

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohamed BOUDIAF, M'sila

Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique

Mémoire de fin d'études présenté par :

REGUIEG Seif Eddine

KHALDI Hamza

En vue d'obtention du diplôme Master en Génie Electrique

Option : Réseaux Electrique

THEME

**MODELISATION DE LA PROPAGATION DE L'ARC
ELECTRIQUE SUR UNE SURFACE ISOLANTE**

Soutenu devant le jury composé de :

M. BENGUESMIA Hani	MCA Univ de M'sila	Président
M. BELHITECHE El Hadi	MAA Univ de M'sila	Encadreur
M. BELHOUCHE Khaled	MAA Univ de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2019/2020

REMERCIEMENTS

Nous remercions DIEU de nous avoir donné la force, le courage et la volonté de faire ce travail

Nous tenons à remercier tout particulièrement notre encadreur Monsieur E. BELHITECHE d'avoir accepté de diriger ce travail et nous lui témoignons toute notre gratitude pour toute sa patience communicatrice et ses orientations.

Nos sincères remerciements vont aussi à Monsieur H. BENGUESMIA, maître de conférences à l'université de M'sila pour ses conseils avisés.

Nous tenons à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'examiner et de juger notre travail.

.

إهداء

إلى من علمني العطاء بدون انتظار .. إلى من أحمل اسمه بكل افتخار .. أرجو من الله أن يمد ف عمرك لتزى ثمارا قد حان
قطافها بعد طول انتظار وستبقى كلماتك نجوم أهتدي بها اليوم وفي الغد وإلى الأبد ..
والذي الغالي ..
إلى ملاكي في الحياة. إلى من يسعد قلبي بلقياها إلى روضة الحب التي تنبت أزكى الأزهار..
إلى بسمه الحياة .. إلى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي إلى أعلى الحبايب
أمي الغالية ..
إلى جميع اصدقائي الذين ساعدوني في تحطيم الشوك لأصل لثمرة النجاح ...

Table des matières

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les isolateurs et phénomène de contournement	
I .1 Introduction.....	2
I.2.Les isolateurs	2
I .2.1 l'isolateur.....	2
I.2.2. Types d'isolateurs.....	2
I.2.2.1 Isolateur de type rigide.....	3
I.2.2.2 Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne	3
I.2.2.3 Isolateurs a capot et tige.....	3
I.2.2.4 Isolateurs à long fût.....	4
I.2.3. Choix des isolateurs.....	5
I.3.Pollution des isolateurs	5
I.3.1.Pollution des isolateurs.....	5
I .3.2 Source de pollution.....	5
I.3.2.1. Pollution naturelle.....	5
I.3.2.2. Pollution marine.....	6
I.3.2.3. Pollution désertique	6
I.3.2.4. Pollution industrielle.....	6
I.3.2.5. Pollution Mixte	7
I.3.3.Conséquences de la pollution	7
I.3.3.1 Arc non localisé	7
I.3.3.2. Arc fixé	7
I 3.3.3. Contournement des isolateurs pollués	7

Table des matières

I .4. Techniques de lutte contre la pollution.....	7
I4.1. Allongement de la ligne de fuite	8
I4.2. Isolateurs plats	8
I.4.3.Revêtement en silicone.....	8
I.4.4. Les isolateurs composites	9
I.4.5. Nettoyage des isolateurs	9
I .5. Le contournement électrique	10
I.5.1.Le contournement électrique	11
I.5.2.Tension de tenue	11
I.5.3. Courant de fuite	11
I.5.4. Courant de fuite critique.....	11
I.5.5. Longueur critique d’arc	11
I .5.2.Le processus de contournement électrique.....	11
I.5.2.1. Le dépôt du polluant	11
I.5.2.2.L’humidification de la couche de pollution	12
I.5.2.3 La formation de bande sèche et de l’arc local	13
I.5.2.4.Le développement d’un arc et l’achèvement du contournement	13
I .5.3.Arc de contournement	14
II.6. Conclusion	14
Chapitre II: Principaux modèles de contournement	
II.1 Mécanismes de propagation de la décharge	16
II.1.1 Propagation par ionisation.....	16
II.1.2.Propagation par force électrostatique	16
II.2 Critères de propagation de la décharge	17

Table des matières

II.2.1 Critère de Hampton.....	17
II.2.2 Critère de Hesketh.....	17
II.2.2 Critère de Wilkins	18
II.3 Principaux modèles statiques de contournement.....	18
II.3.1.Modèle d’Obenaus	18
II.3.2.Modèle de Neumarker.....	19
II.3.3.Modèle d’Alston et Zoledziows	20
II.3.4. Modèle de Rizk	20
II.3.5. Modèles de Nacke et Wilkins	21
II. 4.Principaux modèles dynamiques de contournement	22
II.4.1 Modèle de Rizk	22
II.4.2 Modèle de Anjana et Lakshminarasimha	23
II.4.3 Modèle de Sundararajan et Gorur	26
II.5 Paramètres d’influence	28
II.5.1. Influence de la polarité	28
II.5.2. Influence des paramètres de la source.....	28
II.5.3. Chute de potentiel	29
II.5.4. Temps au contournement	29
II.5.5. Profil de l’isolateur	30
II.5.6. Arcs multiples	31
II.5.7. Couche de pollution non uniforme.....	32
II.5.8. Formation de bandes sèches.....	33
II .4. Conclusion.....	34
Chapitre III : Résultats et interprétations	
III.1. Introduction.....	36

Table des matières

III. 2. Description du logiciel	37
III.3. Validation	37
III.4. Hypothèses	38
III.4.1. Courant critique et tension de contournement	39
III.5. Validation du critère.....	40
III.5.1. Courant de contournement.....	41
III.5.2. Tension de contournement	42
III.6 Application.....	43
III.7. Simulation du modèle réel par COMSOL	43
III.8. Maillages	44
III.9. Analyse des résultats de simulation	44
III.9.1. Etude du potentiel	44
III.10. Distribution du champ électrique	45
III.11. Conclusion.....	47
Conclusion Générale	48
Résumé	49
Références bibliographiques	50

Liste des tableaux

Tableaux II.1 les valeurs des constantes N et n	19
Tableau III.1 les valeurs des constants N et n pour les cinq modèles	40
.Tableau III.2.les valeurs de courant de contournement modèle Obenaus	41
Tableau III.3les valeurs de courant de contournement de modèle Woodson	41
Tableau III.4les valeurs de courant de contournement de modèle Wilkins	41
Tableau III.5les valeurs de courant de contournement de modèle Jolly.....	41
Tableau III.6les valeurs de courant de contournement de modèle Hampton.....	41
Tableau III.7les valeurs de Tension de contournement modèle Obenaus	43
Tableau III.8les valeurs de Tension de contournement modèle Woodson	43
Tableau III. 9 les valeurs de Tension de contournement modèle Wilkins	43
Tableau III.10les valeurs de Tension de contournement modèle Hampton.....	43
Tableau III.11 les valeurs de Tension de contournement modèle Jolly	43

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 isolateur réel	2
Figure I.2 Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre	3
Figure I.3 Isolateurs à capot et tige	4
Figure I.4 Isolateur à long fût en porcelaine	4
Figure I.5 Isolateur pollué	6
Figure I.6 Isolateur plat en verre	8
Figure I.7 Revêtement silicone d'isolateur	9
Figure I.8 Nettoyage des isolateurs	10
Figure I.9. Contournement d'un isolateur	10
Figure I.10 Dépôt et évolution de l'agent polluant	12
Figure I.11 Humidification du dépôt polluant et création d'un courant de fuite	12
Figure. I.12 Etapes du contournement sur une surface polluée	13

Chapitre II

Figure II.1 Mécanisme de propagation par ionisation proposé par Wilkins	15
Figure II.2 Courbure de la décharge dans la direction de l'écoulement du courant mettant en évidence l'existence d'une force	16
Figure II .3 Modèle d'Obenaus. L représente la longueur de fuite totale.....	17
Figure II .4 Modèle cylindrique utilisé par Alston et Zoledziowski	19
Figure II .5 représentation schématique de la surface d'un isolateur	21
Figure II .6 Organigramme du modèle de Anjana et Lakshminarasimha	24
Figure II .7 organigramme du modèle Sundararajan et Gorur	26
Figure II .8 Exemple de profil réel d'un isolateur à partir de mesures expérimentales.....	29

Chapitre III

Figure III.1 la courbe de courant de contournement en fonction de résistance linéique ..	40
Figure III .2 la courbe de tension de contournement en fonction de résistance linéique ..	42
Figure III.3 Représentation du modèle réel sur le logiciel COMSOL pour un élément.....	43
Figure III.4 Représentation du modèle réel sur le logiciel COMSOL pour deux éléments.	43
FigureIII.5 Maillage de l'isolateur réel.....	45
Figure III.6 Distribution du potentiel d'un isolateur pour un élément en fonction de la conductivité	45
Figure III.7 Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne	46
Figure III.8 Distribution du champ électrique d'un isolateur pour un élément en fonction de la conductivité	47
Figure III.9 Distribution du champ électrique d'un isolateur pour deux éléments en fonction de la conductivité	47
Figure III.10 Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs.....	48

Introduction générale

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

La pollution des isolateurs associée à la présence d'humidité diminue le niveau d'isolation du système [1]. En effet l'apport d'eau au niveau du dépôt de pollution provoque la dissolution des sels et conduit à la formation d'une couche électrolytique [2]. Cette couche, soumise à la différence de potentiel aux bornes de l'isolateur devient le siège d'un courant de fuite conduisant à l'échauffement de la couche par effet Joule et par conséquent à l'apparition de bandes sèches. La différence de potentiel, qui initialement est appliquée entre la ligne et la partie la plus éloignée de la chaîne d'isolateurs, se portera aux frontières de ces zones. A cause des champs électriques très élevés, une étincelle, prenant racine sur la zone humide où le potentiel est élevé, apparaît au-dessus de la bande sèche en ionisant l'air environnant. L'étincelle atteint alors une telle taille, qu'elle se propage sur toute la longueur de la couche de pollution. L'isolateur cesse d'assurer sa fonction première et le court-circuit de la ligne devient alors inévitable : c'est le contournement.

L'objectif dans notre travail, est de faire dans un premier lieu, une étude comparative des modèles trouvés dans la littérature pour le calcul des paramètres électrique (Courant et tension de contournement). Par la suite nous allons exploiter le logiciel COMSOL Multiphysics pour étudier l'influence des paramètres électro-géométriques sur les distributions du potentiel et du champ électriques le long d'une chaîne d'isolateurs.

Pour ce faire, nous avons réparti le manuscrit en trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous allons donner quelques généralités sur les isolateurs et le phénomène de contournement. Le deuxième chapitre fera l'objet des principaux modèles du contournement en régimes statique et dynamique trouvés dans la littérature.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons et interpréterons les résultats de simulation de cette étude. Nous terminerons par une conclusion générale.

Chapitre I :

GENERALITES SUR LES ISOLATEURS ET PHENOMENE DE CONTOURNEMENT

I.1. introduction

L'étude du phénomène du contournement électrique d'une chaîne d'isolateur H.T reste d'actualité nonobstant l'intérêt qui lui a été accordé depuis plusieurs années. En effet, il est toujours une des causes d'incidents sur les réseaux HT, particulièrement en zone humide et à fort taux de pollution. Ce phénomène est défini comme la naissance de micro-décharges évolutives qui s'étendent sur sa surface des isolateurs jusqu'à atteindre la masse, court-circuitant ainsi la ligne HT. Dans ce qui suit, nous allons donner quelques généralités sur les isolateurs et phénomène de contournement.

I.2 Les Isolateurs

I.2.1 L'isolateur

Les équipements de haute tension des réseaux aériens de transport de l'énergie électrique sont supposés opérer de façon fiable sous des conditions environnementales spécifiques pour lesquelles ils sont prévus. En particulier, les isolateurs, qui représentent relativement un faible pourcentage dans le prix des lignes aériens, constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement de ces lignes. Une quantité des isolateurs est utilisé sur les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique, et en principe ces isolateurs sont employés dans différents environnements tel que tropical, arctique, côtier, atmosphère polluée, etc.

L'isolateur est un matériau isolant solide qui présente une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle [4-5]. Il est utilisé pour isoler les conducteurs ou les pièces sous tension afin d'empêcher les circulations de courant de courant, les pertes de courant et les charges d'électrocution, il est utilisé pour retenir mécaniquement les conducteurs.

Parmi les contraintes auxquelles sont soumis les isolateurs des réseaux électriques, ce sont les accumulations de dépôt de la pollution atmosphérique. Depuis plusieurs années, l'une des principales cibles dans les travaux de recherche de développement dans le champ de transmission et de la distribution électrique a été la diminution du nombre et de la durée des interruptions de l'alimentation en énergie des consommateurs. Parmi les défauts source d'interruption on distingue le contournement des isolateurs pollués.



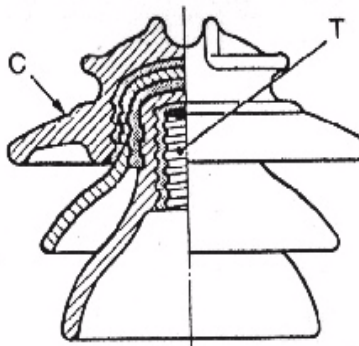
Figure I.1 isolateur réel

I.2.2.Types D'isolateurs

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs : les isolateurs de type rigide et les éléments de chaîne.

I.2.2.1 Isolateur de type rigide

Un isolateur rigide (Figure I.2) est relié au support par une ferrure fixe. Cet isolateur est principalement soumis à des efforts de flexion et de compression, lorsqu'il est placé en position verticale. Il peut dans certains cas être placé horizontalement. Ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 kV.



C : Cloche T : logement de tige

Figure I.2 Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre

I.2.2.2 Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

Ils sont constitués par le matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et à donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs. La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (chaîne d'alignement), soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage).

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

- les isolateurs à capot et tige.
- les isolateurs à long fût.

I.2.2.3 Isolateurs a capot et tige

Chaque élément est constitué d'un capot, d'une partie isolante en forme de jupe et d'une tige, La coupe d'un tel isolateur est schématisée sur la (Figure1.3). La forme de la tête est dessinée de sorte que les efforts de traction appliqués à l'isolateur se transforment, autant que possible, en compression des diélectriques sur lesquels apparaissent, toutefois, inévitablement certaines contraintes de cisaillement.

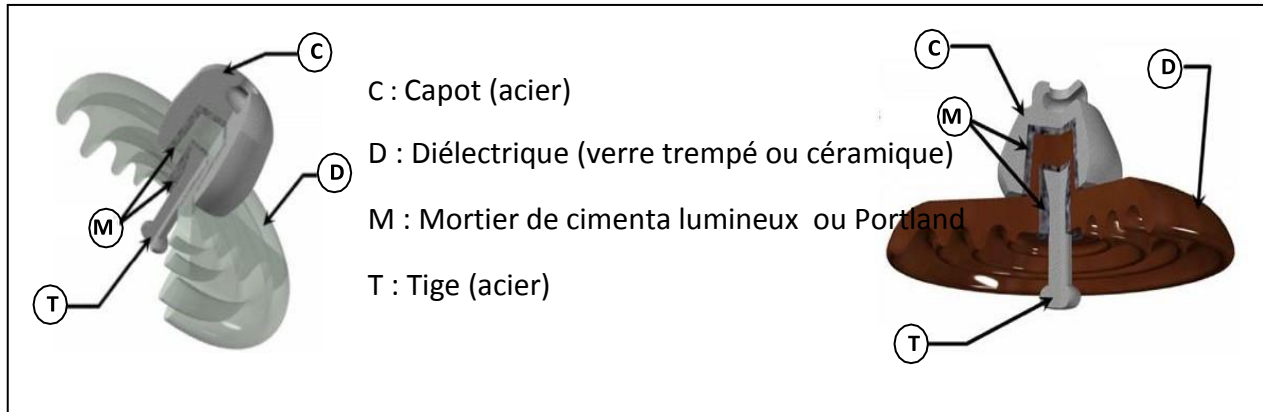


Figure I.3 Isolateurs à capot et tige

I.2.2.4 Isolateurs à long fût

L'isolateur à long fût est constitué d'un bâton cylindrique en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques muni d'ailettes, à chaque extrémité duquel est fixée une pièce métallique de liaison. Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, soit elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (figure i.4 (a)), soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet.

