الجمهورية الجزائرية الديمقر اطية الشعبية

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



## **THESE**

Présentée au Département d'Electrotechnique Pour l'obtention du diplôme de

## **DOCTORAT EN SCIENCES**

**Option: Réseaux Electriques** 

Par

Mr OUCHEN Lyamine

## **THEME**

# Contribution à l'étude et à l'analyse du comportement des isolateurs des lignes de transmission sous contraintes de tension

Soutenu le: ..../2020 devant un Jury composé de:

Dr. Ahmed GHERBI	Prof. à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1	Président
Dr. Abdelhafid BAYADI	Prof. à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1	Directeur de Thèse
Dr. Rabah BOUDISSA	Prof. à l'Université A. Mira de Bejaia	Co- Directeur de thèse
Dr. Hocine MOULAI	Prof à l'Université des Sciences et Technologies-USTHB, Alger	Examinateur
Dr. Leila MOKHNACHE	Prof. à l'Université Mustapha Benboulaid Batna 2	Examinateur
Dr. Hamou NOURI	Prof. à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1	Examinateur

## **DECLARATIONS**

# 

Signé ......(OUCHEN Lyamine)

en annexe.

# LISTE DES TRAVAUX

## **Publications Internationals**

1.L. Ouchen, A. Bayadi, and R. Boudissa, "Dynamic model to predict the characteristics of the electric arc around a polluted insulator," *IET Sci.Meas.Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 83–90, 2020.

## **Journées des Doctorants**

- 1. Ouchen. Z, Bayadi. A, 'Participation au Journées des Doctorants' Université Sétif, Avril 2012.
- 2. Ouchen. Z, Bayadi. A, 'Participation au Journées des Doctorants' Université Sétif, Avril 2013.

#### ملخص:

العازل عبارة عن جهاز مصنوع من مادة عازلة صلبة ، قادر على تحمل الضغط الكهربائي. يتميز بمقاومة عالية عند مرور التيار الكهربائي. دورها هو فصل كائنين موصلين ، يخضعان لإمكانيات مختلفة. في شبكات نقل الطاقة ، يتم توفير عزل عن طريق سلسلة من العوازل. تتميز كل سلسلة بشكل رئيسي بطول التسرب. هذا الطول يعتمد على مستوى الجهد التشغيل. تم تنفيذ هذه الرسالة من أجل تحليل خصائص القوس الكهربائي حول عازل ملوث. من خلال حساب التوزيع المحتمل والمجال الكهربائي ، سيساعد ذلك في تحسين تصميم العوازل ، خاصةً في المناطق الملوثة.

Obenaus يهدف الجزء الأول من هذا العمل إلى تقديم نموذج ديناميكي لانتشار القوس على أساس صياغة نموذج ومعيار Hampton لنشر التفريغ. أُجريت تجربة على عازل زجاجي عملي مثبت في الشبكة الجزائرية ، لقياس جهد الالتفافية وتقدير معلمات القوس (n و n) باستخدام الخوار زميات الجينية ( $\alpha$ ). المعلمات المستخدمة في النموذج الديناميكي لتقييم تيار القوس وطول القوس ومقاومة القوس. بالإضافة إلى ذلك ، جرت محاولة مع COMSOL لحساب مجال الجهد والكهرباء على سطح العازل مع وجود الملوثات وبدونها.

يتعلق الجزء الثاني من الأطروحة بالنموذج الرقمي الذي يسمح بتوزيع الإمكانات والمجال الكهربائي في سلسلة من العوازل الزجاجية المستخدمة في الشبكات الكهربائية الجزائرية. تم تطوير دائرة مكافئة أولية مكونة من شبكة موازية. تم تحديد معالمها بناءً على طريقة العناصر المحددة. قمنا بتنفيذ هذه الدائرة المكافئة في برنامج ATP / EMTP من أجل محاكاة التيارات التسرب، وتم الحصول على نتائج مرضية.

**كلمات مفتاحيه** عازل ، نموذج ديناميكي ، عناصر محدودة ، مجال كهربائي ، تجاوز ، خوارزمية وراثية ، تيار التسرب ، قوس كهربائي.

## Résumé

L'isolateur est un dispositif constitué spécialement d'un matériau isolant solide, capable de résister à la contrainte électrique. Il est caractérisé par une grande impédance au passage du courant électrique. Son rôle est de séparer deux corps conducteurs, soumis à deux potentiels différents. Dans les réseaux de transport d'énergie électrique, l'isolement pylône-conducteur est assuré par une chaîne d'isolateurs. Chaque chaîne est caractérisée principalement par sa longueur de fuite. Cette longueur est dépendante du niveau de tension de service. Cette thèse a été réalisée dans le but d'analyser les caractéristiques de l'arc électrique autour d'un Isolateur pollué. En calculant la distribution du potentiel et le champ électrique, cela contribuera à améliorer la conception des isolateurs, en particulier pour les zones contaminées.

La première partie de ce travail vise à présenter un modèle dynamique de propagation de l'arc basé sur la formulation du modèle d'Obenaus et le critère de Hampton pour la propagation de la décharge. Une expérimentation a été menée sur un isolateur en verre pratique installé sur le réseau algérien, pour mesurer la tension de contournement et estimer les paramètres de l'arc (A et n) en utilisant les algorithmes génétiques (GA).

Les paramètres ont été utilisés dans le modèle dynamique pour évaluer le courant d'arc, la longueur d'arc et la résistance à l'arc. De plus, une tentative a été faite avec COMSOL pour calculer la tension et champ électrique sur la surface de l'isolateur avec et sans présence de contaminants.

La deuxième partie de la thèse concerne le modèle numérique qui permet d'avoir la répartition du potentiel et du champ électrique dans une chaine d'isolateurs en verre type capot et tige, utilisé dans les réseaux électriques algériens. Un circuit équivalent formé d'un réseau *RC* parallèle a été développé. Ses paramètres ont été identifiés en se basant sur la méthode des éléments finis. Nous avons implanté ce circuit équivalent dans le logiciel ATP/EMTP dans le but de simuler les courants de fuite, et des résultats satisfaisants ont été obtenus.

**Mots-Clés** -Isolateur, modèle dynamique, éléments Finis, champ électrique, contournement, algorithme génétique, courant de fuite, arc électrique.

## **Abstract**

The insulator is a device specially made of a solid insulating material, capable of withstanding electrical stress. It is characterized by a high impedance at the passage of electric current. Its role is to separate two conductive bodies, subjected to two different potentials. In power transmission networks, pylon-conductor isolation is provided by a chain of insulators. Each chain is mainly characterized by its leakage length. This length is dependent on the operating voltage level. This thesis was carried out in order to analyze the characteristics of the electric arc around a polluted Insulator. By calculating the potential distribution and the electric field, this will help improve the design of the insulators, especially for contaminated areas.

The first part of this work aims to present a dynamic model of arc propagation based on the formulation of the Obenaus model and the Hampton criterion for the discharge propagation. An experiment was conducted on a practical glass insulator installed in the Algerian network, to measure the flashover voltage and estimate the parameters of the arc (A, n) using genetic algorithms (GA). The parameters used in the dynamic model to assess the arc current, arc length and arc resistance. In addition, an attempt was made with COMSOL to calculate the voltage and electric field on the surface of the insulator with and without the presence of contaminants.

The second part of the thesis concerns the digital model which allows to have the distribution of the potential and the electric field in a chain of glass insulators used in Algerian electrical networks. A preliminary equivalent circuit formed of a parallel *RC* network is developed. Its parameters were identified based on the finite element method. We have implemented this equivalent circuit in the ATP / EMTP software in order to simulate leakage currents, and satisfactory results have been obtained.

**Keywords** - Insulator, Dynamic model, Finite Elements, Electric field, Flashover, Genetic algorithm, Leakage current, Electric arc.

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents pour sacrifice pour mes études,

A ma femme et ma fille "Chiraz",

A mes très chères sœurs et frères,

A toute ma famille loin ou prés,

A mes amis,

A tous mes maitres et enseignants de ma carrière d'étude.

**OUCHEN.LYAMINE** 

## Remerciements

Je remercie DIEU de m'avoir donné la force, le courage et la volonté pour faire ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, le Professeur Abdelhafid BAYADI, pour avoir cru en mes capacités pour mener à bien ce travail qu'il a toujours dirigé avec une très grande rigueur scientifique. Son engagement, sa disponibilité, ses conseils et ses encouragements durant toutes ces années.

Je remercie profondément Monsieur le Professeur **Rabah BOUDISSA** à l'Université de Bejaia , de m'avoir Co-encadré pendant toute la durée de cette thèse. Sa rigueur, son sens critique et ses encouragements m'ont été d'une aide inestimable dans mon travail.

J'adresse mes vifs remerciements au professeur **Pr. Ahmed GHERBI**, pour avoir accepté de juger ce travail et m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je tiens aussi à remercier Madame Leila MOKHNACHE, Professeur à l'Université de Batna, Monsieur Hocine MOULAI, Professeur à l'USTHB d'Alger et Monsieur NOURI Hamou, Professeur à l'université de Sétif, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Un grand merci aux tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

**OUCHEN LYAMINE** 

# Sommaire

Chapitre 01	1
INTRODUCTION GENERALE	1
1.1. Contexte général	1
1.2. Problématique	3
1.4. Originalité de ce travail	5
1.5. Structure de la thèse	5
Chapitre 02	2
LES ISOLATEURS DES LIGNES DE TRANSMISSION	2
2.1. Introduction	2
2.2. Processus de contournement des isolateurs pollués	2
2.3. Étude du comportement électrique des isolateurs pollués	3
2.3.1. Influence de la forme de l'isolateur	4
2.3.2. Influence du diamètre	5
2.3.3. Influence de la tension appliquée	7
2.3.4. Effet de la non-uniformité de la contamination	11
2.3.5. Effet de la discontinuité de la contamination	14
2.3.6. Influence de l'épaisseur de la pollution	17
2.3.7. Constitution chimique de la pollution	17
2.3.8. Formation de bandes sèches	18
2.3.9. Matière insoluble	18
2.4. Paramètres de la décharge surfacique -contournement	19
2.4.1. Nature de la décharge	19
2.4.2. Diamètre de la décharge	20
2.4.3. Température de la décharge	21

2.4.4. Conductivité de la décharge	22
2.5. Méthode de diagnostic de l'état des isolateurs	23
2.5.1. Méthode de la densité du dépôt de sel équivalent	23
2.5.2. La densité du dépôt de sel non soluble DDNS	24
2.5.3. La conductance superficielle	25
2.5.4. La mesure du Courant de fuite	26
2.5.5. La mesure de la décharge partielle	28
2.6. Techniques de lutte contre la pollution	29
2.6.1. Allongement de la ligne de fuite	29
2.6.2. Changement de la forme des isolateurs	29
2.6.3. Graissage périodique	30
2.6.4. Revêtements silicones	30
2.6.5. Isolateurs composites	30
2.6.6. Nettoyage des isolateurs	31
2.7. Conclusion	31
	2.2
Chapitre 03	33
MODELISATION THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DU PHENOMENE DE	2.2
CONTOURNEMENT	33
3.1. Introduction.	33
3.2. les modèles statiques de contournement	33
3.2.1. Modèle d'Obenaus	33
3.2.2. Modèle de Neumarker	36
3.2.3. Modèle de Wilkins	37
3.2.4. Modèle de Zhicheng et Renyu	38
3.2.5. Modèle de Rao et Gopal	39
3.3. les modèles dynamiques de contournement	40

3.3.1. Mécanisme de propagation	40
3.3.2. Propagation par ionisation	40
3.3.3. Propagation par force électrostatique	42
3.3.4. Critères de propagation de la décharge	43
3.4. Modèles dynamiques	44
3.4.1. Modèle de Rizk et Nguyen	44
3.4.2. Modèle de Dhahbi et Beroual	45
3.4.3. Modèle de Anjana et Lakshminarasimha	46
3.4.4. Modèle de Sundararajan et Gorur	48
3.4.5. Modèle d'Aydogmus et Cebeci	49
3.5. Conclusion	51
Chapitre 04	53
MODELE DYNAMIQUE PREDICTIF DES CARACTERISTIQUES DE L'ARC	
ELECTRIQUE	53
4.1. Introduction	53
4.2. Objectif de ce travail	54
4.3. Modèle de l'isolateur	54
4.4. Dispositif expérimental	56
4.5. Modèle mathématique de contournement	57
4.6. Calcul du potentiel et du champ électrique sur l'isolateur pollué	73
4.7. Conclusion	78
Chapitre 05	80
CIRCUIT EQUIVALENT DE L'ISOLATEUR SOUS CONDITION	
DE POLLUTION	80
5.1 Introduction	80

5.2. Description du chaîne étudié	80
5.3. Identification des domaines	82
5.4. Étude de la distribution du potentiel dans les conditions propres	84
5.5. Études de la distribution du potentiel dans les conditions polluées	87
5.5.1. Pollution uniforme	87
5.5.2. Pollution non uniforme	90
5.6. Circuit équivalent d'une chaîne d'isolateurs	94
5.6.1. Méthode analytique	94
5.6.2. Méthode numérique	95
5.7. Résultats de simulation et interprétations	97
5.8. Décharge à travers la bande sèche	101
5.9. CONCLUSION	104
Chapitre 06	106
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES	106
6.1. Introduction	106
6.2. Résumé des Résultats	106
6.3. Recommandations de recherche futures	108

# Liste des figures

Figure 2.1 Segments de profil:(a) assiette plate, (b) profil réel d'un isolateur [19]5
Figure 2.2 Assimilation théorique d'un isolateur à un cylindre [25]6
Figure 2.3 Performance des isolateurs pollués en fonction du diamètre moyen [25]
Figure 2.4 Tension critique en fonction de la conductivité surfacique [15]9
Figure 2.5 Modèle de laboratoire dans [28]
Figure 2.6 Tension de contournement en fonction la résistivité de pollution pour les deux polarités [28]
Figure 2.7 Courant de fuite par rapport à la résistivité de pollution pour les deux polarités [28]
Figure 2.8 Première configuration [42] Figure 2.9 Deuxième configuration [42]12
Figure 2.10 Première configuration [42]
Figure 2.11 Deuxième configuration [42]
Figure 2.12 Catégories de distribution de pollution non uniformes [43]
Figure 2.13 Modèle de J. Danis [44]
Figure 2.14 Modèle expérimental de Mekhaldi et al [45]
Figure 2.15 Schémas de modèle de Diampeni [34]
Figure 2.16 Influence de l'épaisseur de la pollution sur la tension critique [36]
Figure 2.17 Effet de l'NSDD sur les tensions de tenue [50]
Figure 2.18 Dispositif de mesure du diamètre de la décharge [59]
Figure 2.19 Schéma bloc du circuit utilisé pour la mesure de la conductivité superficielle [41]
Figure 2.20 Schéma de la configuration de test au laboratoire haute tension [67]
Figure 2.21 Evolution de l'amplitude des décharges partiels [68]
Figure 3.1 Décharge en série avec un électrolyte d'après Obenaus [69]

Figure 3.2 Modèle de Wilkins [26]
Figure 3.3 Modèle de Zhicheng et Renyu [72]
Figure 3.4 Mécanisme propagation par ionisation selon Wilkins [27]41
Figure 3.5 Courbure de décharge dans la direction de la circulation du courant [76] 43
Figure 3.6 Schéma d'un isolateur pollué et son modèle électrique équivalent [80]46
Figure 3.7 Organigramme du modèle de Anjana et Lakshminarasimha [81]
Figure 3.8 Organigramme du modèle de Sundararajan et Gorur [81]
Figure 3.9 Isolateur étudié (a) et son modèle discrétisé par la MEF (b) [12]49
Figure 3.10 Surface dépliée correspondante à l'isolateur étudié [12]
Figure 4.1 Représentation schématique de modèle d'isolateur <i>U</i> 40 [86]
Figure 4.2 Dispositif expérimental de l'isolateur pollué <i>U</i> 40
Figure 4.3 Schéma de mesure de la tension de contournement de l'isolateur pollué 57
Figure 4.4 Contournement de l'isolateur testé dans le cas polluée ( $\sigma p = 30~\mu S$ )
Figure 4.5 Schéma de base d'un isolateur pollué [69]
Figure 4.6 Variation des valeurs optimales des constantes d'arc <i>A et n</i>
Figure 4.7 Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle de la pollution
Figure 4.8 Organigramme du modèle de propagation d'arc
Figure 4.9 Vitesse de la décharge en fonction de la conductivité surfacique
Figure 4.10 Courbe d'ajustement de vitesse de la décharge en fonction de la conductivité surfacique
Figure 4.11 Temps au contournement en fonction de la conductivité surfacique
Figure 4.12 Evolution temporelle du courant de fuite
Figure 4.13 Longueur de la décharge en fonction du temps, pour différentes conductivités surfaciques
Figure 4.14 Rayon de la décharge en fonction du temps, pour différentes conductivités71

conductivités surfaciques	
Figure 4.16 Résistance de la couche de pollution en fonction de la longueur de la décharge pour différentes conductivités surfaciques	
Figure 4.17 Résistance de la décharge en fonction de sa longueur, pour différent conductivités superficielles	
Figure 4.18 Surfaces équipotentielles autour de l'isolateur <i>U</i> 40 : a) cas propre b) cas poll	
Figure 4.19 Distribution de la tension électrique pour l'isolateur <i>U</i> 40	76
Figure 4.20 Distribution du champ électrique pour l'isolateur <i>U</i> 40	77
Figure 4.21 Champ électrique en fonction de la conductivité surfacique	77
Figure 4.22 Densité de courant de fuite à travers l'isolateur <i>U</i> 40	78
Figure 5.1 Chaîne d'isolateurs en verre utilisé dans une ligne de transmission en Algér (réseaux de distribution $30\ kV$ )	
Figure 5.2 Modèle de la chaine d'isolateurs en 2D dans la plate forme de COMSC Multiphysics	
Figure 5.3 Discrétisation du modèle avec raffinement de maillage	83
Figure 5.4 Surfaces équipotentielles le long de la chaîne d'isolateurs propre	85
Figure 5.5 Potentiel électrique en fonction de la distance axiale de la chaîne	86
Figure 5.6 Champ électrique en fonction de la distance axiale de la chaîne	86
Figure 5.7 Schéma de modélisation de l'isolateur sous conditions contaminées	87
Figure 5.8 Surfaces équipotentielles le long de la chaîne d'isolateurs uniformément pollué	
Figure 5.9 Potentiel électrique le long de la chaîne d'isolateurs polluées	89
Figure 5.10 Champ électrique le long de la chaîne d'isolateurs polluées	89
Figure 5.11 Cas de pollution non uniforme	90

Figure 5.12 Surfaces équipotentielles le long de la chaine (pollution non uniforme) 91
Figure 5.13 Concentration des lignes équipotentielles dans la bande sèche
Figure 5.14 Potentiel électrique le long de la chaine d'isolateurs (pollution non uniforme). 93
Figure 5.15 Champ électrique le long de la chaine d'isolateurs (pollution non uniforme) 93
Figure 5.16 Circuit équivalent complet d'une chaîne d'isolateurs
Figure 5.17 Forme d'onde du courant de fuite pour le cas d'une chaîne d'isolateurs propre 97
Figure 5.18 Formes d'ondes du courant de fuite pour le cas d'une chaîne d'isolateurs polluées
Figure 5.19 Variations du courant de fuite en fonction de la tension appliquée
Figure 5.20 Circuit équivalent de la chaîne d'isolateurs pollué avec bande sèche
Figure 5.21 Chute de tension dans la bande sèche
Figure 5.22 Forme d'onde du courant de fuite en présence de la bande sèche
Figure 5.23 Circuit de décharge à travers la bande sèche
Figure 5.24 Courant de la décharge en fonction du temps
Figure 5.25 Longueur de la décharge en fonction du temps
Figure 5.26 Résistance de la couche polluante en fonction du temps

# Liste des tableaux

Tableau 3.1Valeur des constantes A et n selon plusieurs auteurs [70]	35
Tableau 3.2 Valeur des constantes A et n selon Ghosh [70].	36
Tableau 4.1 Caractéristiques de l'isolateur <i>U</i> 40	55
Tableau 4.2 Valeurs des constantes d'arc <i>A et n</i> selon de nombreux auteurs	61
Tableau 4.3 Valeurs expérimentales	61
Tableau 4.4 Parametres de l'algorithme génétique	62
Tableau 4.5 Paramètres de simulation	75
Tableau 5.1 Paramètres des différents domaines de la chaîne étudié	82
Tableau 5.2 Épaisseur de la couche de contamination selon [93]	88
Tableau 5.3 . Valeurs des différents paramètres du circuit équivalent (cas propre)	96
Tableau 5.4 Valeurs des paramètres du circuit équivalent pour le cas pollué (fa	aible,
moyenne et fort)	96

## Listes des Acronymes et Symboles

## **Acronymes**

**GA** Genetic algorithm

**EMTP** Electromagnetic Transients Program

**ATP** Alternative Transients Program

**HT** Haute Tension

**DDSE** Densité du dépôt de sel équivalent

**DDNS** Densité de dépôt de matière non-soluble

**CEI** Commission Electrotechnique Internationale

NaCl Chlorure de sodium

LC Leakage current

**FFT** Fast Fourier transform

**DWT** Discrete wavelet transform

**STD-MRA** Standard deviation-Multiple resolution analysis

**HFCT** High frequency current transformer

**DP** Décharge partielle

**C.C** Courant continue

**C.A** Courant alternative

CaCl<sub>2</sub> Chlorure de calcium

**FeCl**<sub>2</sub> Chlorure de fer

CuSO<sub>4</sub> Sulfate de cuivre

U<sub>40</sub> Isolateur capot et tige en verre

**EOS 80D** Appareil photo numérique CANON

**CMOS APS** Capteur

**Gmax** Maximum génération

**P**<sub>c</sub> Probabilité de croisement

**P**<sub>mut</sub> Probabilité de mutation

**C.C** Courant continue

**C.A** Courant alternative

## **Symboles**

**A**, **n** Paramètres de l'arc électrique

ξ Efficacité de la longueur de fuite

Wr Largeur de la rainure

**Dr** Hauteur de la rainure

**Rr** Distance entre la rainure et l'axe de symétrie de l'isolateur

*K<sub>c</sub>* Constant dépend du niveau de contamination.

 $L_{fr}$  Longueur de fuite de l' isolateur

 $L_{fp}$  Longueur de fuite de l' isolateur plat

 $R_p$  Résistance de la couche polluante

ρ Résistivité volumique de la couche polluante

Ø Diamètre moyen d'un isolateur

**F** Facteur de forme

**Uc** Tension de contournement

 $Uc^*$  Tension de contournement des isolateurs de petit diamètre

Vcri Tension critique

*Icri* Courant critique

**k** et **b** Constantes de réamorçage

x Longueur de l'arc

**V** Volt

**A** Ampère

**Pa** Pascal

 $r_d$  Rayon de la décharge

I Courant de la décharge

 $a_p, b_p$  Constantes de la polarité appliquée

**K** Kelvin

**kg** Kilogramme

**m** Mètre

**n**<sub>e</sub> Densité des électrons

**e** Charge d'électron

**m**<sub>e</sub> Masse d'électron

 $S_{eff}$  Section efficace de collision électron/atome

*T<sub>d</sub>* Température de la décharge

**P** Pression

**K**<sub>h</sub> Constante de Boltzmann

W<sub>i</sub> Energie d'ionisation des atomes

*l* Litre

**θ** Température de la solution

**S**<sub>a</sub> Salinité

A Zone de la surface d'isolateur

 $V_{app}$  Tension appliquée

 $\sigma_p$  Conductivité de la couche de pollution

 $r_p$  Résistance linéique de la pollution

 $K_r$  Rapport entre la longueur de l'arc et la ligne de fuite

 $K_t$  Nombre de couches de pollution en série

 $E_p$  Champ de la couche de pollution

**E**<sub>arc</sub> Champ au pied de l'arc

**P** Puissance de l'arc

 $T_{th}$  Energie thermique

 $r_{arc}$  Résistance linéique de l'arc

**τ** Constante du temp

**t** Temps

**δ** Masse volumique de l'électrolyte

**H** Enthalpie

 $H_c$  Coefficient de transfert de la chaleur par convection

 $C_p$  Chaleur spécifique sous pression constante

 $W_{th}$  Energie thermodynamique

**C**<sub>p</sub> Capacité électrique de la couche de pollution

 $\varepsilon_p$  Permittivité électrique de la couche de pollution

**ω** Pulsation

**R**<sub>d</sub> Résistance de la décharge

**P**<sub>0</sub> Perte par unité de longueur

*v* Vitesse de propagation de l'arc

μ Mobilité de l'arc

**P** Pas de l'isolateur

**D** Diamètre de l'isolateur

Uarc Tension de la décharge

 $U_P$  Tension aux bornes de la couche polluante

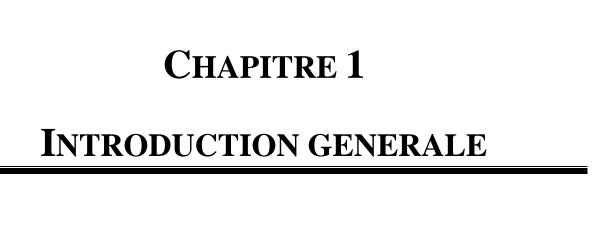
 $\varepsilon$  Somme des erreurs quadratiques

**N** Nombre d'itérations

 $U_c(A, n)$  Tension calculée

 $U_{cm}$  Tension mesurée

**J** Densité de courant



# Chapitre 01

## INTRODUCTION GENERALE

## 1.1. Contexte général

Les équipements haute tension présents dans les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique sont supposés opérer de façon fiable quelles que soient les conditions environnementales. En particulier, les isolateurs, qui représentent relativement un faible pourcentage dans le prix des lignes aériennes, constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement de ces lignes. Leur rôle est d'assurer l'isolement électrique entre les parties haute tension et les parties mises à la terre. Depuis plusieurs années, l'une des principales cibles dans les travaux de recherche et de développement dans le champ de la transmission et de la distribution électrique a été la diminution du nombre et de la durée des interruptions de l'alimentation en énergie électrique des consommateurs. Une quantité importante d'isolateurs est utilisée sur les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique et en pratique, ces isolateurs sont employés dans différents environnements tels que tropical, arctique, côtier, atmosphère polluée, etc. De ce fait, les lignes aériennes qui sont conçues, réalisées, entretenues et exploitées conformément aux normes, prescriptions et directives de sécurité, de même qu'aux règles de l'art, sont exposées a diverses contraintes. Parmi cellesci la pollution des isolateurs qui constitue l'un des facteurs de première importance dans l'altération de la qualité et la fiabilité du transport d'énergie ; ce qui implique de la prendre en considération lors du dimensionnement et de la conception de l'isolement des systèmes de transport.

L'intégrité des isolateurs aériens est décisive dans le maintien de la fiabilité et le coûtefficacité d'un service moderne de l'électricité fournie. En service, les isolateurs aériens doivent résister à la tension et les stress environnementaux auxquels ils peuvent être soumis. La performance sous pollution est particulièrement importante dans la conception de la coordination des isolateurs aériens. Les premiers isolateurs étaient fabriqués en porcelaine. Il n'en reste que très peu sur le réseau, car ils ont été remplacés par d'autres constitués de

verre. Ceux-ci se voient dans le paysage sous forme de chaînes plus ou moins longues accrochées aux pylônes et auxquelles sont fixés les câbles. Dans leur souci d'améliorer sans cesse la résistance du diélectrique face à la pollution et au contournement, les constructeurs d'isolateurs sont tournés vers des matériaux tels que les polymères et les matériaux composites. Cela occasionne un changement du profil de l'isolateur et une adhésion plus faible des poussières sur la surface. Le meilleur comportement sous pollution des isolateurs composites est surtout dû à l'hydrophobicité des matériaux de revêtement (silicone). Cependant, l'inconvénient de ces substances est leur aptitude au vieillissement qui n'est pas encore bien connue. Pour cette raison, ce type d'isolateur est encore à l'essai sur différents sites.

En effet, par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle d'un isolateur et le contournement peut alors survenir. Les conséquences de contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension; une des caractéristiques principales d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est placé.

#### On distingue trois classes de pollution:

- 1. La pollution d'origine naturelle: dans les régions côtières, les embruns marins se déposent progressivement sur les isolateurs et forment des couches de sel qui deviennent conductrices lorsqu'elles sont humidifiées par les embruns eux-mêmes, ou bien par un brouillard, ou encore par condensation. Les autres pollutions naturelles proviennent des dépôts de poussières du sol, d'engrais, de sable... etc.
- 2. La pollution d'origine industrielle: dans les régions industrielles, ce sont les raffineries, les cimenteries, les papeteries..., qui dégagent de la fumée, des particules conductrices. Dans les régions urbaines, la pollution provient des appareils de chauffage et des véhicules.
- 3. La pollution mixte: c'est la forme la plus sévère de pollution car elle résulte de l'association d'une pollution naturelle et d'une pollution industrielle.

Le dépôt de la couche de pollution résulte de la concomitance de plusieurs facteurs tels que les conditions climatiques, le champ électrique, la force et la direction du vent, la position

d'accrochage des isolateurs, leurs formes et le type de matériaux qui les constitue (verre, porcelaine, silicone composite, élastomère et polymère) [1]. Après la formation de la couche de pollution, un processus d'humidification de la surface polluée de l'isolateur intervient graduellement en présence de brouillard, de rosée et de petite pluie fine. Les sels contenus dans le dépôt, se dissolvent créant ainsi un électrolyte rendant de ce fait la couche polluante conductrice. Il s'établit alors un courant de fuite dont l'amplitude dépend du temps, de la nature et de la quantité des sels et des produits insolubles contenus dans le dépôt polluant ainsi que du degré d'humidification. La circulation du courant de fuite va chauffer le film de pollution qui recouvre la surface de l'isolateur. Cet échauffement va donner suite à une évaporation de l'humidité contenue dans la couche de pollution. La puissance dissipée par effet Joule se fera par convection du dépôt vers l'air ambiant et par conduction thermique à travers la couche de pollution [2]. Cette évaporation va continuer jusqu'à l'assèchement de certaines zones. La densité du courant de fuite devient très importante aux extrémités des zones sèches, favorisant ainsi l'extension de ces dernières jusqu'à la création de bandes sèches. A partir de ce moment, le courant s'annule et la résistance de la couche de pollution prend une valeur très grande. La répartition du potentiel sur l'isolateur est modifiée par la présence de ces bandes sèches et la plupart des lignes de champ électrique se concentrent en ces bandes. Par conséquent, la tension est essentiellement appliquée aux bornes de ces bandes. Des décharges locales apparaissent par rupture diélectrique dans l'air et le courant se remet à circuler. Deux scénarios sont possibles : soit que la décharge s'éteigne soit elle évolue jusqu'au contournement. Dans le premier cas le courant de fuite est inférieur à une certaine valeur et la situation reste stable ; la résistance en série avec la décharge limite le courant et la longueur de cette dernière. Par contre, si le courant de fuite atteint un seuil dit « critique », et que certaines conditions sont remplies, alors le contournement se produira.

## 1.2. Problématique

Le champ de recherche concernant le contournement électrique des isolateurs pollués est très vaste mais l'intérêt qu'il suscite se fait sentir dans de plus en plus de pays touchés par ce problème. En effet, plusieurs interruptions électriques sur les réseaux aériens ont été observées dans divers pays tels que le Canada [3, 4–5], les États-Unis [6], l'Angleterre [7], le Japon [8], la Norvège [9].

le comportement des isolateurs des lignes de transmission sous contraintes de tension reste à ce jour complexe malgré de nombreuses recherches effectuées pour comprendre le développement de la décharge électrique qui mène au contournement en présence de la pollution. La complexité de ce phénomène impose aux chercheurs d'effectuer plus d'expériences au laboratoire et en site, sous des conditions de pollution artificielle ou naturelle afin d'en comprendre le mécanisme. Toutefois, les méthodes d'essais sur site sont les plus intéressantes mais nécessitent plusieurs années pour permettre une étude convenable du comportement de l'isolateur.

Plusieurs paramètres influent sur le bon fonctionnement de l'isolateur de haute tension tels que la nature du dépôt polluant [10-11], la non-uniformité du dépôt de pollution[12-13], la conductivité superficielle et le profil de l'isolateur [14], la tension appliquée (continue, alternative) [15], rendent la compréhension et la maîtrise du mécanisme de contournement très difficile. Les résultats des travaux antérieurs ont néanmoins permis d'établir des modèles permettant d'accéder aux caractéristiques des décharges se propageant sur les surfaces d'isolateurs et ce jusqu'au contournement.

## 1.3. Objectif

En vue de pouvoir dimensionner correctement les isolateurs haute tension sous des conditions sévères de pollution, cela nécessite des investigations sur plusieurs fronts à savoir:

- Il importe de développer des modèles prédictifs fiables pour estimer de la tension critique de contournement,
- Etude des mécanismes d'élongation de la décharge,
- L'établissement d'un tel modèle dynamique ou statique de contournement des isolateurs pollués pourrait permettre de réduire significativement le nombre d'expériences laborieuses et dispendieuses requises,
- Deux paramètres sont très importants pour calculer la tension critique de contournement, les caractéristiques de la décharge et la résistance de la couche de pollution. Slama [16] a donné des informations détaillées sur les caractéristiques de la décharge,

• développement d'un circuit équivalent pour l'isolateur en tenant compte de la pollution. Ce dernier, dont les paramètres seront identifiés en se basant sur l'approche éléments finis, sera par la suite implanté dans l'ATP/EMTP.

## 1.4. Originalité de ce travail

L'apport scientifique de cette thèse est d'étudier un modèle dynamique de propagation de l'arc électrique. L'étude prend en considération la forme géométrique réelle de l'isolateur. Un test expérimental a d'abord été effectué sur un isolateur réel en verre type capot à tige pour optimiser les paramètres (A et n) en utilisant l'algorithme génétique. Ces paramètres réels ont ensuite été utilisés dans le modèle dynamique pour évaluer la variation instantanée de la décharge. La performance de cet isolant dépend fortement de la distribution du champ électrique. Les résultats de la simulation ont prouvé que les contaminants accumulés à la surface du l'isolateur affectent de manière significative la distribution de tension et le champ électrique. Ce champ déformé accélérera le processus de contournement. Il est évident que le champ calculé aiderait à améliorer la conception de l'isolateur en particulier pour les zones contaminées.

