

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

par

Loana Soucy

Effet de la fonte et de la pollution sur la tension de
tenue maximale des isolateurs recouverts de glace

Octobre 1996



Mise en garde/Advice

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

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

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

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

Résumé pour la Bibliothèque Nationale du Canada :

Titre : Effet de la fonte et de la pollution sur la tension de tenue maximale des isolateurs recouverts de glace

Une étude systématique, dont le but est de proposer une méthode standard d'essais sous glace et d'étudier l'influence de différents paramètres sur la tenue électrique d'isolateurs recouverts de glace, fut entreprise par le Groupe de Recherche en Ingénierie de l'Environnement Atmosphérique de l'Université du Québec à Chicoutimi et l'Institut de recherche d'Hydro-Québec à Varennes. C'est dans ce projet de recherche que la présente étude s'inscrit. Le but de cette dernière est d'étudier l'influence de deux facteurs sur la tension de tenue maximale d'isolateurs recouverts de glace. Ces deux facteurs sont les suivants: la fonte de la glace (engendrée par l'augmentation de la température ambiante jusqu'au point de fonte de la glace) et le niveau de contamination à la surface des isolateurs.

Loana Soucy

Université du Québec à Chicoutimi

RÉSUMÉ

La performance électrique des isolateurs de lignes de transport d'énergie électrique est dégradée par la présence de glace à leur surface. Cet affaiblissement de la tenue électrique des isolateurs peut être tel que des arcs électriques peuvent prendre naissance et se développer jusqu'à provoquer un contournement total des isolateurs. Le contournement électrique des isolateurs qui est ainsi produit peut alors engendrer une interruption de courant. Il apparaît donc essentiel de connaître le plus adéquatement possible la performance électrique (sous glace) des isolateurs, lorsque ceux-ci sont situés dans un lieu propice à l'accumulation de glace à leur surface. Cependant, il n'existe présentement aucune norme standard pour tester des isolateurs sous des conditions de glace. Partant de là, une étude systématique, dont le but est de proposer une méthode standard d'essais sous glace et d'étudier l'influence de différents paramètres sur la tenue électrique d'isolateurs recouverts de glace, fut entreprise par le Groupe de Recherche en Ingénierie de l'Environnement Atmosphérique de l'Université du Québec à Chicoutimi.

C'est dans ce projet de recherche que la présente étude s'inscrit. Le but de cette dernière est donc d'étudier l'influence de deux facteurs sur la tension de tenue maximale d'isolateurs recouverts de glace. Ces deux facteurs sont les suivants: la fonte de la glace (engendrée par l'augmentation de la température ambiante jusqu'au point de fonte de la glace) et le niveau de contamination à la surface des isolateurs.

À l'issue des expérimentations réalisées au cours de la présente recherche, il apparaît que la fonte de la glace cause une diminution de l'ordre de 10% de la tension de tenue maximale, en comparaison aux essais réalisés sans période de fonte de la glace. Également, la présence de contamination à la surface des isolateurs cause une diminution de leur tenue électrique. C'est ainsi que la tension de tenue maximale des isolateurs contaminés légèrement ($0,05 \text{ mg/cm}^2$) était d'environ 5% plus faible que lors d'essais réalisés sans contamination. De plus, cette diminution de la tenue électrique des isolateurs devenait très critique lorsque le niveau de contamination était moyen ($0,1 \text{ mg/cm}^2$). Effectivement, des isolateurs composites ayant une densité du dépôt de sel à leur surface de $0,1 \text{ mg/cm}^2$, furent contournés par un arc électrique au cours de la période de fonte de la glace, alors qu'ils étaient sous tension de service.

Dans le présent mémoire, quelques notions de bases sont relatées dans le but de donner une meilleure compréhension de l'objet d'étude. Également, une revue des principales recherches réalisées dans ce domaine est présentée. Enfin, les résultats de ce travail de recherche, de même que leur analyse, sont présentés en détail.

REMERCIEMENTS

Il me fait plaisir d'exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont permis de mener à bien ce travail de recherche. À mon directeur de maîtrise, le Docteur Masoud Farzaneh, qui malgré ses nombreuses occupations a su me diriger de façon claire et efficace; au Docteur Jacek Kiernicki pour son encouragement, son aide lors des essais techniques et les discussions enrichissantes; à Sylvain Desgagné pour sa précieuse aide technique; à Jean-François Drapeau, responsable du projet à l'IREQ, pour sa judicieuse coopération et ses commentaires constructifs; ainsi qu'à tous mes compagnons d'étude et à mes proches qui, de par leur présence, ont rendu cette expérience beaucoup plus agréable.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	I
REMERCIEMENTS	II
TABLE DES MATIÈRES	III
CHAPITRE I	1
INTRODUCTION	1
CHAPITRE II	5
RAPPELS DE BASE	5
2.1 Rappels sur les isolateurs de lignes de transport d'énergie électrique	5
2.2 Rappels sur la glace qui s'accumule à la surface des isolateurs	8
2.2.1 Régimes de croissance de la glace et type de glace	8
2.2.2 Intensité d'accumulation de la glace	10
2.3 Rappels sur les impuretés contenues dans l'eau formant la glace et celles qui s'accumulent à la surface des isolateurs	11
2.3.1 Pollution naturelle	11
2.3.2 Contamination artificielle des isolateurs	14
2.4 Rappels sur la distribution des impuretés dans les dépôts de glace	15
2.5 Rappels sur l'évolution de l'arc électrique vers le contournement d'isolateurs recouverts de glace	15
CHAPITRE III	18
FACTEURS INFLUENÇANT LA TENUE ÉLECTRIQUE DES ISOLATEURS RECOUVERTS DE GLACE	18
3.1 Régime de croissance de la glace	18
3.2 Épaisseur du dépôt de glace	19

