

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI  
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR  
RABAH CHAARANI

DÉTERMINATION DE LA TENSION DE TENUE MAXIMALE  
DES ISOLATEURS COMPOSITES EN EPDM

AUTOMNE 1996



### 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

Dans les pays froids, les lignes aériennes de transport d'énergie sont souvent exposées au givrage atmosphérique et pendant de longue période, elles sont recouvertes de glace. L'accumulation de la glace sur les isolateurs modifie leurs propriétés électriques, ce qui peut entraîner parfois une coupure d'électricité causée par l'apparition d'un arc de contournement. Les dommages ainsi créés ont un impact important sur l'économie, facteur qui a motivé l'investigation des chercheurs de plusieurs pays sur le problème de contournement.

L'utilisation de plus en plus fréquente des isolateurs synthétiques dans les réseaux de haute tension rend nécessaire l'étude de leurs performances dans les conditions de givrage. Cette étude consiste surtout à déterminer la tension de tenue maximale de ces isolateurs en fonction de différents facteurs ayant trait au phénomène du givrage.

Les études menées dans le laboratoire des hautes tensions du Groupe de recherche en ingénierie de l'environnement atmosphérique (GRIEA) de l'Université du Québec à Chicoutimi sont orientées vers l'établissement d'une méthode standardisée de mesure de la tension de tenue maximale des isolateurs électriques en présence de la glace et de la contamination. L'objectif général est d'améliorer la conception des isolateurs utilisés dans les réseaux électriques en régions froides.

Le présent mémoire, entrepris dans le cadre des travaux du GRIEA, a pour but d'étudier, en régime d'accumulation et en régime de fonte, la tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM et des isolateurs standards IEEE recouverts de glace artificielle formée en régime humide. L'accumulation de la glace sur les isolateurs a été effectuée dans une chambre froide à partir des gouttelettes d'eau surfondues. L'épaisseur de la glace accumulée sur les isolateurs a été mesurée sur un cylindre témoin. En régime d'accumulation, on a examiné l'influence de l'épaisseur du dépôt de glace sur la tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM, mesurée selon une méthode basée sur celle décrite par la norme CEI 507. Quant aux isolateurs standards IEEE, une seule épaisseur de glace (2 cm) a été considérée pour mesurer la tension de tenue à 50 %, également décrite par la norme CEI 507. Un des buts de la présente recherche était alors de vérifier l'applicabilité de la méthode de la tension de tenue maximale (qui a été développée originellement pour les essais sous contamination) aux essais sous glace, en sachant qu'il est fort possible que le coefficient de variation statistique soit bien différent. Ce but se réalisera en comparant les résultats obtenus par les deux méthodes (tenue maximale et tenue à 50 %) pour la même épaisseur de glace.

En régime de fonte, la tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM et standards IEEE recouverts de glace a été mesurée pour une seule épaisseur de glace, soit 1,5 cm. L'objectif était d'établir une comparaison de la sévérité de l'accumulation de glace formée dans les deux régimes d'accumulation et de fonte.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, M. Masoud Farzaneh, pour l'attention portée et les judicieux conseils prodigués tout au long de ce mémoire.

Ma gratitude va également au docteur Jacek Kiernicki pour son appui professionnel et ses conseils.

Je désire également remercier MM. Claudes D'amour et Sylvain Desgagnés pour leur appui technique ainsi que le personnel de l'UQAC, qui a contribué à l'avancement de ce travail de recherche.

Je tiens enfin à exprimer mes plus sincères sentiments de reconnaissance à ma famille et mes amis(es) qui m'ont donné le courage de poursuivre mes études.

## TABLE DES MATIÈRES

Résumé . . . . .	ii
Remerciements . . . . .	iv
Tables des matières . . . . .	v
Liste des tableaux . . . . .	x
Liste des figures . . . . .	xii

### 1. INTRODUCTION

1.1 Problématique. . . . .	2
1.2 Objectifs de la présente étude . . . . .	7

## 2. PHÉNOMÈNE DU GIVRAGE ET NOTIONS FONDAMENTALES

2.1	Formation du dépôt de glace . . . . .	10
2.2	Décharge électrique . . . . .	15
2.3	Contournement . . . . .	17
2.4	Tension de tenue . . . . .	21
2.4.1	Détermination de la tension de tenue maximale . . . . .	22
2.4.2	Détermination de la tension de tenue à 50 % . . . . .	23

## 3. ÉTUDES ANTÉRIEURES SUR LE GIVRAGE DES ISOLATEURS

3.1	Introduction . . . . .	28
3.2	Études sur les sites naturels . . . . .	29
3.3	Études en laboratoires . . . . .	32
3.3.1	Facteurs influençant la tension de tenue . . . . .	32
3.3.1.1	Effet du type de glace . . . . .	33
3.3.1.2	Effet de l'épaisseur de glace . . . . .	34
3.3.1.3	Effet de la conductivité de l'eau . . . . .	36
3.3.1.4	Effet de l'uniformité du dépôt de glace . . . . .	38
3.3.1.5	Effet de la longueur de la chaîne d'isolateurs . . . . .	39
3.3.1.6	Effet de la distance de fuite . . . . .	41
3.3.1.7	Effet du courant de fuite . . . . .	44

3.3.1.8	Effet de la polarité . . . . .	46
3.3.2	Caractéristiques des constantes d'arc A et n . . . . .	50
<b>4. ÉQUIPEMENT ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES</b>		
4.1	Introduction . . . . .	54
4.2	Équipement . . . . .	55
4.2.1	Isolateurs testés . . . . .	55
4.2.2	Chambre climatique . . . . .	57
4.3	Procédures expérimentales . . . . .	60
4.3.1	Formation des dépôts de glace . . . . .	60
4.3.2	Procédures liées aux essais de contournement . . . . .	62
4.3.2.1	Opérations préliminaires . . . . .	63
4.3.2.2	Essais de contournement . . . . .	64
4.3.2.2.1	Régime d'accumulation . . . . .	64
4.3.2.2.2	Régime de fonte . . . . .	66
4.4	Conclusion . . . . .	69

## 5. TENSION DE TENUE EN RÉGIME D'ACCUMULATION

5.1	Introduction . . . . .	71
5.2	Tension de tenue maximale, $V_{TM}$ , en fonction de l'épaisseur de glace . . . . .	72
5.2.1	Observations . . . . .	74
5.2.1.1	Observations durant l'accumulation . . . . .	74
5.2.1.2	Observations durant les tests de contournement . . . . .	78
5.2.2	Comparaison des résultats avec ceux obtenus pour l'isolateur standard . . . . .	79
5.2.3	Érosion des isolateurs . . . . .	80
5.3	Tension de tenue à 50 % . . . . .	82
5.3.1	Calcul statistique . . . . .	84
5.3.2	Comparaison avec la méthode de tenue maximale . . . . .	86
5.4	Conclusion . . . . .	88

## 6. TENSION DE TENUE MAXIMALE EN RÉGIME DE FONTE

6.1	Introduction . . . . .	91
6.2	Tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM . . . . .	92
6.3	Tension de tenue maximale des isolateurs standards IEEE . . . . .	93
6.4	Observations . . . . .	95
6.5	Conclusion . . . . .	98

<b>7. CONCLUSIONS GÉNÉRALES</b> . . . . .	<b>100</b>
<b>8. RÉFÉRENCES</b> . . . . .	<b>105</b>
<b>9. ANNEXES</b> . . . . .	<b>115</b>

## Liste des tableaux

Tableau 2.1: Formation de glace dans la nature . . . . .	11
Tableau 2.2: Caractéristiques des conditions atmosphériques . . . . .	12
Tableau 2.3: Conditions expérimentales . . . . .	14
Tableau 2.4: Calcul statistique pour $P_c = 0.95$ . . . . .	26
Tableau 3.1: Tension de tenue maximale en fonction du type de glace . . . . .	33
Tableau 3.2: Distance de fuite en fonction de la vitesse du vent en mm . . . . .	42
Tableau 3.3: Réduction de la ligne de fuite des isolateurs recouverts de la glace . . . . .	43
Tableau 3.4: Constantes d'arc A et n pour les surfaces givrées et polluées . . . . .	51
Tableau 3.5: Constantes d'arc A et n pour différentes longueurs $x < 7$ cm . . . . .	52
Tableau 4.1: Caractéristiques des isolateurs étudiés . . . . .	56
Tableau 4.2: Condition d'accumulation de la glace formée en régime humide . . . . .	61
Tableau 5.1: Résultats de mesure de la tension de tenue maximale, $V_{TM}$ , des isolateurs en EPDM en fonction de l'épaisseur de la glace . . . . .	72
Tableau 5.2: Résultats de mesure de la tension de tenue maximale, $V_{TM}$ , des isolateurs IEEE et en EPDM en fonction de l'épaisseur de glace . . . . .	80
Tableau 5.3: Résultats de mesure de la tension de tenue à 50 %; 6 isolateurs standards; régime d'accumulation; épaisseur de glace de 2 cm . . . . .	83
Tableau 5.4: Résultats obtenus pour 6 isolateurs standards IEEE par la méthode de tension de tenue maximale; épaisseur de glace de 2 cm . . . . .	86

Tableau 6.1: Résultats de mesure de la tension de tenue maximale des isolateurs en EPDM; régime de fonte lente; épaisseur de glace de 1,5 cm . . . .	92
Tableau 6.2: Résultats de mesure de la tension de tenue maximale; 6 isolateurs IEEE; régime de fonte lente; épaisseur de glace de 1,5 cm . . . .	93
Tableau A.1: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 3,0 cm . . . . .	116
Tableau A.2: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace égale 2,5 cm . . . . .	117
Tableau A.3: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 2,0 cm . . . . .	118
Tableau A.4: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 1,5 cm . . . . .	119
Tableau A.5: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 1,0 cm . . . . .	120
Tableau A.6: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 0,5 cm . . . . .	121

## Liste des figures

Figure 2.1: Vitesse de croissance du dépôt de glace . . . . .	14
Figure 2.2: Modèle électrique de la décharge sur une surface givrée . . . . .	16
Figure 2.3: Modèle utilisé pour analyser les caractéristiques de la décharge sur une surface givrée . . . . .	16
Figure 2.4: Description d'une surface polluée . . . . .	18
Figure 2.5: Formation des zones sèches sur une surface polluée . . . . .	19
Figure 2.6: Formation des arcs locaux sur une surface polluée . . . . .	19
Figure 2.7: Contournement d'une surface polluée . . . . .	20
Figure 2.8: Contournement d'un isolateur recouvert de glace . . . . .	20
Figure 2.9: Tension de tenue maximale . . . . .	22
Figure 3.1: Tension de tenue maximale en fonction de l'épaisseur de glace . . . . .	34
Figure 3.2: Distance de fuite d'une jupe d'un isolateur IEEE . . . . .	35
Figure 3.3: Tension de tenue maximale d'une colonne isolante en fonction de la conductivité( $\sigma$ ) . . . . .	37
Figure 3.4: Angle de déviation ( $\alpha$ ) en fonction de la vitesse du vent . . . . .	38
Figure 3.5: Tension de tenue maximale en fonction de la vitesse du vent . . . . .	39
Figure 3.6: Tension de tenue maximale en fonction de la distance d'arc . . . . .	40

Figure 3.7: Distance de fuite d'une chaîne de 4 isolateurs . . . . .	41
Figure 3.8: Tension de tenue maximale en fonction de la distance de fuite . . .	43
Figure 3.9: Évolution du courant de fuite . . . . .	44
Figure 3.10: Tension de tenue maximale en fonction de l'épaisseur de glace ( $\epsilon$ ) pour différentes polarités . . . . .	46
Figure 3.11: Modèle utilisé par Bui . . . . .	47
Figure 3.12: Ionisation positive . . . . .	48
Figure 3.13: Ionisation négative . . . . .	49
Figure 4.1: Formes des isolateurs testés . . . . .	55
Figure 4.2: Chambre climatique . . . . .	57
Figure 4.3: Système de la haute tension . . . . .	59
Figure 4.4: Aspect visuel du cylindre témoin . . . . .	61
Figure 4.5: Poids de la glace en fonction de l'épaisseur ( $\epsilon$ ) de glace mesurée sur le conducteur témoin . . . . .	62
Figure 4.6: Augmentation de la température pendant la fonte lente . . . . .	67
Figure 4.7: Augmentation de la température pendant la fonte rapide . . . . .	68
Figure 5.1: Variations de la tension de tenue maximale des isolateurs en EPDM en fonction de l'épaisseur de glace . . . . .	73
Figure 5.2: Dépôt de glace durant l'accumulation . . . . .	75
Figure 5.3: Variations du courant enregistré durant un test menant à la tenue pour une épaisseur de glace de 0,5 cm . . . . .	77
Figure 5.4: Variations du courant enregistré durant un test menant à la tenue pour une épaisseur de glace de 3,0 cm . . . . .	78

Figure 5.5: Variations du courant enregistré durant un test menant au contournement pour une épaisseur de glace de 2,5 cm . . . . .	79
Figure 5.6: Aspect visuel de l'érosion d'une jupe d'un isolateur en EPDM . . . . .	81
Figure 5.7: Détermination de la tension de tenue à 50 % de 6 isolateurs IEEE; épaisseur de glace de 2 cm . . . . .	84
Figure 5.8: Détermination de la tension de tenue maximale de 6 isolateurs IEEE; épaisseur de glace de 2 cm . . . . .	86
Figure 6.1: Résultats de mesure de la tension de tenue maximale des isolateurs en EPDM; régime de fonte lente; épaisseur de glace de 1,5 cm . . . . .	92
Figure 6.2: Résultats de mesure de la tension de tenue maximale des isolateurs IEEE; régime de fonte lente; épaisseur de glace de 1,5 cm . . . . .	94
Figure 6.3: Variations du volume et de la conductivité de l'eau récupérée durant un test de contournement en régime de fonte lente . . . . .	94
Figure 6.4: Variation du courant enregistré durant un test menant à la tenue; régime de fonte lente; isolateur en EPDM . . . . .	96
Figure 6.5: Variation du courant enregistré durant un test menant au contournement; régime de fonte lente; isolateur en EPDM . . . . .	96
Figure 6.6: Variation du courant enregistré durant un test menant à la tenue; régime de fonte lente; isolateur IEEE . . . . .	97
Figure 6.7: Variation du courant enregistré durant un test menant au contournement; régime de fonte lente; isolateur IEEE . . . . .	97
Figure 6.8: Comparaison des tensions de tenue maximale de l'isolateur en EPDM dans les deux régimes d'essai; épaisseur de glace de 1,5 cm . . . . .	98
Figure 6.9: Comparaison des tensions de tenue maximale de l'isolateur IEEE dans les deux régimes d'essai; épaisseur de glace de 1,5 cm . . . . .	99

Figure A.1: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 3,0 cm . . . . .	116
Figure A.2: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 2,5 cm . . . . .	117
Figure A.3: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 2,0 cm . . . . .	118
Figure A.4: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 1,5 cm . . . . .	119
Figure A.5: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 1,0 cm . . . . .	120
Figure A.6: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 0,5 cm . . . . .	121

## CHAPITRE 1

### INTRODUCTION

## CHAPITRE 1

### INTRODUCTION

#### **1.1 Problématique**

Les lignes et les postes aériens de transport d'énergie électrique sont soumis aux rigueurs du climat. Exposés à l'environnement d'un climat froid, les isolateurs peuvent subir à la fois une contamination et un givrage à leur surface. La contamination est causée par l'accumulation de plusieurs agents minéraux et biologiques tels que: la poussière, la fumée d'usines, les excréments d'oiseaux, les dépouilles d'insectes, les pluies acides, etc. Le givrage est principalement causé par la pluie verglaçante, les nuages et le brouillard givrant, la neige fondante et la condensation.

Dans plusieurs pays, les conditions climatiques en hiver sont sévères et peuvent entraîner des accumulations de glace dans les postes électriques et sur les lignes aériennes. Ces précipitations persistent souvent durant de longues périodes de l'année et peuvent entraîner des dommages mécaniques et électriques. Sous un poids excessif du dépôt, les structures exposées peuvent s'effondrer et parfois, en présence de vent, provoquer des vibrations (galop) et par conséquent des courts-circuits entre les conducteurs des différentes phases. L'accumulation de glace modifie les caractéristiques électriques des isolateurs et diminue leur tension de tenue. En raison de la contamination et du processus de givrage, la surface de glace couvrant les isolateurs peut devenir plus ou moins conductrice; durant un réchauffement et en présence de la tension appliquée, un film d'eau d'une conductivité élevée peut se former sur la surface des dépôts de glace et provoquer des décharges électriques. Dans les cas extrêmes, un arc électrique peut s'amorcer et se développer en arc de contournement pouvant provoquer des coupures d'électricité.

Au fil des ans, de nombreuses interruptions de courant, attribuables au givrage des lignes et des postes aériens, ont été enregistrées sur le réseau d'Hydro-Québec. Certaines ont eu de graves conséquences économiques et des perturbations de fonctionnement touchant des régions entières [1]. Lorsque l'accident concerne une zone économiquement importante ou qu'il survient dans un lieu difficilement accessible, les pannes de courant durent plus longtemps.

L'ampleur constamment croissante du problème, compte tenu du développement des réseaux, a suscité l'intérêt des chercheurs de différents pays. Les incidents graves, attribués à l'accumulation de glace sur les isolateurs des lignes et postes électriques, ont été rapportés dans plusieurs publications. Les chercheurs qui ont entamé des études concernant l'impact de la glace sur la fiabilité du transport d'énergie électrique et surtout sur le contournement électrique des isolateurs recouverts de glace ont rapporté plusieurs cas d'incidents attribués à la présence de glace.

A. E. Boyer et J. R. Meale [2], J. F. Drapeau [3], M. Farzaneh [4; 5; 6], R. A. Gorski [7] et W. A. Chisholm *et al.* [8] relatent certains incidents causés par les précipitations froides sur les réseaux d'Hydro-Québec et d'Hydro-Ontario au Canada. Les événements les plus remarquables ont eu lieu les 9 et 10 mars 1986 sur le réseau d'Hydro-Ontario [9] et le 18 avril 1988 sur le réseau d'Hydro-Québec [3; 9]. L'origine de l'événement sur le réseau d'Hydro-Ontario était l'accumulation de glaçons sur les isolateurs, causée par la pluie verglaçante et le brouillard givrant. Au Québec, au poste Arnaud, six contournements causés par la glace ont été rapportés et furent la cause d'une interruption majeure d'électricité affectant la plupart des régions du Québec.

M. Kawai [10] et M. D. Charneski [11] ont rapporté certains incidents causés par l'accumulation de glace sur les isolateurs des lignes aériennes aux États-Unis. D'après les auteurs, les contournements des isolateurs qui ont eu lieu en 1976 ont été causés par une

tempête de neige dans des stations non contaminées. M. M. Khalifa et R. M. Morris [12] ont rapporté le cas où la glace était à l'origine d'une défaillance des lignes de haute tension sur la côte ouest du Canada et aux États-Unis. Une réduction de voltage de 315 kV à 280 kV a été nécessaire pour maintenir le service pendant ces conditions. J. F. Forrest [13] a rapporté des incidents relatifs à l'effet de la glace sur les isolateurs de lignes de 400 kV en Angleterre. H. Matsuda *et al.* [14] ont présenté plusieurs cas de contournement causés par la glace dans le réseau de 154 kV et 275 kV du Japon. S. M. Fikke *et al* [15] ont mentionné l'effet néfaste des précipitations froides, de la contamination des isolateurs par le sel de mer et des agents ioniques comme le sulfure et le nitrogène dans le réseau norvégien. A. Meier et W. M. Niggli [16] ont rapporté les cas de perturbations sur les lignes de 400 kV provoqués par l'accumulation de neige en Suisse. L. Shu *et al.* [17] ont pour leur part fait état des incidents causés par la pollution et la glace sur les lignes à très haute tension en Chine.

Parmi les autres chercheurs qui ont réalisé diverses études pour saisir l'effet de la glace et de la neige sur la tension de tenue des isolateurs, nommons L. C. Phan et H. Matsuo [18], E. A. Cherney [19], H. M. Scheider [20], F. Su et Y. Jiu [21], K. Kannus et V. Verkonner [22; 23], P. E. Renner *et al.* [24], M. Sato *et al.* [25], H. Bui *et al.* [26]. Leurs études étaient à un stade de développement primaire. M. Kawai [10] a soutenu que la tension de contournement des isolateurs propres et recouverts de glace est approximativement égale à celle des isolateurs pollués couverts d'un taux de contamination saline de  $0,5 \text{ mg/cm}^2$ .

E. A. Cherney [19] n'a noté aucun contournement durant la tension de service que pour les isolateurs contaminés à un taux de contamination saline  $DEDS = 0,4 \text{ mg/cm}^2$ , puis recouverts de glace. Les paramètres caractérisant la sévérité des conditions climatiques qui accompagnent la formation de glace sont différents d'un laboratoire à l'autre. Certains paramètres tels que la longueur des glaçons [27], le poids du dépôt de glace accumulée sur l'isolateur [12] et l'épaisseur de glace mesurée sur un cylindre témoin [4; 6; 28] ont été utilisés en guise de référence.

Étant donné que le givrage des isolateurs se produit sur les sites naturels, on peut se demander pourquoi un plus grand nombre d'essais n'ont pas été réalisés à l'extérieur avec de vraies précipitations. C'est que d'un point de vue pratique, il est presque impossible de contrôler les paramètres expérimentaux à l'extérieur. De plus, il est très difficile de transporter les équipements nécessaires en raison de leur poids et de leur taille (sans compter que les essais doivent se faire seulement en hiver). Les expériences de contournement en laboratoire se font, par contre, sans interruption causée par les changements de saisons et avec un contrôle précis des conditions atmosphériques simulées. Les différents types de glace observés dans la nature ont été approximativement reproduits dans les laboratoires [4; 5; 29]. Plusieurs études ont été faites en vue d'établir des principes de formation de la glace et d'identifier les conditions qui favorisent l'accumulation de glace sur les lignes aériennes [1; 30].

Des études continues dans le domaine du givrage des isolateurs sont menées dans le laboratoire du Groupe de recherche en ingénierie de l'environnement atmosphérique (GRIEA) de l'Université du Québec à Chicoutimi. Le but principal de ces recherches consiste à établir une méthode standardisée de mesure de la tension de tenue maximale des isolateurs recouverts de glace. Ces études ont démontré que la tension de tenue maximale des isolateurs varie en fonction du type de glace [31] et de son épaisseur [4; 6], de l'uniformité du dépôt et des conditions atmosphériques [4]. Les dépôts de glace sont formés par l'entassement de gouttelettes d'eau surfondues gelant au contact d'une surface froide. Le type de glace accumulée dépend de l'ensemble des paramètres accompagnant sa formation, plus particulièrement de la température, de la vitesse du vent, de la taille des gouttelettes et de la teneur en eau. Les caractéristiques générales de la glace sont influencées par des phénomènes électriques tels que l'effet de couronne, le courant de fuite et le vent ionique [32]. Les décharges électriques partielles ont un effet d'échauffement tandis que le vent ionique a un effet de refroidissement [33].

## **1.2 Objectifs de la présente étude**

L'objectif principal de la présente étude consiste à identifier les facteurs influençant la tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM recouverts de glace ainsi qu'à valider la méthode de mesure de la tension de tenue à 50 % pour les essais de contournement en présence de glace.

En régime d'accumulation, on poursuit les objectifs suivants:

- Déterminer la tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM recouverts de glace en fonction de l'épaisseur de la glace. Cinq épaisseurs, allant de 0,5 à 3 cm, ont été considérées
- Déterminer la tension de tenue à 50 % des isolateurs standards IEEE pour une épaisseur de 2 cm;

En régime de fonte, on poursuit l'objectif suivant:

- Déterminer la tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM et standards IEEE recouverts de glace pendant la fonte lente. Une seule épaisseur de glace est utilisée, soit 1,5 cm. Le régime de fonte lente est caractérisé par une longue période de fonte de glace, soit 4 à 5 heures.

## CHAPITRE 2

### PHÉNOMÈNE DU GIVRAGE ET NOTIONS FONDAMENTALES

## CHAPITRE 2

### PHÉNOMÈNE DU GIVRAGE ET NOTIONS FONDAMENTALES

#### 2.1 Formation du dépôt de glace

L'accumulation et l'évolution d'un dépôt de glace se déroulent dans des conditions naturelles suivant trois phases [34]:

- La phase d'accumulation, caractérisée par une croissance rapide du dépôt;
- La phase d'endurance, qui présente une croissance ou décroissance lente du dépôt;
- La phase du délestage, caractérisée par une décroissance rapide du dépôt.

Tout dépendant des conditions environnementales, trois types de glace sont produits: le verglas, transparent, d'une densité de 0,8 à 0,9 g/cm<sup>3</sup>; le givre lourd, opaque, semi transparent et d'une densité de 0,6 à 0,87 g/cm<sup>3</sup> et le givre léger, blanc et opaque, avec une densité inférieure à 0,6 g/cm<sup>3</sup>. Le givre lourd et le givre léger sont formés à de basses températures et durant un régime sec; les gouttelettes d'eau gèlent complètement au contact de la surface froide. Le verglas est formé en régime humide à une température allant de -3 à 0 °C; les gouttelettes d'eau ne gèlent pas complètement et il y a un surplus d'eau à la

surface. On remarque la formation de glaçons causée par l'écoulement d'eau à la surface. La couleur et l'opacité du dépôt dépendent de l'épaisseur et de la concentration des bulles d'air. D. Kroiwa [34; 35], I. Imai [36] et H. Oguchi [37] ont étudié les conditions favorisant la formation de ces trois types de glace. Leurs résultats sont présentés dans le tableau 2.1.

