

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU



Faculté de Génie Electrique et de l'Informatique
Département d'Electrotechnique

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES
En vue de l'obtention du Diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Option : MACHINES ELECTRIQUES

Thème

Etude du comportement électrique
d'un isolateur plat en verre pollué et
soumis à une
tension alternative

Proposé et dirigé par :

Mr: SAHLI Zahir (U.M.M.T.O)
Mr: BOUDISSA Rabah (U.A.M. Bejaia)

Réalisé par :

Mr: CHABANE Dahmane
Mr: BENT CHAKAL Hakim

Promotion : 2007/2008

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : ISOLANTS ET ISOLATEURS	
I.1 Introduction	3
I.2 Isolants.....	3
I.2.1 Définitions.....	3
I.2.1.1 Isolant	3
I.2.1.2 Isolation	3
I.2.1.3 Diélectrique	3
I.2.2 Différents types d'isolants	4
I.2.2.1 Isolant gazeux.....	4
I.2.2.2 Isolants liquides	4
I.2.2.3 Isolants solides	4
I.2.3 Nature de l'isolation.....	5
I.2.3.1 Porcelaine.....	5
I.2.3.1.1 Représentation	5
I.2.3.1.2 Composition de la porcelaine	6
I.2.3.1.2.1 La porcelaine dure	6
I.2.3.1.2.2 La porcelaine tendre artificiel (ou la porcelaine à ferrite).....	6
I.2.3.1.2.3 La porcelaine tendre naturelle (bonne china).....	6
I.2.3.1.3 Préparation de la porcelaine.....	6
I.2.3.1.3.1 La pâte	6
I.2.3.1.4 Utilisation de la porcelaine	7
I.2.3.2 Verre	8
I.2.3.2.1 Verres trempés.....	9
I.2.3.2.2 Verres recuits.....	9
I.2.3.3 Silicone	9
I.2.4 Propriétés diélectriques des isolants.....	10

I.2.4.1 Rigidité diélectrique.....	10
I.2.4.2 Permittivité.....	11
I.2.4.3 Angle de pertes et facteur de dissipation.....	12
I.2.4.4 Résistivité et résistance d'isolement.....	12
I.2.4.4.1 Définition et signification.....	12
I.2.4.4.2 Résistance et résistivité superficielle.....	13
I.2.5 Application des isolants dans l'industrie électrique.....	13
I.3 Isolateurs.....	14
I.3.1 Définitions.....	14
I.3.1.1 Isolateur.....	14
I.3.1.2 Ligne de fuite.....	14
I.3.1.3 Ligne de contournement.....	14
I.3.1.4 Facteur de forme.....	14
I.3.2 Fonctionnement et constitution d'un isolateur.....	15
I.3.3 Différents types d'isolateurs.....	15
I.3.3.1 Isolateurs supports.....	15
I.3.3.2 Isolateurs de traversées.....	16
I.3.3.3 Isolateurs de lignes aériennes.....	16
I.3.3.3.1 Isolateurs rigides.....	16
I.3.3.3.2 Élément de chaîne des isolateurs suspendus.....	17
I.3.3.3.2.1 Isolateurs capot et tige.....	18
I.3.3.3.2.2 Isolateurs longs fûts.....	19
I.3.4 Contraintes subites par l'isolateur.....	21
I.3.4.1 Contraintes mécaniques.....	21
I.3.4.2 Contraintes climatiques et d'environnement.....	21
I.3.5 Choix des isolateurs.....	22
I.4 Conclusion.....	23

CHAPITRE II : CARACTERISATION DE LA POLLUTION

II.1 Introduction.....	24
II.2 Définitions.....	24

II.2.1 Pollution.....	24
II.2.2 Salinité (Sa).....	24
II.2.3 Couche de pollution.....	25
II.2.4 Degré de pollution.....	25
II.3 Différents types de polluants.....	25
II.3.1 Polluants naturels.....	25
II.3.2 Polluants dûs aux activités humaines.....	25
II.4 Différentes sources de pollution.....	26
II.4.1 Pollution naturelle.....	26
II.4.1.1 Pollution marine.....	26
II.4.1.2 Pollution désertique.....	26
II.4.2 Pollution industrielle.....	27
II.4.3 Pollution mixte.....	27
II.5 Facteurs climatiques d'influence de la pollution.....	27
II.5.1 Vent.....	28
II.5.2 Pluie.....	28
II.5.3 Humidité.....	28
II.5.4 Température.....	28
II.6 Répartition de la pollution sur la surface des isolateurs.....	28
II.6.1 Non uniformité longitudinale non périodique.....	29
II.6.2 Non uniformité par secteurs.....	29
II.6.3 Non uniformité longitudinale périodique.....	29
II.7 Conséquences de la pollution.....	29
II.7.1 Arc non localisé.....	30
II.7.2 Arc fixe.....	30
II.8 Effets de la pollution sur la santé humaine et les équipements électriques.....	30
II.8.1 Effet de la pollution sur la santé humaine.....	30
II.8.2 Effet de la pollution sur les équipements électriques.....	31
II.8.2.1 Corrosion des isolateurs.....	31
II.8.2.1.1 Mécanisme de la corrosion des ferrures des isolateurs.....	31
II.8.2.1.2 Phénomènes liés à la corrosion des pièces métalliques.....	32

II.8.2.2 Altération de la surface des isolateurs.....	32
II.9 Sévérité de pollution d'un site	33
II.9.1 Méthodes de mesure des caractéristiques électriques de pollution.....	34
II.9.1.1 Conductivité électrique de la pollution	34
II.9.1.1.1 Dispositif et procédé de mesure.....	34
II.9.1.2 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE).....	38
II.9.1.3 Conductance superficielle.....	40
II.9.1.4 Comptage des impulsions de courant de fuite	41
II.9.1.5 Courant de fuite le plus élevé (I_h).....	43
II.9.1.6 Contrainte de contournement.....	44
II.9.1.7 Mesure optique	45
II.9.1.8 Densité de dépôt non soluble (DDNS).....	45
II.9.2 Choix d'une méthode de mesure de sévérité de pollution d'un site	46
II.10 Conclusion	46

CHAPITRE III : SIMULATION ET LUTTE CONTRE LA POLLUTION

III.1 Introduction.....	48
III.2 Simulation de la pollution au laboratoire.....	48
III.2.1 Méthodes de simulation.....	48
III.2.1.1 Brouillard salin.....	48
III.2.1.2 Brouillard équivalent	49
III.2.1.3 Brouillard vapeur	49
III.2.1.4 Brouillard tenu.....	50
III.2.1.5 Methycellulose ou méthode de pollution liquide.....	50
III.2.1.6 Kieselguhr.....	51
III.2.1.7 Contaminant humide.....	51
III.2.2 Corrélation entre les méthodes de pollution naturelle et artificielle.....	51
III.3 Lutte contre la pollution.....	53
III.3.1 Techniques de lutte contre la pollution	53
III.3.1.1 Allongement de la ligne de fuite	53
III.3.1.2 Changement de forme des isolateurs (isolateurs plats).....	53

III.3.1.3 Graissage périodique des isolateurs	53
III.3.1.4 Revêtements silicones.....	54
III.3.1.5 Isolateurs composites.....	54
III.3.1.6 Nettoyage des isolateurs	55
III.4 Conclusion	55

CHAPITRE IV : LES DECHARGES DANS LES GAZ, SUPERFICIELLE ET SOUS POLLUTION

IV.1 Introduction	56
IV.2 Notions élémentaires sur les décharges dans les gaz.....	56
IV.2.1 Décharge de Townsend.....	57
IV.2.1.1 Processus d'avalanche coefficient de Townsend.....	58
IV.2.1.2 Attachement électronique.....	60
IV.2.2 Théorie du streamer [30].....	61
IV.2.2.1 Influence de la distribution du champ électrique appliqué sur le développement d'un streamer [27,28]	62
IV.2.2.2 Influence du type de tension appliquée	63
IV.2.2.2.1 En tension continue	63
IV.2.2.2.2 En tension alternative (50Hz ou 60Hz).....	63
IV.2.2.3 Influence de la polarité	63
IV.2.2.3.1 En polarité négative.....	63
IV.2.2.3.2 En polarité positive	64
IV.3 décharges superficielles.....	65
IV.3.1 définition	65
IV.3.2 Processus de propagation des décharges glissantes	67
IV.4 Décharge disruptive ou claquage	67
IV.4.1 Décharge intrinsèque.....	67
IV.4.2 Décharge thermique	67
IV.4.3 Décharge partielle.....	68
IV.5 Contournement sous pollution	68
IV.5.1 Modélisation des phénomènes de contournement.....	70

IV.5.1.1 Modèle de base (Modèle d'Obenaus).....	70
IV.1.2 Critère de Dhahbi, Beroual et Krahenbuhl	72
IV.1.3 Modèle de N. Dhahbi et A. Beroual.....	73
IV.6 Conclusion	73

CHAPITRE V : PARTIE EXPERIMENTALE

V.1 Introduction.....	74
V.2 Techniques expérimentales	74
V.2.1 Dispositif expérimental	74
V.2.2 Circuit d'alimentation	76
V.2.3 Circuit de mesure de la tension appliquée	76
V.2.4 Visualisation de l'arc.....	76
V.2.5 Mode opératoire.....	76
V.2.6 Préparation de la solution polluante	76
V.2.7 procédés d'application de la pollution	77
V.2.8 Procédé d'essai	78
V.2.9 Mesure des conductivités volumiques et superficielles	78
V. 2.10 Correction des résultats en fonction des conditions atmosphériques.....	79
V.2.11 Reproductibilité des résultats.....	81
V.2.11 Correction des résultats en fonction des conditions atmosphériques.....	81
V.3 Résultats d'essais et interprétations.....	81
1 ^{er} cas : Contournement des surfaces parallèles différemment polluées	81
a. Visualisation et observation de la forme de l'arc	84
a.1 Forme de l'arc à l'état propre et sec ($l_1=16\text{cm}$ et $l_2=0\text{cm}$).....	84
a.2 : Forme de l'arc en fonction des conductivités superficielles ($l_1=12\text{cm}$ et $l_2=4\text{cm}$).....	85
a.3 : Forme de l'arc en fonction des conductivités superficielles ($l_1=8\text{cm}$ et $l_2=8\text{cm}$).....	85
a.4 : Forme de l'arc en fonction des conductivités superficielles ($l_1=8\text{cm}$ et $l_2=8\text{cm}$).....	86

b	Interprétation des résultats	86
C	: Probabilité de contournement des surfaces parallèles différemment polluées.....	87
2 ^{em} cas	: Contournement des surfaces parallèles différemment polluées séparées par une zone sèche	90
A:	on a fixé la largeur de la bande de pollution à 20cm, on a pris $l_1=l_2=8\text{cm}$ séparées par une surface sèche de 4cm.....	90
B:	on a fixé la largeur de la bande de pollution à 20cm, on a pris $l_1=l_2=4\text{cm}$ séparées par une surface sèche de 4cm	91
a	: Visualisation et observation de la forme de l'arc	92
a.1	: Forme de l'arc en fonction des largeurs ($l_1=4\text{cm}$, $\sigma_1=0.02\mu\text{S}$ et $l_2=4\text{cm}$, $\sigma_2=5.2\mu\text{S}$).....	92
a.2	: Forme de l'arc en fonction des largeurs ($l_1=4\text{cm}$, $\sigma_1=3.33\mu\text{S}$ et $l_2=4\text{cm}$, $\sigma_2=5.2\mu\text{S}$).....	93
a.3	: Forme de l'arc en fonction des largeurs ($l_1=4\text{cm}$, $\sigma_1=0.02\mu\text{S}$ et $l_2=4\text{cm}$, $\sigma_2=5.2\mu\text{S}$).....	93
a.4	: Forme de l'arc en fonction des largeurs ($l_1=4\text{cm}$, $\sigma_1=3.33\mu\text{S}$ et $l_2=4\text{cm}$, $\sigma_2=5.2\mu\text{S}$).....	93
b	: Interprétation.....	94
c	: Probabilité de contournement des surfaces parallèles différemment polluées séparées par une zone sèche	95
V.4	Conclusion.....	96
	CONCLUSION GENERALE.....	97
	RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS	98

INTRODUCTION GENERALE

Grâce aux progrès techniques qui aident à endurer les climats sévères, l'homme peut maintenant pénétrer dans ces régions pour exploiter les nouvelles sources d'énergie (hydroélectriques, nucléaires, gazeuses) de plus en plus éloignées pour produire de l'énergie électrique, sachant que la consommation de celle-ci augmente sans cesse chaque année.

Dans ces conditions, les lignes aériennes de transport d'énergie électrique doivent parfois traverser des régions montagneuses, des centres urbains et manufacturiers, ou passer proches des lacs ou en bord de mer.

L'un des principaux objectifs dans la conception des équipements des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique consiste à les rendre fiables quel que soient les conditions environnementales. Ces conditions peuvent être liées à divers facteurs telles que l'humidité, la pression atmosphérique, la température, etc. De plus, s'ajoute le problème de la pollution atmosphérique. Les dépôts de pollution qui peuvent s'accumuler sur les équipements électriques entraînent, en présence d'humidité en particulier, la diminution de la rigidité diélectrique de ces derniers et réduisent ainsi la fiabilité des réseaux électriques.

En plus de la pollution atmosphérique, la rigidité diélectrique de ces équipements est souvent menacée par la présence innée de surtensions transitoires sur les réseaux électriques.

Ces derniers correspondent principalement aux enclenchements ou à l'ouverture des réseaux électriques (surtensions de manoeuvre) et surtensions atmosphériques (foudre) qui peuvent détruire les équipements d'isolations des réseaux électriques.

Parmi les équipements électriques constituant les réseaux aériens, un intérêt particulier doit être porté aux isolateurs qui constituent un élément essentiel pour le bon fonctionnement de ces derniers et cela, malgré le fait qu'ils représentent un faible pourcentage dans le coût total de conception. En effet, leur défaillance peut avoir une grande influence sur les coûts d'exploitations des réseaux électriques, puisque leur rôle est d'assurer l'isolement électrique des phases sous tension entre elles, et de ces dernières par rapport à la terre.

Des particules en suspension dans l'air provenant de sel de mer, de pollution industrielle ou de pollution naturelle se déposent sur la surface des isolateurs. En présence d'humidité (brouillard, rosée, pluie, neige fondante, givre et verglas), les couches déposées deviennent plus ou moins conductrices.

Dans le cas des isolateurs humides et contaminés, à cause de la non uniformité de la distribution du courant de fuite sur la surface des isolateurs, des zones sèches se forment et, dues à leur grande résistivité, elles supportent une partie importante de la tension appliquée.

Lorsque le gradient de la tension est trop élevé, une décharge partielle se produit dans l'air, dépendant du degré de contamination et d'autres facteurs (niveau de tension, taux de pollution), un contournement peut se produire.

Le présent travail porte sur l'étude du comportement d'un isolateur plat en verre pollué et soumis à une tension alternative il comporte cinq chapitres:

Le premier chapitre sera consacré à des rappels concernant les isolateurs et leur 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 la lutte contre la pollution.

Le quatrième chapitre sera consacré sur les phénomènes de décharge dans les gaz et sous pollution.

Dans le cinquième chapitre nous présentons les résultats expérimentaux que nous avons obtenus et leurs interprétations. Nous étudierons également l'effet des différentes dispositions des couches de pollution, sur le contournement de l'isolateur. Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

I Isolants et isolateurs**I.1 Introduction**

Les matériels, destinés à supporter des organes sous tension dans l'air et les isoler entre eux ou par rapport à la terre, ont un comportement particulier en ce sens que la défaillance de l'isolation peut se manifester soit par un arc de contournement dans l'air à la surface de l'isolateur, soit par une perforation du matériau solide constituant l'isolateur et provoquant sa destruction. La distance d'amorçage dans l'air le long de l'isolateur doit être suffisante pour assurer l'isolation souhaitée, compte tenu de l'environnement (pluie, brouillard salin, pollutions diverses) qui peut réduire notablement la tension d'amorçage. A cet effet, les isolateurs sont munis de jupes destinées à allonger la ligne de fuite dans l'air.

En outre, ils sont conçus pour que la 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.2 Isolants**I.2.1 Définitions [1]****I.2.1.1 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.2.1.2 Isolation

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

I.2.1.3 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.2.2 Différents types d'isolants**I.2.2.1 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-générateurs;
- 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.2.2.2 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.2.2.3 Isolants solides [2]

Les isolants solides sont d'origines minérales, organiques et résineuses (**Tab.I.1**):

- 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 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,...).

Isolants minéraux	Isolants organiques				
Verre	Naturels	Synthétiques			
Quartz					
Céramiques	Cellulose	Polymères	Polymères	Composites et divers	Elastomères et caoutchoucs synthétiques
{ Mica et dérivés	{ Asphaltes et Bitumes	Thermoplastiques	Thermos-durcissables		
{ Amiante et dérivés	{ Cires et paraffines	Polyéthylène	Phénoplastes Aminoplastes Epoxydes Polyesters Silicones	Emaux et vernis Stratifiés divers Compound et adhésifs	Isobutylène
	Caoutchoucs	Polystyrène			Chloroprènes
	Naturels	Polyvinyles			Polysulfides
		Polyamides			Elastomères fluorés
		Polycarbonates			Elastomères de Silicones
		Polymères Fluorés			
		Dérivés de la Cellulose			

Tab. I.1: Principaux isolants solides utilisés dans l'industrie électrique

I.2.3 Nature de l'isolation

I.2.3.1 Porcelaine [2, 3, 4]

I.2.3.1.1 Représentation [4]

Porcelaine (céramique), produit céramique obtenue à partir d'un mélange de minéraux qui, après cuisson, se vitrifie pour former une pâte blanche, translucide et sonore. La porcelaine est plus dense et plus dure que la poterie (terre cuite ou grès)

I.2.3.1.2 Composition de la porcelaine [4]

On distingue généralement deux types de porcelaine : La porcelaine dure et la porcelaine tendre.

I.2.3.1.2.1 La porcelaine dure

Fabriquée en Chine dès le III^e siècle après. J.-C., elle est composée d'un mélange d'argile blanche ou kaolin, de feldspath ou de pétunsé (silicate d'alumine et de potasse) et de quartz. Après préparation, la pâte commence à cuire à basse température (de 800 à 1 050 °C) — cette opération est appelée le dégourdissage. La pâte est ensuite revêtue d'une couche de feldspath, et la cuisson reprend à haute température (de 1 250 à 1 450 °C). La pâte se vitrifie alors, et devient blanche, translucide et sonore.

I.2.3.1.2.2 La porcelaine tendre artificiel (ou la porcelaine à ferrite)

Créée en Europe à partir du XVI^e siècle, dans le dessein d'imiter la porcelaine de Chine, elle est composée de kaolin et de fritte. Après mélange, la pâte est cuite à une température.....

I.2.3.1.2.3 La porcelaine tendre naturelle (bone china)

Mise au point à la fin du XVIII^e siècle en Angleterre, elle est devenue la porcelaine anglaise typique. Elle est composée d'une pâte à base d'argile et de cendre d'os, moins fragile que celle destinée à la porcelaine tendre, mais plus dense que celle de la porcelaine dure.

I.2.3.1.3 Préparation de la porcelaine [4]**I.2.3.1.3.1 La pâte**

Elle peut être façonnée par pressage de l'argile plastique dans un moule ; le façonnage est alors le plus souvent réalisé par bandes d'argile desséchée, liées à l'aide d'un mélange d'argile liquide appelé barbotine (façonnage par pressage). On peut également verser la barbotine dans un moule poreux qui, après absorption de l'eau par capillarité, libère une céramique légèrement plus petite que le moule (façonnage par moulage). La dernière technique consiste à travailler l'argile sur un tour de potier (façonnage par tournage).

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

Les propriétés électriques, mécaniques et thermiques sont les suivantes:

- Rigidité diélectrique élevée, 25 à 35 kV/mm;
- Permittivité relative $\epsilon_r = 6$ à 7;
- Grande résistivité, environ $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ à 20 °C;
- Faibles pertes électriques en basse fréquence et en haute tension;
- Résistance mécanique 2500 à 400 N/mm².

En plus de ces bonnes caractéristiques, elle est d'une grande résistance aux agents atmosphériques et chimiques, elle n'absorbe pas l'humidité. Elle présente aussi une grande résistance aux températures élevées sauf qu'au-delà de 300°C; ces propriétés diélectriques diminuent rapidement [2, 3].

I.2.3.1.4 Utilisation de la porcelaine [5]

Elles sont actuellement utilisées pour les isolateurs haute tension et correspondent à des formules voisines, soit de AL_2O_3, SiO_2 (porcelaine traditionnelle), soit de $AL_2O_3, 5SiO_2$ (stéa-tite).

L'isolateur, après usinage de son ébauche cylindrique humide (type à capot et tige) ou sèche (type à long fut), est cuit dans un four à une température et pendant une durée convenables certaines céramiques à grains très fins sont recommandées pour des isolateurs devant supporter des efforts mécaniques élevés.

Caractéristique	Céramiques			Verres		
	Porcelaine Electrotechnique traditionnelle	Porcelaine Electrotechnique alumineuse	Stéatite	Sodocalcique recuit	Sodocalcique trempé	Brosolicaté
Permittivité relative (20° C et 50Hz).....	6	7.5	6.1	7.5	7.5	5.3
Rigidité diélectrique (20° C et 50hz) (kV.m ⁻¹)	170	160	180	230	230	2.90
Masse volumique (kg.m ⁻³)	2.4	2.8	2.5	2.5	2.5	2.2
Contrainte à la rupture en traction (MPa)	30	60	45	20	150	100
Module d'élasticité (MPa)	77000	107000	100000	74000	72000	67000
Coefficient de dilatation linéique (en 10 ⁻⁶ K ⁻¹)	5.5	6.5	7.5	9	9.1	3.2

Tab.I.2 : Caractéristiques diélectriques et mécanique de la porcelaine et des verres

I.2.3.2 Verre [2]

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

Les isolateurs en verre, un peu moins chers, mais plus fragiles que ceux en porcelaine.

- Sa rigidité est excellente à froid, de l'ordre de 50 à 100 kV/mm, tandis qu'elle se trouve divisée par 100 à 400°C.
- Sa permittivité relative environ 5 à 8.
- Sa résistivité à 20°C: 10¹⁰ ... 10¹⁶ Ω.cm.

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

I.2.3.2.1 Verres trempés [3]

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

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

I.2.3.2.2 Verres recuits [3]

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

I.2.3.3 Silicone [6]

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

- rigidité diélectrique 15 kV/mm;
- permittivité relative à 25 °C et 1 KV est de 5,4;
- facteur de dissipation diélectrique à 25 °C et 10 kHz ; $\text{tg}\delta = 4 \text{ à } 5 \cdot 10^{-3}$;
- conductivité thermique : 0,41 à 0, 62.....W/m.K;
- température d'auto-inflammation est supérieure à 300°C;
- masse volumique de 2300 à 2800 kg/m³.

I.2.4 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.2.4.1 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 laquelle 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 laquelle 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.2.4.2 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 .

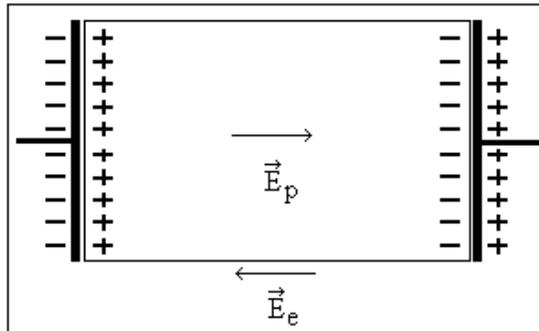


Fig. I.1: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

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

$$\epsilon_r = C_x / C_0 \tag{I.1}$$

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

$$\epsilon_a = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \tag{I.2}$$

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

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

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \tag{I.3}$$

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

$$\epsilon_a^* = \epsilon_r^* \cdot \epsilon_0 \tag{I.4}$$

I.2.4.3 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 (**Fig.2, 3**).

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:

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

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

$$\text{tg } \delta = \varepsilon_r'' / \varepsilon_r' \tag{I.6}$$

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

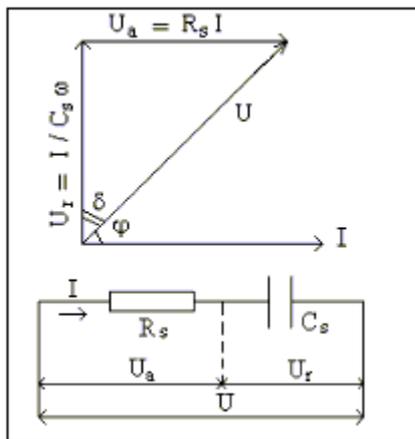


Fig. I.2: Circuit électrique équivalent série

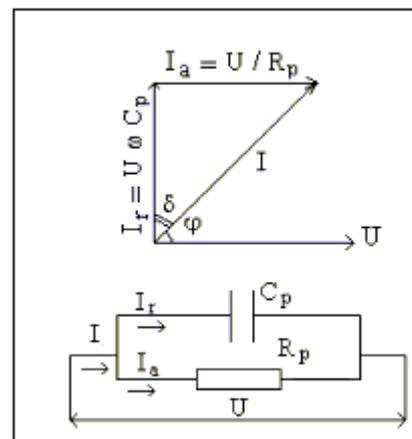


Fig. I. 3: Circuit électrique équivalent parallèle

I.2.4.4 Résistivité et résistance d'isolement

I.2.4.4.1 Définition et signification

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

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

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

I.2.4.4.2 Résistance et résistivité superficielle

Dans les matériels électroniques (cartes imprimées) l'isolement principal entre deux conducteurs est assuré par la surface de l'isolant, d'où l'importance pratique de la détermination de la résistance longitudinale. Cette résistance comporte d'une part la résistance purement superficielle, mais aussi une certaine fraction de la résistance interne du matériau. Les valeurs relatives de ces deux composantes de la résistance sont fonction de divers paramètres et notamment de la largeur et de l'écartement entre conducteurs ainsi que de l'état d'humidification respectif des couches superficielles et internes du matériau. Par définition, la résistance superficielle est le quotient de la tension continue appliquée entre les deux électrodes disposées à la surface de l'isolant par le courant qui en résulte. La résistivité superficielle est le quotient du gradient de potentiel en surface par le courant par unité de largeur.

I.2.5 Application des isolants dans l'industrie électrique

L'adoption définitive d'un isolant par un constructeur repose sur la prise en considération de la nature multidisciplinaire des études et essais sur celui-ci. Leur réalisation nécessite des connaissances en électricité, en mécanique, en chimie et statistiques. De nombreuses expérimentations sont également nécessaires afin d'évaluer la durée de vie d'un nouveau matériau. On estime que les progrès récents dans la mise en œuvre des isolants sont dus essentiellement à trois raisons:

- Dimensionner au mieux l'isolation des matériaux électriques;
- Maintenir le taux de défaillance des isolations au dessous de leurs valeurs acceptables pour les utilisateurs;
- Développer les isolants permettant la construction de matériels de tensions de plus en plus élevée ou fonctionnant dans des conditions particulières.
- Mais diverses contraintes, liées essentiellement à l'industrialisation provoquent des changements importants. Dès à présent les producteurs et les utilisateurs d'isolants doivent:
- Tenir compte d'exigences très diverses selon les sites sur lesquels sont installés les matériels (réseaux, bâtiments, bord de mer, centrales nucléaires etc...);

- Réduire ou supprimer les pollutions résultant de la dispersion d'isolants liquides, d'additifs, dans la nature ou d'incendies entraînant la production de composés toxiques ou corrosifs;
- Mettre au point des procédés de fabrication et de mise en œuvre des isolants nécessitant une moindre consommation d'énergie.

I.3 Isolateurs

I.3.1 Définitions [8]

I.3.1.1 Isolateur

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.3.1.2 Ligne de fuite

La ligne de fuite (L_f) est la distance la plus courte le long de la surface d'un isolateur entre deux parties conductrices.

I.3.1.3 Ligne de contournement

La ligne de contournement (L) est la distance la plus courte dans un gaz entre deux parties conductrices.