3.3 Uniformité d'un dépôt de glace formé en régime humide	20
3.4 Conductivité de l'eau formant la glace	21
3.5 Niveau de pollution à la surface des isolateurs	22
3.6 Caractéristiques des isolateurs	24
3.7 Augmentation de la température suite à l'accumulation d'un dépôt de glace	26
CHAPITRE IV	29
EXPÉRIMENTATION	29
4.1 Équipements de la chambre climatique	29
4.1.1 Système d'arrosage	30
4.1.2 Système de ventilation	31
4.1.3 Système de refroidissement et de contrôle de la température	31
4.1.4 Système d'alimentation à haute tension et système de mesures électriques	32
4.2 Mesure des paramètres climatiques dans la chambre	35
4.2.1 Teneur en eau liquide contenue dans l'écoulement d'air	35
4.2.2 Diamètre volumique des gouttelettes d'eau	36
4.2.3 Vitesse du vent	37
4.2.4 Température	37
4.3 Détermination des caractéristiques du dépôt de glace	38
4.3.1 Densité de la glace	38
4.3.2 Épaisseur de référence de la glace	39
4.3.3 Longueur de l'intervalle d'air	39
4.4 Isolateurs testés	41
4.5 Définition des différents régimes d'essais	42
4.6 Étapes expérimentales	46
4.6.1 Étape de contamination	47
a) Contamination	47
Isolateurs standards IEEE	47
Isolateurs composites en EPDM et en silicone	48
b) Vérification du niveau de contamination	53
4.6.2 Étape d'accumulation	55
4.6.3 Étape de fonte	57

4.6.4 Étape de l'essai de tenue	62
4.7 Méthode d'évaluation de la tension de tenue maximale, V_{TM}	63
CHAPITRE V	64
RÉSULTATS ET ANALYSE DES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX	64
5.1 Introduction	64
5.2 Essais sans contamination	66
5.2.1 Tensions de tenue maximales, V_{TM} , des isolateurs testés en fonction des différents régimes d'essais	66
5.2.2 Observations faites au cours des étapes de fonte et de l'essai de tenue (régime de fonte rapide)	68
a) Essais avec les isolateurs IEEE	69
b) Essais avec les isolateurs composites (en EPDM et en silicone)	76
5.2.3 Discussion	82
5.3 Essais avec contamination	86
5.3.1 Tensions de tenue maximales, V_{TM} , des isolateurs testés en fonction du niveau de contamination	87
a) Contamination légère (0,05 mg/cm ²)	87
Essais en régime d'accumulation	87
Essais en régime critique d'essais	89
b) Contamination moyenne (0,1 mg/cm ²)	91
5.3.2 Observations au cours des expérimentations	92
a) Période d'accumulation de la glace	92
b) Période de fonte de la glace	96
c) Période de l'essai de tenue	100
CHAPITRE VI	104
CONCLUSION	104
6.1 Conclusions relatives aux essais sans contamination	104
6.2 Conclusions relatives aux essais avec contamination	106
6.3 Suggestions pour de futurs travaux	108
ANNEXE	109

A.1 Paramètres caractérisant chaque essais de tenue	110
A.1.1 Essais sans contamination en régime de fonte rapide	110
A.1.2 Essais avec contamination en régime d’essais le plus critique	113
A.1.3 Essais avec contamination en régime d’accumulation	118
A.1.4 Autres	119
A.1.5 Lexique	121
A.2 Abaque de la résistivité de la solution aqueuse contenant du sel en fonction de sa salinité	122
BIBLIOGRAPHIE	123

CHAPITRE I

INTRODUCTION

La performance électrique des isolateurs de postes et de lignes de transport d'énergie est influencée par plusieurs facteurs environnementaux et atmosphériques. Parmi ceux-ci, l'accumulation d'un dépôt de glace à la surface des isolateurs a pour effet de diminuer leur tenue électrique. L'ampleur de cette diminution est fonction des caractéristiques des isolateurs (distance d'arc, diamètre, longueur des pas, etc.), des caractéristiques du dépôt de glace qui s'accumule à leur surface (type, épaisseur, uniformité, etc.) et des conditions atmosphériques suivant la formation du dépôt de glace (température ambiante, humidité, vitesse du vent, etc.). Également, la surface des isolateurs sur lesquels la glace s'accumule peut être recouverte d'un dépôt de pollution. Par conséquent, les particules solubles qui recouvrent la surface des isolateurs (émissions industrielles, dépôts salins, etc.) sont dissoutes lors de l'accumulation ou de la fonte de la glace. L'augmentation de la conductivité du dépôt de glace qui découle de cette dernière situation envenime grandement la performance électrique des isolateurs qui, par la seule présence d'un dépôt de glace à leur surface, est déjà lourdement affectée. L'accumulation d'un dépôt de glace

sur des isolateurs contaminés ou non contaminés constitue donc une situation qui provoque la circulation d'un courant de fuite à la surface de la glace accumulée. Également, des arcs électriques peuvent prendre naissance dans les discontinuités du dépôt de glace et se développer jusqu'à former un seul arc rejoignant les deux bornes des isolateurs. Le contournement électrique des isolateurs qui est ainsi produit peut alors engendrer une coupure de courant.

Des contournements d'isolateurs, causés par la formation de dépôts de glace à leur surface, ont été observés dans plusieurs régions sujettes aux accumulations de glace. La littérature mentionne certains de ces incidents. Ils ont notamment été observés au Québec [10], en Ontario [23], dans la région de la côte Ouest du Canada et des États-Unis [4, 45], dans le Nord et le Sud des États-Unis [44, 49], au Japon [53], en Angleterre [30] et en Norvège [27]. Tous ces accidents ont bien évidemment engendré des pertes monétaires pour les compagnies d'électricité et souvent pour leurs clients, sans compter tous les désagréments non monnayables. Il est donc très souhaitable de connaître la performance électrique des isolateurs recouverts de glace, lorsque ces derniers sont situés dans un lieu propice aux accumulations de glace. Malheureusement, il n'existe présentement aucune méthode standard d'essais pour évaluer la performance électrique des isolateurs recouverts de glace. Conséquemment, les méthodes expérimentales instituées afin d'évaluer la performance électrique des isolateurs recouverts de glace varient d'un laboratoire à l'autre, ce qui rend difficile la comparaison des résultats des différents laboratoires. Par exemple,

certains chercheurs mesurent la tension maximale à laquelle les isolateurs peuvent tenir pour des conditions précises d'essais [16], d'autres trouvent les conditions d'essais pour lesquelles les isolateurs peuvent tenir sous un niveau de tension constant [5, 34, 68], et d'autres encore trouvent la distance d'arc minimale pour laquelle les isolateurs ne contourneront pas et cela pour des conditions fixes d'essais [4]. Le paramètre indiquant la sévérité du dépôt de glace varie lui aussi. Il peut être déterminé notamment par la mesure de l'épaisseur [5, 34] ou du poids [59] du dépôt de glace, ou par la mesure de la longueur des glaçons [31]. Également, la glace est dans certains cas formée sans tension, ce qui est plus ou moins représentatif de ce qui se produit sur le terrain [38, 45]. De plus, les résultats de certaines études sont difficiles à utiliser puisque certaines conditions d'essais sont mal définies, telles que: le type de glace, ses caractéristiques, et ses conditions de formation [53, 59], de même que le taux d'augmentation de la température en périphérie de l'isolateur, dans le cas d'essais en régime de fonte [66].