<b>Tableau 2.1 : Formation de glace dans la nature.</b>			
Type de glace	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Température ambiante (°C)	Vitesse du vent (m/s)
Verglas	0,8 à 0,9	0 à -3	1 à 20
Givre lourd	0,6 à 0,87	-3 à -15	5 à 20
Givre léger	< 0,6	-5 à -25	5 à 20

Les types de glace produits dans les conditions artificielles correspondantes ne diffèrent pas beaucoup de ceux qu'on trouve sur les sites naturels, particulièrement en ce qui concerne le givre léger et le verglas. En laboratoire, on produit un type de glace, en régime humide, dont les propriétés sont assez proches de celles du verglas.

Lors des études expérimentales sur la détermination de la tension de tenue maximale des isolateurs recouverts de glace, C. L Phan et H. Matsuo [18] ont simulé en laboratoire les divers types de glace (tableau 2.2).

Type de glace	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Teneur en eau (g/m <sup>3</sup> )	Vitesse du vent (m/s)	Température ambiante (°C)
Verglas	0,89	2	5,5	- 4
Givre lourd	0,87	2	5,5	-12
Givre léger	0,30	2,14	4	-16

La glace formée dépend de la grosseur des gouttelettes d'eau, de la vitesse du vent emportant ces gouttelettes, de la teneur en eau et de la température ambiante. Ces dimensions peuvent être facilement contrôlées et mesurées en laboratoire.

La grosseur des gouttelettes d'eau est déterminée selon la méthode présentée par Godard [38]. On utilise un mélange composé d'une solution de gélatine à 5 % avec une solution de collargol à 5 %, dans une proportion de 4:1. Le mélange est appliqué sur une plaque de verre puis séché rapidement. L'impact des gouttelettes sur cette solution séchée apparaît sous forme de petits disques d'un brun sombre sur les bords, entourés d'anneaux jaune clair. Le diamètre de la gouttelette,  $d$ , est lié au diamètre extérieur de l'anneau,  $D$ , par une relation de la forme  $d = K \cdot D$ , où  $K$  est un facteur qui varie entre 0,3 et 0,4. Une statistique satisfaisante a donné  $K = 0,34 \pm 0,03$  [38]. Pour mesurer les dimensions des anneaux, on place une plaque enduite du film sensible à côté d'un petit bac en plexiglas de même dimension dont le fond est recouvert de fluide de silicone et on les soumet à la même pulvérisation. On déduit par après les dimensions réelles des gouttelettes.

Le vent est produit par des ventilateurs et sa vitesse est normalement mesurée à l'aide d'anémomètres à fils chauds ou rotatifs.

La teneur en eau (la quantité d'eau en grammes contenue dans un volume de 1 m<sup>3</sup> d'air) est mesurée selon la méthode du cylindre rotatif [39]. Cette méthode consiste à faire accumuler la glace sur un cylindre lisse de 3,15 mm de diamètre et de 12 mm de longueur, tournant à 1 tour / seconde, pendant 30 secondes. Ensuite, on mesure le poids et la densité de la glace ainsi que le coefficient de captation [5; 18; 34; 40]. La teneur en eau est calculée selon la relation suivante:

$$m = \frac{\pi \rho_i}{EVT} \left[ \sqrt{\frac{W}{\pi \rho_i l} + r_i^2} - r_i^2 \right] \quad (2.1)$$

Où

$\rho_i$  est la densité de glace accumulée sur le cylindre;

V est la vitesse d'impact des gouttelettes;

W est la masse de glace accumulée;

l est la longueur du cylindre;

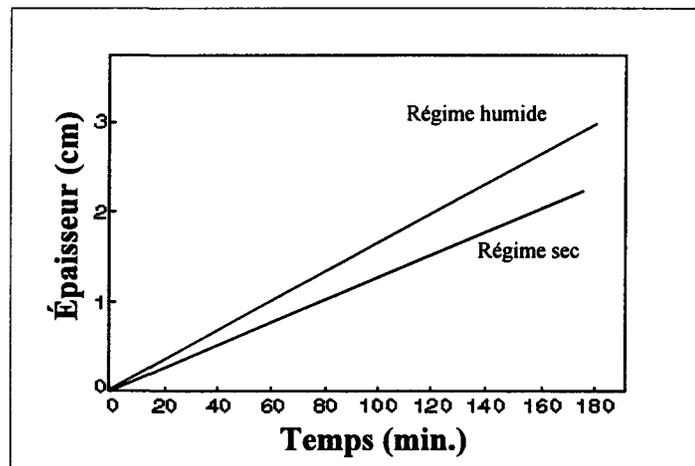
$r_i$  est le rayon du cylindre;

E, le coefficient de collection, est fonction de plusieurs variables telles que la vitesse et le diamètre des gouttelettes ainsi que la température et la pression d'air.

Les conditions reproduites pour la formation de glace durant les essais effectués dans le cadre de ce mémoire sont présentées dans le tableau 2.3. Elles sont conformes à celles déterminées par le GRIEA pour la formation du type de glace le plus dangereux du point de vue des possibilités d'amorçage de l'arc de contournement [4; 31].

<b>Tableau 2.3 : Conditions expérimentales.</b>				
Grosueur de gouttelette ( $\mu\text{m}$ )	Teneur en eau ( $\text{g}/\text{m}^3$ )	Température ( $^{\circ}\text{C}$ )	Vitesse du vent ( $\text{m}/\text{s}$ )	Régime d'accumulation
80	6,8	-12	3,3	Humide

Pour une température de  $-12^{\circ}\text{C}$  et une vitesse de  $3,3\text{ m/s}$ , l'accumulation de glace formée sur les isolateurs, en régime humide, augmente en moyenne de  $1\text{ cm/heure}$  sur le cylindre témoin [4; 31] (figure 2.1). La glace ainsi formée possède des propriétés similaires à celles du verglas; elle est considérée comme le type de glace le plus dangereux du point de vue de la probabilité d'amorçage de l'arc blanc.

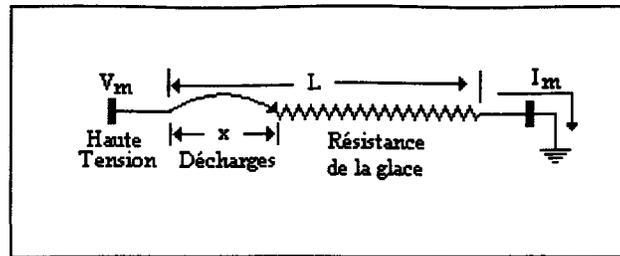


**Figure 2.1: Vitesse de croissance du dépôt de glace.**

## 2.2 Décharge électrique

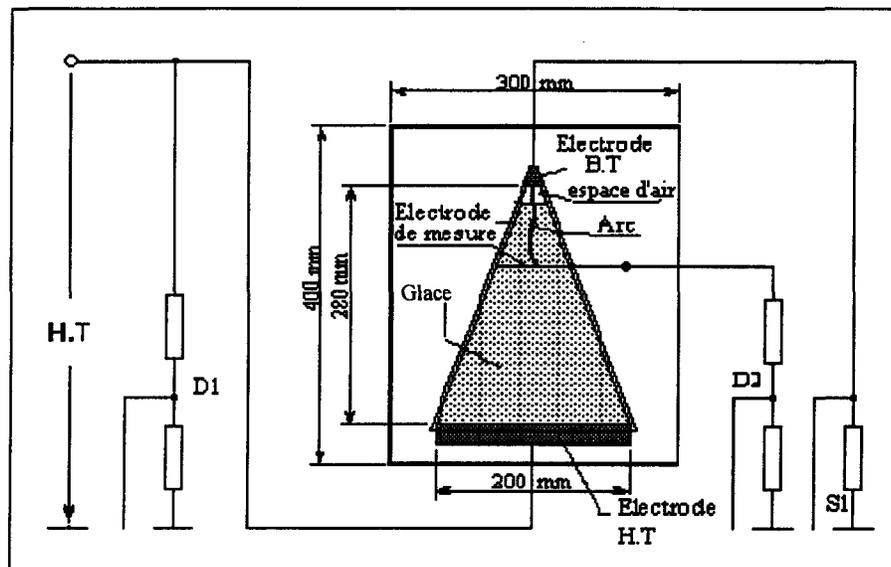
La décharge, un phénomène électrique qui précède le contournement, est une manifestation de l'effet couronne. Elle apparaît surtout dans un champ électrique non uniforme. Le phénomène de décharge peut s'expliquer comme suit: au fur et à mesure que le champ électrique augmente, les électrons libérés, par l'irradiation ou par le champ lui-même, sont de plus en plus accélérés. Ils acquièrent de plus en plus d'énergie après plusieurs collisions élastiques et peuvent ioniser les molécules ou les atomes neutres de l'air [41]. Les électrons additionnels ainsi créés acquièrent à leur tour suffisamment d'énergie pour provoquer d'autres collisions ionisantes et ainsi de suite. Ce processus entraîne un accroissement rapide du courant de fuite et dégage de l'énergie sous forme de chaleur.

Le phénomène de décharge sur une surface polluée a été la préoccupation de beaucoup de chercheurs dont Obenaus, qui a été un des premiers auteurs à réaliser une analyse quantitative sur la décharge des surfaces contaminées [42]. En ce qui a trait aux surfaces givrées, une étude récente réalisée par M. Farzaneh et J. Zhang [43] a mené à une modélisation de la décharge sur une surface couverte de glace. Un modèle électrique similaire à celui de Obenaus a été conçu dans le but d'analyser, sous tension alternative, les décharges et les arcs locaux sur les surfaces recouvertes de glace (figure 2.2).



**Figure 2.2** Modèle électrique de la décharge sur une surface givrée.

Or, en raison de la forme complexes des isolateurs, un modèle triangulaire a été conçu pour la détermination des caractéristiques de décharges dans les conditions de glace (figure 2.3).



**Figure 2.3** Modèle utilisé pour analyser les caractéristiques de la décharge sur une surface givrée.

Pour une tension alternative, la chute de tension entre les électrodes peut être négligée.

L'équation de la décharge décrite par Obenaus devient [42]:

$$V_m = A x I_m^{-n} + I_m R(x) \quad (2.2)$$

Où

$I_m$  est le courant de fuite;

$V_m$  est la tension appliquée;

$x$  est la longueur de décharge;

$R(x)$  est la résistance de la glace;

$A$  et  $n$  sont des constantes expérimentales de décharge.

### 2.3 Contournement

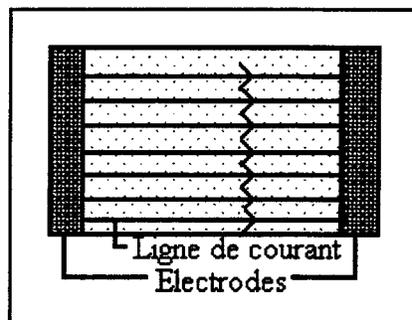
Le contournement est un arc dans l'air qui joint les deux bornes de la tension (borne de haute tension et de mise à la terre) d'un isolateur, provoquant ainsi un court-circuit. Il se manifeste par une émission forte de lumière dont la couleur dépend de la présence de différents éléments chimiques dans la colonne de gaz ionisés. Cette couleur varie du blanc au violet selon la température (loi de Boltzman). L'arc suit la distance la plus courte, soit le contour de la surface et non pas la forme de l'isolateur, d'où le nom de contournement. L'arc dans l'air se propage dans une colonne du gaz complètement ionisé à la pression atmosphérique de concentration allant jusqu'à  $10^{18}$  électrons/cm<sup>3</sup>. L'arc s'amorce lorsque le courant est élevé, soit supérieur à 0,45 A. Lors de la présence d'un arc électrique, on trouve une variation importante du potentiel aux électrodes.

En général, la chute de tension à la cathode est plus élevée que celle à l'anode et, par la suite, le gradient de potentiel à la cathode est faible. On peut classer les arcs électriques selon trois types attribuables au processus d'ionisation de surface [41]:

- arc thermoionique à cathode chauffée par une source externe;
- arc thermoionique avec l'autochauffage de la cathode par l'arc lui-même;
- arc à émission de champ où les électrons sont extraits de la cathode par l'action d'un champ électrique très intense. Ce champ intense peut être créé par les charges d'espaces positives qui se trouvent près de la cathode.

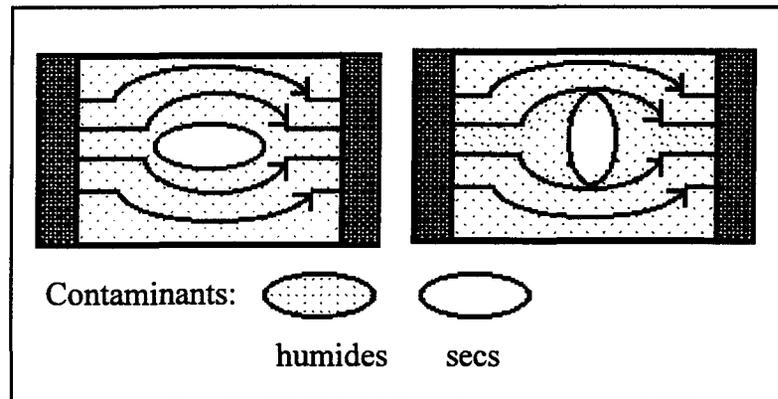
L'arc observé durant les essais qui ont été réalisés au laboratoire de haute tension de l'UQAC appartient à la troisième catégorie mentionnée.

Le contournement d'une surface isolante polluée [44] est le résultat d'une évolution que l'on peut schématiser par les figures suivantes (figures 2.4 à 2.7):



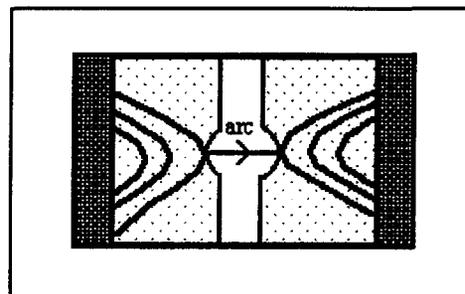
**Figure 2.4: Description d'une surface polluée.**

L'écoulement du courant de fuite à travers l'électrolyte qui recouvre l'isolement provoque un échauffement qui accroît la conductivité du milieu (si la surface polluée était formée de glace, ce phénomène se manifesterait par la création d'un film d'eau à la surface de la glace). L'échauffement croissant provoque une sorte de resserrement circulaire des lignes de courant. Une zone sèche se produit (figure 2.5).



**Figure 2.5: Formation des zones sèches sur une surface polluée.**

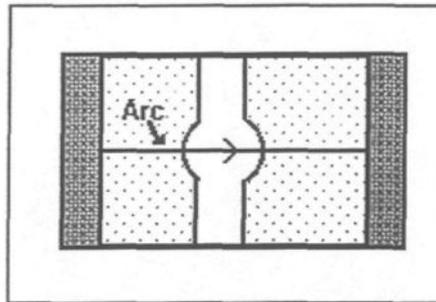
La tension se trouve rapportée aux bornes de la zone sèche et des arcs locaux sont susceptibles d'apparaître; la zone sèche s'élargit (figure 2.6).



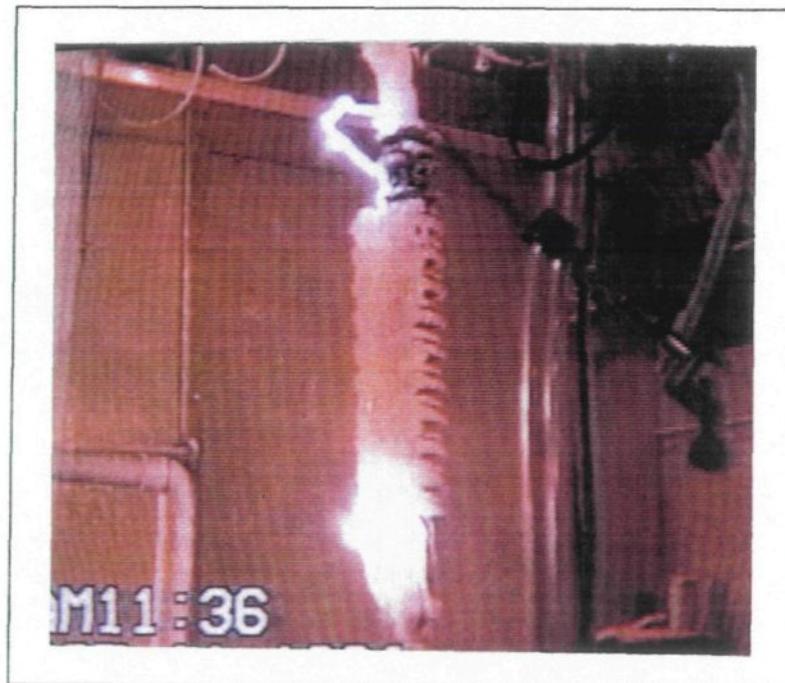
**Figure 2.6: Formation des arcs locaux sur une surface polluée.**

Le contournement est un phénomène aléatoire. En effet, à partir de ce développement:

- L'arc peut s'éteindre ou trouver une position plus stable;
- L'arc peut atteindre les électrodes et provoquer le contournement (figures 2.7 et 2.8).



**Figure 2.7: Contournement d'une surface polluée.**



**Figure 2.8: Contournement d'un isolateur recouvert de glace.**

## 2.4 Tension de tenue

La tension de tenue des isolateurs recouverts de glace est, par définition, le niveau de tension le plus élevé qu'on peut appliquer aux isolateurs électriques avec une certitude statistique que le contournement ne se produise pas. Les études effectuées ont démontré que cette valeur dépend de plusieurs facteurs tels que:

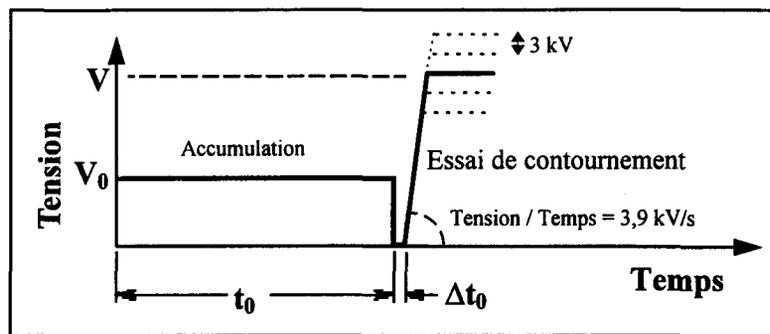
- le type, l'épaisseur et l'uniformité du dépôt de glace;
- la nature de la tension d'essai et la méthode d'application;
- la forme géométrique de l'isolateur.

Les variations de ces facteurs peuvent entraîner de fortes variations de la tension de tenue. On se sert de deux méthodes de détermination de la tension de tenue: la méthode de mesure de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , et la méthode de mesure de la tension de tenue à 50 %,  $V_{50\%}$ .

On définit aussi la tension minimale de contournement,  $V_{MF}$ , comme étant la tension la plus basse qu'on peut appliquer sur une chaîne d'isolateurs pour avoir un contournement. Dans les conditions d'essai testées, on peut considérer que cette tension a un niveau de 3 kV inférieur à celui de la tension de tenue maximale. Elle est utilisée par plusieurs auteurs comme tension de référence.

### 2.4.1 Détermination de la tension de tenue maximale

Basée sur la norme CEI 507 [45], la tension de tenue maximale se définit comme étant le niveau de la tension appliquée pour lequel on obtient au moins 3 tenues sur 4 essais consécutifs (à un même niveau de tension), à condition d'avoir, au niveau d'essai supérieur, au moins 2 contournements sur 3 essais. Cette méthode est présentée dans les travaux antérieurs du GRIEA [4, 28] et peut être résumée comme suit (figure 2.9):



**Figure 2.9: Tension de tenue maximale.**

Une tension de service,  $V_0$ , est appliquée durant toute la phase d'accumulation de glace (période  $t_0$  et période de la fonte s'il y a lieu). Un petit intervalle  $\Delta t_0$  est intercalé entre la fin de la période d'accumulation de glace et le début du moment de l'application de la tension d'essai. Lorsqu'il s'agit de la fonte,  $\Delta t_0$  est intercalé entre la fin de la période d'accumulation de glace et le début de la période de fonte. Cet intervalle sert à réaliser

quelques opérations préliminaires. Au moment ( $t_0 + \Delta t_0$ ), on augmente la tension jusqu'à une valeur prédéterminée de la tension d'essai  $V$ .

Tout dépendant du résultat obtenu (tenue ou contournement), la tension d'essai, pour le prochain essai, est augmentée (dans le cas d'une tenue) ou diminuée (dans le cas d'un contournement) d'un pas de  $\Delta v = 3 \text{ kV}$ . La tension de tenue maximale est déterminée par l'obtention de trois tenues à un même niveau ( $K$ ) de tension, à condition d'avoir deux contournements au niveau supérieur ( $K+1$ ) de tension.

#### **2.4.2 Détermination de la tension de tenue à 50 %**

Basée aussi sur la norme CEI 507 [45], la méthode de mesure de la tension de tenue à 50 % 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. Cette méthode [28] peut être résumée comme suit:

Une tension  $V_k$ , considérée comme approximativement égale au niveau de décharge disruptive à 50 %, et un intervalle de tension  $\Delta V$ , approximativement égal à 5 % de  $V_k$ , sont choisis. On applique la tension  $V_k$ ; s'il ne se produit pas de contournement, la tension suivante sera  $V_k + \Delta V$ . Si un contournement se produit, la tension suivante sera  $V_k - \Delta V$ .

Ces modalités sont répétées, la tension de chaque essai étant déterminée par le résultat de l'essai précédent. Au moins 10 essais utiles sont nécessaires pour déterminer la tension de tenue à 50 %. Le calcul de la tension de tenue à 50 % est effectué avec la formule suivante:

$$V_{50\%} = \frac{\sum(n_k \times V_k)}{N} \quad (2.3)$$

Où

N est le nombre d'essais utiles;

$V_k$  est un niveau de tension appliquée;

$n_k$  est le nombre de groupes d'essais au même niveau de tension  $V_k$ .

Étant donné que le contournement est un phénomène aléatoire, il paraît utile d'employer des procédés statistiques pour obtenir des informations plus significatives à partir des résultats d'essais. On suppose alors qu'à chaque niveau de tension d'essai,  $V_k$ , est attachée une probabilité ( $P$ ) qu'un contournement se produise pour toute application particulière. Le problème consiste à déterminer la fonction de distribution de probabilité  $P(V)$  qui relie  $P$  à la tension  $V$ . On exprime cette distribution à l'aide de la valeur moyenne  $V_{50\%}$  et de l'écart-type  $\sigma$  de la tension de contournement. La plupart du temps, la fonction de distribution suit une loi gaussienne à 95 %, ou même à 98 %. En pratique, parce que le nombre d'applications de tension exécutées pendant les essais est limité, les vraies valeurs

de  $V_k$  et de  $\sigma$  ne peuvent être évaluées que dans certaines limites de précision: on parle alors de limites de confiance. Les résultats se présentent, dans ce cas, sous forme de suite de  $n$  valeurs de tension  $V_k$ , à partir de laquelle les valeurs estimées de la tension de contournement ( $\bar{V}$ ) et de l'écart-type ( $S$ ) peuvent être obtenues:

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n V_k \quad (2.4)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (V_k - \bar{V})^2} \quad (2.5)$$

Pour chaque ensemble de  $n$  mesures, on peut effectuer des vérifications statistiques afin de définir les limites entre lesquelles se situe la vraie valeur moyenne de  $V_k$  et le véritable écart-type  $\sigma$ , avec une probabilité donnée  $P_c$ . Les limites de confiance sont données par:

$$\bar{V} - St_p / \sqrt{n} \leq V_k \leq \bar{V} + St_p / \sqrt{n} \quad (2.6)$$

$$S \sqrt{(n-1) / \chi^2_{p/2}} \leq \sigma \leq S \sqrt{(n-1) / \chi^2_{(1-p/2)}} \quad (2.7)$$

Où

$t_p$ ,  $\chi^2 p/2$  et  $\chi^2(1 - p/2)$  sont les variables de la loi de Student pour  $t_p$  et la distribution de  $\chi^2$  pour  $(n - 1)$  degrés de liberté et avec  $P = (1 - P_c)$ .

Le tableau 2.4 peut être utilisé pour le calcul statistique avec une probabilité de 95 % [45].

<b>Tableau 2.4: Calcul statistique pour <math>P_c = 0,95</math>.</b>			
n	$t_p/\sqrt{n}$	$\sqrt{(n-1)/\chi^2 p/2}$	$\sqrt{(n-1)/\chi^2(1-p/2)}$
5	1,24	0,60	2,87
10	0,72	0,69	1,83
15	0,55	0,73	1,58
20	0,47	0,76	1,46
30	0,37	0,80	1,34
40	0,32	0,82	1,28
50	0,28	0,84	1,25

## CHAPITRE 3

### ÉTUDES ANTÉRIEURES SUR LE GIVRAGE DES ISOLATEURS

## CHAPITRE 3

### ÉTUDES ANTÉRIEURES SUR LE GIVRAGE DES ISOLATEURS

#### 3.1 Introduction

Les études sur le phénomène de givrage des isolateurs recouverts de glace ont préoccupé les chercheurs en ce qui concerne la morphologie et les caractéristiques de la glace, ou encore le comportement électrique des isolateurs. Ce genre d'études peuvent être réalisées directement sur les sites naturels ou menées dans les laboratoires.

Les études en sites extérieurs sont en pratique peu réalistes. Hormis les obstacles saisonniers sur le site naturel, il semble presque impossible de définir les conditions exactes de l'expérience. Dans la nature, la température ambiante, la vitesse du vent et la teneur en eau varient d'un instant à l'autre. De plus, les dépôts de glace ne sont pas toujours homogènes, de même que le type de glace accumulée sur deux isolateurs voisins peut être différent [46].