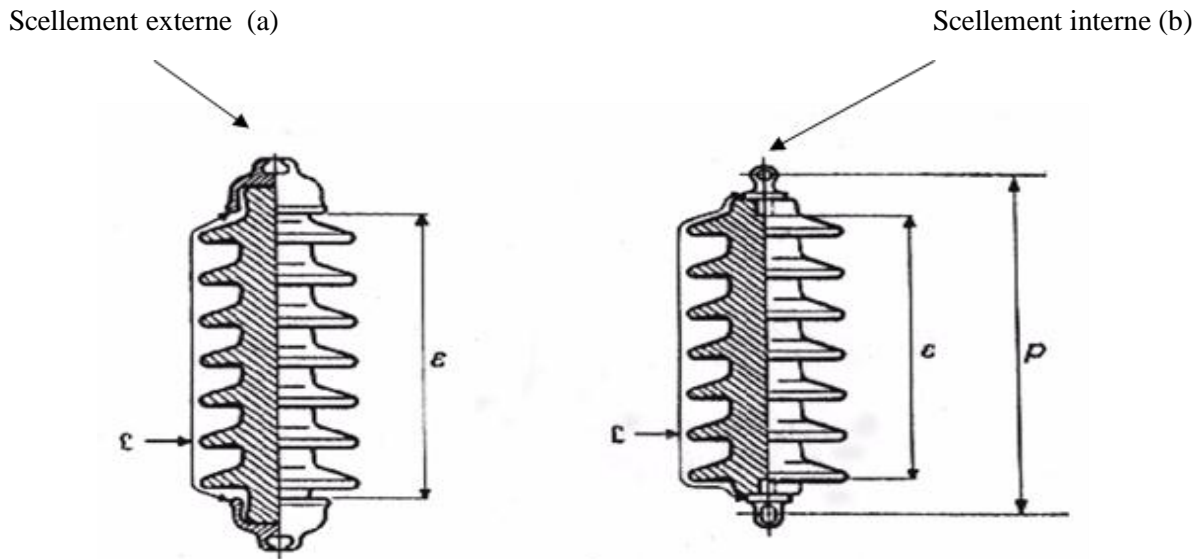


Figure I.4 Isolateur à long fût en porcelaine

£: Plus courte distance dans l'air, extérieure à l'isolateur

ε : Longueur du canal de perforation

p : pas $\epsilon \gg \lambda/2$

I.2.3 Choix Des Isolateurs

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service.

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné 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.

I.3 Pollution des isolateurs

I.3.1 Pollution des isolateurs

Un isolateur est placé à l'extérieur est exposé aux différents agents constituant l'atmosphère qui le contamine. Cette contamination est due à la formation de couches plus ou moins conductrices sur la surface de l'isolateur. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la

résistivité superficielle des surfaces isolantes et par suite la diminution de la tension de tenue des isolateurs.

L'échauffement de la couche polluante conductrice humidifiée, provoqué par la circulation des courants de fuite sur la surface de ces isolateurs, entraîne des assèchements locaux de la couche de pollution et l'apparition d'arcs de petite longueur (arcs partielles). Dans certaines conditions, ces arcs partiels peuvent se développer jusqu'à provoquer le contournement total des isolateurs, en connectant l'extrémité sous haute tension à celle mise à la terre, et conduisant ainsi à la mise hors service de l'ensemble de l'installation.

Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer le phénomène d'entretien de l'arc. Ainsi, Maikopar [6] a établi le modèle de réallumage par rupture énergétique. Le modèle de réallumage par rupture diélectrique a été décrit par Rizk [7]. Le contournement est l'ultime étape liée à la génération d'une décharge à la surface de l'isolateur.

I.3.2. Sources de pollution

La nature de la pollution dépend de la situation géographique et climatique. Les diverses sources de pollution les plus fréquemment observées sur les isolateurs peuvent être regroupées selon leur origine et classées comme suit.

I.3.2.1 Pollution Naturelle

La pollution naturelle provient:

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



Figure I.5 Isolateur pollué

I.3.2.2 Pollution marine

Les installations situées au bord de la mer sont exposées aux embruns portés par le vent et qui se déposent progressivement sur les isolateurs, formant une couche de pollution de sel qui devient

conductrice lorsqu'elle est humidifiée par le brouillard ou simplement par condensation. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance. Dans certaines conditions, ils se développent jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur.

I.3.2.3 Pollution désertique

La pollution désertique est caractérisée surtout par les dépôts de sable se formant à la surface des isolateurs après les vents de sable. Une fois humidifiés, ces dépôts deviennent plus ou moins conducteurs (en fonction des concentrations en sels solubles qu'ils contiennent) et engendrent la circulation d'un courant de fuite qui apparaît brusquement et qui est suivi par l'apparition d'arcs partiels qui peuvent conduire au contournement total de l'isolateur.

I.3.2.4 Pollution industrielle

Au voisinage de certaines zones industrielles, la pollution est engendrée par l'évacuation des fumées des usines (raffinerie, cimenterie, minerais etc.). La présence d'éléments conducteurs dans les couches, la dissolution des sels qu'elles contiennent engendrent la circulation d'un courant de fuite plus ou moins fort selon les concentrations des agents polluants.

Les usines ne sont pas les seules responsables de ce genre de pollution, les gaz d'échappement des véhicules et les engrais utilisés en agriculture contribuent aussi aux dépôts observés à la surface des isolateurs.

I.3.2.5 Pollution mixte

Ce type de pollution est en fait le plus fréquent et le plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. La pollution mixte résulte de la combinaison entre les différents types de pollution, comme par exemple les pollutions marine et industrielle lorsque des installations industrielles sont situées en bord de mer.

I.3.3 Conséquences de la pollution

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs engendrent une conductivité électrique superficielle. Celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. Suivant les conditions atmosphériques (pluie fine, brouillard,...), la tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite. Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur.

I.3.3.1 Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçait à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courant de fuite entraînant une petite perte d'énergie, généralement supportable par l'installation.

I.3.3.2 Arc fixe

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

I.3.3.3 Contournement des isolateurs pollués

L'accumulation du dépôt est continue et elle n'est modifiée que par la pluie ou le vent. En position verticale, le nettoyage est plus efficace sur le dessus de l'isolateur que sur le dessous, d'où un dépôt plus important sur la surface inférieure des ailettes. Généralement, les principaux phénomènes conduisant au contournement d'un isolateur pollué, soumis à la tension de service, comprenant la formation d'une couche électrolytique conductrice à la surface de l'isolateur, consiste en l'apparition brusque d'un courant de fuite accompagné de la formation d'une bande sèche et d'arcs partiels, et la propagation en surface de l'arc qui peut couvrir tout l'isolateur.

I.4. Techniques de lutte contre la pollution

Pour un niveau de pollution donné, une bonne conception des lignes basée sur des mesures de sévérité de pollution permet de prévenir, autant que possible, les incidents lorsque la ligne est en service. Mais un changement dans les données d'un site est toujours possible, c'est-à-dire même un dimensionnement initialement correct peut s'avérer insuffisant dans certaines conditions.

Dans ces circonstances, on utilise des techniques comme l'allongement de la ligne de fuite, l'adaptation d'un autre type des isolateurs capable de résister aux contraintes de la pollution.

Par contre, certaines zones très localisées sont soumises à un niveau de pollution exceptionnel. Dans ce cas, la simulation de laboratoire n'est pas recherchée, car aucun isolateur de dimensionnement raisonnable n'est en mesure de résister à ces contraintes.

On préfère, généralement, utiliser d'autres types des techniques de lutte contre la pollution. Plusieurs moyens sont utilisés afin de prévenir, autant que possible, les incidents lorsqu'une ligne est en service. Ces moyens de lutte doivent tenir compte des données propres au site considéré et au changement possible de la sévérité de pollution dû à de nouveaux facteurs (apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, ...). Les différentes méthodes utilisées consistent.

I.4.1 Allongement de la ligne de fuite

Permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux techniques sont employées :

- Le changement de type d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite) : c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.

- L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants.

I.4.2 Isolateurs plats (auto-nettoyables)

L'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminution de la ligne de fuite des isolateurs. En effet, ces derniers sans nervures 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 principalement utilisés dans les régions désertiques.



Figure I.6 Isolateur plat en verre

I.4.3 Revêtement a base des silicones

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Comme pour le graissage grâce à ses propriétés hydrophobes, ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre sa longévité est, en général, nettement supérieure à celle du graissage.



Figure I.7 Revêtement silicone d'isolateur

I.4.4 Les isolateurs composite

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

I.4.5 Nettoyages sous ou hors tension

Le nettoyage manuel (essuyage à sec de l'isolateur) ou le lavage hors tension, peuvent être utilisés de façon périodique, en particulier dans les postes. Comme ces méthodes sont utilisées hors tension, elles entraînent nécessairement des interruptions de service parfois assez longues. Aussi, il faut limiter, autant que possible, leur utilisation. Le lavage sous tension permet d'éviter ces coupures. Dans son principe, ce type de lavage permet de garder propre l'isolateur. Ce dernier est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans ces cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau de lavage, le processus de lavage et les distances de sécurité à respecter 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 (Amérique du Nord en particulier). Cette technique permet le nettoyage d'isolateurs recouverts de pollution très adhérente (ciment, par exemple) et peut être utilisée pour dégraisser les isolateurs.



Figure I.8 Nettoyage des isolateurs

I.5 Le contournement électrique

I.5.1 Le contournement

Le contournement électrique d'un isolateur haute tension est l'extension sur sa surface d'une décharge jusqu'à ce qu'elle mette en court-circuit la haute tension et la masse, ce qui a pour conséquence grave l'interruption de la distribution de l'énergie électrique.

Le contournement des isolateurs pollués est un phénomène de rupture diélectrique provoqué par le dépôt de la pollution sur une surface d'isolateur. Pour étudier ce phénomène beaucoup d'essais de tension de tenue au contournement ont été effectués dans des conditions normales ou artificielles de dépôt de pollution, respectivement dans une station de pollution ou dans un laboratoire. La Commission Electrotechnique International a établi une série de norme standard internationale pour les essais artificiels de pollution sur les isolateurs haute tension.



.Figure I.9 contournement d'un isolateur

I.5.2 Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les deux électrodes. Elle dépend.

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

I.5.3 Tension de tenue

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

I.5.4 Courant de fuite

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

I.5.5. Courant de fuite critique

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

I.5.6. Longueur critique d'arc

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

I.5.2. Le processus de contournement électrique

Généralement le processus de contournement sur une surface polluée peut être divisé en quatre étapes.

I.5.2.1. Le dépôt du polluant

Le polluant, qui va se trouver en forme d'aérosol, peut se précipiter sur une surface de l'isolateur en formant une couche de pollution.

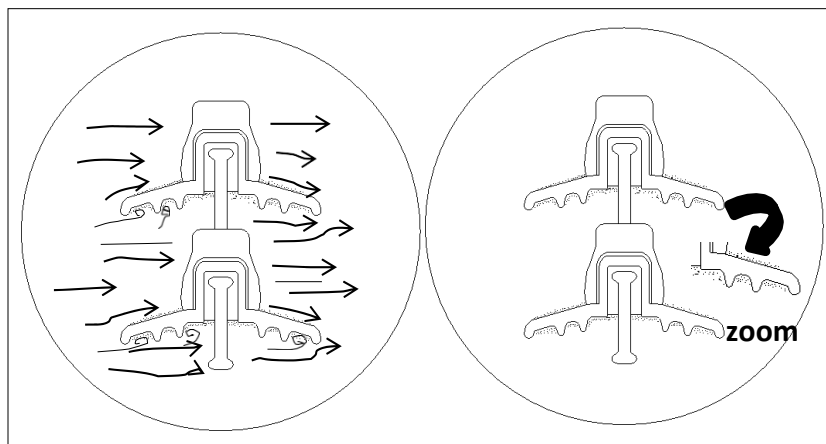


Figure I.10. Dépôt et évolution de l'agent polluant

I.5.2.2. L'humidification de la couche de pollution

La résistance de couche de pollution est très grande, donc la pollution ne cause pas une diminution dans les propriétés d'isolation. Cependant, sous quelques conditions climatiques (brouillard, la rosée, la bruine ...), la couche de pollution, constituée d'électrolytes extrêmement solubles, sera humidifiée. Alors on obtient une augmentation de la conductivité surfacique et par conséquent un courant de fuite qui s'allongera dans la couche de pollution comme illustré dans comme la figure suivante.

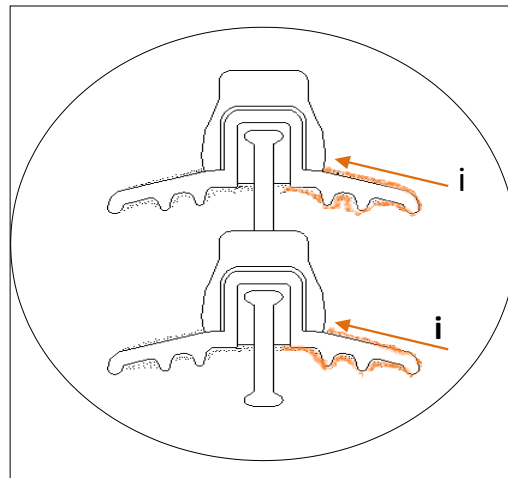


Figure I.11 Humidification du dépôt

polluant et création d'un courant de fuite.

I.5.2.3 La formation de bande sèche et de l'arc local

A cause de la forme d'isolateurs, la densité du courant sur la surface est généralement non uniforme. Importante augmentation de la densité actuelle, l'effet de chauffage du courant va donc apparaître dans ces secteurs. Cette zone sèche locale mènera à la contrainte de courant. La zone sèche locale aura tendance alors latéralement à s'étendre jusqu'à ce qu'une bande sèche est complètement formée selon la figure I.12 Une bande sèche a une grande résistance, donc, la tension appliquée tombera principalement le long de la bande sèche. Si la tension est assez grande, la bande sèche ne sera pas conductrice et un arc local apparaîtra à travers cette bande, à proximité de la racine d'arc, la concentration du courant mènera à un élargissement de la bande sèche comme montré sur la figure suivante.

