

18/04

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

Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie électrique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour L'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Thème

العدسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Conception d'un Modèle Dynamique de Contournement d'un Isolateur Pollué sous Tension Alternative 50 Hz

Proposé et dirigé par :

Mr. Ahmed BOUBAKEUR	Professeur, ENP
Mr. Madjid TEGUAR	Maître de conférences, ENP

Etudié par :

Mohamed Amine SOUFI
Menouar ZEMIRLINE

Soutenu devant le jury :

Mr A. HELLAL	Président de jury
Mr A. BOUBAKEUR	Rapporteur
Mr M. TEGUAR	Rapporteur
Mr A. MEKHALDI	Examineur

Remerciements

Au terme de ce mémoire de fin d'études d'ingénieur, nous tenons à formuler nos chaleureux remerciements à Mr. A. BOUBAKEUR Professeur à l'ENP, notre encadreur, qui a dirigé notre travail avec dévouement jusqu'à sonachèvement.

Nous remercions également Mr. M. TEGUAR Maître de conférences à l'ENP, notre encadreur aussi, pour ces directives, ses conseils combien utiles, sa très grande disponibilité et ses qualités humaines.

Nous adressons nos vifs remerciements au président du jury ainsi qu'aux examinateurs qui ont accepté de juger ce travail.

Nous tenons aussi à exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble de nos enseignants des départements des sciences fondamentales et de génie électrique pour leurs efforts déployés à notre égard tout au long de notre parcours universitaire.

Enfin, nous remercions tous ce qui ont contribués de prés ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère.

A mon très chers père.

A mon frère et mes sœurs.

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment.

A vous.

Mohamed Amine

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère.

A mon très chers père.

A mes frères et sœurs.

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment.

A vous.

Menouar

RESUME

Ce travail présente un modèle dynamique permettant de prédire le comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative. Se basant sur un circuit électrique équivalent et utilisant des lois physiques, ce modèle permet d'évaluer la tension de contournement et le temps au contournement et de décrire la dynamique de l'arc en tenant compte du profil de l'isolateur et des variations instantanées des caractéristiques de l'arc (comme la résistance de l'arc, le courant de fuite, le rayon, la longueur et de la résistivité de l'arc), de la vitesse instantanée de propagation, de la puissance instantanée fournie par la source ainsi que du champ dans la pollution et celui à l'intérieur de l'arc. Les résultats de simulation obtenus avec notre modèle sont discutés par rapport à ceux obtenus par d'autres auteurs.

Mots clés : pollution – contournement – isolateur – modèle – tenue diélectrique – décharge – courant de fuite – propagation – dynamique – tension

ABSTRACT

This work presents a dynamic model allowing predicting the behaviour of polluted insulator under AC voltage. Basing on an equivalent electrical circuit and using physical laws, this model allows to evaluate the flashover voltage and the time lag to flashover taking into account the insulator profile and the instantaneous variations of the discharge parameters (such as the arc resistance, the leakage current, the arc radius, length and resistivity), the instantaneous propagation velocity, the instantaneous power delivered by the source, as well as the fields in the pollution and in the arc. The simulation results obtained with our model are discussed with regards to those reported by other authors.

Key words : pollution – flashover – insulator – model – dielectric strength – discharge – leakage current – propagation – dynamic – voltage

ملخص

يعرض هذا العمل نموذج ديناميكي يتنبأ بتصرف عازل ملوث تحت توتر متناوب. بالاعتماد على دائرة كهر بائية مكافئة و باستعمال قوانين فيزيائية، هذا النموذج يسمح بحساب توتر الإحاطة و الزمن المؤدي إلى الإحاطة آخذاً بعين الاعتبار هندسة العازل و كذا التغيرات اللحظية لكل من عوامل التفريغ (مثل مقاومة التفريغ، التيار المتسرب، نصف قطر، طول، و ناقلية القوس)، السرعة اللحظية للانتشار، الاستطاعة اللحظية المحررة من قبل المنبع، و كذا الحقول في كل من التفريغ و التلوث. ناقش النتائج الرقمية المحصل عليها من برنامجنا بمقارنتها مع أخرى محررة من قبل باحثين آخرين.

الكلمات المفتاحية: تلوث – إحاطة – عازل – نموذج – شدة عزل – تفريغ – تيار متسرب – انتشار –

توتر

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : POLLUTION DES ISOLATEURS DE HAUTE TENSION	
I. 1. INTRODUCTION	4
I. 2. LES ISOLATEURS	5
<i>I. 2. 1. Définition</i>	5
<i>I. 2. 2. Fonctionnement et constitution d'un isolateur</i>	5
<i>I. 2. 3. Principaux types d'isolateurs</i>	6
I. 2. 3. 1. Isolateurs de type rigide	6
I. 2. 3. 2. Isolateurs à capot et tige	6
I. 2. 3. 3. Chaîne d'isolateurs	7
I. 2. 3. 4. Isolateurs à long fût en porcelaine	7
<i>I. 2. 4. Choix des isolateurs</i>	8
I. 3. POLLUTION DES ISOLATEURS	9
<i>I. 3. 1. Définition</i>	9
I. 3. 1. 1. Contournement	9
I. 3. 1. 2. Contrainte de contournement	10
I. 3. 1. 3. Tension de contournement	10
I. 3. 1. 4. Tension de tenue	10
I. 3. 1. 5. Courant de fuite	10
I. 3. 1. 6. Courant de fuite critique	10
I. 3. 1. 7. Longueur critique d'arc	11
I. 3. 1. 8. Conductance superficielle	11
<i>I. 3. 2. Formation et réparation des couches polluantes</i>	11
<i>I. 3. 3. Source de pollution</i>	12
I. 3. 3. 1. Pollution naturelle	12
I. 3. 3. 2. Pollution industrielle	13
I. 3. 3. 3. Pollution mixte	13
<i>I. 3. 4. Conséquences de la pollution</i>	13
I. 3. 4. 1. Arc non localisé	14
I. 3. 4. 2. Arc permanent	14
I. 3. 4. 3. Contournement des isolateurs	14
I. 4. MESURE DE LA SEVERTE DE LA POLLUTION DES SITES	16
<i>I. 4. 1. Classification des sites pollués</i>	16
<i>I. 4. 2. Méthodes de mesures de la sévérité de pollution</i>	17
I. 4. 2. 1. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)	17
I. 4. 2. 2. Conductance superficielle	18

I. 4. 2. 3. Comptage d'impulsion	18
I. 4. 2. 4. Courant de fuite de la plus forte crête	19
I. 4. 2. 5. Contrainte de contournement	19
I. 4. 2. 6. Mesure de la pollution de l'air	20
I. 4. 2. 7. Densité de dépôt non soluble	20
I. 4. 2. 8. Mesures optiques	20
I. 5. METHODES D'ESSAIS SOUS POLLUTION	20
<i>I. 5. 1. Essai sous pollution naturelle</i>	21
<i>I. 5. 2. Essais sous pollution artificielle</i>	21
I. 5. 2. 1. Méthode des couches solides	21
I. 5. 2. 2. Méthodes du brouillard salin	22
I. 5. 2. 3. Méthode de la chambre de poussière	22
<i>I. 5. 3. Critique de ces méthodes d'essais</i>	23
I. 6. TECHNIQUES DE LUTTES CONTRE LA POLLUTION	23
<i>I. 6. 1. Allongement de la ligne de fuite</i>	24
<i>I. 6. 2. Isolateurs plats</i>	24
<i>I. 6. 3. Graissage périodique</i>	24
<i>I. 6. 4. Revêtement silicone</i>	25
<i>I. 6. 5. Isolateurs composites</i>	25
<i>I. 6. 6. Nettoyage des isolateurs</i>	25
I. 7. CONCLUSION	26
CHAPITRE II : PRINCIPAUX MODELES DE CONTOURNEMENT	
II. 1. INTRODUCTION	27
II. 2. MECANISMES DE PROPAGATION	28
<i>II. 2. 1. Propagation par ionisation</i>	28
<i>II. 2. 2. Propagation par force électrostatique</i>	28
II. 3. CRITERES DE PROPAGATION DE LA DECHARGE	29
<i>II. 3. 1. Critère de Hampton</i>	29
<i>II. 3. 2. Critère de Hesketh</i>	30
<i>II. 3. 3. Critère de Wilkins</i>	30
<i>II. 3. 4. Critère de Anjana et Lakshminarasimha</i>	30
<i>II. 3. 5. Critère de Dhahbi, Beroual et Krahenbul</i>	31
II. 4. PRINCIPAUX MODELES STATIQUES DE CONTOURNEMENT	32
<i>II. 4. 1. Modèle d'Obenaus</i>	32
<i>II. 4. 2. Modèle de Neumarker</i>	33

II. 4. 3. <i>Modèle de Rizk</i>	34
II. 4. 4. <i>Modèle de Claverie et Porcheron</i>	34
II. 4. 5. <i>Modèle de Rao et Gopal</i>	35
II. 4. 6. <i>Modèle d'Alston et Zoledziowski</i>	36
II. 4. 7. <i>Modèle de Danis</i>	36
II. 4. 8. <i>Modèle de Nacke et Wilkins</i>	38
II. 4. 9. <i>Modèle de la couche mixte</i>	40
II. 4. 10. <i>Modèle du disque circulaire</i>	41
II. 4. 11. <i>Modèle de Tegar</i>	43
II. 5. MODELES DYNAMIQUES	45
II. 5. 1. <i>Modèle de Rizk et Nguyen</i>	45
II. 5. 2. <i>Modèle de Anjana et Lakshminarasimha</i>	46
II. 5. 3. <i>Modèle de Dhahbi</i>	47
II. 5. 4. <i>Modèle de Sundararajan et Gorur</i>	48
II. 5. 5. <i>Modèle de Tegar</i>	49
II. 6. CONCLUSION	49
CHAPITRE III : ELABORATION DU MODELE DYNAMIQUE	
III. 1. INTRODUCTION	50
III. 2. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES	51
III. 3. MODELE EQUIVALENT A LA PROPAGATION	51
III. 3. 1. <i>Modèle de base</i>	51
III. 3. 2. <i>Propagation de la décharge</i>	52
III. 3. 2. 1. <i>Initialisation de la décharge</i>	52
III. 3. 2. 2. <i>Critère de propagation</i>	52
III. 3. 2. 3. <i>Critère de réamorçage (réallumage de l'arc)</i>	53
III. 3. 2. 4. <i>Circuit de propagation</i>	54
III. 4. PARAMETRES DU CIRCUIT ELECTRIQUE	54
III. 4. 1. <i>Equation du circuit</i>	55
III. 4. 2. <i>Résistance de la couche de pollution</i>	55
III. 4. 3. <i>Le champ dans l'arc et dans la pollution</i>	58
III. 4. 4. <i>Caractéristiques de l'arc</i>	59
III. 4. 1. <i>Chute de tension aux bornes de l'arc</i>	59
III. 4. 2. <i>Résistance de l'arc</i>	59
III. 4. 3. <i>Rayon de l'arc</i>	59
III. 4. 4. <i>Résistivité de l'arc</i>	60
III. 4. 5. <i>Puissance dissipée dans l'arc</i>	60

III. 5. VITESSE DE PROPAGATION	61
III. 6. TEMPS AU CONTOURNEMENT	62
III. 7. SIMULATON NUMERIQUE	63
III. 8. LIMITES DU PROGRAMME	66
<i>III. 8. 1. Influences des paramètres de la source</i>	66
<i>III. 8. 2. Formation d'arcs multiples</i>	66
<i>III. 8. 3. Couches de pollution non-uniformes</i>	67
<i>III. 8. 4. Influence de l'effet thermique</i>	68
III. 8. 4. 1. Formation de bandes sèches	68
III. 8. 4. 2. Augmentation de la conductivité de la pollution	68
<i>III. 8. 5. Autres paramètres</i>	69
III. 9. CONCLUSION	69

CHAPITRE IV : VALIDATION ET APPLICATION

IV. 1. INTRODUCTION	70
IV. 2. VALIDATION	71
<i>IV. 2. 1. Validation basée sur le modèle statique de Tegar</i>	71
<i>IV. 2. 2. Validation basée sur le modèle dynamique de Dahbi</i>	74
IV. 3. APPLICATION	76
<i>IV. 3. 1. Evolution temporelle</i>	77
IV. 3. 1. 1. Tension appliquée, tension et chute de tension dans l'arc	77
IV. 3. 1. 2. Longueur de la décharge	79
IV. 3. 1. 3. Courant de fuite	79
IV. 3. 1. 4. Résistance de la couche polluante	80
IV. 3. 1. 5. Résistance de l'arc	81
IV. 3. 1. 6. Rayon de la décharge	82
IV. 3. 1. 7. Puissance transférée dans l'arc	83
IV. 3. 1. 8. Puissance délivrée par la source	84
IV. 3. 1. 9. Champs au pied de l'arc et dans la pollution	84
IV. 3. 1. 10. Vitesse de propagation	86
IV. 3. 1. 11. Temps au contournement	86
<i>IV. 3. 2. Evolution spatiale</i>	87
IV. 4. CONCLUSION	89
CONCLUSION GENERALE	90

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, l'énergie électrique joue un rôle très important dans le développement et l'évolution de l'industrie et l'économie des pays. De ce fait, il faut assurer, à tout instant, un bon équilibre entre la demande croissante et la production de l'énergie. C'est pour cela, qu'une très grande part d'importance est attachée aux réseaux électriques de distribution, principalement aux lignes de haute tension. Ces lignes peuvent parcourir des centaines de kilomètres et donc traverser des régions très différentes par leur climat, leur industrialisation, leur localisation géographique, etc. Par conséquent, les systèmes d'isolation du réseau sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution qui se dépose sur les surfaces d'isolateurs. Quelle que soit leur nature, les polluants en état sec, ne provoquent pas la dégradation de la rigidité diélectrique [1, 2]. Cependant, l'humidification de ces dépôts solides engendrent, lors de la mise sous tension, la naissance d'un faible courant de fuite qui va circuler le long des zones de résistivités différentes, modifiant la répartition du potentiel entre électrodes [3]. La décharge électrique pourra s'amorcer, si le champ électrique local atteint un certain seuil. Cette décharge pourra s'allonger sur la surface de l'isolateur menant au court-circuit de l'électrode haute tension et la masse; c'est le phénomène de contournement, qui peut engendrer la mise hors service de la ligne haute tension et même la détérioration de l'isolateur [2].

Dans les régions polluées, un bon choix de dimensionnement des isolateurs s'avère indispensable pour assurer la fiabilité et la qualité de l'isolement de haute tension. Afin de surveiller la qualité d'isolement d'un ouvrage, il est impératif de connaître réellement les mécanismes conduisant au contournement sous pollution. De nombreux travaux ont été faits, aussi bien théoriques qu'expérimentaux, mais ces mécanismes restent insuffisamment compris, à cause de grand nombre de facteurs difficiles [1] à cerner qui interviennent simultanément dans la génération et la propagation des décharges électriques.

Le présent travail porte sur l'élaboration d'un modèle analytique de propagation de l'arc sur une surface isolante polluée soumise à une tension alternative 50 Hz. Etant donné que sa nature est idéalisée, principalement à cause des hypothèses simplificatrices rendues nécessaires dans le calcul analytique, il ne peut en aucun cas se substituer au travail expérimental. Néanmoins, ce type de modèle est un outil permettant de faire des estimations préliminaires, de rationaliser les expériences conçues pour explorer le mécanisme de contournement, d'interpréter et de généraliser les résultats obtenus en un temps réduit. Ce modèle se base sur un circuit électrique équivalent et utilise des lois physiques. Notre modèle dynamique permet la prédiction des différents paramètres de l'arc et leurs évolutions dans le temps. Quatre chapitres y seront présentés.

Nous commençons le premier chapitre par un rappel sur les phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique. Des méthodes de mesure de la sévérité de pollution des sites, des méthodes d'essais sous pollution naturelle et artificielle, ainsi que des techniques de lutte contre ces phénomènes y seront présentés.

Dans le deuxième chapitre, nous citons les principaux modèles rencontrés dans la littérature. Nous précisons leur caractère statique ou dynamique, leur aspect empirique, semi empirique ou analytique, ainsi que les facteurs d'influence qu'ils traitent. Des modèles s'appliquant aux arcs sous tension continue et alternative, ainsi que les critères de propagation des décharges électriques, y seront aussi présentés.

Un modèle dynamique permettant de prédire le comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative, sera présenté dans le chapitre trois. Ce modèle utilise un critère de propagation et se base sur circuit électrique équivalent. En effet, un isolateur pollué et partiellement contourné sera représenté par une décharge électrique de longueur donnée en série avec une résistance représentant la bande de pollution. Le canal de la décharge sera assimilé à des cellules résistives. Chaque cellule nouvellement créée représentera un nouveau déplacement partiel de l'arc.

L'exploitation numérique ainsi que la validation, en comparant certains résultats de simulation à ceux obtenus par d'autres chercheurs, feront l'objet du quatrième chapitre. Notons que ce modèle permet d'évaluer la tension de contournement et le temps au contournement et de décrire la dynamique de l'arc en tenant compte de la géométrie de l'isolateur ainsi que des variations instantanées des caractéristiques de l'arc (à savoir sa résistance, son rayon, sa longueur, la tension à ses bornes, sa résistivité et la puissance et l'énergie transférées dans cet arc), de la vitesse de propagation, du courant de fuite ainsi que du champ dans la pollution et celui de l'arc.

I. 1. INTRODUCTION

Les lignes aériennes et les postes des réseaux de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. En effet par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut parfois survenir.

L'humidification des couches polluantes facilite en fait, la circulation d'un courant de fuite sur les surfaces isolantes provoquant des échauffements locaux et par la suite l'assèchement de la couche de pollution. Ainsi, la répartition du potentiel est modifiée d'une façon significative et des arcs partiels peuvent apparaître. Ces derniers peuvent évoluer jusqu'au contournement total de l'isolateur. Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension. Ainsi, une des caractéristiques principale d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est utilisé.

De nombreux travaux, aussi bien théorique qu'expérimentaux ont été entrepris dans le domaine de la pollution des isolateurs afin de mieux comprendre le phénomène de contournement et de se prémunir d'outils permettant le suivi de son évolution et d'éviter son apparition. La complexité du phénomène et le grand nombre de paramètres qui le caractérisent tels que la nature du dépôt polluant [1- 4], la conductivité superficielle et le profil de l'isolateur [5, 6], rendent la compréhension et la maîtrise du mécanisme de contournement bien difficiles. Les résultats de recherche ont néanmoins permis d'établir des modèles donnant les caractéristiques des décharges évoluant sur les surfaces d'isolateurs et ce jusqu'au contournement. La plupart de ces modèles sont empiriques ou semi empiriques.

Le présent chapitre comporte deux parties et porte sur l'étude des phénomènes de conduction et de décharges électrique sur des isolateurs dans les conditions de pollution. Dans la première partie, nous présentons, l'importance des isolateurs, leur utilité et leurs

phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport d'énergie électrique. Les principaux paramètres associés ainsi que les méthodes de mesure et les moyens de lutte contre ce phénomène, sont également présentés.

I. 2. LES ISOLATEURS

Le phénomène de pollution des lignes aériennes constitue un sujet d'étude d'une importance primordiale. Cela provient du fait que la pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de haute tension. En effet, et suite à l'interaction entre, l'air transportant des grains de poussières et l'isolateur, une couche étrangère se dépose sur les surfaces de celui-ci [6]. Une fois cette couche humidifiée, la tension de tenue peut diminuer considérablement, provoquant des incidents très graves. Cela est lié à plusieurs facteurs dont les plus importants sont la nature de l'agent polluant et le profil de l'isolateur.

I. 2. 1. Définition

L'isolateur est un matériau isolant solide qui présente une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle. Il est utilisé pour isoler les conducteurs ou les pièces sous tension afin d'empêcher les court-circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution [7].

I. 2. 2. Fonctionnement et constitution d'un isolateur

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes. Ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage), ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF₆) et l'isolation externe (air atmosphérique), ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure) [8].

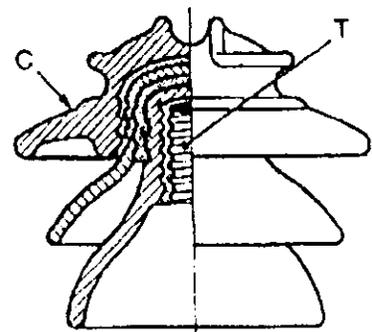
Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement [9]. Du point de vue électrique, l'isolateur est considéré comme deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents, qui sont les suivants [9]:

- L'intervalle d'air.
- Le matériau diélectrique.
- L'interface air - matériau diélectrique (la longueur de l'interface constitue la ligne de fuite ; ligne le long de laquelle circulerait le courant de fuite)

I. 2. 3. Principaux types d'isolateurs

I. 2. 3. 1. Isolateurs de type rigide

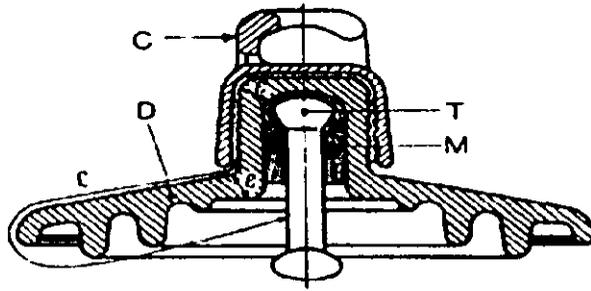
Un isolateur rigide (Figure I. 1.), est relié au support par une ferrure fixe. Tous les isolateurs rigides normalisés sont livrés avec une douille scellée de telle façon qu'ils puissent être vissés directement sur les ferrures correspondantes. La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides [7].



C : Cloche T : Logement de tige
Figure I. 1. Isolateur rigide en verre

I. 2. 3. 2. Isolateurs à capot et tige

L'isolateur capot et tige est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre (ou la porcelaine). L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille [6, 10]. L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique [10]. La coupe de l'isolateur capot-tige est schématisée à la figure I. 2.



C : Capot (fonte malléable, galvanisée à chaud)
 D : Diélectrique (verre trempé ou céramique)
 M : Mortier de ciment alumineux ou Portland
 T : Tige (acier, galvanisé à chaud)
 \mathcal{L} : Plus courte distance dans l'air, extérieure à l'isolateur
 ε : Longueur du canal de perforation, $\varepsilon \ll \mathcal{L}/2$

Figure I. 2. Isolateur à capot et tige

I. 2. 3. 3. Chaîne d'isolateurs

Une chaîne d'isolateurs est constituée de plusieurs éléments de type capot et tige ou autres (Figure I. 3.). Ces éléments sont soumis principalement à des efforts de traction. Ils sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (alignement), soit horizontale (ancrage) [9].