I.3.1.4 Facteur de forme

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 (L/P) en fonction de la longueur de la ligne de fuite partielle L calculés depuis une extrémité de l'isolateur jusqu'au point considéré. Le facteur de forme est donné par l'aire sous la courbe et calculé suivant la formule:

$$F = \oint_L \frac{dL}{p(L)} \quad (\text{I.7})$$

I.3.2 Fonctionnement et constitution d'un isolateur

Les isolateurs sont des éléments indispensables au transport et à la distribution d'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents. Accrochés aux pylônes des lignes aériennes, ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateur d'alignement et d'ancrage), assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF₆) et l'isolation externe (traversées de transformateurs, extrémités de câbles) et constituent également l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres). Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes introduites par l'environnement.

I.3.3 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.3.3.1 Isolateurs supports [9]

On appelle isolateurs supports, des pièces isolantes destinées à supporter, en isolant des éléments conducteurs des traversés (**fig.I.4**). Ils sont utilisés par exemple comme supports de jeux de barres dans les postes de transformation.



Fig. I.4: Photo isolateur support

I.3.3.2 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.

I.3.3.3 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.3.3.3.1 Isolateurs rigides [10]

Les isolateurs rigides sont utilisés pour l'isolement des lignes aériennes HT (inférieur à 80 kV). Ils permettent d'obtenir une liaison rigide entre les supports et les câbles, ils sont constitués par plusieurs éléments scellés l'un sur l'autre (**fig.I.5**). Ils sont reliés aux supports par une ferrure fixe, ces isolateurs sont soumis à des efforts de flexion et de compression, lorsqu'ils sont placés en position verticale, ils peuvent être dans certains cas en position horizontale. Le conducteur est fixé directement à l'isolateur à l'aide d'un fil d'attache, il existe également des isolateurs à socle constitués d'un ou plusieurs pièces en céramique ou en matériaux synthétiques, assemblés de façon permanente sur un socle métallique [13].

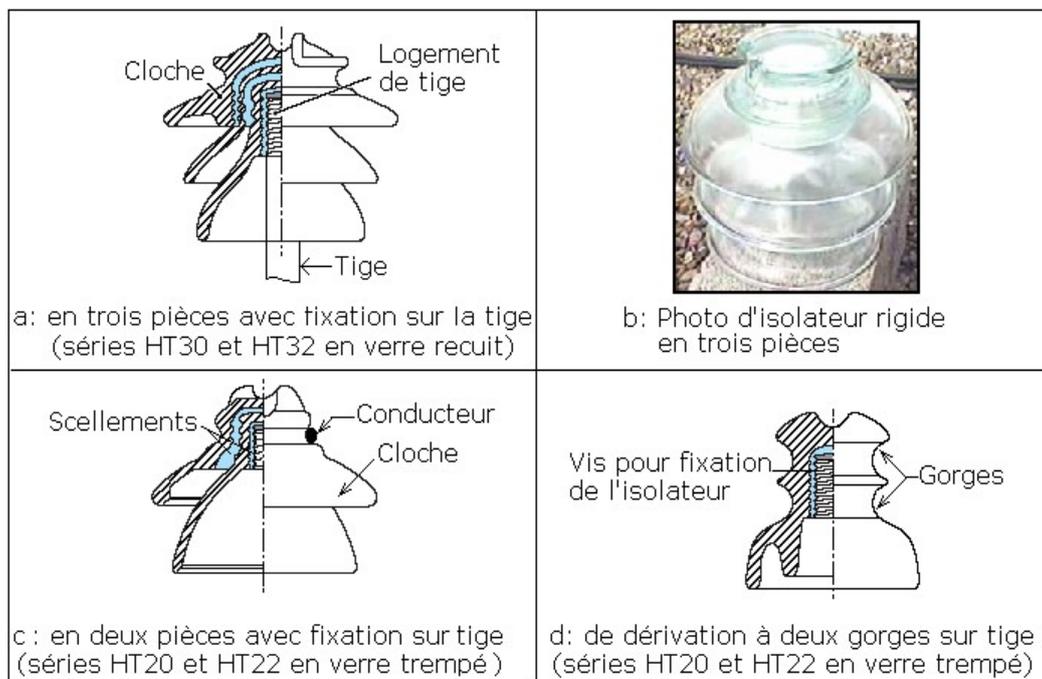


Fig. I.5: Isolateurs rigides en verre

I.3.3.2 Elément de chaîne des isolateurs suspendus [3]

Il est relié à d'autres éléments, à la pince de suspension du conducteur ou au support de façon flexible, par un assemblage à rotule et logement de rotule ou à chape et tenon (**Fig. I.6**). Dans le cas des isolateurs à capot et tige, chaque élément est constitué d'un capot, d'une partie isolante en forme de jupe et d'une tige. L'isolateur à long fût est constitué d'un bâton cylindrique en céramique, muni d'ailettes, à chaque extrémité duquel est fixée une pièce métallique de liaison. Un ensemble de plusieurs éléments de chaîne forme une chaîne d'isolateurs. Les chaînes verticales ou obliques suspendent les conducteurs aux pylônes d'alignement ; on les appelle chaînes de suspension ou chaînes d'alignement. Une chaîne de suspension peut être simple, double, en A ou en V. Les chaînes horizontales relient les conducteurs aux pylônes d'ancrage; on les appelle chaînes d'ancrage. Une chaîne d'ancrage peut être simple ou double.

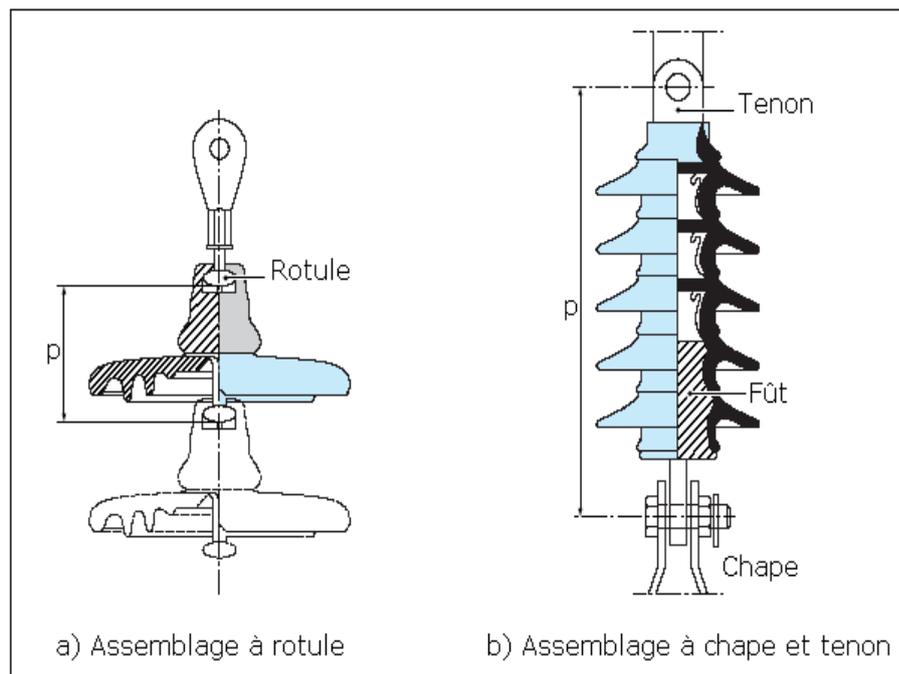


Fig. I.6: Assemblage des éléments de la chaîne d'isolateurs

I.3.3.2.1 Isolateurs capot et tige [10]

Les isolateurs des lignes aériennes HT et THT sont de types capot et tige. La liaison entre deux éléments successifs est réalisée par des systèmes métalliques soit à rotule et logement de rotules, soit à chape et tenon (**Fig.I.6**). Chaque élément est constitué de deux parties, la tête et l'assiette (**Fig.I.7a**):

- La tête: elle est attachée avec du ciment qui sert à assurer l'isolation entre le capot et la tige, pour résister aux différents efforts et particulièrement à ceux dus à la traction et au poids des conducteurs.
- L'assiette: assure l'isolation externe en forme de jupe et d'une tige, la condensation de l'eau ou de brouillard, ainsi la diminution des courants de fuite superficiels est assurée par la forme sinueuse de l'assiette (**Fig.I.7b**).

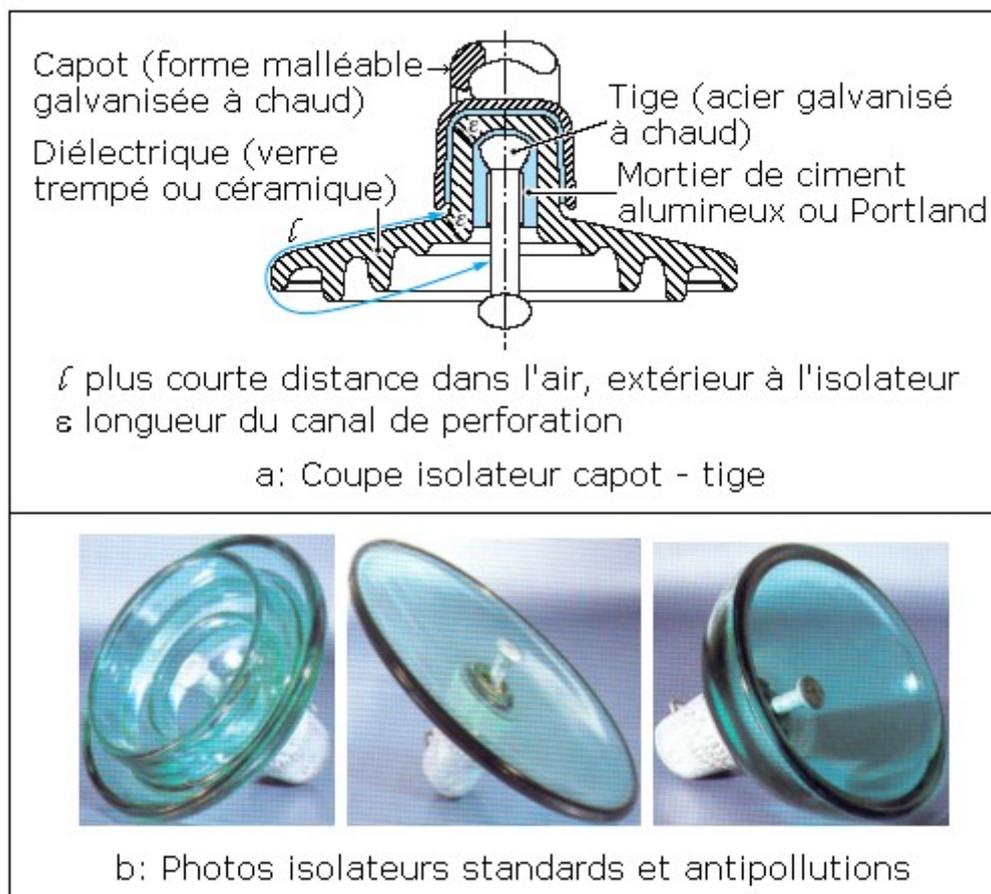


Fig. I.7: Isolateur capot et tige

I.3.3.2.2 Isolateurs longs fûts [11,3]

a. En céramique

Ces types d'isolateurs sont formés d'un bâton cylindrique en céramique, menu d'ailettes et à chaque extrémité du quel est fixée une pièce métallique de liaison. Ils sont utilisés pour les lignes haute tension (**fig.I.8**). Leur avantage est d'être plus léger que les isolateurs à capot et tige avec un inconvénient de fragilité aux chocs mécaniques.

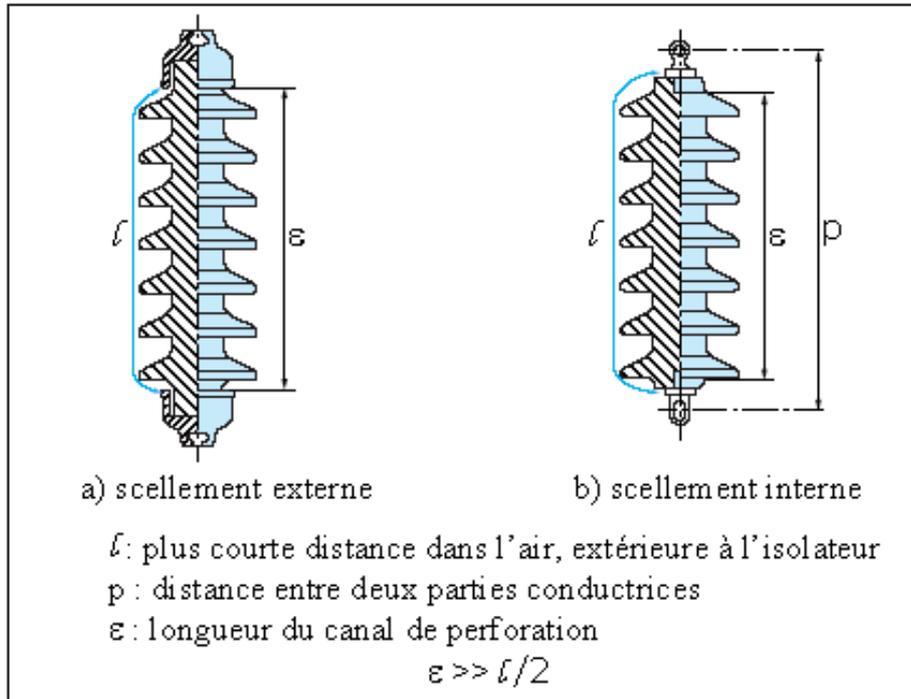


Fig. I.8: Isolateur long fût

b. En matériaux synthétiques

L'intérêt principal de tels isolateurs est leur meilleure tenue à la pollution, leur faible encombrement, leur résistance au vandalisme et leur légèreté, en particulier lorsqu'on les compare aux chaînes d'isolateurs pour les lignes de tension électrique élevée. De par leur constitution, ces isolateurs sont appelés isolateurs composites. Ils sont constitués de trois parties ayant des rôles différents (fig.I.9):

- Un noyau en fibre de verre, imprégnées de résine, capable d'assurer l'isolement et de supporter les efforts mécaniques générés par les conducteurs.
- Un revêtement en élastomère en EPDM (Éthylène, Propylène, Diène, Monomère), vulcanisés à chaud qui donne le profil et la ligne de fuite tout en protégeant le noyau contre toute attaque des agents extérieurs en assurant l'étanchéité au raccordement avec les pièces métalliques d'extrémités. Son profil à ailettes alternées permet d'accroître la tenue sous pollution;
- Des pièces métalliques, en fonte malléable ou acier forgé galvanisés à chaud, nécessaires au montage de l'isolateur et à la transmission des efforts mécaniques.

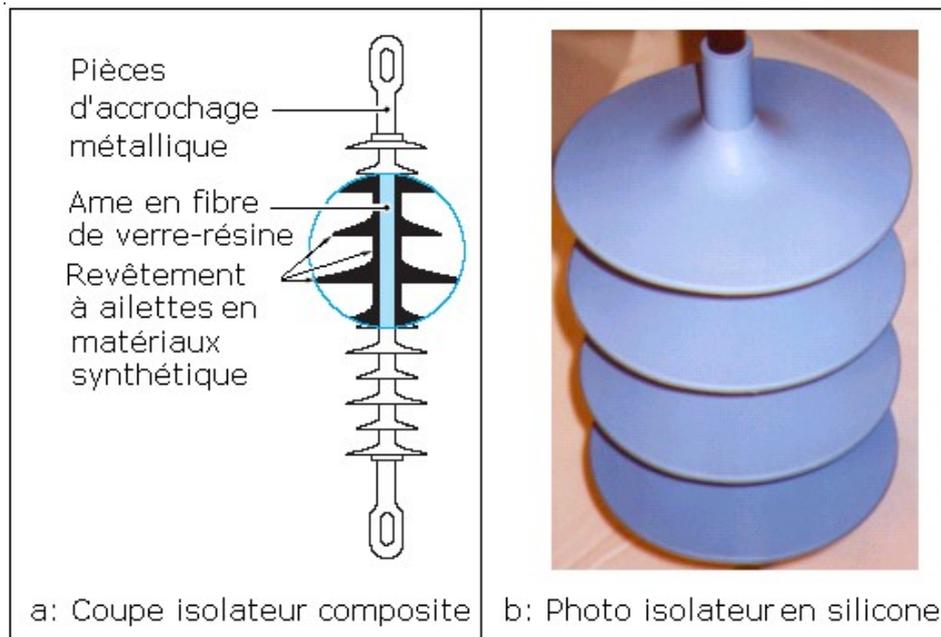


Fig. I.9: Isolateur composite

I.3.4 Contraintes subites par l'isolateur

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

I.3.4.1 Contraintes mécaniques [10]

Du fait de leur conception, les chaînes 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 chaîne (poids des conducteurs, des accessoires);
- Surcharge exceptionnelle dû 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.3.4.2 Contraintes climatiques et d'environnement [10]

Les isolateurs sont spécialement influés par la contamination de l'environnement, dans les ouvrages (lignes et postes) installés au bordure de mer, les embruns portés par les vents déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel, qui à plus ou moins longue échéance, ensuite recouvre toute la surface de l'isolant y compris les parties les mieux protégées. Cette couche de sel humidifiée par les embruns eux-mêmes par un brouillard ou simplement par condensation, devient conductrice. Ce qui donne naissance à un courant de

fuite qui s'établit à travers la couche superficielle, et dans certains condition des arcs peuvent se développer et provoquer le contournement total de l'isolateur.

Le choix et le dimensionnement demeurent très importants, pour cela le tableau I.2 donne les caractéristiques géométriques principales des isolateurs à assemblage à rotule et logement de rotule.

Désignation CEI	Charge de rupture (kN)	Norme d'assemblage (CEI120) (1)	Diamètre de la partie isolante (mm)	Pas nominal P (mm)	Ligne de fuite L _f (mm)
U 40	40	11	175	100 ou 110	185
U 70	70	16	255	127 ou 146	280
U 100	100	16	255 288	127 146	318 440 (2)
U160	160	20	280 320	146 170	370 540 (2)
U 300	300	24	320	195	480
U 400 (3)	400	28	360 380	206 220	525 550
U 530 (3)	530	32	380 440	240 255	600 640
F4R	40	11	175	120	190
F12R	120	16	255	140	300
F100D	100	16	380	127	365
1508 BF	40	11	175	110	195
F 40- 10	40	11	255	110	320
F70-10	70	16	255	127	320
F9P	100	16	255	146	390
F100P	100	16	280	146	445
F100PF	100	16	330	146	550
F160PF	160	20	330	146	550
F100P	100	16	288	146	445
F160P	160	20	320	170	545
F300P	300	24	380	226	690

Tab. I.2: Caractéristique géométrique principale des isolateurs à assemblage à rotule et logement de route

1. La norme d'assemblage des isolateurs à capot et tige, à assemblage à rotule et logement de rotule, correspond au diamètre de la tige ;
2. Ces isolateurs à ligne de fuite allongée sont utilisés en zones polluées ;
3. Isolateurs utilisés au Japon.

c. Contraintes électriques [12,8]

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

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

I.3.5 Choix des isolateurs [3]

Les isolateurs sont des éléments essentiels pour la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service.

Les isolateurs les mieux adaptés sont ceux qui retiennent le taux de dépôts 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 incidents 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;
- De leur nature (rigide ou suspendue);
- Du prix de revient de la ligne et de son importance;
- Du degré de sévérité de la pollution du site d'utilisation.

I.4 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 et du givre, 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).

II Pollution**II.1 Introduction**

La pollution est introduite par l'homme, directement ou indirectement sous forme de substances ou d'énergie dans l'environnement qui entraîne des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux systèmes écologiques, à porter atteintes aux agréments ou à gêner les autres utilisations légitimes de l'environnement.

Sans oublier que dans le domaine d'électrotechnique la pollution constitue un sérieux problème dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de transport et de l'appareillage haute tension. En effet, les dépôts polluants qui recouvrent les surfaces isolantes peuvent engendrer une diminution considérable de la tension de tenue des isolateurs. Ils peuvent dans les cas les plus critiques, conduire à un contournement total des isolateurs, ce qui constitue la situation la plus grave, car conduisant à la mise hors service de la ligne. La connaissance du degré de pollution est par conséquent une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau de l'isolement des ouvrages installés sur site, en vue de dimensionner convenablement l'isolation.

II.2 Définitions [8]**II.2.1 Pollution**

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme le sous-produit de l'action humaine, au travers d'effets directs ou indirects altérant les modalités de répartition des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources en produits agricoles, en eau, et autres produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il détient, les possibilités récréatives du milieu ou encore en enlaidissant la nature.

II.2.2 Salinité (Sa)

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

II.2.3 Couche de pollution

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

II.2.4 Degré de pollution

Valeur de quantité (salinité, conductivité de la couche, densité du dépôt de sel) qui caractérise la pollution artificielle appliquée sur l'isolateur en essai.

II.3 Différents types de polluants [14]

Les polluants de l'air (ou polluants atmosphériques) peuvent être d'origine naturelle ou provenir des activités humaines (industries, transports). Ils sont présents en quantité extrêmement faible.

II.3.1 Polluants naturels

Les polluants d'origine naturelle sont principalement le dioxyde de soufre (SO₂) et le dioxyde d'azote (NO₂). Ils sont dûs aux éruptions volcaniques, aux décompositions de matières organiques (animaux et végétaux morts) et aux feux de forêts.

Des particules en suspension dans l'air (aérosols) peuvent également provenir des éruptions des volcans ou des déserts et être transportées sur de très grandes distances. C'est par exemple le cas des poussières de sable du désert du Sahara (en Afrique), qui sont transportées par les vents jusqu'en Europe. Ces polluants naturels sont peu dangereux car ils ne restent pas très longtemps dans l'atmosphère.

II.3.2 Polluants dûs aux activités humaines

Les principaux polluants que les hommes rejettent dans l'atmosphère sont:

Le dioxyde de carbone (CO₂), le dioxyde de soufre (SO₂), le dioxyde d'azote (NO₂), l'ozone (O₃) et des particules en suspension. Ces polluants proviennent de la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), des industries (usines métallurgiques et sidérurgiques, incinérateurs de déchets, raffineries de pétrole, etc.) et des transports routiers.

Cette pollution a commencé avec l'ère industrielle, au 19^{ème} siècle, elle est présente surtout en zones urbaines et entraîne de graves problèmes de santé chez les êtres humains, la pollution est plus forte les jours où la température est élevée (forte chaleur) et lorsqu'il n'y a pas de vent.

II.4 Différentes sources de pollution [15]

Les principales sources de pollution pouvant être rencontrées sont la pollution naturelle, la pollution industrielle et la pollution mixte.

II.4.1 Pollution naturelle

Ce type de pollution peut être constitué par:

- La pollution naturelle d'origine marine;
- Les autres pollutions naturelles provenant des dépôts de poussières naturelles, de sable véhiculé par les vents en région désertiques, pluie, ...etc. On distingue:

II.4.1.1 Pollution marine

Dans les ouvrages installés en bordure de mer, les embruns portés par le vent déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel, qui à plus ou moins échéance, recouvre toute la surface des isolateurs, y compris les parties les mieux protégées.

Cette couche de sel humidifiée par les embruns eux même, par un brouillard ou simplement par condensation, devient conductrice. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance dans certaines conditions, et se développent jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur.

II.4.1.2 Pollution désertique

En régions désertiques, les fréquentes tempêtes de sable déposent progressivement sur les isolateurs une couche de pollution contenant des sels humidifiés; cette couche devient beaucoup plus conductrice. Un courant de fuite apparaît brusquement accompagné d'arcs partiels, dont la propagation à la surface de l'isolateur peut aussi conduire à un contournement total de l'isolateur.

II.4.2 Pollution industrielle [17, 20, 21, 22, 23, 24, 25]

La pollution industrielle provient des fumées évacuées à proximité des raffineries, des cimenteries, des complexes sidérurgiques, chimiques ou même aux abords des centrales thermiques. Pour les régions exemptes de fumées, cette pollution peut être d'origine domestique (appareils de chauffage, véhicules, automobiles ...).

Les isolateurs se recouvrent de poussières faiblement conductrices, mais très hygroscopiques, car elles ont tendance à absorber l'humidité de l'air.

Dans les conditions de forte humidité (brouillard, pluie, condensation matinale), la dissolution des sels contenus dans cette poussière provoque la formation d'une couche électrolytique. Les gaz présents dans les fumées absorbés par la couche liquide, augmentent encore la conductivité superficielle. Comme dans le cas de la pollution marine, un courant de fuite circule alors dans la couche superficielle et le contournement peut survenir.

II.4.3 Pollution mixte

La pollution mixte résulte de la combinaison d'une ou plusieurs pollutions précitées. C'est la forme de pollution la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques.

Par conséquent, quelle que soit la source de pollution, on observe la formation d'une couche électrolytique due à l'humidification d'un dépôt solide accumulé progressivement à la surface des isolateurs.

La nature et les caractéristiques des agents contaminants sont très variées. Généralement, ils ne provoquent pas à court terme de dégradation de la rigidité diélectrique lorsqu'ils sont secs. Cependant, l'humidification d'un dépôt solide accumulé progressivement à la surface des isolateurs, quelle que soit sa nature, provoque la formation d'une couche électrolytique, caractéristique du phénomène de pollution.

II.5 Facteurs climatiques d'influence de la pollution [16]

Parmi les facteurs météorologiques essentiels d'influence des dépôts polluants et par conséquent de la tenue électrique des isolateurs on distingue:

II.5.1 Vent

Il constitue l'agent qui assure le transport des poussières et des sels marins ainsi que la distribution des dépôts polluants formés sur les surfaces des isolateurs. D'autre part, il peut être considéré comme un agent d'auto nettoyage dans le cas où sa vitesse est grande.

II.5.2 Pluie

Les fines pluies humidifient les surfaces polluées, donc favorisent l'adhérence de pollution, ce qui augmente le risque de contournement. Cependant, les fortes pluies permettent le nettoyage des surfaces polluées et diminuent le risque de contournement.

II.5.3 Humidité

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

II.5.4 Température

Pour les surfaces polluées, les hautes températures ont une influence positive, car elles sèchent les dépôts et augmentent leur résistivité. Cependant, la différence de température entre le jour et la nuit peut provoquer le phénomène de condensation et l'humidification de la couche de pollution.

II.6 Répartition de la pollution sur la surface des isolateurs [8]

La répartition d'une couche de pollution dépend du profil, la hauteur et la disposition (verticale, horizontale, inclinée) des chaînes des isolateurs par rapport au sol et du niveau de la tension qui leur est appliquée.

L'étude de H. Streubel a montré que la non uniformité peut être classé en trois catégories:

- non uniformité longitudinale non périodique;
- non uniformité transversale ou par secteurs;
- non uniformité longitudinale périodique.

II.6.1 Non uniformité longitudinale non périodique

La cause principale de cette géométrie est le lavage sous tension et l'effet du champ électrique. Elle se présente en bandes de pollution de conductivité différente dont la valeur est constante dans chaque bande le long de la ligne de fuite d'un isolateur mais elle peut être variable le long du périmètre de l'isolateur.

II.6.2 Non uniformité par secteurs

L'existence d'une direction privilégiée des vents et des pluies fait que cette répartition soit ainsi, c'est à dire on trouve des secteurs au bande de pollution de différente largeur dont la conductivité superficielle est variable d'un secteur à l'autre le long du périmètre de l'isolateur mais elle reste constante dans le même secteur le long de la ligne de fuite.

II.6.3 Non uniformité longitudinale périodique

Ce type de pollution est peut fréquent. Il est caractérisé par la variation périodique de la conductivité de la couche de pollution le long de la ligne de fuite de l'isolateur et constante le long du périmètre. Ses principales spécifications sont:

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

Ce type de regroupement concerne une accumulation progressive de la pollution et ne peut pas rendre compte des accumulations aléatoires en cas de conditions atmosphériques exceptionnelles, comme il a été indiqué dans la bibliographie, lorsque 'il s'agit de tempête (par exemple sable).

