

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI 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: Réseaux électriques

Thème

**Comportement électrique de deux
isolateurs parallèles contaminés et soumis à
une tension alternative 50Hz**

Proposé et dirigé par :

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

Réalisé par :

Mr: AIT ALIOUA NADIR
Mr: DJABER MADJID
M^{elle}: CHIKHI DAHBIA

Promotion: 2008/2009

Remerciements

Ce travail à été réalisé au niveau du Laboratoire de Haute Tension de BEJAJA.

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

En premier lieu, nous remercions DIEU tout puissant, qui nous a donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

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

Nous tenons aussi à exprimer nos remerciements, d'une façon particulière à Mr BOUDISSA Rabah (U.A.M de BEJAJA), pour nous avoir accueillis dans son Laboratoire, pour ces orientations ainsi qu'à toute la documentation qu'il a mit à notre disposition.

Nos humbles remerciements vont également aux résidents de la citée universitaire de BEJAJA particulièrement ceux de la chambre K.113 et 216 (Targa-Ouzemour).

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

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

Que tous les enseignants ayant contribué à notre formation trouvent ici notre profonde reconnaissance.

Sommaire



Sommaire

Introduction générale	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 (bone 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	10
I.2.4.3 Angle de pertes et facteur de dissipation	11
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	12
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	14
I.3.3 Différents types d'isolateurs	15
I.3.3.1 Isolateurs supports	15
I.3.3.2 Isolateurs de traversées	15
I.3.3.3 Isolateurs de lignes aériennes	15
I.3.3.3.1 Isolateurs rigides	15
I.3.3.3.2 Elément de chaîne des isolateurs suspendus.....	16
I.3.3.3.2.1 Isolateurs capot et tige	17

I.3.3.3.2.2 Isolateurs longs fûts	18
I.3.4 Contraintes subites par l'isolateur.....	20
I.3.4.1 Contraintes mécaniques	20
I.3.4.2 Contraintes climatiques et d'environnement	20
I.3.4.3 Contraintes électriques.....	22
I.3.5 Choix des isolateurs	22
I.4 Conclusion	23

Chapitre II

Caractérisation 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.....	26
II.4.3 Pollution mixte.....	27
II.5 Facteurs climatiques d'influence de la pollution	27
II.5.1 Vent.....	27
II.5.2 Pluie	27
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	28
II.6.2 Non uniformité par secteurs.....	28
II.6.3 Non uniformité longitudinale périodique	29
II.7 Conséquences de la pollution.....	29
II.7.1 Arc non localisé	29
II.7.2 Arc fixe	29
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	30
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.....	31
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	33
II.9.1.1 Conductivité électrique de la pollution.....	33
II.9.1.1.1 Dispositif et procédé de mesure	33
II.9.1.2 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)	37
II.9.1.3 Conductance superficielle	38
II.9.1.4 Comptage des impulsions de courant de fuite	39
II.9.1.5 Courant de fuite le plus élevé (I_h).....	41
II.9.1.6 Contrainte de contournement	42
II.9.1.7 Mesure optique	42
II.9.1.8 Densité de dépôt non soluble (DDNS)	43
II.9.2 Choix d'une méthode de mesure de sévérité de pollution d'un site.....	43

Chapitre III Simulation et lutte contre la pollution

III.1 Introduction.....	45
III.2 Simulation de la pollution au laboratoire.....	45
III.2.1 Méthodes de simulation.....	45
III.2.1.1 Brouillard salin.....	45
III.2.1.2 Brouillard équivalent.....	46
III.2.1.3 Brouillard vapeur	46
III.2.1.4 Brouillard tenu	47
III.2.1.5 Methycellulose ou méthode de pollution liquide.....	47
III.2.1.6 Kieselguhr	47
III.2.1.7 Contaminant humide	48
III.2.2 Corrélation entre les méthodes de pollution naturelle et artificielle	48
III.3 Lutte contre la pollution.....	49
III.3.1 Techniques de lutte contre la pollution	49
III.3.1.1 Allongement de la ligne de fuite	49
III.3.1.2 Changement de forme des isolateurs (isolateurs plats).....	50
III.3.1.3 Graissage périodique des isolateurs	50
III.3.1.4 Revêtements silicones	50
III.3.1.5 Isolateurs composites	51
III.3.1.6 Nettoyage des isolateurs.....	51
III.4 Conclusion	51

Chapitre IV Modèles de contournement d'un isolateur pollué

IV.1 Introduction.....	53
IV.2 Contournement sous pollution [25 ,26].....	53
IV.3 Modélisation des phénomènes de contournement.....	55
IV.3.1 Modèled'Obenaus.....	55
IV.3.2 Modèle de Neumarker.....	56
IV.3.3 Modèle de Danis	57
IV.3.4 Modèle de Nacke et Wilkins	58
IV.3.5 Modèle de la couche mixte	60
IV.4 Modèles dynamiques de contournement	61
IV.4.1 Mécanisme de Propagation.....	61
IV.4.1.1 Propagation par ionisation	61
IV.4.1.2 Propagation par force électrostatique	62
IV.4.2 Critères de propagation de la décharge	62
IV.4.2.1 Critère de Hampton	62
IV.4.2.2 Critère de Hesketh	63

61

IV.4.2.3 Critère de Wilkins	63
IV.4.2.4 Critère de Anjana et Lakshminarasimha	63
IV.4.2.5 Critère de Dhahbi, Beroual et Krahenbul	63
IV.4.3 Modèles dynamiques	64
IV.4.3.1 Modèle de Rizk	64
IV.4.3.2 Modèle de Anjana et Lakshminarasimha	65
IV.4.3.3 Modèle de Sundararajan et Gorur	66
IV.5 Conclusion.....	67

Chapitre V

Partie expérimentale

V.1 Introduction.....	68
V.2 Techniques expérimentales.....	68
V.2.1 Dispositif expérimental.....	68
V.2.2 Circuit d'alimentation.....	69
V.2.3 Circuit de mesure de la tension appliqué	69
V.2.4 Visualisation de l'arc.....	70
V.2.5 Mode opératoire	70
V.2.6 Préparation de la solution polluante.....	70
V.2.7 Procédé d'application de la pollution	70
V.2.8 Procédé d'essai	71
V.2.9 Mesure des conductivités volumiques et superficielles	71
V.2.10 Correction des résultats en fonction des conditions atmosphériques	72
V.3 Mesure des facteurs d'influence de la tension de contournement	73
V.3.1 Pollution uniforme	73
V.3.2 Pollution non uniforme	76
V.3.2.1 Système d'isolateurs à deux couches de pollution	76
a) Une surface propre et sèche, une surface polluée.....	76
b) Une surface fortement et une surface faiblement polluée.....	78
V.3.2.2 Système d'isolateurs à trois couches de pollution	81
a) Rapport des largeurs fixe, rapport des conductivités superficielles variable....	81
b) Rapport des largeurs variable, rapport des conductivités superficielles fixe....	83
c) Rapport des produits ($\frac{R_{21}}{R_{22}} = \frac{l_{c22}\sigma_{22}}{l_{c21}\sigma_{21}}$) variable	85
V.3.2.3 Système d'isolateur à quatre couches de pollution	87
a) Rapport des largeurs fixe, rapport des conductivités superficielles variable.....	87
b) Rapport des largeurs variable, rapport des conductivités superficielles fixe...	90
c) Rapport des produits ($\sigma_{22} l_{c22} / \sigma_{21} l_{c21}$) variable	92

d) Rapport des largeurs fixe ($l_{c12}/l_{c11} = l_{c22}/l_{c21} = 1$)	95
e) Rapport des largeurs fixe ($l_{c12}/l_{c11} = l_{c22}/l_{c21} = 0,4$)	96
V.3.3 Effet de la distance entre les deux isolateurs sur la rigidité du système.....	98
V.3.4 Comparaison entre la pollution uniforme et non uniforme.....	101
V.4 Conclusion	102

Conclusion générale.....103



Introduction générale



Introduction générale

De nos jours, l'énergie électrique joue un rôle très important dans le développement et l'évolution de l'industrie et l'économie du pays. De ce fait, il faut assurer, à tout instant, un bon équilibre entre la demande croissante et la production de l'énergie. C'est pour cela, qu'une très grande part d'importance est attachée aux réseaux électriques, principalement aux lignes de haute tension.

Les isolateurs des lignes et de poste de transport d'énergie électrique sont le siège de plusieurs contraintes. Entre autres, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie.

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 quelles 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 manœuvre) 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'exploitation des réseaux électriques, puisque leur rôle est d'assurer l'isolement électrique des phases sous tension entre elles, et de ces dernières par apport 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.

L'influence de la non uniformité de la couche de pollution sur le développement de l'arc de contournement n'a jamais été étudiée de façon systématique. C'est pour ces raisons que l'on ne peut pas déterminer exactement les conditions les plus favorables au contournement des isolateurs pollués.

Le présent travail porte sur l'étude du comportement de deux isolateurs plans en verre mis en parallèles et soumis à une tension alternative. Ce type de configuration d'isolation s'installe à la traversée des grandes routes, régions urbains pour des raisons de sécurité (augmenté la résistance mécanique de la chaîne).

Notre travail consiste à étudier le comportement électrique de système sous pollution atmosphérique pour cette raison, celui-ci est subdivisé en cinq chapitres:

Le premier chapitre sera consacré à des rappels concernant les isolateurs et leur constitution 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 pollution naturelle et artificielle.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation et la lutte contre la pollution.

Le quatrième chapitre décrit les différents modèles de contournement d'un isolateur pollué.

Le cinquième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus et leur interprétation.

Dans ce chapitre ont été étudiées les variantes de pollution uniforme et non uniforme et l'effet de leurs paramètres (largeur et conductivité de la couche de pollution) sur la rigidité diélectrique du système d'isolateurs étudié.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Isolants et isolateurs



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 non 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		Emaux et vernis	Isobutylène
	Caoutchoucs	Polystyrène	Phénoplastes		Chloroprènes
	Naturels	Polyamides	Aminoplastes	Stratifiés divers	Polysulfides
		Polycarbonates	Epoxydes		Compound et adhésifs
		Polymères Fluorés	Polyesters		Elastomères de Silicones
		Dérivés de la Cellulose	Silicones		

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]

I.2.3.1.1 Représentation

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

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 déourdissage. 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 de 1250 à 1450 °c. La pâte se vitrifie alors, et devient blanche, translucide et sonore.

I.2.3.1.2.3 La porcelaine tendre naturelle

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

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

Elles sont actuellement utilisées pour les isolatrices hautes tensions 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	Sodocalciq ue recuit	Sodocalciq ue trempé	Brosolica té
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 mécaniques 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 : $10^{10} \dots 10^{16} \Omega.\text{cm}$.

Les principales variétés de verres utilisés 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 variations brusques de température. De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension. On cite aussi les verres sodiques, borosilicate et les polyamides.

I.2.3.3 Silicone [4]

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 [5]

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 la quelle se produit une perforation dans les conditions d'essai spécifiées et la distance entre les deux électrodes auxquelles est appliquée la tension.

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

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

I.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 .

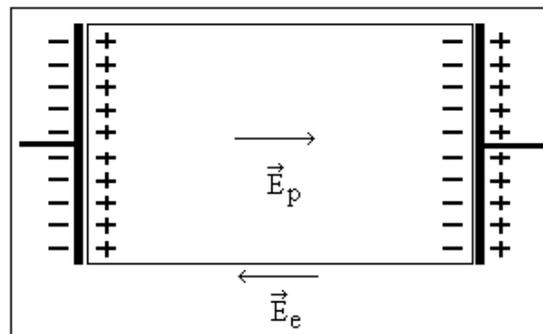


Fig. I.1: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

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:

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

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

$$\epsilon_a = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (\text{I.2})$$

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

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 :

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

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

$$\epsilon_a^* = \epsilon_r^* \cdot \epsilon_0 \quad (\text{I.4})$$

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. I.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:

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

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

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

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

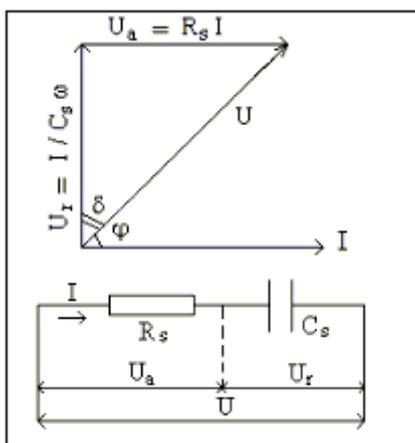


Fig. I.2: Circuit électrique équivalent série

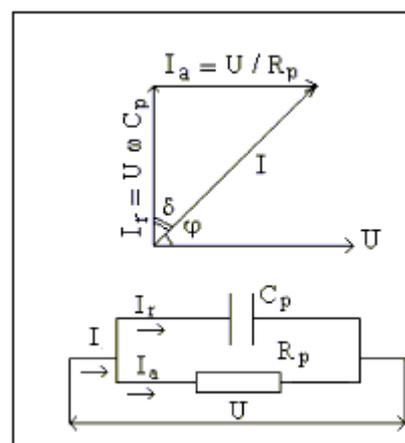


Fig. I.3: Circuit électrique équivalent parallèle

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 [6]

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 calculé 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:

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

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 [7]

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 [7]

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 [8]

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].

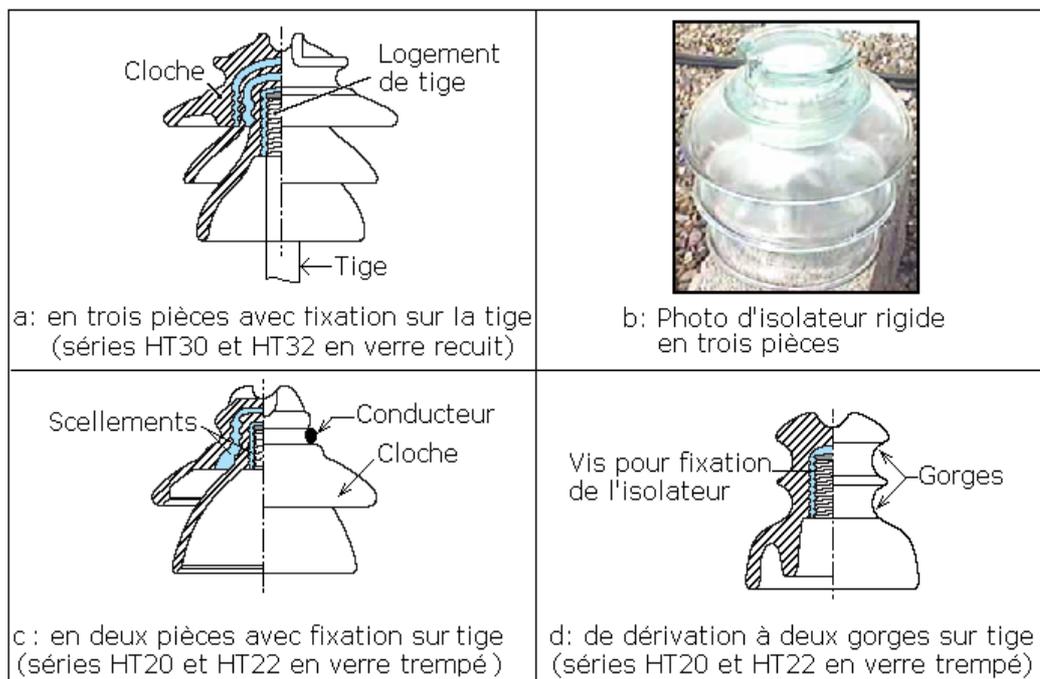


Fig. I.5: Isolateurs rigides en verre

I.3.3.3.2 Élément 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.

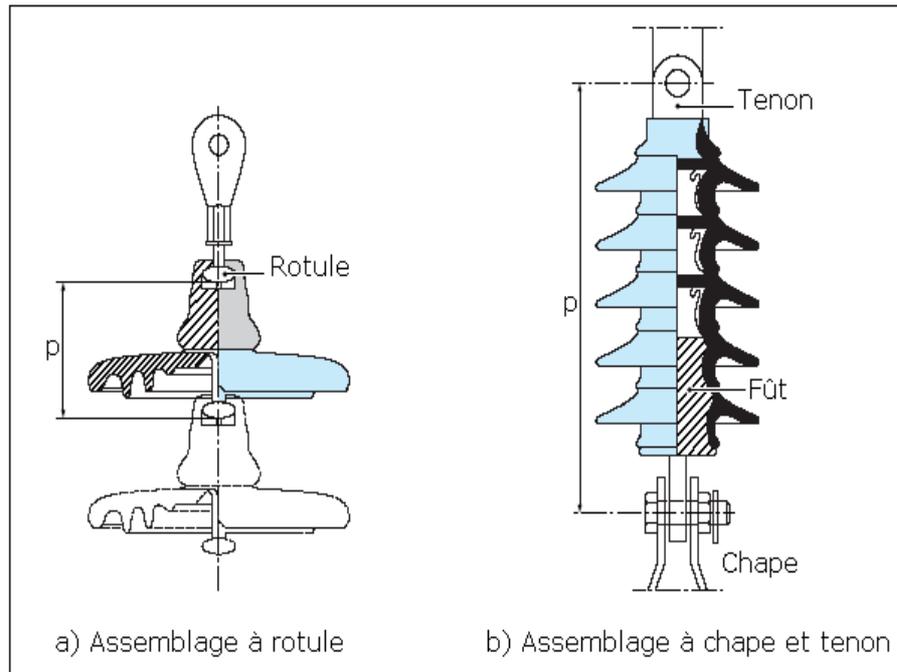


Fig. I.6: Assemblage des éléments de la chaîne d'isolateurs

I.3.3.2.1 Isolateurs capot et tige [8]

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**).

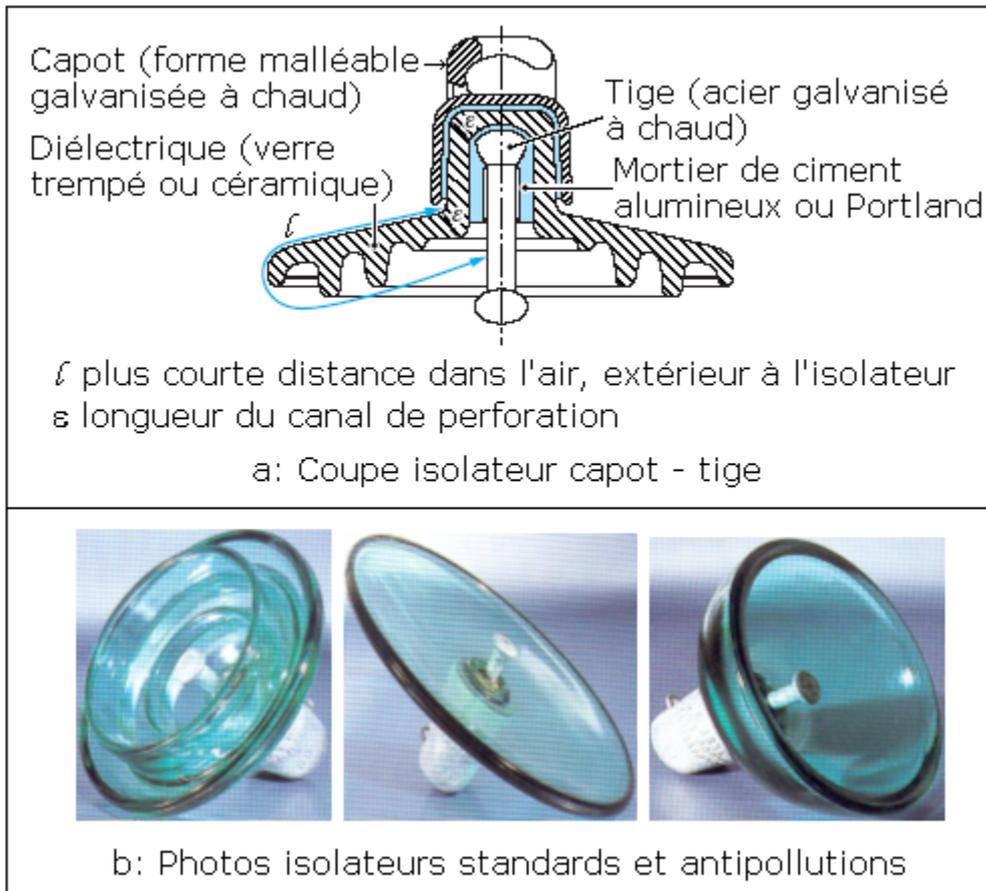


Fig. I.7: Isolateur capot et tige

I.3.3.3.2 Isolateurs longs fûts [9,3]

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.

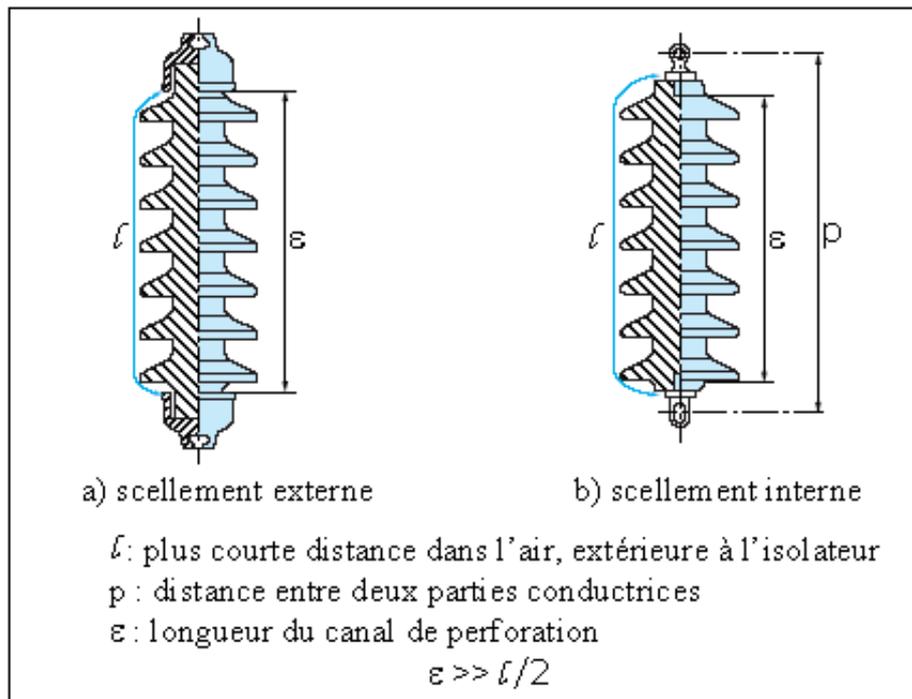


Fig. I.8: Isolateur long fût

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 (Ethylène, 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.

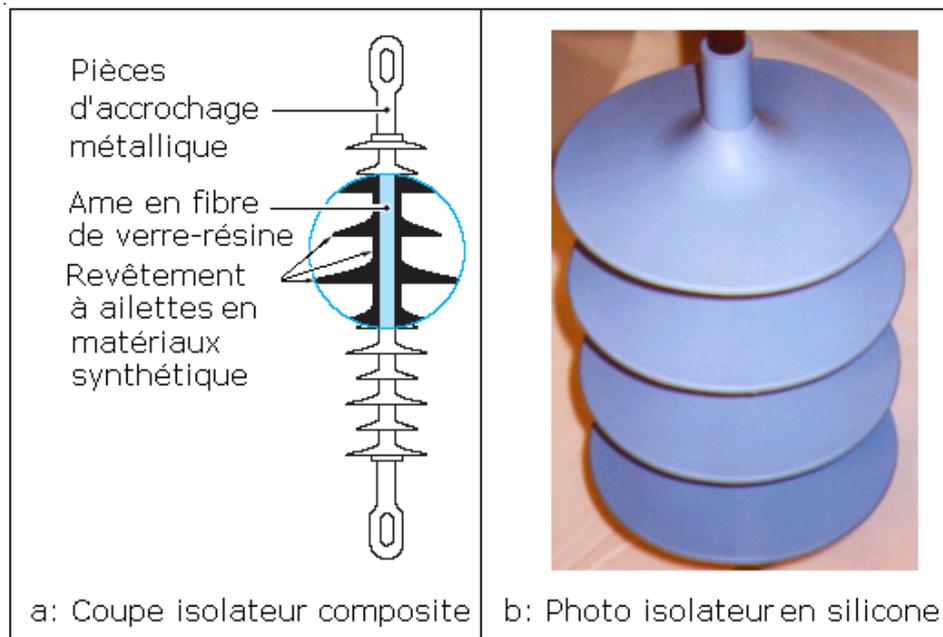


Fig. I.9: Isolateur composite

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 [8]

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 [8]

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, 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 certaines conditions 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 rotule

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.

I.3.4.3 Contraintes électriques [10,6]

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).

Chapitre II

Caractérisation de la pollution



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. [11]

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 haut 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 [6]

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 [12]

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 dus 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 volcaniques 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 dus 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 [13]

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 au 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

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 [14]

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 tenue 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 [6]

La répartition d'une couche de pollution dépend du profile, la hauteur et la disposition (verticale, horizontale, inclinée) des chaînes des isolateurs part 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, lorsqu'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

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.[6]

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

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 multipliée 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 dus aux gaz d'échappement (dioxine). [15]

II.8.2 Effet de la pollution sur les équipements électriques

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 dus à l'industrialisation de l'Algérie et à l'inexistante d'informations à l'échelle nationale 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. [16]

II.8.2.1 Corrosion des isolateurs [17]

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 absorbent 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 volantes 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'arborescences;
- érosion de la matière isolante sur plusieurs dixièmes de millimètres avec perte 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 formation 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 [6]

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 [14]

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**).

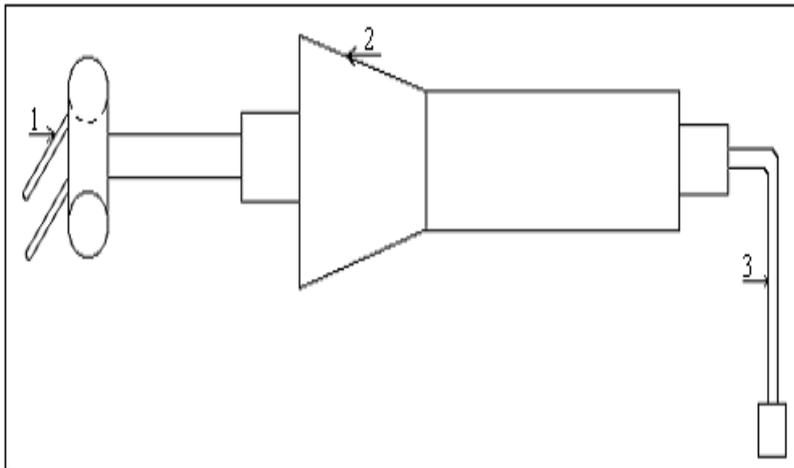


Fig. II.1: Photo d'un conductimètre à sonde mobile

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

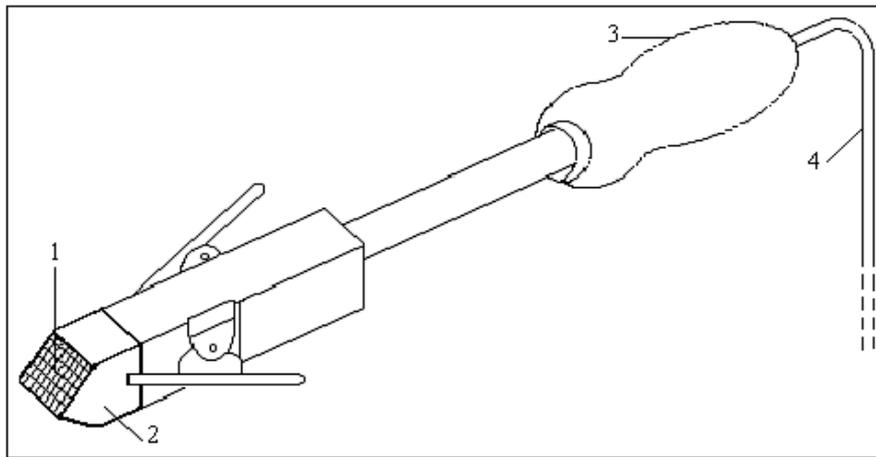
Fig. II.2a: Sonde à électrodes linéaires

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.



