

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À :**

**L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC COMME  
EXIGENCE PARTIELLE POUR  
L'OBTENTION DU GRADE DE  
MAÎTRISE EN SCIENCES  
APPLIQUÉES**

**(INGÉNIERIE)**

**PAR  
MOURAD CHAFIQ, ING.**

**COMPORTEMENT ÉLECTRIQUE DES ISOLATEURS  
STANDARDS IEEE RECOUVERTS DE GLACE**

**NOVEMBRE 1995**



### 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

Les lignes de transport et de distribution d'énergie électrique peuvent être exposées, durant la saison hivernale, à l'accumulation de glace. La présence de glace entraîne la dégradation des propriétés électriques de l'isolation des lignes et favorise l'apparition de l'arc de contournement.

Les conséquences néfastes de l'accumulation de glace sur les isolateurs des lignes et des postes ont attiré l'attention des chercheurs.

Les études entamées dans ce domaine consistent à déterminer la tension minimale de contournement,  $V_{MF}$ , des isolateurs en porcelaine, en verre trempé, ou en matière synthétique recouverts de glace, soumis à la tension alternative ou continue dans les régimes d'accumulation et de fonte.

Les études avancées dans le domaine du givrage des isolateurs se continuent actuellement dans le laboratoire des hautes tensions du Groupe de Recherche en Ingénierie de l'Environnement Atmosphérique (GRIEA) à l'UQAC et dans quelques autres laboratoires. Le but principal des études à l'UQAC consiste à établir une méthode standardisée de mesure de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , des isolateurs recouverts de glace en fonction de plusieurs facteurs ayant trait au givrage et à la contamination. Cette

méthode permettra de faire une conception adéquate des isolateurs destinés aux réseaux électriques dans les régions froides.

Le projet actuel entrepris dans le cadre du programme du GRIEA consiste en particulier à la détermination de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , des isolateurs en porcelaine de type standard IEEE en fonction des paramètres suivants:

- 1) le nombre d'isolateurs (pour deux types de glace: givre léger et verglas);
- 2) l'épaisseur de la glace (pour un type de glace: verglas);
- 3) la conductivité de l'eau (pour un type de glace: verglas).

Les résultats des essais concernant les variations de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , ont démontré que les valeurs de  $V_{TM}$ , exprimées en kV en fonction du nombre d'isolateurs en présence du givre léger, sont plus élevées qu'en présence du verglas. Le verglas est donc plus dangereux du point de vue de la possibilité de l'amorçage de l'arc de contournement.

Les résultats des essais concernant les variations de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , exprimées en kV par mètre de distance d'arc, en fonction de l'épaisseur de glace,  $\epsilon$ , ont démontré que la valeur de  $V_{TM}/m$  diminue avec la croissance de l'épaisseur: elle passe de 110 kV/m pour une épaisseur de 0,5 cm à 69,1 kV/m pour une épaisseur de

2,5 cm, soit une diminution d'environ 37 %. À partir de 2,5 cm, la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , reste constante malgré la croissance de l'épaisseur du dépôt de glace.

Les résultats des essais relatifs à la détermination de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , en fonction de la conductivité de l'eau ont démontré qu'une valeur élevée de la conductivité provoque une diminution sensible de la valeur de la  $V_{TM}$ . Les essais effectués ont démontré que la croissance de la conductivité de l'eau de 4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a entraîné une diminution de la tension de tenue maximale de 137,2 kV/m à 69,1 kV/m, soit environ deux fois.

La dernière partie de l'étude présentée dans ce mémoire concerne la comparaison entre les performances électriques des isolateurs recouverts de glace et celles des isolateurs pollués. Cette comparaison permet d'établir une certaine correspondance entre la sévérité de glace et celle de la pollution et de comparer l'épaisseur de glace accumulée, avec un taux de pollution sèche. Par exemple, la valeur de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , mesurée pour 6 isolateurs standards IEEE recouverts de verglas d'une épaisseur de 2,5 cm correspond à celle obtenue au cours d'essais sous brouillard propre avec un taux de pollution égal à 0,153  $\text{mg}/\text{cm}^2$ .

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier sincèrement mon directeur de recherche M. Masoud FARZANEH, professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi, pour les précieux conseils et l'encouragement qu'il a manifesté durant la réalisation de ce projet.

Je désire remercier le docteur Jacek KIERNICKI pour son appui et ses conseils lors de la supervision de ce travail.

Ma reconnaissance s'adresse aussi à M. Claude D'AMOURS et M. Sylvain DESGAGNES pour l'aide technique qu'ils ont apportée durant l'exécution des expériences.

Enfin, il m'est agréable d'exprimer ma gratitude à mes parents, mes soeurs, mes frères et mes amis qui, de près ou de loin, par leur encouragement et leurs conseils, ont efficacement contribué à la réalisation de ce projet.

## TABLE DES MATIÈRES

	PAGE
RÉSUMÉ.....	ii
REMERCIEMENTS.....	v
TABLE DES MATIÈRES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 PROBLÉMATIQUE.....	2
1.2 OBJECTIFS PRINCIPAUX DU PRÉSENT TRAVAIL.....	5
2. TRAVAUX ANTÉRIEURS DANS LE DOMAINE DU GIVRAGE.....	7
2.1 TRAVAUX À L'EXTÉRIEUR DE L'UQAC.....	8
2.2 TRAVAUX À L'UQAC.....	18
3. TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES ET PROCÉDURES.....	28
3.1 FORMATION DE LA GLACE.....	29
3.2 ÉQUIPEMENT DE LA CHAMBRE CLIMATIQUE.....	30
3.3 ISOLATEURS TESTÉS.....	34
3.4 PROCÉDURES D'ACCUMULATION DE GLACE.....	36
3.5 PROCÉDURE UTILISÉE POUR DÉTERMINER LA TENSION DE TENUE MAXIMALE.....	37
4. ÉTUDE DE LA TENSION DE TENUE MAXIMALE, $V_{TM}$ , DES ISOLATEURS STANDARDS IEEE RECOUVERTS DE GLACE EN FONCTION DU NOMBRE D'ISOLATEURS (RÉGIME D'ACCUMULATION).....	39
4.1 OBJECTIF.....	40
4.2 TENSION DE TENUE MAXIMALE, $V_{TM}$ , MESURÉE EN PRÉSENCE DU GIVRE LÉGER.....	40
4.2.1 <i>Observations</i> .....	40
4.2.2 <i>Résultats des essais</i> .....	41
4.3 TENSION DE TENUE MAXIMALE, $V_{TM}$ , MESURÉE EN PRÉSENCE DU VERGLAS.....	44
4.3.1 <i>Observations</i> .....	44
4.3.2 <i>Résultats des essais</i> .....	45
4.4 DISCUSSION.....	50

5. ÉTUDE DE LA TENSION DE TENUE MAXIMALE, $V_{TM}$ , DES ISOLATEURS STANDARDS IEEE RECOUVERTS DE GLACE EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE GLACE.....	53
5.1 OBJECTIF .....	54
5.2 OBSERVATIONS .....	55
5.3 RÉSULTATS DES ESSAIS.....	56
5.4 DISCUSSION.....	59
6. ÉTUDE DE LA TENSION DE TENUE MAXIMALE, $V_{TM}$ , DES ISOLATEURS STANDARDS IEEE RECOUVERTS DE GLACE EN FONCTION DE LA CONDUCTIVITÉ DE L'EAU.....	62
6.1 INTRODUCTION.....	63
6.2 OBSERVATIONS .....	63
6.3 RÉSULTAT DES ESSAIS.....	64
6.4 DISCUSSION .....	66
7. COMPARAISON ENTRE L'EFFET DE LA GLACE ET L'EFFET DE LA POLLUTION.....	73
7.1 INTRODUCTION.....	74
7.2 SOURCES DE POLLUTION.....	74
7.3 RELATION ENTRE LA TENSION DE TENUE 50%, $V_{50\%}$ , ET LE NIVEAU DE POLLUTION .....	76
7.4 COMPARAISON ENTRE LA SÉVÉRITÉ DE LA GLACE ET CELLE DE POLLUTION.....	77
7.5 DISCUSSION .....	80
8. CONCLUSION GÉNÉRALE.....	82
9. RÉFÉRENCES.....	86
ANNEXE .....	92

## LISTE DES TABLEAUX

	PAGE
TABLEAU 3.1: Caractéristiques des isolateurs standards IEEE .....	34
TABLEAU 3.2: Conditions expérimentales de la formation de glace .....	36
TABLEAU 4.1: Tension de tenue maximale, $V_{TM}$ , en fonction du nombre d'isolateurs (givre léger).....	41
TABLEAU 4.2: Tension de tenue maximale, $V_{TM}$ , en fonction du nombre d'isolateurs (glace formée dans un régime humide, $\epsilon = 2$ cm).....	46
TABLEAU 4.3: Tension de tenue maximale, $V_{TM}$ , déterminée pour les deux types de glace .....	50
TABLEAU 5.1: Tension de tenue maximale par mètre de distance d'arc, $V_{TM}/m$ , en fonction de l'épaisseur de la glace .....	57
TABLEAU 5.2: Comparaison des stress électriques en régime maximal de tension sur le réseau d'Hydro-Québec avec la tension de tenue maximale, $V_{TM}/m$ , des isolateurs IEEE pour les épaisseurs de glace égales à 2,0; 2,5 et 3,0 cm.....	60
TABLEAU 6.1: Poids de glace accumulée en fonction de la conductivité de l'eau.....	64
TABLEAU 6.2: Tension de tenue maximale par mètre de distance d'arc, $V_{TM}/m$ (kV/m) en fonction de la conductivité de l'eau.....	65
TABLEAU 6.3: Comparaison de la conductivité de l'eau servant à l'accumulation avec celle provenant de la fonte .....	69
TABLEAU 7.1: Contaminants: ses sources et méthodes de mesure.....	75
TABLEAU 7.2: Tension de tenue 50%, $V_{50\%}$ , par unité d'isolateurs en fonction de la densité équivalente de dépôt de sel (ESDD) par unité d'isolateur .....	76
TABLEAU 7.3: Comparaison entre la sévérité de l'épaisseur de la glace et celle de la pollution.....	78

## LISTE DES FIGURES

	PAGE
FIGURE 2.1: Représentation schématique de l'évolution du courant de fuite .....	22
FIGURE 2.2: Évolution du courant durant un test de contournement.....	24
FIGURE 2.3: Représentation schématique des étapes du développement de l'arc de contournement sur une chaîne d'isolateurs.....	24
FIGURE 3.1: Schéma de la chambre climatique.....	31
FIGURE 3.2: Schéma des circuits d'alimentation et de mesure.....	34
FIGURE 3.3: Représentation schématique des distances d'arc et de fuite sur une chaîne d'isolateurs standards IEEE.....	35
FIGURE 3.4: Procédure pour la détermination de la tension de tenue maximale, $V_{TM}$ .....	38
FIGURE 4.1: Tension de tenue maximale, $V_{TM}$ , pour une et deux unités d'isolateurs standards IEEE recouverts de givre léger.....	42
FIGURE 4.2: Relation entre la tension de contournement et la durée de son application .....	43
FIGURE 4.3: Traces d'érosion sur l'isolateur à proximité de la borne de la haute tension .....	45
FIGURE 4.4: Tension de tenue maximale, $V_{TM}$ , en fonction de la distance d'arc (glace formée dans un régime humide, $\epsilon = 2$ cm).....	46
FIGURE 4.5: Variations du courant de fuite durant un test de tenue .....	49
FIGURE 4.6: Aspect visuel des isolateurs standards IEEE recouverts de givre léger ( $\epsilon = 2$ cm) (a: avant l'application de la tension d'essai , b: après l'essai ) .....	51
FIGURE 4.7: Aspect visuel des isolateurs standards IEEE recouverts de verglas ( $\epsilon = 2$ cm) (a: avant l'application de la tension d'essai , b: après l'essai ).....	52

# **Chapitre I**

## **INTRODUCTION**

# 1. Introduction

## 1.1 Problématique

Dans certaines régions du monde, les conditions climatiques en hiver sont sévères et persistent souvent durant de longues périodes. Les basses températures, les précipitations froides, le passage de nuages, le brouillard givrant, les pluies verglaçantes et la neige encouragent l'accumulation de dépôts de glace sur les câbles et les isolateurs des lignes de transport et de distribution d'énergie électrique traversant les terrains froids.

Il est connu que les dépôts de glace formés sur les câbles et les pylônes peuvent engendrer des dommages mécaniques aux structures des lignes [1, 2]. Ils peuvent même parfois conduire, sous l'effet du vent, à des courts-circuits entre les conducteurs des différentes phases pouvant entraîner des pannes d'électricité [3, 4]. En particulier, ces dépôts formés sur les surfaces des isolateurs dégradent leurs performances électriques, ce qui peut parfois mener à l'apparition de contournements [5, 6].

Dans certaines publications portant sur les conséquences du givrage, les auteurs font ressortir les coïncidences entre les conditions atmosphériques favorisant l'accumulation de glace et l'apparition du nombre de pannes d'électricité affectant les réseaux électriques [7-12].

M. Kawai [13], M.D. Charneski et al.[14] ont rapporté certains incidents causés par l'accumulation de glace sur les équipements de transport (lignes et postes) aux États Unis.

D'après leurs travaux, les défauts sur les réseaux d'isolateurs, survenus en 1976, sont dus à l'accumulation de glace à la surface des isolateurs.

H. Matsuda et al. [15] ont relaté plusieurs cas de contournement causés par le dépôt de glace sur les réseaux à 154 kV et 275 kV au Japon. J.F. Forrest [16] a rapporté des incidents relatifs à l'effet de la pollution et l'effet de la glace sur des isolateurs de lignes à 400 kV en Angleterre. S.M. Fikke [17] a présenté les effets nocifs des précipitations froides et de la contamination des isolateurs par les sels minéraux émanant de la mer et les composants chimiques comme le sulfure et le nitrogène sur le réseau norvégien. L. Shu et al. [18] ont rapporté des incidents dus au givrage et à la contamination des isolateurs qui ont eu lieu sur les réseaux chinois.

A.E. Boyer et J.R. Meale [8], M. Farzaneh [5, 6, 7], M. Farzaneh et O.T. Melo [19], R.A. Gorski [20] et W.A. Chishlom [21] relatent des incidents électriques sur les réseaux d'Hydro-Québec et d'Hydro-Ontario vraisemblablement causés par des précipitations froides et/ou par la présence de brouillard givrant . On suppose qu'à l'origine des incidents sur le réseau d'Hydro-Ontario [22], les 9 et 10 mars 1986, a été l'accumulation de glace en forme de courts glaçons, suite à une période de pluie verglaçante, combinée à la présence de brouillard. Dans le réseau d'Hydro-Québec, au poste Arnaud, une série des contournements ont été causés par l'accumulation de neige humide [23].

Tous ces incidents ont entraîné des conséquences techniques et économiques considérables. Les compagnies touchées se sont alors intéressées à étudier ce phénomène.

Parmi les premiers chercheurs qui ont entamé des études sur le contournement des isolateurs recouverts de glace, on peut citer M.M. Khalifa et R.M. Morris [24] qui ont étudié l'effet de la glace atmosphérique accumulée sur les isolateurs des lignes à haute tension. Ils ont présenté des études en laboratoire concernant l'influence de la glace sur le courant de fuite, sur la tension minimale de contournement,  $V_{MF}$ , et sur la distribution de la tension le long des isolateurs. Ils ont constaté que lorsque la température atteint le point de fusion de la glace (0°C), l'apparition d'un film d'eau à la surface de la glace peut accélérer l'évolution des décharges électriques et, par la suite, le développement de l'arc blanc se propageant à la surface et à l'intérieur des glaçons dans des canaux créés par la fonte locale de la glace. Dans certaines conditions les arcs partiels finissent par se rejoindre pour former un long arc unique, ce qui aboutit en un contournement complet.

Selon Y. Watanabe [25], le contournement se produit lorsque l'arc dépasse une certaine longueur. Cette longueur dépend de la conductivité électrique de l'eau utilisée pour former la glace.

L.C. Phan et H. Matsuo [26] et M. Hara et L.C. Phan [27] ont démontré que la tension minimale de contournement,  $V_{MF}$ , la plus basse a été atteinte dans le cas de glace humide

formée à des vitesses de vent allant jusqu'à 5,5 m/s, ayant une épaisseur égale à 2 cm et une densité égale à 0,87 g/cm<sup>3</sup>.

Les études antérieures effectuées au GRIEA [6, 7] ont prouvé que la température ambiante, la vitesse du vent et la teneur en eau sont parmi les facteurs qui déterminent le type et la quantité de glace accumulée. Elles influencent donc la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ .

### **1.2 Objectifs principaux du présent travail**

Les objectifs du présent travail porteront sur la détermination de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , des isolateurs standards IEEE recouverts de glace en fonction des paramètres suivants :

- le nombre d'isolateurs ( pour givre léger et glace formée en régime humide);
- l'épaisseur de glace ( pour la glace formée en régime humide);
- la conductivité de l'eau (pour la glace formée en régime humide).

De plus , on comparera l'effet de la glace avec celui de la pollution en se basant sur les travaux antérieurs .

Le choix des isolateurs IEEE se justifie par le fait qu'ils servent d'isolateurs de référence pour le développement de techniques d'essais dans les différents laboratoires

effectuant des tests de pollution. Ils offrent une base de comparaison reconnue pour apprécier les résultats des essais.

## **CHAPITRE II**

# **LES TRAVAUX ANTÉRIEURS DANS LE DOMAINE DU COMPORTEMENT ÉLECTRIQUE DES ISOLATEURS RECOUVERTS DE GLACE**

## **2. Travaux antérieurs dans le domaine du comportement électrique des isolateurs recouverts de glace**

### **2.1 Travaux à l'extérieur de l'UQAC**

Au Canada, au milieu des années 1960, M.M. Khalifa et R.M. Morris [24] ont entamé des recherches sur le comportement des isolateurs en porcelaine et des isolateurs en matières synthétiques recouverts de glace.

Le but de ces recherches consistait à déterminer l'augmentation du courant de fuite, la diminution de la tension minimale de contournement et la modification de la répartition de la tension le long de l'isolateur causées par la glace. La glace a été produite en pulvérisant de l'eau distillée à la surface des isolateurs suspendus en position verticale dans une chambre froide où la température a été maintenue entre  $-7\text{ °C}$  et  $-12\text{ °C}$ . La tension appliquée était alternative et elle pouvait atteindre 200 kV rms.

Les conclusions importantes sont les suivantes :

- la performance d'isolateurs de suspension en porcelaine recouverts de glace est inférieure à celle d'une chaîne équivalente d'isolateurs standards suspendus de même longueur;
- la performance d'une chaîne double d'isolateurs en suspension est inférieure à celle d'une chaîne simple.

E.A. Cherney [28] a conduit des expériences sur les isolateurs standards IEEE et les isolateurs synthétiques à longs fûts recouverts de glace et pollués artificiellement. Le but de ces recherches consistait à déterminer l'effet du type de glace accumulée sur une chaîne

d'isolateurs. La glace accumulée a été produite par pulvérisation d'eau du robinet dans une chambre froide où la température était maintenue entre  $-3,5\text{ °C}$  et  $-6,0\text{ °C}$ . L'eau a été pulvérisée sur les isolateurs en absence de vent dans la chambre. La pollution a été produite par la pulvérisation d'une solution contenant 170 g de NaCl, 40 g de kaolin et 1g de photoflow par litre d'eau. Le dépôt équivalent de densité de sel était égal à  $0,4\text{ g/cm}^2$ , ce qui est considéré comme un taux élevé. Les isolateurs ont été pollués avant d'être recouverts de glace. Les tensions d'essai exprimées en fonction de la distance d'arc était de  $112,4\text{ kV/m}$  (une chaîne de 14 unités d'isolateurs standards), et de  $136,9\text{ kV/m}$  (une chaîne de 25 unités d'isolateurs standards). Les conclusions obtenues sont:

- il n'y a pas de contournement des isolateurs propres sous pluie verglaçante modérée aux valeurs de tension testées;
- les performances des isolateurs pollués exposés à la pluie verglaçante dépendent du taux de glace accumulée et de la longueur des glaçons formés autour des jupes.

Aux États Unis, en 1968, M. Kawai [13] a effectué des essais sur des isolateurs suspendus en porcelaine artificiellement recouverts de glace. Il a déterminé que le contournement se produit avec deux types de glace, celle formée à une température d'environ  $-9,5\text{ °C}$ , et celle formée dans l'intervalle de températures entre  $-1\text{ °C}$  et  $-7\text{ °C}$  en présence de brouillard. Dans le cas d'une chaîne d'isolateurs composée de 5 unités, la tension alternative d'essai exprimée en fonction de la distance d'arc était de  $109,5\text{ kV/m}$  et de  $205,4\text{ kV/m}$  pour les expériences dans la chambre froide. Dans le cas d'une chaîne

d'isolateurs de 23 unités, la tension alternative d'essai exprimée en fonction de la distance d'arc était de 60,5 kV/m et de 104,2 kV/m pour les expériences effectuées sur un site naturel. Le but de ces travaux était de développer une méthode expérimentale pour simuler les conditions naturelles d'accumulation de glace, d'examiner la performance des différents types d'isolateurs recouverts de glace, incluant la relation non linéaire entre les performances isolantes et la longueur de ces isolateurs.

Les conclusions importantes de ces travaux sont les suivantes:

- la distribution non uniforme de la tension le long d'une chaîne d'isolateurs recouverts de glace est à l'origine des fortes décharges à proximité de la borne de la haute tension et de la terre;
- le risque d'apparition de contournement est vraisemblablement possible si l'épaisseur maximale de glace sur un des isolateurs des lignes aériennes est d'environ 2,5 cm.