II.7 Conséquences de la pollution

Quelle que soit la nature du dépôt de pollution, accumulé progressivement sur les surfaces des isolateurs, son humidification provoque la formation d'une couche électrolytique, caractéristique du phénomène de pollution selon les contraintes auxquelles l'isolateur est soumis, trois cas possibles peuvent se présenter:

II.7.1 Arc non localisé

On dit qu'un arc est non localisé, lorsque la surface d'un isolateur est amorcée par un arc et qui s'éteint rapidement pour se réamorcer à un autre endroit. Ce phénomène ne cause pas de dommages pour l'installation, malgré l'apparition de courant de fuite à la surface de l'isolateur.

II.7.2 Arc fixe [8]

L'arc se fixe sur la surface de l'isolateur, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en s'y réamorçant au même endroit (courant alternatif). Le courant de fuite au travers de diélectrique et les phénomènes de polarisation alternative des molécules représentent une énergie qui se manifeste sous forme de chaleur dans le diélectrique (pertes diélectriques). Ces pertes varient selon la nature du diélectrique; elles sont proportionnelles à la fréquence et l'importance du champ électrique. Dans le cas d'une basse tension et d'une fréquence industrielle 50 Hz, les pertes diélectriques des matériaux isolants sont très faibles. En revanche en très haute tension et surtout pour des fréquences élevées, ces pertes deviennent importantes en période d'humidification longue et sont la cause d'échauffement excessif, destructeurs de l'isolation.

II.8 Effets de la pollution sur la santé humaine et les équipements électriques**II.8.1 Effet de la pollution sur la santé humaine [17]**

La pollution de l'air provoque principalement des irritations des yeux, des problèmes de vision et des difficultés respiratoires. Cette pollution peut aussi entraîner des douleurs de poitrine et des toux. Les personnes les plus fragiles sont les jeunes enfants, les personnes âgées et les personnes sensibles (fumeurs, asthmatiques, malades du cœur ou du poumon), des risques de cancer sont possibles. En 1952, le célèbre brouillard «smog» a stagné sur Londres durant plusieurs jours, la mortalité a immédiatement été multiplié par trois. A plus long terme, une révision récente des données donne des résultats plus pessimistes en estimant à 12000 le nombre de décès attribués à cet épisode de 1952.

En 1990 certains chercheurs citent le chiffre de 40000 morts par année attribuables à la pollution pour l'Autriche, la France et la Suisse réunie. La moitié serait liée directement à la pollution automobile. En 2002, la pollution a été jugée responsable de 6500 à 9500 décès dûs aux gaz d'échappement, dioxine.

II.8.2 Effet de la pollution sur les équipements électriques [18]

Les irrégularités dans la distribution des dépôts polluants sur la surface des isolateurs conduisent évidemment à une diminution des performances des isolateurs sous pollution. Ce problème a toujours entraîné et engendre encore des défauts d'isolation au niveau de ces réseaux électriques, il en résulte parfois des défaillances des équipements, des installations des consommateurs d'énergie électrique, une diminution de la fiabilité des réseaux électriques ainsi qu'un manque à gagner pour les exploitants de ces structures électriques.

Des statistiques établies par les exploitants de réseaux électrique algérien ont montré qu'environ 60% des incidents électriques enregistrés sur ces structures électriques sont dûs à l'industrialisation de l'Algérie et à l'inexistante d'information à l'échelle national sur le niveau de pollution des différentes régions traversées par le réseau électrique de la Sonelgaz et le manque de moyens de lutte contre la pollution.

II.8.2.1 Corrosion des isolateurs [19]**II.8.2.1.1 Mécanisme de la corrosion des ferrures des isolateurs**

La corrosion des isolateurs ne se produit que si la surface des isolateurs est polluée, et en présence d'humidité. Lorsque la surface des isolateurs est recouverte d'un dépôt conducteur de pollution humide, un courant de fuite prend alors naissance. Son amplitude est fonction du degré de pollution (quantité de sels solubles).

Le passage du courant de fuite sur la surface polluée du diélectrique entre les ferrures crée une corrosion électrolytique de ces pièces métalliques. Les effets du courant de fuite sont d'autant plus nocifs que la fréquence et la durée des périodes humides sont élevées (climat tropical humide) et que la pollution a l'aptitude à être hygroscopique (importance des contaminants inertes qui absorbe ou retiennent l'humidité).

Cette corrosion est plus importante en courant continu qu'en courant alternatif pour un même site, du fait du courant unidirectionnel et des phénomènes électrostatiques qui entraînent la formation de dépôts de pollution plus importants.

Pour les isolateurs aux effets dominants de la corrosion électrolytique, s'ajoutent ceux de la corrosion atmosphérique et ceux dûs à la formation d'agents oxydants (ex O_3 , O) causé par la présence d'arcs près des ferrures. Ces derniers peuvent être initiés et se maintenir pendant les périodes d'humidification et de séchage qui précède et succède aux conditions critiques où l'isolateur est le plus humide. La présence d'accessoires de protection répartiteur de champ

peut être bénéfique pour limiter ces phénomènes pendant les périodes d'humidification et de séchage qui sont un facteur d'accélération de la corrosion des ferrures des isolateurs les plus contraints électriquement.

Ces phénomènes de corrosion se traduisent par:

- une attaque de la galvanisation;
- une attaque de la structure interne de l'acier ou de la fonte avec formation d'un dépôt de rouille conductrice qui peut couler sur le diélectrique.

Les cas de corrosion les plus sévères intéressent surtout les zones tropicales très proches de la mer où la pollution marine et la pollution par poussières (latérites provenant du sol, cendres votantes après brûlage des champs) qui s'accumulent pendant de longues périodes sans pluie, s'ajoutent à la forte humidité ambiante.

II.8.2.1.2 Phénomènes liés à la corrosion des pièces métalliques

La corrosion des ferrures des isolateurs peut avoir pour effets:

- d'affecter 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).
- d'affecter 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.
- d'entraîner la rupture du diélectrique du fait de l'expansion de la tige corrodée. Ce phénomène reste spécifique aux isolateurs capot tige en porcelaine.

II.8.2.2 Altération de la surface des isolateurs

L'observation d'isolateurs en service depuis plusieurs années dans les zones de forte pollution montre en général une altération de surface du diélectrique (partie isolante).

Celle ci est souvent concentrée au voisinage des électrodes que constituent les ferrures de l'isolateur, c'est-à-dire dans les zones où le champ électrique est le plus élevé ou prédominant les zones sèches et les arcs qui y sont associés.

Plusieurs étapes successives peuvent être notées sur des isolants de bonne qualité:

- dépoli de la surface qui devient plus mate;
- traces d'arcs sous forme d'arborescence;
- érosion de la matière isolante sur plusieurs dixièmes de millimètres avec pertes de masses sans réduction notable de la tenue de l'isolateur.

Les matériaux de moindre qualité peuvent être sujets à un cheminement, c'est-à-dire à la formation irréversible d'un chemin conducteur.

La présence d'une activité électrique sur le revêtement des isolateurs composites est un facteur d'augmentation de la dureté de surface et de la rugosité par élimination partielle de la base du revêtement en élastomère chargé.

En conséquence, la formulation du revêtement doit être optimisée, non seulement pour minimiser l'influence du vieillissement UV, mais surtout pour éviter toute dégradation carbonée lors de la fixation des arcs de surface.

Seule une érosion minimale et contrôlée est acceptable pour garantir une tenue à long terme convenable.

Hormis le choix de matériaux fiables et durables, hormis la qualité des interfaces entre tous les matériaux et surtout avec les ferrures d'extrémité, la conception de l'isolateur doit être telle que les contraintes électriques locales soient les plus réduites possibles et en tout cas inférieures au seuil de vieillissement.

II.9 Sévérité de pollution d'un site [8]

Le dimensionnement convenable de l'isolation externe vis à vis de la pollution est subordonné à la détermination du degré de pollution du lieu d'utilisation de cette isolation.

La sévérité de pollution d'un site est généralement caractérisée par l'intensité de précipitation ainsi que par la conductivité des dépôts polluants.

L'évaluation de la sévérité de pollution d'un site, devrait fournir toutes les informations nécessaires sur le comportement diélectrique des isolations, ainsi que sur la fiabilité des lignes et des postes. La surveillance de l'évolution spatio-temporelle de la pollution est indispensable pour la conception et le choix d'une isolation adéquate, et pour prévoir ainsi, des techniques de lutte efficaces aux problèmes de contournement sous pollution. Diverses méthodes ont été conçues pour l'évaluation de la sévérité de pollution d'un site.

II.9.1 Méthodes de mesure des caractéristiques électriques de pollution

II.9.1.1 Conductivité électrique de la pollution [16]

II.9.1.1.1 Dispositif et procédé de mesure

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**).



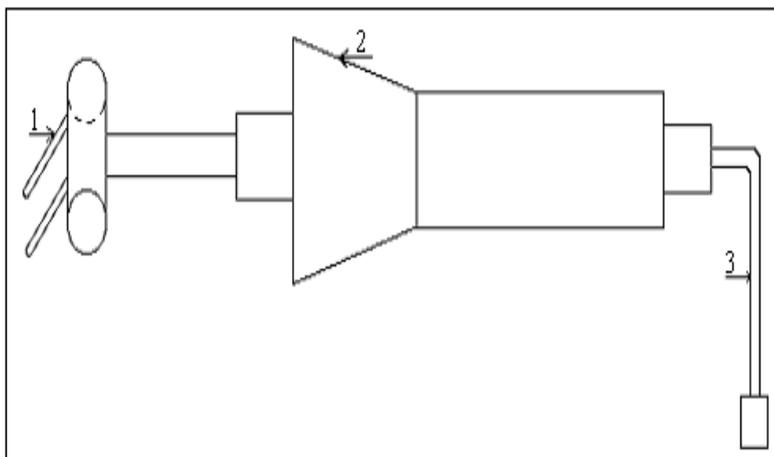
Fig.II.1 : Photo d'un conductimètre à sonde mobile

La sonde est composée essentiellement:

- de la tête qui est constituée de deux électrodes (1);
- du poignet (2);
- du câble de liaison entre la sonde et l'appareil de mesure (3).

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.2a et II.2b.



1 : électrodes linéaires à extrémités arrondies ;

2 : poignée de la sonde ;

3 : câble de liaison avec le conductimètre

Fig.II.2a : Sonde à électrodes linéaires 34

Dans le cas de la sonde à électrodes linéaires (**Fig.II.2a**), 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.II.2b**), avant d'effectuer les mesures sur une surface polluée d'un isolateur, il faut:

1. Fixer une bande sèche absorbante (papier PH), de dimensions (10 mm x 10 mm), sur la tête de la sonde (1);
2. Avant chaque essai la bande absorbante doit être trempée dans de l'eau distillée dont la conductivité volumique doit être inférieure ou égale à $10\mu\text{S}/\text{cm}$. Le nettoyage et l'humidification de la bande absorbante nécessitent une quantité d'un litre d'eau distillée;
3. Après chaque nettoyage la tête de la sonde doit être secouée pour éliminer les gouttelettes d'eau distillée non absorbées par le papier;
4. Vérifier que la conductivité superficielle propre de la bande absorbante σ_p ne dépasse pas $2\mu\text{S}$;
5. 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;
6. 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, résulte des conductivités de la pollution humidifiée et de la bande polluée.

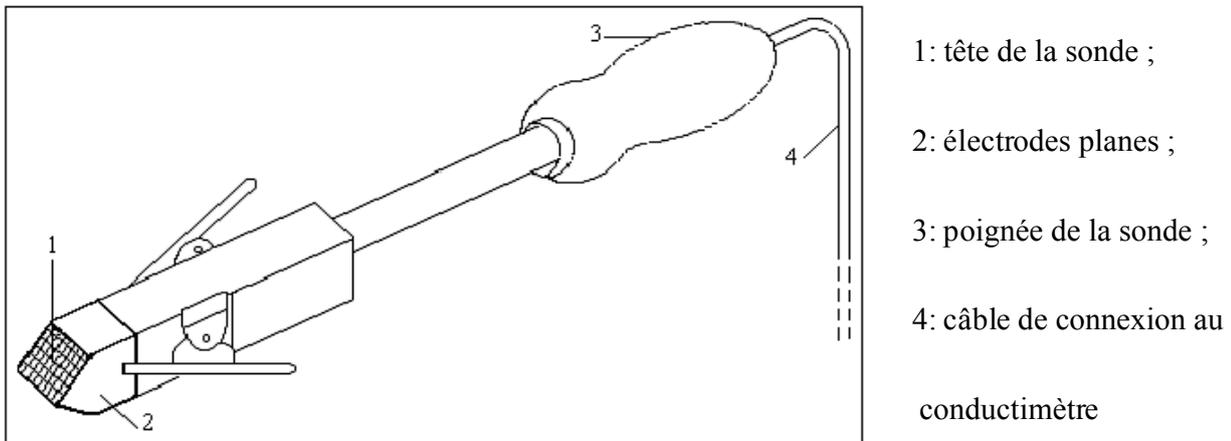


Fig.II.2 b: Sonde à électrodes planes avec papier

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

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

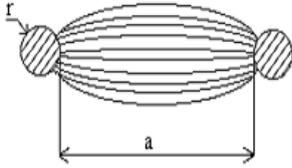
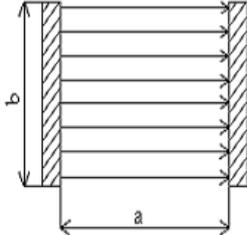
Où :

σ_m : Conductivité mesurée (μS);

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

f_s : Facteur de forme de la sonde utilisée (**Tab.II.1**) . Pour une sonde à électrodes planes, le facteur de forme est égal à 1.

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

Tab.II.1: Tableau récapitulatif des facteurs de forme pour chaque type de sonde

La conductivité superficielle réelle est donnée par la relation suivante :

$$\sigma_r = \sigma_m - \sigma_p \tag{II.2}$$

Où :

σ_m : Conductivité mesurée (μS), donnée par la formule (II.1);

σ_p : 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 correspondant à 20°C ($\sigma_{r20^\circ C}$) est déduite de la formule suivante :

$$\sigma_{r20^\circ C} = (\sigma_{rT} / \alpha) \tag{II.3}$$

Avec :

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

α : Facteur de correction donné par le (Tab.II.2):

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

Tab.II.2: Facteur de correction α en fonction de la température

II.9.1.2 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE) [20]

Il s'agit du dépôt équivalent, en milligrammes de NaCl/cm² 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 sélectionnés. Les dépôts sont récupérés par lavage à l'aide d'un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier, éponge, brosse) et de l'eau distillée, à moins qu'il soit gratté à sec. Le dépôt est dissout dans l'eau distillée, la suspension obtenue est constamment agitée au moins pendant deux minutes avant de procéder à la mesure de la conductivité volumique σ_θ de la suspension à température θ en °C.

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

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

Où :

Θ : Température de la suspension en °C;

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

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

b : Facteur dépendant de la température θ °C, qui est donné 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 σ_{20} est à l'intérieure de l'intervalle (0,004 – 0,4) S/m, la salinité de la suspension est déterminée par la formule suivante :

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

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 :

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

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 très 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.9.1.3 Conductance superficielle [20]

Elle est définie comme le rapport du courant à fréquence industrielle qui traverse l'isolateur à la tension appliquée. La tension utilisée est d'environ 30 kV par mètre de longueur de l'isolateur, mais inférieure à la tension de service. Ceci concerne les phases 1 et 2 du processus de contournement.

Le niveau de pollution et le degré d'humidification de la couche, permettent de déterminer les performances de l'isolateur, ainsi, la mesure de la conductance superficielle est une méthode satisfaisante pour évaluer la sévérité de pollution d'un site.

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

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

Avec :

I : le courant en A ; V : la tension en V ; G : la conductance en S.

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

$$\sigma = f . G \quad \text{(II.9)}$$

Où : f est 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 à la surface de l'isolateur. Ceci peut être évité en limitant le temps d'application de la tension.

L'expérience a montré que la tension ne doit pas être appliquée pendant plus de deux à cinq périodes et le courant pendant la première période ne doit pas être 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.

L'utilisation d'une tension d'essai inférieure à la tension de service est avantageuse puisqu'elle réduit le risque de contournement de l'isolateur en essai. Il est ainsi, impossible d'enregistrer des conductances superficielles 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.9.1.4 Comptage des impulsions de courant de fuite [21]

Cette méthode consiste à enregistrer pendant une période donnée le nombre d'impulsions du courant de fuite, dépassant une certaine amplitude pour un isolateur soumis à la tension de service (**Fig.II.3**).

L'existence d'impulsions de courant de fuite précède la phase finale du processus de contournement sous pollution et leurs amplitudes et fréquences augmentent tout en s'approchant de cette dernière. Les premiers compteurs étaient des compteurs téléphoniques, électromagnétiques, réglés 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 (**Fig.II.3**).

Plus récemment des circuits électroniques relativement sophistiqués ont été utilisés, mais ces modèles nécessitent des batteries, contrairement aux premiers modèles qui ne demandent pas une source d'énergie auxiliaire. Les compteurs sont généralement réglés pour fonctionner à des niveaux de courant de crête de 20, 50, 100, et 250 mA.

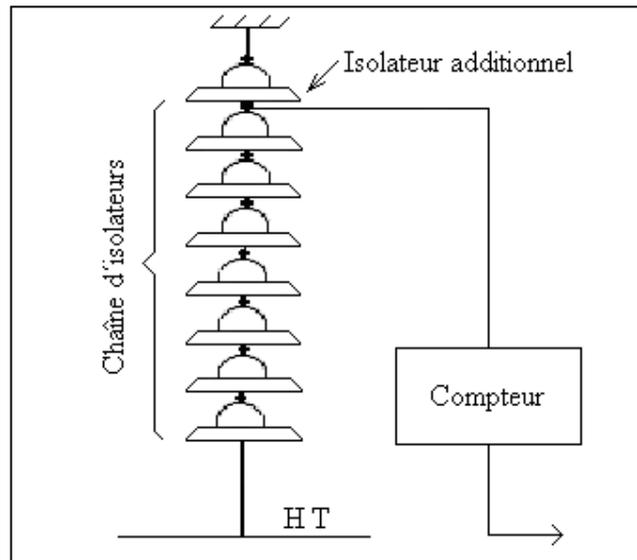


Fig.II.3: Méthode de connexion d'un compteur d'impulsion à un isolateur de ligne

Le comptage d'impulsions ne peut pas fournir une mesure absolue des performances d'un isolateur donné, car pour les mêmes conditions de pollution, le nombre d'impulsions enregistrées avant un contournement peut varier considérablement. Cette méthode est intéressante car elle permet de:

- Déterminer les longueurs d'isolateurs dans le cadre de l'extension ou du réisolement du réseau existant;
- La mise en évidence du besoin de lavage ou de graissage des isolateurs.

Les avantages que présente cette méthode sont:

- Le coût faible;
- Une aptitude au contrôle continu dans les conditions de service normal.

La mesure de courant de fuite se fait soit par l'intermédiaire d'une dérivation soit via un transformateur de courant. Certains dispositifs de surveillance ont été construits pour pouvoir être installés sur des isolateurs alimentés par le réseau, d'autres comportent une source d'alimentation propre qui leur permet d'alimenter leurs isolateurs d'essai.

II.9.1.5 Courant de fuite le plus élevé (I_h) [23]

I_h est la plus forte crête du courant de fuite enregistrée pendant une période donnée sur un échantillon ou un isolateur réel soumis continuellement à sa tension de service V_w . Ceci concerne toutes les phases du processus de contournement.

La plus forte valeur de crête des impulsions de courant de fuite est considérée comme un paramètre satisfaisant pour caractériser, par apport au contournement, l'état dans lequel l'isolateur se trouve et par conséquent pour mesurer la sévérité de pollution des sites. Pour un isolateur donné, il est possible de mesurer au laboratoire le plus fort courant de fuite I_h , en fonction de la sévérité de la pollution S_e , pour une tension appliquée donnée V .

On peut aussi déterminer I_h en fonction de la tension appliquée pour une sévérité donnée S_e dans les deux cas I_h croît jusqu'au courant critique I_c , au dessus duquel a lieu le contournement. La valeur correspondante de la tension appliquée est V_c . Des études ont pu montrer que la limite inférieure de la valeur de crête du courant de fuite pendant la demi-période qui précède le contournement I_{max} est une bonne approximation de la valeur critique théorique I_c si bien que cette valeur critique peut être déterminée expérimentalement. La **Fig.II.4** donne le schéma du circuit de mesure de I_h . Afin d'éviter la détérioration de l'équipement de mesure en cas de contournement, divers systèmes de protection ont été mis au point.

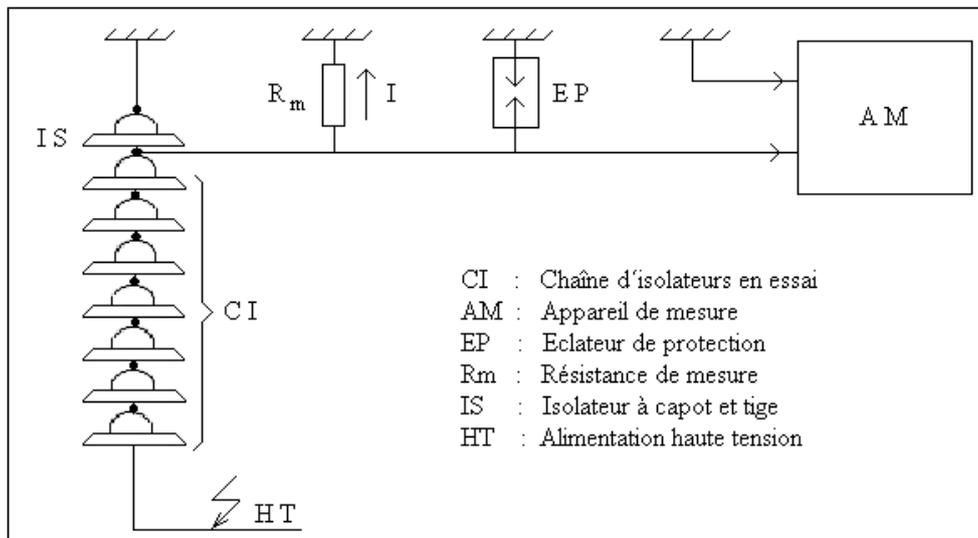


Fig.II.4 : Circuit de mesure du courant de fuite le plus élevé

Sur la base des enregistrements de courant de fuite sur site et au laboratoire on pourra choisir une forme et une longueur d'isolateur en utilisant l'une des méthodes suivantes :

II.9.1.6 Contrainte de contournement [24]

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 phases du processus de contournement.

La mesure de cette contrainte donne toutes les informations nécessaires au calcul de la longueur des isolateurs utilisés qui donnera une fiabilité meilleure.

La mesure de la contrainte de contournement sur site peut être effectuée 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 renouvelé afin d'obtenir des résultats statistiquement utilisables.
- La deuxième variante donne plus d'informations sur les isolateurs, elle consiste à placer sur chaque chaîne d'isolateurs des fusibles permettant 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 à contrainte réduite. Le processus sera répété jusqu'à obtenir la contrainte minimale 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.9.1.7 Mesure optique [20]

Le but de cette méthode consiste à évaluer l'épaisseur de la couche déposée à la surface d'un isolateur. Un dispositif de prédiction par sonde laser effectue les mesures en se fondant sur une technique elliptométrique. Un rayon à polarisation rectiligne traverse un analyseur et aboutit à un photodétecteur. Une analyse avancée des caractéristiques du rayon réfléchi (amplitude, décalage de phase) 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.9.1.8 Densité de dépôt non soluble (DDNS) [20]

La densité de dépôt non soluble correspond à la quantité de produits non solubles présents dans une couche de pollution. La détermination de la DDNS (**Fig.II.6**) s'effectue comme suit:

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

$$DDNS = 1000 (m_f - m_i) / A \tag{II.10}$$

Où:

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

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

m_i : Masse initiale du papier filtre en g;

A : Surface lavée de l'isolateur en cm^2

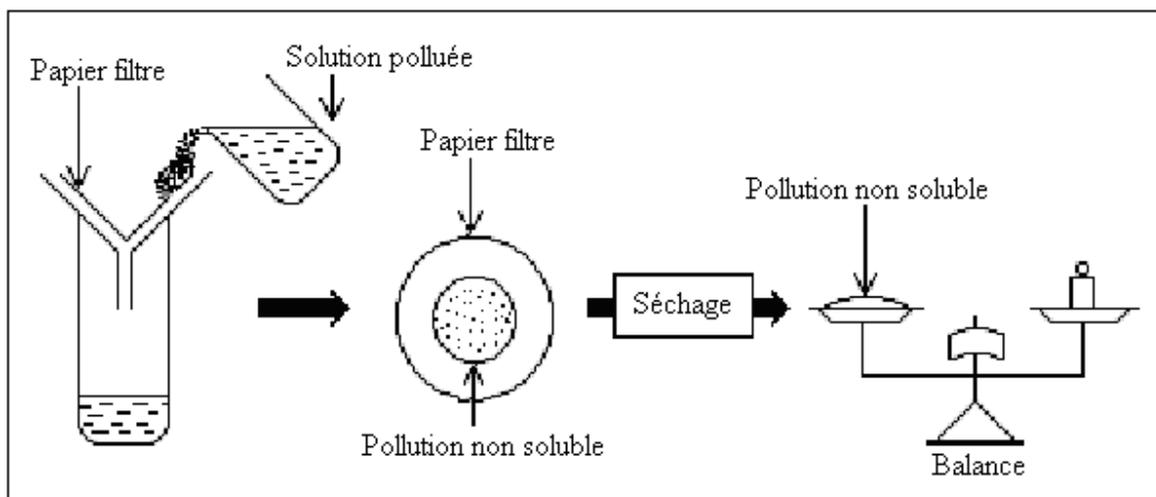


Fig.II.6 : Schéma et procédé de mesure de la DDNS

II.9.2 Choix d'une méthode de mesure de sévérité de pollution d'un site [16]

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 elles ne nécessitent pas d'installations complexes et coûteuses, puis elles donnent des résultats satisfaisants.

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

Dans tous les cas, le choix d'une méthode dépend essentiellement des paramètres suivants:

- Equipement de mesure (coût des appareils et de la réalisation des mesures, disponibilité de mesures électriques, fiabilité statistique et fiabilité d'applications des données fournies)
- Réseau de transport (étendue, situation géographique, gamme de sources polluantes, degré de fiabilité demandé).
- Le choix de la technique de mesure dépend aussi de la manière dont les mesures de sévérité de pollution sont introduites dans le calcul du niveau d'isolement.

II.10 Conclusion

La mesure de la sévérité de pollution pour la détermination des niveaux d'isolement pose des problèmes communs à toutes les méthodes décrites dans ce chapitre.

Le problème le plus important est probablement le temps car il faut prendre en considération le temps nécessaire à la formation d'une couche superficielle. 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 satisfaisante.

La disponibilité des sources de tension et le coût sont aussi des paramètres importants influant sur le choix d'une méthode qui dépend de la situation locale du site.

Les derniers dispositifs de surveillance conçus comportent une option d'humidification artificielle qui permet d'effectuer des mesures sans attendre que l'humidification naturelle

surviennent. Ce traitement de données en provenance des dispositifs de surveillance est important et il peut être intéressant d'assortir les mesures de pollution des mesures météorologiques.

Une étude est en cours pour préciser les avantages et les inconvénients des différents dispositifs, elle comparera aussi leur fiabilité, leur coût, les grandeurs mesurées et les résultats obtenus. Pour éliminer les problèmes rencontrés dans ces méthodes, on fait recours aux techniques artificielles, par simulation de la pollution naturelle au laboratoire qui fait l'objet du prochain chapitre.

III Simulation et lutte contre la pollution

III.1 Introduction

La simulation de pollution au laboratoire a pour but principal de pallier à un inconvénient majeur rencontré par les chercheurs, à savoir la durée des essais sur site.