- 1: tête de la sonde ;
- 2: électrodes planes ;
- 3: poignée de la sonde ;
- 4: câble de connexion au conductimètre

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

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

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

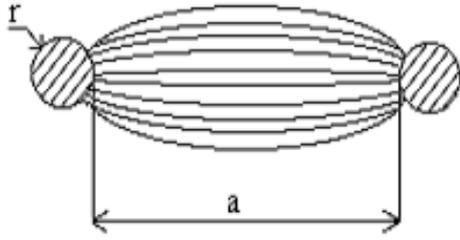
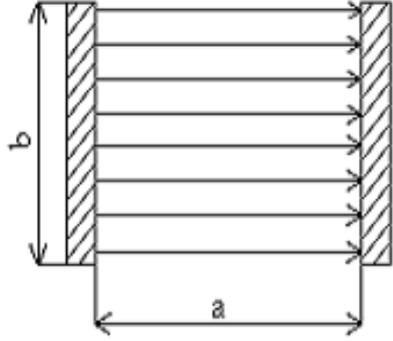
Où :

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 :

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

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 ($\sigma_{r20^\circ\text{C}}$) est déduite de la formule suivante :

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

Avec :

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

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

Température T ($^\circ\text{C}$)	0	9	10	15	20	25	30	35	40

Facteur de correction α	0.6	0.68	0.77	0.89	1.00	1.12	1.23	1.34	1.45
--	-----	------	------	------	------	------	------	------	------

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

II.9.1.2 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE) [18]

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, a 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 de la suspension à température en °C.

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

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

Où :

θ : Température de la suspension en °C;

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

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

b : Facteur dépendant de la température °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 :

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

Avec:

S_a en kg/m³ et σ_{20} en S/m.

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

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

Avec :

V : Volume de la suspension en m³;

S : Surface nettoyée en m² ;

DDSE en kg/ m².

Pour la détermination de la sévérité du site, les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante pour obtenir les niveaux entre les périodes de lavage naturel. En conséquence, plusieurs 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 [19]

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 [20]

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.

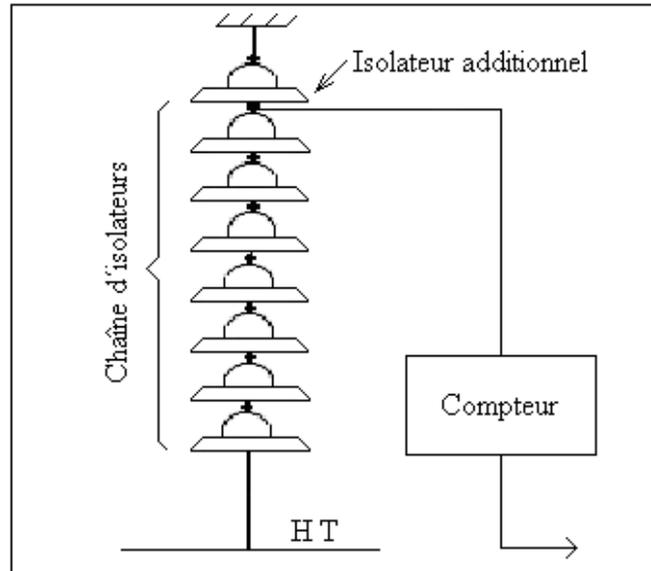


Fig. II.3: Méthode de connexion d'un compteur d'impulsion à un isolateur de ligne

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) [21]

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 rapport 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.

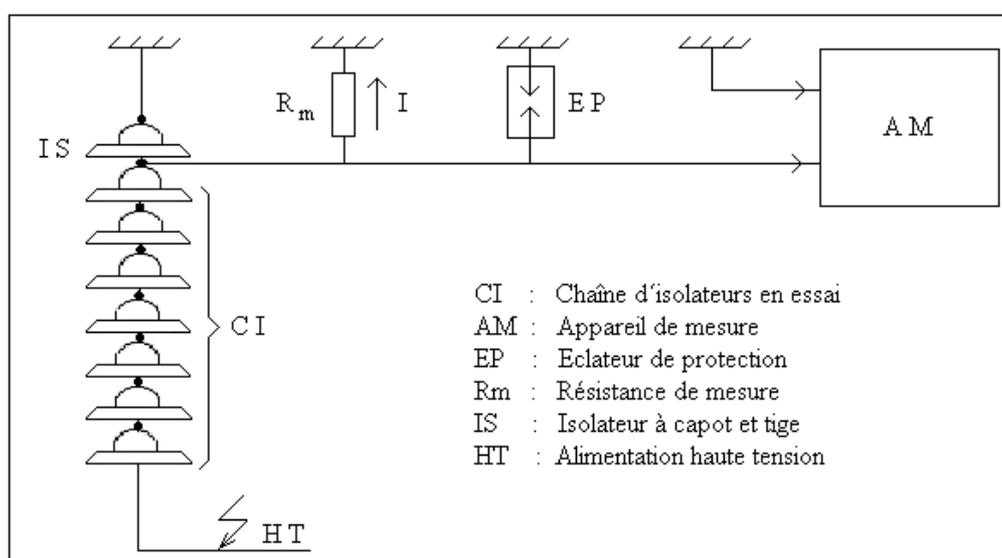


Fig. II.4 : Circuit de mesure du courant de fuite le plus élevé

II.9.1.6 Contrainte de contournement [22]

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 [18]

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) [18]

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 :

$$DDNS = 1000 (m_f - m_i) / A$$

(II.10)

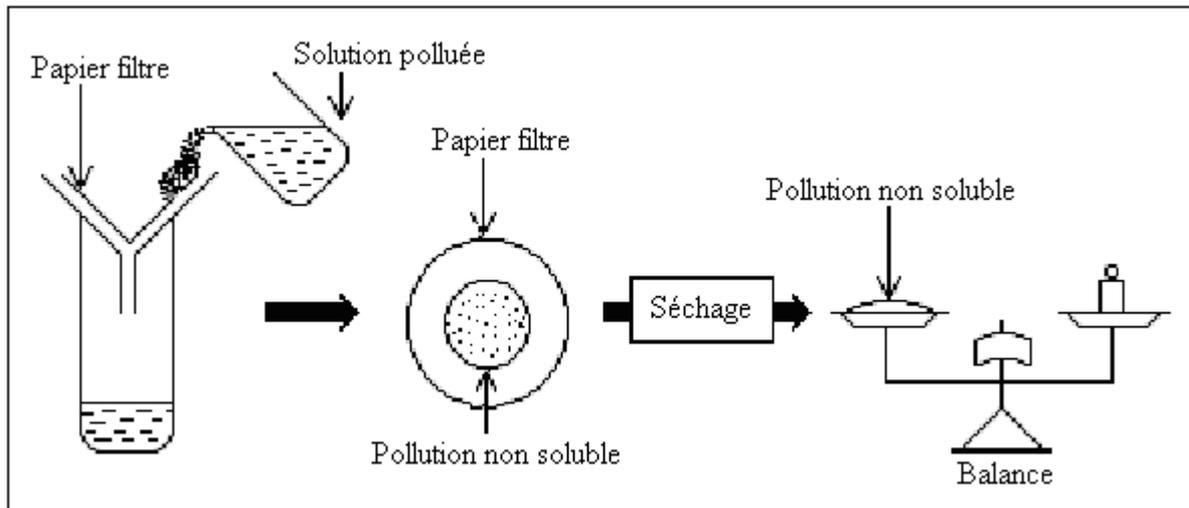
Où:

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



II.9.2 Choix d'une méthode de mesure de sévérité de pollution d'un site [10]

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

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 survienne. 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.

Chapitre III

Simulation et lutte contre la pollution



III Simulation et lutte contre la pollution

III.1 Introduction

La simulation de la 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 [23,24]

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 concordent 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 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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	<ul style="list-style-type: none"> - 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

II	M O Y E N	- 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
III	F O R T	- 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
IV	T R E S F O R T	- 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

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 [21,23]

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.

Chapitre IV

Modèles de contournement d'un isolateur pollué



IV.1. Introduction

Plusieurs travaux expérimentaux et théoriques ont été consacrés pour expliquer le mécanisme conduisant au contournement des isolateurs pollués. Le but de ces travaux est d'élaborer un modèle pouvant tenir compte des paramètres réels intervenant dans la génération et la propagation des arcs électriques sur les surfaces isolantes. Il s'agit en particulier de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes (homogènes ou non homogènes), de la résistivité des échanges thermiques, de la non uniformité du mouillage, de l'intensité des arcs au voisinage de la surface isolante, de la formation d'arcs multiples et de la détermination de la tension de contournement.

Dans ce qui va suivre, nous allons exposer une recherche bibliographique des différents modèles statiques et dynamiques développés dans ce domaine.

IV.2 Contournement sous pollution [25 ,26]

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.1.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.1. 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.1.c** et **Fig. IV.1.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.1.e** et **Fig.IV.1.f**)

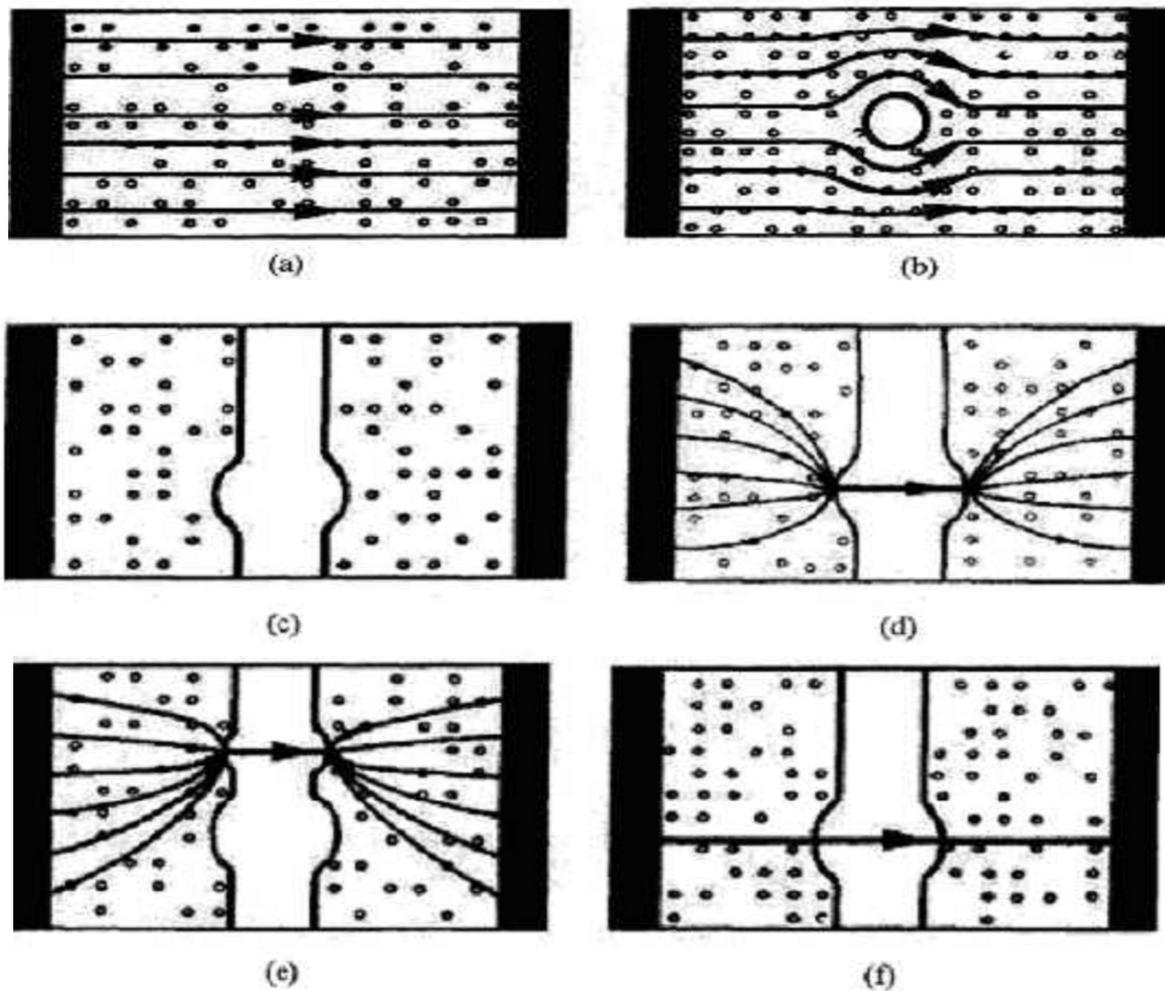


Fig. IV.1 : Processus de contournement d'un isolateur pollué

- 1 - a) Humidification de la couche de pollution et écoulement du 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.3 Modélisation des phénomènes de contournement

IV.3.1. Modèle d'Obenaus

C'est Obenaus [28] qui, dans un travail de pionnier, est à l'origine des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante, sous tension continue. Partant d'un modèle type circuit électrique équivalent, constitué d'un arc de longueur x en série avec une résistance R_p représentant la résistance de la pollution (Figure IV.2 où L représente la longueur de fuite totale), il en a déduit la tension d'arc :

$$U_{arc} = \frac{Ax}{I^n} \quad (IV.1)$$

où I est le courant de fuite, n et A les constantes de la caractéristique statique de l'arc.

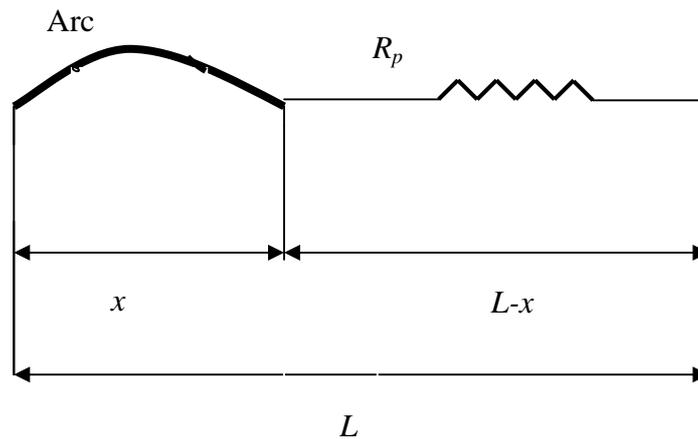


Figure IV.2 : Modèle d'Obenaus [28]

Les valeurs des paramètres n et A dépendent du milieu dans lequel s'amorce la décharge. Selon certains auteurs [29- 30] : $0.4 < n < 1$ et $3 < A < 500$.

A partir de mesures expérimentales sur un canal d'électrolyte, Ghosh et al [30] ont proposé de prendre des valeurs différentes pour A et n caractérisant l'équation de la décharge selon la nature de l'électrolyte utilisé. Les résultats de leurs mesures sont donnés dans le tableau IV.1.

Electrolyte	A	n
NaCl	360	0.59
CaCl ₂	461	0.42
FeCl ₃	270	0.66
CuSO ₄	450	0.49

Tableau IV.1 : Constantes caractéristiques selon Ghosh et al [30]

IV.3.2 Modèle de Neumarker

En reprenant les travaux d'Obenaus [28], et en y ajoutant l'hypothèse d'une couche de pollution de résistance r_p uniforme par unité de longueur de fuite, Neumarker [31] a proposé l'expression suivante pour la résistance de pollution R_p :

$$R_p = r_p (L - x) \quad (IV.2)$$

En introduisant cette expression dans le modèle d'Obenaus et en négligeant les chutes de tension cumulées aux électrodes, la tension U aux bornes de l'isolateur sera :

$$U = U_{arc} + r_p (L - x) \quad (IV.3)$$

ou encore :

$$U = \frac{Ax}{I^n} + r_p (L - x) \quad (IV.4)$$

Ainsi, Neumarker déduit le courant et la longueur d'arc critiques :

$$I_c = \left(\frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (IV.5)$$

et

$$x_c = \frac{L}{n+1} \quad (IV.6)$$

L'expression de la tension critique de contournement est par conséquent :

$$U_c = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} L \quad (IV.7)$$

IV.3.3 Modèle de Danis

Afin de reproduire des couches similaires à celles observées sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, Danis [27] a utilisé un modèle de forme géométrique simple (plan ou cylindrique) possédant plus d'une zone sèche (Figure IV.3.a). La rupture des zones sèches survient alors d'une manière aléatoire (Figure IV.3.b). Le lieu d'apparition des arcs partiels, la forme et le mouvement des racines des arcs sur une surface polluée (Figure IV.3.c) dépendent ainsi de plusieurs facteurs, dont on ne peut déterminer leurs effets instantanés. Par conséquent, le comportement macroscopique de ces arcs a une nature stochastique. La tension de contournement est donc une variable aléatoire et a une fonction de distribution.

Une simulation numérique des observations expérimentales, utilisant des photographies à grande vitesse (3000 images par seconde), a été effectuée pour déterminer cette tension.

En considérant que la résistance de la couche polluante est linéaire par rapport à la longueur, l'équation qui régit le modèle est :

$$U = \frac{Ax}{I^n} + r_p(L-x)I \quad (\text{IV.8})$$

Avec $n = 0.5$ et $200 \leq A \leq 400$,

r_p est la résistance linéique.

Le courant et la tension critique déduites par l'auteur [27] sont donnés par les expressions :

$$I_c = \left(\frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (\text{IV.9})$$

et

$$U_c = L(Ar_p)^{\frac{1}{n+1}} = AI_c^{-1} \quad (\text{IV.10})$$

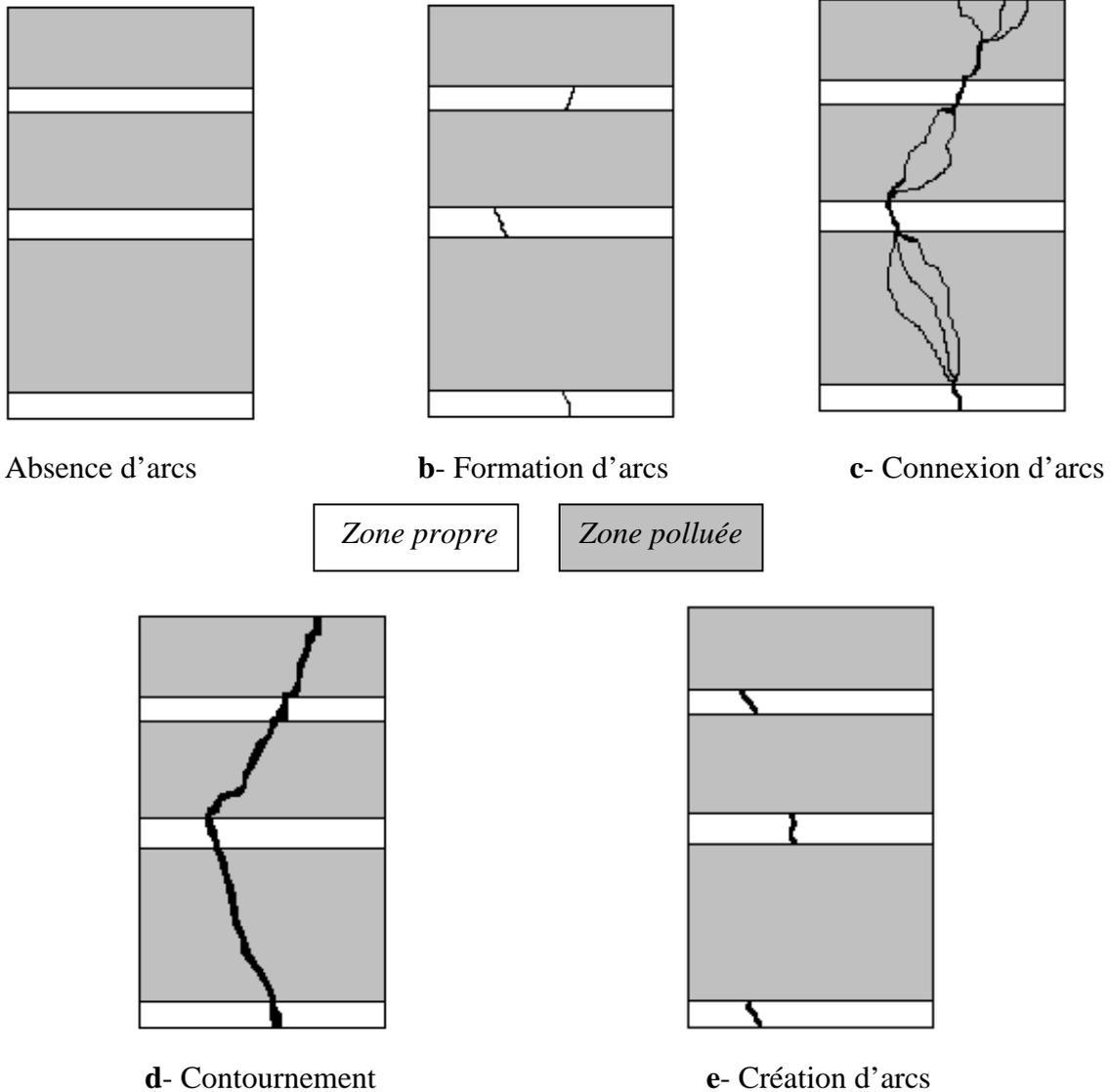


Figure IV.3 : Modèle de Danis [27]

IV.3.4 Modèle de Nacke et Wilkins

Nacke [32,33] et Wilkins [34] considèrent que les points à la base de l'arc forment des demi-cercles aux limites des bandes sèches (Figure IV.4.a). Ainsi, la résistance de la pollution se

compose de deux termes : une résistance interne $R_i(x)$ propre aux deux demi-cercles, et une résistance externe $R_e(x)$ pour le reste.

Pour une largeur de bande étroite ($x_p/b \ll 2/\pi$) :

$$R_i(x) = \frac{1}{\pi\gamma} \quad (\text{IV.11})$$

et

$$R_e(x) = rx_p + \frac{2}{\gamma\pi} \log\left(\frac{b}{2\pi r_d}\right) \quad (\text{IV.12})$$

où

R : est la résistance linéique de la pollution,

x_p : la longueur de la couche polluée (mouillée) dans les conditions critiques,

b : la largeur de la surface de l'isolateur,

r_d : le rayon de la base de l'arc.

Pour une bande large et pour un isolateur à ailette unique, la résistance externe est donnée par :

$$R_e(x) = \frac{2}{\pi\gamma} \left\{ 0.68 + \ln\left(\frac{x_p}{r_d}\right) \right\} \quad (\text{IV.13})$$

Pour un isolateur à ailettes multiples :

$$R_e = \frac{2}{\pi\gamma} \left\{ 0.3 + \ln\left(\frac{x_p}{r_d}\right) \right\} \quad (\text{IV.14})$$

Ainsi, la résistance de pollution totale sera :

$$R(x) = R_i(x) + R_e(x) \quad (\text{IV.15})$$

Pour la même configuration (Figure IV.4.b), dans le cas d'une bande étroite, Wilkins [34] a obtenu :

$$R(x) = r(L-x) + \frac{1}{\pi\gamma} \ln\left(\frac{b}{2\pi r_d}\right) \quad (\text{IV.16})$$

et pour une bande large :

$$R(x) = \frac{1}{\pi\gamma} \left\{ \ln\left(\frac{2L}{\pi r_d}\right) - \ln\left(\tan\frac{\pi x}{L}\right) \right\} \quad (\text{IV.17})$$

où

x : la longueur d'arc,

L : la distance totale de fuite de l'isolateur.

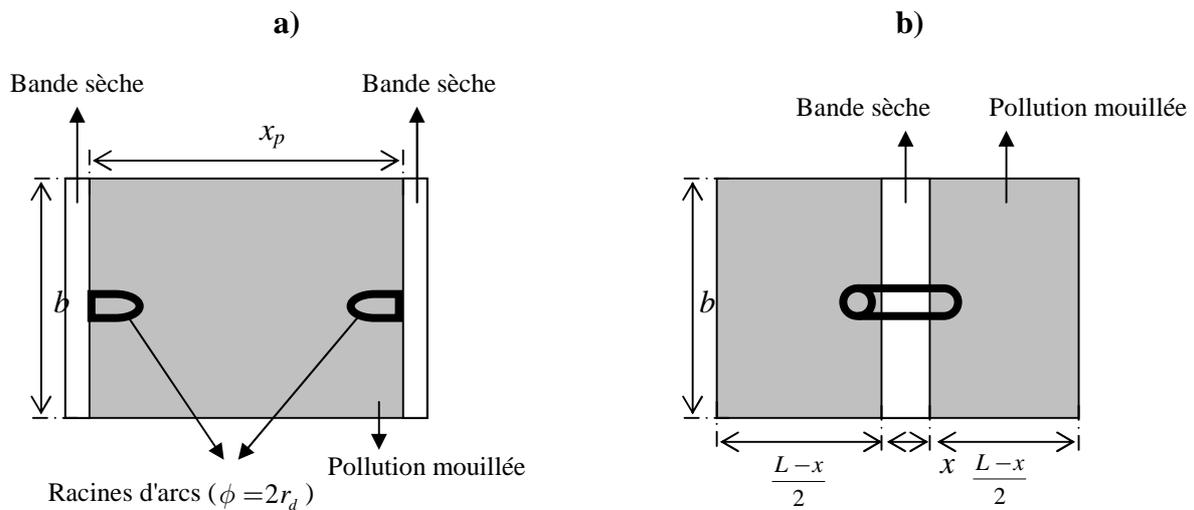


Figure IV.4 : Représentation schématique de la surface d'un isolateur et des pointes de base de l'arc utilisé pour le calcul de la résistance de pollution selon:

(a) Nacke [32-33], (b) Wilkins [34]

IV.3.5 Modèle de la couche mixte

De façon à mieux représenter la résistance superficielle de pollution d'un isolateur à long fût, Obenaus et Boheme [35] ont considéré que celle-ci était équivalente à deux couches résistantes en série, de résistance linéique r_1 et r_2 et correspondant respectivement à la tige et aux ailettes, et ils ont décomposé la distance totale de fuite L en deux distances partielles, L_1 et L_2 respectivement (Figure IV.5). L'application du critère de Hampton [36] leur a permis de déduire la relation (IV.18) donnant le gradient de contournement critique (en faisant certaines hypothèses et choisissant l'exposant $n=1$) :

$$\frac{U_c}{L} = 0.8\sqrt{Ar_p} \quad (\text{IV.18})$$

où: $A=80\text{VA/cm}$.

Le modèle concorde bien avec les résultats d'essais obtenus en régime alternatif pour les couches polluantes de faibles résistivités.