Par conséquent, afin de combler cette lacune qui existe dans les méthodes d'essais des isolateurs, le Groupe de Recherche en Ingénierie de l'Environnement Atmosphérique de l'Université du Québec à Chicoutimi, en collaboration avec l'Institut de recherche d'Hydro-Québec à Varennes, a entrepris une étude systématique visant à proposer une méthode standard d'essais des isolateurs recouverts de glace. Pour réaliser cet objectif, la mise en place d'une méthode permettant de trouver de la tension de tenue maximale, V_{TM} , des isolateurs recouverts de glace a d'abord été réalisée [13, 16]. Cette méthode est basée

sur la norme internationale CEI 507 d'essais d'isolateurs soumis à des conditions de brouillard [37]. Par la suite, l'influence de différents facteurs sur la tension de tenue maximale, V_{TM} , des isolateurs recouverts de glace a été étudiée. Ces facteurs sont les suivants: le type de glace [13, 20], son épaisseur [16], son uniformité [13, 20], la conductivité de l'eau formant la glace [13, 14, 18] et la distance d'arc des isolateurs [13].

Afin de compléter le travail entrepris, la présente étude a pour but d'étudier l'influence de la fonte de la glace et de la pollution sur la tension de tenue maximale, V_{TM} , d'isolateurs recouverts de glace. L'étude de ces deux facteurs est importante car ils ont une influence directe sur la conductivité du dépôt de glace et par conséquent sur la tenue électrique des isolateurs qui en sont recouverts.

CHAPITRE II

RAPPELS DE BASE

Afin d'avoir une meilleure compréhension du travail réalisé au cours de cette étude et une meilleure idée des principaux paramètres et facteurs influençant la performance électrique des isolateurs recouverts de glace, quelques rappels de base seront apportés.

2.1 Rappels sur les isolateurs de lignes de transport d'énergie électrique

Les isolateurs utilisés pour le transport d'énergie électrique par les lignes aériennes peuvent être divisés en deux groupes. Il s'agit des isolateurs en céramique à capot et tige, dont la partie isolante est en verre ou en porcelaine, et des isolateurs composites à long fût, dont l'enveloppe extérieure est faite d'un matériau synthétique (tel que l'EPDM¹ ou le silicone). Les isolateurs en céramique sont lourds et fragiles, tandis que les isolateurs composites ont un ratio poids/tenue mécanique très faible et ils sont peu fragiles [43].

¹ Éthylène Propylène Diene Monomer

Également, lorsque les isolateurs composites sont nouveaux, leur surface est hydrophobe [33, 43]. L'eau adhère donc difficilement à leur surface. Par conséquent, les impuretés qui se trouvent à la surface des isolateurs composites sont dissoutes moins facilement que celles qui s'accumulent à la surface d'isolateurs en céramique. L'hydrophobicité des isolateurs composites améliore donc leur performance électrique sous pollution.

Cependant, l'hydrophobicité des isolateurs composites n'est pas permanente. En effet, elle peut être perdue temporairement ou de façon permanente [33]. Cela est principalement dû à leur exposition aux rayons UV et aux décharges qui se produisent à leur surface [43]. Néanmoins, l'hydrophobicité des isolateurs composites peut être recouverte après un certain temps. Ce recouvrement de l'hydrophobicité est fonction de l'état physique et chimique de la surface des isolateurs et des stress environnementaux auxquels ils sont soumis [33]. Selon S.Gurbanski et R. Hartings [33], les isolateurs en silicone ont un meilleur comportement à cet égard que les isolateurs en EPDM. En effet, tous les isolateurs en silicone qu'ils ont testés ont recouvré leur hydrophobicité, ce qui ne fut pas le cas des isolateurs en EPDM. Les travaux de G.G. Karaday et al. [43] abondent aussi dans ce sens. Effectivement, les isolateurs en silicone qu'ils ont testé recouvraient leur hydrophobicité après une période de 6 à 8 heures, tandis que les isolateurs en EPDM recouvraient leur hydrophobicité qu'après une période de 12 à 15 heures.

Les isolateurs en céramique à capot et tige et les isolateurs composites à long fût diffèrent aussi par leur profil. Par exemple, la ligne de fuite² par mètre de distance d'arc³ de certains isolateurs composites peut être plus longue que celle des isolateurs en céramique. Le champ à la surface de ces isolateurs composites est alors plus faible que celui à la surface des isolateurs en céramique. C'est d'ailleurs le cas des isolateurs composites testés dans la présente étude. De plus, les isolateurs composites ont un plus petit diamètre que les isolateurs en céramique, de sorte que les isolateurs composites accumulent moins d'impuretés et de glace à leur surface que les isolateurs en céramique. La tenue électrique des isolateurs composites est donc moins affectée par la présence à la surface des isolateurs d'impuretés dissoutes et/ou de glace, que les isolateurs en céramique [33, 42, 57].

En plus de la possibilité qu'ils ont de perdre leur hydrophobicité, les isolateurs composites semblent plus sensibles au vieillissement que les isolateurs en céramique [43]. Les signes du vieillissement de ces isolateurs peuvent être les suivants: un dépôt blanchâtre à leur surface; le durcissement d'une mince couche de leur surface qui peut occasionner des microfractures; la formation irréversible de chemins carbonisés et conducteurs à leur surface; et même, la formation irréversible de microcanaux, conducteurs ou non, dans la partie isolante [6].

² Distance la plus courte, le long de la surface de la partie isolante, entre deux pièces conductrices [35].

³ Distance la plus courte, entre les deux bornes d'un isolateur ou d'une chaîne d'isolateurs [35].