Les méthodes d'essais artificiels, sont adoptées pour tester les isolateurs de lignes et des postes, les isolateurs de traversées et les enveloppes, à la fois de types standard et anti-pollution, mais dans de nombreux cas elles ont été utilisées, ou pourraient l'être, pour tester des isolateurs et des matériels spéciaux, à savoir les parafoudres, les isolateurs en matériaux synthétiques et les isolateurs graissés. De plus, ces méthodes peuvent être utilisées pour mesurer la réponse des isolateurs pollués aux surtensions temporaires aux surtensions de manœuvre et de foudre, ainsi qu'aux tensions de service.

Le dimensionnement des isolateurs peut devenir insuffisant lorsque la sévérité de pollution d'un site change, suite à l'apparition, par exemple, d'une nouvelle usine à proximité d'un poste. La construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter durablement ou temporairement la pollution de ce site. Pour cela, la protection des installations contre ces nouvelles sources de pollution devient indispensable.

III.2 Simulation de la pollution au laboratoire [25,26]

III.2.1 Méthodes de simulation

III.2.1.1 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 d'essai de 60 minutes. L'isolateur d'essai est placé dans un brouillard salin qui est produit par deux rangés 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 déplacé 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'essais 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.

III.2.1.2 Brouillard équivalent

La solution contient du sel dans une suspension de 40g de poudre Tonoko (60 à 70 % de SiO_2 , 10 à 20 % de 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-fût, des tensions d'amorçage plus élevées que dans les conditions naturelles. La densité du dépôt de sel en mg/cm^2 définit la sévérité de l'essai.

III.2.1.3 Brouillard vapeur

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.2.1.4 Brouillard tenu

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.2.1.5 Methycellulose ou méthode de pollution liquide

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

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.2.1.6 Kieselguhr

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.2.1.7 Contaminant humide

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, quelques minutes 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.2.2 Corrélation entre les méthodes de pollution naturelle et artificielle

Aucun essai artificiel ne peut reproduire toutes les véritables conditions auxquelles un isolateur peut être soumis 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 (**Tab.III.1**).

Niveau de pollution		Environnement	Pollution artificielle : sévérité équivalente		
			Couche liquide conductivité μS	Couche solide Densité de NaCl équivalente	Ligne de fuite cm/kV (efficace)
I	L E G E R	- Zones sans Industries et avec faible densité de maisons équipées d'installations de chauffage. - Zones avec faible densité d'industries ou de maisons, mais soumises à des vents ou des pluies fréquentes. - Toutes les régions agricoles. - Toutes ces zones doivent être situées loin de la mer (10 à 20km) ou à haute altitude et ne doivent, en aucun cas, être exposées aux vents venant de la mer.	5 à 10	0.05 à 0.1	2.7
		- Zones avec des industries ne produisant pas de fumées polluantes, ou avec une densité moyenne de maisons équipées de chauffages. - Zones avec forte densité de maisons ou d'industries, mais exposées à de vents fréquents et propres, ou à des pluies. - Zones exposées au vent de mer, mais pas trop proches de la côte (Distance < à 1km).	10 à 15	0.1 à 0.2	3.5
		- Zones à forte densité d'industries et banlieues de grandes villes avec forte densité d'appareils de chauffage polluant. - Zones proches de la mer, ou en tout cas exposé à un vent relativement fort venant de la mer.	15 à 30	0.2 à 0.6	4.3
		- Zones généralement peu étendues, soumises à des poussières conductrices et à des fumées industrielles produisant des dépôts conducteurs particulièrement épais. - Zones généralement peu étendues, très proches de la côte et exposées à des vents forts et très polluants venant de la mer.	30 à 50	0.6 à 1.1	5.4
II	M O Y E N				
III	F O R T				
IV	T R E S F O R T				

Tab. III.1 : Equivalence entre pollution naturelle et pollution artificielle

III.3 Lutte contre la pollution

III.3.1 Techniques de lutte contre la pollution [23,25]

III.3.1.1 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 fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants.

III.3.1.2 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.3.1.3 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, et d'autre 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 et 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 par la société électricité de France.

Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de graissage est longue, coûteuse et nécessite une interruption de service.

III.3.1.4 Revêtements 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.3.1.5 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.

Les isolateurs composites sont aujourd'hui de plus en plus utilisés sur le réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique.

III.3.1.6 Nettoyage des isolateurs

Le nettoyage manuel et le lavage périodique sont fréquemment utilisés à travers le monde, en particulier dans les postes, ils sont pratiqués hors tension. 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. Dans les deux cas, 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 certains pays, en particulier en Amérique du nord. Cette technique permet le nettoyage des isolateurs recouverts 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 coûteuse, il est donc conseillé de réaliser le lavage au moment le plus approprié.

III.4 Conclusion

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.
- La méthode de Kieselguhr peut être recommandée, lorsqu'on rencontre une pollution industrielle avec des couches épaisses.
- Les procédés de la méthylcellulose, du contaminant humide et du brouillard équivalent semblent être moins souhaitables que les autres, parce que la situation de mise sous tension qu'elles simulent donne des valeurs anormalement élevées pour les isolateurs long-fût.
- 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 une pollution inattendue ou bien exceptionnelle. Ils ne doivent, en aucun cas, être considérés comme un moyen normal pour faire face à la pollution des isolateurs.

IV Les décharges dans les gaz, superficielle et sous pollution**IV.1 Introduction**

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

Très vite, les chercheurs ont tenté de faire le lien avec la décharge de foudre afin de mieux comprendre ses mécanismes et de mieux s'en protéger. En effet celle-ci est responsable d'un grand nombre de destruction d'équipement électrique et électroniques (de plus en plus sophistiqués et donc de plus en plus fragiles) tant sur les installations industrielles que domestiques. D'ailleurs, leurs études ont démontré une similarité entre la foudre et les décharges superficielles.

Une décharge électrique (ou étincelle) est instantanée pour l'œil humain et s'accompagne d'un claquement sec et violent, comme un gigantesque coup de fouet. Mais en réalité, cette étincelle, qui correspond au passage de l'état isolant à l'état conducteur de l'air, ne se produit pas de façon instantané mais avec un retard qui dépend essentiellement de la valeur de la distribution et de l'évolution temporelle du champ électrique ainsi que d'autres facteurs qui sont liées à l'environnement où elle se produit.

Les décharges superficielles (ou glissantes), qui feront l'objet de la présente étude, sont des décharges électriques qui apparaissent à la surface d'un isolant solide placé dans un gaz ou liquide isolant.

IV.2 Notions élémentaires sur les décharges dans les gaz

Les gaz sont de bons isolants s'ils sont mis hors d'atteinte des agents ionisants extérieure. Mais ce n'est pas le cas dans la réalité puisque cet isolement est impossible à faire, de fait de la présence des rayonnements cosmiques et solaires ainsi que de la radioactivité naturelle. Ils contiennent toujours une certaine quantité de charges libres.

L'application d'un champ électrique entraîne le déplacement de ces charges, donc l'apparition d'un courant dont la valeur dépend de celle du champ électrique. En effet, tant que le champ appliqué est faible, le gaz garde ses qualités d'isolant, mais on dépassant un certains seuil, le gaz présente une conductivité supérieur due à une ionisation qui s'effectue par collision entre les particules, les électrons et les photons qui y sont créés. C'est ce phénomène lie à la transition d'un gaz de l'état isolant à celui de conducteur que l'on appelle décharge électrique.

Les décharges électriques présentent plusieurs régimes différents des uns des autres et qui sont influencés par différents paramètres (électriques, géométriques et extérieurs) et leur interprétation se fait à base de deux modèles qui sont :

- ▶ la décharge de townsend.
- ▶ la décharge par streamer.

IV.2.1 Décharge de Townsend [27,28]

La théorie de Townsend est à la base de la compréhension de tous les phénomènes de décharge, elle fait intervenir tout l'intervalle de la décharge. Cette théorie se base sur la multiplication électronique par ionisation du gaz. La décharge de Townsend est une décharge autonome qui se produit à des très faibles pressions ($0.1\text{atm} \leq p \leq 1\text{atm}$) dans un système d'électrodes plan.

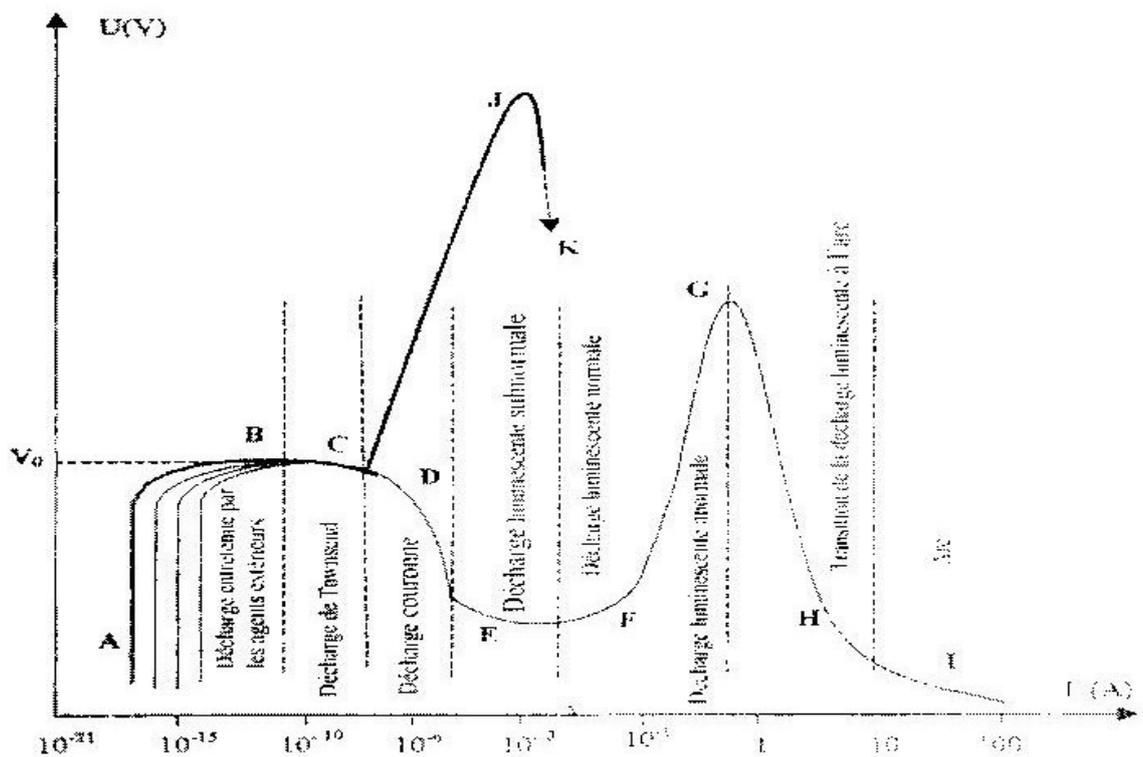


Fig.IV.1 : Différents régimes d’une décharge représentée par sa caractéristique

- A à I : configuration plan – plan en basse pression
- ABCK : configuration pointe – plan en haute pression

IV.2.1.1 Processus d'avalanche-coefficient de Townsend

Dans ce processus, il faut la présence d'un électron germe. En effet, quand on soumet cet électron à un champ électrique créé par un potentiel appliqué à un intervalle gazeux compris entre deux électrodes séparées par une distance d , il peut ioniser une espèce neutre (atome ou molécule) si son énergie dérivant du champ excède le potentiel d'ionisation de cette espèce. Alors un deuxième électron sera créé, deux électrons sont alors disponibles. Accélérer à leur tour par le champ, ils peuvent ioniser deux atomes ou molécules si leur énergie le permet pour former quatre électrons et ainsi de suite. C'est ce phénomène qu'on appelle avalanche électronique. Partant de la cathode vers l'anode, le nombre d'électrons créés par l'électron initial et par unité de longueur parcourue dans la direction du champ est défini par un coefficient d'ionisation α appelé premier coefficient de Townsend. A l'arrivée de l'électron germe sur l'anode, $e^{\alpha \cdot d}$ nouveaux électrons auront été produits sur la distance d . Ces électrons constituent avec l'électron germe une avalanche électronique et on peut écrire la relation de Townsend :

$$I = I_0 e^{\alpha \cdot d} \quad (\text{IV.1})$$

I_0 : représente un courant initial produit par un agent d'origine extérieure correspondant à un nombre n_0 électrons primaires initiaux.

L'étude expérimentale du courant I effectuée par Townsend en fonction de la tension U , montre que le courant augmente plus rapidement que prévu par la relation (IV.1) ceci est dû aux différents processus d'émission d'électron par la cathode sous l'impacte d'ion positifs ou de photons ou encore dans le gaz par des photo ionisation. La Fig. (IV.2) donne une représentation schématique sommaire de divers phénomènes pouvant survenir dans le gaz au contact des matériaux d'électrodes.

Accélérés par le champ, les ions positifs venant frapper la cathode peuvent en extraire des électrons secondaires si leur énergie est suffisante. La probabilité d'émission d'électrons par impact d'ion positifs sur le métal est désignée par le coefficient γ_i caractérisant le rendement électronique de surface. Une extraction d'électrons de la cathode peut également se faire par impact de photons lorsque l'énergie de ces photons est supérieure au travail de sortie du métal. On désigne par γ_p le coefficient d'émission d'électrons secondaires par photo-ionisation à la cathode. Ces photons peuvent eux aussi, si leur énergie le permet, photo ioniser les atomes ou les molécules de gaz à leurs proximités. La

probabilité d'émission d'électron, par photo- ionisation dont le gaz est désigné par le coefficient γ_g .

En résumé, les principaux processus conduisant à l'émission d'électrons secondaires sont :

- ▶ La photo ionisation dans le gaz.
- ▶ L'effet photoélectrique à la cathode.
- ▶ L'émission secondaire par impact ionique à la cathode.

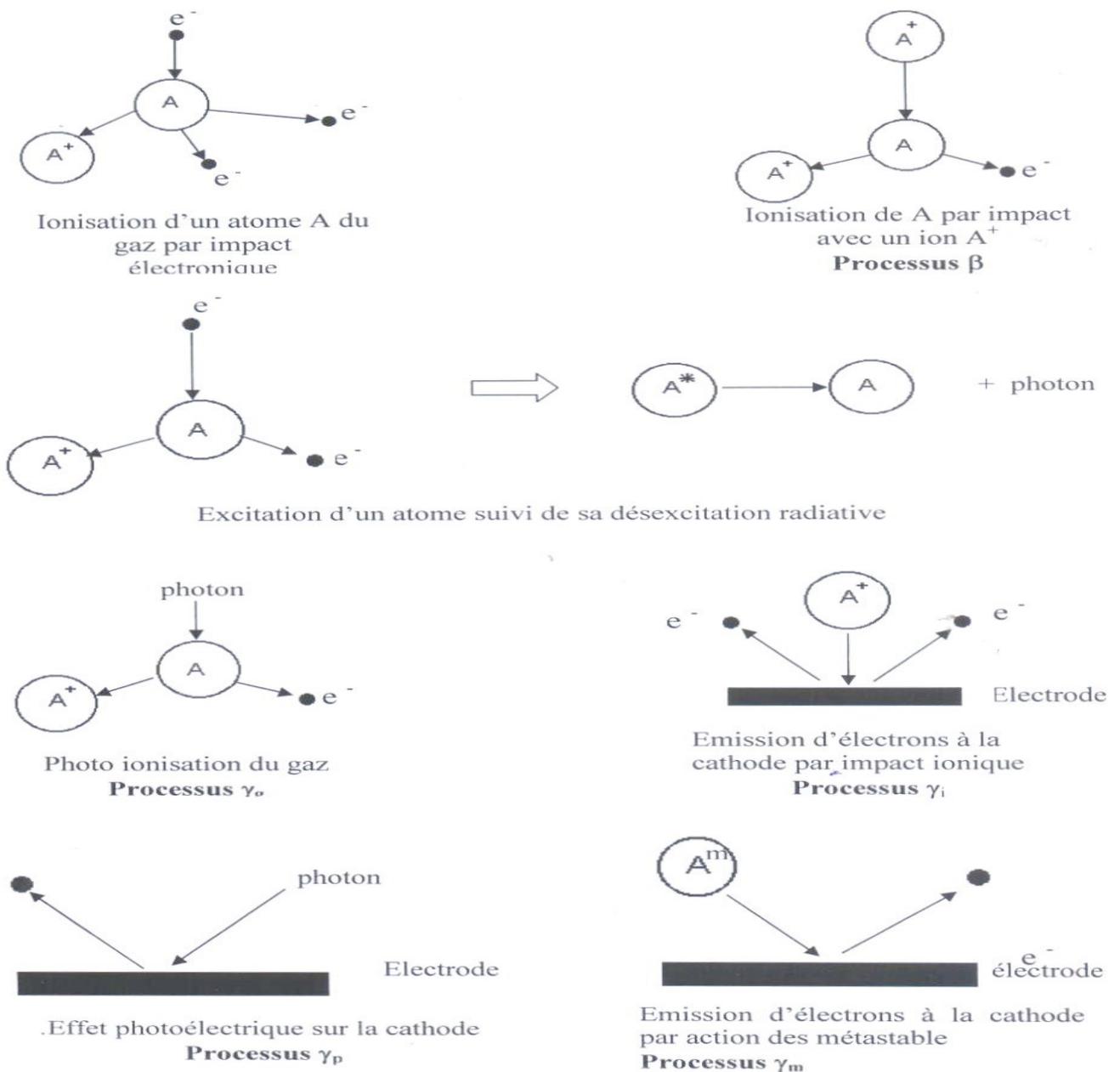


Fig.IV.2 : Différents types d'ionisation et d'émission secondaire [29]

Ce qui nous donne le coefficient

$$\gamma = \gamma_i + \gamma_p + \gamma_g \quad (IV.2)$$

Ce coefficient dépend à la fois de la nature du gaz et de celle de matériaux constituant les électrodes.

Les n_0 électrons issus de la cathode produiront sur la distance d , $n_0(e^{\alpha \cdot d} - 1)$ paires d'ions électrons. Ces ions vont libérer $\gamma(e^{\alpha \cdot d} - 1)$ nouveaux électrons à la cathode qui se multiplieront à leur tour comme les électrons initiaux. Le nombre d'électron atteignant l'anode sera alors donné par :

$$n = n_0 \frac{e^{\alpha \cdot d}}{1 - \gamma(e^{\alpha \cdot d} - 1)}$$

Et le courant collecté à l'anode quant à lui vaudra :

$$I = I_0 \frac{e^{\alpha \cdot d}}{1 - \gamma(e^{\alpha \cdot d} - 1)} \quad (IV.3)$$

IV.2.1.2 Attachement électronique

Dans le gaz, il n'y a pas seulement le phénomène d'ionisation, d'origine photonique ou dû aux impacts électroniques. Il existe un autre phénomène qui consomme les électrons libres, c'est l'attachement électronique. Ce mécanisme est défini par un coefficient η qui est le nombre d'attachements électroniques par unité de longueur du parcours des électrons dans la direction du champ.

En introduisant ce coefficient, on peut donc corriger la relation de Townsend (IV.3) :

$$I = I_0 \frac{e^{(\alpha - \eta)d}}{1 - \gamma(e^{(\alpha - \eta)d} - 1)} = I_0 \frac{e^{\alpha' \cdot d}}{1 - \gamma(e^{\alpha' \cdot d} - 1)} \quad (IV.4)$$

$\alpha' = \alpha - \eta$ Est appelé premier coefficient net de Townsend ou coefficient d'ionisation primaire apparent.

On définit par la suite un coefficient de multiplication électronique R donné par :

$$R = \frac{n}{n_0} = \frac{I}{I_0} = \frac{e^{\alpha' \cdot d}}{1 - \gamma(e^{\alpha' \cdot d} - 1)}$$

L'évolution du coefficient R dépend fortement de la valeur de $\gamma(e^{\alpha' \cdot d} - 1)$ qui définit le critère d'auto-entretien.

$$M = \gamma(e^{\alpha \cdot d} - 1) \begin{cases} \leq 1 ; \text{ La décharge est non auto entretenue} \\ \geq 1 ; \text{ La décharge est auto entretenue} \end{cases}$$

Le coefficient α ne sera pas constant lorsque le champ appliqué n'est pas uniforme, le critère d'auto entretien s'exprimera donc par la relation suivante [29]

$$M = \gamma \int_0^d \alpha \exp \left[\int_0^x (\alpha - \eta) dx \right] dx \quad (\text{IV.5})$$

VI.2.2 Théorie du streamer [30]

La théorie du Townsend ne peut expliquer complètement la décharge par étincelle ou arc. En effet Raëther, Meek et Loeb ont remis en cause cette théorie après avoir fait les observations suivantes :

1. Certains résultats expérimentaux montrent que la tension de claquage dans l'air à quelques atmosphères de pression ne varie pas beaucoup avec la nature de la cathode.
2. Le courant de décharge pour des surtensions importantes atteint des valeurs notables avant même que la première avalanche ne soit écroulée (et a fortiori avant que les ions de cette avalanche aient atteint la cathode pour extraire des électrons secondaires).
3. La décharge n'est plus diffuse, comme celle de Townsend, mais concentre en un canal étroit avec des ramifications et des changements de direction (étincelle).

Si pour qu'un ion se déplace de l'anode jusqu'à la cathode il lui faut 10^{-4} à 10^{-5} second, l'expérience a montré que le temps de la formation d'étincelle est de 10^{-7} second et moins, donc l'émission secondaire (due aux ions positifs) ne peut expliquer la décharge par étincelle.

L'expression de la grande vitesse avec laquelle se développe l'étincelle est donnée par la théorie du streamer (ou théorie des canaux) qui est actuellement bien justifiée par des données expérimentales.

Une première avalanche de Townsend faiblement luminescente se forme sous l'effet de la photo ionisation due aux rayonnements émis par cette avalanche, de nouvelles avalanches prennent naissance et donnent naissance à leur tour à d'autres avalanches dans le volume du gaz. Au cours de leur développement, les diverses avalanches se rattrapent les unes les autres et se confondent en donnant un canal bon conducteur à streamer. Ce canal à grande conductivité constitue de charges positives et de charges négatives formées dans le gaz, court-circuitera les deux électrodes et conduira les charges en prévenance de la source.

La grande vitesse à la quelle se produira la décharge est due au fait que le steamer est conduit par plusieurs avalanches qui se développent simultanément entre les deux électrodes.

Au moment où le canal de plasma atteint l'anode, nous aurons une décharge complète sous forme d'arc.

L'arc se distingue de la décharge de Townsend par le fait que :

- La densité de courant d'arc est très élevée 0,1 à 100 kA/cm²
- Le courant d'arc est principalement dû aux électrons issus de la cathode et (non pas à ceux résultant de l'ionisation du gaz (ce qui explique le point précédent)
- La tension d'arc n'est que de quelques dizaines de volts.

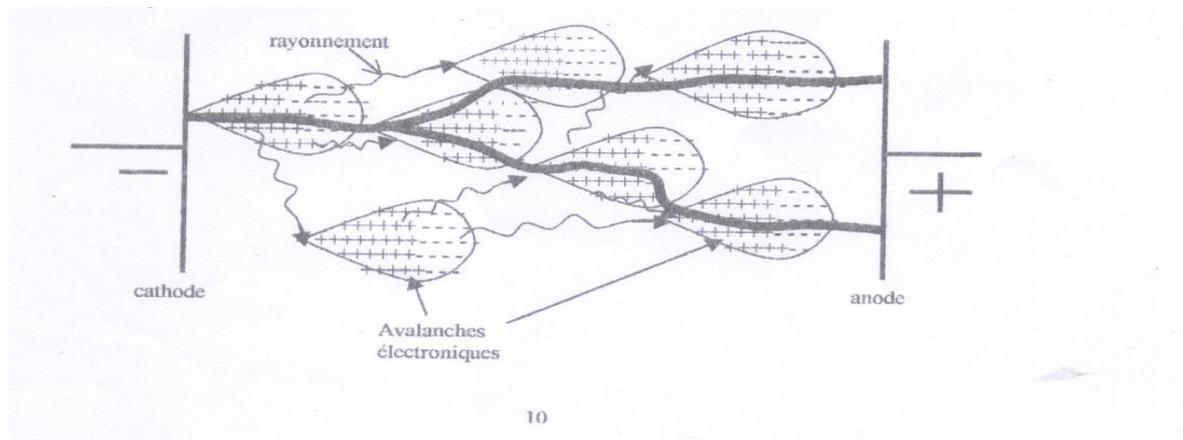


Fig.IV.3 : Développement d'un streamer

IV.2.2.1 Influence de la distribution du champ électrique appliqué sur le développement d'un streamer [27,28]

La distribution du champ électrique influence bien sur le comportement de streamer.

Si les électrodes sont des plans parallèles, le champ est homogène. Si leur intensités sont telle qu'un streamer prend naissance, son développement sera infini, jusqu'à la cathode. La condition de claquage de l'intervalle se ramène à la condition d'apparition du streamer.

Si les électrodes sont dissymétriques, par exemple une configuration pointe plan, les avalanches se développeront préférentiellement dans la région de fort champ c'est-à-dire près de la pointe. Le streamer s'il prend naissance se propagera tant que le champ électrique total ($E_g + E_c$) dans la région active permet de produire des avalanches secondaires.

IV.2.2.2 Influence du type de tension appliquée

L'existence ou non de streamers est liée à l'amplitude du champs électrique dans l'intervalle, donc de la tension appliquée aux bornes de l'intervalle d'aire en l'occurrence. La forme de la tension appliquée est donc importante pour décrire le déclenchement de streamer. Elle peut être continue (un échelon), alternative ou une rampe. Raisonnons d'abord dans la configuration pointe positive plane à la masse pour laquelle les mécanismes sont mieux connus.

IV2.2.2.1 En tension continue

On peut définir un niveau de tension minimum qui correspond à l'apparition du premier streamer. Si ce niveau est appliqué ou même dépassé, un streamer se développe. S'il atteint le plan un court circuit limité par le circuit extérieur prend place. Si le champ n'est pas suffisant pour que le streamer traverse tout l'intervalle inter électrode, la partie « passive » a pour effet de réduire le champ au voisinage de l'électrode privant tout phénomène d'ionisation. Les processus de recombinaison, de dérive et de diffusions vont dégager petite a petit le voisinage de la pointe. Le champ électrique augmente et les conditions d'initiation d'avalanche et de streamer réapparaissent. Le résultat est une succession de petites décharges streamer à la fréquence régulière dépendant du niveau de tension.

Ce streamers porte aussi le nom de « dard ».

IV.2.2.2.2 En tension alternative (50Hz ou 60Hz)

Les processus sont identiques car la fréquence de la tension appliquée est très inférieure à celle des streamers. La fréquence de répétition des couronnes et du domaine de l'audible. C'est précisément les bourdonnements que l'on entend sous les lignes HT. Dans ce cas, les streamers se développent tout autour du câble HT et on parle de « décharge couronne ».

IV.2.2.3 Influence de la polarité [31]

IV.2.2.3.1 En polarité négative

En polarité négative, l'avalanche se développe de conducteur vers l'extérieur, puis elle s'arrête à une certaine distance où le champ ne peut pas assurer l'effet de multiplicateur

$$\alpha = \alpha' - \eta = 0 \Rightarrow \alpha' = \eta$$

L'ionisation primaire est limitée à un volume bien défini autour du conducteur, dans la zone de faible champ, les électrons s'attachent aux molécules neutres pour former des ions négatifs donc il y'aura un nuage d'ions des deux polarités qui s'accumule devant le

conducteur à cause de leur faible mobilité, les ions positifs sont neutralisés avec les électrons donc il y'aura un excès d'ions négatifs ce qui va donner naissance aux aigrettes négatives Le champ critique dans ce cas légèrement plus faible.