Les études réalisées dans les laboratoires présentent plus d'avantages: elles peuvent être menées à tout moment de l'année. Les conditions expérimentales sont bien connues et on peut facilement y apporter des modifications. Les types de glace accumulée sont bien distincts et ils forment des dépôts homogènes le long des chaînes d'isolateurs. Le temps d'accumulation est réglable et diffère de celui des sites naturels, selon les conditions de l'expérience. En laboratoire, on peut toujours fixer les paramètres selon le besoin [12; 28]. On peut noter que les types de glace formée en laboratoire diffèrent quelque peu de ceux que l'on retrouve sur les sites naturels, mais cette différence est négligeable et n'influe pas sur le résultat des essais [47].

### **3.2 Études sur les sites naturels**

Y. Watanabe [48], dans le but de déterminer les critères d'utilisation des isolateurs dans les régions froides, a comparé les performances des isolateurs en porcelaine en présence de verglas et de neige avec celles d'isolateurs contaminés. La glace a été produite sur le site naturel en pulvérisant de l'eau sur la surface des isolateurs pendant la nuit et pendant que les températures étaient inférieures à 0 °C. La neige a été prélevée dans les régions montagneuses et a été déposée sur les chaînes d'isolateurs. Watanabe a conclu que l'effet de la glace et de la neige sur la tension de tenue maximale est plus grave que celui de la contamination saline. D'autre part, il a conclu que la tension de tenue maximale en courant continu est plus faible en polarité positive qu'en polarité négative.

Les dernières conclusions étaient que la tension de tenue maximale est plus faible en régime humide qu'en régime sec.

H. M. Schneider [20] a effectué ses travaux sur des isolateurs artificiellement recouverts de glace sur un site naturel. Il a étudié l'effet de la sévérité de la glace et de la longueur d'une chaîne d'isolateurs sur la tension de tenue maximale. La glace a été produite par pulvérisation d'eau du robinet sur les isolateurs pendant les nuits froides (lorsque la température était inférieure à 0 °C). Il a rapporté que les isolateurs installés en position V et recouverts de glace ont une meilleure performance que ceux installés en position verticale.

N. Sugawara *et al.* [49] ont effectué leurs essais sur des sites à haute altitude allant jusqu'à 2300 m. Leur objectif était de déterminer les caractéristiques de la résistance de fuite d'une chaîne d'isolateurs standards IEEE recouverts de glace. Ils ont conclu que, pour des températures supérieures à 0°C, la résistance de fuite est minimale au moment de la perte de la neige causée par le vent ou à la fonte. De plus, à la température de fonte ou sous l'effet d'un brouillard épais, des gouttelettes d'eau se déposent sur la surface des isolateurs, formant ainsi un film d'eau. Par la suite, ce film d'eau entraîne une diminution de la valeur de la résistance de fuite jusqu'à sa valeur minimale.

P. E. Renner *et al.* [24] ont utilisé des isolateurs en verre trempé et en porcelaine recouverts de glace d'une manière artificielle et soumis à une tension continue. La glace a été produite par pulvérisation d'eau du robinet ainsi que d'eau distillée à la surface des isolateurs sur un site naturel. Ils ont observé que la tension de tenue maximale, en polarité positive, est supérieure à celle obtenue en polarité négative. Les résultats ont aussi mené les chercheurs à conclure que la tension de tenue maximale des isolateurs recouverts de glace sèche est supérieure à celle des isolateurs recouverts de glace mouillée.

A. Meier et W. M. Niggli [16] ont mené leur travaux dans les régions montagneuses de Suisse. Ils ont travaillé sur l'influence de la glace et de la neige sur les isolateurs à long fût installés en position horizontale. La glace a été formée à des températures de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  en utilisant des moules. Leurs conclusions indiquent que la distribution de la tension sur les isolateurs recouverts de glace dépend de la température de l'air ambiant alors que le courant de fuite dépend de l'épaisseur de la glace ou de la neige et sa variation est plus élevée en présence du verglas qu'en présence de l'eau.

T. Iwama, R. Matsuoka *et al.* [50] ont conduit pendant trois ans leurs tests dans les régions du Japon exposées à de longues périodes de précipitations de neige et à une faible contamination de sel. Pour valider leurs travaux, ils ont effectué des tests artificiels où la neige a été apportée des sites naturels et déposée sur les isolateurs. Ils ont remarqué que lorsque la vitesse du vent était faible, il neigeait d'une façon rapide et cela provoquait une

accumulation abondante, tandis que la conductivité de l'eau provenant de la fonte de la neige, sous l'effet du vent, était élevée (330  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour une vitesse de vent de 6 m/s). D'autre part, quand l'épaisseur de la neige fondante devenait importante, formant ainsi des ponts entre les isolateurs, la possibilité d'un contournement était très élevée.

S. M. Fikke *et al.* [51] ont rapporté que le phénomène de contournement sur les isolateurs des lignes aériennes dans les régions montagneuses de Norvège se produit dans les conditions où la glace est mélangée avec des ions de sel (en présence de précipitation) ou avec des résidus de gaz de fossiles contenus dans l'air.

### **3.3 Études en laboratoires**

#### **3.3.1 Facteurs influençant la tension de tenue**

Selon les chercheurs, plusieurs facteurs influencent la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , des isolateurs recouverts de glace. L'influence de ces facteurs est résumée ci-après:

### 3.3.1.1 Effet du type de glace

C. L. Phan et H. Matsuo [18] ont examiné la tension de tenue d'une courte chaîne d'isolateurs recouverts de givre léger, lourd et de verglas. Ces auteurs ont montré que le givre lourd formé à une densité de  $0,87 \text{ g/cm}^3$  à  $-12 \text{ }^\circ\text{C}$ , était le type de glace le plus important au point de vue de probabilité de contournement. M. M. Khalifa et R. M. Morris [12] ont étudié la performance d'une chaîne d'isolateurs recouverts de la glace à diverses densités. Ils ont trouvé que lorsque la densité de la glace accroît de  $0,32 \text{ g/cm}^3$  à  $0,8 \text{ g/cm}^3$ , l'amplitude du courant de fuite double. T. Fujimura *et al.* [27] ont examiné la performance des isolateurs recouverts de neige naturelle et de glace produite dans une chambre froide. Ils ont conclu que la tension de tenue maximale d'une chaîne d'isolateurs couverte de glace est de 40 % plus basse que celle d'une chaîne couverte de neige.

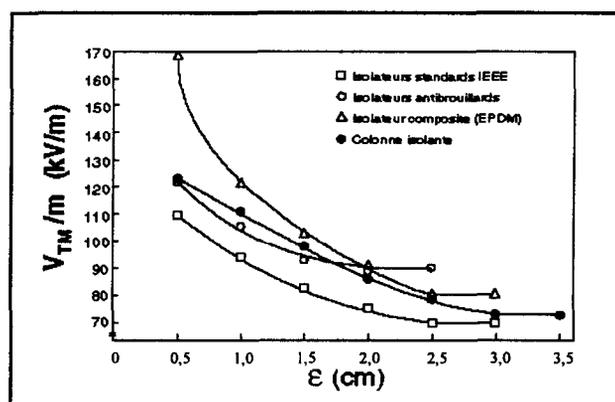
Des études récentes sur l'effet du type de glace, réalisées à l'UQAC [4; 6; 31], ont démontré une dépendance étroite entre la valeur de tension de tenue maximale et le type de glace accumulée (tableau 3.1).

<b>Tableau 3.1: Tension de tenue maximale en fonction du type de glace.</b>				
Type de glace	Tension de tenue maximale, $V_{TM} / m$ (kV/m)			
	IEEE	NGK	EPDM	Colonne isolante
Givre léger	> 148	>146	> 168	> 197
Glace formée en régime humide	60	84	96	90

Selon les résultats obtenus [6], la tension de tenue maximale la plus élevée correspond à celle du givre léger. Par ailleurs, la tension de tenue maximale la plus faible correspond à la glace formée dans un régime humide. Cette glace est compacte et adhérente. Elle forme des glaçons qui peuvent combler entièrement les espaces entre les isolateurs. Le film d'eau formé à la surface de la glace couvre toute la surface de l'isolateur et favorise les décharges.

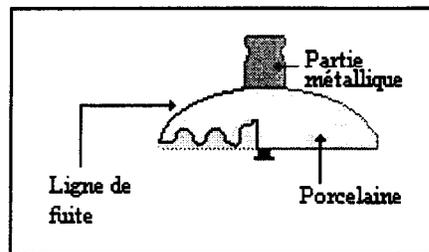
### 3.3.1.2 Effet de l'épaisseur de glace

L'épaisseur du dépôt de glace est un facteur important dans la détermination de la tension de tenue maximale. Plusieurs essais [4] ont montré que la valeur de la tension de tenue maximale diminue avec la croissance de l'épaisseur du dépôt de glace jusqu'à une certaine valeur de saturation et reste constante à partir d'une épaisseur critique qui est égale à 2 cm pour les isolateurs antibrouillards, 2,5 cm pour les isolateurs composites en EPDM et les isolateurs standards IEEE et de 3,0 cm pour la colonne isolante (figure 3.1).



**Figure 3.1: Tension de tenue maximale en fonction de l'épaisseur de glace.**

À partir d'une épaisseur de 1,5 cm, le dépôt de glace couvre la surface d'une jupe de façon uniforme. Les longs glaçons forment des ponts entre les jupes, diminuant ainsi la distance de fuite [4]. Cette distance a été définie comme la distance parcourue par la ligne de fuite d'une jupe et des  $(n-1)$  espaces entre les jupes,  $n$  étant le nombre total des jupes (figures 3.2). Le courant de fuite creuse des canaux à travers la glace, encourageant ainsi le passage de l'arc blanc [59].



**Figure 3.2: Distance de fuite d'une jupe d'un isolateur IEEE.**

La diminution de la tension de tenue par rapport à la croissance du dépôt s'explique par le fait qu'une faible épaisseur de glace n'assure pas, en principe, la continuité du dépôt. On a une sorte d'espaces d'air, donc une non-uniformité de dépôt et une ligne de fuite relativement longue. Pour des épaisseurs plus importantes, la couche de glace est continue et recouvre l'isolateur comme une sorte de pont reliant les jupes. Ainsi, la ligne de fuite est plus courte.

M. Kawai [10] a conclu que l'épaisseur réelle de la glace, le long de la chaîne, n'est pas uniforme et que l'épaisseur maximale est de 1 pouce, ce qui donne une grande

probabilité de contournement sous la tension de service. T. Fujimura *et al.* [27] ont rapporté que plus l'épaisseur de la neige augmente plus la tension de tenue diminue. Les valeurs de tension de tenue tendent vers la saturation lorsque le poids de la neige atteint 875 g par isolateur. Dans le cas de la glace artificielle, les auteurs ont montré que la tension de tenue maximale diminue avec la croissance de la longueur des glaçons. Dans le cas des longs glaçons qui forment un pont, la tension de tenue maximale est 60 % plus basse que dans le cas où il n'y a pas de glaçons formés. L. Shu *et al.* [17] ont mesuré la tension de tenue maximale des isolateurs suspendus, contaminés et recouverts de glace artificielle. Ils ont trouvé que la tension de tenue maximale diminue graduellement et tend à se saturer au fur et à mesure que le poids de la glace augmente.

### **3.3.1.3 Effet de la conductivité de l'eau**

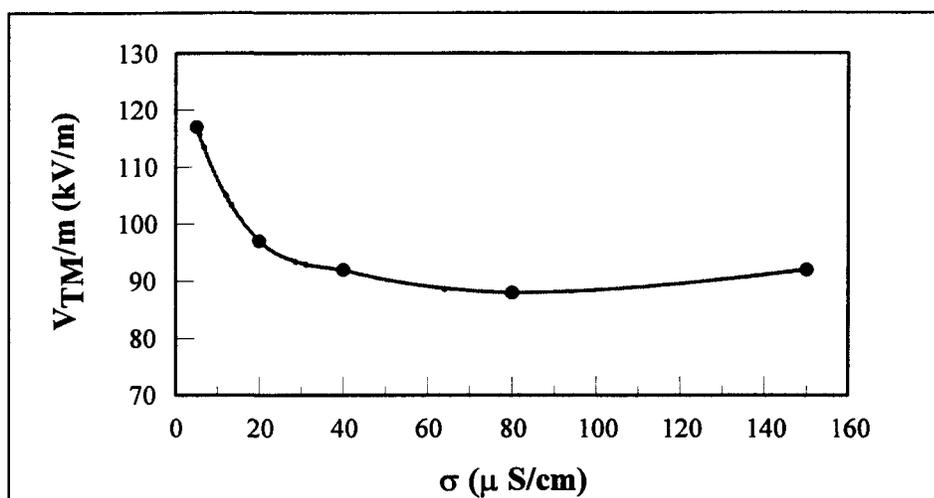
Des études ont été faites à l'UQAC pour observer l'effet de la conductivité de l'eau (servant à l'accumulation de glace) sur la tension de tenue maximale des isolateurs recouverts de glace [4; 5; 53]. La conductivité de l'eau est modifiée en ajoutant une solution de chlorure de sodium avec l'eau distillée. Les résultats ont révélé que la tension de tenue maximale diminue avec la croissance de conductivité de l'eau. La variation de la tension de tenue maximale, mesurée par mètre de distance d'arc, pour une colonne isolante (figure 3.3), est donnée par la formule suivante.

$$V_{TM}/m = 132,5 \times \sigma^{-0,092} \text{ kV/m} \quad (3.1)$$

Où

$\sigma$  est la conductivité de l'eau en  $\mu\text{S/cm}$ ;

$V_{TM}/m$ , est la tension de tenue maximale par mètre de la distance d'arc.



**Figure 3.3: Tension de tenue maximale d'une colonne isolante en fonction de la conductivité ( $\sigma$ ).**

Z. Vouckvic et Z. Zdravkovic [54] ont examiné la tension de tenue maximale des isolateurs de verre trempé recouverts de 2 cm de glace formée par de l'eau distillée ainsi que par de l'eau salée ayant une conductivité de 8000  $\mu\text{S/cm}$ . Leurs résultats indiquent que la tension de tenue maximale était 30 % plus basse pour la glace formée d'eau salée que pour celle formée d'eau distillée.

K. Kannus et K. Verkkonen [23] ont effectué une série de tests sur les isolateurs recouverts de glace artificielle dont la résistivité de l'eau variait de  $0,7 \Omega\text{m}$  à  $9 \Omega\text{m}$ . Ils ont trouvé que le courant de fuite augmente rapidement et que la tension de tenue maximale de deux isolateurs suspendus et recouverts de glace est linéairement proportionnelle à la racine carrée de la résistivité de l'eau.

#### 3.3.1.4 Effet de l'uniformité du dépôt de glace.

L'uniformité du dépôt de glace s'exprime par la valeur de l'angle de déviation des glaçons par rapport à l'axe vertical de l'isolateur (figure 3.4). Cet angle augmente avec la vitesse du vent. Par conséquent, l'uniformité du dépôt de glace dépend généralement de la vitesse du vent. Les glaçons formés sous l'effet d'un vent d'une vitesse de  $3,3 \text{ m/s}$  sont relativement verticaux, ce qui produit une distribution uniforme de la glace. Pour des vitesses plus élevées, les glaçons sont inclinés vers l'axe de l'isolateur. On obtient donc, dans ce cas, une distribution non uniforme de glace [4; 55].

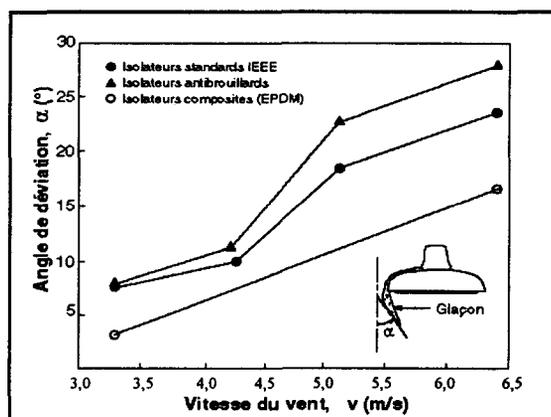
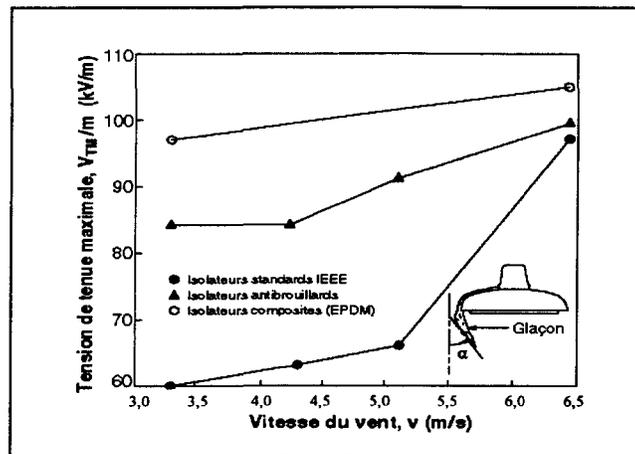


Figure 3.4: Angle de déviation ( $\alpha$ ) en fonction de la vitesse du vent.

Les résultats ont montré (figure 3.5) que la valeur la plus faible de tension de tenue maximale correspond à un dépôt uniforme de glace pour une vitesse de 3,3 m/s [31; 47]. On en déduit que l'accroissement de l'angle de déviation des glaçons entraîne un allongement de la ligne de fuite et, par la suite, un accroissement de la tension de tenue maximale.



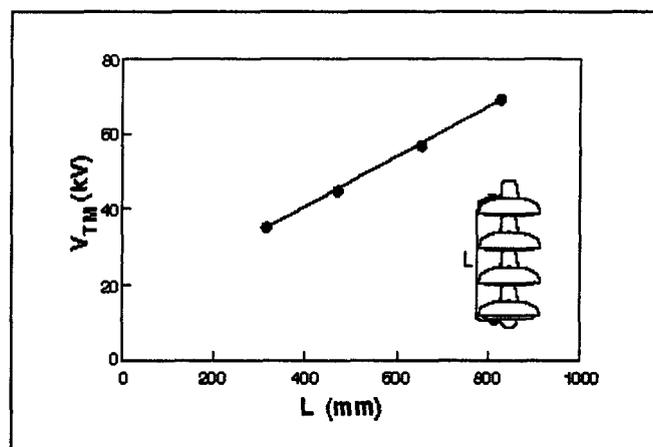
**Figure 3.5: Tension de tenue maximale en fonction de la vitesse du vent.**

### 3.3.1.5 Effet de la longueur de la chaîne d'isolateurs

K. Kannus et V. Verkkonen [22] ont travaillé sur une courte chaîne d'isolateurs recouverts de glace et ont trouvé que la tension de tenue maximale des isolateurs suspendus verticalement augmente linéairement avec la longueur de la chaîne.

C. L. Phan et H. Matsuo [18] ont mesuré la tension de tenue maximale de 1, 2, 3 et 4 isolateurs en verre trempé recouverts de glace. Ils ont noté que lorsqu'on augmente la longueur de la chaîne d'isolateurs, la distance de fuite augmente et par conséquent, la tension de tenue maximale augmente. Cette tension varie linéairement en fonction de la distance de fuite en présence de la glace. M. Kawai [10] a rapporté que la tension de tenue maximale calculée par unité de longueur est plus basse pour une longue chaîne d'isolateurs (15 à 19 unités) que pour une courte chaîne (5 à 7 unités). Il attribue cette différence à une non-uniformité de la distribution de la tension sur la chaîne d'isolateurs, causée par la présence de la glace.

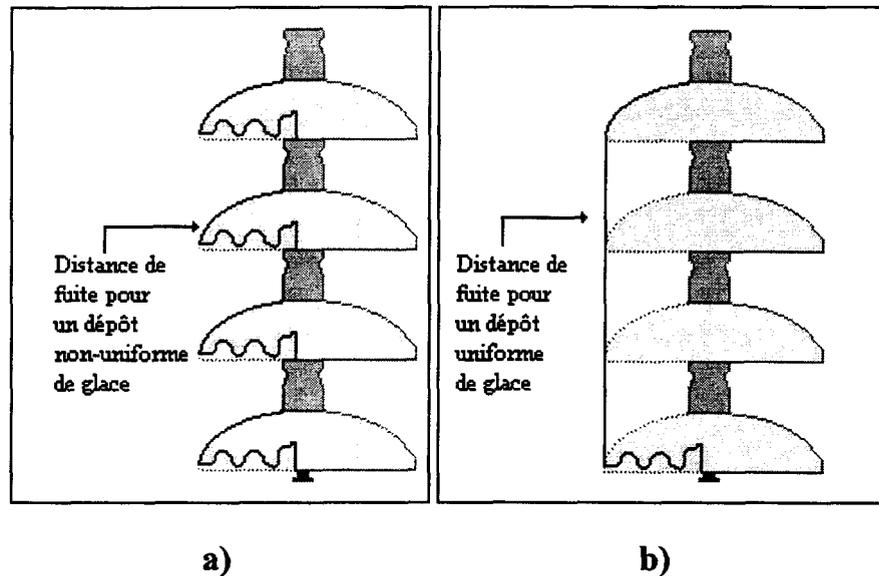
La figure 3.6 présente la croissance linéaire de la tension de tenue maximale en suivant la croissance de la distance d'arc [28; 32]. On remarque que plus la chaîne d'isolateurs est longue, plus la distance d'arc est longue. Par conséquent, la tension de tenue maximale est élevée.



**Figure 3.6: Tension de tenue maximale en fonction de la distance d'arc.**

### 3.3.1.6 Effet de la distance de fuite

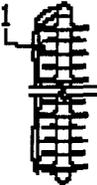
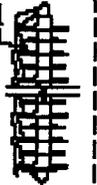
L'accumulation de glace réduit de façon remarquable la ligne de fuite [18; 49]. La figure 3.7-a montre l'allure de la distance de fuite pour une chaîne de 4 isolateurs non recouverts de glace uniformément. Les glaçons formés dans les espaces libres entre les isolateurs provoquent un rapprochement de la longueur de la distance de fuite à celle de la distance d'arc des isolateurs propres (figure 3.7-b).



**Figure 3.7: Distance de fuite d'une chaîne de 4 isolateurs.**

Tout dépendant de l'angle des glaçons, la distance de fuite est influencée par la vitesse du vent. Plus le vent est fort, plus la distance de fuite est longue (tableau 3.2) [41; 47].

**Tableau 3.2: Distance de fuite en fonction de la vitesse du vent en mm.**

Type	Sans glace	Avec glace	
		3.3 m/s	6.4 m/s
EPDM	2171	 763	 955
IEEE (5 unités)	1525	 945	 1085

On peut observer qu'au fur et à mesure que la vitesse du vent augmente, l'angle de déviation des glaçons augmente et, par conséquent, la distance de fuite. La figure 3.8 montre la variation de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , pour 5 isolateurs IEEE recouverts de glace, en fonction de la distance de fuite [4]. La tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , augmente linéairement avec la distance de fuite [47]. La plus basse valeur de la tension de tenue correspond à la plus basse valeur de la distance de fuite qui correspond elle-même à un dépôt uniforme de glace.

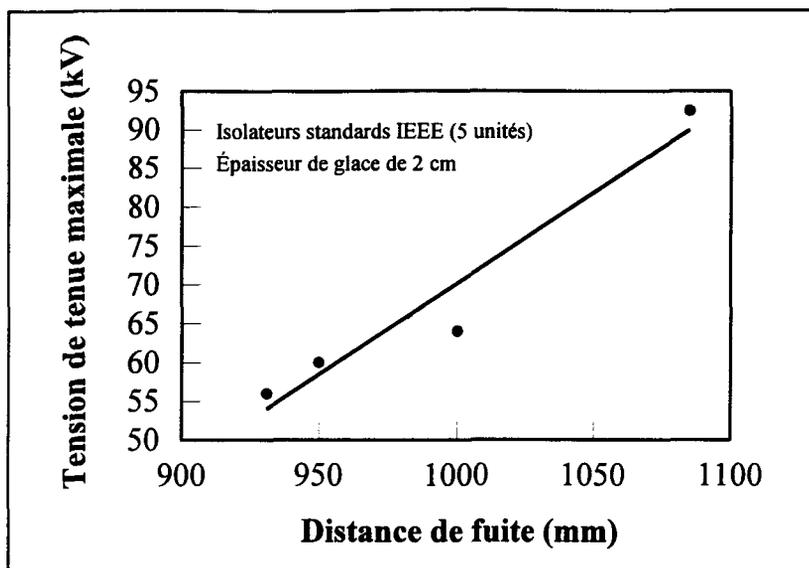


Figure 3.8: Tension de tenue maximale en fonction de la distance de fuite.

Le tableau 3.3 représente la variation de la distance de fuite pour les quatre types d'isolateurs testés. On remarque qu'il y a une réduction considérable de la distance de fuite quand il s'agit d'une surface givrée.

Type d'isolateur	Distance de fuite des isolateurs propres en cm	Distance de fuite des isolateurs givrés en cm	Réduction %
Standard IEEE	152,5	80,9	47
Antibrouillard	281,1	82	71
Composite en EPDM	217,1	71,4	67
Colonne isolante	352,5	61	76

### 3.3.1.7 Effet du courant de fuite

Le courant de fuite résulte essentiellement des décharges électriques à la surface de l'isolateur recouvert de glace et du courant de conduction à la surface de la glace. La tension d'essai étant appliquée, des décharges apparaissent entre les pointes des glaçons suspendus aux bords de l'isolateur et la surface des jupes recouvertes de glace situées au-dessous. Les plus fortes décharges électriques se concentrent entre la borne à haute tension et le glaçon le plus rapproché. L'évolution du courant de fuite durant la période d'accumulation (figure 3.9) a été étudiée par Phan et Hara [52].