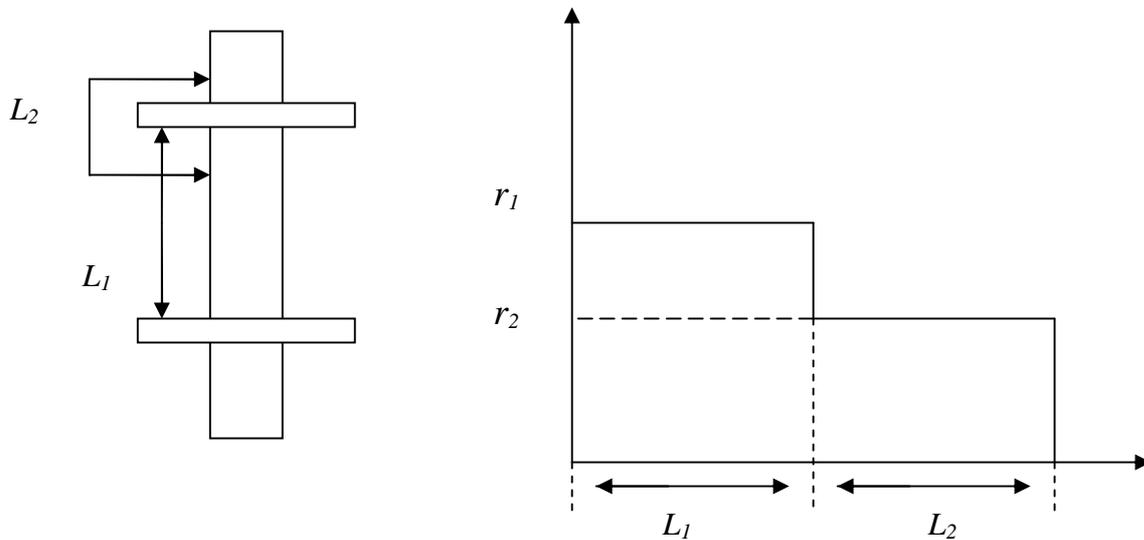


Figure IV.5 : Modèle d'un isolateur à long fût et distribution de la résistance de pollution selon Boheme et Obenaus [35]

En appliquant le critère de Hesketh [37], l'expression précédente devient

$$\frac{U_c}{L} = 0.8(Lr_p I) \quad (\text{IV.19})$$

où r_p est la résistance linéaire sur une longueur partielle de fuite L_1 ou L_2 .

IV.4. Modèles dynamiques de contournement

IV.4.1 Mécanisme de propagation

IV.4.1.1 Propagation par ionisation

Wilkins et Al-Baghdadi [38] ont proposé un mécanisme d'élongation basé sur l'ionisation et le déplacement discontinu du pied de la décharge. Selon Wilkins, la probabilité d'ionisation dans la région précédant l'avant pied de la décharge est grande, étant donné que la température ainsi que le potentiel sont élevés dans cette région.

Si l'ionisation est suffisante, alors il y a circulation d'un courant électrique. La conductivité du nouveau trajet du courant va augmenter avec celui-ci, tandis que celle du trajet précédent dans l'électrolyte reste constante. Ainsi, le changement progressif du courant total entraîne une élongation dx de la décharge.

IV.4.1.2 Propagation par force électrostatique

A partir des observations faites sur un canal d'électrolyte, Rahal [39] a essayé de mettre en évidence l'existence d'une force électrostatique s'exerçant sur la décharge, responsable du déplacement de l'arc. Il a démontré que du point de vue électrique macroscopique, cette force

était due à la dissymétrie de la distribution du potentiel, elle-même causée par le passage du courant dans le liquide couvrant la surface isolante.

Cette force provoque la courbure de la décharge vers l'électrode de masse. La décharge se déplace vers l'électrode de masse, si les conditions critiques sont satisfaites.

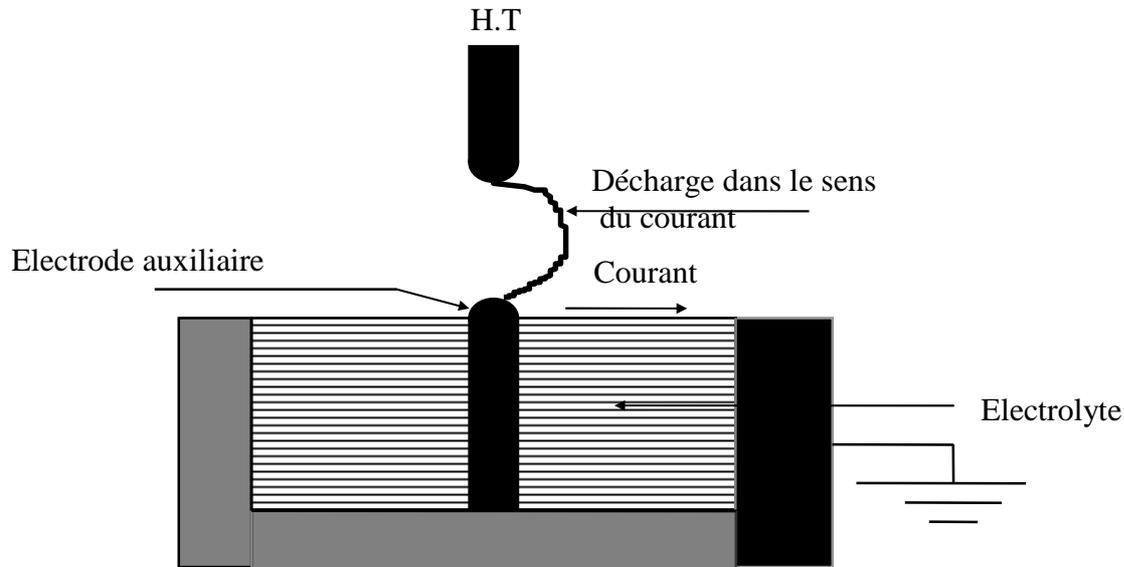


Figure IV.6 : Courbure de la décharge dans la direction de l'écoulement du courant mettant en évidence l'existence d'une force électrostatique [39]

IV.4.2. Critères de propagation de la décharge

IV.4.2.1 Critère de Hampton

A partir d'une étude expérimentale, Hampton [36] a déterminé les conditions critiques de propagation de l'arc, en remplaçant la couche de pollution en série avec l'arc par une colonne d'eau uniforme présentant une résistance linéique constante. Il a pu établir que la condition pour que le contournement se produise, est que le champ E_p dans la colonne d'eau dépasse le champ E_{arc} à l'intérieur de l'arc :

$$E_{arc} < E_p \quad (IV.20)$$

IV.4.2.2. Critère de Hesketh

En supposant que l'arc en série avec la couche de pollution mouillée se modifie de façon à rendre maximale le courant I qu'il tire de la source d'alimentation, Hesketh [40] a établi un critère de propagation de l'arc, exprimé par la relation :

$$\frac{dI}{dx} > 0 \quad (IV.21)$$

Cette relation montre, par conséquent, que la propagation de la décharge est possible, si elle provoque l'augmentation du courant circulant sur la surface isolante.

IV.4.2.3 Critère de Wilkins

En considérant qu'un système se place dans la configuration qui lui permet de dissiper le maximum d'énergie, Wilkins [34] a généralisé la condition énoncée par Hesketh [40] et établit un critère de propagation utilisant la puissance P fournie par la source :

$$\frac{dP}{dx} > 0 \quad (\text{V.22})$$

Selon Wilkins, le mouvement de la décharge se produit lorsque la puissance P augmente avec l'élongation de la décharge. Lorsque la tension appliquée au système est constante, le critère de Wilkins se réduit à la condition établie par Hesketh.

IV.4.2.4. Critère de Anjana et Lakshminarasimha

En assimilant l'arc à une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, Anjana et Al [41] ont établi une condition nécessaire à la propagation de l'arc, basée sur des conditions énergétiques : l'énergie totale fournie W_{totale} doit être supérieure ou égale à l'énergie W_{th} nécessaire pour maintenir l'arc à sa température :

$$W_{totale} \geq W_{th} \quad (\text{IV.23})$$

IV.4.2.5. Critère de Dhahbi, Beroual et Krahenbul

Ces auteurs [42] ont proposé un nouveau critère analytique de propagation de la décharge en faisant intervenir l'impédance équivalente Z_{eq} d'un circuit électrique (Figure IV.7), simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite.

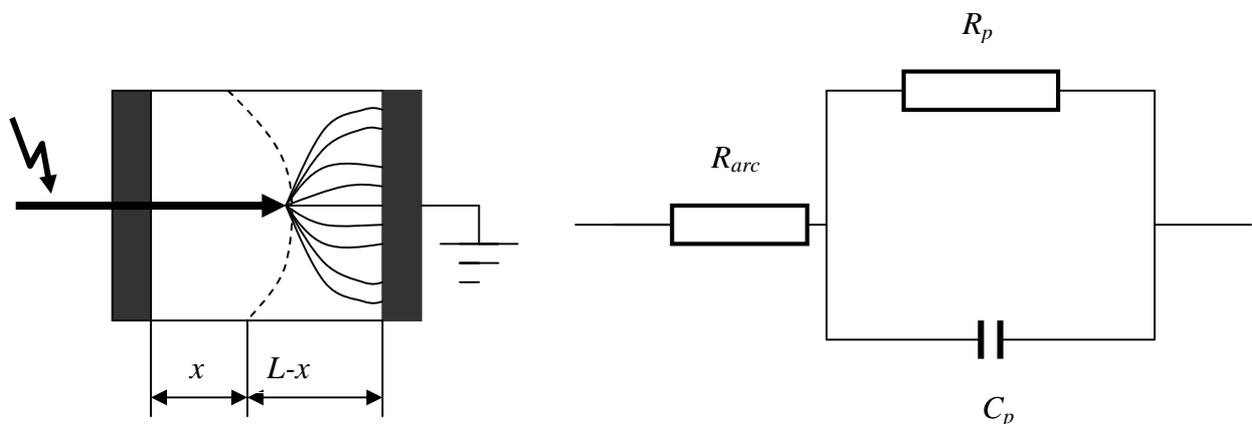


Figure IV.7 : Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent [42]

En utilisant la condition nécessaire à la propagation de l'arc, donnée par :

$$\frac{d|Z_{eq}|}{dx} \leq 0 \quad (\text{IV.24})$$

ces auteurs ont abouti à un critère qui est :

$$E_{arc} \geq \frac{E_p}{\sqrt{a}} \quad (IV.25)$$

Sous tension continue $a=1$, car $a = 1 + \omega^2 \rho_p^2 \varepsilon^2$

Où

ω : la pulsation,

ρ_p : la résistivité de la pollution,

ε : la permittivité de la pollution.

IV.4.3 Modèles dynamiques

IV.4.3.1. Modèle de Rizk

Pour caractériser la dynamique de l'arc pour le cas continu, Rizk et Nguyen [43] ont considéré une résistance d'arc qui varie selon l'équation de Mayr [44] :

$$\frac{dR_{arc}}{dt} = \frac{R_{arc}}{\tau} - \frac{R_{arc}^2 I^{n+1}}{A\tau} \quad (IV.26)$$

avec

$\tau = 100 \mu s$, constante de temps de l'arc.

$n = 0,8$ et $A = 60$; constantes de la caractéristique statique de l'arc.

IV.4.3.2. Modèle de Anjana et Lakshminarasimha

Anjana et Lakshminarasimha [41] ont proposé un modèle basé sur l'équation de Mayr [44] et sur le modèle statique d'Obenaus [28]. Ils ont proposé que l'isolateur est divisé en un certain nombre de bandes, formant des anneaux symétriques par rapport à l'axe de l'isolateur, et que l'arc est une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, dont l'énergie est donnée par :

$$W_{th} = \frac{3}{2} KTM \quad (IV.27)$$

avec

T : la température de l'arc,

M : le nombre de particules neutres dans l'arc,

K : la constante de Boltzman.

Pour la propagation de l'arc, Anjana et Al [41] proposent leur propre modèle, selon lequel l'arc ne se déplace que si son énergie totale W_{totale} est supérieure ou égale à l'énergie W_{th} nécessaire pour maintenir l'arc à sa température, où W_{totale} est donnée par l'expression suivante :

$$W_{totale} = (E_{arc} I_{arc} - P_0) dt \quad (IV.28)$$

avec :

E_{arc} : le gradient de la décharge,

I_{arc} : le courant de la décharge,

dt : l'incrément de la longueur de la décharge,

P_0 : les pertes par unité de longueur (constantes).

Si la condition de propagation n'est pas satisfaite, la tension est incrémentée de dU et le programme est repris depuis le début. Par contre, si la condition est satisfaite, la vitesse de propagation de l'arc est calculée par :

$$v = \mu E_{arc} \quad (IV.29)$$

où

μ : est la mobilité de l'arc.

On déduira la longueur d'arc $dx = v dt$

Donc la nouvelle longueur est $(x+dx)$. Si, cette dernière atteint la longueur totale de fuite, il y a contournement. Dans le cas contraire, le temps est incrémenté et les calculs sont repris depuis le début. Les différentes étapes du programme de calcul sont données dans l'organigramme de la figure IV.8.

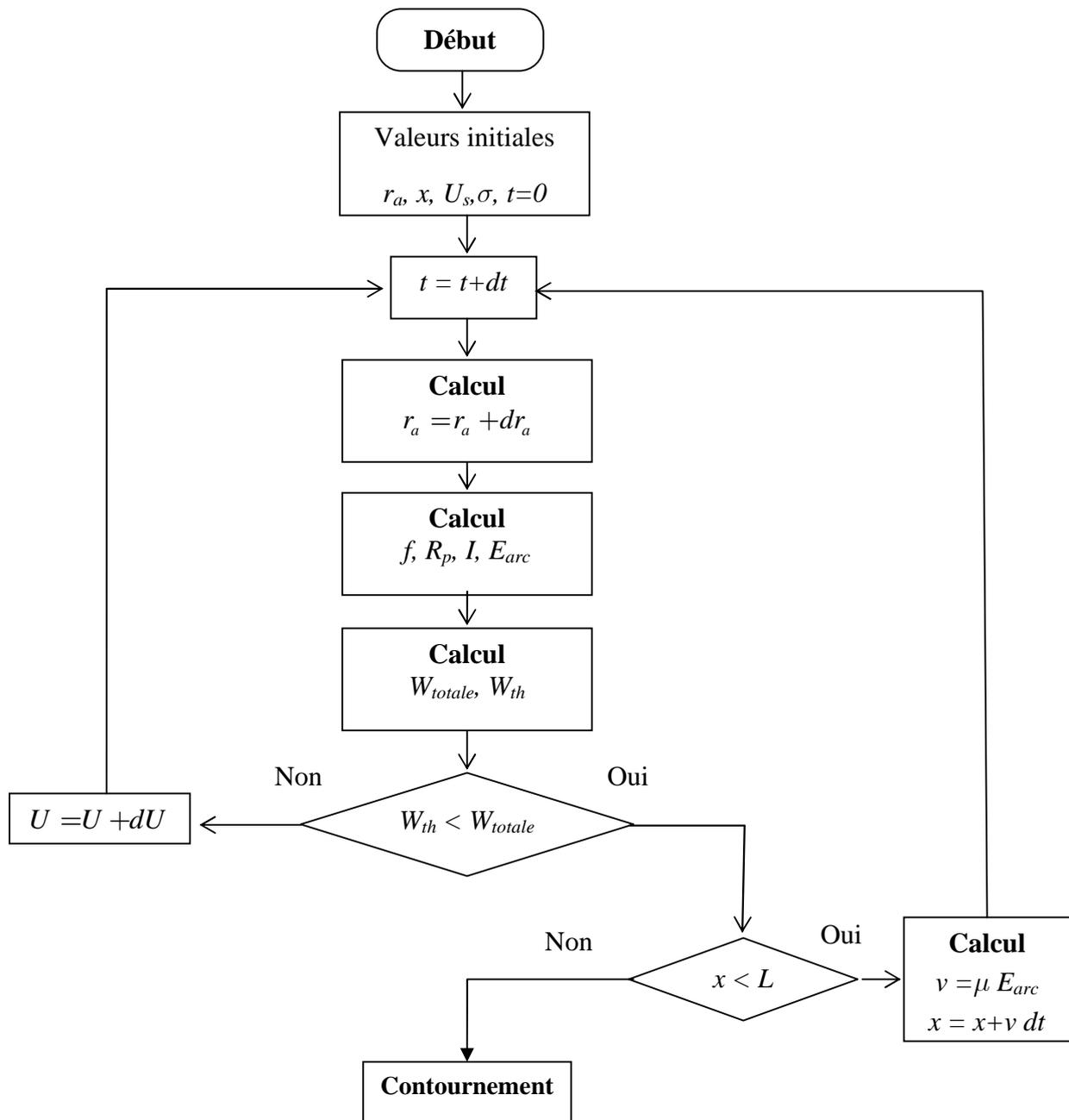


Figure IV.8: Organigramme du modèle de Anjana et Lakhminarasimha [41]

IV.4.3.3. Modèle de Sundararajan et Gorur

Sundararajan et Gorur [45] ont proposé un modèle dynamique en continu, qui ressemble à celui de Anjana et Lakhminarasimha, mais basé sur le critère de propagation de Hampton [36].

Pour le gradient de la tension dans la couche de pollution, ils ont utilisé l'expression :

$$E_p = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{IV.30})$$

avec

r_p : la résistance linéique de la couche de pollution,

$A = 63$ et $n = 0.5$: les constantes de la caractéristique statique de l'arc.

Notons que la valeur de E_p utilisée par Sundrarajan et al est en fait la contrainte critique

$$E_c = A \frac{1}{n+1} r_p^{n+1} \text{ établie par Neumarker [31].}$$

IV.5 Conclusion

Le choix entre les différents modèles technique 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 effectués 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 on 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 couche de pollution, leur position par rapport aux électrodes ainsi que la polarité de la tension.

Chapitre V

Partie expérimentale



V Partie expérimentale

V.1 Introduction

L'étude du comportement des isolateurs recouverts de pollution en 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.

La répartition de la pollution sur les isolateurs de haute tension est soit uniforme ou non uniforme. La non uniformité (longitudinale et transversale), est due au profil complexe des isolateurs, au vent.....etc.

A cet effet, nous nous intéresserons en premier lieu, à l'impact d'une distribution uniforme de la couche de pollution sur les surfaces des isolateurs plans en verre, en mettant en relief l'influence de la largeur et la conductivité de la pollution sur la tension de contournement.

En second lieu, nous nous intéresserons à l'illustration des distributions non uniformes, transversales de la couche de pollution. La non uniformité transversale consiste à varier la conductivité superficielle et la largeur des zones polluées des deux isolateurs plans en verre.

Afin de mieux étudier le comportement de deux isolateurs mis en parallèle, différents modèles de laboratoire ont été proposés dans la littérature. En effet, les isolateurs réels sont souvent remplacés par des modèles de géométrie simple. Dans ces modèles, les formes complexes des isolateurs sont représentées par des rectangles équivalents et la ligne de fuite de l'isolateur par la distance interélectrode. Même si ces isolateurs ne reflètent pas exactement le comportement des isolateurs réels, ils permettent tout de même, une meilleure visualisation du phénomène de court-circuit.

V.2 Technique expérimentales

Le model expérimental est un système de deux isolateurs plans en verre mis en parallèle, de forme rectangulaire, chaque plaque isolante a une longueur de 20 cm et une largeur de 15 cm. Elle est munie de deux électrodes en papier aluminium qui y adhèrent parfaitement, elles sont collées à la plaque de verre d'une manière à avoir un bon contact. On pose sur chaque plaque les électrodes d'essai, on branche l'une d'elles à la borne haute tension et l'autre à la terre. La distance interélectrode est fixée à $d = 10$ cm durant tous les essais.

V.2.1 Dispositif expérimental

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/ 135 kV), d'un modèle expérimental (deux isolateurs plans en verre), et d'un dispositif de mesure. Les éléments qui constituent le dispositif sont schématisés sur la Figure **V.1**.

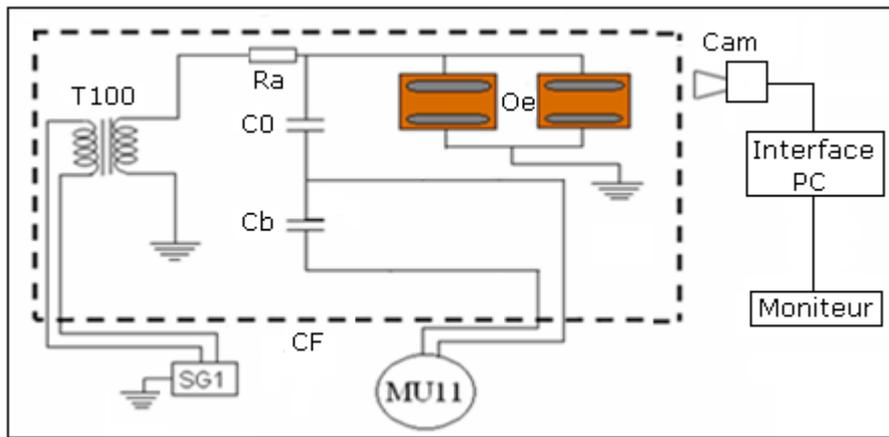


Fig. V.1: Schéma électrique du dispositif expérimental

T100 : Transformateur 0,08 A / 135 kV ;

Ra : Résistance d'amortissement : 160 k ;

C0 : Capacité haute tension du diviseur capacitif ;

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

Cam : Caméscope ;

MU11 : Voltmètre de crête ;

SG1 : Commande de l'alimentation du transformateur ;

CF : Cage de faraday ;

Cb : Capacité basse tension du diviseur capacitif ;

V.2.2 Circuit d'alimentation

Il est constitué d'un transformateur d'essai (0,08 A/135 kV, 8 kVA), dont le primaire est relié à un transformateur de réglage (autotransformateur intégré dans SG1), permettant d'ajuster la tension.

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 de connexions, capacité du câble coaxiale et la capacité d'entrée des appareils de mesure, il permet de diviser la tension réelle de contournement par 404. 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 et la propagation de l'arc peuvent être visualisées.

V.2.5 Mode opératoire

Avant chaque essai, les deux isolateurs doivent être bien rincés avec une eau dont la conductivité est inférieure à la conductivité de la couche de pollution, puis séchés à l'aide du papier absorbant. Les électrodes sont fixées sur les deux plaques isolantes.

Pour éliminer les espaces d'air entre les électrodes et les deux plaques isolantes, des électrodes en papier aluminium sont collées avec du mazoute, pour assurer un bon contact avec les surfaces des deux plaques.

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

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 GA33.04.04 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 : (4.82, 3.75, 2.85, 1.93 ,0.96, 0.024) μS .

V.2.7 Procédé d'application de la pollution

La figure **V.2** illustre la manière de préparer l'objet d'essai. L'application de la pollution est effectuée par un balayage de gauche à droite sur la surface interélectrode de la plaque isolante à l'aide d'une éponge remplie de 20 ml de la solution polluante, ensuite on applique immédiatement la tension d'essai.

Pour assurer une bonne reproductibilité des couches polluantes, nous avons gardé durant tous les essais la même quantité de la solution à injecter dans l'éponge qui est maintenue à 20 ml, ainsi que le mode d'application de la pollution.

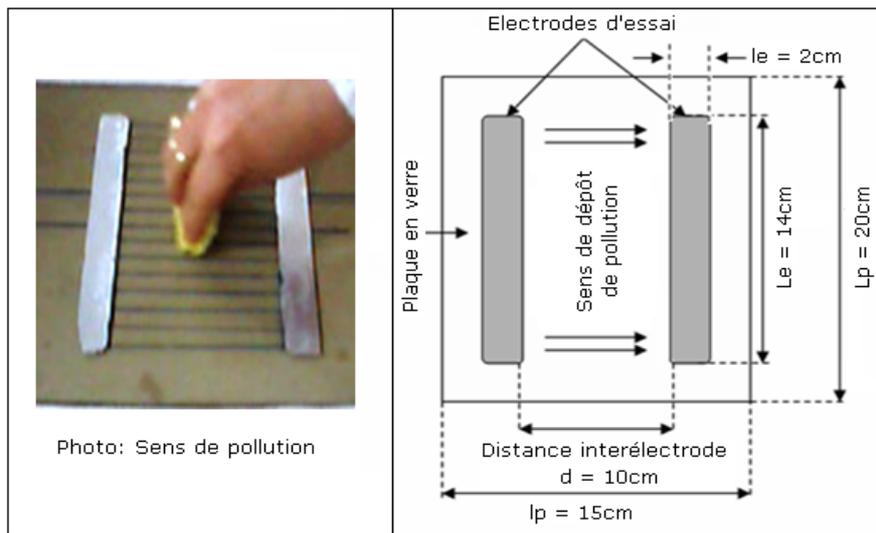


Fig. V.2: Plaque d'essai avec le sens d'application de la pollution

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 et distribution de la pollution. La mesure de la tension de contournement nous permet de prévoir les paliers, ainsi que les cas limites de La tension de contournement retenue pour chaque cas de conductivité et chaque distribution de la pollution qui est la moyenne arithmétique de vingt cinq essais.

V.2.9 Mesure des conductivités volumiques et superficielles

Pour chaque conductivité volumique mesurée à l'aide d'un conductimètre (fig. V.3.1) qui sont: 2700, 1500, 1000, 300 et 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nous avons 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 V.3.2, En suite nous avons vérifié que les écarts maximaux sont conformes aux exigences de la publication CEI 60-1 et 60-2 qui sont : le plus grand 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 trente mesures effectuées sur l'ensemble de la surface polluée de la plaque isolante en verre.

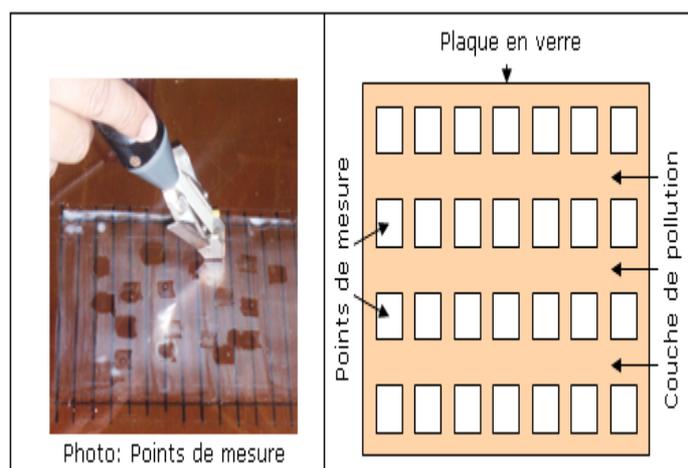
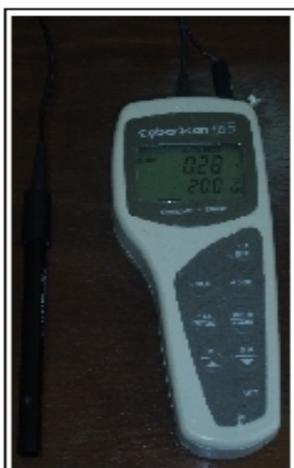


Photo: Points de mesure

Fig. V.3.2: conductimètre

Fig. V.3.1: Mesure des conductivités superficielles

Les conductivités superficielles sont respectivement égales à 4.82, 3.75, 2.85, 1.93, 0.96 et 0.024 μS .

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

V.2.10 Correction des résultats en fonction des conditions atmosphériques

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 : $\hat{U}_c = (K_h/K_d) U_m$

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

\hat{U}_c : Tension de contournement dans les conditions normales de température θ_0 , de pression, P_0 et d'humidité H_0 .

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

K_h : Facteur de correction relatif à l'humidité.

$$K_d = \frac{P}{100} \left[\frac{273+20}{273+\theta} \right] = 2.93 \frac{P}{273+\theta}, \quad P \text{ (kPa) et } \theta \text{ (}^\circ\text{C)}$$

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

L'abaque de la figure V.4, 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.4 est reportée sur l'abaque de la figure V.5, pour déduire K_h .