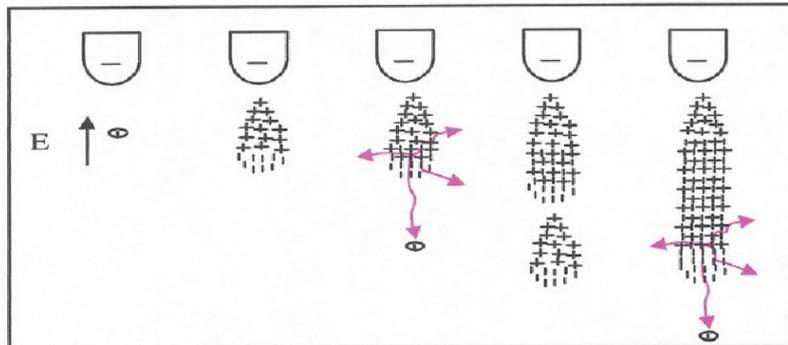


Fig.IV.4 : Processus de développement d'un streamer négatif

IV.2.2.3.2 En polarité positive

En polarité positive, l'avalanche prend naissance dans l'espace du conducteur en se développant vers le conducteur, les électrons sont absorbés par celui-ci en laissant un nuage d'ions positifs et tout se passe comme si le conducteur est prolongé par une pointe positive ce qui permet de former une nouvelle avalanche (ions + qui bombardent la cathode) en avant de la précédente, ce processus se prolonge autour du conducteur plus loin que les avalanches en polarité négative. La taille critique de l'avalanche est le critère de propagation du streamer elle est de l'ordre 10^8 électrons, des phénomènes auxiliaires tels que la photo ionisation permet d'expliquer la grande vitesse du développement des streamers, ceci donne au streamer son caractère lumineux.

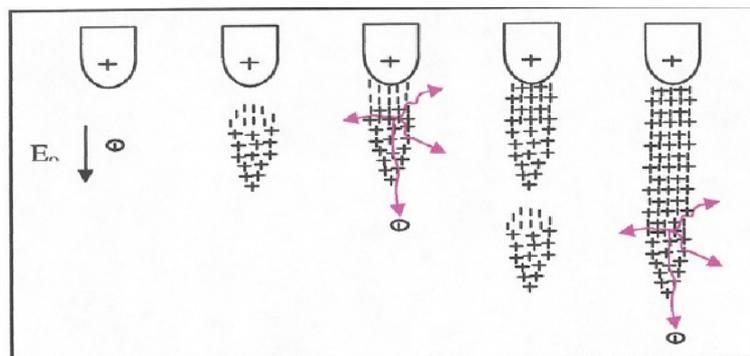


Fig.IV.5 : Processus de développement d'un streamer positif

IV.3 décharges superficielles

IV.3.1 définition [30]

Les décharges superficielles sont des décharges électriques qui apparaissent à la surface d'un solide, placé dans un milieu isolant gazeux ou liquide, la composante tangentielle du champ électrique est élevée. Le courant de ces décharges est un courant de déplacement qui résulte de la variation du champ électrique ($I_d = \frac{dE}{dt}$). C'est pour cette raison que, en tension continue, le risque de voir se produire des décharges glissantes est minimes du fait que ($I_d = 0$). Dans ce cas, leur apparition est due au courant de conduction. En tension variable, le risque de voir ces décharges se produire est grand (E Variable $\Rightarrow (I_d = dE/dt) \neq 0$). Mais c'est en tension de choc que le risque est plus élevé, en raison de la variation rapide du champ qui va engendrer un courant de déplacement très important.

Les décharges glissantes ont l'aspect de décharges électriques filamenteuses très lumineuses. Elles se caractérisent par le fait qu'elles restent en contact avec une surface diélectrique sur la quelles elles se propagent.

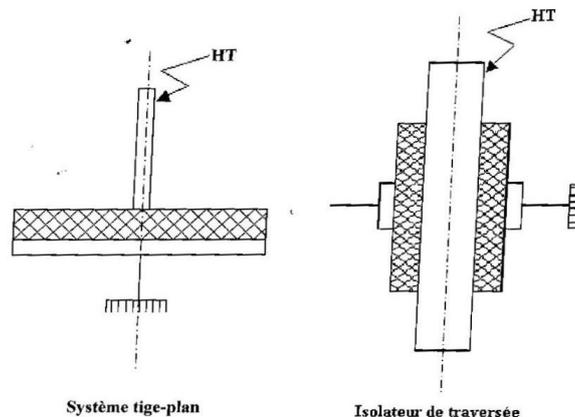


Figure II-1

Fig.IV.6 : Exemples de systèmes où apparaissent des décharges glissantes

En appliquant une tension, qui augmente graduellement, à un système d'électrode pointe plan, il en résulte au début, l'établissement d'un champ électrique entre les deux électrodes, avec concentration des lignes du champ à l'extrémité de la pointe (effet de pointe). Cet effet de concentration va provoquer une décharge électrique dite décharge couronne sur la pointe. Des ions gazeux, vont alors être libérés par cette décharge et suivront des chemins différents selon leur Polarité. Ceux qui possèdent une charge électrique de polarité opposée à la haute tension seront neutralisés dans le conducteur sous

tension. Les ions dans la polarité est la même que celle du potentiel appliqué vont suivre les lignes de champs électrique. Ils vont donc se diriger vers l'électrode au potentiel zéro qui est derrière une feuille diélectrique.

La présence de cette feuille isolante constituant un barrage infranchissable pour les charges électriques, celles-ci vont s'accumuler sur la surface libre de l'électrode plan. Ce phénomène se poursuivra jusqu'à ce que le champ électrique autour de l'électrode au potentiel zéro atteint ou dépasse le champ disruptif de l'air ambiant, l'ionisation de l'air qui en résulte va alors modifier la répartition du champ électrique en rendant le gaz conducteur au voisinage de l'électrode au potentiel zéro. Ce processus va conduire à l'équivalent d'une réaction en chaîne, car le champ électrique se trouve repoussé aux frontières du volume du gaz neutre, ce qui repoussera davantage les régions de fort champ électrique, etc....

Ceci se traduit par la génération d'une décharge électrique, qui peut se propager sur toute la surface libre du diélectrique situé en regard de l'électrode plane sous-jacente.

IV.3.2 Processus de propagation des décharges glissantes

La propagation et le développement des décharges glissantes diffèrent selon la polarité de l'électrode active et de type de tension appliquée.

Ainsi, en fonction de la polarité de l'électrode active, il existe deux modèles de décharges glissantes :

- En pointe positive, on aura des décharges glissantes positives ;
- En pointe négative, on aura des décharges glissantes négatives.

IV.4 Décharge disruptive ou claquage [7]

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

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

D'autres causes secondaires tels que les effets électrochimiques et chimiques de détérioration de l'isolant peuvent découler des précédents.

IV.4.1 Décharge intrinsèque

La décharge intrinsèque est due à la présence d'électrons libres, aptes à se déplacer dans l'isolant. Ce phénomène se manifeste préalablement par une caractéristique du courant à travers l'isolant présentant une saturation très nette à partir d'une certaine valeur de la tension.

IV.4.2 Décharge thermique

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

IV.4.3 Décharge partielle

Les matériaux isolants de qualité technique comportent toujours des inclusions de particules étrangères et de vacuoles gazeuses. Lorsque ces isolants sont soumis à une tension alternative à fréquence industrielle, le champ électrique résultant est plus élevé dans les vacuoles que dans l'isolant. La formation des décharges partielles dans les isolants solides est due à :

- l'élévation de la permittivité des isolants solides par rapport à celle des gaz;
- la faible rigidité diélectrique des gaz ($E_g \approx E_s/10$).

Ces deux constatations entraînent l'apparition des décharges partielles dans les vacuoles des isolants pour des tensions 20 à 60 fois plus faibles que celles qui provoqueraient la perforation du diélectrique solide.

IV.5 Contournement sous pollution [32 ,33]

Le contournement d'un isolateur pollué est en général précédé de l'apparition brutale d'un courant de fuite accompagné de la formation d'une bande sèche et d'arcs partiels. Un arc peut alors se propager en surface jusqu'au contournement total de l'isolateur. D'une façon générale, le contournement passe par cinq étapes :

- 1) Dans une première phase, une couche de pollution constituée de sels solubles et d'acides ou de bases dilués recouvre progressivement l'isolateur. A l'état sec, la couche polluante est généralement non conductrice.

- 2) Quand la couche de pollution subit une humidification partielle ou complète, pour permettre la formation d'électrolyte sur la surface de l'isolateur. Cette humidification est provoquée par du brouillard, une pluie légère ou une glace fondante. Le cas de la pluie violente est plus compliqué. En effet, elle peut aussi bien éliminer les composants électrolytiques de la couche polluante sans aboutir au contournement, comme elle peut favoriser ce dernier en court-circuitant les ailettes par ruissellement (**Fig.IV.7.a**).
- 3) Dans le deuxième stade, des courants de fuite s'écoulent à la surface de l'isolateur qui, par effet Joule, assèche certaines zones de la couche polluante. Ce séchage n'est jamais uniforme à cause de l'inhomogénéité des densités du courant de fuite (**Fig.IV.7. b**).
- 4) Une partie importante de la tension appliquée se trouve alors reportée sur cette bande sèche de quelques centimètres de largeur engendrant ainsi un claquage dans l'air quand le champ électrique a une intensité suffisante. Les zones sèches sont court-circuitées par des arcs électriquement en série avec la résistance de la partie humide restante de la couche polluante. Il en résulte une impulsion de courant de fuite chaque fois qu'une zone sèche amorce (**Fig.IV.7.c** et **Fig.IV.7.d**).
- 5) Dans la dernière phase, les arcs peuvent s'éteindre ou se développer jusqu'au contournement final selon les conditions électriques dans lesquelles ils se retrouvent. En effet, si la résistance de la partie humide est assez faible, les arcs qui court-circuitent les zones sèches peuvent brûler continuellement et s'étendre le long de l'isolateur, court-circuitant ainsi une partie de plus en plus grande de sa surface. Cette situation entraîne une réduction de la résistance en série avec les arcs se qui accroît le courant et permet aux arcs de court-circuiter une partie encore plus grande de la surface de l'isolateur jusqu'à ce que le contournement complet soit atteint. Dans le cas contraire, la zone sèche va tendre à s'élargir jusqu'à ce que la tension appliquée ne puisse plus maintenir la décharge qui va alors s'éteindre (**Fig.IV.7.e** et **Fig.IV.7.f**).

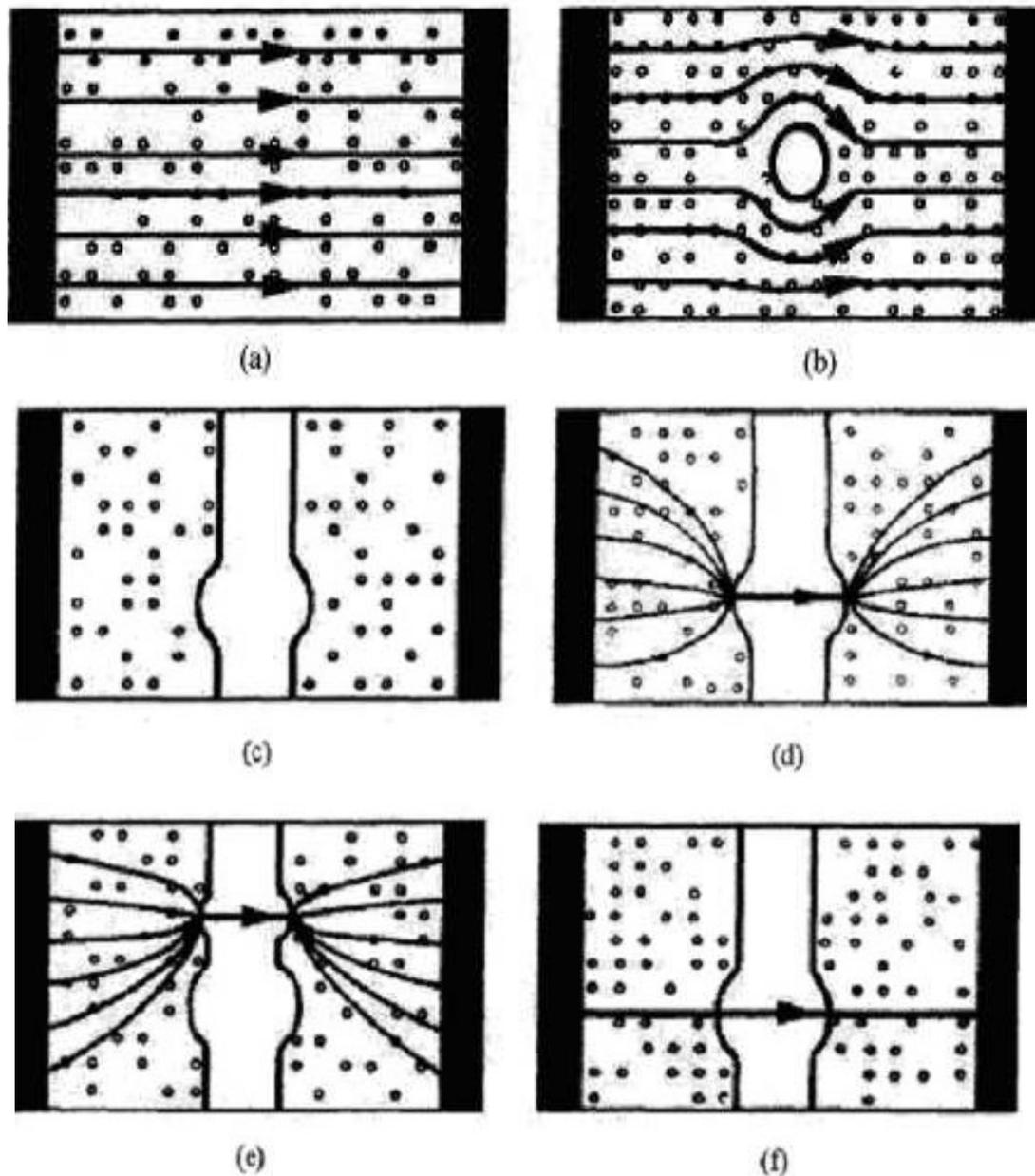


Fig.IV.7 : Processus de contournement d'un isolateur pollué

- 1 - a) Humidification de la couche de pollution et écoulement de courant de fuite;
- 1 - b) Formation des zones sèches sous l'effet du courant de fuite;
- 1 - c) Les zones sèches se développent pour former des bandes sèches;
- 1 - d) Les bandes sèches sont contournées par des arcs locaux;
- 1 - e) L'arc local se déplacera latéralement pour trouver une position plus stable;
- 1 - f) Dans certaines conditions, l'arc se propage jusqu'au contournement.

IV.5.1 Modélisation des phénomènes de contournement

IV.5.1.1 Modèle de base (Modèle d'Obenaus) [32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40]

En 1958, Obenaus a été le premier à proposer une théorie sur le mécanisme de contournement connu sous le nom de la « théorie d'extinction ». Cette méthode a été complétée plus tard par Neumarker. Le modèle utilisé (FigIV.8), présente un arc en série avec une résistance. La décharge est un contournement partiel sur la surface de l'isolateur, et la résistance représente le reste de la surface non contournée par la décharge électrique qui peut varier en fonction de degré de contamination. Obenaus a supposé que le contournement se produit si la décharge partielle saute par-dessus la zone sèche pour atteindre la résistance.

Il a fait la première analyse quantitative des phénomènes d'arcs se produisant sur des surfaces contaminées.

A partir d'un arc de longueur x en série avec une résistance R_p , (la résistance de la couche polluée humide), un circuit est ainsi formé, alimenté par une source de tension (V) la tension d'entretien d'arc a pour expression :

$$V_{arc} = \frac{XN}{I^n} \tag{IV.6}$$

n et N des constantes caractéristiques de l'arc, elles dépendent du milieu dans lequel s'amorce la décharge, certains auteurs les classent entre 0.4 à 1 et 3 à 500 respectivement n et N .

Cette relation est déduite du circuit suivant :

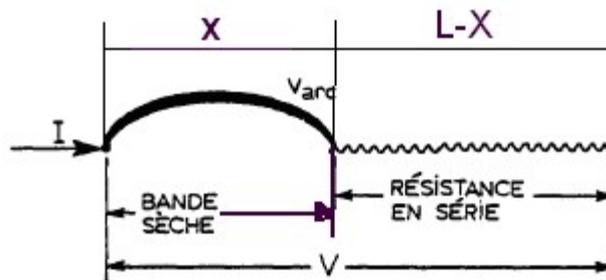


Fig.IV.8 : Modèle d'Obenaus

L'équation totale du circuit est :

$$V = V_e + V_{arc} + R_p(X).I \quad (IV.7)$$

Avec

V : La tension appliquée ;

V_e : Chute de tension totale au niveau des électrodes ;

$R_p(X)$: Résistance de la couche polluée ;

V_{arc} : Tension d'arc tel que $V_{arc} = R_{arc}.X.I$;

R_{arc} : Résistance de l'arc par unité de longueur ;

X : longueur court-circuité par l'arc ;

I : courant qui traverse la couche polluée ;

L'équation de la décharge est donner par :

$$E_a = \frac{V_{arc}}{X} = N.I^{-n} \quad (IV.8)$$

$$V_{arc} = N.I^{-n} .X \quad (IV.9)$$

et l'équation (3.2) devient :

$$V = V_e + N.I^{-n} .X + R_p(X).I \quad (IV.10)$$

IV.1.2 Critère de Dhahbi, Beroual et Krahenbuhl [41]

N. Dhahbi et al proposent un nouveau critère analytique de propagation de la décharge faisant intervenir l'impédance équivalente d'un circuit électrique simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite (Fig.IV.9).

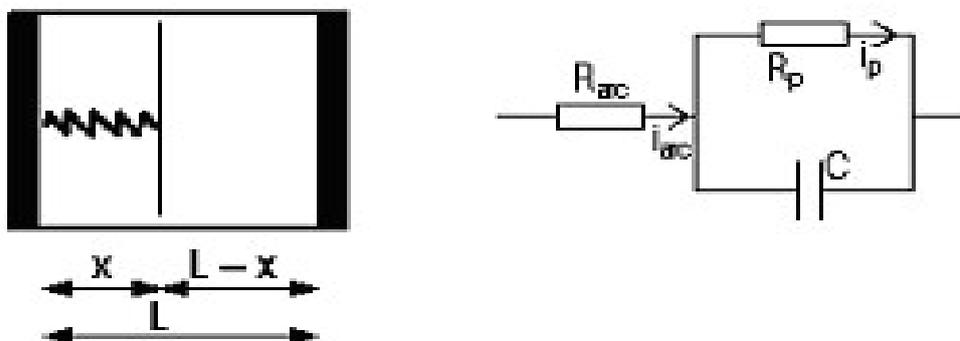


Fig.IV.9 : Modèle d'isolateur pollué et son circuit équivalent correspondant

En utilisant comme condition nécessaire à la propagation de l'arc $\frac{d|z_{eq}|}{dx} \leq 0$

En effet, les auteurs [44, 45] trouvent un autre critère tel que:

$$E_a \leq \frac{E_p}{\sqrt{a}} \tag{IV.11}$$

Avec : $a = 1$, car $a=1 + \omega^2 \rho_p \varepsilon^2$

ω et ε représentent respectivement la fréquence de la tension d'alimentation et la permittivité diélectrique du milieu polluant.

IV.1.3 Modèle de N. Dhahbi et A. Beroual [42, 43, 44, 45]

De ce modèle, Dhahbi et A. Beroual considèrent que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme indiqué à la (Fig.IV.10) R_i , C_i , L_i et V_i sont respectivement la résistance, la capacité, l'inductance et la tension correspondant à chaque cellule nouvellement créée représentant un nouveau déplacement partiel de l'arc. La résistance R_p représente la résistance de la couche de pollution.

Pour décrire la propagation de l'arc, ce modèle utilise comme caractéristique fondamentale le critère d'impédance. Ainsi, les auteurs ont trouvé que les effets de l'inductance du canal de la décharge peuvent être négligés. La forme d'onde de la tension appliquée a une influence directe sur les caractéristiques de contournement de l'isolateur pollué.

La variation de la résistance est calculée par l'utilisation de l'équation de Mayer, la capacité est obtenue par approximation sphérique, et concernant l'inductance du canal de la décharge, les auteurs ont utilisé les simplifications proposées par I. Fofana et A. Beroual.

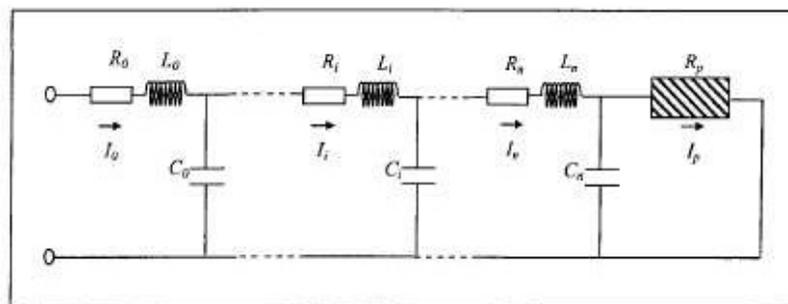


Fig.IV.10 : Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge de N. Dhahbi et A. Beroual

Conclusion :

Le choix entre les différents modèles techniques d'essais est individuel, mais il doit être fait d'une manière suffisamment rigoureuse afin d'être adopté comme essai standard.

En ce qui concerne les nombreuses recherches qui ont été effectuées afin de modéliser le processus d'arc sur les surfaces conductrices, on peut conclure:

- ♦ Plusieurs et différents modèles ont été employés afin de déterminer le gradient et les paramètres statiques n et N de l'arc électrique.
- ♦ Presque tous les modèles statiques et dynamiques sont basés sur le concept d'Obenaus.
- ♦ Les différentes investigations ont employé une variété de valeurs des composantes d'arc n et N constantes, et la gamme des valeurs utilisées est significative.
- ♦ Le but des modèles statiques est de calculer la tension d'arc critique bien qu'ils ne puissent pas jusqu'ici déterminer l'évolution temporelle des variables d'arc.
- ♦ Le phénomène de contournement sur les isolateurs pollués sous la tension alternative (AC), peut se produire quand la tension appliquée est à proximité de sa valeur critique, et la plupart des investigateurs ont trouvé qu'il est nécessaire que la tension soit suffisante pour le ré-allumage de l'arc. Cette condition de développement d'arc a été déterminée expérimentalement.
- ♦ Les modèles dynamiques sont basés sur le rapport de vitesse et le critère de propagation, pour chacun d'eux, plusieurs modèles limités ont été présentés jusqu'ici et employés dans la littérature.
- ♦ Très peu de modèles dynamiques ont été présentés pour étudier des phénomènes d'arc sur les isolateurs pollués et que tous ces modèles se servent de l'équation de Mayer.

Le chapitre suivant fera l'objet de la présentation de notre travail qui consiste à étudier l'influence du mode de distribution non uniforme et uniforme de la pollution sur la tension de contournement d'un isolateur de laboratoire en considérant, comme paramètre essentielle la longueur de la conductivité des différentes couches de pollution, leur position par rapport aux électrodes ainsi que la polarité de la tension.

V Partie expérimentale

V.1 Introduction

L'étude du comportement des isolateurs recouverts de pollution au laboratoire rend la tâche plus facile aux chercheurs. Ainsi, il est possible d'étudier en tout temps l'impact de l'accumulation de la pollution sur l'isolation, et cela sous conditions environnementales et expérimentales systématiques.

Souvent la répartition de la pollution sur les isolateurs réels sous tension est non uniforme; cette distribution est due essentiellement aux profils complexes des isolateurs ainsi qu'aux phénomènes atmosphériques (vent, pluie,...).

Ce chapitre décrit les techniques expérimentales utilisées pour étudier les performances d'un isolateur plat en verre sous tension alternative.

Les paramètres essentiels considérés lors de nos essais se résument à la non uniformité de distribution des couches de pollution par rapport aux électrodes, aux dimensions des zones de pollution et à la visualisation de l'évolution du phénomène de la décharge électrique sur la surface de la plaque isolante en verre polluée.

V.2 Techniques expérimentales

Le model expérimental est une plaque isolante en verre, de forme rectangulaire d'une longueur de 30cm et d'une largeur de 20cm. Elle est munie de deux électrodes en papier Aluminium qui y adhèrent parfaitement, ils sont collées à la plaque de verre d'une manière à avoir un bon contact. On pose sur cette dernière les électrodes d'essai, en branchant l'une des électrodes à la borne haute tension et l'autre à la terre.

La distance inter-électrode est fixée à $d=10\text{cm}$ durant tous les essais.

V.2.1 Dispositif expérimental [45]

La figure (V.1) représente le dispositif expérimental du laboratoire des diélectriques de l'Université Abderrahmane MIRA de Bejaia. Il est constitué d'un circuit d'alimentation (transformateur 0.08A/135kV), d'un modèle expérimental (isolateur plat en verre), et d'un dispositif de mesure ; le dispositif expérimental répond aux exigences de la publication CEI160/1.

Les éléments qui constituent le dispositif sont schématisés sur la **Figure (V.1)**

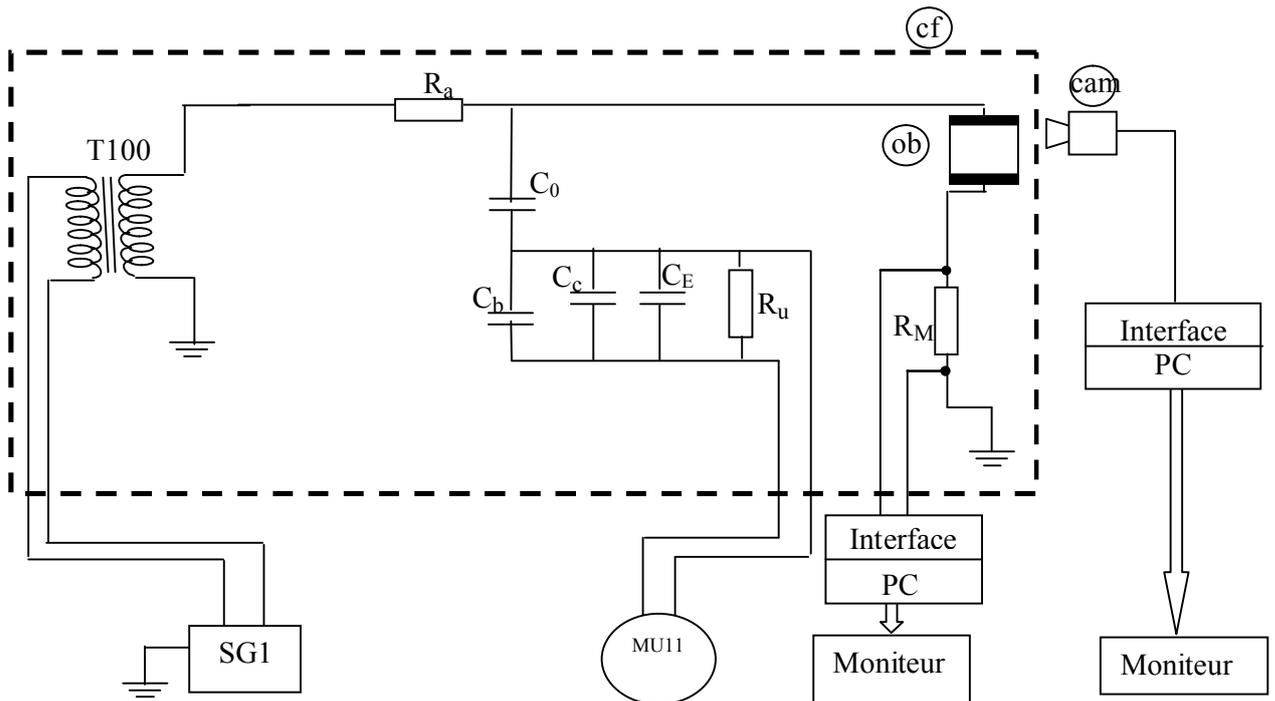


Fig.V.1 : Schéma électrique du dispositif expérimental

T100 : Transformateur 0,08 A/135kV ;

Ra : Résistance d'amortissement : 160k Ω ;

C₀ : Capacité haute tension du diviseur capacitif ;

ob : Objet d'essai (isolateur sous pollution) ;

R_M : Résistance de mesure de courant de fuite: 100 Ω ;

cam : Caméscope ;

MU11 : Voltmètre de crête ;

SG1 : Commande de l'alimentation du transformateur ;

cf : Cage de Faraday ;

C_E : Capacité d'entrée de MU11 ≤ 50 pF ;

C_C : Capacité du câble coaxial ;

C_b : Capacité basse tension du diviseur capacitif ;

R_U : Résistance d'entrée de MU11 : 4,24M Ω ;

V.2.2 Circuit d'alimentation

Il est constitué d'un transformateur d'essai (0.08A/135kV, 8kVA), dont le primaire est relié à un transformateur de réglage (autotransformateur intégré dans SG1), permettant d'ajuster la tension à la valeur désirée.