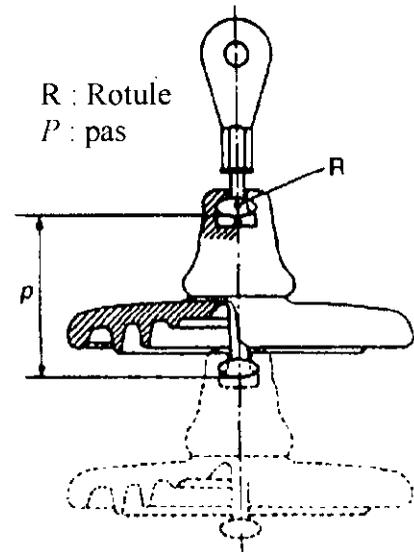


Figure I. 3. Assemblage à rotule

I. 2. 3. 4. Isolateur à long fût en porcelaine

Ils sont constitués d'un cylindre plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes (Figure I. 4). A chaque extrémité est fixée une pièce métallique de liaison ; celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le cylindre, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet. De tels isolateurs peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis [9].

cavité prévue à cet effet. De tels isolateurs peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis [9].

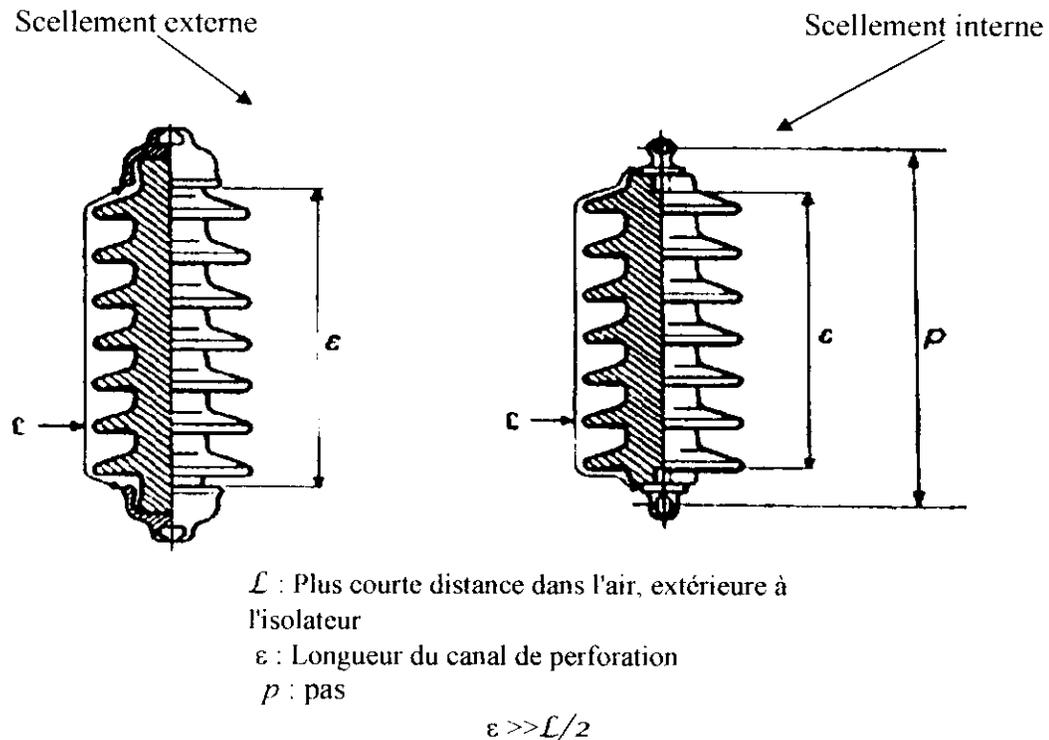


Figure I. 4. Isolateur à long fût en porcelaine

1. 2. 4. Choix des isolateurs

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépend la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service [10].

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire les isolateurs qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident. La sévérité de la pollution d'un site peut changer. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la

pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution éventuelles [11].

I. 3. POLLUTION DES ISOLATEURS

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème sur l'isolement des ouvrages de haute tension, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de haute tension. Ceci est dû à la formation de couches plus ou moins conductrices sur la surface des isolateurs. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle des surfaces isolantes et par suite la diminution de la tension de tenue des isolateurs.

L'échauffement de la couche polluante conductrice humidifiée, provoqué par la circulation des courants de fuite sur la surface de ces isolateurs, entraîne des assèchements locaux de la couche de pollution et l'apparition d'arcs de petite longueur (arcs partiels). Dans certaines conditions, ces arcs partiels peuvent se développer jusqu'à provoquer le contournement total des isolateurs, en connectant l'extrémités sous haute tension à celle mise à la terre, et conduisant ainsi à la mise hors service de l'ensemble de l'installation [12].

I. 3. 1. Définitions

I. 3. 1. 1. Contournement

Le contournement est représenté par une décharge disruptive le long d'une surface solide [13] dont la trajectoire contourne cette dernière. Aussi, le terme contournement est employé pour des décharges par amorçage dans l'air.

I. 3. 1. 2. Contrainte de contournement

La contrainte de contournement d'un isolateur est le rapport de la tension de contournement à la longueur totale de l'isolateur [14].

I. 3. 1. 3. Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les deux électrodes [13]. Elle dépend :

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

I. 3. 1. 4. Tension de tenue

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

I. 3. 1. 5. Courant de fuite

C'est un courant de nature impulsionnelle. Il est de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur. Il est donc à caractère électrolytique et de type résistif. Il devient important lorsqu'on s'approche de la tension de contournement. Il dépend de plusieurs facteurs, entre autres, la nature de la couche de pollution, la longueur de la ligne de fuite et les conditions atmosphériques [7].

I. 3. 1. 6. Courant de fuite critique

C'est le courant minimal nécessaire pour provoquer le contournement sous pollution d'un isolateur à une tension donnée. Il est indépendant du procédé d'essai ainsi

1. 3. 1. 7. Longueur critique d'arc

C'est la longueur limite X_C de l'arc partiel au-delà de laquelle l'arc conduira au contournement total [15].

1. 3. 1. 8. Conductance superficielle

La conductance superficielle 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.

1. 3. 2. Formation et répartition des couches polluantes

Suite à l'écoulement d'un air transportant des poussières diverses, une couche de pollution se forme à la surface des isolateurs. La répartition non-uniforme et non-homogène de cette couche dépend du profil de l'isolateur, de la position de la chaîne par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), du niveau de tension ainsi que du degré de pollution du site où est situé l'isolateur [15].

Plusieurs travaux d'observation [16, 17] ont montré qu'il existe toujours une distinction nette entre les couches formées à la surface supérieure et celles formées à la surface inférieure d'un isolateur soumis à la pollution naturelle. Cela veut dire que la répartition de la pollution le long de l'isolateur est très peu uniforme; le vent, par exemple, impose des orientations préférentielles pour les dépôts.

La pluie qui lave périodiquement les surfaces exposées est un autre facteur de non-uniformité puisque les parties arbitrées de l'isolateur ne sont jamais lavées. Cette répartition dépend [12]:

- du profil de l'isolateur,
- de la position de l'isolateur,
- du niveau de tension appliqué.

1. 3. 3. Source de pollution

Les divers types de pollution atmosphérique les plus fréquemment observés peuvent être regroupés selon leurs origines et classés comme suit :

1. 3. 3. 1. Pollution naturelle

La pollution naturelle provient:

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

1. 3. 3. 1. 1. Pollution marine

Les installations situées en bord de mer sont exposées aux embruns portés par le vent et qui se déposent progressivement sur les isolateurs, formant une couche de pollution de sel qui devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée par le brouillard ou simplement par condensation. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance. Dans certaines conditions, ils se développent jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur [15, 17].

1. 3. 3. 1. 2. Pollution désertique

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

I. 3. 3. 2. Pollution industrielle

Au voisinage de certaines zones industrielles, la pollution est engendrée par l'évacuation des fumées des usines (raffinerie, cimenterie, minerais etc.). La présence d'éléments conducteurs dans les couches, et/ou la dissolution des sels qu'elles contiennent engendrent la circulation d'un courant de fuite plus ou moins fort selon les concentrations des agents polluants [14].

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

I. 3. 3. 3. Pollution mixte

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

I. 3. 4. Conséquences de la pollution

Lorsque l'isolateur est propre ou recouvert d'une couche de pollution sèche, un très faible courant capacitif circule à sa surface. Ceci est dû aux très faibles valeurs des conductivités volumiques de l'air, de l'isolant solide et de la couche de pollution. On obtient ainsi une répartition électrostatique du potentiel électrique. Par contre, lorsque la couche de pollution est humidifiée, elle devient le siège d'un courant de conduction de valeur relativement importante et la répartition du potentiel électrique diffère de la répartition électrostatique.

La rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite. Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur [12, 14].

de fuite. Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur [12, 14].

1. 3. 4. 1. Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçe aléatoirement à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition d'un courant de fuite intermittent entraînant une perte d'énergie relativement faible et généralement supportable par l'installation [14].

1. 3. 4. 2. Arc permanent

L'arc électrique se fixe à la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en se réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant [14].

1. 3. 4. 3. Contournement des isolateurs

Le contournement d'une surface polluée et humidifiée est le résultat d'une évolution qui comprend quatre phases principales, schématisées à la figure (I. 5). Pour simplifier la présentation, considérons le cas d'une plaque plane rectangulaire avec deux électrodes :

- dans une première phase, le courant de fuite s'écoule à travers l'électrolyte qui recouvre l'isolant. Il provoque un échauffement de l'électrolyte qui a pour effet d'accroître la conductivité du milieu et par suite le courant (phase 1).
- L'échauffement croissant par effet joule créé par le courant de fuite, provoque un assèchement de la couche polluante. La zone sèche formée a tendance à s'étendre latéralement jusqu'à l'interruption complète du courant (phase 2).
- La tension appliquée se trouve pratiquement totalement reportée aux bornes de la zone sèche et des arcs locaux sont susceptibles d'apparaître. Au voisinage de la

- A partir de ce stade, l'évolution de la décharge peut se faire de différentes façons : l'arc local peut s'éteindre (phase 4), ou bien il peut se déplacer latéralement pour retrouver une position plus stable correspondant à une plus faible longueur d'arc (phase 5), ou encore, il peut s'allonger jusqu'à atteindre l'électrode et provoquer ainsi le contournement. Dans ce cas, l'allongement de l'arc se fait à la surface de l'électrolyte sans formation de zone sèche (phase 6).

Bien entendu, en pratique le phénomène s'initie et évolue en fonction de la forme des isolateurs, de l'hétérogénéité des dépôts et de l'humidification de telle ou telle autre partie de l'isolateur. Il est aussi fréquent que plusieurs arcs naissent simultanément le long d'une chaîne ou d'une colonne isolante. Enfin, nous avons implicitement admis que la tension appliquée à l'isolateur était constante. La tension alternative présente, à cet égard, une différence importante du fait de son annulation périodique. Les arcs locaux s'éteignent à chaque passage par zéro et se réamorcent d'une façon aléatoire aux maxima de tension [11].

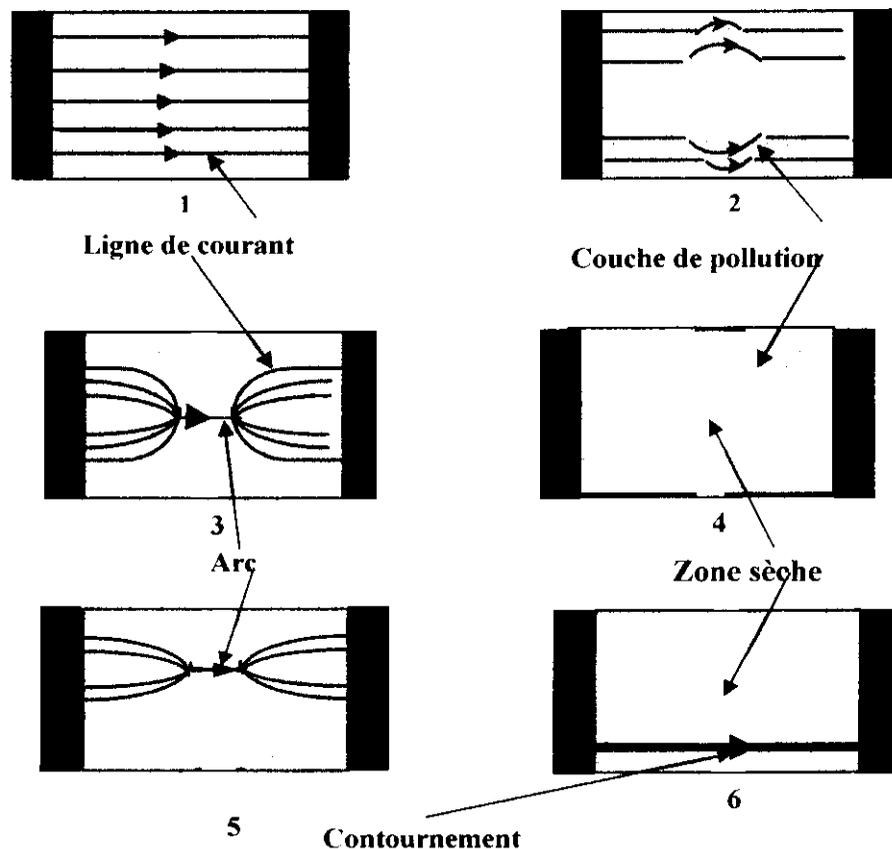


Figure I. 5. Etapes du contournement d'une couche polluée

I. 4. MESURE DE LA SEVERITE DE LA POLLUTION DES SITES

Le choix des isolateurs à installer dans le réseau ne peut se faire que si la sévérité de pollution des différents sites concernés est connue. En effet, la mesure de cette sévérité est indispensable afin de dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillance dans un site donné [14].

La mesure de la sévérité est généralement basée sur la détermination expérimentale de la conductance superficielle de la couche polluante ou la détermination au laboratoire du courant de fuite d'un isolateur pollué artificiellement [11].

I. 4. 1. Classification des sites pollués

Pour définir l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la salinité et les niveaux de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été définies selon le degré de pollution [14] :

❖ **Classe 1** : Cette classe correspond à une pollution faible d'origine naturelle (sauf marine). Elle concerne généralement les zones non industrielles ayant une faible densité d'habitation, situées loin de la mer. Un isolement normal convient facilement pour ces zones. La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium à 2.5 g/l de concentration.

❖ **Classe 2** : Cette classe correspond à une pollution moyenne, naturelle (excepté marine) ou faiblement industrielle. Elle correspond à des zones à moyenne densité d'habitation et situées loin de la mer. Ces zones nécessitent un isolement renforcé. En classe 2, la salinité équivalente maximale retenue est de 10 g/l.

❖ **Classe 3** : Elle correspond à une forte pollution marine et industrielle. Les zones considérées possèdent une forte densité d'habitation et situées près de la mer, donc

❖ **Classe 4** : Elle correspond à des zones où le niveau de pollution est exceptionnel. La pollution dans ces zones peut être naturelle, industrielle ou mixte. Ces zones sont sujettes aux fumées industrielles et aux poussières conductrices produisant des dépôts très épais, et situées très proches de la côte et donc soumises à des vents marins très forts et très polluants. Elles nécessitent un isolement exceptionnel. La salinité équivalente maximale, pour cette classe, est de 160 g/l.

1. 4. 2. Méthodes de mesures de la sévérité de pollution

La mesure de la sévérité de pollution peut être effectuée selon plusieurs méthodes [12, 13]. Généralement, on se base soit sur la mesure de la conductivité des agents polluants, soit sur le courant de fuite. Les essais de laboratoires sont valables dans la mesure où les conditions d'essais conduisent aux mêmes valeurs de courant de fuite observées sur site. Les principales méthodes qui ont été proposées, pour mesurer la sévérité de pollution d'un site, sont :

1. 4. 2. 1. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)

La DDSE est le dépôt équivalent exprimé en mg de sel par cm^2 de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel, lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau [12, 13].

Des échantillons de pollution sont prélevés à la surface d'isolateurs ou d'autres collecteurs. Le dépôt est récupéré par lavage, en utilisant un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier,...) et de l'eau distillée. A partir de la conductivité de la solution obtenue, de la surface utilisée de l'isolateur, du volume d'eau et de la température, on peut déterminer la DDSE équivalente.

Ainsi, les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante pour obtenir les niveaux maximums entre les périodes de lavage naturel. Cette méthode permet d'établir une relation avec les méthodes d'essais sous pollution artificielle, ce qui est un avantage à prendre en considération. Elle présente, en outre, certains inconvénients, tels

d'établir une relation avec les méthodes d'essais sous pollution artificielle, ce qui est un avantage à prendre en considération. Elle présente, en outre, certains inconvénients, tels que les fréquences de prélèvements, les fluctuations de l'humidité et l'amorçage des arcs électriques qui ne sont pas pris en compte.

I. 4. 2. 2. Conductance superficielle

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance σ par un facteur de forme de l'isolateur. Généralement, la tension est appliquée aux électrodes terminales, ce qui fournit la conductivité superficielle globale de l'isolateur [12, 13].

Cette méthode est donc un paramètre qui caractérise l'état global de la surface isolante (niveau de pollution et degré d'humidification de la couche), lequel détermine la performance de l'isolateur.

Ainsi, la mesure de la conductance superficielle est une méthode satisfaisante pour évaluer la sévérité de la pollution d'un site. Elle peut être représentative d'un type de site étudié, mais en général, elle présente des résultats dispersés.

I. 4. 2. 3. Comptage d'impulsions

Il consiste à enregistrer, à l'aide d'un dispositif approprié, pendant une période donnée, le nombre d'impulsions du courant de fuite, dépassant une certaine amplitude, pour un isolateur soumis à sa tension de service. L'existence d'impulsions précède généralement la phase finale de contournement sous pollution. La fréquence et l'amplitude de ces impulsions croissent lorsqu'on s'approche du contournement [12, 13].

Cette méthode se prête mieux à la détermination des longueurs d'isolateurs dans le cadre de l'extension ou du réisolement de réseaux existants. Cependant, elle ne fournit pas une mesure absolue de la performance des isolateurs et exige une aptitude au contrôle permanent.

I. 4. 2. 4. Courant de fuite de la plus forte crête (I_{fc})

I_{fc} est la plus forte crête du courant de fuite enregistrée pendant une période donnée sur un échantillon ou un isolateur réel, continuellement soumis à sa tension de service. Ces mesures doivent être effectuées pendant une période relativement longue et donc, à coût relativement élevé [12, 13].

Cette méthode est simple et tient compte de l'effet combiné des conditions atmosphériques et de la tension sur la couche polluante ; mais le coût relativement élevé de l'équipement de mesure contrebalance les avantages de cette méthode.

I. 4. 2. 5. Contrainte de contournement

La mesure de la contrainte de contournement donne toutes les informations nécessaires au calcul de la longueur de l'isolateur, qui donnera une fiabilité assez importante ou un taux de défaillance acceptable [12, 13].

Sur site, la contrainte de contournement peut être mesurée de différentes façons, entre autres :

➤ L'installation de chaînes d'isolateurs de même type, mais de différentes longueurs et soumises à une tension constante. On estime les probabilités de contournement à partir des portions d'amorçage enregistrées.

➤ La disposition des éclateurs qui sont disposés sur chaque chaîne afin que sa longueur effective soit augmentée jusqu'à atteindre le niveau de tenue en tension.

Ces méthodes présentent des mesures les plus directes qui puissent être faites sur les isolateurs réels, afin de déterminer leurs performances. L'inconvénient de ces méthodes, est le coût élevé qui peut toutefois être réduit par l'utilisation d'une ligne existante.

1. 4. 2. 6. Mesure de la pollution de l'air

Les mesures de pollution de l'air s'effectuent sur une période de temps donnée et permettent d'évaluer l'intensité et les caractéristiques de la pollution de l'air sur un site. Les méthodes de mesures adoptées partent du principe qu'en ce qui concerne le phénomène de contournement, une corrélation peut être établie entre l'analyse physico-chimique de l'air sur un site et la sévérité de la pollution sur ce même site [12, 13].

1. 4. 2. 7. Densité de dépôt non soluble

La densité de dépôt non soluble (DDNS) correspond à la quantité de produits polluants non solubles présents dans une couche de pollution. Elle s'exprime en mg/cm^2 . Les mesures de DDNS s'accompagnent également souvent d'une analyse physico-chimique de la pollution, au terme de laquelle les sources polluantes peuvent être identifiées [12, 13].

1. 4. 2. 8. Mesures optiques

Le but des mesures optiques est d'évaluer l'épaisseur de la couche de pollution déposée à la surface de l'isolateur. Un dispositif à rayons laser permet à partir des rayons réfléchis (amplitude, décalage de phase, etc.) de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche de pollution. La mesure de la sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche [12, 13].

1. 5. METHODES D'ESSAIS SOUS POLLUTION

A fin de comparer les performances de divers types d'isolateurs et de sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution, il est nécessaire de les soumettre à des essais. Pour cela, nous distinguons deux principales méthodes d'essais à

1. 5. 1. Essai sous pollution naturelle

On installe, dans différents sites pollués, des stations dans lesquelles on observe et analyse le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs ou colonnes isolantes, de longueurs et de profils différents. Les qualités respectives de ces isolateurs soumis à une même tension sont appréciées en se basant sur le courant de fuite ou la conductivité superficielle. Cependant la durée relativement longue (parfois plusieurs années) que nécessitent ces essais est le principal inconvénient [18]. Pour cela, plusieurs méthodes de laboratoire ont été proposées en vue de simuler convenablement les conditions naturelles d'exploitation.

1. 5. 2. Essais sous pollution artificielle

Les essais au laboratoire sont basés sur la simulation de la couche de pollution par des solutions réparties à la surface de l'isolateur et dont la conductivité peut être modifiée.

Afin de valider les essais sous pollution artificielle, il a été nécessaire de comparer les performances des isolateurs mis sous essais au laboratoire à celle des isolateurs en exploitation dans des conditions naturelles de pollution.

Une première approche consiste à rechercher une méthode qui simule le mieux possible les conditions naturelles de pollution, en tenant compte de la répartition non-uniforme de la pollution. Une deuxième approche consiste à rechercher une méthode de laboratoire susceptible de fournir des résultats reproductibles, afin de faciliter la comparaison des performances des différents types d'isolateurs [12, 19].

Les méthodes d'essais qui demeurent actuellement normalisées sont : la méthode du brouillard salin et la méthode de la couche solide [19].

1. 5. 2. 1. Méthode des couches solides

Dans ces méthodes la surface isolante est recouverte par pulvérisation d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte. La

I. 5. 2. 1. Méthode des couches solides

Dans ces méthodes la surface isolante est recouverte par pulvérisation d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte. La conductivité de cette suspension est réglée par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium. Si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérité est défini par la densité de dépôt de sel en mg/cm^2 . Si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini par la conductivité de la couche polluante [19]. Certains chercheurs [10, 14] ont utilisé une peinture semi-conductrice comme agent polluant.

I. 5. 2. 2. Méthode du brouillard salin

La surface isolante est alimentée par une tension de service, maintenue constante durant tous les essais et soumise à un brouillard salin. La solution saline, utilisée dans la méthode du brouillard salin, représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière insoluble, ou bien la pollution industrielle ayant une couche de pollution relativement mince [14].

Le degré de salinité exprimé en kg de sel par m^3 de solution, définit le paramètre de sévérité. Les valeurs de salinité appliquée en référence aux conditions de pollution sont choisies selon une progression allant de 2,5 à 160 kg/m^3 .

