

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE DU DOCTORAT EN INGÉNIERIE

PAR
RABAH CHAARANI

ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES DES ISOLATEURS
SUR LEURS PERFORMANCES ÉLECTRIQUES DANS DES CONDITIONS DE
GIVRAGE

HIVER 2003



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

L'avancement de la recherche dans le développement de nouveaux types d'isolateurs plus performants destinés aux régions froides nécessite des investigations spécifiques sur les paramètres physiques et électriques qui influencent de façon directe ou indirecte la tension critique de contournement de ces isolateurs.

L'accumulation de la glace sur les isolateurs modifie considérablement leurs caractéristiques diélectriques et entraîne une diminution de leur tension de tenue. En effet, la couche de glace recouvrant les isolateurs devient plus ou moins conductrice en raison de la contamination et de l'injection d'impuretés à la surface durant le processus de givrage. Pendant un réchauffement causé par l'augmentation de la température ambiante, par les décharges couronne ou encore par le courant de fuite, un film d'eau se forme à la surface de la glace. Cette couche liquide est d'une conductivité plus élevée que celle de la glace à cause des impuretés rejetées à la surface. Ce phénomène provoque une augmentation des décharges électriques ainsi que l'amorçage de l'arc de contournement et, par la suite, une coupure électrique.

Des incidents graves provoqués par l'apparition de l'arc électrique sur les isolateurs des lignes et postes électriques recouverts de glace ont été rapportés dans plusieurs publications. Les chercheurs, qui ont étudié l'impact de la glace sur la fiabilité du transport de l'énergie électrique et surtout sur le contournement des isolateurs recouverts de glace, ont rapporté plusieurs cas d'incidents attribuables à la présence de la glace.

La présente thèse, entreprise dans le cadre des travaux de la Chaire industrielle sur le givrage des équipements des réseaux électriques (CIGELE) de l'Université du Québec à Chicoutimi, a pour but d'étudier l'influence des caractéristiques physiques d'une chaîne d'isolateurs standards IEEE recouverts de glace sur la tension de tenue de ces derniers.

L'influence de la variation du diamètre des isolateurs et de la répartition des intervalles d'air sur la tension de tenue ont été examinés en régime d'accumulation. Ainsi, les résultats obtenus montrent que la tension de tenue décroît avec l'augmentation du diamètre et varie selon la répartition des espaces d'air le long de la chaîne d'isolateurs. Cette répartition des espaces d'air le long de l'isolateur et son influence sur la tension de tenue sous les conditions de givrage ont été étudiées par la suite. On a conclu qu'une répartition symétrique des espaces d'air en bas, en haut et au milieu de la chaîne d'isolateur permet une meilleure tenue sous les conditions de givrage.

Les différents résultats expérimentaux ont été ensuite utilisés pour améliorer le modèle mathématique, développé à la CIGELE, en vue de l'appliquer sur des isolateurs réels. Ce modèle mathématique tient compte de la variation de la valeur de la conductivité de la surface de l'isolateur, de la longueur de l'isolateur, de la distance d'arc et de l'effet du diamètre moyen. Enfin, des expériences supplémentaires ont été réalisées sur un cylindre givré pour corriger la condition de rallumage de l'arc utilisée par ce modèle mathématique.

Ainsi, les travaux réalisés dans le cadre de ce projet ont contribué à une meilleure compréhension de l'effet de la géométrie de l'isolateur sur sa tension de tenue et à l'amélioration du modèle mathématique permettant de prédire les contournements électriques des isolateurs. De plus, ces résultats contribueront à améliorer la conception de nouveaux types d'isolateurs mieux adaptés aux conditions de précipitations atmosphériques froides.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, le professeur Masoud Farzaneh, pour son attention et ses judicieux conseils prodigués tout au long de cette thèse.

Ma gratitude va également aux docteurs Christophe Volat, Janhui Zhang et Issouf Fofona pour leurs appuis professionnels et leurs conseils.

Je désire également remercier MM. Jean-François Drapeau et Sylvain Desgagnés pour leurs appuis techniques ainsi que l'ensemble du personnel de l'UQAC, qui ont contribué à l'avancement de ce travail de recherche.

Enfin, je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à ma famille et mes amis qui m'ont donné encore le courage de poursuivre mes études.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction | 1 |
| 1.1 Contexte général | 2 |
| 1.2 Problématique | 3 |
| 1.3 Objectif..... | 7 |
| 1.4 Méthodologie..... | 7 |
| 1.5 Structure de la thèse | 9 |
| | |
| 2. Revue de littérature et notions fondamentales | 11 |
| 2.1 Introduction | 12 |
| 2.2 Études de la performance électrique des isolateurs pollués | 13 |
| 2.2.1 Influence de la forme de l'isolateur | 13 |
| 2.2.2 Influence du diamètre | 16 |
| 2.2.3 Modèles mathématiques..... | 21 |
| 2.2.3.1 Modèles théoriques..... | 21 |
| 2.2.3.2 Modèles empiriques..... | 26 |
| 2.3 Études de la performance électrique des isolateurs recouverts de glace..... | 27 |
| 2.3.1 Influence du diamètre | 27 |
| 2.3.2 Influence de la distance entre les jupes..... | 28 |
| 2.3.3 Modèles mathématiques..... | 30 |
| 2.4 Conclusion..... | 37 |

| | |
|--|-----------|
| 3. Équipements et procédures expérimentales | 39 |
| 3.1 Introduction | 40 |
| 3.2 Équipements | 41 |
| 3.2.1 Chambre climatique..... | 41 |
| 3.2.2 Isolateur testé..... | 43 |
| 3.3 Méthodologie expérimentale | 45 |
| 3.3.1 Méthode de simulation du diamètre de l'isolateur..... | 45 |
| 3.3.2 Méthode de simulation de la répartition des intervalles d'air | 47 |
| 3.3.3 Méthode de la correction de l'équation de réallumage de l'arc | 48 |
| 3.3.4 Méthode de mesure de la tension de tenue à 50 % | 49 |
| 3.3.5 Procédures de tests..... | 50 |
| 3.3.5.1 <i>Accumulation de glace</i> | 50 |
| 3.3.5.2 <i>Transition</i> | 51 |
| 3.3.5.3 <i>Tests de contournement</i> | 52 |
| 3.4 Conclusion..... | 53 |
| | |
| 4. Études de l'influence du diamètre des isolateurs recouverts de glace sur la tension de tenue | 56 |
| 4.1 Introduction | 57 |
| 4.2 Observation durant l'accumulation..... | 58 |
| 4.3 Résultats expérimentaux relatifs à l'influence du diamètre..... | 60 |
| 4.4 Analyse des résultats..... | 64 |
| 4.5 Conclusion..... | 71 |

| | |
|---|------------|
| 5. Influence de la répartition des intervalles d'air le long de l'isolateur recouvert de glace sur la tension de tenue | 73 |
| 5.1 Introduction..... | 74 |
| 5.2 Observations générales | 78 |
| 5.3 Résultats expérimentaux relatifs à la répartition des intervalles d'air | 79 |
| 5.4 Analyse des résultats..... | 85 |
| 5.4.1 Analyse du courant de fuite | 85 |
| 5.4.2 Analyse de la tension de tenue à 50% | 96 |
| 5.4.3 Discussion..... | 98 |
| 5.4.4 Suggestions pour l'amélioration de la tenue diélectrique des isolateurs recouverts de glace | 103 |
| 5.5 Conclusion | 105 |
| | |
| 6. Modèle mathématique..... | 108 |
| 6.1 Introduction..... | 109 |
| 6.2 Influence du diamètre | 112 |
| 6.3 Influence de la répartition et du nombre d'intervalles d'air | 113 |
| 6.4 Conclusion | 130 |
| | |
| 7. Conclusions générales et recommandations pour les travaux futurs | 132 |
| 7.1 Influence du diamètre | 134 |
| 7.2 Influence de la répartition et du nombre des intervalles d'air | 136 |
| 7.3 Modèle mathématique..... | 139 |

| | |
|--|------------|
| 7.4 Recommandations pour les travaux futurs..... | 141 |
| 7.4.1 Recommandations sur l'influence du diamètre | 142 |
| 7.4.2 Recommandation sur l'influence de la répartition des espaces d'air..... | 142 |
| 7.4.3 Recommandations pour l'amélioration du modèle mathématique | 143 |
| 7.4.4 Recommandations pour l'amélioration de la tenue diélectrique des isolateurs | 144 |
| | |
| Références..... | 146 |
| | |
| ANNEXE A..... | 154 |

Listes des figures

| | |
|--|----|
| Figure 2.1 : Définition du facteur de profil | 14 |
| Figure 2.2 : Influence du profil sur la tension de tenue des isolateurs pollués..... | 15 |
| Figure 2.3 : Assimilation théorique d'un isolateur à un cylindre | 16 |
| Figure 2.4 : Diamètre moyen des isolateurs IEEE et EPDM | 18 |
| Figure 2.5 : Performance des isolateurs pollués en fonction du diamètre moyen | 19 |
| Figure 2.6 : Tension de tenue par millimètre de distance de fuite en fonction du diamètre..... | 20 |
| Figure 2.7 : Densité du dépôt de sel en fonction du diamètre moyen..... | 20 |
| Figure 2.8 : Dépendance de la tension critique nécessaire au maintien d'un arc en régime continu sur la longueur | 22 |
| Figure 2.9 : Modèle théorique proposé par Obenaus | 23 |
| Figure 2.10 : Tension de tenue maximale par mètre de longueur pour 3 types d'isolateurs de diamètres différents et pour une épaisseur de glace de 2 cm | 27 |
| Figure 2.11 : Effet de la longueur des glaçons sur la distance de fuite..... | 28 |
| Figure 2.12 : Tension de tenue en fonction de la distance d'arc | 29 |
| Figure 2.13 : Modèle électrique de décharge sur une surface givrée..... | 30 |
| Figure 2.14 : Modèle géométrique utilisé pour calculer la résistance de la glace | 31 |
| Figure 2.15 : Aspect visuel d'un dépôt de 2 cm de glace sur un isolateur IEEE..... | 33 |
| Figure 2.16 : Courbe de l'équation de la tension de tenue en fonction du courant de fuite | 35 |
| Figure 2.17 : Courbe de l'équation de la tension de tenue en fonction de la distance de l'arc | 36 |
| Figure 2.18 : Résultats calculés et résultats expérimentaux de la tension de contournement d'une chaîne de 5 isolateurs IEEE | 36 |
| Figure 3.1 : Installations..... | 42 |

| | |
|--|----|
| Figure 3.2 : Aspect visuel d'une chaîne de 6 unités d'isolateur standard IEEE | 44 |
| Figure 3.3 : Concept d'utilisation du cylindre pour simuler un isolateur réel | 44 |
| Figure 3.4 : Simulation d'un isolateur de 5 cm de diamètre et recouvert uniformément de glace..... | 46 |
| Figure 3.5 : Appareil utilisé pour varier la largeur de la glace accumulée | 46 |
| Figure 3.6 : Création manuelle des intervalles d'air..... | 48 |
| Figure 3.7 : Méthode de mesure de la tension de tenue à 50%..... | 49 |
| Figure 3.8 : Accumulation de 1,5 cm d'épaisseur de glace sur le cylindre témoin..... | 51 |
| Figure 3.9 : Aspect visuel des tests de contournement..... | 52 |
| Figure 3.10 : Effet d'un arc sur la surface d'un cylindre | 55 |
| Figure 4.1 : Concentration de l'accumulation au centre du MASQUE..... | 59 |
| Figure 4.2 : Accumulation de 2 cm de glace de largeurs différentes sur une chaîne d'isolateurs | 59 |
| Figure 4.3 : Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 24,5 cm de diamètre moyen de glace | 60 |
| Figure 4.4 : Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 15 cm de diamètre moyen de glace | 61 |
| Figure 4.5 : Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 10 cm de diamètre moyen de glace | 63 |
| Figure 4.6 : Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 5 cm de diamètre moyen de glace | 63 |
| Figure 4.7 : Enregistrement complet d'un test de contournement : cas d'une tenue..... | 65 |
| Figure 4.8 : Enregistrement complet d'un test de contournement : cas d'un contournement..... | 66 |
| Figure 4.9 : Courants enregistrés pour les accumulations de glace ayant un diamètre moyen de 15 cm et une tension appliquée de 82.5 kV | 67 |
| Figure 4.10 : Courants enregistrés pour les accumulations de glace ayant un diamètre moyen de 10 cm et une tension appliquée de 90.7 kV | 67 |

| | |
|--|----|
| Figure 4.11 : Courants enregistrés pour les accumulations de glace ayant un diamètre moyen de 5 cm et une tension appliquée de 103.3 kV..... | 67 |
| Figure 4.12 : Variation du courant de fuite en fonction du diamètre moyen de glace.... | 68 |
| Figure 4.13 : L'influence du diamètre moyen de l'isolateur sur la résistance moyenne de la surface du dépôt de glace..... | 69 |
| Figure 4.14 : l'influence du diamètre moyen de l'isolateur sur la tension de tenue..... | 69 |
| Figure 4.15 : Exemple de calcul de l'ordre de l'équation de la résistance de glace..... | 71 |
| Figure 5.1 : Influence de la longueur des glaçons sur la distance de fuite..... | 76 |
| Figure 5.2 : Position des intervalles d'air pour les différentes séries de tests..... | 77 |
| Figure 5.3 : Tension de tenue à 50% de la série # 1 | 80 |
| Figure 5.4 : Tension de tenue à 50% de la série # 2 | 81 |
| Figure 5.5 : Tension de tenue à 50% de la série # 3 | 83 |
| Figure 5.6 : Tension de tenue à 50% de la série # 4 | 84 |
| Figure 5.7 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 1 : cas d'un contournement | 86 |
| Figure 5.8 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 1 : cas d'une tenue | 86 |
| Figure 5.9 : Effet des décharges sur la répartition des espaces d'air dans un test de la série # 1 ayant mené à une tenue..... | 87 |
| Figure 5.10 : Enregistrement d'une période du courant de fuite obtenue lors d'une tenue dans un test de la série # 1 | 87 |
| Figure 5.11 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 2 : cas d'un contournement | 89 |
| Figure 5.12 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 2 : cas d'une tenue | 89 |
| Figure 5.13 : Effet des décharges sur la répartition des intervalles d'air dans un test de la série # 2 ayant mené à une tenue | 90 |
| Figure 5.14 : Enregistrement d'une période du courant de fuite lors d'une tenue dans un test de la série # 2..... | 90 |

| | |
|---|-----|
| Figure 5.15 : Comparaison de la tension de tenue de l'accumulation de la série # 3 avec celle d'une accumulation standard sous tension de service | 91 |
| Figure 5.16 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 3 : cas d'une tenue..... | 92 |
| Figure 5.17 : Enregistrement d'une période du courant de fuite lors d'une tenue dans un test de la série # 3..... | 93 |
| Figure 5.18 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 3 : cas d'un contournement..... | 93 |
| Figure 5.19 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 4 : cas d'une tenue..... | 95 |
| Figure 5.20 : Enregistrement d'une période du courant de fuite lors d'une tenue dans un test de la série # 4..... | 95 |
| Figure 5.21 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 4 : cas d'un contournement..... | 96 |
| Figure 5.22 : L'influence des différents espaces d'air étudiés sur la tension de tenue à 50 % | 97 |
| Figure 5.23 : Comparaison de la résistance générale d'une surface de glace..... | 101 |
| Figure 5.24 : Conception préliminaire d'un meilleur isolateur | 104 |
| Figure 6.1 : Propagation de l'arc | 111 |
| Figure 6.2 : Correction du coefficient K en fonction du diamètre..... | 114 |
| Figure 6.3 : Validation du modèle corrigé par les résultats expérimentaux | 115 |
| Figure 6.4 : Modèle mathématique de base correspondant à la série # 1..... | 116 |
| Figure 6.5 : Modèle équivalent à la série # 2..... | 117 |
| Figure 6.6 : Modèle équivalent à la série # 3 | 119 |
| Figure 6.7 : Modèle équivalent à la série # 4..... | 120 |
| Figure 6.8 : Influence de la répartition des intervalles d'air sur la tension de tenue calculée pour les différentes configurations..... | 122 |
| Figure 6.9 : Concentration de lignes de courant en bas de l'intervalle d'air | 123 |

| | |
|--|-----|
| Figure 6.10 : Modèle équivalent aux séries # 3 et # 4..... | 124 |
| Figure 6.11 : Comparaison entre les tensions de tenue calculées par le modèle mathématique avec celles mesurées expérimentalement pour les séries # 3 et # 4 | 125 |
| Figure 6.12 : Comportement de la glace dans les séries # 1 et # 2..... | 125 |
| Figure 6.13 : Création des intervalles d'air à proximité de l'électrode de la mise à la terre durant les tests de contournement des séries # 1 et # 2 | 126 |
| Figure 6.14 : Tension de tenue calculée par le modèle mathématique en fonction de la conductivité de la surface dans le cas de la série # 1 | 127 |
| Figure 6.15 : Comparaison entre les tensions de tenue calculées par le modèle mathématique avec celles mesurées expérimentalement pour les séries # 3 et # 4 | 128 |
| Figure 6.16 : Variation du coefficient J en fonction des différentes configurations étudiées..... | 129 |

Listes des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 3.1 : Conditions d'accumulation de la glace formée en régime humide..... | 50 |
| Tableau 4.1: Caractéristiques de l'accumulation de la glace..... | 58 |
| Tableau 4.2 : Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 24,5 cm de diamètre moyen de glace | 60 |
| Tableau 4.3 : Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 15 cm de diamètre moyen de glace | 61 |
| Tableau 4.4 : Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 10 cm de diamètre moyen de glace | 62 |
| Tableau 4.5 : Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 5 cm de diamètre moyen de glace | 64 |
| Tableau 5.1 : Position et longueur des intervalles d'air le long de la chaîne d'isolateur IEEE pour les différentes séries de tests | 77 |
| Tableau 5.2 : Tension de tenue à 50% pour la série # 1 | 79 |
| Tableau 5.3 : Tension de tenue à 50% pour la série # 2..... | 81 |
| Tableau 5.4 : Tension de tenue à 50% pour la série # 3..... | 82 |
| Tableau 5.5 : Tension de tenue à 50% pour la série # 4..... | 84 |
| Tableau 5.6 : Tension de claquage des différents intervalles d'air | 99 |
| Tableau 6.1 : Correction du coefficient K..... | 113 |

Listes des symboles

| | |
|----------------------------|---|
| A | Ampère |
| EPDM | Isolateur Éthylène Propylène Diène monoMère |
| γ_e | Conductivité de la surface |
| IEEE | Isolateur IEEE |
| kV | kiloVolts |
| L | Longueur de la chaîne d'isolateur |
| r₀ | Rayon de courbure de l'arc |
| R_x | Résistance résiduelle de la glace |
| U_c | Tension Critique |
| V₀ | Tension de service |
| V_{50%} | Tension de tenue à 50% |
| V_e | Tension aux bornes des électrodes |
| V_{mc} | Tension d'entretien d'arc |
| V_{tm} | Tension de tenue maximale |
| W | Diamètre moyen de l'isolateur |
| x | Longueur de l'arc partiel |
| σ | Déviation |

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Contexte général

Les équipements haute tension (*H.T.*) des réseaux aériens de transport de l'énergie électrique sont supposés opérer de façon fiable sous des conditions environnementales spécifiques pour lesquelles ils sont prévus. En particulier, les isolateurs, qui représentent relativement un faible pourcentage dans le prix des lignes aériennes, constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement de ces lignes. Leur rôle est d'assurer l'isolement électrique entre les parties portées à la *H.T.* ou entre les parties *H.T.* et les parties mises à la terre. Depuis plusieurs années, l'une des principales cibles dans les travaux de recherche et de développement dans le champ de la transmission et de la distribution électrique a été la diminution du nombre et de la durée des interruptions de l'alimentation en énergie électrique des consommateurs. Une quantité importante d'isolateurs est utilisée sur les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique et, en pratique, ces isolateurs sont employés dans différents environnements tels que tropical, arctique, côtier, atmosphère polluée, etc.

Parmi les conditions météorologiques auxquelles sont soumis les équipements des réseaux électriques, ce sont les accumulations de neige et de glace qui sont les plus

dangereuses. En effet, dans plusieurs régions froides, les accumulations de neige et de glace sur les équipements des réseaux aériens de distribution électrique peuvent entraîner non seulement des dommages mécaniques sur les pylônes et les conducteurs, mais elles peuvent aussi affecter considérablement les performances diélectriques des isolateurs. Une fois leur rigidité diélectrique affaiblie par ces accumulations, ces isolateurs subissent des contournements électriques pouvant entraîner des interruptions partielles, voire totales, de la distribution électrique. Un contournement électrique se traduit par un court-circuit, entre la partie portée à la *H.T.* et la mise à la terre, créé par un arc électrique s'établissant généralement à la surface de la couche de glace recouvrant l'isolateur.

1.2 Problématique

Le champ de recherche concernant le contournement électrique des isolateurs recouverts de glace est assez jeune, mais l'intérêt qu'il suscite se fait sentir dans de plus en plus de pays touchés par ce problème. Depuis environ une trentaine d'années, un nombre important de laboratoires se sont intéressés à la problématique du contournement électrique des isolateurs recouverts de glace, de neige et de givre. Ces études ont permis d'identifier le processus de contournement électrique d'un isolateur recouvert de glace qui peut se résumer comme suit :

- durant le processus de givrage, les impuretés du dépôt solide accumulées sur l'isolateur seront rejetées à la surface de la glace,

- lors d'un échauffement causé par l'augmentation de la température ambiante ou encore un échauffement causé par le courant de fuite, un film d'eau se forme à la surface de la glace. Cette couche liquide devient plus ou moins conductrice en raison de la contamination à la surface, ce qui provoque des décharges partielles amorçant des arcs locaux,
- finalement, sous certaines conditions, ces arcs locaux peuvent se développer à la surface de la glace et conduire au contournement de l'isolateur.

Les processus de développement de l'arc électrique à la surface de glace sont tellement complexes que de nombreuses hypothèses simplificatrices sont nécessaires afin de rendre possible une modélisation de ce processus au moyen d'un modèle mathématique. Parmi les paramètres identifiés qui rendent ce processus complexe, on note en particulier:

- la variabilité de la résistivité superficielle découlant de l'existence d'échanges thermiques : un courant de fuite à la surface d'un isolateur pollué provoque un échauffement de l'électrolyte qui recouvre l'isolant. Cette chaleur a pour effet d'accroître la conductivité du milieu, engendrant ainsi une augmentation du courant de fuite. Ce dernier augmente encore la chaleur du milieu et dans le cas d'un isolateur recouvert d'un dépôt de glace (considéré comme une couche de pollution), cette chaleur entraîne la chute de morceaux de glace créant ainsi des intervalles d'air le long desquels des arcs locaux peuvent apparaître;

- la non uniformité de l'intensité des arcs au voisinage de la surface de l'isolateur : un arc peut se propager sur la surface de la glace ou bien dans l'air environnant. Ce phénomène dépend du processus d'ionisation, de la forme de l'isolateur, de l'hétérogénéité du dépôt solide, du gradient de la tension appliquée et de l'environnement entourant l'isolateur. Il est aussi fréquent que plusieurs arcs naissent simultanément le long d'une chaîne d'isolateurs ou d'une colonne isolante. De plus, en tension alternative, les arcs locaux s'éteignent à chaque passage à zéro de la tension appliquée et se réamorcent d'une façon presque aléatoire.

D'après les expériences vécues par Hydro-Québec [Hydro-Québec, 1988] et Hydro-Ontario [Gorski, 1986], la non uniformité de la géométrie des différents types d'isolateurs (EPDM, IEEE, antibrouillard, colonne isolante, etc.), c'est-à-dire le diamètre moyen, les espaces entre les jupes et la largeur de celles-ci, serait aussi un paramètre pouvant influencer le processus de contournement des isolateurs recouverts de glace. En effet, les observations faites sur le terrain en période hivernale ont révélé que les isolateurs de postes subissaient un nombre de contournements plus élevé que les isolateurs de lignes. L'explication possible apportée à ce phénomène est que les isolateurs de poste possèdent un diamètre moyen plus large que les isolateurs en chaîne (capot et tige, long fût), ce qui permet une accumulation plus importante sur la surface de ces isolateurs. De plus, les distances entre les ailettes sont beaucoup plus faibles que les espacements entre deux isolateurs successifs dans une chaîne d'isolateurs, ce qui fait en sorte qu'elles sont plus rapidement obstruées par la glace.

Par conséquent, la géométrie des isolateurs apparaît donc comme un paramètre important influençant la tension critique de contournement sous des conditions de précipitations atmosphériques froides. Ce paramètre a été mis en évidence dans le cas des isolateurs pollués. En effet, les nombreuses recherches effectuées sur la performance électrique des isolateurs soumis à des conditions de pollution ont démontré qu'il existait une relation entre la tension de tenue des isolateurs et le diamètre du fût, le diamètre maximal des ailettes ainsi que la forme de ces dernières [Matsuoka et *al.*, 1991] [Sundavarajan et Gorur, 1994]. Règle générale, il a été établi que la tension de contournement des isolateurs pollués diminuait avec le diamètre moyen des isolateurs [Matsuoka et *al.*, 1991].

En ce qui concerne la performance électrique des isolateurs en présence de la glace, il existe, à notre meilleure connaissance, très peu de données scientifiques concernant l'influence de la géométrie des isolateurs recouverts de glace et leur tension critique de contournement. Presque toutes les recherches portant sur la tension de tenue des isolateurs font abstraction de l'influence des facteurs reliés au profil des isolateurs. Quant à l'influence du diamètre sur la tension de tenue, seules des études en présence de pollution ont été effectuées sous tensions alternatives et continues [Hydro-Québec, 1988] [Gorski, 1986] [Neumarker, 1959]. Dans les conditions de givrage, l'étude de la variation de la tension de tenue en fonction du diamètre d'isolateur se présente comme l'objectif principal de cette thèse.

1.3 Objectif

L'objectif principal de la présente thèse consiste à étudier l'influence des caractéristiques physiques des isolateurs recouverts de glace sur la tension de tenue afin d'en améliorer la conception et la fiabilité sous des conditions de givrage. Plus spécifiquement, il s'agit :

- d'étudier l'influence du diamètre moyen de l'isolateur sur la tension de tenue,
- d'étudier l'influence de la répartition des intervalles d'air le long de l'isolateur sur la tension de tenue,
- d'améliorer le modèle mathématique de prédiction des contournements électriques des isolateurs glacés existants [Farzaneh et *al.*, 1997] en vue d'accroître son champ d'application. Ce modèle devra tenir compte de la variation de l'état de la conductivité de la surface, de la longueur de l'isolateur, de la répartition des intervalles d'air et de l'effet du diamètre moyen.

Les résultats ainsi obtenus contribueront à une meilleure compréhension du processus de contournement des isolateurs recouverts de glace ainsi que pour la mise au point de nouveaux types d'isolateurs adaptés aux conditions hivernales.

1.4 Méthodologie

Afin de déterminer l'influence de la géométrie d'un isolateur et de la répartition des intervalles sur la tension de contournement lorsqu'il est recouvert de glace, cette recherche a été divisée en trois étapes principales:

Première étape : Étude de l'influence du diamètre

Réalisation de tests en laboratoire sur l'effet du diamètre en utilisant un seul isolateur et en variant la largeur de la glace accumulée. Cette procédure permet ainsi de simuler une accumulation uniforme sur un isolateur de même type ayant un diamètre égal à la couche de glace accumulée. Pour ce faire, quatre largeurs de glace, allant de 5 cm à 24,5 cm, ont été accumulées sur une chaîne d'isolateurs standards IEEE afin de permettre de simuler des chaînes d'isolateurs de diamètres allant de 5 cm à 24,5 cm recouverts complètement de glace.

Deuxième étape : Étude de l'influence des intervalles d'air

Réalisation de tests en laboratoire sur la même chaîne d'isolateurs standards IEEE pour des accumulations de glace dont la position, le nombre et la longueur des intervalles d'air sont différents.

Troisième étape : Amélioration du modèle mathématique existant

Réalisation de tests dans le but de corriger l'équation de réallumage de l'arc sous tension alternative. Cette équation, initialement établie pour les tests en présence de pollution, a été adaptée pour les tests en présence de glace [Claverie, 1971].

Validation du modèle mathématique de prédiction des contournements des isolateurs recouverts de glace en comparant les résultats numériques fournis par le modèle amélioré aux résultats expérimentaux réalisés à cet effet.

Il est bon de mentionner que la méthode de tenue 50% [Commission électrotechnique internationale, 1991] a été utilisée pour déterminer la tension de tenue de toutes les séries de tests qui ont servi à l'accomplissement de la présente recherche. Cette méthode, basée sur la norme CEI507, consiste à calculer la tension moyenne d'au moins dix essais utiles. *Le premier essai utile est défini comme celui qui donne un résultat différent du précédent.*

1.5 Structure de la thèse

Le chapitre II est consacré aux notions fondamentales entourant le processus de contournement des isolateurs pollués et recouverts de glace. Basées sur une étude bibliographique, l'influence de la géométrie des isolateurs sur la tension de tenue est présentée pour les cas de pollution et de glace ainsi que les modèles mathématiques de prédiction des contournements associés.

Le chapitre III présente la procédure de mesure de la tension de tenue utilisée dans cette recherche, les équipements employés, les méthodes de simulations expérimentales portant sur la modification du diamètre de l'isolateur et de la répartition des intervalles d'air et la méthode de la correction de l'équation de rallumage de l'arc.

Le chapitre IV porte sur la présentation et l'analyse des résultats relatifs à l'étude de l'influence du diamètre sur la tension de tenue des isolateurs recouverts de glace.

Le Chapitre V est consacré à l'étude de l'influence de la répartition des intervalles d'air le long de l'isolateur sur sa tension de tenue.

Le chapitre VI est consacré à l'amélioration du modèle mathématique de prédiction des contournements des isolateurs recouverts de glace à partir des résultats présentés aux Chapitres IV et V. De plus, toujours dans l'optique d'améliorer le modèle existant, une modification de l'équation de rallumage est présentée.

Enfin, le chapitre VII présente les conclusions générales ainsi que des recommandations pour les travaux futurs.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE ET NOTIONS FONDAMENTALES

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE ET NOTIONS FONDAMENTALES

2.1 Introduction

Les études relatives à l'influence des caractéristiques géométriques des isolateurs sur leur tension de contournement rapportées à ce jour dans la littérature ont été effectuées que pour des conditions de pollution [Matsuoka *et al.*, 1991] [Sundavarajan et Gorur, 1994] [Rizk, 1981] [LeRoy et Cie, 1984].

R. Matsuoka *et al.* ont démontré que la tension de contournement diminue au fur et à mesure que le diamètre augmente pour une contamination constante [Matsuoka *et al.*, 1991]. Ils ont aussi démontré que la densité du dépôt contaminant diminue avec l'augmentation du diamètre.

I. Kimoto, T. Fujimura et K. Naito ont observé que la tension de contournement en régime continu est plus affectée par la forme de l'isolateur que la tension alternative [Kimoto *et al.*, 1973].

M. Fazelian *et al.* ont démontré que, pour un isolateur pollué ayant une distance constante entre les jupes, l'arc choisit le chemin le plus court dans

l'air [Fazelian et *al.*, 1989]. Ces derniers ont conclu qu'une hauteur inégale entre les jupes améliore la tension de contournement.

R. Sundararajan et R. S. Gorur ont utilisé un modèle dynamique pour étudier, en tension continue, l'effet du profil des isolateurs en présence de pollution afin de concevoir un outil informatique facilitant la conception des isolateurs dans les conditions de contamination [Sundavarajan et Gorur, 1994]. Ils ont conclu que le diamètre ainsi que le profil de l'isolateur ont une forte influence sur la tension de tenue.

Quant aux conditions de givrage, il n'existe, à notre meilleure connaissance, aucune documentation faisant état de l'influence du diamètre et du profil d'isolateur sur la tension de tenue.

2.2 Études de la performance électrique des isolateurs pollués

2.2.1 Influence de la forme de l'isolateur

La longueur de fuite est un important paramètre qui influence la tenue des isolateurs. Pour augmenter la performance d'un isolateur, on pourrait être tenté d'augmenter la longueur de fuite. Cependant, la forme des isolateurs est différente d'un type à l'autre. Un isolateur dont le profil est simple (figure 2.1 a) possède une ligne de fuite plus petite que celui dont le profil comporte de nombreuses nervures comme les isolateurs antipollution (figure 2.1 b) lorsqu'ils sont identiquement pollués. En effet, si la couche de pollution est uniformément répartie, des arcs locaux peuvent se développer sous

certaines conditions. Si les arcs locaux restent en contact avec la surface isolante, la ligne de fuite est complètement utilisée (figure 2.1 a). Par contre, si les arcs adoptent un trajet plus court dans l'air, une partie de la ligne de fuite n'est plus utilisée. On admet que dans ce cas, la tension de contournement est inférieure à celle escomptée. Il est presque impossible de prédire l'amorçage des arcs dans l'air le long de la ligne de fuite, mais il a été observé qu'en deçà d'une distance critique de 50 mm entre les jupes, un claquage se produit [LeRoy et Cie, 1984]. D'autre part, on peut admettre que si la couche polluante est très conductrice, l'arc adopte un trajet préférentiel de la ligne de fuite. En revanche, une faible conductivité de la couche polluante favorise le claquage dans l'air entre les jupes.

Un critère empirique appelé facteur de profil, FP , présenté dans la figure 2.1, a été introduit comme le rapport entre la ligne de fuite simplifiée ($2P + S$) et la ligne de fuite réelle (LS) pour 1 pas de l'isolateur, (P) étant la profondeur horizontale maximale des ailettes et (S) la distance entre deux ailettes.

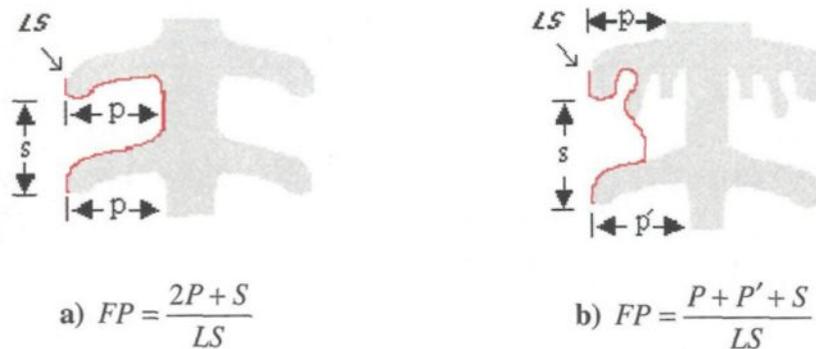


Figure 2.1 : Définition du facteur de profil

Les expériences sur les isolateurs contaminés ont montré que pour un niveau de pollution donné, la tension de contournement des isolateurs est d'autant plus faible que le facteur de profil est plus petit (Figure 2.2) [LeRoy et Cie, 1984].

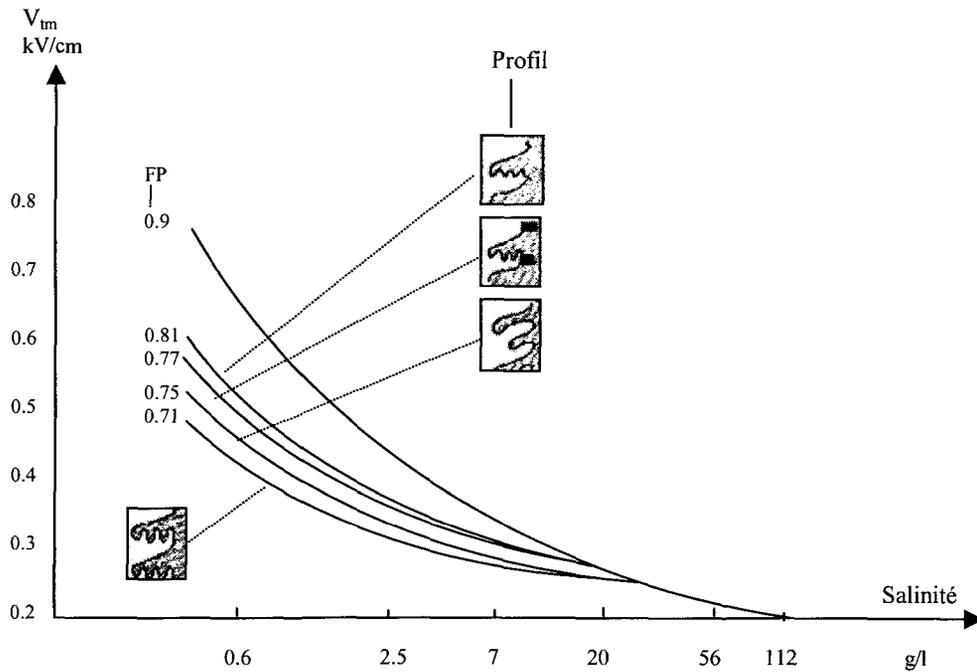


Figure 2.2 : Influence du profil sur la tension de tenue des isolateurs pollués [LeRoy et Cie 1984]

2.2.2 Influence du diamètre

Par définition, le diamètre moyen ϕ d'un isolateur réel correspond au diamètre d'un isolateur qui serait cylindrique et qui posséderait la même ligne de fuite, L , et la même résistance lorsqu'il est recouvert de la même couche polluante, e , que l'isolateur réel (figure 2.3) [LeRoy et Cie, 1984].