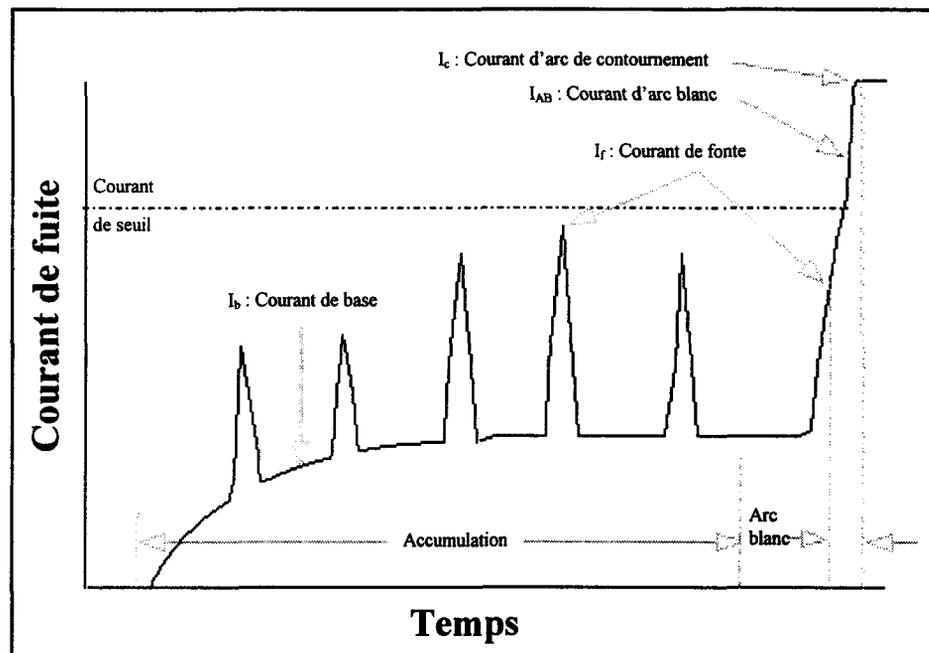


Figure 3.9: Évolution du courant de fuite.

D'après ces auteurs, le courant de fuite est composé de:

$I_B$ : courant de base, de faible intensité ne dépassant pas 1 mA, qui se produit généralement à l'extrémité des glaçons par de faibles décharges partielles.

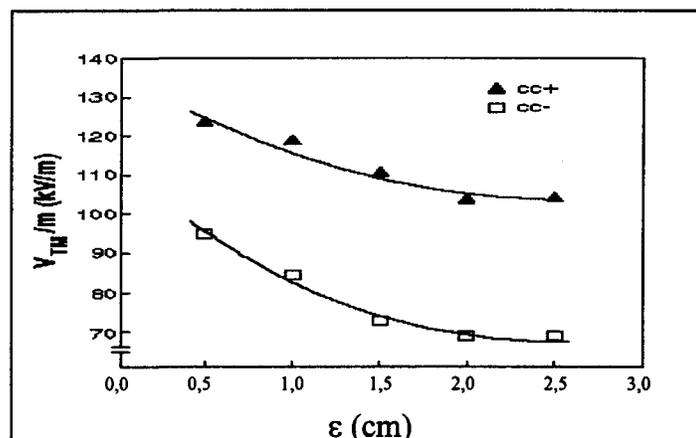
$I_f$ : courant de fonte qui se propage dans un film d'eau formé à la surface du dépôt de glace. Le courant de fonte apparaît d'une façon discontinue et contribue à la formation des canaux conducteurs qui facilitent l'amorçage de l'arc blanc. Le courant de fonte est de l'ordre de 30 à 50 mA.

$I_{AB}$ : courant d'arc blanc apparaissant lorsque le courant de fonte atteint une valeur de seuil  $I_{AB_S}$  d'environ 18 mA. Ce phénomène est accompagné d'une augmentation de l'énergie dissipée par le courant et d'une émission de chaleur, ce qui provoque une forte luminosité de la colonne de décharge.

$I_C$ : courant de l'arc de contournement se produisant lorsque le courant d'arc blanc atteint un seuil d'environ 200 mA. L'arc blanc peut alors s'allonger et aboutir à un contournement complet de la chaîne d'isolateurs. Ce dernier phénomène dépend surtout de la tension d'essai, des conditions thermiques de la fonte de glace et de l'uniformité de dépôt de glace sur la chaîne d'isolateurs.

### 3.3.1.8 Effet de la polarité

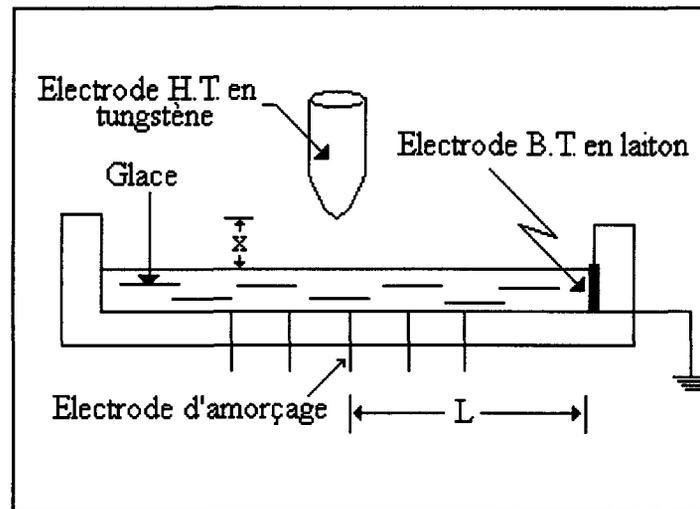
Les valeurs de tension de tenue maximale varient en fonction de la nature de la tension appliquée [56; 57]. Dans le cas d'une tension continue, pour une épaisseur donnée de glace, les valeurs les plus faibles, donc les plus dangereuses, ont été obtenues en polarité négative et les valeurs les plus élevés, en polarité positive. Les valeurs de tension de tenue obtenues sous tension alternative sont inférieures à celles obtenues sous tension continue en polarité positive et supérieures à celles obtenues sous tension continue en polarité négative. Lors des essais sous tension continue, les valeurs de tension de tenue maximale dépendent du régime d'essai. On a constaté que les résultats de tension de tenue maximale obtenus en régime de fonte sont inférieurs de 24 % en polarité négative et de 3 % en polarité positive par rapport à ceux obtenus en régime d'accumulation. Par exemple, pour une chaîne de 4 isolateurs antibrouillards, des essais, en régime de fonte et en fonction de la polarité, ont donné les résultats présentés par la figure 3.10 [56].



**Figure 3.10: Tension de tenue maximale en fonction de l'épaisseur de glace (ε) pour différentes polarités.**

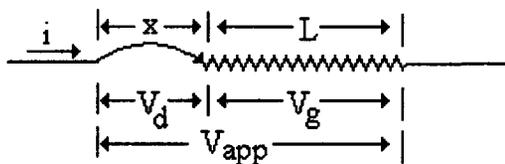
Il faut mentionner que ces résultats doivent être interprétés avec prudence car la source de courant utilisée pour les essais cités n'était pas d'une puissance adéquate [6].

Pour représenter une décharge sur la surface de la glace conductrice, Bui [58], dans son mémoire de maîtrise, s'est servi du schéma électrique d'Obenaus [42], préparé pour une surface polluée et l'a appliqué à la glace en la considérant comme étant une sorte de pollution (figure 3.11).



**Figure 3.11: Modèle utilisé par Bui.**

Le schéma électrique correspondant à la surface décrite ci-haut sera:



$$V_{app} = V_d + V_g \quad (3.2)$$

$$V_g = L \cdot r \cdot i \quad (3.3)$$

$$V_d = \frac{A \cdot x}{i^n} + V_e \quad (3.4)$$

Où

$V_{app}$  : Tension appliquée;

$x$  : Longueur de la décharge;

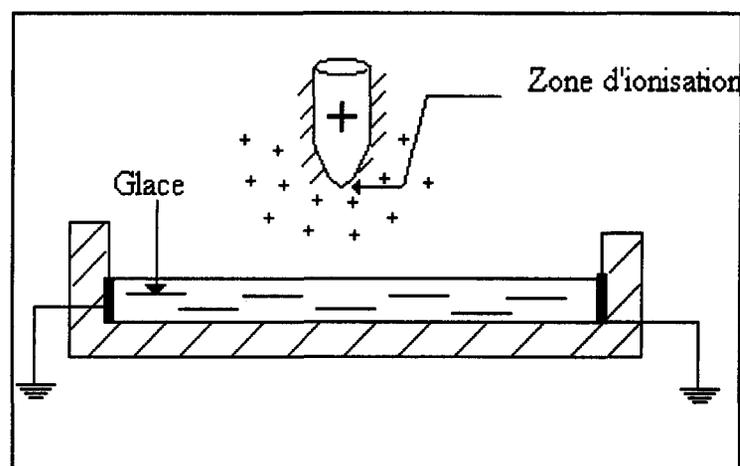
$V_e$  : Chute de tension aux électrodes;

$V_d$  : Tension aux bornes de la décharge;

$V_g$  : Tension mesurée aux deux extrémités de la couche de glace;

A et n sont des constantes expérimentales de décharge caractérisant l'arc.

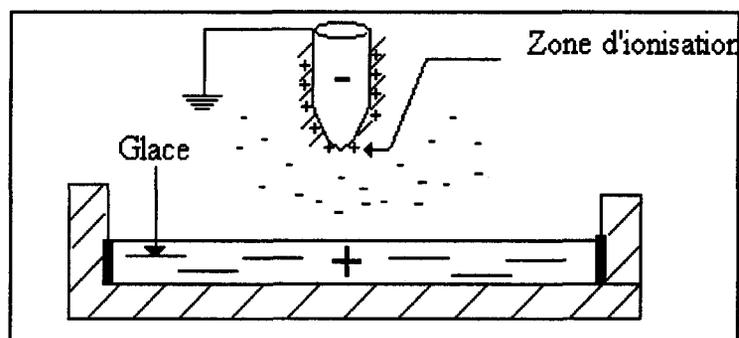
Une tension continue de polarité positive appliquée à l'électrode métallique ionise l'espace l'entourant et provoque la formation d'ions positifs qui prendront le chemin de la cathode (figure 3.12). Les électrons existant dans l'air se déplacent vers l'anode tout en produisant des avalanches par ionisation secondaire.



**Figure 3.12: Ionisation positive.**

Plus on s'éloigne de la zone d'ionisation, plus le champ électrique devient faible par rapport au champ de seuil (30 kV/ cm), ce qui limite l'ionisation à l'espace près de l'anode. La glace, isolée de la zone d'ionisation par la zone de dérive, retarde la génération d'électrons secondaires par impact des ions positifs à la surface. Alors, les ions positifs générés par l'anode restent autour de celle-ci. La charge positive domine complètement l'espace entre les deux électrodes, ce qui augmente le potentiel de l'anode et par conséquent, la chute de tension cumulée aux électrodes  $V_e$ . Les électrons, qui se trouvent dans une région où l'intensité du champ croît rapidement (à côté de l'anode), favorisent le phénomène de l'avalanche.

Par contre, si la polarité négative est appliquée (figure 3.13) la surface de la cathode constitue la zone d'ionisation et provoque l'émission des électrons secondaires produits par l'impact des ions positifs sur la cathode. La décharge apparaît lorsque la multiplication des charges par les chocs des électrons secondaires et des molécules de gaz contribue à augmenter l'ionisation de l'air environnant.



**Figure 3.13: Ionisation négative.**

Parce que l'évacuation des ions est moins rapide que celle des électrons, l'espace entre les deux électrodes devient chargé négativement. La charge d'espace positive domine seulement la zone d'ionisation (autour de la cathode) qui est située dans la région où le champ électrique est intense, ce qui augmente le potentiel de la cathode et, par conséquent, la chute de tension aux bornes des électrodes diminue. L'excédent d'ions négatifs contribue à la suppression de la décharge car ils diminuent le champ initial.

### 3.3.2 Caractéristiques des constantes d'arc A et n

En raison de l'influence du type de glace et de sa conductivité, le contournement d'une surface glacée est un phénomène plus complexe que le contournement d'une surface polluée [59]. Le gradient de la tension de l'arc sur une surface polluée est donné par:

$$E_{\text{arc}} = \frac{V_{\text{arc}}}{x} = A \cdot (I_m)^{-n} \quad (3.5)$$

Où

$E_{\text{arc}}$  est le gradient de la tension de l'arc;

$V_{\text{arc}}$  est la tension aux bornes de l'arc;

$I_m$  est la pointe du courant de fuite.

A et n sont les constantes d'arc qui sont influencées par plusieurs conditions environnementales comme la nature de la tension appliquée et l'état de l'arc. Des études faites aux laboratoires du GRIEA ont pour but de déterminer les caractéristiques des constantes A et n de l'arc sur une surface de glace [59]. Le modèle approprié choisi pour la modélisation de l'arc est donné par la figure 2.3.

L'utilisation d'un tel modèle physique assure la formation des arcs locaux et facilite la mesure de la chute de tension à ces bornes. La glace est formée à une température de  $-12^{\circ}\text{C}$  puis un espace d'air, au sommet du triangle, est réalisé en coupant une partie de la glace. Cela facilite l'amorçage de l'arc. Une électrode de mesure est installée sur la surface de glace, puis le montage est placé verticalement dans la chambre froide, dont la température est réglée à  $0^{\circ}\text{C}$ . Plusieurs tests ont été effectués en variant la haute tension et la distance x de l'arc dont on tire les conclusions suivantes:

1) Les valeurs de A sont plus élevées pour une surface glacée que pour une surface polluée tandis que les valeurs de n ont un comportement inverse (tableau 3.4).

<b>Tableau 3.4: Constantes d'arc A et n pour les surfaces givrées et polluées.</b>				
	Surface givrée, $x \geq 7$ cm		Surface polluée	
	Arc dynamique	Arc statique	Arc dynamique	Arc statique
A	204,7	178,8	140,0	69,0
n	0,5607	0,5093	0,67	0,76

2) Pour une longueur inférieure à 7 cm, les deux arcs, dynamique et statique, influencent les constantes A et n (tableau 3.5).

x (cm)	Arc dynamique		Arc statique	
	A	n	A	n
1	989,8	0,2812	971,9	0,2226
3	567,6	0,3362	404,4	0,3430
5	346,4	0,3556	227,2	0,4709
7	204,7	0,5607	178,8	0,5093

Plus l'arc est court, plus les valeurs de A croissent et celles de n décroissent.

Atteignant 7 cm et plus, A et n demeurent constants et l'équation de l'arc sera:

$$E_{\text{arc}} = 204,7 I_m^{-0,5607} \quad (3.6)$$

3) Le diamètre de l'arc formé sur une surface glacée est plus petit que celui observé sur une surface polluée.

## CHAPITRE 4

### ÉQUIPEMENT ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

## CHAPITRE 4

### ÉQUIPEMENT ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

#### 4.1 Introduction

L'opportunité d'étudier le comportement des isolateurs recouverts de glace dans un environnement de laboratoire facilite le travail des chercheurs. Selon les procédures expérimentales utilisées dans les différents laboratoires, la glace recouvrant les isolateurs testés est produite artificiellement ou bien apportée des sites naturels et déposée sur les isolateurs [13; 49]. La glace artificielle est accumulée à partir de fines gouttelettes formées d'eau distillée et d'un ajout de sel pour une conductivité donnée [4; 40], ou tout simplement de l'eau du robinet [31].

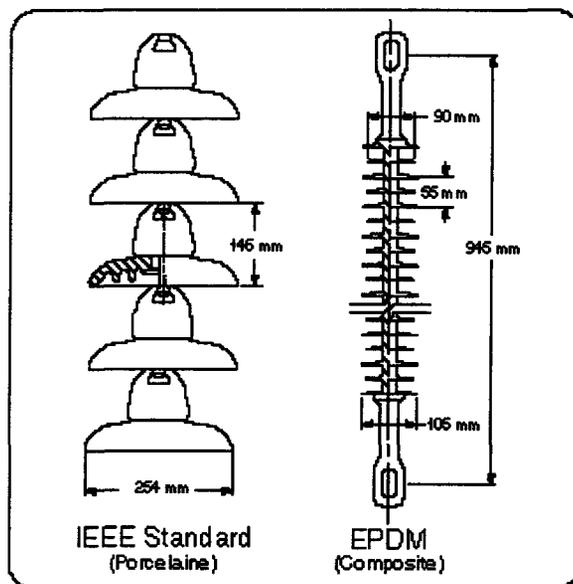
Dans le cadre du présent projet de recherche, l'influence de l'épaisseur du dépôt de glace sur la tension de tenue maximale des isolateurs composite (EPDM) est étudiée en profondeur.

## 4.2 Équipement

### 4.2.1 Isolateurs testés

Deux types d'isolateurs ont été utilisés: l'isolateur standard IEEE et l'isolateur composite en EPDM.

La figure 4.1 illustre les deux types d'isolateurs qui ont été testés à l'UQAC. Ces isolateurs diffèrent par leur forme géométrique, leur rigidité et par les matériaux dont ils sont composés. Leurs caractéristiques sont présentées au tableau 4.1.



**Figure 4.1: Formes des isolateurs testés.**

L'isolateur IEEE comprend deux parties métalliques (armatures) servant à l'accrochage et une partie isolante (figure 4.1).

Les isolateurs composites EPDM sont constitués d'une âme, réalisée en fibre de verre imprégnée de résine, donnant à l'isolateur la résistance mécanique ainsi que d'une enveloppe en ÉthylPropylDimonoMère; d'où le nom des isolateurs en EPDM, (figure 4.1). Les revêtements évitent tout cheminement carboné en surface sous l'effet de contraintes électriques, mais sont soumis à une érosion superficielle (vieillessement) plus ou moins rapide selon leur constitution. L'intérêt primordial de tels isolateurs est leur prix relativement bas et leur légèreté, en particulier lorsqu'on les compare aux chaînes équivalentes d'isolateurs en porcelaine pour les lignes de tension électrique élevée.

<b>Tableau 4.1: Caractéristiques des isolateurs étudiés.</b>		
<b>Paramètres</b>	<b>Isolateurs standards</b>	<b>Isolateurs composites</b>
Résistance mécanique (kN)	67-87	120
Diamètre (mm)	254	90/105
Pas (mm)	146	51
Ligne de fuite/unité (mm)	305	2171
Distance d'arc/unité (mm)	225	714

## 4.2.2 Chambre climatique

La glace a été accumulée dans une chambre climatique permettant d'atteindre des températures allant jusqu'à  $-35\text{ °C}$  [60]. La stabilité de la température est contrôlée par un régulateur numérique agissant avec une précision de  $\pm 0,2\text{ °C}$ . La chambre climatique présentée à la figure 4.2 mesure  $4,8\text{ m} \times 2,8\text{ m} \times 3,5\text{ m}$  et est munie d'équipements appropriés, soient:

- un système d'arrosage;
- un système de refroidissement;
- un système de haute tension.

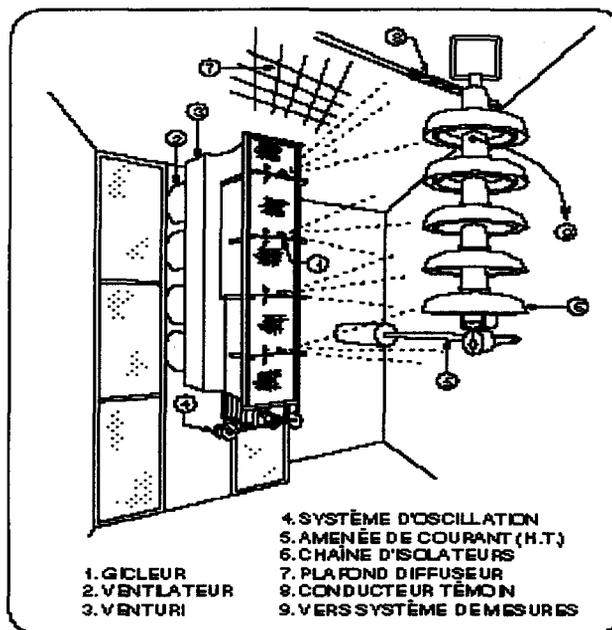


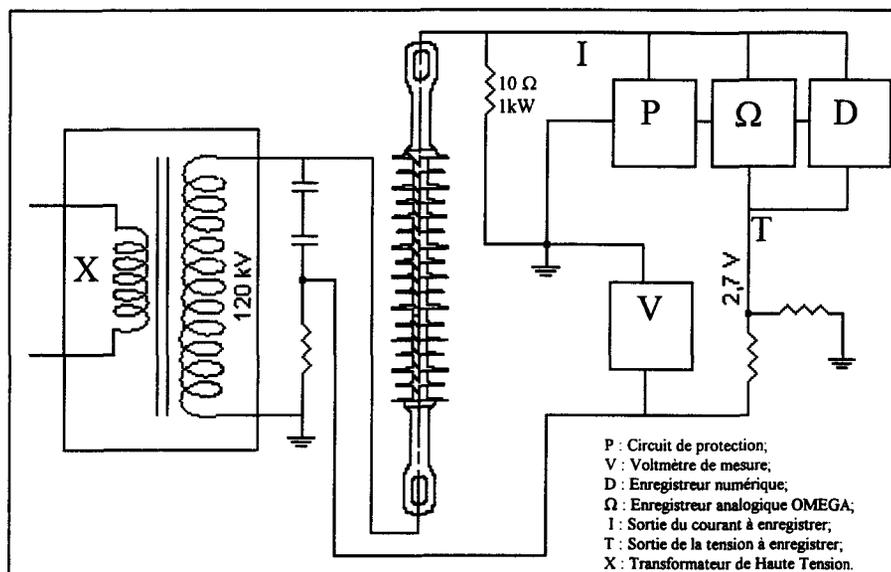
Figure 4.2: Chambre climatique.

Le système d'arrosage est constitué d'un ensemble de quatre gicleurs pneumatiques servant à produire de fines gouttelettes d'eau dont le volume varie selon la pression d'air et le type de capot d'air. La régulation du débit d'eau et de la pression d'air se fait manuellement à l'aide des vannes appropriées. En vue d'améliorer l'uniformité du dépôt de glace, les gicleurs, placés verticalement l'un par-dessus l'autre, sont montés sur des supports oscillants. Le mouvement oscillant est produit par un mouvement rotatif d'un moteur électrique à vitesse réglable et à l'aide d'un système d'excentriques et de bielles. Un groupe de huit ventilateurs, placés en venturi, assure le transport des gouttelettes en direction des isolateurs.

Le système de refroidissement est composé de deux unités indépendantes de machines frigorifiques à compression. Le pouvoir frigorifique des machines a une capacité totale de 316,5 kJ/min. L'installation du plafond diffuseur facilite l'échange rapide et uniforme de la température dans tout le volume de la chambre climatique.

Le système de haute tension, schématisé à la figure 4.3, comprend un régulateur automatique de tension (BRENTFORD), un transformateur H.T. (0,6/120 kV), 240 kVA, un diviseur capacitif de tension  $2 \times 100$  pF et une amenée de courant à haute tension. La lecture de la haute tension est effectuée par le biais du voltmètre HEAFELY. La mesure de la tension et du courant de fuite est effectuée à l'aide d'un enregistreur analogique

OMEGA. Les résultats de mesure sont traités et analysés à l'aide d'un logiciel de traitement de signaux (VIEWDAC).



**Figure 4.3: Système de la haute tension.**

Enfin, la chambre climatique est munie d'un épurateur d'air à charbon actif dont le rôle consiste à éliminer l'ozone produit par les décharges électriques. Elle comprend aussi un système d'éclairage permettant d'observer les phénomènes étudiés à l'intérieur et un système de balais mécaniques permettant de dégager la glace produite sur les grilles d'échangeurs thermiques.

### **4.3 Procédures expérimentales**

#### **4.3.1 Formation des dépôts de glace**

Le dépôt de glace est formé par l'accumulation de gouttelettes d'eau surfondues qui gèlent au contact d'une surface froide, selon des conditions et un processus thermique déterminés. L'accumulation et l'évolution d'un dépôt de glace sur une chaîne d'isolateurs sont présentées au paragraphe 2.1.

Le type de glace dépend principalement de l'ensemble des conditions atmosphériques qui accompagnent sa formation et, plus particulièrement, de la température et de la vitesse du vent. Le tableau 2.1 montre trois types essentiels de glace ayant une origine atmosphérique. Seule la glace formée en régime humide a été fabriquée en laboratoire et choisie pour les présents tests. La raison pour ce choix est que ce type de glace est considéré comme étant le plus dangereux du point de vue des probabilités d'apparition de l'arc de contournement. Cela est attribuable au fait que la glace formée en régime humide est adhésive et s'accumule facilement sur la surface des isolateurs en créant des glaçons formant un pont entre les jupes des isolateurs. De plus, les précipitations favorisant ce type de glace durent parfois longtemps et il en résulte un important volume de glace déposée sur la chaîne d'isolateurs. Le tableau 4.2 présente les conditions d'accumulation utilisées en laboratoire pour la formation de ce type de glace.

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

L'épaisseur de la glace a été mesurée sur un cylindre témoin de 3,8 cm de diamètre, tournant à une vitesse de 1 tour/min. Le cylindre a été installé à proximité de l'isolateur supérieur pendant toute la période d'accumulation (figure 4.4). La vitesse d'accumulation de glace est une fonction linéaire du temps (figure 2.1).