I. 5. 2. 3. Méthode de la pollution liquide

Elle est appelée aussi « méthode de la méthylcellulose » et s'apparente à la méthode de la couche solide lorsqu'un mélange liquide est déposé sur l'isolateur avant l'essai. Cependant, la pollution reste humide durant l'essai. Elle est constituée d'eau, de craie et de méthylcellulose ou de kaolin. La conductivité est ajustée par addition de chlorure de sodium [14].

Après quelques minutes d'égouttage, on applique la tension d'essai à l'isolateur. Il est important de signaler que la couche polluante n'est pas humidifiée en cours d'essai.

I. 5. 2. 4. Méthode de la chambre de poussière

Dans le cas de la tension continue, les méthodes d'essai déjà énumérées ne considèrent pas l'effet dû à la force électrostatique qui s'exerce sur les polluants. Dans le but d'avoir la tension de tenue et de contournement, la méthode de la chambre de poussière a été développée. Cette méthode permet de représenter le niveau de pollution et la distribution de polluants de la même manière que ceux trouvés dans les conditions naturelles, et elle permet aussi de reproduire de manière raisonnable l'accumulation des polluants sur site.

Cette méthode consiste à générer un débit d'air lent transportant du sel et des matériaux inertes avec une distribution uniforme que possible, à travers l'objet d'essai positionné au milieu d'une chambre. Puis, un vaporisateur va mouiller le dépôt de pollution généré précédemment [16].

I. 5. 3. Critiques de ces méthodes d'essais

Parmi les méthodes que nous avons décrites, il est clair que la méthode de la chambre de poussière offre un atout considérable pour les essais au laboratoire, en différentes formes de tension, car elle assure une pollution continue et uniforme.

D'autre part, la méthode du brouillard salin qui permet d'obtenir, par rapport aux méthodes de la couche solide et la couche liquide, une bonne reproductibilité des essais. En outre, elle est d'une grande facilité de mise en œuvre. Cette méthode est la seule qui assure, au cours de l'essai, un renouvellement de la couche polluante. La validité de cette méthode a été vérifiée dans un certain nombre de régions côtières [12].

I. 6. TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION

Plusieurs moyens sont utilisés afin de prévenir, autant que possible, les incidents lorsqu'une ligne est en service. Ces moyens de lutte doivent tenir compte des données propre au site considéré et du changement possible de la sévérité de pollution dû à de

Plusieurs moyens sont utilisés afin de prévenir, autant que possible, les incidents lorsqu'une ligne est en service. Ces moyens de lutte doivent tenir compte des données propre au site considéré et du changement possible de la sévérité de pollution dû à de nouveaux facteurs (apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, ...). Les différentes méthodes utilisées sont [11, 12] :

1. 6. 1. Allongement de la ligne de fuite

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

- Le changement de type d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite) : c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste [11].
- L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [20].

1. 6. 2. Isolateurs plats

Tandis que les deux précédentes méthodes conduisent à l'allongement de la ligne de fuite des isolateurs, l'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminuer. En effet, ces isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto-nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont principalement utilisés dans les régions désertiques où la principale source d'humidification est la condensation [21], soumis à des tempêtes de sable .

1. 6. 3. Graissage périodique

Grâce à ces propriétés hydrophobes, le graissage protège temporairement les isolateurs. La longévité du graissage dépend de l'environnement et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement comprise entre un et quatre ans. En plus du coup de l'opération, cette méthode nécessite une interruption de service, ce qui représente un inconvénient majeur [11].

I. 6. 4. Revêtement silicones

Il consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Il protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre, sa longévité est nettement supérieure à celle du graissage [22].

I. 6. 5. Isolateurs composites

Ils sont constitués d'un noyau en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Ces isolateurs présentent l'avantage d'une grande légèreté, une haute résistance mécanique et une propriété hydrophobe. Ils peuvent être utilisés dans les régions où règne une pollution exceptionnelle [23]. Mais, ils présentent l'inconvénient de vieillir sous l'effet des différentes contraintes électrique et mécanique.

I. 6. 6. Nettoyage des isolateurs

Il existe trois types :

- Le nettoyage manuel (essuyage à sec de l'isolateur) ou le lavage hors tension, peuvent être utilisés de façon périodique, en particulier dans les postes, nécessitant des interruptions de service assez longues [11].
- Le lavage sous tension qui permet d'éviter les coupures à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans ce cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau de lavage, le processus de lavage et les distances de sécurité à respecter, pour éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.
- Le nettoyage des isolateurs à l'aide d'un abrasif pulvérisé sous pression. C'est une technique utilisée dans certains pays (Amérique du nord, en particulier). Cette méthode permet le nettoyage pour des agents polluants très adhérents (ciment) et peut être utilisée pour dégraisser les isolateurs [11].

permet le nettoyage pour des agents polluants très adhérents (ciment) et peut être utilisée pour dégraisser les isolateurs [11].

I. 7. CONCLUSION

La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension de transport d'énergie électrique.

Pour mieux dimensionner les chaînes d'isolateurs, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés. La connaissance de cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation. Il n'en demeure pas moins que trois années sont au minimum nécessaires pour déterminer la sévérité d'un site.

Le fait de disposer d'une méthode de pollution artificielle permet de n'effectuer l'expérimentation (dans le site) que sur un seul type d'isolateurs et éventuellement à un niveau de tension différent que celui prévu, ce qui constitue déjà un avantage considérable.

Afin d'être en mesure de fournir rapidement des renseignements concernant l'isolement nécessaire, il serait préférable de disposer d'une carte de sévérité des principaux sites pollués. On propose de les classer en quatre catégories de sévérité auxquelles correspondent des longueurs minimales de lignes de fuite à respecter pour les isolateurs en services dans ces sites.

II. 1. INTRODUCTION

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

Une décharge ne peut être générée que si le champ électrique au niveau des électrodes (et donc la tension appliquée) dépasse une certaine valeur dite <<de seuil>> (respectivement tension d'amorçage). Cette décharge ne peut évoluer que si certaines conditions sont réunies.

Partant d'une analyse graphique, Flazi [24] a montré que les conditions critiques d'élongations de la décharge sont différentes des conditions critiques de contournement ; les premières sont déterminées par la satisfaction du critère d'élongation juste en avant de la décharge, les deuxièmes sont déterminées lorsque ce critère est satisfait tout au long de l'élongation.

Par ailleurs et en courant alternatif, 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. 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. Ainsi, Maikopar [25] a établi le modèle de réallumage de l'arc par rupture énergétique. Le modèle de réallumage par rupture diélectrique a été décrit par Rizk [26].

II. 2. MECANISMES DE PROPAGATION

II. 2. 1. Propagation par ionisation

Wilkins et Al-Baghdadi [27] ont proposé un mécanisme d'élongation basé sur l'ionisation et le déplacement discontinu du pied de la décharge. Selon Wilkins, la probabilité d'ionisation dans la région précédant l'avant pied de la décharge est grande, étant donné que la température et le potentiel sont élevés dans cette région.

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

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

II. 2. 2. Propagation par force électrostatique

A partir des observations faites sur un canal d'électrolyte, Rahal [28] a essayé de mettre en évidence l'existence d'une force électrostatique s'exerçant sur la décharge, responsable du déplacement de l'arc. Il a démontré que du point de vue électrique macroscopique, cette force était due à la dissymétrie de la distribution du potentiel, elle-même causée par le passage du courant dans le liquide couvrant la surface isolante.

Cette force va provoquer la courbure de la décharge vers l'électrode de masse (Figure II.1). La décharge se déplace vers l'électrode de masse, si les conditions critiques sont satisfaites.

Dans une analyse critique des différents mécanismes de propagation de la décharge présents dans la littérature, Flazi [24] a déduit que l'augmentation du degré d'ionisation à l'intérieur de la décharge et le démarrage du processus d'ionisation devant celle-ci, sont les

facteurs responsables de l'allongement et du changement que subit la décharge, dans ses états dynamiques.

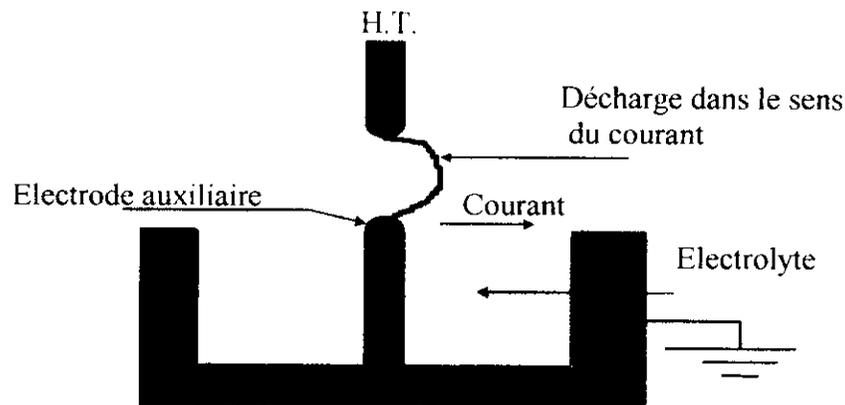


Figure II. 1. Courbure de la décharge dans la direction de l'écoulement du courant mettant en évidence l'existence d'une force

II. 3. CRITERES DE PROPAGATION DE LA DECHARGE

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, soit l'énergie fournie par la source ou encore les impédances.

II. 3. 1. Critère de Hampton

Partant de résultats expérimentaux, Hampton [29] a déterminé les conditions critiques de propagation de l'arc, en remplaçant la couche de pollution en série avec l'arc par une colonne d'eau uniforme présentant une résistance linéique constante. Il a pu établir que la condition pour que le contournement se produise, est que le champ E_p dans la colonne d'eau dépasse le champ E_{arc} à l'intérieur de l'arc :

$$E_{arc} < E_p \quad (II.1)$$

II. 3. 2. Critère de Hesketh

En supposant que l'arc en série avec la couche de pollution mouillée change de façon à rendre maximale le courant I qu'il tire de la source d'alimentation, Hesketh [30] a établi un critère de propagation de l'arc, exprimé par la relation :

$$\frac{dI}{dx} > 0 \quad (\text{II.2})$$

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

II. 3. 3. Critère de Wilkins

Wilkins [18] a généralisé la condition énoncée par Hesketh [30] et a établi un critère de propagation utilisant la puissance ; en considérant qu'un système placé dans une configuration lui permettant de dissiper le maximum d'énergie, l'allongement de la décharge est assuré par l'augmentation de la puissance P fournie par la source :

$$\frac{dP}{dx} > 0 \quad (\text{II.3})$$

Lorsque la tension appliquée au système est constante, le critère de Wilkins se réduit à la condition établie par Hesketh [30].

II. 3. 4. Critère de Anjana et Lakshminarasimha

En assimilant l'arc à une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, Anjana et Lakshminarasimha [31] ont établi une condition nécessaire à la propagation de l'arc, basée sur des conditions énergétiques : l'énergie totale fournie W_{totale} doit être supérieure ou égale à l'énergie W_{th} nécessaire pour maintenir l'arc à sa température :

$$W_{\text{totale}} \geq W_{\text{th}} \quad (\text{II.4})$$

II. 3. 5. Critère de Dhahbi, Beroual et Krahenbul

Ils ont proposés un nouveau critère analytique de propagation de la décharge [32] en faisant intervenir l'impédance équivalente Z_{eq} d'un circuit électrique (Figure II. 2), simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite.

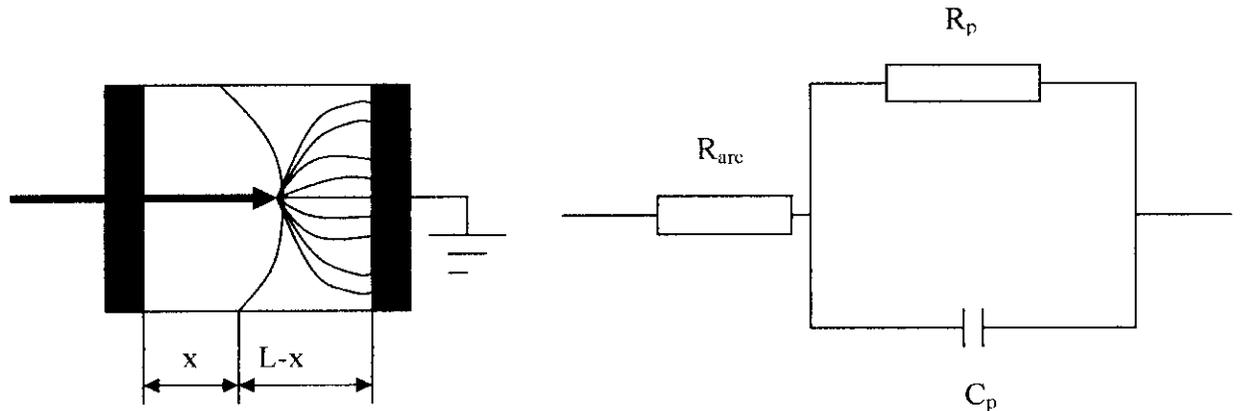


Figure II. 2. Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent

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

$$\frac{d|Z_{eq}|}{dx} \leq 0 \quad (\text{II.5})$$

Ces auteurs ont abouti à un critère qui est :

$$E_{arc} \geq \frac{E_p}{\sqrt{a}} \quad (\text{II.6})$$

Avec: $a=1$ en tension continue, car $a=1+\omega^2\rho_p\xi^2$

Ils ont conclu que, pour la tension continue ($a=1$), l'arc peut s'allonger, même si $E_{arc} \geq E_p$; le critère de Hampton alors ne correspond pas à une condition suffisante à la propagation de la décharge.

II. 4. PRINCIPAUX MODELES STATIQUES DE CONTOURNEMENT

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

II. 4. 1. Modèle d'Obenaus

C'est Obenaus [2] qui, dans un travail de pionnier, est à l'origine des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante, sous tension continue. En effet, partant d'un modèle type circuit électrique équivalent, constitué d'un arc de longueur x en série avec une résistance R_p représentant la résistance de la pollution (Figure II. 3), il en a déduit la tension d'arc :

$$U_{\text{arc}} = \frac{Ax}{I^n} \quad (\text{II.7})$$

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

Les valeurs des paramètres n et A dépendent du milieu dans lequel s'amorce la décharge. Selon certains auteurs [12, 16, 33] : $0.4 \leq n \leq 1$ et $3 \leq A \leq 500$.

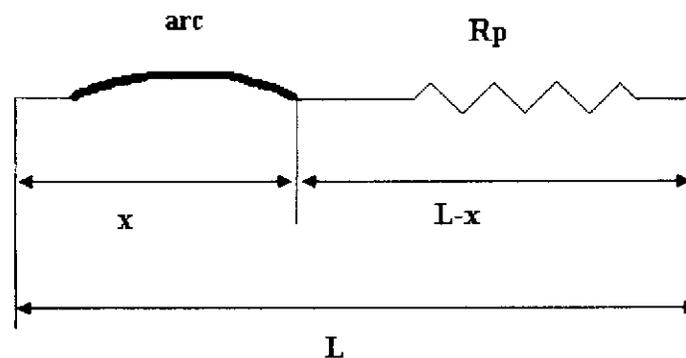


Figure II. 3. Modèle d'Obenaus

A partir de mesures expérimentales sur un canal d'électrolyte, Ghosh et al [33] ont proposé de prendre des valeurs différentes pour les constantes A et n caractérisant l'équation de la décharge selon la nature de l'électrolyte utilisé. Les résultats de leurs mesures sont donnés dans le tableau (II.1).

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

Tableau II. 1. Constantes caractéristiques statiques de l'arc selon Ghosh et Al

II. 4. 2. Modèle de Neumarker

Neumarker [34] a repris les travaux d'Obenaus [2], et a ajouté l'hypothèse d'une couche de pollution de résistance r_p uniforme par unité de longueur de fuite. En effet Neumarker propose l'expression suivante pour la résistance de pollution R_p (résistance linéique) :

$$R_p = r_p(L - x) \quad (II.8)$$

En introduisant cette expression dans le modèle d'Obenaus et en négligeant les chutes de tension cumulées aux électrodes [35], la tension U aux bornes de l'isolateur sera :

$$U = U_{arc} + r_p(L-x) I \quad (II.9)$$

ou encore :

$$U = \frac{xA}{I^n} + r_p(L-x)I \quad (II.10)$$

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

$$I_c = \left(\frac{xA}{I^n} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (\text{II.11})$$

et

$$x_c = \frac{L}{n+1} \quad (\text{II.12})$$

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

$$U_c = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} L \quad (\text{II.13})$$

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

III. 4. 3. Modèle de Rizk

A partir d'une analyse théorique, Rizk [26] a décrit le phénomène d'entretien de l'arc et le mécanisme de rupture diélectrique. Il a mis en évidence l'expression de la rigidité de l'espace résiduel et établi une relation entre la tension minimale U_c nécessaire à l'entretien de l'arc, la résistance de pollution linéique r_p et la longueur de fuite L . Cette relation peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{U_c}{L} = 23r_p^{0.4} \quad (\text{II.14})$$

II. 4. 4. Modèle de Claverie et Porcheron

Plusieurs modèles expérimentaux ont été proposés pour le cas d'une tension alternative. Le plus connu est celui de Claverie et Porcheron [36, 37]. Ces auteurs ont montré que, pour un modèle d'isolateur plan (Figure II. 4), la tension d'arc est de la forme :

$$U_{\text{arc}} = 100 \frac{x}{\sqrt{I}} \quad (\text{II.15})$$

et la tension minimale d'entretien de l'arc est :

$$U = 800 \frac{x}{\sqrt{I}} \quad (\text{II.16})$$

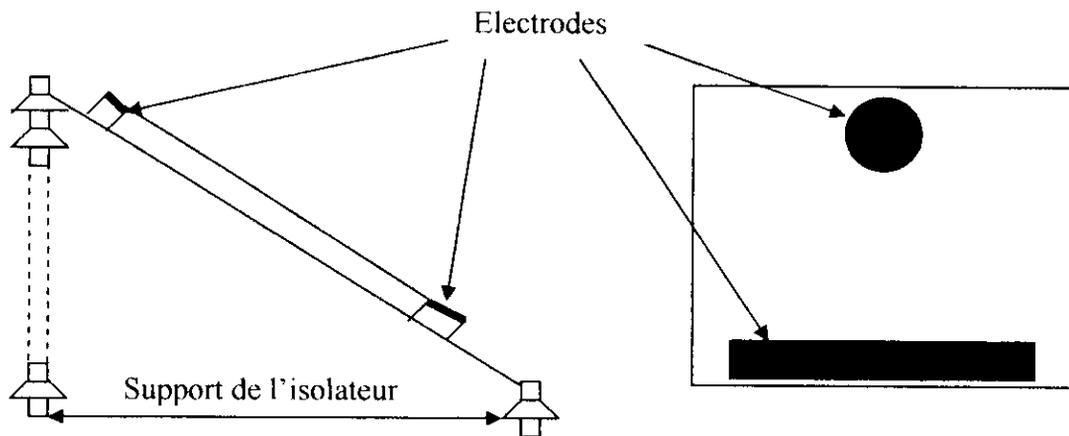


Figure II. 4. Modèle expérimental de Claverie et Porcheron

II. 4. 5. Modèle de Rao et Gopal

D'après Rao et Gopal [38], la tension d'arc, donnée par l'équation (II.7), n'est valable que pour une décharge de type intermédiaire entre la luminescence et l'arc [39]. Ce type d'équation peut être contesté lorsque la décharge se réamorce périodiquement. Ainsi, les auteurs ont introduit une nouvelle équation, afin d'expliquer les écarts entre les prédictions des modèles et les valeurs mesurées pendant le contournement :

$$U = \alpha + (\beta + x)v \left(\ln \frac{I}{\delta} \right)^{-3} \quad (\text{II.17})$$

α , β , v et δ sont des constantes qui dépendent de la nature des électrodes entre lesquelles s'amorce la décharge.

Cette équation exprime la caractéristique $U(I, x)$ d'un arc de faible intensité brûlant dans l'atmosphère sous tension continue [39].

II. 4. 6. Modèle d'Alston et Zoledziowski

En tenant compte de l'hypothèse de Neumarker [34] et pour une tension d'application dépassant quelques kV. Alston et Zoledziowski [40] ont déterminé la condition de maintien de l'arc électrique, dans le cas d'un isolateur cylindrique de longueur L (figure II. 5) soumis à une tension continue:

$$U_{cx} = (n + 1)(Ax)^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{r(L - x)}{n} \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{II.18})$$

où x est la longueur d'arc, A et n sont les constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc, et r représente la résistance de la pollution en série avec l'arc.

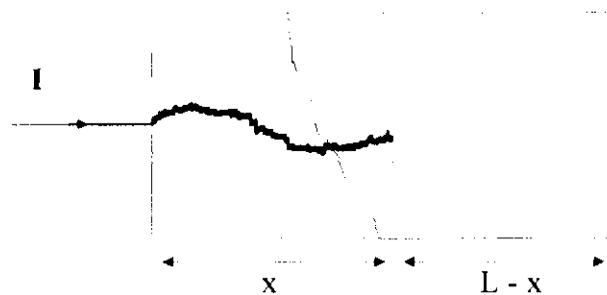


Figure II. 5. Modèle cylindrique utilisé par Alston et Zoledowski

II. 4. 7. Modèle de Danis

Afin de reproduire des couches similaires à celles observées sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, Danis [1] a utilisé un modèle de forme géométrique simple (plan ou cylindre) possédant plus d'une zone sèche (Figure II. 6. a). La rupture des zones sèches survient alors d'une manière aléatoire (Figure II. 6. b). Le lieu d'apparition des arcs partiels, la forme et le mouvement des racines des arcs sur une surface polluée (Figure II. 6. c) dépendent ainsi de plusieurs facteurs, dont on ne peut pas déterminer les effets instantanés. Par conséquent, le comportement macroscopique de ces arcs a une nature stochastique. La tension de contournement est donc une variable aléatoire et a une fonction de distribution.

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

En considérant que la résistance de la couche polluante est linéaire, l'équation qui régit le modèle sous tension continue est :

$$U = \frac{Ax}{l^n} + r_p(L - x)l \quad (\text{II.19})$$

avec $n \leq 0.5$ et $200 \leq A \leq 400$

r_p est la résistance linéique .