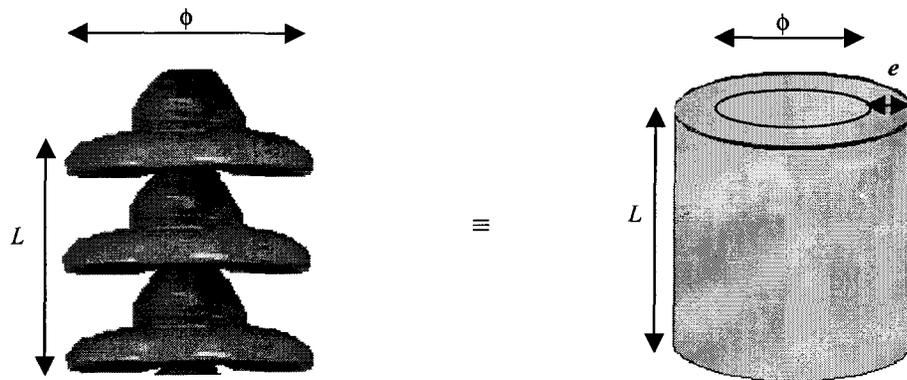


Figure 2.3 : Assimilation théorique d'un isolateur à un cylindre

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

$$L = \frac{S}{\pi\phi} \quad \text{E2.1}$$

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

$$f = \int_0^L \frac{ds}{\pi\phi} \quad \text{E2.2}$$

où ds est l'abscisse curviligne d'un point de l'isolateur mesuré le long de son profil. ϕ est le diamètre de l'isolateur au point s . D'une part, si on assimile la couche polluante à un film régulier d'épaisseur e et de résistivité volumique ρ , la résistance de l'isolateur sera:

$$R = \rho \int_0^L \frac{ds}{\pi \phi e} = \frac{\rho}{e} f \quad \text{E2.3}$$

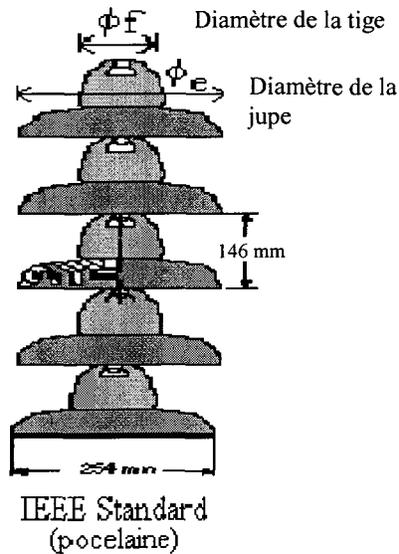
où f est le facteur de forme de l'isolateur. D'autre part, la résistance du cylindre équivalent est

$$R = \rho \frac{L}{\pi \phi e} \quad \text{E2.4}$$

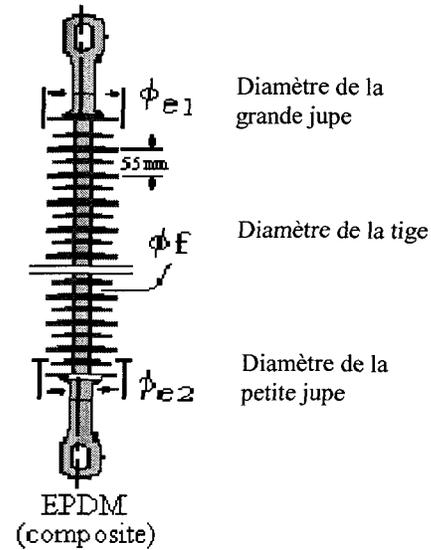
En conclusion, en assimilant l'isolateur réel à un isolateur cylindrique (figure 2.3) ayant une même ligne de fuite L_F et une même couche polluante, le diamètre moyen s'écrit [LeRoy et Cie, 1984]:

$$\phi = \frac{L_F}{\pi f} \quad \text{E2.5}$$

Pour les isolateurs de gros diamètre, on peut résumer le diamètre moyen comme suit :

Isolateurs à ailettes régulières

$$\phi_m = \frac{\phi_f + \phi_e}{2}$$

Isolateurs à ailettes alternées

$$\phi_m = \frac{2\phi_f + \phi_{e1} + \phi_{e2}}{4}$$

Figure 2.4 : Diamètre moyen des isolateurs IEEE et EPDM [LeRoy et Cie, 1984]

Il a été démontré que, pour une certaine densité de contamination, la tension critique de contournement diminue au fur et à mesure que le diamètre augmente et ce, jusqu'à une certaine valeur où la tension de contournement cesse de diminuer [LeRoy et Cie, 1984]. Ce phénomène s'explique par le fait qu'un large diamètre ϕ signifie une plus grande exposition de la surface à la pollution, diminuant ainsi la résistance (d'après E2.4) et réduisant par conséquent la tension de contournement. Par contre, une augmentation relative du diamètre peut causer un supplément d'arcs locaux provoquant une baisse de tension aux bornes de l'électrode. Cette baisse de tension compense partiellement la baisse de la tension de contournement. De plus, l'augmentation du diamètre peut impliquer l'augmentation de la distance de fuite qui atténue la diminution

de la tension de contournement. La figure 2.5 exprime les résultats d'essais par le rapport entre la tension de contournement mesurée (V_c) et la tension de contournement moyenne des isolateurs de petit diamètre (V_c^*) [LeRoy et Cie, 1984].

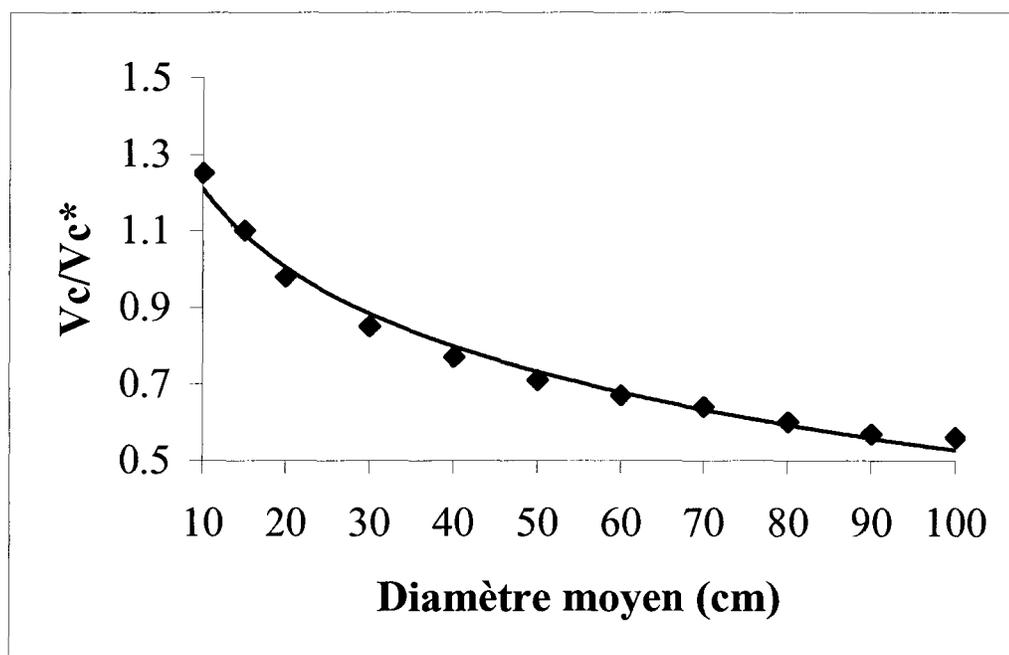


Figure 2.5 : Performance des isolateurs pollués en fonction du diamètre moyen [LeRoy et Cie, 1984]

Les expériences de R. Matsuoka *et al.* ont démontré que la tension de tenue diminue au fur et à mesure que le diamètre augmente (figure 2.6) [Matsuoka *et al.*, 1991]. La variation du diamètre influence aussi la densité du dépôt de contamination sur l'isolateur : plus le diamètre augmente, plus la densité du dépôt contaminant diminue (figure 2.7) [Matsuoka *et al.*, 1991].

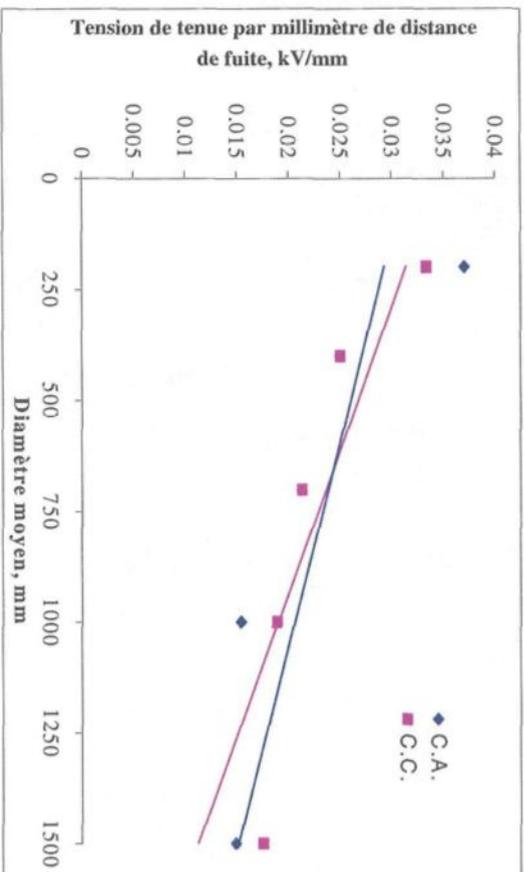


Figure 2.6 : Tension de tenue par millimètre de distance de fuite en fonction du diamètre [Matsuoka et al., 1991]

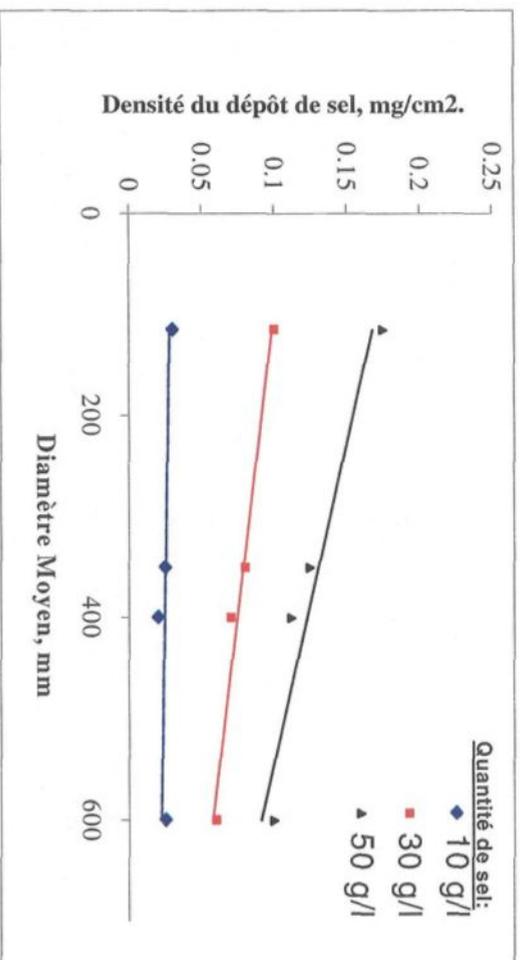


Figure 2.7 : Densité du dépôt de sel en fonction du diamètre moyen [Matsuoka et al., 1991]

2.2.3 Modèles mathématiques

2.2.3.1 Modèles théoriques

Les phénomènes de contournement qui se produisent sur une surface contaminée sont très complexes en raison de la forme des isolateurs, de la non uniformité des dépôts et de la complexité de la physique de l'arc. On admet toujours que le contournement se produit suite à :

- la formation d'une couche conductrice à la surface de l'isolateur soumis à la tension de service;
- l'apparition brusque d'un courant de fuite accompagnée de la formation de bandes sèches et d'arcs partiels le long de celles-ci;
- la propagation, en surface, de l'arc qui peut contourner l'isolateur [Obenaus, 1958].

Il existe deux aspects fondamentaux afin de représenter le phénomène de contournement sur les surfaces contaminées :

- le critère de propagation de l'arc sur la surface d'un isolateur;
- la détermination de la tension minimale nécessaire au maintien d'un arc partiel.

La figure 2.8 présente ces aspects selon trois transitions:

1. Un arc partiel brûlant en position fixe au-dessus d'une portion polluée relativement restreinte de la ligne de fuite pourrait continuer à brûler jusqu'à l'assèchement local

de la région polluée. Cette zone sèche peut s'étendre latéralement entraînant ainsi l'extinction graduelle de l'arc et limitant par ailleurs le danger d'un contournement;

2. L'arc pourrait se développer jusqu'à ce que $X = X_s$, mais pas davantage, car pour se faire, la tension nécessaire pour entretenir l'arc doit dépasser U_{cs} ;
3. La longueur d'arc pourrait dépasser X_s au départ, ce qui aurait comme effet de réduire la tension d'entretien de l'arc et permettre à celui-ci de se développer jusqu'au contournement.

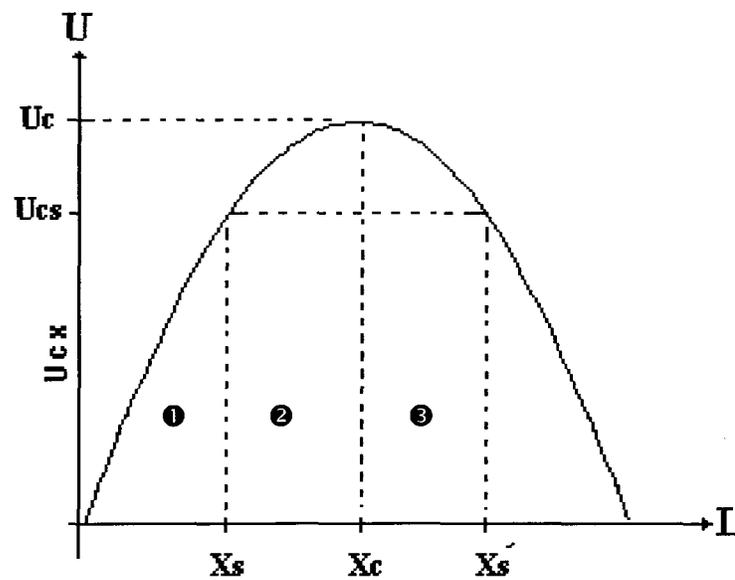


Figure 2.8 : Dépendance de la tension critique nécessaire au maintien d'un arc en régime continu sur la longueur [LeRoy et Cie, 1984]

Obenaus a été le premier à faire une analyse quantitative des phénomènes d'arc se produisant sur une surface contaminée [Obenaus, 1958]. Son modèle, dont le concept est présenté à la figure 2.9, se présente sous forme d'une décharge de longueur X en série avec une résistance $R(X)$ caractérisant la couche polluante.

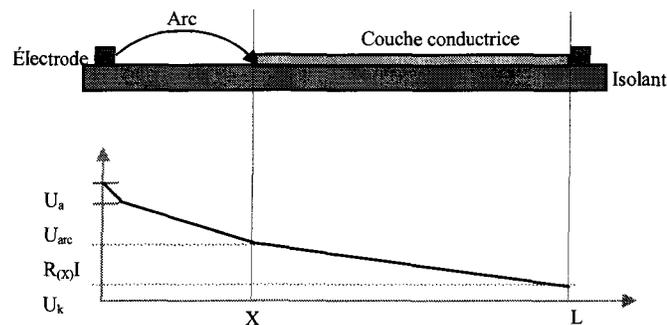


Figure 2.9 : Modèle théorique proposé par Obenaus

L'équation électrique du modèle s'écrit ainsi :

$$U = U_e + U_{arc} + R_{(X)}.I \quad \text{E2.6}$$

où :

- U est la tension appliquée;
- U_e est la chute de tension aux électrodes telle que :

$$U_{e_DC} = U_a + U_k \text{ et } U_{e_AC} = 0 \quad \text{E2.7}$$

avec U_a la chute anodique, U_k la chute cathodique et I le courant de fuite.

- $R_{(x)}$ représente la portion de la couche polluante parcourue par le courant de fuite.

D'autre part, l'arc électrique en statique est caractérisé par le champ électrique longitudinal E_a :

$$E_a = \frac{U_{arc}}{X} = AI^{-n} \quad \text{E2.8}$$

où A et n sont des constantes de l'arc. On déduit l'équation de base d'Obenaus utilisée par les chercheurs jusqu'à nos jours :

$$U = U_e + XAI^{-n} + R_{(X)} \cdot I \quad \text{E2.9}$$

À partir du modèle d'Obenaus, Neumärker a fait l'hypothèse d'une résistance de pollution uniforme par unité de longueur de fuite [Neumarker, 1959]:

$$R_{(X)} = r_x(L - X) \quad \text{E2.10}$$

Par la suite, il a établi l'équation de la tension continue critique U_C et le courant critique I_c nécessaire pour entretenir l'arc en fonction de la distance de fuite :

$$U_c = L \cdot \left(\frac{1}{A^{n+1} \cdot \bar{r}_x^{\frac{n}{n+1}}} \right) \quad \text{E2.11}$$

$$I_c = \left(\frac{A}{\bar{r}_x} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad \text{E2.12}$$

Hampton [Hampton, 1964] a déterminé l'expression du courant critique à partir de l'hypothèse de Hesketh qui propose qu'un arc en série avec une couche polluante mouillée se modifie automatiquement de façon à rendre maximal le courant qu'il tire de la source d'alimentation [Hesketh, 1967]. Son équation se résume ainsi :

$$U_c = \bar{r}_x \cdot L \cdot \left(\frac{A}{\bar{r}_x}\right)^{\frac{1}{n+1}} \quad \text{E2.13}$$

Woodson et McElroy ont représenté l'isolateur comme un disque circulaire en partant de l'hypothèse que la résistance superficielle de la couche de pollution humide peut s'exprimer en fonction du rayon de l'électrode externe et de la résistivité superficielle du polluant [Woodson et McElroy, 1970].

Näche a établi qu'en courant continu, la somme de la chute du potentiel à la cathode et à l'anode était de 830 V [Näche, 1966] tandis que Wilkins soutenait qu'elle était plutôt de 840 V [Wilkins et Al-Baghdadi, 1971].

Dans le cas des isolateurs de grand diamètre, plusieurs arcs peuvent brûler simultanément en parallèle au-dessus d'une bande sèche. Une largeur effective b_{eff} vient se substituer à la largeur réelle correspondant à un arc unique. Erler s'est servi du modèle d'Obenaus pour constater expérimentalement que $b_{eff} = \frac{3L}{2v}$, où v représente le nombre d'arcs brûlants en série dans des conditions critiques [Erler, 1969].

En tension alternative, l'arc s'éteint deux fois par période, soit à chaque passage à zéro de la tension. Le réallumage de l'arc se fait par rupture diélectrique de l'intervalle d'air lorsque la croissance de la tension de rétablissement devient relativement lente et dépasse la rigidité diélectrique de l'intervalle d'air. Ce phénomène a ainsi été proposé par Rizk en négligeant la conductance électrique de l'arc résiduel au moment de l'annulation du courant [Rizk, 1971].

2.2.3.2 Modèles empiriques

Hurley et Limbourn ont utilisé deux tiges distantes d'une longueur X pour produire un arc alternatif en série avec une résistance R_x et ont conclu que la tension de contournement critique, U_c , dépendait de la longueur de fuite et de la distance d'arc minimale de l'isolateur selon l'équation suivante où K est une constante quelconque [Hurley et Limbourn, 1969].

$$U_c = K \cdot X^{2/3} \cdot R_x^{1/3} \quad \text{E2.14}$$

Claverie et Porcheron ont conçu un modèle basé sur la relation entre la tension de réallumage minimale en fonction du courant et sur une expression approchée de la tension d'arc à l'instant où le courant alternatif passe par sa valeur crête [Claverie et Porcheron, 1973]:

$$U_{cx} = \frac{800x}{\sqrt{i}} \quad \text{E2.15}$$

2.3 Études de la performance électrique des isolateurs recouverts de glace

2.3.1 Influence du diamètre

Au meilleur de notre connaissance, il n'existe aucune étude relative à l'influence du diamètre des isolateurs sur leur tension de tenue dans des conditions de givrage atmosphérique. Cependant, il est possible de se faire une idée de l'influence du diamètre en regroupant les résultats obtenus pour trois types d'isolateurs de diamètres différents [Farzaneh et *al.*, 1995, 1997]. Ainsi, en comparant la tension de tenue maximale par mètre de distance d'arc de ces isolateurs, obtenue pour la même épaisseur de glace et les mêmes conditions contrôlées, on remarque, d'après les résultats de la figure 2.10, qu'au fur et à mesure que le diamètre d'un isolateur augmente, la tension de tenue maximale diminue.

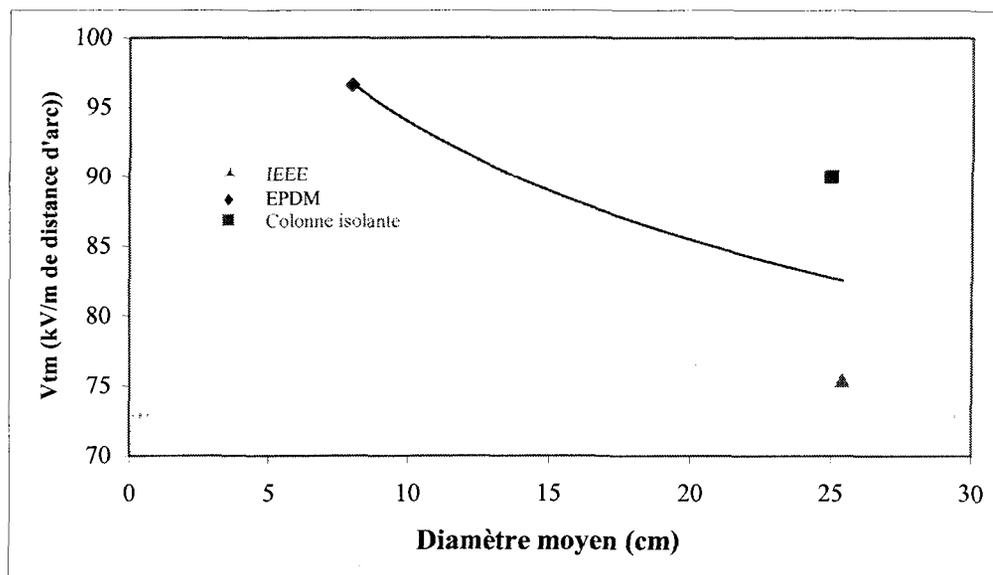


Figure 2.10 : Tension de tenue maximale par mètre de longueur pour 3 types d'isolateurs de diamètres différents et pour une épaisseur de glace de 2 cm

2.3.2 Influence de la distance entre les jupes

La longueur des glaçons est influencée par un certain nombre de paramètres dont la distance entre les jupes qui joue un rôle important dans la détermination de la tension de tenue. En effet, pour une distance inter-jupes faible, les glaçons vont combler l'espace entre deux jupes consécutives plus rapidement, entraînant la formation d'un pont de glace (figure 2.11-a). Dans ce cas, la distance de fuite de l'isolateur est grandement diminuée, ce qui conduit à une forte probabilité d'un contournement [Drapeau et *al.*, 2000]. Dans le cas où la distance inter-jupes est plus importante, l'espace entre deux jupes consécutives n'est pas obstrué par la glace et des intervalles d'air se forment entre les glaçons et les jupes (figure 2.11-b). Dans ces conditions, la distance de fuite de l'isolateur est alors plus importante que dans le cas où un pont de glace est créé.

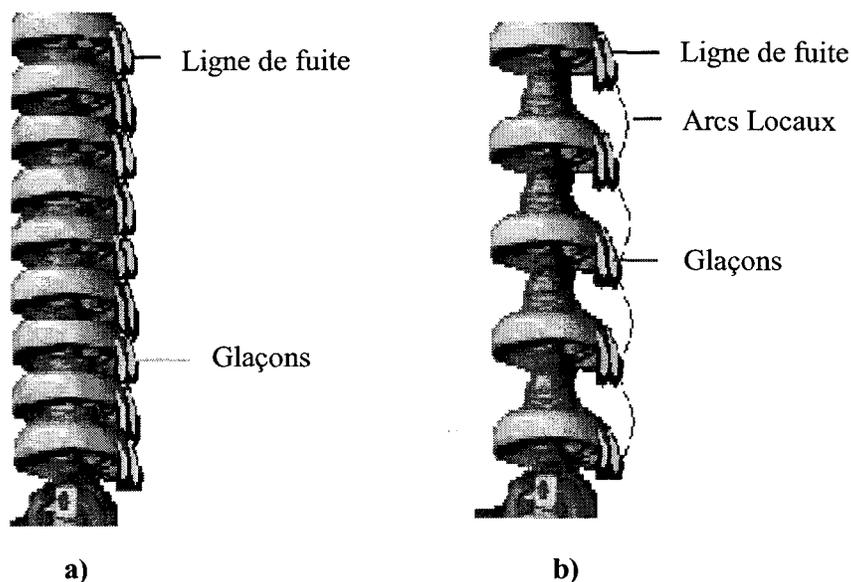


Figure 2.11 : Effet de la longueur des glaçons sur la distance de fuite

Or, tout dépendant de la forme de l'isolateur, la tension de tenue peut être linéairement influencée par la longueur de fuite ainsi que par la longueur de la chaîne d'isolateurs [Drapeau et *al.*, 2000] [Kannus et Verkkonen, 1988]. Kannus a conclu que la tension de contournement est améliorée lorsque la distance entre les jupes est grande [Kannus et Verkkonen, 1988]. La raison est que les glaçons formés se situent en moyenne sur une distance éloignée par rapport aux autres jupes. Ainsi, cela diminue les décharges et la possibilité d'un contournement. C. L. Phan et H. Matsuo ont trouvé que la tension de tenue varie linéairement en fonction de la distance de fuite [Phan et Matsuo, 1995]. Fujurama et al. ont rapporté que la tension de tenue des isolateurs recouverts de glace diminue avec la longueur des glaçons [Fujurama et *al.*, 1975]. Lorsque les glaçons formaient un pont entre les jupes, la tension de tenue était 60 % plus basse que celle obtenue avec des glaçons plus courts. Les études en présence de glace, réalisées à l'UQAC [Farzaneh et Kiernicki, 1995], ont montré que la tension de tenue augmente avec la distance d'arc (figure 2.12) impliquant une variation en fonction de la ligne de fuite.

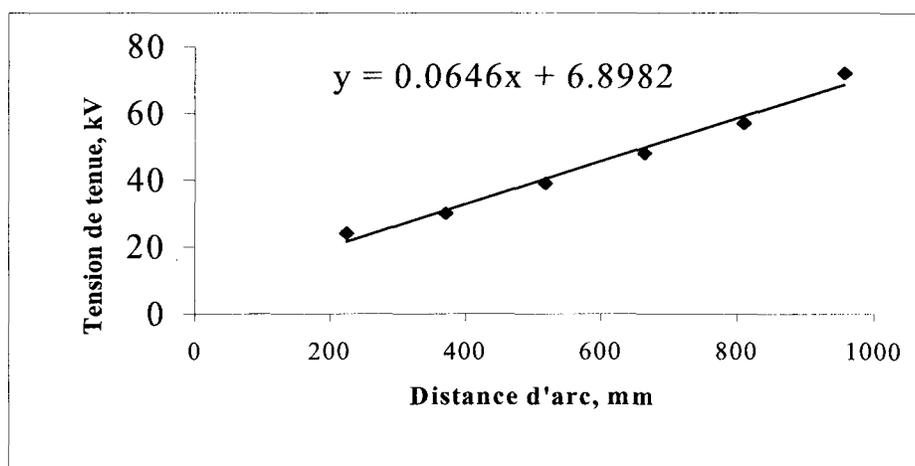


Figure 2.12 : Tension de tenue en fonction de la distance d'arc [Farzaneh et Kiernicki, 1995]

2.3.3 Modèles mathématiques

Bui s'est servi du modèle d'Obenaus en introduisant la glace comme couche de pollution et a établi un modèle sur une surface givrée (figure 2.13) [Bui *et al.*, 1984].

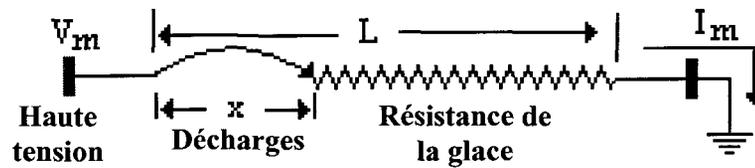


Figure 2.13 : Modèle électrique de décharge sur une surface givrée

Le circuit, alimenté par une tension V_m , est formé d'un arc électrique de longueur x en série avec une couche résiduelle de glace caractérisée par sa résistance $R(x)$. En tout temps, la tension V_m correspond à la formule suivante :

$$V_m = V_e + V_{arc} + V_g \quad \text{E2.16}$$

où :

- V_e est la chute de tension aux électrodes,
- V_{arc} la tension d'entretien de l'arc qui est donnée par :

$$V_{arc} = A x I^{-n} \quad \text{E2.17}$$

où A et n sont les constantes de l'arc et I le courant de fuite.

- V_g est la tension aux bornes de la résistance de la couche de glace résiduelle, donnée par :

$$V_g = R(x) I \quad \text{E2.18}$$

avec $R(x)$ la résistance de la couche résiduelle de glace.

Quant aux isolateurs recouverts de glace, la résistance de la glace est difficile à calculer en raison des formes complexes des isolateurs. Ainsi, pour contourner ce problème, une forme géométrique triangulaire a été utilisée dans un premier temps par les chercheurs de la CIGELE [Farzaneh et *al.*, janvier 1997] afin de diminuer la complexité des mesures (figure 2.14).

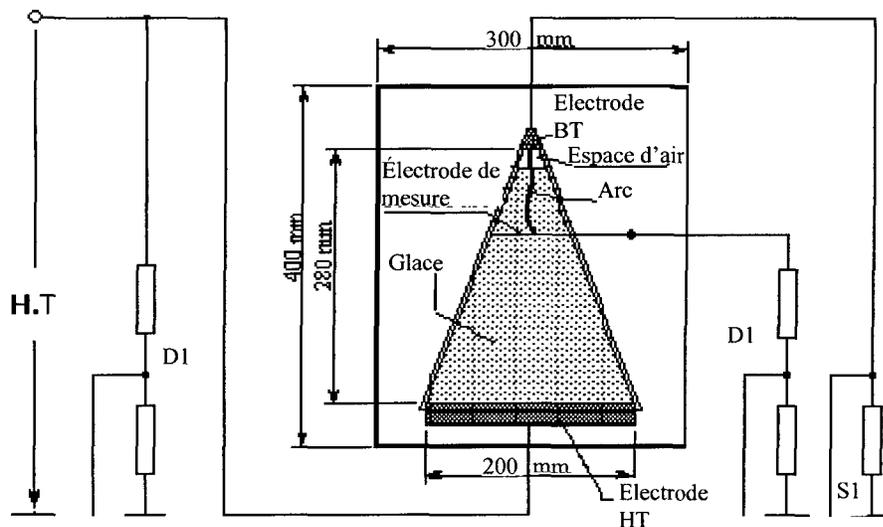


Figure 2.14 : Modèle géométrique utilisé pour calculer la résistance de la glace [Farzaneh et *al.*, janvier 1997]

Le modèle mathématique tient compte des constantes d'arc A et n qui ont été déterminées expérimentalement ainsi que des constantes de réallumage de l'arc k et b pour une tension alternative. Ce modèle est défini par les équations suivantes :

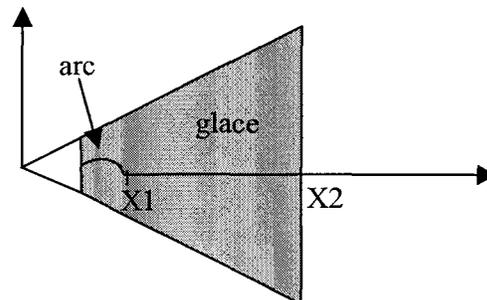
$$V_{im} = Ax \left(\frac{Kx}{V_m} \right)^{-n} + R(x) \left(\frac{Kx}{V_m} \right)^{\frac{1}{b}} \quad \text{E2.19}$$

$$V_{im} = \frac{kx}{I_m^b} \quad \text{E2.20}$$

où :

- V_{im} est la tension appliquée;
- x est la longueur de décharge;
- $R(x)$ est la résistance de la glace, calculée à partir de la conductivité surfacique de la glace, γ_e , qui a été déterminée pour différentes conditions de givrage à l'aide du modèle triangulaire présenté à la figure 2.14.

$$R(x) = \int_{x_1}^{x_2} \frac{3 \cdot 10^6}{2 \cdot \gamma_e} dx$$



Lorsqu'il s'agit d'un isolateur recouvert de glace, le phénomène de contournement est plus complexe. En effet, la forme de l'isolateur recouvert de glace nécessite des études approfondies sur la formation et l'accrétion des gouttelettes d'eau à la surface de l'isolateur. Ainsi, pour tenter d'appliquer le modèle mathématique à des isolateurs réels, la forme de la glace accumulée sur l'isolateur a alors été simplifiée à une moitié d'un cylindre rectangulaire de longueur L et de largeur W (figure 2.15). L'application de cette méthode est justifiée par le fait que la glace s'accumule généralement sur la moitié de l'isolateur qui est exposée aux précipitations verglaçantes (figure 2.15).

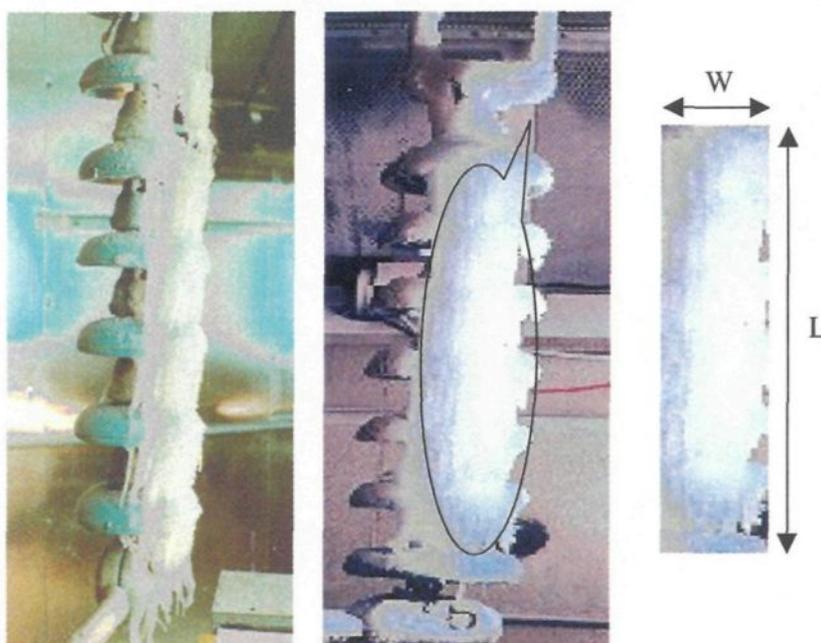


Figure 2.15 : Aspect visuel d'un dépôt de 2 cm de glace sur un isolateur IEEE

La résistance $R(x)$ peut alors être calculée à partir de ce modèle cylindrique du dépôt de glace en utilisant l'équation suivante [Farzaneh et *al.*, 1997] :

$$R(x) = \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L-x)}{W} + \ln\left(\frac{W}{2\pi r_0}\right) \right] \quad \text{E2.21}$$

où :

- γ_e est la conductivité de surface, exprimée en μS , donnée par l'équation suivante [Farzaneh et *al.*, 1997] :

$$\gamma_e = 0.0675 \sigma + 2.45 \quad \text{E2.22}$$

avec σ la conductivité de l'eau d'accumulation exprimée en $\mu S/cm$ à 20°C.

- r_0 , le rayon de courbure de l'arc au point de contact avec la surface de la glace.

Le rayon r_0 a été calculé expérimentalement pour le modèle triangulaire et a été évalué jusqu'à deux fois plus grand pour le modèle cylindrique [Farzaneh et Zhang, 1998].

$$r_0 = \sqrt{\frac{I}{\pi d}} \quad \text{E2.23}$$

avec d la densité du courant.

Ensuite, la valeur de $R(x)$ a été introduite dans l'équation (E2.19) de la tension de l'arc pour arriver à V_{tm} , la valeur prédite de la tension de contournement qui est donnée par :

$$V_{tm} = AxI^{-n} + \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L-x)}{W} + \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] \cdot I \quad \text{E2.24}$$

L'équation (E2.24) a la forme d'une parabole qui passe par un minimum correspondant au courant maximal I_{max} (figure 2.16) :

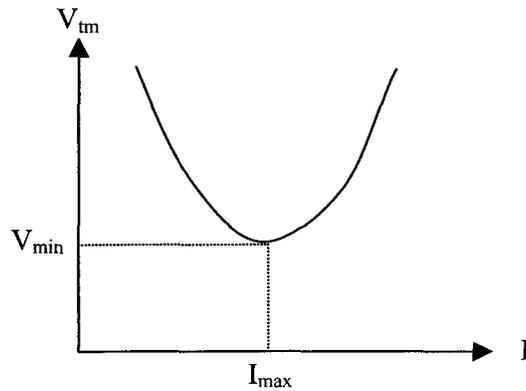


Figure 2.16 : Courbe de l'équation de la tension de tenue en fonction du courant de fuite

En utilisant l'équation de réallumage de l'arc (E2.20), on peut déduire l'équation de la tension de tenue alternative en fonction de la distance d'arc (figure 2.17) :

$$V_{tm} = Ax \left(\frac{kx}{V_{tm}} \right)^{-n} + \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L-x)}{W} + \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] \left(\frac{kx}{V_{tm}} \right)^{\frac{1}{b}} \quad \text{E2.24}$$

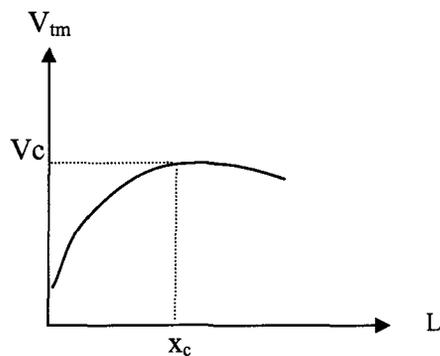


Figure 2.17 : Courbe de l'équation de la tension de tenue en fonction de la distance de l'arc

Une série de tests expérimentaux sur une chaîne d'isolateurs a permis de conclure une concordance remarquable avec les valeurs théoriques (figure 2.18) [Farzaneh et *al.*, Janvier 1997].

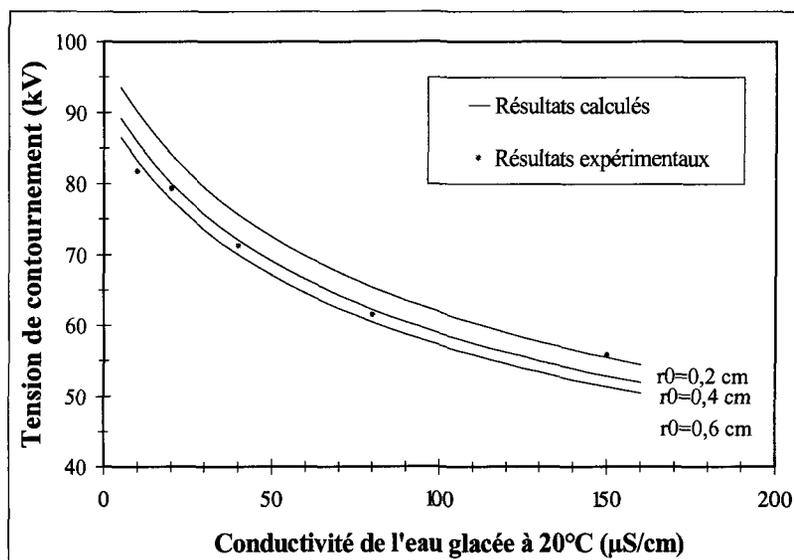


Figure 2.18 : Résultats calculés et résultats expérimentaux de la tension de contournement d'une chaîne de 5 isolateurs IEEE [Farzaneh et *al.*, Janvier 1997]

Le modèle développé est valable pour des longueurs d'isolateurs ne dépassant pas 2 m. Au-delà de 2 m, des erreurs entrent en jeu, dû probablement à l'équation de réallumage de l'arc qui a été établie à l'aide du modèle rectangulaire et qui a été adaptée pour les tests sur les isolateurs réels en présence de glace [Farzaneh et *al.*, avril 2000]. Or, lorsqu'il s'agit de la glace, l'arc s'établit dans les intervalles d'air et provoque la fonte d'une partie de la glace et l'augmentation de la longueur d'arc.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la problématique de la pollution et du givrage atmosphérique des isolateurs. Ces contraintes sont reconnues comme étant les facteurs majeurs à l'origine des défauts enregistrés sur les lignes aériennes, et apparaissent ainsi comme des facteurs de très grande importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. Nous avons présenté et discuté quelques modèles mathématiques visant à prédire le comportement des isolateurs sous des conditions de pollution ou de givrage atmosphérique.

En dépit de spectaculaires percées de recherche, il reste encore plusieurs aspects à explorer pour établir des liens entre les multiples facteurs intervenant dans les mécanismes qui y sont impliqués. Soulignons ici que la forme des isolateurs actuels ainsi que les matériaux qui les recouvrent sont conçus essentiellement en fonction de la pluie et de la pollution atmosphérique sans tenir compte de la glace et de la neige. Dans ce contexte, l'amélioration de la connaissance de l'influence des caractéristiques

physiques des isolateurs sur leur performance électrique dans les conditions de glace est nécessaire si on veut augmenter la fiabilité du transport d'énergie.

Les approches, à la fois théoriques et expérimentales, sont requises pour :

- La mise en place ou l'amélioration d'outils numériques pour la prédiction des tensions critiques de contournement;
- L'amélioration de la conception des isolateurs destinés à des applications dans des réseaux de transport d'énergie électrique de régions froides et/ou à forte pollution atmosphérique.