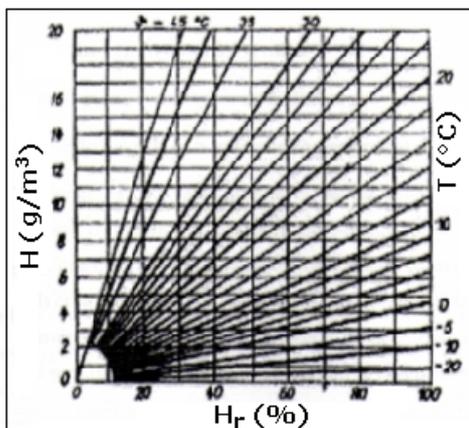


Fig. V.4: $H = f(H_r, T)$

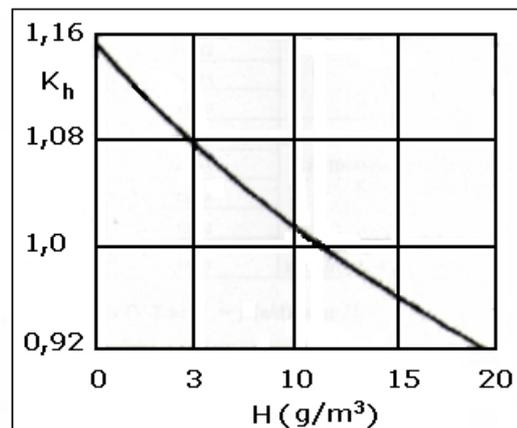


Fig. V.5: $K_h = f(H)$

Ex: $U_c = 21,30\text{ kV}$, ($\theta = 18^\circ\text{C}$, $P = 1017\text{ hPa}$, $H_r = 43\%$), $U_{c0} = 22,037\text{ kV}$

V.3 Mesure des facteurs d'influence de la tension de contournement du système

V.3.1 Pollution uniforme

Dans cette partie, nous avons fixé les largeurs des couches de pollution ($l_{c1} = l_{c2} = 14\text{cm}$) et les conductivités superficielles des deux surfaces de la bande polluée des deux isolateurs

$\sigma_1 = \sigma_2 = (0.024, 0.96, 1.93, 2.85, 3.75 \text{ et } 4.82) \mu\text{S}$, comme le montre la figure V.6.

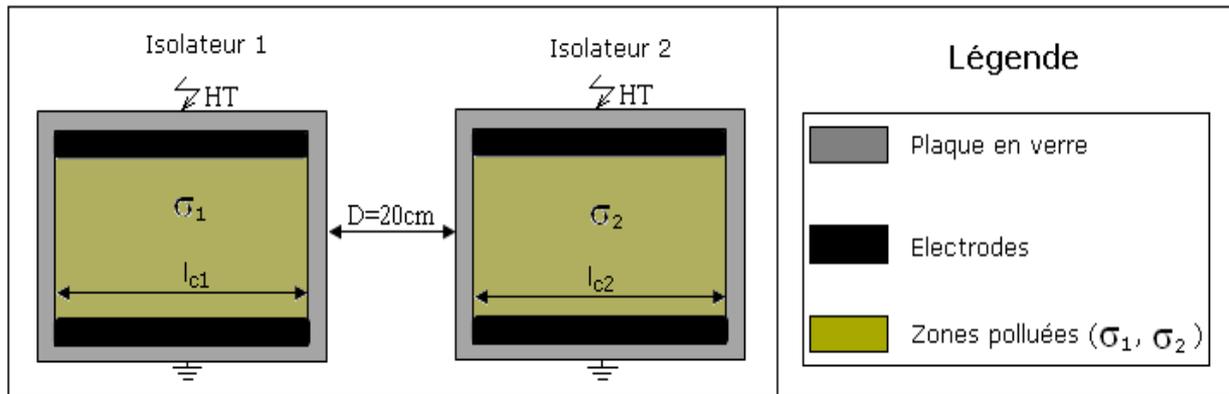


Fig. V.6: Configuration de la pollution sur les deux plaques isolantes

La figure V.7 représente l'allure de la tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle de la couche électrolytique recouvrant les surfaces des isolateurs.

Ces résultats indiquent que la tension de contournement diminue avec l'augmentation de la conductivité superficielle.

On constate que les deux isolateurs sont très rigides à l'état sec où la valeur de la tension de contournement est très élevée ($\hat{U}_c=73,33 \text{ kV}$) par contre dans le cas pollué la rigidité diminue avec l'augmentation du degré de sévérité. Pour la conductivité superficielle $\sigma_1 = \sigma_2=4,82 \mu\text{S}$ la tension de contournement est trois fois plus faible que la tension de contournement de l'isolateur à l'état propre et sec.

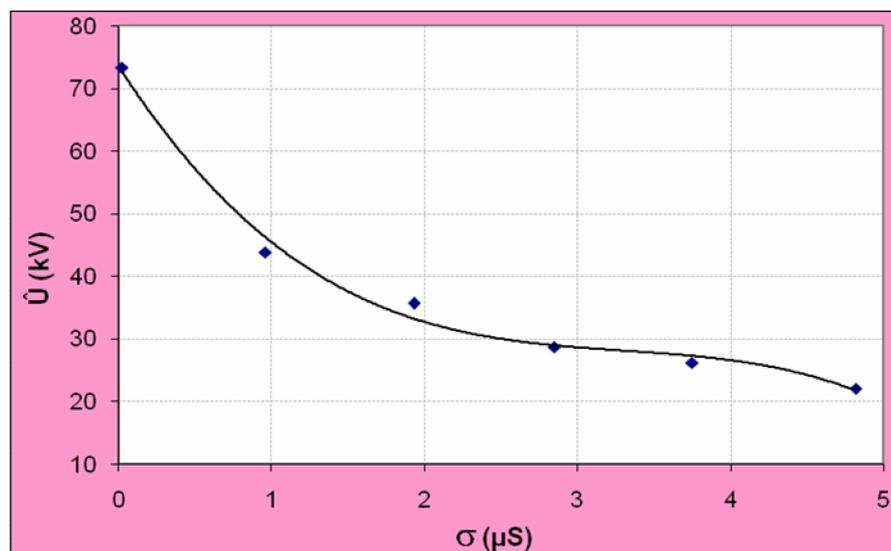


Fig. V.7: Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle

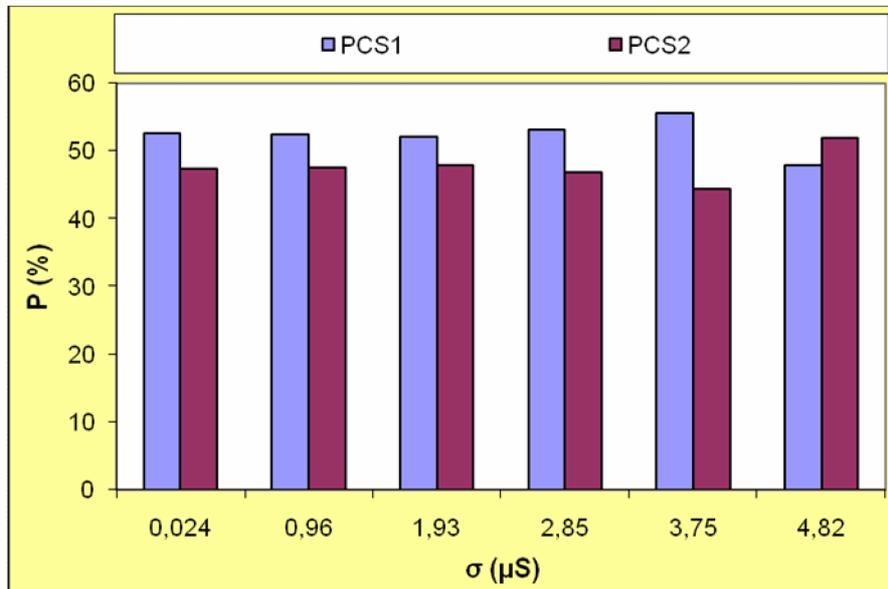


Fig. V.8: Probabilité de contournement pour différentes conductivités superficielles

- PCS1: Probabilité de contournement de la surface du premier isolateur
- PCS2: Probabilité de contournement de la surface du deuxième isolateur

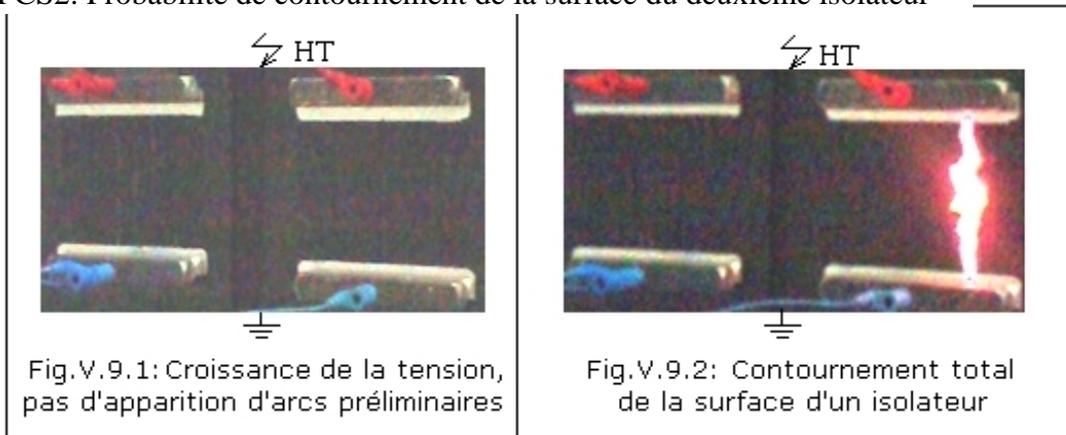


Fig. V.9: Processus de contournement des deux plaques isolantes propres et sèches

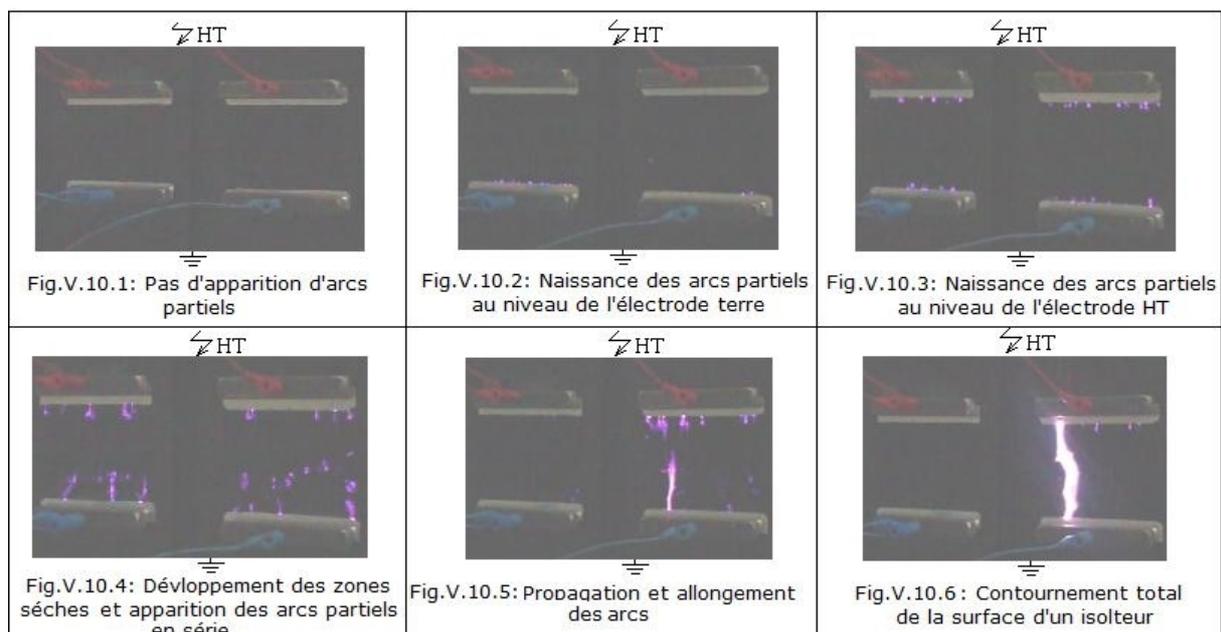


Fig. V.10 : Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées uniformément
 ($\sigma_1 = \sigma_2 = 4,82 \mu\text{S}$ et $l_{c1} = l_{c2} = 14\text{cm}$)

Durant tous les essais nous avons recensé les lieux d'apparition des arcs de contournements et les résultats du dénombrement sont représentés en figure V.8 qui montre que les probabilités de contournement des deux surfaces des isolateurs sont presque identiques lorsque la pollution est répartie uniformément sur ces deux plaques isolantes.

La figure V.9 montre le chemin de l'arc pour deux isolateurs propres et secs et on constate le contournement du premier isolateur **Fig. V.9.2**.

Les figures V.10.1 à V.10.6 montrent le processus de contournement et le chemin de l'arc dans le cas ($\sigma_1 = \sigma_2 = 4,82 \mu\text{S}$).

En premier lieu on remarque la naissance des arcs sur les surfaces d'un seul isolateur, et lorsque la tension dépasse un certain seuil on observe l'apparition et l'allongement d'arcs sur les surfaces des deux isolateurs, les arcs s'allongent jusqu'au contournement total de l'un des deux isolateurs.

V.3.2 Pollution non uniforme

V.3.2.1 Système d'isolateurs à deux couches de pollution

a) Une surface propre et sèche, une surface polluée

Dans cette partie, les largeurs ont été fixées à 14 cm, la surface du premier isolateur est gardée propre et sèche, et la conductivité superficielle de la surface du deuxième isolateur prend les valeurs $\sigma_2 = (0.024, 0.96, 1.93, 2.85, 3.75 \text{ et } 4.82) \mu\text{S}$, conformément à la figure V.11.

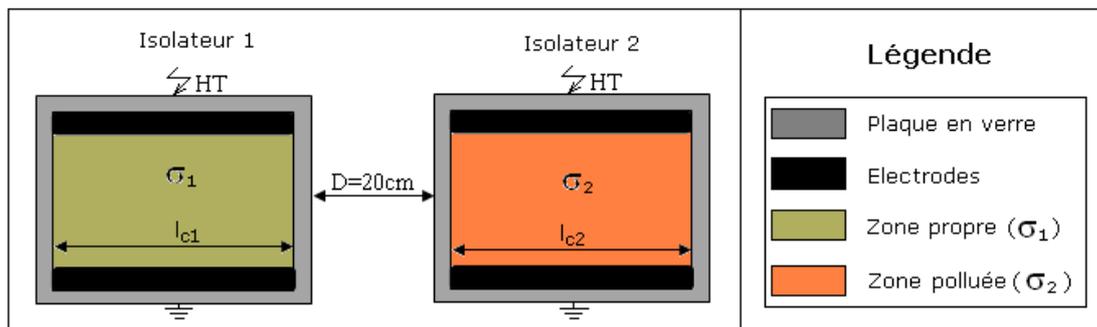


Fig. V.11: Configuration de la pollution sur les deux plaques isolantes (σ_1 fixe (propre); σ_2 variable)

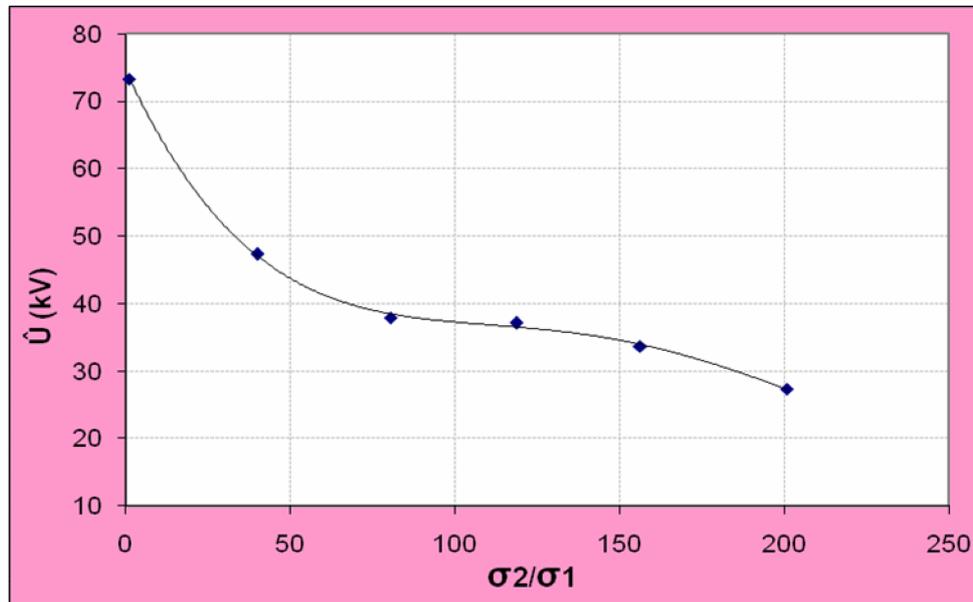


Fig. V.12: Tension de contournement en fonction de rapport des conductivités superficielles
 La figure **V.12** représente la tension de contournement en fonction du rapport des conductivités superficielles (σ_2/σ_1).

L'analyse des résultats montre que la tension de contournement décroît avec le rapport des conductivités superficielles des deux couches.

Nous constatons que la valeur de la tension de contournement est très élevée dans le cas de la pollution non uniforme (un isolateur sec et l'autre pollué avec une pollution de $\sigma_2 = 0,96\mu\text{S}$ à $\sigma_2 = 4.82\mu\text{S}$). Par contre dans le cas uniforme la tension est minimale, donc les deux isolateurs sont très rigides en distribution non uniforme de pollution.

La figure **V.13** montre que la probabilité de contournement du premier isolateur (propre et sec) est nulle, sauf dans le cas où le rapport des conductivités est égal à l'unité, la probabilité de contournement est presque la même pour les deux isolateurs.

Les figures **V.14.1** à **V.14.6** représentent les étapes de contournement dans le cas où le rapport des conductivités $\sigma_2/\sigma_1=200.83$, on remarque la naissance des arcs sur la surface de l'isolateur pollué, ces arcs s'allongent jusqu'au contournement total de l'un des deux isolateurs.

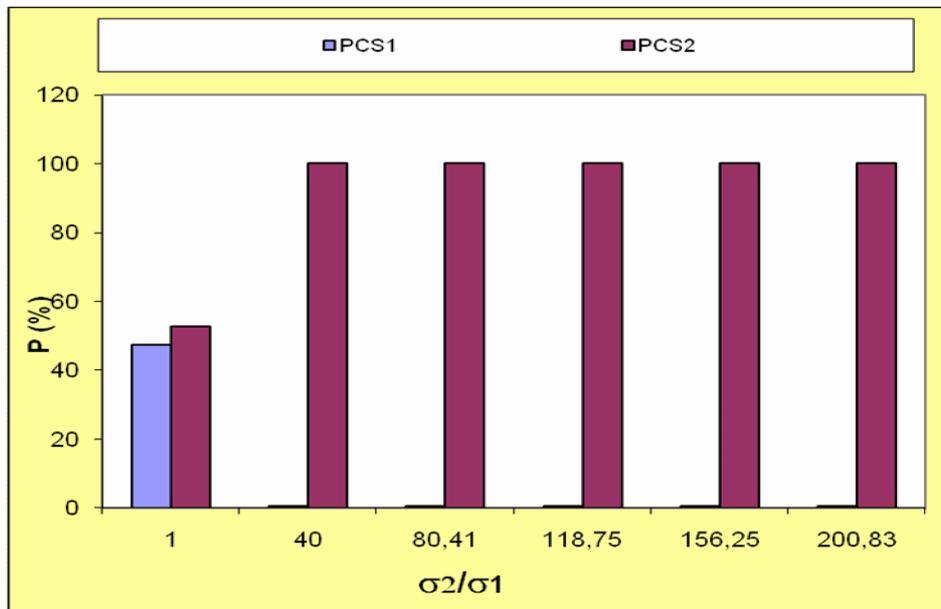


Fig. V.13: Probabilité de contournement pour différents rapports des conductivités superficielles

- PCS1 : Probabilité de contournement de la surface de l'isolateur propre et sec
- PCS2 : Probabilité de contournement de la surface de l'isolateur pollué
 $\sigma_2 = (0,024 \ 0,96 \ 1,93 \ 2,85 \ 3,75 \ \text{et} \ 4,82) \ \mu\text{S}$

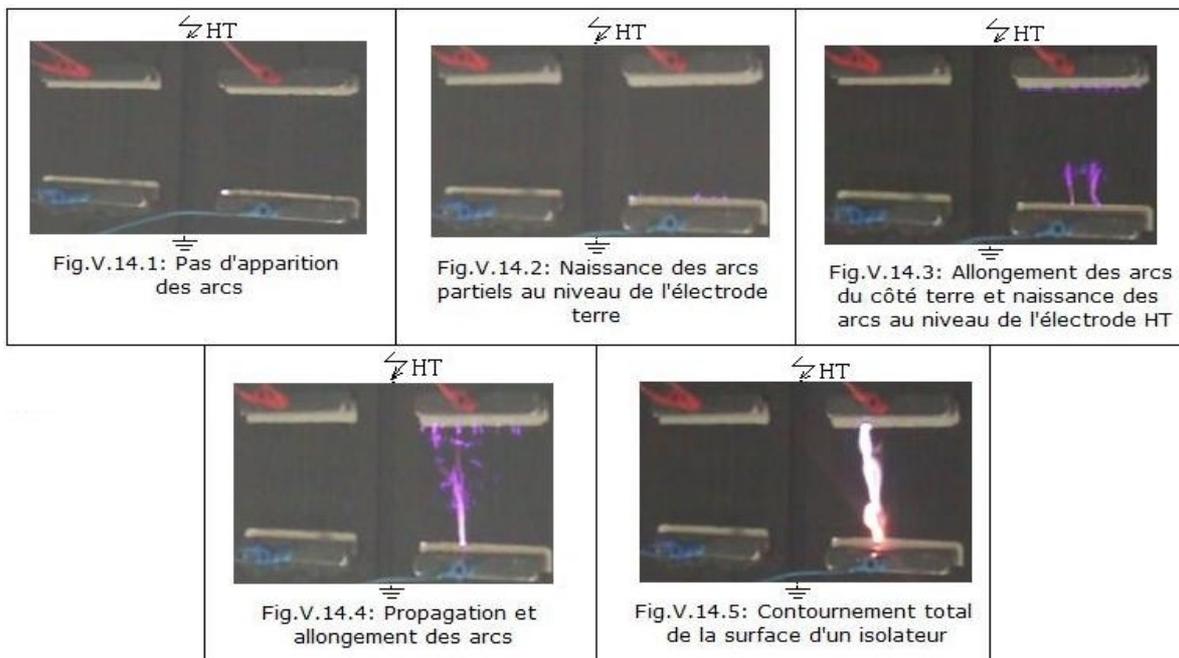


Fig. V.14: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées avec ($\sigma_1 = 0,024 \mu\text{S}$, $\sigma_2 = 4,82 \ \mu\text{S}$ et $l_{c1} = l_{c2} = 14 \text{ cm}$)

b) Une surface fortement et une surface faiblement polluée

Dans cette partie, les largeurs ont été fixées à 14 cm, la surface du premier isolateur est fortement polluée ($\sigma_1 = 4,82 \ \mu\text{S}$) et la conductivité superficielle de la surface du deuxième isolateur prend les valeurs, $\sigma_2 = (0,024 \ 0,96 \ 1,93 \ 2,85 \ 3,75 \ \text{et} \ 4,82) \ \mu\text{S}$, conformément à la figure V.15.

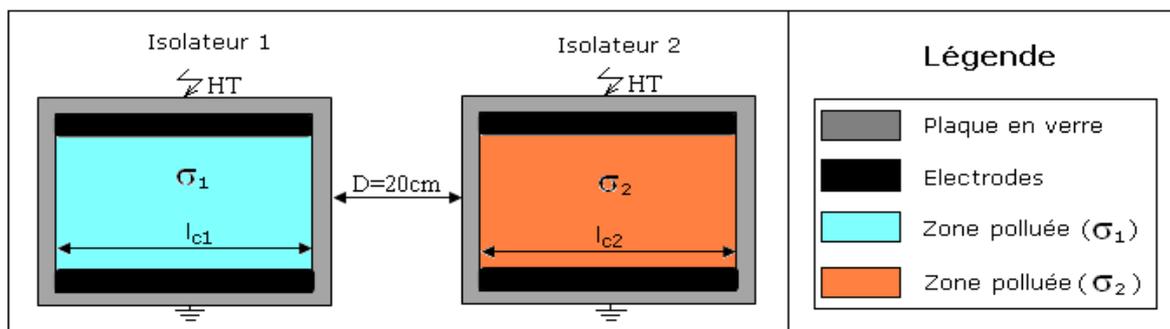


Fig. V.15: Configuration de la pollution sur les deux plaques isolantes (σ_1 fixe (pollué) ; σ_2 variable)

La figure **V.16** donne l'allure de la tension de contournement en fonction des rapports des conductivités (σ_2/σ_1). Ces résultats indiquent que la tension de contournement diminue avec la croissance du rapport des conductivités, et que les deux isolateurs sont très rigides lorsque le rapport des conductivités est plus petit.

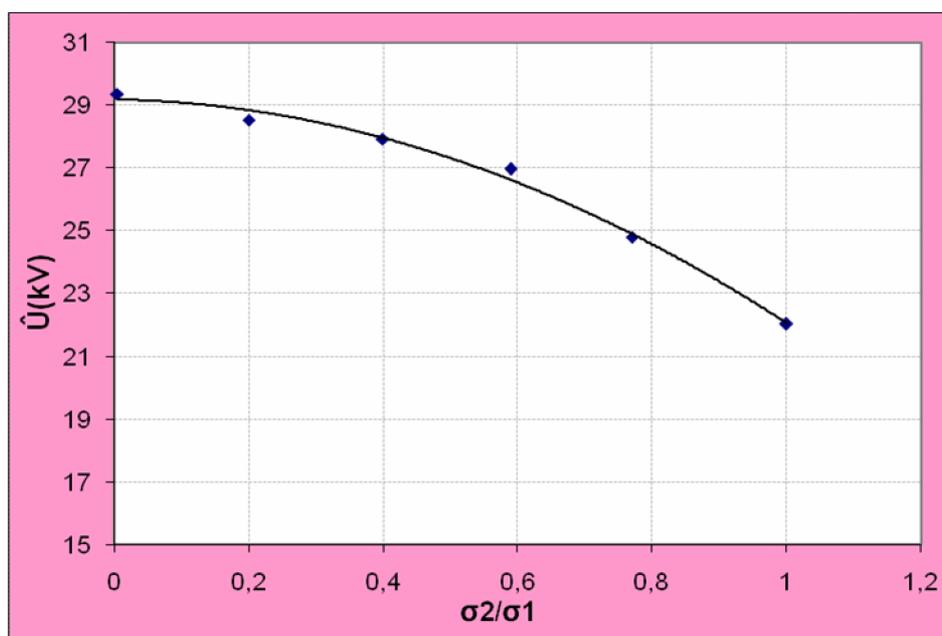


Fig. V.16: Tension de contournement en fonction des rapports des conductivités

La figure **V.17** montre que la probabilité de contournement de l'isolateur fortement pollué est plus importante par rapport à celle de l'isolateur faiblement pollué, cette probabilité tend vers 100% lorsque le rapport des conductivités (σ_2/σ_1) est inférieur à 0,59.

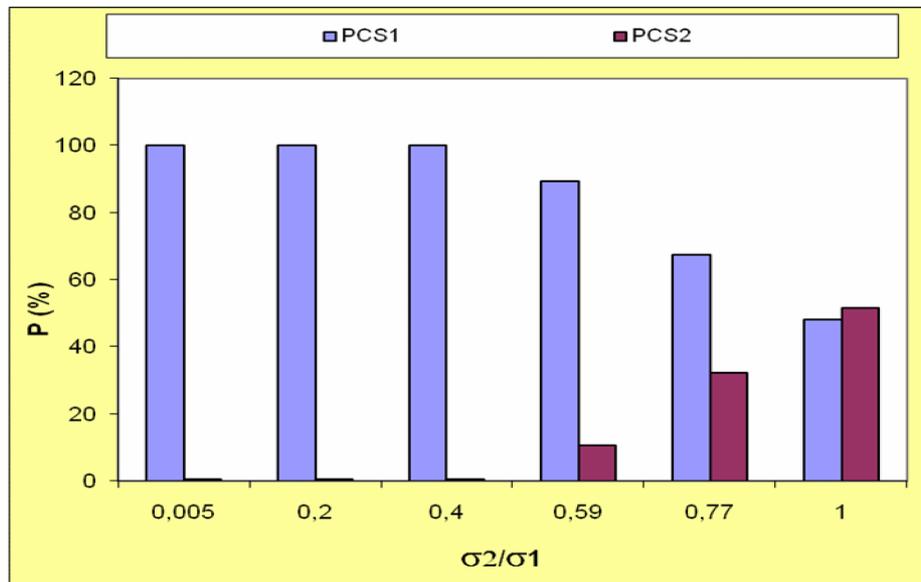


Fig. V.17: Probabilité de contournement pour différents rapports des conductivités superficielles.