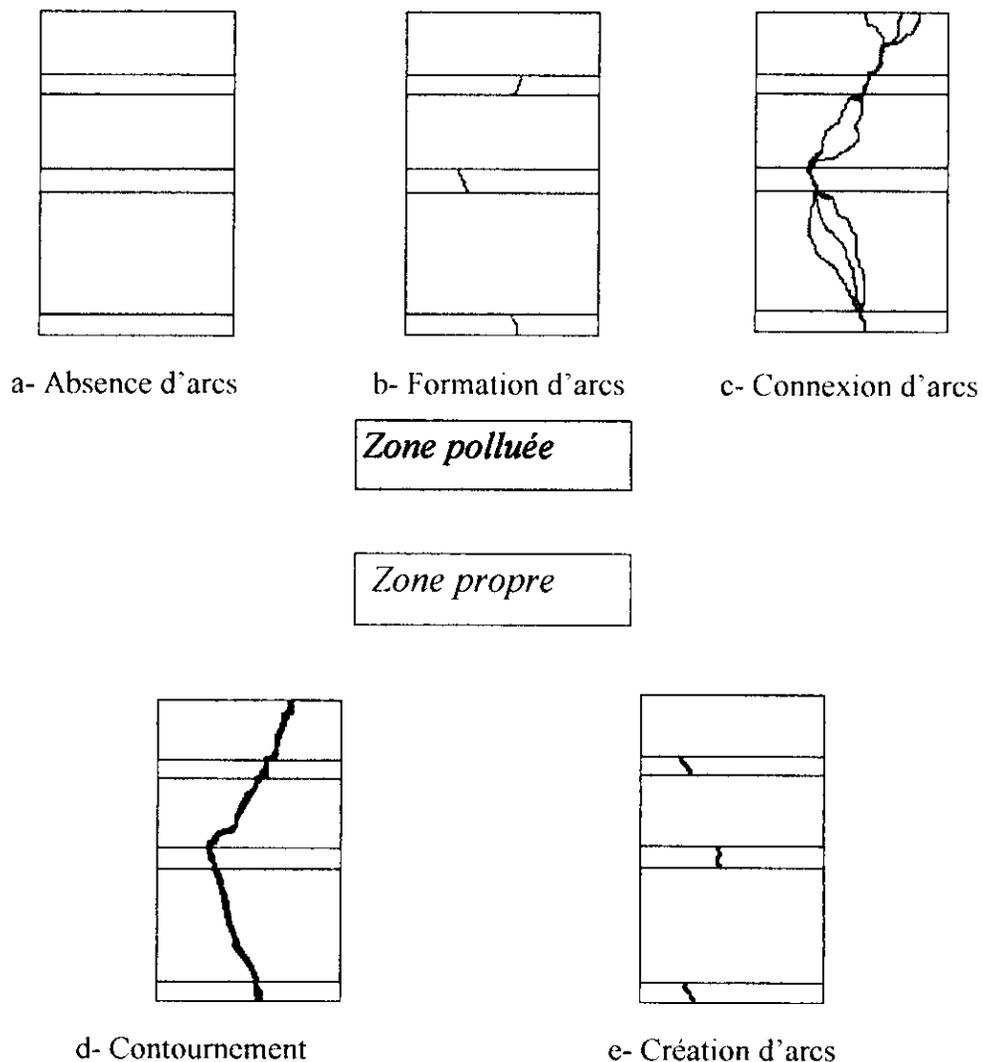


Figure II. 6. Modèle de Danis

Pour la même configuration (Figure II. 7. b), dans le cas d'une bande étroite, Wilkins [18] a obtenu :

$$R_p = r_p(L - x) + \frac{1}{\pi\gamma} \ln\left(\frac{b}{2r_d\pi}\right) \quad (II.28)$$

et pour une bande large :

$$R_p = \frac{1}{\pi\gamma} \left(\ln\left(\frac{2L}{\pi r_d}\right) - \ln\left(\tan\left(\frac{\pi x}{L}\right)\right) \right) \quad (II.29)$$

où x est la longueur d'arc et L est la longueur totale de fuite de l'isolateur.

II. 4. 9. Modèle de la couche mixte

De façon à mieux représenter la résistance superficielle de pollution d'un isolateur à long fut, Obenaus et Boheme [43] ont considéré que celle-ci était équivalente à deux couches résistantes en série, de résistance linéique r_1 et r_2 et correspondant respectivement à la tige et aux ailettes, et ils ont décomposé la distance totale de fuite L en deux distances partielles, L_1 et L_2 respectivement (Figure II. 8). L'application du critère de Hampton leur a permis de déduire la relation (II.30) donnant le gradient de contournement critique (en faisant certaines hypothèses et choisissant l'exposant $n=1$) :

$$\frac{U_c}{L} = 0.8\sqrt{A} \cdot \sqrt{r_1} \quad (II.30)$$

où: $A=80VA/cm$

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

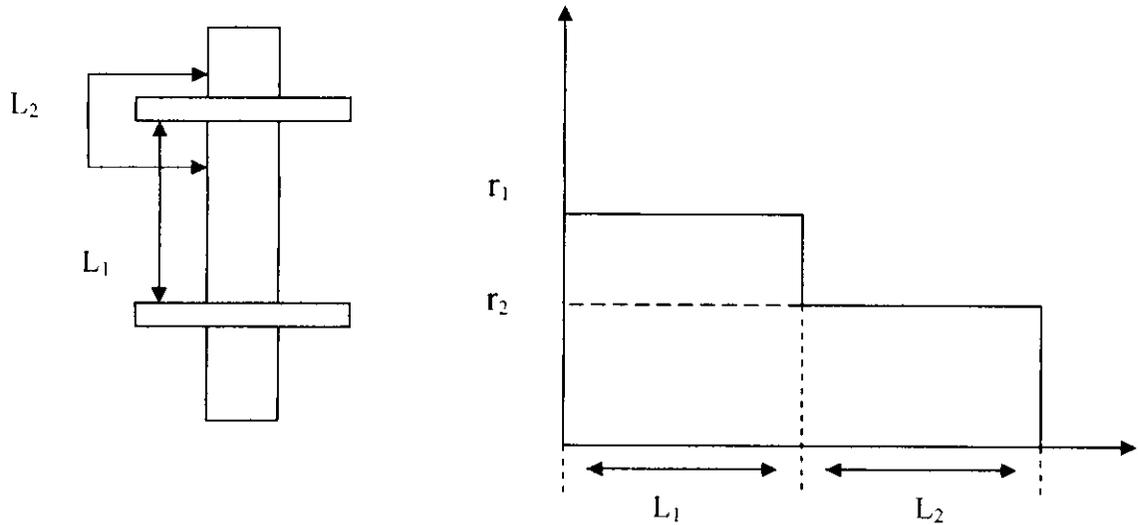


Figure II. 8. Modèle d'un isolateur à long fut et distribution de la résistance de pollution selon Boheme et Obenaus

En appliquant le critère de Hesketh [30], l'expression précédente devient

$$\frac{U_c}{L} = 0.8(L, r_p, i) \quad (\text{II.31})$$

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

II. 4. 10. Modèle du disque circulaire

Woodson et McElroy [44] ont imaginé une configuration géométrique, illustrée à la figure (II. 9), qui représenterait de façon idéale la surface d'un isolateur à disque. Ils partaient de l'hypothèse que, de façon générale, la résistance superficielle de la couche de pollution humide, pour n'importe quelle position r_a du point de départ de l'arc de rayon r_d , peut s'exprimer par une fonction de la forme :

$$R_p = \frac{1}{\gamma} f(r_d, r_a, r_v) \quad (\text{II.32})$$

où r_0 est le rayon de l'électrode externe et γ la conductivité superficielle du polluant.

Si l'on néglige la dépendance de la fonction f vis-à-vis du rayon de l'arc r_d , on obtient une expression encore plus simple ayant la forme :

$$R_p = \frac{\text{const}}{\gamma} (r_0 - r_a)^m \quad (\text{II.33})$$

La constante a été ensuite déterminée expérimentalement pour $R_p = 1.6 \cdot 10^{-2}$ et la valeur obtenue était 1,4. McElroy et Woodson [44] l'ont utilisé avec assez peu de succès.

Ce modèle sous tension continue n'a pas donné de résultats satisfaisants. Cela a été imputé à la non uniformité de la résistivité superficielle de l'isolateur.

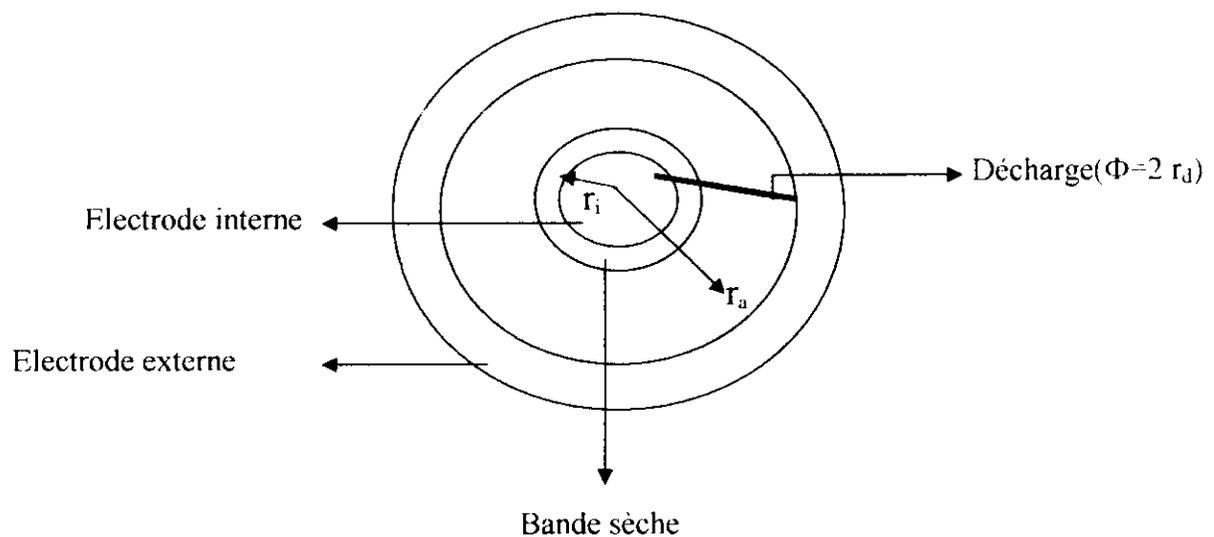


Figure II. 9. Model d'isolateur en forme de disque conçu par McElroy et Woodson

II. 4. 11. Modèles de Tegar

a / Cas de pollution continue

Tegar [12] a élaboré un modèle statique en tension alternative. Son modèle est basé sur celui d'Obenaus [2], et permet d'avoir les différentes caractéristiques concernant le développement de l'arc électrique sur une surface isolante uniformément polluée.

En se basant sur l'équation du circuit et sur la condition limite de réamorçage [36, 37], il a déterminé l'expression donnant la résistance de pollution en série avec l'arc, en fonction de la tension appliquée et le courant de fuite :

$$R_p = \frac{1}{\rho} \frac{K - 100}{K} \frac{U}{I} = \rho F_p \quad (II.34)$$

où ρ représente la résistivité de la couche de pollution et K la constante de la caractéristique statique de l'arc.

Cette équation lui a permis d'évaluer la longueur critique de l'arc et par suite tous les paramètres caractérisant les phénomènes de conduction et de décharge électriques sur des surfaces isolantes uniformément polluées.

Un modèle amélioré a été mis au point par Tegar [45] pour caractériser la propagation d'une décharge électrique sur des surfaces isolantes soumises à une pollution continue non uniforme.

b / Cas de pollution discontinue

Tegar [45] a élaboré un algorithme qui permet d'obtenir les différentes caractéristiques des phénomènes de conduction sur les surfaces isolantes sous pollution discontinue. Les bandes propres et polluées sont représentées pas des circuits électriques.

Les composants de ces circuits sont déterminés à partir des essais effectués sur la plaque propre et celle uniformément polluée. Le courant de fuite critique et la tension de contournement sont calculés à partir de la connaissance de la tension de contournement obtenue expérimentalement dans le cas où les couches de la pollution discontinue sont remplacées par du papier aluminium.

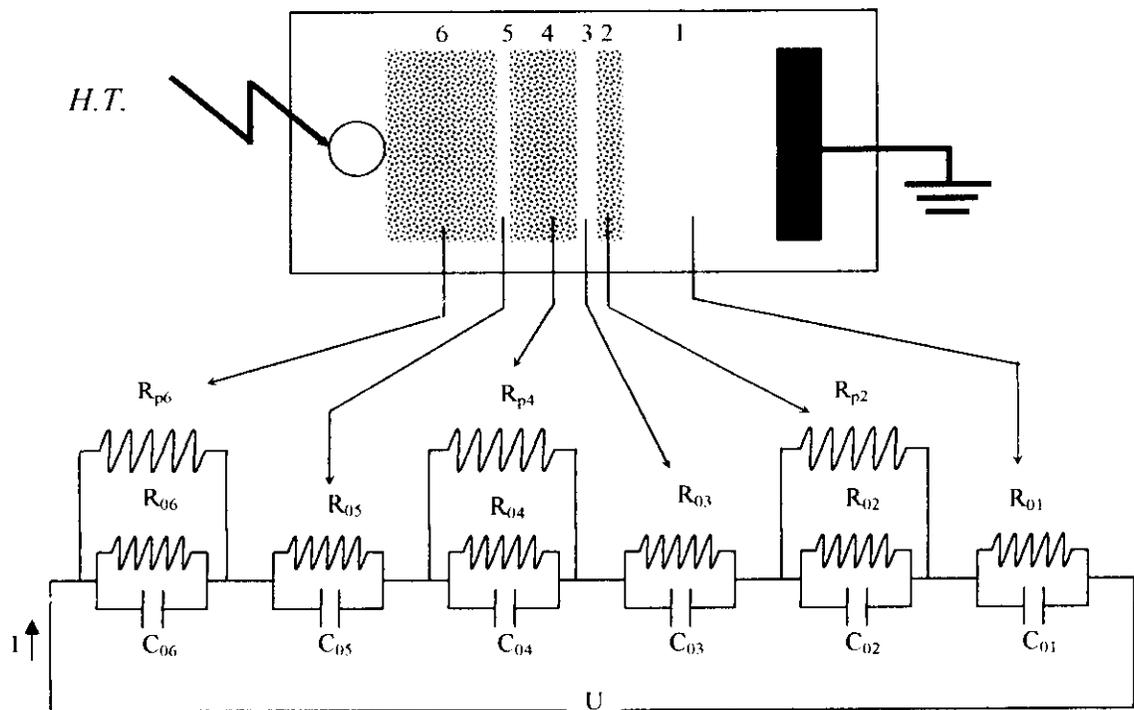


Figure II. 10. Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire

La figure (II.10) représente le circuit électrique équivalent au modèle de laboratoire sous pollution discontinue. Dans ce circuit, chaque bande i ($i=1$ à 6) est constituée d'une résistance R_{0i} en parallèle avec une capacité C_{0i} . Pour chaque bande polluée i ($i=2, 4, 6$), ces circuits sont shuntés par une résistance R_{pi} représentant la couche de pollution (peinture semi-conductrice à base de graphite)

Le fait que les couches polluantes possèdent des formes rectangulaire et selon la recommandation de la CEI 60-1 [17], l'expression de la résistance pour chaque bande polluée i peut être formulée par :

$$R_{pi} = R_{sp} \int_0^{l_i} \frac{dx}{b} = R_{sp} \frac{l_i}{b} = R_p f \frac{l_i}{b} \quad (II.35)$$

avec $i=2, 4, 6$, R_{pi} la résistance de couche de pollution, dx élément de longueur, l_i la longueur de la pollution, b la largeur de la couche de pollution et f le facteur de forme.

Les résultats simulés concordent assez parfaitement avec ceux obtenus expérimentalement pour les grandes largeurs de couches polluantes.

II. 5. MODELES DYNAMIQUES

Alors que plusieurs paramètres évoluent dans le temps, l'étude du phénomène de contournement a été souvent effectuée en utilisant des modèles statiques. Afin d'être plus proche de la réalité, de nouveaux modèles ont été élaborés prenant en considération la variation dans le temps de certains paramètres. Ainsi, des lois physiques sont utilisées pour établir les critères de propagation et l'étude de la dynamique de l'arc.

Nous présentons, dans cette section, certains modèles dynamiques basés sur le modèle d'Obenaus [2] et celui de Mayr [46] pour le comportement dynamique de l'arc.

II. 5. 1. Modèle de Rizk et Nguyen

Pour caractériser la dynamique de l'arc pour le cas continu, Rizk et Nguyen [47] ont considéré une résistance d'arc qui varie selon l'équation de Mayr [46] :

$$\frac{dR_{arc}}{dt} = \frac{R_{arc}}{\tau} - \frac{R_{arc}^2 I^{n+1}}{A\tau} \quad (II.36)$$

Avec

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

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

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

II. 5. 2. Modèle de Anjana et Lakshminarasimha

Anjana et Lakshminarasimha [31] ont proposé un modèle basé sur l'équation de Mayr [46] et sur le modèle statique d'Obenaus [2]. Ils ont proposé que l'isolateur est divisé en un certain nombre de bandes, formant des anneaux symétriques par rapport à l'axe de l'isolateur, et que l'arc est une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, dont l'énergie est donnée par :

$$W_{th} = \frac{3}{2} kTM \quad (II.37)$$

Avec

T : la température de l'arc, M le nombre de particules neutres dans l'arc et k la constante de Boltzman.

Pour la propagation de l'arc, Anjana et Al [31] proposent leur propre modèle, selon lequel l'arc ne se déplace que si son énergie totale W_{totale} est supérieure ou égale à l'énergie W_{th} nécessaire pour maintenir l'arc à sa température, où W_{totale} est donnée par l'expression suivante :

$$W_{totale} = (E_{arc} I_{arc} - P_0) dt \quad (II.38)$$

Avec :

E_{arc} : le gradient de la décharge.

I_{arc} : le courant de la décharge.

dt : le laps de temps.

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

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

$$V = \mu E_{arc} \quad (II.39)$$

V : vitesse de propagation de la décharge et μ est la mobilité des électrons dans l'arc.

On déduira :

$$dx = V dt \quad (II.40)$$

La multiplication de la vitesse instantanée par l'intervalle de temps dt (représentant l'incrément temporel) permet d'obtenir l'évolution dans l'espace équivalente (dx) qui représente l'allongement de la décharge, dont la nouvelle longueur est $(x+dx)$. Si, cette dernière atteint la longueur totale de fuite, il y a contournement. Dans le cas contraire, le temps est incrémenté et les calculs sont repris depuis le début.

II. 5. 3. Modèle de Dhahbi

Dhahbi [49] a considéré que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure (II.10). Pour chaque saut de l'arc, on obtient une nouvelle cellule ayant les paramètres suivants : R_i , C_i , L_i et U_i . Elle a considéré aussi que la résistance du canal d'arc varie selon l'équation de Mayr [46] et que la forme de ce canal est cylindrique de résistivité constante.

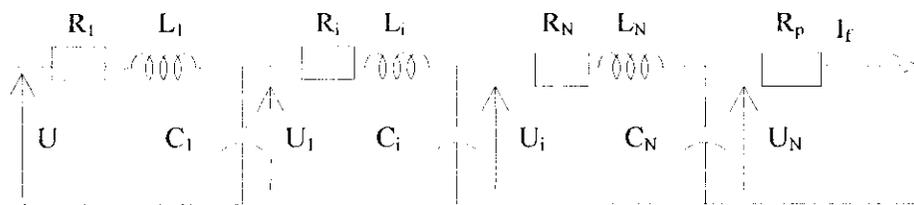


Figure II. 10. Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge selon Dhahbi

où:

R_p : est la résistance de la pollution

C_p : la capacité de la couche de pollution

R_i : est la résistance de l'arc

C_i : la capacité de la décharge

L_i : l'inductance de la décharge

U_i : tension correspondant à chaque cellule nouvellement créée

Ce modèle permet de calculer la tension de contournement, le temps au contournement ainsi que certains paramètres caractérisant la propagation de la décharge électrique le long d'une surface isolante polluée. Elle a utilisé le critère d'impédance comme critère de propagation. Ainsi, Dhahbi a trouvé que les effets de l'inductance du canal de la décharge sont négligeables, et que la forme d'onde de la tension appliquée a une influence directe sur les paramètres régissant le phénomène de contournement.

II. 5. 4. *Modèle de Sundararajan et Gorur*

Dans le but d'estimer la tension de contournement des isolateurs pollués sous tension continue, Sundararajan et Gorur [50] ont proposé un modèle dynamique, qui ressemble à celui de Anjana et Lakshminarasimha [31], mais basé sur le critère de propagation de Hampton [37] (champ au pied de l'arc inférieur à celui dans la pollution).

Concernant le gradient de la tension dans la couche de pollution E_p , ils ont utilisé la contrainte critique donnée par l'expression :

$$E_p = A \frac{1}{r_p^{n+1}} r_p^n \quad (\text{II.41})$$

avec:

r_p : la résistance linéique de la couche de pollution

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

La résistance R_p de la couche de pollution est calculée en se basant sur le facteur de forme de l'isolateur :

$$R_p = \frac{1}{\gamma_p} f = \frac{1}{\gamma_p} \int_X^L \frac{dX}{2r_a \pi} \quad (\text{II.42})$$

L est la longueur de fuite de l'isolateur en cm, X la longueur d'arc en cm, dX le pas de la longueur d'arc en cm, γ_p la conductivité superficielle de la couche polluante, en S.

II. 5. 5. Modèle de Tegar

Le modèle de Tegar [45] en tension continue se base sur le circuit électrique équivalent d'obenaus [2] et utilise le critère de propagation de Hampton [29].

Par ailleurs, Tegar [45] a représenté la résistance de pollution comme une fonction linéaire de la longueur de fuite. Concernant le rayon d'arc, il a utilisé l'expression donnée par Wilkins [18] qui met en évidence la relation entre le rayon r au pied de l'arc et le courant I dans l'arc.

Le modèle qu'il a proposé permet d'évaluer la tension de contournement et le temps au contournement et de décrire la dynamique de l'arc en tenant compte de la géométrie de l'isolateur ainsi que des variations instantanées de certains paramètres importants à savoir le courant de fuite, la vitesse de propagation, la puissance et l'énergie fournies par la source, le champ dans la pollution et au pied de l'arc, la résistance de la pollution, le rayon du canal d'arc, la résistance de ce canal, sa longueur, sa résistance linéique, sa résistivité, sa tension ainsi que la puissance et l'énergie qui lui ont été transférées.

II. 6. CONCLUSION

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

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

III. I. INTRODUCTION

L'expérience industrielle et les recherches de laboratoires ont montré que les décharges partielles précèdent toujours le contournement d'un isolateur. Les processus physiques mis en jeu sont nombreux et très complexes. Cependant, il est souhaitable qu'un modèle mathématique simple de l'arc soit élaboré, avec l'objectif d'aider à la compréhension des mécanismes d'extension d'une décharge électrique sur des surfaces polluées jusqu'au contournement total.

Beaucoup de progrès ont été fait dans l'analyse physique de l'arc. Mais la plupart des modèles rapportés dans la littérature, sont des modèles statiques [2, 18, 51, 52]. Ces derniers permettent, pour une situation donnée, la prédiction de la tension de contournement critique sans prendre en compte les variations instantanées dans les paramètres de l'arc (électriques, thermiques, géométriques, ...).

Pour faciliter l'utilisation pratique, on schématise l'arc par un élément d'un circuit électrique pur; qui est représenté par une résistance non linéaire [12, 26, 53]. Alors que le courant d'arc est une fonction de la tension et de la longueur d'arc.

En se basant sur le modèle de Tegar [45], nous proposons un modèle dynamique de contournement sous tension alternative. Notre modèle tient compte de la géométrie de l'isolateur. En outre, il permet de suivre l'évolution temporelle de plusieurs paramètres de la décharge, à savoir le courant d'arc, la vitesse de propagation, la chute de tension dans l'arc, la longueur de l'arc électrique, la résistivité de l'arc, les champs dans l'arc et dans la couche de pollution, le rayon de l'arc, la puissance et l'énergie délivrées par la source ainsi que celles transférées dans l'arc.