Les travaux de H.M.Schneider [29] ont été effectués sur des isolateurs artificiellement recouverts de glace sur un site naturel. L'effet de la longueur des chaînes d'isolateurs ainsi que la sévérité de la glace sur la tension de contournement ont été étudiés. La glace a été produite par pulvérisation d'eau du robinet sur les isolateurs au cours des nuits où la température était au-dessus de  $-2,8^{\circ}\text{C}$ . Des isolateurs en porcelaine standards et des isolateurs synthétiques ont été installés en position verticale ainsi qu'en position V. Les tensions d'essai, exprimées en fonction de la distance d'arc étaient: 80,4 kV/m et 88,7 kV/m ( 24 unités); 64,6 kV/m et 71,3 kV/m (30 unités).

Les conclusions résultantes de ces travaux sont les suivantes:

- la configuration en V donne des performances meilleures que la configuration verticale pour les isolateurs de suspension en porcelaine recouverts de glace;
- en position verticale, la performance des isolateurs synthétiques est inférieure à celle des isolateurs en porcelaine .
- il n'existe aucune différence entre la tension minimale de contournement obtenue avec la glace humidifiée avec l'eau du robinet et celle obtenue avec la glace couverte d'eau de fonte.

M.D Charneski et al. [14] ont étudié le comportement électrique des isolateurs en porcelaine et en matières synthétiques soumis à la pluie verglaçante. Durant les essais au laboratoire, la glace a été formée par pulvérisation de l'eau de robinet sur les isolateurs dans une chambre froide où la température a été maintenue à -12 °C. La tension d'essai exprimée en fonction de la distance d'arc appliquée à une chaîne d'isolateurs standards composée de 8 unités était de 63,2 kV/m. L'évaluation de la performance d'un type d'isolateur a été basée sur le nombre de contournements produits au cours d'une heure de test. Si aucun contournement ne se produit pendant une heure, on augmente la tension d'essai par unité d'isolateur en produisant un court-circuit, à l'aide de papier d'aluminium, sur un ou plusieurs isolateurs.

Les conclusions de ces travaux sont les suivantes :

- avec un gradient de tension de 77 kV/m, les isolateurs utilisés pour les lignes de transport électrique de la compagnie Détroit Edison à Détroit, Michigan, et soumis à des tensions de 120, 230 et 345 kV ne contournent pas sous pluie verglaçante.
- quant aux isolateurs des postes en porcelaine, il a été constaté que ceux utilisés pour la tension nominale de 345 kV contournent dans 65 % des cas, tandis que ceux utilisés pour les tensions de 120 kV et 230 kV ne contournent pas.

P.E. Renner et al. [30] ont mené des expériences sur les isolateurs recouverts de glace d'une manière artificielle. La glace a été produite par pulvérisation d'eau de robinet ainsi que d'eau distillée à la surface des isolateurs sur un site naturel. On a utilisé des isolateurs en verre trempé et en porcelaine soumis à une tension continue. Le but de ces travaux est de déterminer, en courant continu, la dégradation des propriétés isolantes des isolateurs causée par la glace.

Les résultats importants sont les suivants :

- la tension minimale de contournement obtenue avec la polarité positive est légèrement supérieure à celle obtenue avec la polarité négative;
- la dégradation des propriétés isolantes des isolateurs recouverts de glace est plus importante que celle des isolateurs pollués;
- l'effet de la polarité sur les propriétés isolantes des isolateurs recouverts de glace est négligeable;

- la tension de contournement des isolateurs recouverts de glace avec la glace sèche est plus élevée que celle obtenue avec la glace recouverte d'eau.

Les travaux de L.Y. Lee et al. [31] portaient sur les différents types d'isolateurs recouverts de glace, suspendus en positions verticale et horizontale. La glace a été produite par pulvérisation d'eau du robinet sur la surface des isolateurs dans une chambre froide où la température a été maintenue entre 0 et - 8 °C. Les isolateurs utilisés étaient en porcelaine, en verre trempé et même un isolateur en matière synthétique. Le but de ces travaux était de comparer la performance des différentes configurations des chaînes d'isolateurs sous l'influence de deux types de glace, soit le givre léger et le verglas.

Les résultats essentiels de ces travaux sont les suivantes:

- en présence de verglas et avec le même nombre d'isolateurs, une chaîne disposée en V se comporte mieux qu'une chaîne suspendue verticalement;
- pour deux chaînes d'isolateurs identiques, la tension de contournement obtenue avec la chaîne en position verticale est 20 % plus basse que celle obtenue avec la chaîne en position horizontale;
- l'influence de la formation des glaçons sur les propriétés isolantes des isolateurs verglacés est minime avec les chaînes en disposition horizontale.

Au Japon, des recherches sur les performances des isolateurs recouverts de glace ou de neige ont été menées, entre autres, par F. Fujimura et al. [32] sur des isolateurs en porcelaine

et en matières synthétiques. La glace a été formée en pulvérisant de l'eau distillée ou contaminée dans une chambre froide à  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La neige a été prélevée dans des régions montagneuses du Japon et stockée à  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Elle a ensuite été déposée manuellement sur les isolateurs. La conductivité de l'eau provenant de cette neige fondue variait entre de  $15\text{ }\mu\text{S/cm}$  et  $25\text{ }\mu\text{S/cm}$  à  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Le but de ces travaux consistait à comparer les performances des isolateurs recouverts de glace ou de neige sous des tensions alternative, continue et impulsionnelle.

Les conclusions de ces travaux sont les suivantes:

- dans le cas d'accumulations de dépôts de neige, il n'existe pas de différence substantielle entre les tensions de tenue obtenues sous tensions alternative et continue;
- sous tension alternative, la tension de tenue des isolateurs pollués et recouverts de neige dépend des conditions de formation de la neige et du niveau de contamination;
- sous tension alternative, la tension de tenue des isolateurs recouverts de neige est toujours plus élevée que celle obtenue avec les isolateurs pollués ;
- la tension de tenue en tension alternative des isolateurs recouverts de glace est presque  $40\%$  plus basse que celle des isolateurs recouverts de neige, à condition que la conductivité de l'eau de fonte se situe entre  $500\text{ }\mu\text{S/cm}$  et  $3000\text{ }\mu\text{S/cm}$ ;
- les valeurs de tension de tenue des isolateurs recouverts de glace, mesurées sous tensions alternatives et continues, sont plus élevées que celles des isolateurs contaminés;
- dans le cas des isolateurs recouverts de neige, la tension de tenue impulsionnelle dépend des caractéristiques du dépôt de la neige et elle est proportionnelle à la longueur de la chaîne.

Dans les conditions les plus défavorables (75 % de la longueur de l'isolateur recouverte de neige), cette tension de tenue pour les isolateurs propres et humides n'est que de 40% à 65% de celle obtenue avec la tension continue en polarité positive .

Les travaux de Y. Watanabe [25] ont consisté à comparer les performances des isolateurs en porcelaine en présence de verglas ou de neige avec celles des isolateurs contaminés afin de déterminer les critères d'utilisation des isolateurs dans les régions froides. La glace a été produite en milieu naturel, en pulvérisant de l'eau sur la surface des isolateurs pendant la nuit lorsque les températures étaient négatives. De la neige a été prélevée dans des régions montagneuses du Japon et une couche d'une épaisseur de 20 cm a été déposée sur la chaîne d'isolateurs.

Les conclusions de ces travaux sont les suivantes:

- l'effet de la glace et de la neige sur la tension minimale de contournement est plus sévère que celui de la contamination saline pour les tensions alternative, continue et impulsionnelle;
- la tension minimale de contournement sous tension continue, obtenue en polarité positive, n'est qu'un peu inférieure à celle obtenue en polarité négative. Cette dernière est presque égale à celle obtenue sous tension alternative;
- la tension minimale de contournement exprimée par mètre des isolateurs en porcelaine d'une chaîne longue est légèrement plus basse que celle obtenue avec les isolateurs en porcelaine d'une chaîne courte;

- la tension minimale de contournement est plus faible en conditions humides (glace humidifiée) qu'en conditions sèches (glace sèche). La valeur obtenue était de 875 kV (240 kV/m) en conditions humides à polarité négative. Cette valeur est à peu près 60 % de la tension de tenue 50 % ,  $V_{50\%}$ , obtenue en conditions humides sur la même chaîne d'isolateurs sans glace.

N. Sugawara et al. [33, 34] ont effectué des essais sur deux sites naturels à des altitudes de 2305 m et de 1540 m [33] et dans une chambre climatique froide 3,6 m x 2,7 m x 2,6 m [34] à une température minimale égale à - 30 °C. Les expériences ont pour but de déterminer les caractéristiques d'isolation et de mesurer la résistance de fuite (RI) d'une chaîne des d'isolateurs IEEE.

Les conclusions importantes de cette étude sont les suivantes :

- à une température supérieure à 0 °C, la résistance de fuite (RI) atteint sa valeur minimale quand la neige commence à fondre et à couler des jupes;
- pendant le brouillard épais et en présence de vent fort, les gouttelettes d'eau entrent en collision avec la surface de l'isolateur, provoquant ainsi l'humidification de la glace et la formation d'un film d'eau;
- les études sur la résistance d'isolation des isolateurs recouverts de givre lourd, de givre léger et de verglas, faites en laboratoire, ont montré que les propriétés d'isolation dépendent du type de glace et de la structure de l'isolateur. Durant l'accumulation du givre lourd et du verglas, la résistance d'isolation varie en fonction du temps. Elle diminue rapidement quand

les glaçons couvrent les espaces entre les isolateurs. Pendant l'accumulation du givre léger, la résistance diminue faiblement, mais celle-ci décroît davantage pendant la période de fonte.

En Suisse, les travaux de recherche concernant l'influence de la glace et de la neige sur les isolateurs à longs fûts, en position horizontale, utilisés dans les régions montagneuses ont été menés par A. Meier et W.M. Niggli [35]. Le but de ces travaux était de déterminer la distribution de la tension le long des chaînes d'isolateurs recouverts de verglas et l'influence de la température ambiante sur la tension de contournement. La glace recouvrant les isolateurs a été formée, en utilisant des moules, à la température de  $-20^{\circ}\text{C}$ .

Les conclusions les plus importantes sont les suivantes :

- les variations du courant de fuite des isolateurs en présence de verglas sont plus élevées que celles des isolateurs mouillés (sans glace);
- le courant de fuite dépend de l'épaisseur de la couche de glace ou de neige;

- la tension minimale de contournement des isolateurs recouverts de glace dépend de la température de l'air ambiant.

En Chine, les travaux de L. Shu et al [36] consistaient à étudier l'influence de la glace et de la pollution sur la tension minimale de contournement,  $V_{MF}$ , des isolateurs des lignes aériennes pollués et recouverts de glace à une très haute altitude. La chambre climatique était en forme d'un cylindre placé horizontalement d'un diamètre de 2 m et d'une longueur de 3,8m dont la température et la pression minimales étaient respectivement de - 40 °C et 34,7 kPa. Cette chambre a été utilisée pour simuler les conditions existantes jusqu'à une altitude de 5000 m. La vitesse du vent était comprise entre 1 et 3 m/s. Les isolateurs utilisés étaient en porcelaine. Les auteurs ont étudié la tension minimale de contournement,  $V_{MF}$ , en fonction du taux de pollution, du poids de la glace accumulée et de l'altitude allant de 232 à 3000 m. Ils ont trouvé que si deux parmi les trois paramètres déjà cités restent constants et le troisième s'accroît, la tension minimale de contournement,  $V_{MF}$ , diminue et tend vers une valeur de saturation.

## ***2.2 Travaux à l'UQAC.***

Les études concernant le givrage ont été entamées à l'UQAC par C.L. Phan [26, 27] sur des isolateurs de suspension, en céramique et synthétiques, suspendus verticalement et recouverts de glace sous une tension alternative. Le but de ces travaux était de déterminer la

tension de contournement et le courant de fuite de 2 types d'isolateurs afin de comparer leurs performances et de trouver le type de glace le plus dangereux. Deux types de glace, soit le givre léger et le verglas, ont été produits par pulvérisation de l'eau. La conductivité de l'eau utilisé pour faire la glace était de  $275 \mu\text{S}/\text{cm}$ . La température dans une chambre froide variait entre de  $0^\circ\text{C}$  et  $-20^\circ\text{C}$ . L'angle de projection des gouttelettes d'eau était de  $45^\circ$  par rapport à l'horizontale et la vitesse du vent était de  $3,3 \text{ m/s}$ . La tension d'essai appliquée aux isolateurs testés était une tension alternative de  $83 \text{ kV rms}$ .

Les conclusions essentielles relatives à ces travaux sont les suivantes:

- la glace formée à la température de  $-12^\circ\text{C}$  et de densité égale à  $0,87 \text{ mg}/\text{cm}^2$  est considérée comme le type de glace le plus dangereux;
- l'arc blanc se produit quand le courant de fuite dépasse une valeur de seuil égale à  $18 \text{ mA}$ ; cette valeur est indépendante du type de glace et du type d'isolateur; elle est constante pendant les deux régimes d'essais; d'accumulation et de fonte;
- la transition de l'arc blanc à l'arc de contournement se produit quand le courant de fuite dépasse  $120 \text{ mA}$  pour les isolateurs synthétiques et  $180 \text{ mA}$  pour les isolateurs en céramiques;
- en régime de fonte, la glace formée avec un vent dirigé de bas en haut, est plus dangereuse que celle formée avec un vent dirigé de haut en bas (formant un angle de  $45^\circ$  par rapport à l'horizontale).

Les études dans le domaine du comportement des isolateurs recouverts de glace sont aujourd'hui développés au laboratoire du Groupe de Recherche en Ingénierie de l'Environnement Atmosphérique (GRIEA) à l'Université du Québec à Chicoutimi. Le but principal de ces recherches consiste à l'établissement d'une méthode standardisée de mesure de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , des isolateurs recouverts de la glace.

Ces travaux ont démontré que la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , des isolateurs recouverts de glace dépend du type, de la quantité et de l'uniformité de la glace ainsi que de la conductivité de l'eau servant à l'accumulation de glace .

Plusieurs types d'isolateurs ont été testés, notamment les isolateurs standards IEEE, antibrouillards NGK, composites (EPDM) et une colonne isolante en porcelaine.

Les conclusions des études effectuées ont été rapportées dans plusieurs publications [5-7, 12, 27, 39], et se résument comme suit :

La glace formée dans un régime humide ou sec influence la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , de différents types d'isolateurs. Les résultats obtenus ont démontré que la tension de tenue maximale des isolateurs recouverts de glace formée dans un régime humide est toujours plus faible. Donc ce type de glace est plus dangereux que la glace formée en régime sec [5, 6].

La tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , mesurée en fonction du nombre d'isolateurs antibrouillards NGK (allant de un à quatre isolateurs) recouverts de glace formée dans un régime humide varie linéairement avec la distance d'arc de ces isolateurs [5, 6].

L'angle de déviation des glaçons,  $\alpha$ , par rapport à l'axe vertical des isolateurs, qui caractérise l'uniformité du dépôt de glace dépend de la vitesse du vent durant la période d'accumulation de glace et du type d'isolateur.

En effet, une faible vitesse de vent de 3,3 m/s favorise la formation de glaçons quasi verticaux et, par conséquent, la distribution de la glace est pratiquement uniforme le long des isolateurs.

À l'inverse, des vitesses de vent plus élevées occasionnent des accumulations non uniformes.

Les résultats d'essais montrent que la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , devient plus élevée pour des accumulations de glace non-uniformes. L'accroissement de la tension minimale de contournement,  $V_{MF}$ , en fonction de l'angle de déviation des glaçons,  $\alpha$ , peut être expliquée par l'allongement de la distance de fuite des isolateurs recouverts de glace au fur et à mesure de l'augmentation de l'angle. En effet, cette distance de fuite, pour une accumulation de glace uniforme, est plus courte que pour des accumulations non uniformes [5, 6].

La tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , varie en fonction de la conductivité de l'eau. Les essais [6] ont démontré que dans le cas d'une colonne isolante, cette tension décroît avec la croissance de la conductivité de l'eau,  $\sigma$ . Pour des valeurs de conductivité entre 4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 80  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , la tension de tenue maximale peut être déterminée par la courbe de puissance suivante :

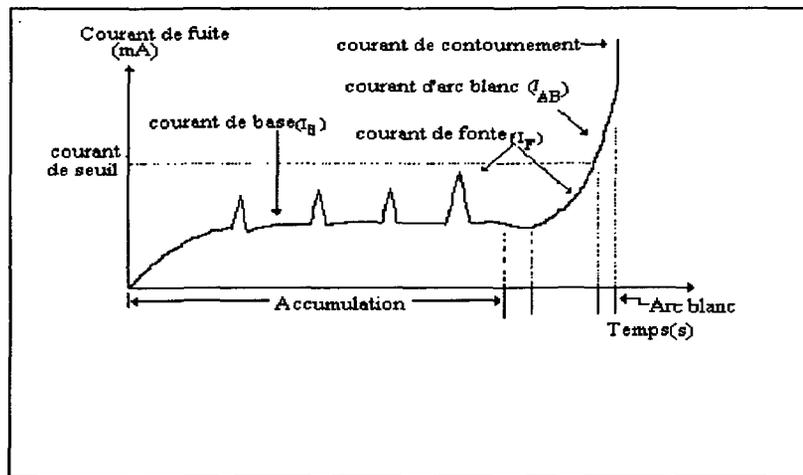
$$V_{TM}/m = 132,5 \sigma^{-0,092}$$

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

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

La tension minimale de contournement dépend de la nature et de la valeur de tension d'essai appliquée. En tension continue, les études effectuées au laboratoire des hautes tensions de l'UQAC [5, 47], sur une courte chaîne de 4 isolateurs antibrouillards, ont démontré que les valeurs les plus faibles de tension minimale de contournement ont été obtenues en polarité négative et les plus élevées en polarité positive. La tension de tenue maximale, mesurée en tension alternative est supérieure de celle en polarité négative et inférieure à celle en polarité positive (mesurée en tension continue).

Le courant de fuite, étant une conséquence de l'effet de couronne, est composé [27] des courants suivants (figure 2.1):



**Fig 2.1: Représentation schématique de l'évolution du courant de fuite.**

- **Courant de base** ,  $I_B$ , produit par des faibles décharges partielles se manifestant à la surface de la glace et dont l'intensité de base ne dépasse pas 1 mA [27].

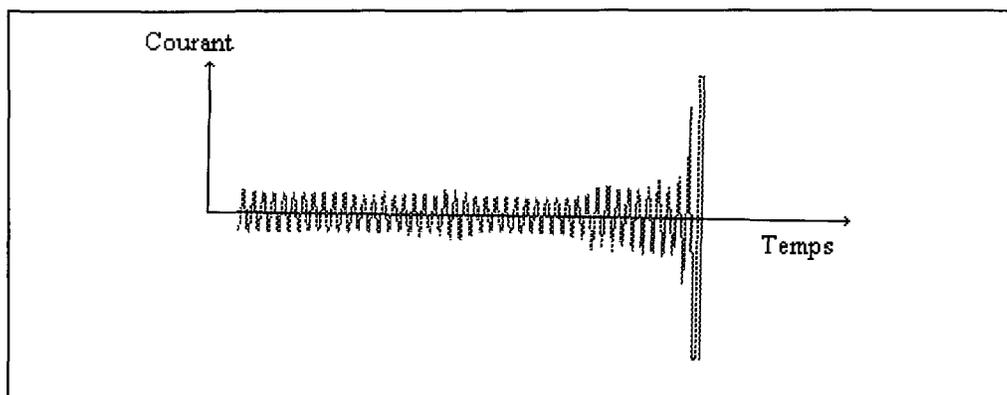
- **Courant de fonte** ,  $I_F$ , qui se propage dans le film d'eau formé à la surface du dépôt de glace d'une conductivité bien supérieure à celle de la glace solide . Le courant de fonte provenant de plus forts effluves apparaît d'une façon discontinue et sa valeur maximale est de l'ordre de plusieurs mA ( 30-70 mA) [27].

- **Courant d'arc blanc** ,  $I_{AB}$  , qui apparaît lorsque le courant de fonte atteint une valeur de seuil d'environ 18 mA [27]. La transformation du courant de fuite en courant d'arc blanc est accompagnée d'une augmentation de l'intensité du courant et d'une forte luminosité de la colonne de décharge.

- **Courant d'arc de contournement** ,  $I_c$ , peut se produire lorsque le courant d'arc blanc atteint un seuil d'environ 500 mA [27], au delà duquel il aboutit au contournement complet.

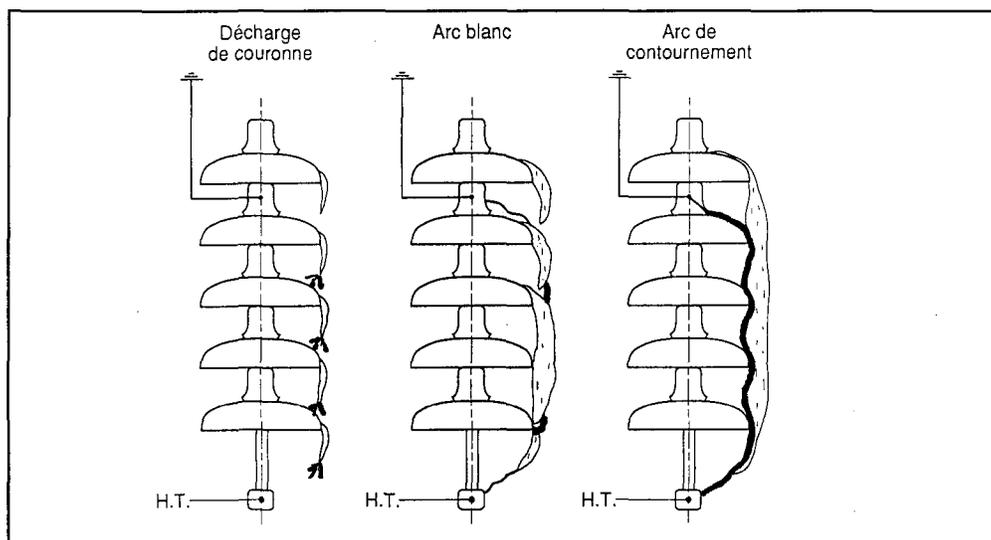
L'évolution du courant de fuite et le temps de transition éventuelle de l'arc blanc en arc de contournement dépendent principalement des conditions thermiques, du niveau et de la nature de la tension d'essai, ainsi que de l'épaisseur et d'uniformité du dépôt de glace formé sur la chaîne d'isolateurs. Les variations du courant de fuite sont dues généralement aux changements de la longueur des glaçons causés par la fonte. Si la valeur du courant de l'arc blanc dépasse une certaine valeur critique, dite valeur de seuil, l'arc blanc se transforme en arc de contournement. Par contre, si la valeur du courant subit une diminution, par exemple à cause de la chute de glaçons, l'arc blanc s'éteint en donnant lieu à la tenue.