- PCS1: Probabilité de contournement de la surface de l'isolateur fortement pollué ($\sigma_1 = 4,82\mu\text{S}$)
- PCS2: Probabilité de contournement de la surface de l'isolateur faiblement pollué
 $\sigma_2 = (0,024 \ 0,96 \ 1,93 \ 2,85 \ 3,75 \ 4,82) \mu\text{S}$.

Les figures V.18.1 à 6, représentant les étapes de contournement dans le cas où ($\sigma_2/\sigma_1=0,2$), montrent que la naissance, le développement et le contournement s'effectue totalement sur la surface du deuxième isolateur fortement pollué, par contre sur les figures V.19.1 à 6, où le rapport ($\sigma_2/\sigma_1=0,77$) nous remarquons en premier lieu la naissance des arcs sur la surface de l'isolateur fortement pollué, les arcs s'allongent jusqu'au contournement total de celui-ci.

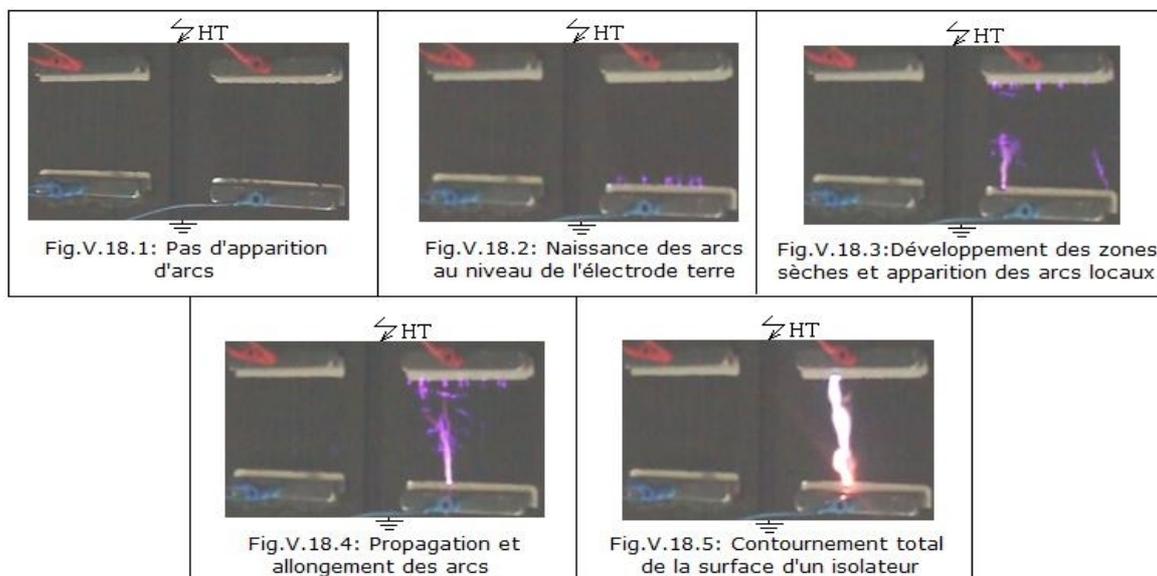


Fig. V.18: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées avec ($\sigma_2=0,96\mu\text{S}$, $\sigma_1=4,82\mu\text{S}$ et $l_{c1}=l_{c2}=14\text{ cm}$)

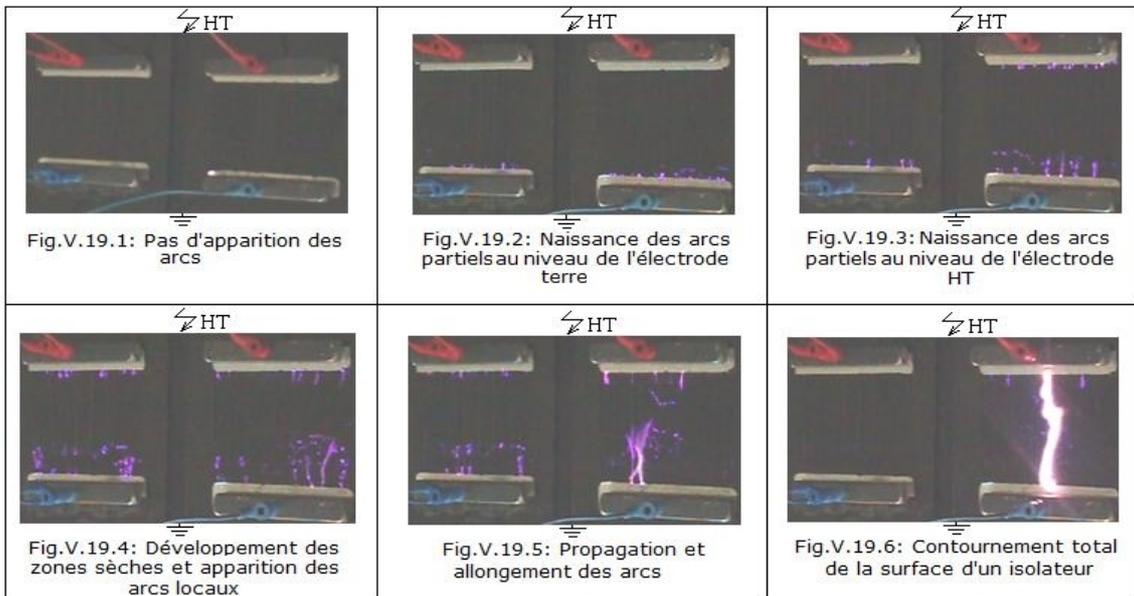


Fig. V.19: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées avec ($\sigma_2 = 3,75 \mu S$, $\sigma_1 = 4,82 \mu S$ et $l_{c1} = l_{c2} = 14 \text{ cm}$)

V.3.2.2 Système d'isolateurs à trois couches de pollution

a) Rapport des largeurs fixe, rapport des conductivités superficielles variable

Dans cette partie, le rapport des largeurs est fixé à 1 et celui des conductivités varie entre 0,0049 et 1) conformément à la figure V.20.

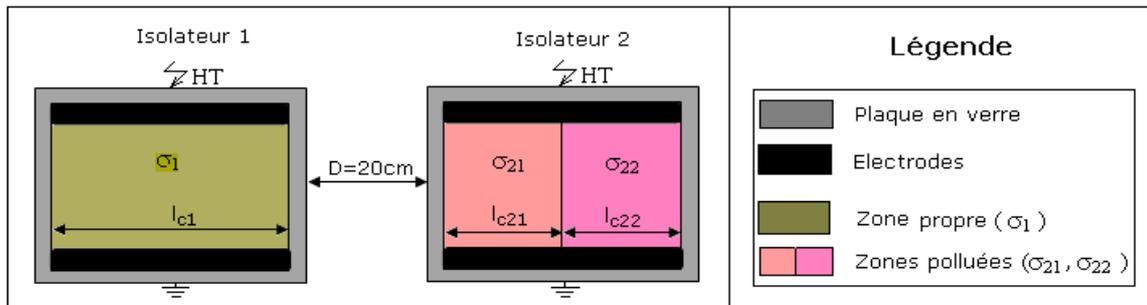


Fig. V.20: Configuration de la pollution sur les deux plaques isolantes

La figure V.21 représente l'allure de la tension de contournement en fonction du rapport des conductivités superficielles (σ_2 / σ_1).

L'analyse de ces résultats indique que la tension de contournement diminue avec l'augmentation du rapport des conductivités.

On constate que la valeur de la tension de contournement est minimale dans le cas d'un système composé d'un isolateur propre et d'un deuxième à deux couches non uniformément polluées.

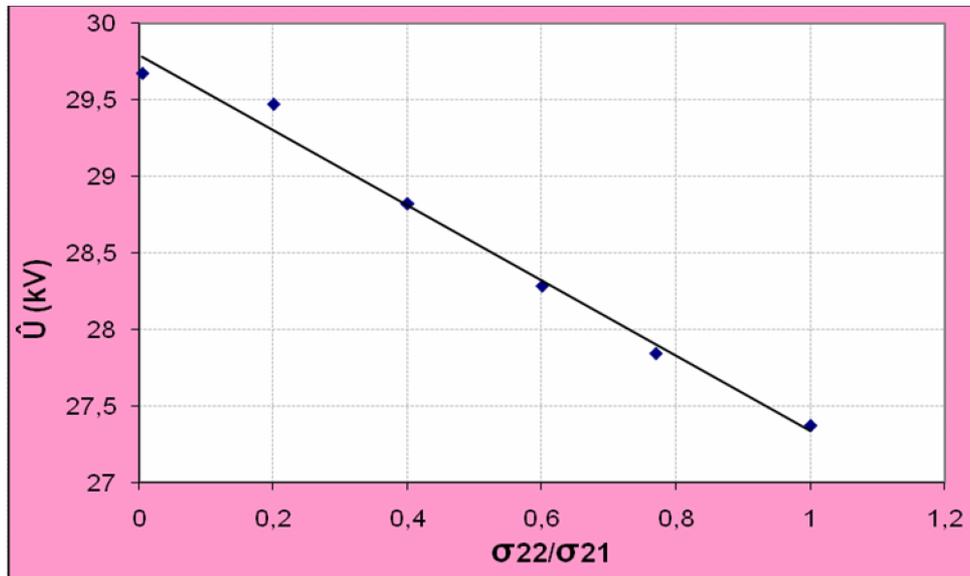


Fig. V.21: Tensions de contournement en fonction du rapport des conductivités superficielles

La figure V.22 montre que la probabilité de contournement de la surface fortement polluée est plus importante que celle faiblement polluée.

Cette probabilité tend vers 100% lorsque le rapport des conductivités (σ_{22}/σ_{21}) est inférieur à 0,6.

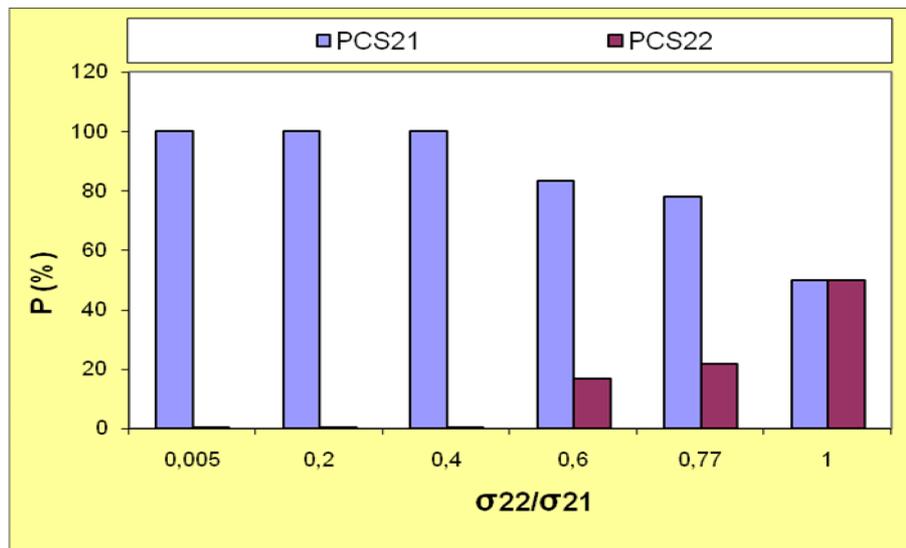


Fig. V.22: Probabilité de contournement pour les différents rapports des conductivités superficielles

- PCS21: Probabilité de contournement de la première surface de l'isolateur fortement polluée ($\sigma_{21}=4,82 \mu\text{S}$)
- PCS22: Probabilité de contournement de la deuxième surface de l'isolateur polluée avec $\sigma_{22}=(0,024 \ 0,96 \ 1,93 \ 2,85 \ 3,75 \ \text{et} \ 4,82) \mu\text{S}$

Les figures V.23.1 à 5 qui représentent les étapes de contournement dans le cas où ($\sigma_{22}/\sigma_{21}=0,77$), montrent la naissance et le développement de l'arc jusqu'au contournement total.

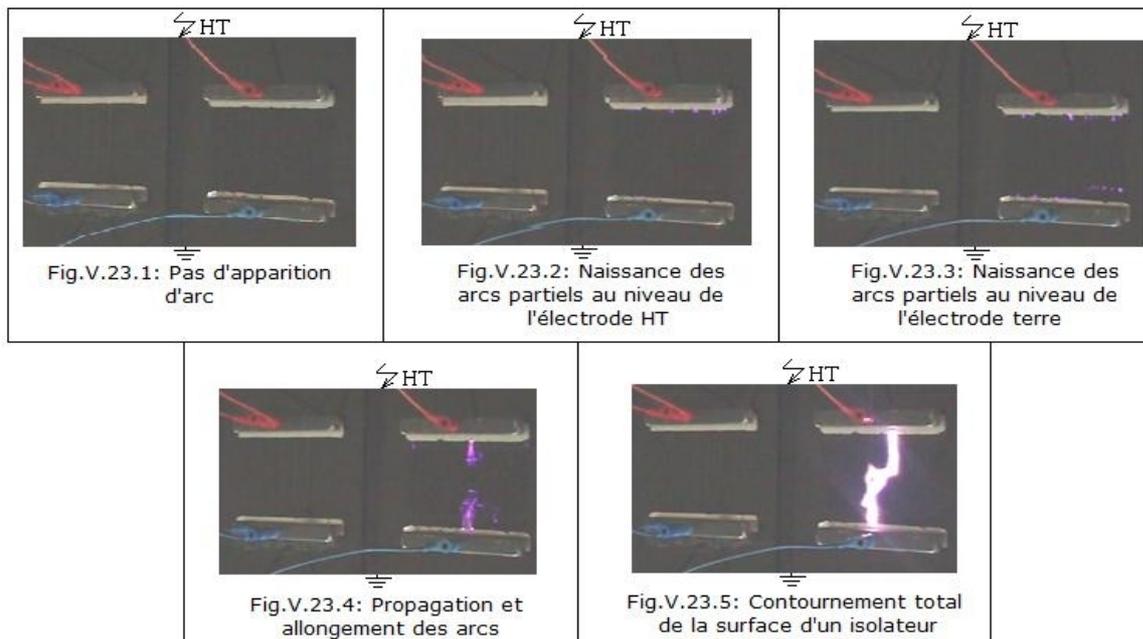


Fig. V.23: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées avec ($\sigma_1=0,024\mu S$, $\sigma_{22}/\sigma_{21}=0,77$, $l_{c1}=14cm$ et $l_{c21}=l_{c22}=7cm$)

b) Rapport des largeurs variable, rapport des conductivités superficielles fixe

Dans cette partie, le rapport des largeurs des deux surfaces du deuxième isolateur prend les valeurs (0,071 0,35 0,5 0,64 et 0,85), leurs conductivités superficielles sont respectivement de 4,82 et 1,96 μS . quant à la surface du premier isolateur est gardé propre et sèche conformément à la figure V.24.

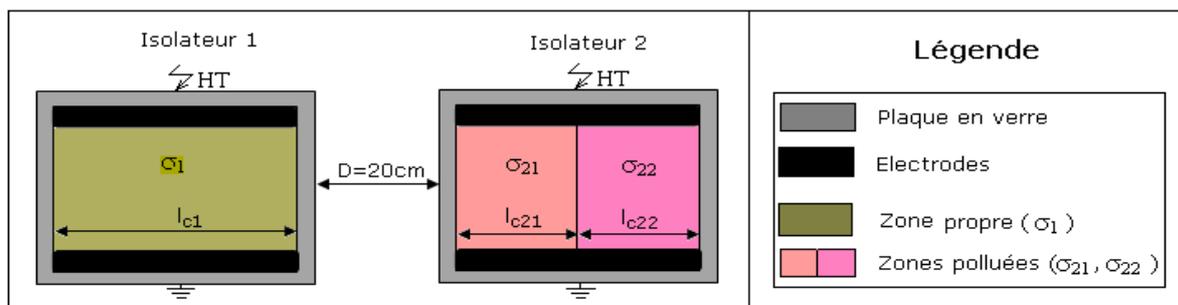


Fig. V.24: Configuration de la pollution sur les deux plaques isolantes (l_{c22}/l_{c21} variable, σ_{22}/σ_{21} fixe)

La figure V.25 représente l'allure de la tension de contournement en fonction du rapport des largeurs (l_{c22}/l_{c21}). Ces résultats indiquent que la tension de contournement augmente avec l'accroissement du rapport des largeurs et que la tension est obtenue 27.33kV lorsque le rapport des largeurs est égal à 0,16. Par contre la rigidité la plus élevée du système est obtenue pour $l_{c22}/l_{c21} = 6$.

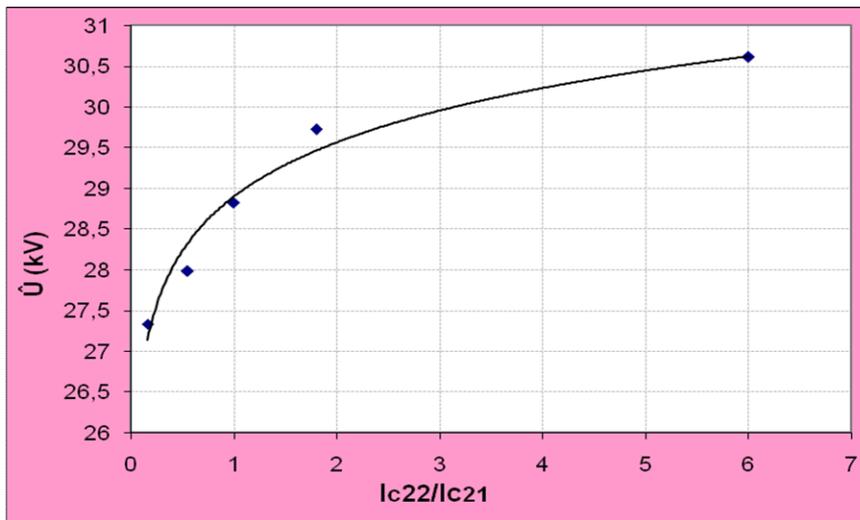


Fig. V.25: Tension de contournement en fonction des rapports des largeurs

La figure **V.26** montre que la probabilité de contournement de la zone fortement polluée est très élevée et tend vers 100%, lorsque le rapport des largeurs (l_{c22}/l_{c21}) est inférieur à 1,8.

Les figures **V.27.1 à 5** qui représentent les étapes de contournement dans le cas où le rapport est égal à 6, montrent la naissance et le développement de l'arc jusqu'au contournement total. Par contre sur les figures **V.28.1 à 5** où le rapport (l_{c22}/l_{c21}) est égal à 1 nous remarquons en premier lieu la naissance des arcs sur la zone fortement polluée, puis sur la zone faiblement polluée, en suite les arcs s'allongent jusqu'au contournement total de l'une des deux surfaces du système.

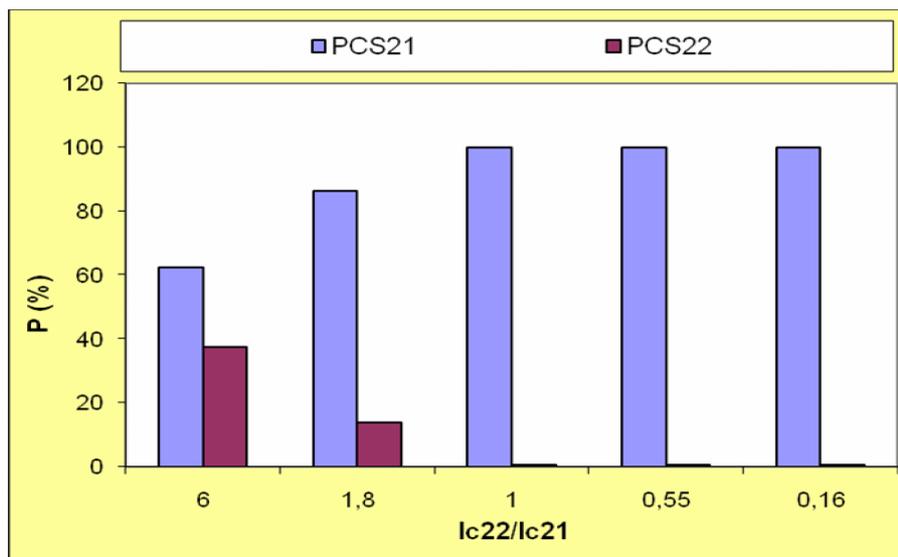


Fig. V.26: Probabilité de contournement pour différents rapports des largeurs

■ PCS21: Probabilité de contournement de la première surface de l'isolateur fortement pollué ($\sigma_{21}=4,82\mu\text{S}$)

■ PCS22: Probabilité de contournement de la deuxième surface de l'isolateur pollué avec ($\sigma_{22}=1,93\mu\text{S}$)

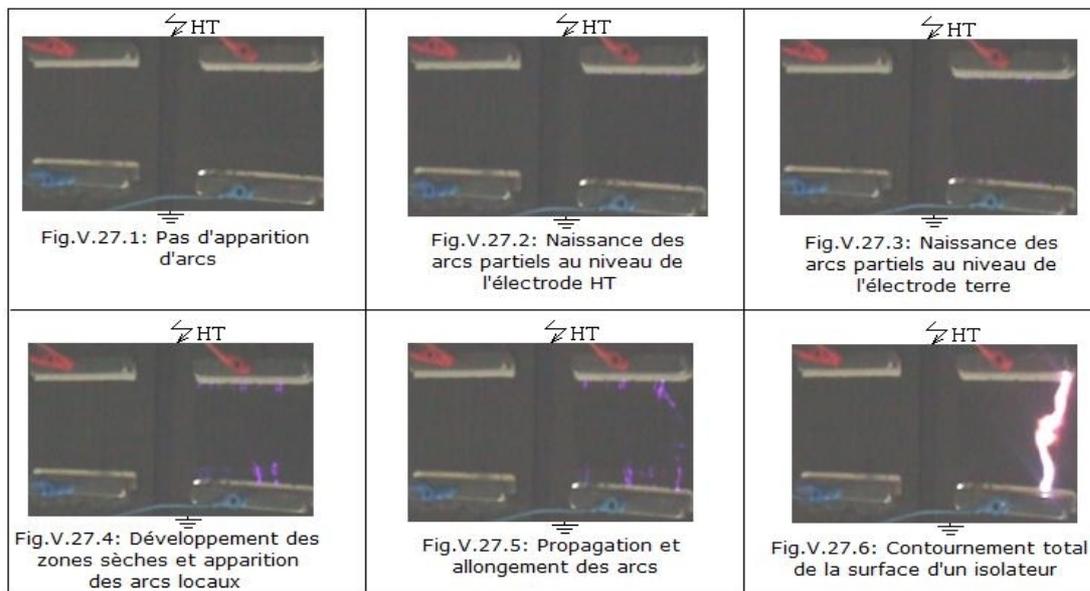


Fig. V.27: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées avec ($\sigma_1=0,024\mu\text{S}$, $l_{c1}=14\text{cm}$ et $\sigma_{21}=4,82\mu\text{S}$, $\sigma_{22}=0,96\mu\text{S}$, $l_{c22}/l_{c21}=6$)

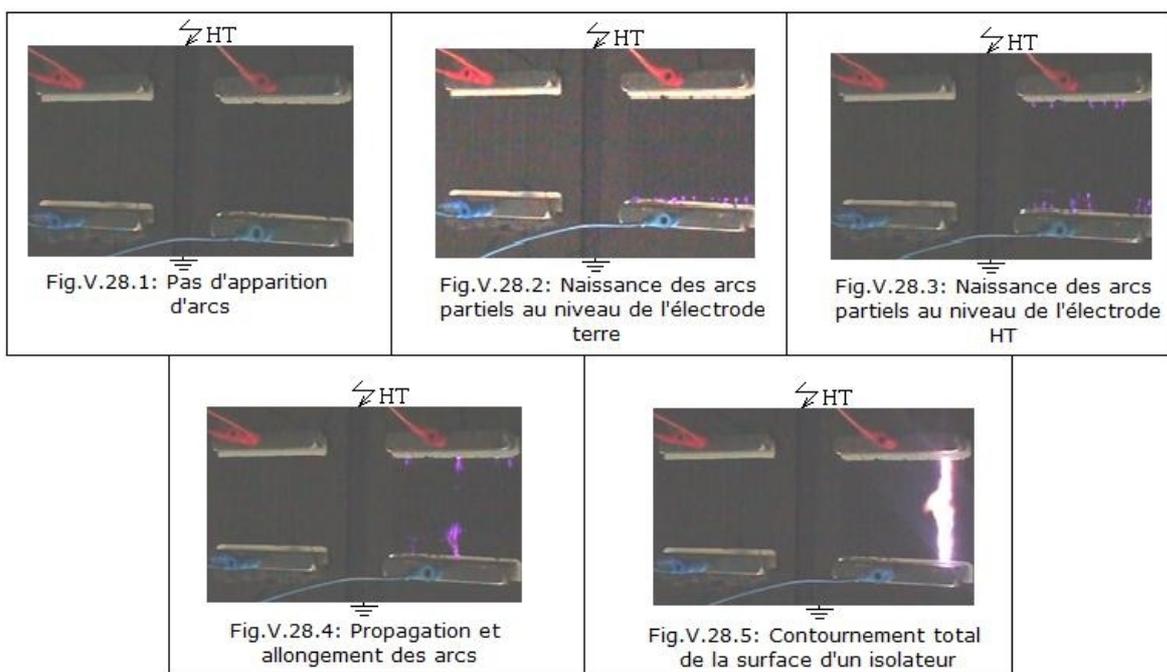


Fig. V.28: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées avec ($\sigma_1=0,024\mu\text{S}$, $l_{c1}=14\text{cm}$ et $\sigma_{21}=4,82\mu\text{S}$, $\sigma_{22}=2,85\mu\text{S}$, $l_{c22}/l_{c21}=1$)

b) Rapport des produits ($\frac{R_{21}}{R_{22}} = \frac{l_{c22}\sigma_{22}}{l_{c21}\sigma_{21}}$) variable

Dans cette partie, la largeur des surfaces isolantes est égal à 14cm et la surface du premier isolateur est gardé propre et sèche. La conductivité superficielle de la première surface du deuxième isolateur est égale à 4,82 μS . Les valeurs de la conductivité superficielle de la deuxième surface du deuxième isolateur sont égales à (0.024, 0.96, 1.93, 2.85, 3.75, 4.82) μS . Le rapport des largeurs (l_{c22}/l_{c21}) de deuxième isolateur prend les valeurs (0,16 0,55 1,8 6), conformément à la figure V.29.