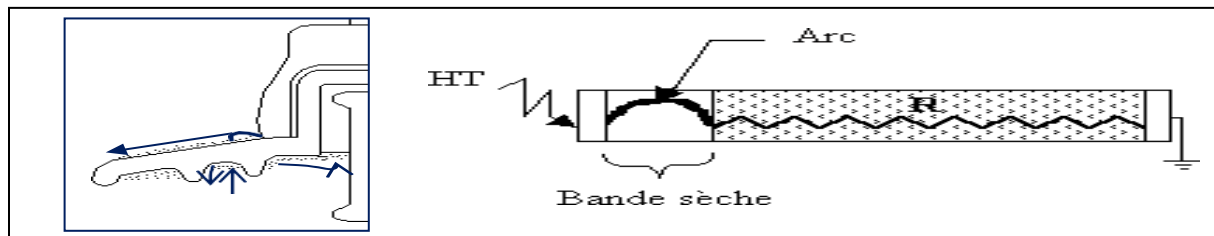


Figure I.12 Arc et bande sèche.

I.5.2.4 Le développement d'un arc et l'achèvement du contournement

Selon les conditions, une décharge de surface peut évoluer de façons suivantes :

L'arc local s'éteint figure I.10. L'arc local peut se déplacer latéralement pour trouver une position plus stable qui correspond à une longueur d'arc plus courte figure I.11.

L'arc local s'allonge longitudinalement jusqu'à ce qu'il atteigne les électrodes et provoquant ainsi le saut final vers le contournement. Dans ce cas, l'arc s'étend le long de la surface de couche de pollution humide hors de la zone sèche figure I.12.

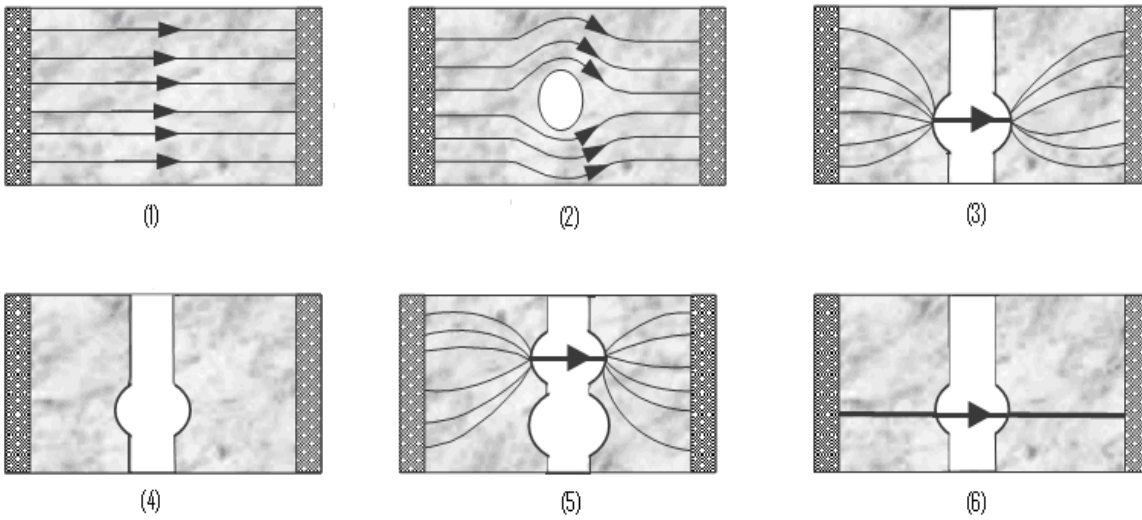


Figure. I.13 Etapes du contournement sur une surface polluée.

I.5.3 Arc de contournement

L'arc de contournement est un phénomène complexe puisqu'il met en jeu différents processus de décharge électriques dans l'air ainsi qu'à la surface du milieu sur lequel il évolue. Il s'agit en fait d'un arc électrique établi entre les électrodes de l'isolateur dont l'une est portée à la haute tension et l'autre est mise à la terre, entraînant ainsi un court-circuit. Cet arc de contournement peut se produire sous différentes conditions atmosphériques telles que la pluie, la neige ou le verglas. De plus la présence d'une couche de pollution peut grandement contribuer au contournement des isolateurs. Enfin ces contournements peuvent se produire sous tension de service, mais aussi lors de chocs de foudre ou de manœuvre qui induisent une surtension sur le réseau électrique.

Pour éviter des contournements sous pollution, la ligne de fuite d'un isolateur (ou d'une chaîne) peut être très longue par exemple 10.50 mètres en 420 kV. Sans l'existence des ailettes ou des nervures, les isolateurs seraient beaucoup trop longs et entraîneraient une surélévation des ouvrages tout à fait inacceptable. C'est pourquoi les fabricants d'isolateurs ont proposé des profils plus ou moins complexes.

La ligne de fuite est la distance la plus courte le long de la surface de l'isolateur entre deux parties conductrices. Le courant de fuite d'un isolateur pollué est le courant qui traverse la couche de pollution humide lorsque l'isolateur est sous tension de service.

I.6. Conclusion

Les isolateurs sont des éléments essentiels dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service. Dans ce chapitre introductif, une synthèse des différents aspects des phénomènes de pollution est présentée. Les principales conclusions que l'on peut tirer de cette synthèse sont : La pollution reste un facteur déterminant pour le dimensionnement des isolateurs dans les ouvrages de haute tension. Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (graissage, lavage, nouveau type des isolateurs, revêtements hydrophobes) permettent de disposer aujourd'hui de solutions curatives à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants sur le réseau. Dans le chapitre qui suit, nous allons donner les principaux modèles de contournement des isolateurs.

Chapitre II :

**PRINCIPAUX MODELES DE
CONTOURNEMENT**

II.1 Mécanismes de propagation de la décharge

II.1.2 Propagation par ionisation

Wilkins et Al Baghdadi [8] 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 (figure II.1). Par conséquent le courant total change progressivement de trajet, entraînant ainsi une élongation δ de la décharge.

Wilkins parle d'ionisation, de passage de courant et de l'existence d'un champ au pied de la décharge sans évoquer le claquage de l'air. Sous le nom d'ionisation, il considère en réalité une rupture diélectrique progressive.

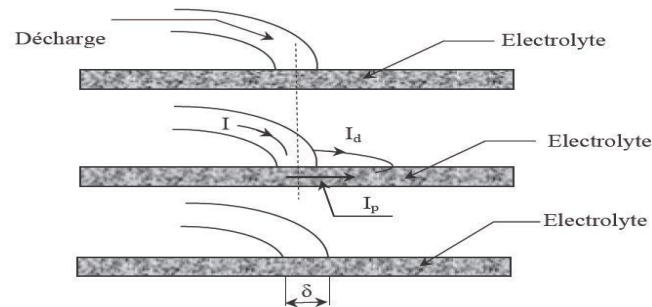


Figure II.1 Mécanisme de propagation par ionisation proposé par Wilkins

II.1.3 Propagation par force électrostatique

A partir des observations faites sur un canal d'électrolyte, Rahal [9] 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 va provoquer la courbure de la décharge vers l'électrode de masse (figure II.2). Une fois les conditions critiques satisfaites, la décharge se déplacera alors vers l'électrode de masse.

D'après l'auteur, l'existence de cette force implique en effet, que l'on considère la décharge comme un élément de circuit doué d'une certaine auto-consistance macroscopique et susceptible de s'étirer de façon plus ou moins élastique.

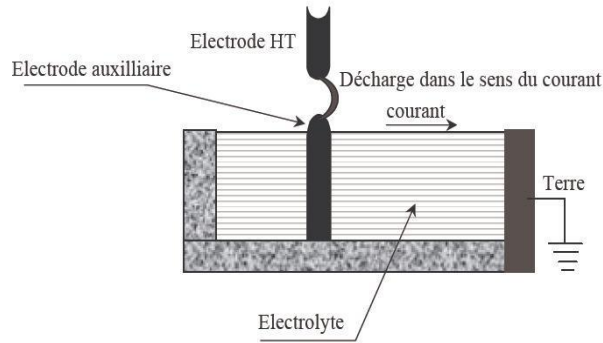


Figure II.2 : Courbure de la décharge dans la direction de l'écoulement du courant mettant en évidence l'existence d'une force

Dans une analyse critique sur les différents mécanismes de propagation de la décharge présents dans la littérature, Flazi [3] ne pouvant pas identifier un phénomène élémentaire de rupture diélectrique d'un intervalle gazeux sur le trajet du contournement, au sens de la physique de la décharge, a dû se ramener à une approche plus globale du phénomène, à savoir le mécanisme de la propagation par ionisation progressive. Ainsi, il a déduit que l'augmentation du degré d'ionisation à l'intérieur de la décharge et le démarrage des processus d'ionisation devant elle, sont les facteurs responsables de l'allongement et du changement que subit la décharge, dans ses aspects et ses états dynamiques.

II.2 Critères de propagation de la décharge

Les principaux critères de propagation rencontrés dans la littérature, ont été établis sur la base de conditions faisant intervenir soit le champ électrique, soit le courant, soit la puissance ou encore l'énergie fournie par la source.

II.2.1 Critère de Hampton

A partir d'une étude expérimentale, Hampton [10] 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 nécessaire pour que le contournement se produise, est que le champ E_p dans la colonne d'eau dépasse le champ à l'intérieur de l'arc E_a :

$$E_a < E_p$$

II.2.2 Critère de Hesketh

En supposons que l'arc en série avec la couche de pollution mouillée se modifie de façon à rendre maximal le courant qu'il tire de la source d'alimentation, Hesketh [12] a établi un critère de propagation de l'arc, exprimé par la relation :

$$\frac{dI}{dx} > 0$$

I étant le courant d'arc

II.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 [11] a généralisé la condition énoncée par Hesketh et établi un critère de propagation utilisant la puissance P fournie par la source

$$\frac{dP}{dx} > 0$$

Pour 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.

II.3. Principaux modèles statiques de contournement

Pour adapter plus rationnellement les isolateurs d'un ouvrage à la sévérité de pollution d'un site, ou pour surveiller la qualité de l'isolement et donc d'éviter les éventuelles défaillances, il est impératif de disposer de modèles permettant de prévoir le contournement des isolateurs. C'est dans cette optique que de nombreux modèles empiriques ou semi-empiriques ont été développés.

II.3.1 Modèle d'Obenaus

C'est Obenaus [6, 7], qui dans un travail de pionnier, est à l'origine des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur des surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante, sous tension continue. En effet, partant d'un modèle type circuit électrique équivalent constitué d'un arc de longueur x en série avec une résistance Rp (figure II.3), il en a déduit la tension d'arc :

$$V_{\text{arc}} = \frac{xN}{In}$$

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

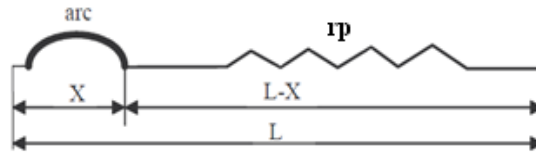


Figure II.3 Modèle d'Obenaus

Les valeurs des paramètres n et N dépendent du milieu dans lequel brûle la décharge. Elles varient selon les auteurs [7-15]. De façon générale :

$$0.40 \leq n \leq 1$$

et

$$3 \leq N \leq 500$$

A partir de mesures expérimentales sur un canal d'électrolyte, Ghosh et al [13] ont proposé de prendre des valeurs différentes pour les constantes N 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 I.1

Electrolyte	N	n
NaCl	360	0,59
CaCl ₂	461	0,42
FeCl ₃	270	0,66
CuSO ₄	450	0,49

Tableau II.1. Les valeurs des constantes N et n

II.3.2 Modèle de Neumarker

En reprenant les travaux d'Obenaus, et en y ajoutant l'hypothèse d'une couche de pollution de résistance r_p uniforme par unité de longueur de fuite, Neumarker [7] propose l'expression suivante pour la résistance de pollution R_p

$$R_p = r_p(L - x)$$

En introduisant cette expression dans le modèle d'Obenaus, la tension U aux bornes de l'isolateur sera

$$U = V_{\text{arc}} + r_p(L - x)$$

ou encore

$$U = \frac{N_x}{I^n} + r_p(L - x)$$

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

$$I_c = \left(\frac{N_x}{I^n}\right)^{\frac{1}{n+1}}$$

$$X_c = \frac{L}{n+1}$$

d'où l'expression de la tension critique de contournement

$$U_c = N^{\frac{1}{n+1}} * r_p^{\frac{n}{n+1}} * L$$

Les modèles établis en courant continu ci-dessus, ont été étendus au cas d'une tension alternative en y apportant certaines modifications

II.3.3 Modèle d'Alston et Zoledziows

En tenant compte de l'hypothèse de Neumarker et pour une tension d'application dépassant quelques kilos Volts, Alston et Zoledziowski [35] ont déterminé la condition de maintien de l'arc électrique dans le cas d'un isolateur cylindrique de longueur L

$$U_{ck} = (n + 1)(N * X)^{\left(\frac{1}{n+1}\right)} \left(r * \frac{L - X}{n}\right) \left(\frac{n}{n + 1}\right)$$

Avec X : longueur d'arc

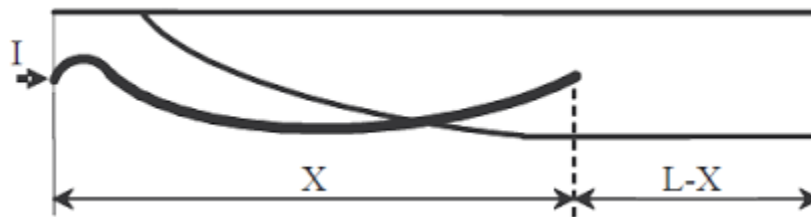


Figure II.4 Modèle cylindrique utilisé par Alston et Zoledziowski

II.3.4 Modèle de Rizk

A partir d'une analyse théorique, Rizk [6] a décrit le phénomène d'entretien de l'arc par le mécanisme de la rupture diélectrique. Il a mis en évidence l'expression de la rigidité diélectrique de l'espace résiduel et établi une relation entre la tension minimale U_c (tension de contournement minimale) nécessaire à l'entretien de l'arc, la résistance de pollution linéique r_p et la longueur de fuite L de la forme

$$\frac{U_c}{L} = 23r_p^{0.4}$$

II.3.5. Modèle de Nacke et Wilkins

Nacke et Wilkins [36] proposent de considérer que les points à la base de l'arc forment des demi-cercles aux limites des bandes sèches figure II.5. Ainsi la résistance de pollution se compose de deux termes : une résistance interne R_i (résistance externe $R_e(x)$) pour le reste.

Pour une largeur de bande étroite ($X_p/b \geq 2/\pi$)

$$R_i(x) = \frac{1}{\pi\gamma}$$

et

$$R_e(x) = rX_p + \frac{2}{\pi\gamma} \log\left(\frac{b}{2\pi}\right) \quad 1.3.4$$

Où

r : est la résistance linéique de la pollution, est la conductivité superficielle.

X_p : est la longueur de la couche polluée (mouillée) dans les conditions critiques.

B : est la largeur de la surface de l'isolateur.

r_d : est 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 :

$$R_e(x) = \frac{2}{\pi} \left[0.68 + \ln\left(\frac{X_p}{r_d}\right) \right]$$

Pour un isolateur à ailette multiples :

$$R_e(x) = \frac{2}{\pi\gamma} \left[0.3 + \ln\left(\frac{X_p}{r_d}\right) \right]$$

Ainsi, la résistance de pollution totale sera :

$$R(X) = R_i(x) + R_e(x)$$

Pour la même configuration figure II.5.2 dans le cas d'une bande étroite, Wilkins [Wi] a obtenu :

$$R(X) = r(L - X) + \frac{1}{\pi\gamma} \ln\left(\frac{b}{2\pi r_d}\right) \quad 1.3.8$$

Et pour une bande large

$$R(X) = \frac{1}{\pi\gamma} \left[\ln\left(\frac{2L}{\pi r_d}\right) \cdot \ln\left(\tan \frac{\pi X}{L}\right) \right]$$

Ou X est la longueur d'arc et L la distance totale de fuite de l'isolateur.