La figure 2.2, relevée à l'aide du système d'acquisition **Viewdac**, présente à titre d'exemple l'évolution du courant de fuite jusqu'au contournement sur une chaîne d'isolateurs IEEE recouverts de glace formée dans un régime humide ( $\epsilon = 2 \text{ cm}$ ,  $V = 75 \text{ kV}$ ).



**Fig 2.2: Évolution du courant durant un test de contournement.**

La figure 2.3 montre d'une manière schématique l'évolution de l'arc de contournement sur une chaîne d'isolateurs recouverts de glace.



**Fig. 2.3: Représentation schématique des étapes du développement de l'arc de contournement sur une chaîne d'isolateurs [24].**

Des travaux de M. Farzaneh et al. [12] ont porté sur les performances électriques d'une chaîne d'isolateurs en porcelaine partiellement recouverts de glace produite à  $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (le verglas) et à  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (le givre léger). Une tension de 14 kV par unité a été appliquée à la chaîne d'isolateurs. Le but de ces expériences consistait à examiner la longueur des glaçons, le poids de glace accumulée sur l'isolateur en fonction des conditions de givrage et également à déterminer la conductivité et le poids de l'eau de fonte en fonction des conditions de givrage durant la période de fonte. D'autre part, M. Farzaneh et O.T. Melo [37] ont étudié la tension minimale de contournement et le courant de fuite sur les isolateurs en porcelaine utilisés dans le réseau de transport d'Hydro-Ontario à 500 kV. Une chaîne d'isolateurs testés composée de 3 ou 4 unités, a été installée verticalement dans le centre de la chambre climatique.

Les conclusions importantes de ces études sont les suivantes:

- à une température de  $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , les glaçons s'accumulent aux abords des isolateurs et leur longueur croît à un taux de 16 mm/h. Une période de 6 heures et 16 min a été nécessaire pour que les glaçons couvrent la totalité de la chaîne d'isolateurs;
- il a été démontré que l'accumulation de glace et de glaçons courts sur la surface des isolateurs causée par la pluie verglaçante, combinée avec la présence de brouillard a été l'origine de l'incident survenu sur le réseau d'Hydro-Ontario en mars 1986. Le contournement a été produit sous une tension d'essai légèrement supérieure à 80 % de la tension normale.

De plus les travaux fondamentaux menés par M. Farzaneh et al [38] ont porté sur les phénomènes accompagnant l'amorçage de l'arc électrique à la surface de glace pendant la

phase de fonte. Le but de cette étude consiste à construire un modèle mathématique exprimant la tension de tenue,  $V_{50\%}$ , en fonction du courant de l'arc et de la longueur de l'arc. Dans ces travaux, les chercheurs ont utilisé des échantillons de glace en forme triangulaire, dont les dimensions étaient de 280 mm x 200 mm x 15 mm. L'échantillon de glace a été placé dans la chambre froide (-12 °C) dans une position verticale. L'accroissement moyen de la température durant les tests était égal à 0,4 °C/min pour la mesure de la conductivité surfacique de la glace. Les mêmes auteurs ont effectué une étude [39] portant sur un échantillon de glace cylindrique dont les dimensions étaient de 300 mm (hauteur) et de 123mm (diamètre). Le but de cette étude était de déterminer une relation entre le courant d'arc, la tension minimale de rétablissement de l'arc et la tension d'arc en fonction de la longueur de l'arc. Les résultats fournis par ce modèle pourront être utilisés pour les isolateurs recouverts de glace.

Les conclusions importantes de ces études sont :

- il a été constaté qu'à une température de 0 °C, quand la glace commence à fondre, l'épaisseur du film d'eau à la surface de glace et, par conséquent, la distribution du courant de fuite ne sont pas uniformes. Pourtant, quand la température est supérieure à 2,5 °C, la distribution du courant de fuite devient uniforme;
- le courant de fuite passe à travers du film d'eau à la surface de glace et il augmente linéairement en fonction de la croissance de l'épaisseur et de la conductivité du film d'eau;
- pour les échantillons de glace qui sont représentatifs pour les isolateurs recouverts de glace, l'épaisseur du film d'eau tend vers une valeur constante à peu près égale à 0,17 mm;

- la conductivité superficielle provenant des gouttelettes d'eau paraît être faible en comparaison avec celle des isolateurs pollués. Cette faible conductivité superficielle ne peut être utilisée comme référence pour la comparaison de la tension de tenue des isolateurs pollués avec la tension de tenue des isolateurs recouverts de glace;
- les caractéristiques des arcs électriques sur la surface de glace diffèrent de celles des arcs des surfaces polluées.

**CHAPITRE III**

**TECHNIQUES  
EXPÉRIMENTALES  
ET PROCÉDURES**

### 3. Techniques expérimentales et procédures

#### 3.1 Formation de la glace

Dans des conditions naturelles, l'accumulation et l'évolution d'un dépôt de glace se déroulent suivant trois phases essentielles [40, 41] :

- 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 de délestage, caractérisée par une décroissance rapide du dépôt, par exemple par la fonte.

Selon D. Kuroiwa [40], I. Imai [41] et H. Oguchi [42], les trois types de glace formés, soit le verglas, le givre lourd et le givre léger sont comme suit:

- a) le verglas est transparent, très dur, et adhésif et d'une densité entre  $0,8 \text{ g/cm}^3$  et  $0,9 \text{ g/cm}^3$ .
- b) Le givre lourd est semi transparent. Il se forme entre  $-5 \text{ °C}$  à  $-12 \text{ °C}$  et a une densité entre  $0,8 \text{ g/cm}^3$  et  $0,9 \text{ g/cm}^3$ . Ce type de glace est très adhésif, il est le plus dangereux du point de vue de la possibilité de l'amorçage de l'arc blanc.
- c) Le givre léger ressemble à la neige. Il est formé des petites gouttelettes d'eau, par exemple, qui gèlent à des températures inférieures à  $-10 \text{ °C}$  et qui ont une densité inférieure à  $0,6 \text{ g/cm}^3$ .

Au laboratoire de l'UQAC, on produit la glace à partir de deux procédés distincts: la glace accumulée dans un régime sec et la glace formée dans un régime humide.

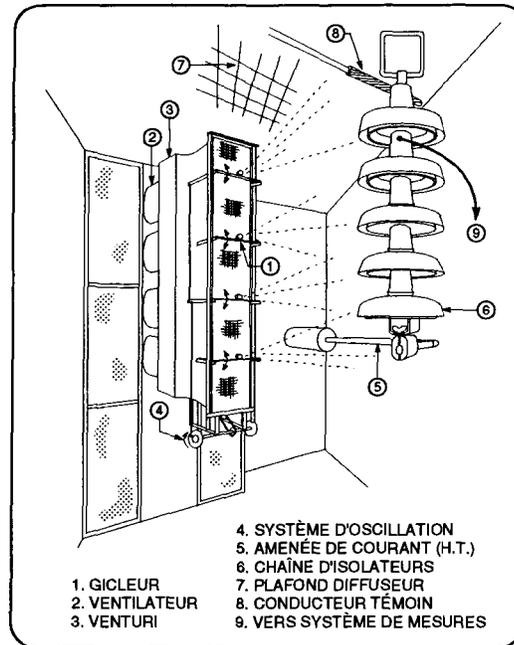
Le procédé sec consiste à former le givre léger à partir de petites gouttelettes d'eau qui gèlent au moment de la collision avec la surface froide de l'isolateur. La température de dépôt, inférieure à 0°C, résulte de l'état d'équilibre entre le taux de la chaleur libérée par l'impact des gouttelettes et le taux de la chaleur transférée vers l'environnement par la convection forcée. La glace produite est blanche, opaque, peu adhésive, et similaire au givre léger formé dans les conditions naturelles du givrage.

Le procédé humide consiste à former le verglas à partir de gouttelettes d'eau surfondues, nettement plus volumineuses que celles utilisées pour la formation de givre léger. Elles arrivent à la surface froide des isolateurs en état liquide. La couleur et l'opacité de ce type de glace varient en fonction de sa teneur en bulles d'air.

### ***3.2 Équipement de la chambre climatique***

L'accumulation de glace sur les isolateurs a été effectuée dans une chambre climatique située au laboratoire des hautes tensions de l'UQAC. Les dimensions de la chambre sont de 4,8 m x 2,8 m x 3,5 m et sa température minimale égale à - 35°C [5, 6] .

La figure 3.1 présente schématiquement une vue d'ensemble de la chambre climatique.



**Fig. 3.1: Schéma de la chambre climatique.**

La chambre climatique est munie des équipements suivants :

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

-**Le système d'arrosage** est constitué d'un ensemble de quatre gicleurs pneumatiques servant à produire les fines gouttelettes d'eau (de diamètre volumique de 15  $\mu\text{m}$  à 80  $\mu\text{m}$  ) suivant la pression d'air et le type de capot d'air. Les gicleurs sont montés sur des supports oscillants et placés verticalement l'un au-dessus de l'autre. Ils sont alimentés en eau à partir d'un réservoir situé au laboratoire et en air directement du réseau de distribution d'air comprimé. La régulation du débit d'eau et de la pression d'air se font manuellement à l'aide des vannes

appropriées. Le débit d'eau maximal est égal à 0,745 l/min et la pression d'air maximale est égale à 48 PSI (3,31 bars). Un dispositif mécanique assure le mouvement oscillatoire des gicleurs pour que la glace soit uniformément répartie sur les isolateurs testés. La vitesse des oscillations peut varier de 0 à 35 oscillations par minute. En ce qui concerne les tests effectués au laboratoire des hautes tensions, la vitesse du système d'oscillation est égale à 5 oscillations par minute.

**-Le système de refroidissement** est composé de deux unités indépendantes de machines frigorifiques à compression. Le pouvoir frigorifique des machines est respectivement de 316,5 kJ/min et 527 kJ/min. La température de l'air est contrôlée et assurée par un système proportionnel, dérivateur et intégrateur (PID), avec une précision de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ . L'installation d'un plafond diffuseur facilite l'échange rapide et uniforme de la température à travers tout le volume de la chambre climatique. Le système de nettoyage des grillages des échangeurs thermiques assure l'uniformité de la température durant toute la période d'accumulation. En tenant compte de l'efficacité de nettoyage ainsi que la détérioration réduite des grillages, un dispositif mécanique de nettoyage à brosses rotatives a été mis au point. Ce dispositif est installé sur les aires d'aspiration de deux échangeurs de chaleur et aussi celles des ventilateurs du venturi de telle manière à maintenir la température et l'écoulement de l'air constants durant les tests. La vitesse de rotation et la pression sur la grille sont ajustables et s'élèvent respectivement de 0 à 500 tr/min et de 0 à 20,3 N/m.

La chambre climatique est aussi équipée d'un épurateur d'air à charbon actif dont le rôle consiste à éliminer l'ozone produit par les décharges électriques.

- **Le système de haute tension** comprend :

- Un transformateur HT ayant les caractéristiques suivantes:

- Puissance nominale de 240 kVA;

- Tension nominale au primaire de 0,6 kV à 60 Hz;

- Tension nominale au secondaire de 120 kV ;

- Impédance du court-circuit de 5 %.

- Un régulateur automatique de tension de type Brentford avec les caractéristiques suivantes:

- Puissance nominale de 240 kVA;

- Tension d'entrée de  $(600 \pm 0,6\%)$  V;

- Tension de sortie de 0 à 600 V;

- Un diviseur capacitif de tension ( 2 x 100 pF);

- Une amenée de courant à HT.

La figure 3.2 présente le schéma d'alimentation en HT et le circuit de mesure.

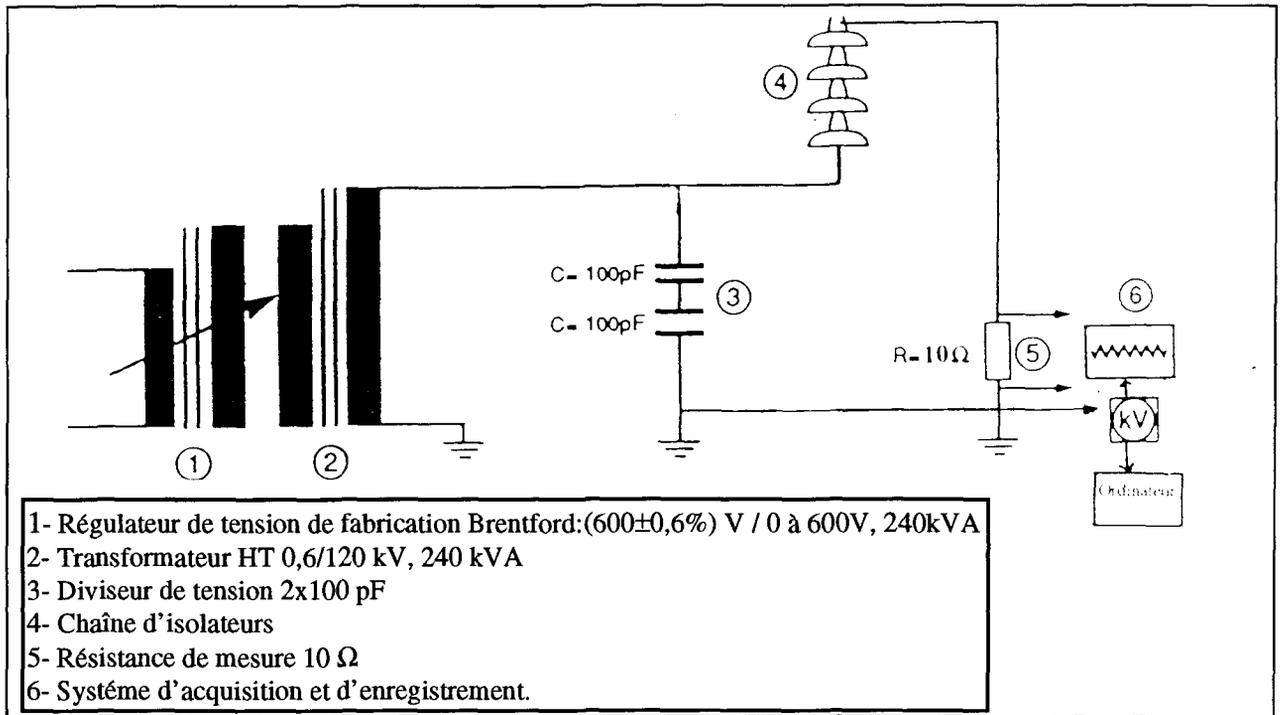


Fig 3.2: Schéma des circuits d'alimentation et de mesure.

### 3.3 Isolateurs testés

Le tableau 3.1 présente les caractéristiques des isolateurs IEEE utilisés durant les tests.

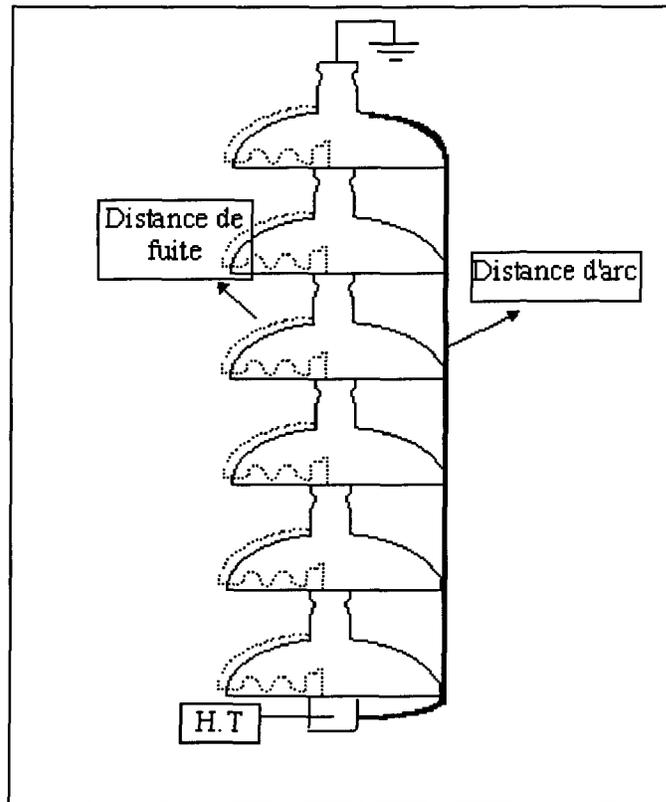
Tableau 3.1: Caractéristiques des isolateurs standards IEEE

Caractéristiques	Pas (mm)	Diamètre (mm)	Nombre d'unités	Distance d'arc (mm)	Distance de fuite (mm)	Résistance mécanique (kN)
IEEE	146	254	6	955	1830	67-87

La figure 3.3 présente la distance d'arc et la distance de fuite d'une chaîne d'isolateurs.

La distance d'arc est définie comme étant la plus courte distance dans l'air entre les deux électrodes ( Fig 3.3, ligne continue ).

La distance de fuite est la plus courte distance suivant la surface de la partie isolante entre les deux électrodes ( Fig 3.3, ligne pointillée).



**Fig 3.3: Représentation schématique des distances d'arc et de fuite sur une chaîne d'isolateurs standards IEEE.**

### 3.4 Procédure d'accumulation de glace

La première phase des essais, dite d'accumulation, consiste à accumuler sur l'isolateur testé un type donné de glace .

Deux types de glace ont été utilisés: le givre léger et le verglas.

Les conditions expérimentales accompagnant la production de ces deux types de glace en laboratoire sont présentés au tableau 3.2.

Tableau 3.2: Conditions expérimentales de la formation de glace.

Conditions expérimentales	Givre léger	Verglas
Température (°C)	-12	-12
Teneur en eau (g/cm <sup>3</sup> )	6,8	6,8
Vitesse du vent (m/s)	3,3	3,3
Diamètre volumique des gouttelettes (µm)	15	80

Le diamètre des gouttelettes est déterminé par un choix adéquat de la pression d'air, 3,31 bars pour les gouttelettes de 15 µm et 0,48 bars pour les gouttelettes de 80 µm et des orifices des capots. La conductivité de l'eau servant à l'accumulation de glace a été fixée par la dissolution d'une quantité déterminée de sel NaCl dans de l'eau distillée.

L'épaisseur de la glace a été mesurée sur un cylindre témoin d'un diamètre de 3,8 cm [6], tournant à une vitesse d'un tour/min, placé en face de l'isolateur supérieur (non soumis à la tension) de la chaîne d'isolateurs.

### **3.5 Procédure utilisée pour déterminer la tension de tenue maximale**

Les essais en vue de déterminer la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , peuvent s'effectuer en régime d'accumulation ou en régime de fonte.

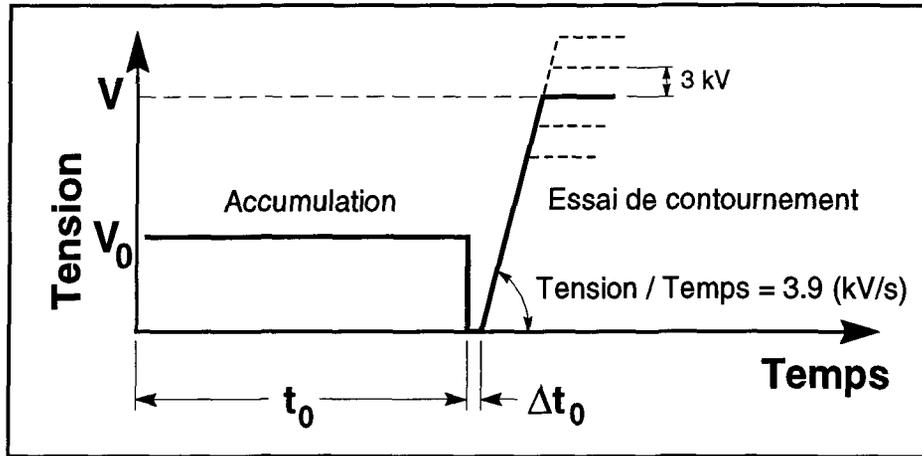
Un essai est réalisé en régime d'accumulation quand la tentative de contournement est effectuée presque immédiatement après la période d'accumulation de la glace.

Durant le test, la température ambiante demeure constante et égale à - 12 °C.

Les valeurs de tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , présentées dans les prochains chapitres ont été déterminées selon une méthode s'inspirant de la méthode dite: "méthode de la tension de tenue maximale" [5-7], décrite dans la norme CEI 507 [43].

Le principe de la procédure développée, tel que le montre la figure 3.4, est le suivant: la glace est accumulée durant une période définie " période d'accumulation " au cours de laquelle une tension de référence  $V_0$  est appliquée aux isolateurs. Une fois la période d'accumulation ( $t_0$ ) terminée et après un court intervalle ( $\Delta t_0 \approx 3\text{min}$ ) nécessaire pour certaines opérations auxiliaires, la tension d'essai prédéterminée est appliquée à l'isolateur dans un temps relativement court (rampe de 3,9 kV/s). Selon le résultat des essais, soit tenue ou contournement, le niveau de tension d'essai pour le test suivant est augmenté ou diminué d'un pas de 3 kV. La tension de tenue maximale est déterminée en fonction du nombre de contournements et de tenues obtenues à chaque palier suivant la norme CEI 507 [43]. Elle

correspond au palier pour lequel au moins 3 tenues sont obtenues, sur un maximum de 4 essais, et pour lequel 2 contournements sont obtenus à un palier (3 kV) plus haut. Le nombre d'essais nécessaires pour déterminer la tension de tenue maximale pour un point de mesure donné est donc supérieur à 5.