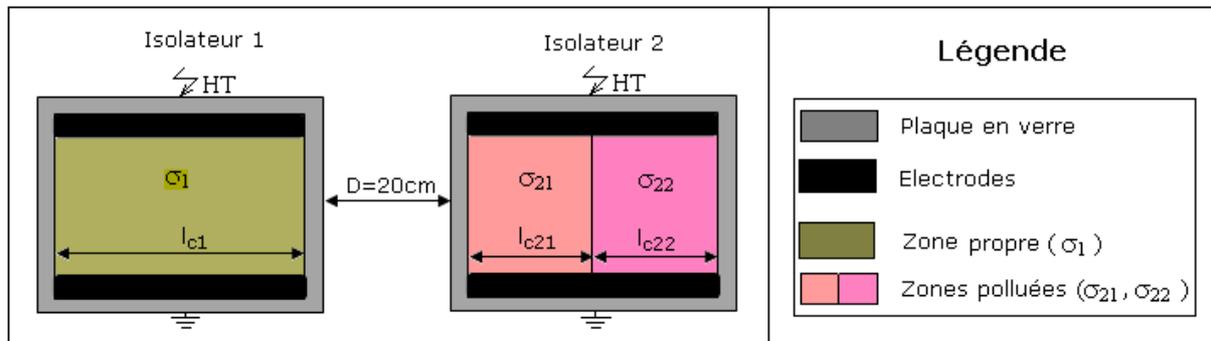


Fig. V.29: Configuration de la pollution sur les deux plaques isolantes
(l_{c22}/l_{c21} variable)

La figure V.30 représente l'allure de la tension de contournement en fonction du rapport des produits (l_{c22}/l_{c21}) où des résistances des deux couches de pollution (R_{21}/R_{22}).

Ces résultats montrent que la tension de contournement croît avec ce rapport.

Nous constatons que les deux isolateurs sont très rigides lorsque le rapport des résistances (R_{21}/R_{22}) est égal à 1,19.

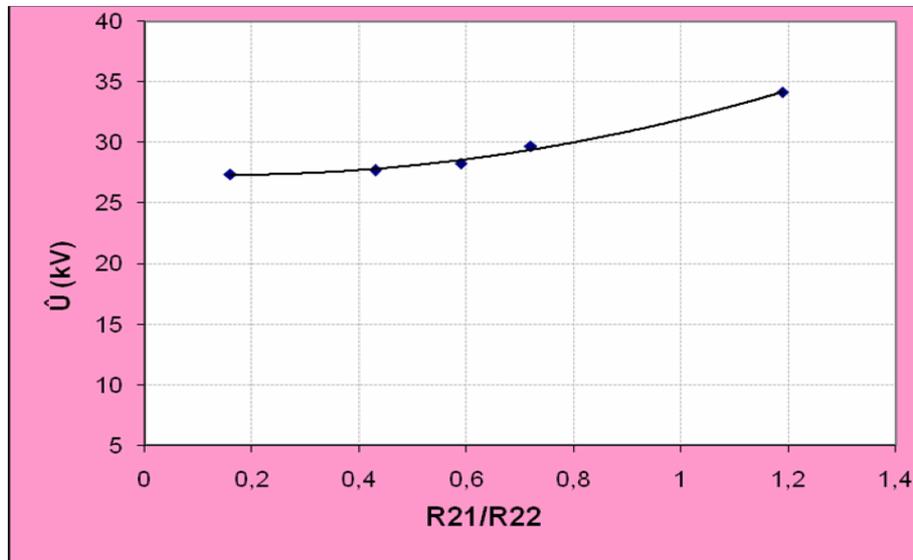


Fig. V.30: Tension de contournement en fonction du rapport des résistances des deux couches de pollution

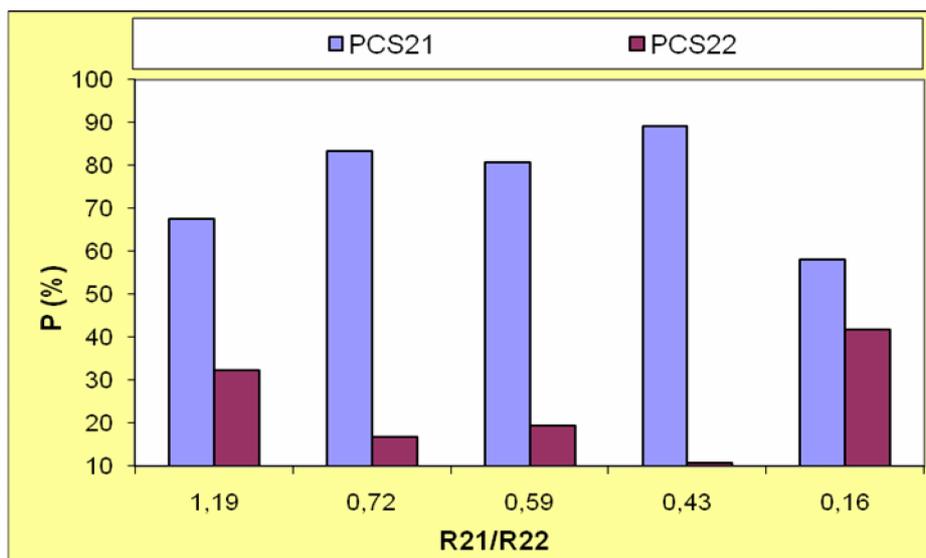


Fig. V.31: Probabilité de contournement pour différents rapports des résistances

- PCS21: Probabilité de contournement de la première surface de l'isolateur fortement polluée ($\sigma_1=4,82\mu\text{S}$)
- PCS22: Probabilité de contournement de la deuxième surface de l'isolateur polluée avec $\sigma_2= (0,024 \ 0,96 \ 1,93 \ 2,85 \ 3,75 \ \text{et} \ 4,82) \mu\text{S}$

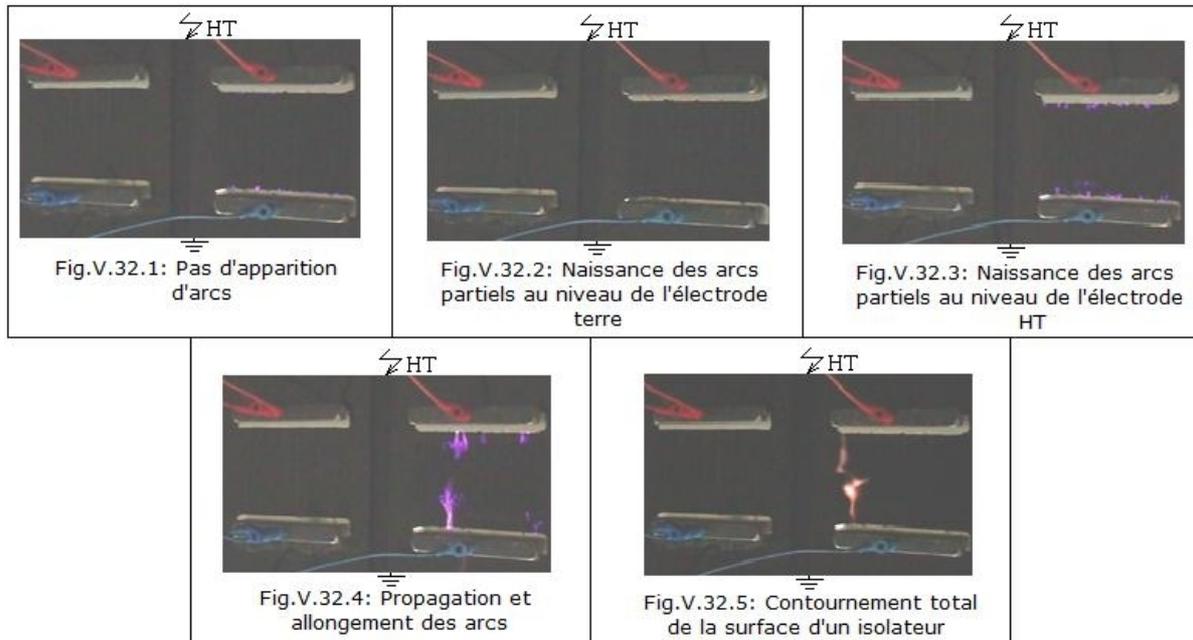


Fig. V.32: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées ($\sigma_1=0,024\mu\text{S}$, $l_{c1}=14\text{cm}$ et $R_{21}/R_{22}=0,4$)

La figure **V.31** montre que la probabilité de contournement de la surface fortement polluée est grande par rapport à celle faiblement polluée ($R_{21}/R_{22}=0,43$), mais la probabilité de contournement de la zone faiblement polluée augmente avec la variation de la conductivité et la largeur jusqu'au ($R_{21}/R_{22}=0,16$) où la probabilité est presque la même dans les deux zones. Les figures **V.32.1** à **5** qui représentent les étapes de contournement dans le cas ($R_{21}/R_{22}=0,4$), montrent la naissance et le développement des arcs jusqu'au contournement total.

V.3.2.3 Système d'isolateur à quatre couches de pollution

a) Rapport des largeurs fixe, rapport des conductivités superficielles variable

Dans cette partie, les largeurs l_{c1} , l_{c22} , l_{cs} et l_{c21} sont égales respectivement à 14, 5, 4 et 5 cm. La surface du premier isolateur est gardé propre et sèche et les deux surfaces du deuxième isolateur a pour conductivités superficielles $\sigma_1=4,82\mu\text{S}$, $\sigma_2= (0,024 \ 0,96 \ 1,93 \ 2,85 \ 3,75 \ 4,82) \mu\text{S}$, conformément à la figure **V.33**.

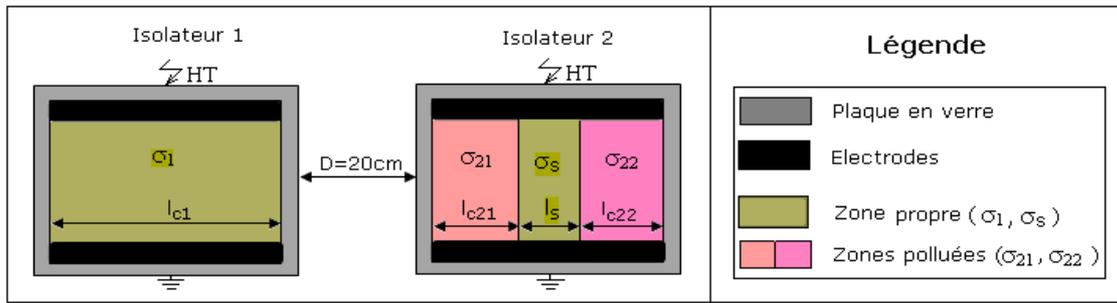


Fig. V.33: Configuration de la pollution sur les deux plaques isolantes parallèles (l_{c22}/l_{c21} fixe, σ_{22}/σ_{21} variable)

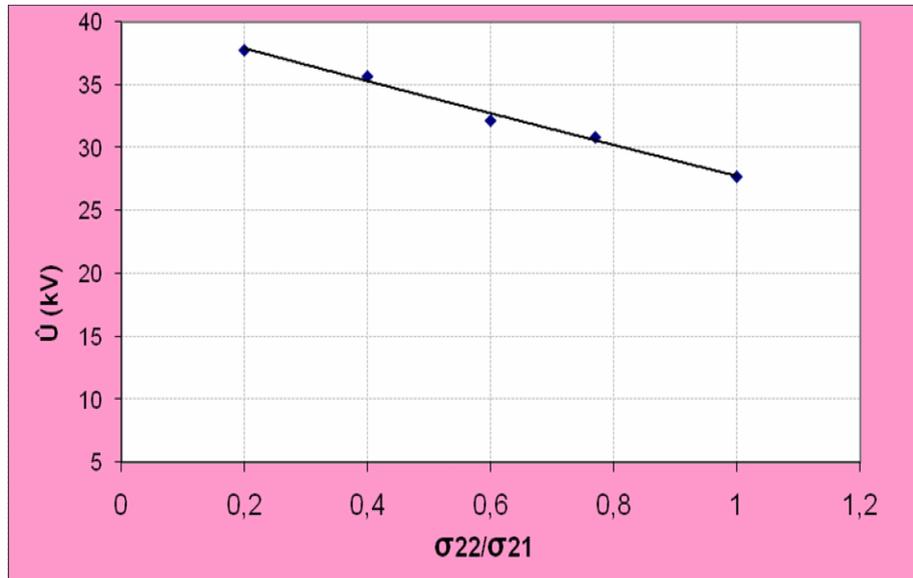


Fig. V.34: Tension de contournement en fonction des rapports des conductivités superficielles

La figure **V.34** représente l'allure de la tension de contournement en fonction des rapports des conductivités superficielles (σ_{22}/σ_{21}) de deux surfaces séparées par une zone sèche.

Ces résultats indiquent que la tension de contournement décroît en fonction du rapport des conductivités superficielles des deux surfaces polluées.

La figure **V.35** montre que la probabilité de contournement de la surface fortement polluée du deuxième isolateur est plus importante que celle faiblement polluée de la troisième surface du deuxième isolateur. Cette probabilité tend vers 100% lorsque le rapport (σ_{22}/σ_{21}) est inférieur à 0.6. Nous remarquons que pour $0,6 < \sigma_{22}/\sigma_{21} < 1$, c'est la surface faiblement polluée qui contourne et lorsque ce rapport est à 1, le contournement s'effectue équiprobable pour les deux surfaces polluées du deuxième isolateur.

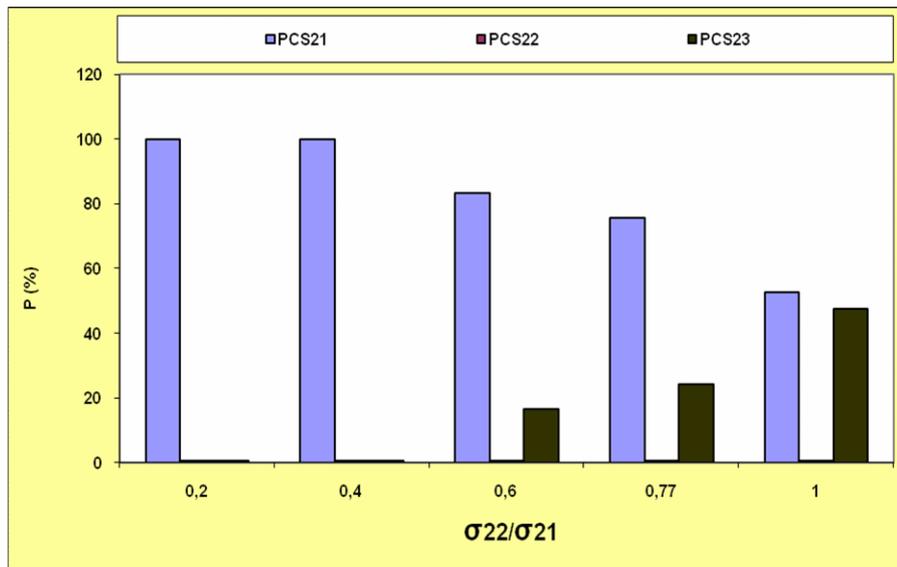


Fig. V.35: Probabilité de contournement pour différents rapports des conductivités superficielles

- PCS21: Probabilité de contournement de la première surface du deuxième isolateur (surface fortement polluée $\sigma_{21}=4,82\mu\text{S}$)
- PCS22: Probabilité de contournement de la deuxième surface du deuxième isolateur (zone sèche)
- PCS23: Probabilité de contournement de la troisième surface du deuxième isolateur polluée avec $\sigma_{22} = (0,024 \ 0,96 \ 1,93 \ 2,85 \ 3,75 \ \text{et} \ 4,82) \mu\text{S}$

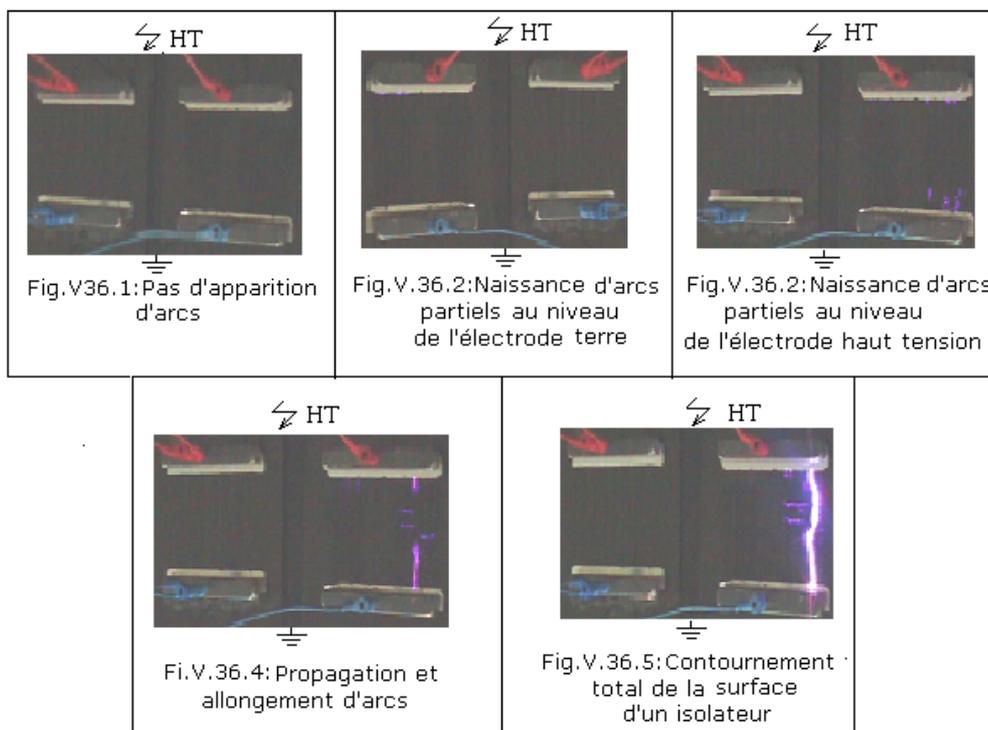


Fig. V.36: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées ($\sigma_{11}=0,024\mu\text{S}$ $\sigma_{12}=0,024 \mu\text{S}$ $\sigma_{22}/\sigma_{21}=0,2$ et $l_{c1}=14\text{cm}$, $l_{c21}=l_{c22}=5\text{cm}$, $l_{cs}=4\text{cm}$)

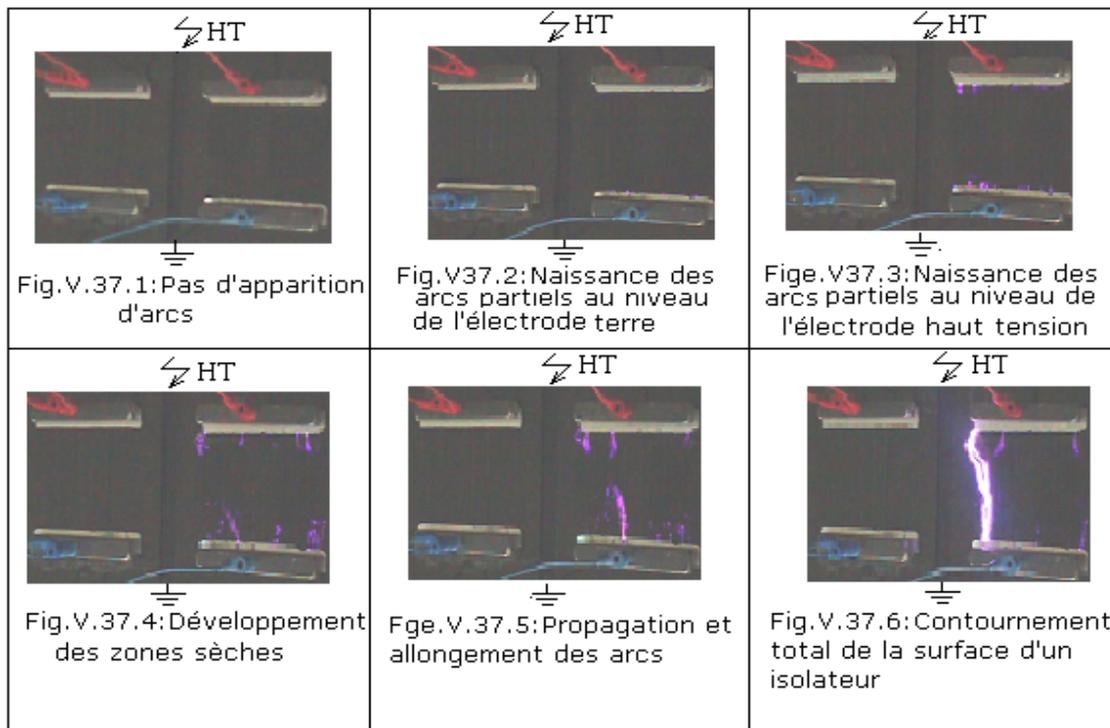


Fig. V.37: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées ($\sigma_1=0,024\mu\text{S}$ $\sigma_s=0,024\mu\text{S}$ $\sigma_{21}/\sigma_{22}=0,6$ et $l_{c1}=14\text{cm}$, $l_{c21}=l_{c22}=5\text{cm}$, $l_{cs}=4\text{cm}$)

Les figures **V.36.1** à **5** qui représentent les étapes de contournement dans le cas où ($\sigma_{21}/\sigma_{22}=0,2$), montrent que c'est la troisième surface de deuxième isolateur qui contourne. Par contre dans le cas où ($\sigma_{21}/\sigma_{22}=0,6$) c'est la première surface qui contourne (fig.**V.37.1** à **6**).

b) Rapport des largeurs variable, rapport des conductivités superficielles fixe

Dans cette partie, le rapport des conductivités superficielles des deux surfaces de deuxième isolateur est égale 0,005, celui des largeurs de la surface faiblement polluée et la surface totale de celui ci est variable (l_{cs} / l_i) sont égales (0 0,14 0,28 0,42 0,57 1), conformément à la figure **V.38**.

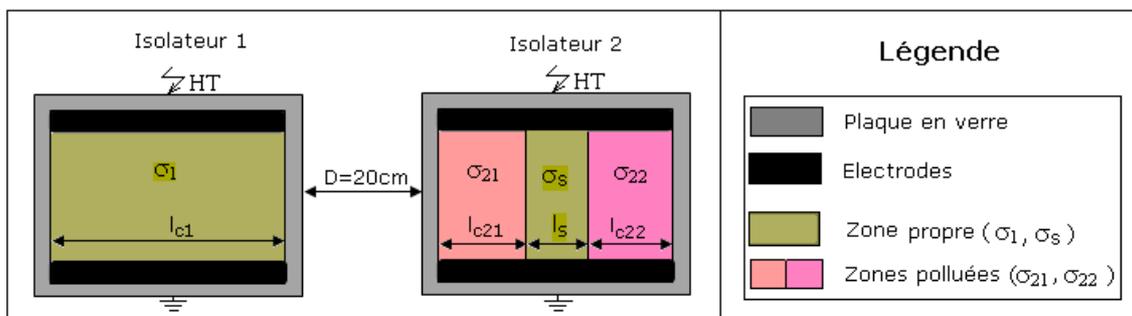


Fig. V.38: Configuration de la pollution sur les deux plaques isolantes parallèles (l_{c22}/l_{c21} variable, σ_{21}/σ_{22} fixe)

La figure **V.39** donne l'allure de la tension de contournement en fonction du rapport des largeurs. Il en résulte que la tension de contournement croît avec la largeur de la zone sèche.

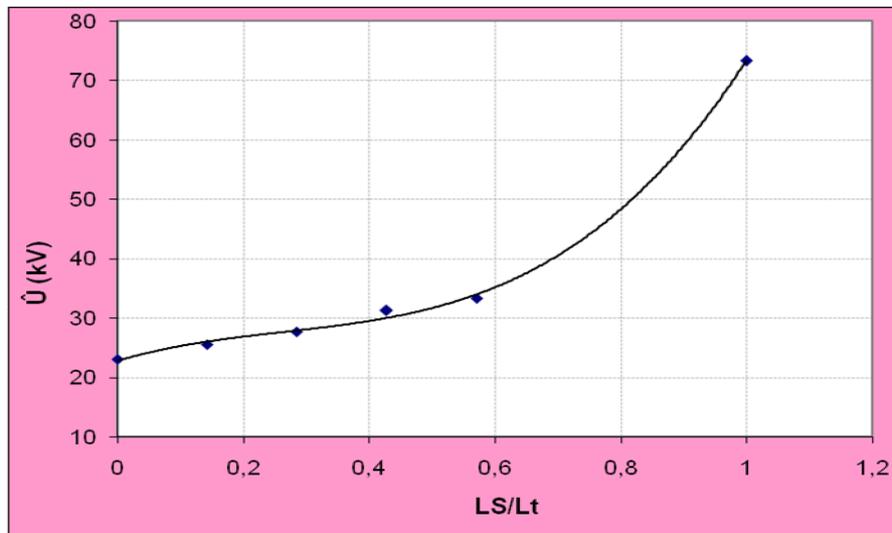


Fig. V.39: Tension de contournement en fonction du rapport des largeurs

La figure **V.40** montre que la probabilité de contournement de la zone sèche est nulle et que le contournement s'effectue totalement dans les deux zones fortement polluées ($\sigma_1 = 22,4,82\mu S$). Lorsque la largeur de la zone sèche est égale à 14cm, la probabilité de contournement de cette zone tend vers 100%.

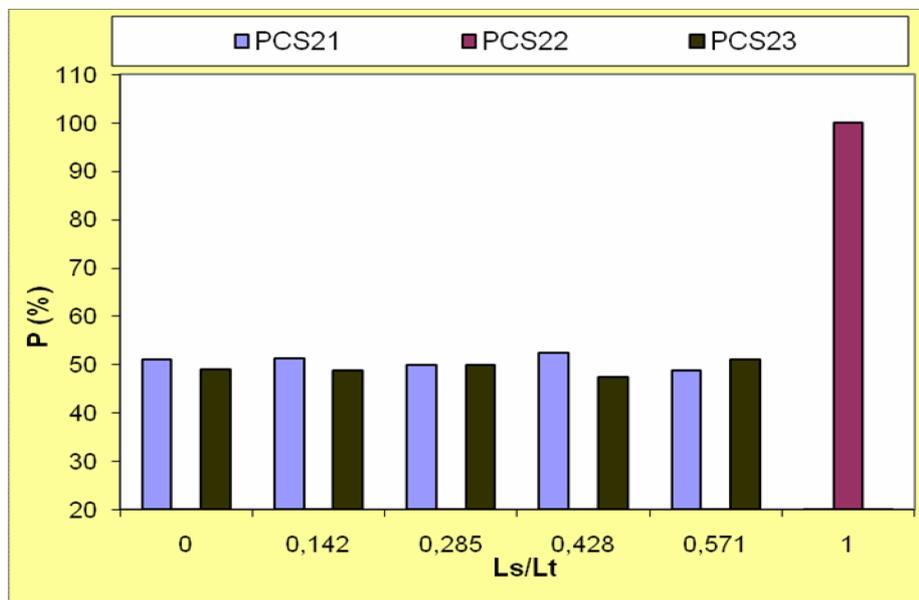


Fig. V.40: Probabilité de contournement du système pour différents rapports des largeurs

- PCS1: Probabilité de contournement de la première surface du deuxième isolateur fortement pollué ($\sigma_1 = 4,82\mu S$)
 - PCS22: Probabilité de contournement de la deuxième surface du deuxième isolateur propre et sèche
 - PCS23 : Probabilité de contournement de la troisième surface du deuxième isolateur fortement polluée avec ($\sigma_2 = 4,82\mu S$)
- Les figures **V.41.1 à 6** représentant les étapes de contournement dans le cas où ($l_{cs} / l_t = 0,28$), montrent que c'est la troisième surface du deuxième isolateur qui contourne.