#### 1.5. Structure de la thèse

Cette thèse comporte six chapitres présentés comme suit: Le premier chapitre présente le contexte général, la problématique, l'objectif et la structure de cette thèse. Dans le deuxième chapitre, nous abordons l'état de l'art et les connaissances acquises à ce jour sur le phénomène des décharges apparaissant à la surface des isolateurs pollués.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les différents modèles théoriques et expérimentaux du phénomène de contournement. Le quatrième chapitre, est consacré au développement d'un modèle dynamique de la décharge électrique sur un Isolateur pollué sous tension continue .Dans le cinquième chapitre, nous avons fait une simulation du courant de fuite qui se développe sur la surface d'une chaine d' isolateurs réels en se basant sur un circuit équivalent formé d'un réseau *RC* parallèle. Ses paramètres ont été identifiés en se basant sur la méthode des éléments finis. Nous avons implanté ce circuit équivalent dans le logiciel de simulation ATP/EMTP. Cette partie à pour but le diagnostic de l'état de

surface des isolateurs en service. Nous clôturons par une conclusion générale dénotant des perspectives prometteuses et des recommandations pour des travaux futures.

# CHAPITRE 2 LES ISOLATEURS DES LIGNES DE TRANSMISSION

# Chapitre 02

## LES ISOLATEURS DES LIGNES DE TRANSMISSION

#### 2.1. Introduction

Dans les réseaux de transport d'énergie électrique, l'isolement pylône-conducteur qui représente les deux parties conductrices, est assuré par une chaîne d'isolateurs. Chaque chaîne est caractérisée principalement par sa longueur de fuite. Leur dimensionnement est déterminé par la surtension de manœuvre. Dans ce cas, la tenue à la tension nominale à 50 Hz des isolateurs propres et secs est excellente. Cependant, de nombreux défauts sont enregistrés sur les lignes aériennes (contournement électrique, défaillance d'isolateurs, ...), particulièrement par temps humide (rosée, brouillard, pluie fine, ... etc.).

Depuis les trois dernières décennies, l'intérêt est croissant vis-à-vis des phénomènes de contournement des isolateurs sous diverses conditions atmosphériques. Certaines de ces études se sont intéressées tout spécifiquement au processus de propagation d' un arc électrique à la surface d'une couche électrolytique dans le but de comprendre les phénomènes complexes reliés au contournement des isolateurs.

L'objectif de ce chapitre est donc d'effectuer une revue de Littérature et notions fondamentales sur le processus de contournement des isolateurs et leur comportement ainsi que des différents modèles prédictifs qui y sont associés à ces derniers.

## 2.2. Processus de contournement des isolateurs pollués

Le processus de contournement électrique des isolateurs pollués a fait l'objet de nombreuses recherches. C'est un phénomène dynamique fort complexe qui met en interaction plusieurs facteurs: la distribution du champ électrique, les conditions environnementales, le type d'isolateur, la géométrie et la nature du dépôt ainsi que les caractéristiques de la tension appliquée [17].

La chronologie du processus qui mène au contournement est constituée essentiellement de quatre grandes phases [16, 18-19]:

- ✓ Dépôt d'une couche solide constituée de sels et de matériaux insolubles, sauf dans le cas d'une pollution marine ou la pollution est sous la forme d'embruns marins.
- ✓ Humidification de la couche de pollution et circulation d'un courant dû à la dissolution des sels contenus dans le dépôt (formation d'un électrolyte).
- ✓ Apparition de bandes sèches dues à l'échauffement par effet Joule résultant de la circulation du courant et conduisant à l'amorçage de décharges locales.
- ✓ Élongation des décharges jusqu'à court-circuiter l'isolateur : contournement.

## 2.3. Étude du comportement électrique des isolateurs pollués

Plusieurs études ont été consacrées à l'influence des caractéristiques géométriques des isolateurs sur leur tension de contournement sous conditions de pollution [19-20].

- R. Matsuaka et al. [18] ont démontré que la tension de contournement diminue au fur et à mesure que le diamètre augmente pour une contamination constante. Ils ont aussi démontré que la densité du dépôt contaminant diminue avec l'augmentation du diamètre.
- R. Sundararajan et R. S. Gorur [20] ont utilisé un modèle dynamique pour étudier, en tension continue, l'effet du profil des isolateurs en présence de pollution afin de concevoir un outil informatique facilitant la conception des isolateurs dans les conditions de contamination. Ils ont conclu que le diamètre ainsi que le profil de l'isolateur ont une forte influence sur la tension de tenue.
- I. Kimoto et al. [21] ont observé que la tension de contournement en régime continu est plus affectée par la forme de l'isolateur que la tension alternative.
- M. Fazelian et al. [22] ont démontré que, pour un isolateur pollué ayant une distance constante entre les jupes, l'arc choisit le chemin le plus court dans l'air. Ces derniers ont conclu qu'une hauteur inégale entre les jupes améliore la tension de contournement.

## 2.3.1. Influence de la forme de l'isolateur

La longueur de fuite est un important paramètre qui influence la tenue des isolateurs. Pour augmenter la performance d'un isolateur, on pourrait être tenté d'augmenter la longueur de fuite. Cependant, la forme des isolateurs est différente d'un type à l'autre. Un isolateur dont le profil est simple possède une ligne de fuite plus petite que celui dont le profil comporte de nombreuses nervures comme les isolateurs antipollution lorsqu'ils sont identiquement pollués [23]. En effet, si la couche de pollution est uniformément répartie, des arcs locaux peuvent se développer sous certaines conditions. Si les arcs locaux restent en contact avec la surface isolante, la ligne de fuite est complètement utilisée.

On peut dire pour assurer sa bonne fonction, le profil de l'isolateur doit satisfaire les conditions suivantes :

- Une longueur de fuite maximale
- ➤ 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.

Pour tenir compte des deux premières conditions, Cheng et Nour [19] ont défini un paramètre  $\xi$  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 Wr, sa hauteur Dr et la distance Rr qui sépare la rainure et l'axe de symétrie de l'isolateur (Figure 2.1).

A partir de mesures expérimentales, ils ont déduit une relation empirique de la forme :

$$\xi = 1 - \left(e^{\frac{-K_c Wr}{Dr}}\right) \tag{2.1}$$

Où  $K_c$  est constante dépend du niveau de contamination. La longueur de fuite de l'isolateur réel sera :

$$L_{fr} = \xi L_{fp} \tag{2.2}$$

avec  $L_{fp}$  est la longueur de fuite de l'isolateur plat.

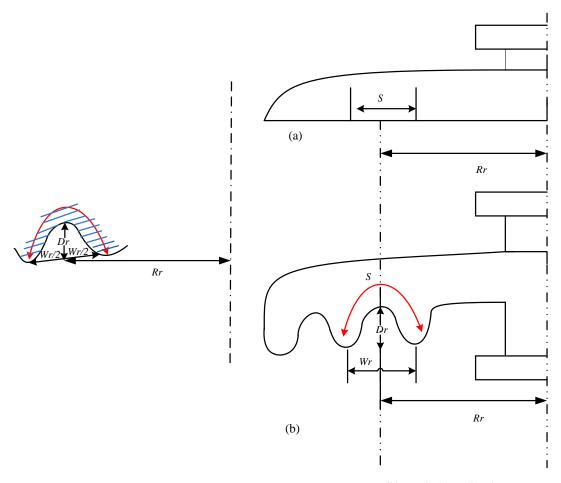


Figure 2.1 Segments de profil:(a) assiette plate, (b) profil réel d'un isolateur [19]

Pour différentes formes d'isolateurs Claverie et Porcheron [24] ont donné des courbes de variation de  $R_p/\rho$  en fonction de la longueur de l'isolateurs et ont déduit une fonction  $F_r(x)$  telle que :

$$R_p = \rho F_r(x) \tag{2.3}$$

 $F_r(x)$  est appelée fonction de répartition de la couche de pollution,  $R_p$  et  $\rho$  sont respectivement la résistance et la résistivité volumique de la couche pollution.

## 2.3.2. Influence du diamètre

Par définition, le diamètre moyen  $\emptyset$  d'un isolateur réel correspond au diamètre d'un isolateur qui serait cylindrique et qui posséderait la même ligne de fuite, L, et la même résistance lorsqu'il est recouvert de la même couche polluante, e, que l'isolateur réel (figure I2.2) [25].

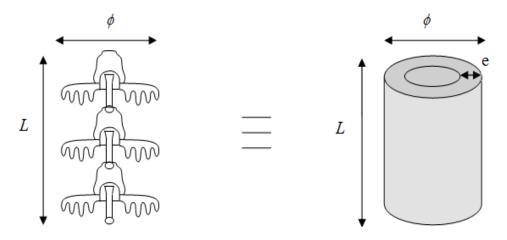


Figure 2.2 Assimilation théorique d'un isolateur à un cylindre [25]

En effet, la longueur d'un cylindre est donnée par :

$$L = \frac{S}{\pi \cdot \emptyset} \tag{2.4}$$

Où S est la surface latérale du cylindre et  $\emptyset$  est le diamètre. Par conséquent, si on intègre F le long du profil de l'isolateur, on aura une approximation de son facteur de forme :

$$F = \int_0^L \frac{dS}{\pi \cdot \emptyset} \tag{2.5}$$

D'une part, si on assimile la couche polluante à un film régulier d'épaisseur e et de résistivité volumique  $\rho$ , la résistance de l'isolateur sera:

$$R = \rho \int_0^L \frac{dS}{\pi \cdot \phi \cdot e} = \frac{\rho}{e} F \tag{2.6}$$

Où F est le facteur de forme de l'isolateur. D'autre part, la résistance du cylindre équivalent est :

$$R = \rho \frac{dS}{\pi \cdot \emptyset \cdot e} \tag{2.7}$$

En conclusion, en assimilant l'isolateur réel à un isolateur cylindrique (Figure 2.2) ayant une même ligne de fuite  $L_f$  et une même couche polluante, le diamètre moyen s'écrit:

$$\emptyset = \frac{L_f}{\pi \cdot F} \tag{2.8}$$

Il a été démontré que, pour une certaine densité de contamination, la tension critique de contournement diminue au fur et à mesure que le diamètre augmente et ce, jusqu'à une certaine valeur où la tension de contournement cesse de diminuer .Ce phénomène s'explique par le fait qu'un large diamètre Ø signifie une plus grande exposition de la surface à la

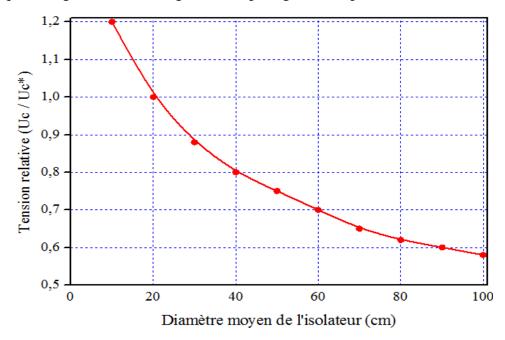


Figure 2.3 Performance des isolateurs pollués en fonction du diamètre moyen [25]

pollution, diminuant ainsi la résistance d'après l'équation 2.7 et réduisant par conséquent la tension de contournement. Par contre, une augmentation relative du diamètre peut causer un supplément d'arcs locaux provoquant une baisse de tension aux bornes de l'électrode. Cette baisse de tension compense partiellement la baisse de la tension de contournement.

On remarque que l'augmentation du diamètre peut impliquer l'augmentation de la distance de fuite qui atténue la diminution de la tension de contournement. La figure 2.3 exprime les résultats d'essais par le rapport entre la tension de contournement mesurée (Uc) et la tension de contournement moyenne des isolateurs de petit diamètre (Uc\*).

## 2.3.3. Influence de la tension appliquée

Sous tension continue, les travaux déjà entrepris rapportent qu'il y a une influence des polarités sur la tension de contournement dont les tensions critiques en polarité négative sont environ 2/3 des tensions critiques en polarité positive [26].

Wilkins et Al Baghdadi [27] ont constaté que dans le cas où les valeurs des résistances sont grandes, les tensions négatives donnent des courants critiques légèrement inférieurs à ceux des tensions positives. Ceci a été expliqué par leur théorie de l'élongation par ionisation. Dans le cas d'une tension négative, le gradient de tension à la tête de la décharge est plus important du fait de la charge d'espace qui favorise l'ionisation. Il en résulte un courant critique inférieur à celui d'une tension positive appliquée.

Slama et al [28] ont montré expérimentalement que les valeurs de *Icri* et *Vcri* pour un isolateur pollué uniformément ou non-uniformément dépendent essentiellement de la configuration de la pollution et de la polarité. Le sens de propagation des décharges varie selon la polarité de l'électrode *HT*. En polarité positive, la décharge située au niveau des bandes sèches du milieu tend à s'allonger beaucoup plus vers le côté où se situe la masse que vers le côté *HT*. Par contre, les décharges sur les dernières bandes sèches tendent s'allonger vers l'électrode *HT*. Lorsque la pointe est négative, les décharges situées au niveau des bandes sèches du milieu ont tendance à s'allonger vers l'électrode de masse alors que celles sur les dernières bandes sèches tendent à s'allonger vers l'électrode *HT* comme en polarité positive.

Bouchelga [29] a étudié le développement de décharges parallèles sur une large surface isolante simultanément dans des conditions de pollution uniforme et sous une tension continue. Les paramètres d'influence considérés sont: la largeur du matériau pollué, le degré de contamination et la polarité de la tension appliquée. Les résultats expérimentaux montrent qu'il existe une largeur de bande limite de pollution à partir de laquelle deux arcs électriques consécutifs peuvent se développer indépendamment avec une tension de contournement minimale. La valeur de cette largeur limite est approximativement 12 cm en polarité positive et 20 *cm* en polarité négative.

Sahli [30] a montré expérimentalement que la polarité positive conduit à une tension de contournement plus élevée que celle correspondant à une polarité négative, quelles que soient la longueur de la bande sèche, la conductivité de la couche polluante et le diamètre de l'isolateur utilisé.

Sous tension alternative, Plusieurs étapes sont donc franchies avant que n'intervienne le contournement de l'isolateur: amorçage d'une décharge, propagation ou élongation de cette décharge, réallumage après le passage par zéro du courant pour le cas alternatif et enfin court-circuit et mise hors service du dispositif d'isolement.

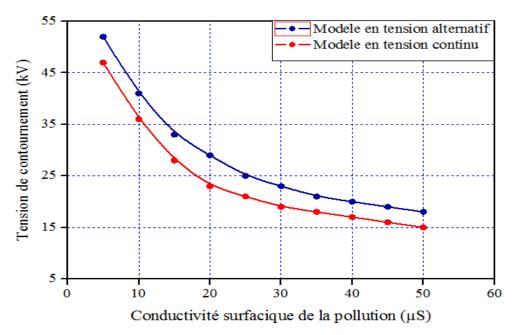
On parle de réallumage de l'arc lorsqu'il s'agit de courant alternatif. Dans ce cas, l'arc est interrompu à la fin de chaque alternance puis réapparaît quelques instants plus tard lorsque la tension est suffisante pour provoquer le réamorçage de la décharge.

Ce réamorçage correspond, en fait à une brusque augmentation de la conductivité du canal de la décharge qui demeurerait partiellement ionisé après extinction de la décharge précédente [31]. Par conséquent, ce réamorçage ne s'effectuera et la décharge ne pourra s'allonger que sous certaines conditions. Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer le phénomène d'entretien de l'arc.

Le modèle de réallumage par rupture diélectrique a été décrit par Rizk qui permet d'étendre le modèle d'Obenaus sous tension continue à celle tension alternative , Cette contribution est la condition de réamorçage de l'arc qui s'explicite par:

$$V_C \ge \frac{k \cdot x}{I_C^b} \tag{2.9}$$

Où k et b sont les constantes de réamorçage,  $V_C(V)$  et  $I_C(A)$  sont les valeurs crêtes de la tension appliquée et du courant de fuite respectivement et x est la longueur de l'arc en (cm) [32].



**Figure 2.4** Tension critique en fonction de la conductivité surfacique [15]

Dhahbi [15] a calculé la tension critique de contournement en fonction de la conductivité (Figure 2.4). Elle remarque que la tension de contournement dynamique en alternatif est supérieure à celle calculée pour le cas continu. Comme il l'a évoqué auparavant, le contournement en continu est le plus critique.

Sous tension impulsionnelle de foudre et de manœuvre, certains chercheurs [33, 34–35] ont trouvé que le contournement en polarité positive est plus facile qu'en polarité négative pour plusieurs types de configurations de la pollution (pollution électrolytique ou solide, uniforme continue et discontinue).

Slama [28] a proposé un dispositif expérimental soumis à une tension inpulsionnelle, comportant un canal rectangulaire en verre d'une profondeur de 18 mm, d'une largeur de 50mm et d'une longueur de fuite totale de 200 mm (Figure 2.5).

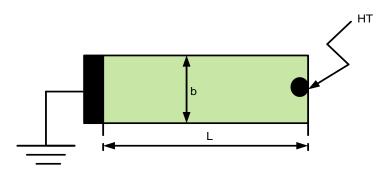
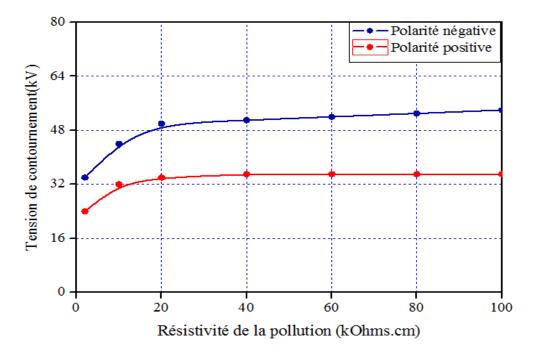
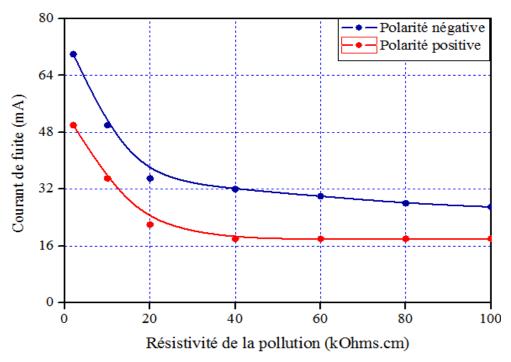


Figure 2.5 Modèle de laboratoire dans [28]



**Figure 2.6** Tension de contournement en fonction la résistivité de pollution pour les deux polarités [28]



**Figure 2.7** Courant de fuite par rapport à la résistivité de pollution pour les deux polarités [28]

Slama et al [28] a noté que les tensions critiques et les courants en polarité positive sont inférieures à celles en polarité négative (Figures 2.6 et 2.7). Ce qui met en évidence l'effet de la pollution sur la tension de contournement, il a montré aussi que les courants critiques et les tensions critiques dépendent de la résistivité de la pollution et de la polarité de l'électrode HT.

# 2.3.4. Effet de la non-uniformité de la contamination

L'influence de la non- uniformité de la distribution de la pollution sur la tension de tenue ou de contournement des isolateurs a fait l'objet de nombreux travaux théoriques et expérimentaux[34, 36, 37–38]. Des résultats contradictoires ont été rapportés. Pour certains, la tension de contournement dans le cas d'une pollution non uniforme est supérieure a celle obtenue avec une pollution uniforme[36, 39], alors que d'autres ont observe le contraire[40, 41].

Teguar [42] a proposé un modèle expérimental dont la distance interélectrode est égale cette fois-ci à 400 mm. Deux configurations de la pollution sont considérées. Chacune d'elles possède deux dispositions distinctes des couches polluantes.

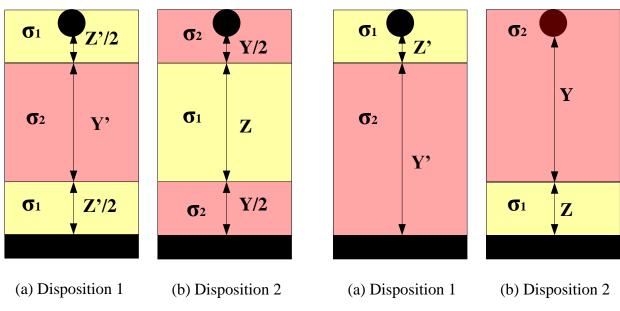


Figure 2.8 Première configuration [42]

Figure 2.9 Deuxième configuration [42]

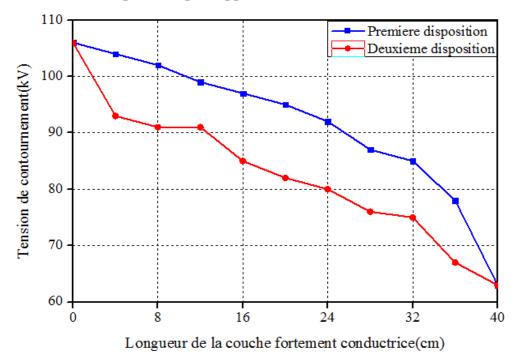
Dans la première configuration (Figure 2. 8), trois couches de pollution ont été appliquées. Les couches qui sont situées près des électrodes sont identiques (mêmes conductivité et dimensions). Par contre, celle au milieu possède une conductivité différente. Dans une première disposition, la couche faiblement conductrice est située des deux côtés de la plaque isolante, contrairement à la seconde où cette couche est appliquée au milieu. Concernant la deuxième configuration, nous considérons deux milieux de conductivités différentes. La couche fortement conductrice est totalement établie du côté terre, pour une première disposition et du côté haute tension, pour la seconde (Figure 2. 9). Les couches fortement conductrices ont une conductivité de 420  $\mathbb{Z}S/cm$  et les couches faiblement conductrices ont une conductivité de 42  $\mathbb{Z}S/cm$ .

où:

Y ou Y': la longueur de la partie fortement conductrice ( $\sigma_2 == 420 \,\mu\text{S/cm}$ ), Z ou Z': la longueur de la partie faiblement conductrice ( $\sigma_1 = 42 \,\mu\text{S/cm}$ ).

Il a constaté que la tension de contournement diminue avec l'augmentation de la longueur de la couche la plus conductrice. Il a prévu ce résultat, car l'augmentation de la longueur de la couche à forte conductivité provoque la diminution de l'impédance équivalente totale interélectrode, engendrant ainsi la dégradation de la tension de tenue diélectrique du système (Figures 2. 10 et 2. 11).

Il a remarqué aussi pour les deux dispositions de la deuxième configuration qu'il y a une légère augmentation de la tension de contournement pour des longueurs de la couche fortement conductrice dépassant 87,5 % de la ligne de fuite totale du modèle. En plus, la tension de contournement pour la deuxième configuration est pratiquement insensible à la position des deux couches polluées par rapport aux électrodes.



**Figure 2.10** Première configuration [42]

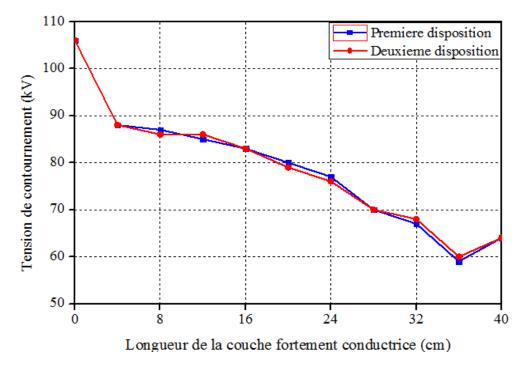


Figure 2.11 Deuxième configuration [42]

Boudissa et Bayadi [43] ont proposé trois scenarios de pollution, transversale, longitudinale périodique et longitudinale non périodique, ces scénarios sont les plus rencontrés en service dans les zones polluées caractérisés par des vents violents. L'étude a été effectuée au laboratoire sous tension alternative. Les configurations sont représentées dans la figure 2.12.

Au premier scénario, ils ont remarqué que la tension de contournement sous pollution non-uniforme transversale est *de* 21 % plus grande qu'en distribution uniforme. En plus, les valeurs de tension de contournement sous pollution longitudinale périodique est au maximum 30 % plus petite que les valeurs obtenues sous pollution uniforme. Le troisième scénario a illustré la présence d'une tension de contournement minimale de 42% plus petite qu'en configuration uniforme, celle-ci représente le cas le plus défavorable qui doit être pris en considération durant le dimensionnement et la conception des nouveaux isolateurs.

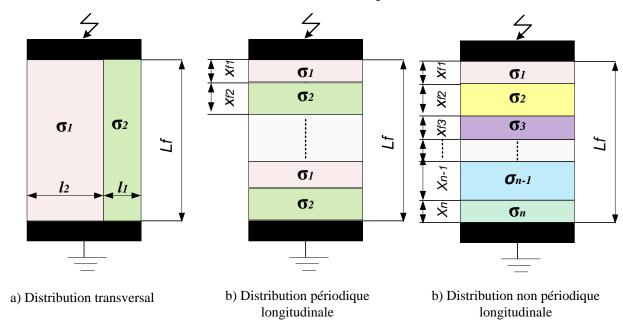


Figure 2.12 Catégories de distribution de pollution non uniformes [43]

# 2.3.5. Effet de la discontinuité de la contamination

La répartition discontinue des couches de pollution dépend principalement du profil des isolateurs, des conditions météorologiques, de la disposition des chaines d'isolateurs et de leurs distances par rapport au sol et au matériau constituant les isolateurs (silicone, verre, céramique, etc.) et de la création des bandes sèches. Plusieurs travaux traitant l'effet de la discontinuité de la pollution sur le comportement des surfaces isolantes ont été établis.

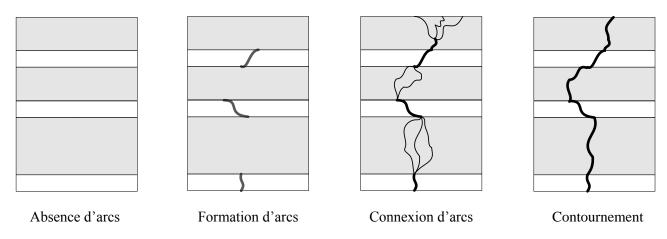


Figure 2.13 Modèle de J. Danis [44]

J. Danis [44] a proposé un modèle constitué d'une plaque de verre de forme géométrique simple possédant plus d'une zone sèche pour reproduire les cas rencontrés en service. Dans ses investigations expérimentales, il a montre que l'arc électrique se développe toujours d'abord à travers la zone sèche, puis dans la zone humide. Il naît de façon aléatoire le long de la zone sèche. Aux premiers stades du processus, plusieurs arcs se développent en parallèle puis disparaissent progressivement lorsque le courant augmente pour ne laisser place qu'à un seul arc dominant qui persiste jusqu'au contournement final qui se fait à travers les chemins déjà préétablis par les différents arcs de chaque zone sèche (Figure 2.13).

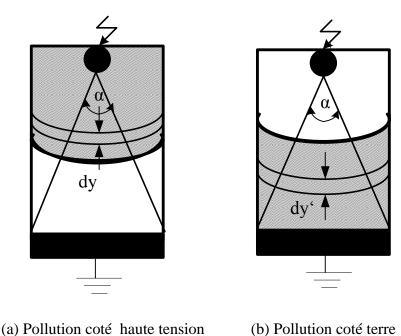


Figure 2.14 Modèle expérimental de Mekhaldi et al [45]

Mekhaldi et al. [45] ont développé un modèle mathématique à partir d'observations expérimentales sur une surface isolante plate couverte d'une couche de pollution discontinue constituée de deux bandes ; une bande sèche et une bande polluée (Figure 2.14). L'effet de la localisation de la bande sèche à proximité de la haute tension ou de la masse sur la longueur de la décharge et l'intensité du courant de fuite ont été pris en compte. Ainsi, d'après la figure 2.14, l'impédance totale serait la somme de l'impédances de la bande sèche et de la résistance de la couche de pollution en fonction des configurations (a) et (b) .

$$z(y) = z_{0d} \left(\frac{L - y}{L}\right)^{0.42} + \frac{K}{\sigma_p} \ln\left(\frac{\alpha - y}{\alpha}\right)$$
 (2.10)

$$z(y) = z_{0d} \left(\frac{L - y'}{L}\right)^{0.42} + \frac{K}{\sigma_p} ln \left(\frac{\alpha + L}{\alpha + L - y'}\right)$$
 (2.11)

Ou y et y' sont les rayons de la bande polluée mesurée à partir de l'électrode HT comme indiquée sur la figure 2.14. Le terme  $z_{0d}$  représente l'impédance empirique de la bande sèche. Le facteur K est une constante et le terme  $\sigma_p$  représente la conductivité de la couche de pollution.

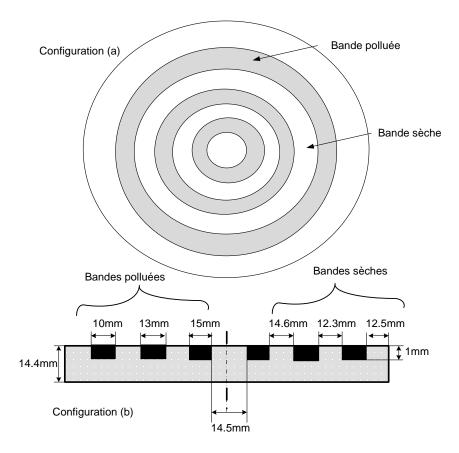
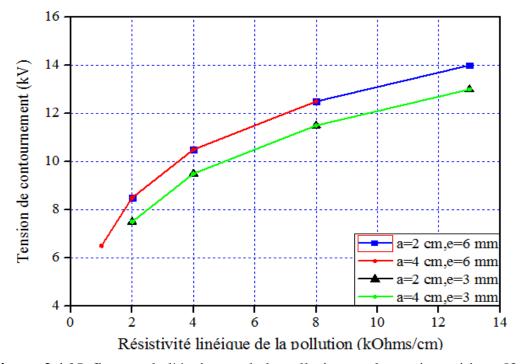


Figure 2.15 Schémas de modèle de Diampeni [34]

Diampeni et al [34] ont remarqué qu'en tension alternative la disposition des bandes et leurs propriétés et plus particulièrement leurs largeurs et leurs conductivités agissent de façon significative sur les caractéristiques de la décharge.

# 2.3.6. Influence de l'épaisseur de la pollution

Mariche et al [36] ont étudié l'influence de l'épaisseur de la pollution sur la tension critique de contournement. Les résultats de ces investigations (figure 2.16) montrent pour la même épaisseur et des largeurs différentes, les tensions critiques sont identiques, et que pour la même largeur et des épaisseurs différentes, les tensions critiques sont différentes malgré que les résistances linéiques soient identiques. A partir de là, l'auteur conclu que l'épaisseur de l'électrolyte intervient sur la tension critique de contournement et arrive à la conclusion que la résistivité superficielle est le paramètre qui intervient directement sur la tension critique. Cette conclusion a été confirmée par les travaux de Slama [28].



**Figure 2.16** Influence de l'épaisseur de la pollution sur la tension critique [36]

# 2.3.7. Constitution chimique de la pollution

Sunraradjan et al [46] ont étudié l'influence de contaminants non solubles sur la tension de tenue. Un modèle dynamique étendu a été utilisé pour prédire la tension de contournement des isolateurs de suspension et de poste de diverses formes pour les tensions

alternatives et continues. Le modèle peut donc être utilisé comme un outil pour la conception et la maintenance des isolateurs de haute tension assisté par ordinateur.

Slama [47] a démontré que la constitution chimique de la couche de pollution a peu d'effet sur la tension critique contrairement aux courants critiques, qui eux sont sensibles à la nature chimique du dépôt de pollution. Les valeurs des constantes caractéristiques de l'arc A et n sont fonction de la nature chimique des dépôts et de la polarité de la tension.

# 2.3.8. Formation de bandes sèches

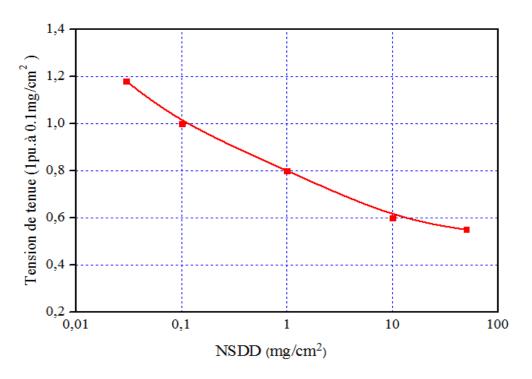
Le problème de la formation de bandes sèches a été traité en premier par Forrest [2]. Par la suite, plusieurs chercheurs ont proposé des modèles plus ou moins complexes en vue de la modélisation et de la prédiction de la formation des bandes sèches sur des surfaces d'isolateurs simples et des isolateurs réels[44, 48]. Dans la majorité des cas, la formation des bandes sèches sur une surface isolante est basée sur le calcul du bilan électrique et thermique de la couche de pollution traversée par le courant de fuite.

Gellert et al [47] ont modélisé la formation de bandes sèches par éléments finis en considérant la relation entre la formation du brouillard, la tension et la distribution de la température, ils ont considéré que :

- ✓ La pénétration de l'eau d'un élément de volume à un autre se fait par diffusion, l'influence de la gravitation est négligeable, 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 aux voisinages est négligeable ;
- ✓ La chaleur développée indique les températures locales dans la couche de pollution.

# 2.3.9. Matière insoluble

A travers les tests au laboratoire, il est établi que le type et le degré de la matière non soluble influent sur les tensions de tenue aussi que sur les caractéristiques de courants [49].



**Figure 2.17** Effet de l'NSDD sur les tensions de tenue [50]

Le Tonoko et le Kaolin [50] sont les plus utilisés pour les tests au laboratoire pour faciliter l'obtention d'une couche polluante continue sur la surface. Ils ont mentionné que la densité de la matière insoluble influe négativement sur les tensions de tenue (figure. 2.17). La réduction de la tension de tenue avec l'augmentation du NSDD peut être expliquée par la grande épaisseur des matières insolubles parce qu'il absorbe plus d'eau ce qui implique l'augmentation de la quantité du sel dissolue, la conductivité surfacique augmente et la tension de contournement diminue.

Montoya [51] a démontré expérimentalement que la quantité de la matière insoluble influe sur les courants de fuite générés aux surfaces isolantes polluées. D'après ces résultats, la relation qui relie l'DDSE avec un niveau spécifique de DDNS est généralement linéaire.

# 2.4. Paramètres de la décharge surfacique -contournement

# 2.4.1. Nature de la décharge

La nature de la décharge menant au contournement des isolateurs pollués reste encore un sujet d'actualité. Novak et al [52] ont mesuré les paramètres caractéristiques d'un arc sous tension continue, dans une gamme de courants variant de 20 mA a 4 A sous des pressions allant de 20 kPa a 150 kPa. Ils ont remarqué un changement du régime de la

décharge luminescente vers l'arc à partir de 300mA pour des tensions inferieures à  $2\,kV$ . D'autres auteurs soutiennent que la décharge est du type arc [11, 45-53]. Cela est plus ou moins justifié par l'intensité du courant mesuré au niveau de l'électrode connectée à la masse. Si le courant dépasse 1A, on considère que la décharge est un arc. Par contre, si le courant est inférieur à cette valeur, il est difficile de définir le type de décharge au vue de sa nature transitoire [54]. Cependant, il est admis, que la décharge est du type luminescente transitoire, lorsque le courant se situe dans la gamme  $10\,mA - 1\,A$  [33, 55].