**Fig. 3.4: Procédure pour la détermination de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ .**

**Légende:**

$t_0$ : période d'accumulation;

$\Delta t_0$ : arrêt du temps ( 3 min ) pour les opérations auxiliaires;

$V_0$ : tension appliquée durant l'accumulation;

$V$ : tension d'essai.

## **CHAPITRE IV**

### **ÉTUDE DE LA TENSION DE TENUE MAXIMALE, $V_{TM}$ , DES ISOLATEURS STANDARDS IEEE RECOUVERTS DE GLACE EN FONCTION DU NOMBRE D'ISOLATEURS (RÉGIME D'ACCUMULATION)**

#### **4. Étude de la tension de tenue maximale, $V_{TM}$ , des isolateurs recouverts de glace en fonction du nombre d'isolateurs (régime d'accumulation),**

##### **4.1 Objectif**

L'objectif de cette partie des essais consiste à déterminer la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , en fonction du nombre d'isolateurs standards IEEE recouverts de glace.

Les essais de contournement ont été réalisés sur une chaîne d'isolateurs IEEE comprenant de une à six unités. Deux types de glace, soit le givre léger et la glace formée en régime humide (le verglas), ont été utilisés. Le dépôt de glace a été formé dans les conditions décrites au chapitre 3. L'épaisseur de glace mesurée sur le cylindre témoin référence, égale à 2 cm, correspond à une période d'accumulation de 120 minutes. La conductivité de l'eau utilisée durant les essais était égale à 80  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La tension de service,  $V_o$ , égale à 10 kV par unité d'isolateur, a été appliquée pendant toute la période d'accumulation.

##### **4.2 Tension de tenue maximale, $V_{TM}$ , mesurée en présence du givre léger**

###### **4.2.1 Observations**

Les observations essentielles durant les tests sont les suivantes:

- un faible courant de fuite relevé sur l'enregistreur analogique;
- la durée de l'arc de contournement a été très courte;

accumulé. Le phénomène du vent ionique s'explique par le fait que les ions libres existant dans l'air sont soumis à un champ électrique intense. Au cours de leur mouvement, ils entrent en collision élastique avec des molécules de gaz. Il en résulte un mouvement général du gaz ambiant appelé phénomène de vent ionique [44].

#### 4.2.2 Résultats des essais

Les tests effectués sur une chaîne d'isolateurs comportant successivement 3, 4 et 5 isolateurs n'ont pas mené au contournement. La source de tension n'est pas suffisamment élevée ( la tension nominale du secondaire du transformateur est de 120 kV).

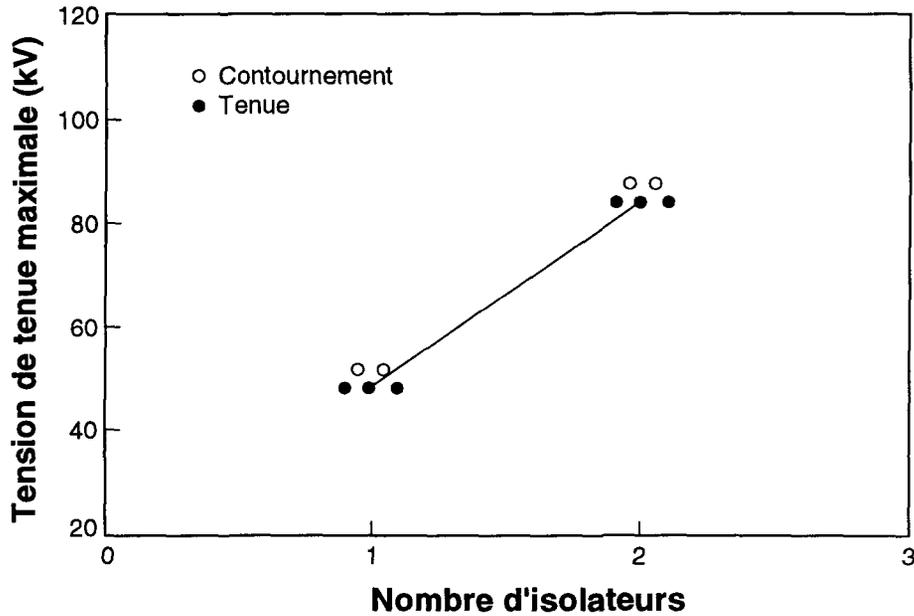
Les tests avec 1 et 2 unités d'isolateurs ont abouti à des résultats conformément aux recommandations de la norme CEI 507 [43] (c.f chapitre 3).

Les valeurs de tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , obtenues sont présentées au tableau 4.1. Les résultats complets concernant les essais sont présentés aux tableaux de 4.4, 4.5 et 4.6 de l'annexe.

Tableau 4.1. Tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , ( et  $V_{TM}/m$  par mètre de distance d'arc) en fonction du nombre d'isolateurs.

Nombre d'isolateurs	Distance d'arc(mm)	$V_{TM}$ (kV)	$V_{TM}/m$ (kV/m)
2	371	84	226,4
1	225	51	226,6

Les valeurs obtenues de tension de tenue maximale,  $V_{TM}/m$ , calculées par mètre de distance d'arc sont pratiquement égales, de l'ordre de 226 kV/m (Tableau 4.1). La figure 4.1 présente la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , en fonction du nombre d'isolateurs.

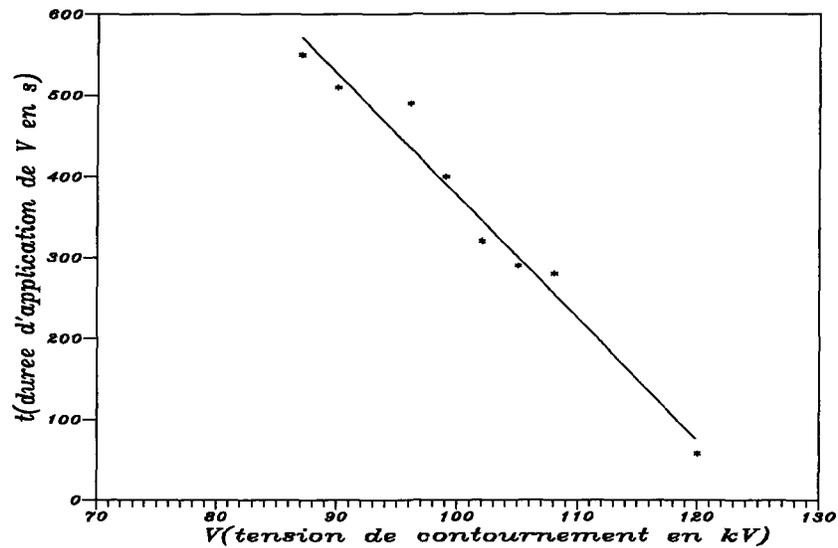


**Fig.4.1: Tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , pour un et deux unités d'isolateurs standards IEEE recouverts de givre léger.**

Étant donné que l'on ne dispose que des valeurs de tension de tenue maximale obtenues seulement pour 1 et 2 unités d'isolateurs, on ne peut pas se prononcer sur la variation de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , en fonction du nombre dépassant deux unités d'isolateurs.

La figure 4.2 présente la relation entre la tension de contournement et la durée d'application de la tension d'essai jusqu'au moment de l'apparition de l'arc de contournement. Elle est établie selon les résultats obtenus pour les tests avec deux isolateurs (tableau 4.5 de

l'application de la tension d'essai et l'apparition du contournement est relativement court pour les tensions d'essai élevées, et il augmente pour les tensions plus faibles.



**Fig.4.2: Relation entre la tension de contournement et la durée de son application.**

Les résultats des essais ont démontré que la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , des isolateurs recouverts de givre léger est très élevée, ce qui peut s'expliquer par le fait que le givre léger est peu adhérent et comporte une quantité élevée de bulles d'air, sa surface est pleine d'aspérités et dépourvue d'un film d'eau. Ces attributs n'encouragent pas la croissance de courant de fuite et préviennent l'amorçage de l'arc de contournement.

### **4.3 Tension de tenue maximale, $V_{TM}$ , mesurée en présence du verglas**

#### **4.3.1 Observations**

Une fois que la tension d'essai est appliquée à la chaîne d'isolateurs, le courant de fuite apporte une contribution au soutien et au développement d'un film d'eau sur la surface du dépôt de glace. L'activité électrique, particulièrement forte, est localisée surtout auprès des deux électrodes: celle de la haute tension et celle de la terre. Au fur et à mesure que le courant de fuite augmente, on observe des décharges électriques se transformant en arcs partiels. Ceux-ci se propagent à la surface et à l'intérieur des glaçons dans des canaux créés par la fonte locale de la glace. La chaleur dégagée par l'arc fait fondre les glaçons, ce qui entretient le développement des arcs partiels. Si la tension appliquée est suffisamment élevée, les arcs partiels finissent par se rejoindre pour former un arc unique, aboutissant au contournement complet.

Après les essais, on a constaté que l'arc avait laissé des traces d'érosion sur la surface extérieure de l'isolateur. La figure 4.3 montre les traces d'érosion sur l'isolateur standard IEEE à proximité de la borne de haute tension. ( $V_{TM} = 72 \text{ kV}$ ,  $\epsilon = 2 \text{ cm}$ ).



**Fig 4.3: Traces d'érosion sur l'isolateur à proximité de la borne de la haute tension.**

#### 4.3.2 Résultats des essais

##### a. Détermination des valeurs de tension de tenue maximale

Les valeurs de tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , déterminées en fonction du nombre d'isolateurs standards IEEE recouverts de glace humide sont présentées au tableau 4.2. Les résultats complets relatifs aux essais sont présentés aux tableaux 4.7 à 4.12 de l'annexe .

La figure 4.4 présente la variation de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , en fonction de la distance d'arc. On remarque que la tension de tenue maximale augmente avec la distance d'arc d'une manière quasi linéaire (Fig.4.4).

Tableau 4.2: Tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , en fonction du nombre d'isolateurs  
(glace formée dans un régime humide,  $\varepsilon = 2$  cm)

Nombre d'isolateurs	Distance d'arc (mm)	$V_{TM}$ (kV)	$I_{max}$ (mA)	$E_{MAX}$ (kJ)
6	955	72	622	1600
5	809	57	498	340
4	663	48	213	310
3	517	39	200	380
2	371	30	340	360
1	225	24	550	297

La figure 4.4 présente la variation de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , en fonction du nombre d'isolateurs,  $n$ , et de la distance d'arc,  $d$ .

Les droites de régression sont respectivement les suivantes:

$$V_{TM}(n) = 9,43 n + 12 \text{ en kV, } 2 \leq n \leq 6$$

$$V_{TM}(d) = 64,58 d + 6,9 \text{ en kV.}$$

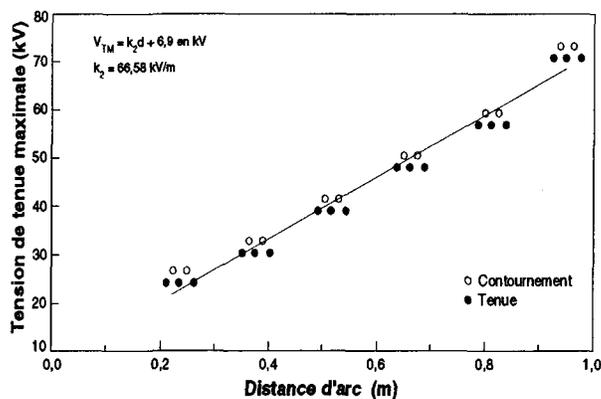


Fig.4.4: Tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , en fonction de la distance d'arc ( glace formée dans un régime humide ,  $\varepsilon= 2$  cm)

En se basant sur les résultats obtenus (particulièrement dans le cas de glace formé dans un régime humide), on peut admettre que la tension de tenue maximale des isolateurs IEEE recouverts de glace, exprimée en kV, varie d'une manière quasi linéaire en fonction de la distance d'arc pour une chaîne d'isolateurs ayant une longueur inférieure à un mètre.

b. Détermination de l'énergie dissipée par l'arc blanc

Le but de cette étude consiste à déterminer l'énergie totale dissipée par l'arc blanc. Lors de la propagation de l'arc blanc, une quantité considérable d'énergie thermique par rapport à l'énergie totale se dégage. Il en résulte la fonte et le décollement de la glace .

L'énergie dissipée par l'arc blanc est répartie comme suit:

- l'énergie thermique qui entraîne la fonte de glace, l'évaporation d'une partie de l'eau de fonte et l'échauffement des isolateurs et de l'air;
- l'énergie électromagnétique qui se manifeste par des radiations et par l'émission des ondes.

L'énergie dissipée est calculé à l'aide de la formule suivante:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} v(t)i(t)dt$$

où  $W$  - l'énergie dissipée en Joules;

$i(t)$  - valeur instantanée de courant de fuite, en A

$v(t)$  - valeur instantanée de tension d'essai, en V

$t_1$  et  $t_2$  - début et fin de l'activité de l'arc blanc.

Les variations du courant de fuite et de la tension d'essai sont enregistrées au cours de l'essai par un système analogique de mesure. En même temps, un système informatique assure l'acquisition de données numériques.

Étant donné que les valeurs enregistrées par le système d'acquisition sont discontinues, le calcul de l'énergie dissipée par l'arc blanc devient comme suit:

$$W_r = \frac{k_v \cdot k_i}{f_a} \sum_i v_i \cdot i_i$$

Dans notre cas :

$f_a$  est la fréquence d'acquisition égale à 2400 Hz;

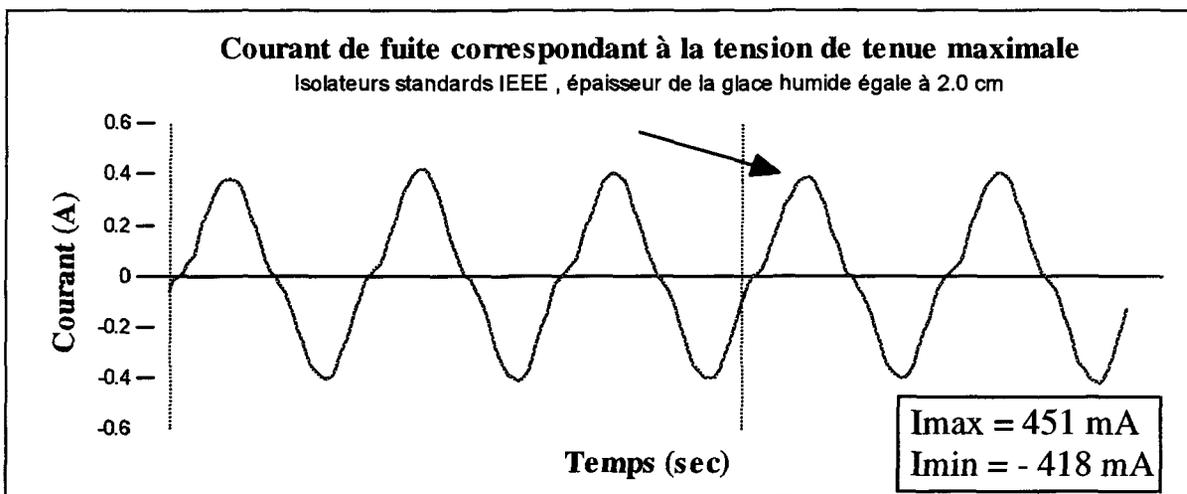
$k_i$  est un coefficient de proportionnalité de courant égal 0,1 A;

$k_v$  est un coefficient de proportionnalité de tension, modifié d'un test à un autre et déterminé en fonction de la tension d'essai appliquée.

$v_i$  et  $i_i$  sont les valeurs discrètes de la tension et du courant durant les essais de tenue. Le logiciel d'acquisition et de traitement des données, **Viewdac**, nous permet d'obtenir une bonne précision de mesure. Le tableau 4.3 présente les valeurs maximales du courant de fuite et de

l'énergie maximale dissipée par l'arc blanc, relevées lors des tests de tenue. Les résultats complets de la détermination de l'énergie dissipée par l'arc blanc et ceux du courant maximal et minimal sont présentés aux tableaux 4.7 à 4.12 de l'annexe .

Le graphique 4.6 présente un exemple d'enregistrement du courant de fuite, effectué pendant un test de tenue ainsi que les valeurs des courants maximal et minimal (Tableau 4.7 de l'annexe ).



**Fig 4.5: Variations du courant de fuite durant un test de tenue**

c. Mesure de la conductivité de l'eau collectée durant le test.

En vue de déterminer la conductivité de l'eau, on a effectué, durant les tests de contournement, le prélèvement de l'eau provenant de la fonte de la glace, résultant de l'action de l'arc électrique. On a constaté que la conductivité de l'eau de fonte est supérieure à celle de l'eau servant à la formation de glace. Les tableaux 4.13 à 4.18 de l'annexe présentent les variations de la conductivité de l'eau collectée durant les tests.

#### 4.4 Discussion

La comparaison des résultats obtenus pour les deux types de glace, soit le givre léger et la glace formée dans un régime humide (le verglas), montre que la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , est nettement plus faible dans le cas du verglas. Ce type de glace est donc plus dangereux du point de vue de la possibilité d'apparition de l'arc de contournement. L'accumulation du givre léger n'est pas un facteur permettant de favoriser l'apparition de l'arc de contournement. La différence des valeurs de tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , résulte surtout des propriétés structurales et physiques des deux types de glace employés. Ces résultats sont en accord avec ceux reportés dans les travaux antérieurs du GRIEA [5, 6].

Le tableau 4.3 présente une comparaison entre les résultats de mesure des valeurs de tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , en fonction du nombre d'isolateurs pour les deux types de glace étudiés.

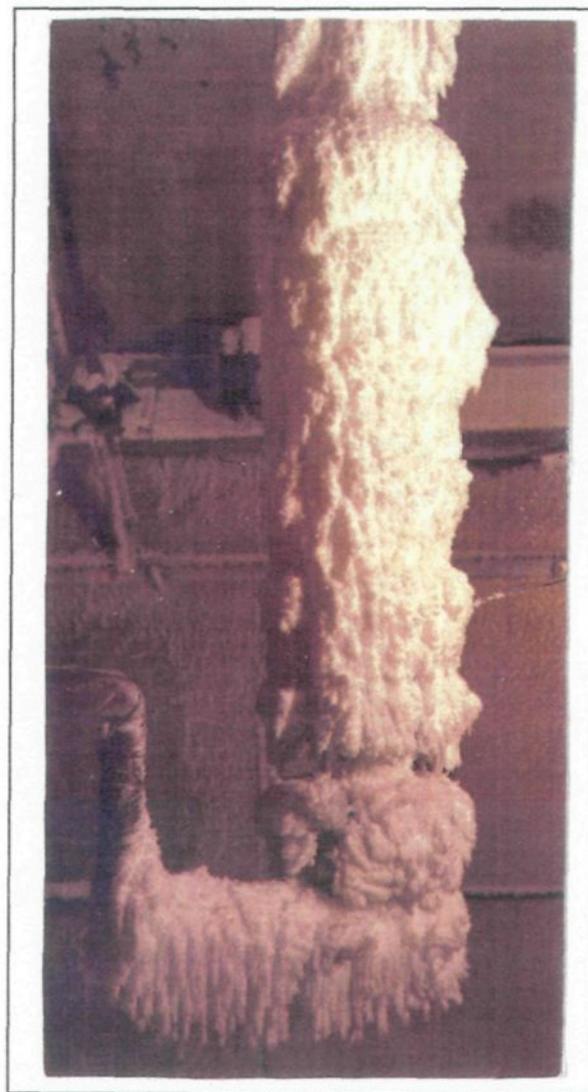
Tableau 4.3: Tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , déterminée pour les deux types de glace.

Nombre d'isolateurs , n.	Tension de tenue maximale (kV)	
	Givre léger	Verglas
6	au-dessus de la tension d'essai disponible de 120 kV	72,0
5		57,0
4		48,0
3		39,0
2		84,0
1	51,0	24,0

Les figures 4.7 et 4.8 montrent respectivement l'aspect visuel d'une chaîne d'isolateurs IEEE recouverts de givre léger et de glace formée dans un régime humide. Ces dépôts de glace correspondent à une accumulation de deux heures. Le poids moyen, dans le cas de la glace formée dans un régime humide, est égal à 6,8 kg/m.



a.



b.

**Fig.4.6: Aspect visuel des isolateurs standards IEEE recouverts de givre léger ( $\epsilon=2\text{cm}$ )  
a) avant l'application de la tension d'essai; b) après l'essai ( $V = 84 \text{ kV}$ )**



a.



b.

**Fig. 4.7: Aspect visuel des isolateurs standards IEEE recouverts de verglas ( $\epsilon = 2$  cm)**  
a) avant l'application de la tension d'essai;    b) après l'essai ( $V = 84$  kV)

## **CHAPITRE V**

**ÉTUDE DE LA TENSION DE TENUE MAXIMALE,  $V_{TM}$ ,  
DES ISOLATEURS STANDARDS IEEE RECOUVERTS DE  
GLACE EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE GLACE.**

## **5. Étude de la tension de tenue maximale, $V_{TM}$ , des isolateurs recouverts de glace en fonction de l'épaisseur de glace.**

### **5.1 Objectif**

L'objectif de cette partie des essais consiste à déterminer, en régime d'accumulation, la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , des isolateurs standards IEEE en fonction de l'épaisseur de glace accumulée,  $\epsilon$ , mesurée sur un cylindre témoin agissant comme référence .