CHAPITRE 3

ÉQUIPEMENTS ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

CHAPITRE 3

ÉQUIPEMENTS ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

3.1 Introduction

Tout dépendant de la forme et de la géométrie de l'isolateur, on peut trouver certaines contraintes et caractéristiques qui diffèrent d'un isolateur à l'autre et varient d'une condition climatique à une autre. Cela rend le problème assez complexe si on veut étudier, d'une façon générale, le comportement des isolateurs soumis à une tension électrique. Pour simplifier le problème, les chercheurs ont identifié les contraintes les plus sévères tout en gardant à l'esprit les possibilités offertes par les laboratoires d'essais. En effet, pour tester en laboratoire une chaîne d'isolateurs de plus de 3 mètres de hauteur, une chambre climatique de 9 mètres de hauteur et un transformateur dont la puissance est adaptée en conséquence sont alors nécessaires, ce qui demande une infrastructure très spécialisée et peu répandue. Ces essais peuvent aussi être réalisés sur les sites naturels, mais cela requiert des essais longs et fastidieux puisqu'ils deviennent tributaires des conditions climatiques qui ne sont plus contrôlables. Dans certains cas, plusieurs années étaient nécessaires pour pouvoir comparer valablement les performances de ces isolateurs sous pollution [LeRoy et Cie, 1984]. Ainsi, les différentes méthodes d'essais proposées dans les laboratoires sont indispensables afin que les chercheurs soient capables de contrôler plusieurs contraintes électriques (la

variation de la tension appliquée et la limitation du courant de fuite), mécaniques (le poids des isolateurs et l'emplacement optimal) ainsi que climatiques (la température ambiante, le type de glace déposée et l'humidité de l'environnement). Mais le problème n'est pas si simple; certaines conditions diffèrent d'un jour à l'autre, comme l'humidité de la chambre climatique, la purification de l'air ambiant et le point de rosée. Si la conductivité de l'eau de congélation est légèrement différente d'un test à l'autre, les intervalles d'air entre les glaçons et les jupes ne se forment pas tout le temps au même endroit, ce qui cause une distribution différente du gradient de la tension appliquée. Ainsi, la tension qui a provoqué un contournement pour un test donné, contribue à une tenue pour un autre test ayant les mêmes paramètres. Pour confirmer la répétitivité des tests, il faut donc s'assurer que les conditions initiales soient identiques et que le dépôt de glace accumulé présente les mêmes caractéristiques physiques durant tous les tests.

3.2 Équipements

3.2.1 Chambre climatique

La chambre climatique du laboratoire de haute tension et de givrage atmosphérique de la CIGELE a été mise à jour depuis quelques années. L'isolation des parois a été renforcée, les purificateurs d'air ont été rénovés et les dimensions ont été agrandies (figure 3.1). La chambre est refroidie à l'aide d'une paire de compresseurs frigorifiques dont la capacité est de 316,5 kJ/min. La température peut atteindre $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ et est contrôlée par un stabilisateur numérique agissant à une précision de $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. La glace y est formée à partir des gouttelettes d'eau produites par le système d'arrosage et portée

d'arrosage et portée jusqu'à l'isolateur à l'aide d'un groupe de huit ventilateurs placés en venturi [Farzaneh. et. Kiernicki, mars/avril 1995] . Le système de haute tension présenté à la figure 3.1, se caractérise par son transformateur *H.T.* (0,6/120 kV), 240 kVA. La tension est régulée à 3,9 kV/s à l'aide d'un système régulateur de type BRENTFORD.

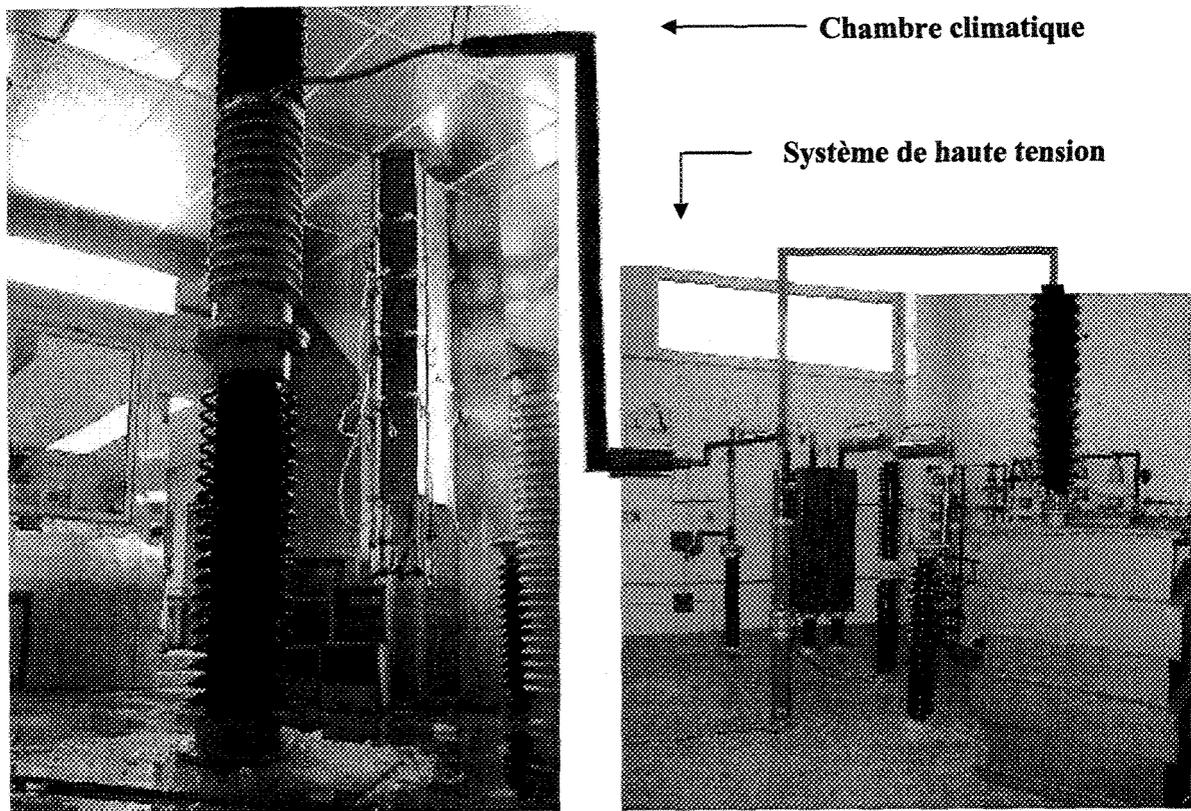


Figure 3.1 : Installations

3.2.2 Isolateur testé

Un seul type d'isolateur, soit le IEEE standard, a été utilisé pour effectuer les tests de la présente étude (figure 3.2). Chaque unité d'isolateurs comprend une partie isolante entre deux armatures servant à l'accrochage. Sa résistance mécanique est de 87 kN, son diamètre est de 24,5 cm et la distance entre les jupes est de 14,6 cm. La ligne de fuite a été mesurée à 30,5 cm par unité et la distance d'arc est de 22,5 cm par unité, ce qui correspond à 135 cm pour une chaîne de 6 isolateurs. La raison d'utilisation de ce type d'isolateur est d'abord son grand diamètre qui nous donne une certaine possibilité pour varier la largeur de glace accumulée, ainsi que sa flexibilité qui nous permet de varier la longueur des glaçons entre les jupes. De plus, ce type d'isolateurs est largement utilisé sur les lignes de transport d'énergie électrique en raison de sa résistance mécanique, de sa rigidité et de sa flexibilité. De plus, on peut ajouter autant d'unités désirées dans une chaîne d'isolateurs en les installant verticalement, horizontalement ou en V, selon le besoin.

Quant à la simulation mathématique décrite dans le modèle (équation E2.2), on a suivi le concept suivant : l'accumulation de la glace dans la chambre froide se forme par l'accrétion des gouttelettes d'eau surfondues qui gèlent partiellement lors du contact avec l'isolateur [Farzaneh et Kiernicki, 1995]. La surface avant de l'isolateur est complètement couverte de glace, tandis que la surface arrière ne l'est pas. La glace a donc été approximée à une moitié d'un cylindre rectangulaire et la surface a été évaluée à un rectangle de longueur L et de largeur W [Farzaneh et al., 1997] (figure 3.3).

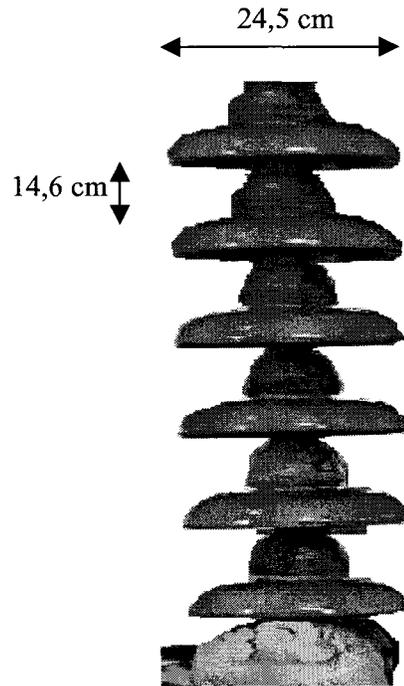


Figure 3.2 : Aspect visuel d'une chaîne de 6 unités d'isolateurs standards IEEE

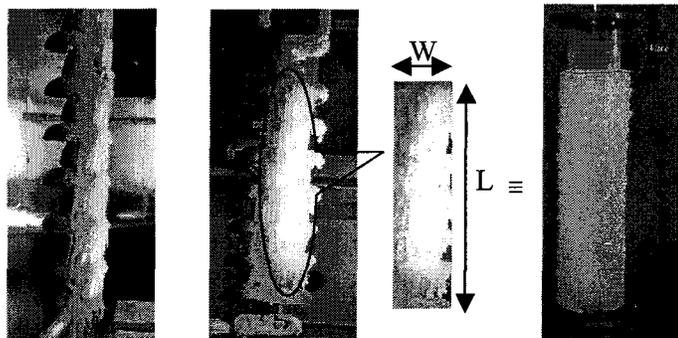


Figure 3.3 : Concept d'utilisation du cylindre pour simuler un isolateur réel

3.3 Méthodologie Expérimentale

3.3.1 Méthode de simulation du diamètre de l'isolateur

Comme nous l'avons déjà mentionné auparavant, pour étudier l'influence du diamètre de l'isolateur sur la tension de tenue, l'idéal aurait été de tester plusieurs isolateurs de même type possédant la même distance entre les jupes, mais ayant des diamètres différents. Devant l'impossibilité de se procurer ce genre d'isolateurs, on a eu recours à la simulation expérimentale. Pour simuler l'effet du diamètre, la largeur du dépôt de glace accumulé sur la chaîne d'isolateurs a été modifiée en suivant le concept suivant : en formant une accumulation à largeur déterminée sur une chaîne d'isolateurs, on obtient l'équivalent d'un isolateur possédant la même largeur et recouvert uniformément de glace. Ainsi, un isolateur IEEE de 24,5 cm de diamètre recouvert de 5 cm de glace peut donc simuler un isolateur de 5 cm de diamètre couvert complètement de glace (figure 3.4).

Pour ce faire, un dispositif approprié a été conçu dans le laboratoire de givrage de la CIGELE (figure 3.5). Ce dispositif, dénommé masque, consiste à bloquer le passage des gouttelettes dirigées vers l'isolateur sauf à l'endroit désiré. Le masque est muni d'un tunnel pour éliminer l'effet de turbulence à la sortie des gouttelettes. Les parois de ce dernier sont chauffées convenablement pour éviter que les gouttelettes ne gèlent à l'intérieur et obstruent le passage.

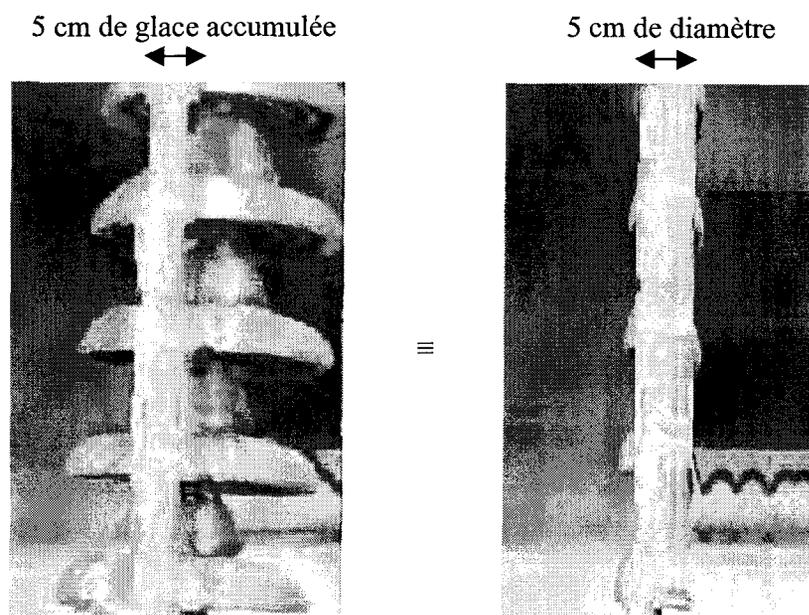


Figure 3.4 : Simulation d'un isolateur de 5 cm de diamètre et recouvert uniformément de glace

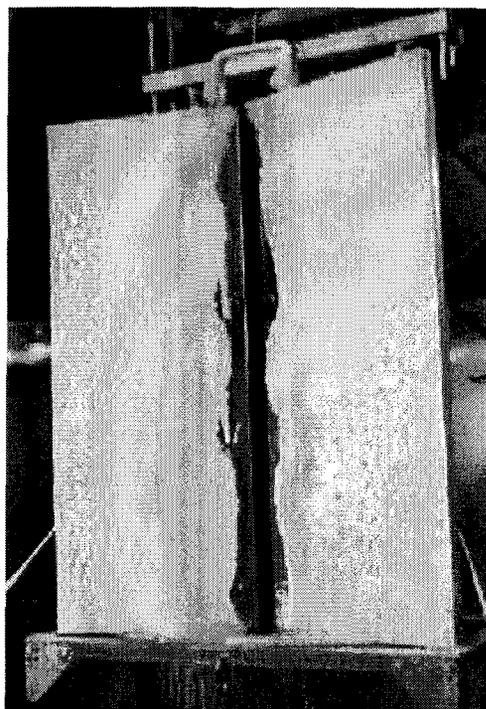


Figure 3.5 : Appareil utilisé pour varier la largeur de la glace accumulée

3.3.2 Méthode de simulation de la répartition des intervalles d'air

Afin d'étudier l'influence de la répartition des intervalles d'air sur la tension de tenue, l'accumulation de la glace a été réalisée sans tension appliquée afin d'obtenir un dépôt de glace uniforme et dépourvu d'intervalles d'air. En effet, en présence de la tension de service, des décharges électriques prennent naissance à l'extrémité des glaçons et entraînent la fonte de ces derniers, entraînant ainsi la formation d'intervalles d'air. En général, ces intervalles d'air sont distribués aléatoirement le long du dépôt de glace recouvrant l'isolateur. Cependant, certains d'entre eux sont situés généralement au voisinage des électrodes, là où le champ électrique est au maximum.

Une fois l'accumulation réalisée, le dépôt de glace est alors découpé à l'aide d'une scie électrique afin de créer artificiellement les intervalles d'air dont la longueur et la position sont entièrement contrôlées le long de l'isolateur (figure 3.6 a). En faisant varier la longueur des intervalles d'air, cela revient à faire varier la distance inter-jupes à l'endroit précis de création des intervalles d'air. Cela permet ainsi de simuler une distance, entre deux jupes successives, différente de la distance normale séparant les autres jupes de la chaîne d'isolateurs qui est alors couverte par le dépôt de glace.

Une fois les intervalles d'air créés aux endroits prédéterminés, on poursuit le test de contournement en appliquant la tension désirée.

3.3.3 Méthode de la correction de l'équation de réallumage de l'arc

Plusieurs cylindres de hauteurs différentes (figure 3.6 b) ont été utilisés pour enregistrer les processus d'extinction et de réallumage de l'arc à leur surface entièrement recouverte de glace. Les résultats ainsi obtenus ont servi à corriger l'équation de réallumage de l'arc utilisée dans le modèle mathématique qui est décrit par l'équation E2.19. La forme simple du cylindre permet de mieux contrôler l'acquisition et l'enregistrement des données durant l'allumage et l'extinction de l'arc.

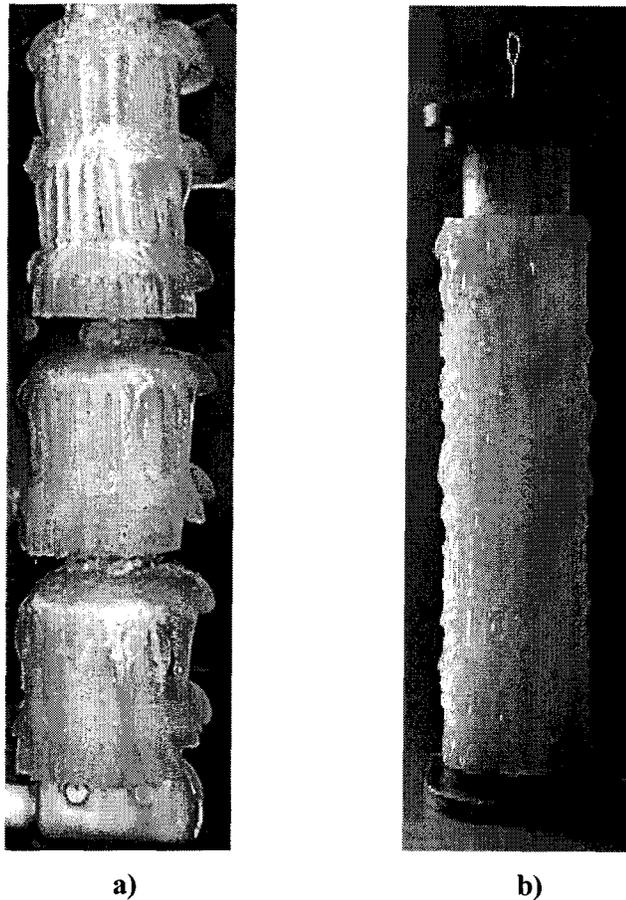


Figure 3.6: Création manuelle des intervalles d'air

3.3.4 Méthode de mesure de la tension de tenue à 50%

La méthode de mesure de la tension de tenue à 50 % a été utilisée pour la totalité des tests présentés dans cette thèse. Basée sur la norme CEI 507 [Commission électrotechnique internationale, 1991], elle consiste à calculer la tension moyenne d'au moins 10 essais utiles. Le premier essai utile est défini comme celui qui donne un résultat différent des précédents (figure 3.7). C'est une méthode statistique qui consiste à trouver la valeur moyenne de tension d'une série de tests dont les tensions varient de ± 3 kV tout dépendant du résultat du test obtenu. Le choix de cette méthode s'explique par le fait que le contournement est un phénomène aléatoire. L'emploi de procédés statistiques pour obtenir des informations significatives à partir des résultats d'essais s'avère nécessaire.

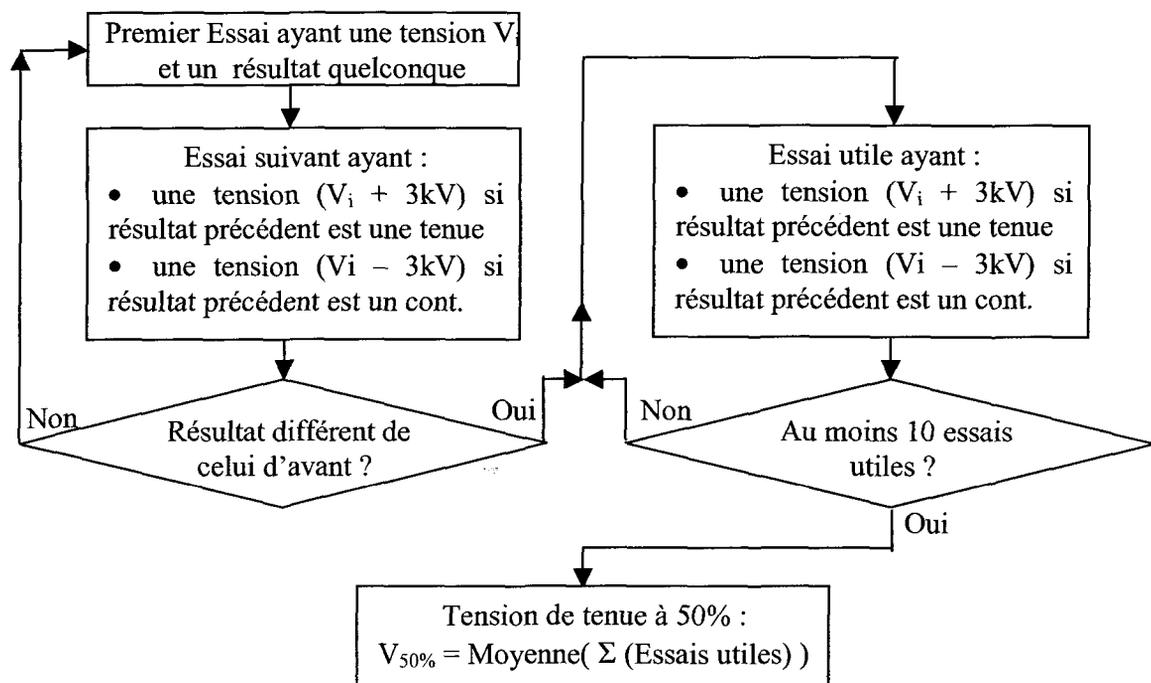


Figure 3.7 : Méthode de mesure de la tension de tenue à 50%

3.3.5 Procédures de tests

3.3.5.1 Accumulation de glace

Parmi les types de glace produites dans les chambres climatiques du laboratoire de recherche sur le givrage de l'UQAC [Farzaneh et Kiernicki, 1995], seule la glace formée en régime humide a été considérée pour les présents tests (tableau 3.1). Ce type de glace s'apparente fortement au verglas qui est produit lors de précipitations verglaçantes. Étant très adhésif, il s'accumule facilement sur la surface des isolateurs et est principalement caractérisé par la formation de glaçons entre les jupes. De part ses caractéristiques et dû au fait que la probabilité d'un contournement est plus élevée avec ce type de glace [Farzaneh et Kiernicki, 1995], il est considéré comme étant le plus dangereux en terme de contournement.

Lors des tests réalisés en laboratoire, l'épaisseur de la glace accumulée sur la chaîne d'isolateurs a été mesurée à l'aide d'un cylindre témoin de 3,8 cm de diamètre tournant à une vitesse de 1 tour / min. Le cylindre est installé à proximité de l'isolateur pendant toute la période d'accumulation (figure 3.8).

| Régime d'accumulation | Température ambiante (°C) | Diamètre moyen des gouttelettes (μm) | Vitesse du vent (m/s) | Teneur en eau (g/m^3) | Conductivité de l'eau ($\mu\text{S/cm}$) |
|-----------------------|---------------------------|---|-----------------------|----------------------------------|--|
| Humide | -12 | 80 | 3,3 | 6,8 | 80 |

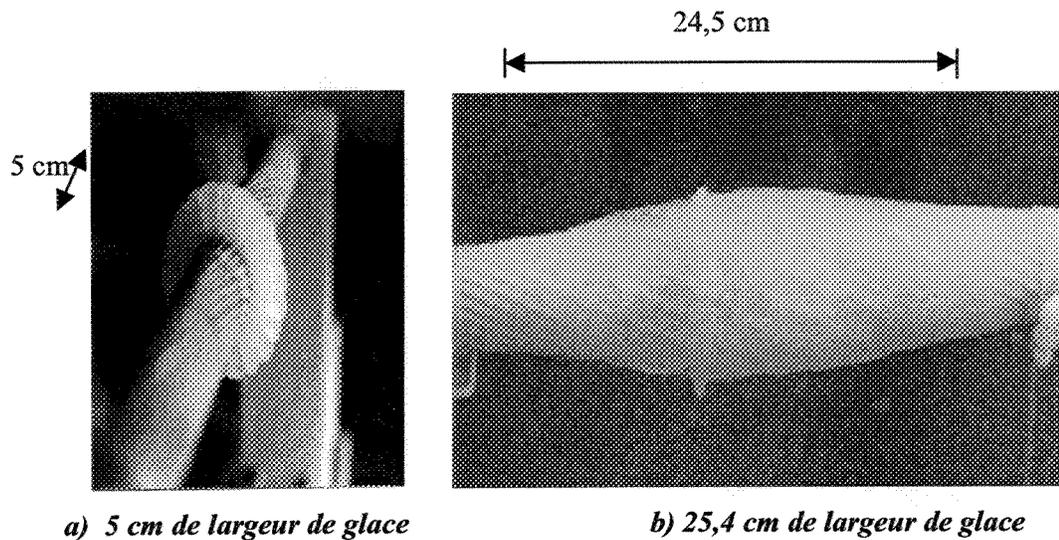


Figure 3.8 : Accumulation de 1,5 cm d'épaisseur de glace sur le cylindre témoin.

3.3.5.2 Transition

À la fin de chaque accumulation de glace, la série d'opérations préparatoires au test de contournement a consisté à examiner en détail le dépôt de glace afin de vérifier la répétitivité des tests réalisés sur la chaîne d'isolateurs. Pour les tests relatifs à l'effet du diamètre, l'uniformité de la largeur du dépôt de glace a été vérifiée à l'aide d'un pied à coulisse et le surplus de glace a été éliminé. Dans les cas où la largeur de glace n'était pas suffisante, le test était alors annulé et répété le lendemain.

Pour les tests réalisés sur les cylindres, le mode préparatoire consistait à installer à la surface de la glace des électrodes d'amorçage d'arc et des électrodes de mesures reliées au système d'acquisition de données. Cette période de transition avait une durée maximale de 3 minutes afin de garder l'état de surface de la glace intacte. Tous les tests ont été accompagnés de prises de photos durant cette période de transition.

3.3.5.3 Tests de contournement

Le test de contournement succède immédiatement à la période de transition. La tension d'essai est appliquée et le système d'acquisition de données est mis en fonction. La durée d'un essai est de 30 minutes s'il n'y a pas eu un contournement. Tous les tests sont archivés, soit par des prises de photos, avant et après le test, ou encore par des enregistrements vidéos. Les fichiers de mesures sont aussi récupérés. La figure 3.9 présente l'aspect visuel d'une accumulation de glace sur une chaîne d'isolateurs standards IEEE (figure 3.9-a), d'un résultat après une tenue (figure 3.9-b) et d'un résultat après un contournement (figure 3.9-c).



a) Après une accumulation b) Après une tenue c) Après un contournement

Figure 3.9 : Aspect visuel des tests de contournement

3.4 Conclusion

La tension de tenue à 50% a été adaptée dans le laboratoire de givrage de l'UQAC et est couramment utilisée dans les essais à haute tension pour déterminer la tension de tenue des isolateurs pollués et recouverts de glace [Farzaneh et *al.*, 1995]. Cette méthode est utilisée dans le but d'évaluer la variation statistique associée à la détermination de la tension de tenue maximale en présence de glace, pour une sévérité donnée, tout en tenant compte de la nature particulière des processus physiques en jeu et de la technique d'essai employée. Toutefois, l'inconvénient associé à l'utilisation d'une telle méthode statistique se caractérise par la nécessité d'un grand nombre d'essais afin d'obtenir des résultats suffisamment pertinents. C'est donc une méthode qui nécessite un plus grand nombre d'essais comparativement à celle de la méthode de tenue maximale. Or, chaque essai nécessite une journée complète de préparation et de test. Il faut donc environ quatre semaines pour accomplir 20 essais en utilisant la méthode de tenue à 50%, ce qui est considérable compte tenu que la méthode de mesure de tenue maximale ne nécessite qu'un minimum de cinq essais, donc environ une semaine de tests.

Durant les essais sur l'effet du diamètre, une tension de service de 50 kV a été appliquée sur la chaîne de cinq unités d'isolateurs standards IEEE. Cela a gêné un peu l'emplacement du masque en avant de la chaîne en raison du fort champ électrique causé par la haute tension. En effet, il a fallu placer ce système à une distance minimale de 30 cm devant la chaîne d'isolateurs. Ceci a créé un genre de turbulence de vent porteur des gouttelettes vers la chaîne causant parfois la formation des petits glaçons se

formant loin de la région étudiée qu'il a fallu par la suite couper manuellement durant la phase de transition afin d'arriver à la largeur de la glace désirée.

Concernant les tests relatifs à l'étude de la répartition des intervalles d'air pour lesquels l'accumulation de glace était réalisée sans tension appliquée, la procédure utilisée lors de la mesure de la tension de tenue à 50% a dû être quelque peu modifiée. En effet, dans certains cas, l'application de la tension d'essai engendrait l'apparition de fortes décharges qui conduisaient à un contournement rapide. Dans d'autres cas, la tension d'essai n'était pas suffisante pour amorcer les décharges et cette dernière devait alors être augmentée jusqu'à l'amorçage des décharges pour ensuite être diminuée jusqu'à sa valeur initiale.

Le fait d'utiliser des cylindres pour simuler une chaîne d'isolateurs facilite beaucoup la tâche des chercheurs et élimine le problème de complexité de la forme géométrique de l'isolateur. Il faut cependant faire attention au choix du matériel de fabrication du cylindre. Certains matériaux, sous l'effet de l'arc, se carbonisent au point de contact de l'arc avec la surface du cylindre. Cette partie détériorée du cylindre devient alors conductrice, modifiant ainsi les propriétés diélectriques de la surface du cylindre qui sont essentielles à la réussite de l'expérience (figure 3.10). Il faut donc examiner la surface du cylindre après chaque test et se procurer également suffisamment de cylindres afin de remplacer les cylindres endommagés.

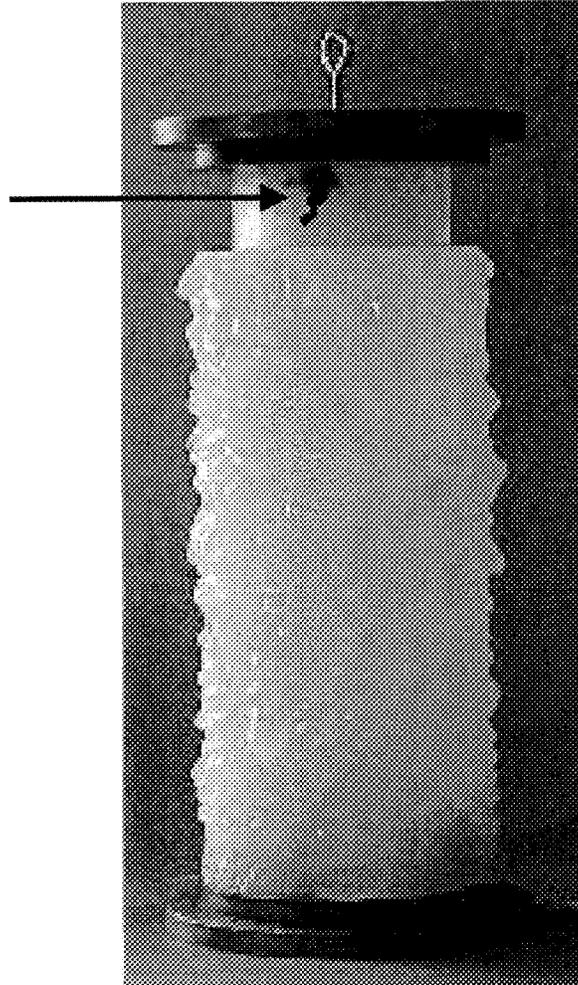


Figure 3.10 : Effet d'un arc sur la surface d'un cylindre.

CHAPITRE 4

ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU DIAMÈTRE DES ISOLATEURS RECOUVERTS DE GLACE SUR LA TENSION DE TENUE

CHAPITRE 4

ÉTUDE DE L'EFFET DU DIAMÈTRE DES ISOLATEURS RECOUVERTS DE GLACE SUR LA TENSION DE TENUE

4.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre consiste à déterminer l'influence du diamètre d'un isolateur électrique recouvert de glace sur la tension de tenue à 50%. Le diamètre de l'isolateur est simulé par la largeur de glace accumulée sur un isolateur réel. Afin de contrôler la largeur de l'accumulation de glace, un dispositif spécial, qui a été dénommé masque et présenté au chapitre précédent (voir figure 3.5), a été utilisé. Ainsi, c'est la largeur contrôlée de l'accumulation obtenue qui simule la variation du diamètre de l'isolateur, puisque le diamètre de l'isolateur sur lequel la glace est accumulée est fixe. Par exemple, une largeur du dépôt de glace de 5 cm sur la chaîne d'isolateurs standards correspond à une accumulation de glace uniforme sur un isolateur de 5 cm de diamètre. Dans ces conditions, quatre diamètres de glace différents ont été testés, 5, 10, 15 et 24,5 cm. Les tensions mesurées dans une série de tests peuvent être des tensions de tenue ou de contournement, la moyenne de ces tensions constitue la tension 50% selon les conditions et les normes décrites au chapitre 3.

4.2 Observations durant l'accumulation

Le tableau 4.1 décrit les conditions expérimentales de l'accumulation de glace réalisée en régime humide sur une chaîne de cinq isolateurs standards IEEE. L'accumulation de glace, d'une épaisseur correspondante à 2 cm de glace mesurée sur le cylindre témoin (figure 3.8) et d'une durée d'une heure et demie, a été réalisée pour une largeur de glace variant entre 5 cm et 15 cm. Pour des largeurs dépassant 15 cm, la durée pour obtenir une épaisseur de 2 cm de glace sur le cylindre témoin est de 2 heures. Cette variation de la durée d'accumulation s'explique par le fait qu'en utilisant le MASQUE, les gouttelettes d'eau sont dirigées par les parois chauffantes de cet appareil (figure 4.1) pour se concentrer en un seul endroit sur la chaîne d'isolateurs. Plus l'ouverture du MASQUE est petite, plus la quantité concentrée est grande. Les glaçons commencent à se former après 45 minutes du début de l'accumulation et évoluent jusqu'à la formation complète d'un pont de glace qui relie la chaîne d'isolateurs. Un effet minime de turbulence cause la création de certains petits glaçons en dehors de la zone de concentration. Ces glaçons ont été coupés manuellement à la fin de chaque accumulation durant la période de transition (décrite au paragraphe 3.5.2). Les décharges minimales pour les faibles largeurs de glace sont devenues de plus en plus fortes avec l'augmentation de la largeur de glace. La figure 4.2 montre l'aspect visuel de la fin d'accumulation pour les quatre diamètres étudiés.

| Tableau 4.1 | | Caractéristiques de l'accumulation de la glace | | | |
|------------------------------|-------------------------|---|---------------------|--|-----------------------|
| Diamètre moyen de glace (cm) | Épaisseur de glace (cm) | Pression d'air (psi) | Débit d'eau (l/min) | Conductivité d'eau ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | Vitesse du vent (m/s) |
| 5 - 15 | 2 | 7,5 | 0,4 | 80 | 3,3 |

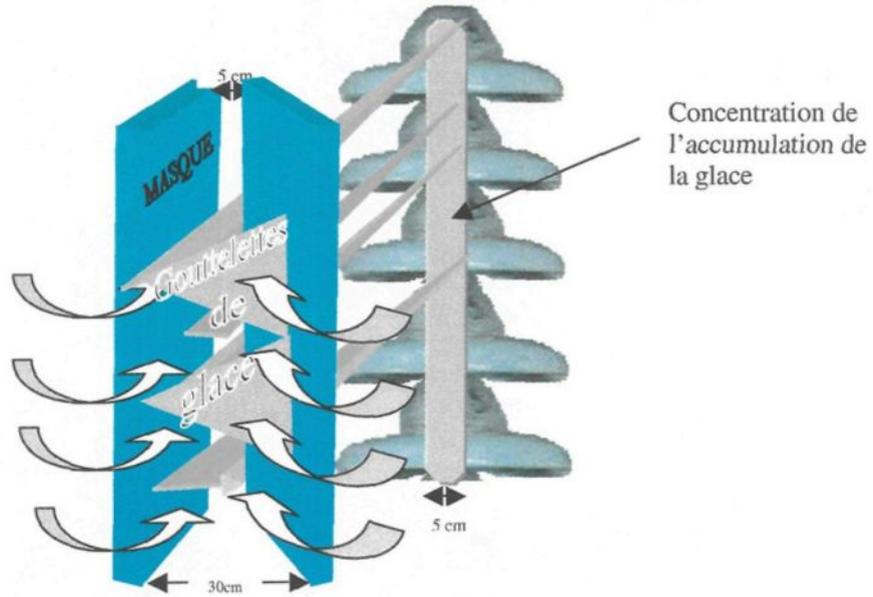


Figure 4.1 : Concentration de l'accumulation au centre du MASQUE

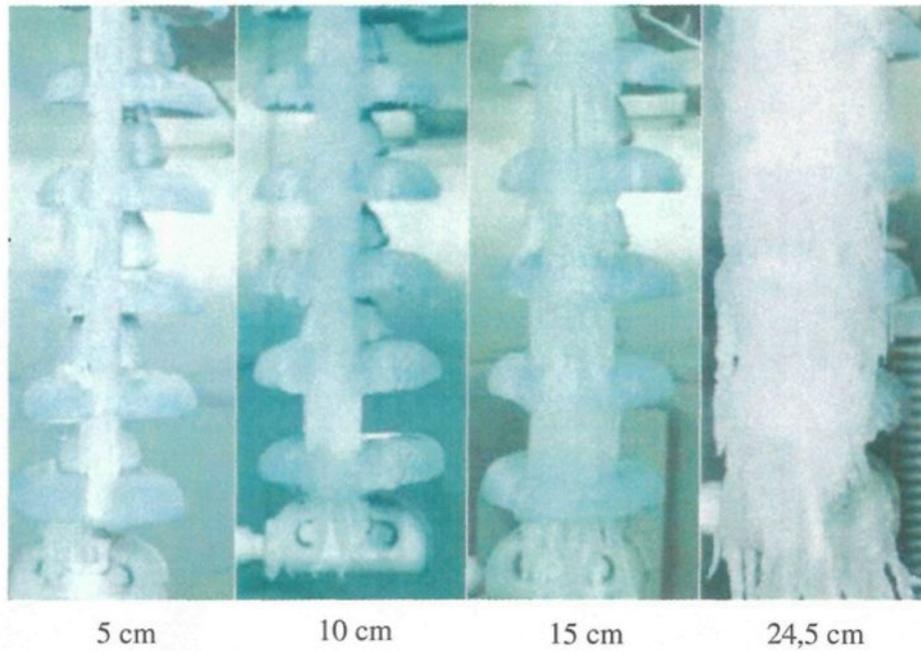


Figure 4.2 : Accumulation de 2 cm de glace de largeurs différentes sur une chaîne d'isolateurs

4.3 Résultats expérimentaux relatifs à l'influence du diamètre

Le tableau 4.2 et la figure 4.3 présentent les résultats de la tension $V_{50\%}$ d'une chaîne de cinq isolateurs (accumulation standard).