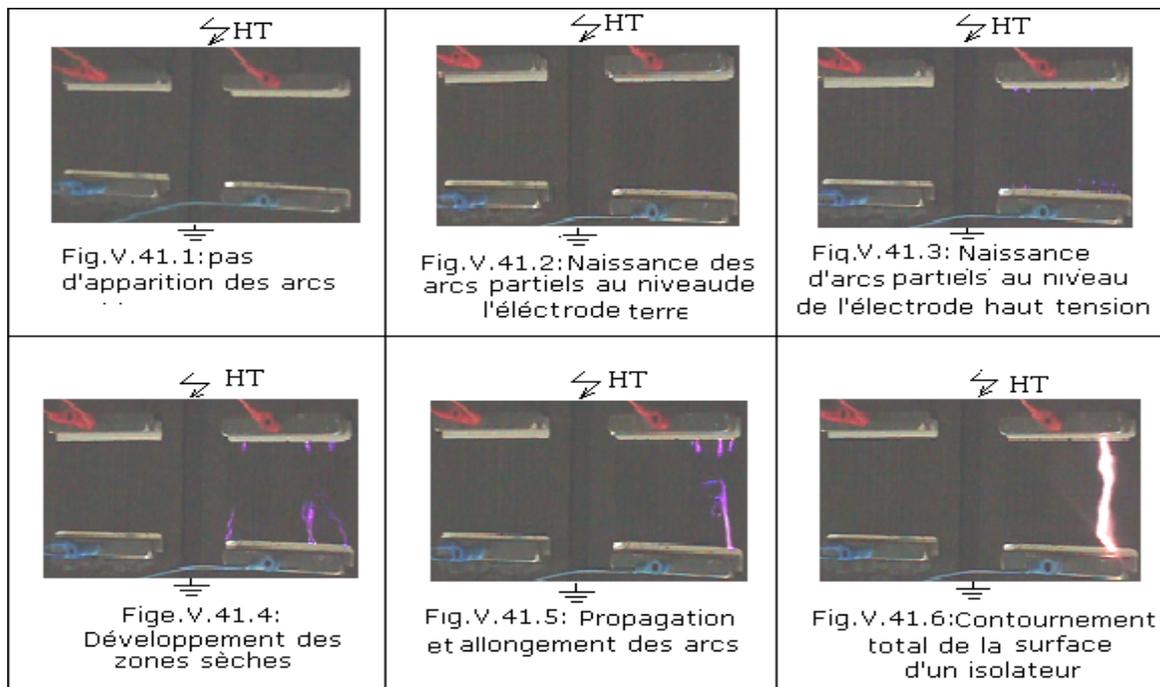


Fig. V.41: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées
 ($\sigma_1=0,024\mu S$, $l_{c1}=14cm$ et $\sigma_2=4,82\mu S$, $l_{cs}/l_t=0,28$)

c) Rapport des produits ($\frac{R_{21}}{R_{22}} = \frac{l_{c22}\sigma_{22}}{l_{c21}\sigma_{21}}$) variable

Dans cette partie, les rapports des largeurs et conductivités des deux surfaces de deuxième isolateur ont été varié de 0 à 1,38. Ces deux surfaces sont séparées par une zone sèche est égale à 4 cm, conformément à la figure V.42.

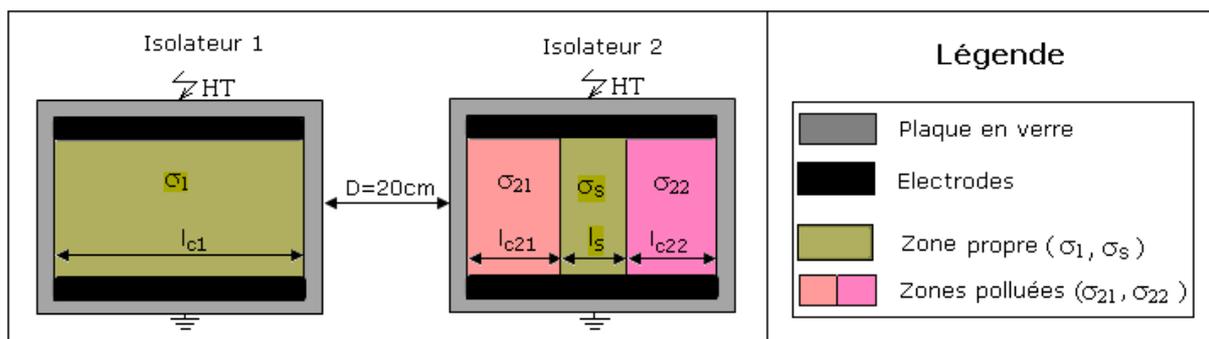


Fig. V.42: Configuration de la pollution sur les deux plaques isolantes parallèles (l_{c22}/l_{c21} variable)

La figure V.43 représente l'allure de la tension de contournement en fonction du rapport des résistances des couches de pollution du deuxième isolateur. Ces résultats montrent que la tension de contournement décroît avec le rapport de ces résistances.

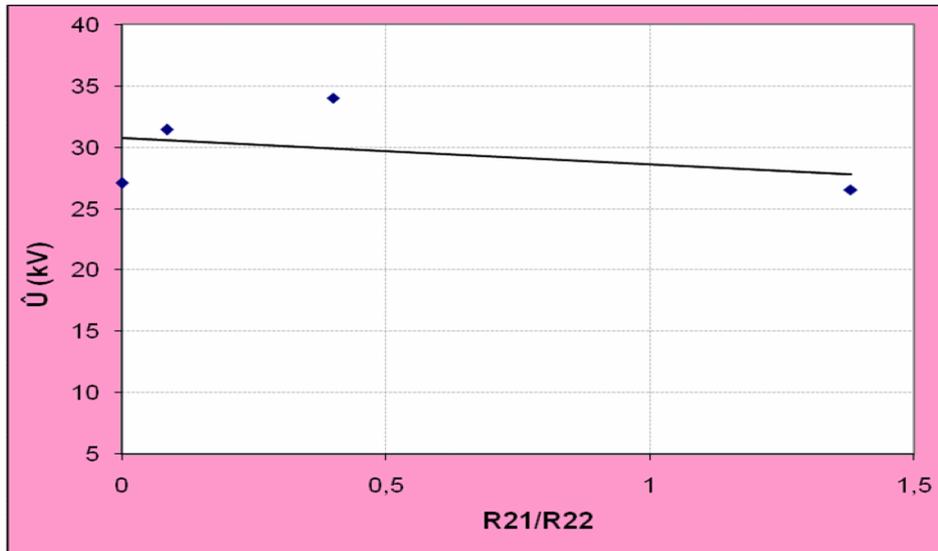


Fig. 43: Tension de contournement en fonction du rapport des résistances

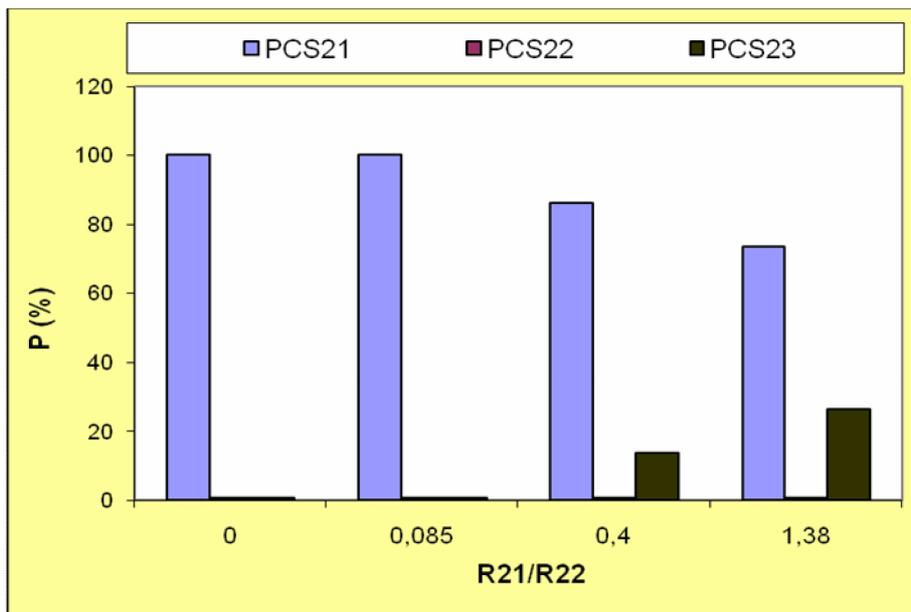


Fig. V.44: Probabilité de contournement pour différents rapports des produits

- PCS21: Probabilité de contournement de la première surface du deuxième isolateur fortement pollué ($\sigma_{21}=4,82\mu\text{S}$)
- PCS22: Probabilité de contournement de la troisième surface du deuxième isolateur polluée avec $\sigma_{22}=(0,024\ 0,96\ 1,93\ 2,85\ 3,75\ \text{et}\ 4,82)\ \mu\text{S}$
- PCS23: Probabilité de contournement de la deuxième surface du deuxième isolateur (surface sèche propre $\sigma_s=0,024\ \mu\text{S}$, $l_s=4\text{cm}$)

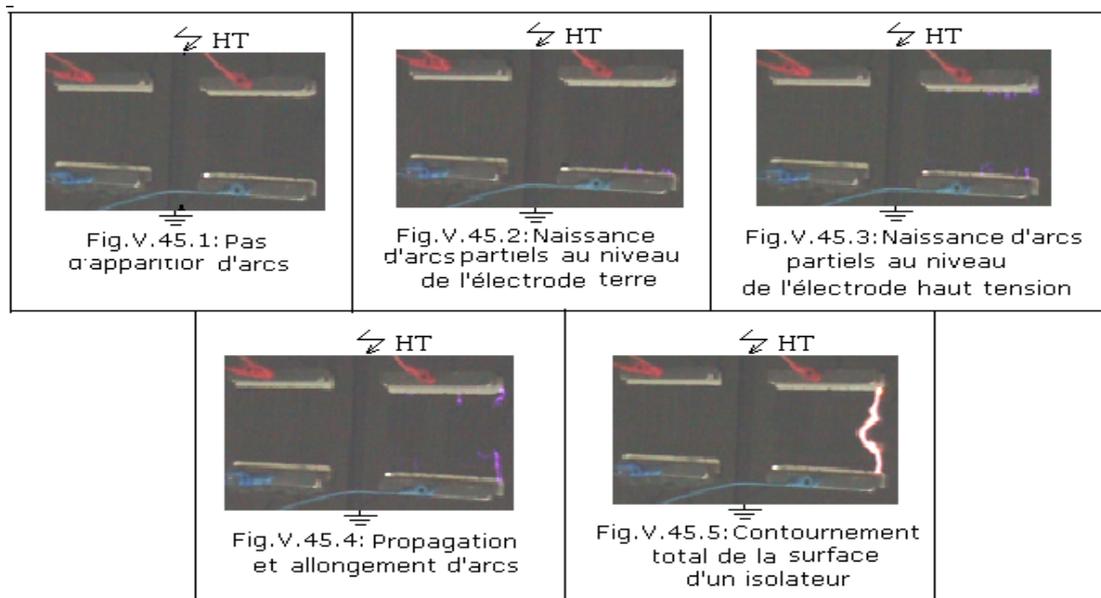


Fig. V.45: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées avec ($\rho_1 = 0.024\mu S$, $\rho_{21} = 4.82\mu S$, $\rho_{22} = 0.96\mu S$, $\rho_s = 0,024\mu S$ et $l_{c1} = 14cm$, $l_{c21} = 7cm$, $l_{c22} = 3cm$, $l_{cs} = 4cm$)

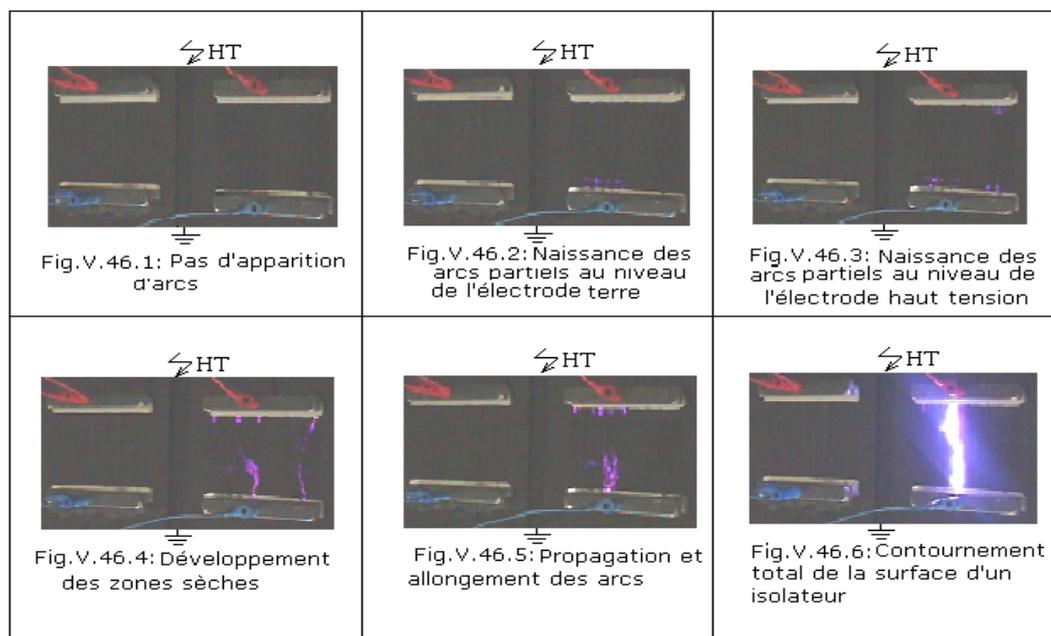


Fig. V.46: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées ($\rho_1 = 0,024\mu S$, $\rho_{21} = 4,82\mu S$, $\rho_{22} = 2,85\mu S$, $\rho_s = 0,024\mu S$ et $l_{c1} = 14cm$, $l_{c21} = 3cm$, $l_{c22} = 7cm$ et $l_{cs} = 4cm$)

Il résulte de la figure V.44 que la probabilité de contournement de la surface fortement polluée du deuxième isolateur est plus élevée que celle de la surface faiblement polluée.

Par contre lorsque ce rapport (R_{21}/R_{22}) est inférieur ou égal à 0,4 c'est la surface faiblement polluée qui est contournée par l'arc.

Les résultats de visualisation de décharge d'arcs (fig. V.45.1 à 5) montrent que pour R_{21}/R_{22} est égal 0.085, c'est la troisième surface qui est contournée. Par contre pour $R_{21}/R_{22} = 1.37$ c'est la première surface de deuxième isolateur qui est court-circuitée (fig. V.46.1 à 6).

d) Rapport des largeurs fixe ($l_{c12}/l_{c11} = l_{c22}/l_{c21} = 1$)

Dans ce cas, le système est composé de quatre couches de pollution, de même largeur et de conductivités différentes de telle sorte que le rapport des largeurs des couches est égal à 1, conformément à la figure V.47.

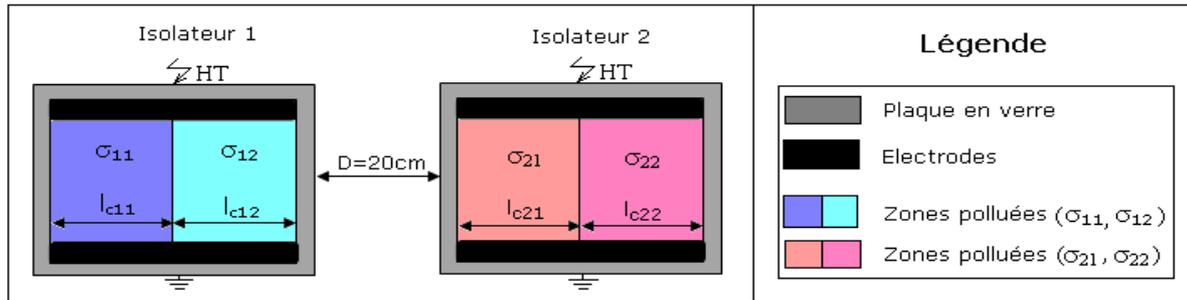


Fig. V.47: Configuration de la pollution sur les deux plaques isolantes ($l_{c12}/l_{c11} = l_{c22}/l_{c21} = 1$)

Les figures V.48 et V.49 donnent l'évolution de la probabilité de contournement du système en fonction de la conductivité de la couche de pollution.

Il en résulte un grand écart de probabilité entre les surfaces fortement et faiblement polluées.

Les résultats de visualisation mettent en évidence le contournement de la surface fortement polluée (fig. V.50.1 à 6).

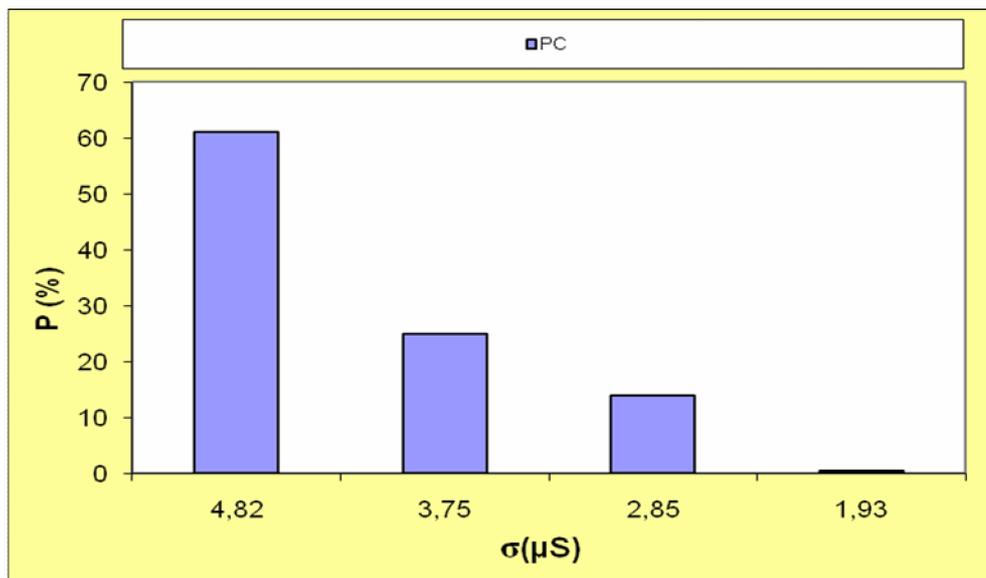


Fig. V.48: Probabilité de contournement pour différentes conductivités superficielles

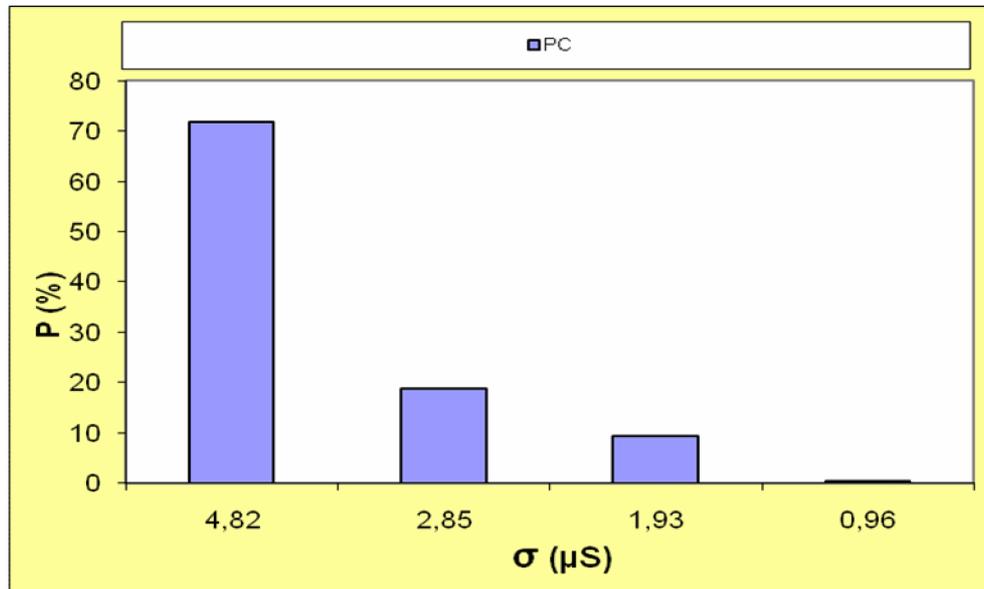


Fig. V.49: Probabilité de contournement pour différentes conductivités superficielles

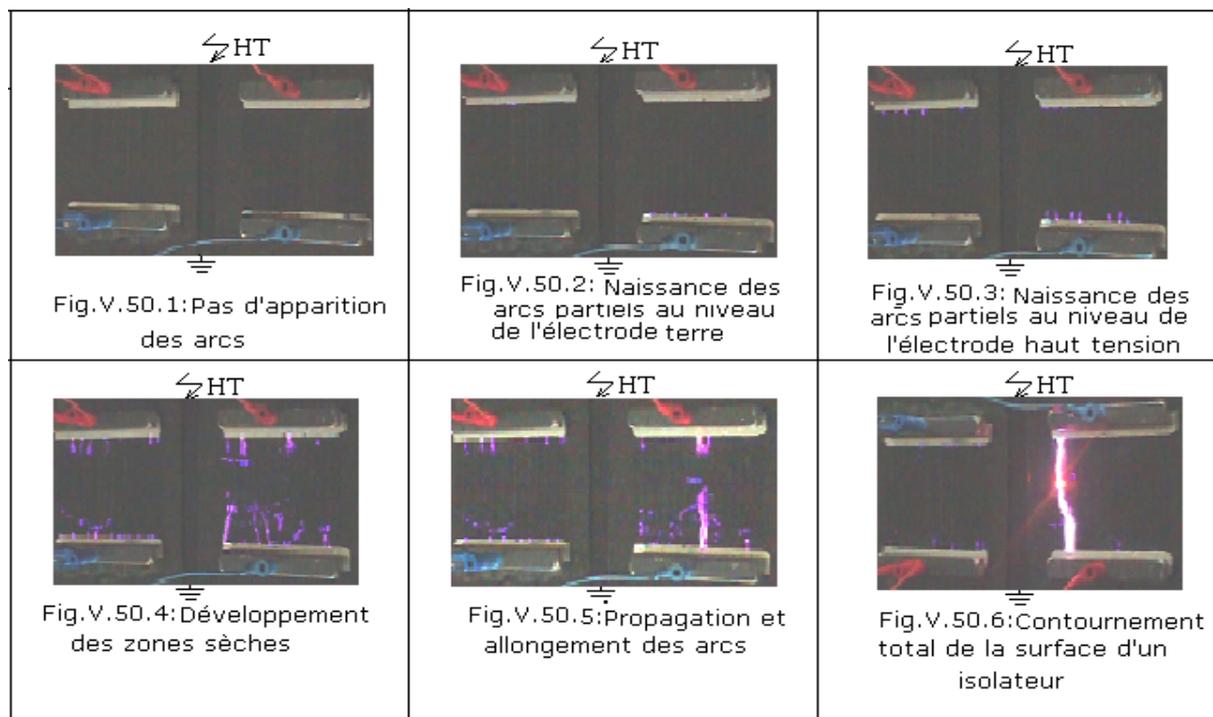


Fig. V.50: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées ($\sigma_{11}=4,82\mu\text{S}$, $\sigma_{12}=2,85\mu\text{S}$, $\sigma_{21}=1,93\mu\text{S}$ et $\sigma_{22}=0,96\mu\text{S}$) et ($l_{c12}=l_{c11}=l_{c22}=l_{c21}=7\text{cm}$)

e) Rapport des largeurs fixe ($l_{c12}/l_{c11}=l_{c22}/l_{c21}=0,4$)

Ce cas est similaire au précédent sauf que le rapport des largeurs des deux isolateur est de 0,4, conformément à la figure V.51.

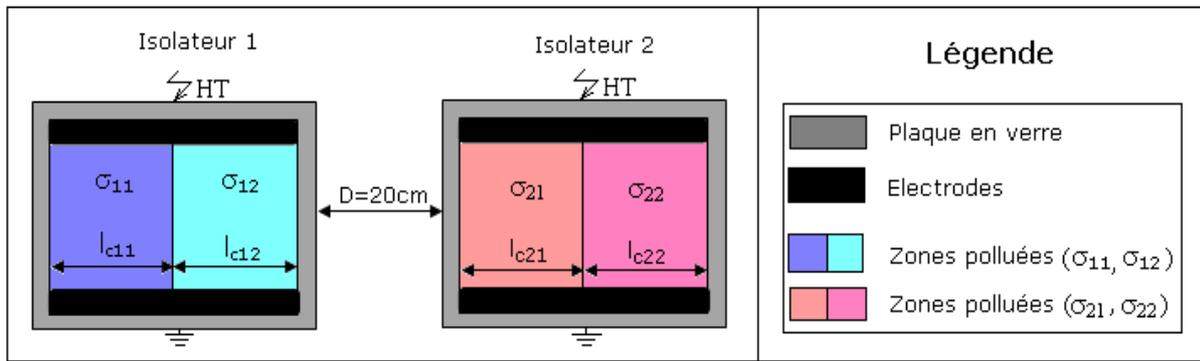


Fig. V.51: Configuration de la pollution sur les deux plaques isolantes ($l_{c12}/l_{c11} = l_{c22}/l_{c21} = 0,4$)

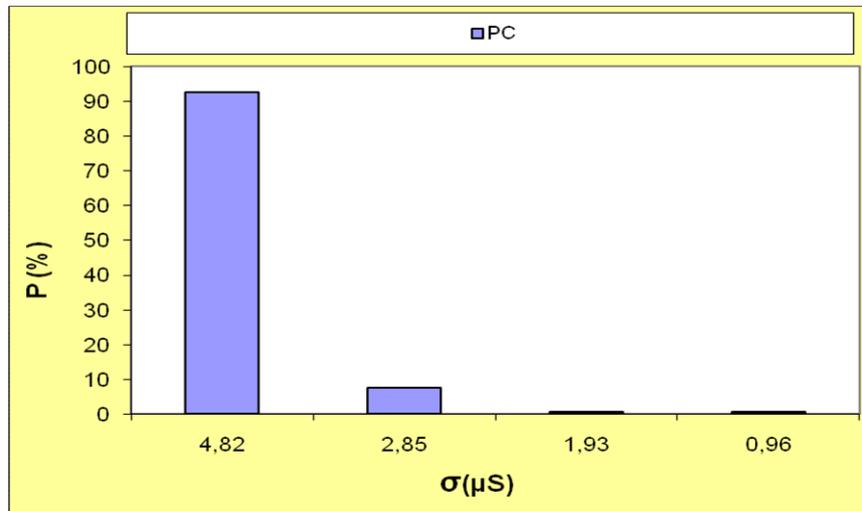


Fig. V.52: Probabilité de contournement pour différentes conductivités superficielles

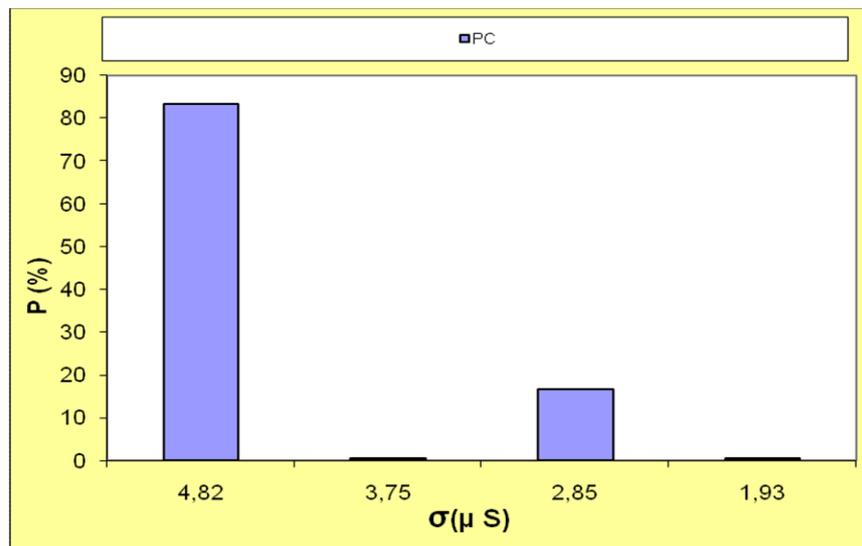


Fig. V.53: Probabilité de contournement pour différentes conductivités superficielles

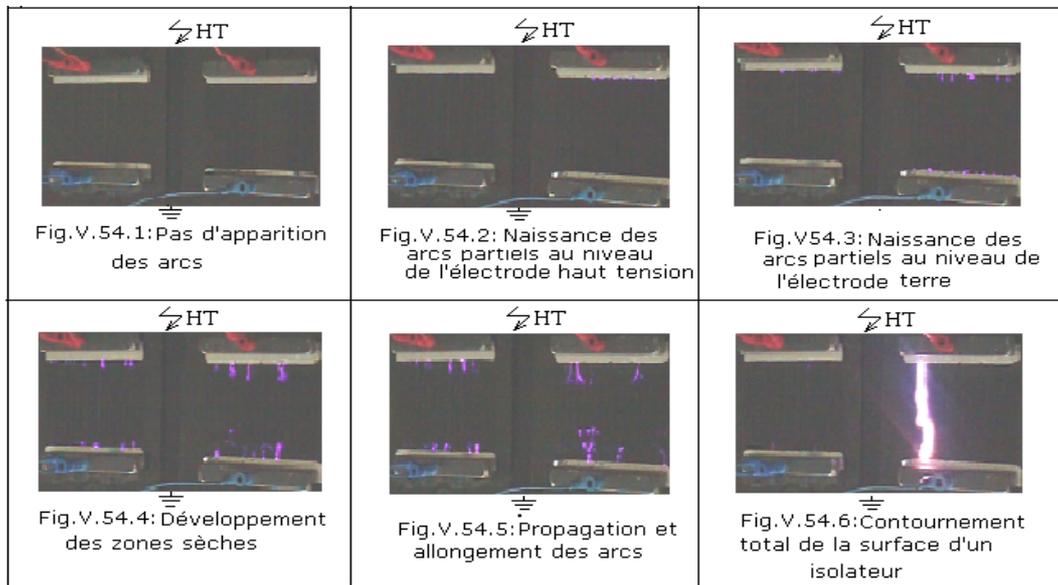


Fig. V.54: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées ($\sigma_{11}=4,82\mu S$, $\sigma_{12}=2,85\mu S$, $\sigma_{21}=1,93\mu S$ et $\sigma_{22}=0,96\mu S$) et ($l_{c11}=l_{c21}=10cm$, $l_{c22}=l_{c12}=4cm$)

Les figures V.52 et V.53 montrent que la probabilité de contournement de la zone de l'isolateur fortement polluée.