Les essais ont été réalisés sur une chaîne de 6 unités d'isolateurs standards IEEE. L'épaisseur de glace sur le cylindre témoin a été variée de 0,5 cm à 3,0 cm, ce qui correspond à des périodes d'accumulation de 30 min et 180 min respectivement. La tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , en fonction de l'épaisseur de glace a été déterminée pour un type de glace, soit la glace formée dans un régime humide (verglas), qui est considéré comme le plus dangereux du point de vue de la possibilité d'amorçage de l'arc de contournement (c.f .chapitre 4). La tension de service,  $V_o$ , appliquée pendant l'accumulation a été égale à 10 kV par unité d'isolateur, donc 60 kV pour toute la chaîne d'isolateurs.

La tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , a été mesurée suivant la méthode décrite au chapitre 3. La valeur initiale de la tension d'essai appliquée,  $V$ , a été prédéterminée pour chaque série d'essais en se basant sur les études antérieures [5, 6].

## **5.2 Observations**

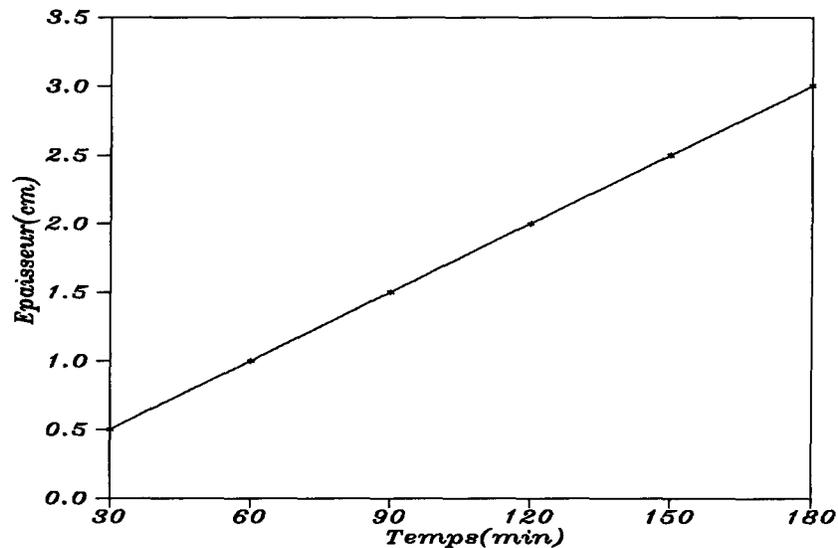
Pendant l'accumulation, correspondant à une épaisseur de glace de 0,5 cm, les longueurs des glaçons sont inférieures aux pas des isolateurs et en conséquence, elles ne comblent pas les espaces libres. Pour l'épaisseur de 1,0 cm, on a observé que certains glaçons peuvent déjà faire la jonction, mais des espaces libres sont toujours observés entre les isolateurs. Pour les épaisseurs supérieures à 1,5 cm, les ponts de glace sont solides, il n'y a plus d'espaces libres et la ligne de fuite de la chaîne est alors bien raccourcie. On a même observé que la répartition de la glace sur la surface de la chaîne d'isolateurs était généralement uniforme.

L'aspect visuel des isolateurs IEEE recouverts de glace formée dans un régime humide pour les différentes épaisseurs de glace est présenté à la figure 5.4 .

Au moment de l'application de la tension d'essai, on constate qu'un film d'eau était toujours en présence sur la surface de glace. Celui-ci a favorisé l'apparition et le développement des décharges électriques qui entraînent la fonte partielle de glace et, ainsi, la croissance du courant de fuite. Les décharges s'accroissent surtout aux extrémités des glaçons. Au fur et à mesure que le courant de fuite s'accroît, des arcs partiels apparaissent dans certains cas et donnent naissance à un arc de contournement ( Tableaux 5.3 à 5.8 de l'annexe ).

### 5.3 Résultats des essais

L'épaisseur du dépôt de glace formée dans un régime humide (le verglas), mesurée sur le cylindre témoin, varie linéairement en fonction de la durée de l'accumulation (Fig.5.1).



**Fig.5.1: Évolution de l'épaisseur de glace,  $\epsilon$ , mesurée sur un cylindre témoin en fonction de la durée de l'accumulation.**

Les valeurs de tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , des isolateurs IEEE recouverts de glace, déterminées pendant les essais, sont présentées au tableau 5.1. Ces valeurs sont aussi calculées par mètre de longueur de distance d'arc ( $V_{TM}/m$ ).

Les résultats complets sont présentés aux tableaux 5.3 à 5.9 de l'annexe. Les résultats pour une épaisseur de glace égale à 2 cm ont été extraits du chapitre 4.

On constate que les variations de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , en fonction de l'épaisseur de glace ne sont pas linéaires .

Tableau 5.1: Tension de tenue maximale par mètre de distance d'arc,  $V_{TM}/m$ , en fonction de l'épaisseur de glace.

Épaisseur de verglas	$V_{TM}$ (kV)	$V_{TM}/m$ (kV/m)	Courant maximal de fuite, $I_{max}$ (mA)	Énergie dissipée, $E_{max}$ (kJ)
0,5 cm	105	110,0	622	194
1,0 cm	90	94,24	548	620
1,5 cm	81	84,90	698	940,4
2,0 cm	72	75,40	622	1566,6
2,5 cm	66	69,10	667,5	1600
3,0 cm	66	69,10	805,17	1800

D'après le tableau 5.1, on remarque que la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , mesurée pour une épaisseur de glace égale à 0,5 cm, est à peu près 1,6 fois supérieure à celle mesurée pour 2,5 cm (ou 3,0 cm). La figure 5.2 présente les valeurs de tension de tenue maximale,  $V_{TM}/m$ , calculées par mètre de distance d'arc en fonction de l'épaisseur de glace ainsi que les valeurs maximales du courant de fuite et de l'énergie dissipée par l'arc blanc relatives aux tests ayant mené aux tenues.

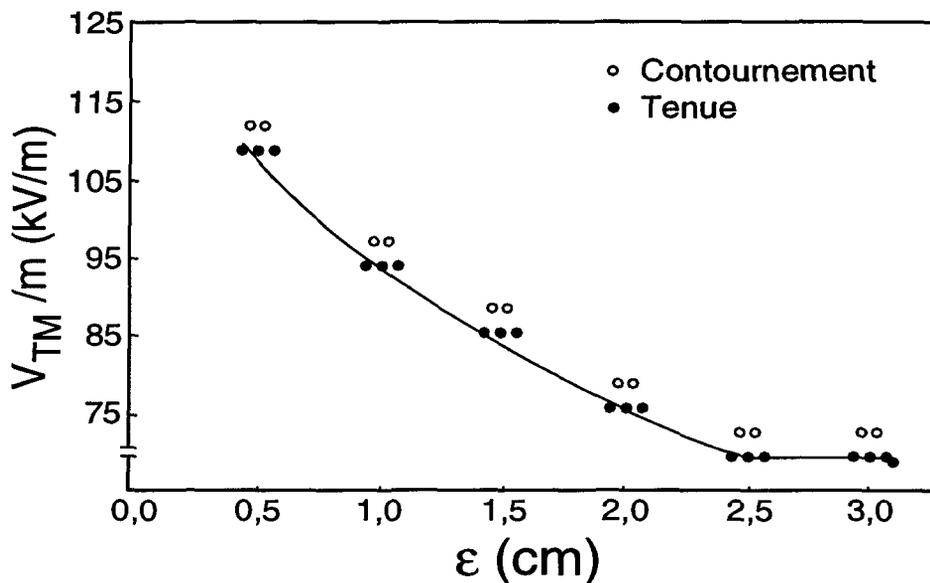


Fig.5.2: Tension de tenue maximale par mètre de distance d'arc,  $V_{TM}/m$ , en fonction de l'épaisseur de glace.

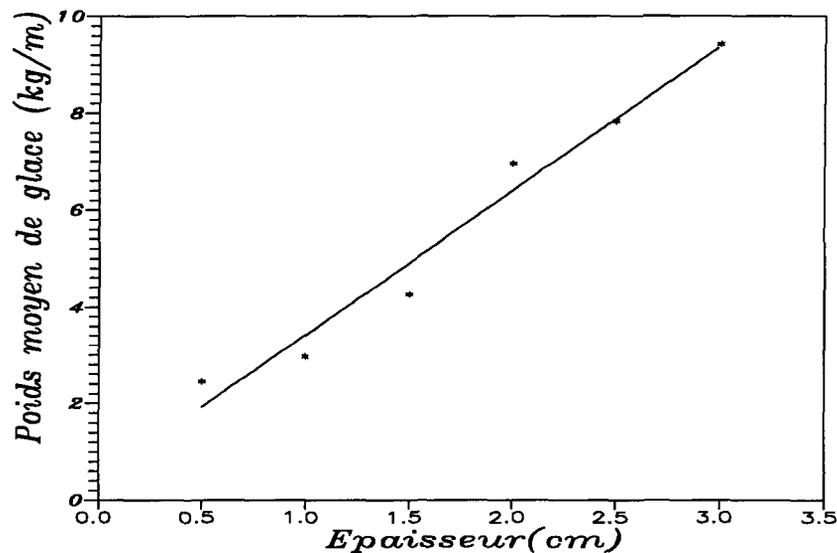
La variation de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , en fonction de l'épaisseur de verglas dans l'intervalle compris entre 0,5 cm et 2,5 cm peut-être établie par la méthode de régression suivante:

$$V_{TM} = 88,16 \varepsilon^{-0,27} ;$$

où  $V_{TM}$  est exprimé en kV, et  $\varepsilon$  en cm.

A partir d'une épaisseur égale à 2,5 cm, la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , ne varie plus. Elle demeure constante malgré la croissance de l'épaisseur du dépôt de glace (verglas) .

Pendant chaque essai, on a mesuré le poids moyen de la glace correspondant à chaque épaisseur de glace accumulée (verglas). La figure 5.3 présente la variation du poids de glace exprimée par mètre de longueur de l'isolateur en fonction de l'épaisseur de verglas.



**Fig.5.3: Poids moyen par mètre de longueur de l'isolateur en fonction de l'épaisseur de verglas mesurée.**

Le poids de la glace,  $W_g$ , varie linéairement en fonction de l'épaisseur de glace,  $\epsilon$ , suivant la droite de régression suivante:

$$W = 2,98 \epsilon + 0,43;$$

où  $W$  représente le poids de glace par mètre de longueur d'isolateur, en kg

#### **5.4 Discussion:**

L'épaisseur du dépôt de glace est un facteur important qui détermine, dans une grande mesure, la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ .

La tension de tenue maximale calculée par mètre de distance d'arc,  $V_{TM}/m$ , diminue en fonction de la croissance de l'épaisseur de glace, de la plus grande obtenue valeur 110 kV/m pour une épaisseur de 0,5 cm, jusqu'à 69,1 kV/m pour une épaisseur de 2,5 cm, soit une diminution de 37 %. Ceci est probablement dû à la croissance de la surface de glace qui entraîne la diminution de la résistance superficielle. A partir de l'épaisseur de 2,5 cm, la tension de tenue maximale,  $V_{TM}/m$ , ne varie plus. Elle demeure constante pour les épaisseurs supérieures à 2,5 cm accumulées dans les mêmes conditions atmosphériques.

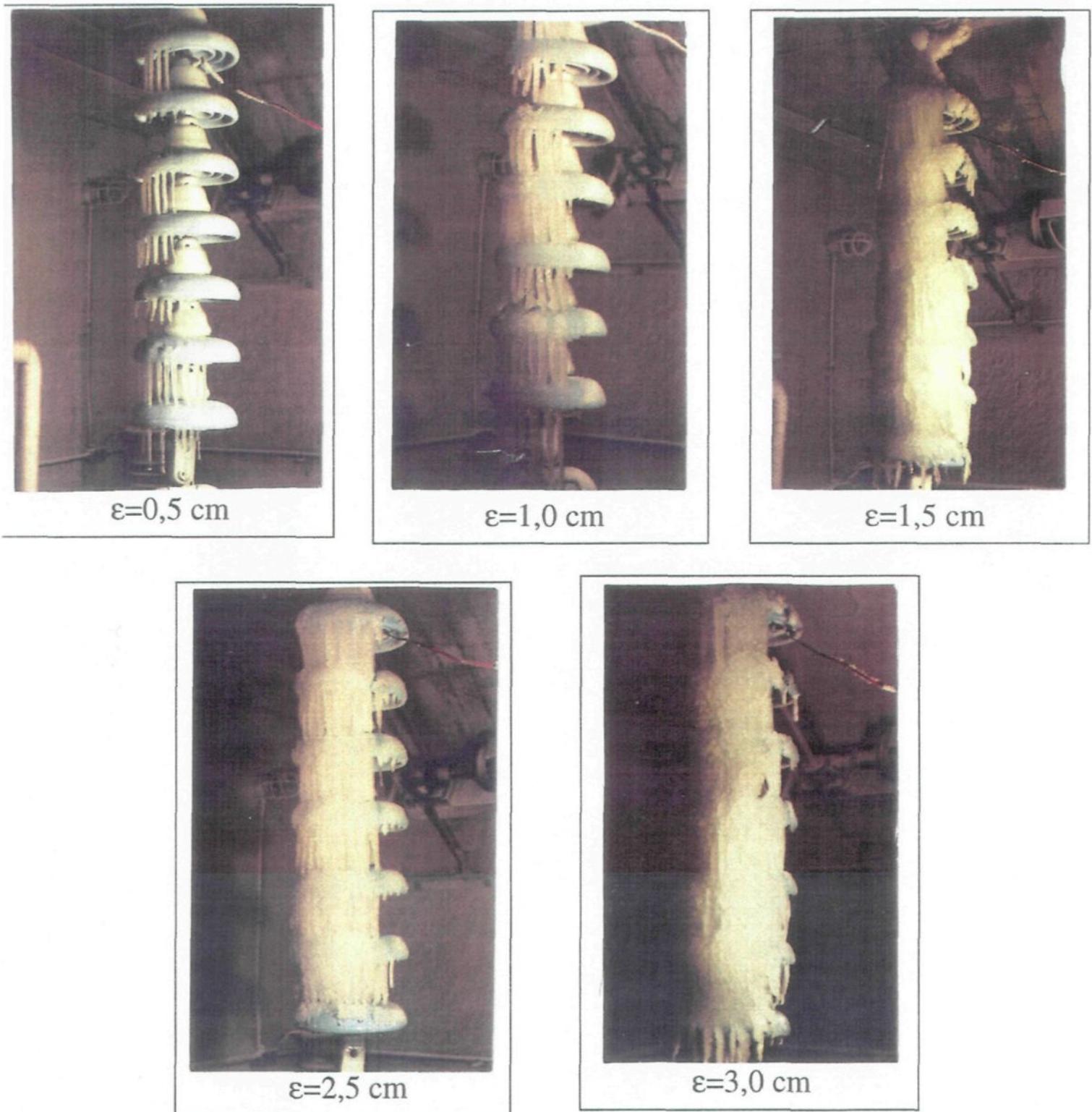
Les résultats obtenus sont conformes à ceux présentés dans les travaux effectués antérieurement [5, 6] pour une chaîne d'isolateurs IEEE comportant 5 unités.

Le tableau 5.2 présente une comparaison des stress électriques en régime maximal du gradient de tension sur les réseaux de transport d'Hydro-Québec [10] avec la tension de tenue maximale mesurée par mètre de distance d'arc des isolateurs recouverts de glace pour une épaisseur de 2,0 cm. Le tableau a été complété pour des épaisseurs de glace de 2,5 cm et 3,0 cm.

Tableau 5.2 : Comparaison des stress électriques en régime maximal de tension sur le réseau d'Hydro-Québec avec la tension de tenue maximale,  $V_{TM}/m$ , des isolateurs IEEE pour des épaisseurs de glace égales à 2,0; 2,5 et 3,0 cm.

Niveau de tension des réseaux (kV)	Stress électrique en régime maximal du gradient de tension (kV/m)	Tension de tenue maximale des isolateurs IEEE ( 6 unités) recouverts de glace (kV/m)		
		$\epsilon = 2,0$ cm	$\epsilon = 2,5$ cm	$\epsilon = 3,0$ cm
230	77.2	75,4	69,1	69,1
315	78.9			
735	90.2			

Le tableau 5.2 montre que les valeurs de tension de tenue maximale,  $V_{TM}/m$ , déterminées pour des épaisseurs de glace supérieures à 1,5 cm sont inférieures aux stress électriques apparaissant sur les réseaux à très haute tension, 230, 315 et 735 kV, en régime maximal du gradient de tension. Cette comparaison montre que de telles accumulations de glace sur les isolateurs des lignes à très haute tension pourrait produire des contournements sur la chaîne d'isolateurs.



**Fig.5.4:** Aspect visuel des isolateurs standards IEEE recouverts de verglas pour différentes épaisseurs : 0,5; 1,0, 1,5; 2,5 et 3,0 cm.

## **CHAPITRE VI**

### **ÉTUDE DE LA TENSION DE TENUE MAXIMALE, $V_{TM}$ , DES ISOLATEURS STANDARDS IEEE RECOUVERTS DE GLACE EN FONCTION DE LA CONDUCTIVITÉ DE L'EAU**

## **6. Étude de la tension de tenue maximale, $V_{TM}$ , des isolateurs recouverts de glace en fonction de la conductivité de l'eau,.**

### **6.1 Introduction**

Le but de la présente partie des essais consiste à déterminer la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , des isolateurs standards IEEE recouverts de glace en fonction de la conductivité de l'eau,  $\sigma$ , servant à l'accumulation de la glace.

Les essais de contournement ont été réalisés sur une chaîne de six unités d'isolateurs recouverts de glace. Les valeurs suivantes de conductivité de l'eau,  $\sigma$ , ont été utilisées pour cette étude: 4 , 10, 20, 40 et 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La tension de tenue maximale , $V_{TM}$ , pour la conductivité  $\sigma$ , égale à 80  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , a été déterminée durant les essais précédents (c.f.chapitre 4). Les valeurs de conductivité de l'eau ont été ajustées par la dissolution dans de l'eau distillée ayant une conductivité propre de l'ordre de 4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et des quantités nécessaires de chlorure de sodium (NaCl).

### **6.2 Observations**

Les figures 6.4 et 6.5 présentent les aspects visuels de la glace formée avec de l'eau ayant des conductivités respectives de 4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et de 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . On y observe que la forme et la quantité de glace accumulée sur la surface des isolateurs dépendent, dans une certaine mesure, du niveau de conductivité de l'eau utilisée. Il a été constaté que l'intensité des

décharges s'accroît avec l'augmentation de la conductivité de l'eau,  $\sigma$ , entraînant ainsi la fonte des glaçons. Dans le cas d'une conductivité de  $4 \mu\text{S/cm}$ , il est à observer que la distribution de la glace a été uniforme le long de la chaîne d'isolateurs. Pour une conductivité supérieure, telle que  $150 \mu\text{S/cm}$ , on constate une distribution moins uniforme de la glace en raison de l'activité électrique intense se manifestant durant l'accumulation.

### 6.3 Résultats des essais

Le tableau 6.1 présente les variations du poids total de glace accumulée pour les différentes conductivités de l'eau. Il est à constater que le poids moyen et l'écart type de glace sont respectivement de 5,9 kg et de 0,54 kg.

On constate aussi que le courant de crête maximal de fuite obtenu à partir des essais ayant mené à des tenues, augmente suivant la croissance de la conductivité de l'eau.

Tableau 6.1: Poids de glace accumulée en fonction de la conductivité de l'eau .

Conductivité de l'eau mesurée (moyenne) ( $\mu\text{S/cm}$ )	Poids de l'eau éjecté des isolateurs, $W_r$ , (kg)	Poids de glace $W_g$ (kg)	Poids total de glace, $W_t$ (kg)	Courant de crête maximal de fuite, $I_{\text{max}}$ (mA)
2,9	0,8	5,8	6,6	362
9,0	1,0	5,5	6,5	420
20,5	1,6	3,9	5,5	460
39,8	1,5	4,2	5,7	510
79,5	0,4	5,8	6,2	622
149,3	1,3	3,8	5,1	670

Le tableau 6.2 présente les variations de la tension de tenue maximale par mètre de distance d'arc,  $V_{\text{TM}}/\text{m}$ , en fonction de la conductivité de l'eau. On constate que la variation

de la conductivité de l'eau influencent sérieusement le comportement électrique des isolateurs. En effet, la conductivité de l'eau élevée provoque une réduction sensible de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}/m$ . Les essais ont démontré que la croissance de la conductivité de l'eau,  $\sigma$ , de 4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a entraîné une réduction de la tension de tenue maximale, de 137,2 kV/m à 69,1 kV/m, soit environ deux fois.

Tableau 6.2: Tension de tenue maximale par mètre de distance d'arc,  $V_{TM}/m$  (kV/m), en fonction de la conductivité de l'eau,  $\sigma$ .

Nombre d'unités	Conductivité de l'eau mesurée (moyenne) ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$V_{TM}$ (kV)	$V_{TM}/m$ (kV/m)	Énergie dissipée, $E_{max}$ (kJ)
5	2,9	111	137,2	1000
6	9,0	96	100,5	1200
	20,5	93	97,4	1400
	39,8	84	88,0	1103
	79,5	72	75,4	1600
	149,3	66	69,1	1650

La figure 6.1 présente la tension de tenue maximale par mètre de distance d'arc,  $V_{TM}/m$ , en fonction de la conductivité de l'eau.