Tableau 4.2 Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 24,5 cm de diamètre moyen de glace.

| Essais utiles | Tension de service (kV) | Tension d'essai (kV) | Résultats d'essai | I_{\max} / I_{\min} (A) | $V_{50\%}$ (kV) |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------|---------------------------|-----------------|
| 1 | 50 | 60 | Cont. | — | 57,3 |
| 2 | 50 | 57 | Tenue | 0,54 / -0,55 | |
| 3 | 50 | 60 | Cont. | — | |
| 4 | 50 | 57 | Tenue | 0,49 / -0,47 | |
| 5 | 50 | 60 | Cont. | — | |
| 6 | 50 | 57 | Tenue | 0,13 / -0,20 | |
| 7 | 50 | 60 | Cont. | — | |
| 8 | 50 | 57 | Cont. | 0,15 / -0,15 | |
| 9 | 50 | 54 | Cont. | — | |
| 10 | 50 | 51 | Tenue | 0,12 / -0,12 | |
| <i>Courant moyen</i> | | | | <i>0,286 / -0,29</i> | |

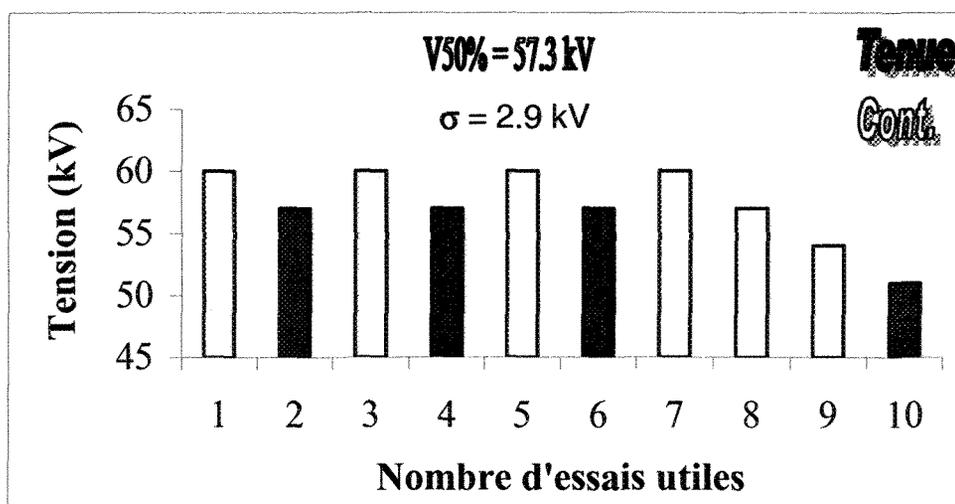


Figure 4.3 : Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 24,5 cm de diamètre moyen de glace

Le tableau 4.3 et la figure 4.4 présentent les résultats de la tension $V_{50\%}$ d'une chaîne de cinq isolateurs ayant une accumulation de 15 cm de diamètre moyen de glace.

Tableau 4.3 Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 15 cm de diamètre moyen de glace.

| Essais utiles | Tension de service (kV) | Tension d'essai (kV) | Résultats d'essai | I_{\max} / I_{\min} (A) | $V_{50\%}$ (kV) |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------|---------------------------|-----------------|
| 1 | 50 | 81 | Tenue | 0,17 / -0,17 | 82,5 |
| 2 | 50 | 84 | Tenue | 0,25 / -0,25 | |
| 3 | 50 | 87 | Cont. | — | |
| 4 | 50 | 84 | Cont. | — | |
| 5 | 50 | 81 | Cont. | — | |
| 6 | 50 | 78 | Tenue | 0,17 / -0,17 | |
| 7 | 50 | 81 | Cont. | — | |
| 8 | 50 | 78 | Tenue | 0,09 / -0,1 | |
| 9 | 50 | 81 | Tenue | 0,13 / -0,13 | |
| 10 | 50 | 84 | Tenue | 0,14 / -0,14 | |
| 11 | 50 | 87 | Tenue | — | |
| <i>Courant moyen</i> | | | | <i>0.16 / -0.16</i> | |

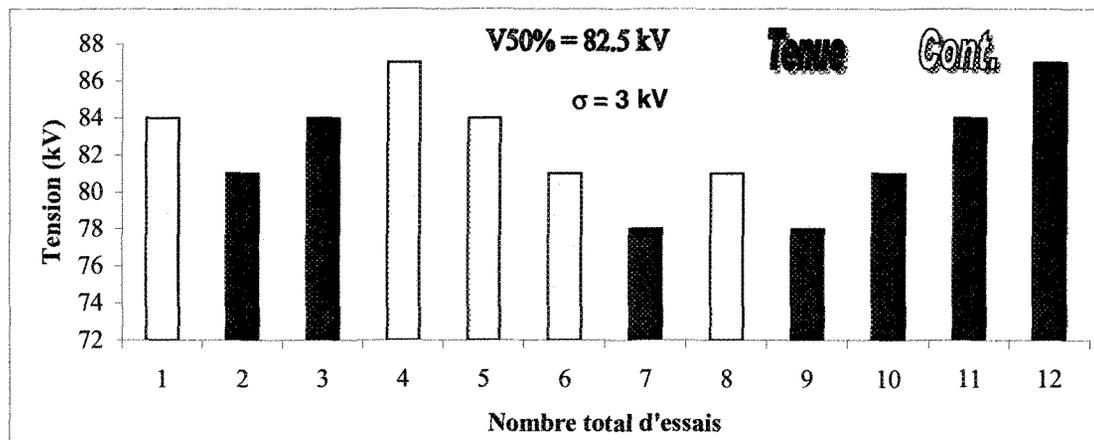
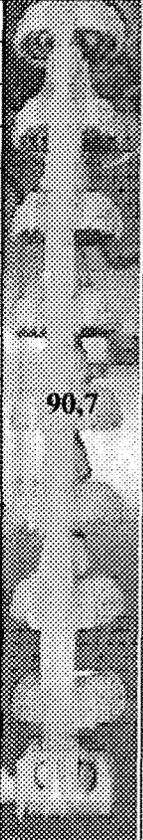


Figure 4.4 : Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 15 cm de diamètre moyen de glace

Les résultats de la tension de tenue à 50% d'une chaîne de cinq isolateurs ayant une accumulation de 10 cm de diamètre moyen de glace sont présentés dans le tableau 4.4 et dans la figure 4.5.

| Tableau 4.4 Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 10 cm de diamètre moyen de glace. | | | | | |
|--|-------------------------|----------------------|-------------------|---------------------------|--|
| Nombre d'essais | Tension de service (kV) | Tension d'essai (kV) | Résultats d'essai | I_{\max} / I_{\min} (A) | $V_{50\%}$ (kV) |
| 1 | 50 | 120 | Cont. | — |  |
| 2 | 50 | 120 | Cont. | — | |
| 3 | 50 | 117 | Cont. | — | |
| 4 | 50 | 114 | Cont. | — | |
| 5 | 50 | 111 | Cont. | — | |
| 6 | 50 | 109 | Cont. | — | |
| 7 | 50 | 106 | Cont. | — | |
| 8 | 50 | 103 | Cont. | — | |
| 9 | 50 | 100 | Cont. | — | |
| 10 | 50 | 97 | Tenue | 0.11 / 0.12 | |
| 11 | 50 | 100 | Cont. | — | |
| 12 | 50 | 97 | Cont. | — | |
| 13 | 50 | 94 | Cont. | — | |
| 14 | 50 | 91 | Cont. | — | |
| 15 | 50 | 88 | Cont. | — | |
| 16 | 50 | 85 | Cont. | — | |
| 17 | 50 | 82 | Tenue | 0,06 / -0,06 | |
| 18 | 50 | 85 | Tenue | 0,05 / -0,05 | |
| 19 | 50 | 88 | Tenue | 0,06 / -0,06 | |
| Courant moyen | | | | 0.07 / -0.07 | |

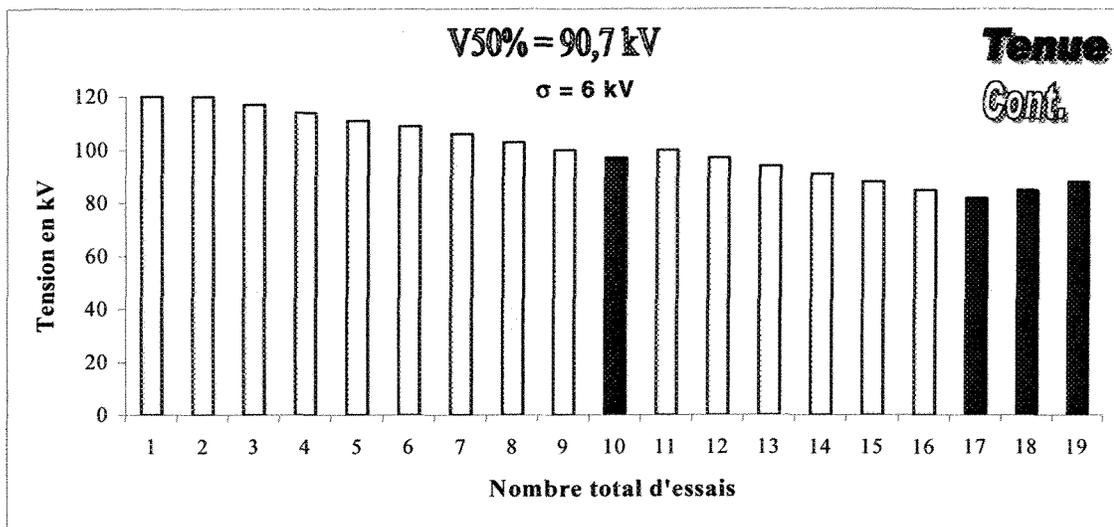


Figure 4.5 : Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 10 cm de diamètre moyen de glace

La figure 4.6 et le tableau 4.5 présentent les résultats de la tension $V_{50\%}$ d'une chaîne de cinq isolateurs ayant une accumulation de 5 cm de diamètre moyen de glace.

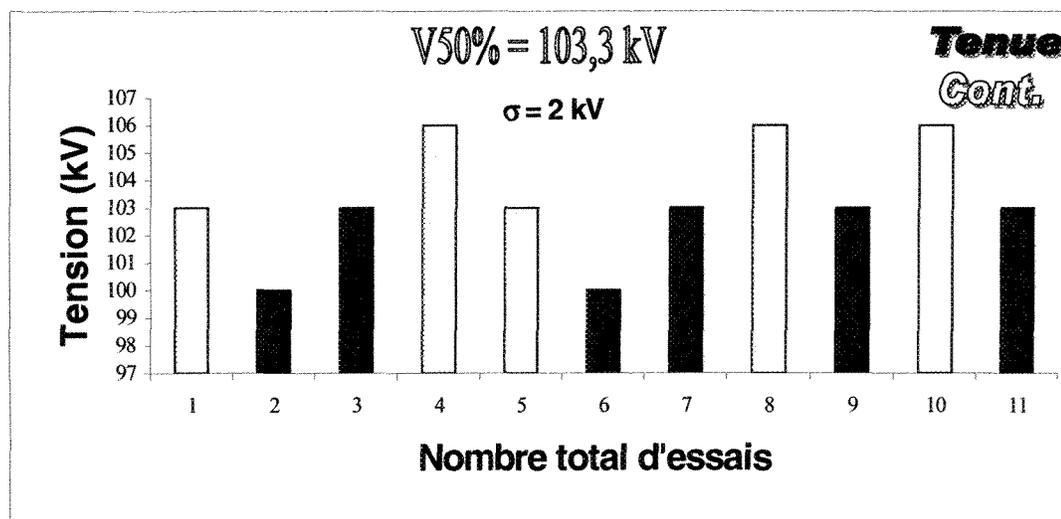


Figure 4.6 : Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 5 cm de diamètre moyen de glace

| Tableau 4.5 Tension de tenue à 50% d'une chaîne de 5 isolateurs ayant une accumulation de 5 cm de diamètre moyen de glace. | | | | | |
|---|-------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|---|
| Nombre d'essais | Tension de service (kV) | Tension d'essai (kV) | Résultats d'essai | I_{max} / I_{min} (A) | $V_{50\%}$ (kV) |
| 1 | 50 | 103 | Cont. | — |  |
| 2 | 50 | 100 | Tenue | 0.05 / -0.05 | |
| 3 | 50 | 103 | Tenue | 0.06 / -0.06 | |
| 4 | 50 | 106 | Cont. | — | |
| 5 | 50 | 103 | Cont. | — | |
| 6 | 50 | 100 | Tenue. | 0.04 / -0.06 | |
| 7 | 50 | 103 | Tenue | 0.07 / -0.04 | |
| 8 | 50 | 106 | Cont. | — | |
| 9 | 50 | 103 | Tenue | 0.05 / -0.05 | |
| 10 | 50 | 106 | Cont. | — | |
| 11 | 50 | 103 | Tenue | 0.03 / -0.05 | |
| Courant moyen | | | | 0.05 / -0.05 | |

4.4 Analyses des résultats

Les figures 4.7 et 4.8 présentent des enveloppes typiques d'enregistrements du courant de fuite durant des tests de contournement pour un diamètre moyen de glace de 15 cm ayant mené respectivement à un contournement (figure 4.7) et à une tenue (figure 4.8). Dans le cas d'un contournement, l'apparition des décharges électriques entraîne une fonte localisée du dépôt de glace qui se traduit par la formation d'un film d'eau conducteur à la surface du dépôt de glace, assurant ainsi la circulation du courant de fuite. L'augmentation de l'intensité du courant de fuite contribue à son tour à l'augmentation de la conductivité du film d'eau. Plus le courant de fuite augmente, plus les décharges sont intenses et plus la fonte du dépôt de glace se développe, conduisant à l'agrandissement des intervalles d'air. Dans le cas où l'augmentation de la valeur du

courant de fuite est beaucoup plus rapide que la fonte du dépôt de glace, les décharges partielles mènent rapidement au contournement (figure 4.7). En d'autres mots, lorsque le courant de fuite dépasse une certaine critique (démontrant une résistance superficielle du dépôt de glace faible) et que le dépôt de glace est encore assez uniforme (avec peu de chutes de morceaux de glace et des intervalles d'air de faible longueur), le contournement peut survenir. La figure 3.9-c illustre bien les propos précédents en présentant l'aspect visuel du dépôt de glace obtenu après un contournement.

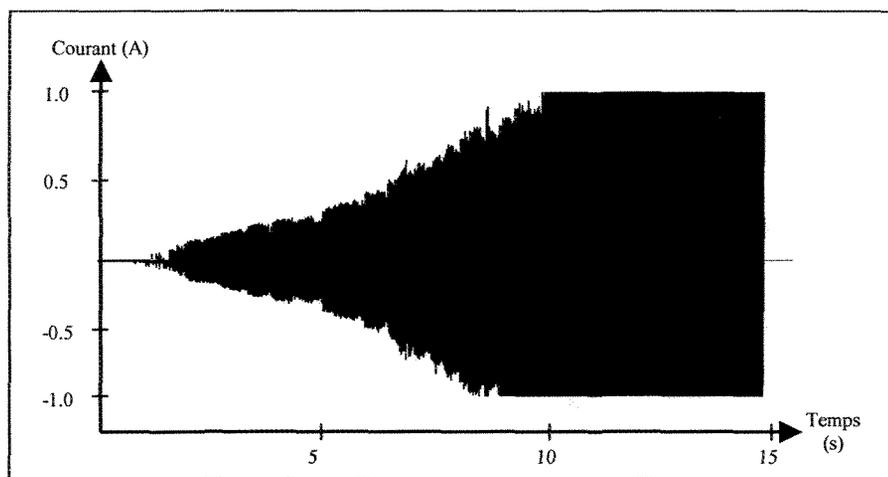


Figure 4.7 : Enregistrement complet d'un test de contournement : cas d'un contournement

Dans le cas d'une tenue, le début de test est généralement identique à un contournement avec l'apparition de décharges électriques, la fonte localisée de la glace et l'augmentation de l'intensité du courant de fuite. Cependant, on note une nette différence dans l'amplitude du courant de fuite qui est alors plus faible que celle obtenue lors d'un contournement. Cette différence provient essentiellement d'une résistance superficielle plus grande ainsi que d'une fonte rapide du dépôt de glace accompagnée de la chute importante de morceaux de glace. Dans ces conditions, un

agrandissement important des intervalles d'air est obtenu, conduisant à l'extinction des décharges et donc à la diminution du courant de fuite. Le contournement est alors évité. L'aspect visuel d'un dépôt de glace après une tenue, présenté à la figure 3.9-b, indique clairement la chute de glace importante ayant mené à la tenue de l'isolateur.

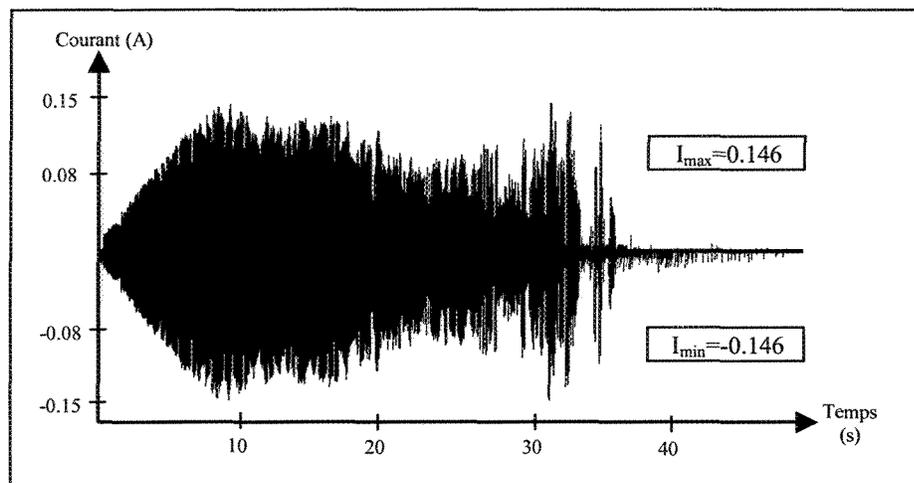


Figure 4.8 : Enregistrement complet d'un test de contournement : cas d'une tenue

La figure 4.9 présente deux cycles typiques d'un test de tenue (figure 4.9-a) et d'un test de contournement (figure 4.9-b) pour un diamètre moyen de glace de 15 cm. Le courant maximal d'une tenue est d'environ 0,15 A. La figure 4.10 présente deux cycles typiques d'un test de tenue (figure 4.10-a) et d'un test de contournement (figure 4.10-b) pour un diamètre moyen de glace de 10 cm. Le courant maximal d'une tenue est d'environ 0,10 A. La figure 4.11 présente un cycle typique d'un test de tenue (figure 4.11-a) et d'un test de contournement (figure 4.11-b) pour un diamètre moyen de glace de 5 cm. Le courant maximal d'une tenue est d'environ 0,05 A.

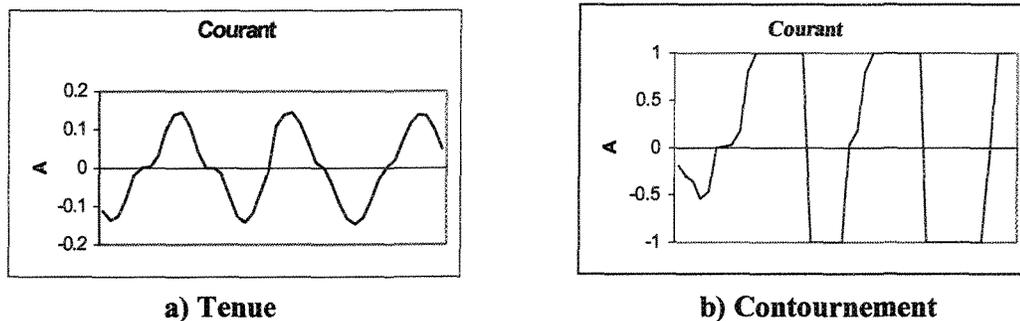


Figure 4.9 : Courants enregistrés pour les accumulations de glace ayant un diamètre moyen de 15 cm et une tension appliquée de 82.5 kV

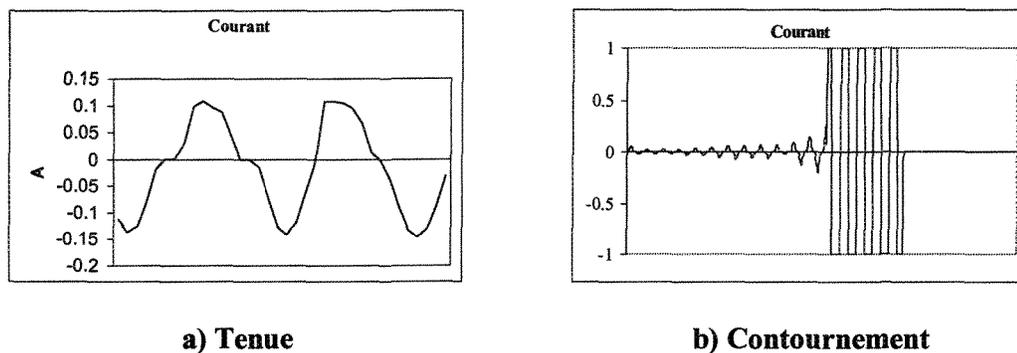


Figure 4.10 : Courants enregistrés pour les accumulations de glace ayant un diamètre moyen de 10 cm et une tension appliquée de 90.7 kV

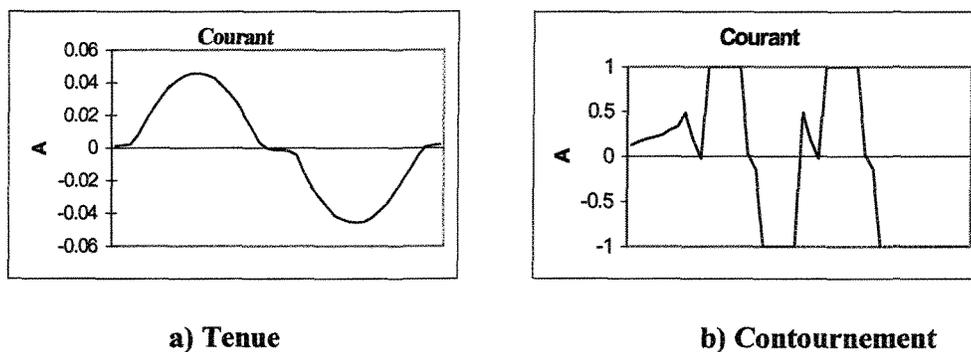


Figure 4.11 : Courants enregistrés pour les accumulations de glace ayant un diamètre moyen de 5 cm et une tension appliquée de 103.3 kV

Pendant les tests, il a été observé qu'au fur et à mesure que le diamètre moyen de glace augmentait, l'intensité des décharges partielles augmentait, indiquant ainsi une valeur de courant de fuite plus importante. Afin de vérifier ces observations, le courant maximum moyen, déterminé à partir de la moyenne des valeurs du courant maximal obtenues lors des tests menant à une tenue pour chaque diamètre de glace, est présenté à la figure 4.12 en fonction du diamètre moyen du dépôt de glace.

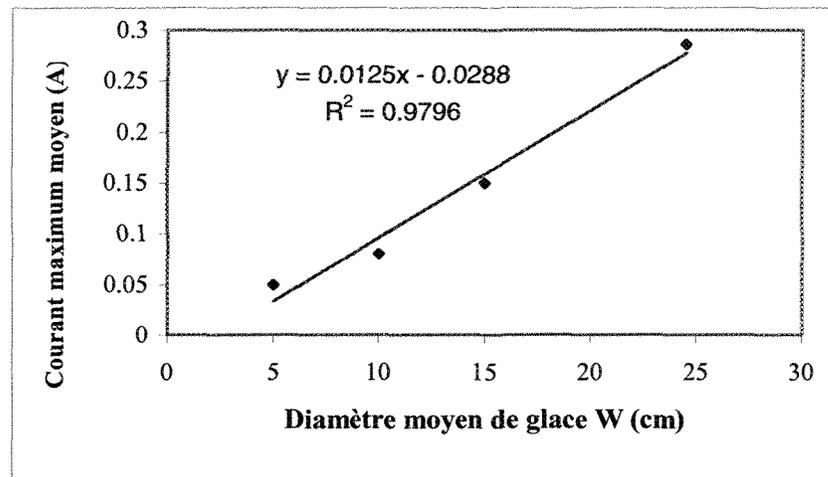


Figure 4.12 : Variation du courant maximum moyen en fonction du diamètre moyen de glace

Le résultat de la figure 4.12 montre que la valeur du courant moyen circulant à la surface du dépôt de glace augmente avec l'augmentation du diamètre moyen de glace. Ce résultat démontre aussi que la résistance moyenne de la surface du dépôt de glace, dans laquelle circule le courant de fuite, diminue lorsque le diamètre moyen de glace augmente, tel que présenté à la figure 4.13. La résistance de surface du dépôt de glace a été déterminée, pour chaque diamètre moyen de glace, en calculant la moyenne des résistances obtenues pour chaque test de tenue en divisant la tension d'essai par le courant maximum moyen présenté à la figure 4.12. Dans ces conditions, il a été

supposé que le courant de fuite est purement résistif, ce qui est le cas généralement lorsque les arcs électriques partiels sont présents le long des intervalles d'air.

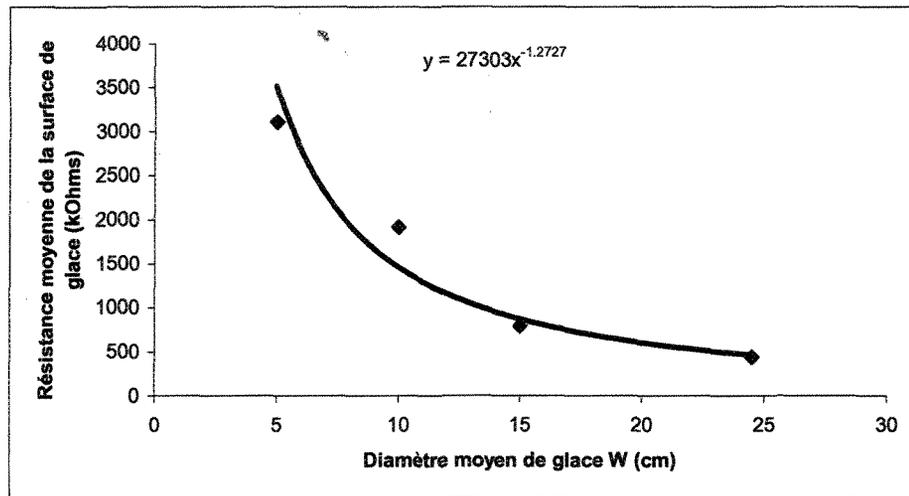


Figure 4.13 : L'influence du diamètre moyen de l'isolateur sur la résistance moyenne de la surface du dépôt de glace.

La tension de tenue à 50% obtenue en fonction du diamètre moyen de l'isolateur peut être représentée par une courbe de puissance dont l'équation est présentée à la figure 4.14..

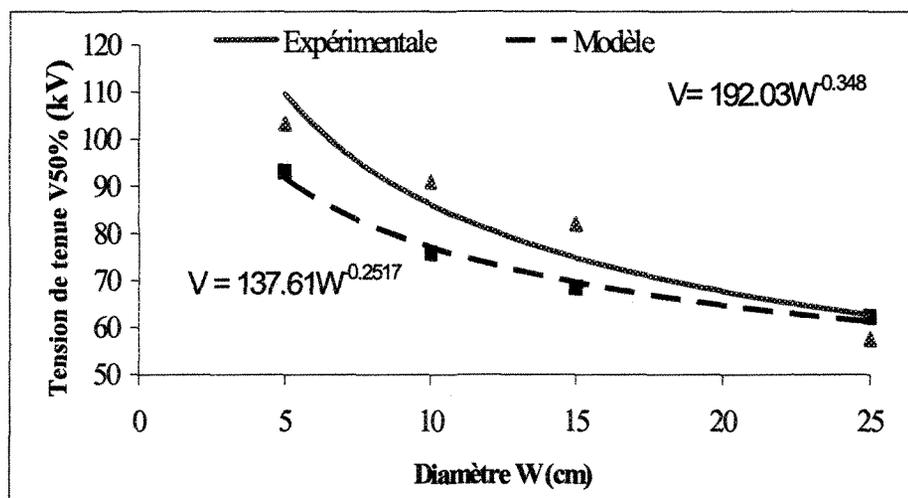


Figure 4.14 : L'influence du diamètre moyen de l'isolateur sur la tension de tenue.

Cette figure présente aussi les résultats calculés à l'aide du modèle mathématique établi.

La diminution de la tension de tenue s'explique par le fait que pour un diamètre d'isolateur plus large, le dépôt de glace présente une résistance de surface plus faible. Cette diminution de la résistance est mise en évidence par l'équation E2.4 et les résultats de la figure 4.13. De plus, l'accumulation de la glace dans la chambre froide se forme par l'accrétion de gouttelettes d'eau surfondues qui gèlent lors d'un contact avec l'isolateur. Tel que présenté au paragraphe 2.3.3 et à la figure 2.15, le dépôt de glace recouvrant la chaîne d'isolateurs peut être approximée à un demi cylindre rectangulaire de longueur L et de largeur W , qui est proportionnel au diamètre moyen de l'isolateur. En observant l'équation E2.21 de la résistance du dépôt de glace décrite dans le modèle mathématique, on remarque que le paramètre W apparaît dans les deux termes de l'équation. Le deuxième terme de l'équation ($\ln(\frac{W}{2r_0})$) est faible et négligeable devant le premier terme $\frac{\pi(L-x)}{W}$ de l'équation E2.21, surtout pour des faibles valeurs de diamètre W , comme le montre la figure 4.15. Ainsi, on peut remarquer que l'équation E2.21 est principalement régit par son premier terme dans lequel W est au dénominateur, démontrant par la même occasion que la résistance du dépôt de glace décroît avec l'augmentation du diamètre de l'isolateur.

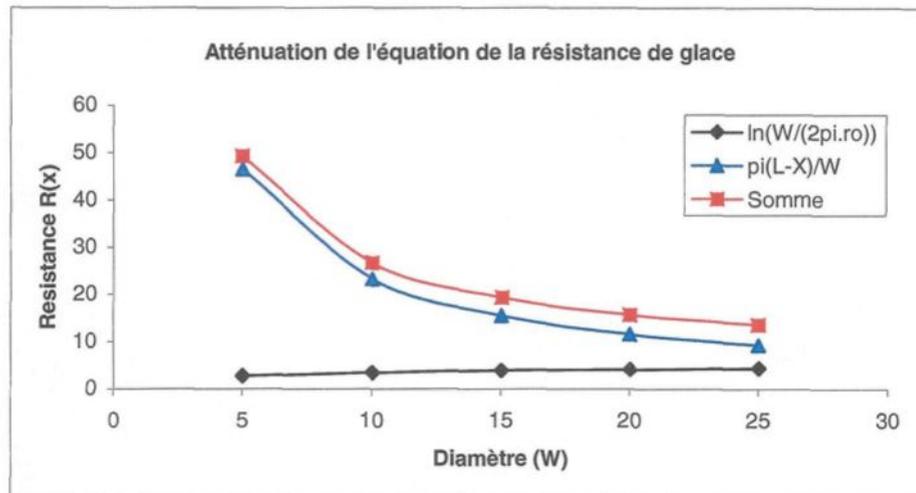


Figure 4.15 : Exemple de calcul de l'ordre de l'équation de la résistance de glace

La détermination de la tension de tenue en fonction du diamètre de l'isolateur recouvert de glace a permis de mettre en évidence la limitation du modèle mathématique actuel de prédiction des contournements. En effet, d'après la figure 4.14, la comparaison des différentes tensions de tenue obtenues expérimentalement avec celles obtenues numériquement à partir de l'équation E2.24, présente des écarts importants au fur et à mesure que le diamètre diminue.

4.5 Conclusion

Le diamètre moyen de l'isolateur a été simulé par une largeur équivalente d'accumulation de glace. L'utilisation d'un MASQUE a permis de simuler des diamètres moyens d'une chaîne d'isolateurs standards IEEE de 5, 10, 15 et 24.5 cm. Ainsi, les résultats portant sur la tension de tenue à 50% en fonction du diamètre moyen de l'isolateur ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'intensité des décharges et le courant de fuite augmente avec l'accroissement du diamètre. De plus, la valeur du courant de fuite varie de façon linéaire en fonction du diamètre moyen de l'isolateur;
- La résistance de la surface de la glace diminue suivant une loi de puissance avec l'augmentation du diamètre. Cela s'explique principalement par l'augmentation du produit de l'épaisseur de glace par la largeur du dépôt de glace. En effet, un diamètre d'isolateur plus large permet une accumulation de glace de plus grande largeur. C'est donc cette largeur qui, placée au dénominateur dans l'expression de la résistance de surface du dépôt de glace, influence la valeur de cette dernière;
- La tension de tenue à 50% diminue, au même titre que la résistance de surface, suivant une loi de puissance avec l'augmentation du diamètre de l'isolateur. En effet, la tension de tenue dépend principalement de la valeur du courant de fuite et de la valeur de la résistance de surface du dépôt de glace. Ainsi, en augmentant le diamètre de l'isolateur, le courant croît linéairement et la résistance diminue suivant une loi de puissance. Il est normal que la tension de tenue suive une loi de variation identique à celle de la résistance;
- La comparaison des résultats numériques et expérimentaux concernant la tension de tenue en fonction de la variation du diamètre montre que des modifications doivent être apportées au modèle mathématique existant afin d'en augmenter sa précision. Ces modifications sont présentées au chapitre 6.

CHAPITRE 5

INFLUENCE DE LA RÉPARTITION DES INTERVALLES D'AIR LE LONG DE
L'ISOLATEUR RECOUVERT DE GLACE SUR LA TENSION DE TENUE

CHAPITRE 5

INFLUENCE DE LA RÉPARTITION DES INTERVALLES D'AIR LE LONG DE L'ISOLATEUR RECOUVERT DE GLACE SUR LA TENSION DE TENUE

5.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre consiste à déterminer l'influence de la répartition des intervalles d'air présents entre les jupes d'une chaîne d'isolateurs recouverte de glace sur la tension de tenue à 50%. Ces intervalles d'air, qui sont les parties de l'isolateur non recouvertes de glace, sont créés pendant la phase d'accumulation de la glace sur l'isolateur. Pendant cette phase, les glaçons se forment entre les jupes de l'isolateur, grandissent et finissent par atteindre le dessus de la jupe suivante. Cependant, à certains endroits le long de l'isolateur, généralement au voisinage des électrodes, des arcs électriques partiels apparaissent à l'extrémité des glaçons avant que ceux-ci n'atteignent la jupe suivante, ce qui entraîne la fonte de ces derniers et donc d'arrêter leur

croissance. La conséquence directe est la création d'intervalles d'air qui subsistent jusqu'à la fin de l'accumulation. De plus, des intervalles d'air peuvent être créés dans le cas où l'espace inter-jupes est plus important. Dans ces conditions et suivant la durée de l'accumulation, les glaçons ne pourront atteindre le dessus de la jupe suivante, empêchant ainsi l'obstruction de l'espace inter-jupes.

Les intervalles d'air jouent un rôle important dans le processus de contournement puisque c'est généralement au niveau de ces derniers qu'apparaissent les arcs électriques partiels qui sont les précurseurs du contournement électrique en plus d'influencer directement la ligne de fuite de l'isolateur glacé (figure 5.1). Ainsi, d'après les observations faites en laboratoire [Farzaneh et *al.*, août/septembre 1995], la position ainsi que la longueur des intervalles d'air, qui peut être modifiée par la chute de parties de glace, peuvent inhiber ou accélérer le processus de contournement.

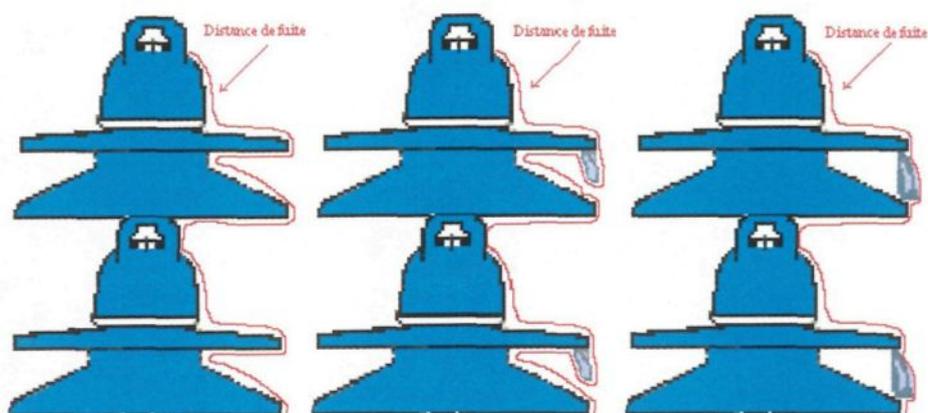


Figure 5.1 : Influence de la longueur des glaçons sur la distance de fuite

L'influence des intervalles d'air sur la tension de tenue des isolateurs recouverts de glace étant un processus mal connu, l'idée qui se présente maintenant est de faire varier la position ainsi que le nombre des intervalles d'air le long de la chaîne d'isolateurs afin d'étudier leur influence sur la tension de tenue. Or, comme la création des intervalles d'air est due aux arcs électriques partiels, qui sont des processus aléatoires au même titre que le contournement, nous avons eu recours à l'expérience et à l'observation durant les tests pour décider de l'endroit où positionner le ou les intervalles d'air le long de l'isolateur. Comme il est difficile de contrôler la position, le nombre et la longueur des intervalles d'air lors des accumulations réalisées sous tension de service, il a été décidé de réaliser les accumulations de glace en l'absence de tension de service. Cette procédure permet ainsi d'obtenir un dépôt de glace uniforme, exempt d'intervalles d'air. Par la suite, il a suffi de découper le dépôt de glace aux endroits choisis afin de créer artificiellement les intervalles d'air désirés. La position, la longueur et le nombre des intervalles d'air créés ont été déterminés à partir des observations faites durant des accumulations de glace réalisées sous tension de service.

Afin d'étudier l'influence de la position et du nombre d'intervalles d'air sur la tension de tenue d'une chaîne de cinq isolateurs standards IEEE, quatre séries de tests ont été réalisés avec différentes longueurs d'intervalles d'air. Le tableau 5.1 illustre les différents intervalles d'air considérés pour chaque série et la figure 5.2 présente l'aspect visuel du dépôt de glace obtenu pour chaque cas.

| Tableau 5.1 | Position et longueur des intervalles d'air le long de la chaîne d'isolateur IEEE pour les différentes séries de tests | | | | | | | |
|-----------------------------|--|----------|---|----------|---|----------|---|---|
| No. série | 1 | 2 | | 3 | | 4 | | |
| No. intervalle d'air | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| Longueur (cm) | 7 | 7 | 4 | 7 | 4 | 7 | 4 | 4 |
| Position No. jupe | 1 | 1 | 2 | 1 | 5 | 1 | 3 | 5 |

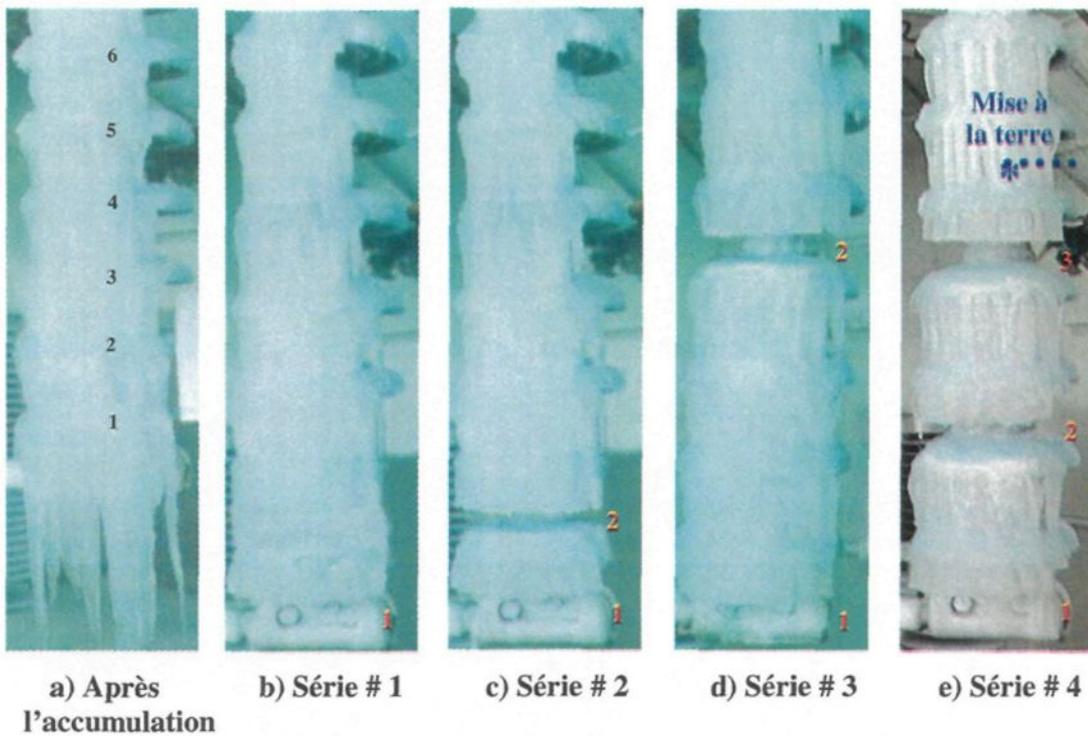


Figure 5.2 : Position des intervalles d'air pour les différentes séries de tests

5.2 Observations générales

Le fait d'accumuler la glace sans tension de service a permis d'obtenir une accumulation de glace presque uniforme le long de la chaîne d'isolateurs mis à part sur les côtés extrêmes des jupes où des glaçons indésirables étaient présents. Ainsi, afin d'uniformiser l'accumulation et obtenir un diamètre fixe de glace, les glaçons indésirables ont été supprimés. Cela a ainsi permis de réaliser des tests sur un isolateur de diamètre fixe, d'après le concept présenté au chapitre 4, et de rendre ces tests répétitifs afin d'obtenir des résultats plus précis, utilisables par la suite pour l'amélioration du modèle mathématique de prédiction des contournements.