**Figure 4.4: Aspect visuel du cylindre témoin.**

Le poids de la glace accumulée, exprimé en fonction de l'épaisseur de glace mesurée sur le conducteur témoin, est présenté dans la figure 4.5. Ce taux de croissance, exprimé en kg par mètre de longueur de l'isolateur, est de 1,75 kg/m pour les isolateurs composites (EPDM) et de 3,4 kg/m pour les isolateurs standards IEEE.

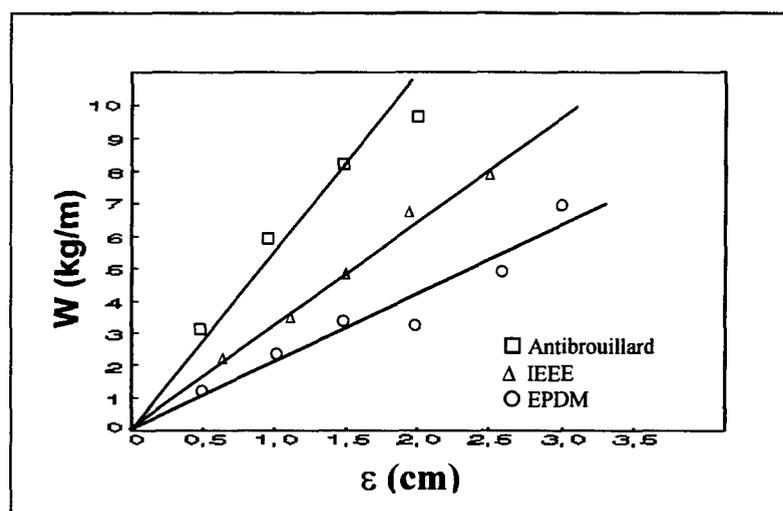


Figure 4.5: Poids de la glace en fonction de l'épaisseur ( $\epsilon$ ) de glace mesurée sur le conducteur témoin.

#### 4.3.2 Procédures liées aux essais de contournement

Un test de contournement est effectué selon les étapes suivantes:

#### 4.3.2.1 Opérations préliminaires

- **Préparation des isolateurs:** les isolateurs sont nettoyés, la veille du test, avec une solution de 0,1 % de phosphate de sodium  $\text{Na}_3 \text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . Ensuite, ils sont rincés avec de l'eau distillée et séchés à la température ambiante. Les isolateurs sont alors placés dans la chambre froide.
- **Préparation de la chambre climatique:** après chaque essai, la chambre climatique est nettoyée du restant de glace et d'eau de fonte, puis séchée à l'air ambiant. Les gicleurs sont retirés et nettoyés à leur tour. L'isolateur est placé à l'intérieur de la chambre qui est réglée à une température froide déterminée. Par la suite, les ventilateurs des échangeurs thermiques et le compresseur sont mis en marche. Le cylindre témoin est placé dans la chambre, à proximité de la borne de terre de l'isolateur, pour vérifier l'épaisseur de la glace accumulée. Environ douze heures plus tard, on procède à l'étape suivante.
- **Préparation de l'eau:** on remplit le réservoir approprié d'eau déminéralisée qu'on additionne d'une quantité prédéterminée de sel ( $\text{NaCl}$ ) pour obtenir la conductivité requise (soit  $80 \mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Après avoir terminé les opérations préliminaires et dès que la chambre froide et les isolateurs ont atteint la température voulue, on peut procéder aux essais de contournement.

### **4.3.2.2 Essais de contournement**

Deux régimes sont utilisés dans ce but, soit le régime d'accumulation et le régime de fonte.

#### **4.3.2.2.1 Régime d'accumulation**

Les essais en régime d'accumulation ont été réalisés selon les étapes suivantes:

1. période d'accumulation;
2. période de préparation à l'essai de contournement;
3. période d'essai de contournement.

Dans la première période, il s'agit d'accumuler la glace sur l'isolateur. Un compresseur d'appoint est mis en marche, de même que le système d'oscillation des gicleurs et les ventilateurs de soufflage et d'épuration d'air. On procède à l'ouverture des vannes d'eau et d'air. Les gicleurs sont chauffés lors de l'étape de l'accumulation afin qu'ils ne soient bloqués par la glace. Puis on règle la pression d'air et le débit d'eau aux valeurs demandées et on observe attentivement le déroulement de l'accumulation de glace. L'épaisseur de la glace, mesurée à intervalles réguliers sur le conducteur témoin, est directement proportionnelle à la durée d'accumulation. L'oscillation des gicleurs favorise une répartition uniforme de la glace le long de l'isolateur. Une tension de service est appliquée à l'isolateur pendant toute la période d'accumulation. Cette tension est de 51 kV

pour l'isolateur composite en EPDM et de 10 kV par isolateur IEEE, c.-à-d. 60 kV pour une chaîne courte d'isolateurs standards IEEE. Une surveillance continue du déroulement de l'accumulation est nécessaire pour assurer un dépôt approprié de glace sur l'isolateur testé.

La période de préparation à l'essai de contournement succède immédiatement la période d'accumulation. Une fois l'épaisseur de glace voulue atteinte, la projection des gouttelettes d'eau est arrêtée, de même que la tension de service. Une prise de photos et de diapositives est alors effectuée ainsi que certaines opérations auxiliaires comme la préparation des logiciels d'acquisition nécessaires aux essais de contournement. Cette période de préparation, réalisée en absence de haute tension, nécessite quelques minutes seulement (2 à 3 minutes), durant laquelle la température demeure constante à -12 °C.

Enfin, pour la période d'essai de contournement, une tension d'essai est appliquée à l'isolateur immédiatement après la courte période de préparation. Cette tension, contrôlée par un régulateur automatique, s'accroît avec une vitesse constante de 3,9 kV/s jusqu'à la valeur estimée de tension d'essai (figure 2.9). Une fois la tension d'essai appliquée, des décharges électriques débutent et un courant de fuite est enregistré. Un résultat est obtenu après 30 minutes d'application de la tension d'essai: dans le cas d'une tenue, on augmente la tension d'essai d'un pas de 3 kV pour le prochain test, dans le cas contraire, la tension d'essai est baissée d'un pas de 3 kV et ainsi de suite.

#### 4.3.2.2 Régime de fonte

Les essais en régime de fonte sont effectués selon les étapes suivantes.

1. période d'accumulation;
2. période de préparation à la période de fonte;
3. période de fonte;
4. période d'essais de contournement.

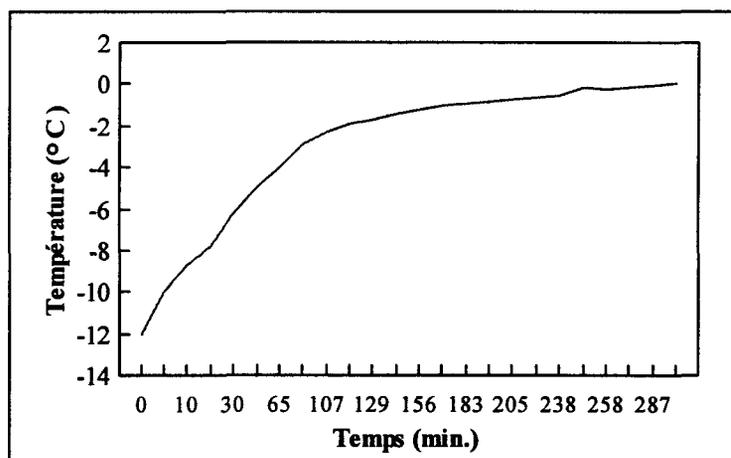
Les deux premières étapes sont identiques à celles décrites dans le régime d'accumulation.

La période de fonte est réalisée par un échauffement, rapide ou lent, de l'air ambiant, jusqu'à une température qui se rapproche de la température de fonte de la glace (0°C). La série de tests présentée ci-dessous a été effectuée en régime de fonte lente. L'échauffement a été produit par un simple arrêt des compresseurs et des ventilateurs. C'est un échauffement adiabatique qui se produit à travers les parois de la chambre (la porte de la chambre demeurant fermée). La montée de la température est d'environ 3 °C/heure (figure 4.6). Une tension de service, de 51 kV pour l'isolateur composite en EPDM ou bien de 50 kV pour l'isolateur IEEE, est appliquée durant la durée de cette période de fonte. La raison de ce choix de 50 kV pour l'isolateur IEEE s'explique par le fait qu'en régime de fonte lente, une tension de service de 60 kV risque d'amorcer un arc de contournement (ou bien des décharges fortes qui font fondre la glace) avant d'atteindre la température de fonte.

Un thermomètre et un thermocouple à sonde sont installés dans la chambre à des distances sécuritaires de l'isolateur afin d'enregistrer l'évolution de la température. La fin de la période de fonte est fixée par la réalisation des effets suivants:

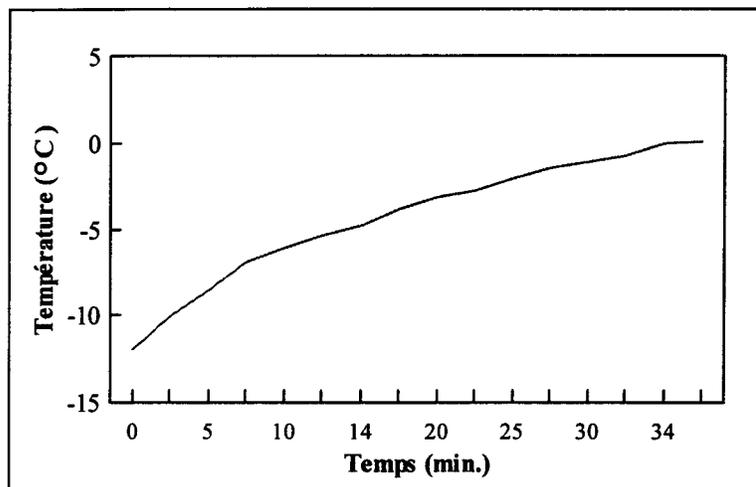
- \* l'écoulement de l'eau à la surface de la glace accumulée sur les isolateurs;
- \* le rapprochement de la température aux environs de 0 °C;
- \* le rapprochement du temps réel de l'échauffement au temps prévu;
- \* l'apparition de fortes décharges à la surface des isolateurs.

Lorsque ces conditions sont atteintes, on procède à l'essai de contournement. Ce dernier est réalisé immédiatement après la période de fonte en augmentant la tension à partir de la tension de service jusqu'à la valeur prédéterminée de la tension d'essai. Le courant de fuite, ainsi que la tension appliquée aux isolateurs, sont enregistrés à l'aide des systèmes numériques et analogiques. La durée de l'essai est égale à 30 minutes ou jusqu'à l'occurrence d'un contournement.



**Figure 4.6: Augmentation de la température pendant la fonte lente.**

La période de fonte rapide est, pour sa part, beaucoup moins longue. Elle dure de 30 à 60 minutes et se réalise par une ouverture contrôlée de la porte de la chambre froide, où la montée de température est d'environ 24 °C/heure (figure 4.7).



**Figure 4.7: Augmentation de la température pendant la fonte rapide.**

Le résultat des essais peut être une tenue ou un contournement. Après chaque test, on ouvre le disjoncteur principal et on prend des photos et des diapositives du dépôt de glace pour mémoriser l'effet de l'action de l'arc. Ensuite, on récupère le restant de la glace accumulée sur l'isolateur, on mesure son poids et la conductivité de l'eau de fonte afin de comparer les essais et, enfin, on procède à l'analyse des résultats.

#### **4.4 Conclusion**

Le régime d'accumulation est réalisé lorsque la tentative d'essai de contournement est faite dans les quelques 2 à 3 minutes qui suivent la fin de la période d'accumulation de la glace sur l'isolateur. La température ambiante de - 12 °C est maintenue constante et la tension d'essai prédéterminée est appliquée à la chaîne d'isolateurs pendant une demi-heure si un contournement ne se produit pas.

Le régime de fonte se réalise lorsque la tentative d'essai de contournement est faite après une période de fonte. Cette période de fonte peut être lente ou rapide: la période de fonte rapide est une période de réchauffement de 30 à 35 minutes, correspondant à un taux moyen d'augmentation de température de l'ordre de 24 °C/heure. La période de fonte lente est une période de réchauffement de 3 à 5 heures, correspondant à un taux moyen d'augmentation de température de l'ordre de 3 °C/heure. La période de fonte est insérée entre la période de préparation routinière (qui succède la période d'accumulation de la glace) et l'essai de contournement. La tension de service est maintenue sur l'isolateur tout au long de la période de fonte.

## CHAPITRE 5

### TENSION DE TENUE EN RÉGIME D'ACCUMULATION

## CHAPITRE 5

### TENSION DE TENUE EN RÉGIME D'ACCUMULATION

#### 5.1 Introduction

Il n'existe encore aucune méthode standard pour mesurer la tension de tenue électrique d'un isolateur recouvert de glace. Les méthodes expérimentales utilisées varient d'un laboratoire à l'autre, ce qui rend difficile la comparaison des résultats publiés. La tension mesurée peut être tension de tenue ou tension de contournement. Elle varie en fonction de l'épaisseur de la glace, de la conductivité de l'eau, de la polarité de la tension appliquée ainsi que d'autres paramètres. Les travaux du GRIEA consistent à développer une méthode standardisée de mesure de la tension de tenue maximale.

L'objectif de ce chapitre est orienté vers deux tâches principales. La première consiste à déterminer l'influence de l'épaisseur de la glace accumulée sur la tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM, les résultats étant comparés, par la suite, avec ceux obtenus pour les isolateurs standards IEEE.

La seconde consiste à déterminer la tension de tenue à 50 % des isolateurs standards IEEE pour une épaisseur de 2 cm de glace, les résultats étant comparés ensuite avec ceux obtenus par la méthode de tension de tenue maximale pour les mêmes isolateurs et la même épaisseur de glace.

## 5.2 Tension de tenue maximale, $V_{TM}$ , en fonction de l'épaisseur de glace

La tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM a été déterminée pour 5 épaisseurs de glace, telles que mesurées sur le cylindre témoin, allant de 0,5 à 3 cm. Les résultats de tension de tenue maximale en fonction de l'épaisseur de glace sont présentées dans le tableau 5.1 et par la figure 5.1. Les résultats détaillés de chaque essai sont présentés en annexe.

<b>Tableau 5.1 : Résultats de mesure de la tension de tenue maximale, <math>V_{TM}</math> des isolateurs en EPDM en fonction de l'épaisseur de glace.</b>					
Épaisseur de glace $\epsilon$ (cm)	Tension de service $V_0$ (kV)	Tension de tenue maximale $V_{TM}$ (kV)	$V_{TM}/m$ (kV/m)	Courant de crête $I_{max.}$ (mA)	Énergie maximale $E_{max.}$ (kJ)
0,5	51	> 120	>168	66	34
1,0	51	87	121,8	144	143
1,5	51	72	100,8	164	182
2,0	51	69	96,6	750	—
2,5	51	57	79,8	648	425
3,0	51	57	79,8	468	608

L'énergie maximale décrite dans le tableau 5.1 est calculée pour les essais menant seulement à des tenues. Elle peut être définie comme étant l'énergie nécessaire pour fondre

la glace sous l'effet de la chaleur dégagée par le courant de fuite. C'est la surface sous la courbe du courant de fuite donnée par l'intégrale:

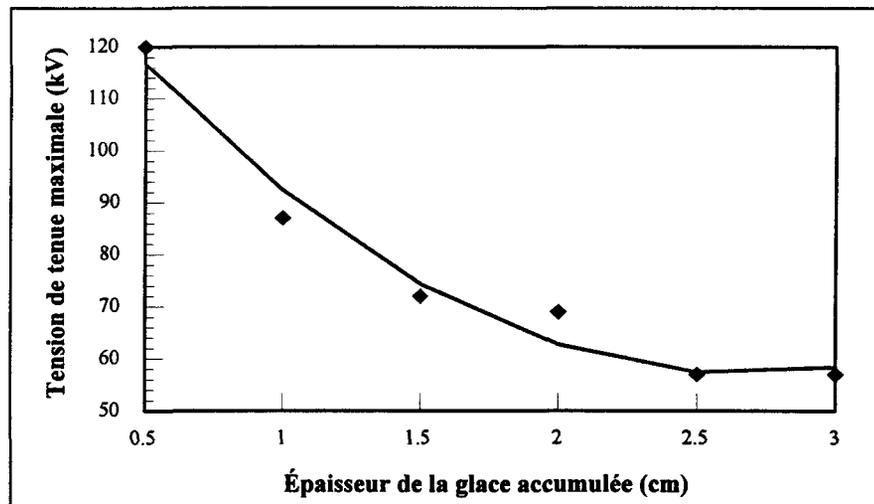
où 
$$E = n \cdot V \cdot \int i dt \quad (5.1)$$

V est la valeur efficace de la tension appliquée;

i est la valeur instantanée du courant de fuite;

n est le nombre d'échantillons par temps donné.

On a remarqué que l'épaisseur de la glace influençait d'une manière considérable la valeur de la tension de tenue maximale. Cette dernière diminue en fonction de la croissance de l'épaisseur jusqu'à une certaine limite à partir de laquelle la tension de tenue maximale demeure constante. Cette épaisseur critique de glace est de 2,5 cm pour les isolateurs composites en EPDM.



**Figure 5.1: Variations de la tension de tenue maximale des isolateurs en EPDM en fonction de l'épaisseur de glace.**

La figure 5.1 montre que la tension de tenue maximale est plus élevée pour une épaisseur de glace égale à 0,5 cm et qu'elle diminue progressivement à mesure que l'épaisseur de glace s'accroît. Ce phénomène s'explique par le fait qu'une faible épaisseur de glace n'assure pas, en général, la continuité de dépôt. Par conséquent, la ligne de fuite sera relativement longue (figure 3.7). D'autre part, les courts glaçons formés aux bords des isolateurs ne facilitent pas les décharges. Les observations ont montré que les décharges commençaient lorsque les glaçons atteignent au moins les trois quarts du pas de l'isolateur. Par contre, au fur et à mesure que l'épaisseur de la glace augmente, les bords de l'isolateur seront liés par des ponts de glace et une couche continue recouvrira tout l'isolateur. Les longs et solides glaçons s'approchent de la borne à H.T., la ligne de fuite se raccourcit, facilitant les décharges fortes ainsi que l'amorçage de l'arc.

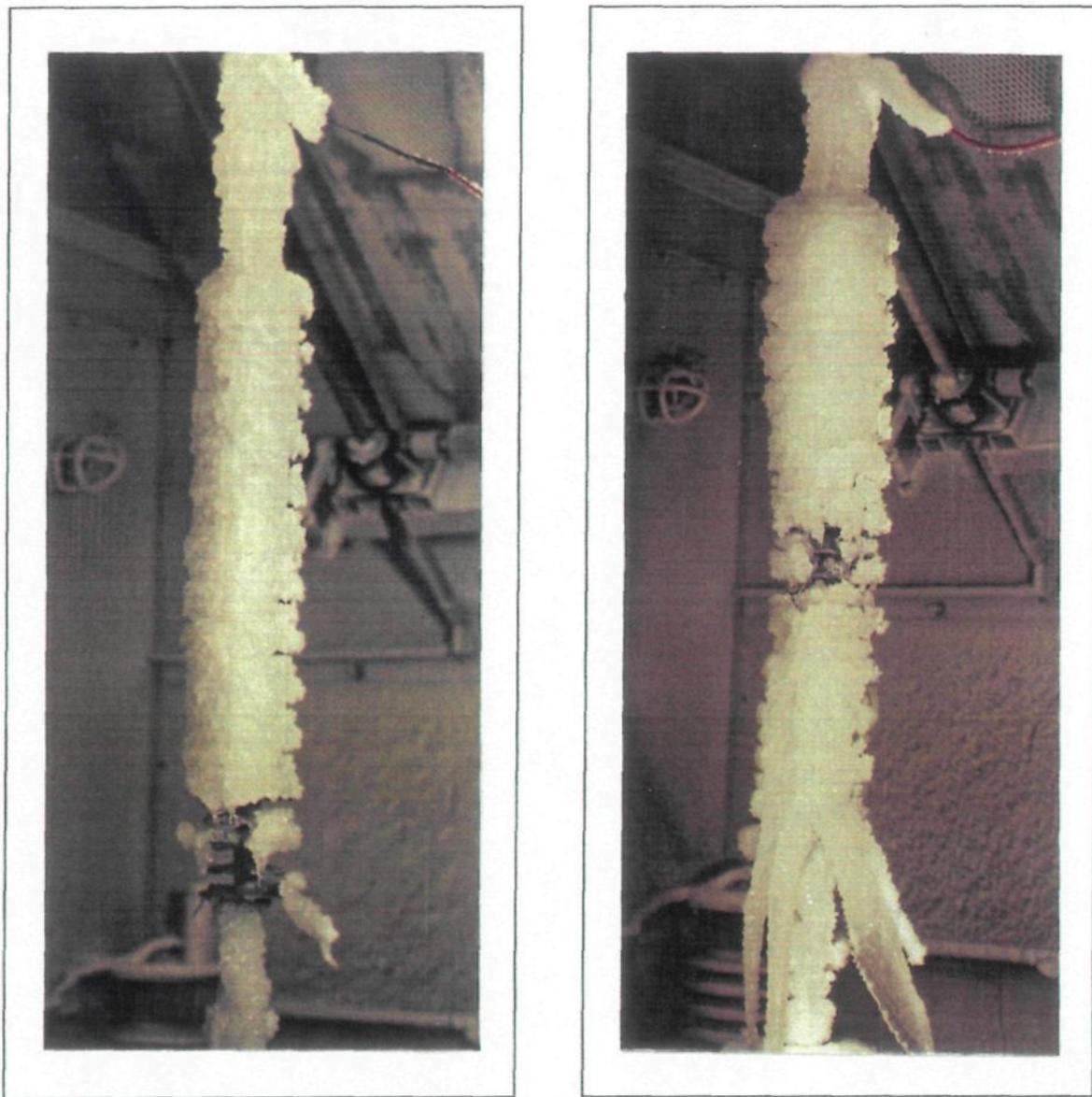
## **5.2.1 Observations**

### **5.2.1.1 Observations durant l'accumulation**

Durant les vingt premières minutes de l'accumulation, des glaçons de plus en plus longs se forment. Des décharges partielles ont lieu et un courant de fuite est enregistré. Ensuite deux événements, E1 et E2 (cas séparés), ont été observés:

**E1.** À la présence des glaçons longs aux abords de l'isolateur (jupe) près de la borne de haute tension, on remarque de fortes décharges et un courant de fuite très élevé qui

dégage de la chaleur entraînant la fonte de ces glaçons. Le courant de fuite diminue ensuite et une accumulation uniforme continue sur toute la chaîne des isolateurs, à l'exception de l'isolateur du bas où les glaçons n'ont pu se former rapidement et le cycle recommence (figure 5.2-a).



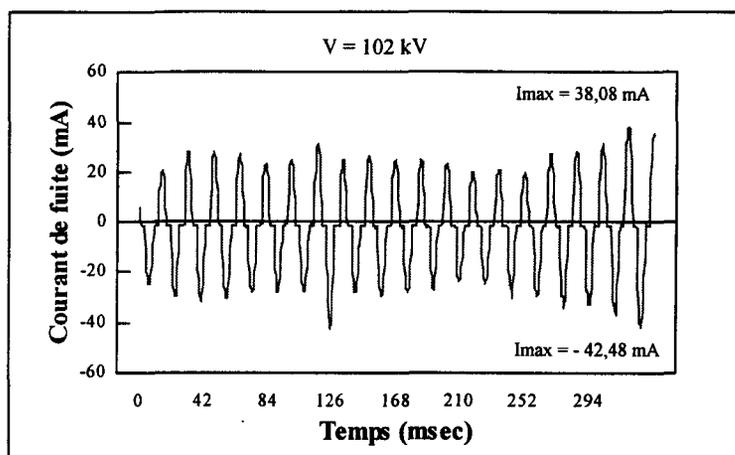
a) b)  
**Figure 5.2: Dépôt de glace durant l'accumulation.**

**E2.** Dans le deuxième cas, en raison du manque de glaçons aux abords de l'isolateur (jupe) près de la borne de haute tension, les fortes décharges se manifestent presque au milieu de la chaîne d'isolateurs. Ces décharges empêchent la formation de glace à cet endroit et un espace d'air se forme au milieu du dépôt, tel que présenté par la figure 5.2-b.

Au cours de la période d'accumulation, des décharges électriques ont été observées. Parfois, un arc blanc avec un fort courant de fuite se produit, entraînant la chute des glaçons provoquée par la fonte de la glace.

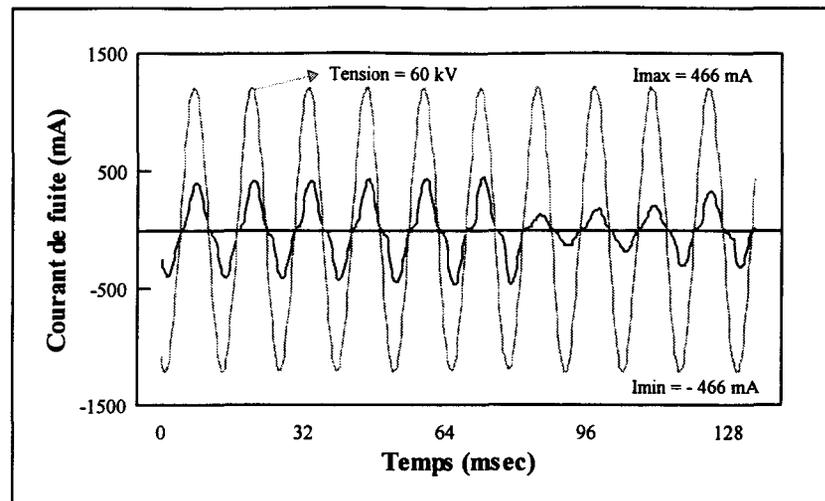
Pour les épaisseurs allant de 0,5 cm à 1 cm, les glaçons ne comblent pas totalement les espaces libres entre les isolateurs et le dépôt de glace atteint à peine le bas de la chaîne d'isolateurs. Cela est attribuable, d'une part, à la courte durée de l'accumulation comme fonction proportionnelle à l'épaisseur et d'autre part, aux décharges qui ont lieu entre la borne à H.T. et la première jupe de l'isolateur. La glace étant discontinue le long de la chaîne d'isolateurs, les espaces d'air sont créés graduellement entre les isolateurs et sont répartis sur toutes les jupes de l'isolateur. En fonction de la distance de fuite, déterminée par les conditions d'accumulation, le courant de fuite se stabilise à une moyenne de 30 mA. De même, on peut observer l'arc blanc, pendant une très courte durée, avec une intensité de courant pouvant atteindre 60 mA.