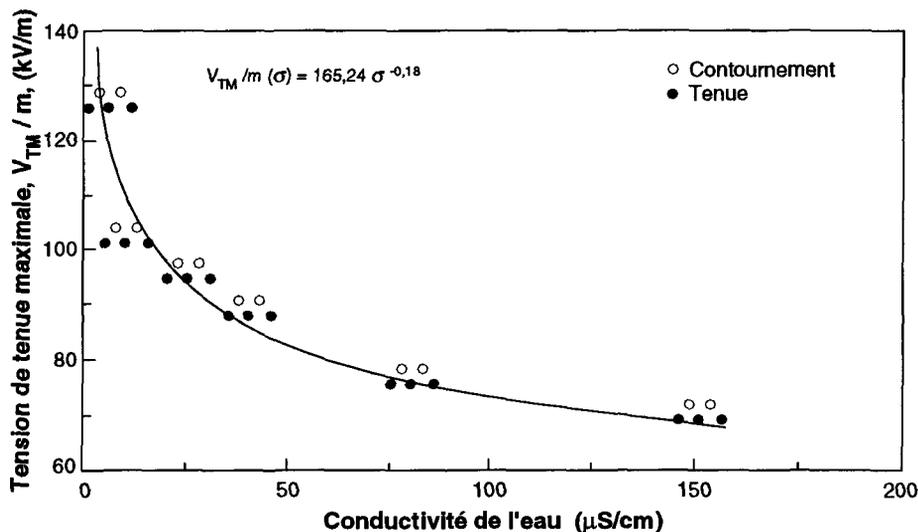


Fig 6.1: Tension de tenue maximale par mètre de distance d'arc  $V_{TM}/m$ , en fonction de la conductivité de l'eau.

La variation de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}/m$ , d'une chaîne de 6 unités d'isolateurs IEEE recouverts de glace en fonction de la conductivité de l'eau, dans l'intervalle compris entre 4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , peut-être exprimée approximativement par la formule suivante :

$$V_{TM}/m = 165,24 \sigma^{-0,18} ;$$

où  $V_{TM}/m$  est exprimée en kV/m,

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

Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans les travaux antérieurs du GRIEA sur une colonne isolante [6].

Les résultats complets des tests sont présentés aux tableaux 6.3 à 6.8 de l'annexe.

#### **6.4 Discussion**

La tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , diminue suivant la croissance de la conductivité de l'eau. Pour une conductivité de 4  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , les tests effectués en vue de déterminer la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , sur une chaîne comportant 6 isolateurs n'ont pas mené au contournement, faute d'une source de tension assez élevée (la tension nominale du transformateur est égale à 120 kV), ce qui nous a contraint à effectuer ces tests sur une chaîne ayant 5 unités d'isolateurs.

Dans le cas des faibles conductivités (inférieures à 40  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) on constate, au début de l'accumulation, un courant de fuite très faible. Cependant, on a observé à partir d'une épaisseur supérieure à 1 cm, des décharges électriques intenses apparaissent surtout sur l'isolateur relié à la borne de haute tension, ce qui entraîne une augmentation du courant.

Pour ce qui est de l'eau ayant une conductivité de 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , de fortes décharges entraînant la fonte partielle des glaçons commencent à se manifester généralement à partir des 20 premières minutes d'accumulation, Dans la plupart des cas, une fois l'accumulation terminée, les glaçons arrivent quand même à joindre l'isolateur inférieur.

Parallèlement à la détermination de la tension de tenue maximale,  $V_{\text{TM}}$ , le courant de fuite et l'énergie dissipée par l'arc blanc ont été étudiés. Le tableau 6.1 et les figures 6.2 et 6.3 présentent les variations du courant de fuite ( $I_{\text{max}} = f(\sigma)$ ) et de l'énergie dissipée ( $E_{\text{max}} = g(\sigma)$ ) en fonction de la conductivité de l'eau, relatives aux tests aboutissant aux tenues. Les courbes  $I_{\text{max}} = f(\sigma)$  et  $E_{\text{max}} = g(\sigma)$  sont établies par la méthode de régression exponentielle:

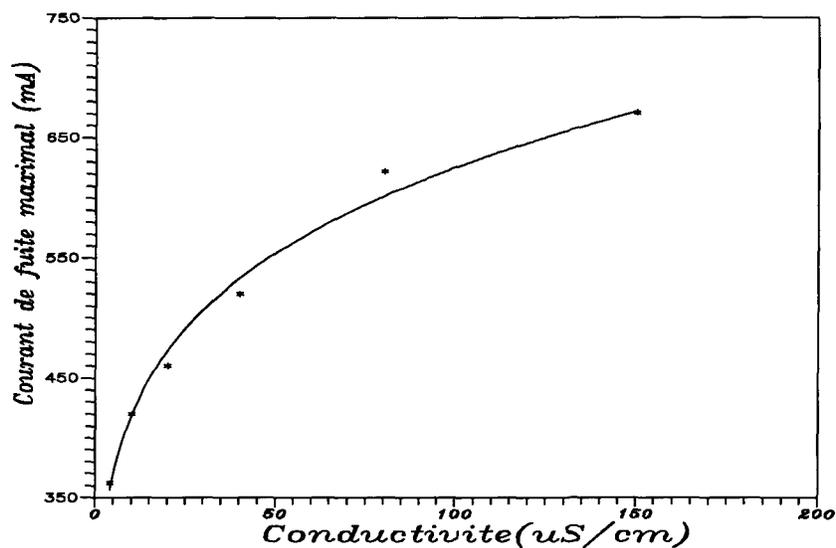
$$I_{\text{max}} = f(\sigma) = 280 \sigma^{0,147} ,$$

$$E_{\text{max}} = g(\sigma) = 912,86 \sigma^{0,126} ,$$

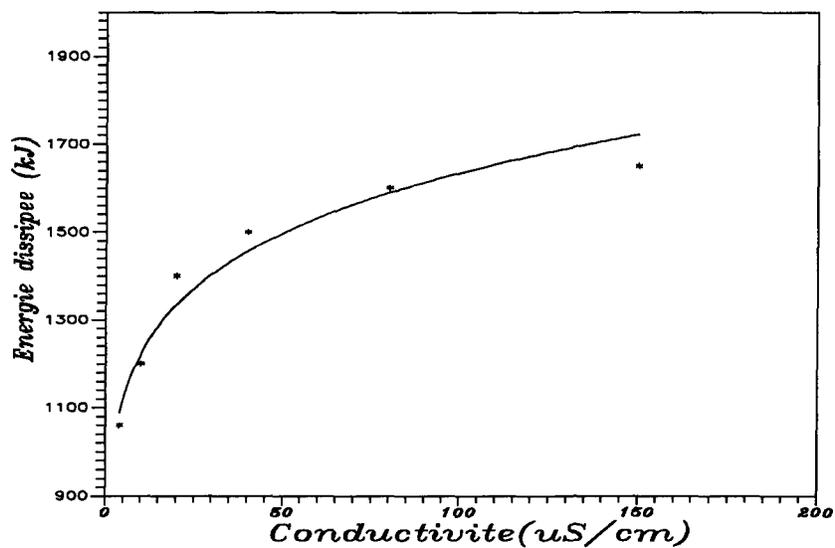
où  $I_{\text{max}}$ , courant maximal (valeurs de crête) exprimé en mA;

$E_{\text{max}}$ , est exprimée en kJ.

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



**Fig.6.2: Courant de fuite maximal en fonction de la conductivité de l'eau**



**Fig.6.3: Énergie maximale dissipée par l'arc en fonction de la conductivité de l'eau.**

Les résultats obtenus montrent que le courant de fuite et l'énergie dissipée augmentent suivant la croissance de la conductivité de l'eau. À partir d'une conductivité de l'eau à peu près égale à 80  $\mu\text{S/cm}$ , l'énergie maximale dissipée par l'arc blanc tend vers une valeur de saturation.

L'eau de fonte de la glace, entraînée par l'action de l'arc électrique, a été collectée en vue d'en mesurer la conductivité.

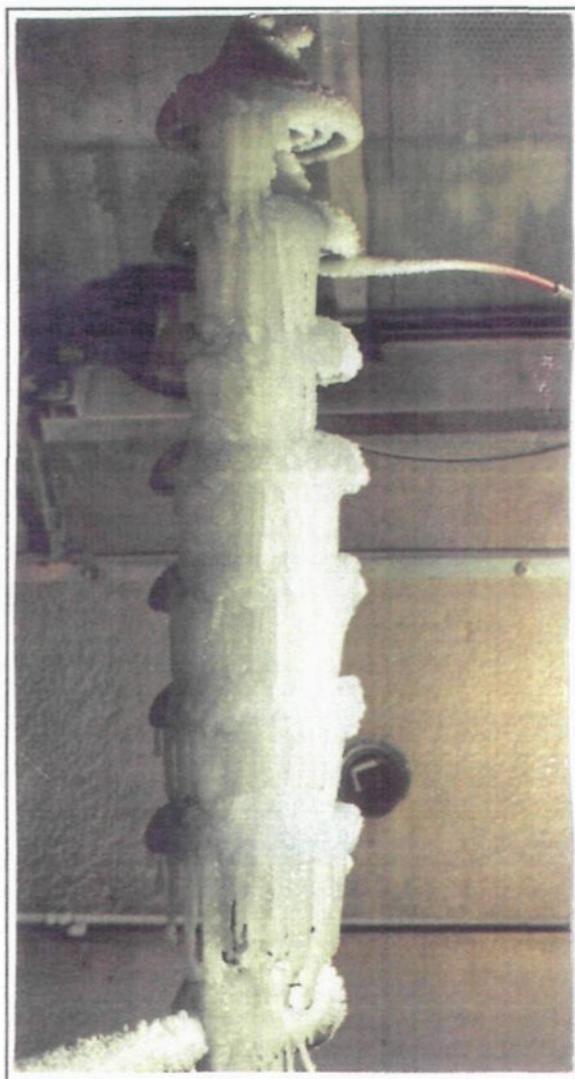
Le tableau 6.3 présente le rapport de la conductivité de l'eau de fonte par rapport à celle utilisée pour la formation de glace ( $\sigma_{\text{fmoy}}/\sigma_{\text{imoy}}$ ) durant les tests menant à la tenue. Les résultats complets concernant la conductivité et le poids de l'eau de fonte sont présentés aux tableaux 6.9 à 6.14 de l'annexe .

Tableau 6.3 : Comparaison de la conductivité de l'eau servant à l'accumulation avec celle provenant de la fonte.

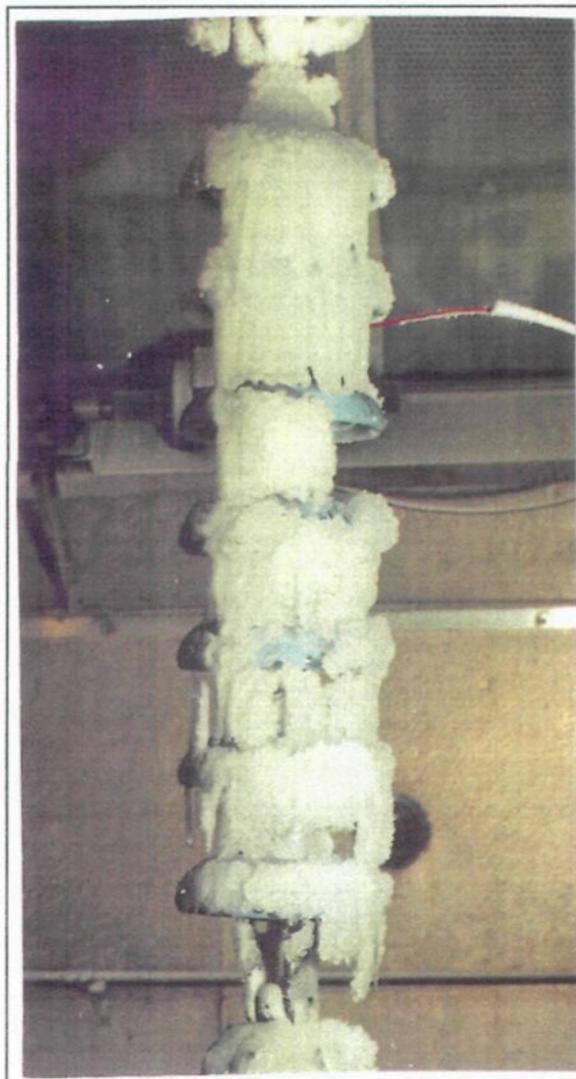
Conductivité $\sigma_{\text{imoy}}$ (moyenne) ( $\mu\text{S/cm}$ )	Volume de fonte moyen (ml)	Conductivité mesurée $\sigma_{\text{fmoy}}$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\sigma_{\text{fmoy}} / \sigma_{\text{imoy}}$
2,9	814	64	22,1
9,0	1068	86	9,5
20,5	1625	110	5,4
39,8	1593	149	3,7
79,5	412	206	2,6
149,3	1325	229	1,5

Durant l'essai de contournement, l'eau de fonte provient des glaçons et de la glace fondues aux abords et sur des jupes de la chaîne d'isolateurs.

Il est à constater que la conductivité de l'eau de fonte augmente avec la croissance de la conductivité de l'eau servant à l'accumulation de glace. Le rapport de ces deux conductivités est très élevé pour les conductivités faibles et diminue sensiblement pour les conductivités supérieures (Tableau 6.3). La conductivité élevée de l'eau de fonte s'explique par le fait que, durant l'accumulation de glace sur la chaîne des isolateurs, les impuretés contenues dans l'eau sont repoussées à la surface de glace et diluées dans le film d'eau. Durant la période de fonte, l'eau de fonte provenant surtout de la partie extérieure (superficielle) de la glace et des glaçons a donc une conductivité élevée. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans les travaux antérieurs [26, 37].



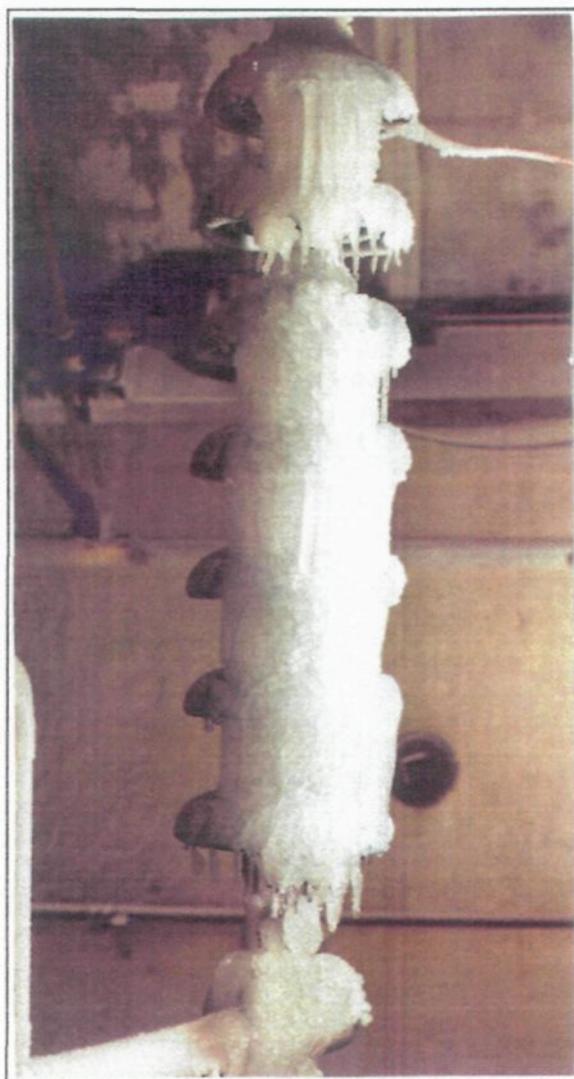
a.



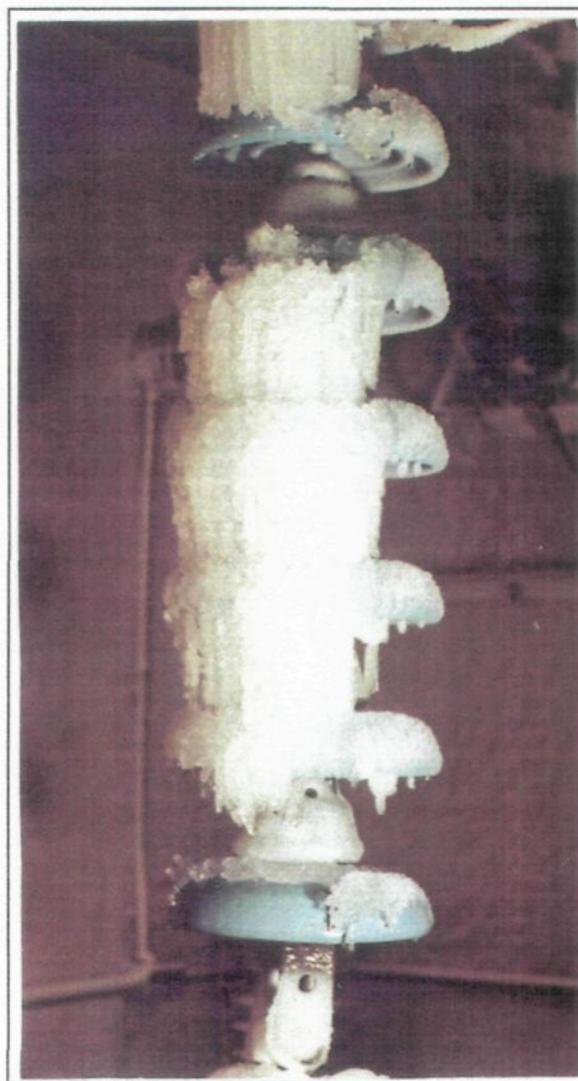
b.

**Fig.6.4: Aspect visuel d'une chaîne de 5 isolateurs standards IEEE recouverts de verglas, formée d'eau ayant une conductivité de  $4 \mu\text{S}/\text{cm}$  ( $\epsilon = 2 \text{ cm}$ ).**

**a) avant l'application de la tension d'essai; b) après l'essai ( $V = 108 \text{ kV}$ ).**



a.



b.

**Fig.6.5: Aspect visuel d'une chaîne de 6 isolateurs standards IEEE recouverts de verglas, formée d'eau ayant une conductivité de  $150 \mu\text{S}/\text{cm}$  ( $\epsilon = 2 \text{ cm}$ ).**

**a) avant l'application de la tension d'essai; b) après l'essai ( $V = 66 \text{ kV}$ ).**

## **CHAPITRE VII**

### **COMPARAISON ENTRE L'EFFET DE LA GLACE ET L'EFFET DE LA POLLUTION**

## **7. Comparaison entre l'effet de glace et l'effet de pollution**

### **7.1 Introduction**

Les conséquences de la glace accumulée sur les performances des isolateurs des lignes aériennes et des postes peuvent être, dans une certaine mesure, comparées avec celles de la pollution. En effet, ces deux facteurs détériorent les performances électriques des isolateurs de sorte que l'apparition de contournements devienne possible.

Dans le cas des isolateurs recouverts de glace, la tension minimale de contournement,  $V_{MF}$ , dépend surtout, pour un type de glace donné, de l'épaisseur et de la conductivité de la glace. Pour les isolateurs pollués la tension de tenue à 50 %,  $V_{50\%}$ , est déterminée par le taux de contamination accumulée à la surface, exprimé par une contamination saline de référence appelé aussi "une densité équivalente du dépôt de sel" (ESDD: Équivalent Salt Density Deposit). La comparaison de la sévérité de la glace avec celle de la pollution atmosphérique permet de trouver une certaine correspondance en ce qui concerne la tension de tenue à 50 %,  $V_{50\%}$ , entre l'épaisseur et la conductivité de glace et le taux de contamination saline.

### **7.2 Sources de pollution**

Les sources de pollution peuvent être d'origine naturelle ou anthropogénique [17]. En effet, dans le cas des lignes aériennes et des postes installés au bord de la mer, les embruns

portés par le vent déposent sur les isolateurs une couche de sel. À la longue, cette couche, lorsque humidifiée par un brouillard, devient conductrice. D'autre part, au voisinage des usines polluantes, par exemple les usines métallurgiques ou chimiques, les isolateurs se recouvrent de particules solides infimes, faiblement conductrices mais hygroscopiques. Dans des conditions de forte humidité, à savoir le brouillard ou la pluie, la dissolution des sels contenus dans ces particules provoque la formation d'un électrolyte.

Les deux concepts cités constituent deux cas typiques de pollution où la contamination des surfaces isolantes est poussée à l'extrême. Il serait pourtant erroné de penser que les régions éloignées de la mer ou des centres industriels sont exemptées de pollution. La pollution domestique produite par les appareils de chauffage des habitations, les véhicules et la pollution agricole sont aussi omniprésentes dans notre environnement.

Le tableau 7.1 [17] résume certains contaminants, leurs sources et les méthodes utilisés pour leur détermination.

Tableau 7.1: Contaminants: sources et méthodes de mesure.

Contaminants naturelles et anthropogéniques	Sources probables de pollution	Méthodes de mesure
$H^+$	atmosphère	Procédé d'électrolyse
$NO, NO_2, CO_2, SO_2, NO_4^-, NO_4^-, NH_3, NH_4^+$	atmosphère, fertilisation, combustion	spectrométrie
$SO_4, NO_3^-, NH_4^+, Cl^-$	mer, brouillard, précipitations	chromatographie
$Na^+, Mg^{++}, Ca^{++}$ et $K^+$ .	mer	Émission atomique ou absorption

La sévérité de la pollution des isolateurs dépend des facteurs géographiques et aussi des conditions climatiques.

### **7.3 Relation entre la tension de tenue, $V_{50\%}$ , et le niveau de pollution**

E.A.Cherney et al. [45] présentent les moyennes des tensions de tenue à 50 %, mesurées au sein de différents laboratoires, en fonction de la densité du dépôt de sel (ESDD) mesurée sur des chaînes d'isolateurs de porcelaine standards IEEE.

Les résultats de cette étude sont résumés dans le tableau 7.2

Tableau 7.2: Tension de tenue 50 %,  $V_{50\%}$ , des isolateurs IEEE en fonction de la densité équivalente du dépôt de sel (ESDD) par unité d'isolateur.