III. 2. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Vu la complexité des phénomènes d'arcs se produisant sur des isolateurs pollués, nous avons adopté les hypothèses suivantes :

- La couche de pollution est représentée par une résistance pure.
- L'isolateur réel est remplacé par un modèle plan équivalent ; il s'agit donc d'une représentation bidimensionnelle.
- La conductivité de la pollution est la même en tout point de la couche polluante et ne change pas durant la propagation de la décharge.
- Parmi tous les arcs multiples qui se développent sur la surface isolante, seul l'arc dominant est pris en considération.
- L'arc électrique est assimilé à un canal cylindrique dont le rayon varie selon le modèle de Wilkins [18].

III. 3. MODELE EQUIVALENT A LA PROPAGATION

Le modèle que nous avons élaboré permet de modéliser un isolateur pollué et partiellement contourné utilisant un circuit électrique équivalent. Son but consiste en la détermination des différents paramètres réagissant la propagation d'une décharge électrique jusqu'au contournement, sous tension alternative 50 Hz.

III. 3. 1. Modèle de base

En se basant sur le modèle proposé par Obenaus [2], nous pouvons représenter un isolateur pollué et partiellement contourné par une décharge électrique, par un circuit électrique équivalent constitué de deux résistances en série. La première résistance R_{arc} représente le canal de la décharge, et la seconde résistance R_p représente la couche de pollution non court-circuitée par la décharge (Figure III.1).

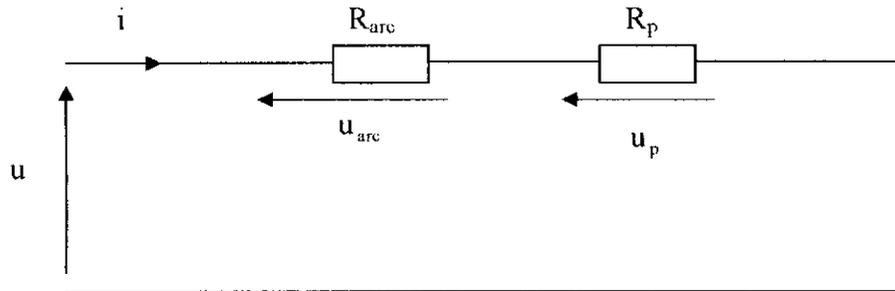


Figure III. 1. Modèle de base

III. 3. 2. Propagation de la décharge

III. 3. 2. 1. Initialisation de la décharge

Lorsqu'on applique une tension suffisamment élevée entre deux électrodes, il y aura apparition d'une première décharge de longueur x_0 sous forme d'effet couronne. Si certaines conditions (citées ultérieurement) sont réunies, cette décharge peut s'allonger. Dans le cas contraire, elle s'éteint et disparaît jusqu'à ce que les conditions de réamorçage d'arc soient de nouveau remplies.

III. 3. 2. 2. Critère de propagation

Nous avons adopté pour notre modèle, le critère de propagation proposé par Hampton [29]. Selon cet auteur, la différence entre le champ dans la décharge et le champ dans la pollution est l'élément essentiel qui influe sur la propagation de la décharge, car cette dernière évolue, si le gradient de la tension (E_p) dans la pollution est supérieur à celui dans la décharge (E_{arc}). En effet, la perspective générale est que, lorsque le gradient E_p dépasse E_{arc} par excès, il y aura augmentation du courant de fuite qui favorise l'évolution de la décharge, ce qui diminue considérablement la rigidité diélectrique du système isolant.

Lorsque la couche polluante est représentée par une résistance pure, Tegar [12] a montré que tous les critères de propagation définis dans le chapitre précédent aboutissent aux mêmes résultats obtenus par le critère d'Hampton.

Sachant que les champs dans l'arc et dans la pollution s'écrivent comme suit :

$$E_{\text{arc}} = -\frac{du_{\text{arc}}}{dx} \quad (\text{III.1})$$

et

$$E_p = -\frac{du_p}{dx} \quad (\text{III.2})$$

III. 3. 2. 3. Critère de réamorçage (réallumage d'arc)

Sous tension alternative, à la fin de chaque alternance le courant est interrompu puis réapparaît quelques instants plus tard lorsque la tension est suffisante pour provoquer le réamorçage de l'arc.

Ce réamorçage correspond, en fait, à une brusque augmentation de la conductivité du canal ionisé qui demeurerait après extinction de l'arc précédent.

On conçoit bien que ce réamorçage ne s'effectue pas dans tous les cas et que l'arc ne pourra se maintenir ou se développer que sous certaines conditions (conductivité, phénomènes d'échange thermique, ...).

Suivant certaines considérations basées sur de nombreuses études relatives à la densité ionique dans le canal ionisé, aux phénomènes d'échanges thermiques, ..., Claverie et Porcheron [36, 37] ont établi la condition de réamorçage suivante :

$$u \geq \frac{Kx}{i^n} \quad (\text{III.3})$$

où u est la tension appliquée aux bornes des électrodes, i le courant d'arc et K et n sont des constantes caractéristiques qui peuvent être déterminées à partir de la mesure de courant de fuite sous différentes tensions d'essais.

Avant le réamorçage de l'arc électrique, le courant i étant négligeable. En effet, le terme $R_p i$ est peu différent de zéro.

III. 3. 2. 4. Circuit de propagation

La propagation de l'arc électrique est possible, si le critère d'élongation est rempli. Dans ces conditions, le canal de la décharge sera assimilé à des cellules résistives. Chaque cellule nouvellement créée représentera un nouveau déplacement partiel de l'arc. Cette propagation de la décharge peut être donc représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure (III. 2).

Dans cette figure, R_j , i_j , et u_j représentent respectivement la résistance, le courant et la tension, correspondant à chaque cellule nouvellement créée et R_p la résistance de la partie de la couche de pollution non court-circuitée par l'arc.

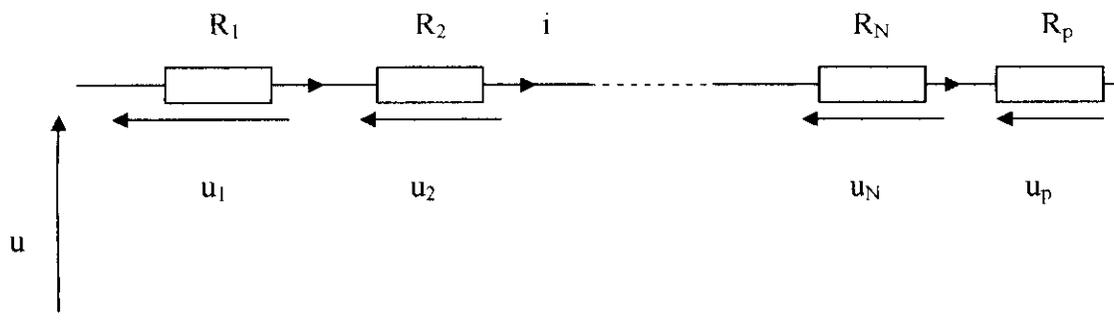


Figure III. 2. Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge

III. 4. PARAMETRES DU CIRCUIT ELECTRIQUE

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 résistivité, sa longueur, son rayon, sa puissance et son énergie.

III. 4. 1. Equation du circuit

En négligeant la chute de tension aux électrodes, environ 800 Volts selon Chung et Nour [35], la tension d'alimentation se trouve répartie entre l'arc et la couche de pollution (Figure III. 3). Dans ces conditions :

$$u = v_{\text{arc}} + R_p i \quad (\text{III.4})$$

avec:

u : la tension instantanée appliquée,

v_{arc} : la tension instantanée au pied de la décharge,

R_p : la résistance de la couche de pollution,

i : le courant de fuite instantané.

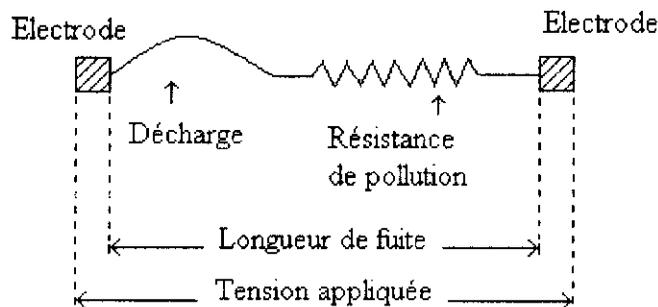


Figure III. 3. Schéma représentatif d'un isolateur partiellement contourné

III. 4. 2. Résistance de la couche de pollution

La connaissance de la résistance de pollution constitue la clef de toute étude statique ou dynamique du phénomène de décharges électriques. Sa détermination est très difficile et dépend de la complexité géométrique de l'isolateur. Dans le but de contourner les profils réels des isolateurs, plusieurs chercheurs [1, 15, 21, 27, 40, 52, 54-58] ont considéré des modèles simples de laboratoire, afin d'aboutir à des formes très simples et exploitables de la résistance de pollution.

Dans notre étude, un isolateur réel est représenté par un modèle plan rectangulaire. La longueur du modèle représente la longueur de fuite totale de l'isolateur. Tandis que sa largeur correspond à la circonférence moyenne de l'isolateur. Ce choix est justifié par le fait que, les caractéristiques de la couche de pollution recouvrant l'isolateur sont les paramètres les plus influents sur le comportement de l'arc électrique.

La représentation de la résistance de pollution, en considérant une pollution uniformément répartie, peut être écrite comme une fonction linéaire de la longueur de fuite [12, 26] :

$$R_p = r_p (L-x) \quad (\text{III.5})$$

avec

r_p : la résistance linéique,

L : la longueur de fuite totale,

x : la longueur instantanée de l'arc.

En se basant sur le modèle de Renyu et Zhicheng [59], Tegar [45] a ramené une structure complexe d'un isolateur pollué à un modèle plan dont la résistance R_p de la pollution peut s'écrire sous la forme suivante :

$$R_p = \frac{1}{\pi \gamma_p} \frac{L-x}{r_{iso}} \quad (\text{III.6})$$

où γ_p la conductivité superficielle de la pollution et r_{iso} le rayon effectif de l'isolateur.

A partir des équation (III.5) et (III.6), la résistance linéique de la pollution peut être formulée par :

$$r_p = \frac{1}{r_{iso} \gamma_p \pi} \quad (\text{III.7})$$

Selon Claverie et Porcheron [36, 37], la résistance de la couche de pollution R_p , en série avec l'arc, dépend de la longueur, de la position, ainsi que de la direction de l'arc. Si, en tous points de la surface polluée, la résistivité ρ de la couche polluante est la même, la fonction caractéristique de répartition de la couche polluante R_p peut être considérée

comme étant le produit de la résistivité ρ par une certaine fonction F_p , dite fonction de répartition de la couche polluante. Cette fonction de répartition F_p dépend des caractéristiques géométriques de la surface isolante, de la répartition de la pollution et de la direction de l'arc le long de cette surface. Ainsi, nous pouvons écrire :

$$R_p = \rho F_p \quad (\text{III.8})$$

ρ : résistivité volumique [Ω/cm],

F_p : fonction de répartition de la résistance

Pour une résistivité ρ donnée et en se basant sur l'étude de Claverie et Porcheron, Tegar [12] a déduit que la tension u , le courant i et la longueur x , sont liés par la relation limite de réamorçage suivante :

$$u i^n = K x \quad (\text{III.9})$$

Cette relation est valable quelles que soient la conductivité et la répartition de la couche polluante.

Les valeurs de la fonction R_p peuvent être déterminées à partir de mesures de courants de fuite. Le système constitué par les équations (III.4) et (III.9), permet de calculer x et R_p à partir de u et i puisque :

$$x = \frac{u i^n}{K} \quad (\text{III.10})$$

$$R_p = \frac{K - 100 u}{K} \frac{1}{i} \quad (\text{III.11})$$

Ainsi, pour déterminer la fonction R_p , il suffira de mesurer le courant de fuite i sous différentes tensions d'essais u . Cette méthode peut être utilisée aussi bien sur site qu'en laboratoire.

Pour tenir compte de la constriction des lignes de courants au niveau des points formants la base de l'arc, Wilkins [18] a supposé que ces points forment des demi cercles aux limites des bandes sèches. Il a obtenu comme expression de R_p pour le cas d'une bande étroite :

$$R_p = \frac{1}{2\pi\gamma} \left[\frac{\pi(L-x)}{a} + \log\left(\frac{a}{2r\pi}\right) \right] \quad (\text{III.12})$$

Dans le cas d'une bande large, R_p aura pour expression :

$$R_p = \frac{1}{2\pi\gamma} \left[\log \frac{2L}{r\pi} \log \tan \frac{x\pi}{2L} \right] \quad (\text{III.13})$$

avec γ , L , x , r et a sont respectivement la conductivité superficielle de pollution, la longueur de fuite totale, la longueur de l'arc, le rayon de l'arc et la largeur de la bande.

En ramenant une structure complexe à un modèle plan, Zhicheng et Renyu [59] ont démontré que la résistance R_p prend la forme suivante :

$$R_p = \frac{1}{\pi\gamma} \ln \frac{L-x}{r} \quad (\text{III.14})$$

III. 4. 3. Le champ dans l'arc et dans la pollution

Le champ dans la pollution et celui au pied de l'arc s'écrivent comme suit :

$$E_p = -\frac{dV_p}{dx} = r_p i \quad (\text{III.15})$$

et

$$E_{\text{arc}} = -\frac{dV_{\text{arc}}}{dx} = -\frac{A}{i^n} \quad (\text{III.16})$$

III. 4. 4. Caractéristiques de l'arc

III. 4. 4. 1. Chute de tension aux bornes de l'arc

L'expression approchée de la chute en tension causée par le canal d'arc est donnée selon Obenaus [2], par l'expression empirique suivante :

$$u_{\text{arc}} = \frac{Ax}{i^n} \quad (\text{III.17})$$

où A et n sont les constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc, x sa longueur et i son courant.

III. 4. 4. 2. Résistance de l'arc

La résistance d'arc est tirée de l'expression de la tension aux bornes de l'arc, et donnée par l'expression empirique suivante :

$$R_{\text{arc}} = \frac{u_{\text{arc}}}{i} = \frac{xA}{i^{n+1}} \quad (\text{III.18})$$

Sachant que la résistance linéique r_{arc} de l'arc peut s'écrire comme suit :

$$r_{\text{arc}} = \frac{R_{\text{arc}}}{x} = \frac{A}{i^{n+1}} \quad (\text{III.19})$$

III. 4. 4. 3. Rayon de l'arc

Le rayon d'arc est un paramètre important dans la vérification des modèles physiques. Cependant, il est nécessaire de définir un diamètre équivalent car les frontières du canal d'arc ne sont pas parfaitement définies.

Une relation entre le rayon r (cm) du pied de l'arc et le courant i dans l'arc est donnée selon Wilkins [18] par :

$$r = \sqrt{\frac{i}{1.45 \pi}} \quad (\text{III.20})$$

III. 4. 4. 4. Résistivité de l'arc

Nous considérons que le canal d'arc est cylindrique de section S ($S = \pi r^2$, r étant le rayon de l'arc), de longueur x et de résistance R_{arc} . Dans ces conditions, la résistivité ρ_{arc} de cet arc peut être donnée par :

$$\rho_{\text{arc}} = \frac{R_{\text{arc}} S}{x} = \frac{R_{\text{arc}} \pi r^2}{x} \quad (\text{III.21})$$

Cette résistivité peut être déterminée en fonction du courant, en substituant dans cette dernière équation, R_{arc} et r par leurs expressions respectives (III.19) et (III.21) :

$$\rho_{\text{arc}} = \frac{A}{1.45 i^n} \quad (\text{III.22})$$

Par ailleurs, en fonction du rayon de l'arc, cette résistivité est donnée par :

$$\rho_{\text{arc}} = \frac{A}{1.45^{n+1} \pi^n r^{2n}} \quad (\text{III.23})$$

III. 4. 3. 5. Puissance dissipée dans l'arc

Lors du développement de l'arc, des pertes en puissance apparaissent et deviennent de plus en plus importantes avec l'augmentation du courant de fuite. Ces pertes sont dangereuses et insupportables par le réseau électrique, si elles sont considérables. Elles sont représentées par l'expression suivante [26]:

$$p_{\text{arc}} = u_{\text{arc}} \cdot i = E_{\text{arc}} \cdot x \cdot i = A \cdot x \cdot i^{n-1}. \quad (\text{III.24})$$

En raison de leur grande mobilité, les électrons cèdent cette puissance aux particules lourdes par collisions, par conduction thermique, par rayonnement, etc.

III. 5. VITESSE DE PROPAGATION

La vitesse de propagation est un facteur très important qui influe directement sur le comportement de la décharge évoluant sur des surfaces isolantes contaminées. Parmi tous les modèles qui ont été établis dans la littérature, peu proposent des relations permettant d'évaluer la vitesse d'élongation de la décharge.

Après avoir supposé que l'allongement de l'arc électrique est lié à la puissance disponible nécessaire à la naissance de la décharge et à l'énergie nécessaire pour l'obtenir, Alston et Zoledziowski [40] ont établi une équation de vitesse qui s'écrit sous la forme suivante :

$$V = \frac{dX}{dt} = \frac{U^2}{\sigma r_p^2 (L - X)^2 Q^2} \quad (\text{III.25})$$

avec, U la tension de la source, σ la conductance de la décharge, Q la densité d'énergie linéique de la décharge, X la longueur de la décharge, L la distance inter-électrodes et r_p la résistance linéique de la pollution.

A l'aide d'une caméra ultra rapide, Al-Baghdadi [60] a pu établir une relation empirique donnant la vitesse (en cm/s) :

$$V = 1.45 r_p^{2.5} (I_c^4 - I^4) 10^{-4} \quad (\text{III.26})$$

où, I est le courant de fuite (en A), I_c le courant critique (en A) et r_p est la résistance linéique de la pollution (en Ω/cm).

Cette dernière expression a été utilisée par Rizk et Nguyen [47] dans leur modèle dynamique.

D'après Sandararajan et Gorur [50] et Anjana et Lakshminarasimha [31], la vitesse de propagation est fonction de la mobilité μ des électrons dans l'arc et du champ électrique E_{arc} au pied de cet arc. Elle aura pour expression :

$$V = \mu E_{arc} \quad (III.27)$$

En partant du principe que l'énergie totale W_{totale} est dépensée sous différentes formes, et qu'une partie de cette énergie est transférée au canal de la décharge sous forme d'énergie cinétique W_{cin} ($W_{cin} = \beta W_{totale}$, $0 < \beta < 1$), lui permettant ainsi de s'allonger de ΔX , Dhahbi [49] a abouti à l'expression suivante de la vitesse de propagation de l'arc :

$$V = \sqrt[3]{\frac{2\beta P}{\rho \pi r^2}} \quad (III.28)$$

β étant la fraction d'énergie nécessaire à la propagation de la décharge, r le rayon de l'arc, ρ la masse volumique du gaz (air) et P : la puissance instantanée injectée dans l'intervalle inter-électrodes.

La vitesse ainsi que le mode de propagation de la décharge électrique sur les surfaces isolantes polluées, dépendent essentiellement du champ électrique au pied de l'arc ainsi que de la mobilité des électrons dans cet arc. C'est pour cette raison que nous avons adopté, dans notre modélisation, $V = \mu E_{arc}$ comme expression de vitesse.

III. 6. TEMPS AU CONTOURNEMENT

Nous définissons le temps total au contournement de l'isolateur comme étant le temps qui s'écoule entre l'instant d'amorçage de l'arc (l'instant où la condition de

réallumage et le critère de propagation sont remplis), et l'instant où le contournement total a lieu.

Plusieurs études déjà faites, comme celle de Ghosh et Chatterjee [33, 61], qui ont montré que l'augmentation de la tension a un effet inverse sur le temps au contournement qui décroît considérablement.

III.7. SIMULATION NUMERIQUE

Dans l'élaboration de notre modèle dynamique, nous avons utilisé le critère de propagation de Hampton [29] en considérant un gradient critique de tension dans la couche de pollution. Nous avons aussi supposé que le canal d'arc est cylindrique et sa résistance est déduite de l'expression empirique de Obenaus [2] donnant la tension aux bornes de ce canal. En s'inspirant des travaux effectués par Rahal [28, 52] et Mahi [62], nous avons considéré que le contournement a lieu durant la première alternance de la tension sinusoïdale.

Dans cette simulation, nous introduisant en premier lieu les données du système d'isolation à savoir la conductivité γ_p de la couche de pollution, la longueur de fuite totale de l'isolateur L , le rayon effectif de l'isolateur r_{iso} ou sa largeur z suivant le type d'isolateur considéré, ainsi que la mobilité des électrons dans l'arc μ , la valeur initiale maximale de la tension appliquée U , le pas d'incrément de la tension dU et le pas d'incrément de temps dt .

En second lieu, nous initialisons le temps ($t_0 = 0$). Nous considérons à cet instant que la décharge électrique est de type couronne et de longueur x_0 . A partir de ces données initiales, nous pouvons calculer tous les paramètres du circuit électrique équivalent, à savoir la résistance de la pollution R_p , la tension aux bornes de l'arc v_{arc} , le courant de fuite i , la résistance d'arc R_{arc} , la puissance dans l'arc p_{arc} , le rayon de l'arc r et enfin la vitesse de propagation de la décharge V .

Par la suite, nous testons le critère de propagation ($E_p > E_{arc}$). Si ce critère n'est pas vérifié, il faut augmenter la tension U et reprendre les calculs précédents. Par contre, si le

critère est vérifié, il y a propagation et il faudra alors recalculer tous les paramètres précédents à partir des nouvelles valeurs de la longueur de la décharge ($x = x + V dt$) et du temps ($t = t + dt$).

Dans le cas où le critère de propagation est vérifié, le contournement total de l'isolateur a lieu seulement si la longueur de la décharge est supérieur ou égale au critère d'arrêt ($x = 0.9 L$) [49]. Dans le cas contraire, les calculs précédents sont repris depuis le début..

Il est à noter qu'après chaque incrémentation du temps, il faut tester le temps de propagation. Si ce temps est supérieur à la durée d'une alternance de la tension sinusoïdale ($t_p - 10ms$), il faudra alors incrémenter la tension et reprendre les calculs depuis le début ; sinon, il n'y aura pas de changement dans le déroulement du programme.