Pour l'épaisseur de 0,5 cm, on n'a pas observé de contournement de l'isolateur en raison de la limite de tension du transformateur de haute tension (120 kV). La figure 5.3 illustre le courant de fuite pendant l'essai de contournement pour une épaisseur de 0,5 cm.



**Figure 5.3: Variations du courant enregistré durant un test menant à la tenue pour une épaisseur de glace de 0,5 cm.**

Pour les épaisseurs supérieures à 1 cm, une jonction du pont de glace est formée entre les jupes. La glace recouvre continuellement l'isolateur, ce qui facilite la répartition du film d'eau sur la surface de la glace et, par la suite, facilite le passage du courant qui devient fort et peut atteindre des valeurs élevées allant jusqu'à 400 mA (figure 5.4). Les arcs partiels s'amorcent et se transforment parfois en arc de contournement.

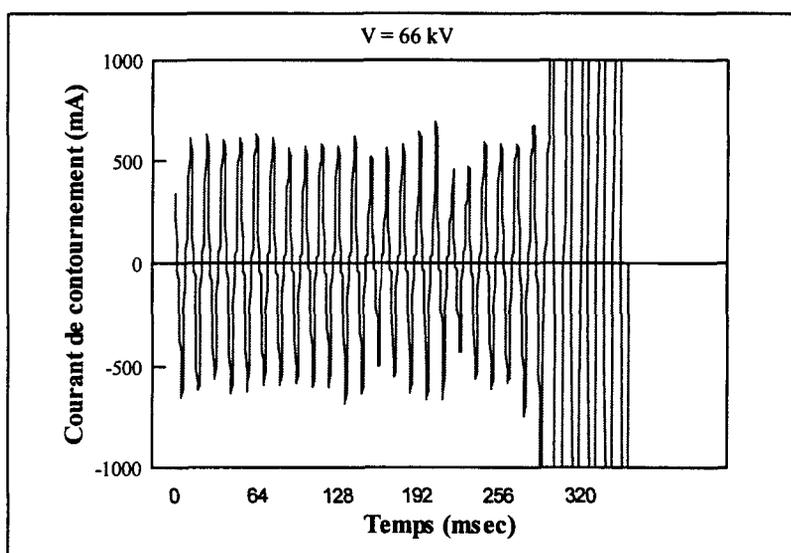


**Figure 5.4: Variations du courant enregistré durant un test menant à la tenue pour une épaisseur de glace de 3,0 cm.**

### 5.2.1.2 Observations durant les tests de contournement

En observant plusieurs expériences, nous avons remarqué que la probabilité d'avoir un contournement est plus forte lorsqu'un espace d'air, occasionné par la fonte de la glace, apparaît presque au milieu de la chaîne d'isolateurs (figure 5.2-b), ce qui facilite l'amorçage d'un arc blanc à travers cet espace et, par la suite, la distance entre les arcs blancs diminue, facilitant leur réunion pour former l'arc de contournement. L'explication probable de ce phénomène est que les espaces d'air dans la glace se comportent de la même façon que les zones sèches décrites par Obenaus [42]. La tension est rapportée à leurs bornes d'où l'amorçage des arcs qui augmentent ainsi le courant de fuite. La chaleur provoquée fait fondre la glace à d'autres endroits créant d'autres espaces d'air et, par la suite, d'autres arcs

blancs. Si la tension appliquée est suffisamment élevée, ces arcs vont se joindre pour former l'arc de contournement. Le contournement est apparu lorsque le courant dépasse 1 A (figure 5.5). Le déclenchement du système de haute tension se produit lorsque le courant de court-circuit dépasse la limite de protection du courant de transformateur qui est de 1A et ce pendant 5 cycles consécutifs (figure 5.5).



**Figure 5.5: Variations du courant enregistré durant un test menant au contournement pour une épaisseur de glace de 2,5 cm.**

### 5.2.2 Comparaison des résultats avec ceux obtenus pour l'isolateur standard.

Le tableau 5.2 présente les valeurs de tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , obtenues selon la méthode de tenue maximale des isolateurs composites et standards [62] pour les mêmes épaisseurs de glace.

<b>Tableau 5.2: Résultats de mesure de la tension de tenue maximale, <math>V_{TM}</math>, des isolateurs IEEE et en EPDM en fonction de l'épaisseur de glace.</b>				
<b>Épaisseur (cm)</b>	<b>Isolateur Standard IEEE</b>		<b>Isolateur composite en EPDM</b>	
	<b><math>V_{TM}</math> (kV)</b>	<b><math>V_{TM}/m</math> (kV/m)</b>	<b><math>V_{TM}</math> (kV)</b>	<b><math>V_{TM}/m</math> (kV/m)</b>
0,5	105	109,9	> 120	> 168
1,0	90	94,2	87	121,8
1,5	81	84,8	72	100,8
2,0	72	75,4	69	96,6
2,5	66	69,1	57	79,8
3,0	66	69,1	57	79,8

On y remarque que la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , mesurée par mètre de longueur, pour la même épaisseur de glace, est toujours plus élevée pour les isolateurs composites en EPDM que pour les isolateurs standards IEEE. Ceci montre que l'isolateur composite est, en général, plus performant que l'isolateur standard quand il s'agit de glace. Le grand diamètre de l'isolateur standard, comparé à celui de l'isolateur composite, lui permet de collecter plus de glace; la surface glacée est alors plus grande que celle de l'isolateur composite, donc la résistance superficielle est plus faible, d'où la différence des résultats.

### 5.2.3 Érosion des isolateurs

Après chaque contournement, on a remarqué des traces d'érosion semblables à des cicatrices (figure 5.6). Ces traces sont localisées sur les jupes du bas et du haut (liées aux électrodes) là où les décharges sont plus fortes. Face à l'éventualité où ces érosions pourrait diminuer les performances diélectriques de l'isolateur et, par la suite, influencer les

résultats des essais, on a choisi de permuter les isolateurs après un certain nombre d'essais pour éviter d'endommager chaque isolateur de façon trop significative.



**Figure 5.6: Aspect visuel de l'érosion d'une jupe d'un isolateur en EPDM.**

### 5.3 Tension de tenue à 50 %

La méthode de mesure de la tension de tenue à 50 % est couramment utilisée pour les essais à haute tension. Elle l'est aussi pour les essais sous pollution. Pour ces derniers, la méthode est décrite dans la norme CEI 507 et consiste à déterminer la tension de tenue des isolateurs selon un procédé statistique. Cette méthode a été adaptée dans les laboratoires du GRIEA [28] pour mesurer la tension de tenue maximale des isolateurs recouverts de glace, 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 et tenant compte de la nature particulière des processus physiques en jeu et de la technique d'essai employée.

L'objectif de cette partie consiste à déterminer, en régime d'accumulation, la tension de tenue à 50 %,  $V_{50\%}$ , des isolateurs standards IEEE recouverts de 2 cm de glace. Les résultats obtenus sont alors comparés avec ceux obtenus en utilisant les mêmes conditions selon la méthode de la tension de tenue maximale. Le tableau 5.3 présente les résultats de tension de tenue à 50 % obtenus pour 6 isolateurs IEEE en régime d'accumulation et pour une épaisseur de 2 cm telle que mesurée sur le cylindre témoin.

<b>Tableau 5.3: Résultats de mesure de la tension de tenue à 50 % ; 6 isolateurs standards; régime d'accumulation; épaisseur de glace de 2 cm.</b>							
No. d'essai	V <sub>0</sub> (kV)	V (kV)	Résultats d'essais	I <sub>max</sub> (+) / I <sub>max</sub> (-) (mA)	E <sub>max</sub> (kJ)	V <sub>50 %</sub> (kV)	σ <sub>v</sub> (kV)
1	60	75	C	—	—	74 (75,5 kV/m)	2.56 (2,7 kV/m)
2	60	72	C	—	—		
3	60	69	T	+0,43 / -0,40	483		
4	60	72	T	+0,32 / -0,31	685		
5	60	75	T	+0,41 / -0,40	743		
6	60	78	C	—	—		
7	60	75	C	—	—		
8	60	72	T	+0,32 / -0,31	698		
9	60	75	T	+0,41 / -0,40	755		
10	60	78	C	—	—		
11	60	75	C	—	—		
12	60	72	T	+0,36 / -0,38	658		
13	60	75	T	+0,44 / -0,45	867		

V<sub>0</sub> : tension de service;

V : tension d'essai;

C : contournement;

T : tenue;

I<sub>max</sub> (+) : valeur de crête du courant pendant l'alternance positive;

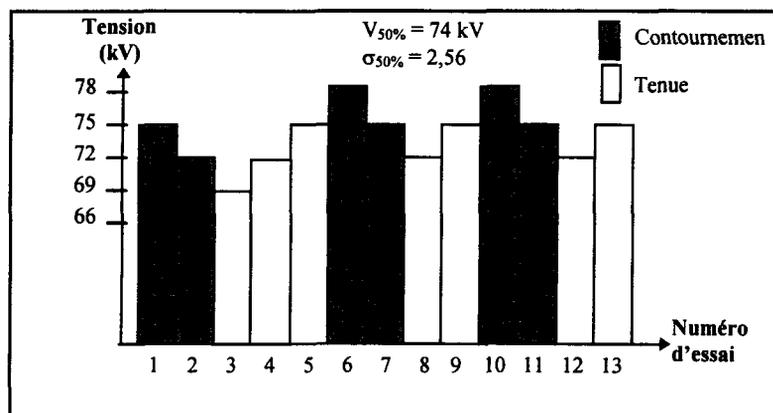
I<sub>min</sub> (-) : valeur de crête du courant pendant l'alternance négative;

E<sub>max</sub> : énergie maximale, définie dans le paragraphe 5.2;

V<sub>50%</sub> : tension de tenue à 50 %;

σ<sub>v</sub> : écart-type.

La figure 5.7 présente graphiquement les résultats de mesures effectuées en vue de déterminer la tension de tenue à 50 % pour 6 isolateurs standards IEEE en régime d'accumulation. L'épaisseur de la glace formée en régime humide était de 2 cm.



**Figure 5.7: Détermination de la tension de tenue à 50 % de 6 isolateurs IEEE; épaisseur de glace de 2 cm.**

### 5.3.1 Calcul statistique

La tension de tenue à 50 % a été calculée en utilisant l'équation 2.4 alors que l'écart-type a été calculé en utilisant l'équation 2.5. En supposant un intervalle de confiance à 95 % (ce qui est le cas, en général, pour ce genre d'essais), on peut évaluer les valeurs moyennes de tension et d'écart-type. Le nombre d'échantillons,  $n$  (défini dans l'équation 2.4), correspond, dans notre cas, au nombre d'essais utiles, qui est égal à 11.

Par une simple interpolation dans le tableau 2.4, on peut déterminer les limites définies dans les équations 2.6 et 2.7. Ainsi pour  $n = 11$  on trouve:

$$t_p/n = 0,686 \quad (5.2)$$

$$\sqrt{(n-1)/\chi^2_{p/2}} = 0,698 \quad (5.3)$$

$$\sqrt{(n-1)/\chi^2(1-p/2)} = 1,78 \quad (5.4)$$

Les équations 2.6 et 2.7 deviennent:

$$72,2 \leq V_K \leq 75,7 \quad (5.5)$$

$$1,78 \leq \sigma \leq 4,55 \quad (5.6)$$

La valeur de la tension de tenue à 50 % déterminée durant nos essais appartient en effet à l'intervalle de limite de confiance calculé dans l'équation 5.5. Le pas de 3 kV utilisé pour chaque essai est supérieur à l'écart-type calculé (2,56 kV) qui appartient toujours à l'intervalle de limite de confiance donné dans l'équation 5.6

### 5.3.2 Comparaison avec la méthode de tenue maximale

Le tableau 5.4 présente les résultats des essais effectués sur les isolateurs standards IEEE pour une épaisseur de glace de 2 cm, mesurée sur le cylindre témoin, selon la méthode de tenue maximale [62].

Tableau 5.4: Résultats obtenus pour 6 isolateurs standards IEEE par la méthode de tension de tenue maximale; épaisseur de glace de 2 cm.						
No d'essai	Tension de service $V_0$ (kV)	Tension d'essai $V$ (kV)	Résultats d'essais	Courant max. $I_T(+)$ / $I_T(-)$ (mA)	Énergie $E_{max}$ (kJ)	Tension de tenue maximale $V_{TM}$ (kV)
1	60	72	T	217 / -270	940	72 (75,4 kV / m)
2	60	75	C	—	—	
3	60	72	T	590 / -511	610	
4	60	72	T	622 / -614	820	
5	60	75	C	—	—	

La figure 5.8 présente graphiquement les résultats de mesures effectuées en vue de déterminer la tension de tenue maximale pour 6 isolateurs IEEE en régime d'accumulation. L'épaisseur de glace est de 2 cm telle que mesurée sur le conducteur témoin.

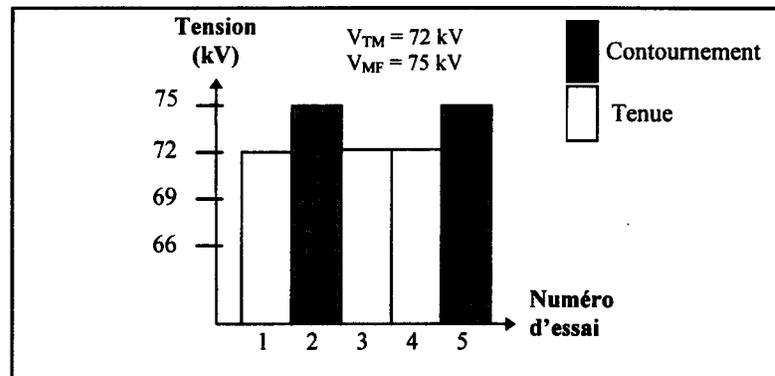


Figure 5.8: Détermination de la tension de tenue maximale de 6 isolateurs IEEE; épaisseur de glace de 2 cm.

On remarque que la tension de tenue à 50 % pour l'isolateur standard IEEE est de 74 kV tandis que la tension de tenue maximale est de 72 kV pour le même isolateur et la même épaisseur de glace. L'écart type est de 2,56 kV, donc plus bas que le pas de 3 kV utilisé pour la tension d'essai. La légère différence entre ces valeurs s'explique par le fait que lorsqu'on augmente ou diminue la valeur de la tension d'essai, on utilise un intervalle de 3 kV, donc d'une tension de 72 kV on monte à 75 kV et non pas à 73 kV ou bien à 74 kV qui pourrait bien présenter une valeur de tenue. La tension de tenue  $V_{50\%}$  peut donc être comparable à celle de la tension minimale de contournement  $V_{MF}$  (75 kV) qui est de 3 kV plus haut que la tension de tenue maximale  $V_{TM}$  (figure 5.8). On peut alors déduire que, dans des conditions de glace sévères, la méthode de tension de tenue maximale semble bien convenir pour évaluer les performances diélectriques des isolateurs recouverts de glace, tout en permettant de minimiser le nombre d'essai requis.

## 5.4 Conclusion

D'après les essais de contournement pour la détermination de la tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM recouverts de glace, on arrive aux conclusions suivantes:

- L'épaisseur de la glace, mesurée sur le cylindre témoin, est une fonction linéaire du temps.
- La tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , est plus élevée pour une épaisseur de 0,5 cm et diminue au fur et à mesure que l'épaisseur de glace augmente pour arriver une valeur plus basse correspondant à une épaisseur de 2,5 cm pour les isolateurs composites en EPDM. Par la suite, la valeur  $V_{TM}$  demeure constante même si on continue à augmenter l'épaisseur de glace. Donc, l'épaisseur de glace de 2,5 cm (mesurée sur le cylindre témoin) est une épaisseur critique pour les isolateurs composites en EPDM.
- La tension de tenue maximale exprimée par unité de longueur, kV/m, est plus basse pour les isolateurs standards IEEE que pour les isolateurs composites en EPDM pour les mêmes épaisseurs de glace. Cependant, l'écart-type favorable des isolateurs composites face aux isolateurs standards IEEE s'atténue avec l'accroissement de l'épaisseur,  $\epsilon$ , de glace, passant de 53% pour  $\epsilon = 0,5$  cm, à seulement 15% pour  $\epsilon = 3,0$  cm.
- Des traces d'érosion sont détectées sur les deux types d'isolateurs après chaque phénomène de contournement.

Suite aux essais de contournement pour déterminer la tension de tenue à 50 % des isolateurs standards IEEE recouverts de glace, on arrive aux conclusions suivantes:

- Dans les conditions testées, la tension de tenue à 50 %,  $V_{50\%}$ , est très proche de la tension minimale de contournement,  $V_{MF}$ , avec une marge d'erreur de 1 kV sous les mêmes conditions de givrage.
- La méthode de tenue à 50 % est plus précise que celle de tenue maximale. La différence entre ces deux méthodes est que la méthode de tenue à 50 % est une méthode statistique, donc, plus les échantillons sont nombreux (nombre d'essais), plus la probabilité d'obtenir des résultats (tension de tenue) précis est grande.
- La méthode de tenue à 50 % nécessite un plus grand nombre d'essais que celle de tenue maximale. Chaque essai requiert une journée complète, il faut donc environ 4 semaines pour accomplir 20 essais par la méthode de tenue à 50 %. Pour sa part, la méthode de tenue maximale nécessite un minimum de 5 essais, donc environ une semaine. D'un point de vue économique, il est préférable, pour sauver du temps, d'utiliser la méthode de tenue maximale plutôt que la méthode de tenue à 50 % dans la plupart des essais de contournement.

## CHAPITRE 6

### TENSION DE TENUE MAXIMALE EN RÉGIME DE FONTE

## CHAPITRE 6

### TENSION DE TENUE MAXIMALE EN RÉGIME DE FONTE

#### 6.1 Introduction

Afin de mieux connaître un plus large éventail de l'effet de la glace sur la tension de tenue des isolateurs électriques en fonction des conditions environnementales, on a poursuivi des essais de contournement en régime de fonte. Le régime de fonte consiste à performer les tests de contournement après une période d'échauffement, suivant la période d'accumulation.

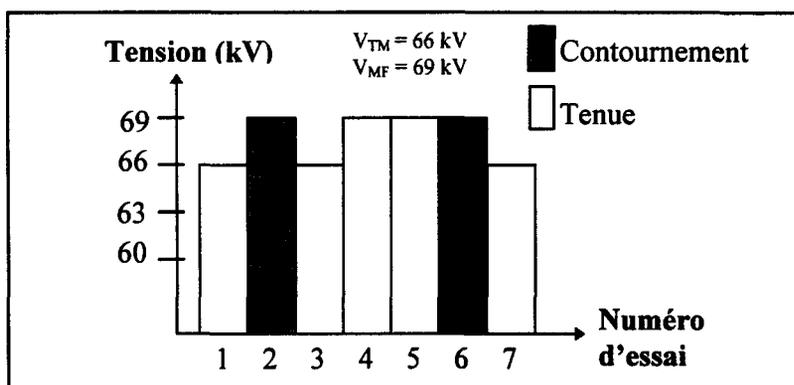
Dans la nature, les périodes d'accumulation et de fonte se produisent de façon aléatoire. Après l'accumulation de glace, une hausse de température peut entraîner la fonte de la glace et la formation d'un film d'eau à la surface de celle-ci. Dans la chambre climatique, la glace est accumulée sur les isolateurs par les procédures décrites précédemment. Ensuite, pour provoquer une fonte lente, une période d'échauffement de longue durée est nécessaire avant d'appliquer la tension d'essai. En ce qui concerne nos propres essais, l'augmentation moyenne de température se situait à 3 °C/heure. Une épaisseur de 1,5 cm de glace a été accumulée sur deux types d'isolateurs: l'isolateur

composite en EPDM et l'isolateur standard IEEE. Des échantillons d'eau, provenant de la fonte de glace, ont été récupérés durant les tests en régime de fonte lente dans le but d'observer l'évolution de la conductivité de la glace à la surface des isolateurs.

## 6.2 Tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM

Les résultats de mesure de la tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM sont présentés dans le tableau 6.1 et, sous forme de graphiques, par la figure 6.1.

<b>Tableau 6.1: Résultats de mesure de la tension de tenue maximale des isolateurs en EPDM; régime de fonte lente; épaisseur de glace de 1,5 cm.</b>					
No. d'essai	Tension de service $V_0$ (kV)	Tension d'essai $V$ (kV)	Résultats d'essai	Tension de tenue maximale	
				$V_{TM}$ (kV)	$V_{TM}/m$ (kV/m)
1	51	66	T	66	92,4
2	51	69	C		
3	51	66	T		
4	51	69	T		
5	51	69	T		
6	51	69	C		
7	51	66	T		



**Figure 6.1: Résultats de mesure de la tension de tenue maximale des isolateurs en EPDM; régime de fonte lente; épaisseur de glace de 1,5 cm.**

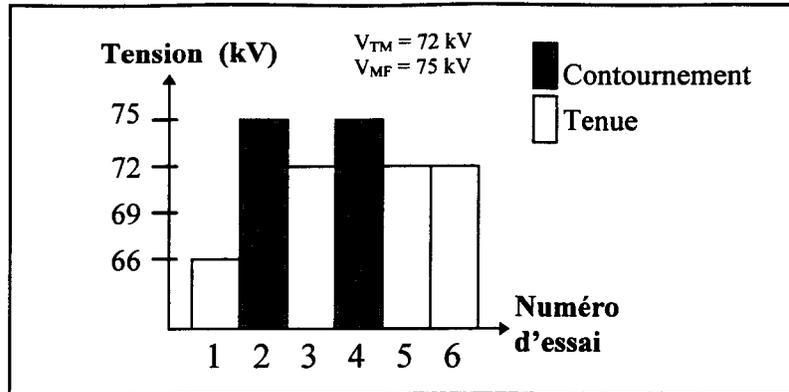
### 6.3 Tension de tenue maximale des isolateurs standards IEEE

Les résultats de tension de tenue maximale des isolateurs standards IEEE recouverts de glace en régime de fonte lente sont présentés dans le tableau 6.2.

<b>Tableau 6.2: Résultats de mesure de la tension de tenue maximale; 6 isolateurs IEEE; régime de fonte lente; épaisseur de glace de 1,5 cm.</b>					
No. d'essai	Tension de service $V_0$ (kV)	Tension d'essai $V$ (kV)	Résultats d'essai	Tension de tenue maximale	
				$V_{TM}$ (kV)	$V_{TM}/m$ (kV/m)
1	50	66	T	72	75,4
2	50	75	C		
3	50	72	T		
4	50	75	C		
5	50	72	T		
6	50	72	T		

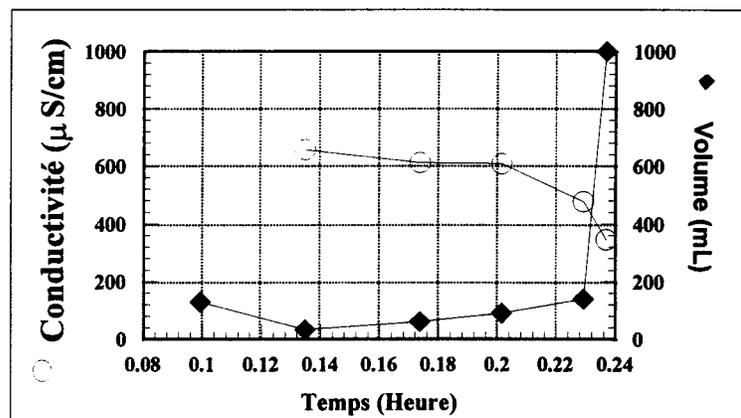
Le fait d'utiliser une tension de service de 50 kV au lieu de 60 kV (généralement utilisée pour les isolateurs IEEE) a diminué le risque de perdre la glace durant la période de fonte causé par les décharges importantes résultant de l'effet de 60 kV. Cette décision fut prise au début des tests de fonte d'après nos observations.

La présentation graphique des résultats de la tension de tenue maximale des isolateurs standards IEEE recouverts de glace en régime de fonte lente est illustrée à la figure 6.2.



**Figure 6.2: Résultats de mesure de la tension de tenue maximale des isolateurs IEEE; régime de fonte lente; l'épaisseur de glace est de 1,5 cm.**

La figure 6.3 présente le volume et la conductivité de l'eau de fonte récupérée durant l'essai en fonction du temps. On remarque qu'au fur et à mesure que le temps s'écoule, la quantité d'eau fondue augmente tandis que la conductivité diminue. Cela peut s'expliquer par le fait qu'avec le temps, la température ambiante augmente: la glace fond donc plus vite et un volume d'eau plus important est récupéré. La courbe de conductivité montre que l'eau possède une conductivité plus élevée à la surface de la glace et moins élevée à mesure que la glace fond.