<b><math>V_{50\%}</math> (kV)</b>	18,94	13,35	11,0
<b>ESDD (<math>\text{mg}/\text{cm}^2</math>)</b>	0,02	0,07	0,20
<b>Écart-type (kV/m)</b>	2,328	2,088	1,91

Ces valeurs peuvent être exprimées à l'aide de la formule de régression suivante:

$$V_{50\%} = 7,35 (\text{ESDD})^{-0,24} ,$$

où  $V_{50\%}$  est la tension de tenue 50 % calculée par unité d'isolateur

et ESDD est la densité équivalente du dépôt de sel en  $\text{mg}/\text{cm}^2$ .

Cette relation est déterminée avec un coefficient de corrélation  $r^2$  égale à 0,988.

#### 7.4 Comparaison entre la sévérité de la glace et celle de la pollution.

L'étude de l'équivalence de l'effet de la glace et celui de la pollution consiste à effectuer une comparaison entre la tension minimale de contournement déterminée en fonction de l'épaisseur de glace formée dans un régime humide (le verglas) et la tension de tenue à 50 %,  $V_{50\%}$ , [10], déterminée en fonction du niveau de pollution.

Étant donné que les valeurs de tension minimale de contournement,  $V_{MF}$ , déterminées pour les différentes épaisseurs de glace sont pratiquement identiques à celles mesurées selon la méthode de tension de tenue à 50 %,  $V_{50\%}$ , il est possible d'utiliser les valeurs de  $V_{MF}$  pour comparer les performances d'isolation sous glace avec celles en régime de contamination.

L'étude a été faite en comparant pour les valeurs de tension minimale de contournement,  $V_{MF}$ , pour les différentes épaisseurs de verglas recouvrant les isolateurs IEEE, selon les résultats présentés dans le chapitre 5 et les valeurs de la tension de tenue à 50 %,  $V_{50\%}$ , établie pour les différents niveaux de pollution [45].

Le taux de pollution équivalent à une épaisseur de glace a été calculé à partir de la relation présentée dans le document manuscrit fourni par l'IREQ :

$$\ln(ESDD) = \frac{-1}{0,23868} \ln\left(\frac{V_{MF}}{7,3522}\right)$$

où  $V_{MF}$  est la tension minimale de contournement par unité d'isolateur correspondant à une épaisseur de glace donnée.

Les résultats de comparaison sont présentés dans le tableau 7.3.

Tableau 7.3 : Comparaison entre la sévérité de l'épaisseur de la glace et celle de la pollution

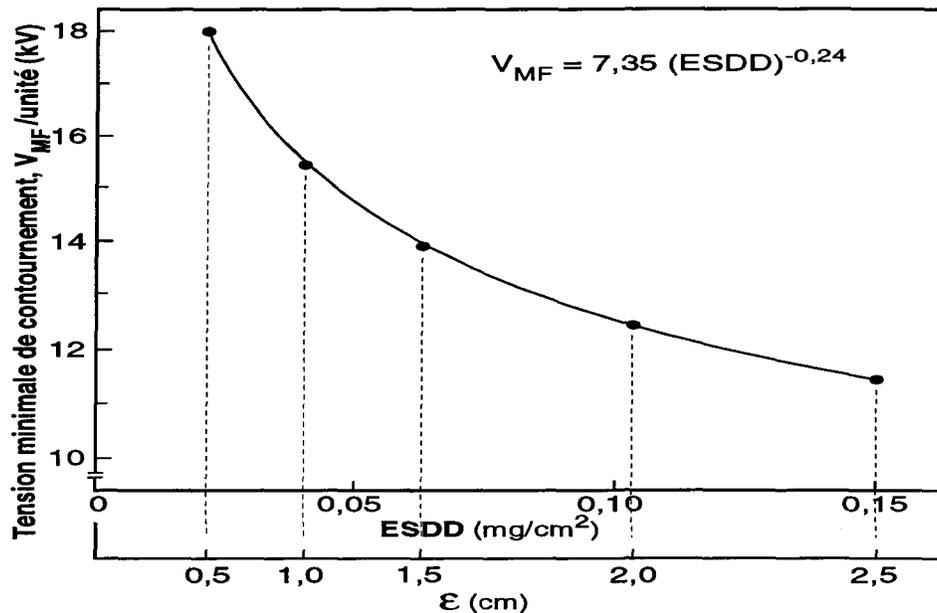
Épaisseur de glace (cm)	$V_{MF}$ (kV)	$V_{MF}/\text{unité}$ (kV)	Taux équivalent de pollution (ESDD) ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	Classe de pollution
0,5	108	18,0	0,023	faible
1,0	93	15,5	0,044	
1,5	84	14,0	0,067	
2,0	75	12,5	0,108	moyenne
2,5	69	11,5	0,153	

Les résultats obtenus montrent que l'influence de la croissance de l'épaisseur de glace correspond avec celle de l'augmentation du taux de pollution. Cette tendance reste valable jusqu'à une épaisseur de glace atteignant une valeur de saturation égale à 2,5 cm, ce qui correspond à un taux de pollution égal à  $0,153 \text{ mg}/\text{cm}^2$ .

Selon la publication 815 CEI 1986, on considère que :

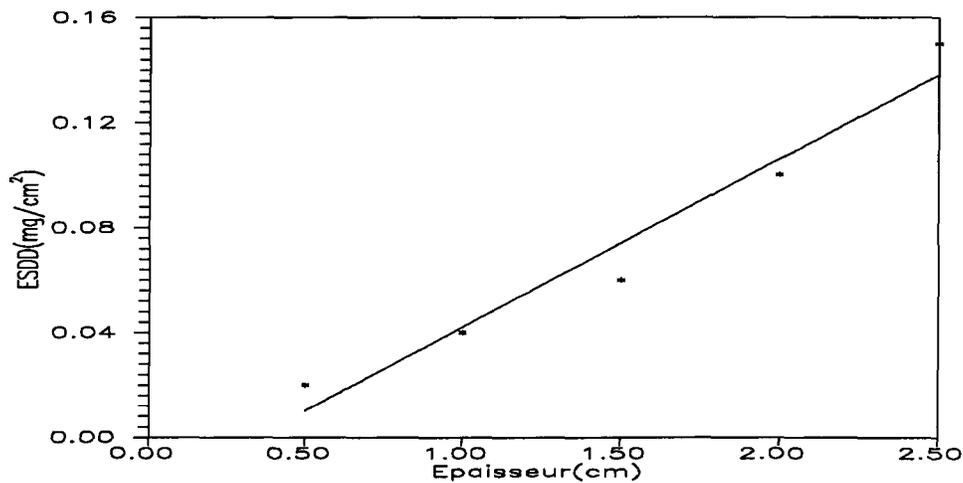
- les épaisseurs de glace de 0,5 cm à 1,5 cm correspondent à un niveau de pollution faible.
- les épaisseurs de glace de 2,0 cm à 3,0 cm correspondent à un niveau de pollution moyenne.

La figure 7.1 présente la variation de la tension minimale de contournement,  $V_{MF}/\text{unité}$ , en fonction de la densité équivalente du dépôt de sel (ESDD) et de l'épaisseur de glace,  $\epsilon$ .



**Fig.7.1: Tension minimale de contournement par unité d'isolateurs en fonction de la densité équivalente du dépôt de sel et de l'épaisseur de glace.**

La figure 7.2 présente la relation entre la densité équivalente du dépôt de sel (ESDD) et l'épaisseur de verglas.



**Fig 7.2: Relation entre la densité équivalente du dépôt de sel et l'épaisseur de glace.**

## 7.5 Discussion

L'effet de l'accumulation de glace sur la tension minimale de contournement,  $V_{MF}$ , des isolateurs peut être comparé avec l'effet de la pollution .

Plusieurs chercheurs ont mené des études en vue de déterminer l'effet combiné de la glace et de la pollution sur la tension minimale de contournement. On peut citer, à titre d'exemple, les travaux des auteurs suivants:

L'étude effectuée par M. Kawai [13] a révélé que la tension minimale de contournement des isolateurs propres et recouverts de glace (la quantité de glace n'était pas fournie) est presque équivalente à celle des isolateurs contaminés dont le taux de contamination (ESDD) est égal à  $0,1 \text{ mg/cm}^2$ .

L.C. Phan et H. Matsuo [26] ont démontré qu'en présence d'un taux de pollution très léger (  $0,01 \text{ mg/cm}^2$  et  $0,02 \text{ mg/cm}^2$  ) et du givre lourd, la tension minimale de contournement des isolateurs en verre est d'environ 25 % au-dessus de la tension de service.

E.A Cherney [45] a noté que le contournement ne peut se produire sous une tension de service appliquée aux isolateurs propres ou recouverts de glace. Celui-ci peut se produire, par contre, à un taux de pollution (ESDD) égal à  $0,4 \text{ mg/cm}^2$ .

Notre étude comparative a démontré qu'il est possible d'établir une certaine équivalence entre l'épaisseur de glace accumulée et le taux de pollution. Par exemple, les valeurs de tension minimale de contournement,  $V_{MF}$ , par unité d'isolateurs IEEE recouverts de glace et déterminées pour une épaisseur de glace égale à 0,5 cm et 2,5 cm, correspondent à celles relatives à des taux de pollution (ESDD) de  $0,023 \text{ mg/cm}^2$  et  $0,153 \text{ mg/cm}^2$  respectivement.

**CHAPITRE VIII**  
**CONCLUSION GÉNÉRALE**

## **Conclusion générale**

Les résultats des essais de contournement des isolateurs standards IEEE

recouverts de glace permettent de tirer les conclusions suivantes :

1. Les dépôts de glace formés sur la surface des isolateurs peuvent mener, dans certains cas, à l'apparition de l'arc de contournement.
2. La tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , augmente en fonction du nombre d'isolateurs pour les deux types de glace, soit le givre léger et la glace formée dans un régime humide (le verglas).

Dans le cas du givre léger, les valeurs de tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , pour une et deux unités d'isolateurs, sont relativement élevées et égales à 52 kV et 84 kV respectivement. Les tests effectués sur une chaîne d'isolateurs comportant successivement 3, 4 et 5 isolateurs n'ont pas mené au contournement, faute d'une source de tension suffisamment élevée.

Dans le cas de la glace formée dans un régime humide (le verglas), la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , a augmenté en fonction du nombre d'isolateurs recouverts de glace humide de 24 kV pour une unité d'isolateurs à 72 kV pour six unités.

3. Les valeurs de tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , pour le givre léger sont plus élevées que celles de la glace formée dans un régime humide (le verglas). Les résultats obtenus montrent que ce dernier présente le type de glace le plus dangereux du point de vue de la possibilité de l'amorçage de l'arc de contournement.
4. La tension de tenue maximale,  $V_{TM}/m$ , calculée par mètre de distance d'arc, diminue avec la croissance de l'épaisseur du dépôt de glace, de 110 kV/m pour une épaisseur de 0,5 cm jusqu'à 69,1 kV/m pour une épaisseur de 2,5 cm, soit une diminution de 37 %. À partir de cette épaisseur, la tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , tend vers une valeur de saturation et demeure constante.
5. L'augmentation de la conductivité de l'eau entraîne une décroissance de la valeur de tension de tenue maximale,  $V_{TM}/m$ , calculée par mètre de distance d'arc. Les essais ont démontré qu'une croissance de la conductivité de l'eau allant de 4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a entraîné une réduction de la tension de tenue maximale,  $V_{TM}/m$ , de 137,2 kV/m à 69,1 kV/m, soit environ deux fois.
6. La comparaison entre la tension minimale de contournement,  $V_{MF}$ , des isolateurs recouverts de glace avec la méthode de la tension de tenue 50 % ( $V_{50\%}$ ) des isolateurs pollués peut permettre d'établir une certaine correspondance entre la sévérité de la glace et celle de la pollution. Par exemple, suivant la relation obtenue, un dépôt de

un dépôt de glace d'une épaisseur égale à 2,5 cm correspond à un taux de pollution égal à  $0,153 \text{ mg/cm}^2$  .

## **CHAPITRE IX**

## **RÉFÉRENCES**

## 9. RÉFÉRENCES

- [1] D.G. Havard et C.J. Pon, "Gallopings Control-Status 1988," Proceedings of the 6th International Workshop On Atmospheric Icing of Structures, Paris, France, pp.314-318, September, 1988.
- [2] K.F. Jones, "The Effect of Horizontal and Torsional Coupling on Vertical Galloping, " Proceedings of the 6th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures Budapest, Hungary, pp.143-148, September 1993.
- [3] T. McCormic et J.C. Pohlman, "Study of Compact 220 kV Line System Indicates Need for Microscale Meteorological Information," Proceedings of the 6th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Budapest, Hungary, pp.155-159, September 1993.
- [4] F. Kiessling et J. Ruhnau, "Ice Loads on Overhead Power Lines in Germany and their impact on Reliability and Design, " Proceeding of the 6th International Workshop on the Atmospheric Icing of Structures, Budapest, Hungary, pp.127-132, September 1993.
- [5] M. Farzaneh et J. Kiernicki, "Flashover Problems Caused by Ice Build-up on Insulators," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 2, pp. 5-17, March/April 1995.
- [6] M. Farzaneh et J.F. Drapeau , "AC Flashover Performance of Insulators Covered with Artificial Ice," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, pp. 1038-1051, April 1995.
- [7] M. Farzaneh, J. Kiernicki et M.A. Dallaire, "AC and DC Flashover Performance of Iced-Covered Insulators during a De-Icing Period," 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Tokyo, Japan, Paper No. B-48, pp. 1-4, September 1990.
- [8] A.E. Boyer et J.R. Meale, "Insulation Flashover under Icing Conditions on the Ontario-Hydro 500 kV Transmission System," CEA Spring Meeting, Montreal, Canada, pp. 20, March 1988.
- [9] 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, pp.1-25, décembre 1989.

- [10] M. Farzaneh , J. Kiernicki, R. Chaarani, J.F. Drapeau et R. Martin, "Influence of Wet Grown Ice The AC Flashover Performance of Ice-Covered Insulators," 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, Austria, Paper No. 3176, pp. 4, August/September 1995.
- [11] M. Farzaneh, J. Kiernicki et R. Martin, "A Laboratory Investigation of the Flashover Performance of Outdoor Insulators Covered With Ice," Proceeding of 4th International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, Brisbane, Australia, pp. 483-486, July 3-8, 1994.
- [12] M. Farzaneh, M.A.Dallaire, O.T.Melo et A.E.Boyer, "Interception of Supercooled Droplets by Energized Line Insulators," Sixth International Symposium On High Voltage Engineering , New Orleans ,LA, USA, August 28- September 1989.
- [13] M. Kawai, "AC Flashover Test at Project UHV on Ice-Coated Insulators," IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-89, No 8, pp. 1800-1804, November/December 1970.
- [14] M.D. Charneski, G.L. Gaibrois et B.F. Whitney, "Flashover Tests on Artificially Iced Insulators, " IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems , Vol. PAS-101, No. 8, pp. 2429-2433, August 1982.
- [15] H. Matsuda, H. Komuro et K. Takasu, "Withstand Voltage Characteristics of Insulator Strings Covered with Snow or Ice," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, pp. 1243-1250, July 1991
- [16] J.S. Forrest, "The Performance of High Voltage Insulators in Polluted Atmospher", Conference Paper IEEE Winter Meeting, New York, 1969.
- [17] S.M. Fikke, J.E.Hanssen et L.Rolfseeng , "Long Range Transported Pollution and Conductivity of Atmospheric Ice on Insulators," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, pp. 1311-1321, July 1993.
- [18] L. Shu, C. Sun, J. Zhang et L. Gu, "AC Performance on Iced and Polluted Insulators for High Altitude Regions," Proceedings of 7th International Symposium on High Voltage Engineering Dresden, Germany, Vol. 4, Paper 43.12, pp. 303-306, August 1991.
- [19] M. Farzaneh et O.T. Melo, "Properties and Effect of Freezing Rain and Winter Fog on Outline Insulators," Cold Regions Science and Technology, Vol. 19, pp. 33-46, 1990.

- [20] 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, pp. 1-40, 1986.
- [21] W.A. Chisholm, Y.T. Tam, "Outdoor Insulation Studies CIFT Conditions 1988-89 Seasons Summary," Ontario-Hydro Research Division Report 89-217-H.
- [22] W.A. Chisholm, J. Kuffel, "Performance Of Insulation Coating Under Contamination and Icing Conditions," Electrical Performance of Insulators Committee, Power System Palnning & Operation Section, Engineering and Operating Division, Vancouver, CA, March 1994.
- [23] Hydro-Quebec, "Analysis of the Hydro-Quebec System Blackout on April 1988", Official Hydro-Quebec Report , Montreal, July 1988.
- [24] M.M. Khalifa et R.M. Morris, "Performance of Line Insulators under Rime Ice," IEEE Transaction on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-86, No. 6, pp. 692-698, June 1968.
- [25] Y. Watanabe, "Flashover Tests of Insulators Covered With Ice or Snow," IEEE Transaction on Power Apparatus & Systems, Vol. PASS-97, No. 5, pp. 1788-1794, September 1968.
- [26] L.C. Phan et H. Matsuo, "Minimum Flashover Voltage of Iced Insulators," IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-18, No. 6, pp. 605-618, December 1983.
- [27] M. Hara et L.C. Phan, "Leakage Current and Flashover Performance of Iced Insulators," IEEE Transaction on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-98, No. 3, pp. 849-859, May/June 1979.
- [28] E.A. Cherney, "Flashover Performance of Artificially Contaminated and Iced Long-Rod Transmission Line Insulators," IEEE Transaction on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-99, No. 1, pp. 46-52, January/February 1980.
- [29] H.M. Schneider, "Artificial Ice Tests on Transmission Line Insulators-A Progress Report," IEEE/PES Summer Meeting, San Francisco, USA, Paper A75-491-1, pp. 347-353, July 1975.
- [30] P.E. Renner, H.L.Hill et O.Ratz, "Effects of Icing on DC Insulation Strength," IEEE Transactions on Power Appartus & Systems , Vol.Pas-90, pp.1201-1206, June 1971.

- [31] L.Y. Lee, C.L. Nellis et J.E. Brown, "60 Hz Tests on Ice Coated 500 kV Insulator Strings," IEEE/PES Summer Meeting , Paper 33-02, pp.1-16, August 1970.
- [32] T. Fujimura , K. Naito, Y. Hasegawa et T. Kawaguchi, "Performance of Insulators Covered with Snow or Ice," IEEE Transactions. on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-98, No. 5, pp. 1621-1631, September/October 1979.
- [33] N. Sugawara, K. Hokari, H. Ando, K. Yoshida, M.Hirota et Y. Tatokoro, "Insulation Properties of Atmospheric Iced Insulators Installed in High Mountains," Proceedings of the 6th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Budapest, Haungary, pp.237-242, Setember 1993.
- [34] N. Sugawara, K.Hokari, T.Nosaka, Y Tatokoro et M. Mizumura, "Insulation Resistance of Transmission Line Insulators Depending on the Accretion of Ice," 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Tokyo, Paper B 4-9, pp.1-6, October/November 1990.
- [35] A. Meir et W.M. Niggli, "The influence of Snow and Ice Deposits on SupertensionTransmission Line Insulators Strings with Special Reference to High Altitude Operation," IEEE Conference Publ.44, London, England, pp.386-395, September 1968.
- [36] L. Shu, C. Sun, J. Zhang, L. Gu "AC Flashover Performance on Iced and Polluted Insulators for High Altitude Regions," Proceedings of 7th International Symposium on High Voltage Engineering, Dresden, Germany, Vol.4, Paper 43.13, pp.303-306 , August 1991.
- [37] M. Farzaneh et O.T.Melo, "Flashover Performance of Insulators in the Presence of Short Icicles," International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol.4,No.2, June 1994.
- [38] X. Chen M. Farzaneh et J. Zhang, "A Laboratory Study of Leakage Current and Surface Conductivity of Ice Samples," Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Arlington, USA, Paper 9456-1, pp. 631-638, 8A-1, October 1994.
- [39] M. Farzaneh, J. Zhang et X. Chen, " Recovery Conditions for AC Arc on Ice Surfaces," Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Paper 5B-1, USA.

- [40] D. Kuroiwa, "Icing and Snow Accretion," Monograph Series of Research, Institute of Applied Electricity, Japan, pp. 1-30, 1985.
- [41] I. Imai et Ichiro, "Studies on Ice Accretion," *Researches on Snow and Ice* No. 1, pp. 35-44, 1953.
- [42] H. Oguchi et al., "Icing on Electric Wires, " *Research on Snow and Ice*, No. 1, pp. 45-49, 1953.
- [43] Commission Électrotechnique Internationale, "Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés aux réseaux à courant alternatif," Norme Internationale CEI 507, avril 1991.
- [44] M. Farzaneh, "Contribution à l'étude des mécanismes des vibrations induites par effet de couronne," Doctorat d'état de l'Université Paul Sabatier de Toulouse , 1986.
- [45] E.A. Cherney et al. "The AC Clean Fog for Contaminated Insulators," *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, Vol. PAS-102, No. 3, pp. 604-613, March 1983.
- [46] Commission Électrotechnique Internationale, publication 815, p38, 1986;
- [47] M. Farzaneh, "Effet of Ice Thickness and Voltage Polarity on the Flashover Voltage on Ice Coverd High Voltage Insulators," *Proceedings of 7th International Symposium on HV Engineering, Dresden, Germany, Vol.4, Paper 43.10*, pp. 203-206, August 1991.

**ANNEXE**

**TABLEAUX DES RÉSULTATS  
EXPÉRIMENTAUX**

**Tension de tenue maximale,  $V_{TM}$ , en fonction du nombre d'isolateurs**

**A Résultats obtenus pour les isolateurs standards IEEE recouverts de givre léger**

**Tableau 4.4: Résultats des essais pour 5, 4 et 3 unités d'isolateurs.**

No d'essai	$V_0$ (kV)	V (kV)	Résultats	$V_{TM}$ (kV)	$I_{max}/I_{min}$ (mA)
1	50	120	T	>120	*
2	40				*
3	30				*

\* très faibles valeurs du courant de fuite.