Dans ce qui suit, nous présentant l'algorithme de simulation illustrant les étapes à suivre dans le calcul des différents paramètres d'une décharge électrique sur un isolateur pollué (Figure III. 4) :

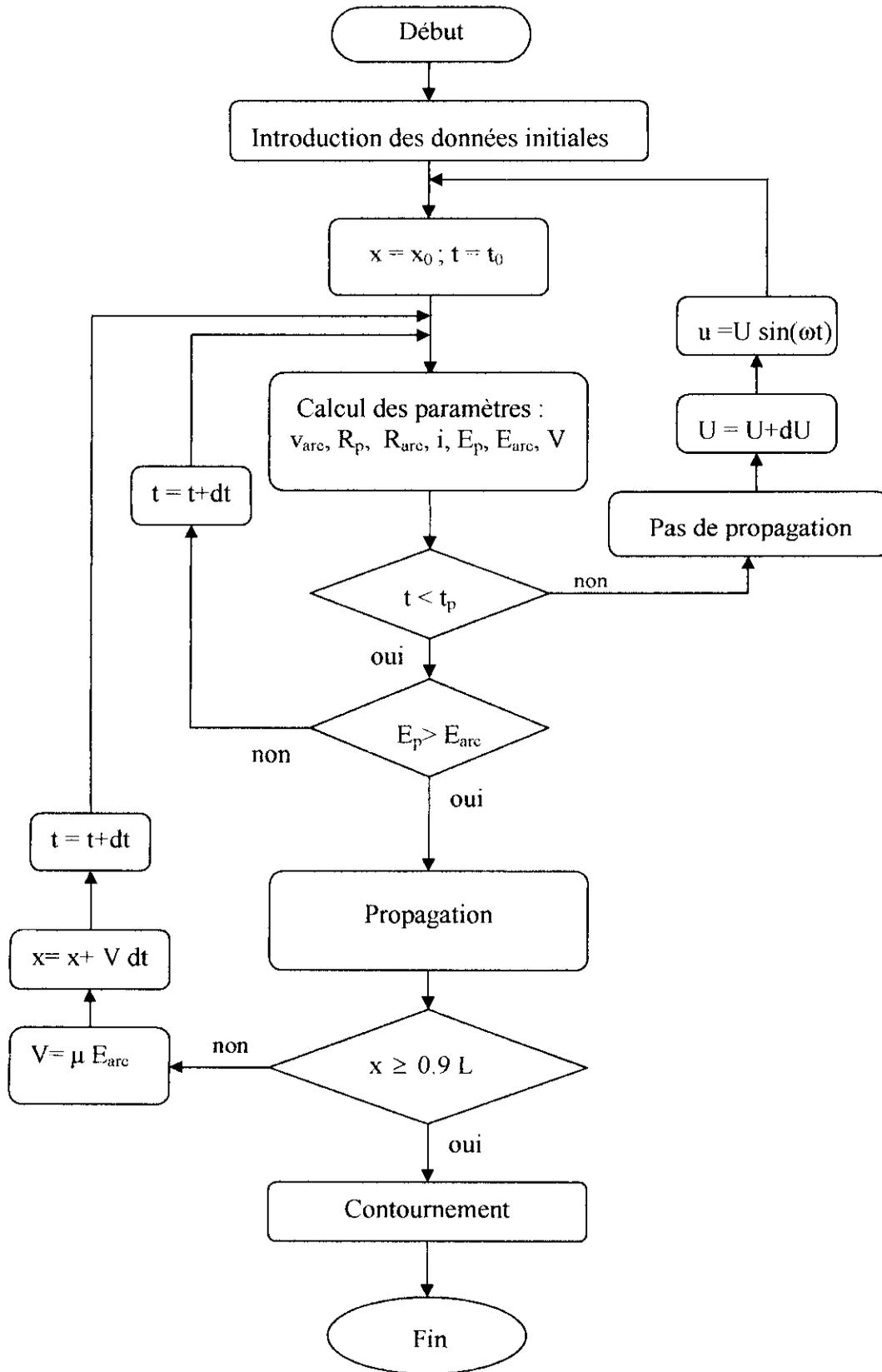


Figure III. 4. Algorithme de simulation

III. 8. LIMITES DU PROGRAMMES

Dans la modélisation que nous avons effectuée, certains facteurs intervenant dans la propagation des décharges électriques n'ont pas été pris en compte, entre autres :

III. 8. 1. Influence des paramètres de la source

A partir des résultats des simulations et des expériences, Rizk [46] a montré qu'une chute de tension maximale aux électrodes est incapable toute seule d'expliquer l'erreur sur la tension critique due aux paramètres de la source. Il a montré que l'erreur de mesure de la tension critique due aux paramètres tests de la source, peut être déterminée par un rapport adimensionnel de deux charges, l'une caractérisant la capacité de sortie de la source, et l'autre l'isolateur test et la sévérité de pollution.

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

Du point de vue électrique, Pissalto [63] a analysé l'influence de la source et a montré que cette dernière joue un rôle important dans la propagation de la décharge.

III. 8. 2. Formation d'arcs multiples

Les observations montrent que pendant la propagation de l'arc, d'autres décharges peuvent également s'amorcer. Comme la source doit fournir plus de courant pour maintenir ces arcs additionnels aux conditions critiques, la tension sera plus grande que celle d'un arc singulier.

Danis [1] a constaté expérimentalement que plusieurs arcs peuvent se développer en parallèle aux premiers stades du processus. Ces arcs disparaissent au fur et à mesure que le courant augmente, de telle sorte qu'un seul arc dominant persiste et se développe, en phase finale, à travers la zone polluée (humide).

Une même constatation a été faite par Rizk [26], lorsqu'il a considéré qu'il existe m arcs en série et m_d bandes sèches. Au début, le nombre d'arcs est égale au nombre de bandes sèches et au fur et à mesure que les arcs avancent sur le chemin de fuite, leur nombre se réduit graduellement de telle façon qu'au contournement, il n'y aura qu'un seul arc. Durant le processus de propagation, Rizk suppose qu'en parcourant une distance dx , le nombre d'arc se réduit de dm proportionnellement à m et à dx ; une fois l'équation différentielle résolue, il a obtenu la relation suivante :

$$m = m_d \frac{L-x}{L} \quad (\text{III.29})$$

Avec

L : La longueur de fuite totale.

x : La largeur de la décharge.

III. 8. 3. Couche de pollution non-uniforme

La couche de pollution qui se dépose sur l'isolateur est loin d'être uniforme. Cependant, on ignore la forme ou la nature de cette non-linéarité car c'est un phénomène très aléatoire dans la nature. Les travaux effectués antérieurement [21, 22, 64], montrent que le cas de pollution uniforme semble être plus critique d'où la justification de l'hypothèse d'une pollution uniforme pour faciliter les calculs. Ce problème a été traité par plusieurs chercheurs qui généralement attribuent des résistivités différentes à chaque zone de l'isolateur.

Pour tenir compte de la non-uniformité de la couche de pollution dans leur modèle, Sundararajan et Gorur [50] ont partagé le profil de l'isolateur en plusieurs zones et ont attribué un ESDD (dépôt de densité de sel équivalent) différent pour chaque zone. Ils ont trouvé que la tension de contournement dans ce cas est légèrement supérieure à celle correspondant à une pollution uniforme dont le ESDD est le même sur toute la surface de l'isolateur.

En utilisant le même principe, Anjana et Lakshminarasimha [31] ont abouti aux mêmes conclusions.

A partir des expériences en pollution artificielle, Matsuo [54] ont trouvé que le degré de non-uniformité des couches polluantes est étroitement lié aux caractéristiques de la résistance surfacique et à leur variation en fonction du temps.

III. 8. 4. Influence de l'effet thermique

Cet effet se traduit par la formation de bandes sèches et par l'augmentation de la conductivité de la pollution.

III. 8. 4. 1. Formation de bande sèche

Le problème de la formation de bandes sèches a été traité, par différents chercheurs.

En se basant sur certaines considérations, Gellert et Rasmussen [65] ont modélisé la formation de bandes sèches par éléments finis en considérant la relation entre la formation de la buée, la tension et la distribution de la température dans la couche de pollution. Ces deux auteurs ont trouvé un accord qualitatif avec les résultats expérimentaux. En effet, cette modélisation mérite d'être exploitée.

III. 8. 4. 2. Augmentation de la conductivité de la pollution

Notre modèle ainsi que les modèles dynamiques rapportés dans la littérature considèrent que la conductivité de la couche polluante est la même en tout point de la surface polluée (pollution uniforme) et ne change pas lors du processus du contournement.

Cependant, Zhicheng et Renyu [59] ont justifié leurs fortes valeurs numériques (obtenus par leur modèle statique) relativement à celles expérimentales, par le fait que la conductivité dans les conditions critiques du contournement, est de l'ordre de 125 % plus grande que celle initiale.

Quant à Wilkins et Al-Baghdadi [27], ils ont constaté que lorsqu'il y a circulation d'un courant, la conductivité du nouveau trajet du courant augmente avec celui-ci, tandis que celle du trajet précédent reste constante.

III. 8. 5. Autres paramètres

Dans le but d'expliquer plus rationnellement les phénomènes d'amorçage et de propagation des décharges électriques sur des isolateurs pollués, il faut connaître plus profondément la physique de la décharge, du plasma, des processus d'échauffement de la couche électrolytique, de l'ionisation de l'espace résiduel, etc.

III. 9. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons mis au point un modèle dynamique. Ce dernier est basé sur un circuit électrique et utilisant un critère de propagation et une condition de réamorçage de la décharge électrique. Tenant compte de la géométrie de l'isolateur, ce modèle permet de calculer la tension de contournement et le temps au contournement ainsi que de suivre l'évolution temporelle et spatiale des différents paramètres caractérisant l'état critique des surfaces isolantes polluées. L'exploitation de l'algorithme que nous avons élaboré ainsi que la validation de ses résultats seront l'objet du chapitre suivant.

IV. 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 [53].

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 [66], il faut distinguer trois cas dans le mécanisme de contournement :

- Contournement immédiat à résistivité de la couche de pollution quasiment constante, nécessitant une seule alternance. Dans ce cas, Rahal suppose que les phénomènes ne seront pas fondamentalement différents à ce qu'ils étaient sous tension continue.
- Contournement consécutif à un abaissement de la résistivité de la couche de pollution, alors même que 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 qui suit, nous allons considérer le cas où la tension appliquée est suffisante pour conduire à un contournement.

Dans son étude sur les mécanismes physiques du contournement des isolateurs haute tension, Rahal [66] a traité qualitativement le contournement en alternatif. Ces observations lui ont permis de supposer que le processus de contournement se fait

toujours dans une seule alternance, même si le processus de préparation consistant par exemple à un échauffement progressif de la couche de l'électrolyte, nécessite plusieurs alternances.

Dans une étude expérimentale sur la propagation sur une surface faiblement conductrice, Mahi [62] a observé que le contournement au voisinage de la tension critique, dure plusieurs périodes et se termine toujours pendant l'alternance positive.

En s'inspirant de ces travaux, nous nous sommes proposés de calculer la tension critique la plus basse qui permet d'avoir un contournement sur une seule alternance (positive).

Dans ce chapitre, nous allons valider notre modèle en tension alternative, en se basant sur les résultats obtenus par le modèle statique de Tegar [12] et le modèle dynamique de Dhahbi [53]. Nous ferons aussi des applications dans le cas d'une pollution forte et légère, pour montrer les évolutions temporelles et spatiales des différents paramètres caractérisant le développement des décharges électriques sur des surfaces isolantes polluées.

IV. 2. VALIDATION

La validation est effectuée en comparant la tension de contournement et le courant critique estimés par notre modèle dynamique à ceux obtenus par d'autres chercheurs (Tegar [12] et Dhahbi [53]). Pour cela, nous allons considérer la même géométrie de l'isolateur ainsi que les mêmes contraintes auxquelles est soumis cet isolateur, supposées par ces chercheurs.

IV. 2. 1. Validation basée sur le modèle statique de Tegar

En tension alternative, Tegar [12] a proposé un modèle statique permettant de calculer la fonction de répartition de la résistance de la pollution, la tension appliquée et le courant de fuite en fonction de la longueur de la décharge ainsi que la tension et le courant

critiques pour différentes résistivités de la couche de pollution (25, 50, 100, 200 et 400 Ω .cm).

L'isolateur considéré est de type rectangulaire plan, ayant une longueur de fuite totale de 34 cm et de 46 cm largeur (Figure IV.1).

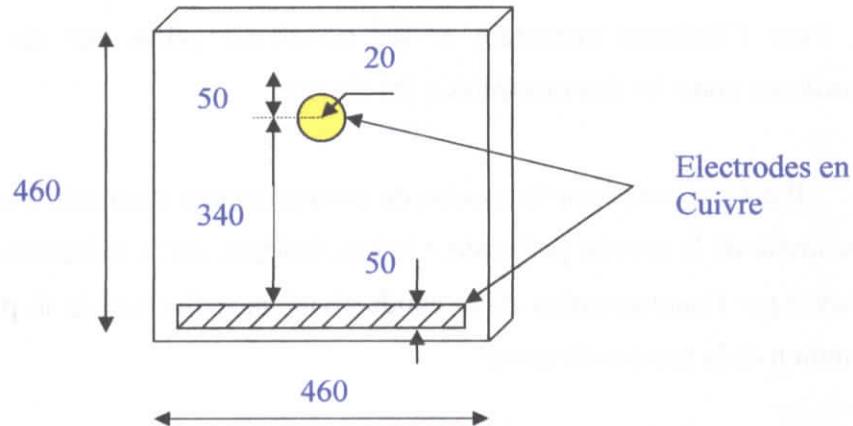


Figure IV. 1. Modèle d'étude de Tegar

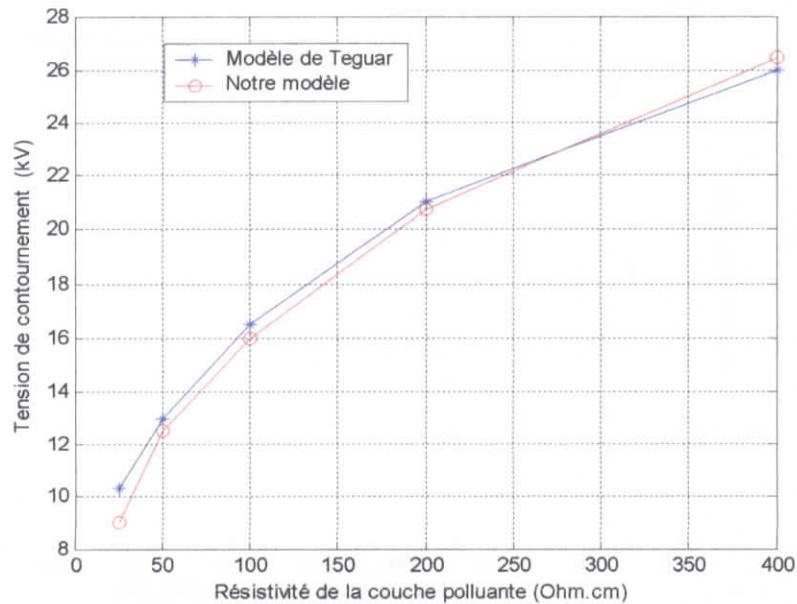


Figure IV. 2. Tension de contournement en fonction de la résistivité de la pollution

Pour valider ce modèle, nous avons utilisé l'expression de la résistance donnée par la relation (III. 11) ainsi que le champ critique dans la pollution :

$$E_{p_c} = (-1)A^{\frac{1}{n+1}} \left[\rho \frac{dF(x)}{dx} \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{IV. 1})$$

La figure (IV. 2) illustre la variation de la tension de contournement en fonction de la résistivité de la pollution obtenue par notre modèle ainsi que celle trouvée par Tegar [12]. Pour l'isolateur considéré et les résistivités prises par cet auteur, une bonne concordance entre les deux modèles a été obtenue.

Il est à signaler que la tension de contournement augmente avec l'augmentation de la résistivité de la couche polluante. Ceci est évident, car la réduction de la résistivité (qui se traduit par l'augmentation de la conductivité superficielle) de la pollution engendre la diminution de la tension de tenue.

Pour le même isolateur considéré, notre caractéristique concernant le courant de fuite critique en fonction de la résistivité de la pollution ainsi que celle obtenue par Tegar [12] sont représentées sur la figure (IV. 3).

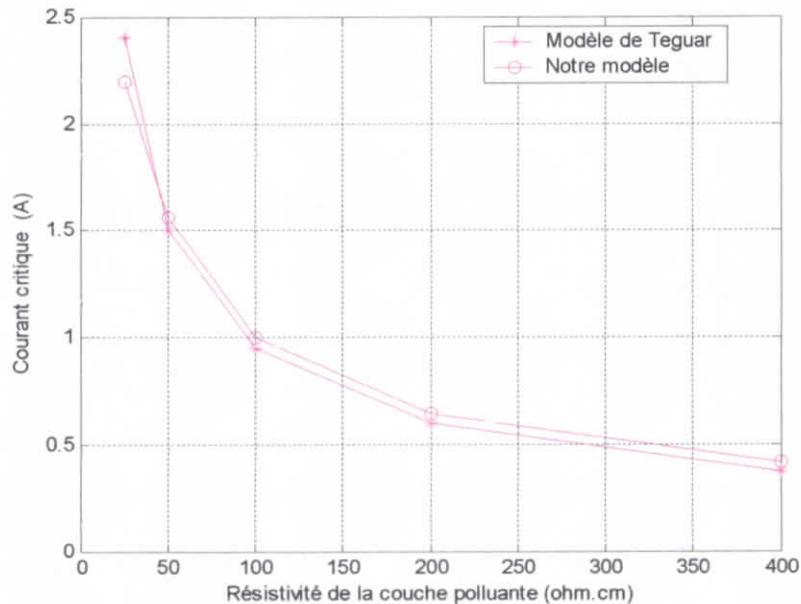


Figure IV. 3. Courant de fuite en fonction de la résistivité de la pollution

Le courant de fuite critique diminue avec l'augmentation de la résistivité. En général, notre modèle présente des courants légèrement supérieurs à ceux obtenus par le modèle statique de Tegar [12].

Notons que les constantes caractéristiques A et n permettant d'obtenir ces résultats sont, dans notre cas, égales à 340 et 0.5 respectivement.

IV. 2. 2. Validation basée sur le modèle dynamique de Dhahbi

Dhahbi [53] a élaborée un modèle dynamique de contournement sous tension alternative. Pour une conductivité donnée, son modèle lui a permis de tracer l'évolution temporelle de tous les paramètres régissant la propagation de la décharge électrique. L'isolateur considéré par Dhahbi est cylindrique de longueur de fuite totale de 50cm, de rayon 5cm et une conductivité de $50\mu\text{S}$. Dans ce qui suit, nous présentons les différentes caractéristiques obtenues par notre modèle et celui de Dhahbi, consistant en les variations temporelles de la tension appliquée, du courant de fuite et du rayon de la décharge (Figures IV. 4 à IV. 6).

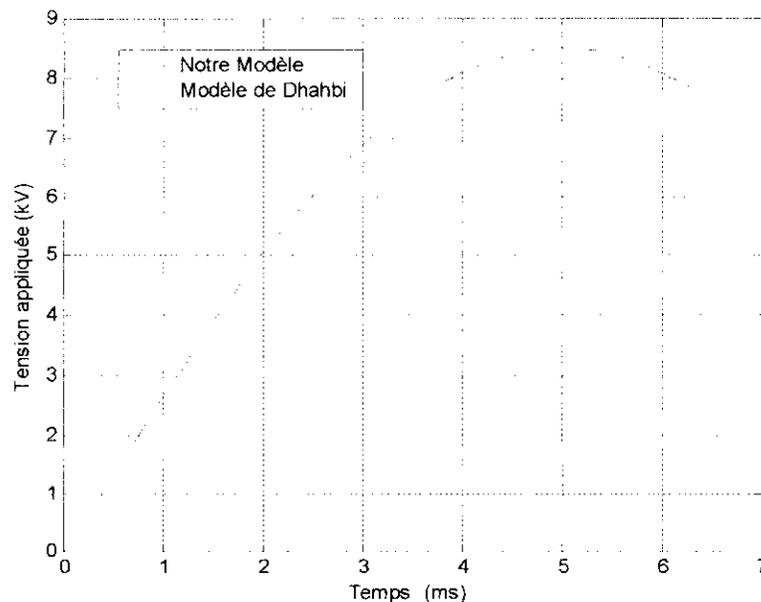


Figure IV. 4. Tension appliquée en fonction du temps

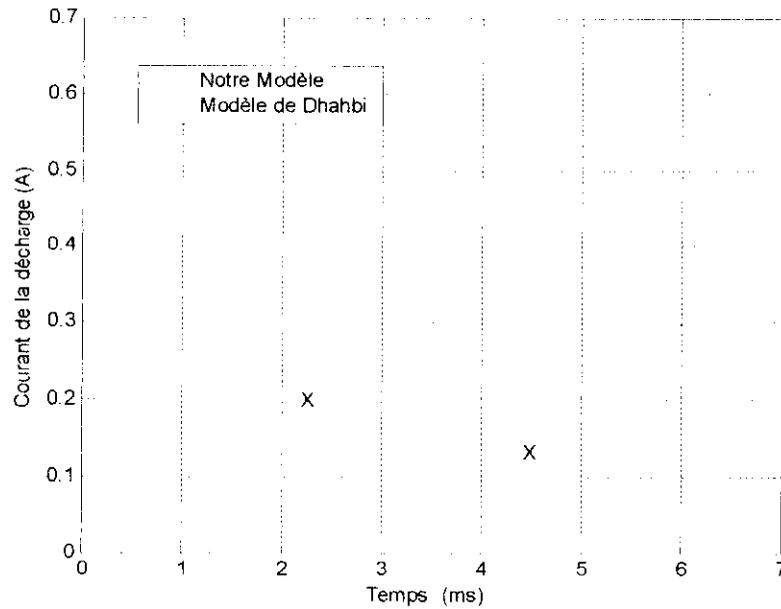


Figure IV. 5. Courant de fuite en fonction du temps

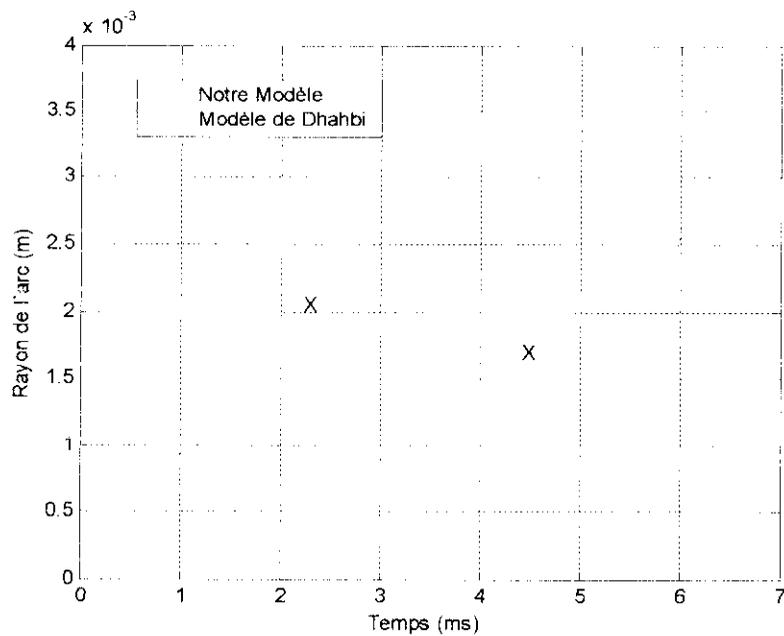


Figure IV. 6. Rayon de la décharge en fonction du temps

Le temps correspondant aux croix apparaissant sur les deux dernières figures, représente l'instant d'amorçage de la décharge électrique pour chaque cas considéré.