**Figure 6.3: Variations du volume et de la conductivité de l'eau récupérée**

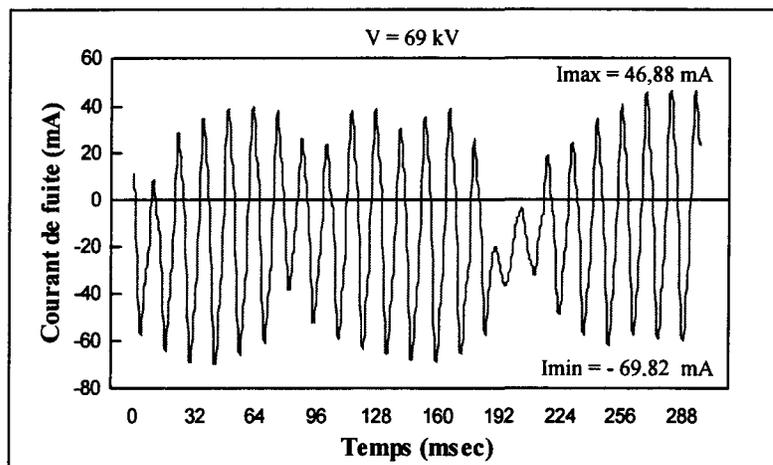
#### 6.4 Observations

À la fin de la période d'accumulation ( $\varepsilon = 1,5$  cm), les isolateurs se trouvent recouverts de glace. Des décharges relativement fortes créent des espaces d'air au bas ou au milieu de la chaîne d'isolateurs, selon le cas.

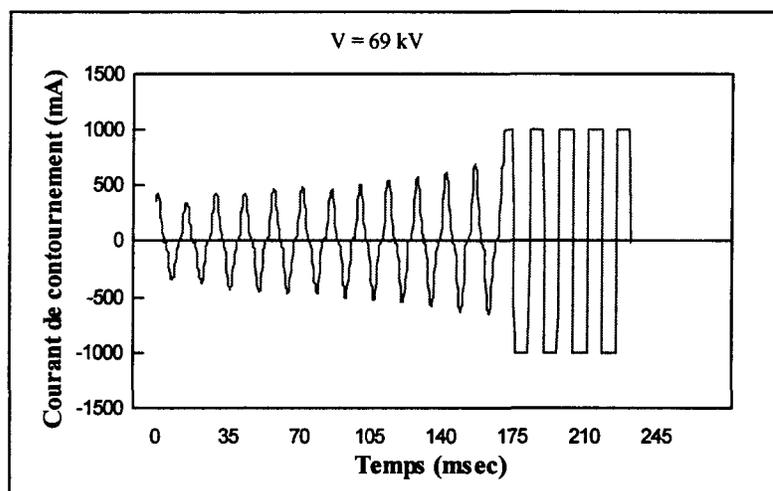
Durant les deux premières heures de la période de fonte, aucune activité de décharge majeure n'est observée. Pendant la troisième heure, la glace commence à fondre, un film d'eau apparaît à la surface de la glace et se met à couler. L'eau de fonte est recueillie pendant l'expérience. En même temps, des décharges se produisent et un courant de fuite relativement élevé est enregistré. À la quatrième heure, de fortes décharges provoquent la fonte rapide des glaçons. Par la suite, des morceaux de glace se détachent en laissant des espaces d'air à plusieurs endroits sur la chaîne d'isolateurs.

On a remarqué que si les décharges durent pendant toute la période de fonte sans faire tomber la glace, alors, à l'application de la tension d'essai, il y a une forte probabilité de contournement. Par contre, si les décharges étaient tellement fortes que presque la majorité de glace accumulée soit perdue (fondue ou tombée par terre), les activités de décharges fortes s'arrêtent avant que la température de fonte ne soit atteinte. Dans ce cas, il y a une forte probabilité de tenue et un très faible courant sera enregistré.

Les figures 6.4 et 6.5 illustrent les variations du courant de fuite enregistrées durant un test de contournement en régime de fonte lente pour les isolateurs composites en EPDM.

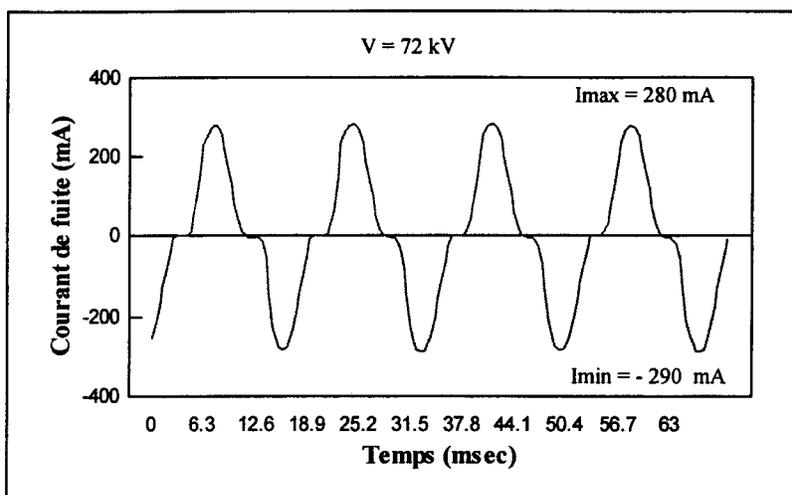


**Figure 6.4: Variation du courant enregistré durant un test menant à la tenue; régime de fonte lente; isolateur en EPDM.**

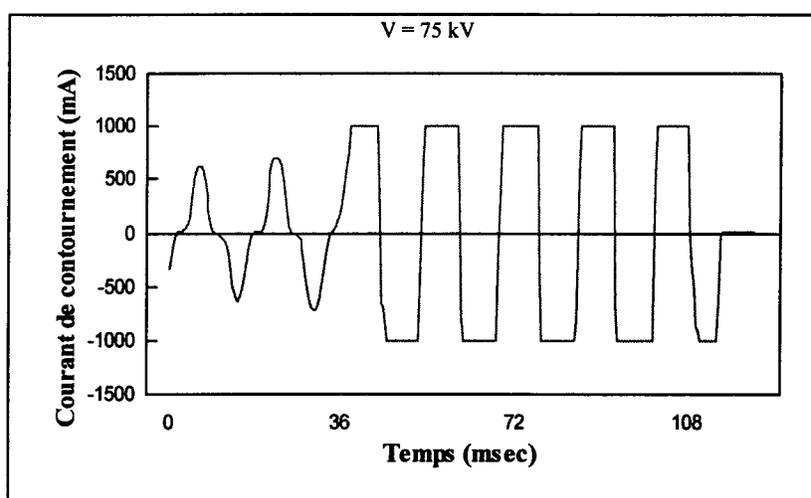


**Figure 6.5: Variation du courant enregistré durant un test menant au contournement; régime de fonte lente; isolateur en EPDM.**

Les figures 6.6 et 6.7 illustrent les variations du courant de fuite enregistrées durant un test de contournement en régime de fonte lente pour les isolateurs standards IEEE.



**Figure 6.6: Variation du courant enregistré durant un test menant à la tenue; régime de fonte lente; isolateur IEEE.**

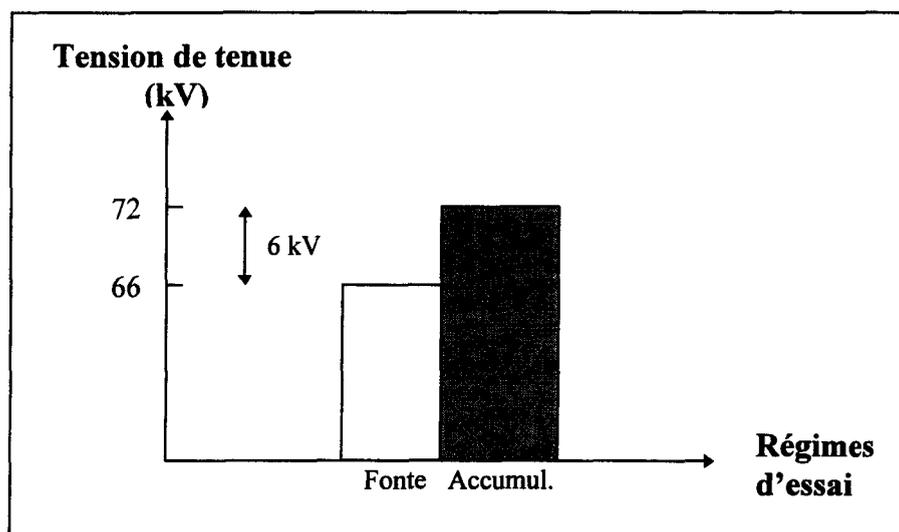


**Figure 6.7: Variation du courant enregistré durant un test menant au contournement; régime de fonte lente; isolateur IEEE.**

## 6.5 Conclusion

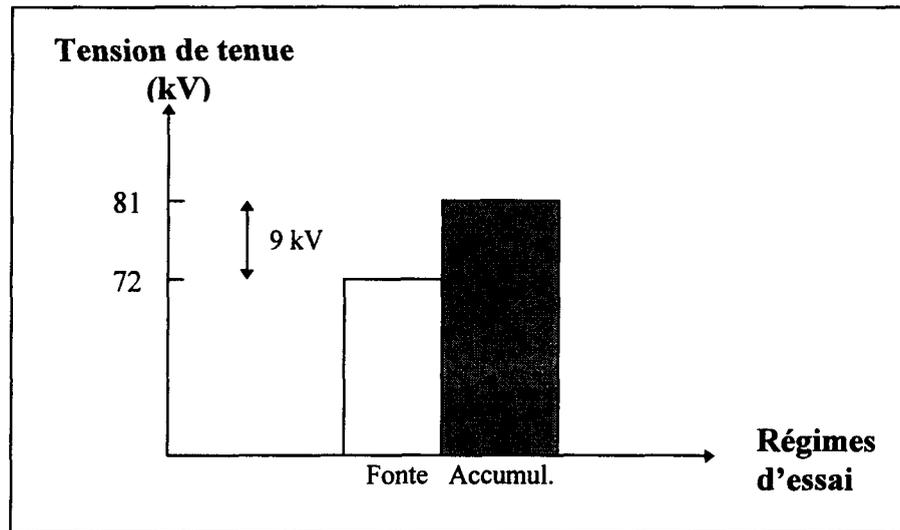
En comparant les valeurs de tension de tenue maximale obtenues pour les essais en régime de fonte lente avec celles obtenues en régime d'accumulation, pour une épaisseur de glace égale à 1,5 cm, on obtient les conclusions suivantes:

- Dans le cas de l'isolateur composite en EPDM, la tension de tenue maximale obtenue en régime de fonte lente (66 kV) est de l'ordre de 6 kV inférieure à celle obtenue en régime d'accumulation (72 kV) pour la même épaisseur de glace (figure 6.8).



**Figure 6.8: Comparaison des tensions de tenue maximale de l'isolateur en EPDM dans les deux régimes d'essai; épaisseur de glace de 1,5 cm.**

- Dans le cas de l'isolateur standard IEEE, la tension de tenue maximale obtenue en régime de fonte lente (72 kV) est de l'ordre de 9 kV inférieure à celle obtenue en régime d'accumulation (81 kV) pour la même épaisseur de glace (figure 6.9).



**Figure 6.9: Comparaison des tensions de tenue maximale de l'isolateur IEEE dans les deux régimes d'essai; épaisseur de glace de 1,5 cm.**

On peut donc conclure que le régime de fonte lente est plus dangereux que le régime d'accumulation en ce qui concerne la probabilité d'apparition d'un arc de contournement.

## CHAPITRE 7

### CONCLUSIONS GÉNÉRALES

## CHAPITRE 7

### CONCLUSIONS GÉNÉRALES

L'objectif principal de cette étude était de déterminer la tension de tenue des isolateurs composites et standards recouverts de glace. Deux méthodes ont été utilisées à cette fin: la méthode de mesure de tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , et la méthode de mesure de tension de tenue à 50 %,  $V_{50\%}$ . Deux régimes fondamentaux ont été utilisés pour la détermination de la tension de tenue des isolateurs recouverts de glace: le régime d'accumulation et le régime de fonte lente. Durant le régime d'accumulation, l'effet de l'épaisseur du dépôt de glace a été étudié en profondeur. À ce propos, cinq épaisseurs de glace ont été accumulées sur les isolateurs, allant de 0,5 cm à 3 cm. La tension de tenue a été mesurée par la méthode de tension de tenue maximale. La tension de tenue à 50 % servait pour évaluer la variation statistique associée à la détermination de la tension de tenue maximale. Durant le régime de fonte lente, une seule épaisseur de glace, de 1,5 cm, a été accumulée sur les isolateurs. Seule la méthode de mesure de tension de tenue maximale a été utilisée.

Le taux d'accroissement du dépôt de glace est une fonction linéaire du temps. Les conditions expérimentales qui ont été utilisées pour la formation et l'accumulation de la glace sur les isolateurs, en régime humide, peuvent se résumer comme suit: température ambiante de  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , vitesse du vent de  $3,3\text{ m/s}$ , teneur en eau de  $6,8\text{ g/m}^3$ , grosseur de gouttelette d'eau de  $80\text{ }\mu\text{m}$ , conductivité de l'eau de  $80\text{ }\mu\text{S/cm}$ , pression d'air de  $7\text{ psi}$ , pression d'eau de  $18\text{ psi}$  et débit d'eau de  $0,395\text{ l/min}$ . Dans ces conditions, l'accumulation de glace sur l'isolateur augmente en moyenne de  $1\text{ cm/heure}$ .

D'après les expériences effectuées dans le cadre de ce mémoire, on peut tirer les conclusions suivantes:

- La présence, à la surface de la glace, d'un film d'eau possédant une conductivité très élevée, contribue à la diminution de la résistance de la glace et à l'augmentation du courant de fuite. Cette conductivité est attribuable aux impuretés qui sont injectées à la surface de l'isolateur. Le film d'eau peut être produit dans la nature par l'augmentation de la température ambiante (rayonnement solaire) ou encore par les décharges couronnes sur les aspérités de glace. La conductivité du film d'eau représente 10 fois la conductivité de l'eau à partir de laquelle la glace a été formée [5; 61]. Le courant de fuite, de plus en plus fort, accélère la fonte de la glace et les décharges couronnes augmentent jusqu'à l'apparition des arcs locaux. Dès qu'un certain seuil de champ électrique est dépassé, les arcs locaux se joignent pour former l'arc de contournement.

- Dans le cas des isolateurs recouverts de glace, la méthode de mesure de tension de tenue à 50 % entraîne des résultats qui se rapprochent de ceux obtenus par la méthode de mesure de tension minimale de contournement. La méthode de tenue à 50 % nécessite un grand nombre d'essais et donc, exige plus de temps, comparativement à la méthode de tension de tenue maximale. En régime d'accumulation, la tension de tenue à 50 % de 6 isolateurs standards IEEE recouverts de 2 cm de glace, mesurée sur le cylindre témoin, est de 74 kV avec un écart-type de 2,5 kV. La tension minimale de contournement pour le même type d'isolateur dans les mêmes conditions est de 75 kV et la tension de tenue maximale est de 72 kV.
- En régime d'accumulation, la tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM en fonction de l'épaisseur de la glace, diminue au fur et à mesure que l'épaisseur de la glace augmente. Atteignant une épaisseur de 2,5 cm, la tension de tenue maximale demeure constante, même si l'épaisseur continue d'augmenter. Cette tension est supérieure à 120 kV pour une épaisseur de glace de 0,5 cm et diminue jusqu'à 57 kV pour une épaisseur de 2,5 cm ou plus.
- Le régime de fonte peut être considéré plus dangereux que le régime d'accumulation. En effet, pour les isolateurs composites en EPDM, la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , obtenue en régime de fonte lente (66 kV) est de 6 kV inférieure à celle obtenue en

régime d'accumulation (72 kV) pour une épaisseur de 1,5 cm de glace mesurée sur le cylindre témoin. Quant aux isolateurs standards IEEE, la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , obtenue en régime de fonte lente (72 kV), est de 9 kV inférieure à celle obtenue en régime d'accumulation (81 kV) pour la même épaisseur de glace.

- En général, la tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM est supérieure à celle des isolateurs standards IEEE pour les mêmes épaisseurs de glace. Ceci est dû au fait que l'isolateur en EPDM est plus performant, sous la glace, que les isolateurs standards IEEE en raison, entre autres, de leur forme géométrique et leur matériau de fabrication. Cependant, l'écart-type favorable des isolateurs composites comparé à celui des isolateurs standards IEEE s'atténue avec l'accroissement de l'épaisseur de glace, passant de 53 % pour une épaisseur de glace de 0,5 cm, à seulement 15 % pour une épaisseur de glace de 3,0 cm.

## RÉFÉRENCES

1. J. F. Drapeau, «Impact du verglas et de la neige sur le réseau de transport d'Hydro-Québec. Analyse de la tempête du 3-4 mars 1991 dans les régions Maisonneuve et Richelieu», Rapport scientifique, Hydro-Québec, No. IREQ-91-166, p. 1-32, décembre 1991.
2. A. E. Boyer et J. R. Meale, «Insulation Flashover under Icing Conditions on the Ontario-Hydro 500 kV Transmission Line System», CEA Spring Meeting, Montréal, Canada, 20 p., mars 1988.
3. J. F. Drapeau, «État de l'art concernant les essais et le comportement sous glace des isolateurs», Rapport scientifique, Hydro-Québec, No. IREQ-4490, p. 1-46, novembre 1989.
4. M. Farzaneh et J. F. Drapeau, «AC Flashover Performance of Insulators Covered with Artificial Ice», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, p. 1038 - 1051, avril 1995.
5. M. Farzaneh et O. T. Melo, «Properties and Effect of Freezing Rain and Winter Fog on Outline Insulators», Cold Region Science and Technology, Vol. 19, p. 33-46, 1990.
6. M. Farzaneh et J. Kiernicki, «Flashover Problems Caused by Ice Build-up on Insulators», IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 2, p. 5-17, mars/avril 1995.

7. R. A. Gorski, «Meteorological Summary - March 10. 1986 - Multiple Outages on the Southern Ontario (Central Region) 500 kV System», Ontario-Hydro, Met. Report No. 80604-1, p. 1-40, 1986.
8. W. A. Chislom et J. Kuffel, «Performance Of Insulation Coating Under Contamination and Icing Conditions», Canadian Electrical Association, Electricity'95 Conference, Transmission section, Vancouver, Canada, mars 1995.
9. O. T. Melo, Y. T. Tam et M. Farzaneh, «Freezing Rain And Fog Events In Southern Ontario: Properties And Effect On EHV Transmission Systems», Proceedings of 4<sup>th</sup> International Workshop On Atmospheric Icing Of Structures, Paris, France, p. 70-75, septembre 1988.
10. M. Kawai, «AC Flashover Test at Project UHV on Ice-Coated Insulators», IEEE Transactions on Power Aparatus & Systems, Vol. PAS-89, No. 8, p. 1800-1804, novembre/décembre 1970.
11. M. D. Charneski, G. L. Gaibrois et B. F. Whitney, «Flashover Tests on Artificially Iced Insulators», IEEE Transactions Power Aparatus & Systems, Vol. PAS-101, No 8, p. 2429-2433, août 1982.
12. M. M. Khalifa et R. M. Morris, «Performance of Line Insulators Under Rime Ice», IEEE Transactions on Power Aparatus. & Systems, Vol. PAS-86, No. 6, p. 692-698, juin 1968.
13. J. S. Forrest, «The Performance of High Voltage Insulators in Polluted Atmospheres», Conference Paper IEEE Winter Meeting, New York, 1969.

14. H. Matsuda, H. Komuro et K. Takasu, «Wisthstand Voltage Characteristics of Insulator String Covered with Snow or Ice», IEEE Transaction on Power Delivery, vol.6, p. 1243-1250, juillet 1991.
15. S. M. Fikke, «Possible Effects of Contaminated Ice on Insulator Strength», Proceeding of the 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Tokyo, Japon, Paper B4-2, p. 1-4, septembre 1990.
16. A. Meier et W. M. Niggli, «The Influence of Snow and Ice Deposits on Supertension Transmission Line Insulator Strings with Special Reference to s Septembre 1968.
17. L. Shu, C. Sun, J. Zhang et L. Gu, «AC Flashover Performance on Iced and Polluted Insulators for High Altitude Regions», Proceedings of 7<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Dresden, Allemagne, Vol. 4, Paper 43.13, p. 303-306, août 1991.
18. L. C. Phan et H. Matsuo, «Minimum Flashover Voltage of Iced Insulators», IEEE Transactions on Electrical Insulation, EI-18-6, p. 605- 618, 1983.
19. E. A. Cherney, «Flashover Performance of Artificially Contaminated and Iced Long-Rod Transmission Line Insulators», IEEE Transactions on Power Aparatus & Systems, Vol. PAS-99, p. 46-52, février 1980.
20. H. M. Schneider, «Artificial Ice Tests on Transmission Line Insulators - A Progress Report», IEEE/PES Summer Meeting, San Francisco, USA, Paper A75-491-1, p. 347-353, juillet 1975.

21. F. Su et Y. Jia, «Icing on Insulator String of HV Transmission Lines and The Harmfulness», Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, p. 655-662, Singapour, juin 1993.
- ✓ 22. K. Kannus et V. Verkkonen, «Effect of Ice Coating on the Dielectric Strength on HighVoltage Insulators», Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Workshop on the Atmospheric Icing of Structures, Paris, France, p. 296-300, 1993.
- ✓ 23. K. Kannus, K. Verkkonen et E. Lakervi, «Effects of Ice Coating on Dielectric Strength on Highh Voltage Insulators», Proceeding of the 4<sup>th</sup> International Workshop on the Atmospheric Icing of Structures, Paris, France, p. 296-300, 1993.
24. P. E. Renner, H.L. Hill et O. Ratz, «Effects of Icing on DC Insulation Strenght», IEEE Transactions on Power Aparatus & Systems, Vol. PAS-90, p. 1201-1206, juin 1971.
25. M. Sato, H. Saito, K. Kaga et H. Akagami, «Fundamental Characteristics of AC Flashover on Contaminated Insulators Covered with Ice», Japanese Journal of Aplied Physics, Vol. 28, No. 5, p. 889-896, mai 1989.
26. H. T. Bui, L.C. Phan, C. Huraux et J. Pissolato, «HVDC Flashover on the Surface of Conductive Ice», IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 84CH1984-6, Montréal, p. 85-88, juin 1984.
27. T. Fujimura, K. Naito, Y. Hasegawa et K. Kawagushi, «Performance of Insulators Covered with Snow or Ice», IEEE Transactions on Power Aparatus & Systems, Vol. PAS-98, p 1621-1631, octobre 1979.

28. M. Farzaneh, J. Kiernicki, R. Chaarani, J. F. Drapeau et R. Martin. «Influence of Wet-Grown Ice on the AC Flashover Performance of Ice-Covered Insulators», 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, Austria, Paper No. 3176, p. 4, août / septembre 1995.
29. J. Zhang, C. Sun, L. Gu et C. Liang, «D.C. Flashover Performance of Iced Insulators», 6<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, USA, Paper 47.26, p. 1-4, août / septembre 1989.
30. J. F. Drapeau, «Statistiques préliminaires concernant les défauts associés aux conditions hivernales sur le réseau d'Hydro-Québec», Rapport interne Hydro-Québec, No. IREQ-4499, p. 1-25, décembre 1989.
31. M. Farzaneh, J. Kiernicki et J. F. Drapeau, «Ice Accretion on Energized Line Insulators», International Journal of Offshore and Polar Engineering. Vol. 2, No. 3, p. 228-233, septembre 1992.
32. M. Farzaneh et J.L. Laforte, «Effect of Voltage Polarity on Ice Accretion on Short String Insulators», Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 113, p. 179-184, mai 1991.
33. M. Farzaneh et J. L. Laforte, «Ice Accretion on Conductors Energized by AC or DC : A Laboratory Investigation of Ice Treeing», Proceedings of the Third International Offshore and Polar Engineering Conference, Singapour, p. 663-671, 6-11 juin 1993.
34. D. Kuroiwa, «Icing and Snow Accretion», Monograph Series of Research, Institute of Applied Electricity, Japon, p. 1-30, 1958.

35. D. Kuroiwa, « Icing and Snow Accretion on Electric Wires», US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Research Report 123, p. 1-10, 1965.
36. Imai et Ichiro, «Studies on Ice Accretion», Researches on Snow and Ice, No. 1, p. 35-44, 1953.
37. H. Oguchi *et al.* «Icing on Electric Wires», Research on Snow and Ice, No. 1, p. 45-49, 1953.
38. S. Godard, «Mesure des gouttelettes de nuage avec un film de Collargol», Bulletin de l'Observatoire du Puy de Dôme, No 2, p. 41-46, 1960.
39. J. R. Stallabrass, «An Apraisal of the Single Rotating Cylinder Method of Liquid Water Measurement», National Research Council Canada, Report LTR-LT-92, p.1-36, 1978.
40. O. T. Melo, Y. T. Tam et M. Farzaneh, «Freezing Rain and Fog Events in Southern Ontario: Properties and Effect on EHV Transmission Systems», Proceedings of 4<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Paris, France, p. 70-75, septembre 1988.
41. M. Farzaneh, «Ingénierie de la Haute Tension», note de cours 6MIG915, UQAC 1994.
42. F. Obenaus, «Contamination Flashover And Greepage Path Lenth», Deutsche Elektrotechnik, vol. 4, p. 135-136, 1958.
43. M. Farzaneh, J. Zhang et X.Chen, «Modeling Of The AC Arc Discharge On Ice Surfaces», IEEE Winter Meeting, Baltimore, 1996.