D'autre part, le fait d'accumuler la glace hors tension de service présente un autre désavantage lors des tests de contournement. En effet, l'absence d'un film d'eau à la surface de la glace au début des tests empêche l'amorçage des décharges sous la tension d'essai choisie. Pour plusieurs tests, la tension de test a dû être augmentée au-delà de sa valeur de contournement afin d'obtenir l'amorçage des décharges, pour ensuite être baissée immédiatement à sa valeur prédéterminée. Ce phénomène, relatif aux conditions expérimentales du moment, était répétitif dans 80 % des tests de la série # 3.

5.3 Résultats expérimentaux relatifs à la répartition des intervalles d'air

Les résultats de la série # 1 permettant de déterminer la tension de tenue à 50%, pour une chaîne de cinq isolateurs ayant un intervalle d'air de 7 cm entre l'électrode de la haute tension et la jupe # 1, sont présentés dans le tableau 5.2 et à la figure 5.3. De plus, la valeur maximale du courant pour chaque test de tenue a été enregistrée. Ainsi, à partir de ces valeurs de courant, le courant maximum moyen pour chaque série de test a été déterminé en effectuant la moyenne des valeurs maximales du courant de fuite. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.2.

| Tableau 5.2 | | Tension de tenue à 50% de la série # 1 | | | |
|------------------------------|--------------------------------|---|--------------------------|---|-----------------------------------|
| Essais utiles | Tension de service (kV) | Tension d'essai (kV) | Résultats d'essai | I_{max} / I_{min} (A) | $V_{50\%}$ (kV) |
| 1 | 0 | 69 | Cont. | — | 68 |
| 2 | 0 | 66 | Tenue | 0,53 / -0,53 | |
| 3 | 0 | 69 | Cont. | — | |
| 4 | 0 | 66 | Tenue | 0,39 / -0,39 | |
| 5 | 0 | 69 | Cont. | — | |
| 6 | 0 | 66 | Tenue | 0,5 / -0,6 | |
| 7 | 0 | 69 | Tenue | 0,67 / -0,88 | |
| 8 | 0 | 72 | Cont. | — | |
| 9 | 0 | 69 | Cont. | — | |
| 10 | 0 | 66 | Tenue | 0,56 / -0,58 | |
| Courant maximum moyen | | | | 0,53 / -0,6 | |

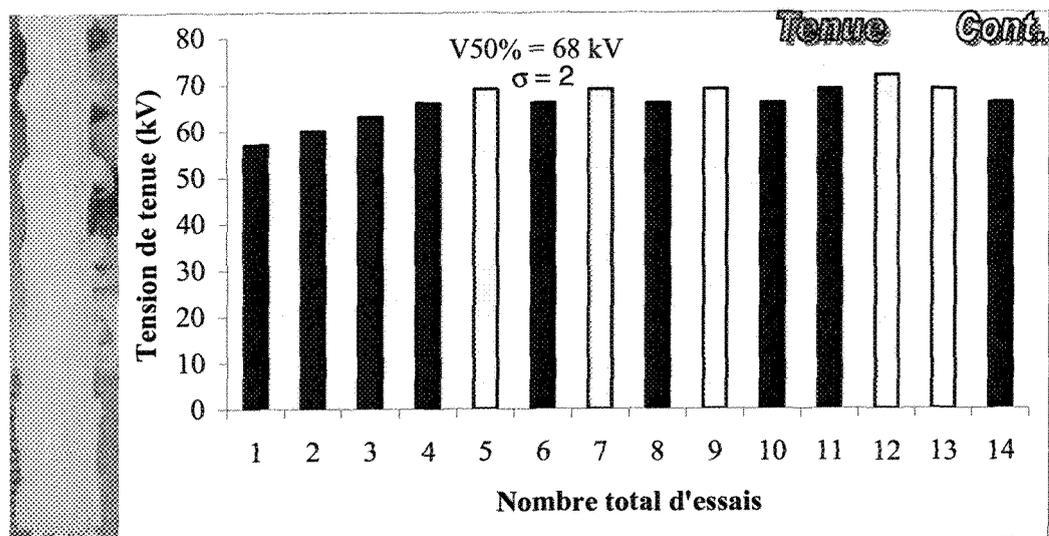


Figure 5.3 : Tension de tenue à 50% de la série # 1

Le tableau 5.3 et la figure 5.4 présentent les résultats de la série # 2 fournissant la tension $V_{50\%}$ d'une chaîne de cinq isolateurs ayant un intervalle d'air de 7 cm entre l'électrode de la haute tension et la jupe # 1, ainsi qu'un intervalle d'air de 4 cm entre la jupe # 1 et la jupe # 2. De même, le courant maximum moyen ainsi que les valeurs maximales du courant sont présentés dans le tableau 5.3.

Tableau 5.3 Tension de tenue à 50% de la série # 2

| Essais utiles | Tension de service (kV) | Tension d'essai (kV) | Résultats d'essai | I_{max} / I_{min} (A) | $V_{50\%}$ (kV) |
|------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|
| 1 | 0 | 69 | Cont. | — | 66 |
| 2 | 0 | 66 | Tenue | 0,42 / -0,42 | |
| 3 | 0 | 69 | Cont. | — | |
| 4 | 0 | 66 | Cont. | — | |
| 5 | 0 | 63 | Tenue | 0,23 / -0,24 | |
| 6 | 0 | 66 | Tenue | 0,22 / -0,21 | |
| 7 | 0 | 69 | Cont. | — | |
| 8 | 0 | 66 | Cont. | — | |
| 9 | 0 | 63 | Tenue | 0,49 / -0,47 | |
| 10 | 0 | 66 | Tenue | 0,67 / -0,65 | |
| <i>Courant maximum moyen</i> | | | | <i>0.41 / -0.4</i> | |

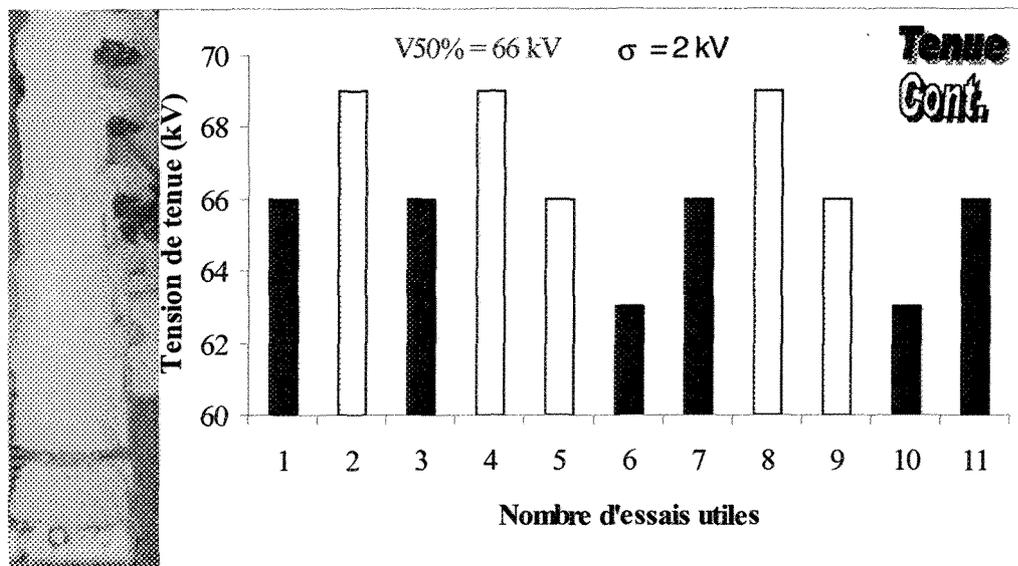


Figure 5.4 : Tension de tenue à 50% de la série # 2

Les résultats de la série # 3 fournissant la tension de tenue à 50%, pour une chaîne de cinq isolateurs ayant un intervalle d'air de 7 cm entre l'électrode de la haute tension et la jupe # 1, ainsi qu'un intervalle d'air de 4 cm entre la jupe # 4 et la jupe # 5, sont illustrés dans le tableau 5.4 et la figure 5.5. De même, le courant maximum moyen ainsi que les valeurs maximales du courant sont présentés dans le tableau 5.4. Cette série est similaire à celle d'une accumulation standard sous tension de service à cause du fait que les intervalles d'air ont été dupliqués d'après les observations faites lors des tests présentés au chapitre précédent pour un diamètre moyen d'isolateur équivalent.

| Tableau 5.4 | | | | | |
|---|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--|-----------------------------|
| Tension de tenue à 50% de la série # 3 | | | | | |
| Essais utiles | Tension de service (kV) | Tension d'essai (kV) | Résultats d'essai | I_{max} / I_{min} (A) | V_{50%} (kV) |
| 1 | 0 | 54 | Tenue | 0,19 / -0,19 | 53 |
| 2 | 0 | 57 | Cont. | — | |
| 3 | 0 | 54 | Cont. | — | |
| 4 | 0 | 51 | Tenue | 0,70 / -0,74 | |
| 5 | 0 | 54 | Tenue | 0,58 / -0,57 | |
| 6 | 0 | 57 | Cont. | — | |
| 7 | 0 | 54 | Cont. | — | |
| 8 | 0 | 51 | Tenue | 0,56 / -0,55 | |
| 9 | 0 | 54 | Cont. | — | |
| 10 | 0 | 51 | Tenue | 0,52 / -0,53 | |
| 11 | 0 | 54 | Cont. | — | |
| Courant maximum moyen | | | | 0,59 / -0,6 | |

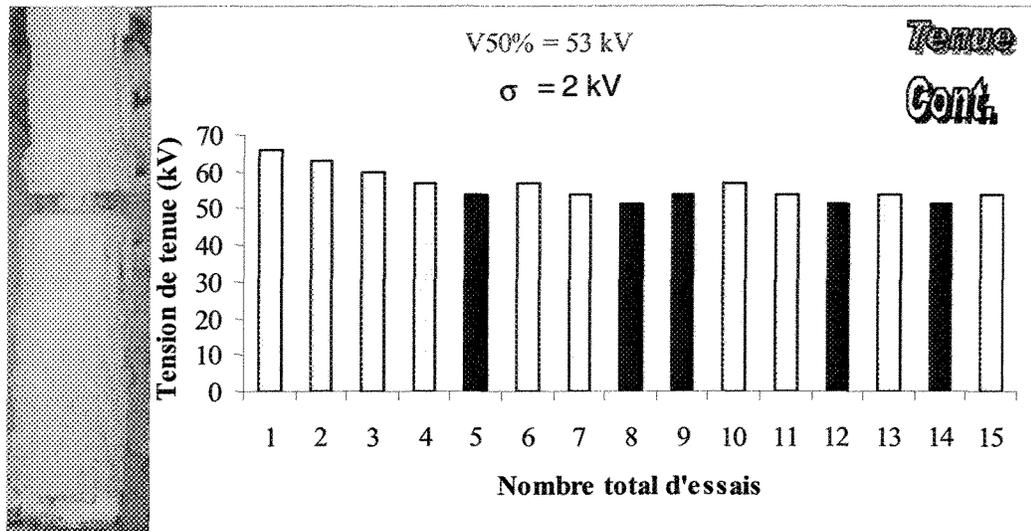


Figure 5.5 : Tension de tenue à 50% de la série # 3

Le tableau 5.5 et la figure 5.6 présentent les résultats de la série # 4 fournissant la tension $V_{50\%}$ d'une chaîne de cinq isolateurs ayant un intervalle d'air de 7 cm entre l'électrode de la haute tension et la jupe # 1, un intervalle d'air de 4 cm entre la deuxième et la troisième jupe et un autre intervalle d'air de 4 cm entre la quatrième et la cinquième jupe. De même, le courant maximum moyen ainsi que les valeurs maximales du courant sont présentés dans le tableau 5.5.

Tableau 5.5 Tension de tenue à 50% de la série # 4

| Essais utiles | Tension de service (kV) | Tension d'essai (kV) | Résultats d'essai | I_{max} / I_{min} (A) | $V_{50\%}$ (kV) |
|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|
| 1 | 0 | 75 | Tenue | 0,008 / -0,01 | 76 |
| 2 | 0 | 78 | Cont. | — | |
| 3 | 0 | 75 | Cont. | — | |
| 4 | 0 | 73 | Tenue | 0,01 / -0,01 | |
| 5 | 0 | 75 | Tenue | 0,01 / -0,01 | |
| 6 | 0 | 78 | Cont. | — | |
| 7 | 0 | 75 | Tenue | 0,002 / -0,01 | |
| 8 | 0 | 78 | Cont. | — | |
| 9 | 0 | 75 | Tenue | 0,002 / -0,004 | |
| 10 | 0 | 78 | Cont. | — | |
| <i>Courant moyen</i> | | | | <i>0.006 / -0.009</i> | |

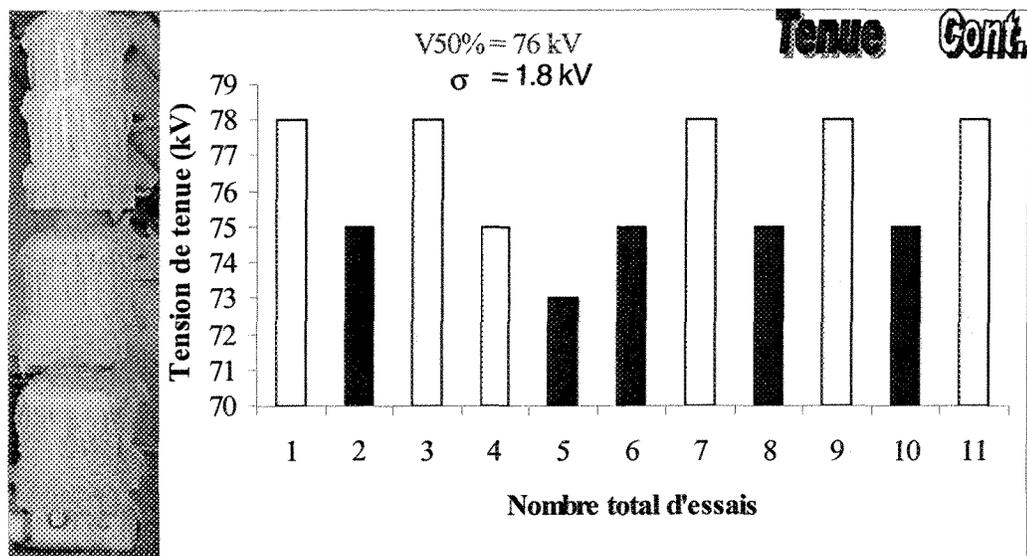


Figure 5.6 : Tension de tenue à 50% de la série # 4

5.4 Analyses des résultats

5.4.1 Analyse du courant de fuite

Les figures 5.7 et 5.8 présentent respectivement une enveloppe typique d'un enregistrement du courant de fuite durant un test menant à un contournement et un test menant à une tenue de la série # 1 pour laquelle un seul intervalle d'air est présent le long de la chaîne d'isolateurs. On remarque que la valeur du courant de fuite est stable pendant les trois premiers quarts de la durée du test. Cette stabilité est principalement due au fait que la surface de glace, qui est importante dans ce cas-là, prend un certain temps pour s'humidifier et pour qu'il y ait apparition d'un film d'eau à sa surface. En effet, comme l'intervalle d'air est situé à l'extrémité basse du dépôt de glace, les décharges électriques partielles présentes le long de ce dernier ne peuvent engendrer la création du film d'eau. C'est en fait l'augmentation de l'intensité du courant de fuite qui, s'écoulant à travers ces décharges et circulant à la surface du dépôt de glace, réchauffe ainsi la surface de glace et contribue à la création du film d'eau conducteur. Une fois ce film d'eau présent sur toute la surface du dépôt de glace, l'intensité des décharges électriques augmente, des arcs partiels sont alors créés et peuvent conduire au contournement, comme le montre la figure 5.7

Dans le cas de la figure 5.8, les décharges ont entraîné la chute d'un morceau de glace entre la jupe # 4 et la jupe # 5 (figure 5.9), conduisant ainsi à la création d'un nouvel intervalle d'air et menant à la rupture du pont de glace et de l'équilibre du gradient de la tension appliquée. L'incidence directe de l'apparition de ce nouvel intervalle d'air est un affaiblissement du courant de fuite et l'extinction des arcs

partiels, menant ainsi à la tenue de la chaîne d'isolateurs. Un exemple du cycle maximum et minimum de courant atteint durant ce test est présenté à la figure 5.10.

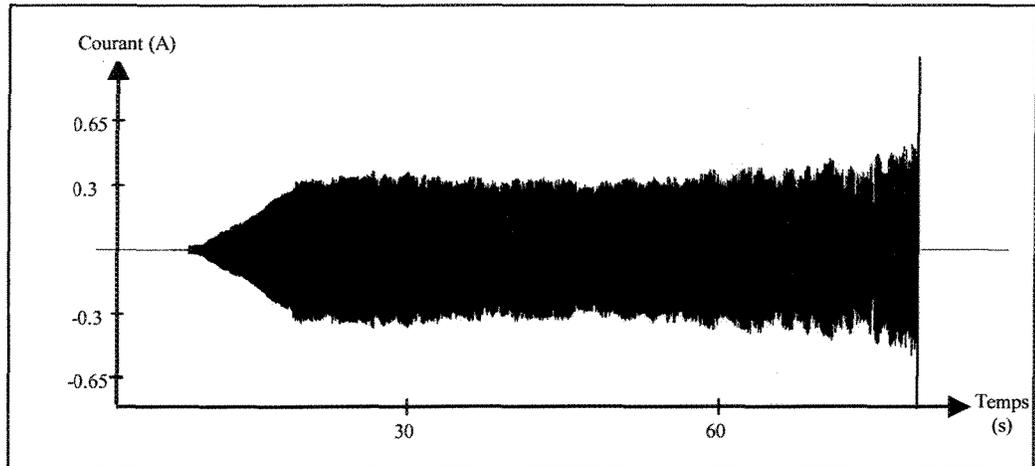


Figure 5.7 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 1 : cas d'un contournement

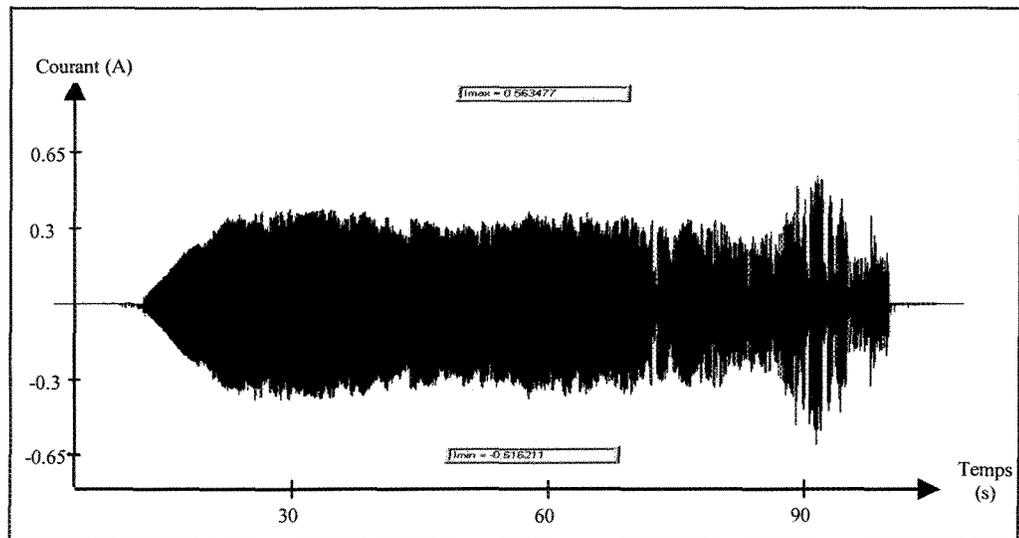


Figure 5.8 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 1 : cas d'une tenue

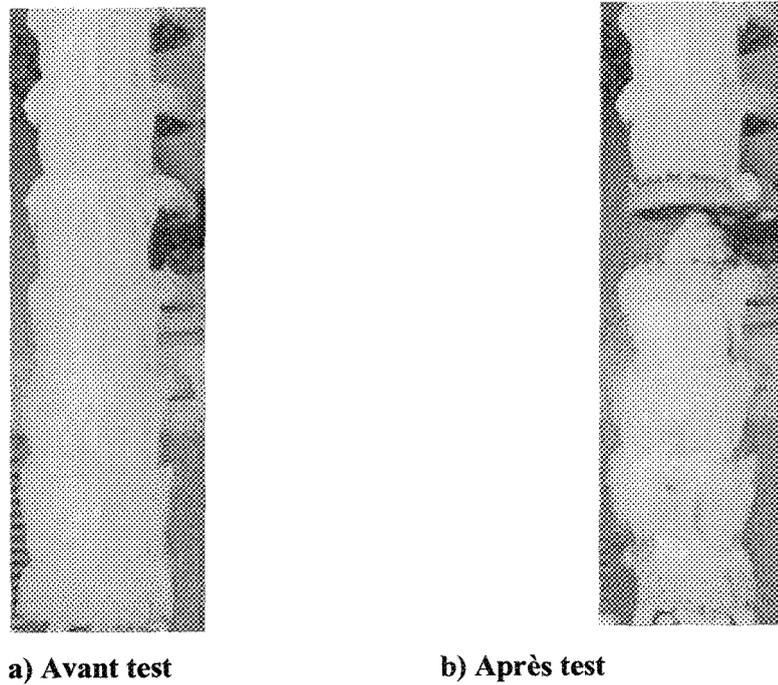


Figure 5.9 : Effet des décharges sur la répartition des intervalles d'air dans un test de la série # 1 ayant mené à une tenue

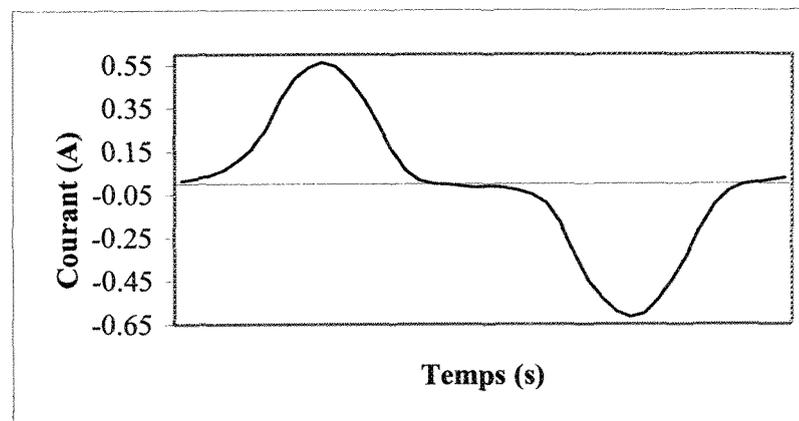


Figure 5.10 : Enregistrement d'une période du courant de fuite obtenue lors d'une tenue dans un test de la série # 1

Concernant les tests de la série # 2 où deux intervalles d'air sont présents, des décharges partielles assez fortes ont été observées dès le début de chaque test. Les figures 5.11 et 5.12 représentent respectivement l'enveloppe typique d'un enregistrement du courant de fuite dans le cas d'un contournement (figure 5.11) ou d'une tenue (figure 5.12). Dans le cas représenté par la figure 5.11, les décharges partielles présentes le long des intervalles d'air ont rapidement conduit au contournement de la chaîne d'isolateur. Par contre, dans le cas représenté par la figure 5.12, un gros morceau de glace s'est détaché, créant un intervalle d'air entre la jupe # 1 et la jupe #2 (figure 5.13), entraînant ainsi la tenue de l'isolateur. Dans le cas de la tenue, une période du courant de fuite est présentée à la figure 5.14.

La comparaison des valeurs maximales du courant de fuite obtenues pour la série # 2 (figures 5.11 et 5.14) avec les valeurs obtenues pour la série # 1 (figure 5.8 et 5.10), permet de noter une augmentation de l'intensité du courant de fuite lorsqu'on passe de un (figure 5.2-b) à deux intervalles d'air (figure 5.2-c). Cela explique en partie le fait d'avoir observé des décharges partielles de forte intensité au début des tests de la série # 2. En effet, pour la série # 1, une valeur maximale du courant de fuite d'environ 0.56 A a été obtenue contre 0.67 A pour la série # 2.

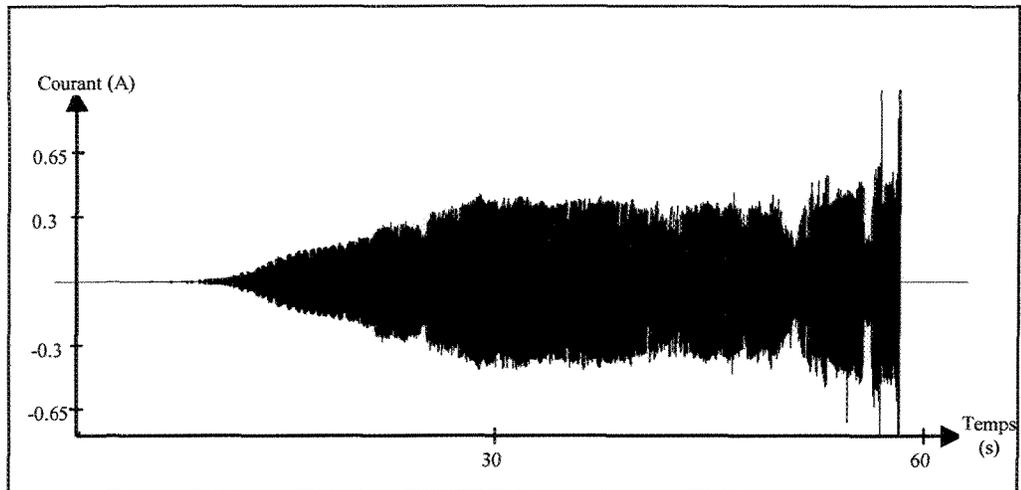


Figure 5.11 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 2 : cas d'un contournement

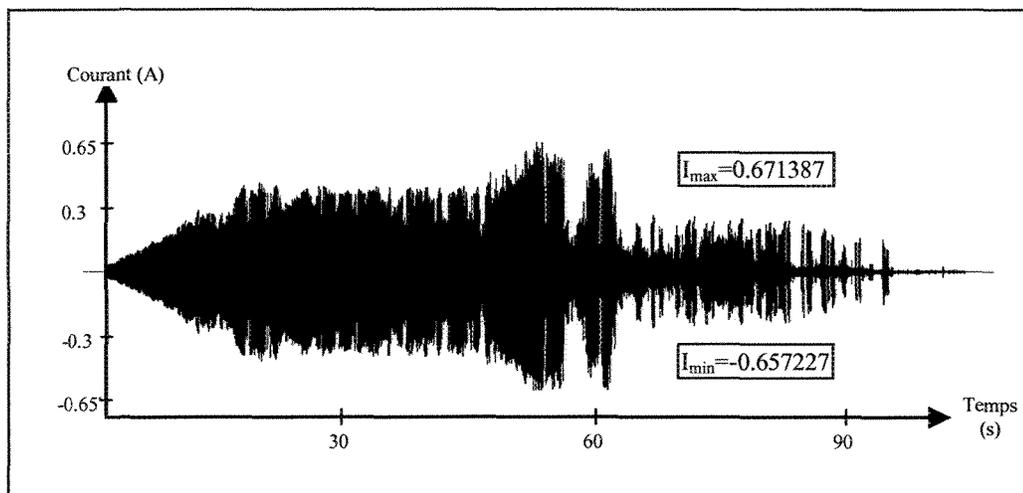


Figure 5.12 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 2 : cas d'une tenue

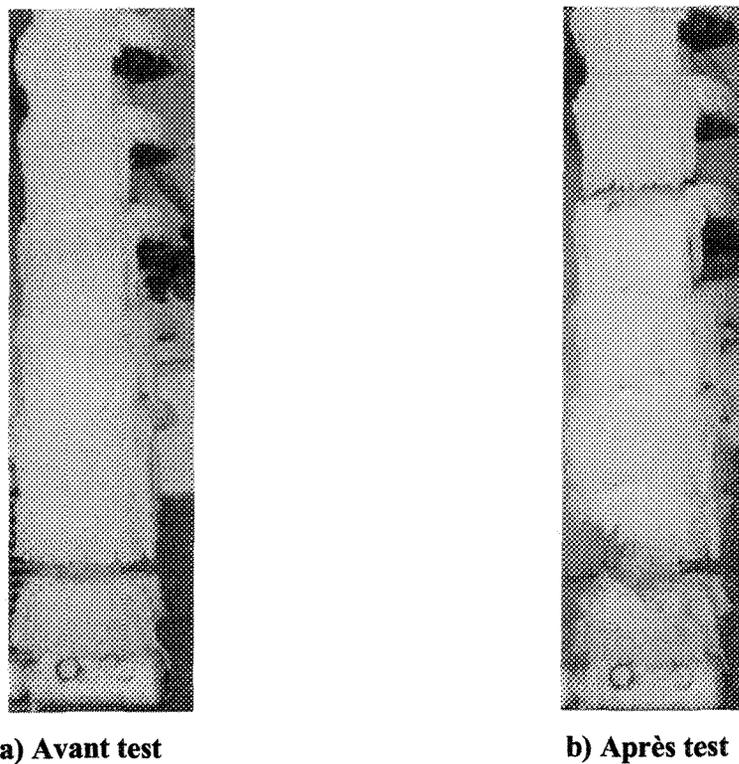


Figure 5.13 : Effet des décharges sur la répartition des intervalles d'air dans un test de la série # 2 ayant mené à une tenue

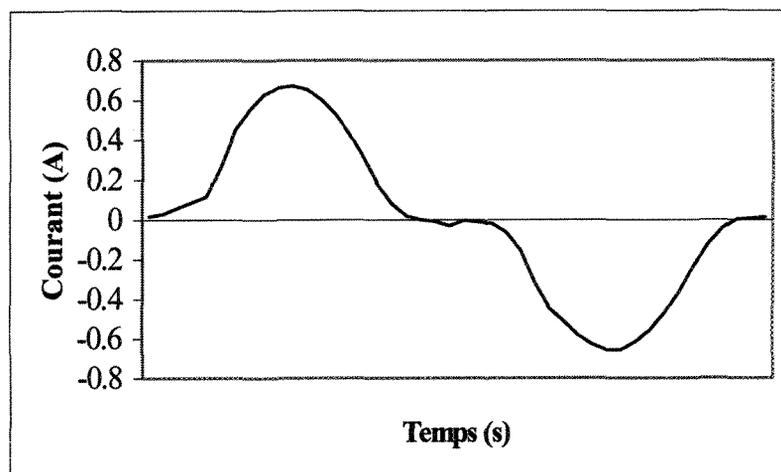


Figure 5.14 : Enregistrement d'une période du courant de fuite lors d'une tenue dans un test de la série # 2.

Pour les tests de la série # 3, la position et la longueur des deux intervalles d'air ont été déterminées à partir des observations faites lors d'accumulations de glace réalisées sous tension de service. Cela a permis de comparer la tension de tenue ainsi obtenue avec la tension de tenue d'une accumulation de glace équivalente réalisée sous tension de service. Les résultats présentés à la figure 5.15 montrent une bonne concordance entre une accumulation de glace présentant des intervalles d'air créés artificiellement et une accumulation de glace réalisée sous tension de service. En effet, une erreur relative de 7,5% a été obtenue, démontrant ainsi la validité de la procédure utilisée pour l'étude de l'influence des intervalles d'air sur la tension de tenue d'une chaîne d'isolateurs.

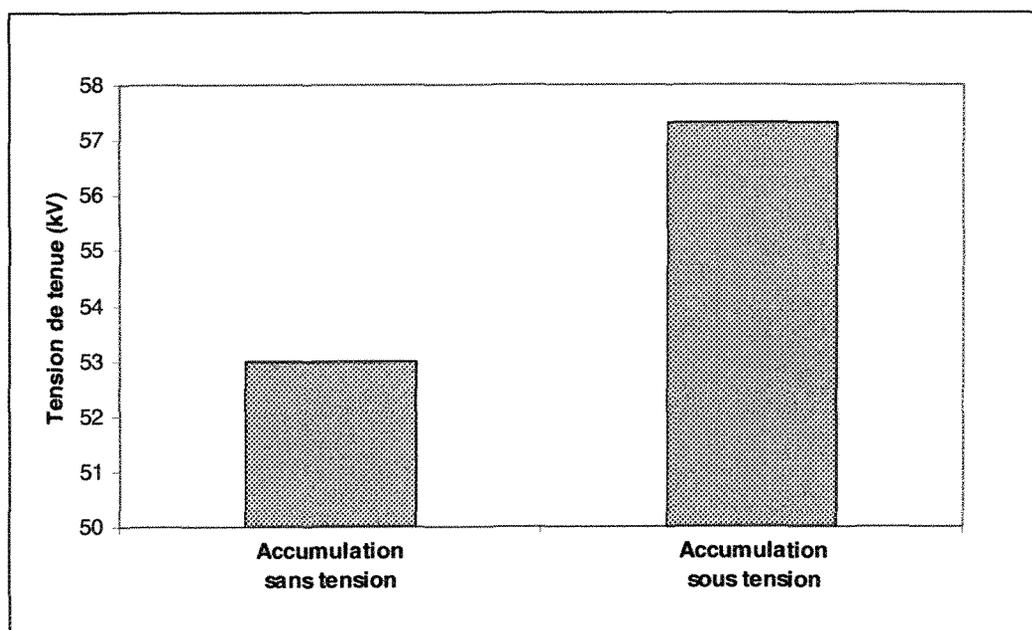


Figure 5.15 : Comparaison de la tension de tenue de l'accumulation de la série # 3 avec celle d'une accumulation standard sous tension de service.

Il est à noter que la procédure expérimentale d'application de la tension était différente pour les tests de la série # 3. En effet, lors de certains tests, la tension

appliquée a dû être augmentée afin d'amorcer les décharges. Une fois l'apparition des décharges, la tension a été baissée jusqu'à sa valeur prédéterminée. Pour d'autres tests, cette manœuvre ne fut pas nécessaire puisque les décharges débutèrent après un certain temps d'attente. Des tests antérieurs visant à déterminer la tension de tenue des isolateurs de postes aboutirent aux mêmes observations [Drapeau et al., 2000].

Les figure 5.16 et 5.17 présentent respectivement l'enveloppe et une période du courant de fuite correspondant à une tenue enregistrée au cours d'un test de la série # 3. La figure 5.18 présente une enveloppe typique d'un enregistrement du courant de fuite durant un test de la série # 3 menant à un contournement.

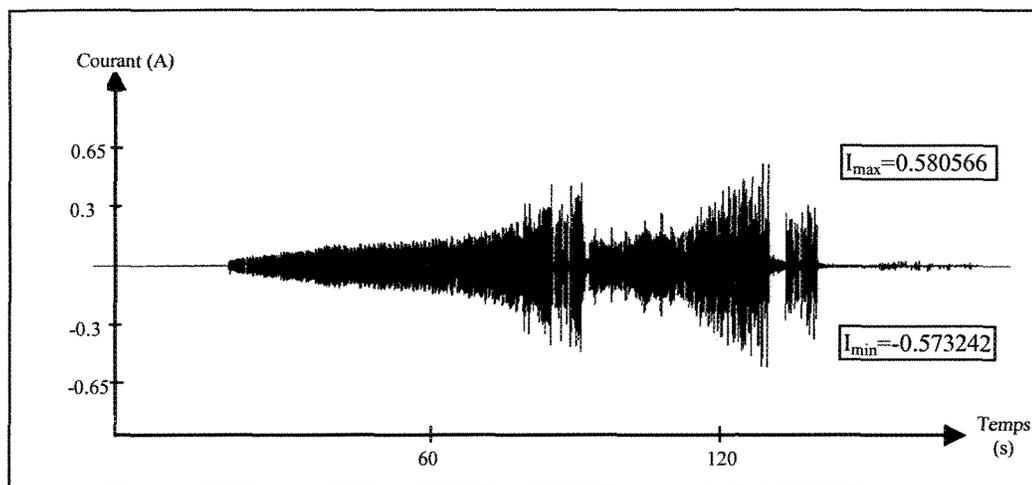


Figure 5.16 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 3 : cas d'une tenue

Dans le cas de la figure 5.16, il semble qu'il y ait une période répétitive qui sépare les deux décharges fortes. On a remarqué que le contournement se produit quand le

courant de fuite dépasse la valeur de 0,8 A (figure 5.18). Dans le cas des tests menant à des tenues, la valeur du courant varie autour de 0.5 A.

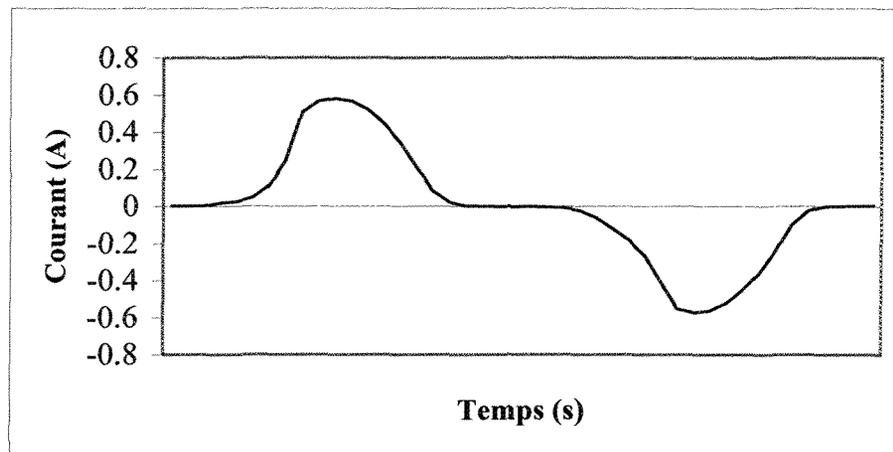


Figure 5.17 : Enregistrement d'une période du courant de fuite lors d'une tenue dans un test de la série # 3

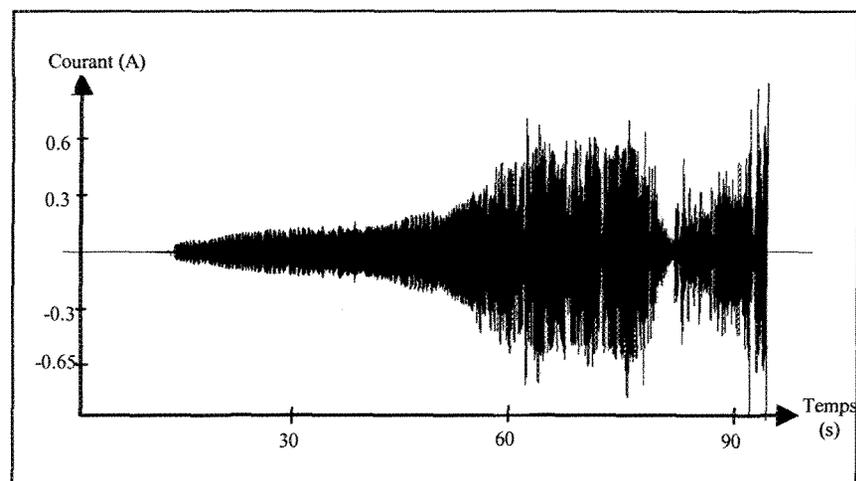


Figure 5.18 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 3 : cas d'un contournement

La figure 5.19 présente une enveloppe typique d'un enregistrement du courant de fuite menant à une tenue durant un test de la série # 4 pour laquelle trois intervalles d'air

sont présents le long de la chaîne d'isolateurs. La figure 5.20 présente une période du courant de fuite au cours de ce test. Enfin, la figure 5.21 présente une enveloppe typique d'un enregistrement du courant de fuite durant un test ayant mené à un contournement.