2.2 Rappels sur la glace qui s'accumule à la surface des isolateurs

2.2.1 Régimes de croissance de la glace et type de glace

Les dépôts de glace qui s'accumulent sur les isolateurs de lignes et de postes sont formés à partir de gouttes d'eau surfondues, c'est-à-dire à l'état liquide sous le point de congélation [46]. Au moment où ces gouttes d'eau entrent en contact avec la surface des isolateurs, elles commencent à geler. Si elles gèlent avant l'arrivée de nouvelles gouttes d'eau, on dit que le dépôt de glace se forme en régime sec. Dans le cas contraire, si l'eau qui arrive à la surface des isolateurs n'a pas le temps de geler avant l'arrivée de nouvelles gouttes d'eau, on dit que la glace se forme en régime humide. Lorsque la glace se forme en régime humide, une mince couche d'eau, que l'on appelle "film d'eau", est continuellement présente à la surface du dépôt de glace. Également, au cours de ce régime de formation de la glace, des glaçons se forment au bord des jupes des isolateurs.

Les types de glace que l'on retrouve sur les sites extérieurs sont les suivants: le verglas, le givre lourd et le givre léger [36, 46, 47, 54, 55, 61]. Le verglas est un type de glace qui se forme en régime humide. La pluie verglaçante, la bruine verglaçante, la neige fondue et l'eau de fonte d'un dépôt de neige accumulé sur les bras d'un pylône mènent à

des accumulations de verglas [61]. Le verglas est transparent, dur, son adhérence est forte et sa surface est lisse. La densité du verglas est d'environ $0,9 \text{ g/cm}^3$.

En ce qui a trait aux givres lourd et léger, ils se forment en régime sec à partir de gouttelettes de brouillard ou de gouttes d'eau de très petits diamètres. Par conséquent, les givres lourd et léger se retrouvent surtout dans des régions montagneuses [55]. La densité du givre lourd se situe entre $0,6 \text{ g/cm}^3$ et $0,87 \text{ g/cm}^3$. Pour ce qui est du givre léger, il a une densité inférieure à $0,6 \text{ g/cm}^3$, il est de couleur blanche et son apparence est plutôt moelleuse et granulaire.

Le régime de croissance de la glace et le type de glace qui se forme sur des structures extérieures sont principalement déterminés par les paramètres suivants: la température de l'air ambiant (T), la vitesse du vent (V), le diamètre des gouttelettes d'eau (d) et la teneur en eau liquide contenue dans l'air (τ) [46]. En plus de ces conditions atmosphériques, lorsque la glace se forme à la surface d'isolateurs sous tension, le courant de fuite, les décharges couronnes et le vent ionique influencent le type de glace qui sera formé [21, 22].

Le tableau 2.1 donne, pour chaque type de glace, l'intervalle des valeurs de la température de l'air ambiant, du diamètre des gouttelettes d'eau et de la vitesse du vent, qui prévalent lors de la formation de chacun des types de glace [36, 46, 47, 48, 54]. En ce qui

a trait à la valeur de la teneur en eau, elle ne dépasserait pas $2,5 \text{ g/m}^3$ pour le verglas et le givre lourd, et $0,5 \text{ g/m}^3$ pour le givre léger [48].

Tableau 2.1: Conditions atmosphériques au cours de la formation de la glace et densité de la glace.

	Température ambiante (°C)	Diamètre des gouttes d'eau	Vitesse du vent (m/s)	Densité (g/cm ³)
Verglas	0 à -3	0,5 mm à 6 mm	1 à 20	0,8 à 0,9
Givre lourd	-3 à -15	5 µm à 5 mm	5 à 20	0,6 à 0,87
Givre léger	-5 à -25	5 µm à 20 µm	5 à 20	< 0,6

2.2.2 Intensité d'accumulation de la glace

L'intensité d'accumulation de la glace, $I \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}\text{)}$, tel que l'équation 2.1 le montre, est fonction de la vitesse du vent, V , de la teneur en eau, τ , et de l'efficacité de collection, E [52]. L'efficacité de collection, E , représente le rapport entre la quantité de gouttes d'eau surfondues qui frappent la surface d'un objet et qui y demeurent, et la quantité de gouttes qui auraient frappé la surface de l'objet si elles n'avaient pas été déviées par le courant

d'air. L'efficacité de collection est gérée par un mécanisme hydrodynamique décrit, entre autres, par D. Kuroiwa [46].

$$I = E \cdot \tau \cdot V \quad (2.1)$$

2.3 Rappels sur les impuretés contenues dans l'eau formant la glace et celles qui s'accumulent à la surface des isolateurs

2.3.1 Pollution naturelle

Les impuretés qui se retrouvent dans les gouttes d'eau formant la glace et celles qui s'accumulent à la surface des isolateurs ont à toutes fins pratiques les même sources. Ces sources de pollution sont les suivantes: les industries, le trafic automobile, le chauffage domestique, l'engrais utilisé en agriculture, le sel qui recouvre les routes durant l'hiver, etc. Ou encore, ce sont des sources naturelles telles que les cendres des volcans, les poussières de terre, le sel provenant de la mer, etc. [7, 29, 50].

Dans le cas où ces impuretés sont des composés ioniques, elles sont dissoutes lors de la condensation d'eau à leur surface (formation des nuages), ou bien, lors de la fonte ou de

la formation de glace à la surface d'isolateurs. Les cristaux qu'elles contiennent se désagrègent alors sous forme d'ions mobiles formant ainsi un électrolyte. Toutefois, les solutions électrolytes ne conduisent pas toutes le courant électrique avec la même efficacité. En effet, plusieurs acides, comme l'acide sulfurique (H_2SO_4) et la plupart des sels sont des électrolytes forts, c'est-à-dire qu'ils conduisent efficacement le courant. En contrepartie, la plupart des composés organiques sont des non électrolytes à l'exception des acides et des bases organiques qui sont de faibles électrolytes [39]. La nature des impuretés présentes dans les dépôts de glace qui se forment à la surface des isolateurs a donc une influence sur la conductivité électrique de ces derniers.