**Tableau 4.5: Résultats pour 2 unités d'isolateurs.**

No d'essai	$V_0$ (kV)	V (kV)	Résultats	$V_{TM}$ (kV)	$I_{max}/I_{min}$ (mA)
4	20	120	C	84	-
5		102	T		120/-70
6		108	C		-
7		105	C		-
8		102	C		-
9		99	T		170/-150
10		99	T		200/-40
11		99	C		-
12		99	C		-
13		96	C		-
14		90	T		420/-130
15		90	C		-
16		87	C		-
17		84	T		250/-240
18		84	T		260/-260
19		84	T		300/-290
20		87	C		-

**Tableau 4.6: Résultats pour un isolateur.**

No d'essai	V <sub>0</sub> (kV)	V (kV)	Résultats	V <sub>TM</sub> (kV)	I <sub>max</sub> /I <sub>min</sub> (mA)
21	10	54	C	51	
22		48	T		225/-70
23		51	T		300/-50
24		51	T		260/130
25		51	C		
26		51	C		
27		48	T		218/-60
28		48	T		240/-70

**Légende :**V<sub>0</sub> - tension de service

V - tension d'essai

I<sub>max</sub> - courant de crête maximal de tenueI<sub>min</sub> - courant de crête minimal de tenueV<sub>TM</sub> - tension de tenue maximale

C - contournement

T - tenue

**B. Résultats obtenus pour les isolateurs standards IEEE recouverts de la glace formée dans un régime humide**

**Tableau 4.7: Résultats pour 6 unités d'isolateurs.**

No d'essai	V <sub>0</sub> (kV)	V (kV)	Résultats	VTM (kV)	I <sub>max</sub> /I <sub>min</sub> (mA)	Énergie (kJ)
1	60	72	T	72	217/-270	940,4
2		75	C		-	-
3		72	T		451/-418	1600,0
4		72	T		622/-614	820,0
5		75	C		-	-

**Tableau 4.8 : Résultats pour 5 unités d'isolateurs.**

No d'essai	V <sub>0</sub> (kV)	V (kV)	Résultats	VTM (kV)	I <sub>max</sub> /I <sub>min</sub> (mA)	Énergie (kJ)
6	50	78	C	57	-	-
7		72	C		-	-
8		69	T		540/-550	330,5
9		69	T		498/-471	340,0
10		69	C		-	-
11		66	C		-	-
12		63	C		-	-
13		60	C		-	-
14		60	C		-	-
15		57	T		120/-200	230,8
16		57	T		149/-155	180,0
17		57	T		131/-125	300,6

18	40	51	C	48	-	-
19		48	T		68/-62	180,0
20		48	T		213/-207	310,0
21		48	T		211/-225	250,0
22		51	C		-	-

**Tableau 4.10 : Résultats pour 3 unités d'isolateurs.**

No d'essai	V <sub>0</sub> (kV)	V (kV)	Résultats	VTM (kV)	I <sub>max</sub> /I <sub>min</sub> (mA)	Énergie (kJ)
23	30	42	C	39	-	-
24		39	T		200/-24	114,7
25		39	T		100/-233	380,8
26		39	T		120/-110	370,0
27		42	C		-	-

**Tableau 4.11: Résultats pour 2 unités d'isolateurs.**

No d'essai	V <sub>0</sub> (kV)	V (kV)	Résultats	VTM (kV)	I <sub>max</sub> /I <sub>min</sub> (mA)	Énergie (kJ)
28	20	30	T	30	120/-90	320,4
29		33	C		-	-
30		30	T		200/-35	305,4
31		30	T		340/-50	360,0
32		33	C		-	-

**Tableau 4.12: Résultats pour un isolateur.**

No d'essai	V <sub>o</sub> (kV)	V (kV)	Résultats	V <sub>TM</sub> (kV)	I <sub>max</sub> /I <sub>min</sub> (mA)	Énergie (kJ)
33	10	27	C	24	-	-
34		24	T		400/-250	216,0
35		24	T		550/-200	297,0
36		27	C		-	-
37		24	T		320/-150	282,0

**Légende :****V<sub>o</sub>** - tension de service**V** - tension d'essai**I<sub>max</sub>** - courant de crête maximal de tenue**I<sub>min</sub>** - courant de crête minimal de tenue**V<sub>TM</sub>** - tension de tenue maximale**C** - contournement**T** - tenue

**C. Variations de la conductivité de l'eau de fonte des isolateurs standards IEEE recouverts glace formée dans un régime humide ( le verglas)**

**Tableau 4.13 : Variations de la conductivité de l'eau pour les essais avec 6 unités d'isolateurs.**

No d'essai	$W_t$ (ml)	$\sigma_i$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$W_r$ (ml)	$\sigma_r$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\sigma_r / \sigma_i$	Résultats d'essai
1	6700	81	2100	204	2,5	T
2	6680	81	990	263	3,2	C
3	5750	82	1750	210	2,5	T
4	5848	80	2100	197	2,4	C
5	6010	80	1200	206	2,5	C

**Tableau 4.14 : Variations de la conductivité de l'eau pour les essais avec 5 unités d'isolateurs.**

No d'essai	$W_t$ (ml)	$\sigma_i$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$W_r$ (ml)	$\sigma_r$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\sigma_r / \sigma_i$	Résultats d'essai
6	5930	81	430	220	2,7	C
7	6040	80	1040	174	2,1	C
8	6050	79	850	195	2,5	T
9	5900	79	1260	189	2,4	T
10	6300	79	110	194	2,4	C
11	6400	78	1340	193	2,5	C
12	5900	80	100	210	2,6	C
13	6020	80	680	196	2,4	C
14	5600	80	100	185	2,3	C
15	6030	81	60	230	2,8	T
16	5950	80	40	240	3,0	T
17	5900	80	30	210	2,6	T

**Tableau 4.15 : Variations de la conductivité de l'eau pour les essais avec 4 unités**

No d'essai	$W_t$ (ml)	$\sigma_i$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$W_f$ (ml)	$\sigma_f$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\sigma_f / \sigma_i$	Résultats d'essai
18	5990	83	860	210	2,5	C
19	6280	75	580	300	4,0	T
20	6050	75	460	210	2,8	T
21	6240	80	0	200	2,5	T
22	5900	82	140	210	2,5	C

**Tableau 4.16 : Variations de la conductivité de l'eau pour les essais avec 3 unités d'isolateurs.**

No d'essai	$W_t$ (ml)	$\sigma_i$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$W_f$ (ml)	$\sigma_f$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\sigma_f / \sigma_i$	Résultats d'essai
23	6000	77	410	260	3,3	C
24	5900	77	300	250	3,2	T
25	5800	84	0	210	2,5	T
26	5850	84	200	175	2,0	T
27	6220	81	20	224	2,7	C

**Tableau 4.17 : Variations de la conductivité de l'eau pour les essais avec 2 unités d'isolateurs.**

No d'essai	$W_t$ (ml)	$\sigma_i$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$W_f$ (ml)	$\sigma_r$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\sigma_r / \sigma_i$	Résultats d'essai
28	6140	80	320	158	1,9	T
29	5950	80	10	170	2,1	C
30	5800	78	20	175	2,2	T
31	5850	82	0	257	3,1	T
32	5950	79	0	271	3,4	C

**Tableau 4.18 : Variations de la conductivité de l'eau pour les essais avec un isolateur.**

No d'essai	$W_t$ (ml)	$\sigma_i$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$W_f$ (ml)	$\sigma_r$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\sigma_r / \sigma_i$	Résultats d'essai
33	6100	79	0	271	3,4	C
34	5630	82	0	251	3,0	T
35	5800	80	20	150	1,8	T
36	4500	80	10	158	1,9	T
37	5900	80	30	175	2,1	C

**Légende**

$W_t$  = volume total de l'eau (glace)

$W_f$  = volume de l'eau fondue par l'arc blanc

$\sigma_i$  = conductivité de l'eau avant l'accumulation ( $\mu\text{S/cm}$ )

$\sigma_r$  = conductivité de l'eau juste après l'accumulation ( $\mu\text{S/cm}$ )

C = contournement

T = tenue

**Tableau 4.19 : Variations de la conductivité de l'eau de fonte (tableau récapitulatif)**

Nombre d'unités	Volume totale moyenne (ml)	$\sigma_{\text{imoy}}$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	Volume de fonte moyenne (ml)	$\sigma_{\text{fmoy}}$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	Résultats d'essai
6	6280	80	1628	240	3 T 2 C
5	6100	80	503	220	7 T 5 C
4	6100	79	408	190	3 T 2 C
3	5964	81	228	146	3 T 2 C
2	5938	80	128	128	3 T 2 C
1	5586	80	12	120	3 T 2 C

**II. Tension de tenue maximale ,  $V_{TM}$ , en fonction de l'épaisseur de la glace formée dans un régime humide ( le verglas)**

**Tableau 5.3: Résultats des essais pour une épaisseur,  $\varepsilon = 0,5$  cm.**

No. d'essai	Tension de service (kV)	Tension d'essai (kV)	Résultats	$V_{TM}$ (kV)	$I_{max} / I_{min}$ (mA)	Énergie (kJ)
1	60	102	T	105	589,0/-590,0	110,0
2		108	C		-	-
3		105	T		149,0/-511,0	194,0
4		105	T		622,0/-614,0	47,0
5		105	T		97,0/-97,0	--
6		108	C		--	--

**Tableau 5.4: Résultats des essais pour une épaisseur  $\varepsilon = 1,0$  cm.**

No. d'essai	Tension de service (kV)	Tension d'essai (kV)	Résultats	$V_{TM}$ (kV)	$I_{max} / I_{min}$ (mA)	Énergie (kJ)
7	60	90	T	90	--	--
8		93	T		548,0/-548,0	264,0
9		96	C		-	-
10		93	T		479,0/-477,0	620,0
11		93	C		--	--
12		93	C		--	--
13		90	T		526,0/-528,0	171,0
14		90	T		526,0/-526,0	214,0

**Tableau 5.5: Résultats des essais pour une épaisseur  $\varepsilon = 1,5$  cm.**

1

No. d'essai	Tension de service (kV)	Tension d'essai (kV)	Résultats	$V_{TM}$ (kV)	$I_{max} / I_{min}$ (mA)	Énergie (kJ)
15	60	78	T	81	325,0/-315,0	537,0
16		81	T		182,0/-176,0	637,0
17		84	T		608,0/-610,0	804,0
18		87	T		495,0/-482,0	425,0
19		90	C		--	--
20		87	C		--	--
21		84	C		--	--
22		81	C		--	--
23		81	T		698,0/-678,0	708,0
24		81	C		-	-
25		81	T		564,0/-569,0	875,0

**Tableau 5.6: Résultats des essais pour une épaisseur  $\varepsilon = 2,0$  cm**

No. d'essai	Tension de service (kV)	Tension d'essai (kV)	Résultats	$V_{TM}$ (kV)	$I_{max} / I_{min}$ (mA)	Énergie (kJ)
26	60	72	T	72	217,0/-270,0	940,4
27		75	C		--	--
28		72	T		590,0/-511,0	610,0
29		72	T		622,0/-614,0	820,0
30		75	C		--	--

**Tableau 5.7: Résultats des essais pour une épaisseur  $\varepsilon = 2,5$  cm**

No. d'essai	Tension de service (kV)	Tension d'essai (kV)	Résultats	$V_{TM}$ (kV)	$I_{max} / I_{min}$ (mA)	Énergie (kJ)
31	60	72	C	66	--	--
32		69	T		313,-/342,2	1000
33		69	T		--	--
34		69	C		--	--
35		69	C		--	--
36		66	T		667,5/-639,6	1158,3
37		66	C		--	--
38		66	T		584,4/-580,0	1566,6
39		66	T		400,8/-396,4	591,6

**Tableau 5.8: Résultats des essais pour une épaisseur  $\varepsilon = 3,0$  cm**

No. d'essai	Tension de service (kV)	Tension d'essai (kV)	Résultats	$V_{TM}$ (kV)	$I_{max}/I_{min}$ (mA)	Énergie (kJ)
40	60	66	T	66	805,7/798,3	15,4
41		69	C		--	--
42		66	T		650,3/646,8	1600,0
43		66	T		400,0/350,0	1800,0
44		69	C		--	--

**Légende :**

- $V_0$**  - tension de service  
**V** - tension d'essai  
 **$I_{max}$**  - courant de crête maximal de tenue  
 **$I_{min}$**  - courant de crête minimal de tenue  
 **$V_{TM}$**  - tension de tenue maximale  
**C** - contournement  
**T** - tenue

**Tableau 5.9: Poids moyen de la glace exprimé par mètre de l'isolateur en fonction de l'épaisseur de la glace**

Épaisseur(cm)	V <sub>t</sub> (ml)	W <sub>tmoy</sub> (kg)	W <sub>tmoy</sub> /m (kg/m)
0,5	2300	2,18	2,45
	2020		
	2200		
	2200		
	-		
	-		
1,0	2640	2,59	2,96
	2580		
	3730		
	2400		
	2100		
	2600		
	-		
	2090		
1,5	3540	3,73	4,26
	3350		
	3640		
	3710		
	3840		
	4400		
	3440		
	4200		
	3730		
	3900		
	3320		
2,0	5990	6,09	6,95
	6280		
	6050		
	6240		
	5900		
2,5	6570	6,87	7,84
	7800		
	7440		
	5980		
	7680		
	5730		
	5600		
	7420		
	7600		
3,0	9710	8,52	9,42
	9000		
	7230		
	5600		
	9710		

**Légende:**

V<sub>t</sub>      Volume totale de l'eau  
W<sub>tmoy</sub>    Volume fondu par l'arc blanc  
W<sub>tmoy</sub>/m   Poids moyen par unité d'isolateurs

**III. Tension de tenue maximale ,  $V_{TM}$ , en fonction en fonction de la conductivité de l'eau( glace formée dans un régime humide )**

**Tableau 6.3: Résultats obtenus pour la conductivité de  $\sigma = 2,9 \mu\text{S/cm}$  pour 5 unités d'isolateurs .**

No. d'essai	Tension de service (kV)	Tension d'essai (kV)	Résultats	$V_{TM}/m$ (kV)	$I_{max} / I_{min}$ (mA)	Énergie (kJ)
1	50	108	T	111	344,5/-344,4	990,0
2		111	T		330,0/-350,0	1020,0
3		114	C		-	
4		114	T		362,0/-362,0	900,0
5		114	C		-	
6		111	T		344,5/-343,5	1040,0
7		111	T		320,0/-319,0	1050,0

**Tableau 6.4: Résultats obtenus pour la conductivité de  $\sigma = 9,0 \mu\text{S/cm}$  avec 6 unités d'isolateurs.**

Numéro d'essai	Tension de service (kV)	Tension d'essai (kV)	Résultats	$V_{TM}$ (kV)	$I_{max} / I_{min}$ (mA)	Énergie (kJ)
8	60	99	C	96	-	-
9		96	T		400,0/-400,0	1200,0
10		96	T		410,0/-410,0	1150,0
11		96	T		420,0/-419,0	1100,0
12		99	C		-	-

**Tableau 6.5: Résultats obtenus pour la conductivité de  $\sigma = 20,5 \mu\text{S/cm}$  avec 6 unités d'isolateurs.**

No. d'essai	Tension de service (kV)	Tension d'essai (kV)	Résultats	$V_{TM}$ (kV)	$I_{max} / I_{min}$ (mA)	Énergie (kJ)
13	60	84	T	93	300,9/-300,0	800,0
14		87	T		460,0/-460,0	841,6
15		90	T		434,0/-418,0	854,0
16		93	T		425,0/-429,0	1400,0
17		96	C		-	-
18		93	T		415,4/-415,4	910,0
19		93	T		420,0/-420,0	860,0
20		96	C		--	--

**Tableau 6.6: Résultats obtenus pour la conductivité de  $\sigma = 39,8 \mu\text{S/cm}$  avec 6 unités d'isolateurs**

No. d'essai	Tension de service (kV)	Tension d'essai (kV)	Résultats	$V_{TM}$ (kV)	$I_{max} / I_{min}$ (mA)	Énergie (kJ)
21	60	84	C	84	-	-
22		81	T		510,0/-510,0	1500,0
23		84	T		10,0/-510,0	1100,0
24		84	T		461,0/-461,0	1166,6
25		84	T		238,0/-240,0	645,8
26		87	C		--	--
27		87	C		--	--

**Tableau 6.7: Résultats obtenus pour la conductivité de  $\sigma=79,5 \mu\text{S}/\text{cm}$  avec 6 unités d'isolateurs**

No. d'essai	Tension de service (kV)	Tension d'essai (kV)	Résultats	$V_{TM}$ (kV)	$I_{max} / I_{min}$ (mA)	Énergie (kJ)
28	60	72	T	72	217,0/-270,0	940,4
29		75	C		--	--
30		72	T		590,0/-511,0	1600,0
31		72	T		622,0/-614,0	820,0
32		75	C		--	--

**Tableau 6.8: Résultats obtenus pour la conductivité de  $\sigma= 149,3 \mu\text{S}/\text{cm}$  avec 6 unités d'isolateurs.**

No. d'essai	Tension de service (kV)	Tension d'essai (kV)	Résultats	$V_{TM}$ (kV)	$I_{max} / I_{min}$ (mA)	Énergie (kJ)
33	60	72	C	66	--	--
34		69	C		--	--
35		66	T		670,0/-670,0	1220,0
36		66	T		503,9/-505,8	1650,0
37		66	T		628,9/-629,3	900,0
38		69	C		--	--

**Légende :**

- $V_0$  - tension de service  
 $V$  - tension d'essai  
 $I_{max}$  - courant maximal de tenue  
 $I_{min}$  - courant minimal de tenue  
 $V_{TM}$  - tension de tenue maximale  
**C** - contournement  
**T** - tenue

**Variations de la conductivité de l'eau des isolateurs standards IEEE**

**Tableau 6.9: Variations de la conductivité de l'eau pour les essais**

**avec 5 unités pour  $\sigma = 2,9 \mu\text{S/cm}$**

No d'essai	$\sigma_i$ réelle ( $\mu\text{S/cm}$ )	$W_f$ (ml)	$\sigma_f$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\sigma_f / \sigma_i$	Résultats d'essai
1	2,9	1250	82,5	28,4	T
2	2,5	900	74,0	29,6	T
3	2,7	1700	69,0	25,5	C
4	2,9	1400	80,0	27,5	T
5	3,8	400	117,6	30,9	C
6	2,4	510	58,4	24,3	T
7	3,7	10	95,0	25,6	T

**Tableau 6.10: Variations de la conductivité de l'eau pour les essais**

**avec 6 unités pour  $\sigma = 9,0 \mu\text{S/cm}$**

No d'essai	$\sigma_i$ réelle ( $\mu\text{S/cm}$ )	$W_f$ (ml)	$\sigma_f$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\sigma_f / \sigma_i$	Résultats d'essai
8	8,6	1800	150,0	17,4	C
9	10,0	400	72,5	7,25	T
10	9,6	180	26,5	2,7	T
11	6,4	160	80,0	12,5	T
12	10,5	2800	102,0	8719,7	C

**Tableau 6.11: Variations de la conductivité de l'eau pour les essais****avec 6 unités pour  $\sigma = 20,5 \mu\text{S/cm}$** 

No d'essai	$\sigma_i$ réelle ( $\mu\text{S/cm}$ )	$W_f$ (ml)	$\sigma_f$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\sigma_f / \sigma_i$	Résultats d'essai
13	21,0	1400	98,0	4,6	T
14	20,5	2800	90,4	4,4	T
15	20,8	2025	95,0	4,5	T
16	20,5	2350	120,0	5,8	T
17	20,9	300	176,6	8,4	C
18	20,4	2800	83,1	4,0	T
19	20,0	400	130,0	6,5	T
20	20,0	900	85	4,2	C

**Tableau 6.12: Variations de la conductivité de l'eau pour les essais****avec 6 unités pour  $\sigma = 39,8 \mu\text{S/cm}$** 

No d'essai	$\sigma_i$ réelle ( $\mu\text{S/cm}$ )	$W_f$ (ml)	$\sigma_f$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\sigma_f / \sigma_i$	Résultats d'essai
21	40,0	1600	95,0	2,3	C
22	40,0	1500	105,0	2,6	T
23	39,5	2500	109,5	2,7	T
24	39,5	1400	138,50	3,5	T
25	40,0	1800	130,5	3,2	T
26	40,0	250	150,0	3,7	C
27	40,0	2100	310,0	7,7	C

**Tableau 6.13 : Variations de la conductivité de l'eau pour les essais  
avec 6 unités pour  $\sigma = 79,5 \mu\text{S/cm}$**

No d'essai	$\sigma_i$ réelle ( $\mu\text{S/cm}$ )	$W_f$ (ml)	$\sigma_f$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\sigma_f / \sigma_i$	Résultats d'essai
28	80	320	158	1,9	T
29	80	10	170	2,1	C
30	78	20	175	2,2	T
31	82	750	257	3,1	T
32	79	960	271	3,4	C

**Tableau 6.14: Variations de la conductivité de l'eau pour les essais  
avec 6 unités pour  $\sigma = 149,5 \mu\text{S/cm}$**

No d'essai	$\sigma_i$ réelle ( $\mu\text{S/cm}$ )	$W_f$ (ml)	$\sigma_f$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\sigma_f / \sigma_i$	Résultats d'essai
33	150	1500	170	1,1	C
34	149	700	157	1	C
35	150	1700	300	2,0	T
36	150	1050	316	2,1	T
37	150	1400	180	1,2	T
38	147	1600	250	1,4	C

### Légende

$W_f$  = Volume fondu par l'arc blanc

$\sigma_i$  = conductivité de l'eau avant l'accumulation ( $\mu\text{S/cm}$ )

$\sigma_f$  = conductivité de l'eau juste après l'accumulation ( $\mu\text{S/cm}$ )

C = Contournement

T = tenue