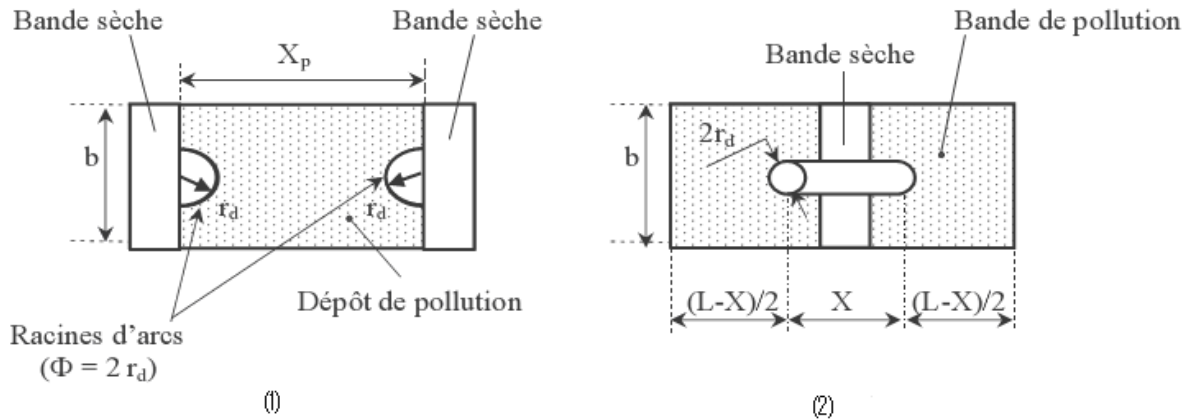


Figure II .5 représentation schématique de la surface d'un isolateur

II.4 Principaux modèles dynamiques

Alors que plusieurs paramètres évoluent dans le temps, l'étude de phénomène de contournement a été souvent effectuée en utilisant des modèles statiques. Afin de se rapprocher le plus possible de la réalité et parer à cet handicap, de nouveaux modèles, tenant compte la variation dans le temps de certains paramètres, ont été proposés. Ainsi, des lois physiques sont utilisées pour établir des critères de propagation de la décharge et pour étudier la dynamique de cette décharge.

II.4.1.Modèle de Rizk

Pour caractériser la dynamique de l'arc pour le cas continu, Rizk et al [15] ont considéré une résistance d'arc qui varie selon l'équation de Mayr [16] :

$$\frac{dr_a}{dt} = \frac{r_a}{\tau} - \frac{r_a^{2-n+1}}{\tau N}$$

Avec

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

$n=0.8$ et $N=60$

La température de l'électrolyte est calculée à partir du bilan des énergies qui prend en compte les pertes d'énergie due à l'évaporation, la convection et la condensation.

$$\delta C_p h \frac{dT}{dt} = \frac{R_p(X) i^2}{S(X)} - \delta H \frac{dh_e}{dt} - \left(H_c + \delta C_p \frac{dh_\omega}{dt} \right) (T - T_a)$$

où h est l'épaisseur de la couche de pollution, δ la masse volumique de l'électrolyte, H l'enthalpie (2260 j/g), H_c le coefficient de transfert de la chaleur par convection ($250 \mu W/cm^2/^\circ C$), C_p la chaleur spécifique sous pression constante, T_a la température ambiante et $S(X)$ la surface de l'électrolyte non contournée.

Dans ce modèle, pour une durée d'impulsion de courant inférieur à 1s, l'augmentation de l'épaisseur de l'électrolyte par humidification (h_w) est négligeable devant sa diminution par évaporation (h_e). Cette dernière peut être calculée pour une température de $T=100^\circ C$ à partir de :

$$\frac{dh_e}{dt} = \frac{\left[\frac{R_p i^2}{S(X)} - H_c (T - T_a) \right]}{\delta [H + C_p (T - T_a)]}$$

Pour calculer la vitesse de propagation, Rizk et al [15] ont adopté l'expression empirique établie par Al Baghdadi [8] et que Rizk a justifié auparavant par son analyse dimensionnelle [17].

Les résultats expérimentaux ont montré que son modèle reproduit correctement l'influence de la résistance de protection placée en série avec l'électrode haute tension.

II.4.2 Modèle de Anjana et Lakshminarasimha

Anjana et al [14] ont proposé un modèle dynamique basé sur l'équation de Mayr [16] et sur le modèle statique d'Obenaus [7]. Ils ont supposé 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 :

$$W_{th} = \frac{3}{2} KTM$$

où T est la température de l'arc, M le nombre de particules neutres dans l'arc et k la constante de Boltzmann.

Pour la propagation de l'arc, Anjana et al [14] proposent leur propre modèle, selon lequel l'arc ne se déplace que si son énergie totale W_t est supérieure ou égale à l'énergie W_{th} nécessaire pour maintenir l'arc à sa température où W_t est donné par l'expression suivante.

$$W_t = (E_{arc}I_{arc} - P_0)\Delta T$$

E_{arc} étant le gradient dans l'arc, P_0 les pertes par unité de longueur considérées comme constantes ; cette valeur sera calculée en fonction des pertes par conduction et des pertes par rayonnement. La température de l'arc et la température ambiante sont supposées constantes et égales respectivement à 3000 K et 300 K.

Si la condition de propagation n'est pas satisfaite, la tension est incrémentée de ΔV_s 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 :

$$v = \mu E_{arc}$$

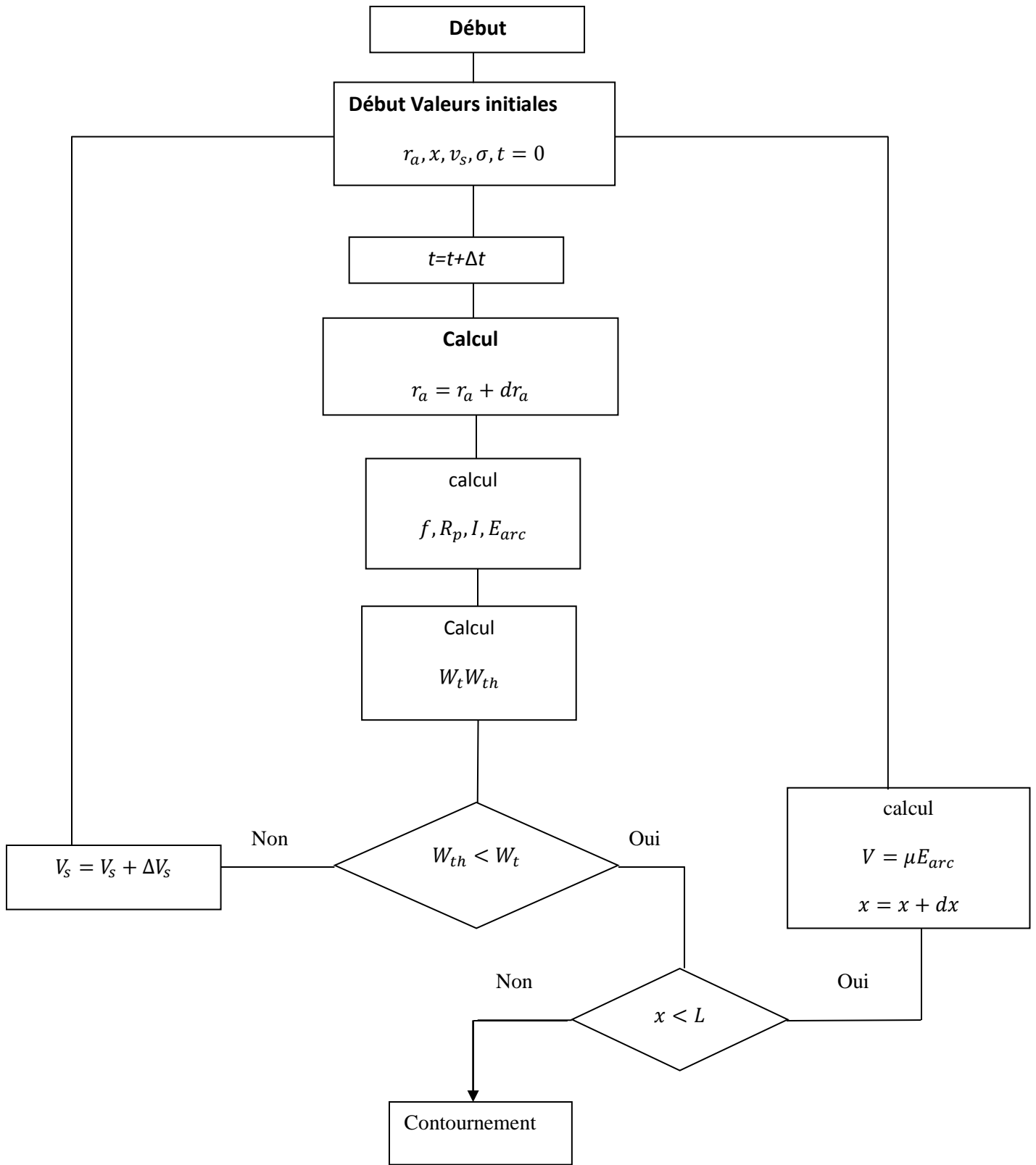


Figure II.6 Organigramme du modèle de Anjana et Lakshminarasimha

II.4.3. Modèle de Sundararajan et Gorur

Sundararajan et Gorur [17] ont proposé un modèle dynamique qui ressemble au modèle précédent sauf qu'ils ont adopté pour le critère de propagation, celui de Hampton ($E_{arc} < E_p$) pour le cas continu.

En ce qui concerne le gradient de tension dans la couche de pollution, les auteurs utilisent l'expression :

$$E_p = N^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n-1}}$$

où r_p représente la résistance de pollution linéique, $N=63$ et $n=0,5$.

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

$$E_p = N^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n-1}}$$

établie par Neumarker [7].

L'ensemble de ces équations est résumé dans l'organigramme indiqué dans la figure

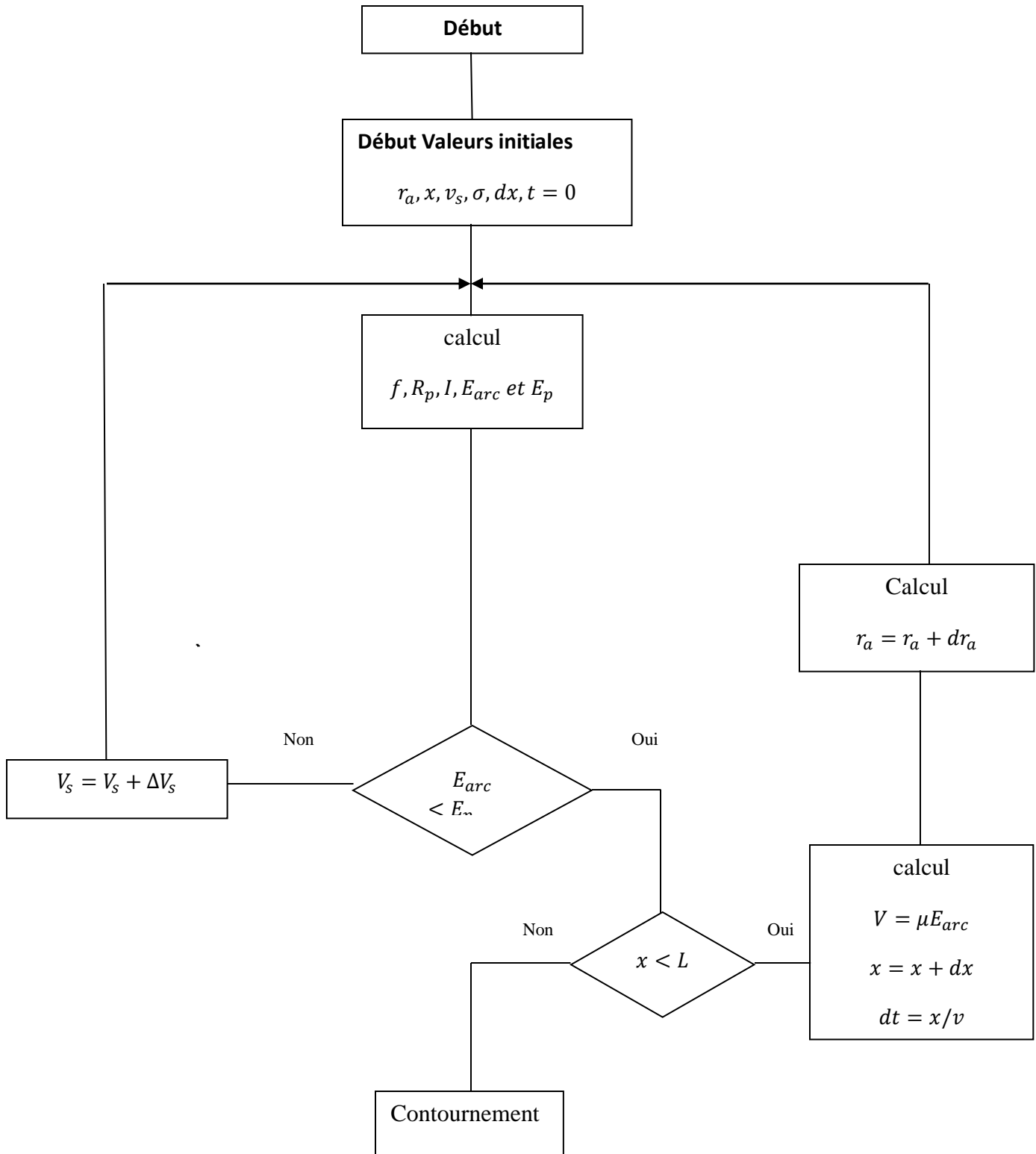


Figure II .7 Organigramme du modèle Sundararajan et Gorur

Pour le cas alternatif, Sundararajan et al [18] utilisent le même modèle mais en y remplaçant le critère de propagation de l'arc par la condition de réallumage établie par Rizk [6].

$$V = 23r_p^{0.4}$$

II.5 Paramètres d'influence

II.5.1 Influence de la polarité

Les modèles classiques de contournement en tension continu, ne font pas la différence entre les polarités. De ce fait, ces modèles n'expliquent pas les résultats expérimentaux de plusieurs chercheurs [19-21], selon lesquels les tensions critiques en polarité négative sont environ 2/3 des tensions critiques en polarité positive.

Wilkins et Al Baghdadi [8] ont remarqué que pour des valeurs de résistances grandes, les tensions négatives donnent des courants critiques légèrement inférieurs à ceux des tensions positives. Ceci peut être expliqué par leur théorie de l'élongation par ionisation. Dans le cas de tension négative, on a un gradient de tension sur la tête de la décharge plus important dû à la charge d'espace, favorisant plus l'ionisation, et donc un courant critique inférieur à celui d'une tension positive appliquée.