En étudiant l'interaction d'une décharge avec un électrolyte faiblement conducteur, Belosheev [56] et Anpilov et al. [57] arrivent à la conclusion que la décharge présente beaucoup de similitudes avec les leaders observés dans les grands intervalles d'air. Cette idée a été récemment utilisée par Waters et al. [58] dans le cas de dépôt de pollution de faible conductivité.

# 2.4.2. Diamètre de la décharge

Le diamètre du canal de la décharge est un paramètre important dont sa connaissance est indispensable à l'élaboration de modèles et la compréhension du phénomène. Sa mesure est cependant très délicate à cause de la diffusion de la lumière et il n'est pas défini aussi de façon unique.

A partir de la mesure de la densité du courant pendant la propagation de la décharge, Wilkins [26] a montré que le rayon de la décharge peut être estimé par la relation:

$$r_d = \sqrt{\frac{I}{\pi . S}} \tag{2.12}$$

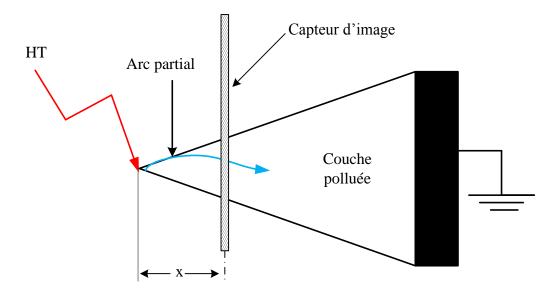
avec:

 $r_d$ : le rayon de la décharge;

S: la densité de courant;

*I* : le courant de la décharge

Matsumoto et al. [59] ont développé un dispositif de mesures optiques composé d'un tableau de 512 photodiodes disposées à des intervalles de 28 mm. Ce dispositif leur a permis de mesurer avec une bonne précision le diamètre de la colonne de la décharge (Figure 2.18).



**Figure 2.18** Dispositif de mesure du diamètre de la décharge [59]

Leurs observations montrent que le diamètre  $r_d(mm)$  de la décharge dépend de la polarité de la tension et du courant I (A) qui la parcourt. A cet effet, ils proposent une relation empirique liant le diamètre de la décharge et le courant :

$$r_d = a_p I^{b_p} \tag{2.13}$$

où I est le courant. Les constantes  $a_p$  et  $b_p$  dépendant de la polarité appliquée à l'électrode haute tension avec :

 $a_p=14$  et  $b_p=0.78$  pour la polarité positive et  $a_p=22$  et  $b_p=0.78$  pour la polarité négative.

# 2.4.3. Température de la décharge

Des travaux expérimentaux ont été consacrés à l'étude de la température de la décharge de contournement des isolateurs pollués. A partir de mesures spectroscopiques, Matsumoto et al. [59] ont estimé la température de la décharge entre 3000 °K et 4500 °K et ont conclu que ces températures sont inférieures à celles mesurées sur des décharges brûlant dans l'air libre dans les mêmes conditions.

Ishii et al [60] ont observé, qu'en polarité positive, un écoulement turbulent de l'air par convection naturelle en avant de la décharge. En polarité négative, l'air de cette région subit une convection naturelle avec un régime laminaire. D'après ces auteurs, la température

du corps de la décharge est estimée à  $2000 \, ^{\circ}K$  lorsque la polarité est négative. le courant de la décharge peut atteindre  $5 \, A$ .

Haji et al [61] ont mesuré la distribution de la température sur un isolateur plat en silicone soumis à une tension alternative. Au bout de 20 secondes d'existence, la température maximale de la décharge mesurée atteignait, voire dépassait, 1730 °K.

# 2.4.4. Conductivité de la décharge

La conductivité de la colonne de la décharge est généralement rapprochée de celle d'une décharge de type arc en supposant que le milieu est en équilibre thermodynamique . En prenant en considération la section efficace de collision des électrons avec les atomes, Flesch[62] estime la conductivité  $\sigma$  d'un arc et propose l'expression suivante :

$$\sigma = \frac{n_e e^2 \sqrt{K_b T_d}}{S_{eff} P \sqrt{2\pi m_e}} \tag{2.14}$$

Avec:

 $n_e$ : la densité des électrons;

e:la charge d'électron;

 $m_e$ : la masse d'électron;

 $S_{eff}$ : la section efficace de collision électron/atome;

 $T_d$ :la température de la décharge;

P : la pression;

 $K_b$ ,:le constante de Boltzmann.

Kuiken [63] a montré que la conductivité de l'arc est une relation entre la température et l'énergie d'ionisation des atomes du milieu composant la colonne de l'arc :

$$\sigma = \sigma_0 \cdot T_d^{(0,75)} \cdot \exp(\frac{eW_i}{2K_b T_d}) \tag{2.15}$$

où:

 $\sigma_0$  est une constante et W<sub>i</sub> est l'énergie d'ionisation des atomes.

Une autre expression de la conductivité a été proposée par Spiltzer [47] :

$$\sigma = \frac{1,53 \cdot 10^{-2} T_d^{\frac{3}{2}}}{\ln\left[1,27 \cdot 10^7 \left(\frac{T_d^2}{c}\right)^{0.5}\right]}$$
(2.16)

où C est une constante, avec  $T_d < 6000$  °K.

# 2.5. Méthode de diagnostic de l'état des isolateurs

La tension de contournement d'un isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité du dépôt polluant (degré de pollution) ainsi que de la répartition de la couche de pollution sur la surface isolante. La connaissance de ce 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.

Plusieurs techniques ont permis au concepteur de mesurer des paramètres caractérisant les phases d'accumulation de la pollution . Ces méthodes basées sur l'exposition directe des isolateurs sur le site concerné et de faire des mesures soit de façon continue soit périodique. Les informations accumulées sont traitées par différentes techniques qui sont utilisées pour avoir une meilleure décision durant le choix du profil de l'isolateur.

# 2.5.1. Méthode de la densité du dépôt de sel équivalent

C'est une méthode permettant de comparer le pouvoir conductimétrique d'une solution à une référence qui est une solution de chlorure de sodium. La densité de dépôt de sel équivalent *DDSE* est exprimée par le dépôt équivalent de chlorure de sodium en  $mg/cm^2$  de la surface de l'isolateur, qui a la même conductivité que celle du dépôt réel lorsqu'il est dissout dans le même volume d'eau déminéralisée. La *DDSE* est déterminée en prélevant un échantillon de la pollution de la surface d'un isolateur choisi et on le dissolve dans une quantité prédéfinie d'eau distillé (250 ml). La conductivité de la solution résultante, son volume et sa température, en collaboration avec la zone de surface de l'isolateur sont utilisés pour calculer la densité de dépôt de sel équivalent. A partir de la conductivité de la solution obtenue nous pouvons calculer la *DDSE*.

La mesure de la *DDSE* dans le cas de la porcelaine et du verre a été normalisée par la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) [64] :

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta} (1 - b(\theta - 20)) \tag{2.17}$$

 $\theta$ : Température de la solution (°C);

 $\sigma_{\theta}$ : Conductivité volumique mesurée à une température  $\theta^{\circ}$  C (S/cm);

 $\sigma_{20}$ : Conductivité volumique mesurée à une température 20° C (S/cm) ;

b: Constante égale à 0,01998.

$$S_a = (5.7 \times \sigma_{20})^{1.03} \tag{2.18}$$

$$DDSE\left(\frac{mg}{cm^2}\right) = \frac{S_a \cdot V}{A} \tag{2.19}$$

Avec:

 $S_a$ : Salinité  $kg/m^3$ ;

V: Volume du dissolvant (eau distillée) en  $cm^3$ ;

A:Zone de la surface d'isolateur pour le rassemblement des polluants en  $cm^2$ .

La forme de tension appliquée (continue ou alternative) sur l'isolateur influe sur la *DDSE*. Sous tension continue, l'accumulation de la pollution est plus sévère que sous tension alternative [44]. Quand la couche polluante contient des matières insolubles, il est indispensable de prendre en considération ce paramètre. Nous introduisons alors la notion de dépôt de densité de matière non soluble (*DDNS*). En effet, des travaux antérieurs ont montré que pour une *DDSE* constante et une *DDNS* variable, le courant de fuite augmente avec l'accroissement de la *DDNS* [51]. L'avantage majeur de cette méthode est qu'elle est souple et peut être utilisée à n'importe quel endroit du réseau.

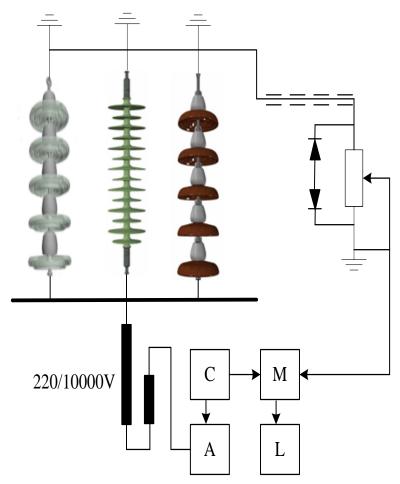
# 2.5.2. La densité du dépôt de sel non soluble DDNS

La mesure de *DDNS* peut également être couplée avec une analyse chimique des dépôts polluants. En outre, le type et la densité de ces contaminants pourraient être importants pour l'évaluation de l'hydrophobicité des isolateurs en polymère. La *DDNS* peut être mesurée en filtrant l'eau de lavage utilisée pour la mesure *DDSE* à travers des filtres en papier qui sont séchés dans un four après que la solution est drainée à travers les filtres. Le poids du composant non soluble est déterminé en soustrayant le poids du papier séché de celui du papier ré-séchés[65].

# 2.5.3. La conductance superficielle

Ce paramètre est le rapport du courant de fuite circulant à la surface de l'isolateur sur la tension appliquée. Elle caractérise l'état global de la surface isolante avant la formation des bandes sèches. La conductance superficielle résulte de l'effet de l'humidité sur les sels existant dans la couche de pollution qui recouvre l'isolateur.

Cette méthode a l'avantage de mesurer les conditions réelles de pollution sur le site mais la difficulté réside dans le choix des isolateurs et de la tension de mesure afin d'éviter la formation de bandes sèches pendant la mesure de conductance. Techniquement, cette méthode consiste à exposer une série d'isolateurs de formes différentes dans un site choisi (Figure 2.19). Les isolateurs témoins sont soumis à une tension à fréquence industrielle appliquée pendant des intervalles prédéterminés. La mesure de la conductance superficielle est faite en  $\mu S$  [41].



**Figure 2.19** Schéma bloc du circuit utilisé pour la mesure de la conductivité superficielle [41]

Avec:

A: Contrôle des manouvres;

C: Contrôle des séquences;

L: Système d'acquisition des données;

M: Mémoire analogique.

La tension est appliquée pendant trois périodes pour éviter la création de bandes sèches qui provoqueraient une distorsion du signal. La mesure est répétée chaque 15 minutes et la tension n'est appliquée que pendant la mesure. L'utilisation d'une tension inférieure à la tension de service élimine le risque du contournement et l'emploi des différents isolateurs permet de mesurer la sévérité de la pollution et de valider la méthode d'essai.

# 2.5.4. La mesure du Courant de fuite

Le courant de fuite qui circule à travers la surface de l'isolateur dépend essentiellement de la tension de service et la conductance de la couche sur la surface. La mesure de la crête du courant de fuite et son impulsion est très représentative de l'état superficiel de l'isolateur. Il a été montré que la plus forte crête du courant de fuite joue un rôle important dans l'évolution des arcs partiels. Lors de la création des zones sèches, le courant de fuite cesse d'être sinusoïdal pour n'être constitué que d'impulsions périodiques d'amplitudes variables ce qui peut renseigner sur l'éminence du contournement [44].

Il existe deux méthodes de mesure du courant de fuite qui s'écoulent vers la terre a travers une résistance de mesure ou bien un transformateur de courant haute fréquence. Ces méthodes sont:

- 1. Mesure de la crête maximale du courant de fuite.
- 2. mesure du nombre d'impulsions du courant de fuite.

La première repose sur la mesure de la plus forte crête du courant de fuite enregistrée pendant une période donnée sur un échantillon ou un isolateur réel constamment soumis à sa tension de service.

L'existence des impulsions du courant de fuite est due à l'établissement des arcs correspondant à la phase qui précède le contournement. La fréquence et l'amplitude de ces

impulsions augmentent au fur et à mesure que l'on s'approche du contournement. Le comptage d'impulsions consiste à enregistrer pendant une période donnée le nombre d'impulsions du courant de fuite qui dépassent une certaine amplitude, pour un isolateur soumis à sa tension de service [44].

L'étude expérimentale de Moula [65] consiste à récolter les différents signaux du courant de fuite et de la tension appliquée caractérisant l'état de surface d'un isolateur pour plusieurs sévérités, configurations et natures de pollutions. En premier lieu, il a caractérisé des décharges électriques par la technique de la transformée en ondelettes discrètes. En outre, deux autres approches à savoir la décomposition en paquet d'ondelettes et la représentation en scalogramme ont été développées afin d'estimer le degré de sévérité de pollution. Par ailleurs, il a procédé à une classification de la sévérité de pollution en trois classes distinctes par l'utilisation des méthodes hybrides basées sur deux techniques de traitement de signal (FFT et transformée en ondelettes) et deux méthodes de classification (SVM, RNA). Ses investigations sont complétées par une étude expérimentale sur un isolateur réel, Les résultats obtenus lors de la validation de ces modèles ne sont pas toujours fiables à 100 %.

Douar et al [66] ont présentés des résultats concernant la pollution non uniforme réalisée sur un modèle plan simulant largement l'isolateur 1512 L utilisé par la Société algérienne du gaz et de l'énergie électrique (SONELGAZ). La solution polluée a une conductivité de 1,2 mS / cm obtenue avec de l'eau distillée et du NaCl. La tension de contournement et la magnitude du courant de fuite ont été utilisées afin d'étudier le processus de contournement sur cette surface isolante. les valeurs d'angle de phase entre la tension appliquée et les signaux de courant de fuite (LC) sont calculés à l'aide du paramètre d'analyse spectrale par transformée de Fourier (FFT). Les mesures d'angle de phase indiquent que le l'impédance équivalente de l'isolateur se comporte comme un circuit RC à fort effet capacitif engendré par la bande propre pré-établie. Cet effet diminue quand les décharges électrique se produisent à un niveau de tension particulier. La transformée en ondelettes discrète (DWT) est adopté pour la décomposition du courant de fuite dans plusieurs bandes temps-fréquence. Le STD - MRA (analyse de l'écart type-résolution

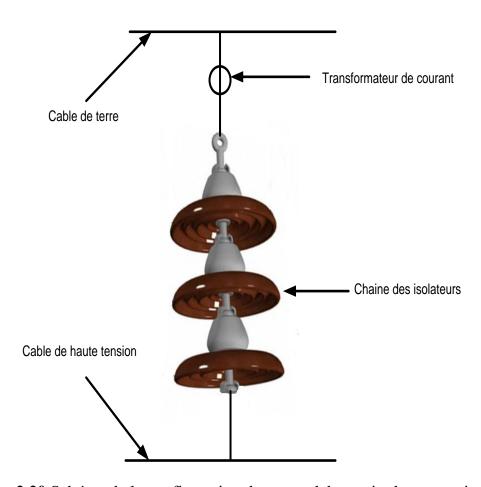
multiple) de ces bandes de fréquences est utilisé pour choisir les détails les plus intéressants qui détectent à la fois la position et l'augmentation de la largeur de la couche conductrice.

# 2.5.5. La mesure de la décharge partielle

Cavallini et al [67] ont utilisé un système de détection des décharges partielles par l'intermédiaire d'un transformateur de courant à haute fréquence (*HFCT*) come montre la figure 2.20.

Ils ont démontré que la tension d'apparition des décharges partielles diminue avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante.

La propagation de ces décharges commence à l'électrode haute tension et la surface intérieure de l'isolateur, puis sur le côté extérieur de l'isolateur. l'amplitude des *DP* augmente proportionnellement avec la tension appliquée et le niveau de pollution (figure. 2.21); ceci est concrétisé par l'élongation progressive des *DP* à travers les zones sèches.



**Figure 2.20** Schéma de la configuration de test au laboratoire haute tension [67]

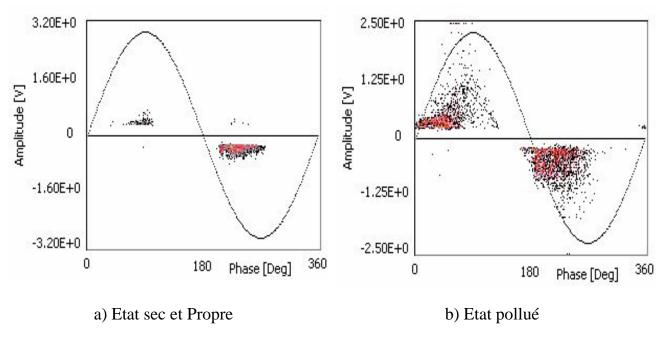


Figure 2.21 Evolution de l'amplitude des décharges partiels [68]

# 2.6. Techniques de lutte contre la pollution

L'accroissement des conditions de pollution, comme dans le cas de l'extension des zones industrielles ou urbaines, implique un changement du degré de sévérité de la pollution d'un site. L'isolateur est en état de service. Le remplacement des isolateurs est une solution trop coûteuse donc, il est préférable de recourir aux techniques de lutte contre la pollution [68]. Plusieurs méthodes sont utilisées :

# 2.6.1. Allongement de la ligne de fuite

L'allongement de la ligne de fuite totale d'une chaîne d'isolateurs, donc l'augmentation du nombre d'isolateurs, est la méthode la plus employée dans les zones à pollution moyenne. Cette technique est certes limitée car un pylône donné d'un certain type ne peut pas admettre un important supplément d'isolateurs.

# 2.6.2. Changement de la forme des isolateurs

Contrairement à la technique précédente, l'utilisation d'isolateurs plats permet de diminuer la ligne de fuite, ceux-ci ont l'avantage d'accumuler moins de pollution que les autres isolateurs et s'auto-nettoient très bien sous l'effet du vent. Ce type d'isolateurs est

destiné aux régions désertiques, où la principale source d'humidification est la condensation.

# 2.6.3. Graissage périodique

Le graissage est une autre technique couramment utilisée, elle est plus particulièrement réservée aux isolateurs des postes. Les graisses utilisées sont des composants siliconés qui en plus de leur caractère hydrophobe ont la propriété d'absorber les poussières.

La duré de vie du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité intrinsèque du produit. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de graissage est longue et coûteuse. Elle nécessite, par ailleurs, une interruption de service.

# 2.6.4. Revêtements silicones

Cette technique est relativement ancienne, elle consiste à appliquer, au moyen d'une 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.

# 2.6.5. Isolateurs composites

Les isolateurs siliconés représentent une excellente solution, pour garantir un fonctionnement optimal des lignes haute tension dans les environnements de forte pollution. Ils permettent de minimiser les courants de fuite et réduisent donc les coûts d'exploitation et de maintenance. Ils permettent en effet d'éviter le nettoyage périodique habituellement réalisé sur les isolateurs en verre, tout en conservant la fiabilité mécanique que l'isolateur en verre a démontré au cours de son existence. 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.

# 2.6.6. Nettoyage des isolateurs

Les isolateurs placés dans des sites à grande pollution sont régulièrement lavés avec de l'eau distillée. Le lavage peut avoir lieu lorsque l'installation est hors ou sous tension, le lavage hors tension, peut être utilisé de façon périodique, en particulier dans les postes. Cette méthode entraîne nécessairement des interruptions de service parfois assez longues. Le nettoyage est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans ce cas des précautions doivent être prises pour éviter que le contournement ne se produise pendant le lavage, 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.

La tension de contournement d'un isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité du dépôt polluant (degré de pollution) ainsi que de la répartition de la couche de pollution sur la surface isolante. La connaissance de ce 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.

# 2.7. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un résumé d'une étude bibliographique sur le phénomène de contournement des isolateurs pollués d'une façon non-uniforme et discontinue ainsi que les paramètres d'influence. La connaissance de ce 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.

Un nombre très important d'études relatives a été dédié au processus de contournement des isolateurs pollués, mais très peu d'informations sont disponibles sur le sujet concernant la détermination de la distribution du potentiel et du champ électrique le long des isolateurs pollués par les méthodes numériques.

Dans le chapitre suivant, nous rappellerons les principaux modèles statiques et dynamiques rapportés dans la littérature et soulignerons leur caractère à travers des équations caractérisant la tension aux bornes de la décharge ou les conditions critiques pour le contournement.

# **CHAPITRE 3**

# MODELISATION THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DU PHENOMENE DE CONTOURNEMENT

# Chapitre 03

# MODELISATION THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DU PHENOMENE DE CONTOURNEMENT

# 3.1. Introduction

De nombreux travaux ont été menés depuis une cinquantaine d'années pour comprendre les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs pollués et la prédiction de ce phénomène, et donc d'éviter la mise hors service du système. Les résultats de ces recherches ont permis d'établir des modèles mathématiques donnant les caractéristiques des décharges évoluant sur les surfaces d'isolateurs pollués jusqu'au contournement [39].

Néanmoins, ces mécanismes restent insuffisamment compris, à cause d'un grand nombre de facteurs difficiles à cerner, qui interviennent simultanément dans la génération et la propagation des décharges électriques.

Dans cette section, nous analysons des principaux modèles mathématiques pour décrire le phénomène de contournement des isolateurs sous pollution. Nous passons en revue les modèles statiques et dynamiques d'isolateurs contaminés soumis à des contraintes électriques continues et alternatives.

# 3.2. les modèles statiques de contournement

# 3.2.1. Modèle d'Obenaus

C'est Obenaus qui propose un modèle électrique de base 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 [69].

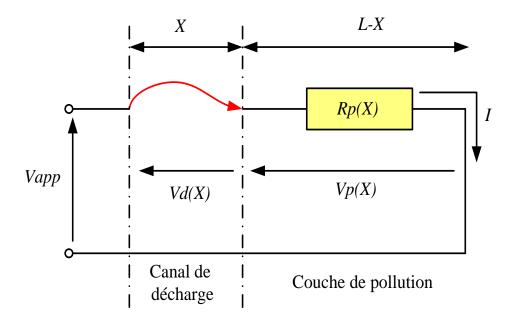


Figure 3.1 Décharge en série avec un électrolyte d'après Obenaus [69]

Son modèle basé sur un circuit électrique équivalent constitué d'un arc de longueur X en série avec une résistance  $R_p(X)$  représentant la couche polluante non court-circuitée par cet arc (Figure 3.1). Ce modèle est à la base de la grande majorité des modèles actuels de prédiction de la tension de contournement des isolateurs pollués.

L'équation électrique s'écrit comme suit :

$$V_{app} = V_d(X) + R_p(X).I (3.1)$$

Avec:

 $V_{app}$ : la tension appliquée;

 $V_d(X)$ : la tension de décharge;

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

L: la longueur de fuite de l'isolateur;

*X*: la longueur d'arc;

*I* : le courant qui traverse la couche polluée (courant de fuite).

la résistance de la couche polluée s'exprime par :

$$R_p(X) = \frac{(L - X)}{\sigma_p s_p} = \frac{\rho_p}{s_p} (L - X) = r_p (L - X)$$
(3.2)

Avec:

 $\sigma_p$ : la conductivité volumique de la pollution;

 $\rho_p$ : la résistivité volumique de la pollution;

 $s_p$ :la section de passage du courant dans la pollution;

 $r_p$ : la résistance linéique de la pollution.

D' autre part, la décharge électrique en statique est caractérisée par le champ électrique longitudinal Ed que l' on peut écrire selon la forme suivante :

$$E_d = \frac{V_d}{X} = AI^{-n} \tag{3.3}$$

où A et n sont des constantes caractéristiques de la décharge.

les valeurs de A et n seraient liées à la nature du milieu dans lequel brûle la décharge et les spécificités des conditions expérimentales (Tableau 3.1). A titre d'exemple, pour Hampton [11], la décharge brûle dans un milieu riche en vapeur d'eau, alors que pour Wilkins et Al-Baghdadi [27] la décharge brûle dans un milieu sec. D'un autre côté, Ghosh et Chatterjee [70] montrent que les conditions critiques du contournement sont étroitement liées à la nature chimique de l'électrolyte et ils proposent que les valeurs de n et A varient avec le type de sel dans la pollution comme le montre le tableau 3.2.

**Tableau 3.1** Valeur des constantes *A* et *n* selon plusieurs auteurs [70].

Auteurs	A	n	Source de tension	Milieu
Wilkins [27]	63	0,76	C.C	Air
Hampton [11]	530	0,24	Inconnue	Vapeur
Obenaus [69]	100	0,70	C.A	Air
Claverie [24]	100	0,50	C.A	Air
Sundararajan [39]	60 à 63	0,5 à 0,8	C.C	Air
Rumeli [71]	518	0,273	Inconnue	Vapeur
Farzaneh [17]	205	0,56	C.A	Givre

**Tableau 3.2** Valeur des constantes *A* et *n* selon Ghosh [70].

Electrolyte	A	n
NaCl	360	0,59
$\mathbf{CaCl}_2$	461	0,42
$\mathrm{FeCl}_2$	270	0,66
CuSO <sub>4</sub>	450	0,49

# 3.2.2. 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 [15] a proposé l'expression suivante pour la résistance de pollution  $R_p(X)$ :

$$R_p(X) = r_p(L - X) \tag{3.3}$$

Où L et  $r_p$  représentent respectivement la longueur de fuite totale et la résistance linéique par unité de longueur.

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

$$V_{app} = V_d(X) + r_p(L - X) \cdot I \tag{3.4}$$

Ou encore:

$$V_{app} = AI^{-n} . X + r_p(L - X) \cdot I$$
 (3.5)

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

$$I_c = \left(\frac{A \cdot X}{I^n}\right)^{1/n+1} \tag{3.6}$$

et:

$$X_c = \frac{L}{n+1} \tag{3.7}$$

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

$$V_c = A^{(1/n+1)} r_p^{(n/n+1)} L (3.8)$$

# 3.2.3. Modèle de Wilkins

Wilkins [26] a étudié l'effet de la concentration des lignes de courant au pied de la décharge sur la résistance de la couche de pollution (Figure 3.2). Il a ajouté un terme à la résistance de la couche de pollution représentant l'influence de la constriction des lignes de courant dans la couche au voisinage de la décharge. Cette correction s'exprime différemment selon le rapport entre la ligne de fuite L et la largeur b de l'isolateur. Ainsi, la résistance de la pollution pour une bande de pollution est donnée par :

$$R_p(X) = \frac{1}{2\pi\sigma_p} \left[ (L - X) + \frac{b}{2\pi} \ln \frac{b^2}{2\pi\alpha_d^2} \right]$$
 (3.9)

Et pour une bande large :

$$R_p(X) = \frac{1}{2\pi\sigma_p} \left[ \ln\left(\frac{2L}{\pi a_d}\right) - \ln\left(\tan g \frac{\pi X}{L}\right) \right]$$
 (3.10)

Avec:

 $a_d$ :le rayon du pied de la décharge;

b:la largeur de l'isolateur.

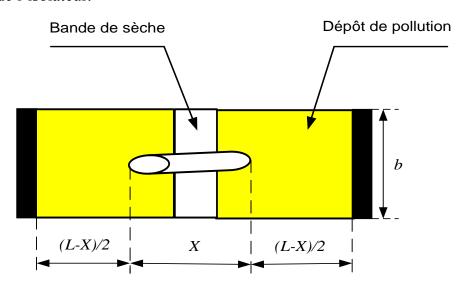


Figure 3.2 Modèle de Wilkins [26]

# 3.2.4. Modèle de Zhicheng et Renyu

Zhicheng et Renyu [72] ont démontré que la résistance de la couche de la pollution pour des isolateurs de forme complexes peut être ramenée à une résistance d'un isolateur plat(Figure 3.3). Ils proposent l'expression suivante :

$$R_p(X) = \frac{1}{\pi \sigma_p} \ln\left(\frac{L - X}{a_d}\right) \tag{3.11}$$

Où:

 $a_d$ :est le rayon du pied de la décharge;

L: la longueur de fuite de l'isolateur.

Zhicheng et Renyu supposent que la tension de contournement dépend de la conductivité superficielle au moment critique et proposent l'idée de la conductivité superficielle effective  $\sigma_e$  tel que :

$$\sigma_e = 1,25\sigma_p \tag{3.12}$$

Ils proposent une nouvelle formule pour calculer la tension de contournement :

$$V_c = A \cdot X \cdot K_r I^{-n} + \left(\frac{K_t I}{\pi \sigma_e}\right) \ln \left(\frac{L - X}{K_t R_p(X)}\right)$$
(3.13)

Avec:

 $K_r$ :le rapport entre la longueur de l'arc et la ligne de fuite sur la surface de l'isolateur,  $K_t$ :le nombre de couche de pollution en série.

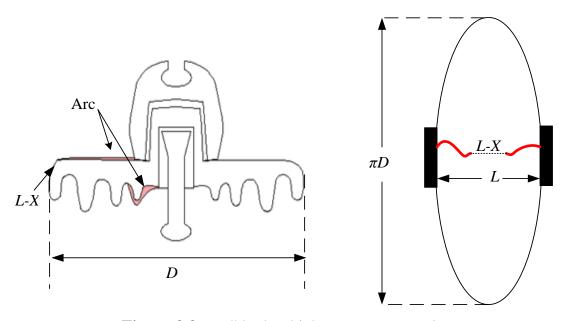


Figure 3.3 Modèle de Zhicheng et Renyu [72]

# 3.2.5. Modèle de Rao et Gopal

Rao et Gopal [73] ont constaté que l'équation de la tension d'arc trouvée par Obenaus n'est pas valable dans tous les cas. Elle est applicable juste pour une décharge de type intermédiaire entre la luminescence et l'arc. Ce type d'équation peut être contestée lorsque la décharge se réamorce périodiquement. Par ailleurs, Ces auteures ont cherché à expliquer les écarts entre les prédictions des modèles et les valeurs mesurées expérimentalement durant le contournement.

Les essais expérimentaux réalisés par ces chercheurs ont été effectués sur une plaque de forme rectangulaire, de longueur L et de largeur b. Ils sont exploité l'équation de Rieder [47] afin d'exprimer la chute de tension dans un arc de longueur X. Cette équation est particulièrement applicable aux arcs non stationnaires à courant faible. Dans ce cas, la tension d'arc  $V_d$  et le gradient  $E_d$  sont donnés par:

$$V_d = a_1 + (a_2 + X) \cdot E_d(I) \tag{3.14}$$

Et:

$$E_d(I) = a_4 \cdot \left(\frac{I}{a_3}\right)^{-3} \tag{3.15}$$

où  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ et  $a_4$  sont les constantes de la décharge, dépendant du matériau des électrodes et du milieu environnant.

Chen et Nour [74] font intervenir une correction de la résistance de la pollution en la multipliant par un facteur qui tient compte de la constriction des lignes de courant à la racine de la décharge tel que :

$$R_p(X) = \frac{(L-X)}{\pi \sigma_p} \left[ 1 + \frac{b}{2\pi (L-X)} \ln \frac{b}{2\pi a_d} \right]$$
 (3.16)

l'expression de la tension de contournement de l'isolateur pollué prend la forme :

$$V_c = a_1 + (a_2 + X) \cdot a_4 \cdot \ln\left(\frac{I}{a_3}\right)^{-3} + \frac{(L - X)}{\pi \sigma_p} \left[1 + \frac{b}{2\pi (L - X)} \ln\frac{b}{2\pi a_d}\right] \cdot I + V_e$$
 (3.17)

Avec:

 $V_c$ : la tension de contournement;

 $V_e$ : Chute de tension au niveau des électrodes;

L: la longueur de fuite de l'isolateur;

CHAPITRE03

*X*: la longueur d'arc;

*I* : le courant de fuite;

 $a_d$ : le rayon du pied de la décharge;

 $\sigma_p$ : la conductivité volumique de la pollution;

*b*:la largeur de l'isolateur.

# 3.3. les modèles dynamiques de contournement

L'étude du phénomène de contournement a été souvent effectuée en utilisant des modèles statiques, alors que plusieurs paramètres électriques, thermiques et géométriques impliqués dans ce phénomène évoluent dans le temps. Afin de se rapprocher le plus possible de la réalité et parer à cet handicap, de nouveaux modèles, tenant compte de 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.

# 3.3.1. Mécanisme de propagation

Dans le phénomène de propagation de l'arc électrique, il existe deux modes principaux :

# 3.3.2. Propagation par ionisation

L'étude de Wilkins et Baghdadi [27], décrit des essais effectués sur le contournement avec des modèles simples, en vue de mieux comprendre le mécanisme de ce phénomène. Une proposition pour le mécanisme de la propagation d'arc a été développée qui peut se nommer élongation de décharge par ionisation et formation successive de racine. Ces résultats montrent que la propagation dépend du gradient de tension immédiatement en face de la pointe de décharge; la figure 3.4 explique ce phénomène.

La théorie propose que l'élongation soit produite par des nouveaux chemins d'ionisation créés à la tête de la décharge. La probabilité de l'ionisation immédiatement devant la racine de la décharge est élevée, en raison du haut gradient de température et au gradient élevé de tension dans cette région.

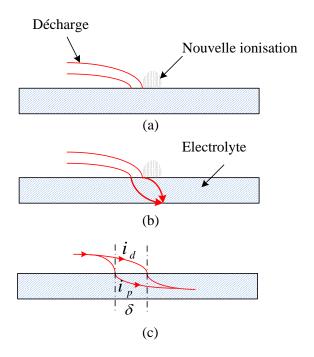
Si l'ionisation est suffisante, un courant peut couler par le chemin ionisé à la tête de la décharge, comme est montré en figure 3.4 b. La conductivité du nouveau chemin augmente avec le courant, alors que la conductivité du chemin précédent d'électrolyte demeure constante, et ainsi le courant total se dévie graduellement au nouveau chemin, produisant une élongation  $\delta$  de la décharge. Cette explication référait à une élongation autant qu' une étape discrète  $\delta$ . En fait, c'est un processus continu régulier.

L'effet de ce mécanisme sur le courant critique peut être estimé, en utilisant la représentation simplifiée en figure 3.4. Ils ont supposé qu'un nouveau chemin du courant  $i_d$  a été établi immédiatement à la tête de la décharge existante, et celle-ci est en parallèle avec la couche de pollution résistive, qui porte un courant  $i_p$ , le courant total devient :

$$i = i_d + i_p \tag{3.18}$$

La chute de tension dans chaque chemin parallèle doit être identique

$$A \cdot i_d^{-n} \cdot \delta = i_p \cdot r_p \cdot \delta \tag{3.19}$$



(a) : Ionisation sur la tête de la pointe de décharge ;

(b): Chemins possibles du courant;

(c) : Modèle d'analyse simplifié.