V.2.3 Circuit de mesure de la tension appliquée

La tension d'essai est mesurée à l'aide d'un diviseur de tension capacitif relié à un voltmètre de crête, ce diviseur est constitué d'une capacité haute tension en série avec un ensemble de capacités dont les capacités des connexions, capacité du câble coaxial et la capacité d'entrée des appareils de mesure, il permet de diviser la tension réelle de contournement par 556. Le voltmètre de crête à affichage numérique permet la lecture de la tension de contournement réduite en la mémorisant automatiquement pendant quelques secondes.

V.2.4 Visualisation de l'arc

A l'aide d'un caméscope numérique, La naissance, la forme et la propagation de l'arc peuvent être visualisées.

V.2.5 Mode opératoire

Avant chaque essai, l'isolateur doit être bien rincé avec une eau dont la conductivité est inférieure à la conductivité de la couche de pollution, puis séché à l'aide du papier absorbant. Les électrodes sont fixées sur la plaque isolante.

Pour éliminer les espaces d'air entre les électrodes et la plaque isolante, des électrodes en papier aluminium sont collées avec du mazoute, pour assurer un bon contact avec la surface de la plaque.

Ce dispositif expérimental se trouve placé à environ un mètre du sol et à une distance suffisamment grande du transformateur d'essai, pour éviter tout phénomène parasite dû au sol et au bobinage du transformateur.

V.2.6 Préparation de la solution polluante [45]

Les méthodes de préparation de la pollution artificielle pour les isolateurs à courant alternatif, sont étudiées par le groupe GT09 du CT36 de la CEI en coopération avec le groupe GA 33.04.04 de la CIGRE.

La solution polluante est obtenue à partir d'un mélange de 40 g de kaolin dissout dans un litre d'eau distillée. La variation du degré de pollution est obtenue en variant la concentration du sel (NaCl) dans l'eau. Ainsi, nous fixons la conductivité de la solution ionique ramenée à la température normale de 20°C.

Les solutions sont réajustées avant chaque début d'une série d'essai, afin de garder les mêmes caractéristiques de la solution. Les conductivités superficielles qui ont été adoptées sont : (5.2, 3.33, 2.04, 1.41, 0.02 μS)

V.2.7 Procédé d'application de la pollution

Au cour du chapitre III on a cité les différents modes de configuration de la pollution, dans nos essais on a adopté la configuration non uniforme transversale, qui consiste à appliquer deux couches de pollution de conductivité différente et de largeur différente.

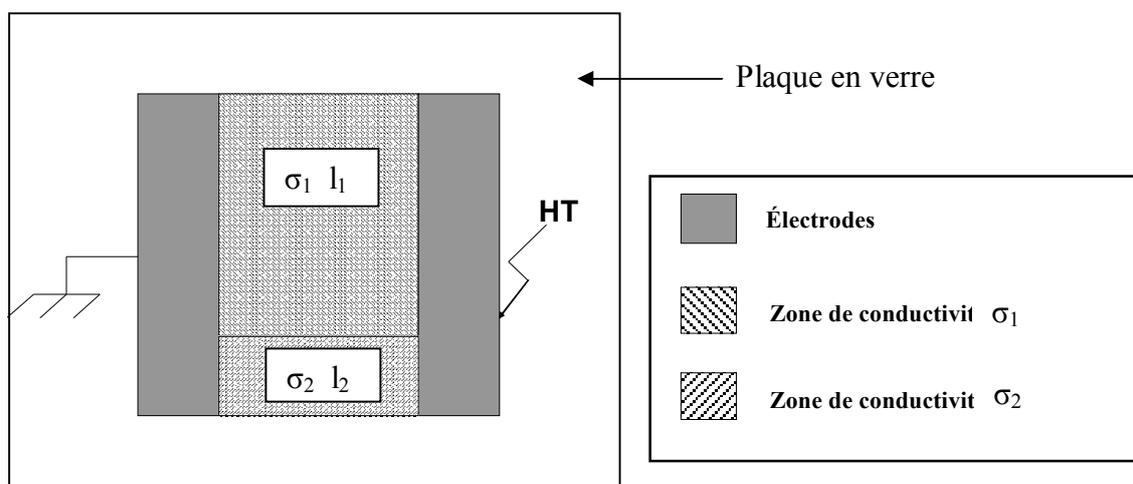
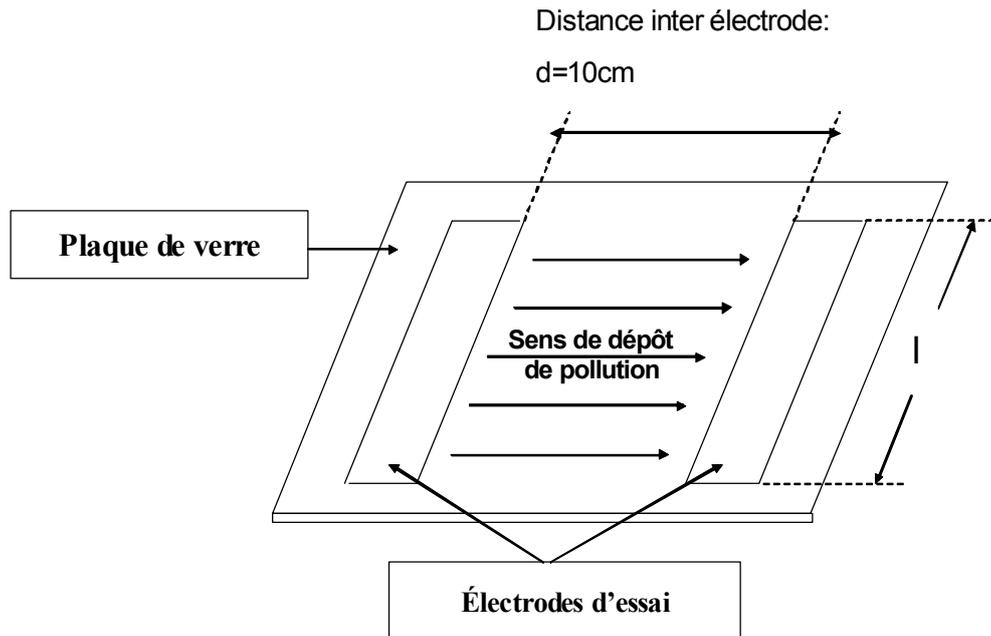


Figure V.3 : Configuration de la pollution sur la plaque d'essai

La figure V.3 illustre la manière de préparer l'objet d'essai. L'application de la pollution est effectuée par le balayage de celle-ci à l'aide d'une éponge remplie de 10ml de la solution polluante, sur la surface inter-électrode de la plaque isolante en verre, en suite on applique immédiatement la tension d'essai, pendant que la plaque est humide.

Pour assurer une bonne reproductibilité des couches polluantes, nous avons gardé durant tous les essais la même manière de polluer et une même quantité de la solution à injecter dans l'éponge qui est maintenue à 10ml.



FigureV.4 : Plaque d'essai avec le sens d'application de la pollution

V.2.8 Procédé d'essai

Après préparation de l'objet d'essai, nous procédons à la mesure de la tension de contournement pour les différents degrés de sévérité de pollution et disposition de la pollution. La mesure de la tension de contournement retenue pour chaque cas de conductivité et chaque type de distribution de la pollution qui est la moyenne arithmétique de dix essais.

V.2.9 Mesure des conductivités volumiques et superficielles

Pour chaque conductivité volumique mesurée à l'aide d'un conductimètre qui sont (4470, 2100, 1150, 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$) on a mesuré la conductivité superficielle partielle dans plusieurs points sur la surface de la plaque isolante en verre, à l'aide d'un conductimètre à sonde mobile, représenté sur la figure (II.1) en chapitre I, et on a vérifiée que les écarts maximaux sont conformes aux exigences de la publication CEI 60-1, et 60-2 [45] qui sont : le plus grande écart entre la valeur moyenne et les valeurs mesurées, ne dépasse pas 10%. Pour chaque essai la conductivité superficielle a été déterminée à partir de 20 mesures effectuées sur l'ensemble de la surface polluée de la plaque isolante en verre.

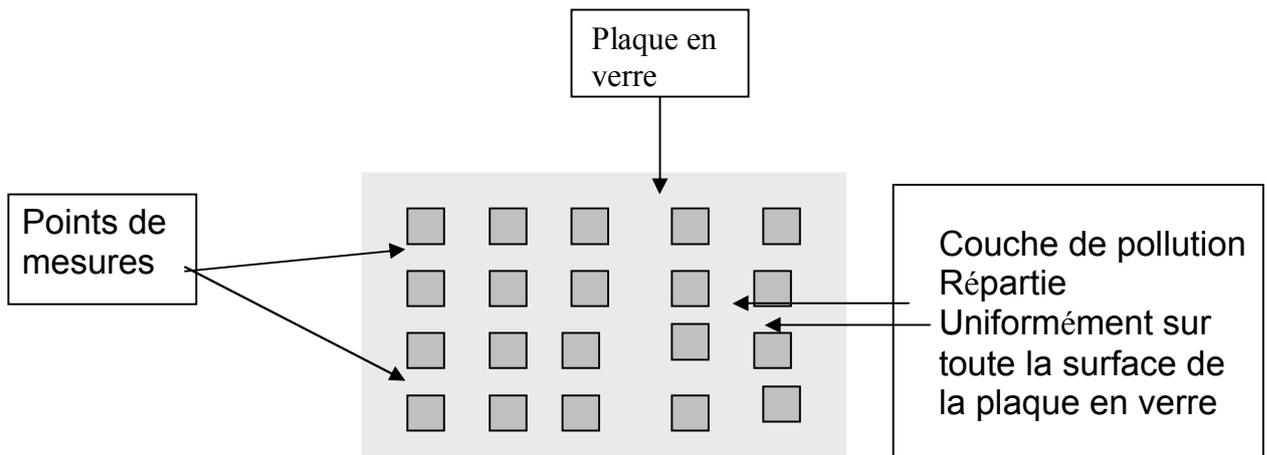


Figure V.5 : Mesure des conductivités superficielles

Les conductivités superficielles sont respectivement égales à 5.2, 3.33, 2.04, 1.44, et à $0.02\mu\text{S}$. A chaque essai la conductivité est vérifiée et ajustée afin de garder les mêmes caractéristiques de la pollution.

Les résultats de mesure des conductivités superficielles sont réunis dans le tableau [1 annexe](#)

V.2.10 Correction des résultats en fonction des conditions atmosphériques [46]

La tension de contournement des isolateurs électriques de haute tension est étroitement liée aux conditions climatiques, à savoir, la température, la pression et l'humidité de l'air environnant.

La valeur de la tension de contournement, dans les conditions normales de température ambiante, de pression et d'humidité ($\theta_0 = 20^\circ \text{C}$, $P_0 = 100\text{KPa}$ et $H_0 = 11\text{g/m}^3$), est donnée par la relation suivante :

$$U_{c0} = \frac{Kh}{Kd} U_c$$

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

U_{c0} : Tension de contournement dans les conditions normales de température θ_0 , de pression P_0 , et d'humidité H_0 .

Kd : Facteur de correction relatif à la température et à la pression ;

Kh : Facteur de correction relatif à l'humidité.

Facteur de correction Kd :

$$Kd = \frac{p}{100} \left[\frac{273 + 20}{273 + \theta} \right]$$

Si la pression atmosphérique P est exprimée en (kPa) et la température θ en ($^{\circ}C$), Kd est donné par :

$$Kd = 2.93 \frac{P}{273 + \theta}, P(kPa) \text{ et } \theta(^{\circ}C)$$

Facteur de correction Kh :

Pour calculer le facteur de correction Kh, relatif à l'humidité, une transformation de l'humidité relative exprimée en % vers l'humidité absolue exprimée en (g/m^3), est nécessaire, car Kh est donné en fonction de cette dernière.

L'abaque de la **Figure (V. 6)**, donne la transformation de l'humidité relative à l'humidité absolue, en fonction de la température. La valeur de l'humidité absolue lue sur l'abaque V.3 est reportée sur l'abaque de la **Figure (V. 7)**, pour déduire Kh.

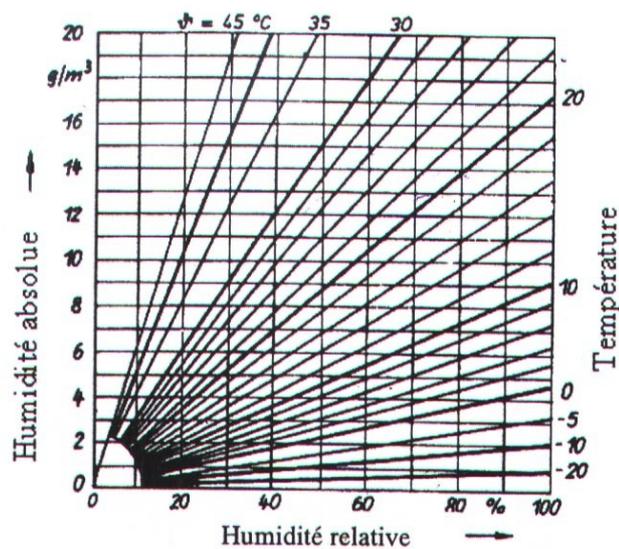


Fig.V6 : Transformation de l'humidité relative en humidité absolue [46]

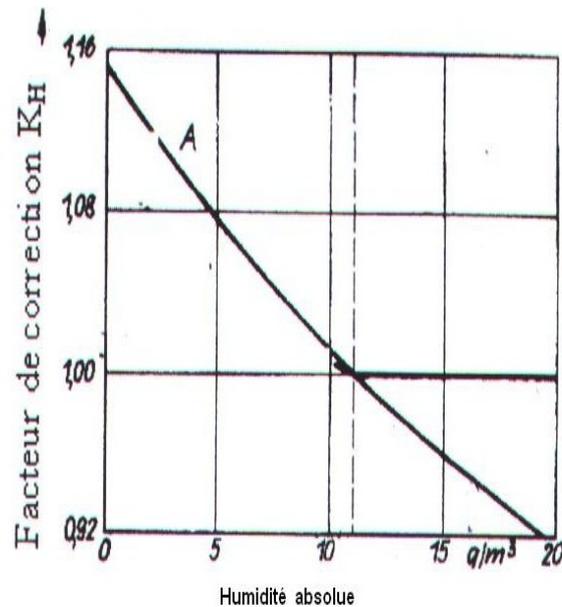


Fig.V.7: Facteur de correction en Fonction de l'humidité Absolue [46]

V.2.11 Reproductibilité des résultats [45]

Pour évaluer le degré de fiabilité de nos résultats on a calculé l'écart type de chaque série d'essai, et nous vérifions s'il est inclus dans l'intervalle de tolérance donné les différentes publications de la CEI.

V.3 Résultats d'essais et interprétations

V.3.1 : Contournement des surfaces parallèles différemment polluées

V.3.1.1 : Tension de contournement

Dans un premier temps on a fixé les conductivités et on a fait varier par pas de 4 cm les largeurs de la bande de pollution la plus conductrice (l_2 , $\sigma_2 = 5.2\mu\text{S}$), et le reste est pollué avec les conductivités ($\sigma_1 = 3.33, 2.04, 1.44$ et $0.02\mu\text{S}$).

Les courbes qui suivent représentent la tension de contournement, en fonction du rapport de la largeur de la zone fortement polluée ($\sigma_2 = 5.2\mu\text{S}$) sur la largeur totale des électrodes.

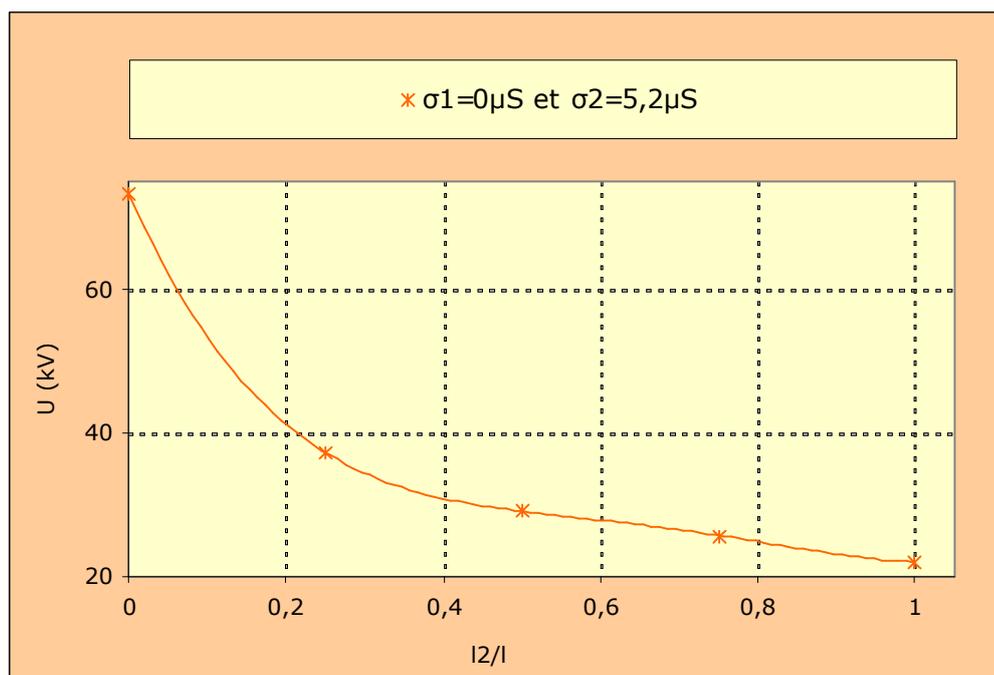


Figure.V.8 : Tension de contournement en fonction du rapport de la largeur de la zone fortement polluée ($\sigma_2 = 5,2 \mu\text{S}$) sur la largeur totale des électrodes

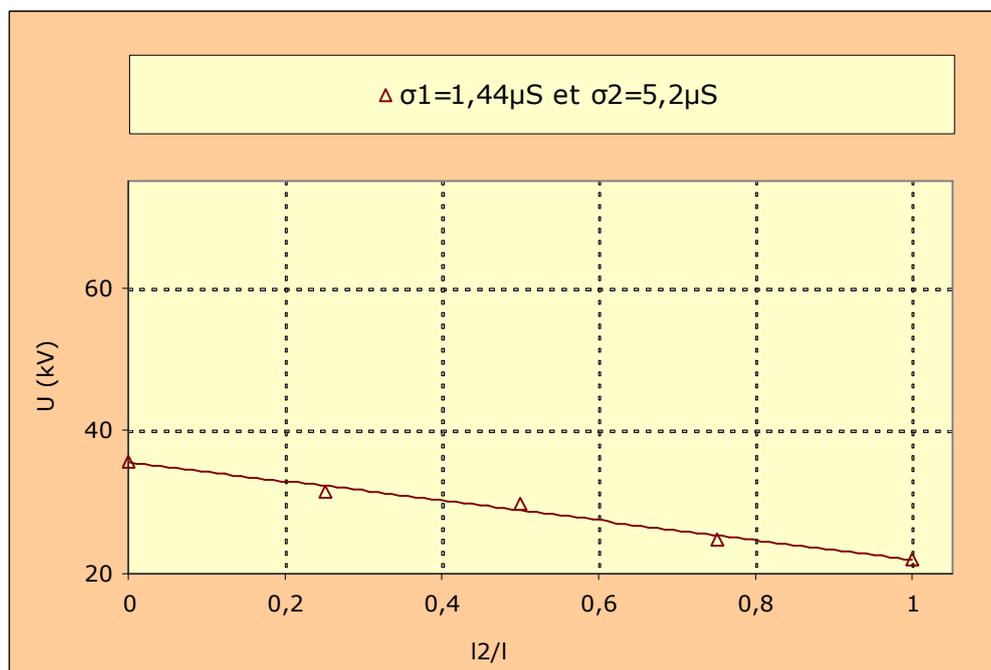


Figure.V.9 : Tension de contournement en fonction du rapport de la largeur de la zone fortement polluée ($\sigma_2 = 5,2 \mu\text{S}$) sur la largeur totale des électrodes

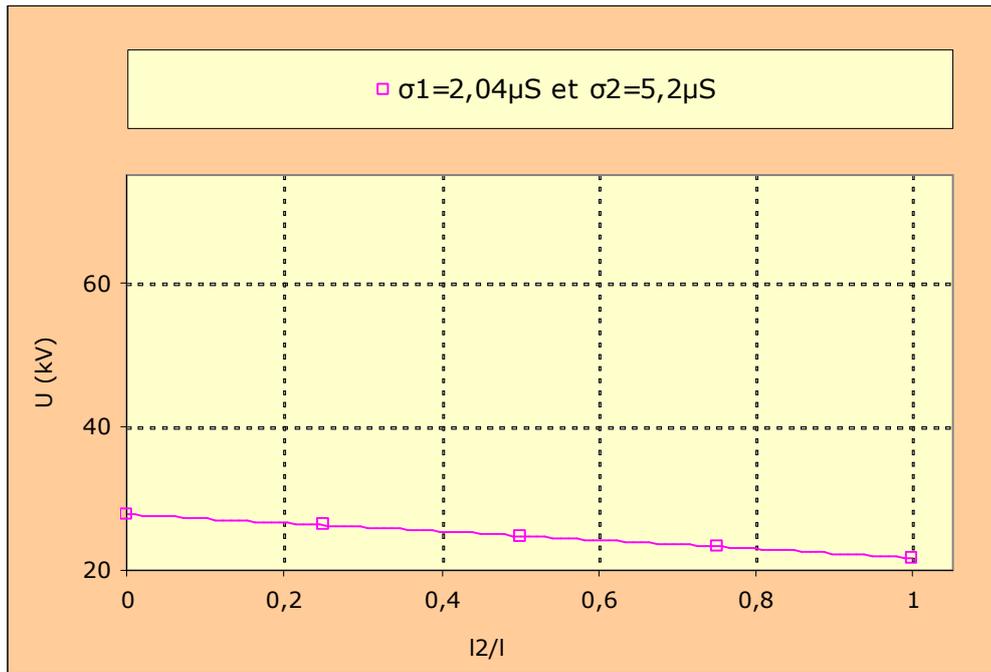


Figure.V10 : Tension de contournement en fonction du rapport de la largeur de la zone fortement polluée ($\sigma_2 = 5.2 \mu\text{S}$) sur la largeur totale des électrodes

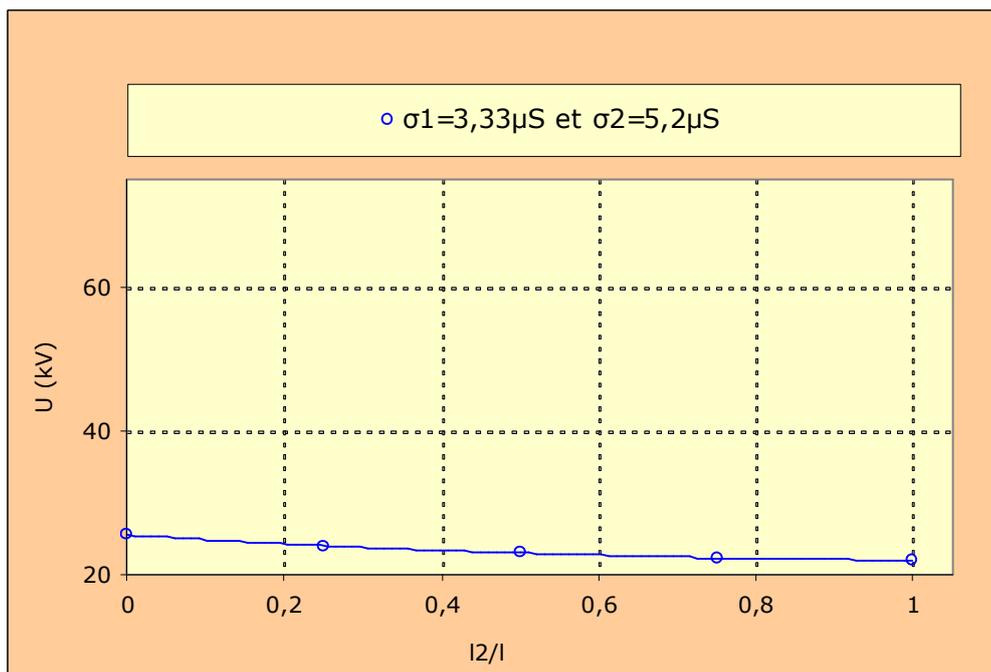


Figure.V11 : Tension de contournement en fonction du rapport de la largeur de la zone fortement polluée ($\sigma_2 = 5.2 \mu\text{S}$) sur la largeur totale des électrodes

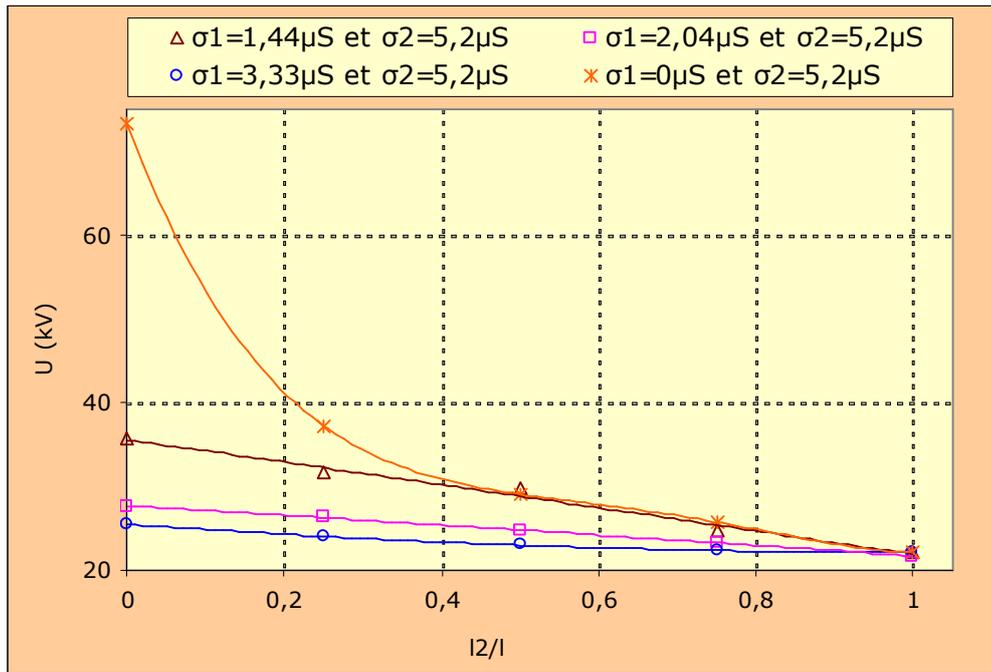
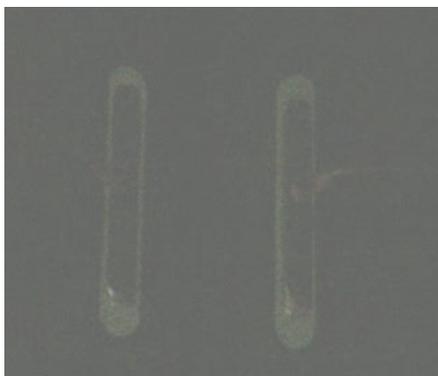


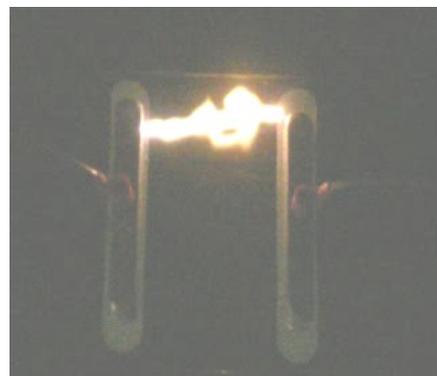
Figure.V12 : Tension de contournement en fonction du rapport de la largeur de la zone fortement polluée ($\sigma_2 = 5.2 \mu S$) sur la largeur totale des électrodes

V.3.1.2 : Visualisation et observation de la forme de l'arc :

A : Forme de l'arc à l'état propre et sec ($l_1=16cm$ et $l_2=0cm$)

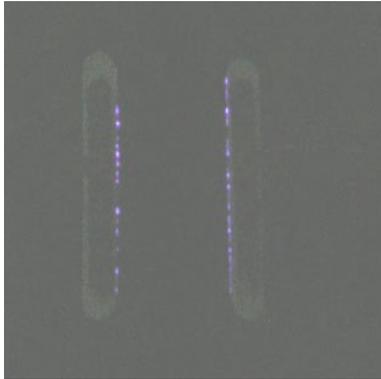


FigV.13.1 : pas d'apparition de décharges partielles



FigV.13.2 : Contournement de la surface isolante à l'état sec.