Dans une étude plus poussée, Renyu et al [22] ont montré que l'influence de la polarité est liée au profil de l'isolateur. Si l'objet est symétrique, il n'y a aucune différence entre les polarités. Par contre, pour un isolateur simple et lisse, un arc négatif est plus stable qu'un arc positif. Ce dernier peut glisser hors de la surface de l'isolateur ou bien s'éteindre facilement

Pour expliquer les valeurs plus faibles de la tension trouvées en polarité négative, certains auteurs [19-21] ont évoqué le rôle de la « pulvérisation cathodique ». En polarité positive, une pulvérisation de gouttelettes d'eau dans la colonne de la décharge peut avoir lieu et modifier ainsi à la fois les gradients de tension dans celle-ci et l'atmosphère dans laquelle brûle la décharge. En polarité négative, la pulvérisation n'ayant pas lieu, la décharge brûlera dans l'air sec.

II.5.2 Influence des paramètres de la Source

A partir des résultats des simulations et des expériences, Rizk [15] a montré qu'une chute de tension maximale aux électrodes est incapable toute seule d'expliquer l'erreur sur la tension critique due aux paramètres de la source. Il a montré que l'erreur de mesure de la tension critique due aux paramètres tests de la source peut être déterminée par un rapport adimensionnel de deux charges, l'une caractérisant la capacité de sortie de la source, et l'autre l'isolateur test et la sévérité de pollution.

Le taux d'ondulation requis peut être exprimé en terme d'un des rapports adimensionnels de la charge et s'il est adopté, il peut constituer le critère du dimensionnement de la capacité d'entrée de la source contrôlée.

Du point de vue électrique, Pissalto [20] a analysé l'influence de la source et montré que cette dernière joue un rôle important dans la propagation de la décharge

II.5.3. Chute de potentiel

Grâce à des mesures, Wilkins [11] a établi que la somme des chutes de tension à la cathode et à l'anode, pour des arcs établis entre des électrodes électrolytiques, était de 840V.

Un modèle théorique de calcul de la chute de potentiel cathodique a été proposé par Cheng et Nour [23]. Ce modèle établi pour le cas des décharges luminescentes sur certaines surfaces métalliques est basé sur l'équation du Poisson et sur le mécanisme d'avalanche de Townsend. Les résultats numériques obtenus concordent avec les mesures ; ce qui a permis aux auteurs de conclure que la valeur de 800V pour la chute de potentiel est raisonnable

D'après Rizk [6], en dehors des conditions où le niveau de pollution est extrêmement élevé et où des arcs multiples brûlent en série, on peut en principe négliger les chutes de potentiel aux électrodes.

II.5.4. Temps au contournement

On appelle temps au contournement, le temps qui s'écoule entre l'instant d'amorçage de la décharge et l'instant où son pied atteint l'électrode basse tension. Dans le cas d'une tension alternative, ce temps est précédé d'un temps t_0 plus grand qu'une demi-période pendant lequel la décharge s'éteint et se réallume plusieurs fois avant de contourner la surface de l'isolateur. Ce temps t_0 est appelé temps de retard ; il correspond à la durée pendant laquelle le milieu où brûle la décharge, perd ses propriétés isolantes

Dans une étude expérimentale de mesure du champ électrique dans l'arc en fonction du temps, Swift [24] a observé la dépendance du temps au contournement avec la nature de mouillage de l'isolateur.

Ghosh et Chatterjee [25, 26] ont montré que le temps au contournement décroît avec l'augmentation de la tension appliquée et dépend de la nature chimique du polluant. Ils ont trouvé que pour chaque électrolyte, il y a une valeur particulière de la tension appliquée pour laquelle un contournement se produit au bout de 1ms et que toute augmentation de la tension n'a pas d'effet remarquable sur le temps au contournement

Matsuoka et al [27] ont montré également que le temps au contournement dépend de la nature chimique du polluant. Ils ont aussi émis l'hypothèse sans la démontrer qu'il existe une corrélation entre la variation temporelle des caractéristiques de la résistance de pollution et le temps au contournement.

En étudiant l'influence de la tension appliquée sur le temps de contournement d'un canal d'électrolyte en tension continue, Pollentes [28] a observé qu'à résistivité d'électrolyte constante,

les temps de contournement moyens sont d'autant plus élevés que l'on se rapproche de la valeur de la tension critique de contournement. Il a aussi constaté qu'en polarité négative, les temps de contournement sont supérieurs à ceux obtenus en polarité positive, à résistivité égale et à niveau de surtension égal. Ces tendances ont été également observées par Peyrène [21].

II.5.5. Profil de l'isolateur

Pour assurer sa fonction, le profil de l'isolateur doit satisfaire les conditions suivantes :

- une longueur de fuite maximum un nombre optimum de nervures (pour une taille donnée de l'isolateur) qui permet d'avoir une tension de contournement plus élevée.

- une géométrie de l'isolateur permettant le nettoyage naturel de l'isolateur par le vent ou par la pluie.

Des diamètres de l'isolateur différents assurant une contamination non uniforme et donc des tensions de contournement plus élevées.

Pour tenir compte des deux premières conditions, Cheng et Nour [29] ont défini un paramètre ξ qui caractérise l'efficacité de la longueur de fuite. Ils ont démontré que pour le cas d'une symétrie cylindrique, ce paramètre est généralement fonction de la largeur de la rainure w , sa hauteur d et la distance r qui sépare la rainure et l'axe de symétrie de l'isolateur

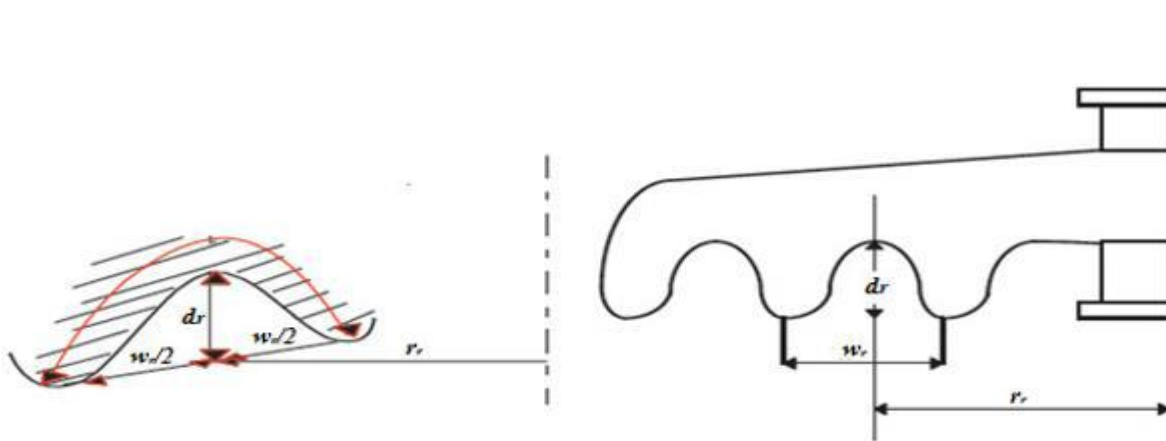


Figure II .8Exemple de profil réel d'un isolateur

A partir de mesures expérimentales,

ils ont déduit une relation empirique de la forme

$$\xi = 1 - \exp\left[\frac{-kw}{d}\right]$$

où k dépend uniquement du niveau de contamination. La longueur de fuite effective sera donc :

$$L_{\text{eff}} = L\xi$$

Pour différentes formes d'isolateurs, Claverie et Porcheron [30] ont donné des courbes de variation de $\frac{r_p}{p}$ en fonction de la longueur de l'isolateur et en ont déduit une fonction $F(x)$ telle que :

$$r_p = \rho F(x)$$

$F(x)$ est appelée fonction de répartition de la couche de pollution.

En pollution artificielle, et en faisant des mesures en alternatif et en continu pour une large variété de forme des isolateurs, Renyu et Zhicheng [24] ont montré que la forme de l'isolateur a plus d'influence sur la performance de l'isolateur en continu qu'en alternatif.

II.5.6. Arcs multiples

Les observations montrent que pendant la propagation de l'arc, d'autres décharges peuvent également brûler. Par conséquent, la source doit fournir plus de courant pour maintenir ces arcs additionnels aux conditions critiques ; la tension doit être aussi plus grande que celle d'un arc singulier

Rizk [15] considère qu'il existe m arcs en série et m_d bandes sèches. Au début, le nombre d'arcs est égal au nombre de bandes sèches et au fur et à mesure que les arcs avancent sur le chemin de fuite, leur nombre se réduit graduellement de telle façon qu'au contournement, il n'y aura qu'un seul arc. Durant le processus de propagation, Rizk suppose qu'en parcourant une distance Δx , le nombre d'arcs se réduit de Δm proportionnellement à m et à Δx ; une fois l'équation différentielle résolue, il a obtenu la relation suivante

$$m = m_d \frac{1-x}{L}$$

Le nombre m_d de bandes sèches est supposé égale à 2 par disque d'isolateur. Le nombre d'arcs en série, rentre dans le calcul de la chute de tension et dans le calcul de la vitesse de propagation [21]. Ce modèle est basé sur celui d'Obenaus. Ainsi, la tension aux bornes de l'isolateur sera :

$$U = V_{\text{arc}} + R_p(x)I + mV_e$$

Où V_e est la chute de tension accumulée à l'anode et à la cathode.

Ce problème a été aussi traité par Cheng et Nour [29] en supposant qu'il existe m décharges simultanées. En partant du modèle d'Obenaus, ils considèrent que le courant qui circule dans la

couche de pollution est la somme des courants dans chaque décharge. La recherche des conditions critiques par rapport au leader (c'est à dire la décharge la plus avancée), les a conduit à des résultats plus proches des mesures que ceux du modèle sans l'hypothèse d'arcs multiples.

Le schéma du modèle multi-arc est donné sur la figure 1.8. L'équation qui décrit le modèle circuit équivalent est dans ce cas [29] :

$$V = NI_m^{-n} + r(L - x_m) \sum_{k=1}^m I_k + V_e$$

Ce modèle est un modèle statique qui conduit, en partant des expressions pour la tension et le courant critiques de Wilkins, aux conditions critiques de contournement, lequel aura lieu si :

$$\frac{dV}{dI_m} = 0 \quad \frac{dV}{dx_m} = 0$$

Pour une décharge de m ramifications, les équations du modèle sont les suivantes

$$\alpha + (\beta + x_m) \gamma \left(\ln \frac{I_m}{\delta} \right)^{-3} = NI_{m-1}^{-n} x_{m-1} + r_p (x_m - x_{m-1}) \sum_{k=1}^{m-1} I_k$$

Les autres branches sont décrites par l'équation suivante

$$NI_{j+1}^{-n} = NI_j^{-n} x_j + r_p (x_{j+1} - x_j) \sum_{k=1}^j I_k$$

Ou

J= 1.2.3.....m-2

II.5.7 Couche de pollution non uniforme

La couche de pollution qui se dépose sur l'isolateur est loin d'être uniforme ; cependant, on ignore la forme ou la nature de cette non linéarité car c'est un phénomène très aléatoire dans la nature. Les travaux effectués antérieurement, montrent que le cas de pollution uniforme semble être plus critique d'où la justification de l'hypothèse d'une pollution uniforme pour simplifier les calculs. Ce problème a été traité par plusieurs chercheurs qui généralement ont attribué des résistivités différentes à chaque zone de l'isolateur

Pour tenir compte de la non uniformité de la couche de pollution dans leur modèle, Sundararajan et Gorur [31] ont partagé le profil de l'isolateur en plusieurs zones et ont attribué un ESDD

(dépôt de densité de sel équivalent) différent pour chaque zone. Ils ont trouvé que la tension de contournement dans ce cas est légèrement supérieure à celle correspondant à une pollution uniforme dont le ESDD est le même sur toute la surface de l'isolateur

En utilisant le même principe, Anjana et al [14] ont abouti aux mêmes conclusions.

A partir des expériences en pollution artificielle, Matsuoka et al [32] ont trouvé que le degré de non uniformité des contaminants est étroitement lié aux caractéristiques de la résistance surfacique et à leur variation en fonction du temps.

II.5.8 Formation de bandes sèches

Le problème de la formation de bandes sèches a été traité par différents chercheurs [33-35]. Gellert et Rasmussen [35] ont modélisé la formation de bandes sèches par éléments finis en considérant la relation entre la formation de la buée, la tension et la distribution de la température dans la couche de pollution. Cette relation peut être décrite par trois équations aux dérivées partielles couplées

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \Delta(D\Delta C) + v - fT$$

pour la distribution de la buée,

$$\Delta(\sigma\Delta V) = 0$$

pour distribution de la tension,

$$C_p\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta(K\Delta T) + (\Delta V)^2\sigma$$

pour la distribution de la température

où

C [g/cm³] est la buée,

D [cm²/s] est le coefficient de diffusion

v [g/cm³ s] est la vitesse de mouillage

f [g/cm³ °C] est la fonction d'évaporation

σ [1/Ωcm] est la conductivité

C_p [J/g°C] est la chaleur spécifique à pression constante

ρ [g/cm³] est la densité, K [Wcm°C] est le coefficient de transfert par conduction t est le temps.

Les équations précédentes ont été établies en considérant que

la pénétration de l'eau d'un élément de volume à un autre se fait par diffusion et l'influence de la gravitation est négligée, le mouillage et l'évaporation ont lieu sur la surface mais sont supposés à travers la couche (acceptable lorsque la couche est fine).

- la tension appliquée et la conductivité déterminent le courant de fuite ;
- aucune accumulation de charge n'est possible ;
- la tension doit être de préférence alternative et la capacité au voisinage est négligée ;

la chaleur développée indique les températures locales dans la couche de pollution ; elle est supposée indépendante de la surface de l'isolateur.

En utilisant en plus des conditions aux limites bien définies, Gellert et Rasmussen [35] ont trouvé une concordance qualitative avec les résultats expérimentaux. Cependant, beaucoup de travail reste à faire pour bien exploiter ce modèle.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité les principaux modèles, en régime dynamique et statique, pour l'étude du phénomène de contournement. Ces modèles présentent une approche électrique et se basent tous sur un critère d'extension.

Les modèles statiques traitent le phénomène de contournement sous un aspect global en lui associant un critère d'extension.

Chapitre III :

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous nous intéresserons à la détermination des répartitions du potentiel et du champ électriques le long des isolateurs. Pour cela, le code de calcul COMSOL Multiphysics, basé sur la méthode des éléments finis, a été utilisé.

Plusieurs paramètres ont été variés à savoir, la conductivité de la couche polluante, et le nombre d'éléments de la chaîne d'isolateurs.

III.2. Description du logiciel

Le logiciel COMSOL Multiphysics 3.5, anciennement appelé FEMLAB, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis.

Développé initialement comme une TOOLBOX de MATLAB, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement.

Sa spécificité est également de permettre de coupler différentes EDP, de manière à décrire des phénomènes Multi physiques.

Il a été retenu pour les raisons suivantes :

- il est spécialisé dans la résolution de problèmes électromagnétiques,
- il permet de prendre en compte la présence de plusieurs diélectriques,
- il permet de modéliser une surface conductrice de faible épaisseur (couche de pollution),
- il permet de travailler en régime statique ou quasi-statique (50 Hz)
- enfin, il permet une modélisation rapide du problème.

III. 3 Validation

La validation est effectuée en comparant la tension de contournement et le courant critique estimés par les différents modèles dynamiques. Pour cela, nous allons considérer la même géométrie de l'isolateur ainsi que les mêmes contraintes auxquelles est soumis cet isolateur, supposées par ces chercheurs. On utilisera le logiciel COMSOL Multiphysics pour la simulation.