**Figure 3.4** Mécanisme propagation par ionisation selon Wilkins [27]

Après l'élimination des équations (3.18) et (3.19), nous obtenons :

$$i = \frac{A}{r_p} \cdot i_d^{-n} + i_d \tag{3.20}$$

Nous constatons que le minimum se produit quand:

$$i_d = n^{\frac{1}{n+1}} \cdot \left(\frac{A}{r_p}\right)^{\frac{1}{n+1}} \tag{3.21}$$

La valeur minimale de *i* est:

$$i_{min} = n^{\frac{1}{n+1}} \cdot \left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot \left(\frac{A}{r_p}\right)^{\frac{1}{n+1}}$$
 (3.22)

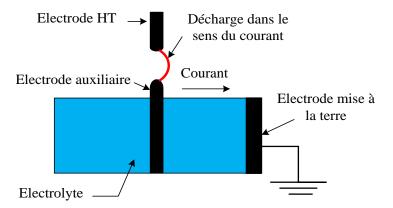
Si le courant est plus faible que  $i_{min}$ , le chemin des décharges parallèles est instable, et par conséquent la décharge parallèle va s'éteindre.

Par conséquent, le nouveau chemin de décharge peut se développer aux dépend du chemin parallèle de pollution seulement si le courant total est plus grand que  $i_{min}$ .

# 3.3.3. Propagation par force électrostatique

A partir des observations faites sur un canal d'électrolyte, Rahal [75] 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 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 1.4). Une fois les conditions critiques satisfaites, la décharge se déplacera alors vers l'électrode de masse.

Flazi [76] 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 du 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.



**Figure 3.5** Courbure de décharge dans la direction de la circulation du courant [76]

# 3.3.4. 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.

# 3.3.4.1. Critère de Hampton

A partir d'une étude expérimentale, Hampton [11] 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  $E_{arc}$ :

$$E_{arc} < E_p \tag{3.23}$$

# 3.3.4.2. Critère de Hesketh

En supposant 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 [77] a établi un critère de propagation de l'arc, exprimé par le relation:

$$\frac{dI}{dx} > 0 \tag{3.24}$$

Avec:

*I* : Courant d'arc ;

x: longueur d'arc.

# 3.3.4.3. Critère de Wilkins

En considérant qu'un système se place dans la configuration qui lui permet de dissiper le maximum d'énergie, Wilkins [26] a généralisé la condition énoncée par Hesketh et établi un critère de propagation utilisant la puissance *P* fournie par la source:

$$\frac{dP}{dx} > 0 \tag{3.25}$$

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.

# 3.3.4.4. Critère de Anjana et Lakshminarasimha

En assimilant l'arc à une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, Anjana et al [78] ont établi une condition nécessaire à la propagation de l'arc, basée sur des considérations énergétiques: l'énergie totale fournie  $T_{totale}$  doit être supérieure ou égale à l'énergie  $T_{th}$  nécessaire pour maintenir l'arc à sa température:

$$T_{totale} \ge T_{th}$$
 (3.26)

# 3.4. Modèles dynamiques

# 3.4.1. Modèle de Rizk et Nguyen

Pour caractériser la dynamique de l'arc pour le cas continu, Rizk et Nguyen ont considéré une résistance d'arc qui varie selon l'équation de Mayer [79]:

$$\frac{dr_{arc}}{dt} = \frac{r_{arc}}{\tau} - \frac{r_{arc}^2 I^{n+1}}{\tau A} \tag{3.27}$$

Avec:

 $\tau$ : constante du temp de l'arc égale à 100  $\mu$ s;

$$n = 0.8$$
 et  $A = 60$ .

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

$$\delta C_p h \frac{dT}{dt} = \frac{R_p(x)I^2}{S(x)} - \delta H \frac{dh_e}{dt} - \left(H_c + \delta C_p \frac{dh_w}{dt}\right) (T - T_a)$$
(3.28)

h: L'épaisseur de la couche de la pollution ;

 $\delta$ : La masse volumique de l'électrolyte ;

H: L'enthalpie (2260J/g);

 $H_c$ : Coefficient de transfert de la chaleur par convection (250 $\mu$ W/cm<sup>2</sup>/C°);

 $C_p$ : Chaleur spécifique sous pression constante ;

 $T_a$ : Température ambiante ;

S(x): 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  $T=100\,^{\circ}\text{C}$  de à partir de:

$$\frac{dh_e}{dt} = \frac{[R_p(x)I^2/S(x) - H_c(T - T_a)]}{\delta[H + C_p(T - T_a)]}$$
(3.29)

#### 3.4.2. Modèle de Dhahbi et Beroual

Dhahbi et Beroual [80] considèrent que la décharge se présente comme un canal cylindrique de résistance  $R_d$  en série avec une couche de pollution d'impédance  $Z_p(R_p//C_p)$  (figure 3.6). Le choix de cette représentation est justifié par le fait que le phénomène de contournement dépend essentiellement des caractéristiques surfaciques de la couche de pollution. Les expressions de  $R_p$  et  $C_p$  peuvent être déterminées par :

$$R_p = \rho_p \frac{(L - X)}{S_p} \tag{3.30}$$

$$C_p = \varepsilon_p \frac{S_p}{(L - X)} \tag{3.31}$$

D'autre part, en considérant que l'arc est un canal cylindrique de section S, de longueur X et de résistivité  $\rho_d$ , sa résistance  $R_d$  sera :

$$R_d = \rho_d \frac{X}{S} \tag{3.32}$$

D'où l'expression de l'impédance équivalente :

$$Z_{eq} = R_d + \frac{R_p}{1 + j\omega R_p C_p} \tag{3.33}$$

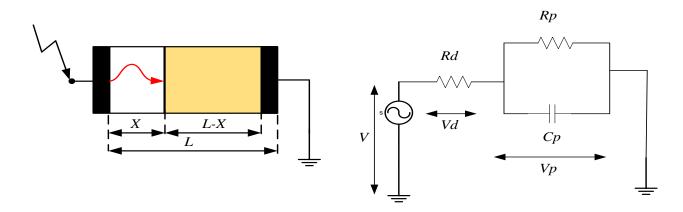


Figure 3.6 Schéma d'un isolateur pollué et son modèle électrique équivalent [80]

Ce modèle permet de calculer la tension de contournement critique, le temps de contournement et la vitesse de propagation, ainsi que le suivi de l'évolution des paramètres caractéristiques de l'arc (courant d'arc, vitesse de propagation, chute de tension dans l'arc, tension à la tête de l'arc et charge injectée dans l'intervalle interélectrode), pour une tension donnée pendant un intervalle de temps fixé à l'avance.

#### 3.4.3. Modèle de Anjana et Lakshminarasimha

Anjana et al [81] ont proposé un modèle dynamique basé sur l'équation de Mayr et sur le modèle statique d'Obenaus. 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:

$$W_{th} = \frac{3}{2}KTM \tag{3.34}$$

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 [81] 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  $W_{th}$  est donné par l'expression suivante:

$$W_t = (E_{arc} I_{arc} - P_0) \Delta T \tag{3.35}$$

 $E_{arc}$  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  $\Delta V_s$  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:

$$v = \mu E_{arc} \tag{3.36}$$

où  $\mu$  est la mobilité de l'arc.

On en déduira, grâce au pas de temps  $\Delta t$ , la variation de la longueur d'arc  $dx(dx = v \Delta t)$ .

Si la nouvelle valeur de la longueur d'arc x + dx atteint la dernière bande, il y a contournement, sinon le temps est incrémenté de  $\Delta t$  et les calculs sont repris depuis le début.

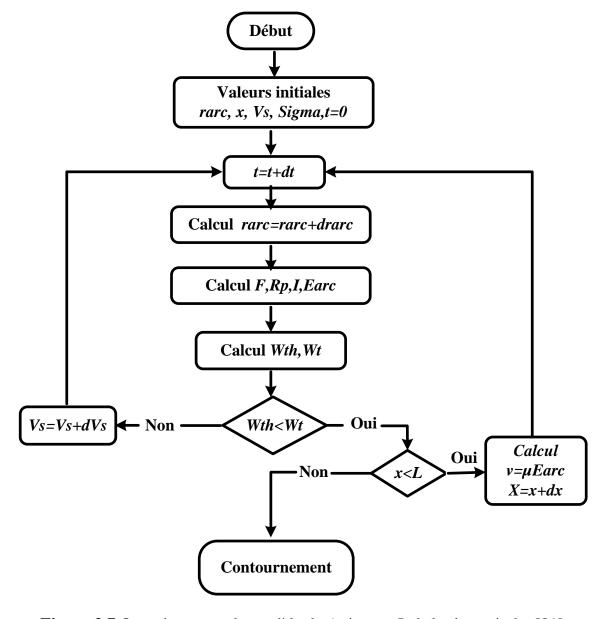


Figure 3.7 Organigramme du modèle de Anjana et Lakshminarasimha [81]

Les différentes étapes du programme de calcul sont données sur l'organigramme illustré par la figure 3.7.

#### 3.4.4. Modèle de Sundararajan et Gorur

Ce modèle est presque identique à celui de Anjana et Lakshminarasimha [81], la seule différence réside au niveau du critère de propagation utilisé. Les auteurs dans ce cas ont exploité le critère de Hampton ( $E_{arc} < E_p$ ) pour le cas continu. Concernant le gradient de tension dans la couche de pollution, ces chercheurs utilisent la formule suivante :

$$E_p = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{1}{n+1}} \tag{3.37}$$

 $r_p$ : la résistance de pollution linéique ;

$$n = 0.5$$
 et  $A = 63$ .

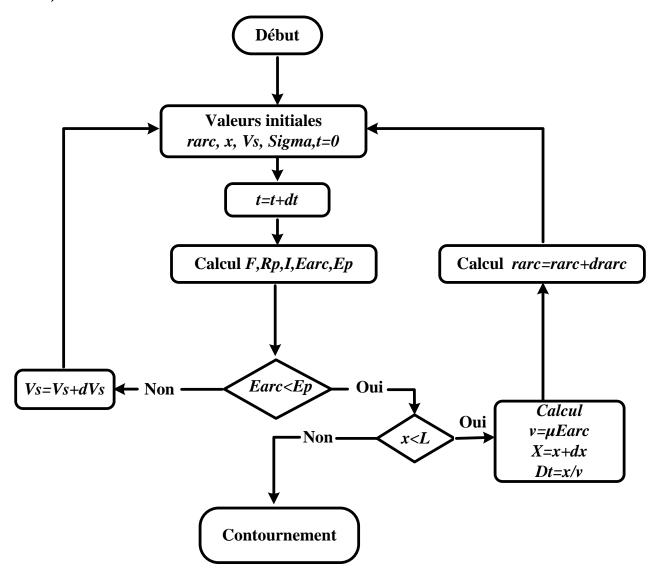


Figure 3.8 Organigramme du modèle de Sundararajan et Gorur [81]

La valeur de  $E_p$  utilisé par Sundararajan et Gorur est en fait celle de la contrainte critique :

$$E_c = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{1}{n+1}} \tag{3.38}$$

L'ensemble de ces équations est résumé dans l'organigramme indiqué dans la figure 3.6.

Sous tension alternative, le phénomène d'entretien de l'arc par le mécanisme de la rupture diélectrique a été décrit par Rizk [68]. Il a mis en évidence l'expression de la rigidité diélectrique de l'espace résiduel et établi une relation entre trois paramètres, à savoir, la tension de contournement minimale  $U_c$  nécessaire à l'entretien de l'arc, la résistance de pollution linéique  $r_p$  et la longueur de fuite L celle-ci est de la forme :

$$\frac{V_c}{L} = 23r_p^{0.4} \tag{3.39}$$

#### 3.4.5. Modèle d'Aydogmus et Cebeci

Aydogmus et Cebeci [12] ont été les premiers à employer la méthode des éléments finis dans le but d'élaborer un modèle dynamique de prédiction de la tension de contournement des isolateurs pollués. En effet, dans leur modèle, les auteurs se servent de la méthode des éléments finis pour calculer le champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur (Figure 3.9a) et le courant de fuite circulant dans la couche de pollution qui le recouvre. Le calcul du champ électrique s'effectue sur un modèle axisymétrique de l'isolateur (Figure 3.9b), tandis que la détermination du courant de fuite s'établit sur la surface de l'isolateur dépliée (voir figure 3.9) qui est considérée comme une surface conductrice pour les besoins de la simulation.

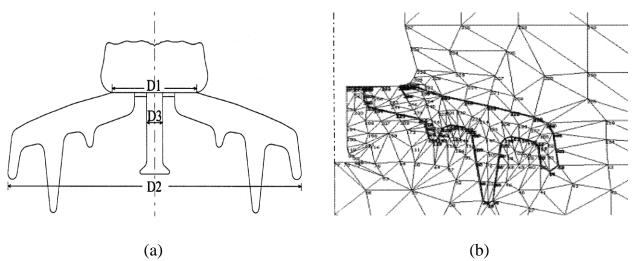


Figure 3.9 Isolateur étudié (a) et son modèle discrétisé par la MEF (b) [12]

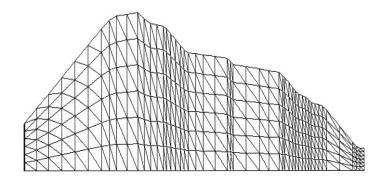


Figure 3.10 Surface dépliée correspondante à l'isolateur étudié [12]

Les composantes x et y du champ sont données comme suit:

$$E_x = \frac{\partial V}{\partial x} \tag{3.40}$$

$$E_{y} = \frac{\partial V}{\partial y} \tag{3.41}$$

A partir des équations ci-dessus, la magnitude de *E* est:

$$|\vec{E}| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \tag{3.42}$$

Le courant de fuite  $I_k$  dans cette région peut être exprimé comme suit:

$$I_k = \sum_{k=1}^m \frac{V_k}{r_k}; \quad (k = 1, 2, 3, \dots m)$$
 (3.43)

Avec:

*k*:le nombre de triangles adjacents à la partie de la couche de pollution à côté de l'électrode mise à la terre;

 $r_k$ : la résistance de chaque élément triangulaire;

 $V_k$ : la tension moyenne de chaque élément triangulaire.

Pour chaque niveau de tension appliquée, si le critère de Hampton est vérifié entre chacun deux nœuds voisins présents sur la ligne de fuite du modèle géométrique discrétisé par la méthode des éléments finis (figure 3.9), un arc est créé entre ces deux nœuds.

La phase suivante consiste à accroître la tension appliquée avec les nouvelles conditions aux limites imposées sur les nœuds et à recalculer, par la suite, le champ électrique entre deux

nœuds voisins pour valider ou non le critère d'Hampton. Ce processus de calcul, qui est poursuivi jusqu'au contournement total de l'isolateur, c'est-à-dire lorsque la longueur de l'are électrique est égale à la longueur de la ligne de fuite de l'isolateur.

#### 3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux modèles statiques et dynamiques existants dans la littérature. D'après cette analyse, il est clair que l'étude du processus de contournement d'une isolation contaminée a été faite durant plusieurs décennies dans différents laboratoires et sur site à travers le monde.

Pour conclure ce chapitre consacré en grande partie à la présentation des modèles actuels de prédiction de la tension de contournement, il convient de souligner que :

- ✓ La majorité des modèles mathématiques, qu'ils soient statiques ou dynamiques, est basée sur le modèle d'Obenaus.
- ✓ Les modèles statiques, permettant la prédiction des différents paramètres caractérisant l'évolution de la décharge électrique sur les surfaces isolantes, traitent le phénomène de contournement sous un aspect global en lui associant un critère d'extension. Ils nous donnent une image à un temps fixe reflétant une situation donnée. Par ailleurs, les modèles dynamiques représentent le mécanisme de contournement, qui tient compte des changements instantanés des paramètres caractérisant l'arc électrique.
- ✓ Les principaux critères de propagation de la décharge rencontrés dans la littérature ont été établis sur la base de conditions faisant intervenir soit l'impédance vue des électrodes, soit le courant, soit le champ électrique, soit la puissance ou encore l'énergie fournie par la source. Le critère d'Hampton (critère de champ électrique) est le plus souvent utilisé dans les modèles dynamiques prédictifs.

## **CHAPITRE 4**

# MODELE DYNAMIQUE PREDICTIF DES CARACTERISTIQUES DE L'ARC ELECTRIQUE

## Chapitre 04

### MODELE DYNAMIQUE PREDICTIF DES CARACTERISTIQUES DE L'ARC ELECTRIQUE

#### 4.1. Introduction

De nombreux travaux ont été menés depuis plusieurs décennies pour comprendre les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs pollués et se munir d'outils permettant la prédiction de ce phénomène, et donc d'éviter la mise hors service du système. Les résultats de ces recherches ont permis d'établir des modèles donnant les caractéristiques des décharges évoluant sur les surfaces d'isolateur et ce jusqu'au contournement.

La performance d'un isolateur sous une contrainte continue est plus critique car la décharge produite après formation de bandes sèches persiste plus longtemps que dans le cas d'une contrainte alternative. Certains chercheurs [15, 34] ont montré que la tension de contournement, pour les mêmes conditions, est plus faible en tension continue qu'en tension alternative. Ceci est dû principalement à l'attraction des particules polluantes dans l'air, induite par la force électrostatique unidirectionnelle et qui est plus importante en continu qu'en alternatif. Par ailleurs, l'absence du zéro en tension continue, contribue également, à l'abaissement de la tension de contournement.

Malgré que le paramètre temps intervient dans le phénomène de propagation de l'arc électrique, l'étude de ce phénomène a été effectuée en grande partie en utilisant des modèles statiques [42]. Afin de se rapprocher le plus possible de la réalité, nous présentons dans ce chapitre, un modèle dynamique permettant de prédire le comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension continue. Ce modèle utilise la formulation d'Obenaus et le critère de Hampton pour la propagation de la décharge.

Le modèle permet d'estimer la tension de contournement et le temps au contournement ainsi que des variations instantanées de certains paramètres importants à

savoir le courant de fuite, la vitesse de propagation, le temps au contournement, la résistance de la pollution, le rayon du canal d'arc, la résistance de ce canal, sa longueur.

#### 4.2. Objectif de ce travail

Nombre de projets ont été réalisées et de nombreuses études ont été publiées partout dans le monde concernant le phénomène de contournement des isolateurs pollués. Volat et al. [82] et Tavakoli [83] ont répliqué avec succès pour les décharges partielles sur des surfaces de glace. En tension alternative, Volat et al. ont appliqué ce modèle d'arcs multiples sur une plaquette isolante en utilisant la méthode des éléments finis, tandis que l'arc était étudié selon le même modèle par Tavakoli et d'excellents résultats ont été obtenus. Slama et al.[28] ont étudié l' influence de la non uniformité linéaire de la couche de pollution sur le courant critique et la tension de contournement sous tension d'impulsionnelle. Chihani et al. ont utilisé le modèle électrothermique sur une plaquette polluée ce qui a permis les modifications instantanés de la caractéristique de décharge telles que le courant de fuite, la température de décharge et la résistance d'arc [84]. Toutes ces études ont utilisé un modèle d'isolateur plat en forme d'une plaque et les paramètres d'arc trouvés dans la littérature pour simplifier l'étude. Cependant, ces valeurs diffèrent d'un auteur à un autre.

Il est très important d'étudier la distribution de tension, le champ maximal et l'intensité de claquage sur une surface isolante polluée. Pour mieux comprendre le mécanisme de propagation de la décharge, nous avons effectué un travail expérimental suivi d'une étude de simulation afin de déterminer la distribution du champ électrique de la décharge dans des conditions critiques de contournement. Les résultats de la simulation obtenus par l'utilisation des tensions de contournement expérimentales permettent de déduire que le mécanisme d'élongation en décharge est une décomposition ordinaire de l'air entre deux électrodes métalliques. Le contournement est donc possible si le critère est vérifié, c'est-à-dire si la distribution du champ électrique le long de la distance de fuite est suffisante pour l'allongement de la décharge.

#### 4.3. Modèle de l'isolateur

Un isolateur capot et tige en verre destiné aux chaînes de suspension et d'ancrage pour lignes de distribution a été utilisé. l'isolateur est de type *U*40 comme le montre la

figure 4.1. Il est composé d'un capot en fonte galvanisé, d'un élément diélectrique en verre trempé, d'une tige en acier galvanisé, assemblés par ciment, et d'une goupille en acier inoxydable. Le diamètre D de l'isolateur est de 175 mm, la ligne de fuite est de 190 mm et le pas P est de 110 mm. Les différents caractéristiques de l'isolateur sont résumé dans le tableau 4.1 [85].

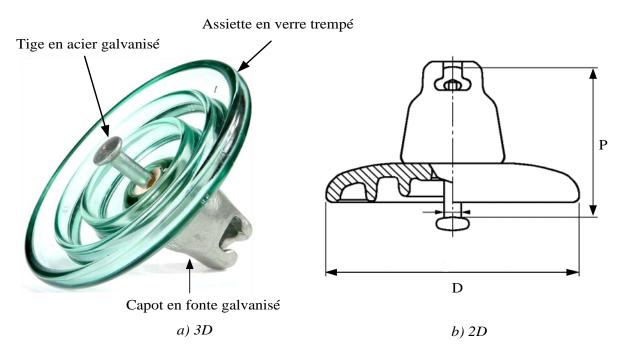


Figure 4.1 Représentation schématique de modèle d'isolateur *U*40 [86]

Tableau 4.1 Caractéristiques de l'isolateur U40

	Pas (P) mm	110
Caractéristiques	Diamètre (D) mm	175
dimensionnelles	Ligne de fuite mm	190
	Tension tenue a fréquence industrielle à sec $(kV)$	50
Caractéristiques électriques	Tension tenue a fréquence industrielle Sous pluie $(kV)$	32
	Tension de tenue au choc de foudre à sec $(kV)$	70
	Tension de perforation dans l'huile $(kV)$	110
Caractéristiques	Poids net approximatif $(kg)$	
emballage	Nombre d'isolateurs par caisse en bois	6

#### 4.4. Dispositif expérimental

Le dispositif que nous avons utilisé est montré sur la figure 4.2. L'électrode haute tension en cuivre est connectée au dessus du capot de l'isolateur et l'électrode de masse est reliée à la tige. Pour reproduire la pollution qui couvre la surface de l'isolateur, nous avons préparé des solutions électrolytiques à base de NaCl et d'eau distillée.

Pour mesurer la tension critique de contournement, nous avons utilisé le montage expérimental qui est représenté dans la figure 4.3. Il est constitué d'un générateur haute tension continue de  $120\,\mathrm{kV}$ , d'un panneau de contrôle constitué d'un voltmètre pour enregistrer la tension de contournement, d'un variateur de tension, et d'un condensateur de lissage  $C = 10\,\mathrm{nF}$ , d'une résistance d'amortissement  $Ra = 100\,\mathrm{k}\Omega$ , un isolateur de suspension est connecté aux bornes d'un diviseur de tension résistif  $(R_0,Ru)$ . La visualisation de la décharge de propagation électrique le long de la surface de l'isolant est effectuée par un appareil photo numérique CANON EOS 80D. Le système équipé d'un capteur CMOS APS-C 24,2 MP nouvellement développé. Durant nos expériences, nous chargeons le condensateur à une tension U. Si la tension appliquée est inferieure à la tension critique Ucri, la décharge évolue vers la masse puis s'éteint. Si cette tension est supérieure ou égale à Ucri, le déplacement de la décharge sur la surface de l'électrolyte se poursuit de plus en plus rapidement jusqu'au contact de l'électrode de masse(Figure 4.3)

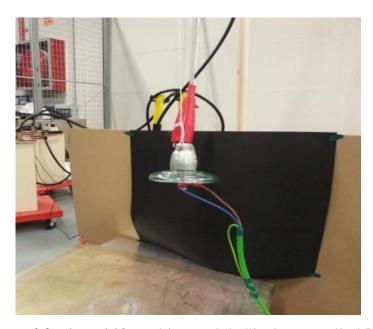


Figure 4.2 Dispositif expérimental de l'isolateur pollué *U*40

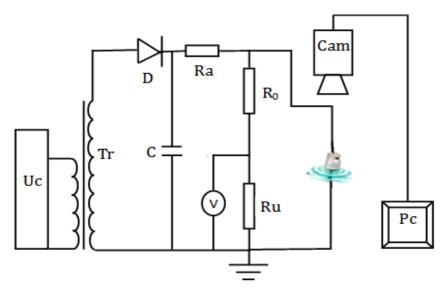
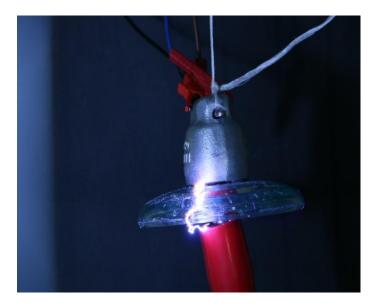


Figure 4.3 Schéma de mesure de la tension de contournement de l'isolateur pollué



**Figure 4.4** Contournement de l'isolateur testé dans le cas polluée ( $\sigma_p = 30 \mu S$ )

#### 4.5. Modèle mathématique de contournement

Le processus de contournement des isolateurs contaminés a été étudié par plusieurs chercheurs(Figure 4.4). Le modèle le plus simple est celui développé par Obenaus[69], qui consiste en un arc traversant la zone sèche et une résistance équivalente à la zone humide (Figure 4.5). Les paramètres de ce circuit concernent la tension totale entre électrodes, la résistance de pollution et les caractéristiques du canal d'arc à savoir sa tension, sa résistance, sa conductivité, son rayon, sa longueur.

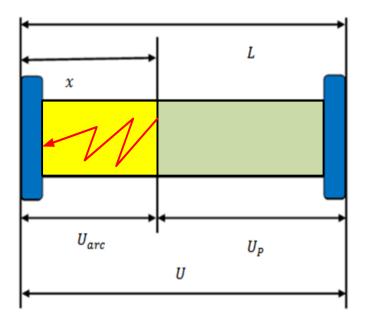


Figure 4.5 Schéma de base d'un isolateur pollué [69]

En négligeant la chute de tension cumulée aux électrodes, de l'ordre de 840 V selon Wilkins [26], l'équation du circuit est donnée par:

$$U = U_{arc} + U_P \tag{4.1}$$

$$U_P = R_P \cdot I \tag{4.2}$$

$$U_{arc} = R_{arc} \cdot I \tag{4.3}$$

Avec:

*U*: La tension appliquée, en [kV];

 $U_{arc}$ : La tension de la décharge, en [kV];

 $U_P$ : La tension aux borne de la couche polluante, en [kV];

 $R_P$ : La résistance de la couche polluante, en [k $\Omega$ ];

 $R_{arc}$ : La résistance de l'arc, en [k $\Omega$ ];

*I*: Le courant de fuite, en [A].

Pour représenter la pollution, nous avons adopté le modèle linéaire, car c'est le modèle le plus utilisé. Il considère une répartition uniforme de la pollution et exprime, par conséquent, la résistance de la couche de pollution varie linéairement avec la longueur de fuite [42, 79] :

$$R_P = r_P(L - x) \tag{4.4}$$

 $r_P$ : La résistance linéique, en [k $\Omega$ /m];

L: La longueur de fuite totale, en [m];

x: La longueur de l'arc, en [m].

La résistance linéique de la pollution peut être formulée par :

$$r_P = \frac{1}{\pi \cdot \sigma_p \cdot r_{iso}} \tag{4.5}$$

Où  $\sigma_p$  la conductivité superficielle de la pollution et  $r_{iso}$  le rayon effectif de l'isolateur.

A partir des équations (4.4) et (4.5), la résistance de la pollution peut être formulée par :

$$R_P = \frac{(L - x)}{\pi \cdot \sigma_p \cdot r_{iso}} \tag{4.6}$$

Par ailleurs, la relation approximative de la tension aux bornes de l'arc est donnée, selon Obenaus [69], par l'expression empirique suivante :

$$U_{arc} = \frac{A \cdot x}{I^n} \tag{4.7}$$

A et n sont les constantes de l'arc électrique.

la résistance  $R_{arc}$  du canal de cet arc peut s'écrire sous la forme suivante :

$$R_{arc} = \frac{A \cdot x}{I^{n+1}} \tag{4.8}$$

Sachant que la résistance linéique  $r_{arc}$  de ce canal est donnée par :

$$r_{arc} = \frac{A}{I^{n+1}} \tag{4.9}$$

A partir des équations (4.4) et (4.7), La tension appliquée U aux bornes de l'isolateur est exprimée par :

$$U = A \cdot x \cdot I^{-n} + (L - x) \cdot r_p \cdot I \tag{4.10}$$

Dans les conditions critiques de propagation de la décharge le long de la surface de l'isolateur pour provoquer le contournement la tension devient :

$$U_c = A \cdot x_c \cdot I_c^{-n} + (L - x_c) \cdot K \cdot r_p \cdot I_c \tag{4.11}$$

le coefficient K a été ajouté pour valider l'équation (4.10) à l'instant critique du contournement. Wilkins [26] a introduit ce coefficient pour modifier la résistance de la couche de pollution  $R_p$  en tenant compte la concentration des lignes de courant au pied de la décharge. La formule simplifiée pour calculer K est [87]:

$$K = 1 + \frac{n+1}{2 \cdot \pi \cdot F \cdot n} \cdot \ln\left(\frac{L}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot F}\right) \tag{4.12}$$

Où R est le rayon du pied d'arc, donné par:

$$R = 0.469 \cdot (\pi \cdot A \cdot Dm \cdot \sigma_p)^{\frac{1}{(2n+2)}}$$
(4.13)

F est le facteur de forme de l'isolateur et qui s'exprime par :

$$F = \int_0^L \frac{dl}{\pi \cdot D(l)} \tag{4.14}$$

A l'état critique, la longueur de l'arc prend la valeur:

$$x_c = \frac{L}{A+1} \tag{4.15}$$

Le courant critique sera calculé par la relation suivante:

$$I_c = (\pi \cdot A \cdot Dm \cdot \sigma_p)^{\frac{1}{(n+1)}} \tag{4.16}$$

et la tension critique par:

$$U_c = \frac{A}{n+1} (L + \pi \cdot D_m \cdot F \cdot K \cdot n) (\pi \cdot A \cdot Dm \cdot \sigma_p)^{\frac{-n}{(n+1)}}$$
(4.17)

où  $D_m$  est le diamètre maximal de l'isolateur et  $\sigma_p$  est la conductivité surfacique qui est donnée en fonction de la densité de dépôt de sel équivalente C en  $(mg/cm^2)$  par :

$$\sigma_p = (369,05 \cdot C + 0.42) \cdot 10^{-6} \tag{4.18}$$

L'équation (4.17) représente la valeur critique de la tension de contournement en fonction des paramètres de l'isolateur  $(D_m, F, K \text{ et } L)$ , les constantes de l'arc A, n et de la conductivité surfacique. La tension critique de contournement peut être calculée après la détermination des constantes de l'arc (A, n). Ces derniers sont les paramètres inconnus de l'équation(4.17).

la variation des constantes d'arc est due à leur dépendance de plusieurs facteurs tels que les conditions atmosphériques, le type de tension et la constitution de la surface électrolytique où l'arc brûle. Le tableau 4.2 présente certaines valeurs de *A et n* qui sont souvent utilisées dans la littérature.

Cette étude propose une solution basée sur les algorithmes génétiques pour obtenir la meilleure série possible de valeurs de paramètres des constantes d'arc *A et n*.

**Tableau 4.2** Valeurs des constantes d'arc *A et n* selon de nombreux auteurs

Auteurs	A	n
Wilkins [26]	63,00	0,760
Obenaus [69]	100,00	0,700
Hampton [11]	530,00	0,240
<b>Ghosh</b> [70]	360,00	0,590
Farzaneh [17]	208,90	0,449
<b>Gonos</b> [87]	124,80	0,409

Tableau 4.3 Valeurs expérimentales

Type d'isolateur	Conductivité surfacique $\sigma_p(\mu S)$	Tension de contournement mesurée $U_{cm}(kV)$
	5	16,0
	10	13,2
•	15	12,0
<i>U</i> 40	20	11,0
D=175mm	25	10,6
H = 110mm	30	10,2
,	35	10
,	40	9,6
	45	9,3
	50	9,0

La validité des paramètres prédits est ensuite vérifiée en comparant les résultats prédits aux résultats expérimentaux présentés dans le tableau 4.3.

Le problème d'optimisation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{N} (U_c(A, n) - U_{cm})^2$$
 (4.19)

Où  $\varepsilon$  est la somme des erreurs quadratiques, N indique le nombre d'itérations,  $U_c(A, n)$  et  $U_{cm}$  sont respectivement la tension calculée et la tension de contournement mesurée.

Le but des algorithmes génétiques (GA) est d'optimiser une fonction objective sur l'espace de recherche. Pour cela, une population d'individus évolue selon le darwinisme artificiel (évaluation, sélection, reproduction) en fonction de l'aptitude  $\varepsilon$  de chaque individu [88]. L'aptitude est directement liée à la valeur de la fonction objective de cet individu. Les opérateurs d'évolution appliqués à la population permettent de créer de nouveaux individus (croisement et mutation) et de sélectionner les individus de la population qui survivront (sélection et remplacement). Pour l'identification des paramètres du modèle de tension de contournement, l'individu est l'ensemble des paramètres inconnus et, par conséquent, chaque gène coïncide avec un paramètre. Le programme utilisait une implémentation avec un codage réel, cela fonctionne avec une population de 20 chromosomes générée aléatoirement. Il génère 20 valeurs aléatoires pour la constante d'arc A (0 < A < 500) et 20 aléatoires pour la constante d'arc A (0 < A < 500) et 20 aléatoires pour la constante d'arc A (0 < A < 500) et 20 aléatoires

Les paramètres choisis de l'algorithme sont résumés dans le tableau 4.4. Les données expérimentales  $U_{cm}$  présentées dans le tableau 4.3 sont appliquées dans l'équation (4.19), aboutissant ainsi à un ensemble d'équations simultanées à deux inconnues A et n.

Tableau 4.4 Parametres de l'algorithme génétique

Taille de la population	Maximum generation	Pc	Pmut
20	200	0,75	1%

La figure 4.6 montre les variations des constantes du modèle en fonction du nombre maximal de générations. Dans cette étude, le critère d'arrêt est celui qui permet d'arrêter le processus. L'un des critères simples souvent utilisé est lorsque le nombre maximal de générations est atteint ( $Gen\ max=200$ ), ce qui donne le couple "Aopt=162,52", "nopt=0,24" optimum.