Les gouttes d'eau des nuages sont le résultat de la condensation de molécules de vapeur d'eau sur des noyaux de condensation. Les noyaux de condensation sont des composés générés par les sources de pollution mentionnées plus haut. La concentration des impuretés contenues dans les gouttes d'eau peut varier après leur formation [28]. Par exemple, plusieurs molécules d'eau peuvent se condenser sur les gouttes d'eau déjà formées, ce qui cause une augmentation du volume des gouttes d'eau, de même qu'une diminution de la concentration d'impuretés contenues dans les gouttes d'eau. C'est d'ailleurs pour cette raison que les gouttes d'eau formant le brouillard ont des concentrations d'ions pouvant être de 5 à 10 fois supérieures à celles des gouttes de pluie [23, 67]. Conséquemment, le givre qui se forme à partir de petites gouttes d'eau, comme celles qui composent les brouillards, a généralement une plus grande concentration

d'impuretés que le verglas qui se forme à partir de grosses gouttes de pluie verglaçante [28].

En ce qui a trait à l'accumulation d'un dépôt de pollution à la surface des isolateurs, elle est principalement le résultat d'un processus aérodynamique [51]. Lorsque l'air contenant des particules en suspension coule vers des isolateurs, l'efficacité avec laquelle ces particules s'accumulent et leur distribution à la surface des isolateurs est fonction: de la forme des isolateurs, de la grosseur des particules, de l'état de la surface des isolateurs (rugosité et adhérence) [33], de la densité des particules et de la vitesse de l'écoulement d'air. Également, lorsque les isolateurs sont soumis à une tension continue (CC), une déposition intense de particules à leur surface peut avoir lieu par une action de précipitation électrostatique. De plus, lorsque des gouttes d'eau polluées qui s'étaient accumulées à la surface d'isolateurs s'évaporent, elles laissent à la surface des isolateurs les impuretés qu'elles contenaient. Enfin, un dépôt de pollution à la surface d'isolateurs peut être nettoyé par un écoulement d'air d'une vitesse élevée contenant des particules (telles que des gouttes d'eau) de masse relativement élevées.

2.3.2 Contamination artificielle des isolateurs

La pollution naturelle, que l'on retrouve à la surface des isolateurs, est simulée en laboratoire par l'application de sel (NaCl) à leur surface. La norme CEI 815 définit 4 niveaux de pollution, depuis une pollution faible jusqu'à une très forte pollution [8, 50]. Le tableau 2.2 présente l'équivalence entre ces niveaux de pollution et la densité du dépôt de sel, DDS, appliqué à la surface des isolateurs.

Tableau 2.2: Équivalence entre la pollution naturelle et la pollution artificielle [8].

Niveau de pollution	Densité du dépôt de sel , DDS (mg/cm ²)
Léger	0,03 à 0,06
Moyen	0,10 à 0,20
Fort	0,30 à 0,60
Très fort [50]	0,60 à 1,10

2.4 Rappels sur la distribution des impuretés dans les dépôts de glace

Lors de la formation de la glace, les impuretés (contenues dans l'eau formant la glace et celles présentes à la surface des isolateurs) sont distribuées dans le dépôt de glace en fonction du régime de croissance de la glace. Au cours d'une formation en régime humide, les impuretés sont rejetées à la surface de la glace [41, 61]. En conséquence, la conductivité du film d'eau recueilli à la surface d'un dépôt de glace formé en régime humide peut atteindre des valeurs aussi élevées que cinq fois celle de l'eau ayant servi à former la glace [23, 56]. De plus, cette différence, entre la conductivité de l'eau formant la glace et celle du film d'eau à la surface de la glace, est d'autant plus importante qu'au cours de la formation de la glace, le film d'eau est contaminé par des gaz produits par l'effet couronne [23]. En ce qui a trait à une formation en régime sec, les impuretés sont emprisonnées entre les couches de glace lors de sa formation [12].

2.5 Rappels sur l'évolution de l'arc électrique vers le contournement d'isolateurs recouverts de glace

Les dépôts de glace formés en régime humide à la surface des isolateurs de lignes et de postes contiennent généralement quelques discontinuités, c'est-à-dire des espaces d'air non occupés par les glaçons qui se forment au bord des jupes des isolateurs. Dans ces

discontinuités, que nous appellerons intervalles d'air, le champ peut être suffisamment intense pour que des arcs électriques y prennent naissance [45]. Par la suite, les arcs peuvent s'allonger jusqu'à atteindre une certaine longueur, qualifiée de critique, à partir de laquelle le contournement électrique des isolateurs devient inévitable.

L'amorçage et l'évolution d'arcs électriques vers le contournement d'isolateurs recouverts de glace peut être décrit à l'aide d'un modèle élaboré à partir de celui réalisé par Obenaus [26, 50]. Le circuit modèle du contournement d'une surface recouverte de glace, qui est représenté schématiquement à la figure 2.1, se présente sous la forme d'un arc électrique, d'une longueur x , en série avec une résistance $R(x)$. La résistance $R(x)$ représente la résistance du dépôt de glace, qui n'est pas contourné par l'arc électrique.

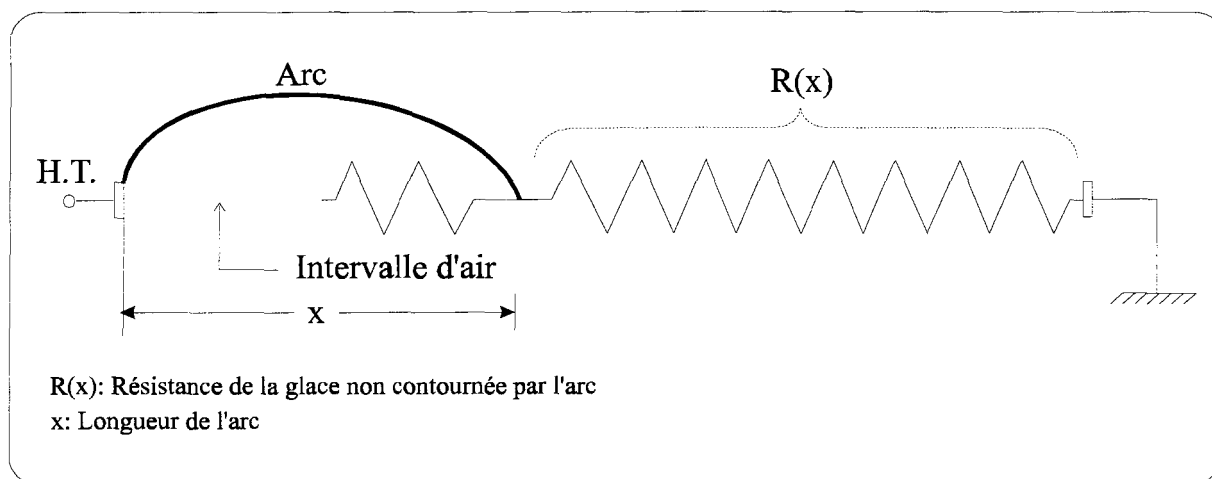


Fig. 2.1: Circuit modèle du contournement d'une surface recouverte de glace.