III.4. Hypothèses

Pour un arc brûlant dans l'air et la vapeur d'eau à la pression atmosphérique (c'est à dire que le milieu peut être considéré en équilibre thermodynamique local), les pertes par radiation sont faibles et la majorité de la dissipation électrique chauffe le gaz dans son voisinage. En supposant que la puissance linéique P est uniquement dissipée dans l'arc par conduction thermique.

$$P = P_{th} = \frac{dQ}{dt} = E_{arc} I_{arc}$$

Q étant la quantité de chaleur par unité de longueur portée par l'arc. En utilisant les hypothèses appropriées concernant la géométrie du canal de l'arc et du gradient de la température (en supposant que les surfaces isothermiques du canal d'arc sont des hémisphères et que l'équation de propagation de la température est unidimensionnelle), l'équation d'équilibre d'énergie peut être exprimée par.

$$E_{arc} I_{arc} = \pi \lambda_{av} T$$

Où T est la température axiale nécessaire à l'ionisation thermique, et λ_{av} est la conductivité thermique de l'air et de la vapeur d'eau

La conductivité thermique d'un tel mélange de gaz n'est pas facile à calculer. D'après W. Mc Elhannon and E. Mc Laughlin. λ_{av} est déterminée par la relation:

$$\lambda_{av} = \sum_{i=1}^v \frac{\lambda_i}{1 + \frac{A_i(1-v_i)}{v_i}}$$

Où λ_i , v_i et sont respectivement la conductivité thermique, la fraction volumique et le coefficient cinétique du gaz pour chaque constituant du mélange; les indexes a et v sont reliés respectivement à l'air et à la vapeur d'eau donc

$$V_{arc} = \pi T \left[\sum_{i=a}^v \frac{\lambda_i}{1 + \frac{A_i(1-v_i)}{v_i}} \right] \frac{x}{I_{arc}}$$

Cette relation peut être exprimée par

$$V_{arc} = \frac{Nx}{I_{arc}^n}$$

$$\text{Ou } n=1 \quad N = \pi T \left[\sum_{i=a}^v \frac{\lambda_i}{1 + \frac{A_i(1-v_i)}{v_i}} \right]$$

Cette expression obtenue analytiquement rappelle celles (empiriques ou semi-empiriques) rencontrées dans la littérature établies à partir de résultats expérimentaux et utilisées par différents chercheurs pour caractériser la tension d'arc. L'équation du circuit est :

$$U = \frac{NX}{I_{\text{arc}}^n} + Z_p (L - x) I_{\text{arc}}$$

Où z_p est l'impédance de la couche de pollution
Si la couche de pollution est résistive, l'équation s'écrit

$$U = \frac{NX}{I_{\text{arc}}^n} + r_p (L - x) I_{\text{arc}}$$

III.4.1 Courant critique et tension de contournement

En dérivant l'équation la dernière équation par rapport à x , on obtient le courant critique I_c

$$I_c = \left(\frac{N}{r_p}\right)^{\frac{1}{n+1}}$$

De même, en dérivant cette expression par rapport à I_{arc} , on obtient

$$\frac{x_c}{L} = \left[1 + \frac{Nn}{r_p I_{\text{arc}}^{n+1}}\right]^{-1}$$

on obtient la longueur d'arc critique X_c par les dernier équations

$$x_c = \frac{L}{n+1}$$

La tension critique de contournement sera donc

$$U_c = N^{\frac{1}{n+1}} * r_p^{\frac{n}{n+1}} * L$$

III.5 Comparaison des modèles

Dans cette partie, nous allons considérer les modèles rapportés dans la littérature, en particulier Obenaus , Wilkins , Jolly , Woodson , et Hampton

Pour tenir compte de la nature du milieu où brûle la décharge, ces auteurs ont considéré des valeurs différentes pour les constantes N et n définissant la caractéristique statique de l'arc. Ces valeurs sont données dans le tableau III.1.

Auteurs	N	n
Obenaus	100	0,7
Wilkins	63	0.76
Jolly	80	0.62
Woodson	200	0.8
Hampton	530	0.24

Tableau III.1. Les valeurs des constants N et n pour les cinq modèles

III.5.1 Courant de contournement

Courant de contournement modèle d'Obenaus

rp (kΩ/cm)	1	2	4	6	8	10	12	14
ic (A)	0,2580	0,1716	0,1141	0,0899	0,0759	0,0666	0,0598	0,0546

Tableau III.2 Les valeurs de courant de contournement modèles Obenaus

Courant de contournement modèle de Woodson

rp(kΩ/cm)	1	2	4	6	8	10	12	14
ic (A)	0,4089	0,2782	0,1893	0,1511	0,1288	0,1137	0,1028	0,0943

Tableau III.3 Les valeurs de courant de contournement de modèle Woodson

Courant de contournement modèle de Wilkins

rp(kΩ/cm)	1	2	4	6	8	10	12	14
ic ((A)	0,2078	0,1402	0,0945	0,0751	0,0637	0,0561	0,0506	0,0464

Tableau III.4 Les valeurs de courant de contournement de modèle Wilkins

Courant de contournement modèle de Jolly

rp(kΩ/cm)	1	2	4	6	8	10	12	14
ic (A)	0,2103	0,1371	0,0893	0,0695	0,0582	0,0507	0,0453	0,0412

Tableau III.5 Les valeurs de courant de contournement de modèle Jolly

Courant de contournement modèle de Hampton

rp(kΩ/cm)	1	2	4	6	8	10	12	14
ic (A)	0,5992	0,3426	0,1959	0,1412	0,1120	0,0935	0,0807	0,0713

Tableau III.6 Les valeurs de courant de contournement de modèle Hampton

Et on trace la courbe du courant de contournement par editor de MATLAB , voici le programme :

```
clear all;
clc;
```

```
rp = xlsread('Ic.xlsx','A2:A9');
obaneaus = xlsread('Ic.xlsx','B2:B9');
woodson = xlsread('Ic.xlsx','C2:C9');
wilkins = xlsread('Ic.xlsx','D2:D9');
jolly = xlsread('Ic.xlsx','E2:E9');
hampton = xlsread('Ic.xlsx','F2:F9');
```

```
plot(rp,obaneaus, rp,woodson, rp,wilkins, rp,jolly, rp,hampton);
```

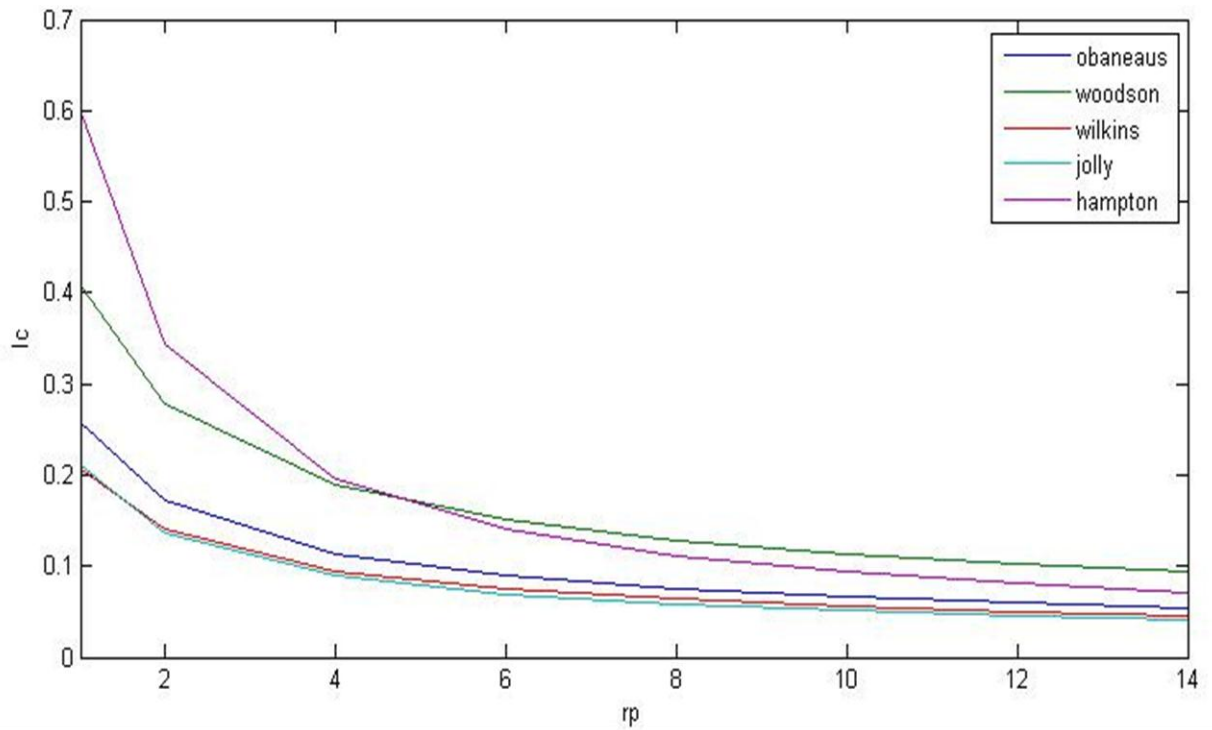


Figure III.1 Variation de courant de contournement en fonction de résistance linéique

En comparant les caractéristiques $I_c=f(r_p)$ des données obtenues par ces différents modèles empiriques, nous remarquons une bonne concordance, de plus ce. En effet, pour les résistances linéiques allant jusqu'à 14 kΩ/cm, la caractéristique donnée par le modèle d'Obenaus se trouve entre celles issues de modèles empiriques. Elle apparaît comme une courbe moyenne par rapport à celles rapportées par des autres modèles.

III.5.2 Tension de contournement

Tension de contournement modèle d'Obenaus

rp (kΩ/cm)	1	2	4	6	8	10	12	14
Uc(v)	9678,23	12875,07	17127,86	20240,03	22785,39	24978,17	26925,56	28690,03

Tableau III.7. Les valeurs de Tension de contournement modèle Obenaus

Tension de contournement modèle de Woodson

rp(kΩ/cm)	1	2	4	6	8	10	12	14
Uc (v)	15336,10	20869,20	28398,59	34006,32	38644,52	42673,58	46275,46	49556,98

Tableau III.8. Les valeurs de Tension de contournement modèle Woodson

Tension de contournement modèle de Wilkins

rp(kΩ/cm)	1	2	4	6	8	10	12	14
Uc (v)	7795,40	10515,47	14184,66	16898,89	19134,15	21069,61	22795,47	24364,49

Tableau III.9. Les valeurs de Tension de contournement modèle Wilkins

Tension de contournement modèle Jolly

rp (kΩ/cm)	1	2	4	6	8	10	12	14
Uc(v)	7887,26	10283,37	13407,39	15658,04	17480,48	19038,92	20414,86	21655,49

Tableau III.10. Les valeurs de Tension de contournement modèle Jolly

Tension de contournement modèle Hampton

rp (kΩ/cm)	1	2	4	6	8	10	12	14
Uc (v)	22473,6	25700,23	29390,08	31789,45	33609,71	35093,08	36353,56	37454,53

Tableau III.11. Les valeurs de Tension de contournement modèle Hampton

Et on trace la courbe de la tension de contournement par editor MATLAB, voici le programme

```
clear all ;
clc ;
```

```
rp = xlsread('Uc.xlsx','A2 :A9') ;
obaneaus = xlsread('Uc.xlsx','B2 :B9') ;
woodson = xlsread('Uc.xlsx','C2 :C9') ;
wilkins = xlsread('Uc.xlsx','D2 :D9') ;
jolly = xlsread('Uc.xlsx','E2 :E9') ;
hampton = xlsread('Uc.xlsx','F2 :F9') ;
```

```
plot(rp,obaneaus, rp,woodson, rp,wilkins, rp,jolly, rp,hampton)
```

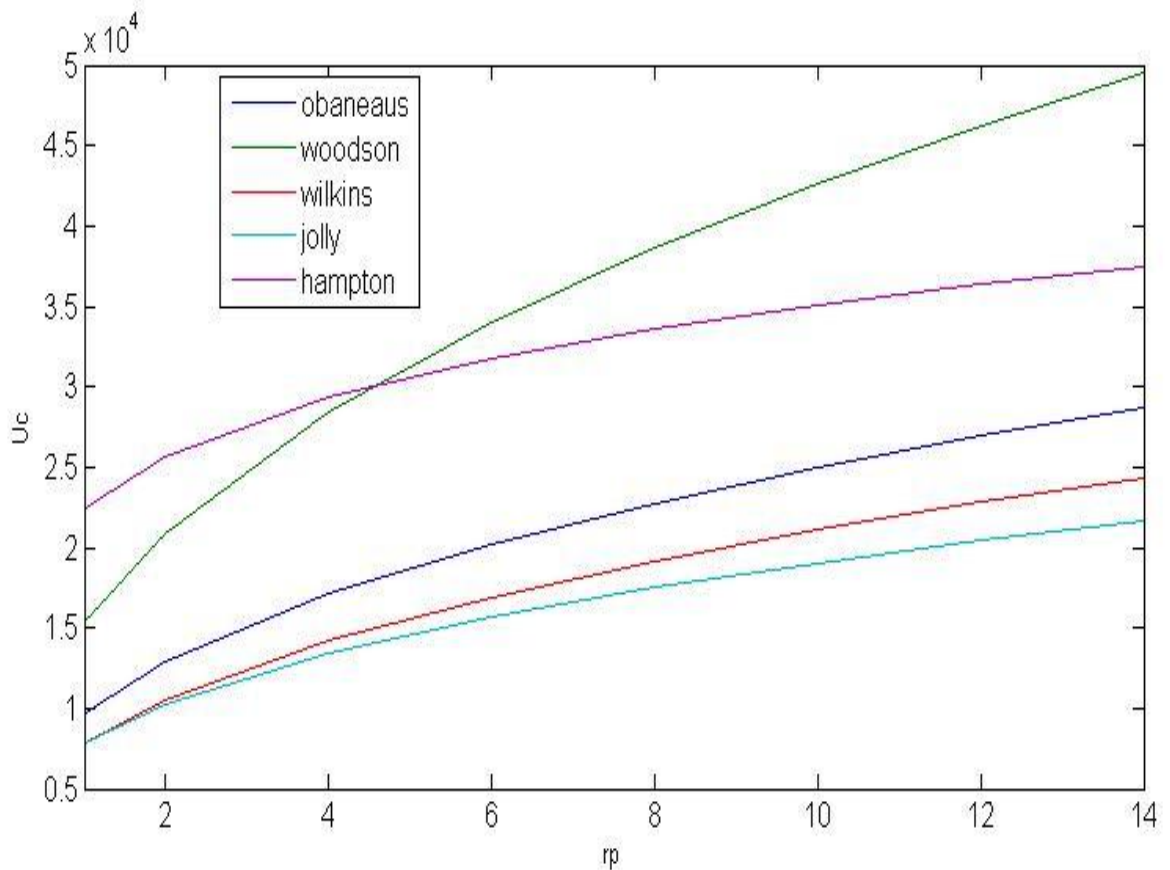


Figure III .2 Variation de la tension de contournement en fonction de résistance linéique

En traçant la tension critique de contournement (U_c) en fonction de r_p (figure III.2), nous remarquons aussi un bon accord entre les caractéristiques données par les modèles. La courbe qui correspond au modèle d'Obenaus se trouve au milieu des autres obtenues par les autres chercheurs.

Par conséquent le modèle d'Obenaus constitue un bon modèle permettant la prédiction de la tension critique de contournement ainsi que du courant critique.