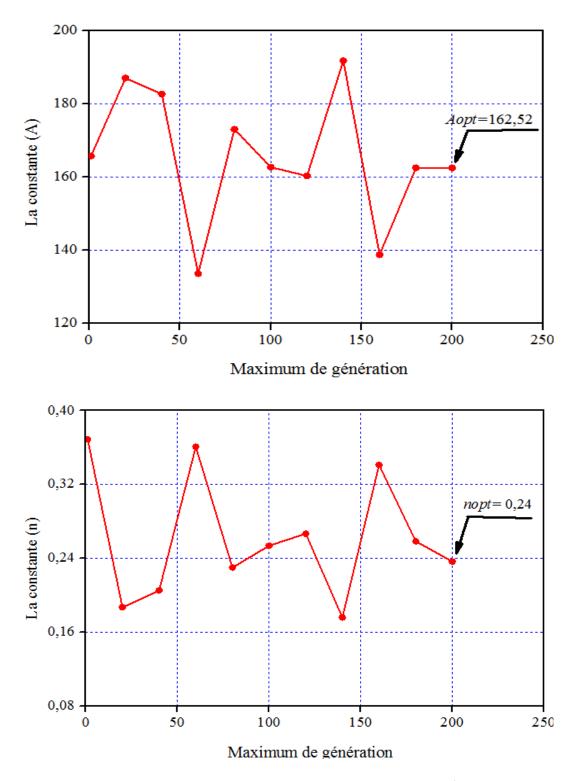


Figure 4.6 Variation des valeurs optimales des constantes d'arc A et n

La figure 4.7 présente la tension de contournement calculée en utilisant les constantes A et n obtenues par rapport à celle mesurée en fonction de la conductivité  $\sigma_p$ . En examinant les résultats obtenus, on peut conclure que l'algorithme génétique présente une bonne approximation des données expérimentales. Il est à signaler que la tension de contournement

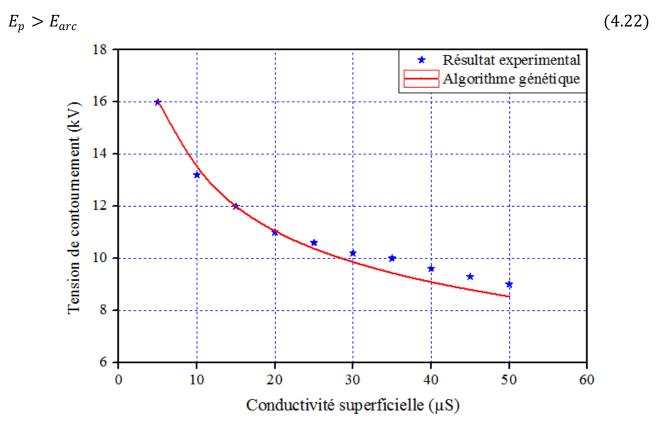
diminue avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante. Ceci est évident, car la réduction de la résistivité superficielle (qui se traduit par l'augmentation de la conductivité superficielle) de la pollution engendre la diminution de la tenue diélectrique des isolateurs.

Les paramètres d'arc optimisés par l'approche génétique sont utilisés dans le modèle dynamique de contournement. Le champ électrique à l'intérieur de l'arc  $E_{arc}$  et le champ électrique dans la couche de pollution  $E_p$  sont calculés comme suit:

$$E_{arc} = AI^{-n} (4.20)$$

$$E_{p} = r_{p}I \tag{4.21}$$

Le critère de propagation de Hampton [11] est adopté pour le modèle actuel. Le critère est généralement accepté par la communauté scientifique et utilisé dans différents modèles de contournement dynamique dans des études antérieures [39, 82]. Son principal avantage réside dans la simplicité de sa mise en œuvre dans le programme par rapport à d'autres critères tels que Hesketh, Wilkins et Ghosh [83, 87].



**Figure 4.7** Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle de la pollution

Le modèle dynamique de contournement nécessite la détermination de la vitesse de propagation de l'arc définie comme suit [39]:

$$v = \mu E_{arc} \tag{4.23}$$

Où  $\mu$  est la mobilité des électrons.

La figure 4.8 montre l'organigramme du modèle proposé utilisé pour calculer le courant de fuite, la vitesse de propagation de l'arc, la longueur de l'arc et le délai de contournement. Les principales étapes de l'algorithme sont les suivantes :

Etape 1 : Introduction des données initiales : la conductivité de la pollution  $\sigma_p$ , la longueur de fuite de l'isolateur L et son rayon  $r_{iso}$ , la mobilité des électrons  $\mu=100~\rm cm^2/Vs$ , la valeur initiale de la tension appliquée U=2~kV, le pas d'incrémentation de la tension dU=0.2~kV et le pas d'incrémentation du temps dt.

**Etape 2:** Initialisation de la longueur d'arc (x = 1 % L) et du temps (t = 0).

**Etape 3:** Calcul de la résistance du canal d'arc  $R_{arc}$ , la résistance  $R_p$ , du courant de fuite I et des champs au pied de l'arc  $E_{arc}$  et dans la pollution  $E_p$ .

**Etape 4:** Vérification du critère de propagation de Hampton  $(E_p > E_{arc})$ , puis accomplissement de l'étape 5 (pas de propagation) si le champ au pied de l'arc est inférieur à celui dans la pollution et de l'étape 6 (propagation) dans le cas contraire.

**Etape 5:** Incrémentation de la tension (U = U + dU) et reprise les étapes 2 et 3.

Etape 6: Calcul du temps au contournement t, de la longueur d'arc x, de son rayon r, du courant I, de la vitesse de propagation v.

Etape 7: Test de la nouvelle valeur de la longueur d'arc (x = x + dx); accomplissement de l'étape 8 (pas de contournement) si cette longueur n'atteint pas la longueur critique, et de l'étape 9 (contournement) dans le cas contraire. Nous avons utilisé une valeur acceptable de  $x_c = 0.9L$  pour simuler notre modèle.

Etape 8: Incrémentation du temps (t = t + dt) et reprise des étapes 3 à 7.

Etape 9: Exploitation des résultats.

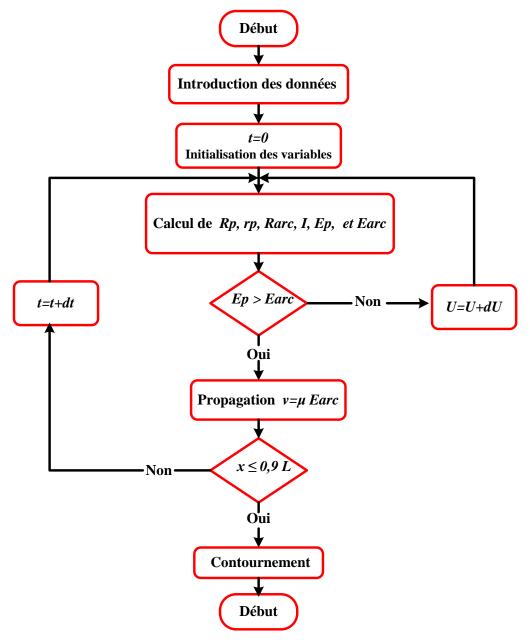


Figure 4.8 Organigramme du modèle de propagation d'arc

La vitesse de propagation de la décharge en fonction de la conductivité de surface de la couche de pollution est donnée à la figure 4.9. Afin de confirmer la crédibilité du modèle développé, nous avons comparé les résultats de la simulation avec ceux rapportés dans la référence [13]. On peut remarquer que les tendances de la vitesse de l'arc pour l'isolant ont diminuent de manière non linéaire avec la conductivité de surface. Ce type de variation a également été rapporté par d'autres chercheurs lors de la mesure de la vitesse de décharge par rapport à la résistivité d'un électrolyte [33, 88]. Une relation empirique a été établie par Wilkins et Al-Baghdadi [27] dans laquelle la vitesse de décharge apparaît comme une fonction décroissante de la conductivité.

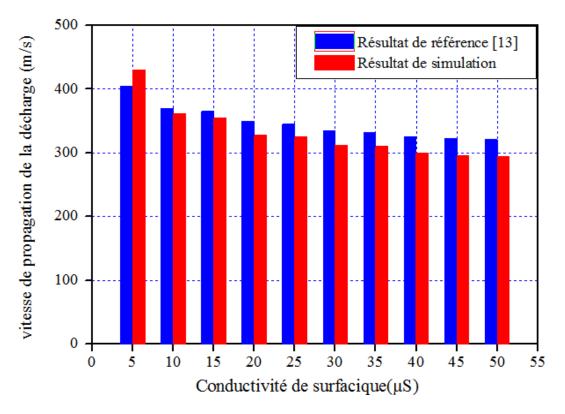


Figure 4.9 Vitesse de la décharge en fonction de la conductivité surfacique

Un traitement mathématique des données a permis d'établir une relation entre la vitesse de propagation de la décharge et la conductivité de surface de la couche de pollution. Elle l'exprimé comme une fonction exponentielle (Figure 4.10).

$$v = \gamma . \sigma_p^{\delta} \tag{4.24}$$

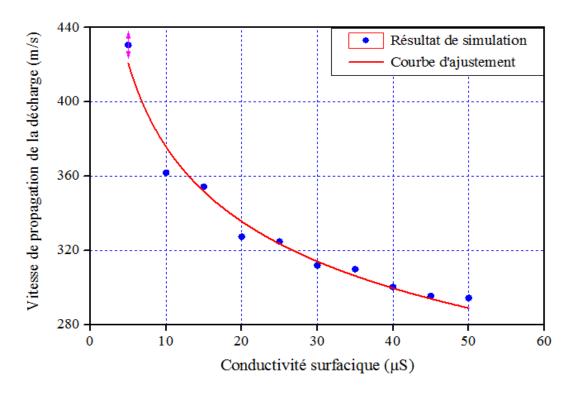
Où  $\sigma_P$  est la conductivité superficielle, v est la vitesse de décharge, et  $\gamma = 547,390$  et  $\delta = -0,16$  sont les coefficients constants.

La figure 4.11 montre que le temps de contournement augmente avec la conductivité des couches polluantes. Ceci s'explique par le fait que lorsque la conductivité de la pollution déposée sur l'isolant est faible, le contournement se produit directement sans apparition d'arcs partiels. Ce processus a pour effet de réduire le temps de contournement.

D'autre part, lorsque cette conductivité est forte, des décharges prennent naissance, se développent jusqu'à provoquer le contournement, le temps de cet allongement sera important. Sur cette figure, on peut voir que le temps de contournement peut être ajusté par une fonction exponentielle de la conductivité des couches polluantes.

$$T = \alpha . \sigma_P{}^{\beta} \tag{4.25}$$

Où  $\sigma_P$  est la conductivité superficielle, T est le temps au contournement, et  $\alpha = 0.02$  et  $\beta = 0.09$  sont des coefficients constants.



**Figure 4.10** Courbe d'ajustement de vitesse de la décharge en fonction de la conductivité surfacique

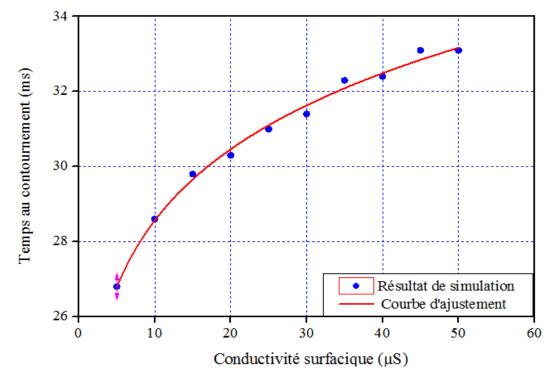


Figure 4.11 Temps au contournement en fonction de la conductivité surfacique

La figure 4.12 illustre l'évolution du courant de fuite dans le temps pour différentes conductivités. Comme on peut le constater, une première partie avec une croissance relativement lente correspondant à la phase de propagation, suivie d'une augmentation brutale correspondant à l'étape finale, à savoir le phénomène de contournement.

Lorsque la décharge se propage, l'impédance de pollution diminue ainsi que la résistance de décharge. Le comportement du courant dépend de la tension appliquée et de la conductivité de la couche de pollution. Ainsi, la différence entre ces paramètres d'influence entraîne différentes évolutions du courant de décharge lors du contournement. nous constatons également que plus la conductivité de pollution est augmente, plus les courants sont importants.

La figure 4.13 montre l'évolution temporelle de la longueur de décharge pour différentes conductivités. On peut remarquer que la longueur a tendance à augmenter de façon régulière. Notons que plus la conductivité est importante, moins vite l'arc se déplace. En effet, l'augmentation de la conductivité engendre le prolongement de la phase de propagation.

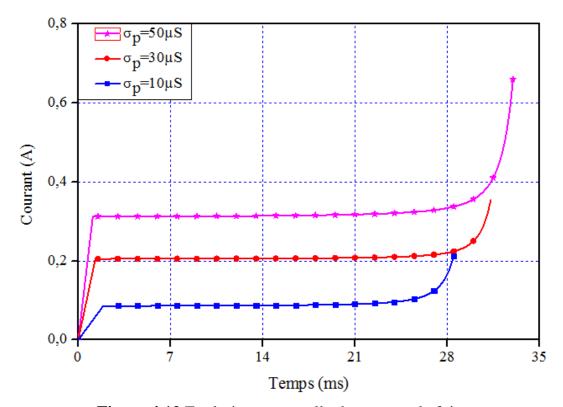
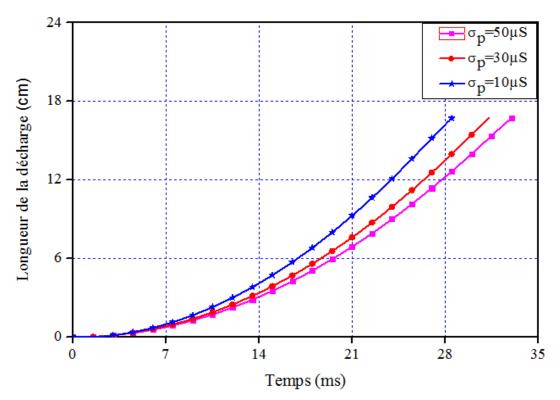


Figure 4.12 Evolution temporelle du courant de fuite



**Figure 4.13** Longueur de la décharge en fonction du temps, pour différentes conductivités surfaciques

Le rayon de la décharge, calculé à partir de l'équation 4.26, selon le modèle proposé par Wilkins [26], suit la forme du courant. En effet, l'augmentation de ce rayon est relativement lente durant la phase de propagation. A partir d'un certain temps, le rayon de la décharge croît assez brusquement pour atteindre une taille plus ou moins importante, lorsque le courant dans l'arc atteint la phase d'augmentation rapide. Ce rayon reste pratiquement constant sur une grande partie de la longueur de fuite pour atteindre une très grande taille en fin de propagation (Figure 4.14).

$$ra = \sqrt{\frac{I}{1.45\pi}}\tag{4.26}$$

Nous savons que la longueur de la décharge augmente de façon continue au cours du temps, les caractéristiques des différentes grandeurs régissant l'arc électrique conservent leurs mêmes allures en fonction de la longueur de la décharge, qu'en fonction du temps.

Les caractéristiques donnant le courant en fonction de la longueur de décharge(Figure 4.15) montrent que l'allure du courant de fuite présente une première partie à croissance relativement lente correspondant à la phase de propagation, suivie d'une brusque

augmentation correspondant à la phase du contournement. Nous remarquons également que plus la conductivité est grande plus les courants sont importants.

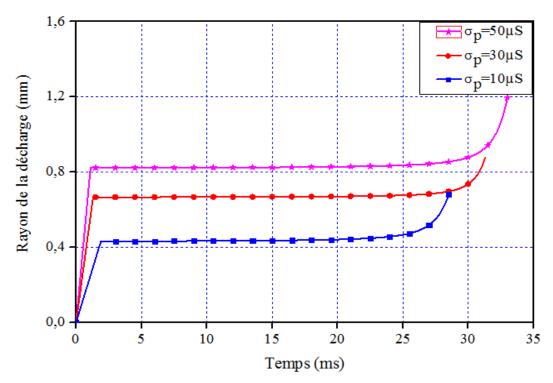
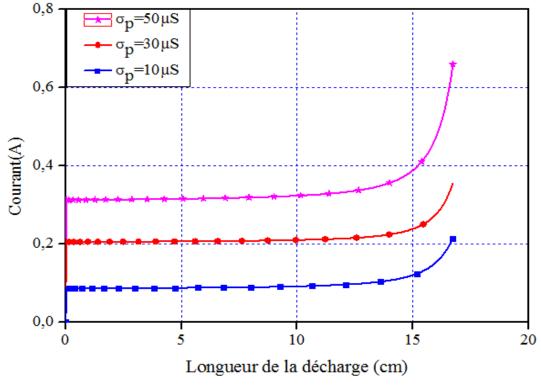
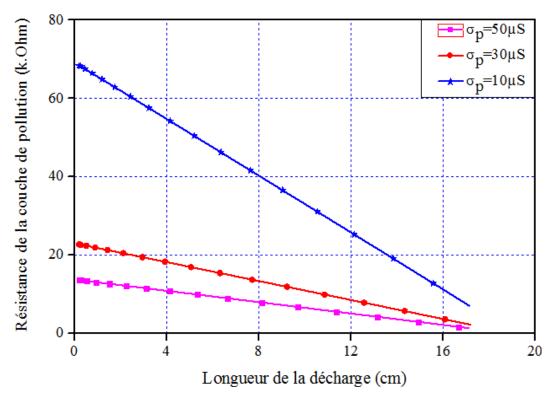


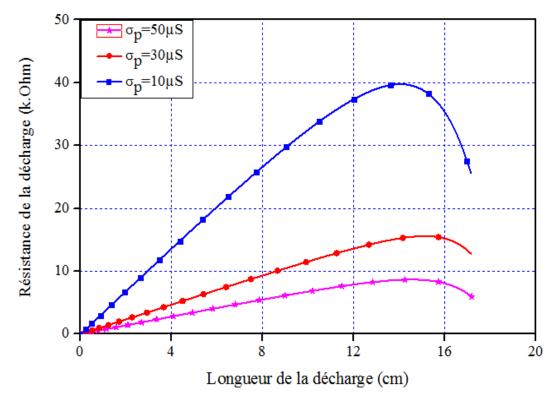
Figure 4.14 Rayon de la décharge en fonction du temps, pour différentes conductivités



**Figure 4.15** Courant de fuite en fonction de la longueur de la décharge, pour différentes conductivités surfaciques



**Figure 4.16** Résistance de la couche de pollution en fonction de la longueur de la décharge, pour différentes conductivités surfaciques



**Figure 4.17** Résistance de la décharge en fonction de sa longueur, pour différentes conductivités superficielles

La figure 4.16 montre le variation de la résistance de la couche de pollution en fonction de la longueur de décharge pour différentes conductivités superficielles. On peut remarquer que la résistance a tendance à diminuer de façon régulière et linéaire. En effet, l'augmentation de la conductivité surfacique engendre la décroissance de la résistance de la couche de pollution.

Les caractéristiques donnant la variation de la résistance du canal d'arc en fonction de la longueur de l'arc (Figure 4.17), montrent que cette résistance augmente en premier lieu, atteint un maximum et diminue par la suite. La raideur de ces caractéristiques est d'autant plus importante que les conductivités sont faibles. En plus, il est tout à fait évident que, la résistance de l'arc décroît avec l'augmentation de la conductivité de la pollution.

#### 4.6. Calcul du potentiel et du champ électrique sur l'isolateur pollué

L'objectif principal de cette étude est de calculer la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un d'isolateur pollué. Comme il était très difficile de mesurer expérimentalement de façon précise la distribution du potentiel et surtout du champ électrique le long d'un isolateur, l'utilisation d'une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel s'est avérée être une des meilleures solutions [91]. A cet effet, la méthode des éléments finis est la mieux adaptée au problème posé. Le logiciel COMSOL Multiphysics, basé sur cette méthode numérique couvre généralement un domaine plus vaste que le problème étudié. En plus, il offre généralement une interface simplifiant la modélisation du problème (interface de conception et définition des propriétés des matériaux), la résolution du problème (définition des conditions initiales et conditions aux limites, maillage automatique ainsi que différents solveurs) et enfin, la visualisation des résultats (affichage des résultats sous forme de courbes, d'équipotentiels, de vecteurs, etc....).

Les étapes de résolution de la méthode des éléments finis utilisées dans le COMSOL Multiphysics peuvent être résumées comme suit:

- Introduction de la géométrie du modèle;
- > Identification des domaines;
- ➤ Introduction des conditions aux limites;
- Résolution;

#### > Visualisations des résultats.

l'isolateur utilisé est du réseau de distribution 10 kV capot et tige en verre à trois jupes (Figure 4.1). Les propriétés électriques des matériaux utilisés dans cette simulation sont résumées dans le tableau 4.3. Pour chaque matériau, nous donnons sa conductivité électrique ( $\sigma$ ) et sa permittivité relative ( $\varepsilon_r$ ). Le problème de calcul a été réalisé en 2D et le type choisi pour cette simulation était les courants électriques. Les équations de Maxwell pour le cas symétrique (4.27) et (4.28) donnent le champ électrique:

$$\vec{E} = -\nabla \vec{V} \tag{4.27}$$

$$\overrightarrow{\nabla}.\overrightarrow{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \tag{4.28}$$

La combinaison de l'équation de Maxwell, l'équation de continuité du courant et la loi d'Ohm est donnée par les équations (4.29) et (4.30) respectivement:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \tag{4.29}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$
 (4.30)  
Avec:

V: Le potentiel électrique (V);

E: Le champ électrique (V / m);

 $\varepsilon$ :La permittivité du matériau diélectrique;

 $\rho$ : La densité de charge  $(C/m^3)$ ;

J: La densité de courant  $(A/m^2)$ ;

 $\sigma$ : La conductivité électrique (S /m).

L'étude de simulation est modélisée dans l'air, où le potentiel électrique (10 kV) est appliqué à la tige de l'isolateur et le capot est mis à la terre.

Le calcul de la tension et la distribution du champ électrique sont supposés fournir des informations sur l'état de l'isolateur. L'isolateur capot et tige a été étudié lorsqu'il était propre et pollué. Une faible couche de polluant a été ajoutée à la surface de l'isolateur.

Le figure 4.18 (a) et (b) illustre les lignes équipotentielles calculées pour les deux cas. Le potentiel est réparti de manière à diminuer progressivement de la tige vers le capot.

Tableau 4.5 Paramètres de simulation

Matériaux	Permittivité relative, er	Conductivité électrique, $\sigma(S/m)$
Verre trempé	4,2	$10^{-14}$
Ciment	15	$10^{-4}$
Fonte malléable	1000	$1,04\cdot 10^5$
Air	1	$10^{-14}$
Acier galvanisé	1000	$4\cdot 10^6$
Pollution	80	$10^{-3}$

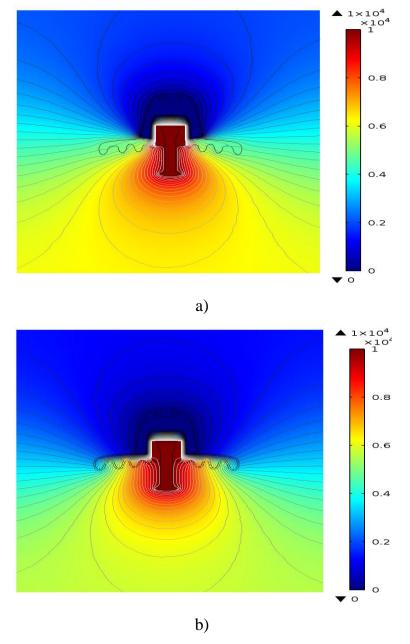


Figure 4.18 Surfaces équipotentielles autour de l'isolateur U40 : a) cas propre b) cas pollué

La figure 4.19 montre la variation de la tension électrique le long de la ligne de fuite. On peut constater que plus de 60 % du potentiel électrique est concentré entre l'électrode HT et jusqu'à la deuxième jupe. Près de 20 % du potentiel électrique est concentré autour de l'électrode mise à la terre. Lorsque le disque en verre est contaminé, le courant résistif modifie la répartition du potentiel électrique. Les ondulations sont affichées sur le profil de tension de l'isolant propre et diminuent fortement de  $10 \, kV$  à  $4,7 \, kV$ . Une légère déformation entre le cas pollué et propre est due à l'effet des caractéristiques électriques de la couche de pollution.

Dans des conditions propres et sèches, on parle généralement du comportement capacitif de l'isolateur [48]. Mais dans le cas de la pollution, l'isolant est totalement résistif. Le calcul de l'intensité du champ électrique fournit des informations utiles sur la pollution de surface. Il est utilisé pour localiser les zones de fortes contraintes où des décharges de surface peuvent se produire (Figure 4.20).

Les tensions critiques Uc de contournement de l'isolateur obtenues à partir des 'expériences ont été utilisées dans le programme de simulation pour calculer le champ électrique critique, comme indiqué sur la figure 4.21.

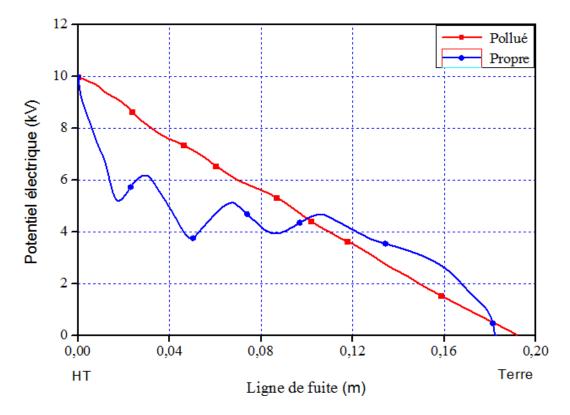


Figure 4.19 Distribution de la tension électrique pour l'isolateur U40

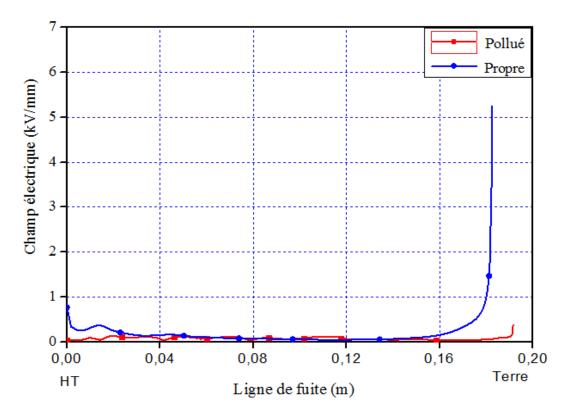


Figure 4.20 Distribution du champ électrique pour l'isolateur U40

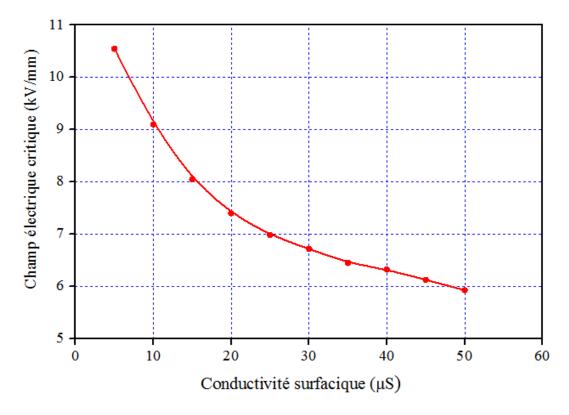


Figure 4.21 Champ électrique critique en fonction de la conductivité surfacique

La figure 4.22 montre la variation de la densité de courant de fuite le long de la couche contaminée sur l'isolateur en verre dans les conditions propres et polluées afin de produire la tension de contournement.

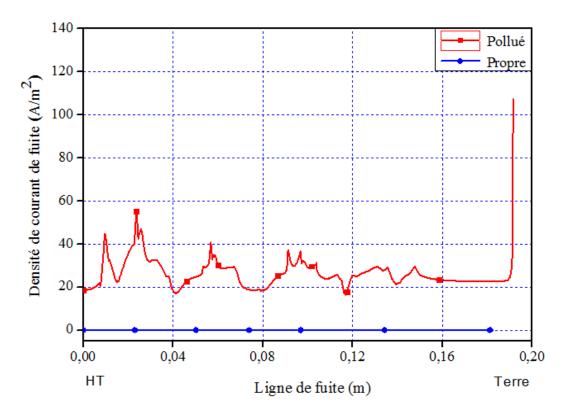


Figure 4.22 Densité de courant de fuite à travers l'isolateur U40

#### 4.7. Conclusion

Une nouvelle contribution est présentée dans ce travail pour développer un modèle dynamique de la décharge électrique. L'étude prend en compte la forme géométrique réelle de l'isolateur. Un test expérimental a été mené sur un isolateur capot et tige pour optimiser les paramètres (*A et n*) à l'aide de l'algorithme génétique. Ces paramètres réels ont ensuite été utilisés dans le modèle dynamique pour observer la variation instantanée de la décharge. Les performances de cet isolateur dépendent fortement de la distribution du champ électrique et de la contrainte du champ électrique. Les résultats de la simulation ont montré que les contaminants accumulés à la surface de l'isolateur affectent de manière significative la distribution de la tension et le champ électrique. Ce champ déformé accélère le processus de contournement. Il est évident que le champ calculé aiderait à améliorer la conception de l'isolateur, en particulier pour les zones contaminées.

## **CHAPITRE 5**

## CIRCUIT EQUIVALENT DE L'ISOLATEUR SOUS CONDITION DE POLLUTION

## Chapitre 05

# CIRCUIT EQUIVALENT DE L'ISOLATEUR SOUS CONDITION DE POLLUTION

#### 5.1. Introduction

Contrairement à la tension continue et la tension impulsionnelle, la tension alternative présente le problème du passage par zéro du courant, Ainsi, la performance d'un isolateur sous une contrainte continue est plus critique car les décharges produites après formation de bandes sèches persistent plus longtemps que pour le cas d'une contrainte alternative [10].Par ailleurs, le contournement d'un isolateur soumis à une tension alternative peut intervenir sur la première alternance, si la tension appliquée est suffisamment élevée. D'après Rahal, il faut distinguer deux cas dans le mécanisme de contournement :

- ✓ Contournement consécutif à un abaissement de la résistivité de la couche de pollution, alors même si la tension appliquée était au départ insuffisante.
- ✓ Non contournement, la couche de pollution électrolytique étant arrivée à son échauffement maximum l'amenant à l'ébullition et la résistivité demeurant trop élevée pour la tension appliquée.

Dans ce chapitre ; nous présenterons le circuit équivalent complet développé pour la simulation des performances électriques d'une chaine d'isolateurs en verre (30kV) sous pollution et les détails de modélisation de çes différentes parties. Enfin nous terminerons ce chapitre par la présentation des résultats de simulation et interprétations.

#### 5.2. Description du chaîne étudié

Une chaîne de trois isolateurs en verre à suspension capot et tige en particulier de type U40 [86] est sélectionnée dans cette étude. Les paramètres techniques de l'isolateur

modélisé sont illustrés par la figure 5.1. Les ailettes sont en verre trempé ayant une permittivité relative  $\varepsilon r=4,2$ . La tige et le capot en acier galvanisé. L'utilisation de ciment pour fixer le disque entre le capot et la tige.

La modélisation et les calculs dans cette étude ont été effectués à l'aide d'un package commercial d'éléments finis, COMSOL Multiphysics. La simulation est réalisée en trois étapes consécutives, à savoir les étapes de prétraitement, de résolution et de post-traitement. Les composants du problème physique tels que la structure géométrique, les propriétés des matériaux et des limites et les critères de maillage sont présentés comme des entrées dans la phase de prétraitement. Le modèle mathématique exprimé sous forme différentielle décrivant le problème physique, est exécuté au stade de la résolution. Enfin, dans la phase de post-traitement, le package permet aux utilisateurs de générer un tracé des variables ou paramètres de post-traitement.

Le modèle de la chaine d'isolateurs décrit en figure 5.1 a été créé à l'aide des outils de dessin disponibles dans le package FEM. Étant donné que la structure géométrique du modèle est très complexe, la modélisation peut être simplifiée en un problème bidimensionnel (2D) au lieu d'un modèle tridimensionnel complet (3D). Cette simplification peut économiser de la mémoire et du temps de traitement sans affecter la précision des résultats de la simulation.

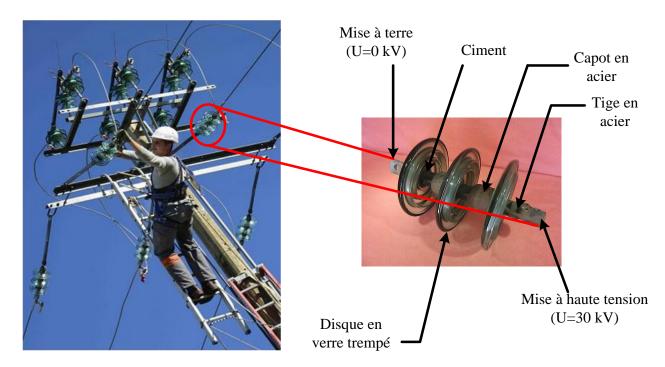


Figure 5.1 Chaîne d'isolateurs en verre utilisé dans une ligne de transmission en Algérie (réseaux de distribution  $30 \ kV$ )

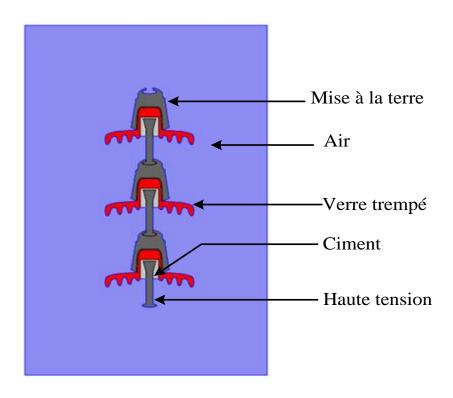


Figure 5.2 Modèle de la chaine d'isolateurs en 2D dans la plate forme de COMSOL Multiphysics

#### **5.3.** Identification des domaines

Dans cette simulation, les paramètres nécessaires pour ce modèle sont résumés dans le tableau 5.1. Pour chaque matériau, nous donnons sa conductivité électrique ( $\sigma$ ) et sa permittivité relative ( $\varepsilon r$ ). Après avoir terminé la phase initiale avec la structure du modèle, ainsi que spécifié propriétés des matériaux et conditions aux limites, le problème du domaine entier a été discrétisé en éléments triangulaires pendant le processus de maillage.

Tableau 5.1 Paramètres des différents domaines de la chaîne étudié

Matériaux	Permittivité relative, er	Conductivité électrique, $\sigma(S/m)$	
Disque (verre trempé)	4,2	$10^{-14}$	
Ciment	15	$10^{-4}$	
Air	1	$10^{-14}$	
Capot et tige (Acier)	1000	$4\cdot 10^6$	

Pour améliorer la précision des résultats de simulation calculés, le raffinement du maillage dans la région de l'intérêt a été réalisé en augmentant le nombre d'éléments de maillage le long de la surface de l'isolateur. Le raffinement qui se traduit par une taille d'élément réduite peut évidemment être vu à partir du maillage concentré le long du chemin de fuite, comme illustré par la figure 5.3. le choix du numéro de maillage est important et doit être équilibré, car moins d'éléments de maillage peut réduire la précision des résultats de la simulation, tandis que des éléments excessifs exigent une consommation de mémoire élevée et un temps de traitement plus long.