En tenant compte du fait que la chute de tension aux bornes des électrodes est négligeable, l'équation du processus de contournement des isolateurs recouverts de glace s'exprime comme suit:

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

ou V_m et I_m sont les valeurs crêtes de la tension et du courant de fuite, A et n sont les constantes de l'arc.

CHAPITRE III

FACTEURS INFLUENÇANT LA TENUE ÉLECTRIQUE DES ISOLATEURS RECOUVERTS DE GLACE

Plusieurs facteurs influencent la tenue électrique des isolateurs recouverts de glace. Les principaux facteurs impliqués ont fait l'objet de plusieurs études. Dans ce chapitre, nous passeront en revue la plupart de ces études. De plus, en raison des objectifs du présent travail, nous nous attarderons davantage sur deux facteurs, soit le niveau de pollution à la surface des isolateurs et l'augmentation de la température ambiante jusqu'au point de fonte de la glace.

3.1 Régime de croissance de la glace

C'est la glace formée en régime humide qui a été identifiée par plusieurs auteurs comme étant la plus sujette à causer le contournement des isolateurs recouverts de glace [13, 20, 56, 64]. Ce risque élevé de contournement des isolateurs recouverts d'un dépôt de

glace formé en régime humide a deux causes principales: la présence d'un film d'eau à la surface de la glace [24, 62, 64] et la présence de glaçons formés au bord des jupes des isolateurs [41, 56, 63].

La conductivité de l'eau est de 100 à 1000 fois plus élevée que celle de la glace [2, 41, 61]. Ainsi, le film d'eau qui prévaut à la surface d'une glace formée en régime humide fait en sorte que la conductivité électrique du dépôt de glace est nettement supérieure à celle d'un dépôt de glace formé en régime sec.

En ce qui concerne l'influence des glaçons formés au bord des jupes des isolateurs sur leur tenue électrique, elle s'explique comme suit: les glaçons qui se forment au bord des jupes des isolateurs peuvent croître jusqu'à relier les jupes entre elles. Les ponts de glace ainsi formés réduisent considérablement la ligne de fuite des isolateurs [16, 20], offrant alors un passage privilégié au courant et, du même coup, augmentant les risques de contournement des isolateurs.

3.2 Épaisseur du dépôt de glace

Plusieurs auteurs [11, 15, 56, 59, 66] ont démontré que la tension de tenue maximale des isolateurs recouverts de glace diminue en fonction de l'épaisseur de la glace et cela

jusqu'à une certaine épaisseur de glace, que l'on peut qualifier d'épaisseur "limite". À partir de cette épaisseur limite, même si la glace continue de s'épaissir, la tension de tenue maximale des isolateurs demeure constante.

Selon C.L. Phan et H. Matsuo, la diminution de la tension de tenue maximale en fonction de l'épaisseur de glace s'estomperait avec l'augmentation du niveau de pollution à la surface des isolateurs [56].

3.3 Uniformité d'un dépôt de glace formé en régime humide

Comme il a été mentionné à la section 3.1, les glaçons, que l'on retrouve au bord des jupes des isolateurs recouverts d'une glace formée en régime humide, causent la diminution de leur ligne de fuite. L'ampleur de cette diminution est fonction de l'angle que forment les glaçons avec l'axe vertical des isolateurs [13]. En effet, plus les glaçons sont verticaux, plus la ligne de fuite "effective" des isolateurs recouverts de glace est courte et, par conséquent, plus la tenue électrique des isolateurs est faible.

Or, plus les glaçons sont verticaux, plus la glace est dite "uniforme". L'uniformité de la glace est principalement fonction de la vitesse du vent qui prévaut lors de la formation de la glace. En effet, plus la vitesse du vent est élevée, plus les glaçons sont inclinés vers

l'axe des isolateurs et moins la glace est uniforme. L'influence de l'uniformité de la glace sur la tenue électrique des isolateurs a été étudiée par M. Farzaneh et J.F. Drapeau [13].

3.4 Conductivité de l'eau formant la glace

La tenue électrique des isolateurs recouverts de glace diminue avec l'augmentation de conductivité de l'eau formant la glace [19, 42, 65]. Cependant, selon les travaux réalisés par M. Farzaneh et al.[19], cette diminution de la tenue électrique peut cesser à partir d'une certaine valeur de la conductivité. En effet, jusqu'à une valeur de 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la tension de tenue maximale d'une colonne isolante recouverte de glace formée en régime humide diminue avec l'augmentation de la conductivité de l'eau formant la glace. Au dessus de cette valeur critique, le courant de fuite de l'isolateur devient suffisamment élevé pour faire fondre une partie de la glace, ce qui a pour conséquence que la tension de tenue maximale de l'isolateur recouvert de glace augmente en fonction de la conductivité de l'eau formant la glace.

3.5 Niveau de pollution à la surface des isolateurs

La tenue électrique des isolateurs recouverts de glace diminue avec l'augmentation du niveau de contamination à leur surface [31, 56, 57, 59]:

T. Fujimura et al. [31] ont testé une chaîne de 6 isolateurs préalablement contaminés et recouverts d'un dépôt de glace accumulé en régime humide. Les niveaux de contamination appliquée à la surface des isolateurs étaient compris entre $0,01 \text{ mg/cm}^2$ et $0,3 \text{ mg/cm}^2$. À la suite de ces essais, il s'est avéré que pour un niveau de contamination de $0,05 \text{ mg/cm}^2$ et un niveau de contamination de $0,1 \text{ mg/cm}^2$, la tension de tenue maximale était respectivement de l'ordre de 35% et 40% plus faible qu'avec un niveau de contamination de $0,01 \text{ mg/cm}^2$.

C.L. Phan et H. Matsuo [56] ont mis à l'essai une chaîne de quatre isolateurs en verre préalablement contaminés et recouverts de glace formée en régime humide (que les auteurs ont appelé givre lourd malgré la présence de glaçons au bord des jupes des isolateurs) d'une épaisseur de 1,5 cm. Avec un niveau de contamination de $0,05 \text{ mg/cm}^2$, la tension de tenue maximale était de 16% plus faible que lors d'essais réalisés avec des isolateurs non contaminés, tandis qu'avec un niveau de contamination de $0,1 \text{ mg/cm}^2$, le contournement électrique de la chaîne se produisait fréquemment au cours de la période d'accumulation de la glace.