III.6.Application

La dynamique de l'arc électrique est décrite en tenant compte des évolutions temporelle (dans le temps) et l'évolution spatiale (suivant la longueur d'arc), des différents paramètres régissant le comportement d'un isolateur pollué, sur lequel une décharge se développe jusqu'à provoquer le contournement total.

III.7. Simulation du modèle réel par COMSOL

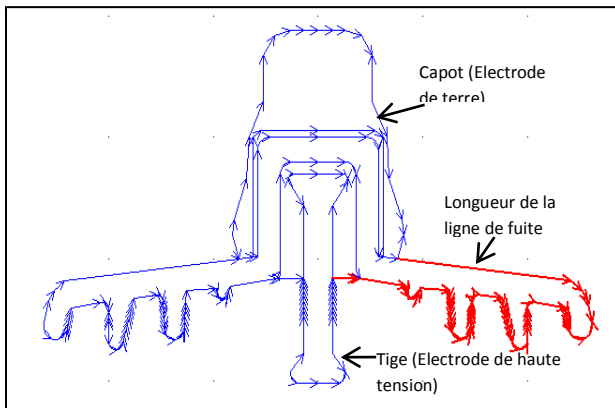


Figure III.3 Représentation du modèle réel sur le logiciel COMSOL pour un élément

Modèle propre

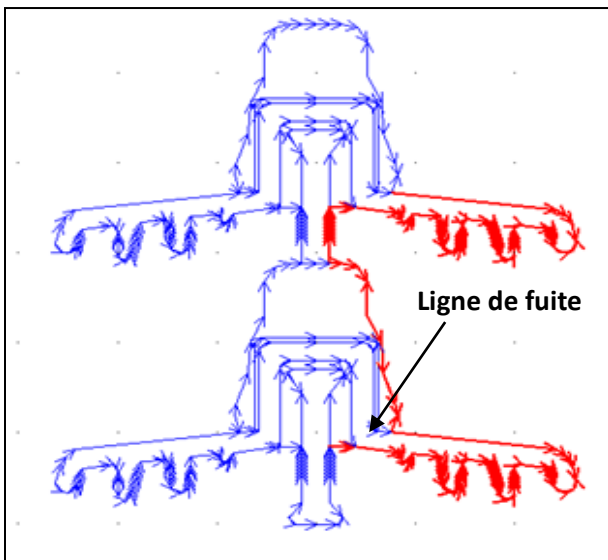


Figure III.4 Représentation du modèle réel sur le logiciel COMSOL pour deux éléments

Modèle propre

III.8 Maillages

La figure III.5 présente le maillage d'un isolateur réel.

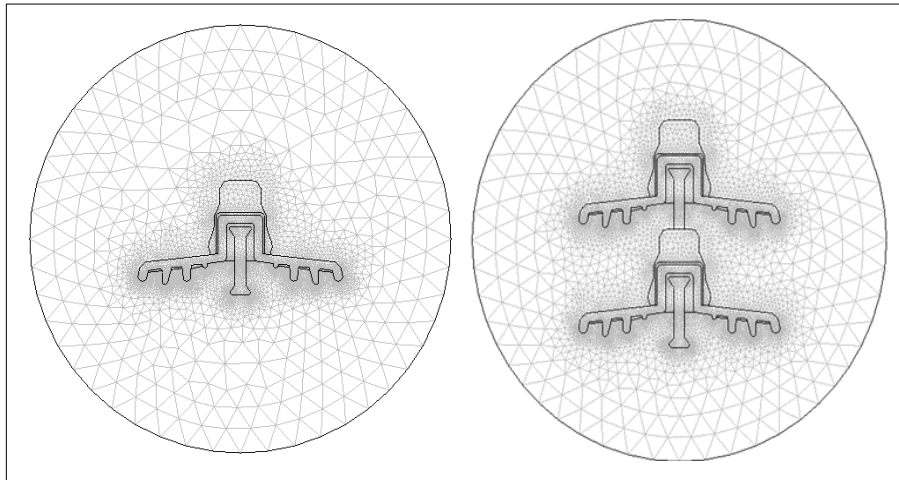


Figure.III.5 Maillage de l'isolateur réel.

III.9 Analyse des résultats de simulation

III.9.1 Etude du potentiel

La figure III.6 présente la distribution du potentiel électrique d'un isolateur pour un élément et deux éléments en fonction de la conductivité.

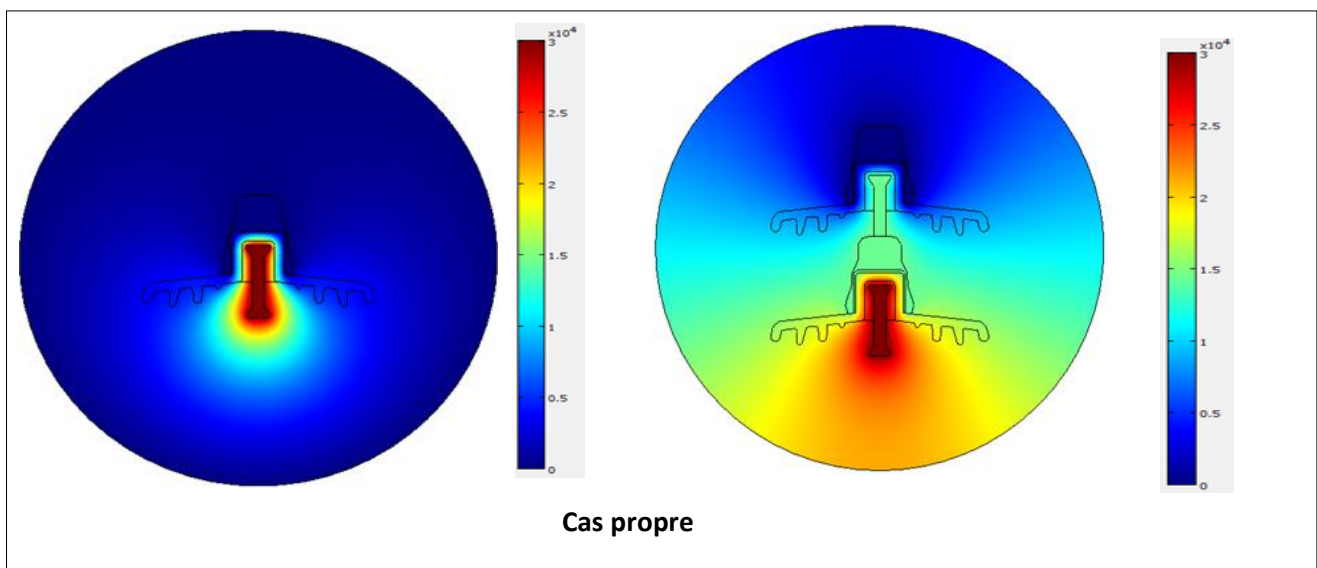


Figure III.6. Distribution du potentiel d'un isolateur pour un élément en fonction de la conductivité

III.9.2. Influence du nombre d'éléments

La figure III.7 montre le potentiel le long de la ligne de fuite de la chaîne d'un, ou deux isolateurs, pour un niveau de tension constant (20 kV). Nous constatons que la tension au niveau des parties métalliques est fixe, tandis qu'elle chute brusquement au contact des parties isolantes (verre et ciment). Cela est nettement visible dans le cas d'un seul élément. Mêmes résultats ont été trouvés par d'autres chercheurs. [37-39].

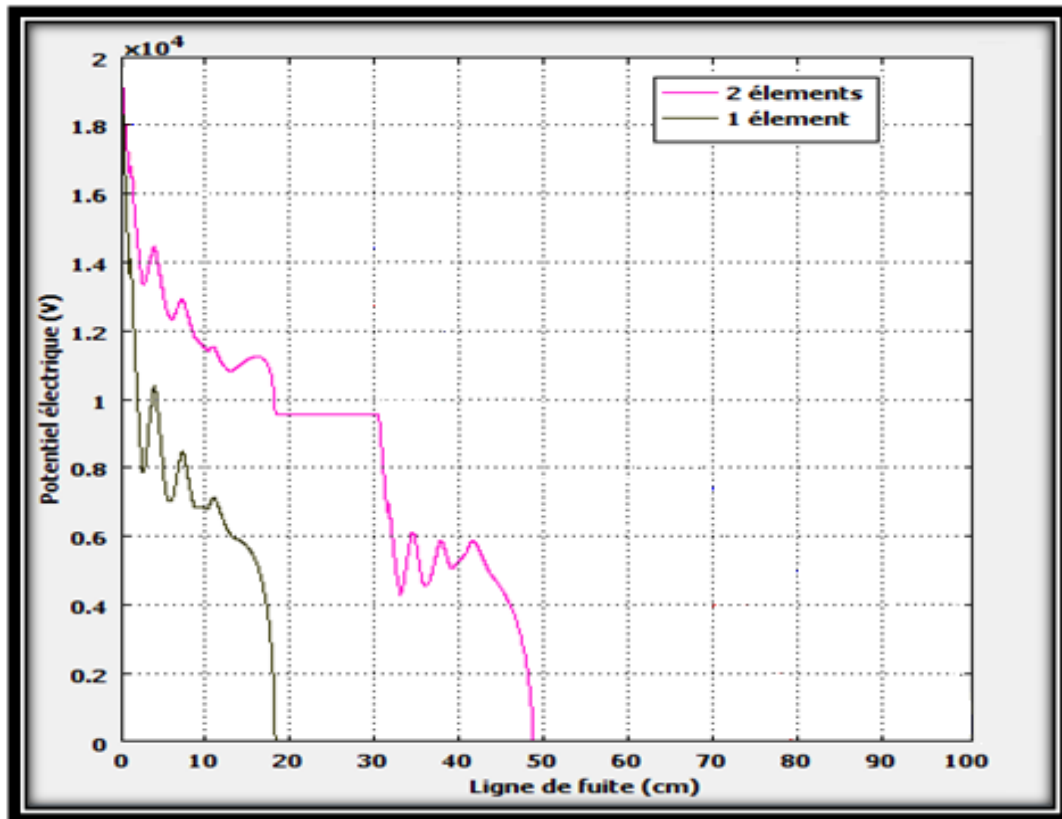


Figure III.7 Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne

III.10 Distribution du champ électrique

Les figures III.8 et III.9 représentent la distribution du champ électrique d'un isolateur ou un élément et deux éléments respectivement en fonction de la conductivité.

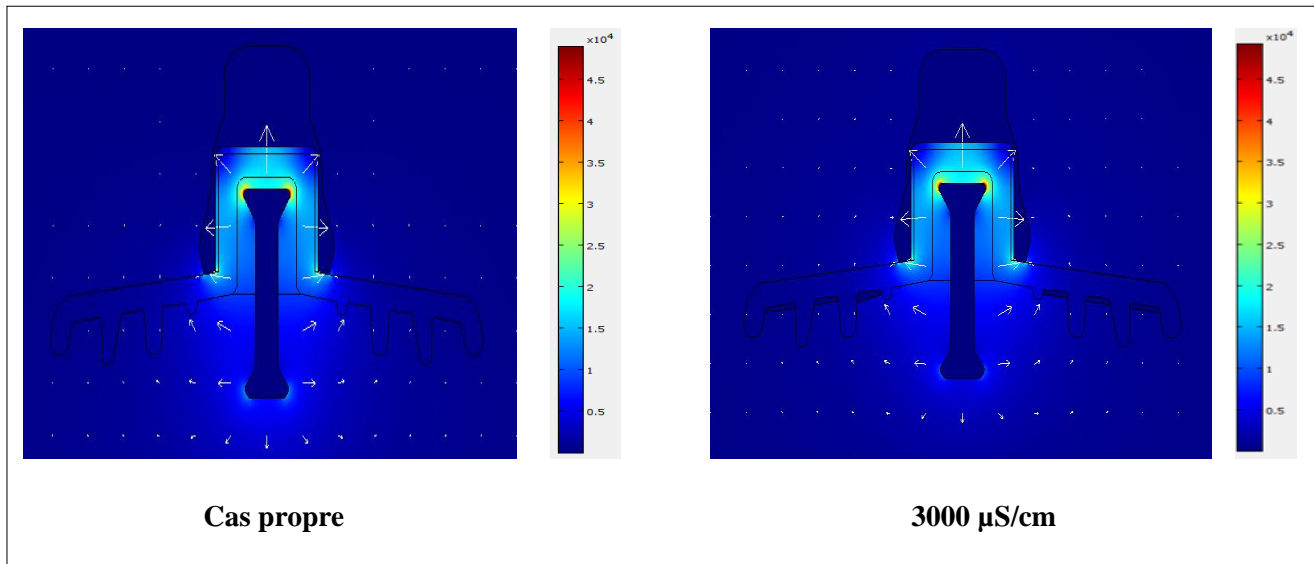


Figure III.8 Distribution du champ électrique d'un isolateur pour un élément en fonction de la conductivité

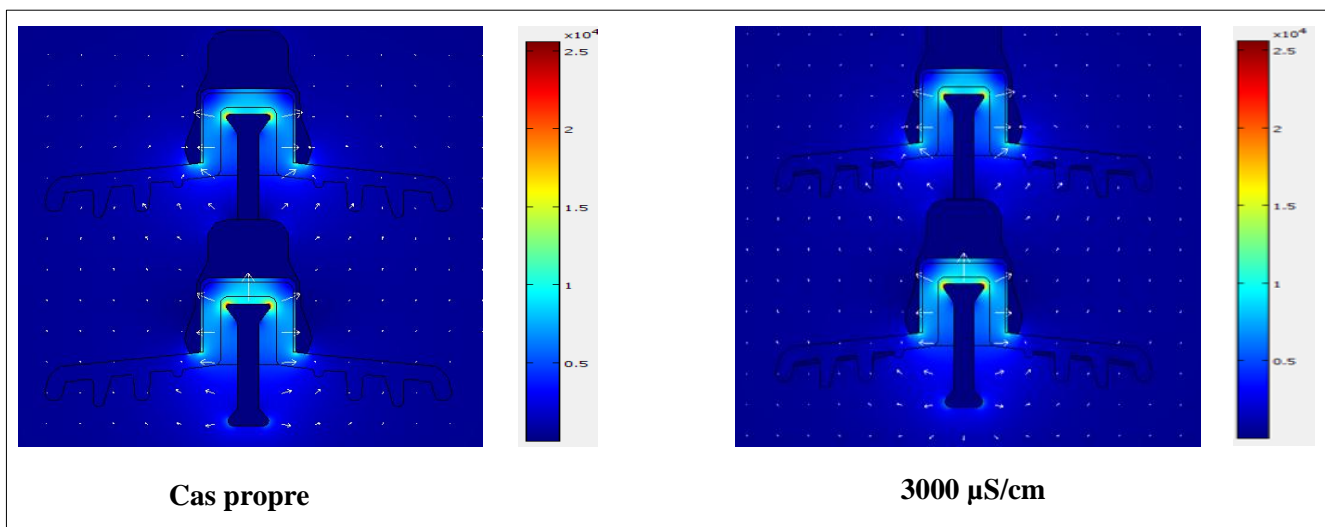


Figure III.9 Distribution du champ électrique d'un isolateur pour deux éléments en fonction de la conductivité

III.10.1. Influence de la conductivité

Pour une tension de service (30 kV), la figure III.10 montre la variation de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne. A l'exception du capot relié à la terre, où l'intensité du champ électrique est très élevée notamment lorsque la chaîne est polluée, le champ électrique n'est pratiquement pas affecté par l'état de surface (polluée ou propre) de l'isolateur. En outre, la figure III.8 montre que la conductivité n'a pratiquement aucune incidence sur la distribution du champ électrique.