Pour valider ce modèle, nous avons utilisé l'expression de la résistance donnée par la relation (III. 5) ainsi que le champ critique dans la pollution :

$$E_p = A^{1+n} \Gamma_p^n \quad (IV. 2)$$

Afin de pouvoir comparer et d'avoir par conséquent, une caractéristique conforme en allure à celle présentée par Dhahbi [53], il nous a fallu prendre une mobilité exagérée de $140\text{cm}^2/\text{Vs}$. Dans la pratique, les mobilités des électrons dans l'arc sont beaucoup plus faibles à celle-la [45]. En outre, la diminution de la mobilité engendre l'augmentation du temps de contournement. Il est à noter que les constantes caractéristiques A et n ont été choisies respectivement égales à 60 et 0.5.

Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre les deux modèles. En effet, les valeurs critiques des différents paramètres représentées sont pratiquement les mêmes. Les temps de propagation et de contournement, obtenus par ces deux modèles, sont très proches. Cependant, notre modèle présente un temps de préparation de l'arc pour qu'il se propage relativement important à celui de Dhahbi. Ceci est dû au fait que la vitesse estimée par Dhahbi (III. 27) est trop importante par rapport à la notre et à celles obtenues par d'autres chercheurs [63, 66]. Par ailleurs, nous remarquons que les temps de propagation sont très proches et sont d'environ 2 ms pour les deux cas considérés.

IV. 3. APPLICATION

La dynamique de l'arc électrique est décrite en tenant compte des évolutions temporelle (dans le temps) et l'évolution spatiale (suivant la longueur d'arc), des différents paramètres régissant le comportement d'un isolateur pollué, sur lequel une décharge se développe jusqu'à provoquer le contournement total. L'isolateur considéré est cylindrique de longueur de fuite 50cm et de diamètre 10cm, sur lequel s'est déposé un dépôt polluant de conductivité superficielle variant de 10 à 60 μS . En outre, nous avons considéré une mobilité de $140\text{cm}^2/\text{Vs}$, permettant l'obtention de résultats comparables à ceux de Dahbi.

IV. 3. 1. 2. Longueur de la décharge

L'évolution de la décharge dans le temps se fait d'une manière régulière dès que les critères de propagation et de réamorçage sont vérifiés, comme le montre la figure (IV. 10). Notons que plus la conductivité est importante, moins vite l'arc se déplace. En effet, l'augmentation de la conductivité engendre l'accroissement de la phase de propagation. Cette figure montre bien l'instant où la décharge commence à s'allonger. Il est estimé à $t = 4,4$ ms et reste pratiquement le même pour les trois conductivités superficielles.

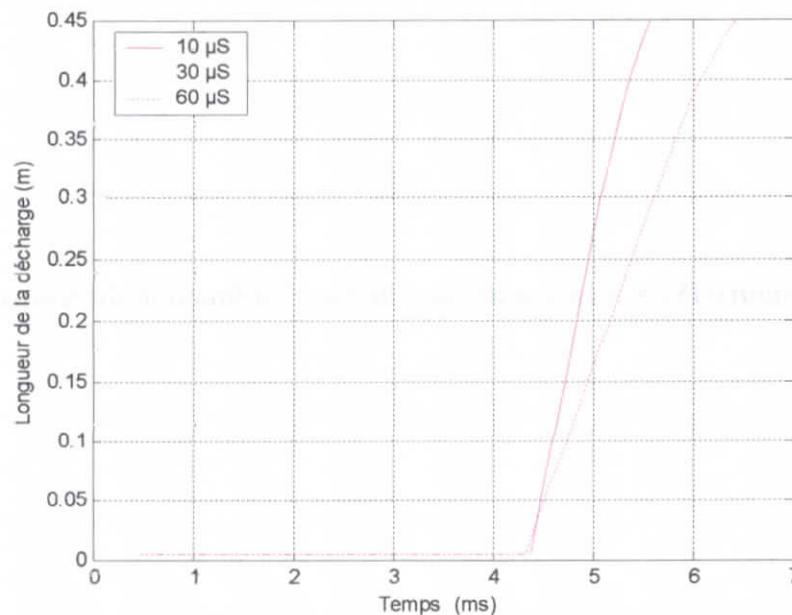


Figure IV. 10. Longueur de la décharge en fonction du temps

IV. 3. 1. 3. Courant de fuite

Les caractéristiques de la figure (IV. 11), donnant le courant en fonction du temps, montrent qu'avant l'amorçage et donc avant l'allongement de l'arc électrique, le courant de fuite suit la tension appliquée et varie de façon sinusoïdale. Durant la phase de propagation, ce courant augmente très lentement. Cette croissance est suivie d'une

augmentation brutale correspondante à la phase de contournement. Nous constatons également que plus la pollution est accentuée (donc plus la conductivité est grande), plus les courants sont importants.

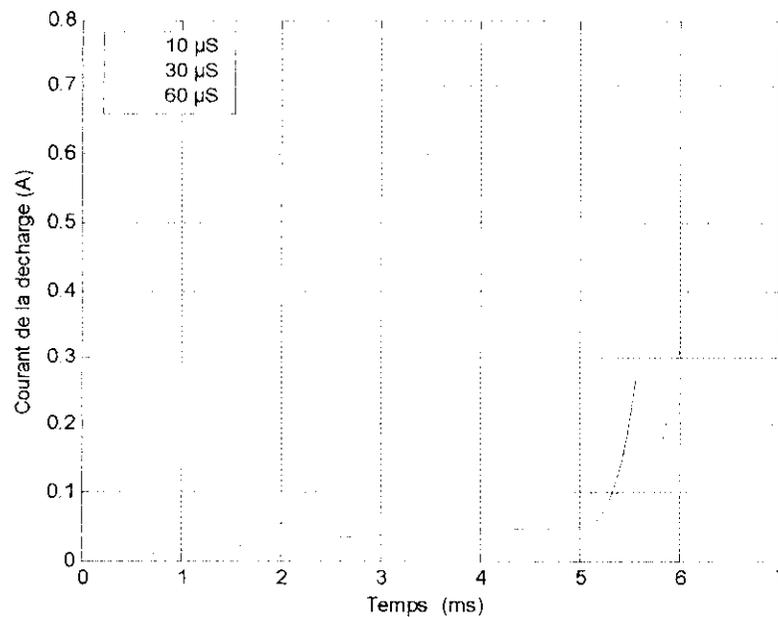


Figure IV. 11. Courant de fuite en fonction du temps

IV. 3. 1. 4. Résistance de la couche polluante

La résistance de la couche polluante non court-circuitée par l'arc est constante avant la propagation. Dès la vérification des critères de réamorçage et de propagation, cette résistance commence à décroître dans le temps (Figure IV. 12). Ce qui est en parfait accord avec l'élongation de l'arc. D'autre part et comme cette résistance est inversement proportionnelle à la conductivité, l'augmentation de cette dernière provoque la diminution de la résistance de la couche polluante.

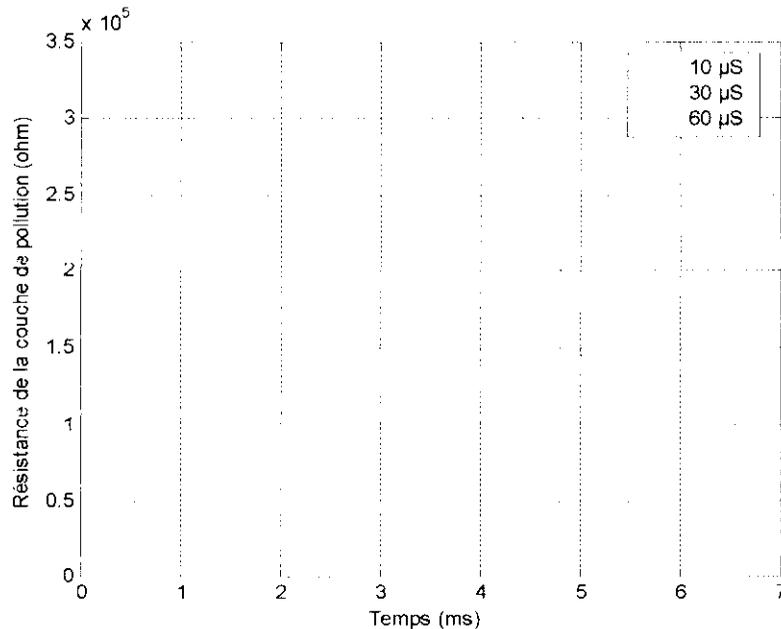


Figure IV. 12. Résistance de la couche de pollution en fonction du temps

IV. 3. 1. 5. Résistance de l'arc

Les caractéristiques illustrant la variation de la résistance de l'arc, en fonction du temps sont présentées à la figure (IV. 12), 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. Par ailleurs, il est tout à fait évident que la résistance de l'arc décroît avec l'augmentation de la conductivité de la pollution.

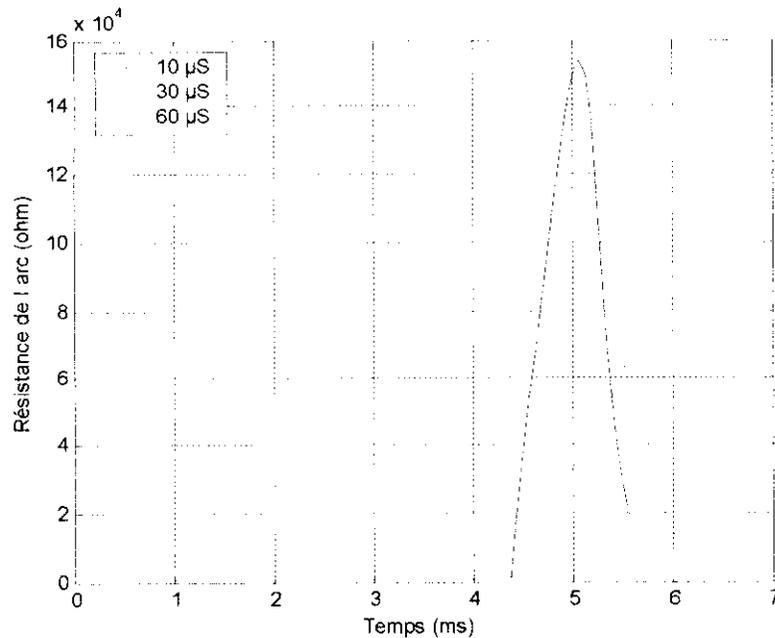


Figure IV. 13. Résistance de l'arc en fonction du temps

IV. 3. 1. 6. Rayon de la décharge

La figure (IV. 14) montre la variation du rayon de la décharge en fonction du temps, pour différentes conductivités. Comme le rayon du pied de l'arc est calculé à partir du modèle de Wilkins [18], son allure est similaire à celle du courant de fuite. En effet, le rayon de la décharge augmente au cours du temps. Cependant, cette augmentation est très faible durant la phase de propagation. A partir d'un certain temps, le rayon de la décharge croît assez brutalement pour atteindre une taille plus ou moins importante. C'est la phase d'augmentation rapide du courant dans l'arc. Cette caractéristique présente, par conséquent, un coude. Ce dernier exprime la fin de la phase de propagation due à l'affaiblissement de la résistance de la couche polluée. Par ailleurs, ce rayon augmente, tout comme le courant, avec la conductivité de la pollution.

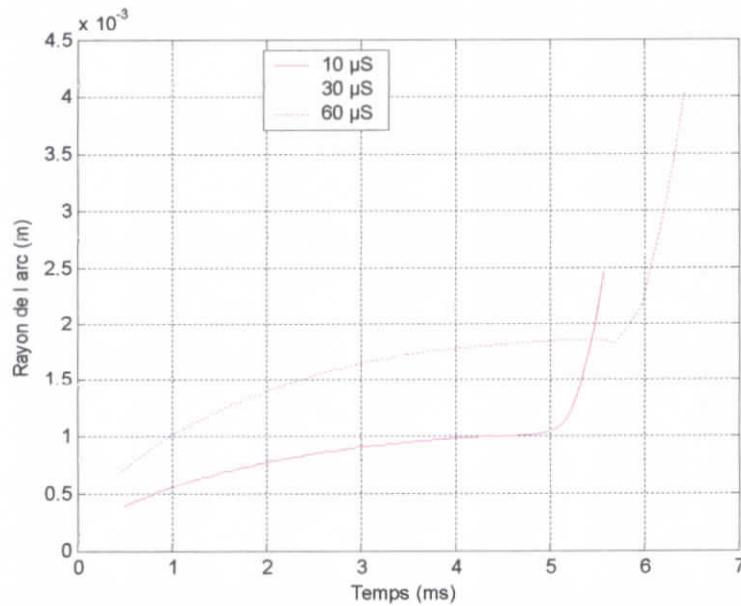


Figure IV. 14. Rayon de l'arc en fonction du temps

IV. 3. 1. 7. Puissance transférée dans l'arc

La puissance transférée dans la décharge électrique (Figure IV. 15) possède une allure identique à celle du courant de fuite. Elle augmente, par conséquent, lentement durant la phase de propagation et rapidement durant celle de contournement.

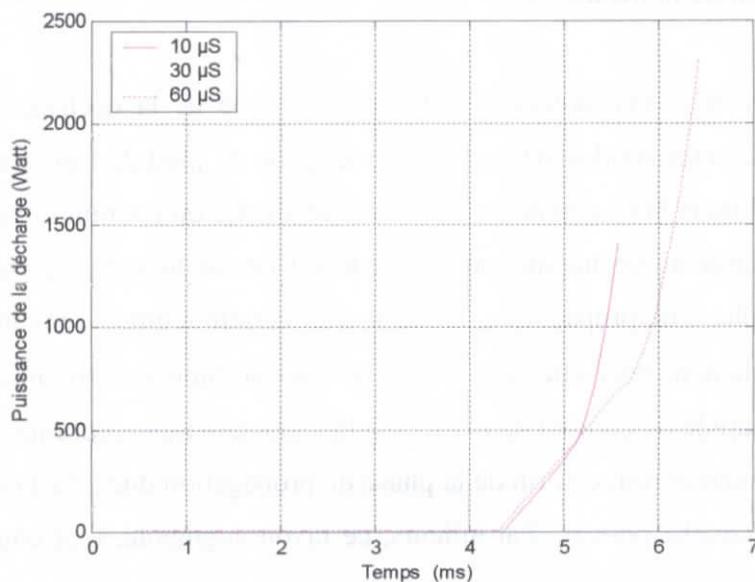


Figure IV. 15. Puissance dissipée dans l'arc en fonction du temps

IV. 3. 1. 8. Puissance délivrée par la source

La figure (IV. 16) représente la variation de la puissance fournie par la source en fonction du temps. L'allure de cette dernière est très proche de celle du courant de fuite. Cela peut s'expliquer par le fait que la tension appliquée varie de façon sinusoïdale imposée par la source, et que le courant soit sujet à des variations qui influent directement sur la puissance de la source.

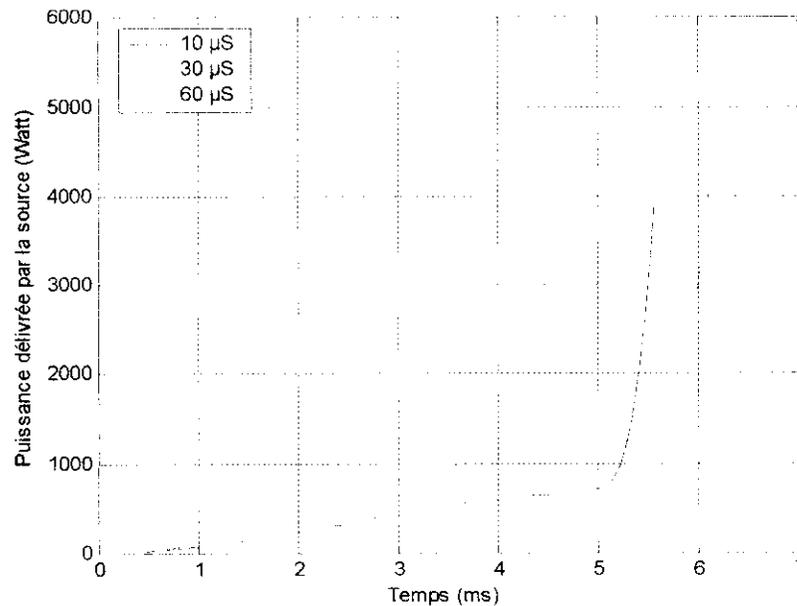


Figure IV. 16. Puissance délivrée par la source en fonction du temps

IV. 3. 1. 9. Champs au pied de l'arc et dans la pollution

Les figures (IV. 17) et (IV. 18) présentent les évolutions des champs au pied de la décharge et dans la pollution en fonction du temps, pour différentes conductivités. A l'instant où les critères de réamorçage et de propagation sont vérifiés, le champ dans la couche polluante devient supérieur à celui au pied de la décharge. Ce dernier champ diminue au cours du temps. Cette diminution est plus accentuée durant la phase du contournement. L'intersection entre le champ au pied de l'arc et celui dans la pollution représente en fait l'instant de propagation de la décharge.

Notons que l'augmentation de la conductivité engendre la diminution de ces deux champs électriques.

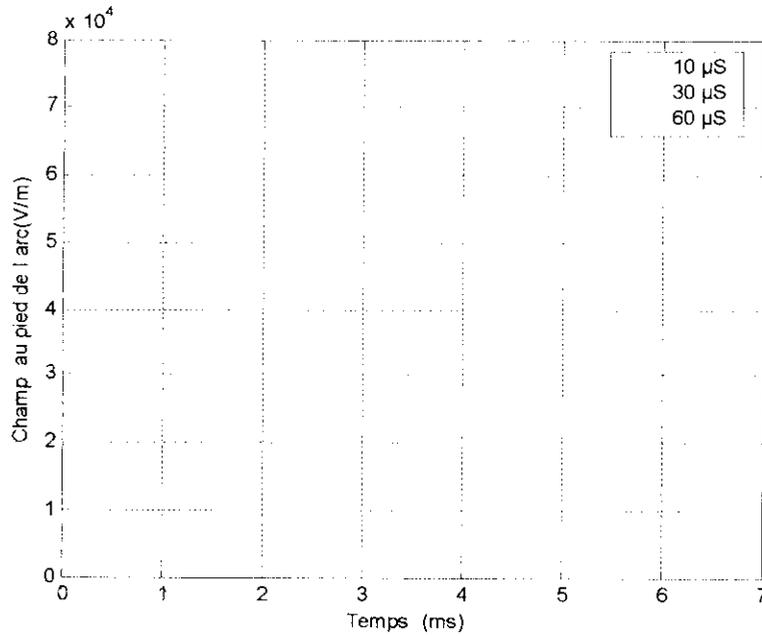


Figure IV. 17. Champ à la tête d'arc en fonction du temps

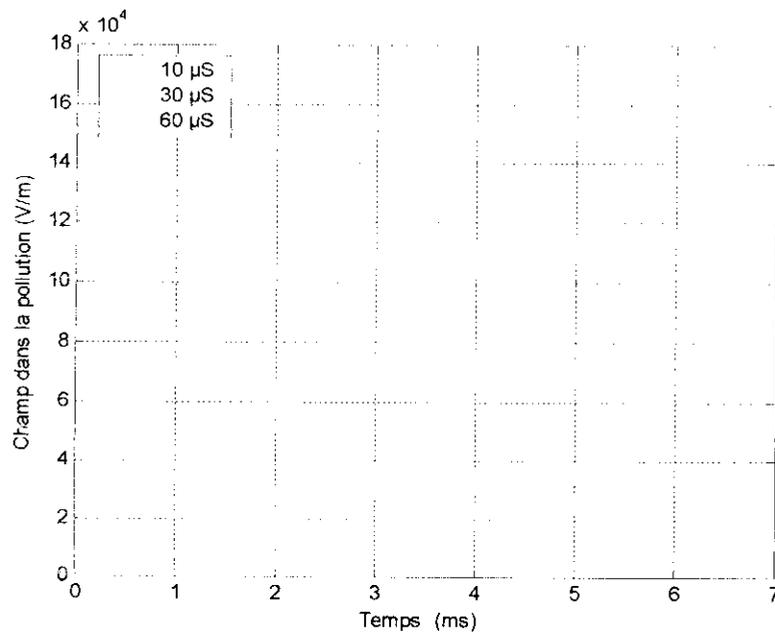


Figure IV. 18. Champ dans la couche de pollution en fonction du temps

IV. 3. 1. 10. Vitesse de propagation

Pour une mobilité donnée des électrons, et une fois les critères de propagation et de réamorçage vérifiés, la vitesse d'élongation de la décharge électrique diminue au cours du temps, comme le montre la figure (IV. 19). Ceci est expliqué par la diminution du champ au pied de cette décharge auquel la vitesse est proportionnelle. L'allure de la vitesse de propagation présente en fait deux parties. Une première à décroissance plus au moins rapide, suivie d'une deuxième à diminution brusque correspondante à la fin de la phase de propagation. D'autre part, l'augmentation de la conductivité entraîne la diminution de la vitesse de propagation.

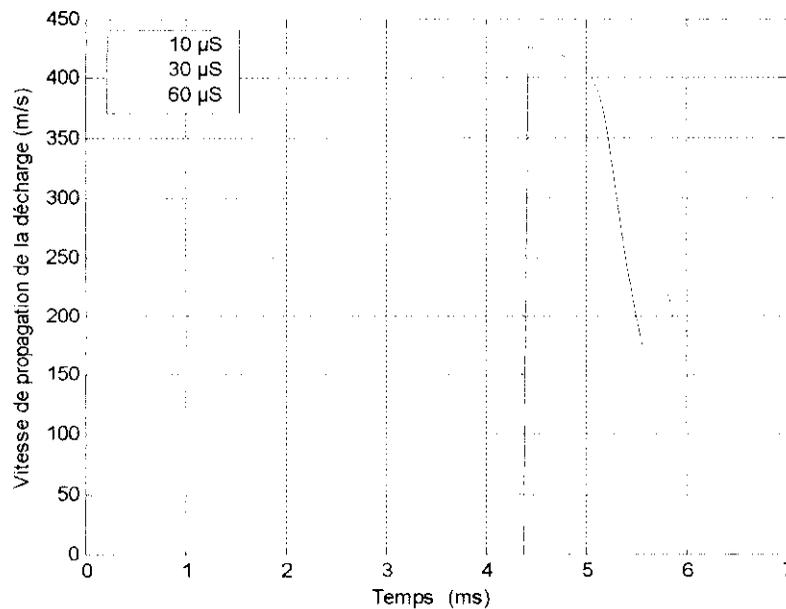


Figure IV. 19. Vitesse de propagation de la décharge

IV. 3. 1. 11. Temps au contournement

La figure (IV. 20) montre que le temps au contournement augmente avec la conductivité de couches polluantes. Ceci est expliqué par le fait que lorsque la pollution est légère (faible conductivité), le contournement se produit directement sans apparition d'arcs partiels. Ce processus a pour effet de réduire le temps au contournement. Par contre, lorsque la conductivité est telle que des décharges prenant naissance, se développent jusqu'à provoquer le contournement, le temps de cette élongation sera important.