C.L. Phan et H. Matsuo [57] ont refait le même type d'essais, mais cette fois-ci avec des isolateurs composites à long fût. Les isolateurs étaient préalablement contaminés et recouverts d'un dépôt de glace formé en régime humide [13, 18] d'une épaisseur de 2 cm. Avec un niveau de pollution de $0,05 \text{ mg/cm}^2$, la tension de tenue maximale des isolateurs était de l'ordre de 15% plus faible que celle trouvée lors d'essais sans contamination.

L. Shu et al. [59] ont mis à l'essai une chaîne de trois isolateurs suspendus, contaminés et recouverts de 2.3 kg de glace. Suite à la période d'accumulation de la glace, une période de fonte de la glace fut réalisée dans le but d'obtenir un film d'eau à la surface de celle-ci. Lors de ces essais, les auteurs ont observé que la tension de tenue diminuait avec l'augmentation du niveau de contamination jusqu'à un niveau de contamination de $0,09 \text{ mg/cm}^2$, valeur à partir de laquelle la tenue électrique des isolateurs ne semblait plus diminuer avec l'augmentation du niveau de contamination. Lorsque le niveau de contamination passait de $0,015 \text{ mg/cm}^2$ à $0,05 \text{ mg/cm}^2$, la tension de tenue diminuait de 18%, et lorsqu'il passait de $0,05 \text{ mg/cm}^2$ à $0,1 \text{ mg/cm}^2$, elle diminuait de 13%.

3.6 Caractéristiques des isolateurs

Certaines caractéristiques des isolateurs, telles que le diamètre des jupes, la longueur du pas et la longueur de la distance d'arc, ont une influence sur leur performance électrique sous glace. Plusieurs travaux ont permis de mettre en lumière l'influence de ces caractéristiques sur la tenue électrique des isolateurs recouverts de glace [4, 5, 13, 41, 42, 44, 55, 56, 57, 61]:

L'influence du diamètre des isolateurs sur leur comportement électrique sous glace a été observé lors de différentes études [42, 57]. En effet, selon les résultats de ces études, la tension de tenue maximale par mètre de distance d'arc des isolateurs recouverts de glace, est plus faible pour des isolateurs de large diamètre, tels que des isolateurs en céramique, que pour des isolateurs de faible diamètre, comme des isolateurs composites. Cela s'explique entre autres par le fait que des isolateurs de large diamètre accumulent plus de glace que des isolateurs de petit diamètre. La résistance électrique d'un dépôt de glace recouvrant des isolateurs de large diamètre est donc plus faible que celle d'un dépôt de glace recouvrant des isolateurs de petit diamètre. D'ailleurs, C.L. Phan et al. [55] ont observé que le courant de fuite moyen des isolateurs de large diamètre est plus important que celui des isolateurs avec des jupes de petit diamètre.

La longueur des pas des isolateurs, c'est-à-dire la plus courte distance entre deux jupes de même diamètre, influence aussi la tenue électrique des isolateurs recouverts de glace. En effet, plus la longueur des pas est grande, plus il sera difficile pour les glaçons de former des ponts de glace entre les jupes des isolateurs et, en contrecoup, de réduire de façon significative la ligne de fuite des isolateurs. Pour cette raison, E.A. Cherney a observé que des isolateurs composites dont le diamètre des jupes alterne ont un meilleur comportement électrique sous glace que ceux dont le diamètre des jupes est constant [5]. Les résultats des travaux de M.D. Charneski et al. [4] et de K. Kannus et al. [41] permettent de tirer des conclusions similaires.

Également, la distance d'arc des isolateurs recouverts de glace influence leur tenue électrique. Effectivement, la tenue électrique d'isolateurs recouverts de glace augmente avec l'allongement de leur distance d'arc. Par exemple, pour une chaîne constituée de un à quatre isolateurs en céramique, la tension de tenue maximale augmente de façon presque linéaire avec l'allongement de la chaîne [13, 56]. Par contre, pour une chaîne constituée de plus de cinq à sept isolateurs, la tension de tenue maximale par mètre de distance d'arc tend à diminuer avec l'allongement de la chaîne [44, 61].

3.7 Augmentation de la température suite à l'accumulation d'un dépôt de glace

Selon certains auteurs [44], l'augmentation de la température ambiante, après la formation d'un dépôt de glace à la surface des isolateurs, influencerait la tenue électrique de ces derniers. En effet, dans le cas d'isolateurs recouverts d'un dépôt de glace formé en régime sec, l'augmentation de la température ambiante jusqu'au point de fonte de la glace cause une diminution significative de la tenue électrique des isolateurs. Cela s'explique par le fait que l'augmentation de la température ambiante cause la formation d'un film d'eau à la surface de la glace et, par le fait même, la dissolution des impuretés contenues dans la glace.

Cependant, dans le cas des isolateurs recouverts d'un dépôt de glace formé en régime humide et soumis à une tension alternative, les avis sont quelque peu partagés à ce sujet. Aussi, selon certains auteurs [1, 17, 24], une période d'augmentation de la température ambiante jusqu'au point de fonte de la glace, après la période d'accumulation de la glace, n'aurait qu'une très faible influence sur la tenue électrique des isolateurs recouverts de cette glace. D'après la plupart de ces auteurs, l'important c'est qu'il y ait un film d'eau à la surface du dépôt de glace. Puisqu'il y en a généralement un à la surface d'un dépôt de glace formé en régime humide, il semblerait qu'une période de fonte de la glace ne diminuerait que de peu la tenue électrique des isolateurs recouverts de ce type de glace.

Par contre, selon d'autres auteurs [34, 66], la tension de tenue des isolateurs recouverts de glace formée en régime humide diminuerait de façon assez importante, lorsqu'une période de fonte de la glace suit celle d'accumulation de glace.