Lors des tests de tenue, la valeur du courant de fuite mesurée est faible (figures 5.19 et 5.20) avec une valeur maximale d'environ 15 mA, traduisant ainsi une activité de décharges de faible intensité. Par contre, dans le cas de contournements (figure 5.21), l'intensité du courant de fuite augmente très rapidement jusqu'au contournement. En effet, d'après les observations expérimentales faites durant ces tests, l'amorçage des décharges dans les dix premières minutes des tests conduisait inévitablement au contournement de la chaîne d'isolateurs. L'enregistrement de l'enveloppe du courant de la figure 5.21 montre que cela prend environ 25 secondes après l'apparition des premières décharges pour que celles-ci se développent jusqu'au contournement de l'isolateur.

La forme des courants de fuite obtenue pour les tests de la série # 4 diffère des formes de courants obtenues pour les séries précédentes. Pour les séries précédentes, il n'y a pas vraiment de grandes différences entre les valeurs maximales du courant dans le cas des tenues et dans le cas des contournements. Ainsi, la différenciation des enveloppes de courant pour chaque cas lors des 60 premières secondes d'enregistrement est difficile. Par contre, pour les tests de la série # 4, la signature du courant dans le cas d'une tenue ou d'un contournement est évidente.

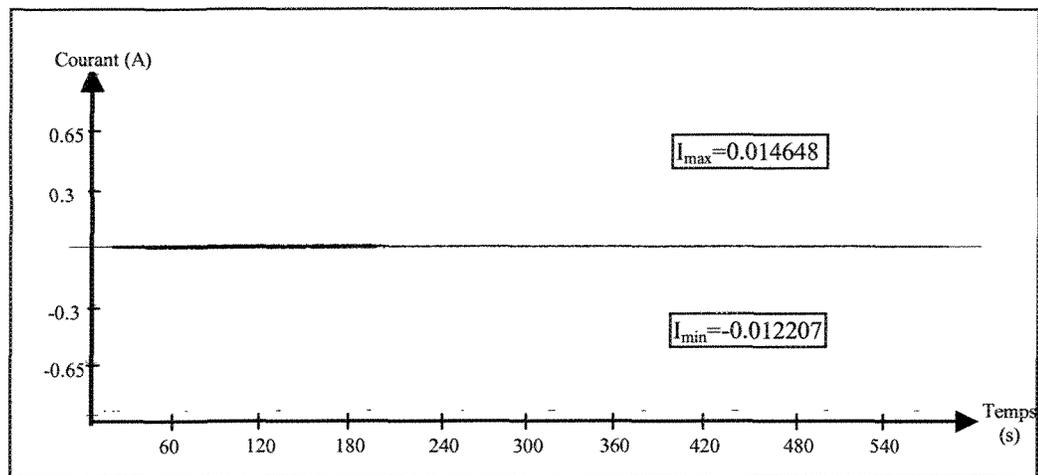


Figure 5.19 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 4 : cas d'une tenue

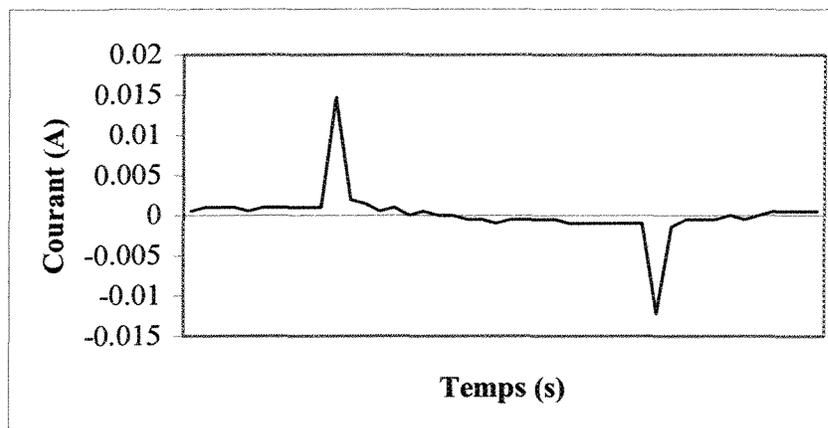


Figure 5.20 : Enregistrement d'une période du courant de fuite lors d'une tenue dans un test de la série #4

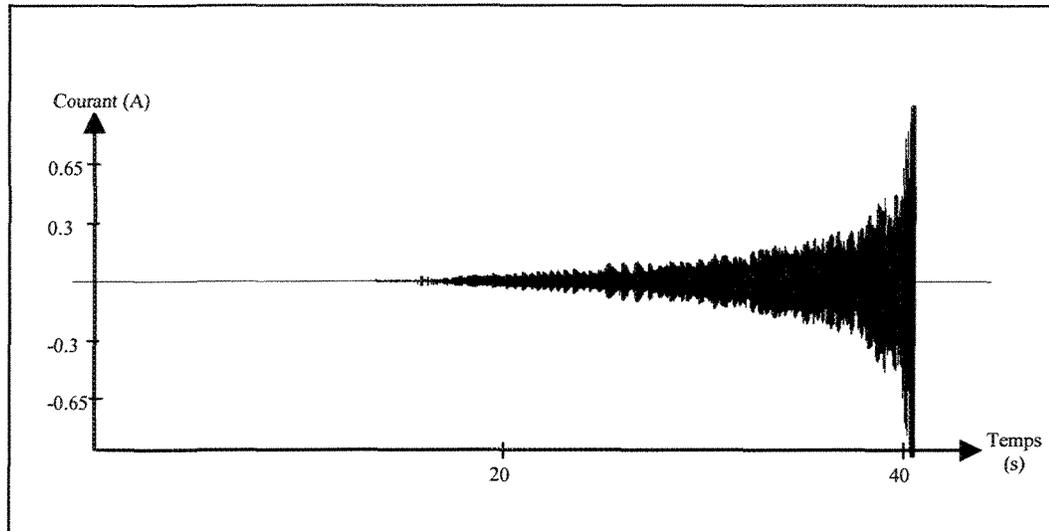


Figure 5.21 : Enregistrement complet d'un test de contournement de la série # 4 : cas d'un contournement

5.4.2 Analyse de la tension de tenue à 50%

L'analyse des enregistrements de l'enveloppe du courant de fuite correspondant à chaque série de tests nous a donné une première idée de l'influence de la position et du nombre d'intervalles d'air sur l'activité des décharges partielles pouvant mener au contournement d'une chaîne d'isolateurs. Cependant, il est nécessaire d'aller plus loin pour connaître exactement l'influence de ces intervalles d'air sur la tension de tenue de la chaîne d'isolateur testée. Les résultats des différents essais pour déterminer la tension de tenue et de contournement présentés précédemment ont donc permis de définir la tension de tenue à 50% de chaque série de test. Les résultats sont résumés à la figure 5.22.

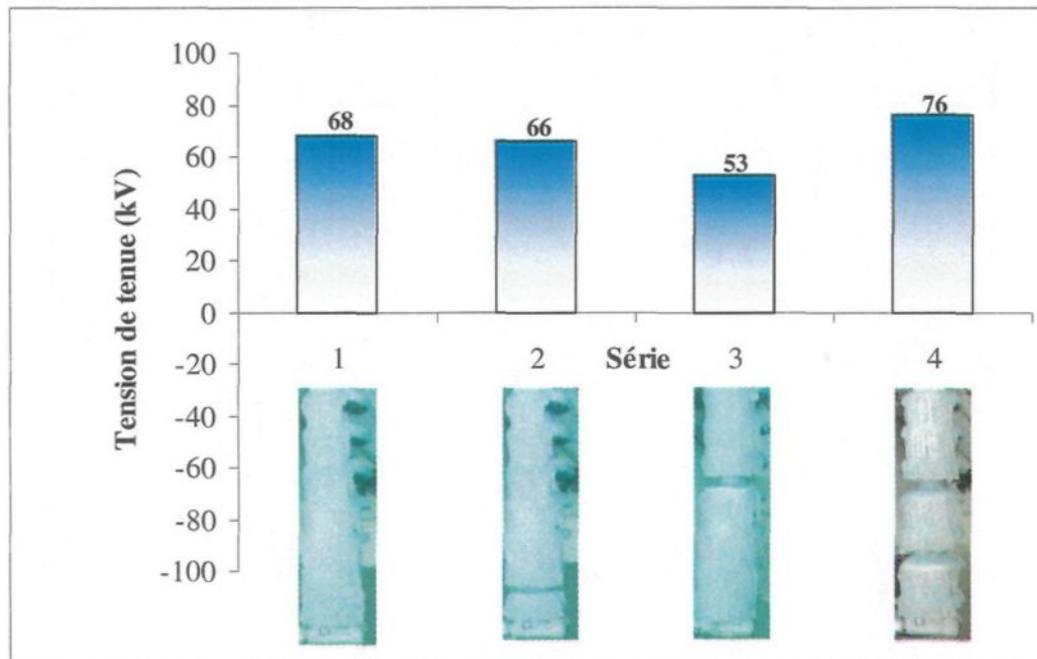


Figure 5.22 : L'influence des différents intervalles d'air étudiés sur la tension de tenue à 50 %.

D'après les résultats présentés à la figure 5.22, nous pouvons directement conclure que la série # 4 présente la meilleure combinaison d'intervalles d'air parmi les quatre séries de tests réalisés. En effet, si l'on compare la tension de tenue à 50% de la série # 4 par rapport à celle de la série # 3 qui présente l'accumulation la plus proche de celles réalisées sous tension de service, une amélioration d'environ 43% a été obtenue, contre environ 25% pour la série # 2 et 28% pour la série # 1. Il est donc évident que le nombre d'intervalles d'air influence directement la tension de tenue et donc la tension de contournement des isolateurs recouverts de glace. De plus, ces résultats démontrent que la position des intervalles d'air a aussi une influence sur la tension de tenue, lorsque l'on compare les résultats de la série # 2 aux résultats de la série # 3 prise comme référence. Cependant, les résultats de la série # 1 semblent contredire l'idée que plus le

nombre d'intervalles d'air est élevé, plus la tension de tenue est importante puisque la tension de tenue obtenue pour cette série est supérieure à celle obtenue pour les séries présentant deux intervalles d'air. Une explication de ce phénomène est présentée ci-dessous.

5.4.3 Discussion

Pour tenter d'expliquer les résultats obtenus précédemment, nous allons utiliser deux approches différentes. La première approche est liée à la répartition du potentiel le long de la chaîne d'isolateur et sur le calcul de la chute de tension le long des intervalles d'air. La deuxième approche est plutôt liée au phénomène de propagation d'un arc électrique à la surface de la glace ainsi qu'à la valeur de la résistance résiduelle.

Première approche

Cette approche permet principalement d'expliquer le fait que la série # 4 présente la tension de tenue la plus élevée. Elle est basée sur le calcul de la tension de claquage, V_b , obtenue en fonction de la longueur minimale de l'intervalle d'air (ou de sa distance d'arc), x , d'après l'équation suivante [Zhang et Farzaneh, 2000]:

$$V_b (kV) = 4,1x(cm) + 3,8 \quad \text{E5.1}$$

Cette équation a été déterminée dans le cas d'un cylindre de glace présentant un intervalle d'air de longueur variable entre l'électrode *H.T.* et la surface de glace. Ainsi,

à partir de l'équation E5.1, les chutes de tension le long des différents intervalles d'air de chaque série ont été déterminées et sont présentées dans le tableau 5.6.

| Tableau 5.6 | Tension de claquage des différents intervalles d'air | | | | | | | |
|--|---|------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|
| | Série # 1 | | Série # 2 | | Série # 3 | | Série # 4 | |
| Longueur de l'intervalle d'air, x (cm) | 7 | 7 | 4 | 7 | 4 | 7 | 4 | 4 |
| V_b (kV) | 32,5 | 32,5 | 20,2 | 32,5 | 20,2 | 32,5 | 20,2 | 20,2 |

Les résultats du tableau 5.6 permettent ainsi d'expliquer la tension de tenue élevée obtenue pour la série # 4. En effet, lorsque trois intervalles d'air sont présents le long de la chaîne d'isolateurs, une tension minimale de 72,9 kV, qui représente la somme des trois tensions de claquages V_b , est nécessaire pour engendrer l'apparition des arcs électriques partiels le long des intervalles d'air. Cette tension minimale étant nettement supérieure aux tensions minimales des trois autres séries (32,5 kV pour la série # 1 et 52,7 kV pour les séries # 2 et # 3), ceci explique le meilleur comportement de la série # 4 en terme de contournement. De plus, l'équation de réallumage de l'arc (E2.20) dépend de la longueur de l'intervalle d'air et de la valeur du courant de fuite. Comme la série # 4 présente une longueur totale des intervalles plus importante et une valeur de courant de fuite généralement plus faible que les autres séries (figures 5.19, 5.20 et 5.21), cela nécessite donc une tension de réallumage plus importante que les autres séries, se traduisant par une tension de contournement plus élevée. Finalement, des études récentes effectuées à la CIGELE [Volat, 2002] ont montré que la présence de trois intervalles d'air le long du dépôt de glace, dans le cas d'un isolateur de poste,

présente une meilleure situation que lorsqu'il s'agit de deux intervalles d'air. En effet, l'intervalle d'air intercalé entre les intervalles d'air proches des électrodes se comporte comme une barrière de potentiel empêchant une redistribution uniforme du potentiel le long de l'isolateur et freinant ainsi l'apparition des arcs partiels le long des intervalles d'air.

Il est important de remarquer que la tension minimale obtenue pour la série # 4 est proche de la tension de tenue à 50% de 76 kV obtenue pour cette série. La même remarque peut être faite pour la série # 3 qui présente une tension minimale de 52,7 kV contre 53 kV pour la tension de tenue à 50 %. Par contre, pour les séries # 1 et 2, les tensions minimales sont beaucoup plus faibles que les tensions de tenue à 50% obtenues. Cette différence entre les séries # 1 et # 2 et les séries # 3 et # 4 s'explique principalement par la présence de l'intervalle d'air situé au voisinage de la mise à la terre dans le cas des séries # 3 et # 4. En effet, dans le cas des séries # 1 et # 2, la couche de glace qui est présente là où il y a un intervalle d'air pour les séries # 3 et # 4, joue le rôle d'une barrière diélectrique formée par la couche de glace dont la rigidité est plus importante que celle de l'air. Par conséquent, une tension supérieure à la tension de claquage de l'air est nécessaire pour entraîner le claquage de l'épaisseur de glace. Ce claquage de l'épaisseur de glace se produit effectivement au niveau de la mise à la terre où la fonte du dépôt de glace a été observée, comme le montre les figures 5.9 et 5.13, créant ainsi un intervalle d'air. Avec la présence de ce nouvel intervalle d'air près de la mise à la terre, les séries # 1 et # 2 présentent le même profil que celui de la série # 3. Cependant, le temps pris pour créer cet intervalle d'air aura entraîné une modification de la résistance de surface du dépôt de glace ainsi que l'augmentation de la

longueur du ou des intervalles d'air situés près de la haute tension. Avec une résistance résiduelle plus importante et une longueur d'intervalle d'air plus grande, il est donc nécessaire d'appliquer une tension plus importante pour obtenir le contournement.

Deuxième approche

La seconde approche est basée sur l'augmentation de la résistance résiduelle de la surface de glace au voisinage des pieds d'arcs. Pour illustrer ce phénomène, prenons l'exemple de deux surfaces de même longueur, mais présentant deux situations différentes, comme le montre la figure 5.23. La situation de la figure 5.23-a illustre une surface de glace uniforme de longueur L le long de laquelle circule un courant de fuite, lui aussi uniforme. Dans ces conditions, les lignes de courant sont parallèles et la résistance de surface est uniforme. Dans la situation de la figure 5.23-b, la surface de glace de longueur L' est en série avec un intervalle d'air.

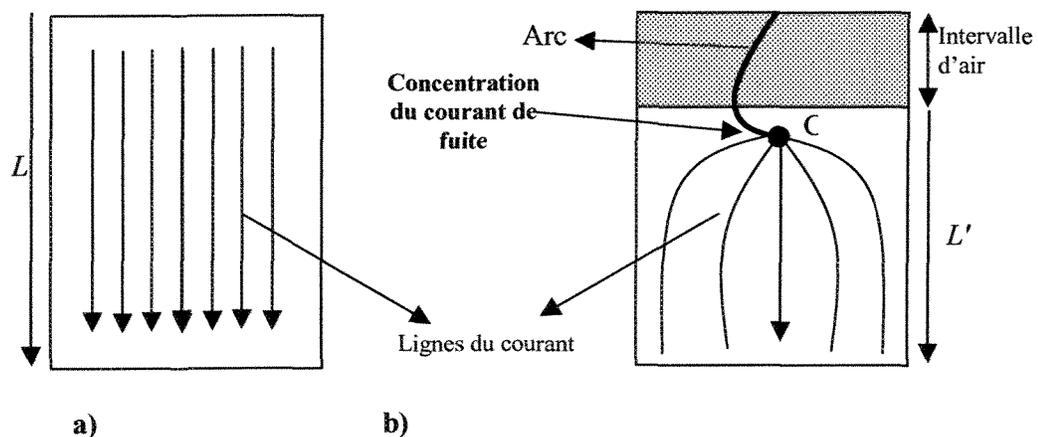


Figure 5.23 : Comparaison de la résistance générale d'une surface de glace.

L'apparition d'un arc partiel le long de l'intervalle d'air permet au courant de circuler librement le long de la surface de glace à travers le pied d'arc qui est en contact avec la surface de glace. Comme le diamètre du pied d'arc est faible (repéré par le point C sur la figure 5.23-b), de l'ordre de 0,14 mm pour un courant de fuite de 15 mA [d'après Zhang et Farzaneh, 2000], une concentration de courant se produit donc au voisinage de ce dernier.

La surface résiduelle parcourue par le courant de fuite dans le cas de la figure 5.23-b est plus petite que celle de la figure 5.23-a puisque la surface de glace de longueur L' est plus petite. En effet, si on divise la surface en plusieurs petits éléments, l'équation générale de la résistance de la surface de glace sera $R = \sum \int_0^l dr$, où $dr = \frac{\delta L}{\gamma_e \cdot \delta \varphi}$, δL et $\delta \varphi$ sont respectivement la longueur et le diamètre au point d'abscisse quelconque. γ_e est la conductivité de la surface à ce point. Or, au point C, $\delta \varphi$ est presque nul, ce qui implique une très forte résistance résiduelle à ce point.

Par conséquent, dans le cas présenté à la figure 5.23-b, la résistance résiduelle totale de la surface de glace aura donc une valeur plus grande que dans le cas de la surface de glace de la figure 5.23-a, malgré une surface de glace moins importante. Maintenant, en reportant ce résultat à une chaîne d'isolateurs recouverte de glace, cela signifie que plus le nombre d'intervalles d'air est grand, donc le nombre d'arcs partiels aussi, plus la résistance résiduelle totale de la surface de la couche de glace est importante. Ce résultat permet ainsi d'expliquer la différence obtenue entre la tension de tenue et la tension minimale d'apparition des arcs partiels dans le cas des séries # 3 et # 4. Pour

ces séries, les tensions de tenue à 50% étaient respectivement de 53 kV et 76 kV contre 52,7 kV et 72,9 kV pour les tensions minimales d'apparition d'arcs. La différence entre la tension de tenue et la tension minimale, qui est plus importante dans le cas de la série # 4, est attribuable au fait que la résistance résiduelle de la surface du dépôt de glace est supérieure malgré une surface de glace plus faible. Ceci est le résultat d'un nombre d'arcs partiels plus grand dans le cas de la série # 4.

5.4.4 Suggestions pour l'amélioration de la tenue diélectrique des isolateurs recouverts de glace

D'après les différents résultats présentés dans ce chapitre, quelques suggestions concernant l'amélioration de la tenue des isolateurs recouverts de glace peuvent être proposées.

- La première idée, d'après les résultats de la série # 4, consisterait à augmenter la distance entre deux jupes successives afin de créer artificiellement trois intervalles d'air. En partant de ce concept, un isolateur dont la distance entre deux jupes consécutives est plus grande en bas, au centre et en haut que le reste des jupes présenterait une meilleure performance sous des conditions de givrage surtout si la tension de tenue est un facteur à respecter. Cette distance additionnelle empêcherait la formation d'un pont de glace entre les deux jupes, créant ainsi un intervalle d'air et permettant une augmentation de la tension de tenue à 50%. Un exemple d'une configuration d'isolateur est illustré à la figure 5.24. La contrainte liée à la création de ces intervalles d'air est qu'ils devront être distribués équitablement le long de l'isolateur tout en veillant à garder une distance

suffisante entre chaque intervalle d'air. Cela limite ainsi le nombre et la longueur des intervalles d'air à créer. Toutefois, ce nombre devra être au moins égal à trois.

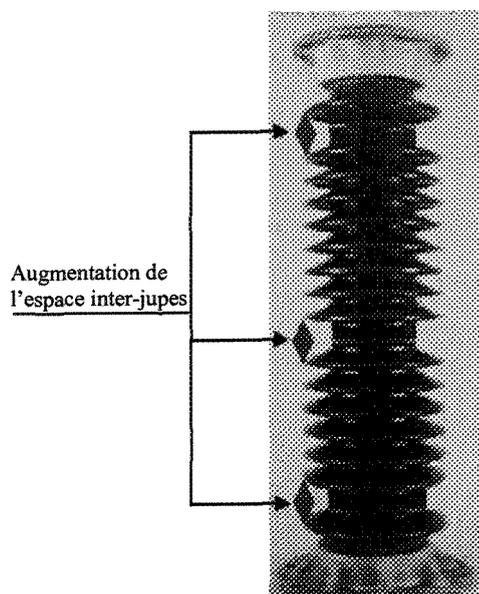


Figure 5.24 : Conception préliminaire d'un meilleur isolateur

- La deuxième idée serait d'empêcher la formation des intervalles d'air au voisinage des électrodes. Ainsi, en supposant que la glace puisse s'accumuler librement sur les électrodes, comme l'exemple des séries # 1 et # 2 pour l'électrode de mise à la terre, cela permettrait d'obtenir une barrière diélectrique supplémentaire à la circulation du courant de fuite, donc au contournement de l'isolateur. Cependant, cela nécessiterait une distribution du potentiel et du champ électrique uniforme le long de la chaîne d'isolateur afin de réduire l'intensité du champ électrique au voisinage des électrodes, surtout près de l'électrode *H.T.* [Volat, 2002]. Toutefois, cela pourrait être réalisable en utilisant soit un revêtement semi-conducteur recouvrant tout l'isolateur [Task Force 33.04.09, 1999], soit des anneaux de gardes [Leroy et Cie, 1984]. En effet, ces

solutions permettent, en uniformisant la distribution du potentiel le long des isolateurs, de réduire la valeur importante du champ électrique au voisinage des électrodes qui est responsable de l'apparition des intervalles d'air à ces endroits.

5.5 Conclusion

À la lumière des résultats obtenus d'après les séries de tests effectués pour déterminer l'influence de la répartition et du nombre d'intervalles d'air créés artificiellement sur une chaîne de cinq isolateurs standards IEEE, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La réalisation d'une accumulation sans tension permet de contrôler la position et la répartition des intervalles d'air le long de la chaîne d'isolateurs ainsi que de simuler convenablement une accumulation réelle d'après les résultats de la figure 5.15.
- Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence l'influence de la position et du nombre d'intervalles d'air présents le long d'une chaîne d'isolateurs recouverte de glace sur sa tension de tenue à 50%.
- La présence de trois intervalles le long du dépôt de glace permet d'augmenter de façon significative la tension de tenue à 50%. Ainsi, un accroissement de 43% de la tension de tenue par rapport à la configuration de référence, constituée de deux intervalles d'air situés respectivement au voisinage des électrodes, a été obtenu.

Cet accroissement de la tension de tenue est attribuable d'une part, à une distance de fuite plus importante, donc une tension minimale d'apparition des arcs partiels plus grande et, d'autre part, à l'augmentation de la résistance résiduelle de la surface du dépôt de glace générée par la présence de trois arcs partiels. De plus, l'intervalle d'air intercalé entre les intervalles d'air situés respectivement près des électrodes se comporte comme une barrière de potentiel et contribue à limiter l'apparition des arcs partiels.

- La répartition des intervalles d'air le long du dépôt de glace a une influence significative sur la tension de tenue. En effet, une répartition équitable des intervalles d'air entraîne une tension de tenue plus importante (série # 3) qu'une répartition où deux des intervalles sont très proches (série # 2). Dans ce cas, la distance séparant ces deux intervalles d'air est généralement rapidement comblée par un arc électrique partiel qui finit par s'établir le long des deux intervalles d'air. Ces deux intervalles d'air sont alors équivalents à un intervalle d'air unique de plus grande taille.
- La présence de glace au voisinage de l'électrode de mise à la terre contribue à augmenter la tension de tenue de l'isolateur en offrant une barrière diélectrique plus importante que celle offerte par un intervalle d'air. De plus, le temps pris pour que ce nouvel intervalle d'air soit créé par l'apparition des décharges partielles entraîne une modification des caractéristiques électriques de la surface de la glace qui est devenue moins propice à l'établissement du contournement. Cela explique les résultats surprenants obtenus pour les séries # 1 et # 2 pour lesquelles, une

augmentation respective de 28.3 % et 24.5 % de la tension de tenue par rapport à la série de référence a été obtenue. Cela démontre aussi que la position des intervalles d'air est plus importante que la longueur totale de ces derniers.

- Les résultats obtenus ont permis de proposer des suggestions concernant l'amélioration de la tenue diélectrique des isolateurs utilisés sous des conditions de précipitations atmosphériques froides. Ainsi, il a été suggéré de soit augmenter la distance inter-jupes afin de créer artificiellement des intervalles d'air, plus précisément trois intervalles d'air, soit d'employer des techniques permettant d'uniformiser la distribution du potentiel le long de l'isolateur afin de permettre une accumulation de glace sur les deux électrodes et ainsi inhiber la formation d'intervalles d'air au voisinage de ces dernières.

CHAPITRE 6

MODÈLE MATHÉMATIQUE

CHAPITRE 6

MODÈLE MATHÉMATIQUE

6.1 Introduction

Le but de ce chapitre est d'améliorer le modèle mathématique existant de prédiction de la tension de tenue des isolateurs recouverts de glace développé à la CIGELE. Ce modèle, qui est basé sur le concept développé par Obenaus (figure 2.9), est régit par l'équation E6.1 dont les paramètres A , n et γ_e ont été déterminés à partir d'une surface de glace triangulaire permettant d'éliminer la complexité de la forme de l'isolateur (figure 2.15).

$$V_{tm} = AxI_m^{-n} + \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L-x)}{W} + \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] I_m \quad \text{E6.1}$$

où :

- V_{tm} est la tension appliquée ;
- A et n sont des constantes expérimentales ;
- x est la longueur d'arc ;
- L est la longueur de l'isolateur ;
- W est le diamètre de l'isolateur ;
- γ_e est la conductivité de la surface ;
- I_m est le courant de fuite.

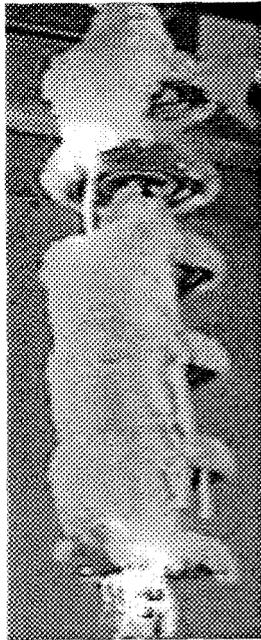
Afin que ce modèle soit utilisable pour des tensions alternatives, des études expérimentales [Farzaneh et *al.*, janvier 1997] ont été effectuées afin de déterminer les constantes d'arc A et n ainsi que les constantes k et b relatives à la condition de réallumage de l'arc. La condition de réallumage de l'arc est modélisée par l'équation suivante :

$$V_m \geq \frac{kx}{I_m^b} \quad \text{E6.2}$$

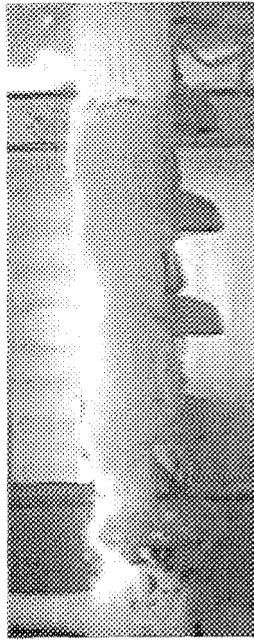
Le modèle mathématique ainsi obtenu a ensuite été validé pour une chaîne d'isolateurs d'une longueur allant jusqu'à 84 cm [Farzaneh et *al.*, janvier 1997]. Une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et numériques a ainsi été obtenue. Cependant, il a été observé que pour une chaîne d'isolateurs dépassant 2 m de longueur, l'erreur entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux augmentait [Farzaneh et *al.*, avril 2000]. La raison de cette erreur provient du fait que l'équation de réallumage de l'arc utilisé dans le modèle existant a été établie expérimentalement en utilisant un court échantillon triangulaire de glace.

Il est important ici de mentionner la complexité de l'établissement et de la propagation de l'arc lorsqu'il s'agit d'un isolateur recouvert de glace. Lorsqu'il s'agit d'une surface polluée, l'arc s'établit aux bornes des zones sèches, tel que décrit par Obenaus au chapitre 2, et dans la plupart des cas, la longueur de cet arc demeure constante. Par contre, lorsqu'il s'agit d'une surface de glace, les arcs électriques partiels prennent naissance le long des intervalles d'air qui sont similaires aux zones sèches d'une couche de pollution. Sous l'action de la fonte continue générée par la

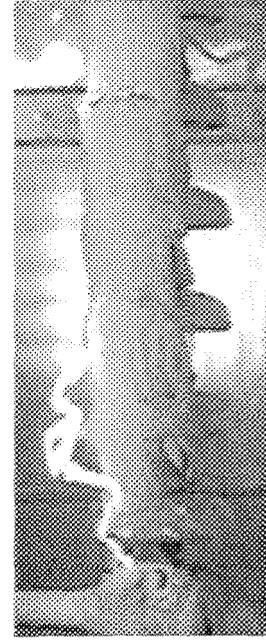
présence des arcs partiels, les intervalles d'air s'agrandissent, modifiant ainsi la longueur des arcs électriques partiels établis le long de ces derniers (figure 6.1-a). D'autre part, si la glace est très adhésive, l'échauffement crée un film d'eau à la surface de la glace et l'arc se propage le long de la surface de glace rendue fortement conductrice par la présence du film d'eau (figure 6.1-b). Enfin, dans certains cas, dépendant de l'état de surface de la glace, l'arc électrique peut choisir un chemin de propagation plus favorable et se propager dans l'air environnant l'isolateur, comme le montre la figure 6.1-c.



a) Aux bornes des intervalles d'air



b) Sur la surface de glace



c) Dans l'air

Figure 6.1 : Propagation de l'arc

Le problème avec le modèle mathématique actuel est qu'il a été élaboré à partir de tests expérimentaux effectués sur un seul type d'isolateur, en l'occurrence sur une chaîne d'isolateurs. Bien qu'il fournisse des résultats plus que satisfaisants dans la

prédiction de la tension de tenue pour ce type d'isolateur ayant une longueur inférieure à un mètre, ce modèle néglige l'influence du diamètre de l'isolateur et ne prend pas en charge la répartition et le nombre des intervalles d'air présents le long du dépôt de glace. La prise en compte de ces paramètres (diamètre et intervalles d'air) dans le modèle mathématique existant est donc présentée dans la suite de ce chapitre.

6.2 Influence du diamètre

L'introduction de l'effet du diamètre dans le modèle mathématique est basé sur les résultats expérimentaux présentés au chapitre 4. Dans ce chapitre, nous avons identifié la relation entre la valeur de la tension de tenue et le diamètre de l'isolateur (figure 4.14). La relation ainsi obtenue, décrite par l'équation E6.3, est une forme très simplifiée de l'équation E6.4 du modèle mathématique établi par les chercheurs de la CIGELE. Cette dernière représente l'équation E6.1 à laquelle a été ajoutée l'équation E6.2 de réallumage de l'arc. Cependant, l'équation E6.3, dont la seule variable est le diamètre W de l'isolateur, est seulement valide pour les conditions expérimentales utilisées dans le chapitre 4, c'est-à-dire une chaîne d'isolateurs de longueur fixe de 73 cm (cinq isolateurs IEEE) ayant une accumulation de glace de conductivité fixe de 80 μS .

$$V_{tm} = 192.03.W^{-0,348} \quad \text{E6.3}$$

$$V_{tm} = Ax\left(\frac{Kx}{V_{tm}}\right)^{\frac{n}{b}} + \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L-x)}{W} + \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] \left(\frac{Kx}{V_{tm}}\right)^{\frac{1}{b}} \quad \text{E6.4}$$

La comparaison des résultats expérimentaux avec ceux calculés par le modèle mathématique de l'équation E6.4, présentés à la figure 4.13, démontrent effectivement que le modèle ne tient pas compte de l'effet du diamètre. La différence entre les résultats numériques et expérimentaux est attribuable au coefficient K intervenant dans l'équation E2.3 de réallumage de l'arc et dont la valeur a été déterminée expérimentalement pour un diamètre fixe de l'isolateur [Farzneh et al., janvier 1997]. Partant de cette considération, il a été décidé d'établir une relation entre le coefficient K et le diamètre W de l'isolateur de la forme $K=f(W)$. Pour déterminer cette relation, une approche par « essais et erreurs » a été utilisée. À partir de calculs itératifs dans lesquels la valeur de k varie, la valeur de la tension de tenue obtenue expérimentalement est comparée, pour chaque diamètre de l'isolateur, à la valeur fournie par le modèle mathématique jusqu'à coïncidence des deux valeurs de tension. Le tableau 6.1 ainsi que la figure 6.2 présentent la variation du coefficient K en fonction du diamètre.

| Tableau 6.1 | Correction du coefficient K | |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------|
| <i>Diamètre (cm)</i> | <i>Coefficient K</i> | <i>Coefficient K corrigé</i> |
| 5 | 1118 | 1601 |
| 10 | 1118 | 1806 |
| 15 | 1118 | 1815 |
| 25 | 1118 | 1118 |

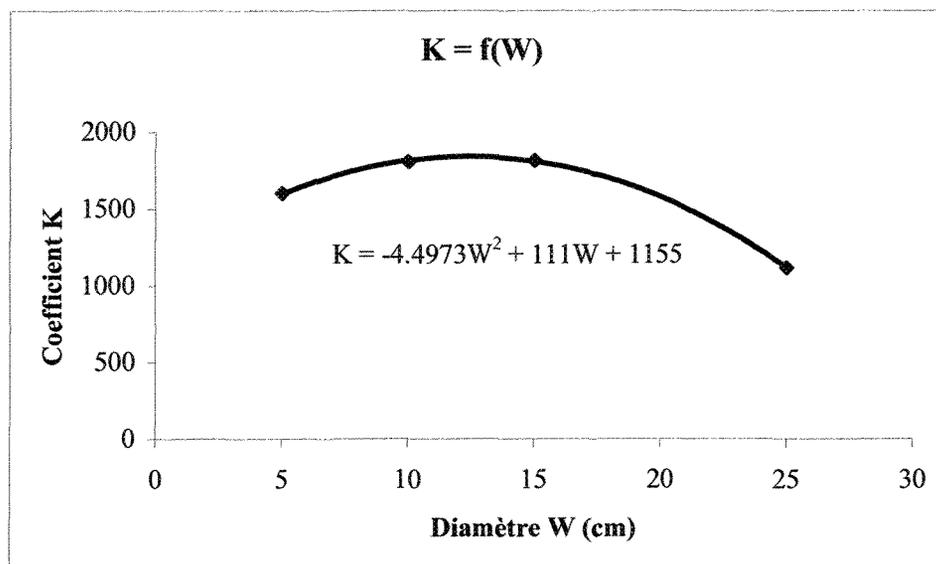


Figure 6.2 : Correction du coefficient K en fonction du diamètre

Une fois l'équation $K = f(W)$ déterminée, celle-ci a été introduite dans l'équation

E6.4. La nouvelle équation mathématique du modèle devient donc :

$$V_{im} = Ax \left[\frac{(-4.4973W^2 + 111W + 1155)x}{V_{im}} \right]^{\frac{n}{b}} + \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L-x)}{W} + \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] \left[\frac{(-4.4973W^2 + 111W + 1155)x}{V_{im}} \right]^{\frac{1}{b}} \quad \text{E6.5}$$

Les résultats calculés à partir du modèle mathématique modifié, après l'introduction de la variation du paramètre K en fonction du diamètre, sont présentés à la figure 6.3 et démontrent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux.

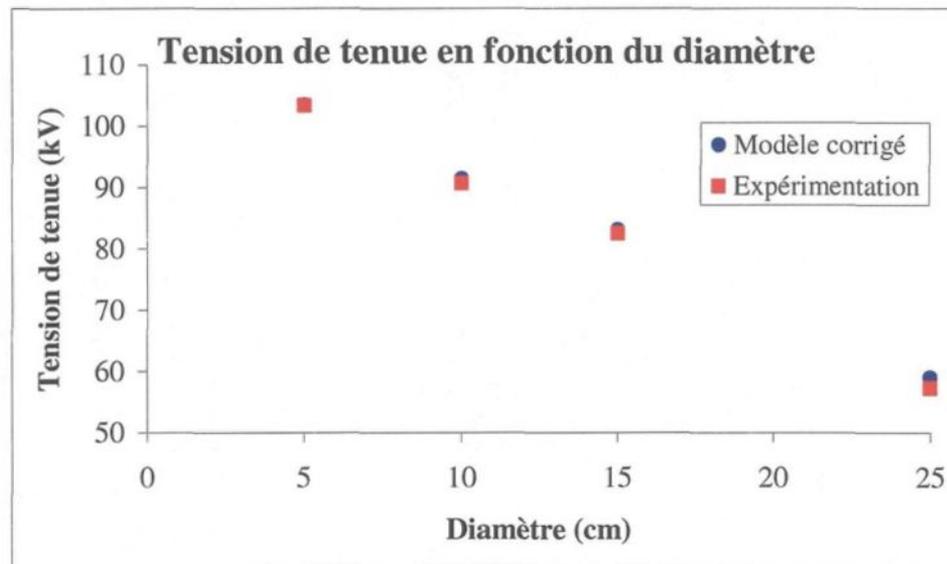


Figure 6.3 : Validation du modèle corrigé par les résultats expérimentaux

6.3 Influence de la répartition et du nombre d'intervalles d'air

L'introduction de l'effet de la répartition des intervalles d'air dans le modèle, plus particulièrement l'influence de leur nombre et de leur position le long du dépôt de glace sur la tension de tenue, est basée sur les résultats expérimentaux présentés au chapitre 5. L'approche utilisée est de définir, à partir du modèle de base qui présente un seul arc partiel défini à la figure 6.4, un modèle mathématique pour chaque configuration de dépôt de glace étudiée. Pour chaque modèle, nous avons considéré que le paramètre déterminant pouvant influencer la tension de tenue dans l'expression du modèle mathématique était en fait la résistance résiduelle du dépôt de glace donnée par l'équation E6.5. Cette résistance dépend essentiellement de deux termes dont le premier ($L-X$) tient compte de la variation de la longueur de l'arc et le deuxième terme

$(\ln(W/2\pi r_0))$ représente la résistance du pied d'arc qui est en contact avec la surface du dépôt de glace.