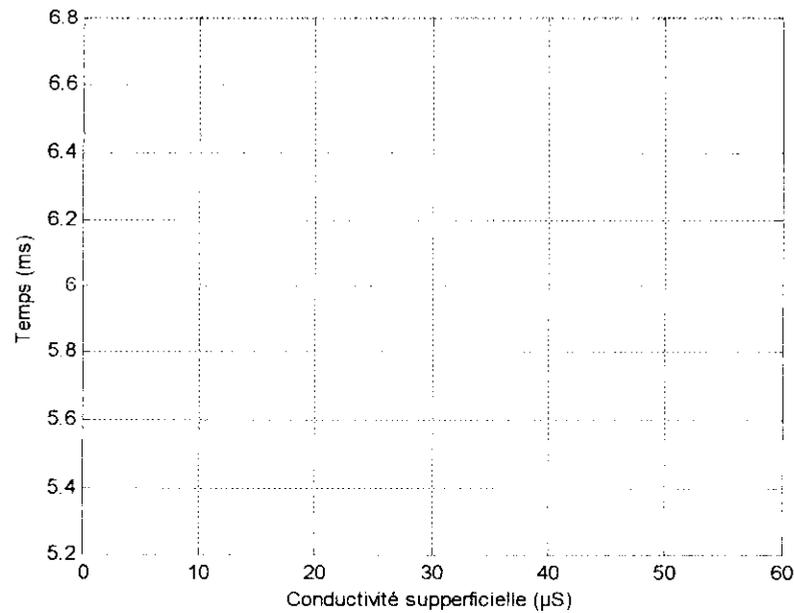


Figure IV. 20. Temps au contournement en fonction de la conductivité de la pollution

IV. 3. 2. Evolution spatiale

Etant donné que la longueur de la décharge augmente de façon continue au cours du temps, les caractéristiques des différents paramètres régissant l'arc électrique conservent leurs mêmes allures en fonction de la longueur de la décharge, qu'en fonction du temps.

A titre d'exemple, les caractéristiques des figures VI. 21 à IV. 23 présentent deux phases de variation correspondant à la propagation et au contournement. La limite entre ces deux phases est obtenue pour une longueur de l'arc électrique estimée à deux tiers de la longueur de fuite totale de l'isolateur. Cette longueur représente la longueur critique de l'arc électrique. Ce résultat, indépendant de la conductivité de la couche polluante, concorde avec de celui obtenu par Dhahbi [53]. Par ailleurs, la longueur critique de l'arc a été évaluée expérimentalement par Mekhaldi [16] et Namane [56] au tiers de la ligne de fuite totale. Cette différence dans l'évaluation de la longueur critique de l'arc peut être justifié par le choix du modèle ainsi que le mode d'application de la pollution.

Le fait que la longueur critique de l'arc est proportionnelle à la longueur de fuite totale de l'isolateur, l'augmentation de la distance inter-électrodes engendre la croissance de la phase de propagation. Ainsi le temps au contournement augmente.

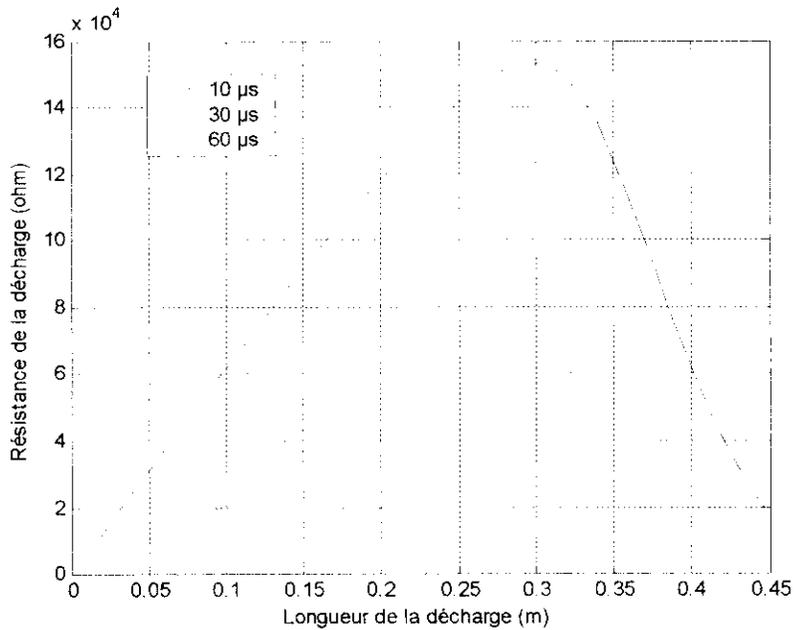


Figure IV. 21. Résistance de la décharge en fonction de la longueur de l'arc

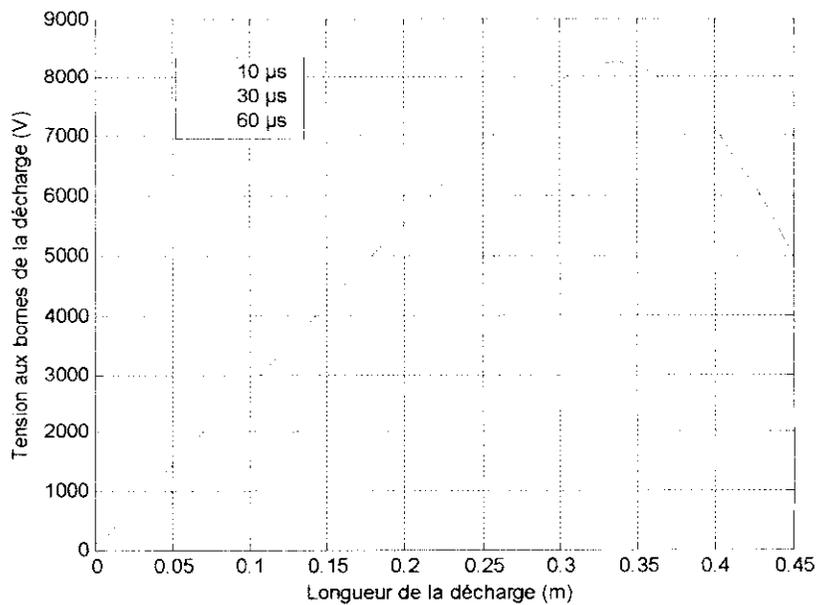


Figure IV. 22. Tension aux bornes de la décharge en fonction de la longueur de l'arc

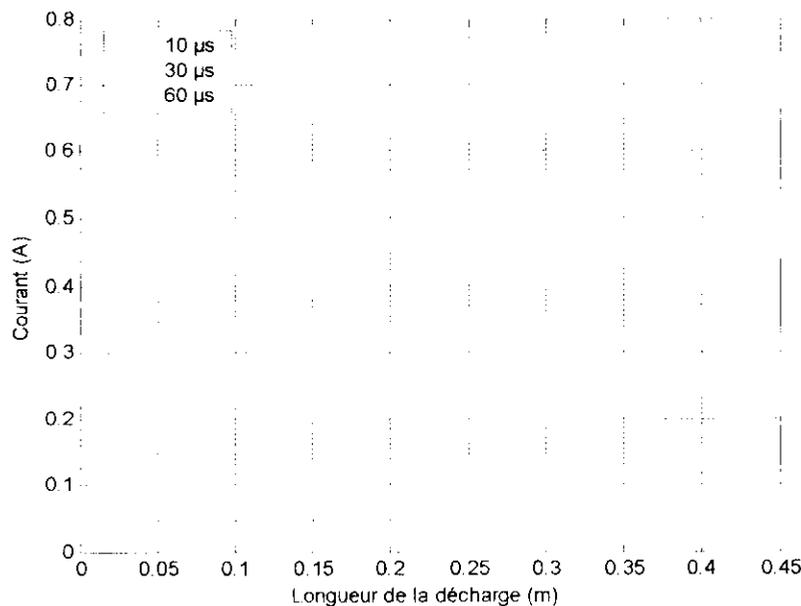


Figure IV. 23. Courant de fuite en fonction de la longueur de la décharge

IV. 4. CONCLUSION

L'étude du phénomène de contournement sous tension alternative, pose le problème du réamorçage de l'arc après extinction, suite au passage par zéro du courant. L'hypothèse du contournement qui peut avoir lieu sur une seule alternance, donne des résultats de simulation satisfaisants à ceux rapportés dans la littérature [12, 36, 37, 53].

Par ailleurs, les caractéristiques temporelles que nous avons obtenues présentent trois évolutions distinctes correspondant à la phase de préparation (avant propagation correspondant à l'effet de couronne), la phase de propagation (qui s'effectue sur les deux tiers de la distance inter électrodes) et la phase de contournement (entre 2/3 et 0,9 de la distance inter électrodes). Nos caractéristiques sont en bon accord avec celles obtenues par Dhahbi et par Tegar.

CONCLUSION GENERALE

Notre étude nous a permis, dans un premier temps, de mieux comprendre les différents mécanismes régissant le phénomène de contournement sur des surfaces isolantes polluées, et de contribuer à la modélisation des isolateurs pollués afin de prédéterminer la dynamique de la décharge et ses différents paramètres.

Après avoir présenté les phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique, nous avons rappelé, les principaux modèles élaborés, en précisant leur caractère et en discutant leur domaine de validité. Ensuite, nous avons proposé un modèle dynamique représentatif de l'arc électrique. Ce modèle permet d'évaluer la tension de contournement, le temps au contournement et les différents facteurs caractérisant l'arc (courant dans l'arc, longueur d'arc, résistance d'arc, tension d'arc, le champ dans l'arc, vitesse de propagation et la puissance transférée dans cet arc), ainsi que la résistance de pollution et le champ dans la pollution.

Un bon accord a été obtenu en comparant les résultats obtenus par notre modèle à ceux rapportés dans la littérature. Nous estimons, par conséquent, que notre modèle est un outil appréciable de prédiction du comportement d'un isolateur pollué, soumis à une tension alternative. Cependant, nous avons traité le phénomène de contournement uniquement du point de vue électrique. Cette analyse ne peut à elle seule traduire les mécanismes réels intervenants dans la génération et l'élongation des décharges électriques sur isolateurs pollués. Pour remédier à cet handicap, une connaissance de la physique de la décharge s'avère très indispensable. Par ailleurs, notre modèle peut être développé en y intégrant des paramètres assez difficile à cerner, comme la présence d'arc multiple, l'influence de l'effet thermique, la discontinuité de la couche de pollution, etc.

- [1] J. Danis, "A Stochastic Pollution Flashover Model", 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 - 12, Septembre 5 - 9, 1983, Athènes, Grèce.
- [2] F. Obenaus, "Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge", Deutsche Elektrotechnik, vol. 4, pp. 135 - 136, 1958.
- [3] H. Zhang, R. Hackam, "Electrical Surface Resistance, Hydrophobicity and Diffusion Phenomena in PVC", IEEE Trans. on Elect. Insul, Vol. 6, N°. 1, pp. 73 - 83, February 1999.
- [4] M. Tegar, A. Mekhaldi, A. Boubakeur, "Algorithm for HV Insulator Flashover under Discontinuous Pollution", Archives of Electrical Engineering, Vol. LI, No. 2, pp. 119-136, 2002.
- [5] R. Sundararajan, R. S. Gorur, "Dynamic Arc Modeling of Pollution Flashover of Insulators under dc Voltage", IEEE Trans. On Dielec. And Elect. Insul., Vol. 26 N°. 2, pp 209-218, April 1993.
- [6] M. A. B. EL Koshairy, F. A. M. Rizk, "Comportement des Isolateurs des Lignes de Transport à Très Haute Tension dans les Conditions de Pollution Désertiques", CIGRE, Rapport 33 - 05, Paris, 1970.
- [7] D. Dumora, "Matériaux isolants céramiques en électrotechnique", Technique de l'ingénieur D275.
- [8] G. Riquel, E. Span genberg, "De la céramique au synthétique", EDE-Epure, N° 58, Avril 1998.
- [9] Y. Porcheron, "Lignes aériennes : Matériels entrant dans la constitution d'une ligne aérienne", Technique de l'ingénieur D4425.
- [10] F. Amidi, k. Ouerdane, "Les effets de la pollution sur les ouvrage électrique à 30kV en région littorales", projet de fin d'étude, département d'électrotechnique, USTH Bab Ezzouar, juin 1998.
- [11] A. Cimador, S. Vitet, "La Pollution des Isolateurs", EDF-Epure, N°. 27, Juillet 1990.
- [12] M. Tegar, "Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Électriques sur des Isolateurs Installés en Régions Polluées", Thèse de Magister ENP, Juillet 1993.
- [13] P. J. Lambeth, H. Auxel, M. P. Verma, "Méthode de Mesure de la Sévérité de la Pollution compte tenu de son Influence sur le Comportement des Isolateurs à Haute Tension", Electra N°. 20, pp 95-100, Janvier 1972.
- [14] W. Heise, G.F. luxa, G.Revrery, M. P. Verma, " Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide ", CIGRE, rapport 33-09, Paris. France, 1982.

- [15] D. Namane, "Effet de la Discontinuité de la Couche de Pollution sur le Comportement d'Isolateur Haute Tension, sous la Fréquence 50Hz", Thèse de Magister ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Février 1998.
- [16] A. Mekhaldi, "Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternatives 50 Hz", Thèses de Doctorat, ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Septembre 1999.
- [17] CEI 60 - 1, "Techniques des Essais à Haute Tension", Définitions et Prescriptions Générales relatives aux Essais, Deuxième Edition, 1989.
- [18] R. Wilkins, "Flashover Voltage of High Voltage Insulators with Uniform Surface Pollution Films", Proc. IEE, Vol. 116, No 3, pp. 457 - 465, Mars 1969.
- [19] S. Bouazabia, T. Chikhaoui, "Méthodes d'essais sur des isolateurs pollués dans les conditions désertiques", Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin. 1988.
- [20] C. H. A. Ely, P. J. Lambeth, J. S. T. Looms, D. A. Swift, C.E.G.B "Contournement des polymères humides et pollués: l'ailette BOOSTER", CIGRE, Rapport 15 - 02, Paris , France, 1978.
- [21] A. Mekhaldi, "Etude du Développement d'un Arc Electrique sur des Surfaces Isolantes Contaminées par la Pollution Désertique", Thèse de Magister, ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Juin 1990.
- [22] A. El-Arabaty, A. Nosseir, S. El-Debeiky, E. Nasser, El-Sharky, "Choix d'Isolateurs Utilisables dans des Ambiances Polluées et Notamment dans des Régions désertiques", CIGRE, Rapport 33 - 11, Paris, France, 1980.
- [23] G. Riquel, E. Spangenberg, "De la Céramique au Synthétique, les isolateurs Font PEAU Neuve", EDF-Epure 58, Avril 1998.
- [24] S. Flazi, « Etude du contournement Electrique des isolateurs haute tension pollués Crotère d'elongation de la décharge et dynamique du phénomène », Doctorat d'état de l'université Paul Sabatier, Toulouse, 1987.
- [25] A.S. Maikopar. "The open small current arc", Elektichestvo, N° . 2, 1905, p. 22-25.
- [26] F. Rizk, "Mathematical Models for Pollution Flashover", Electra, Vol. 78, pp. 71 - 103, Paris, France, 1981.
- [27] R. Wilkins, A. A. J. Al-Baghdadi, "Arc Propagation along an Electrolyte Surface", Proc. IEE, Vol. 118, N° . 12, pp. 1886 - 1892, December 1971.
- [28] A. M. Rahal, C. Huraux, "Flashover of High Voltage Insulators", IEEE Trans., Vol. Pas - 98, N° . 6, pp. 2223 - 2231, 1979.

- [29] B. F. Hampton, "Flashover Méchanism of Polluted Insulation", Proc.PIEE, Vol. 111, N°5, pp. 985 - 990, Juillet 1964.
- [30] S. Hesketh, "General criterion for the prédiction of pollution flashover", Proc.IEE, Vol.114, N° 4, p. 531 - 532, Avril 1967.
- [31] S. Anjana, C. S. Lakshminarasmha, "Computed of Flashover Voltages of Polluted Insulators using Dynamic Arc Model", 6th International Symposium on high voltage Engineering, paper 30-09, New Orleans, USA, 1989.
- [32] N. Dhahbi - Megriche, A. Beroual, L. Krahenbuhl, "A New Proposal Model for Polluted Insulators Flashover", Journal of Physics D: Applied Physics, (30), N° 5, pp. 889 - 894, March 1997.
- [33] P. S. Gosh, S. Chakravorti, N. Chatterjee, "Estimation of Time to Flashover Characteristics of Contaminated Electrolytic Surfaces Using a Neural Network", IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., Vol. 2, N° 6, pp. 1064 - 1076, December 1995.
- [34] G. Neumärker, "Verschmutzungszustand und Kriechweg", Monatsber. d. Deut. Akad. Wiss., Berlin, vol.1, pp.352 - 359, 1959.
- [35] T. C. Chung, H. I. M. Nour, C. Y. Wu, "DC Interfacial Breakdown on Contaminated Electrolytic Surfaces", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 19, N° 6, pp. 536 - 542, December 1984.
- [36] P. Claverie, "Predetermination of the Behaviour of Polluted Insulators", IEEE Trans. PAS, Vol. 90, N° 4, pp. 1902 - 1908, Juillet 1971.
- [37] P. Claverie, Y. Porcheron, "How to Choose Insulators for Polluted Areas", IEEE Trans. PAS, Vol. 92, N° 3, pp. 1121-1131, 1973.
- [38] S. Gopal Y. Narayana Rao, "On the Flashover Mechanisms of Polluted Insulators", ISPPISD, IIT, pp. 1 - 6, Madras, Inde, 1983.
- [39] Publication IEC 71-2, "Insulation Coordination, Application Guide", Seconde Edition, 1976.
- [40] L. L. Alston, S. Zoledziowski, "Growth of Discharges on Polluted Insulators", IEEE, Trans. PAS, Vol. 110, N° 7, pp. 1260-1266, Juillet 1963.
- [41] H. Nacke, "Lichtbogen festigkeit und kriechstrom festigkeit von isolier stoffen", Dissertation, University of Berlin-Charlottenburg, 1962.
- [42] H. Nacke, "Stabilitat der Fremdschichtentladungen und Theorie des Fremdschichtuberschlags", ETZ - A, N° 16, pp. 577 - 585, 1966.

- [43] H. Boehme, F. Obénaus. "Essais de contournement sur des isolateurs pollués en laboratoire et en lieu de service du point de vue de la conception d'un modèle d'amorçage pour courant rampant", CIGRE, N°. 407, Paris, France, 1966.
- [44] H. H. Woodson, A. J. McElroy. "Insulators with contaminated surfaces part II: modelling of discharge mechanisms", IEEE Trans., Vol. Pas-89, N°. 8, November-December 1970. p. 858-867.
- [45] M. Teguar. "Modélisation d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro-géométriques", Thèse de doctorat d'état. ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Alger, Avril 2003.
- [46] O. Mayr, "Beitrag zur Theorie der Statischen und der Dynamishchen Litchbogens", Arch. f. Elektrotechnik, Vol. 37, pp. 588 - 608, 1943.
- [47] F. A. M. Rizk, D. H. Nguyen, "Digital Simulation of Source Insulator Interaction in HVDC Pollution Tests", IEEE Trans. on Power Delivery, pp. 405 - 410, 1988.
- [48] G. Leroy, C. Gary, "les propriétés diélectriques de l'air et les Très Hautes Tensions", Edition Eyrolles, Paris, France, 1984.
- [49] N. Dhahbi - Megriche, A. Beroual, "Evaluation of Polluted Insulators Flashover Voltage for Different Waveforms Using an Equivalent Electrical Network Model", 11th International Symposium on High Voltage Engineering, Conference Publication No. 467, IEE, Vol. 4, sec. P2, pp 377-380, August 22-27, London, UK, 1999.
- [50] R. Sundararajan, R. S. Gorur, "Computer Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Conditions", IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul., Vol. 2, N°. 1, pp. 121-127, February 1995.
- [51] P. Claverie, Y. Porcheron, "How to Choose Insulators for Polluted Areas", IEEE Trans. PAS, Vol. 92, N°. 3, pp. 1121 - 1131, 1973.
- [52] C. Huraux, A. M. Rahal, "Le Contournement des Isolateurs Haute Tension Approché à l'aide d'un Modèle de Laboratoire", RGE, Tome 84, N°. 6, pp. 425 - 429, Juin 1975.
- [53] N. Dhahbi, "Modélisation Dynamique des Décharges sur les Surfaces d'Isolateurs Pollués sous Différentes Formes de Tensions: Elaboration d'un Critère Analytique de Propagation", Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, France, 1998.
- [54] H. Matsuo, T. Fujishima, T. Yamashita, K. Hatase, "Relation between Leakage Impedance and Equivalent Salt Deposit Density on an Insulator under a Saltwater Spray", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 6, N°. 1, pp. 117 - 121, February 1999.
- [55] A. Mekhaldi, S. Bouazabia, "Conduction Phenomena on Polluted Surface under ACHV", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 310.74, August 28th -September 1st, 1995, Graz, Austria.

- [56] D. Namane, A. Mekhaldi, S. Bouazabia, "Influence de la Largeur de la Couche de Pollution sur le Courant de Fuite des Isolateurs", Deuxième Conférence Nationale sur la Haute Tension, Tizi - Ouzou, Algérie, 17 - 19 Novembre 1997.
- [57] M. N. Rayes, M. Zhirh, "Investigation about Flashover Performance of Insulators under Uniform and Non Uniform Contamination", 7th International Symposium of High Voltage Engineering, pp. N°. 43 - 08, Dresden, Germany, 26 - 30 August 1991.
- [58] Michel Pollentes, "Sur l'Utilisation de Modèles de Laboratoire pour l'Etude de la Tenue au Contournement des Isolateurs Pollués", Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1996.
- [59] Z. Renyu, G. Zhicheng, "A Study on the Difference between the Flashover Voltages of Contaminated Insulators under AC and DC Voltages", IEEE Trans., pp. 332 - 334, 1985.
- [60] A. Al-Baghdadi, "The Mechanisme of Flashover of Polluted Insulator", P. H. D. Desertation, The Victoria University of Mansherster, May 1970 .
- [61] P. S. Gosh, N. Chatterjee, "Polluted Insulator Flashover Model for AC Voltage", IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., Vol. 2, N°. 1, pp. 128 - 136, February 1995.
- [62] M. D. Mahi, "Dynamique de l'allongement sur une surface faiblement conductrice d'une décharge électrique alimentée en courant alternatif", Thèse des sciences de l'université Paul Sebatier, 1986.
- [63] José Pissalto Filho, "Analyse du Contournement d'une Surface Faiblement Conductrice par une Décharge Electrique Alimentée en Courant Continu", Thèse Sciences Physiques, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1986.
- [64] J. Keller - Jacobsen, A. A. Pedersen, J. K. Rasmussen, A. Henriksen, C. Lindqvist, S. Smedsfelt, "Essais au Laboratoire et en Plein Air pour Dimensionner Correctement les Isolateurs Exposés A La Pollution Saline", CIGRE, Rapport 33 - 11, Paris, France, 1978.
- [65] B. C. Gellert, J. K. Rasmussen et Al, "Finite Element Modelling of Dry Zone Formation on Polluted Out door HV Insulators", 6th International Symposium on High Voltage Engineering, paper 24 - 07, New Orleans, USA, 1989.
- [66] E. H. A. M. Rahal, "Sur les Mécanismes Physiques du Contournement des Isolateurs Haute Tension", Thèse Sciences Physiques, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1979.