La chaîne d'isolateurs a été simulée dans un module AC/DC en utilisant un solveur de courant électrique quasi-statique, qui permet à l'utilisateur de spécifier la conductivité ainsi que la permittivité d'un matériau. En quasi-statique, les courants et les champs électromagnétiques varient lentement, ce qui est valable pour de nombreuses applications en haute tension. Le courant induit par les champs magnétiques,  $\vec{E}$  et les champs électriques,  $\vec{E}$ . le couplage entre les deux est négligé dans le calcul. Cette approximation peut être représentée par une expression mathématique [92]:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = 0 \tag{5.1}$$

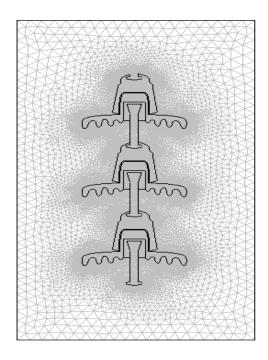


Figure 5.3 Discrétisation du modèle avec raffinement de maillage

Les équations de Maxwell sont utilisées pour calculer le potentiel et le champ électrique. En appliquant la divergence à la loi de Maxwell-Ampère :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{H} = \nabla \left[ \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right]$$
 (5.2)

Où  $\vec{J}$  et  $\vec{D}$  représentent respectivement la densité de courant de conduction et la densité de courant de déplacement.

Avec la loi de Gauss,  $\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$  et l'équation de continuité, le logiciel résout l'équation (5.2) pour obtenir le potentiel électrique et la distribution de champ.

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \tag{5.3}$$

Alors

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \tag{5.4}$$

L'équation de Poisson s'écrit :

$$\nabla^2 V = \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \tag{5.5}$$

L'équation de Laplace peut être obtenue en faisant la charge d'espace  $\rho = 0$ ,

$$\nabla^2 V = 0 \tag{5.6}$$

Dans le domaine électrostatique, la conductivité électrique est presque nulle pour les zones isolantes et très grande pour des zones conductrices, donc la distribution du potentiel électrique dans le domaine électrostatique est obtenue de la résolution de l'équation de Laplace, où la charge électrique dans l'espace est nulle.

$$-\nabla \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V) - \nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0$$
 (5.7)

Dans ces expressions, U est la différence de potentiel,  $\sigma$  est la conductivité électrique,  $\varepsilon_0$  est la permittivité du vide et  $\varepsilon_r$  est la permittivité relative du matériau.

#### 5.4. Étude de la distribution du potentiel dans les conditions propres

En premier lieu nous simulons la chaîne dans les conditions où la surface isolante est propre. La tige est portée à une tension  $V_{eff} = \frac{30}{\sqrt{3}} = 17.32kV$ , tandis que le capot est mise à la terre  $(V=0\ kV)$ . Les équipotentielles au voisinage de la chaîne d'isolateurs dans des conditions de surface nettoyée à sec, sont présentées en figure 5.4. Les lignes sont tracées à

4 % d'intervalle de tension, produisant ainsi un total de 25 lignes équipotentielles dans les résultats de simulation. Comme on peut l'observer sur le graphique, les courbes de niveau sont généralement concentrées autour des électrodes métalliques, indiquant des régions de champ élevé sur le disque isolant (verre trempé).

D'après les résultats illustrés par les figures 5.4 et 5.5, il est clair que la distribution du potentiel est uniforme. De plus la zone proche de l'électrode *HT* est la plus contraignée alors que celle près de l'électrode terre le potentiel est presque nulle.

La distribution axiale de la tension a été calculée au centre et à la frontière de la chaîne. Comme prévu, les courbes montrent une tendance à l'imperfection lors du passage vers la borne de mise à la terre. Le profil de tension dans des conditions propres montre un gradient de potentiel élevé aux deux extrémités de l'isolateur, illustrant des régions de champ élevé sur la surface isolante. Cela correspond bien aux lignes d'équipotentielles de la figure 5.4.

La figure 5.6 montre les résultats de simulation des distributions de champ électrique axial le long du la chaîne d'isolateurs dans des conditions propres. Le tracé illustre en général une tendance similaire avec une distribution de champ symétrique entre les bornes de terre et haute tension.

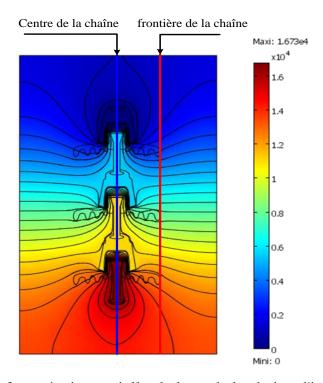


Figure 5.4 Surfaces équipotentielles le long de la chaîne d'isolateurs propre

comme prévu, la magnitude du champ axial est nulle dans les parties conductrices et plus élevée sur la surface près des électrodes métalliques. Cela montre une bonne corrélation avec le tracé équipotentiel et le profil de tension comme discuté dans les sections précédentes. Généralement, on observe qu'il y a une diminution de potentiel et de l'intensité du champ électrique lorsque on s'éloigne du centre de la chaîne d'isolateurs.

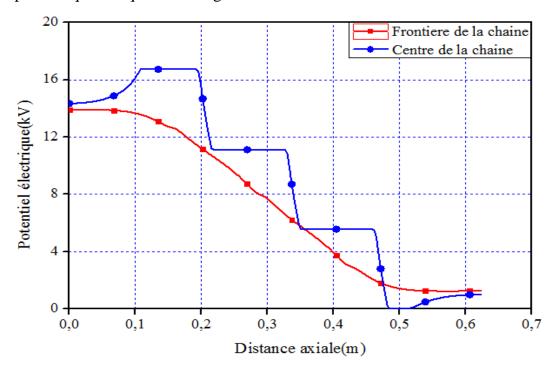


Figure 5.5 Potentiel électrique en fonction de la distance axiale de la chaîne

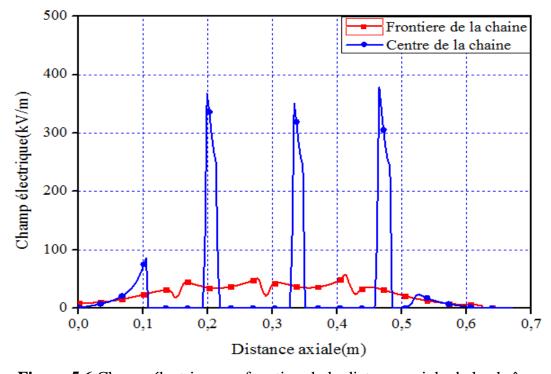


Figure 5.6 Champ électrique en fonction de la distance axiale de la chaîne

#### 5.5. Études de la distribution du potentiel dans les conditions polluées

La formation et la répartition de la couche de pollution sur la surface des isolateurs dépendent du profil, de la hauteur et l'environnement où la chaine d'isolateurs fonctionnent. Dans cette partie du travail, L'étude de la répartition de la tension et du champ électrique en présence d'une couche de pollution à la surface de l'isolateur sera faite. Elle aura pour objectifs de voir l'effet des différentes conductivités et la nature de la pollution sur la dite distribution de tension. A cet effet nous allons procéder à plusieurs scénarios pour mieux comprendre l'action de la pollution sur les isolateurs.

#### 5.5.1. Pollution uniforme

Pour modéliser l'isolateur contaminé, un film mince avec différentes épaisseurs de la couche de contamination répertoriée dans le tableau 5.2 a été créé. Ce film a été modélisé comme une couche uniforme sur toute la surface de l'isolant en adoptant les propriétés de l'eau de mer comme source de contamination [93].

Le logiciel a l'avantage de pouvoir modéliser une fine couche conductrice en 3D de conductivité volumique  $\sigma_v$  et d'épaisseur e comme une surface conductrice en 2D de conductivité surfacique  $\sigma_p$ .

$$\sigma_p = e.\,\sigma_v \tag{5.8}$$

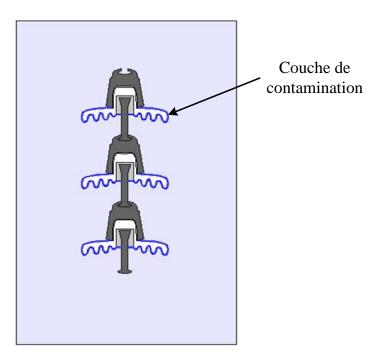


Figure 5.7 Schéma de modélisation de l'isolateur sous conditions contaminées

Tableau 5.2 Épaisseur de la couche de contamination selon [93]

Niveaux de contamination	Épaisseur de la couche de contamination, e (mm)	Conductivité électrique, $\sigma_p~(\mu S~)$
Propre	aucun	0
Faible	1	10
Moyenne	1,5	30
Fort	2	50

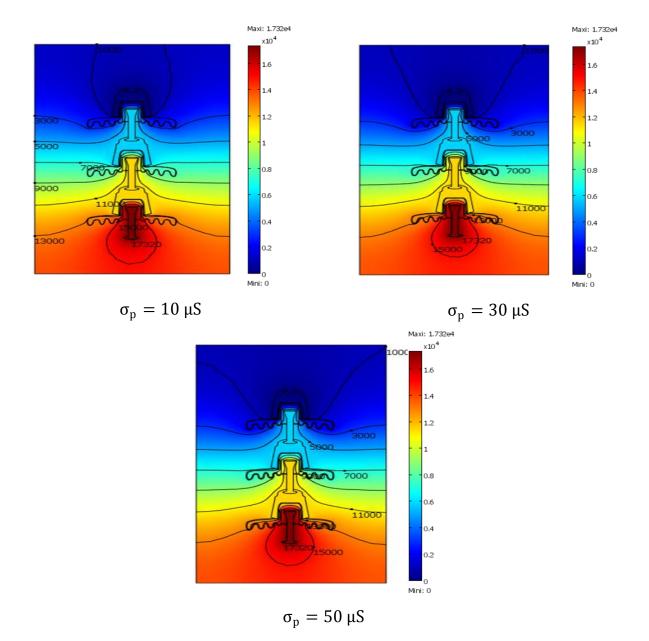


Figure 5.8 Surfaces équipotentielles le long de la chaîne d'isolateurs uniformément polluées

une couche de pollution uniforme ayant les conductivités égales à  $10\mu S$ ,  $30\mu S$  et  $50\mu S$  est appliquée à la surface de l'isolateur. Les résultats sont montrés dans les figures 5.8 et 5.9. Dans la figure 5.8, on présente la distribution des lignes équipotentielles où on peut remarquer que seulement un changement minime qui a eu lieu.

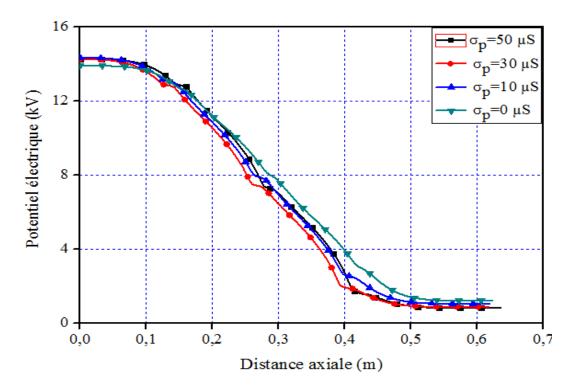


Figure 5.9 Potentiel électrique le long de la chaîne d'isolateurs polluées

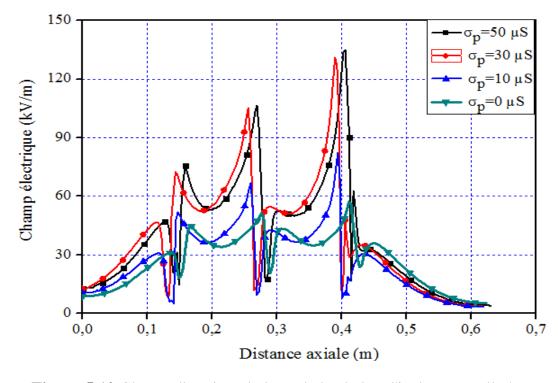


Figure 5.10 Champ électrique le long de la chaîne d'isolateurs polluées

Cette différence est plus clair en examinant les courbes de la figure 5.9 qui donnent la répartition axiale de la tension. Comme il était attendu le type de pollution influe énormément sur la distribution du potentiel et la rend non-uniforme ce qui veut dire que l'isolateur n'est pas contraint de la même manière ce qui favorise l'apparition des contournements. Ce constat est en accord avec la distribution du champ électrique montré dans la figure 5.10.

La distribution de champ électrique le long de la chaine est donné aux figure 5.10 pour différents cas de pollution. L'intensité de champ maximale ne se produit pas aux parties à triple jonction; Au lieu de cela, il peut se produire à la partie extérieure de la coque en verre. Le cas de pollution importante, le champ vas être intense, ce qui favorise d'apparition des décharges partiels et des zones sèches terminons par un contournement de l'isolateur.

#### 5.5.2. Pollution non uniforme

En service, les effets du vent et de la pluie rendent la surface supérieure d'un isolateur moins susceptible d'être fortement polluée que son côté inférieur, donnant naissance au terme isolateur «pollution sur la surface inférieure» (PSI). D'autre part, la surface supérieure d'un isolateur peut parfois être plus polluée que la surface inférieure en raison de la position relative de l'isolateur. Ce cas est appelé un isolant «pollution sur la surface supérieure» (PSS). En plus de ces types d'isolateurs, la simulation a également impliqué d'autre exemple: un isolateur «entièrement pollué avec une bande sèche» (EPBS) caractérisé par une région propre autour de côté haute tension, qui a été inclus comme moyen de modéliser le condition de bande sèche qui peuvent se produire autour de côté de la tige en raison de concentrations de champ plus élevées [94]. La figure 5.11 illustre les types de cas de la pollution simulés.

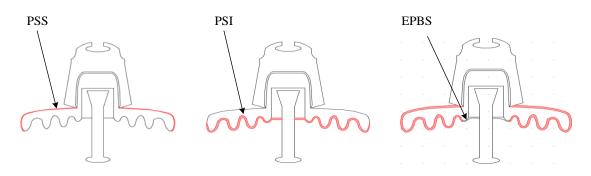


Figure 5.11 Cas de pollution non uniforme

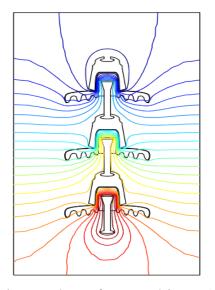
Dans le cas de formation de la bande sèche, la conductivité suivra la loi suivante [86]:

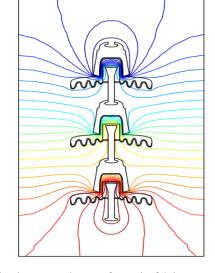
$$\sigma_v = \frac{A \cdot x}{V^{n+1}} \tag{5.9}$$

Avec:

V: Tension à travers la bande sèche en (V); A et n: sont des constantes; x: largeur de la bande sèche en (m).

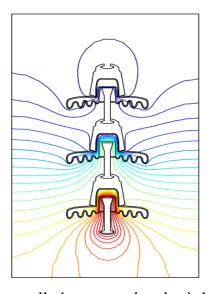
Nous notons que la constante diélectrique relative du domaine de la bande sèche est prise égale à 1.





Pollution sur la surface supérieure (PSS)

Pollution sur la surface inférieure (PSI)



Entièrement pollué avec une bande sèche (EPBS)

Figure 5.12 Surfaces équipotentielles le long de la chaine (pollution non uniforme)

Comme il a été dit le type de pollution influe énormément sur la distribution du potentiel et la rend non-uniforme la chaine d'isolateurs est alors contraint de façons différentes, ce qui favorise l'apparition des bandes sèches.

Dans la figure 5.12, on présente la distribution des lignes équipotentielles, où on peut remarquer que ces dernières sont concentrées dans les surfaces à une conductivité inferieure. Ce qui permet de dire, que la chaine de l'isolateurs n'est pas contrainte de la même manière et ce qui conduit à une distribution du potentiel non-uniforme. D'après ces résultats, nous remarquons que l'augmentation de la conductivité de la couche polluée favorise la distribution non uniforme du potentiel le long de la surface de l'isolant.

En présence de la bande sèche, Les lignes équipotentielles et la plus grande portion du potentiel électrique se trouve reportée aux bornes de cette dernière comme montre la figure 5.13.

La formation de la bande sèche dans la zone inferieure de la chaine d'isolateurs (Figure 5.15) cause un champ électrique intense. La tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entrainant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite. Le réamorçage fréquent au même endroit entraine par effet thermique la dégradation et aussi peut conduire à des décharges partielles sur la surface isolante.

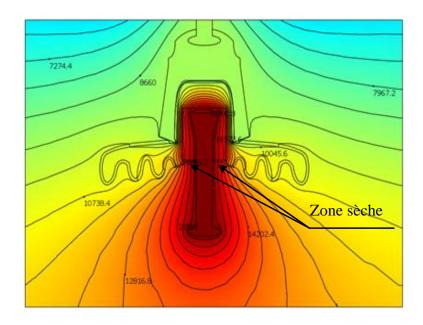
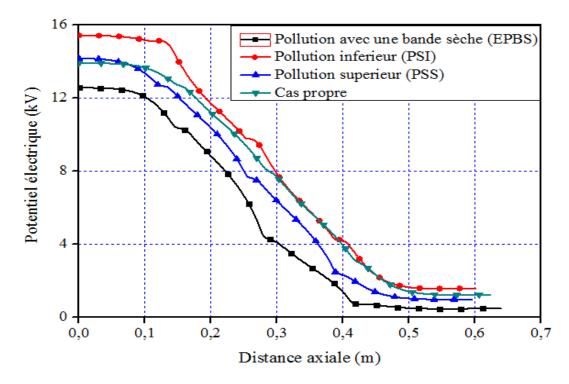
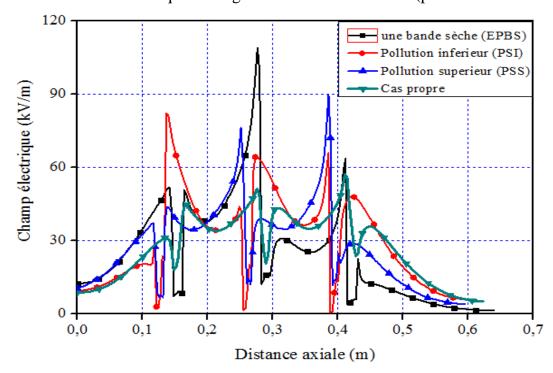


Figure 5.13 Concentration des lignes équipotentielles dans la bande sèche

Dans les conditions partielles et entièrement polluées, il a également été tenu compte des conditions de bande sèche, qui sont celles qui se trouvent dans une région propre autour du côté de la tige d'un isolateur (coté haute tension). Dans ce cas, les variations de les potentiels sont non linéaires. Étant donné que presque toutes les chutes potentielles se produisent à travers la région sèche comme montre la figure 5.14.



**Figure 5.14** Potentiel électrique le long de la chaine d'isolateurs (pollution non uniforme)



**Figure 5.15** Champ électrique le long de la chaine d'isolateurs (pollution non uniforme)

#### 5.6. Circuit équivalent d'une chaîne d'isolateurs

Ils existent deux méthodes pour calculer les paramètres électriques du circuit équivalent d'une chaîne d'isolateurs [95, 96], Il s'agit de la:

#### 5.6.1. Méthode analytique

Cette méthode est basée sur des mesures expérimentales. Elle combine les valeurs de la tension appliquée avec les valeurs des courants de fuite mesurés pour la détermination des diverses condensateurs et résistances du circuit équivalent. Une brève description de la méthode est la suivante:

➤ Si la tension appliquée s'annule, le courant de fuite est à caractère capacitif. Dans ce cas on écrit:

$$I_f = I_c \tag{5.10}$$

A partir de cette équation, on peut calculer les condensateurs des ailettes de la chaine d'isolateurs.

On a:

$$V_{app} = V_{max} \cdot \sin(\omega t) \tag{5.11}$$

$$I_c = C \frac{dV_{app}}{dt} = C. \, \omega. \, V_{max} \tag{5.12}$$

Alors:

$$C = \frac{I_c}{\omega \cdot V_{max}} \tag{5.13}$$

➤ Si la tension appliquée s'annule, le courant de fuite est à caractère résistif. Dans ce cas on écrit:

$$I_f = I_R (5.14)$$

En tenant compte de l'équation 5.14 les différentes résistances peuvent être calculées par:

$$R = \frac{V_{app}}{I_R} \tag{5.15}$$

Avec C et R sont les condensateurs et les résistances des éléments de la chaîne respectivement.

#### 5.6.2. Méthode numérique

Un modèle électrique a été développé pour représenter le comportement de la chaîne d'isolateurs sous différents condition. La chaine d'isolateurs est divisé en trois parties. chaqu' un est représenté par un condensateurs  $C_{iso}$  parallèlement à une résistance  $R_{iso}$ . En introduisant aussi les condensateurs contre terre  $C_q$  (Figure 5.16).

La méthode des éléments finis a été employée via le logiciel COMSOL Multiphysics pour calculer les distributions de tension et du champ à la surface de la chaîne d'isolateur. Les valeurs du champ électrique calculées sont employées pour obtenir l'énergie électrique emmagasinée dans les différentes parties de l'isolateur. Ces valeurs d'énergies combinées avec les potentiels calculés permettent la détermination des diverses capacités du circuit équivalent développé dans le cadre de ce travail (Figure 5.16). Ce circuit a été ensuite implanté dans l'ATP-EMTP pour déterminer les différentes tensions et le courant fuite circulants à la surface de l'isolateur.

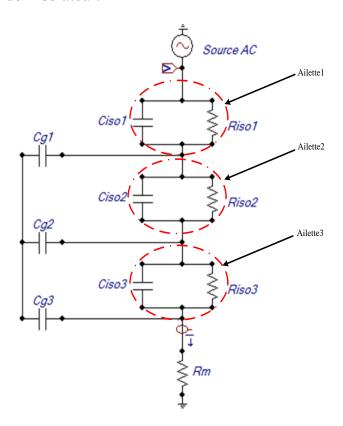


Figure 5.16 Circuit équivalent complet d'une chaîne d'isolateurs

Dans ce qui suit une brève description de la méthode qui a servi pour la détermination des paramètres est donnée.

La capacité de condensateur est donnée par l'expression suivante:

$$C_{iso} = \frac{2W_e}{V^2} \tag{5.16}$$

Avec:

*V*: tension entre conducteurs;

We: l'énergie emmagasinée dans un condensateur.

Pour calculer la résistance, on applique la loi d'ohm. La valeur de la résistance est très grande alors le courant qui passe à ca dernière très faible, et on peut écrire :

$$R_{iso} = \frac{V}{I} \tag{5.17}$$

Les résultats obtenues en se basant sur la formule (5.16, 5.17) et à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics sont résumées dans le tableau 5.3 et 5.4.

**Tableau 5.3.** Valeurs des différents paramètres du circuit équivalent (cas propre)

Chaîne d'isolateurs	Condensateurs $C_{iso}(pF)$	$ \begin{array}{c} \textbf{Condensateurs} \\ \textbf{\textit{C}}_g(\textbf{pF}) \end{array} $	Résistances $R_{iso}(\Omega)$
Ailette1	279	31,5	$11,13\cdot 10^{14}$
Ailette2	279	69,6	$11,04\cdot 10^{14}$
Ailette3	282	282	$10,91\cdot10^{14}$

**Tableau 5.4** Valeurs des paramètres du circuit équivalent pour le cas pollué (faible, moyenne et fort)

Chaîne d'isolateurs	Condensateurs $C_{iso}(pF)$	Condensateurs $\mathcal{C}_g(\mathbf{pF})$	Résistances $R_{iso}(k\Omega)$
Ailette1	305 – 339,36 – 387,56	34,5 - 38,5 - 43,78	78,31 – 25,5 – 10,74
Ailette2	306 - 340 - 387,90	76 – 84,64 – 96,60	73,33 – 25 – 10,68
Ailette3	307 - 341 - 388,60	307 – 341 – 388,9	70,3 - 24,45 - 10,63

#### 5.7. Résultats de simulation et interprétations

L'étude des caractéristiques de courant dans ces phases est très importante pour prévenir la phase précoce de l'apparition des décharges. Ces signaux peuvent être considérés comme des indicateurs sur la nécessité de la maintenance ou bien de l'intervention par le lavage.

En première étape on va simuler la chaîne d'isolateurs pour une tension alternative. La figure 5.17 illustre la variation instantanée du courant de fuite dans le cas d'une surface propre. Comme on peut le voir clairement sur le figure, le courant de fuite est très faible et à prédominance capacitive à cause de l'impédance équivalente élevée du milieu avec un déphasage de 90°.

En deuxième étape on va simuler numériquement la chaîne d'isolateurs en condition humide (pollution uniforme). La figure 5.18 montre les formes d'ondes du courant de fuite d'une chaîne polluée. Comme on peut le voir :

- ✓ d'une part le courant de fuite est plus importants .
- ✓ Cependant, il existe un changement significatif d'amplitude et de déphasage, puisque la surface polluée humide offre une résistance plus faible que celle du cas propre. La magnitude actuelle passe d'environ 0,9 mA à 0,8 A, et la différence de phase avec la tension appliquée est réduite à zéro indiquant une conduction de courant résistif.

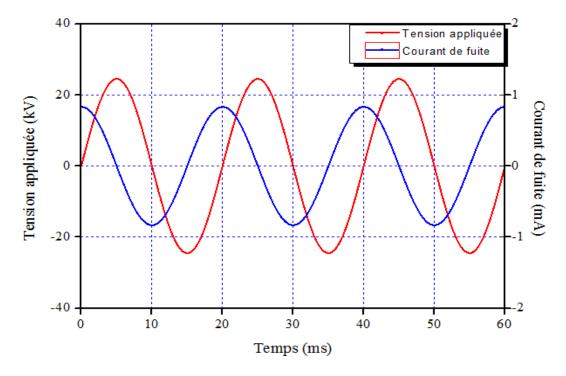


Figure 5.17 Forme d'onde du courant de fuite pour le cas d'une chaîne d'isolateurs propre

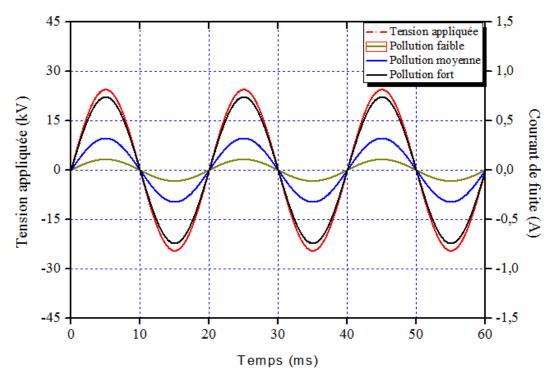


Figure 5.18 Formes d'ondes du courant de fuite pour le cas d'une chaîne d'isolateurs

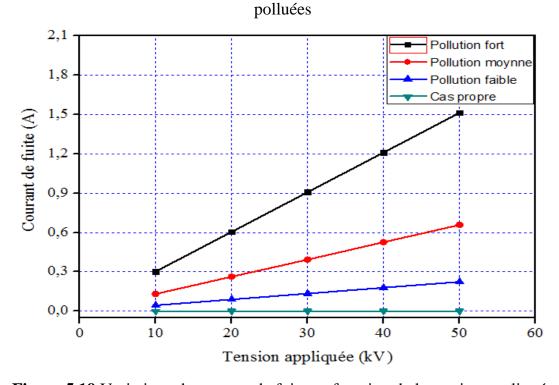


Figure 5.19 Variations du courant de fuite en fonction de la tension appliquée

Les valeurs crête du courant de fuite augmentent linéairement avec la tension appliquée, comme le montre la figure 5.19. Cela indique qu'il n'y a pas d'apparition d'arcs de bande sèche à la surface de l'isolateur. D'autre part, nous notons que les valeurs maximales du courant de fuite dans le cas ou la chaîne d'isolateurs en état propre ne présentent pas de

changement significatif à cause de l'impédance équivalente élevée du milieu.

En troisième étape, la chaîne d'isolateurs est polluée et contient des bandes sèches. Pour prendre en compte l'apparition des bandes sèches suite aux assèchements locaux, un modèle basé sur le concept de Neumarker [69] est développé dans lequel la résistance non-linéaire de la bande sèche prend la forme:

$$R_{db} = \frac{A.x}{I^{(n+1)}} \tag{5.18}$$

La partie humide sera donc :

$$R_H = r_p(L - x) \tag{5.19}$$

Avec:

A, n: constants de l'arc;

*I*:courant de fuite;

L:linge de fuite de l'isolateur;

*x*: longueur de l'arc.

Ce modèle est implanté dans l'EMTP puis introduit dans le circuit équivalent montré dans la figure 5.20. Une simulation avec largeur de la bande sèche de 3cm a été faite pour étudier l'effet de la bande sèche sur le fonctionnement de la chaîne d'isolateurs.

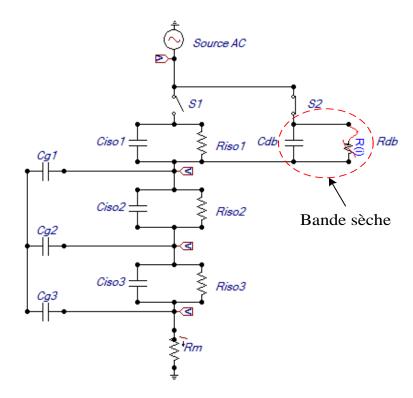


Figure 5.20 Circuit équivalent de la chaîne d'isolateurs pollué avec bande sèche

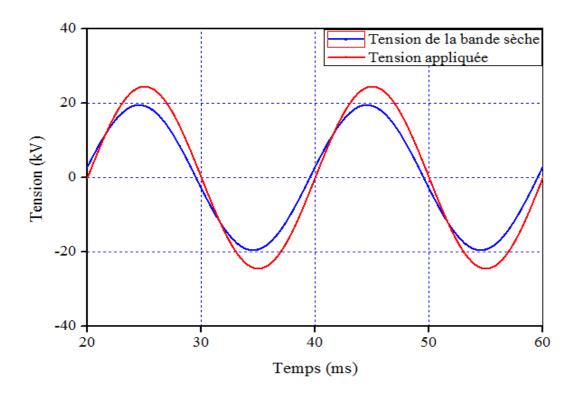


Figure 5.21 Chute de tension dans la bande sèche

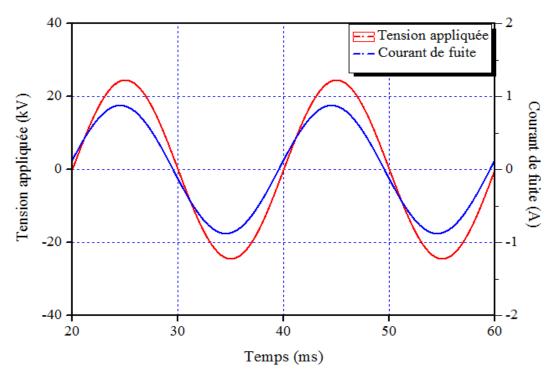


Figure 5.22 Forme d'onde du courant de fuite en présence de la bande sèche

Dans la figure 5.21 et 5.22 on présente les formes d'onde de la tension de la bande sèche et le courant à travers sa résistance respectivement. La présence de la bande sèche a comme conséquence une différence de phase entre la tension à ses bornes et la tension appliquée.

Donc la partie proche de la bande devient plus contraignée laissant dire que presque toute la tension d'alimentation est appliquée à la bande sèche (Fig. 5.21). Ainsi la résistance qui représente la section de la bande sèche devient plus grande que l'état humide. On peut voir que la bande sèche influe sur la phase et l'amplitude du courant de fuite. Donc l'augmentation de la largeur de la bande sèche conduit à un courant de fuite plus faible et de plus en plus capacitif ce qui est parfait concordance avec le résultat obtenu pour une chaîne d'isolateurs propre (Fig. 5.22).

#### 5.8. Décharge à travers la bande sèche

Dans l'intention d'étudier l'influence de réamorçage de la décharge sur le comportement de la chaîne d'isolateurs. La décharge à travers la bande sèche a été simulée en adoptant le même modèle dynamique de décharge considéré précédemment (chapitre 4).

Dans ce cas, on considère une chaîne fortement pollué et la bande sèche est supposée apparaître dans la première ailette sur le coté de haute tension comme illustre la figure 5.23.

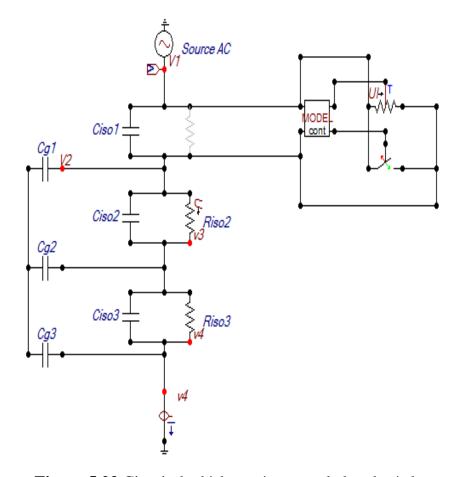


Figure 5.23 Circuit de décharge à travers la bande sèche

La tension alternative est caractérisé par un passage du zéro du courant. Ainsi la performance d'un isolateur sous une contrainte alternative est moins critique, les décharges produites après formation de bandes sèches ne se maintenant pas en permanence.

Nous supposons qu'à chaque nouvelle alternance (après extinction de l'arc), le milieu retrouve toutes ses propriétés diélectriques et que l'arc va se réamorcer avec les mêmes conditions initiales que celles qu'il avait tout au début.

Lorsque la tension appliquée est suffisante pour réamorcer une décharge et la condition de propagation est vérifié ( $E_p > E_{arc}$ ), l'arc électrique prend naissance et court-circuit la bande sèche (voir Annexe A).

Nous pouvons remarquer que l'évolution de toutes les grandeurs caractéristiques est symétrique sur toutes les alternances comme si l'arc après chaque extinction retrouve le même comportement qu'il avait dans l'alternance qui précède.

Si nous considérons l'exemple du courant de la décharge (figure 5.24) et de sa longueur (figure 5.25), nous voyons que le courant a la même allure et la même amplitude sur toutes les alternances et que la décharge parcourt toujours la même distance dans chaque alternance.