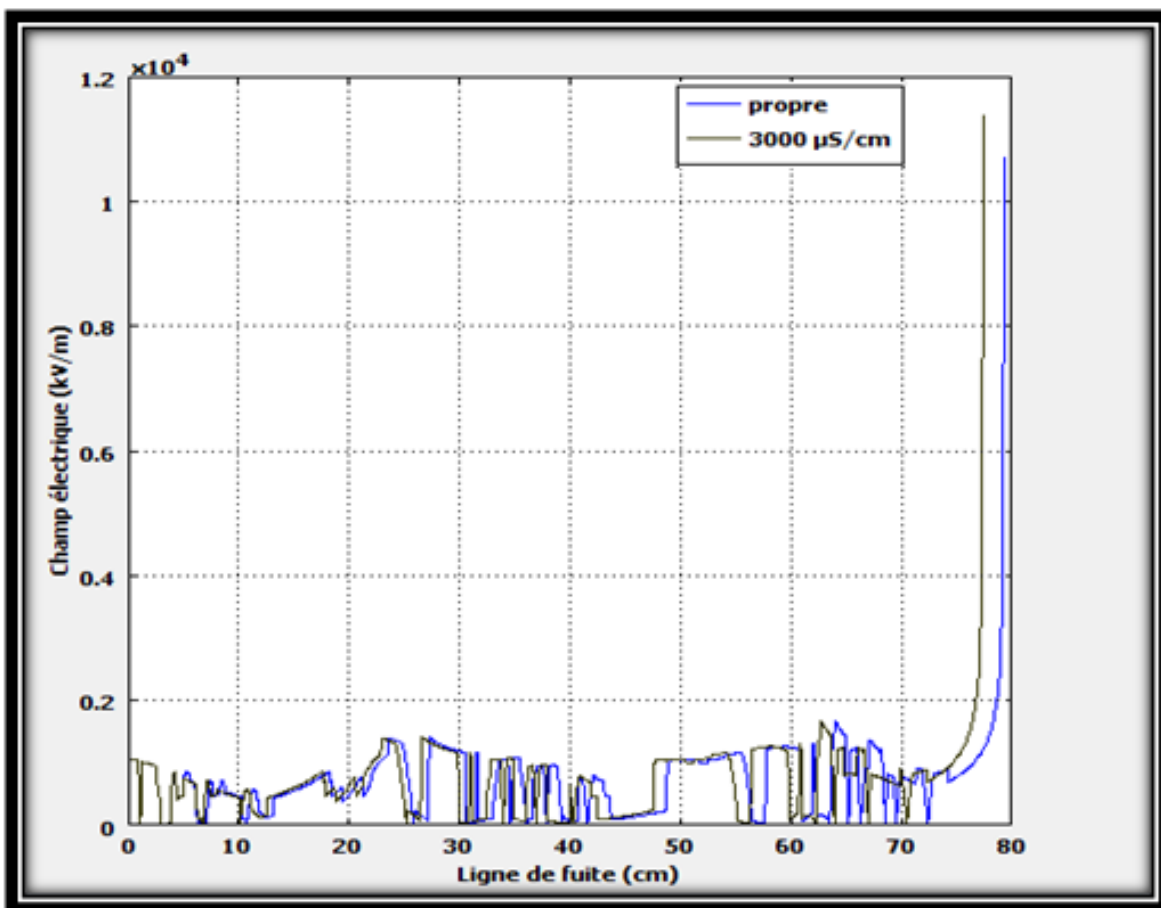


Figure III.10 Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs

III.11. Conclusion

Dans le dernier chapitre nous avons fait, dans la première partie, une étude comparative du courant et de la tension du contournement pour les différents modèles. Nous avons constaté que le modèle d'Obenaus est le meilleur par rapport aux autres, vu qu'il donne des résultats qui se trouvent en milieu (la moyenne) pour les deux paramètres étudiés : le courant et la tension de contournement en fonction de la résistance linéique.

Dans la deuxième partie, nous avons fait une simulation par le logiciel COMSOL Multiphysics, basé sur la méthode des éléments finis, nous avons pu analyser les distributions du potentiel et du champ électriques le long d'une chaîne d'isolateurs, soumise à différents paramètres électro-géométriques, à savoir la conductivité de la couche polluante, et le nombre d'isolateurs. Comme principaux résultats, nous pouvons dire que la conductivité de la couche polluante n'a pratiquement pas d'effet sur les répartitions du potentiel et du champ électriques. Par contre le nombre d'éléments et l'état de surface de l'isolateur influe sur la répartition du champ électrique. Ce dernier est plus élevé dans le cas où la chaîne est polluée.

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons étudié la modélisation de la propagation de l'arc électrique sur une surface isolante. Dans le premier chapitre, nous avons donné les généralités sur les isolateurs et le phénomène de contournement. Le deuxième chapitre a fait l'objet des différents modèles du contournement en régimes statique et dynamique.

Dans le dernier chapitre nous avons fait, dans la première partie, une étude comparative du courant et de la tension du contournement pour les différents modèles. Nous avons constaté que le modèle d'Obenaus est le meilleur par rapport aux autres, vu qu'il donne des résultats qui se trouvent en milieu (la moyenne) pour les deux paramètres étudiés : le courant et la tension de contournement en fonction de la résistance linéique.

Dans la deuxième partie, nous avons fait une simulation par le logiciel COMSOL Multiphysics, basé sur la méthode des éléments finis, nous avons pu analyser les distributions du potentiel et du champ électriques le long d'une chaîne d'isolateurs, soumise à différents paramètres électro-géométriques, à savoir la conductivité de la couche polluante, la tension de la ligne, le nombre d'isolateurs. Comme principaux résultats, nous pouvons dire que la conductivité de la couche polluante n'a pratiquement pas d'effet sur les répartitions du potentiel et du champ électriques. Par contre l'état de surface et le nombre d'éléments de l'isolateur influent sur la répartition du champ électrique. Ce dernier est plus élevé dans le cas où la chaîne est polluée.

ملخص

العمل المقدم في هذه الأطروحة هو نمذجة انتشار القوس الكهربائي على سطح عازل. تم إجراء هذه النمذجة لأول مرة باستخدام معايير التحايل المختلفة الموجودة في الأدبيات. بعد ذلك ، قمنا بمحاكاة باستعمال برنامج COMSOL Multiphysics نمذجة عازل حقيقي. أظهرت نتائج المحاكاة أن موصلية الطبقة الملوثة ليس لها أي تأثير تقريباً على توزيعات الجهد الكهربائي والمجال. من ناحية أخرى ، تؤثر حالة سطح العازل على توزيع المجال الكهربائي. هذا الأخير أعلى إذا كانت السلسلة ملوثة.

الكلمات المفتاحية: النمذجة ، الجهد الكهربائي ، الحقل الكهربائي ، العازل ، التلوث

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire est la modélisation de la propagation de l'arc électrique sur une surface isolante. Cette modélisation a été faite dans un premier temps avec les différents critères de contournement trouvés dans la littérature. Ensuite, nous avons fait une simulation sous l'environnement COMSOL Multiphysics pour une modélisation d'un isolateur réel. Les résultats de simulation montrent que la conductivité de la couche polluante n'a pratiquement pas d'effet sur les répartitions du potentiel et du champ électriques. Par contre l'état de surface de l'isolateur influe sur la répartition du champ électrique. Ce dernier est plus élevé dans le cas où la chaîne est polluée.

Mots clés : Modélisation, potentiel électrique, champ électrique, isolateur, pollution.

Abstract

The work presented in this paper is the modeling of the propagation of the electric arc on an insulating surface. This modeling was first done with the various circumvention criteria found in the literature. Then, we did a simulation under the COMSOL Multiphysics environment for a modeling of a real isolator. The simulation results show that the conductivity of the polluting layer has almost no effect on the distributions of the electric potential and field. On the other hand, the surface condition of the insulator influences the distribution of the electric field. The latter is higher if the chain is polluted.

Keywords: Modeling, electric potential, electric field, insulator, pollution

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] E. Nasser, "Contamination Flashover of Outdoor Insulation", ETZ-A, Vol. 93, pp. 321-325, 1972.
- [2], J. Y. Saison, "Etude du Phénomène d'Humidification de Dépôts Naturels et Artificiels de Pollution sur des Isolateurs Electriques", Thèse de Doctorat de l'Université de Strasbourg, 1992.
- [3] S. Flazi, "Etude du Contournement Electrique des Isolateurs Haute Tension Pollués Critère d'Elongation de la Décharge et Dynamique du Phénomène", Doctorat d'Etat-Sciences de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1987
- [4] F. W. Crawford and H. Edels, "The Reignition Voltage Characteristics of Freely Recovering", Proc. IEE, Vol. 107, pp. 202-212, April, 1960
- [5] H. Edels, "Arc Interruption and Thermal Reignition", Proc. IEE, Vol. 109, pp. 89-98, Feb., 19627
- [6] F. Rizk, "Mathematical Models for Pollution Flashover", Electra, Vol. 78, pp. 71-103, 1981.
- [7] H. Boeme and F. Obenaus, "Pollution Flashover Tests on Insulators in Laboratory and in Systems and Model Concept of Creepage Path Flashover", Cigre, 1485.11, paper N° 406, June 1966
- [8] R. Wilkins and A. A. J. Al-Baghdadi, "Arc Propagation Along an Electrolyte Surface", Proc IEE, Vol. 118, N°. 12, pp. 1886-1894, December 1971.
- [9] A. M. Rahal and C. Huraux "Flashover Mechanism of High Voltage Insulators", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. Pas-98, N°. 6, pp. 2223-2230, 1979.
- [10] B.F Hampton, "Flashover Mechanism of Polluted Insulation", PIEEE, Vol. 111, pp. 985-990, 1964.
- [11] R. Wilkins, "Flashover Voltage of HV, Insulators with Uniform Surface Pollution Films", PIEEE, Vol. 116, pp. 54-64, 1969.
- [12] S. Hesketh, "General Criterion for the Prediction of Pollution Flashover", Proc IEE, Vo. 114, N° 4, pp.531-532, April 1967.
- [13] P. S. Gohsh, 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 Insul, Vol. 2, N° 6, pp. 1064-1074, 1995.
- [14] 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, 1989.
- [15] F. A. M. Rizk and D. H. Nguyen, "Digital Simulation of Source Insulator Interaction in V V D C Pollution Tests", IEEE Trans. on Power Delivery, pp. 405-410, 1988

- [16] O. Mayer, "Beitrag zur Theorie der Statischen und der Dynamishchen Litchbogens", Arch. f. Elektrotechnik, Vol 37, pp. 588-608, 1943.
- [17] F. A. M. Rizk, "Application of Dimensional Analysis to Flashover Characteristics of polluted Insulators", Proc. IEE, Vol. 117, pp. 2257-2260, 1970.
- [18] R. Sundararajan and R.S Gorur, "Computer Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Condition", IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul, Vol. 2, N° 1, pp. 121-127, February 1995.
- [19] E.H.A.M. Rahal, "Sur les Mécanismes Physiques du Contournement des Isolateurs Haute Tension", Thèse Sciences Physiques, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1979.
- [20] José Pissalto Filho, "Analyse du Contournement d'une Surface Faiblement Conductrice pr une Décharge Electrique Alimentée en Courant Continu", Thèse Sciences de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 1986.
- [21] G. Pyrène and A. M. Rahal, C. Huraux, "Flashover of a Liquid Conducting Film
- [22] Z. Renyu and G. Zhicheng, "A Study on the Difference between the Flashover Voltages of Contaminated Insulators under AC an DC Voltage", IEEE Trans., pp. 332-334, 1985
- [23] T.C. Chen, H.I.M. Nour and C.Y.Wu, "DC Interfacial Breakdown on Contaminated Electrolytic Surfaces", IEEE Trans.on Elect. Insul., Vol. 19, N° 6, pp. 536-542, December 1984.
- [24] D.A. Swift, "Flashover of polluted Insulators: Electric Field in the Arc", 6th International Symposium of H.V. Engineering, New Orleans, paper N°30.10, Sep 1989.
- [25] P. S. Ghosh, S. Chakravorti and N. Chatterjee, "Estimation of Time to Flashover Characteristics of Contaminated Electrolytic Surfaces Using a Neural Network", IEEE Trans. on Diel and Elect. Insul., Vol. 2, N°. 6, pp. 1064-1076, December 1995.
- [26] P. S. Ghosh and N. Chatterjee, "Polluted Insulator Flashover Model for AC Voltage", IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul., vol. 2, N°. 1, pp. 128-136, February 1995.
- [27] R. Matsuoka, K. Kondo, K. Naito and M. Ishii, "Influence of Non Soluble Contaminants on the Flashover Voltage of Artificially Contaminated Insulators", IEEE, Trans. on Power Delivery, Vol. 11, N°. 1, January, 1996
- [28] Michel Pollentes, "Sur l'utilisation de Modèles de Laboratoire pour l'Etude de la Tenue au Contournement des Isolateurs Pollués", Thèse de l'Université Paul Sabatier Toulouse, 1996.
- [29] T.C. Chen and H.I.M. Nour, "A Study on the Profile of HVDC Insulators", IEEE Trans.on Elect. Insul., Vol. 24, N° 1, pp. 113-117, February 1989

- [30] P. Claverie and Y. Porcheron, "How to Choose Insulators for Polluted Areas", IEEE Trans. PAS, Vol. 92, N° 3, pp. 1121-1131, 1973.
- [31] R. Sundararajan and R.S. Gorur, "Dynamic Arc Modelling of Pollution Flashover of Insulators under dc Voltage", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 28 N° 2, pp. 209-219, April 1993.
- [32] R. Matsuoka, H. Shinokuba, K. Kondo, Y. Mizuno, K. Naito, T. Fujimura and T. Terada, "Assessment of Basic Contamination Withstand Voltage Characteristics of Polymer Insulators", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, N°. 4, pp. 1895-1900, October 1996.
- [33] O. E. Gouda and A. El-Mershed, "Factors Affecting the Dry Band Formation on Energized Polluted Insulators", 5th International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, paper. 52.08, 1987
- [34] S. Gopal and Y. N. Rao, "Initiation and Growth of Dry band on Polluted Insulator Surfaces", 5th International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, paper. 5207, 1987.
- [35] L.L Alston, S.Zoledziowski, "Growth of discharge on polluted insulation "; Proc.IEE, pp.1260
1266, 1963.
- [36] R.Wilkins, "Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface pollution films"
Proc IEE.Vol 116 n°3- pp.457-465 March 1969.
- [37] **H Benguesmia**, N M'ziou, A Boubakeur « Simulation of the potential and electric field distribution on high voltage insulator using the finite element method », Diagnostyka, Vol 19, 2018.
- [38] **K Belhouchet**, A Bayadi, ME Bendib « Artificial neural networks (ANN) and genetic algorithm modeling and identification of arc parameter in insulators flashover voltage and leakage current », 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp 1-6
- [39] **Hani Benguesmia**, Nassima M'ziou, AM Chouchou, L Rachdi « Experimental Study of the various pollution and simulation of potential and electric field distribution using FEMM at a high voltage insulator under alternative current » International Symposium on Computational and Experimental Investigations of Fluid and Structure Dynamics,(CEFSD2015-94), pp 16-18, 2015, Hammamet, Tunisia.