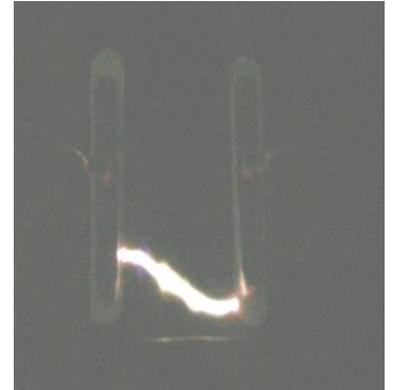
Figures V.13 : Processus de contournement de la plaque isolante polluée avec ($l_1=16cm, \sigma_1=0.02 \mu S$ et $l_2=0cm, \sigma_2=5.2 \mu S$)

B : Forme de l'arc en fonction des conductivités superficielles ($l_1=12\text{cm}$ et $l_2=4\text{cm}$)

FigV.14.1: Naissance des décharges partielles au niveau de l'électrode terre



FigV.14.2 : Développement des zones sèches et apparition des arcs locaux



FigV.14.3 : Contournement de la surface isolante.

FiguresV.14 : Processus de contournement de la plaque isolante polluée avec ($l_1=12\text{cm}$, $\sigma_1=3.33\mu\text{S}$ et $l_2=4\text{cm}$, $\sigma_2=5.2\mu\text{S}$)

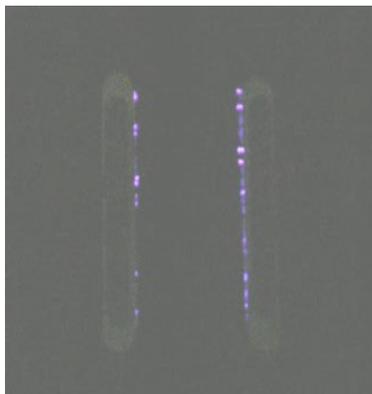
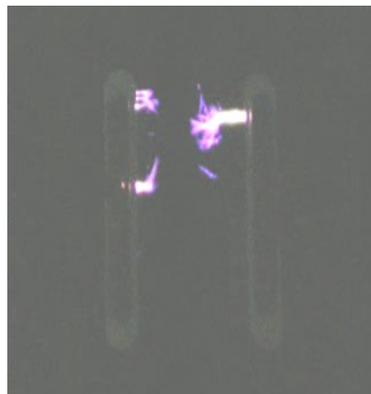
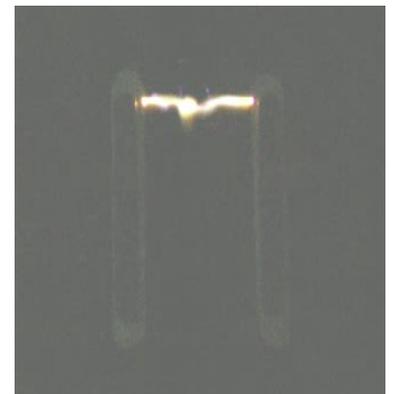
C : Forme de l'arc en fonction des conductivités superficielles ($l_1=8\text{cm}$ et $l_2=8\text{cm}$)

Fig.V.15.1: Naissance des décharges partielles au niveau de l'électrode terre

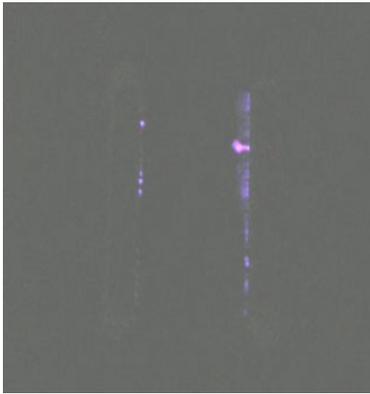


FigV.15.2 : Développement des zones sèches et apparition des arcs locaux



FigV.15.3 : Contournement de la surface isolante.

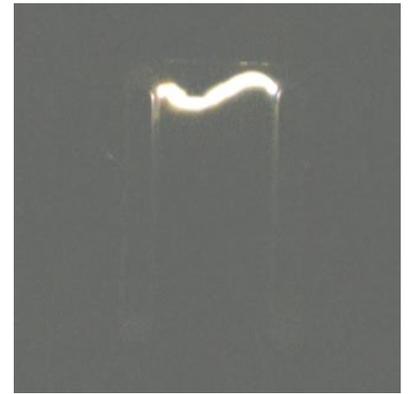
FiguresV.15 : Processus de contournement de la plaque isolante polluée avec ($l_1=8\text{cm}$, $\sigma_1=2.04\mu\text{S}$ et $l_2=8\text{cm}$, $\sigma_2=5.2\mu\text{S}$)

D : Forme de l'arc en fonction des conductivités superficielles ($l_1=8\text{cm}$ et $l_2=8\text{cm}$)

FigV.16.1: Naissance des décharges partielles au niveau de l'électrode terre



FigV.16.2 : Développement des zones sèches et apparition des arcs locaux



FigV.16.3 : Contournement de la surface isolante.

FiguresV.16 : Processus de contournement de la plaque isolante polluée avec ($l_1=8\text{cm}$, $\sigma_1=1.44\mu\text{S}$ et $l_2=8\text{cm}$, $\sigma_2=5.2\mu\text{S}$)

V.3.1.3 : Interprétation des résultats

La **Figure (V.12)** représente l'allure de la tension de contournement en fonction du rapport (l_2/l_1) de la largeur de la zone fortement polluée ($\sigma_2 = 5.2\mu\text{S}$) sur la largeur totale des électrodes.

L'analyse rapide de ses résultats indique que la tension de contournement est inversement proportionnelle à la conductivité de la pollution.

Il en résulte que la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité suit une fonction de puissance de forme $V = K\sigma^{-\alpha}$, [15]

Cette relation unissant V et σ montre que la tension de contournement diminue avec l'augmentation de la conductivité.

Sur la **Figure (V.8)** on a constaté que l'isolateur est très rigide à l'état sec ($l_2=0$, $\sigma_1 \approx 0\mu\text{S}$), la tension de contournement est plus élevée, par contre dans le cas de pollution uniformément ($l_2=l$) le champ est plus intense, cela est due à l'assèchement non uniforme de la couche électrolytique, ce qui influe sur la diminution de la tension de contournement. L'ensemble des courbes montrent que la tension de contournement de la plaque isolante diminue avec l'augmentation de la bande de pollution la plus conductrice jusqu'à une

valeur minimale de : $U_{c0}=22.05\text{kV}$ correspondante à une surface uniformément polluée avec la plus grande conductivité superficielle : $\sigma_2=5.2\mu\text{S}$.

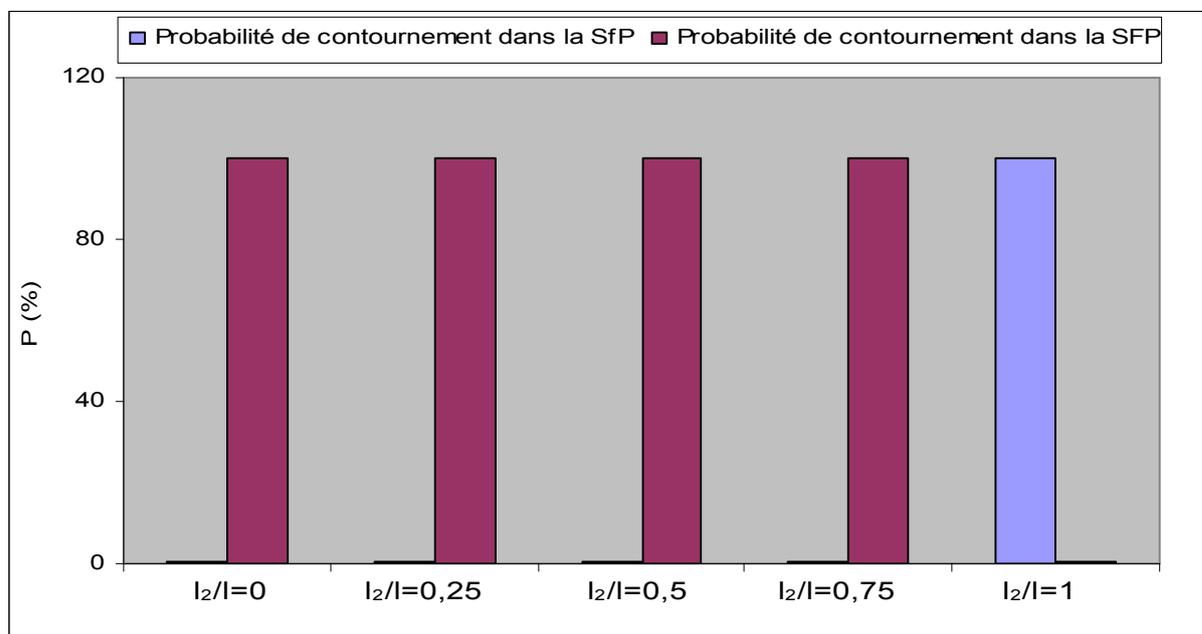
A l'état sec on a remarqué un claquage direct dans l'air qui est représenté sur les images des **Figures (V.13.1)** et **(V.13.2)**, par contre dans l'état pollué on a remarqué l'apparition des arcs sur la surface inter-électrode qui se développent pour avoir un contournement comme le montre le reste des images.

Les images des **Figures (V.14.1)** et **(V.15.1)** montrent que la naissance d'arcs partiels au niveau de l'électrode terre est plus rapide pour une couche de pollution plus conductrice.

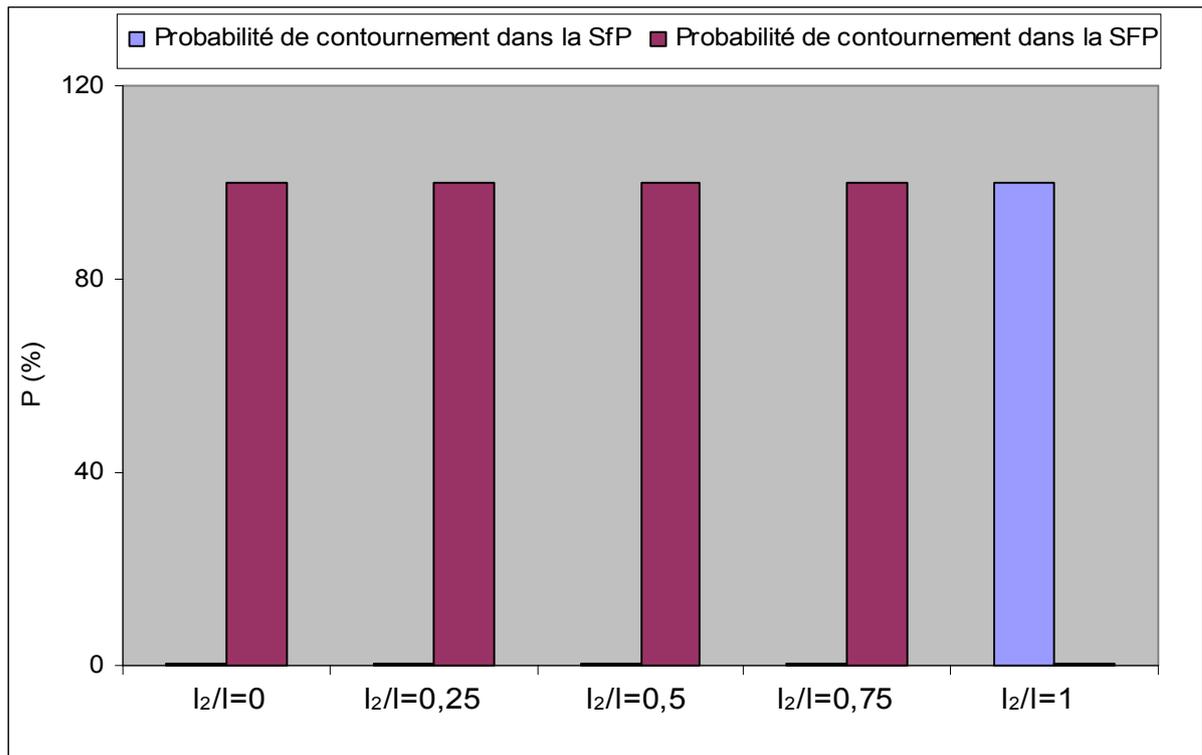
La comparaison entre les images de la **Figure (V.15.1)** et de la **Figure (V.16.1)** montre que la naissance d'arc partiel est au niveau de la zone fortement polluée côté terre, puis ces arcs apparaissent du côté haute tension de la même zone, puis de côté de l'électrode terre de la zone faiblement polluée, et enfin du côté de l'électrode haute tension de la zone faiblement polluée.

V.3.1.4: Probabilité de contournement des surfaces parallèles différemment polluées

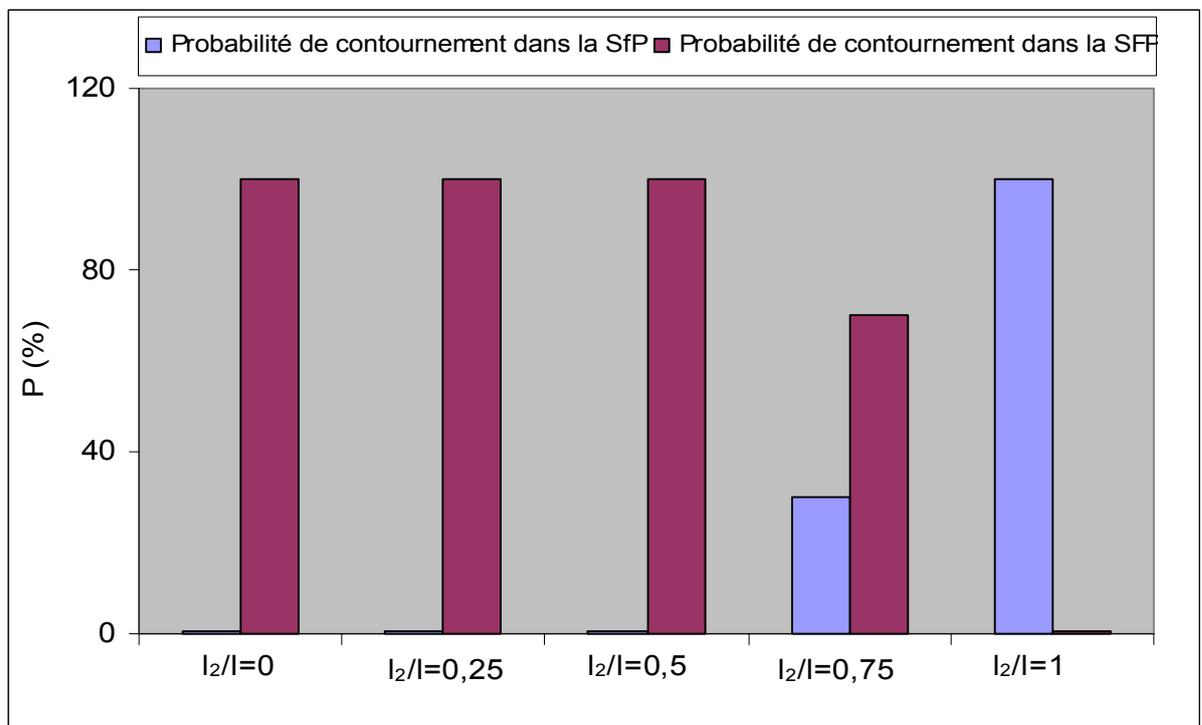
Les figures V.17 : (a, b, c, d) donnent l'allure de la probabilité d'apparition de la décharge dans la zone fortement polluée SFP et dans la zone faiblement polluée SfP, établit pour chaque rapport de conductivité (σ_1/σ_2)



FigureV.17.a : Probabilité de contournement dans les zones faiblement et fortement polluées en fonction des rapports des largeurs pour le rapport des conductivités ($\sigma_1/\sigma_2=0$)



FigureV.17.b : Probabilité de contournement dans les zones faiblement et fortement polluées en fonction en fonction des rapports des largeurs pour le rapport des conductivités ($\sigma_1/\sigma_2=0,27$)



FigureV.17.c : Probabilité de contournement dans les zones faiblement et fortement polluées en fonction des rapports des largeurs pour le rapport des conductivités ($\sigma_1/\sigma_2=0,39$)

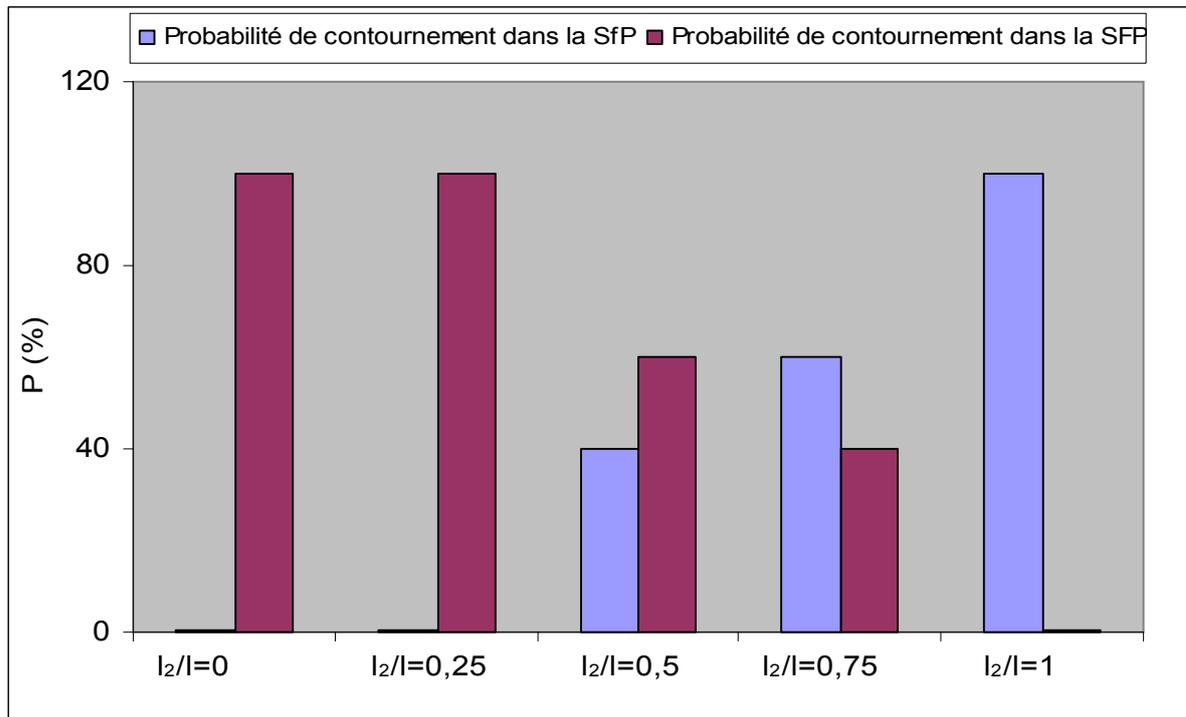


Figure V.17.d : Probabilité de contournement dans les zones faiblement et fortement polluées en fonction des rapports des largeurs pour le rapport des conductivités ($\sigma_1/\sigma_2=0,64$)

Les figures V.17 : (a, b, c, d) montrent que la probabilité de contournement s'effectue dans la zone fortement polluée est très grande par rapport à celle de la zone faiblement polluée, et dans les deux cas où la conductivité électrique de la surface faiblement polluée sont respectivement 0.02 et 1.44 μS , le contournement s'effectue totalement dans la surface fortement polluée, sauf pour l'essai où la surface inter-électrode est totalement polluée avec une faible conductivité, dans ce cas on aura un contournement dans cette surface qui est faiblement polluée.

On a dans un seul cas où la probabilité de contournement de la surface faiblement polluée dépasse la probabilité de contournement de la surface fortement polluée, et ceci est dans le cas où $\sigma_1 = 3.33\mu\text{S}$ et pour $l_1=12\text{cm}$, cela est dû à sa grande largeur telle que $l_1.\sigma_1$ est supérieur à $l_2.\sigma_2$.

V.3.2 : Contournement des surfaces parallèles différemment polluées séparées par une zone sèche

Dans cette partie, on a fixé les distances des surfaces de la bande polluée de la plaque isolante, avec une zone sèche de 4cm et on a fixé une surface à une conductivité superficielle de $5.2\mu\text{S}$, et on fait varier la conductivité superficielle de la deuxième zone ($5.2, 3.33, 2.04, 1.44$ et $0.02\mu\text{S}$), comme le montre la figure (V.18)

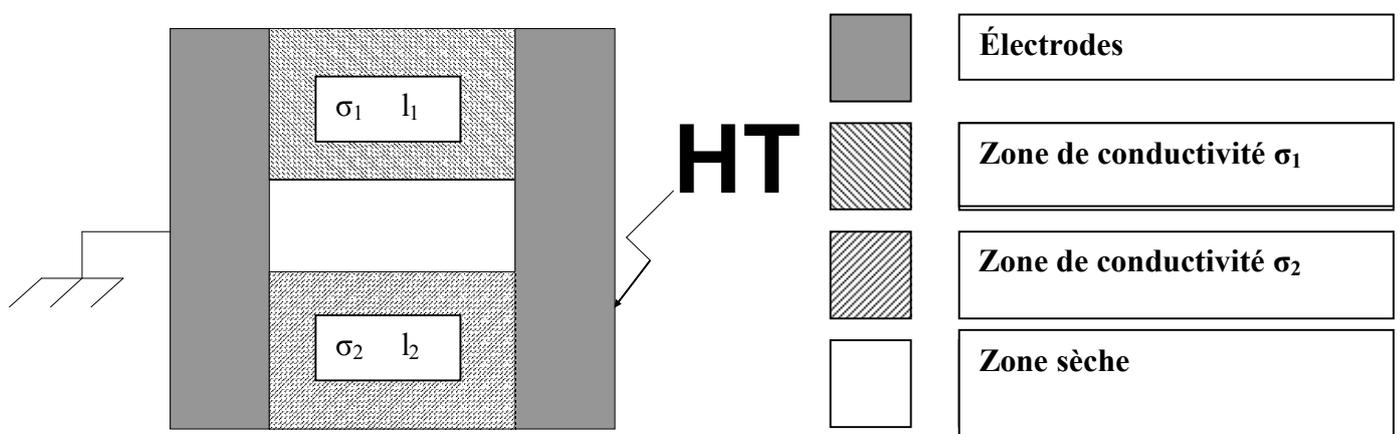


Figure.V.18 : Configuration de la pollution sur la plaque d'essai

V.3.2.1 : Tension de contournement

Les courbes qui suivent représentant la tension de contournement en fonction du rapport des conductivités électriques superficielles ($5.2, 3.33, 2.04, 1.44$ et $0.02\mu\text{S}$) sur la conductivité électrique la plus forte ($5.2\mu\text{S}$).

1^{er} cas : on a fixé la largeur de la bande de pollution à $l=20\text{cm}$, on a pris $l_1=8\text{cm}$ et $l_2=8\text{cm}$ séparées par une surface sèche de 4cm .

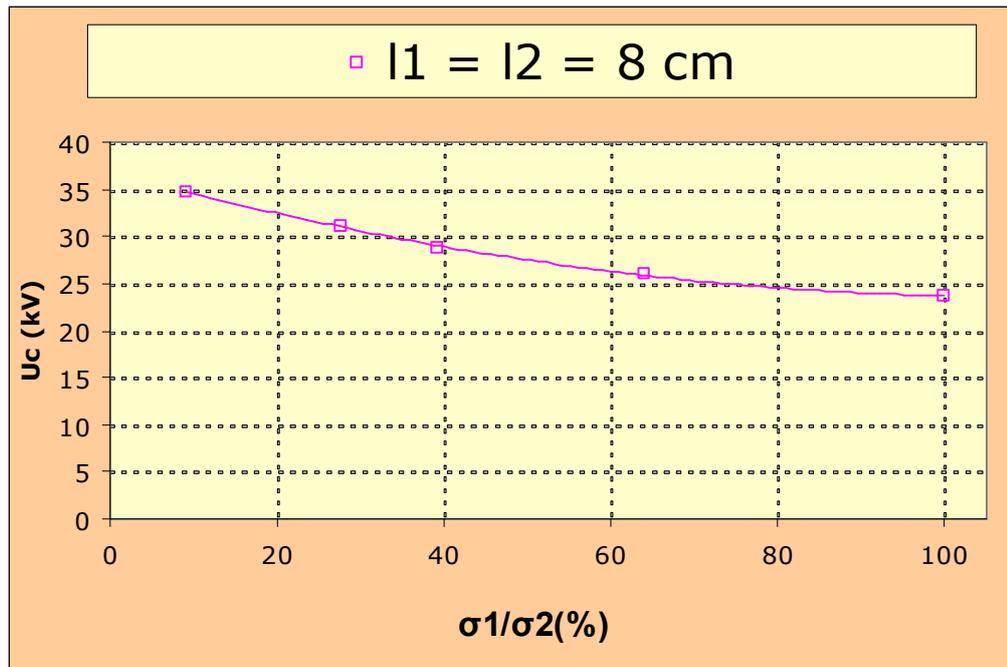


Figure V.19 : Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités
(σ_1/σ_2 (%))

2^{em} cas : on a fixé la largeur de la bande de pollution à $l=12\text{cm}$, on a pris $l_1=4\text{cm}$ et $l_2=4\text{cm}$ séparées par une surface sèche de 4cm .