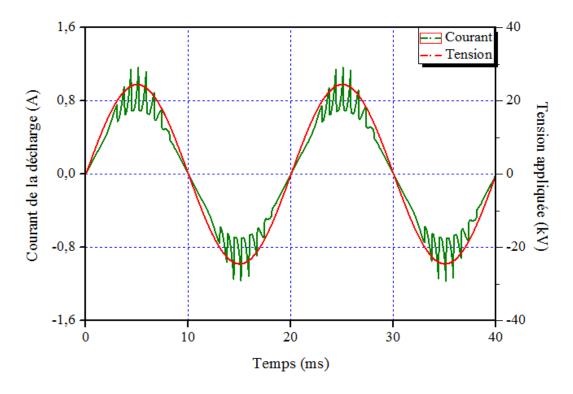


Figure 5.24 Courant de la décharge en fonction du temps

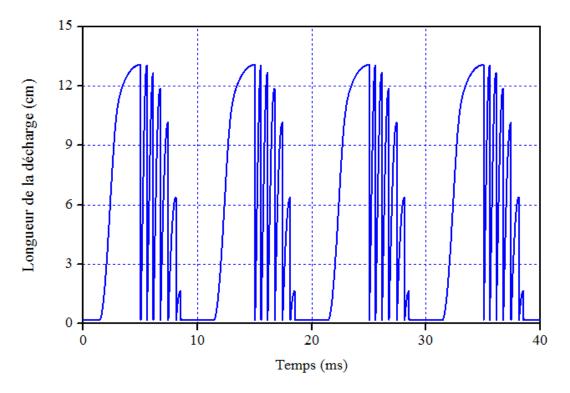


Figure 5.25 Longueur de la décharge en fonction du temps

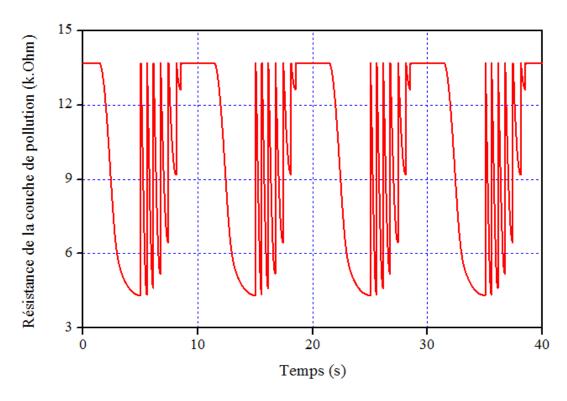


Figure 5.26 Résistance de la couche polluante en fonction du temps

La propagation de la décharge ne se fait pas toujours de façon linéaire; elle avance par bonds.les instants de pause observés dans certains cas sont des instants ou le critère de propagation n'est pas satisfait, c'est-à-dire que le champ de l'arc est supérieur au champ de la couche de pollution

La figure 5.26 montre le variation de la résistance de la couche de pollution en fonction de temps. On peut remarquer que la résistance a une même allure que la longueur de décharge. Lorsque le courant est passé par un zéro, la résistance tient la valeur initiale (extinction de l'arc). cette résistance s'annule pas à cause de l'absence pas d'un contournement de la chaine d'isolateurs (juste un décharge partiel).

#### 5.9. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté l'influence de la pollution à la surface de l'isolateur sur la distribution du potentiel et du champ électrique, en basant sur la méthode des éléments finis. On a aussi présenté un circuit équivalent de la chaîne d'isolateurs qui nous a permis de simuler les courants de fuite sous des conditions polluée et propres. Ses paramètres ont été identifiés en se basant sur l'approche des éléments finis. Par ailleurs, nous avons également développé un modèle dynamique permettant de déterminer les différents paramètres caractéristiques de l'arc (courant, longueur, résistance,...) en tenant compte du changement de la résistance de pollution et de l'arc durant la propagation. Nous avons implanté ce circuit équivalent dans logiciel de simulation ATP/EMTP. Des résultats satisfaisant ont été obtenus. Le réamorçage de la décharge est localisé surtout auprès de l'électrode HT où le champ électrique est plus élevé.

# **CHAPITRE 6**

# CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

# Chapitre 06

## CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

#### 6.1. Introduction

Lorsque les isolateurs sont installés dans régions exposées à la pollution, les particules solides polluantes se déposent sur la surface de l'isolateur. Aux conditions humides, les divers dépôts polluants deviennent plus ou moins conducteurs et par la suite, un courant de fuite prend naissance et circule dans cette couche conductrice qui sèche irrégulièrement. On assiste alors au phénomène de formation de la bande sèche sur la surface de l'isolateur.

Ce travail a porte sur la caractérisation électrique ainsi que la modélisation mathématique des décharges dynamiques se propageant sur les surfaces d'isolateurs polluées en tenant compte de la forme de tension appliquée, de la géométrie réel de l'isolateur et le dépôt de la pollution.

Après avoir rappelé les principaux modèles statiques rapportés dans la littérature, souligné leur caractère empirique ou semi empirique et discuté leur domaine de validité, nous avons basé sur le critère de propagation de Hampton simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est générée; ce critère a été également discuté à la lumière de ceux rapportés par d'autres chercheurs.

#### 6.2. Résumé des Résultats

Dans un premier temps on a également présenté un modèle prédiction analytique et dynamique basé sur les constantes caractéristiques de la décharge n et A. Ces derniers ont déterminé à l'aide de l'approche génétique.

Le modèle mathématique que nous avons élaboré en courant continu (DC) permettant de déterminer la tension critique de contournement a été adopté. Celui-ci est basé sur le modèle d'Obenaus et utilise les caractéristiques géométriques de l'isolateur tels que : le diamètre, le pas de l'isolateur, la ligne de fuite, le facteur de forme et la sévérité de pollution. L'avantage

de ce modèle est qu'il donne la possibilité de calculer la tension critique de contournement pour des configurations de géométries complexes, en particulier l'isolateur réel.

La dynamique de l'arc électrique est décrite en tenant compte des évolutions en fonction du temps (évolution temporelle) et en fonction de la longueur de l'arc (évolution spatiale), de différents paramètres régissant le comportement d'un isolateur pollué, sur lequel une décharge se développe jusqu'à provoquer le contournement total. A titre illustratif, nous avons présenté les différents paramètres caractéristiques de l'arc (courant de fuite, vitesse de propagation de l'arc, résistance, longueur,...).

D'autre part, notre travail a porté sur l'étude de la distribution du potentiel et du champ électriques le long d'une chaîne d' isolateur (30kV). Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics, basé sur la méthode des éléments finis. Cette méthode s'est avérée être un bon choix parmi les différentes méthodes numériques proposées. Cette méthode, qui permet de se contenter d'une description surfacique des objets modélisés, présente les avantages importants par rapport aux différentes méthodes existantes du point de vue du nombre d'inconnues mis en jeu, de la prise en compte des domaines infinis, des configurations tridimensionnelles et de la description d'une surface conductrice de faible épaisseur.

Nous avons conclu que la répartition non uniforme de la pollution influe sur la distribution du potentiel qui subit des changements brusques dus aux différentes zones de pollution. Nous avons pu modéliser l'apparition des bandes sèches qui ont tendance à augmenter la tension à leurs bornes et par conséquent à la distorsion du champ électrique. La valeur maximale du champ est obtenue dans le cas où l'isolateur est pollué. Le champ électrique augmente avec la tension appliquée. Cependant, la forme des allures du champ électrique restent les mêmes. En d'autres termes, la différence est dans les valeurs et non pas dans la forme. Les valeurs du potentiel et du champ électriques diminuent au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'électrode soumise à la haute tension de l'isolateur. La valeur maximale du champ électrique est obtenue dans les nervures de l'isolateur près de la tige. Par la suite, nous avons présenté un circuit équivalent qui tient compte l'état propre de la chaine d'isolateurs, la présence de la couche de pollution et l'apparition de la bande sèche. Les paramètres électriques du circuit sont déterminés par la méthode des éléments finis.

Nous avons implanté le circuit équivalent dans le logiciel de simulation l'ATP/EMTP dans le but de simuler les courants de fuite qui traversent la chaine d'isolateurs. Les résultats de simulation obtenus dans le cadre de cette étude montrent que l'état humide de la pollution influe sur le courant de fuite et dans ce cas est purement résistif. La décharge à travers la bande sèche a été simulée en adoptant le modèle dynamique de propagation de la décharge en courant alternative (Annexe A.). Ce modèle a été implanté dans le circuit équivalent de l'isolateur. Il ressort de différentes simulations de ce dernière partie de travail que, la présence de la décharge à travers la bande sèche influe sur le courant de fuite. De plus, le réamorçage de la décharge sur la surface de la chaine d'isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité du dépôt polluant ainsi que de la répartition de la couche de polluante. Par conséquent, la connaissance de ce degré de pollution est une condition préalable et indispensable pour apprécier et dimensionner convenablement la chaine d'isolateurs installée sur site.

#### 6.3. Recommandations de recherche futures

Cette étude a offert une perspective évaluative sur les recherches expérimentales et théoriques sur l'effet de propagation de la décharge électrique autour de l'isolateur sous contrainte de tension (continue et alternative). Le modèle de l'arc basé sur les propriétés physiques du phénomène de la décharge dynamique été choisi. L'objectif a été atteint et ce modèle donne des résultats satisfaisants. Par ailleurs, il montre une concordance très prometteuse pour continuer dans le futur l'implantation des modèles dynamiques avec plus d'améliorations dans la mise en considération d'autres processus de développement de la décharge.

Parmi les futures recherches qui peuvent améliorer ce travail on peut citer:

- Améliorer le modèle de propagation de l'arc, sachant que la décharge s'établit dans une atmosphère caractérisée par des paramètres dynamiques et électrothermiques (A et n).
- Etude de l'instabilité de la décharge qui peuvent à provoquer une érosion à la surface de l'isolateur.
- Développement des modèles prédictifs dans le but de la réduction des essais pour prédire le degré de sévérité, l'évolution du courant de fuite et de la conductivité

superficielle en fonction du temps dans les conditions naturelle.

# **ANNEXE**

### Annexe A.

#### MODELE DE DECHARGE

```
comment ce programme (Les données de programme)
```

- --- V1,V2: Tension aux bornes de la première ailette
- --- R: Résistance de la partie humide
- --- Rarc: Résistance de l'arc
- --- close: Action de fermeture de l'interrupteur
- --- L: Ligne de fuite de l'ailette
- --- gamma: Conductivité de la couche polluante
- --- riso: Rayon de l'ailette
- --- mu: mobilité des électrons
- --- A ,n: Constantes de l'arc
- --- I: Courant de décharge
- --- Ep: Champ de la partie humide
- --- Earc: Champ de l'arc
- --- Vt: Vitesse de propagation de l'arc
- --- TT: Pas de temp

#### end comment

#### **INPUT** V1,V2

**OUTPUT** R, close

**DATA** L, gamma, riso ,mu, A, n

VAR x, I, V, R, Ep, Earc, Rarc, rp, Vt, TT, close

#### **INIT**

TT:=0.0001

x := 0.01 \* L

Rarc:=0

rp:=1/(riso\*gamma\*pi)

R:=rp\*L

#### **ENDINIT**

**EXEC** 

```
TT:=TT+timestep ---Incrémentation du temp
    V:=V1-V2
   R:=rp*(L-x) --- Calcul de la résistance de pollution
   I:=V/(R+Rarc)---Calcul de courant de fuite
   Rarc := (A*x)/(\textcolor{red}{\textbf{1e-6}} + ABS(I)**(\textcolor{red}{\textbf{n+1}})) --- Calcul \ de \ la \ r\'esistance \ de \ l'arc
   Earc:=A/(1e-6+sign(I)*(ABS(I))**n)---Calcul de champ de l'arc
   Ep:=rp*I---Calcul de champ de la partie humide
  write("Earc : ", Earc)
  write("Ep:", Ep)
   IF (abs(Ep) > = abs(Earc)) THEN
         IF (x <= 0.9*L)THEN
            Vt:=mu*abs(Ep-Earc)
           x := x + Vt*timestep
         ELSE
           IF (x>L) THEN
            x := L
            ENDIF
            close:=1
            R:=rp*(L-x)
         ENDIF
   ELSE
      close:=0
      x := 0.01 * L
      R := rp*0.99*L
   ENDIF
    ENDEXEC
ENDMODEL
```

- [1] X. Lin, Z. Chen, X. Liu, and K. Chu, "Test Results on Various Shed Shapes in Heavy Industrial Contamination Areas," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 27, no. 3, pp. 593–600, 1992.
- [2] J. S. Forrest, "The electrical characteristics of 132-kV line insulators under various weather conditions," *J. Inst. Electr. Eng.*, vol. 79, no. 478, pp. 401–415, 1936.
- [3] M. M. Khalifa and R. M. Morris, "Performance of Line Insulators Under Rime Ice," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-86, no. 6, pp. 692–698, 1967.
- [4] W. A. Chisholm *et al.*, "The cold fog test," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 16, no. 10, pp. 58–59, 1996.
- [5] M. Farzaneh, "Contournement electrique des isolateurs recouverts de glace Flashover performance of ice-covered insulators," *CAN.J.ELECT &COMP.ENG*, vol. 22, no. 3, pp. 95–109, 1997.
- [6] M. Kawai, "AC Flashover Tests at Project UHV on Ice-Coated Insulators," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-89, no. 8, pp. 1800–1804, 1970.
- [7] J. S. Forrest, P. J. Lambeth, and D. F. Oakeshott, "The authors' reply to the discussions on 'Research on the performance of high-voltage insulators in polluted atmospheres," *Proc. IEE Part A Power Eng.*, vol. 107, no. 32, p. 195, 1960.
- [8] kazuhiko T. Hisakazu Matsuda, Hiroshi Komuro, "Withstand voltage characteristics of insulator string covered with snow or ice," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 6, no. 3, pp. 1243–1250, 1991.
- [9] S. M. Fikke, J. E. Hanssen, and L. Rolfseng, "Long range transported pollutants and conductivity of atmospheric ice on insulators," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 3, pp. 1311–1321, 1993.
- [10] R. O. Ravi S. Gorur, "Prediction of flashover voltage of insulators using low voltage surface resistance measurement," Final Project Report, Arizona State University, 2006.
- [11] B. F. Hampton, "Flashover mechanism of polluted insulation," *PROC.IEE*, vol. 111, no. 5, pp. 985–990, 1964.
- [12] Z. Aydogmus and M. Cebeci, "A new flashover dynamic model of polluted HV insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 11, no. 4, pp. 577–584, 2004.
- [13] A. B. N Dhahbi-Megriche, "Flashover Dynamic Model of pulluted Insulators under ac Voltage," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 7, no. 2, pp. 283–289, 2000.

- [14] L. Bo and R. S. Gorur, "Modeling flashover of AC outdoor insulators under contaminated conditions with dry band formation and arcing," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 3, pp. 1037–1043, 2012.
- [15] N. Dhahbi-Megriche, "Modélisation dynamique des décharges sur les surfaces d'isolateurs pollués sous différentes formes de tension: elaboration d'un critère analytique de propagation," *Ph.D. Diss. École Cent. Lyon, Fr.*, no. January 1998, 1998.
- [16] M. E. A. Slama, A. Beroual, and H. Hadi, "Analytical computation of discharge characteristic constants and critical parameters of flashover of polluted insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 6, pp. 1764–1771, 2010.
- [17] M.Farzaneh and J.Zhang, "Modelling of DC arc discharge on ice surfaces," *IEE Proc.gener.transm.Distrib*, vol. 147, no. 2, pp. 81–86, 2000.
- [18] R. Matsuoka, S. Ito, K. Sakanishi, and K. Naito, "Flashover on Contaminated Insulators with Different Diameters," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 6, pp. 1140–1146, 1991.
- [19] T. C. Cheng and H. I. M. Nour, "A Study on the Profile of HVDC Insulators: Mathematical Modeling and Design Considerations," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 1, pp. 113–117, 1989.
- [20] R.Sundararajan and R.S Gorur, "Effect of Insulator Profiles on dc Flashover Voltage under Polluted Conditions," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 1, no. 1, pp. 124–132, 1994.
- [21] T. Fujimura, "Performance of Insulators for Direct Current Transmission Line," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 92, no. 3, pp. 943–949, 1972.
- [22] M. Fazelian, C. Y. Wu, H. I. Nour, and L. J. Wang, "A Study on the Profile of HVDC Insulators: DC Flashover Performance," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 1, pp. 119–125, 1989.
- [23] L. ouchen, "Modélisation Et Simulation Des Isolateurs Par La Méthode Des Eléments Finis"," these majister, Univ. Sétif, Algérie, 2010.
- [24] P. Claverie and Y. Porcheron, "How to choose insulators for polluted areas," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-92, no. 3, pp. 1121–1131, 1973.
- [25] R. Chaarani, "Étude De L'Influence Des Caractéristiques Des Isolateurs Sur Leurs Performances Électriques Dans Des Conditions De Givrage," these de

- doctorat, université de quebec, canada, 2003.
- [26] R. Wilkins, "Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films," *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 116, no. 3, p. 457, 1969.
- [27] R. Wilkins and A. A. J. Al-Baghdadi, "Arc propagation along an electrolyte surface," *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 119, no. 12, p. 1767, 1972.
- [28] M. E. A. Slama, A. Beroual, and H. Hadi, "Influence of the linear non-uniformity of pollution layer on the insulator flashover under impulse voltage - Estimation of the effective pollution thickness," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 2, pp. 384–392, 2011.
- [29] F. Bouchelga and R. Boudissa, "Effect of the development of electrical parallel discharges on performance of polluted insulators under DC voltage," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 4, pp. 2224–2233, 2015.
- [30] Z. Sahli, A. Mekhaldi, R. Boudissa, and S. Boudrahem, "Prediction parameters of dimensioning of insulators under non-uniform contaminated conditions by multiple regression analysis," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 4, pp. 821–829, 2011.
- [31] H. Edels and Y. Ettinger, "Arc interruption and thermal reignition," *Proc. IEE Part A Power Eng.*, vol. 109, no. 43, p. 89, 1962.
- [32] N. Mhaguen, "Développement de modèles dynamiques de prédiction de la tension critique de contournement des isolateurs recouverts de glace basés sur la méthode des éléments finis," *these Dr. quebec, canada*, 2011.
- [33] H. Matsuo, T. Yamashita, and T. Fujishima, "Shape of contacting surface between an electrolytic solution and local discharge on it," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 10, no. 4, pp. 634–640, 2003.
- [34] S. Diampeni kimbakala, "Modelisation dynamique des decharges se propageant sur des surfaces isolantes pollueés avec des depots discontinus sous differentes formes de tension," *Ph.D. Diss. École Cent. Lyon, Fr.*, 2007.
- [35] K. L. Chrzan, H. Schwarz, and H. Hausler, "Effect of Impulse Polarity on the Flashover Voltage of Polluted Cap and Pin Insulators," *Proc. 16th Int. Symp. High Volt. Eng.*, no. May, pp. 1–5, 2009.
- [36] M. Marich, H. Hadi, and R. Amiri, "New approach for the modeling of the polluted insulators," *Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, pp. 441–

- 444, 2006.
- [37] R. Boudissa, S. Djafri, A. Haddad, R. Belaicha, and R. Bearsch, "Effect of insulator shape on surface discharges and flashover under polluted conditions," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, no. 3, pp. 429–437, 2005.
- [38] M. E. A. Slama, H. Hadi, and S. Flazi, "Study on influence of the no-uniformity of pollution at the surface of HVAC lines insulators on flashover probability," *Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, no. mm, pp. 562–566, 2007.
- [39] R. Sundararajan and R. S. Gorur, "Dynamic Arc Modeling of Pollution Flashover of Insulators under dc Voltage," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 28, no. 2, pp. 209–218, 1993.
- [40] X. Chen, "Modélisation de l'arc de contournement sur la surface de glace polluée," *these Dr. quebec, canada*, 2000.
- [41] M. E. A. Slama, "Contribution a l'étude de l'influence de la non uniformité de la distribution de la pollution basée sur la méthode de la DDSE pour le dimensionnement des isolateurs des lignes THT a courant alternatif," these majister, Univ. d'Oran(USTO), Algérie, 2002.
- [42] M. Teguar, "Modélisations d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électrogéométriques," *Thèse Dr. d'Etat,, Ec. Natl. Polytech. El-Harrach, Algérie.*, 2003.
- [43] R. Boudissa, A. Bayadi, and R. Baersch, "Effect of pollution distribution class on insulators flashover under AC voltage," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 104, pp. 176– 182, 2013.
- [44] H. Terrab, "Contribution à 1' étude et 1' analyse de la pollution et ses effets sur les isolateurs haute tension utilisés dans le réseau électrique national," *Thèse Dr. Univ. Sétif, Algérie*, 2016.
- [45] A. Mekhaldi, D. Namane, and S. Bouazabia, "Flashover of Discontinuous Pollution Layer on HV Insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 6, no. 6, pp. 900–906, 1999.
- [46] R. Sundararajan and R. S. Gorur, "Role of non-soluble contaminants on the flashover voltage of porcelain insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 3, no. 1, pp. 113–118, 1996.

- [47] M. E. A. Slama, "Étude expérimentale et modélisation de l'influence de la constitution chimique et de la répartition de la pollution sur le contournement des isolateurs haute tension," *Thèse Dr. Ec. Cent. Lyon, Fr.*, 2011.
- [48] D. L. Williams, A. Haddad, A. R. Rowlands, H. M. Young, and R. T. Waters, "Formation and Characterization of Dry Bands in Clean Fog on Polluted Insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 6, no. 5, pp. 724–731, 1999.
- [49] R. Matsuoka, K. Kondo, K. Naito, and M. Ishii, "Influence of Nonsoluble Contaminants on the Flashover Voltages of Artificially Contaminated insulators," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 1, pp. 420–430, 1996.
- [50] "Outdoor insulation in polluted conditions: guidelines for selection and dimensioning," *Cigré Tech. Broch. n°518, Work. Gr. C4.303, December 2012.*
- [51] G. Montoya, I. Ramirez, and J. I. Montoya, "Correlation among ESDD, NSDD and leakage current in distribution insulators," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 151, no. 3, 2004.
- [52] J. Novak and G. Ellena, "Arc field measurement with a simple experimental arrangement," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 20, no. 4, pp. 462–467, 1987.
- [53] S. Farokhi, "Mécanismes de propagation de l'arc électrique a la surface de glace," *Thèse Dr. en Genie, UQAC, Québec, Canada*, no. September, 2010.
- [54] L. J. Williams, J. H. Kim, and Y. B. Kim, "Contaminated insulators-chemical dependence of flashover voltages and salt migration," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-93, no. 5, pp. 1572–1580, 1974.
- [55] S. Flazi, A. Ouis, and N. Boukhennoufa, "Resistance of pollution in equivalent electric circuit of flashover," *ET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 1, no. 1, pp. 183–188, 2007.
- [56] V. P. Belosheev, "Study of the leader of a spark discharge over a water surface," *Technical.Physics*, vol. 43, no. 7, pp. 1–7, 1998.
- [57] A. M. Anpilov, E. M. Barkhudarov, and I. A. Kossyi, "High-voltage pulsed discharge along the water surface. Electric and spectral characteristics," *Electr. Spectr. Charact.* 28, ICPIG, Prague, Czech Repub., no. 8, pp. 1030–1033, 2007.
- [58] R. T. Waters, A. Haddad, H. Griffiths, N. Harid, and P. Sarkar, "Partial-arc and spark models of the flashover of lightly polluted insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 2, pp. 417–424, 2010.

- [59] T. Matsumoto, M. Ishii, and T. Kawamura, "Optoelectronic measurement of partial arcs on a contaminated surface," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-19, no. 6, pp. 543–549, 1984.
- [60] M. Ishii and H. Ohashi, "Polarity Effect in dc Withstand Voltages of Contaminated Surfaces," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 6, pp. 1033–1042, 1988.
- [61] K. Haji, Y. Zhu, M. Otsubo, and T. Sakoda, "Studies on erosion of silicone rubber exposed to partial arc discharges," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 93, no. 12, pp. 2214–2221, 2008.
- [62] P. Flesch, "Light and Light Sources...High-Intensity Discharge Lamps," *springer*, pp. 3–50, 2006.
- [63] H. K. Kuiken, "An asymptotic treatment of the Elenbaas-Heller equation for a radiating wall-stabilized high-pressure gas-discharge arc," *J. Appl. Phys.*, vol. 70, no. 10, pp. 5282–5291, 1991.
- [64] Norme Internationale CEI 60060-1, "Techniques d'essais à haute tension. Partie 1 : Définitions et prescriptions relatives aux essais," 1989.
- [65] B. Moula, A. Mekhaldi, M. Teguar, and A. Haddad, "Characterization of discharges on non-uniformly polluted glass surfaces using a wavelet transform approach," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 4, pp. 1457–1466, 2013.
- [66] M. A. Douar, A. Mekhaldi, and M. C. Bouzidi, "Flashover process and frequency analysis of the leakage current on insulator model under non-uniform pollution conditions," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 4, pp. 1284–1297, 2010.
- [67] A. Cavallini, S. Chandrasekar, G. C. Montanari, and F. Puletti, "Inferring ceramic insulator pollution by an innovative approach resorting to PD detection," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 1, pp. 23–29, 2007.
- [68] F. Bouchelga, "Etude du développement des décharges électriques parallèles sur une surface isolante large et polluée sous tension continue," *Thèse Dr. Univ. Bejaia, Algérie.*, 2016.
- [69] S. A. Bessedik, "Contournement des isolateurs pollués Soutenue," *Thèse Dr. Univ. d'Oran, Algérie.*, 2015.
- [70] P. S. Ghosh and N. Chatterjee, "Polluted Insulator Flashover Model for ac voltage," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 2, no. 1, pp. 128–136, 1995.

- [71] A. Rumeli, "Flashover Along a Water Column," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-11, no. 4, pp. 115–120, 1976.
- [72] G. Zhicheng and Z. Renyu, "Calculation of dc and ac Flashover Voltage of pulluted insulators," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 25, no. 4, pp. 723–729, 1990.
- [73] S. Gopal and Y. N. Rao, "Flashover Phenomena of Polluted Insulators.," *IEE Proc. C Gener. Transm. Distrib.*, vol. 131, no. 4, pp. 140–143, 1984.
- [74] E. Insulation, C. Cheng, C. Y. Wu, H. Nour, and L. Angeles, "DC Interfacial Breakdown on Contaminated Electrolytic Surfaces," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-19, no. 6, pp. 536–542, 1984.
- [75] A. M. Rahal and C. Huraux, "Flashover Mechanism of High Voltage Insulators," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 11, no. 6, pp. 2223–2231, 1979.
- [76] S. Flazi, A. Ouis, M. Hamouda, and H. Hadi, "Dynamic features of DC flashover on polluted insulators," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 1, no. 1, pp. 8–12, 2007.
- [77] S. Hesketh, "General Criterion for the Prediction of Pollution Flashover," *PROC.IEE*, vol. 114, no. 4, pp. 531–532, 1967.
- [78] M. Marich, "Validation de nouvelles méthodes de modélisation du contournement des isolateurs pollués," *these Dr. Univ. d'Oran, Algerie*, 2018.
- [79] F. A. M. Rizk and D. H. Nguyen, "Digit al Simulation of Source-Insulator Interaction in HVDC Pollution Tests," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 3, no. 1, pp. 405–410, 1988.
- [80] N. Dhahbi-Megriche, A. Beroual, and L. Krahenbul, "A new proposal model for flashover of polluted insulators," *J. Phys. D Appl. Phys*, vol. 30, pp. 889–894, 1997.
- [81] R. Sundararajan, N. R. Sadhureddy, and R. Gorur, "Computer Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Conditions," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 2, no. 1, pp. 121–127, 1995.
- [82] C. Volat, M. Farzaneh, and N. Mhaguen, "Improved FEM Models of One- and Two-arcs to Predict AC Critical Flashover Voltage of Ice-covered Insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 2, pp. 393–400, 2011.
- [83] C. Tavakoli, M. Farzaneh, and I. Fofana, "Dynamics and Modeling of AC Arc on Surface of Ice," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 13, no. 6, pp. 1278–1285, 2006.
- [84] T. Chihani, A. Mekhaldi, A. Beroual, M. Teguar, and D. Madjoudj, "Model for polluted

- insulator flashover under AC or DC voltage," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 25, no. 2, pp. 614–622, 2018.
- [85] Catalog of SGD La Granja, "Glass insulators," 2016.
- [86] L. Ouchen, A. Bayadi, and R. Boudissa, "Dynamic model to predict the characteristics of the electric arc around a polluted insulator," *IET Sci.Meas.Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 83–90, 2020.
- [87] F. V. Topalis, I. F. Gonos, and I. A. Stathopulos, "Dielectric behaviour of polluted porcelain insulators," *IEE Proc.-Gener. Trunsm. Distrib.*, vol. 148, no. 4, pp. 269–274, 2001.
- [88] A. Bayadi, "Parameter identification of ZnO surge arrester models based on genetic algorithms," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 7, pp. 1204–1209, 2008.
- [89] P. S. Ghosh and N. Chatterjee, "Arc propagation over electrolytic Surfaces under Power Frequency Voltage," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 3, no. 4, pp. 529–536, 1996.
- [90] G. Peyregne, A. M. Rahal, and C. Huraux, "Flashover of a Liquid Conducting Film Part2: Time To Flashover Mechanisms," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-17, no. 1, pp. 15–19, 1982.
- [91] C. Volat, "Calcul de la distribution du potentiel du champ électrique le long des surfaces de glace recouvrant les isolateurs haute-tension et dans les intervalles d'air entre celles-ci," *these Dr. quebec, canada*, 2002.
- [92] A. rahman Rahisham, "Investigations of zno microvaristor for stress control on polymeric outdoor insulators," *Thèse Dr. École d'ingénierie, Univ. Cardiff.*, no. August, 2012.
- [93] N. A. Othman, M. A. M. Piah, and Z. Adzis, "Space charge distribution and leakage current pulses for contaminated glass insulator strings in power transmission lines," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 4, pp. 876–882, 2017.
- [94] S. Ilhan, A. Ozdemir, S. H. Jayaram, and E. A. Cherney, "Numerical and experimental investigation of the effects of pollution on glass suspension-type insulators," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 5, pp. 2987–2994, 2015.
- [95] K. Chrzan, Z. Pohl, S. Grzybowski, and W. Köhler, "Pollution performance of 110 kV metal oxide arresters," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 12, no. 2, pp. 728–733, 1997.

[96] M. Faramarzi Palangar, M. Mirzaie, and A. Mahmoudi, "Improved flashover mathematical model of polluted insulators: A dynamic analysis of the electric arc parameters," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 179, no. October 2019, p. 106083, 2020.



# Dynamic model to predict the characteristics of the electric arc around a polluted insulator

ISSN 1751-8822 Received on 17th January 2019 Revised 17th July 2019 Accepted on 9th October 2019 E-First on 2nd December 2019 doi: 10.1049/iet-smt.2019.0029 www.ietdl.org

Lyamine Ouchen<sup>1 ™</sup>, Abdelhafid Bayadi<sup>1</sup>, Rabah Boudissa<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, University Ferhat ABBAS Setif – 1, Algeria

**Abstract:** This study presents a dynamic arc model of a polluted insulator based on the formulation of the Obenaus model and the Hampton criterion for discharge propagation. An experiment was conducted on a practical glass insulator installed in the Algerian network for the purpose of measuring the flashover voltage and estimating the arc parameters (*A* and *N*) using a genetic optimisation algorithm. The parameters used in the dynamic model were the arc current, arc length, and arc resistance calculated using MATLAB. Moreover, an attempt was made with finite element software to calculate the voltage and electric-field throughout the insulator surface with and without the presence of contaminants. Finally, the obtained simulation and experimental results showed high performances under operational conditions and respect IEC 60060-1 standard recommendations.

#### 1 Introduction

The development of the modern world depends to a large extent upon continuous electric power supply. With growing demand, utilities must provide secure and reliable power delivery while maximising the performance of the power distribution system from both technical and economic standpoints. Interruptions or failures in power systems result in damage to the high-voltage (HV) equipment such as glass insulators, surge arresters etc.

Insulators are the devices that are used in electricity supply networks to support and separate conductors at HV. However, overhead insulators have been beset by crucial problems due to contamination. When pollution is combined with fog or rain, a wet conducting surface is created and a resistive leakage current begins to flow through the insulator surface, leading progressively to the formation of dry bands [1, 2]. This formation is generally accompanied by partial discharges. When the leakage current increases, a partial arc will propagate along the pollution layer and finally leads to flashover.

In recent years there has been rapidly growing interest in the mechanism of development of electrical arcs around polluted insulators. A great number of projects have been carried out and many studies have been published all over the world concerning the phenomena of pollution flashover. The modelling of polluted insulator flashover started from a mathematical model proposed by Obenaus [3]. Hadjrioua et al. [4] determined the critical conditions for which the electrical discharge moves towards flashover. Subsequently, other researchers improved and developed the flashover model, and built both static and dynamic AC/DC models [5]. Dynamic models mainly consider the bow channel as an equivalent electrical circuit and simulate the propagation of the arc step by step. The excellent characteristic of dynamic models is that they are time-dependent while the calculation of velocity is the critical point. Beroual solved these problems successfully on the basis of an energy balance [6, 7]. In another publication [8], Dhahbi-Megriche and Beroual proposed a dynamic model in which the arc channel is equivalent to a series of resistors with an inductance and an impedance criterion d|Zeq|/dx < 0.

Taking advantage of the previously cited model, Volat et al. [9] and Tavakoli et al. [10] successfully replicated it for AC arc discharges on ice surfaces. Volat et al. applied this model to AC multiple arcs on flat plate insulator using the finite element method (FEM), while the AC arc was investigated using the same model

by Tavakoli and excellent results were obtained. Slama et al. [11] studied the influence of the linear non-uniformity of the pollution layer on the critical current and flashover voltage of a polluted flat plate under lightning impulse voltage. A mathematical model to compute the flashover discharge characteristic constants (A and N) and hence the critical characteristics of flashover were presented. The electro-thermal model of the polluted flat plate insulator enabled the instantaneous changes in the discharge characteristic such as leakage current, discharge temperature, and arc resistance to be predicted [12]. All these studies used a flat plate insulator model and the arc parameters found in the literature to simplify the study. However, these values differ from one author to another. The present study, therefore, contributes to developing a dynamic flashover model taking into consideration the real geometrical shape of the insulator. An experimental test was conducted on a cap and pin insulator to identify A and N parameters using genetic algorithm (GA). These parameters were then used in the dynamic model to observe the instantaneous variation of the discharge.

In reality, the voltage and electric field distribution of the insulator string from the insulator pin to the cap is highly non-uniform. Therefore, the computation of voltage changes and electric field distribution needs to be precise because the maximum field is usually the most important and decisive factor in insulation design and flashover studies.