Ainsi, la configuration de la série # 1 peut être assimilable au modèle de la figure 6.4 représentée par l'équation de la résistance résiduelle E6.5, qui est en fait l'équation du modèle de base.

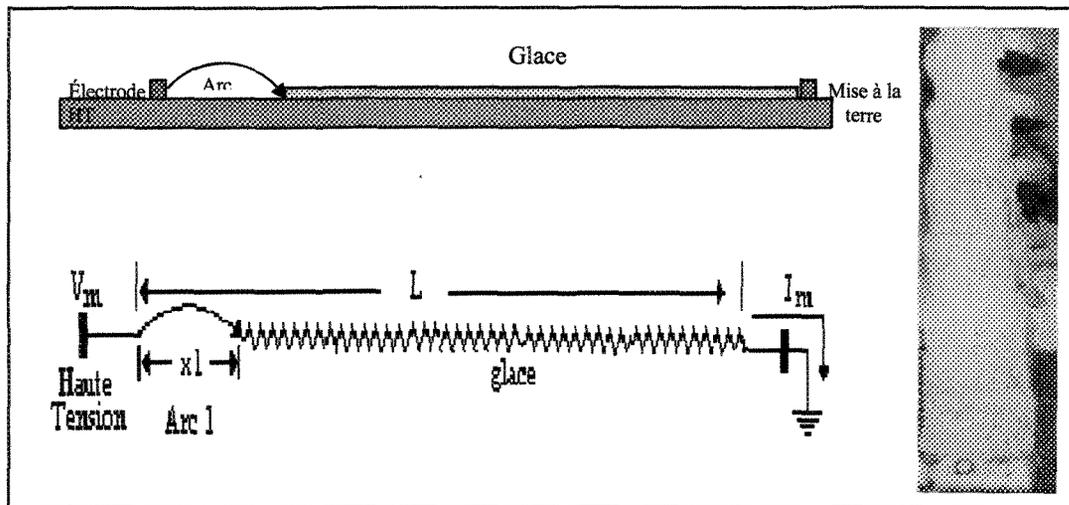


Figure 6.4 : Modèle mathématique de base correspondant à la série # 1

$$R(X) = \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L-X)}{W} + \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] \quad \text{E6.5}$$

Le modèle suivant concerne la configuration de la série # 2 où deux intervalles d'air sont présents, proches de l'extrémité basse du dépôt de glace (figure 6.5). L'équation de la résistance résiduelle résultante de cette configuration est donnée dans l'équation E6.6.

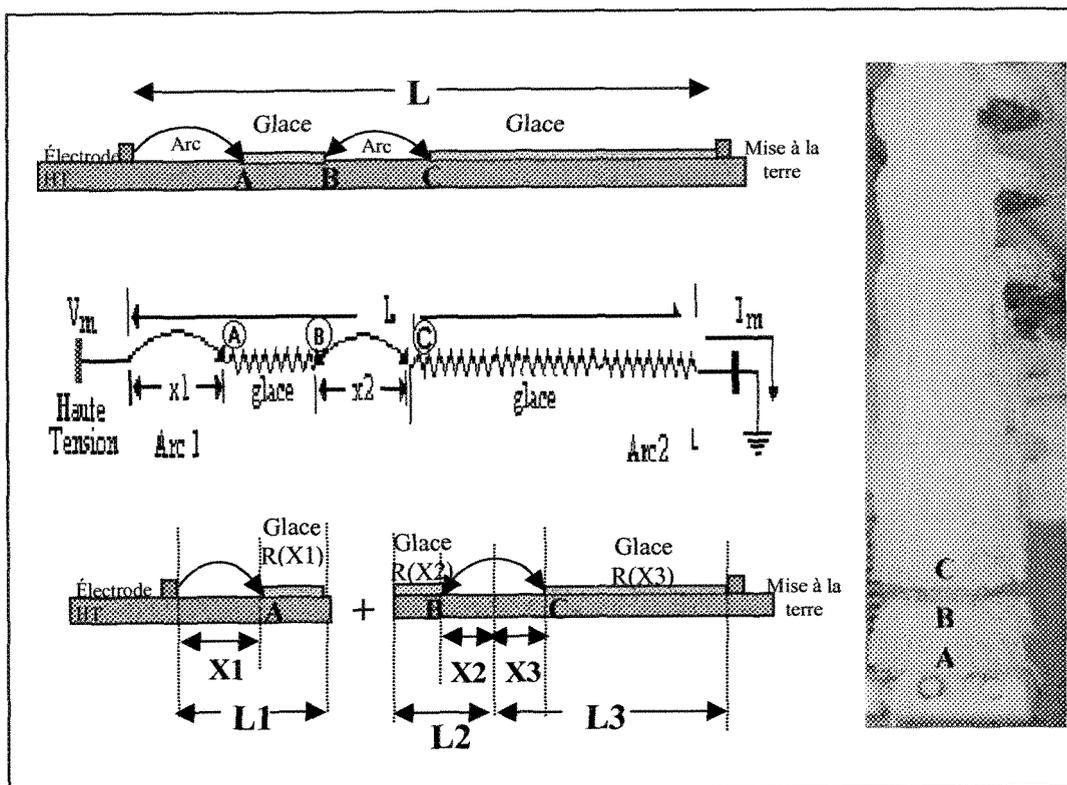


Figure 6.5 : Modèle équivalent à la série # 2

$$R(X) = \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L1 - X1)}{W} + \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] + \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L2 - X2)}{W} + \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] + \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L3 - X3)}{W} + \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right]$$

E6.6

En développant l'équation E6.6 et sachant que $X = X1 + X2 + X3$ (en considérant que les 2 arcs possèdent le même rayon de courbure, r_0) et $L = L1 + L2 + L3$, l'équation de la résistance de glace pour la série # 2 peut s'écrire comme suit :

$$R(X) = \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L - X)}{W} + 3 \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] \quad \text{E6.7}$$

Lorsqu'il y a un seul intervalle d'air à côté de l'électrode portée à la haute tension située en bas de la chaîne d'isolateurs (figure 6.4), un arc s'établit à ses bornes. La concentration du courant au point où l'arc touche la glace est très forte, impliquant une augmentation importante de la résistance superficielle de la glace. Or, souvent la basse tension ne fournit pas assez d'intensité pour qu'un arc s'établisse en haut de la chaîne, là où la glace bouche les intervalles d'air comme le montre la série # 1. Par contre, lorsqu'on ajoute un intervalle d'air en haut de la chaîne (cas de la série # 3, figure 6.6), un arc peut s'établir rapidement à ces bornes créant un faible passage de courant à travers la surface de la glace qui sépare les deux arcs.

Toutefois, le modèle de la série # 3 peut être divisé en deux parties égales, chacune étant semblable au modèle de base (figure 6.4). L'équation de la résistance résiduelle résultante de cette configuration est donnée dans l'équation E6.8

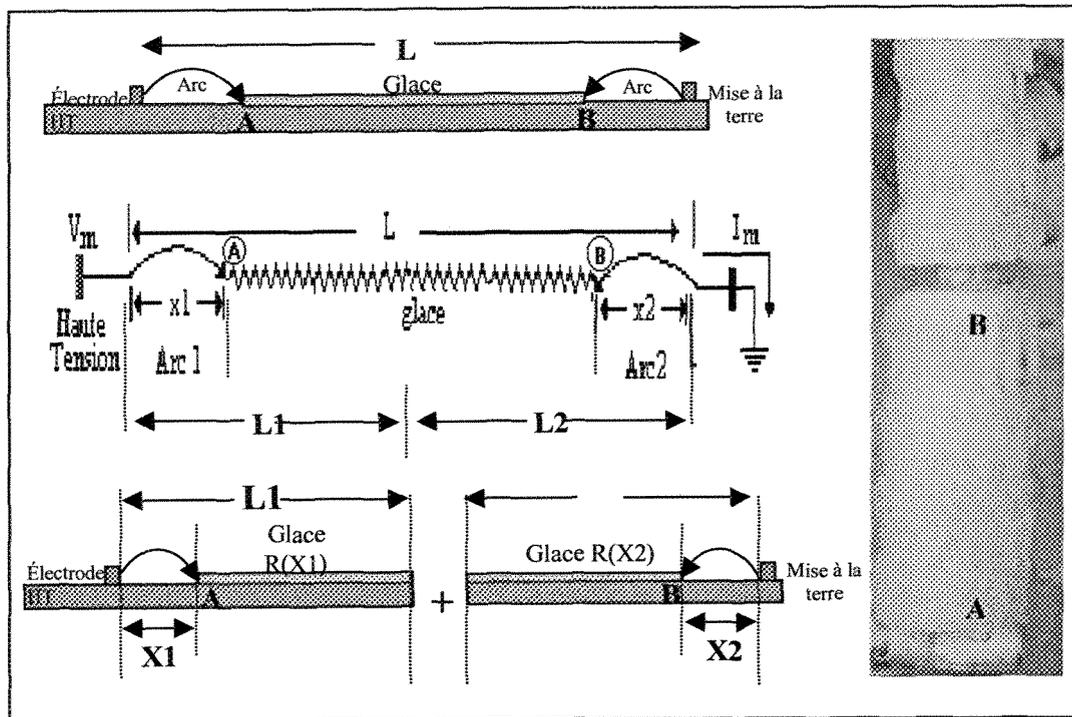


Figure 6.6 : Modèle équivalent à la série # 3

$$R(X) = \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L1 - X1)}{W} + \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] + \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L2 - X2)}{W} + \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] \quad \text{E6.8}$$

En développant l'équation E6.8, sachant que $X = X1 + X2$ (en considérant que les 2 arcs possèdent le même rayon de courbure, r_0) et étant donné que $L = L1 + L2$, on considère l'équation de la résistance de glace pour la série # 3 comme étant le pire cas en terme de contournement. L'équation obtenue s'écrit donc :

$$R(X) = \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L - X)}{W} + 2 \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] \quad \text{E6.9}$$

Dans le cas de la série # 4, nous avons ajouté un intervalle d'air au milieu de la chaîne (figure 6.7). Cet intervalle d'air interrompt le passage de courant de fuite circulant à la surface de la portion de glace séparant les deux intervalles d'air de la série # 3. Le contournement se produit lorsque les arcs électriques établis le long de ces trois intervalles d'air se rejoignent. Cependant, pour y arriver, les gradients de la tension aux bornes de ces 3 intervalles d'air devront être sensiblement égaux, ce qui peut difficilement se produire. Mais lorsque cela se produit, le contournement est instantané.

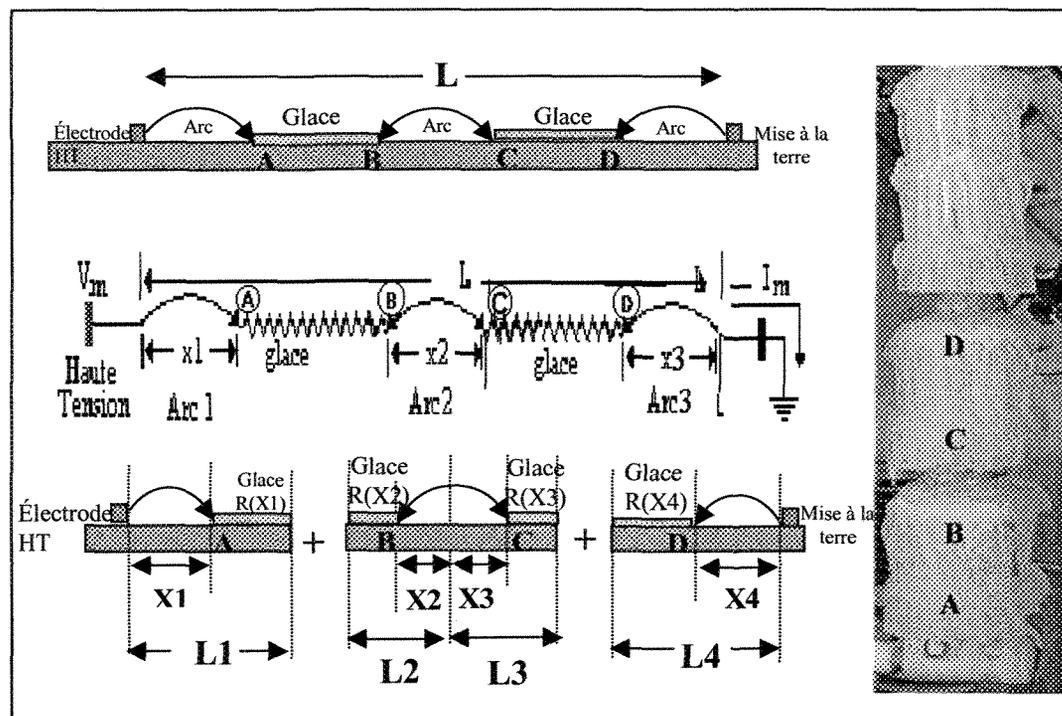


Figure 6.7 : Modèle équivalent à la série # 4

Dans le cas de la série # 4 , la résistance de la glace $R(X)$ sera donnée par l'équation suivante :

$$R(X) = \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L1 - X1)}{W} + \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] + \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L2 - X2)}{W} + \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] + \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L3 - X3)}{W} + \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] + \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L4 - X4)}{W} + \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] \quad E6.10$$

En suivant le même concept des trois autres séries, l'équation de la résistance de la glace de la série # 4 sera:

$$R(X) = \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L - X)}{W} + 4 \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] \quad E6.11$$

En comparant les équations E6.5, E6.7, E6.9 et E6.11, on remarque, pour chaque configuration trouvée, la présence d'un coefficient en avant du terme fournissant la résistance du pied d'arc, représentant le nombre de points de contact des arcs avec la surface du dépôt de glace. L'équation équivalente de la résistance de la glace sera alors présentée dans l'équation E6.12. Les résultats calculés à partir de cette équation ont été comparés avec ceux obtenus expérimentalement et sont présentés à la figure 6.8.

$$R(X) = \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L - X)}{W} + J \cdot \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] \quad E6.12$$

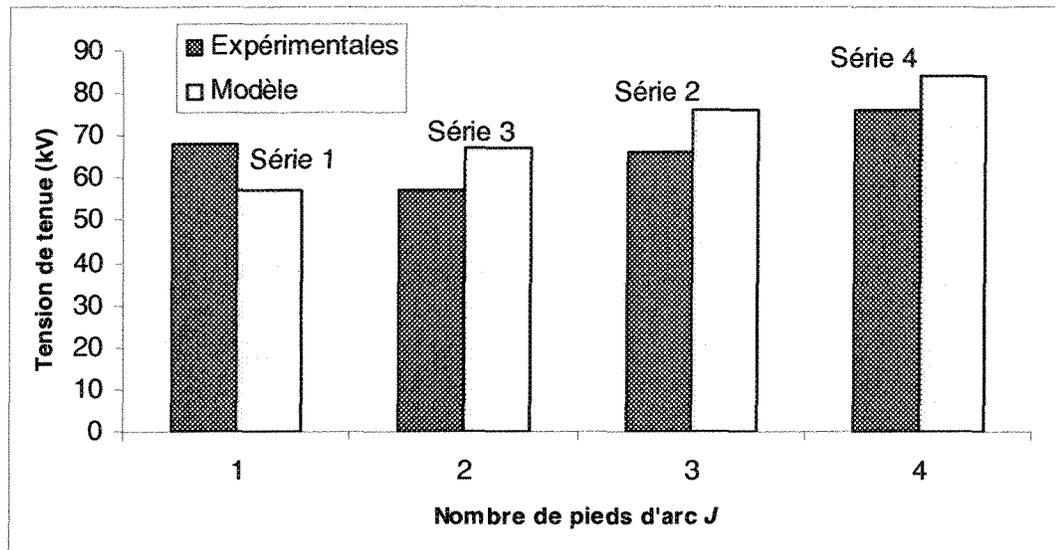


Figure 6.8 : Influence de la répartition des intervalles d'air sur la tension de tenue calculée pour les différentes configurations

D'après les résultats de la figure 6.8, l'erreur relative obtenue entre les résultats expérimentaux et numériques sont de l'ordre de 15 % pour chaque cas étudié. Cette différence, assez significative, montre que l'introduction du paramètre J dans l'équation de la résistance de glace, donnée par l'équation E6.5, nécessite quelques ajustements afin d'augmenter la précision des résultats numériques. Pour ce faire, des investigations supplémentaires ont été entreprises sur l'effet de la répartition des intervalles d'air sur la tension de tenue pour essayer de comprendre ce phénomène assez complexe. Ces investigations font l'objet de deux approches qui permettent d'expliquer la différence entre les résultats numériques et expérimentaux afin d'affiner le modèle numérique présenté ci-dessus. Ces deux approches concernent en particulier deux situations importantes dont la première porte sur la présence d'un intervalle d'air au voisinage de

l'électrode de mise à la terre, situé à l'extrémité haute du dépôt de glace (figure 6.9), alors que la deuxième porte sur l'absence de cet intervalle d'air (figure 6.12).

➤ *Première approche*

Pour cette première approche, l'existence de plusieurs arcs établis simultanément le long de l'intervalle d'air situé au voisinage de l'électrode de la mise à la terre, comme dans le cas des séries # 3 et # 4, a été proposée (figure 6.9-a) d'après les observations expérimentales faites en laboratoire (figure 6.9-b). Ainsi, avec une multitude de points de contact des arcs avec la surface de la glace (représenté par le point G de la figure 6.9-a), le courant de fuite peut s'écouler facilement à travers l'intervalle d'air puisqu'il n'y a plus de concentration de ligne de courant comme dans le cas d'un seul arc (figure 5.23). Dans ces conditions, la résistance du pied d'arc au point G ne doit pas être prise en considération. Cela revient à dire que l'électrode de mise à la terre est reportée au bas de l'intervalle d'air représenté par le point G de la figure 6.9-a.

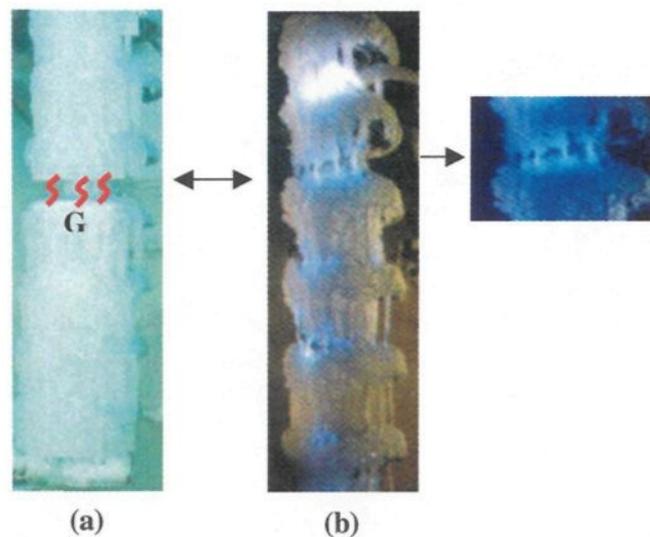


Figure 6.9 : Concentration de lignes de courant en bas de l'intervalle d'air

Les modèles mathématiques équivalents de la série # 3 et # 4 peuvent donc être représentés par les modèles de la figure 6.10.

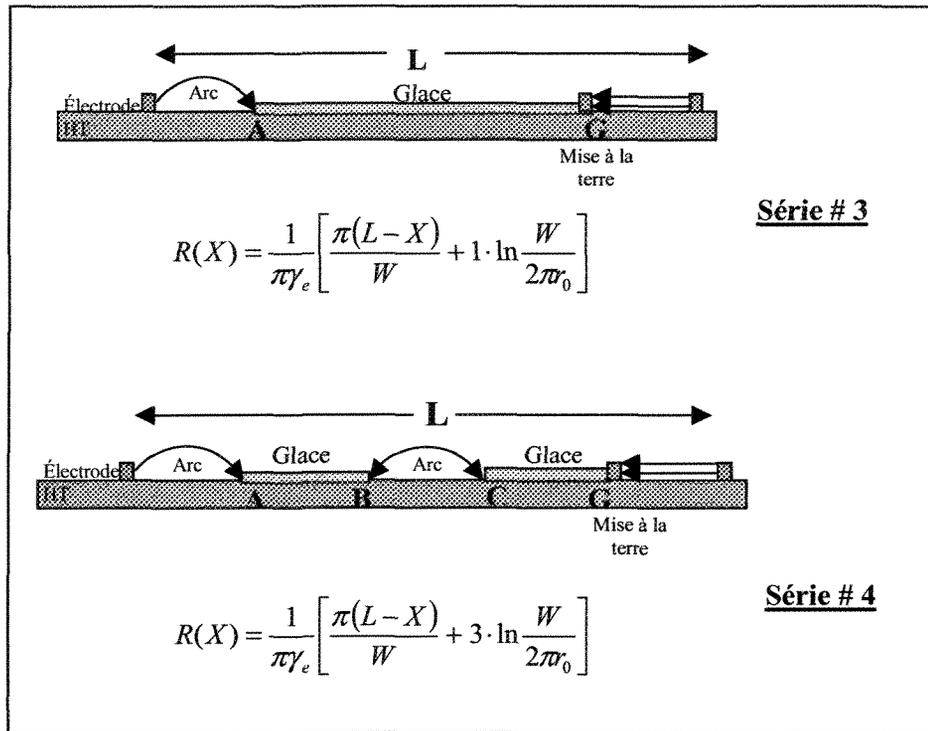


Figure 6.10 : Modèle équivalent aux séries # 3 et # 4

Basée sur ces nouveaux modèles, l'équation de la résistance de la glace équivalente est alors donnée par :

$$R(X) = \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L-X)}{W} + J' \cdot \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] \quad \text{E6.13}$$

où J' représente le nombre de points de contact des arcs avec la surface de la glace ne tenant pas compte des arcs établis entre l'électrode de mise à la terre et la surface de glace. Les résultats ont été recalculés par la suite et ont été comparés avec ceux obtenus expérimentalement (figure 6.11).

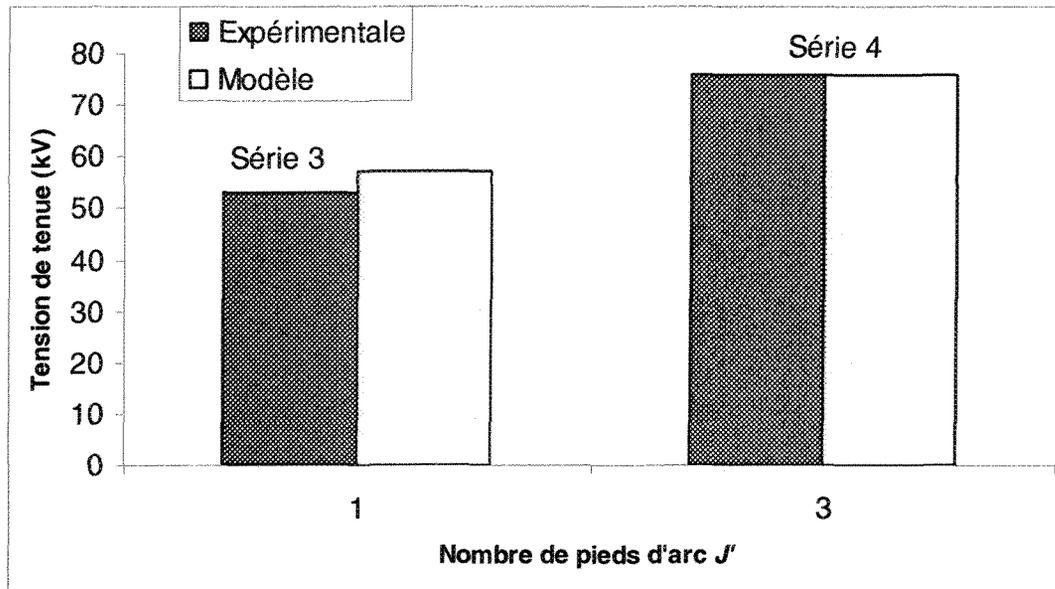


Figure 6.11 : Comparaison entre les tensions de tenue calculées par le modèle mathématique avec celles mesurées expérimentalement pour les séries # 3 et # 4

➤ Deuxième approche

Cette deuxième approche concerne les séries # 1 et # 2 pour lesquelles la glace faisait office de barrière diélectrique au voisinage de l'électrode de mise à la terre, comme le montre la figure 6.12.

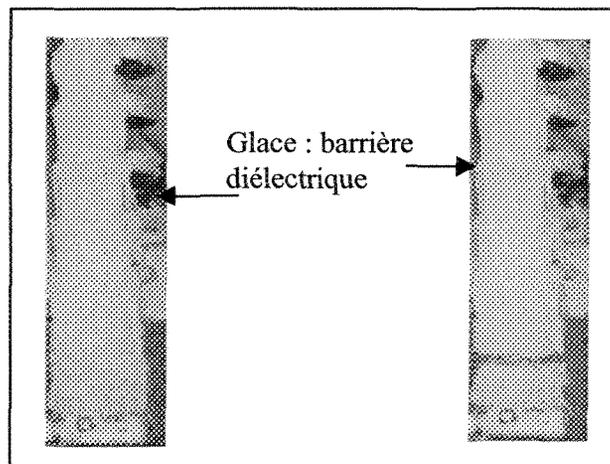


Figure 6.12 : Comportement de la glace dans les séries # 1 et # 2

En l'absence d'intervalle d'air à cet endroit, un certain temps était nécessaire pour la création de celui-ci, causé par l'échauffement du courant de fuite et la fonte engendrée par les décharges partiels, comme le montre la figure 6.13. Cela expliquait la valeur constante du courant de fuite enregistré pendant les tests. Mais le temps pris pour créer cet intervalle d'air a provoqué des changements dans les caractéristiques de la glace, ayant comme résultat une diminution de la conductivité de la surface, γ_e , donc une augmentation de la résistance résiduelle de la glace.

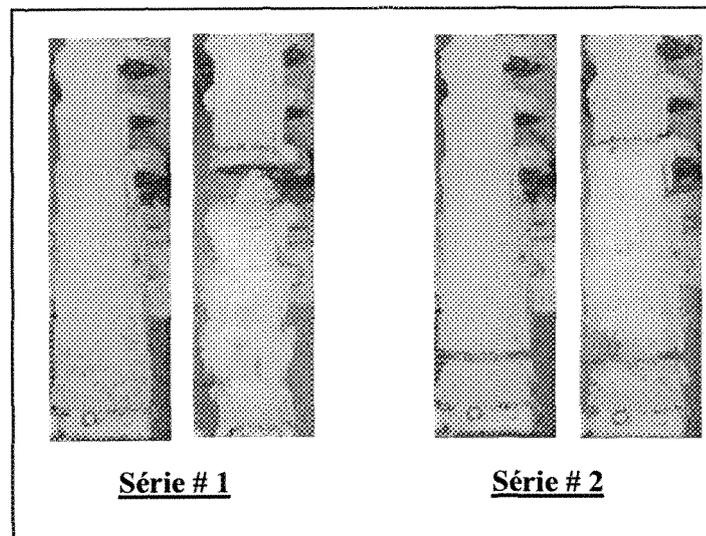


Figure 6.13 : Création des intervalles d'air à proximité de l'électrode de la mise à la terre durant les tests de contournement des séries # 1 et # 2

Dans ce cas, on peut supposer que la variation dynamique de la conductivité de la surface durant cette période a joué un rôle déterminant dans la tension de tenue, expliquant ainsi les différences obtenues entre les résultats numériques et expérimentaux des séries # 1 et # 2. Il a donc été décidé d'introduire cette variation de la conductivité de surface de la glace, notée $\gamma_e(t)$, dans l'expression de la résistance résiduelle du dépôt de glace donnée par l'équation E6.14.

$$R(X) = \frac{1}{\pi\gamma_e(t)} \left[\frac{\pi(L-X)}{W} + J \cdot \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] \quad \text{E6.14}$$

Il ne reste plus qu'à déterminer la conductivité surfacique du dépôt de glace correspondant aux tensions de tenue des séries # 1 et # 2 obtenues expérimentalement. Cela a été effectué en utilisant le modèle mathématique donné par E6.1 dans lequel la valeur de la conductivité $\gamma_e(t)$ a été diminuée jusqu'à atteindre la valeur de la tension de tenue correspondante à chaque série. Bien entendu, pour chaque série, le paramètre J de l'équation E6.14 a été ajusté en conséquence. Un exemple de l'évolution de la tension de tenue en fonction de la conductivité surfacique γ_e est présenté à la figure 6.14. Ce calcul a été effectué dans le cas de la série # 1 avec une valeur de J égale à 1. Un calcul identique est effectué dans le cas de la série # 2 avec J égal à 2.

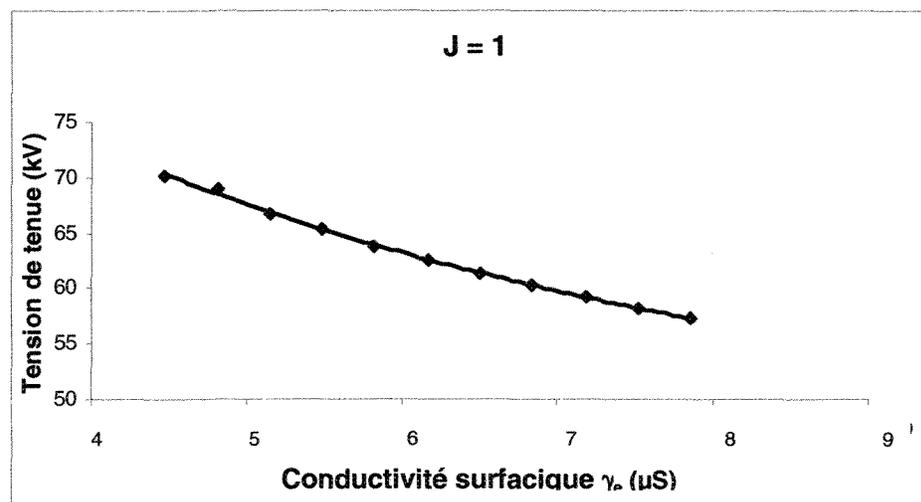


Figure 6.14 : Tension de tenue calculée par le modèle mathématique en fonction de la conductivité de la surface dans le cas de la série # 1

Ainsi, les valeurs de conductivité obtenues sont respectivement de 4.18 et 5.15 μS pour la série # 1 et # 2. Ces valeurs sont nettement inférieures à la valeur de conductivité surfacique utilisée pour les séries # 3 et # 4 qui est de 7.85 μS .

La figure 6.15 présente la comparaison entre les tensions de tenue mesurées expérimentalement des séries # 1 et # 2 avec celles calculées par le modèle en utilisant à la fois les valeurs ajustées de la conductivité surfacique du dépôt de glace et le nombre de pieds d'arc (modélisé par le paramètre J). On obtient ainsi une très bonne concordance entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux, démontrant ainsi l'effet de la barrière diélectrique créée par le dépôt de glace.

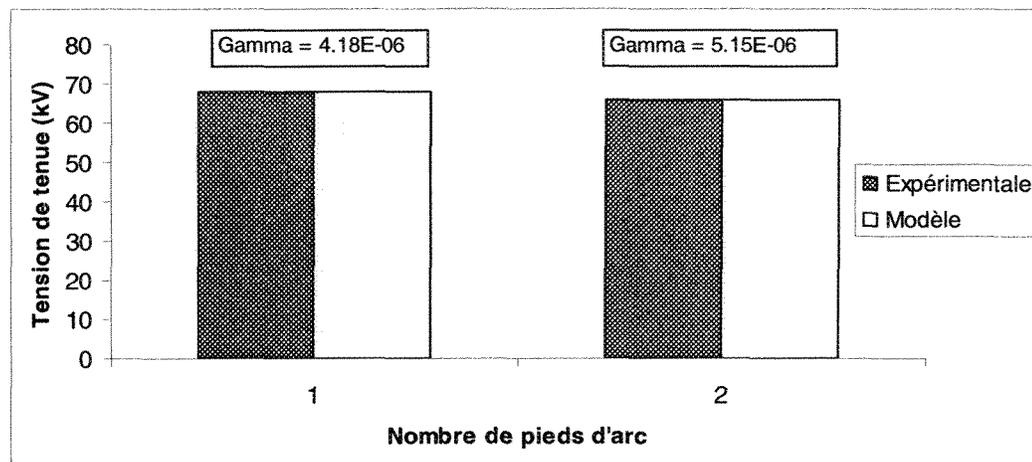


Figure 6.15 : Figure 6.11 : Comparaison entre les tensions de tenue calculées par le modèle mathématique avec celles mesurées expérimentalement pour les séries # 1 et # 2

La figure 6.16 résume les valeurs de la tension de tenue obtenues avec le modèle numérique pour chaque série de test, la valeur du coefficient J correspondant ainsi que la prise en compte ou non de la variation de la conductivité en fonction du temps.

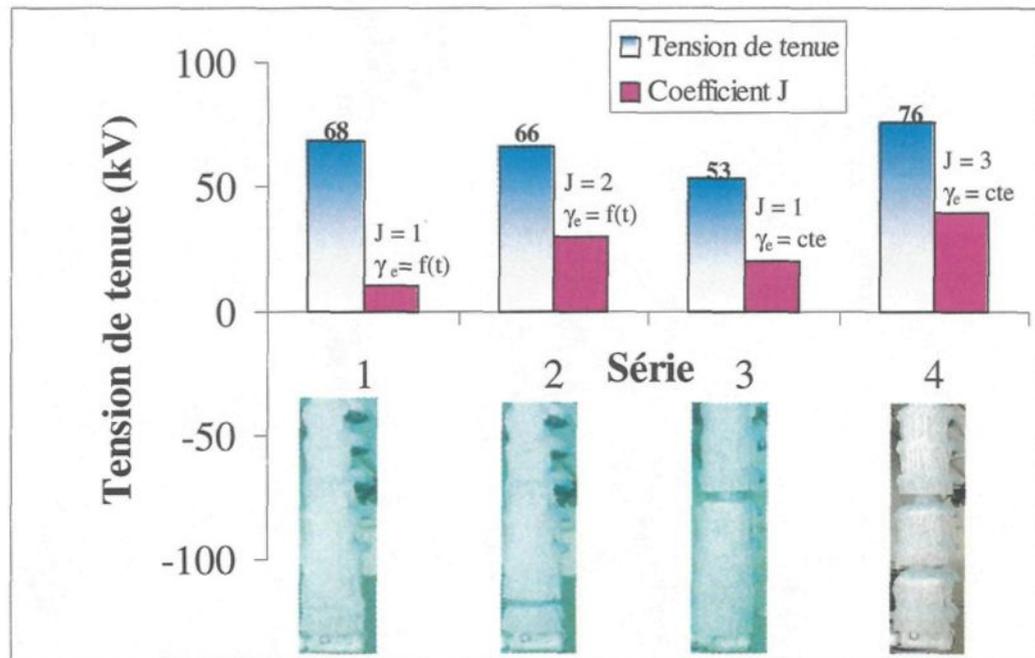


Figure 6.16 : Variation du coefficient J en fonction des différentes configurations étudiées

En introduisant la nouvelle équation de la résistance de la glace dans le modèle mathématique amélioré, on arrive à la forme finale de l'équation de prédiction de la tension de tenue :

$$V_{tm} = Ax \left[\frac{(-4.4973W^2 + 111W + 1155)x}{V_{tm}} \right]^{\frac{n}{b'}} + \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[\frac{\pi(L-x)}{W} + J' \cdot \ln \frac{W}{2\pi r_0} \right] \left[\frac{(-4.4973W^2 + 111W + 1155)x}{V_{tm}} \right]^{\frac{1}{b'}} \quad \text{E6.15}$$

Remarque

La méthode Newton-Raphson d'ordre 1, présentée à l'annexe A, a été utilisée pour résoudre l'équation générale du modèle en variant la conductivité surfacique, γ_e , le diamètre et la longueur de l'isolateur. Mais au fur et à mesure que la complexité de

cette équation augmente, la convergence de certaines itérations n'est plus garantie. Par conséquent, nous nous sommes servis d'une variante d'ordre 2 de la méthode de Newton-Raphson pour pallier ce problème, mais nous avons été confrontés à une autre difficulté dans le calcul matriciel de la dérivée seconde. Alors, la méthode du nombre d'or (Annexe A) combinée avec la méthode de Newton-Raphson a été utilisée pour résoudre ce problème. Encore une fois, nous avons été bloqués devant un choix erroné sur les critères d'initialisation et d'arrêt. Ainsi, pour obtenir des résultats non erronés, il a été décidé d'utiliser la méthode de substitution (Annexe A) dont la convergence vers une solution exacte est toujours garantie. La vitesse lente de la convergence était le seul prix à payer et la comparaison des résultats calculés à ceux obtenus expérimentalement s'est déroulée comme prévu. Les résultats étaient plus cohérents, d'où une meilleure précision du nouveau modèle.

6.4 Conclusion

Les expériences effectuées pour déterminer l'effet du diamètre sur la tension de tenue ont permis d'effectuer une première correction de l'équation du modèle mathématique. Le modèle ainsi modifié a fourni des résultats très satisfaisants concernant la prise en compte de la variation du diamètre de l'isolateur.

Les expériences concernant l'étude de l'influence de la longueur et de la position des intervalles d'air sur la tension de tenue ont permis d'apporter une deuxième correction à l'équation du modèle mathématique. Cependant, cette correction a nécessité quelques ajustements. Dans un premier temps, la prise en compte du nombre

de pieds d'arc par l'introduction du paramètre J dans l'équation de la résistance résiduelle du dépôt de glace n'a pas été très concluante. En effet, une erreur relative d'environ 15 % a été obtenue pour chaque série. Cette erreur provenait en grande partie des dépôts de glace des séries # 1 et # 2 qui sont différents de ceux des séries # 3 et # 4. À partir de cette constatation, ces deux couples de séries ont été traités différemment afin de tenir compte de leur différence respective.

Pour les séries # 3 et # 4, il a été décidé de diminuer la valeur du paramètre J afin de tenir compte de la multiplicité des arcs électriques locaux présents le long de l'intervalle d'air situé au voisinage de l'électrode de mise à la terre. Étant donné que la résistance au voisinage des différents pieds d'arc en contact avec la surface de glace est négligeable, les résultats numériques obtenus avec cette considération ont grandement été améliorés.

Pour les séries # 1 et # 2, pour lesquelles l'électrode de mise à la terre est complètement recouverte de glace, une barrière diélectrique prend place et ralentit ainsi l'établissement du courant de fuite et par conséquent du contournement. Afin de tenir compte de cette barrière diélectrique, il a été supposé que la conductivité surfacique du dépôt de glace se modifiait au cours du franchissement de cette barrière diélectrique. Ainsi, pour chaque série, la valeur de la conductivité surfacique a été recalculée en fonction de la tension de tenue obtenue expérimentalement, puis réinjectée dans le modèle mathématique. Les résultats numériques obtenus, qui tiennent aussi compte du nombre de pieds d'arc, ont grandement été améliorés.

La méthode de substitution utilisée pour résoudre l'équation mathématique semble être la mieux désignée pour obtenir des résultats précis.