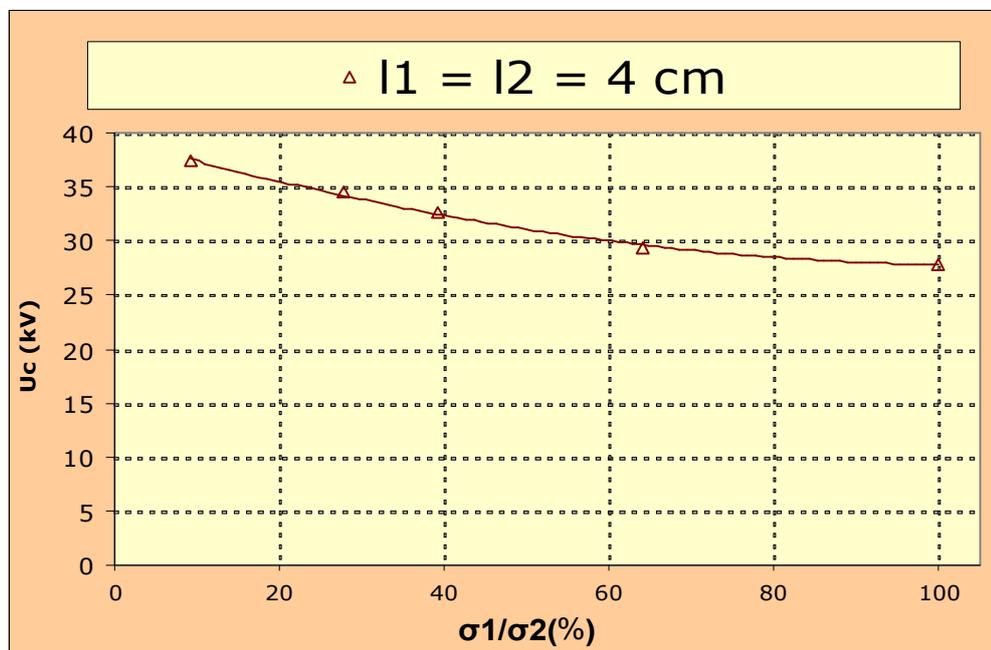
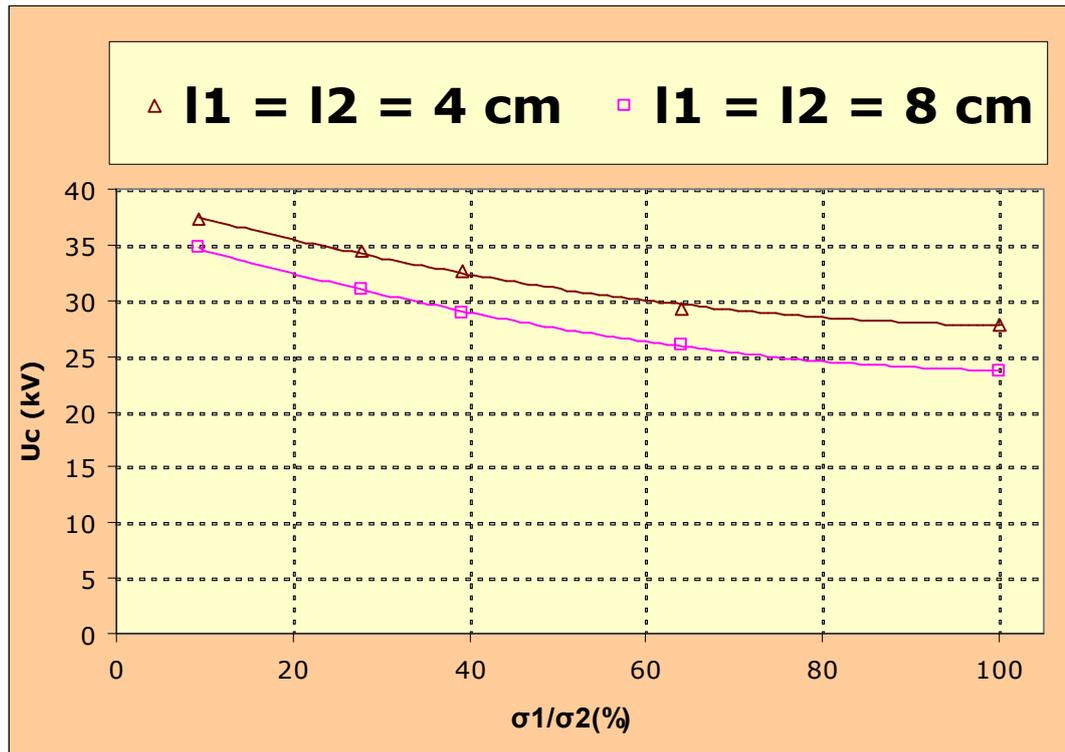


Figure V.20 : Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités
(σ_1/σ_2 (%))



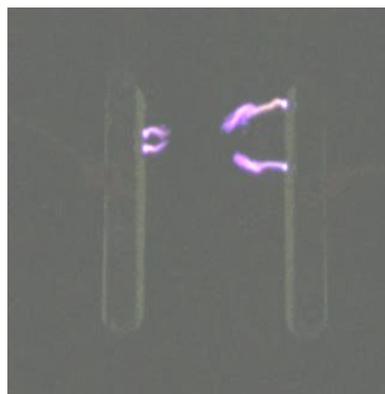
FigureV.21 : Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités (σ_1/σ_2 (%))

V.3.2.2: Visualisation et observation de la forme de l'arc :

A : Forme de l'arc en fonction des largeurs ($\sigma_1=0.02\mu S$ et $\sigma_2=5.2 \mu S$)



FigV.22.1: Naissance des décharges partielles au niveau de l'électrode terre



FigV.22.2 : Développement des zones sèches et apparition des arcs locaux



FigV.22.3 : Contournement de la plaque isolante

FiguresV.22 : Processus de contournement de la plaque isolante polluée pour les largeurs ($l_1=4cm$ et $l_2=4cm$).

B : Forme de l'arc en fonction des largeurs ($\sigma_1=3.33\mu\text{S}$ et $\sigma_2=5.2 \mu\text{S}$)



FigV.23.1: Naissance des décharges partielles au niveau de l'électrode terre



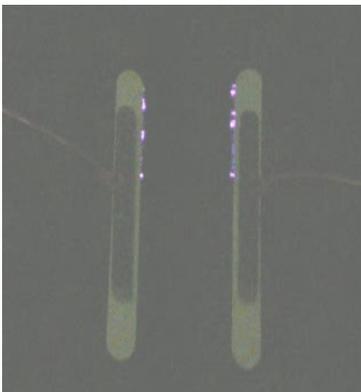
FigV.23.2 : Développement des zones sèches et apparition des arcs locaux



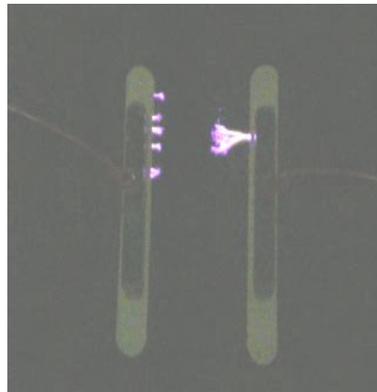
FigV.23.3 : Contournement de la plaque isolante

FiguresV.23 : Processus de contournement de la plaque isolante pollué pour les largeurs ($l_1=4\text{cm}$ et $l_2=4\text{cm}$).

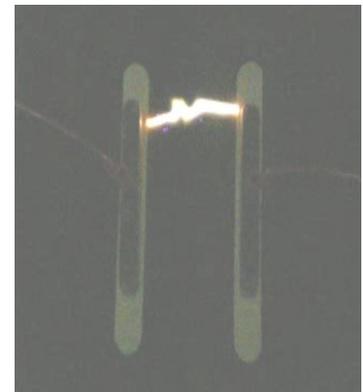
C : Forme de l'arc en fonction des largeurs ($\sigma_1=0.02\mu\text{S}$ et $\sigma_2=5.2 \mu\text{S}$)



FigV.24.1: Naissance des décharges partielles au niveau de l'électrode terre



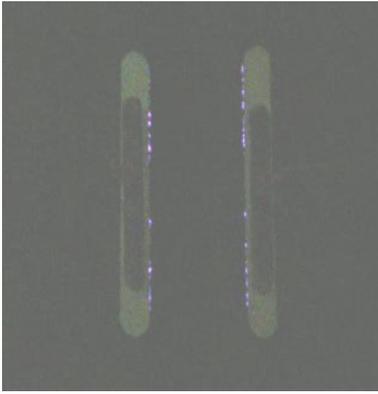
FigV.24.2 : Développement des zones sèches et apparition des arcs locaux



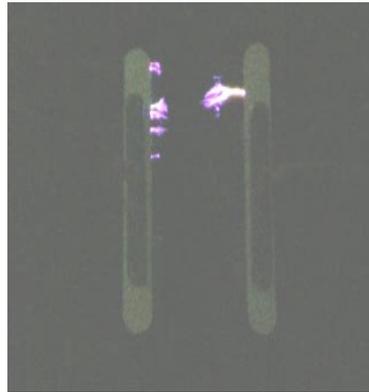
FigV.24.3 : Contournement de la plaque isolante

FiguresV.24 : Processus de contournement de la plaque isolante pollué pour les largeurs ($l_1=8\text{cm}$ et $l_2=8\text{cm}$).

D : Forme de l'arc en fonction des largeurs ($\sigma_1=3.33\mu\text{S}$ et $\sigma_2=5.2 \mu\text{S}$)



FigV.25.1: Naissance des décharges partielles au niveau de l'électrode terre



FigV.25.2 : Développement des zones sèches et apparition des arcs locaux



FigV.25.3 : Contournement de la plaque isolante

FiguresV.25 : Processus de contournement de la plaque isolante polluée pour les largeurs ($l_1=8\text{cm}$ et $l_2=8\text{cm}$).

V.3.2.3: Interprétation des résultats :

La figure (V.19, V.20, V.21) représente la tension de contournement en fonction des rapports des conductivités électriques (σ_1/σ_2) avec présence de zone sèche au milieu des deux surfaces polluées.

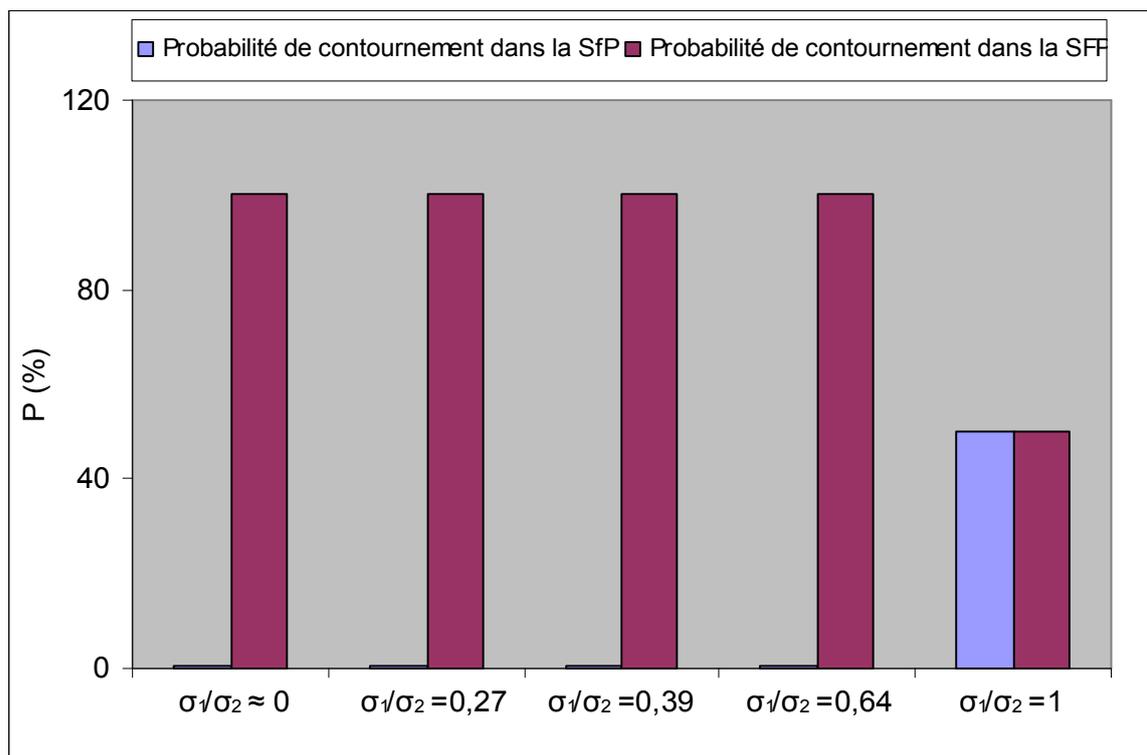
L'analyse des résultats montre que la présence de la bande sèche au milieu des deux surfaces polluées augmente la tension de contournement.

En comparant les deux cas des figures précédentes, on a remarqué que la tension de contournement est plus grande lorsqu'on a utilisé une plaque avec une bande de pollution égale à 12cm en fonction du rapport des conductivités électriques.

La visualisation et l'observation de l'arc sur les **Figures (V.24.1) et (V.25.1)** montrent avec une très grande précision que la naissance d'arcs partiels au niveau de l'électrode terre est plus rapide pour une couche de pollution plus conductrice.

V.3.2.4: Probabilité de contournement des surfaces parallèles différemment polluées séparer par une zone sèche

Les figures V.26 : (a, b) donnent la deuxième famille d'histogrammes obtenue en faisant varier le rapport du conductivité électrique pour les deux cas de configurations précédents ($l_1=l_2=4\text{cm}$, $l_1=l_2=8\text{cm}$)



FigureV26.a : Probabilité de contournement dans les zones faiblement et fortement polluées en fonction de rapport des conductivités ($l_1=l_2=4\text{cm}$)

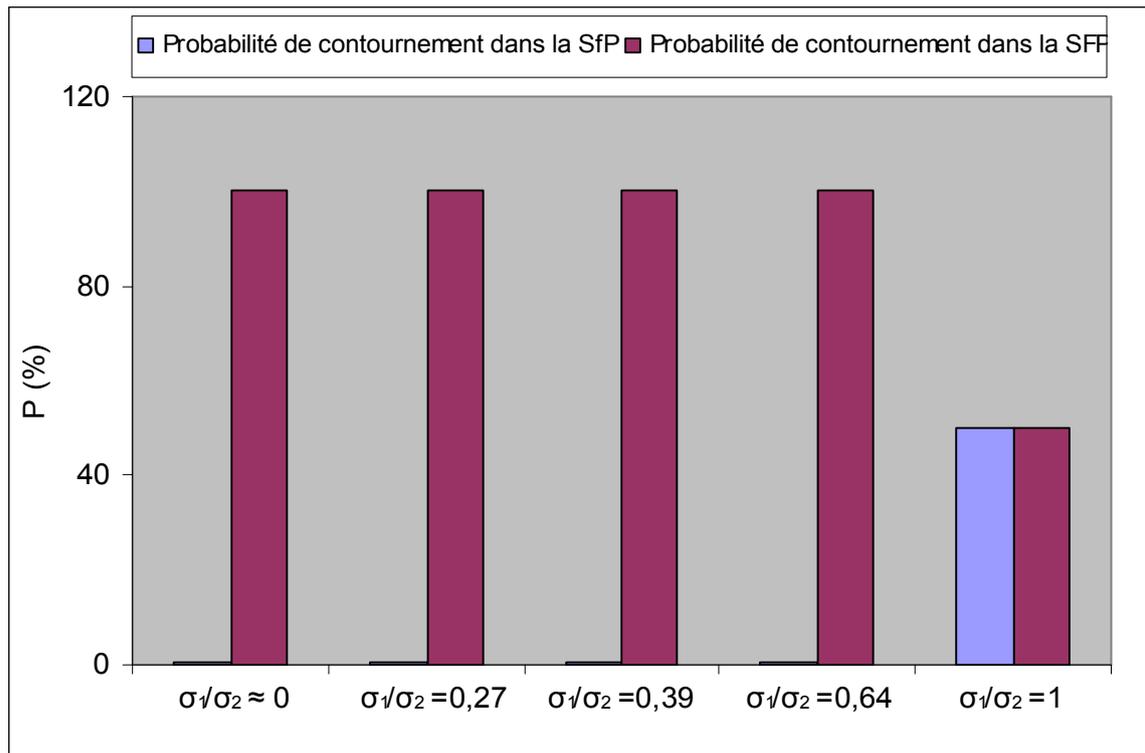


Figure V.26.b : Probabilité de contournement dans les zones faiblement et fortement polluées en fonction de rapport des conductivités ($l_1=l_2=8\text{cm}$)

Les figures V.26 : (a, b) montrent que la probabilité de contournement dans la zone faiblement polluée est nulle, et que le contournement s'effectue totalement dans la surface fortement polluée, du fait que les deux surfaces faiblement et fortement polluées sont égaux ($l_1=l_2$) et que $l_2 \cdot \sigma_2$ est supérieur à $l_1 \cdot \sigma_1$.

V.4 : Conclusion

Les résultats obtenus lors de l'étude de l'influence de la distribution de la pollution sur un isolateur plat en verre sous tension alternative pollué artificiellement nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- l'isolateur propre et sec est plus rigide qu'un isolateur pollué.
- la tension de contournement en fonction de la conductivité suit une loi de fonction décroissante quelque soit la distribution de la pollution.
- la rigidité diélectrique transversale d'un isolateur plat en verre sous des conditions de pollution (pollution non uniforme), le long de sa largeur converge vers une valeur minimale $U_{c0}=22.05 \text{ kV}$, atteinte dans le cas où sa surface totale est uniformément polluée, avec la conductivité électrique la plus élevée $5.2\mu\text{S}$.

- Dans la plus part des cas, le contournement s'effectue au niveau de la zone fortement polluée.
- Dans le cas où deux surfaces polluées sont séparées par une zone sèche, la tension de contournement est inversement proportionnelle à la largeur de ces deux surfaces.
- Les arcs naissent toujours dans le côté terre pour tous les cas considérés.

Tableau 1 de mesure des conductivités volumiques et superficielles

N°	Zone sèche	50 μ S/cm	1150 μ S/cm	2100 μ S/cm	4470 μ S/cm
1	0.01	1.62	2.37	3.26	5.85
2	0.03	1.60	2.13	3.50	5.82
3	0.02	1.28	1.70	3.37	5.33
4	0.04	1.52	1.79	3.33	5.54
5	0.01	1.07	2.36	3.04	4.90
6	0.01	1.22	2.00	3.07	5.57
7	0.02	1.40	2.05	3.75	5.65
8	0.03	1.74	2.13	3.47	5.47
9	0.01	2.04	2.24	3.30	5.36
10	0.01	1.16	1.86	3.65	5.00
11	0.02	1.42	2.00	3.26	5.60
12	0.04	1.06	2.04	3.03	4.95
13	0.03	1.46	2.08	3.10	5.41
14	0.04	1.52	1.76	3.45	5.09
15	0.01	1.62	1.90	3.01	5.72
16	0.03	1.24	1.84	3.15	4.85
17	0.01	1.40	2.08	3.66	5.66
18	0.02	1.54	2.80	3.50	5.50
19	0.03	1.52	1.91	2.91	5.75
20	0.02	1.42	1.83	3.80	5.46
Moyenne (μ S)	0.02	1.44	2.04	3.33	5.2

contournement des surfaces parallèles différemment polluées

T (°C)	22	23	23	24	22
Hr (%)	54	56	60	66	52
P (hPa)	1008	1008	1008	1007	1008
σ_1 (μS)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
σ_2 (μS)	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
l_1 (cm)	0	4	8	12	16
l_2 (cm)	16	12	8	4	0
l_2/l_1	1	0.75	0.5	0.25	0
Ucm (kV mesuré)	21.88	25.29	29.58	37.96	73.37
$U_{cc} = U_{cm} \frac{Kh}{Kd}$ (kV corrigé)	22.05	25.69	29.04	37.20	73.44
PCSfP (%)	0.5	0.5	0.5	0.5	100
PCSFP (%)	100	100	100	100	0.5

T (°C)	22	23	22	22	22
Hr (%)	54	54	56	56	52
P (hPa)	1008	1008	1008	1008	1008
σ_1 (μS)	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44
σ_2 (μS)	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
l_1 (cm)	0	4	8	12	16
l_2 (cm)	16	12	8	4	0
l_2/l_1	1	0.75	0.5	0.25	0
Ucm (kV mesuré)	21.88	24.9	29.81	31.62	35.42
$U_{cc} = U_{cm} \frac{Kh}{Kd}$ (kV corrigé)	22.05	24.7	29.78	31.58	35.70
PCSfP (%)	0.5	0.5	0.5	0.5	100
PCSFP (%)	100	100	100	100	0.5

T (°C)	22	23	23	23	23
Hr (%)	54	57	58	60	57
P (hPa)	1008	1009	1009	1010	1009
σ_1 (μS)	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04
σ_2 (μS)	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
l_1 (cm)	0	4	8	12	16
l_2 (cm)	16	12	8	4	0
l_2/l_1	1	0.75	0.5	0.25	0
Ucm (kV mesuré)	21.88	23.49	25.22	26.88	27.97
$U_{cc} = U_{cm} \frac{Kh}{Kd} (kV \text{ corrigé})$	22.05	23.27	24.74	26.32	27.71
PCSfP (%)	0.5	0.5	0.5	30	100
PCSFP (%)	100	100	100	70	0.5

T (°C)	22	22	23	23	22
Hr (%)	54	63	60	56	62
P (hPa)	1008	1010	1010	1010	1010
σ_1 (μS)	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33
σ_2 (μS)	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
l_1 (cm)	0	4	8	12	16
l_2 (cm)	16	12	8	4	0
l_2/l_1	1	0.75	0.5	0.25	0
Ucm (kV mesuré)	21.88	22.8	23.49	24.22	26.1
$U_{cc} = U_{cm} \frac{Kh}{Kd} (kV \text{ corrigé})$	22.05	22.27	23.02	23.97	25.49
PCSfP (%)	0.5	0.5	40	60	100
PCSFP (%)	100	100	60	40	0.5

contournement des surfaces parallèles différemment polluées séparées par une zone sèche

1 pour $l_1=l_2=4\text{cm}$

T (°C)	23	23	23	23	23
Hr (%)	52	51	51	51	51
P (hPa)	1008	1008	1008	1008	1008
σ_1 (μS)	5.2	3.33	2.04	1.44	0.02
σ_2 (μS)	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
l_1 (cm)	4	4	4	4	4
l_2 (cm)	4	4	4	4	4
σ_1/σ_2	1	0.64	0.39	0.27	0
Ucm (kV mesuré)	27.5	29.28	32.22	34.01	36.86
$U_{cc} = U_{cm} \frac{Kh}{Kd}$ (kV corrigé)	27.85	29.28	32.63	34.45	37.34
PCSFp (%)	50	0.5	0.5	0.5	0.5
PCSFP (%)	50	100	100	100	100

2 pour $l_1=l_2=8\text{cm}$

T (°C)	23	23	23	23	23
Hr (%)	59	56	50	50	50
P (hPa)	1008	1008	1008	1008	1008
σ_1 (μS)	5.2	3.33	2.04	1.44	0.02
σ_2 (μS)	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
l_1 (cm)	8	8	8	8	8
l_2 (cm)	8	8	8	8	8
σ_1/σ_2	1	0.64	0.39	0.27	0
Ucm (kV mesuré)	24.07	26.22	28.47	32.61	34.32
$U_{cc} = U_{cm} \frac{Kh}{Kd}$ (kV corrigé)	23.63	26.01	28.84	33.03	34.76
PCSFp (%)	50	0.5	0.5	0.5	0.5
PCSFP (%)	50	100	100	100	100

CONCLUSION GENERALE

Ce travail nous à permis d'abord de mieux comprendre le mécanisme de contournement des isolateurs sous pollution.

L'objectif principal de cette étude était de déterminer la tension de contournement d'un isolateur plat en verre, recouvert d'une mince couche de pollution, soumis à une tension alternative.

Pour cela, deux méthodes de distribution de la couche de pollution ont été considérées : deux surfaces parallèles différemment polluées, et deux surfaces parallèles différemment polluées séparées par une zone sèche.

Dans un premier temps, nous avons étudié les performances de cet isolateur lorsqu'on a deux surfaces parallèles différemment polluées, et pour lesquelles l'influence de la conductivité électrique et la largeur des surfaces polluées, ont été étudiées. Les résultats émanant de cette étude peuvent être résumés comme suit :

- * La tension de contournement diminue avec l'augmentation de la conductivité électrique de pollution quelque soit la largeur de la surface polluée.
- * La tenue diélectrique de notre isolateur diminue avec l'augmentation de la largeur de la conductivité électrique la plus élevée.

Dans un deuxième cas, nous avons testé un autre type de distribution de la pollution, c'est le cas où nous avons deux surfaces parallèles différemment polluées, séparées par une zone sèche, il en résulte de cette étude que :

- * la tension de contournement est inversement proportionnelle à la largeur de la surface polluée, et le rapport de leurs conductivités électriques respectives.

Nos résultats comparés avec ceux cités par les auteurs [25, 26, 27] révèlent une analogie qualitative. En effet, les formes de nos courbes de performances sont qualitativement semblables à celles des auteurs, néanmoins la différence quantitative et principalement due à la forme des isolateurs, la méthode de pollution et aussi à la différence des conditions d'essai.

RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS

Les résultats obtenus au cours de cette étude ont contribué à la compréhension du comportement diélectrique des isolateurs recouverts de pollution sous tension alternative. 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 l'épaisseur, du type et de la température de la couche de pollution sur la tenue diélectrique des isolateurs recouverts de pollution sous la tension alternative, pourraient être effectuées, afin de compléter les données sur l'influence des paramètres liés au dépôt de pollution dans les mécanismes de contournement des isolateurs pollués.
- * Il serait très intéressant de mesurer la tension aux bornes de l'intervalle d'air pour chaque rapport de la longueur de la bande sèche sur la longueur de fuite, et d'estimer les paramètres statiques de l'arc électrique. Cela permettra entre autres, de les utiliser.
- * La simulation par des méthodes numériques, afin de déterminer de façon précise la distribution du champ et du potentiel électrique le long d'isolateur d'essai.

Références Bibliographiques

- [1] **M.NEMAMCHA**, «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. Tout droits réservés.**
- [5] Technique de l'ingénieur.
- [6], «propriétés des isolants », Techniques de l'ingénieur, E1820. D155 ; D214 ; K712.
- [7] **R.BOUDISSA**, «cours du module matériaux en électrotechnique », 2005.
- [8] **F.AMIR, KH.NAMAOUI**, mémoire d'ingénieur, «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 ».

[14] **Microsoft ®Encarta® 2006.© 1993-2005 Microsoft Corporation. Tout droits réservés**

[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 «Evaluation du degré de pollution atmosphérique d'un site » promotion 2004.

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

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

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

• SEDIVER – 79, Avenue François Arago – 92017 NANTERRE Cedex 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 ALGE

[26] **Groupe de travail 04 du Comité d'études n°33(Surtension et coordination de l'isolement). Rapport publié 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 2001.

[30] **cours de Mr M. A. Handala**
Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou.

[31] **F.Obenaus, "Fremdschichtuberschlag und Kriechweglänge"**
Deutsche Elektrotechnik, Vol.
4, 1958, p.135-136

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

[33] **Changiz Tavakoli Zaniani «Modélisation dynamique du développement de l'arc électrique à la surface de la glace en courant alternatif»,** mémoire du Doctorat en ingénierie présentée devant l'UQAC, pp.32-33, Novembre 2004.

[34] **B.F.Hampton. "Flashover Méchanism of polluted Insulation"** Proc. PIEEE, vol.111, N°5, pp. 985-990, Juillet 1964.

[35] **R.Wilkins, "Flashover Voltage of High Voltage Insulators with Uniform Surface Pollution films",** proc. IEE, Vol.116, N°3, pp.457-465, Mars 1969.

[36] **P. Claverie, "Predetermination of the behaviour of polluted insulators",** IEEE, Trans. PAS, Vol. 90 N°4, pp. 1902-1908, July 1971.

[37] **P. Claverie and Y. Porcheron, "How to choose insulators of polluted areas",** IEEE, Trans. PAS, Vol. 92 N°3, pp. 1121-1131, 1973.

[38] **A.M.Rahal, C. Huraux, "Flashover of High voltages insulations",** IEEE., Vol.pas-98, N°6, pp 2223-2231,1979.

[39] **P.S. Gosh, S. Chakravorti and N. Chartterjie, "Estimation of time to flashover characteristics of contaminated electrolytic surfaces using a neural network",** IEEE, Trans. On diel. And elect. Insul, Vol. 2 N°6, pp. 1064-1076, December 1995.

[40] **R.Sundararajan and RS.Gorur, "Computer Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Conditions",** IEEE Trans, on Diel, and Elect, Insul, Vol, 2, N°1, pp.121-127

[41] **N, Dahabi -Megriche, A.Beroual , "Evaluation of Polluted Insulators Flashover Voltage for Different Waveforms using an Equivalent Electrical Network Model".**11th International Symposium on high Voltage Enginerring, London, UK, 1999.

[42] **O..Mayer, "Beitrag sur Theorie der statischen und der dynamischen Lichtbogens",** arch. f. Elektrotechnik, vol.37, pp.588-608, 1943.

[43] **E.Durand, "Electrostatique, Tome II"** Masson et Cie éditeurs, 1966.

[44] I.Fofana and A.Beroual, “A predictive model of the positive discharge in long air gaps under pure and oscilling impulse shapes”, J.phys.D: applied physics, pp.165-1667, 1997.