Numerical methods have been developed to calculate the electric field and the potential within and around HV equipment. Rasolonjanahary et al. [13] presented a computation method based on integral limit equations for electric fields and potentials that can be used in polluted insulators, while the finite difference method for calculating the electric field in and around polluted insulators with asymmetric boundary conditions was proposed by Morales et al. [14]. In addition, the FEM is a powerful method for providing precise solutions to the electrical potential problems associated with HV insulation [15–17]. The voltage and distribution of the electric field for different types of ceramic disc insulators were studied in [18] using two-dimensional (2D) and 3D FEM [19] software.

This study presents a dynamic arc model of a polluted insulator. It is based on a formulation of the Obenaus model. The critical values of the flashover voltage were obtained for the definition of the arc constants. The latter made it possible to quantify the evolution time of the leakage current, the propagation speed, the time to flashover, and the discharge length. A simulation study was

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, University Abderrahmane MIRA Bejaia, Algeria

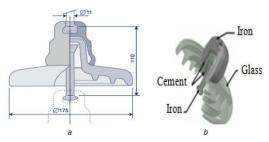


Fig. 1 Schematic representation of the insulator model type  $U_{40}$  (a) 2D, (b) 3D

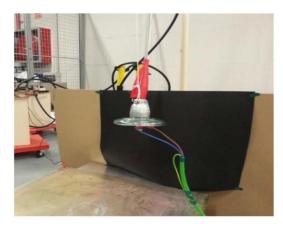


Fig. 2 Polluted test insulator

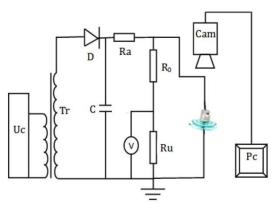


Fig. 3 Circuit diagram of the measurement. (UC) voltage regulator, (D) diode, (Tr) transformer, (C) capacitor, (Ra) current limiting resistor, (V) voltmeter, (R0, Ru) resistive divider, (Cam) camera, (Pc) computer

then carried out to determine the potential distribution and the electric field corresponding to the experimental values of the flashover voltage, using COMSOL version 4.3 Multiphysics software.

### 2 Insulator model

A cap and pin glass insulator type  $\rm U_{40}$  was selected for the study (Fig. 1). It consists of three different materials, namely iron for the insulator cap and pin, glass for the main insulating medium, and cement which is used to bond both the pin and the cap to the disc. The diameter D of the insulator is 175 mm, the creepage distance is 190 mm and the height H is 110 mm (Fig. 2).

The general assembly diagram of the experimental setup is shown in Fig. 3. The DC test voltage is provided by a 120 kV transformer. The latter is provided after a half-wave rectification composed of a high-voltage diode D, a smoothing capacitor, a damping resistor Ra and control panel. The flashover voltage is recorded through a digital measuring instrument in a test cell. A suspension insulator is connected across the protective resistor and the resistive voltage divider. Visualisation of the electrical propagation discharge along the insulator surface is performed by CANON EOS 80D DSLR camera. The device system is equipped with a newly developed 24.2 MP advanced photo system type-C complementary metal oxide semiconductor sensor feature.

#### 3 Experimental work

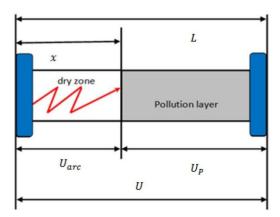


Fig. 4 Basic equivalent electrical model

**Table 1** Values of arc constants *A* and *N* according to many authors

autriors		
Authors	Α	Ν
Wilkins [20]	63.00	0.760
Obenaus [3]	100.00	0.700
Hampton [1]	530.00	0.240
Ghosh [21]	360.00	0.590
Farzaneh and Zhang [22]	208.90	0.449
Topalis et al. [23]	124.80	0.409

Table 2 Experimental values

Insulator type	Surface conductivity $\sigma_P$ , $\mu S$	$U_{\rm cm}$ , kV
U40	5	16.0
	10	13.2
D = 175 mm	15	12.0
	20	11.0
H = 110 mm	25	10.6
	30	10.2
	35	10
	40	9.6
	45	9.3
	50	9.0

Table 3 Parameters of the GA

Population size	Maximum generation	$P_{\rm c}$	$P_{mut}$
20	200	0.75	1%

## 4 Mathematical flashover model

The flashover process on contaminated insulators has been studied by several researchers. The simplest model is the one developed by Obenaus [3], which consists of an arc that runs through the dry zone and a resistance equivalent to the wet zone (Fig. 4). The voltage across the insulator is given by the following formulas:

$$U = U_{\rm arc} + U_{\rm P} \tag{1}$$

$$U_{\rm P} = (L - x)r_{\rm P} \tag{2}$$

$$U_{\rm arc} = xAI^{-N} \tag{3}$$

where  $U_{\rm arc}$  and  $U_{\rm P}$  are the stress in the arc and pollution layer, respectively; x is the length of the arc; L is the creepage distance of the insulator;  $r_{\rm P}$  is the resistance per unit length of the pollution layer; I is the leakage current; A and N are the arc constants.

The conductivity of the pollution layer is

$$\sigma_{\rm P} = (369.05C + 0.42)10^{-6} \tag{4}$$

in which C is the equivalent salt deposit density in mg/cm<sup>2</sup>.

We can define easily the critical length of the discharge as follows [20]:

$$x_{\rm c} = \frac{1}{N+1}L\tag{5}$$

The critical current will be

$$I_{c} = (\pi D \sigma_{P} A)^{1/(N+1)} \tag{6}$$

The flashover voltage under this critical condition becomes

$$U_{c} = \frac{A}{N+1} (L + \pi DFKN) (\pi D\sigma_{P}A)^{-N/(N+1)}$$
 (7)

D is the insulator diameter; K is the coefficient of the pollution layer resistance; F is the form factor of the insulator; A and N are the arc constants.

According to (7), all parameters are known except A and N. The range variation of arc constants is due to their dependency on several factors such as atmospheric conditions, voltage type, and the constitution of the electrolytic surface where the arc burns. Table 1 presents some values of A and N, which are often used in the flashover literature (Table 1).

This study proposes to provide a solution based on GAs to obtain the best possible series of parameter values of the arc constants A and N. The validity of the predicted parameters is then verified by comparing the predicted results with the experimental results presented in Table 2.

The response of a model can be correctly predicted if an adequate choice of its parameters A and N is made. These parameters can be determined by minimising the following objective function:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{n} (U_{\rm c} - U_{\rm cm})^2 \tag{8}$$

where  $\varepsilon$  is the sum of quadratic errors, n indicates the number of iterations,  $U_{\rm c}$  and  $U_{\rm cm}$  are the calculated and the measured flashover voltage, respectively.

The goal of GAs is to optimise an objective function in the research space. To achieve this, a population of individuals evolves according to artificial Darwinism (evaluation, selection, and reproduction) based on the fitness  $\varepsilon$  of each individual [24]. The fitness is directly related to the value of the objective function of this individual. Evolution operators applied to the population make it possible to create new individuals (crossover and mutation) and to select the individuals of the population who will survive (selection and replacement). To identify the parameters of the flashover voltage model, the individual is the set of unknown parameters and consequently, each gene coincides with a parameter

The programme used an implementation with real coding. It works with a randomly generated population of 20 chromosomes. It generates 20 random values for the arc constant A (0 < A < 500) and 20 random values for the arc constant N(0 < N < 1).

The chosen parameters of the algorithm are summarised in Table 3. The experimental data  $U_{\rm cm}$  presented in Table 2 are applied in (8), thus resulting in a set of simultaneous equations with two unknowns A and N.

The simulation produces pairs of values (A, N), which finally converge towards the optimal values of A and N. Fig. 5 shows the variations of the constants of the model as a function of the maximum number of generations.

In this study, a stop criterion was applied to stop the process. One of the simplest criteria often used is when the maximum number of generations is reached (Gen max = 200), which gives the pair ' $A_{opt}$  = 162.52', ' $N_{opt}$  = 0.24' optimum.

The model allows the calculation of the critical voltage using the geometrical characteristics of the insulator and the conductivity

Fig. 6 presents the calculated flashover voltage using the A and N constants obtained compared with the measured ones as a function of the conductivity  $\sigma_P$ . The results show that GA presents a good approximation of the experimental data.

The arc parameters optimised by the genetic approach were used in the dynamic flashover model.

The electric field inside the arc  $E_{arc}$  and the electric field in the pollution layer  $E_p$  are calculated as follows:

$$E_{\rm arc} = AI^{-N} \tag{9}$$

$$E_{\rm p} = r_{\rm P} I \tag{10}$$

where  $r_P$  is the resistance per unit length of the pollution layer given by the following relation:

$$r_{\rm P} = \frac{R_{\rm P}}{I_{\rm r} - r} \tag{11}$$

The resistance  $R_P$  of the pollution can be written as follows:

$$R_{\rm P} = \frac{L - x}{\pi \sigma_{\rm P} r_{\rm iso}} \tag{12}$$

where  $r_{iso}$  is the effective radius of the insulator

$$I = \frac{U}{R_{\rm arc} + R_{\rm P}} \tag{13}$$

The resistance of the arc channel can be written as

$$R_{\rm arc} = \frac{Ax}{AI^{N+1}} \tag{14}$$

The Hampton propagation criterion [1] was adopted for the actual model. The criterion is generally accepted by the scientific community and has been used in different dynamic flashover models in previous studies [9, 25]. Its main advantage lies in its simplicity of implementation in the programme compared to other criteria such as Hesketh, Wilkins or Ghosh [10, 26]

$$E_{\rm p} > E_{\rm arc}$$
 (15)

The dynamic flashover model needs the determination of the arc propagation speed defined as follows [25]:

$$v = \mu E_{\rm arc} \tag{16}$$

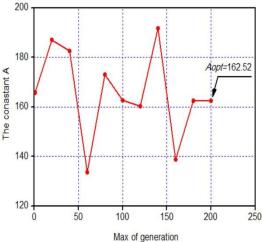
where  $\mu$  is the arc mobility.

Fig. 7 shows the flowchart of the proposed model used to calculate the leakage current, the arc propagation speed, the arc length, and the time lag to flashover.

At time t = 0, the initial value of the applied voltage U is fixed at 2 kV and the corresponding voltage step dU at 0.2 kV

The initial partial arc length x represents 1% of the leakage path L. The pollution resistance  $R_P$  is evaluated, respectively, as well as the leakage current I using (13).

The critical length varies from one author to another. Teguar [27] obtained a value equal to half of the total leakage length of the insulator. This critical length differs from that obtained by Mekhaldi [28] (two-third of the total creepage distance) and that found experimentally by Gopal and Rao [29] (1/3 of the total creepage distance). Ghosh and Chatterjee [26] found an interval ranging from 0.4 to 0.63 L and Gopal an interval from 0.5 to 0.85 L. Other researchers [4, 12] have used the value of L in their models. These differences in the evaluation of the critical length of



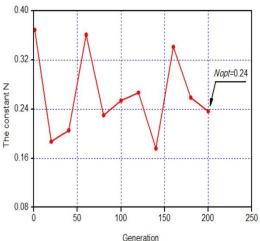


Fig. 5 Variation in the optimum values of the arc constants A and N

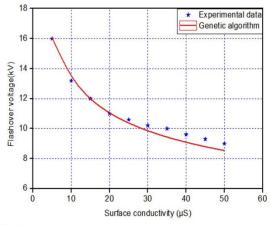


Fig. 6 Critical flashover versus the surface conductivity

the arc can be justified by the choice of the model, the pollution application mode as well as the pollution nature. We used an acceptable value of 0.9 L to simulate our model.

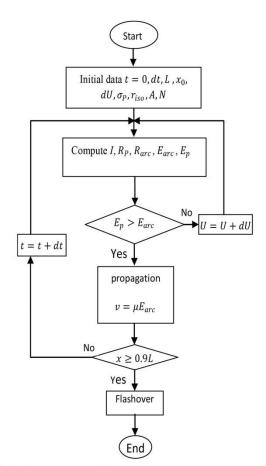


Fig. 7 Arc propagation model flowchart

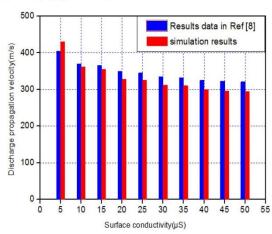


Fig. 8 Discharge propagation velocity as a function of surface conductivity

The propagation velocity of the discharge as a function of the surface conductivity of the pollution layer is given in Fig. 8.

To confirm the credibility of the developed model, we compared the simulation results with the results reported in [8].

It can be seen that the arc speed trends for the insulator decreased non-linearly with surface conductivity. This type of variation has also been reported by other researchers when

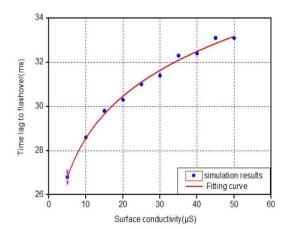


Fig. 9 Time lag to flashover as a function of surface conductivity

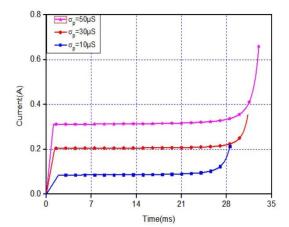


Fig. 10 Temporal evolution of leakage current

measuring discharge velocities versus the resistivity of an electrolyte [30, 31]. An empirical relationship was established by Wilkins and Al-Baghdadi [32] where the discharge velocity appears as a decreasing function of conductivity.

Fig. 9 shows that the time to flashover increases with the conductivity of the polluting layers. This is explained by the fact that when the conductivity of the pollution depositing on the insulator is low, the flashover occurs directly without the appearance of partial arcs. This process has the effect of reducing the time to flashover. On the other hand, when this conductivity is strong, discharges arise and develop until causing the flashover. This time lag can be considerable. From this figure, it can be seen that the time to flashover can be fitted by an exponential function of the conductivity of the polluting layers

$$T = \alpha \cdot \sigma_{\rm P}^{\beta} \tag{17}$$

where  $\sigma_{\rm P}$  is the surface conductivity, T is the time to flashover, and  $\alpha = 0.02$  and  $\beta = 0.09$  are the constant coefficients.

Fig. 10 illustrates the evolution of leakage current with time for different conductivities. As can be seen, it comprises two stages: the first part with relatively slow growth corresponding to the propagation phase, followed by a sudden increase corresponding to the final step, i.e. the flashover phenomenon.

When the discharge propagates, the pollution impedance decreases as well as the discharge resistance over half of the total leakage length. The current behaviour depends on the applied voltage as well as the pollution layer conductivity. Thus, the

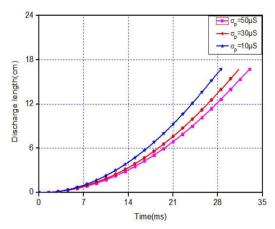


Fig. 11 Discharge length versus time

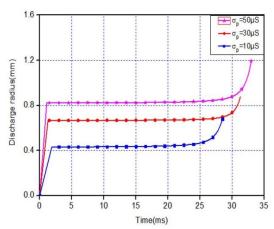


Fig. 12 Discharge radius as a function of time

Table 4 Material properties

Type of material	Relative electric permittivity, $\varepsilon_r$	Electric conductivity, $\sigma$ (S/m)
glass	4.2	10 <sup>-14</sup>
cement	15	10 <sup>-4</sup>
iron	1000	$1.04 \times 10^{5}$
air	1	10 <sup>-14</sup>
pollution	81	10 <sup>-3</sup>

difference in these influencing parameters leads to different evolutions for discharge current during flashover.

Fig. 11 shows the evolution of the discharge length with time for different conductivities. One can notice that the length tends to increase in a regular and almost linear way. The resistance of the arc decreases with time which is in perfect agreement with the propagation of the arc [12]. As the discharge progresses, its propagation speed increases and then pass through the same maximum length (about 0.9 L).

The radius of the discharge calculated from the model proposed by Arshad Nekahi *et al.* [15] (see (18)), follows the shape of the current. This radius remains practically constant over a large part of the leakage length to reach a very large size at the end of the propagation (Fig. 12)

$$ra = \sqrt{\frac{I}{1.45\pi}} \tag{18}$$

#### 5 Simulation parameters

It is very important to study the voltage distribution, the maximum E-field, and the breakdown strength of the polluted insulator surface. To better understand the discharge propagation mechanism, we performed an experimental work followed by a simulation study to determine the electric field distribution of the discharge at critical conditions of flashover. From the simulation results obtained using experimentally flashover voltage, it may be deduced that the discharge elongation mechanism is an ordinary breakdown of the air between two metal electrodes. Flashover is, therefore, possible if the criterion is verified, which means if the electric field distribution along the leakage distance is sufficient for discharge elongation.

The electrical properties of the materials used in this simulation are summarised in Table 4. For each material, we give its electrical conductivity  $(\sigma)$ , and relative permittivity  $(\varepsilon_r)$ . The computation problem was performed in 2D and the type chosen for this simulation was electric currents. Equations (19) and (20) give the equations for electric field and Maxwell's equation for the symmetric case

$$E = -\nabla U \tag{19}$$

$$\nabla E = \frac{\rho}{c} \tag{20}$$

The combination of Maxwell's equation, the current continuity equation, and Ohm's law is given by (21) and (22), respectively

$$\nabla J = \frac{\delta \rho}{\delta t} \tag{21}$$

$$J = \sigma E \tag{22}$$

where U is the electric potential (V), E is the electric field (V/m),  $\varepsilon$  is the permittivity of dielectric material,  $\rho$  is the charge density (C/m³), J is the current density (A/ m²), and  $\sigma$  is the electric conductivity.

The simulation study is modelled in air, where the electric potential (10 kV) is applied to the insulator pin and the insulator cap is grounded.

#### 6 Potential and the electric field

The voltage calculation and electric field distribution are assumed to provide information on the condition of the insulator. The cap and pin insulator were studied when clean and contaminated. A thin film of the pollutant was added on the surface of the insulator.

Figs. 13a and b illustrate the computed equipotential for the two cases. The potential is distributed so as to gradually decrease from insulator pin to insulator cap (Table 4).

Fig. 14 shows the variation in the electric voltage along the creepage distance. It can be seen that more than 60% of electric potential is concentrated between the HV electrode (pin) and until the second skirt. Almost 20% of the electric potential is concentrated around the ground electrode (cap). When the glass disc is contaminated, the resistive current changes the distribution of the electric potential and smoothes it. The undulations are displayed on the clean insulator voltage profile and decrease sharply from 10 to 4.7 kV (Figs. 15 and 16).

Under clean and dry conditions, it is characteristically as capacitive [33]. However, in the case of pollution, the insulator is completely resistive. Computation of the electric field strength provides useful information about surface pollution and is used to locate high stress regions where surface discharges may occur (Figs. 15 and 16).

The critical voltage Uc of the insulator obtained from experiments was used in the simulation programme to calculate the critical electric field Ec as shown in Fig. 17.

The leakage current density along the contaminated layer on the cap and pin glass insulator was simulated under clean and polluted conditions in order to produce the flashover voltage.

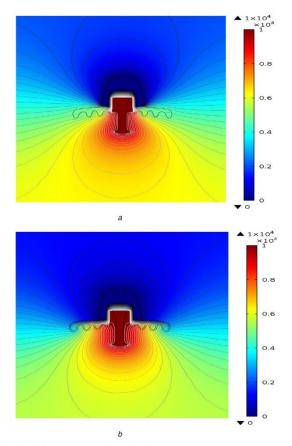


Fig. 13 Equipotential lines and contours (a) Clean, (b) Polluted

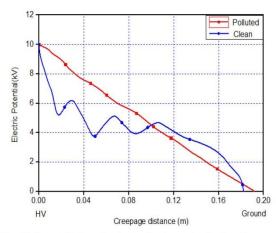


Fig. 14 Computed voltage distributions for clean and polluted insulators

Fig. 18 shows the leakage current density variation over the polluted cap and pin insulator. The current intensity distribution is obtained by using finite element analysis considering a continuous water film with a conductivity of 1 mS/m. The results indicate that a leakage current density is created and flows through the pollution layer. Its magnitude depends on the level of pollution severity and the contamination salinity.

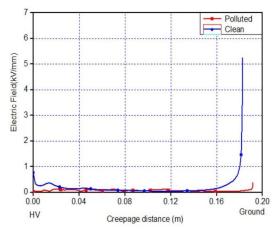
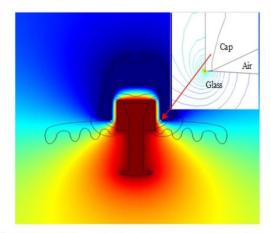


Fig. 15 Electric field distributions for clean and polluted insulators



 $\textbf{Fig. 16} \ \ \textit{Electric field strength at the triple junction region `air-cap-glass'}$ 

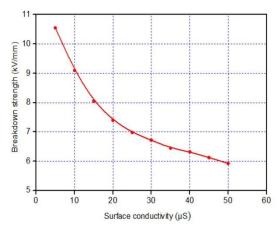


Fig. 17 Critical electric field versus surface conductivity

#### 7 Conclusion

A new contribution is presented in this work towards developing a dynamic flashover model. The study takes into consideration the real geometrical shape of the insulator. An experimental test was first conducted on a cap and pin insulator to tune the parameters (A and N) using the GA. These real parameters were then used in the

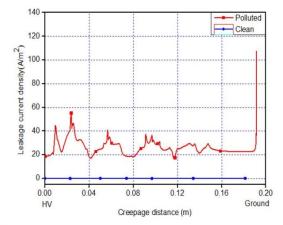


Fig. 18 Leakage current density through clean and polluted insulators

dynamic model to observe the instantaneous variation of the discharge. The performance of this insulator depends strongly on the electric field distribution and the electric field stress. The results of the simulation proved that the contaminants accumulated on the surface of the insulator significantly affect the voltage distribution and the electric field. This distorted field will accelerate the flashover process. It is obvious that the calculated field would help improve insulator design, especially for contaminated areas.

#### 8 Acknowledgments

We gratefully acknowledge the support of the Algerian electricity company SONELGAZ, and the research laboratory LAS; the University of Setif1, Algeria for supporting this project.

#### 9 References

- [1] Hampton, B.F.: 'Flashover mechanism of polluted insulation', IEE Proc.,
- 1964, 111, (5), pp. 985–990

  De la O, A., Gorur, R.S.: 'Flashover of contaminated non ceramic outdoor insulators in a wet atmosphere', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 1998, 5, (6), pp. 814-823
- 'Die vbersehlagspannung verwhmutrter isolatoren', ETZ, 1935, [3] Obenaus, F.: 'Di 56, pp. 369–370
- 50, pp. 309–370
  Hadjrioua, F., Mahi, D., Slama, M.E.-A.: 'Electro-thermal dynamic model using the analytical are parameters for the prediction of the critical flashover condition on the HVDC polluted insulator', *IEE Gener. Transm. Distrib.*, 2017, 11, (2), pp. 427–436
  El-Zohri, E.H., Ziedan, H., Procházka, R.: 'A new proposed dynamic are
- [5]
- [6]
- El-Zont, E.H., Zhedan, H., Frocnazka, R.: A new proposed dynamic arc model for flashover performance of a non-uniform polluted insulator string under HVAC stress', *Electr. Power Syst. Res.*, 2015, **119**, pp. 278–286
  Beroual, A.: 'Electronic and gaseous processes in the breakdown phenomena of dielectric liquids', *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**, (9), pp. 4528–4533
  Dhabbi-Megriche, N., Beroual, A.: 'Dynamic model of discharge propagation on polluted surfaces under impulse voltages', *IEE Proc. Gener. Transm.*
- Distrib., 2000, 147, (5), pp. 279–284

  Dhahbi-Megriche, N., Beroual, A.: 'Flashover dynamic model of polluted insulators under ac voltage', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2000, 7, (2), pp. 283-289

- Volat, C., Farzaneh, M., Mhaguen, N.: 'Improved FEM models of one- and two-arcs to predict AC critical flashover voltage of ice covered insulators', *IEEE Trans Dielectr. Electr. Insul.*, 2011, **18**, (2), pp. 393–400
- arc on surface of ice', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2006, **13**, (6), pp. 1278–1285
- Slama M.E.-A. Beroual A. Hadi H. Influence of the linear nonuniformity of pollution layer on the insulator flashover under impulse voltage
- estimation of the effective pollution thickness', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2011, **18**, (2), pp. 384–392 Chihani, T., Mekhaldi, A., Beroual, A., et al.: 'Model for polluted insulator flashover under AC or DC voltage', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2018, **25**, (2), pp. 444–622
- 25, (2), pp. 614–622 Rasolonjanahary, J.L., Krähenbühl, L., Nicolas, A.: 'Computation of electric fields and potential on polluted insulators using a boundary element method', *IEEE Trans. Magn.*, 1992, **28**, (2), pp. 1473–1476
  Morales, N., Asenjo, E., Valdenegro, A.: 'Field solution in polluted insulators
- [14]
- with non-symmetric boundary conditions', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2001, **8**, (2), pp. 168–172

  Arshad Nekahi, A., McMeekin, S.G., Farzaneh, M.: Numerical computation of electric field and potential along silicone rubber insulators under contaminated and dry band conditions', *3D Res.*, 2016, **7**, (3), pp. 1–10

  El-Refaie, E.-S.M., Abd Elrahman, M.K., Mohamed, M.K.: 'Electric field [15]
- [16] distribution of optimized composite insulator profiles under different pollution conditions', *Ain Shams Eng. J.*, 2016, **9**, (4), pp. 1349–1356 Slama, M.El-A., Abed, M.El-A., Hadi, H., *et al.*: 'HVAC parametric study
- and numerical calculation of partial discharge inception of water droplet at the surface of hydrophobic insulator', *J. Electr. Eng.*, 2014, **14**, (3), pp. 1–7 Subba Reddy, B., Sultan, N.A., Monika, P.M., *et al.*: 'Simulation of potential
- Suboa Reddy, B., Sultan, N.A., Monika, P.M., et al.: Simulation of potential and electric field for high voltage ceramic disc insulators: Fifth Int. Conf. on Industrial and Information Systems (ICIIS), India, 2010, pp. 526–531
  Kontargyri, V.T., Gonos, I.F., Stathopulos, I.A.: 'Measurement and simulation of the electric field of high voltage suspension insulators', Eur. Trans. Electr. Pawer, 2009, 19, (3), pp. 509–517
- Wilkins, R.: 'Flashover voltage of high voltage insulators with uniform [20]
- whikins, R.: Flashover voltage of high voltage insulators with uniform surface pollution films', *Proc. IEE*, 1969, 116, (3), pp. 457–465 Ghosh, P.S., Chatterjee, N.: 'Polluted insulators flashover model for ac voltage', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 1995, 2, (1), pp. 128–136
- Farzaneh, M., Zhang, J.: Modelling of DC are discharge on ice surfaces', *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, 2000, **147**, (2), pp. 80–86

  Topalis, F.V., Gonos, I.F., Stathopulos, I.A.: 'Dielectric behaviour of polluted
- porcelain insulators', *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, 2001, **148**, (4), pp. 269–274
- Bayadi, A.: 'Parameter identification of ZnO surge arrester models based on genetic algorithms', *Electr. Power. Syst. Res.*, 2008, **78**, (7), pp. 1204–1209 Sundararajan, R., Gorur, R.S.: 'Dynamic arc modeling of pollution flashover [24]
- of insulators under DC voltage', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 1993, 28,
- of instators under De Voltage', *IEEE Trans. Dielecti. Electi. Insul.*, 1993, 26, (2), pp. 209–218

  Ghosh, P.S., Chatterjee, N.: 'Arc propagation over electrolytic surfaces under power frequency voltage', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 1996, 3, (4), [26] pp. 529–536

  Teguar, M.: 'Modélisations d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres
- électro géométriques'. PhD thesis, National Polytechnie School, El-Harrach, Algiers University, 2003 Mekhaldi, A.: 'Etude des phénomènes de conduction et de décharge
- [28] électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz'. PhD thesis, National Polytechnic School, El-Harrach, Algiers University,
- Gopal, S., Rao, Y.N.: 'Flashover phenomena of polluted insulators', *IEE Proc.*, 1984, **131**, (4), pp. 140–143.

  Peyrene, G., Rahal, A., Huraux, C.: 'Flashover of a liquid conducting film, part 2: time to flashover-mechanisms', *IEEE Trans. Electr. Insul.*, 1982, **17**, (1), pp. 10–19.
- Matsuo, H., Fuiishima, T., Yamashita, T., et al.: 'Propagation velocity and [31]
- [32]
- Matsuo, H., Fujishima, T., Yamashita, T., et al.: 'Propagation velocity and photoemission intensity of a local discharge on an electrolytic surface', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 1996, 3, (3), pp. 444–449
  Wilkins, R., Al-Baghdadi, A.A.J.: 'Arc propagation along an electrolyte surface', Proc. IEE, 1972, 119, (2), pp. 1886–1892
  Williams, D.L., Haddad, A., Rowlands, A.R., et al.: 'Formation and characterization of dry bands in clean fog on polluted insulators', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 1999, 6, (5), pp. 724–731

#### ملخص:

العازل عبارة عن جهاز مصنوع من مادة عازلة صلبة ، قادر على تحمل الضغط الكهربائي. يتميز بمقاومة عالية عند مرور التيار الكهربائي. دورها هو فصل كاننين موصلين ، يخضعان لإمكانيات مختلفة في شبكات نقل الطاقة ، يتم توفير عزل عن طريق سلسلة من العوازل تتميز كل سلسلة بشكل رئيسي بطول التسرب هذا الطول يعتمد على مستوى الجهد التشغيل تم تنفيذ هذه الرسالة من أجل تحليل خصائص القوس الكهربائي حول عازل ملوث من خلال حساب التوزيع المحتمل والمجال الكهربائي ، سيساعد ذلك في تحسين تصميم العوازل ، خاصةً في المناطق الملوثة.

يهدف الجزء الأول من هذا العمل إلى تقديم نموذج ديناميكي لانتشار القوس على أساس صياغة نموذج Obenaus ومعيار Hampton لنشر التغريغ. أجريت تجربة على عازل زجاجي عملي مثبت في الشبكة الجزائرية ، لقياس جهد الالتفافية وتقدير معلمات القوس  $(n \ e \ h)$  باستخدام الخوارزميات الجينية (GA) المعلمات المستخدمة في النموذج الديناميكي لتقييم تيار القوس وطول القوس ومقاومة القوس. بالإضافة إلى ذلك ، جرت محاولة مع (COMSOL) لحساب مجال الجهد والكهرباء على سطح العازل مع وجود الملوثات وبدونها.

يتعلق الجزء الثاني من الأطروحة بالنموذج الرقمي الذي يسمح بتوزيع الإمكانات والمجال الكهربائي في سلسلة من العوازل الزجاجية المستخدمة في الشبكات الكهربائية الجزائرية. تم تطوير دائرة مكافئة أولية مكونة من شبكة RC موازية. تم تحديد معالمها بناءً على طريقة العناصر المحددة. قمنا بتنفيذ هذه الدائرة المكافئة في برنامج ATP / EMTP من أجل محاكاة التيارات التسرب ، وتم الحصول على نتائج مرضية.

كلمات مفتاحية: عازل ، نموذج ديناميكي ، عناصر محدودة ، مجال كهربائي ، تجاوز ، خوار زمية وراثية ، تيار النسرب ، قوس كهربائي.

## Résumé :

L'isolateur est un dispositif constitué spécialement d'un matériau isolant solide, capable de résister à la contrainte électrique. Il est caractérisé par une grande impédance au passage du courant électrique. Son rôle est de séparer deux corps conducteurs, soumis à deux potentiels différents. Dans les réseaux de transport d'énergie électrique, l'isolement pylône-conducteur est assuré par une chaîne d'isolateurs. Chaque chaîne est caractérisée principalement par sa longueur de fuite. Cette longueur est dépendante du niveau de tension de service. Cette thèse a été réalisée dans le but d'analyser les caractéristiques de l'arc électrique autour d'un Isolateur pollué. En calculant la distribution du potentiel et le champ électrique, cela contribuera à améliorer la conception des isolateurs, en particulier pour les zones contaminées.

La première partie de ce travail vise à présenter un modèle dynamique de propagation de l'arc basé sur la formulation du modèle d'Obenaus et le critère de Hampton pour la propagation de la décharge. Une expérimentation a été menée sur un isolateur en verre pratique installé à le réseau algérien, pour mesurer la tension de contournement et estimer les paramètres de l'arc (*A et n*) en utilisant les algorithmes génétique (GA). Les paramètres ont utilisés dans le modèle dynamique pour évaluer le courant d'arc, la longueur d'arc et la résistance à l'arc. De plus, une tentative a été faite avec COMSOL pour calculer la tension et champ électrique sur la surface de l'isolateur avec et sans présence de contaminants.

La deuxième partie de la thèse concerne le modèle numérique qui permet d'avoir la répartition du potentiel et du champ électrique dans une chaine d'isolateurs en verre type capot et tige utilisé dans les réseaux électriques algériens. Un circuit équivalent est développé. Ses paramètres ont été identifiés en se basant sur la méthode des éléments finis. Nous avons implanté ce circuit équivalent dans le logiciel ATP/EMTP dans le but de simuler les courants de fuite, et des résultats satisfaisant ont été obtenus.

<u>Mots Clés</u>: Isolateur, Modèle dynamique, Eléments Finis, Champ électrique, Contournement, Algorithme génétique, Courant de fuite, Arc électrique.

## Abstract:

The insulator is a device specially made of a solid insulating material, capable of withstanding electrical stress. It is characterized by a high impedance at the passage of electric current. Its role is to separate two conductive bodies, subjected to two different potentials. In power transmission networks, pylon-conductor isolation is provided by a chain of insulators. Each chain is mainly characterized by its leakage length. This length is dependent on the operating voltage level. This thesis was carried out in order to analyze the characteristics of the electric arc around a polluted Insulator. By calculating the potential distribution and the electric field, this will help improve the design of the insulators, especially for contaminated areas.

The first part of this work aims to present a dynamic model of arc propagation based on the formulation of the Obenaus model and the Hampton criterion for the discharge propagation. An experiment was conducted on a practical glass insulator installed in the Algerian network, to measure the flashover voltage and estimate the parameters of the arc (A, n) using genetic algorithms (GA). The parameters used in the dynamic model to assess the arc current, arc length and arc resistance. In addition, an attempt was made with COMSOL to calculate the voltage and electric field on the surface of the insulator with and without the presence of contaminants.

The second part of the thesis concerns the digital model which allows to have the distribution of the potential and the electric field in a chain of glass insulators used in Algerian electrical networks. A preliminary equivalent circuit formed of a parallel *RC* network is developed. Its parameters were identified based on the finite element method. We have implemented this equivalent circuit in the ATP / EMTP software in order to simulate leakage currents, and satisfactory results have been obtained.

**Key Words**: Insulator, Dynamic model, Finite Elements, Electric field, Flashover, Genetic algorithm, Leakage current,