CHAPITRE 7

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS

CHAPITRE 7

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS

L'objectif de cette thèse était d'approfondir les connaissances dans le domaine du givrage atmosphérique des isolateurs et d'améliorer le modèle mathématique existant permettant de prédire la tension de tenue de ces derniers. Les résultats ainsi obtenus permettront d'améliorer la conception et le design des isolateurs afin d'accroître leur performance diélectrique lorsqu'ils sont soumis à des accumulations de glace sévères.

En particulier cette thèse visait à étudier l'influence des caractéristiques physiques d'une chaîne de cinq isolateurs standard IEEE tel que son diamètre moyen ainsi que la répartition et le nombre des intervalles d'air présents sur la tension de tenue. Les résultats obtenus à partir des différentes études expérimentales réalisées ont donné lieu à l'amélioration du modèle mathématique existant afin de prédire la tension de tenue d'un isolateur recouvert de glace réalisée en régime humide. Ainsi, en incluant la prise en compte de l'effet du diamètre de l'isolateur, ainsi que la répartition et le nombre des intervalles d'air, un modèle mathématique plus général a été obtenu. Ce modèle permettra ainsi de couvrir plusieurs types d'isolateurs présentant des morphologies de dépôts de glace

différents. Cependant, les études réalisées dans le cadre de cette thèse n'ont pas pris en compte l'effet de la longueur de l'isolateur qui reste toujours limité à 84 cm, au moment où cette thèse a été rédigée. Des travaux afin d'augmenter l'applicabilité du modèle à des longueurs d'isolateurs allant jusqu'à quatre mètres sont actuellement entrepris.

7.1 Influence du diamètre

L'étude de l'influence de la variation du diamètre moyen de l'isolateur recouvert de glace sur sa tension de tenue a été réalisée en faisant varier la largeur du dépôt de glace accumulé à l'aide d'un dispositif spécialement conçu à cet effet, appelé masque. Cette procédure a permis de contourner la difficulté de trouver des isolateurs de même type mais avec des diamètres différents. Ainsi, en faisant varier la largeur du dépôt de glace sur un isolateur de diamètre fixe, en l'occurrence une chaîne de cinq isolateurs standards IEEE, différents diamètres moyens de 5, 10, 15 et 24.5 cm ont pu être étudiés.

Dans l'optique de se placer dans le cas le plus défavorable que l'on puisse rencontrer dans la nature, les accumulations de glace ont été réalisées en régime humide afin d'obtenir une glace s'apparentant au verglas. De plus, ces accumulations de glace présentaient une forte épaisseur afin de simuler des accumulations sévères. Pour chaque diamètre étudié, la tension de tenue a été déterminée en utilisant la méthode de mesure à 50%.

Les résultats obtenus en faisant varier le diamètre moyen de la chaîne d'isolateurs ont mis en évidence la diminution de la tension de tenue avec l'augmentation du diamètre de la

chaîne d'isolateurs. Cette diminution provient principalement de la diminution de la résistance du dépôt de glace lorsque le diamètre augmente. Effectivement, dans l'expression de la résistance, la largeur du dépôt de glace apparaît au dénominateur de l'équation et, étant le seul paramètre à varier, il influence directement la valeur de la résistance. De plus, il a été démontré que la résistance suivait une loi de puissance en fonction du diamètre, similaire à l'expression obtenue avec la tension de tenue déterminée. De même, une variation linéaire entre la valeur maximale moyenne du courant de fuite a été obtenue en fonction du diamètre moyen de l'isolateur, confirmant ainsi les résultats obtenus pour les lois de variation de la résistance et de la tension de tenue.

En résumé, sous des conditions de précipitations atmosphériques froides et sévères, un isolateur présentant un diamètre plus faible aura, pour une tension appliquée équivalente, une tension de tenue à 50 % plus importante qu'un isolateur de plus gros diamètre. Les résultats présentés dans cette thèse ont été obtenus avec des isolateurs suspendus, mais ils peuvent être tout aussi bien applicables aux isolateurs de poste.

7.2 Influence de la répartition et du nombre des intervalles d'air

Cette étude, rendue possible grâce à la réalisation d'une accumulation sans tension permettant ainsi de contrôler la position et la répartition des intervalles d'air créés artificiellement, a mis en évidence l'importance que peut avoir la distribution et le nombre d'intervalles d'air sur le contournement électrique d'une chaîne de cinq isolateurs standards IEEE.

Pour cette étude, quatre configurations différentes ont été étudiées. Elles étaient regroupées par paire, c'est-à-dire deux présentant un intervalle d'air au voisinage de l'électrode de mise à la terre et deux autres ne présentant pas cet intervalle d'air. De plus, la configuration de chaque paire présentait un nombre différent d'intervalles d'air.

Ainsi, parmi les quatre configurations étudiées, celle présentant trois intervalles répartis équitablement s'est avérée être la meilleure combinaison (série #4). Dans ce cas, une augmentation de 43 % de la tension de tenue à 50 % a été obtenue par rapport à la configuration prise comme référence et qui présentait un intervalle d'air situé au voisinage de chaque électrode (série #3). Cette augmentation est attribuable principalement au fait qu'un nombre plus important d'intervalles d'air entraîne une augmentation de la distance de fuite (ou encore distance de contournement) de l'isolateur recouvert de glace. Cela se traduit par une apparition des décharges partielles et une tension de réallumage des arcs plus grande. De plus, un nombre plus important d'intervalles d'air signifie une

augmentation du nombre d'arcs partiels qui se traduit finalement par une augmentation de la résistance résiduelle du dépôt de glace générée par un nombre de pieds d'arc plus important. Enfin, toujours pour cette configuration, l'intervalle d'air du milieu se comporte comme une barrière de potentiel et contribue à limiter l'apparition des arcs partiels.

Pour les deux séries présentant de la glace au voisinage de l'électrode de mise à la terre (séries #1 et #2), c'est-à-dire à la place de l'intervalle d'air présent sur les deux autres séries, une augmentation respective de 28.3% et 24.5 % de la tension de tenue par rapport à la série de référence a été obtenue. Ceci est dû principalement au fait que le dépôt de glace recouvrant l'électrode de mise à la terre se comporte comme une barrière diélectrique plus importante que celle offerte par l'intervalle d'air. Cela contribue à limiter partiellement le courant de fuite et ralentir ainsi la formation du film d'eau conducteur à la surface de la glace. Une fois cette barrière diélectrique franchie, le courant de fuite peut alors croître, entraînant la formation d'un intervalle d'air près de la mise à la terre, résultant de la fonte localisée du dépôt de glace par les arcs électriques. On se retrouve alors dans le même cas de figure que la configuration de référence. Cependant, le temps pris pour créer ce nouvel intervalle d'air a entraîné une modification de la conductivité superficielle du dépôt de glace, se traduisant par l'augmentation de sa résistance superficielle et par l'accroissement de la tension de tenue. De plus, la comparaison de ces deux séries (séries #1 et #2) ont montré que le nombre d'intervalles d'air n'a pas de réelle influence lorsque ceux-ci sont placés proches l'un de l'autre. Au contraire, d'après les résultats obtenus, la configuration à deux intervalles d'air contribue à diminuer la tension de tenue au lieu de l'accroître et ce,

malgré une distance de fuite plus importante. En effet, les arcs électriques établis respectivement le long de chaque intervalle d'air finissent rapidement par se rejoindre avec l'apparition du film d'eau, créant ainsi un arc plus long qui court-circuite les deux intervalles d'air. Cet arc a alors une distance plus faible à parcourir pour mener au contournement.

Les différents résultats obtenus au cours de cette étude ont permis de proposer des suggestions concernant l'amélioration de la tenue diélectrique des isolateurs recouverts de glace. La première idée concerne l'augmentation de la distance inter-jupes des isolateurs à des positions précises afin d'entraîner la formation d'intervalles d'air. Ainsi, un nombre minimum de trois intervalles d'air répartis équitablement le long de l'isolateur afin de conserver une distance suffisante entre ces derniers pourrait être un bon compromis. La deuxième idée porte sur la possibilité d'empêcher la formation des intervalles d'air au voisinage des électrodes de mise à la terre et de haute tension. Cette idée semble contradictoire avec la précédente, mais les résultats ont montré que la glace, en offrant une meilleure barrière diélectrique que l'air, pouvait augmenter la tension de tenue lorsqu'elle était présente à ces endroits précis. Ainsi, une uniformisation de la distribution du potentiel permettrait, en réduisant l'intensité élevée du champ électrique au voisinage des électrodes, d'atteindre cet objectif. Cela peut être fait en utilisant des anneaux de garde disposés sur chaque électrode ou une couche semi-conductrice recouvrant entièrement l'isolateur. Finalement, une combinaison des différentes méthodes proposées précédemment pourrait permettre une amélioration réelle de la tension de tenue.

7.3 Modèle mathématique

Les études expérimentales effectuées au cours de cette thèse avaient non seulement pour but de déterminer l'influence de la géométrie d'une chaîne d'isolateurs sur la tension de tenue, mais aussi d'améliorer le modèle mathématique de prédiction de la tension de tenue qui, jusqu'à présent, était seulement applicable à des isolateurs présentant un diamètre important (autour de 24 cm) pour une accumulation de glace standard. L'idée était de développer un modèle mathématique pouvant être applicable à différents types d'isolateurs présentant des diamètres différents et des dépôts de glace de un ou plusieurs intervalles d'air.

Dans un premier temps, une correction préliminaire a été apportée au modèle mathématique qui portait sur l'équation de réallumage de l'arc déterminée expérimentalement par l'utilisation d'un cylindre en remplacement de l'isolateur. Les résultats obtenus ont montré que la tension établie aux bornes de l'intervalle d'air, créé artificiellement le long du dépôt de glace cylindrique, dépend uniquement de la longueur de l'espace d'air et non pas de la longueur du dépôt de glace. De plus, il a été démontré que cette tension, à partir de laquelle l'équation de la tension de réallumage de l'arc a été déterminée, varie linéairement avec l'augmentation de la longueur de l'intervalle d'air.

La première correction relative aux études expérimentales portait sur l'introduction de la variation du diamètre moyen de l'isolateur dans le modèle mathématique. Cette prise en

compte de la variation du diamètre s'est faite par l'intermédiaire du coefficient K , qui apparaît dans l'équation de réallumage de l'arc. L'équation obtenue à partir des résultats expérimentaux a permis d'établir une relation entre K et le diamètre moyen de l'isolateur. L'introduction de cette nouvelle équation dans le modèle mathématique a permis d'obtenir des résultats proches de ceux obtenus expérimentalement, validant ainsi cette première correction.

La répartition et le nombre d'intervalles d'air ont été introduits dans le modèle mathématique par l'intermédiaire du coefficient J qui représente le nombre de pieds d'arc en contact avec la surface de glace. Cette procédure permet ainsi de modéliser l'augmentation de la concentration des lignes de courant au voisinage du pied d'arc qui contribue à augmenter la résistance résiduelle du dépôt de glace. Cependant, les résultats obtenus avec cette première correction n'ont pas été concluants puisqu'une erreur relative d'environ 15 % entre la tension de tenue obtenue numériquement et expérimentalement a été relevée. Cette différence provenait essentiellement de la présence ou non de l'intervalle d'air situé au voisinage de la mise à la terre. Il a donc été décidé de traiter ces deux cas différemment et de modifier le modèle mathématique en conséquence.

Dans le cas où l'intervalle d'air est présent, le nombre de pieds d'arc en contact avec la surface de glace a été diminué de un afin de tenir compte de la présence simultanée de plusieurs arcs partiels le long de l'intervalle d'air considéré. Dans le cas où l'intervalle d'air fait place au dépôt de glace, c'est la conductivité superficielle de la glace, γ_e , qui a été

modifiée afin de tenir compte de sa diminution au cours du processus de contournement. Le modèle mathématique final corrigé a ainsi permis d'obtenir des résultats en accord avec les mesures expérimentales de la tension de tenue à 50 % et peut donc être applicable à tout type d'isolateur dont la longueur ne dépasse pas 84 cm.

7.4 Recommandations pour les travaux futurs

Les études effectuées au cours de cette recherche ont permis d'avoir une meilleure compréhension de l'influence de la géométrie d'un isolateur sur sa tension de tenue lorsque ce dernier est recouvert d'un dépôt de glace réalisé en régime humide. Ces études sont donc un premier pas important vers une aide précieuse à la conception de nouveaux types d'isolateurs ainsi qu'à l'amélioration des modèles mathématiques de prédiction de la tension de tenue qui permettront bientôt de réduire le nombre de tests expérimentaux longs et laborieux. Ces études auront aussi permis d'ouvrir de nouvelles voies de recherche plus appliquées dans la compréhension des phénomènes de contournement et des paramètres physiques pouvant les influencer. Cependant, avant d'aboutir à une solution optimale, d'autres études expérimentales devront être entreprises et de préférence, en suivant les recommandations présentées ci-après.

7.4.1 Recommandations sur l'influence du diamètre

Concernant les études relatives à l'influence du diamètre, il pourrait être intéressant de se procurer plusieurs isolateurs de même type et de différents diamètres afin d'effectuer à nouveau des tests de contournement en utilisant ces isolateurs et de valider les résultats trouvés. Il pourrait être aussi utile de déterminer une nouvelle expression du coefficient K de l'équation de réallumage de l'arc en fonction du diamètre. De même, ces différents tests devront être réalisés en tension continue. Enfin, il faudrait aussi vérifier si les résultats obtenus sont valides pour des isolateurs de poste dont la mise à la terre et la haute tension sont inversées par rapport aux isolateurs suspendus.

7.4.2 Recommandations sur l'influence de la répartition des espaces d'air

Concernant l'étude de l'influence de la répartition et du nombre d'intervalles d'air, il serait intéressant dans un premier temps de se procurer plusieurs isolateurs de même type ayant un pas variable entre les jupes pour effectuer une nouvelle série de tests de contournement. Les résultats obtenus pourraient être combinés avec les résultats de simulation numérique de calcul du champ électrique afin de tirer le maximum d'information sur l'influence des intervalles d'air sur la tension de tenue des isolateurs testés. Dans la même optique, des tests concernant l'influence de la répartition et du nombre d'intervalles d'air pourraient être entrepris, mais cette fois en utilisant une même distance de contournement (ou longueur totale des intervalles d'air) qui serait répartie sur

un ou plusieurs intervalles d'air. Pour ces tests, un isolateur de poste pourrait être utilisé et les résultats obtenus pourraient alors être comparés aux résultats numériques disponibles à ce sujet.

D'autres études expérimentales sont nécessaires pour déterminer la variation dynamique de la conductivité de la surface γ_e au cours du processus de contournement. En particulier, il serait intéressant de déterminer une relation temporelle de cette conductivité surfacique.

Enfin, les différents tests proposés pourraient être de nouveau réalisés en tension continue.

7.4.3 Recommandations pour l'amélioration du modèle mathématique

Dans un premier temps, il serait judicieux d'utiliser un isolateur réel à la place du cylindre employé pour trouver l'équation de réallumage de l'arc. De même, il faudrait réaliser des études plus approfondies sur les équations permettant d'obtenir les paramètres K et b relatifs à la tension de réallumage de l'arc dans le cas où plusieurs intervalles d'air sont présents le long de l'isolateur. Les résultats trouvés pourront alors être intégrés à l'équation du modèle mathématique. Finalement, des études relatives à l'application de ce nouveau modèle à des longueurs d'isolateurs allant jusqu'à 4 m devront être entreprises.

7.4.4 Recommandations sur l'amélioration de la tenue diélectrique des isolateurs

Il serait intéressant de vérifier les suggestions faites concernant l'amélioration de la tenue diélectrique des isolateurs recouverts de glace. La première idée serait de créer artificiellement des intervalles d'air le long de l'isolateur, soit en augmentant la distance inter-jupes, soit en utilisant des extensions de jupes. Ces intervalles d'air devront être distribués équitablement le long de l'isolateur tout en veillant à garder une distance suffisante entre chaque intervalle d'air. Cette contrainte limite le nombre et la longueur des intervalles d'air à créer, mais ce nombre devra toutefois être au moins égal à trois. La deuxième idée serait de permettre à la glace de s'accumuler sur les électrodes afin de créer une barrière supplémentaire au contournement et ce, par l'utilisation d'anneaux de garde ou l'emploi de revêtement semi-conducteur. Pour chaque configuration retenue, la détermination de la tension de tenue à 50 % devra être établie et des ajustements devront être pris en conséquence afin de déterminer la meilleure solution. Ces ajustements pourraient porter sur le nombre d'intervalles d'air créés, sur la méthode utilisée pour créer ces intervalles d'air, sur une combinaison des méthodes proposées ou, éventuellement, sur le développement de nouvelles méthodes. Un nombre important de possibilités nous est offert et c'est en testant différentes configurations et en éprouvant de nouvelles idées que les objectifs fixés seront atteints. En ce sens, nous pouvons dire qu'il reste encore beaucoup de chemin à parcourir.

RÉFÉRENCES

Boehme H. et Obenaus F., "Pollution Flashover Tests on Insulators in the Laboratory and in Systems and the Model Concept of Creepage Path Flashover", GIGRE, n° 407, 1966.

Browne Jr., « A Study of AC Arc Behaviour near Current Zero by means of Mathematical Models », IEEE Transaction, Vol. 67, P. 141-153, 1948.

Bui H.T., Phan L.C., Huraux C. et Pissolato J. Jr., « HVDC Flashover on the Surface of Conductive Ice », « IEEE International Symposium on Electrical Insulation », Vol. 84CH1964-6, pp.85-88, Montréal 1984.

Claverie P., « Predetermination of the Behavior of Polluted Insulators ». IEEE Transaction, Vol. PAS-90, No. 4 P. 1902-1908, juillet 1971.

Claverie P. et Porcheron Y., « How to Choose Insulators for Polluted Areas », IEEE Transaction, Vol. PAS-92, No. 3 P. 1121-1131, mai / juin 1973.

Commission Électrotechnique Internationale, « Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés aux réseaux à courant alternatif », Norme internationale CEI 507, avril 1991.

Drapeau J. F., Farzaneh M., Roy M., Chaarani R. et Zhang J., « An experimental Study of Flashover Performance of Various Post Insulators Under Icing Conditions »,

« Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena », CEIDP, Vol. 1, P. 4-1, Victoria, BC, Canada, **2000**.

Erler F., «Zum Kriechuberschlag Dicker Isolator en bei Wechsels Pannung», Elektric, Vol. 3 P.100-102, **1969**.

Farouk A. M. Rizk, «Modèles mathématiques du contournement des isolateurs sous pollution», Electra, Vol. 78, P. 71-103, **1981**.

Farzaneh M., Zhang J. et Chen X., « Modeling of the AC Discharge on Ice Surfaces ». « IEEE Transactions on Power Delivery », Vol. 12 No. 1, p. 325, janvier **1997**.

Farzaneh M. et Kiernicki J., « Flashover Performance of Ice-Covered Insulators », revue canadienne de génie électrique et informatique, Vol. 22 No. 3, juillet **1997**.

Farzaneh M., Kiernicki J., Chaarani R., Drapeau J. F. et Martin R., « Influence of Wet-Grown Ice on the AC Flashover Performance of Ice-Covered Insulators ». « 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz », Autriche, Vol. No. 3176, p.4, août / septembre **1995**.

Farzaneh M. et Kiernicki J., «Flashover Problems caused by Ice Build-up on Insulators», « IEEE Electrical Insulation Magazine », Vol. 11, No. 2, mars/avril **1995**.

Farzaneh M. et Volat C., «Electric Field Modelling Around an Ice-Covered Insulator using Boundary Element Method». «Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation », Anaheim, CA, USA, avril 2-5, **2000**.

Farzaneh M., Zhang J., Chaarani R. et Fikke S. M., «Critical Conditions of AC Arc Propagation on the Ice Surfaces», «Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation », Anaheim, CA USA, avril 2-5, **2000**.

Farzaneh M. et Zhang J., «Behaviour of DC Arc on Ice Surfaces », «The English International Workshop on Atmospheric Icing of Structures », p.193-197, IWAIS **1998**.

Fazelian, M. Wu C.Y., Cheng T. C., Nour H. I. et Wang L. J., «A Study on the Profile of HVDC Insulators : dc Flashover Performance ». IEEE Transaction, EI, Vol. 24, No. 1, pp. 119-125, février **1989**.

Fujimura T., Naito K., Hasegawa Y. et Kawagushi K., «Performance of Insulators Covered with Snow or Ice». «IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems », Vol. PAS 98, PP. 1621-1631 octobre **1975**.

Gorski R. A., «Meteorological Summary - March 10 1986 - Multiple Outages on the Southern Ontario (Central Region) 500 kV System». Hydro-Ontario, Report No. 80604-1 P. 1-40, **1986**.

Hampton B. F., «Flashover Mechanism of Polluted Insulator», Proc. IEEE, Vol. 11, No. 5, P. 985-990, juillet **1964**.

Hesketh S., «General Criterion for the Prediction of Pollution Flashover». Proc. IEEE, Vol. 114, No. 4, avril **1967**.

Hoyaux M. F., « Arc Physics », Springer-Verlag New York Inc., **1968**.

Hurley J. J. et Limbourn G. J., «Correlation of Service Performance of Insulators and Lightning Arresters under Polluted Conditions with Test Results with a View to Examining the Validity of Present Criteria for Insulator Selection and Testing», CIGRE, SC. 33, septembre **1969**.

Hydro-Quebec, «Analysis of the Hydro-Quebec System Blackout on April 1988». «Official Hydro-Quebec Report », Montréal, juillet **1988**.

Kannus K. et Verkkonen V., « Effect of Ice Coating on the Dielectric Strength of High-Voltage Insulators », Quatrième congrès international sur le givrage atmosphérique de structures, P. 296-299, Paris, septembre **1988**.

Kawai M., «AC Flashover Tests at Project UHV on Ice-Covered Insulators». « IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems », Vol. PAS-89, No. 8, p. 1800-1805, Décembre **1970**.

Kimoto, I. Fujimura, T. et Naito, K., « Performance of Insulators for Direct Current Transmission Line Under Polluted Condition ». IEEE Transaction on PAS, Vol.92, pp. 943-949, mai/juin 1973.

Kuffel E. et Zaengl W. S., «High Voltage Engineering Fundamentals», Pergamon Presse, 1984.

LeRoy et Cie, «Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions», Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, Paris 1984.

Li S., « The mechanism of the flashover on a Polluted Dielectric Surface under AC Voltage ». Thèses PHD, Université de Tsinghua, 1988.

Matsuoka R., Ito S., Sakanishi K. and Naito K., «Flashover on Contaminated Insulators with Different Diameters». « IEEE Transactions on Electrical Insulation », Vol. 26 No. 6, décembre 1991.

Nache H., «Tabilitat der Fremdschichtentladungen und Theorie des Fremdschichtuberschlags», ETZ-A No. 16, P. 577-585, 1966.

Neumarker G., «Verschmut zung szustand und kriechweg». « Monatsber, D. Deut. Akad, Wiss », Berlin, Vol. 1 P. 352-359, 1959.

Obenaus F., «Fremdshichtüberschlag und Kriechweglang», « Deutch Elektrotechnik », Vol. 4, P. 135-136, **1958**.

Phan C. L. et Matsuo H., «Minimum Flashover Voltage of Iced Insulators». IEEE «Transaction on Electrical Insulation», EI-18-6, PP. 605-618, **1983**.

Rizk F. A. M., «Analysis of Dielectric Recovery with Reference to Dry-Zone Arc on Polluted Insulators». IEEE Conference, Vol. No. 71 C134 PWR, « Winter Power Meeting », New York, janvier / février **1971**.

Sundavarajan R., Sadhureddy N. R. et Gorur R. S., «Computer-Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Conditions», « IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation », Vol. 2, No. 1, février **1995**.

Sundavarajan R. et Gorur R. S., «Effect on Insulator Profiles on DC Flashover Voltage under Polluted Conditions». « IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation », Vol. 1 No. 1, février **1994**.

Task Force 33.04.09, « Influence of Ice and Snow on The Flashover Performance of Outdoor Insulators, Part I: Effects of Ice ». ÉLECTRA, no. 187, pp. 91-111, décembre **1999**.

Volat C., «Calcul du potentiel et du champ électrique le long des surfaces de glace recouvrant un isolateur H.T. et dans les intervalles d'air entre celles-ci». Thèse de Doctorat, UQAC, **2002**.

Wilkins R. et Al-Baghdadi A. A. J., «Arc Propagation along an Electrolyte surface», Proc. IEEE, Vol. 118, No. 12, P. 1886-1892 décembre **1971**.

Woodson H. H. et McElroy A. J., « Insulators with Contaminated Surfaces Part III : Modelling of Discharge Mechanism», IEEE Transaction, Vol. Pas-89, No. 8 P. 1858-1867, novembre / décembre **1970**.

Zhang J., Farzaneh M. et Chen X., «Characteristics of Local Arc on Ice Surface», 9th ISH, P. 3177, Autriche **1995**.

Zhang J. et Farzaneh M., « Propagation of AC and DC Arcs on Ice Surfaces ». IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 2, pp. 269-276, **2000**.

Zhang J., Farzaneh M. et Aboutorabi S., «Critical Condition of Arc Propagation on Ice-Covered Insulators», IW AIS, **2002**.

ANNEXE A

DÉFINITIONS ET THÉORIES

A.1 Arc de contournement

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

Toutefois, quelle que soit l'origine de l'arc de contournement, ce dernier est créé suivant le même processus qui débute par l'apparition de décharges partielles ou décharges couronnes. Les décharges couronnes apparaissent généralement dans une région où la valeur du champ électrique atteint celle du champ électrique disruptif de l'air. Elles sont caractérisées par l'apparition d'effluves lumineuses qui sont dues à l'ionisation de l'air sous l'effet du champ électrique intense et par l'apparition d'un crépitement audible entretenu par de nombreux claquages diélectriques. Dû à l'importance du phénomène dans le domaine du transport de l'énergie électrique, les décharges couronnes ont fait l'objet de nombreuses études qui ont conduit à l'établissement de diverses lois au cours des dernières

décades. Par exemple, en vue de trouver une relation empirique expliquant le processus de décharge sous tension alternative, Peek s'est servi d'un cylindre coaxial pour mesurer le champ critique d'une décharge couronne E_c sur un conducteur électrique [Kuffel et Zaengl, 1984]. La relation empirique ainsi obtenue est donnée par :

$$\frac{E_c}{\delta} = 31.53 + \frac{9.63}{\sqrt{\delta r}}$$

avec δ la densité relative de l'air et r le rayon interne du cylindre.

Ces études ont aussi permis d'identifier les processus d'ionisation à l'origine des décharges couronnes. Sans entrer dans les détails, on peut citer essentiellement les processus d'ionisation par impact d'électrons, par photoionisation, par formation des ions négatifs et par phénomène de surface. De plus, suivant la polarité de la tension appliquée, on retrouve différents modes caractérisant les décharges. Ainsi, en polarité négative, les décharges commencent par une avalanche électronique, suite à l'ionisation de l'air suivant les modes décrits précédemment. Celle-ci est suivie des lueurs négatives et d'effluves négatifs dans certains cas principalement lorsqu'on fait croître la tension appliquée des impulsions de Trichel. En polarité positive et avec l'augmentation de la tension appliquée, l'avalanche électronique est suivie des streamers, des lueurs de Hermstein. En tension alternative, tous les modes de décharges précédents sont présents.

L'apparition de décharges couronne s'accompagne de charges d'espace négative ou positive suivant la polarité de la tension appliquée qui contribue au processus de décharge.

L'étape finale de ce processus de décharge, si la tension appliquée est suffisante, est l'établissement d'un arc électrique le long de l'espace inter-électrodes où les décharges couronnes ont pris naissance. L'arc se distingue principalement des décharges précédentes par le fait que sa densité de courant d'arc est très élevée ($0.1 - 100 \text{ kA/cm}^2$), que le courant d'arc est principalement dû aux électrons issus de la cathode et non pas ceux résultant de l'ionisation de l'air et que la tension d'arc (la chute de tension le long de l'arc) est faible. L'arc électrique présente donc une conductivité électrique élevée ainsi qu'une température importante de l'ordre de 4000K.

A.2 Processus de développement de l'arc de contournement

Il existe différentes conditions qui peuvent être à l'origine d'un contournement électrique d'un isolateur : la pluie, la neige, la pollution ou la glace. Mais dans tous les cas, il faut nécessairement la présence d'une couche conductrice à la surface de l'isolateur pour que le contournement se produise. Et quelle que soit la condition présente, le processus de contournement de l'isolateur est souvent identique et est généré par la propagation d'un arc électrique à la surface de l'isolateur.

Pour expliquer le processus de contournement d'un isolateur, prenons l'exemple d'un isolateur recouvert de glace. Par la même occasion, nous parlerons de la relation entre le courant de fuite circulant à la surface de l'isolateur glacé et le processus de contournement. Lorsqu'un isolateur est propre, son courant de fuite est négligeable, de l'ordre du microampère. En présence d'une couche de glace, la valeur du courant reste faible si la glace est sèche, c'est-à-dire non-conductrice. On se trouve alors dans un régime capacitif puisqu'il s'agit d'un courant de déplacement et non de conduction. Cependant, cette couche de glace va affecter sensiblement la distribution statique du potentiel le long de l'isolateur de par sa forte permittivité. De plus, on observe une augmentation de la chute de tension le long des intervalles d'air présents (les parties de l'isolateur non recouvertes de glace). Dans certains cas, ces chutes de tension peuvent être suffisantes pour générer des décharges partielles dans les intervalles d'air, généralement au voisinage de l'électrode haute tension. L'apparition de ces décharges va entraîner l'augmentation du courant de fuite qui, combinée à la présence des décharges, entraînent la fonte de la surface de la glace et la création d'un film d'eau. Disposant maintenant d'une surface conductrice, le courant de fuite peut alors circuler librement à la surface de l'isolateur et sa valeur s'en trouve augmentée (inférieure à 20 mA). On passe alors d'un régime capacitif à un régime capacitif-résistif. Lorsque le film d'eau est présent sur toute la surface de glace, la distribution du potentiel se trouve fortement modifiée. Ainsi, la majorité de la tension appliquée se retrouve aux bornes des intervalles d'air. Avec cette augmentation de la différence de potentiel aux bornes des différents intervalles d'air, les décharges couronnes évoluent en effluves (négatives ou positives en alternatif) qui conduisent généralement à

l'apparition d'arcs électriques accompagnés d'un courant de fuite de valeur élevé (supérieure à 20 mA). On se trouve alors dans un régime purement résistif. Finalement, suivant les conditions qui sont liées à la conductivité superficielle de la couche de glace ainsi qu'à l'homogénéité du dépôt de glace, le ou les arcs électriques présents le long des intervalles d'air peuvent se propager et mener au contournement de l'isolateur. Ce processus est sensiblement identique lorsqu'il s'agit d'une couche de pollution. Dans ces conditions, la contournement se produira lorsque la couche de pollution est humide.

Les études concernant la propagation de l'arc à la surface ont démontré que la rupture électrique de l'air au pied de l'arc n'était pas la cause de la propagation de l'arc sur la surface [Li 1988]. Li a utilisé la méthode de simulation des charges pour calculer la fatigue électrique causée par un arc se propageant sur une surface diélectrique polluée. Il a ainsi émis l'hypothèse que le contournement était causé par l'ionisation à haute température des molécules de sel condensé dans l'arc et était complété par la migration des ions positifs et négatifs sous l'effet du champ électrique. Hampton a établi un critère de propagation de l'arc sous tension continue [Hampton, 1964]:

$$E_a > E_p$$

où E_a est le gradient de la tension dans l'arc et E_p le gradient de la tension de la surface polluée.

Sous tension alternative, l'arc s'éteint à chaque passage de courant par zéro. L'arc se développe lorsque l'amplitude de la tension atteint son maximum. Dans les autres cas, l'arc diminue et augmente selon la tension alternative et son réallumage est considéré en relation avec la rupture énergétique [Browne 1948] et diélectrique [Rizk, février 1971]. La rupture énergétique a lieu quand le courant passe par zéro, mais l'énergie injectée ne se dissipe plus à cause de la forte conductivité du milieu. Le réallumage diélectrique se manifeste lorsque la conductance électrique de l'arc résiduel disparaît partiellement lors du passage du courant par zéro.

A.3 Tension de tenue

La tension de tenue est définie comme étant la tension maximale pouvant être appliquée aux bornes de l'isolateur sans risque de contournement. Cette tension peut être aussi appelée tension de contournement. Deux méthodes existent pour mesurer la tension de tenue maximale : la méthode de la tension de tenue maximale et la méthode de la tension de tenue à 50% [Commission électrotechnique internationale, 1991].

A.4 Méthodes numériques

A.4.1 Méthode de Newton-Raphson

La méthode de Newton-Raphson est utilisée dans la plupart des algorithmes de résolution des systèmes non linéaires. Cette méthode se caractérise par les étapes ci-dessous :

- Définition de l'expression du résidu $R(X)$, de la matrice tangente $A_t(X)$ et de la solution initiale X_0 (souvent la solution du système linéaire associé);
- Calcul de la première correction ΔX_1 et de la première estimation $X_1 = X_0 + \Delta X_1$;
- Estimation du critère d'arrêt qui dépend généralement de R et de ΔX ;
- Calcul de la deuxième correction ΔX_2 et de la deuxième estimation $X_2 = X_1 + \Delta X_2$;
- Estimation du critère d'arrêt et ainsi de suite ...

En détail, la méthode de Newton-Raphson procède à une approximation X_{i-1} de la solution pour laquelle le résidu n'est pas nul :

$$R(X_{i-1}) = F - A(X_{i-1})X_{i-1} \quad \text{Ea.1}$$

À l'itération i , une approximation X_i de la solution est obtenue telle que :

$$R(X_i) = R(X_{i-1} + \Delta X_i) = 0 \quad \text{Ea.2}$$

L'algorithme de base de Newton-Raphson est obtenu en développant ce résidu en série de Taylor à l'ordre 1 au voisinage de X_{i-1} :

$$R(X_{i-1} + \Delta X_i) = R(X_{i-1}) + \left(\frac{\delta R}{\delta X}\right)X = X^{i-1}\Delta X_i = 0 \quad \text{Ea.3}$$

Soit :

$$-\left(\frac{\delta R}{\delta X}\right)X = X^{i-1}\Delta X_i = 0 = R(X^{i-1}) \quad \text{Ea.4}$$

En posant la matrice tangente $A_t = -\left(\frac{\delta R}{\delta X}\right)$, on obtient l'algorithme de base de la méthode de Newton-Raphson :

$$A_t(X_{i-1}).\Delta X_i = R(X_{i-1}) \quad \text{Ea.5}$$

Avec $X_i = X_{i-1} + \Delta X_i$. En utilisant l'expression du résidu, on obtient, par dérivation :

$$A_t = -\left(\frac{\delta R}{\delta X}\right) = A(X) + \frac{\delta A}{\delta X}.X \quad \text{Ea.6}$$

$X_1 = X_0 + \Delta X_1$ est obtenue par résolution de $A_t(X_0).\Delta X_1 = R(X_0)$;

$X_2 = X_1 + \Delta X_2$ est obtenue par résolution de $A_t(X_1).\Delta X_2 = R(X_1)$;

Évidemment, ce qui est délicat dans ce genre de méthode, c'est le choix des itérations et des critères d'arrêt. Quelquefois le processus d'itérations a de fortes chances de diverger avec cette méthode. Il faut décomposer le processus et résoudre un système non-linéaire pour chaque incrément. Un autre problème se pose aussi lors de l'arrêt du processus itératif pour chaque incrément. Lorsqu'on l'arrête, on n'atteint pas la convergence absolue et l'erreur va se répercuter sur les incréments suivants. Une manière de pallier ce problème est de réinjecter le résidu qui a été obtenu à la première itération, dans le second membre de l'incrément suivant afin que ce dernier soit rééquilibré dans la suite des calculs. La définition des incréments et les critères d'arrêt de la convergence sont très difficiles à choisir et peuvent coûter très cher lorsque les erreurs conduisent à une divergence du processus itératif.

Il existe des variantes plus sophistiquées et plus efficaces de la méthode de Newton-Raphson utilisant des développements limités du résidu à l'ordre 2, au lieu de l'ordre 1 pour la méthode de base. Ceci implique le calcul d'une matrice dérivée seconde. Cette variante est cependant peu utilisée car le calcul de la matrice tangente n'est déjà pas très simple à programmer dans les applications courantes.

A.4.2 Méthode de substitution

La méthode de substitution consiste à construire une suite de solutions X_0, X_1, \dots, X_i . Cette suite de solutions doit converger vers la solution exacte. La nouvelle solution X_i est calculée à partir de la solution précédente X_{i-1} en résolvant le système linéaire :

$$A(X_{i-1})X_i = F \quad \text{Ea.7}$$

et ceci autant de fois qu'il est nécessaire pour aboutir à la convergence. On introduit donc, sous forme incrémentale, le résidu R_i du système non-linéaire. Ce résidu est un bon indicateur de la convergence puisqu'il doit tendre vers 0 au fur et à mesure des itérations :

$$R_i = R(X_{i-1}) = F - A(X_{i-1})X_{i-1} \quad \text{Ea.8}$$

L'équation Ea.7 devient :

$$A(X_{i-1})X_i = R_i + A(X_{i-1})X_{i-1} \quad \text{Ea.9}$$

D'où la formule de récurrence incrémentale :

$$A(X_{i-1})\Delta X_i = R_i \quad \text{Ea.10}$$

Avec $X_i = X_{i-1} + \Delta X_i$.

Cette méthode est plutôt utilisée dans les algorithmes pour deux raisons :

- Les termes correctifs successifs, ΔX_i , à rajouter à la solution initiale, sont évalués plusieurs fois afin de contrôler la convergence du processus;
- Les résidus, R_i , qui doivent tendre vers 0, sont aussi évalués au cours du processus. Le résidu constitue donc une bonne mesure de l'erreur au cours de la convergence. Ainsi, on a deux critères d'erreurs qui permettent d'apprécier la convergence.

Le désavantage de cette méthode demeure la vitesse de la convergence qui est plutôt lente comparée à celle de la méthode de Newton-Raphson.

A.4.3 Méthode de nombre d'or

Cette méthode se caractérise par la réduction, pour une certaine fraction, de son intervalle à chaque évaluation. L'intervalle est subdivisé en utilisant une seule évaluation lorsque l'évaluation précédente est bien localisée. Si on appelle ξ la fraction de l'intervalle L qui localise la première évaluation x_1 et η la fraction qui localise la deuxième évaluation x_2 on aura :

$$\xi L + L(\eta - \xi) + \xi L = L \quad \text{Ea.11}$$

et en simplifiant :

$$\xi + \eta = 1 \quad \text{Ea.12}$$

En posant L' dans le nouvel intervalle trouvé, les proportions nécessaires pour que le processus puisse se répéter suivant les mêmes proportions seront:

$$\xi L + L' = L \text{ et } \xi L + \xi L' = \eta L \quad \text{Ea.13}$$

en remplaçant :

$$1 - \xi = \frac{L'}{L} = \frac{\eta - \xi}{\xi} \quad \text{Ea.14}$$

On combine les deux équations pour obtenir $(1 - \xi)\xi = (1 - \xi) - \xi = 1 - 2\xi$, ou

$$\xi^2 - 3\xi + 1 = 0 \quad \text{Ea.15}$$

d'où

$$\xi = \frac{3 \pm \sqrt{5}}{2} \quad \text{Ea.16}$$

Comme $\xi < 1$, on ne retient que la solution suivante :

$$\xi = \frac{3 - \sqrt{5}}{2} = 0.381966011 \quad \text{et} \quad \eta = 0.618033989$$

La réduction de l'intervalle obtenue à chaque évaluation est $\frac{L'}{L} = 1 - \xi = 0.61803389$.

On appelle le nombre d'or, τ , un nombre défini par:

$$\tau = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{5}) = 1.618033989 \quad \text{Ea.17}$$