Le seul cas où la probabilité de contournement de la surface faiblement polluée dépasse la probabilité de contournement de la surface fortement polluée, correspond au cas de la figure V.53 où $\sigma_{21}=2,85\mu S$, $l_{c21}=10cm$ et $\sigma_{12}=3,75\mu S$ pour $l_{c12}=4cm$. Ce la peut être expliqué par le fait que ce produit $\sigma_{21} l_{c21}$ est supérieur à $\sigma_{12} l_{c12}$.

Les figures V.54.1 à 6 donnent les étapes de contournement, dans ce cas montrent que le contournement a lieu dans la première surface du deuxième isolateur.

V.3.3 Effet de la distance entre les deux isolateurs sur la rigidité du système

Dans ce cas les deux isolateurs (fig. V.55.1) sont uniformément pollués ($\sigma = 4,82\mu S$) et sont en contact l'un de l'autre ($D = 0$).

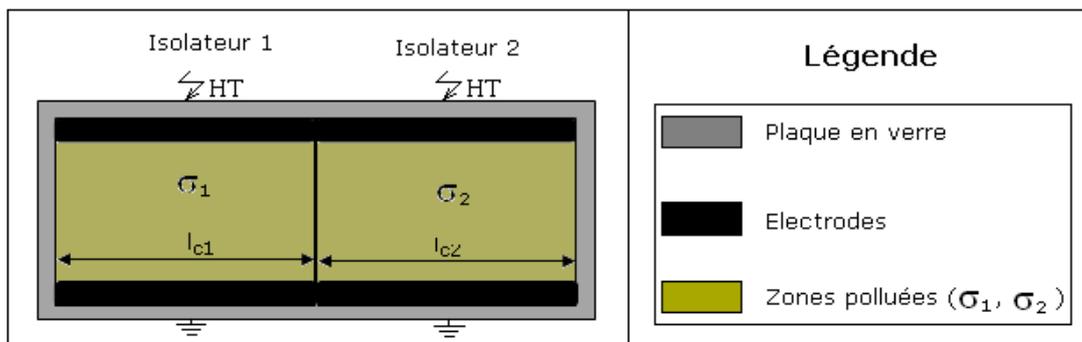


Fig. V. 55.1: Configuration de la pollution sur les deux plaques ($D = 0cm$)

Ce cas est similaire au précédent sauf que la distance séparait les deux isolateur du système est égale à 20cm (fig. V.55.2).

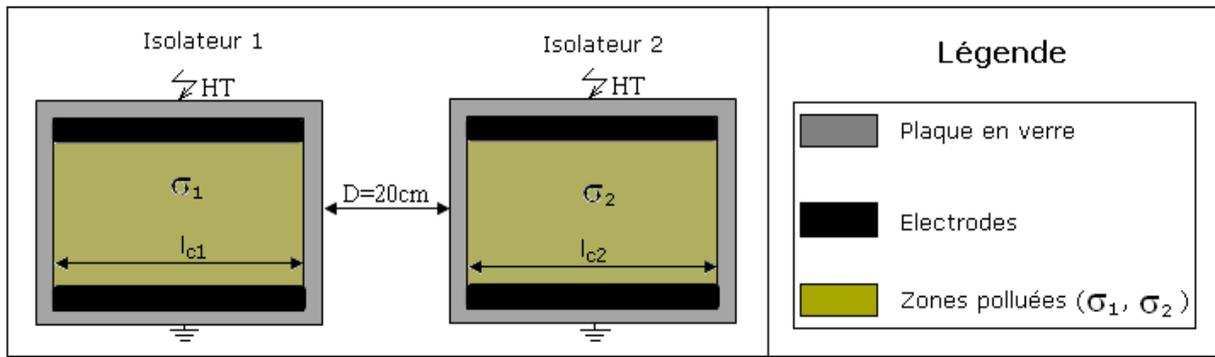


Fig. V.55.2: Configuration de la pollution sur les deux plaques ($D = 20\text{cm}$)

La figure **V.56** représente l'allure de la tension de contournement en fonction de la distance entre les deux isolateurs parallèles.

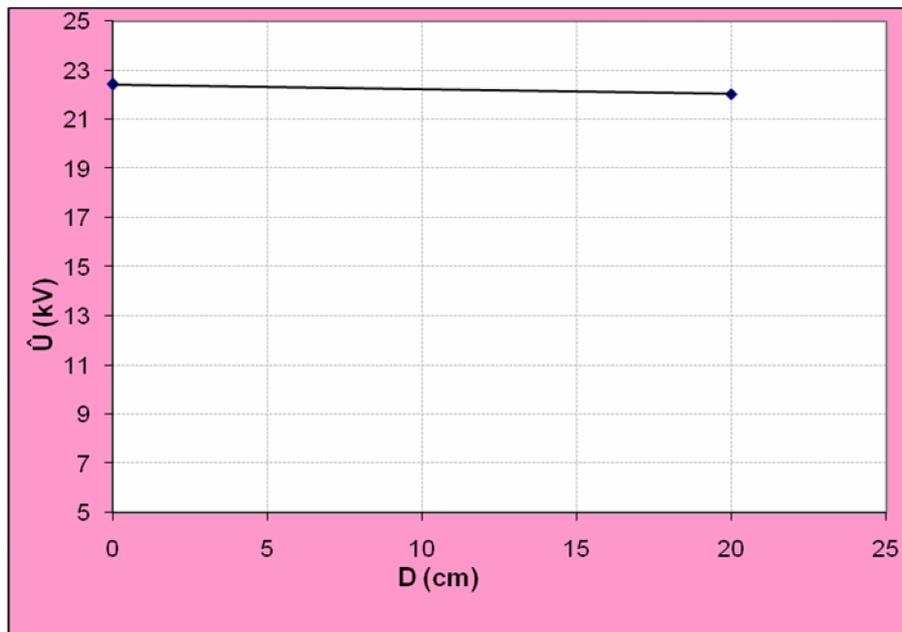


Fig. V.56: Tension de contournement en fonction de la distance sépare les deux isolateurs

L'analyse de ces résultats indique que la tension de contournement est indépendante de la distance sépare les deux isolateurs du système.

La figure **V.57** représente la probabilité de contournement des deux surfaces du système. Nous constatons que la probabilité de contournement est presque la même pour les deux isolateurs, du fait que les deux surfaces fortement polluées sont égales ($l_{c1} = l_{c2} = 14\text{cm}$) et ($\sigma_1 = \sigma_2 = 4,82\mu\text{S}$).

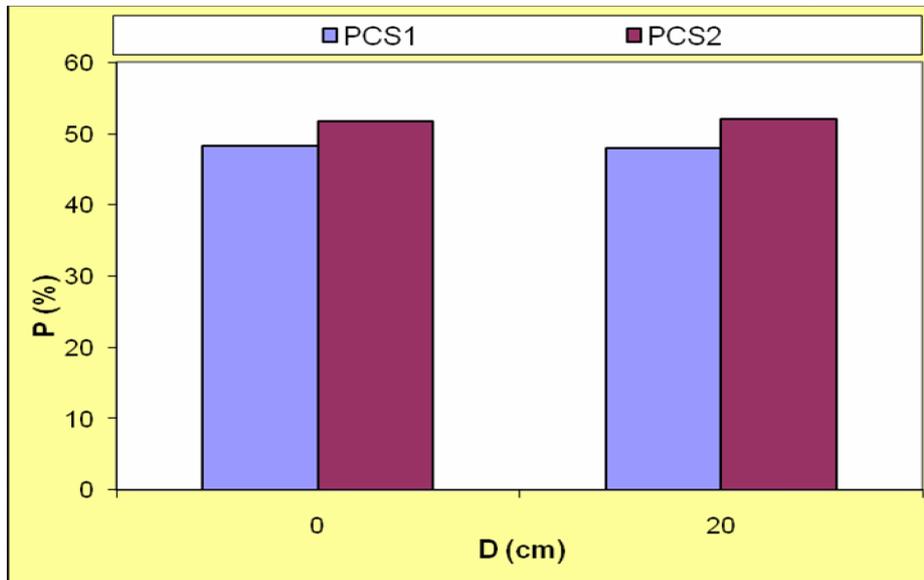


Fig. V.57: Probabilité de contournement en fonction de la distance entre les deux isolateurs parallèles

Les figures **V.58.1** à **6** qui représentant les étapes de contournement, montrent que le contournement a lieu sur la surface du deuxième isolateur dans le cas ($\epsilon_1 = \epsilon_2 = 4,82\mu\text{S}$ et $D=20\text{cm}$), par contre les figures **V.59.1** à **5** montrent que c'est la surface du deuxième isolateur dans le cas qui est contournée ($\epsilon_1 = \epsilon_2 = 4,82\mu\text{S}$ et $D=0\text{cm}$).

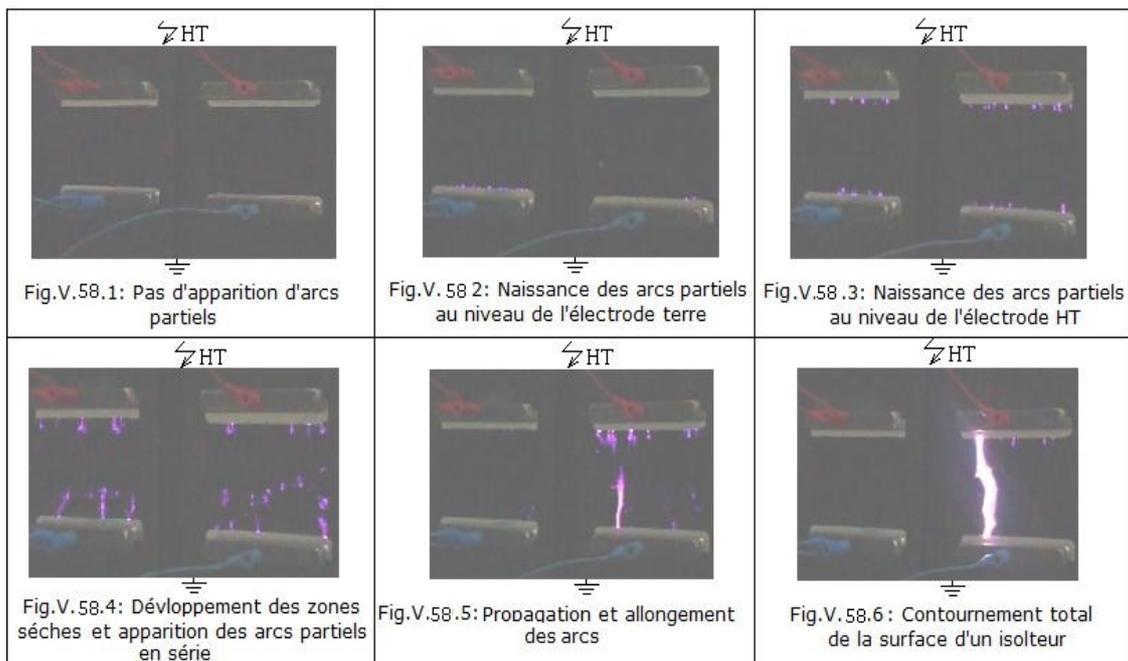


Fig. V.58: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées ($\epsilon_1 = \epsilon_2 = 4,82\mu\text{S}$), ($l_{c1}=l_{c2}=14\text{cm}$) et la distance entre les deux isolateur $D=20\text{cm}$.

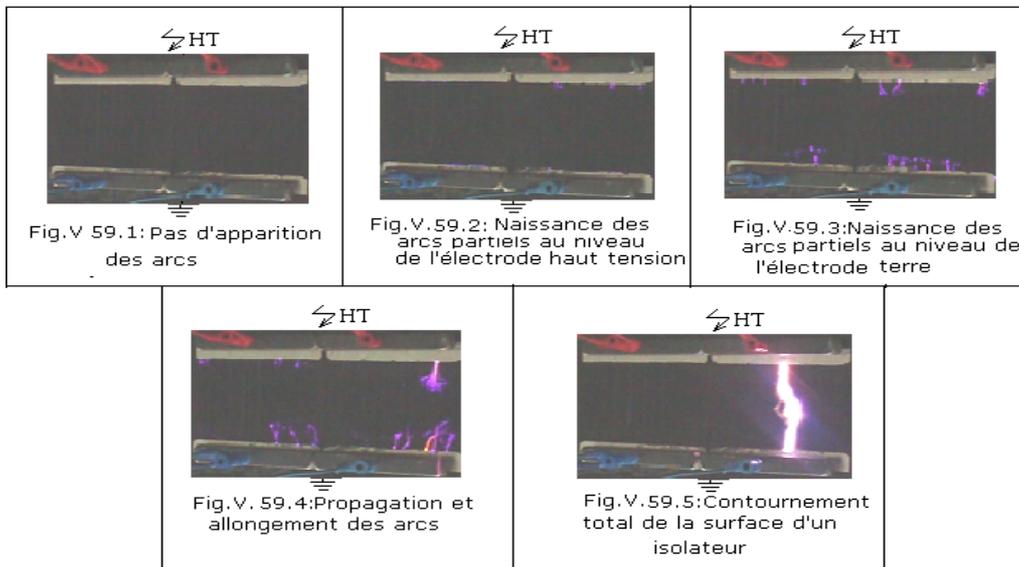


Fig. V.59: Processus de contournement des deux plaques isolantes polluées ($\sigma_1 = \sigma_2 = 4,82\mu S$), ($l_{c1} = l_{c2} = 14cm$) et la distance entre les deux isolateur $D=0cm$

V.3.4 Comparaison entre la pollution uniforme et non uniforme

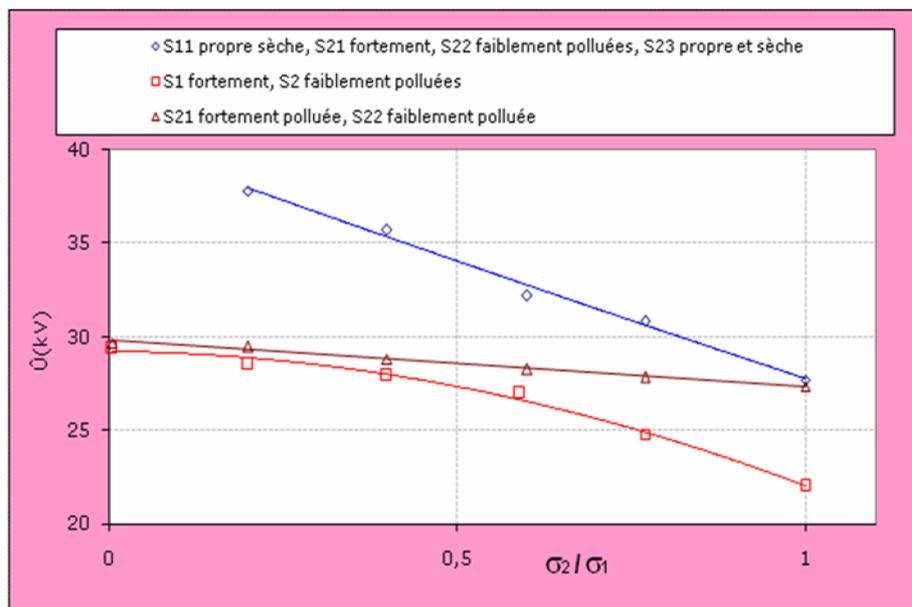


Fig. V.60: Comparaison de la rigidité du système d'isolation sous condition de pollution uniforme et non uniforme

La figure V.60 représente l'allure de la tension de contournement en fonction du rapport des conductivités.

L'analyse de ces résultats indique que la tension de contournement est très élevée dans le cas non uniforme, par contre dans le cas uniforme la tension est minimale donc le système est plus rigide dans le cas non uniforme.

La comparaison de ces trois variantes de distribution de la pollution fait ressortir que le système à quatre couches est plus rigide que celui à trois couches et celui à deux couches, il est à remarquer.

V.4 Conclusion

Il découle des résultats, obtenus lors de l'étude de l'effet du mode de distribution de la pollution sur un système de deux isolateurs plans en verre, mis en parallèle et soumis à une tension alternative 50Hz sur sa performance, les conclusions suivantes :

- L'isolateur propre et sec est plus rigide qu'un isolateur pollué;
- La tension de contournement du système en fonction de sa conductivité superficielle est décroissante quelle que soit le mode de distribution de la pollution sur sa surface;
- La rigidité diélectrique longitudinale d'un système d'isolateurs sous conditions de pollution non uniforme, converge vers une valeur minimale $\hat{U}_c = 22,037$ kV, atteinte dans le cas où les surfaces de celui-ci sont uniformément polluées avec la conductivité électrique la plus élevée est égale à $4.82 \mu\text{S}$;
- Dans la plupart des cas le contournement du système a lieu sur la zone fortement polluée.

Conclusion générale



Conclusion générale

Le contournement des isolateurs propres peut être engendré par une surtension de foudre ou de manœuvre qui provoquera une décharge électrique à la surface de l'isolateur suivant les mécanismes classiques des décharges.

L'objectif principal de notre étude était de déterminer la tension minimale de contournement d'un système de deux isolateurs parallèles recouverts d'une mince couche de pollution et soumise à une tension alternative 50 Hz. Pour cela, deux variantes de distribution de la couche de pollution ont été considérées: une distribution uniforme (continue) et une distribution non uniforme (discontinue).

Nous avons étudié les performances de notre système dans le cas de ces deux catégories de répartition de pollution et pour lesquelles les dimensions et les positions des couches de pollution 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 (sévérité) de la pollution quelque soit la largeur de la surface du système polluée.
- * La tenue diélectrique de notre modèle diminue avec l'augmentation de la largeur de sa surface isolante polluée.
- * Le système est plus rigide lorsque la pollution est non uniforme.
- * La tension de contournement reste toujours constante quelque soit la distance séparant les deux isolateurs du système considéré.

Nos résultats comparés à ceux d'auteurs révèlent une analogie qualitative. En effet, les allures de nos courbes de performances du système étudié sont qualitativement semblables, néanmoins la différence quantitative est principalement due à la forme des isolateurs, la méthode et le degré de pollution ainsi qu'à la différence des conditions d'essai.

Les résultats obtenus au cours de cette recherche 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 thème d'étude. Ainsi, les recommandations suivantes 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 aussi la tension aux bornes de l'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

Références bibliographiques



- [1] **M.NEMAMCHA**, <<Claquage des isolantes hautes tensions>>, mémoire d'ingénieur juin2006.
- [2] **A.CHABLOZ**, <<Technologie des matériaux à l'usage des professions de l'électricité>>, 1986.
- [3] **X.DUCOURET**, <<Lignes aériennes : matériels >>, Technique de l'ingénieur, D4423.
- [4] <<Propriétés des isolants>>, Technique de l'ingénieur, E1820, D155, D214.
- [5] **R.BOUDISSA**, <<cours du module matériaux en électrotechnique >>, 2005.
- [6] **F.AMIR, KH.NAMAOU**, <<étude du comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative>>, mémoire d'ingénieur U.A.Mira de Bejaia, juin2004.
- [7] **S.MEDJAHED, M.IBLAIDEN**, <<Etude de l'évolution temporelle de la sévérité de pollution d'un site>>, mémoire DEUA en électrotechnique, Université A. Mira de Bejaia 2005.
- [8] **F.ZEDAM, A.BOUCHOUCHA**, <<Etude comparative de la distribution du potentiel électrique dans l'isolateur chaîne par voie numérique et expérimentale>>, mémoire d'ingénieur, université FEHAT ABBAS-SETIF, 2001.
- [9] **Documentation internet** [[http //www.hydro Québec. Com](http://www.hydro Québec. Com)].
- [10] **Technique de l'ingénieur D 4**, partiel : réseaux électrique ; exploitation et planification
- [11] **VIGER SOLANGE**, <<pollution de l'environnement : risques responsabilité>>,paris 2000.
- [12] **Documentation Internet**
[www.ac-versailles.fr/pedagogi/villette/droitsdevoirs/jzdd/ReponjZ.Html-7k]
- [13] **Z.SAHLI**, <<étude du non uniformité de la pollution sur les caractéristiques de contournement des isolateurs réels pollués sous tension continue>>, mémoire de magister, U. A Mira de Bejaia, 2003.
- [14] **S.AITOUAKLI, Y.CHIBOUTI**. <<Evaluation du degré de pollution atmosphérique d'un site>>, mémoire DEUA en électrotechnique, U. A Mira de Bejaia, 2004.
- [15] **Documentation Internet** [www.afsse.fr/documents/impact-sanitaire-pollution-atmospherique-urbaine.pdf]
- [17] **D.DUMORA, R, PARRAU** <<Solution apportée aux problèmes de pollution par différents isolateurs en verre trempé et isolateurs composite>>. 428 RP 99/BC/MRG
- SEDIVER-79, Avenue François Arago -92017NANTERRE Cedex France.
- [18] **GRUPE D'ACTION 33.44.03**, <<dispositifs de surveillance des isolateurs soumis à La pollution>> Electra, n°152, février 1994.
- [19] **M.SFORZINI**, << CIGRE discussion groupe 33>>, paris 1970, pp92-31.

- [20] **D. BARKA, H. ISKOUNEN**, <<détermination du degré de pollution d'un site>>, mémoire d'ingénieur, U. A Mira de Bejaia
- [21] **F. AMIDI, OUERDANE**, <<Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30KV en régions littorales>>. Mémoire d'ingénieur, USTHB de Babezzouar, 1998.
- [22] **GROUPE 33.04** << mesure de la sévérité de la pollution des sites et application au dimensionnement des isolateurs pour les réseaux à courant alternatif>>. Electra, n°64, pp.101-106, paris, 1979.
- [23] **A. MEKHALDI**, <<Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50Hz>>.Thèse de doctorat d'état, 1999, ENP ALGER.
- [24] **Groupe de travail 04 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>>.
- [25] **Publication IEC71-2, <<Installation coordination, Application Guide>>**
 Seconde Edition, 1976.
- [26] **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, novembre 2004.
- [27] **J. Danis**, "A Stochastic Pollution Flashover Model", 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 - 12, September 5 - 9, 1983, Athens, Greece.
- [28] **F. Obenaus**, "Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge", Deutsche Elektrotechnik, Vol. 4, pp. 135 - 136, 1958.
- [29] **F. Rizk**, "Mathematical Models for Pollution Reignition", Electra, Vol. 78, pp. 71 - 103, 1981.
- [30] **P. S. Gosh, S. Chakravorti and N. Chatterjee**, "Estimation of Time to Flashover Characteristics of Contaminated Electrolytic Surfaces Using a Neural Network", IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insult. Vol. 2, N° 6, pp. 1064 - 1076, December 1995.
- [31] **G. Neumärker** , "Verschmutzungszustand und Kriechweg", Monatsber. d. Deut. Akad., Wiss., Berlin, Vol. 1, pp.352 - 359, 1959.
- [32] **H. Nacke**, "Lichtbogen festigkeit und kriechstrom festigkeit von isolier stoffen", Dissertation, University of Berlin-Charlottenburg, 1962.

- [33] **H. Nacke**, "Stabilitat der Fremdschichtentladungen und Theorie des Fremdschichtuberschlags", ETZ - A, N° 16, pp. 577 - 585, 1966.
- [34] **R. Wilkins**, "Flashover Voltage of High Voltage Insulators with Uniform Surface Pollution Films", Proc. IEE, Vol. 116, N° 3, pp. 457 - 465, Mars 1969.
- [35] **H. Boehme and F. Obénaus**. "Essais de Contournement sur des Isolateurs Pollués en Laboratoire et en Lieu de Service du Point de Vue de la Conception d'un Modèle D'amorçage pour Courant Rampant", CIGRE, N° 407, Paris, France, 1966.
- [36] **B. F. Hampton**, "Flashover Méchanism of Polluted Insulation", Proc. PIEEE, Vol. 111, N° 5, pp. 985 - 990, Juillet 1964.
- [37] **H. Woodson and A. J. McElroy**. "Insulators With Contaminated Surfaces Part II: Modelling of Discharge Mechanisms", IEEE Trans., Vol. Pas-89, N° 8, pp. 858 - 867. November- December 1970.
- [38] **R. Wilkins and A. J. Al-Baghdadi**, "Arc Propagation along an Electrolyte Surface", Proc. IEE, Vol. 118, N° 12, pp. 1886 - 1892, December 1971.
- [39] **A. M. Rahal and C. Huraux**, "Flashover of High Voltage Insulators", IEEE Trans., Vol. Pas - 98, N° 6, pp. 2223 - 2231, 1979.
- [40] **S. Hesketh**, "General Criterion for the Prédiction of Pollution Flashover", Proc. IEE, Vol. 114, N° 4, p. 531 - 532, April 1967.
- [41] **S. Anjana and C. S. Lakshminarasmha**, "Computed of Flashover Voltages of Polluted Insulators using Dynamic Arc Model", 6th International Symposium on high voltage Engineering, paper 30 - 09, New Orleans, USA, 1989.
- [42] **N. Dhahbi - Megriche, A. Beroual and L. Krahenbuhl**, "A New Proposal Model for Polluted Insulators Flashover", Journal of Physics D: Applied Physics, (30), N° 5, pp. 889 - 894, March 1997.
- [43] **F. A. M. Rizk and D. H. Nguyen**, "Digital Simulation of Source Insulator Interaction in HVDC Pollution Tests", IEEE Trans. on Power Delivery, pp. 405 - 410, 1988.
- [44] **O. Mayr**, "Beitrag zur Theorie der Statischen und der Dynamishchen Litchbogens", Arch. f. Elektrotechnik, Vol. 37, pp. 588 - 608, 1943.

[45] **R. Sundararajan and R. S. Gorur**, "Computer Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Conditions", IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul, Vol. 2, N° 1, pp. 121 - 127, February 1995.