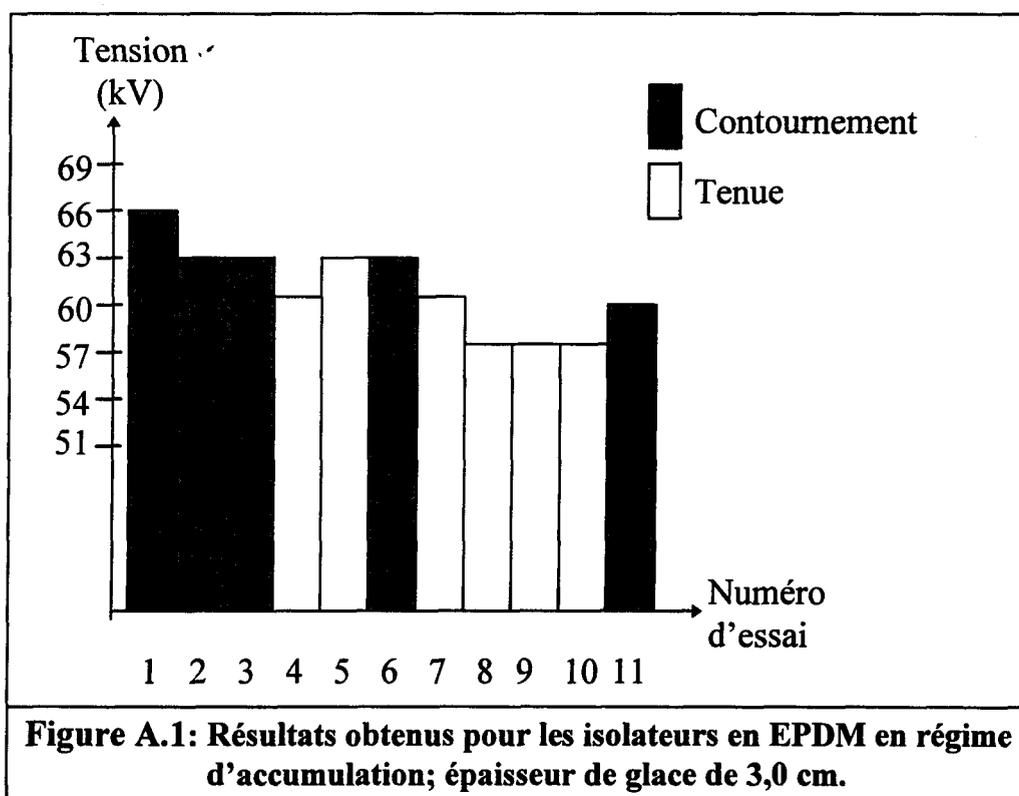
44. Le Roy et Cie, «Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions», ouvrage réalisé sous la direction de Claude Gray, Paris 1984.
45. Commission Électrotechnique Internationale, «Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés aux réseaux à courant alternatif», Norme internationale CEI 507, avril 1991.
46. M. Sato, H. Saito, K. Kaga et H. Akagami, «Fundamental Characteristics of AC Flashover on Contaminated Insulator covered with Ice», Japanese Journal of Applied Physics, vol.28, no.5, p.889-896, mai 1989.
47. M. Farzaneh, J. Kiernicki et R. Martin, «A Laboratory Investigation of Flashover Performance of Outdoor Insulators Covered with Ice», Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Brisbane, Australie, p. 483-486, juillet 1994.
48. Y. Watanabe, «Flashover Tests of Insulators Covered with Ice or Snow», IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-97, No. 5, p. 1788-1794, septembre 1978.
49. N. Sugawara, K. Hokari, H. Ando, K. Yoshida, M. Hirota et Y. Yatokara, «Insulation Properties of Atmospheric Iced Insulators Installed in High Mountains», Proceedings of the 6<sup>th</sup> International workshop on Atmospheric Icing of Structures, Budapest, Hungary, p. 237-242, septembre 1993.

50. T. Iwama, Y. Sumiya, R. Matsuoka, S. Ito et K. Sakanishi, «Investigation of AC Insulation Performance of Tension Insulator Assembly Covered with snow», B4-7(1), Iwais 1990.
51. S. M. Fikke, J. E. Hanssen et L. Rolfseng, «Long Range Transported Pollution and Conductivity on Atmospheric Ice on Insulators», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, p. 1311-1321, juillet 1993.
52. M. Hara et C. L. Phan, «Leakage Current and Flashover Performance of Iced Insulators», IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-98, No. 3, p. 849-859, mai / juin 1979.
53. M. Farzaneh et J. Kiernicki, «Détermination de la tension de contournement d'une colonne isolante recouverte de glace en fonction de la conductivité de l'eau», Rapport de l'UQAC présenté à Hydro-Québec (IREQ), p. 1-10, janvier 1993.
54. Z. Vuckovic et Z. Zdravkovic, «Effect of Polluted Snow and Ice Accretion on High-Voltage Transmission Line Insulators», 5<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures Tokyo, Paper B4-3, p. 1- 6, octobre / novembre 1990.
55. M. Farzaneh et J. Kiernicki, «Effet de la répartition de glace sur la tension de tenue maximale des isolateurs recouverts de glace humide», Rapport de l'UQAC présenté à Hydro-Québec (IREQ), p. 1-34, octobre 1994.
56. M. Farzaneh, «Effect Of Ice Thickness And Voltage Polarity On The Flashover Voltage On Ice Covered High Voltage Insulators», Proceeding of 7<sup>th</sup> International Sumposium On HV Engineering, Dresden, Allemagne, Paper 43.10, août 1991.

57. M. Farzaneh, J. Kiernicki et M. A. Dallaire, «AC And DC Flashover Performance Of Ice-Covered Insulators During A De-Icing Period», 5<sup>th</sup> International Workshop On Atmospheric Icing Of Structures, Tokyo, Japon, paper no B-48, 1990.
58. H. T. Bui, «Contribution à l'étude du mécanisme de développement de la décharge électrique en arc de contournement sur la surface de la glace conductrice», mémoire de maîtrise, UQAC 1984.
59. J. Zhang, M. Farzaneh et X. Chen, «Characteristics Of Local Arc On Ice Surfaces», 9th ISH Austria, p. 3177, 1995.
60. M. Farzaneh et J. Kiernicki, «Choix de l'appareillage de base pour une chambre climatique et détermination des paramètres d'essais», Rapport de l'UQAC présenté à Hydro-Québec (IREQ), , p. 1-157, juillet 1991.
61. M. Farzaneh et O. T. Melo, «Flashover Performance of Insulators in the Presence of Short Icicles», International Journal of Offshore and Polar Engineering, mars 1994.
62. M. Chafiq, «Comportement électrique des isolateurs standards IEEE recouverts de glace», mémoire de Maîtrise, février 1996.

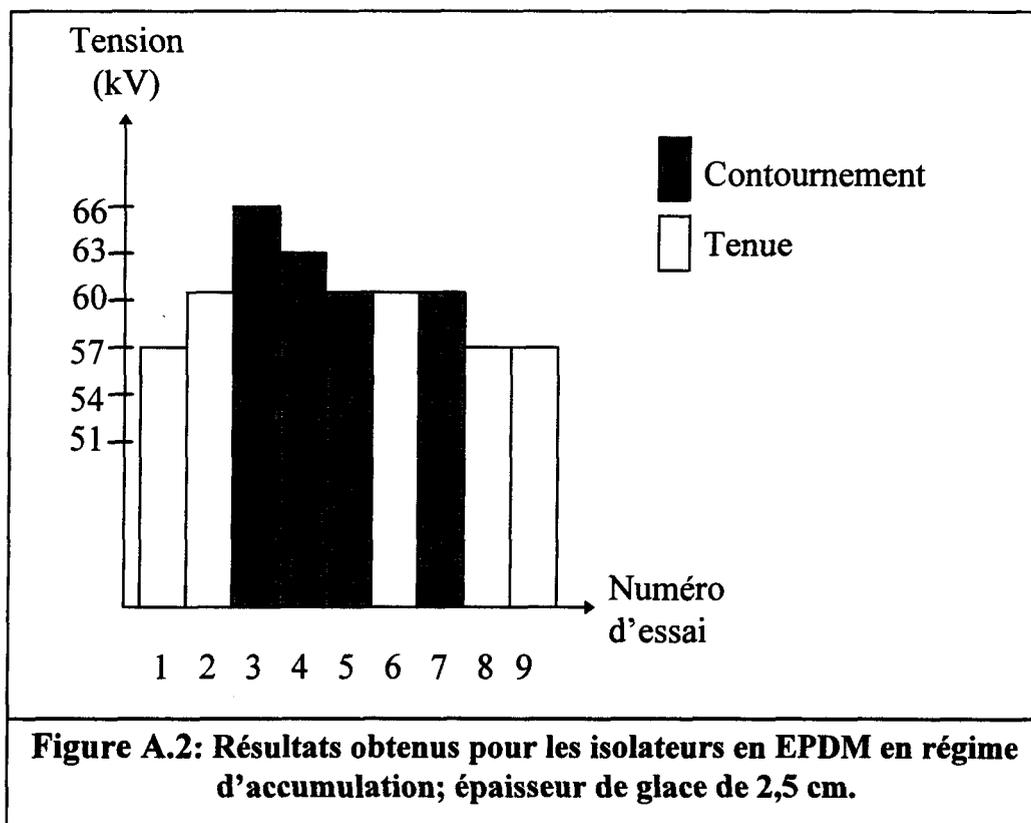
## ANNEXES

No. d'essai	V <sub>0</sub> (kV)	V (kV)	Résultats d'essais	I <sub>T</sub> (+) / I <sub>T</sub> (-) (mA)	E <sub>max</sub> (kJ)	V <sub>TM</sub> (kV)
1	51	66	C	—	—	57
2	51	63	C	—	—	
3	51	63	C	—	—	
4	51	60	T	448 / - 467	587	
5	51	63	T	385 / - 387	496	
6	51	63	C	—	—	
7	51	60	C	—	—	
8	51	57	T	468 / - 465	562	
9	51	57	T	361 / - 364	608	
10	51	57	T	415 / - 418	570	
11	51	60	C	—	—	



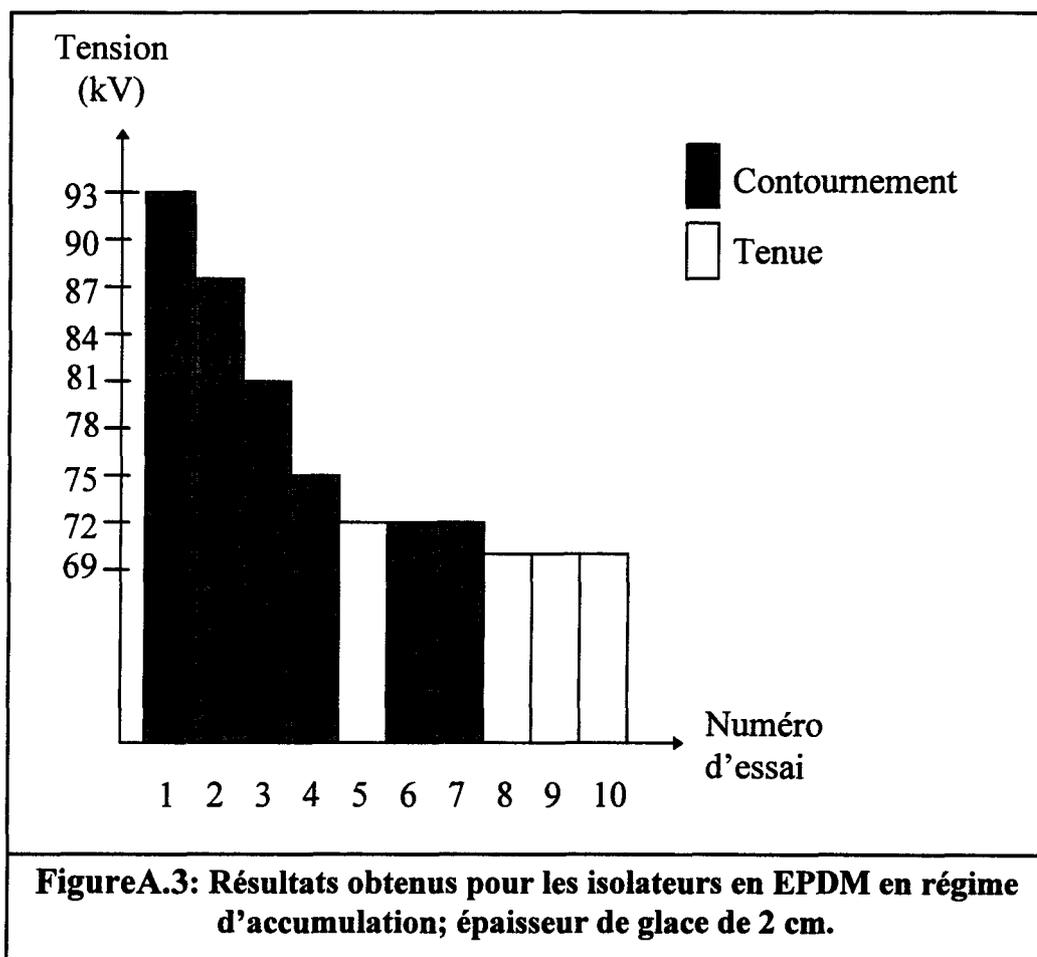
**Tableau A.2: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 2,5 cm.**

No. d'essai	V <sub>0</sub> (kV)	V (kV)	Résultats d'essais	I <sub>T</sub> (+) / I <sub>T</sub> (-) (mA)	E <sub>max</sub> (kJ)	V <sub>TM</sub> (kV)
1	51	57	T	415 / - 418	352	57
2	51	60	T	897 / -886	496	
3	51	66	C	—	—	
4	51	63	C	—	—	
5	51	60	C	—	—	
6	51	60	T	371 / - 371	275	
7	51	60	C	—	—	
8	51	57	T	631 / - 648	425	
9	51	57	T	334 / - 335	—	

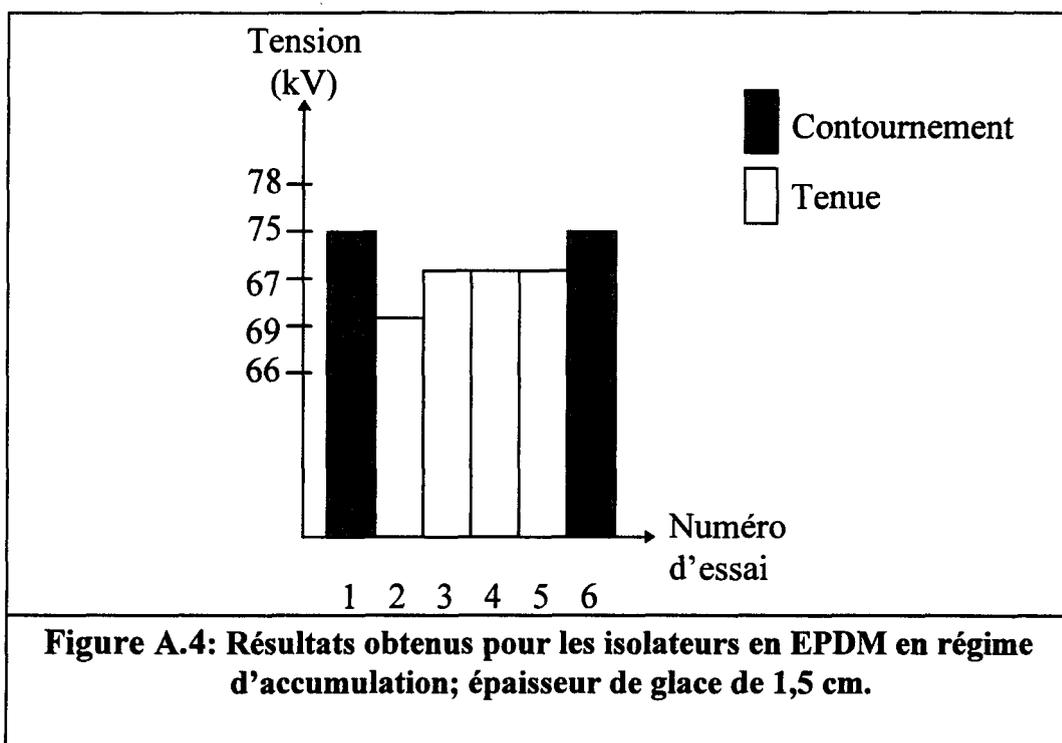


**Tableau A.3: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 2 cm.**

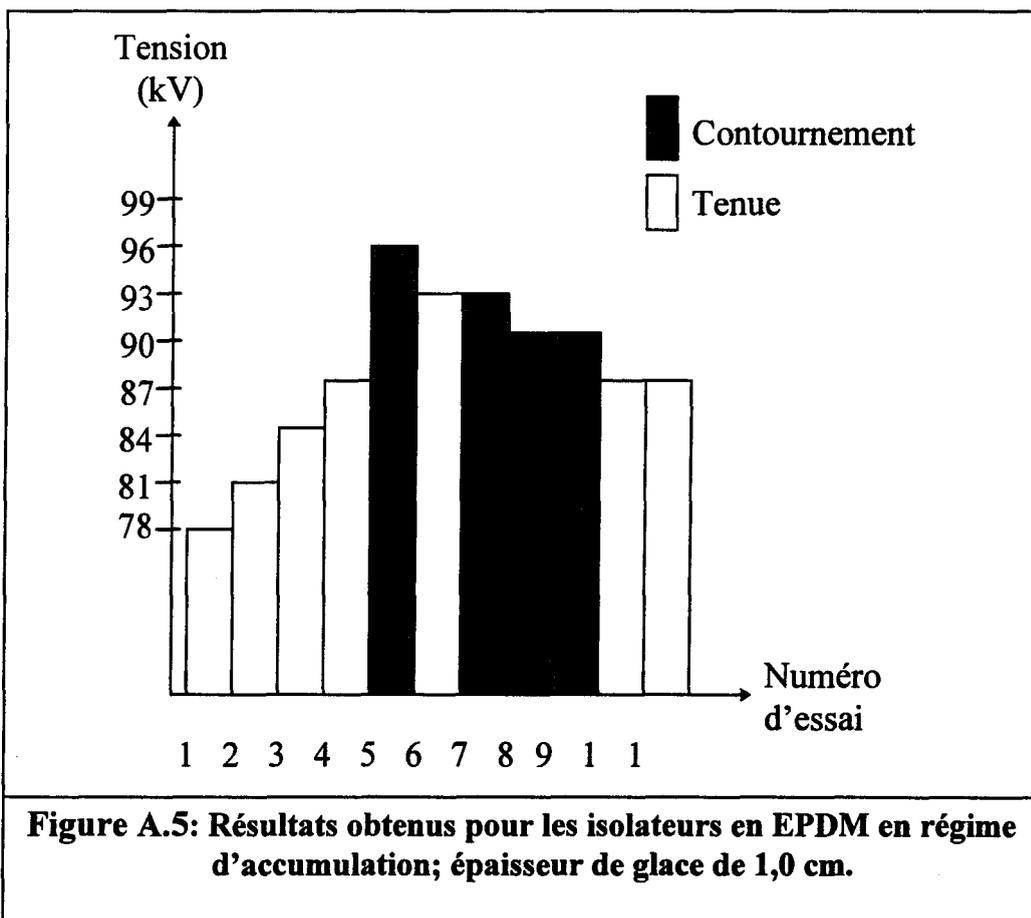
No. d'essai	V <sub>0</sub> (kV)	V (kV)	Résultats d'essais	I <sub>T</sub> (+) / I <sub>T</sub> (-) (mA)	E <sub>max</sub> (kJ)	T (kV)
1	51	93	C	—	—	69
2	51	87	C	—	—	
3	51	81	C	—	—	
4	51	75	C	—	—	
5	51	72	T	506 / - 507	—	
6	51	72	C	—	—	
7	51	72	C	—	—	
8	51	69	T	740 / - 750	—	
9	51	69	T	436 / - 436	—	
10	51	69	T	255	—	



<b>Tableau A.4: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 1,5 cm.</b>						
No. d'essai	V <sub>0</sub> (kV)	V (kV)	Résultats d'essais	I <sub>T</sub> (+) / I <sub>T</sub> (-) (mA)	E <sub>max</sub> (kJ)	V <sub>TM</sub> (kV)
1	51	75	C	—	—	72
2	51	69	T	91 / - 92	142	
3	51	72	T	157 / - 164	182	
4	51	72	T	101 / - 101	150	
5	51	72	T	69 / - 64	142	
6	51	75	C	—	—	

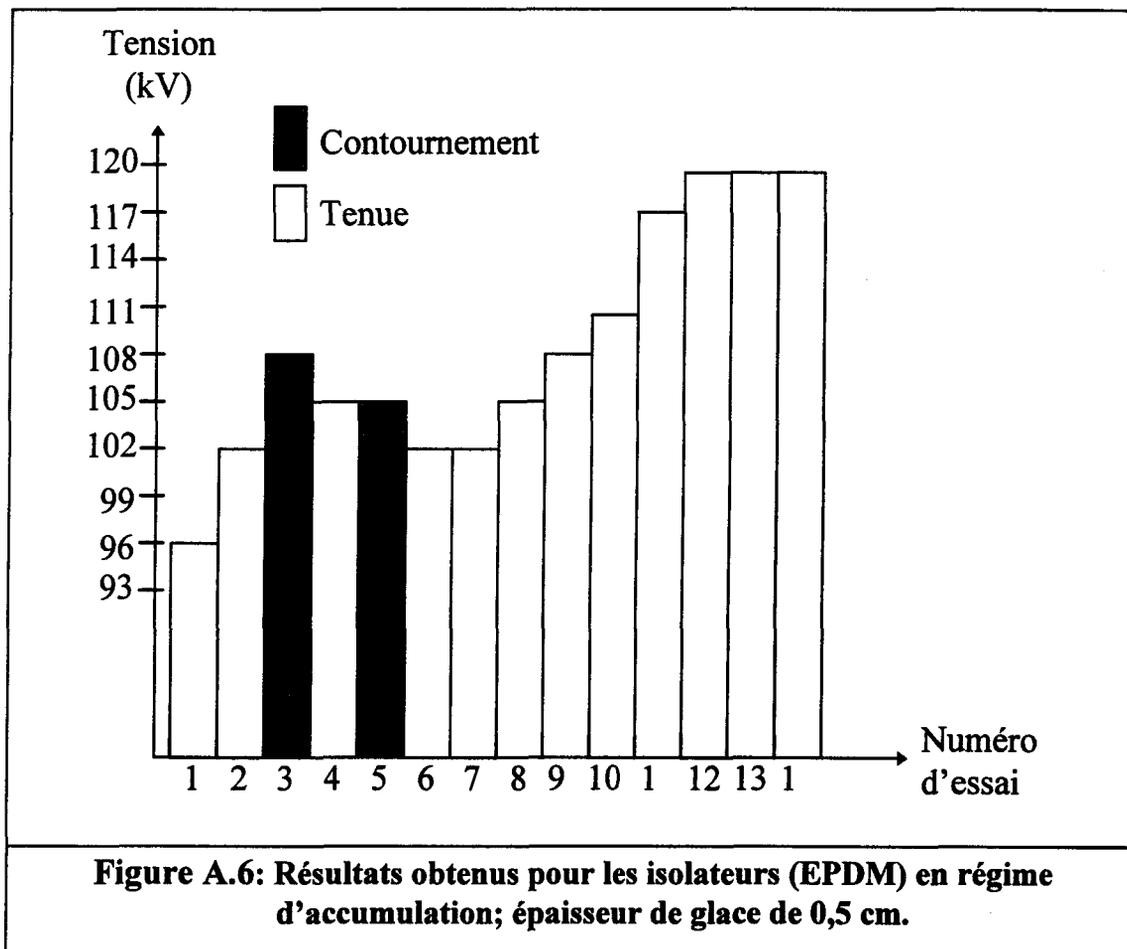


<b>Tableau A.5: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 1,0 cm.</b>						
No. d'essai	V <sub>0</sub> (kV)	V (kV)	Résultats d'essai	I <sub>T</sub> (+) / I <sub>T</sub> (-) (mA)	E <sub>max</sub> (kJ)	V <sub>TM</sub> (kV)
1	51	78	T	131 / - 48	60	87
2	51	81	T	129 / - 131	160	
3	51	84	T	109 / - 110	132	
4	51	87	T	120 / - 121	143	
5	51	96	C	—	—	
6	51	93	C	—	—	
7	51	93	C	—	—	
8	51	90	C	—	—	
9	51	90	C	—	—	
10	51	87	T	142 / - 144	142	
11	51	87	T	123 / - 117	105	



**Figure A.5: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 1,0 cm.**

<b>Tableau A.6: Résultats obtenus pour les isolateurs en EPDM en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 0,5 cm.</b>						
No. d'essai	V <sub>0</sub> (kV)	V (kV)	Résultats d'essais	I <sub>T</sub> (+) / I <sub>T</sub> (-) (mA)	E <sub>max</sub> (kJ)	T (kV)
1	51	96	T	312 / - 356	NC	> 120
2	51	102	T	23 / - 26	17	
3	51	108	C	—	—	
4	51	105	T	24 / - 27	47	
5	51	105	C	—	—	
6	51	102	T	38 / - 42	5	
7	51	102	T	18 / - 21	31	
8	51	105	T	49,3 / - 53	35	
9	51	108	T	43 / - 48	47	
10	51	111	T	NC	NC	
11	51	117	T	35 / - 38	24	
12	51	120	T	33 / - 37	33	
13	51	120	T	7 / - 12	4	
14	51	120	T	62 / - 66	34	



**Figure A.6: Résultats obtenus pour les isolateurs (EPDM) en régime d'accumulation; épaisseur de glace de 0,5 cm.**