M. Hara et C.L Phan [34] ont mis à l'essai des isolateurs composites à long fût et des isolateurs en porcelaine recouverts d'un dépôt de glace formé en régime humide. La période d'accumulation de la glace était suivie d'une augmentation de la température jusqu'à des valeurs comprises entre $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Au cours des périodes de fonte, la température dans la chambre augmentait à des taux allant de $0,8\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ à $80\text{ }^{\circ}\text{C/h}$. Les auteurs ont conclu de ces essais qu'une période de fonte causait une diminution significative de la tenue électrique des isolateurs. C'est ainsi que, lors des essais en régime de fonte, le contournement électrique des isolateurs recouverts de glace se produisait à des épaisseurs de glace plus faibles que lors des essais en régime d'accumulation. De plus, selon eux, un taux d'augmentation rapide de la température ambiante augmenterait davantage les risques de contournement qu'un taux d'augmentation lent de la température.

Lors d'essais réalisés par C. Sun et al. [66], des dépôts de glace étaient formés en régime humide sur des courtes chaînes d'isolateurs en céramique. Après l'accumulation de glace, la température dans la chambre d'essais était augmentée jusqu'à un peu plus de 0°C . Les auteurs ont remarqué que la tension de tenue maximale la plus faible était mesurée au cours de la période de fonte de la glace, et cela à des températures ambiantes d'environ

+4°C. Lorsque la température ambiante dépassait cette valeur, la fonte des glaçons était suffisamment importante pour que la tenue électrique des isolateurs augmente.

Les divergences d'opinions concernant l'influence de l'augmentation de la température ambiante sur la tenue électrique d'isolateurs recouverts de glace sont très certainement la conséquence des différentes méthodes d'essais. Par exemple, le temps qui s'écoule entre la fin de la période d'accumulation de la glace et l'application de la tension d'essais influence la tenue électrique des isolateurs recouverts de glace. Ainsi, si cette période de temps est longue, le film d'eau à la surface de la glace aura le temps de se solidifier et la tenue électrique des isolateurs sera plus élevée que si cette période avait été courte.

CHAPITRE IV

EXPÉRIMENTATION

Dans ce chapitre, nous décrirons l'équipement du laboratoire de haute tension et givrage atmosphérique du GRIEA de l'Université du Québec à Chicoutimi, de même que les diverses méthodes de mesure qui ont permis de mener à bien les expérimentations. Il y sera également question des procédures expérimentales qui ont permis de trouver la tension de tenue maximale, V_{TM} , d'isolateurs recouverts de glace formée en régime humide, et cela pour différents régimes d'essais et niveaux de contamination.

4.1 Équipements de la chambre climatique

Les essais ont été effectués dans une chambre climatique équipée de façon adéquate pour l'accumulation de glace et la réalisation de tests de contournement. La figure 4.1 présente de façon schématique cette chambre qui, de par ses dimensions (4,8 m × 2,8 m × 3,5 m), permet de tester un isolateur ou une chaîne d'isolateurs allant jusqu'à 1 m de

longueur. La chambre d'essais est dotée d'un système d'arrosage, d'un système de ventilation, d'un système de refroidissement et de contrôle de la température, d'un système d'alimentation à haute tension et d'un système de mesures électriques. Ces différents systèmes sont décrits plus en détail dans les lignes qui suivent.

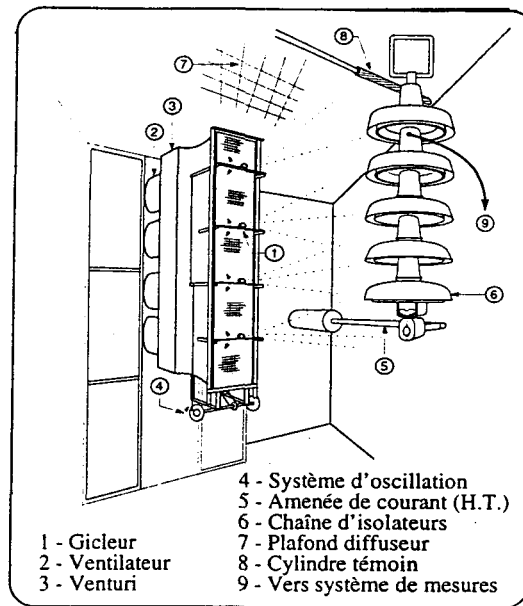


Fig. 4.1: Vue de la chambre climatique [18]

4.1.1 Système d'arrosage

Le système d'arrosage permet de produire de fines gouttelettes d'eau. Ce système est composé de quatre gicleurs pneumatiques placés sur un support vertical parallèle à l'axe

des isolateurs. La distance de ce support par rapport à l'axe central des isolateurs est de 1,8 m. De plus, afin d'améliorer l'uniformité de la glace accumulée à la surface des isolateurs, les gicleurs oscillent de haut en bas. Enfin, l'eau utilisée pour engendrer les fines gouttelettes est déminéralisée et du sel (NaCl) lui est ajouté, afin d'obtenir la conductivité désirée.

4.1.2 Système de ventilation

Le système de ventilation permet de générer un courant d'air dirigeant les gouttelettes d'eau vers les isolateurs. Le courant d'air, dont la vitesse est relativement uniforme, est obtenu en utilisant un système de huit ventilateurs placés par paires dans quatre tubes débouchant sur un venturi. Le système peut générer un vent dont la vitesse peut atteindre jusqu'à 14 m/s à une distance de 1,8 m de la lisière du venturi.

4.1.3 Système de refroidissement et de contrôle de la température

Le système de refroidissement, qui comprend deux unités indépendantes de machines frigorifiques à compression, permet d'atteindre des températures dans la chambre climatique allant jusqu'à -35°C. La température dans la chambre est contrôlée avec une

précision de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ à l'aide d'un régulateur à action proportionnelle, intégrale et dérivée (PID). Également, des échangeurs thermiques permettent une distribution plus uniforme de la température dans la chambre.

4.1.4 Système d'alimentation à haute tension et système de mesures électriques

La figure 4.2 présente le système d'alimentation à haute tension utilisé au cours des expérimentations. Il est constitué d'un transformateur d'une puissance de 240 kVA, dont l'impédance de court-circuit est de 5%. Les tensions nominales au primaire et au secondaire du transformateur sont respectivement de 0,6 kV_{eff} et 120 kV_{eff}. Le côté primaire du transformateur est connecté à un régulateur de tension de 240 kVA, dont l'impédance de court-circuit est de 2%. Le courant de court-circuit débité par le système d'alimentation à la tension maximale d'opération, soit 120 kV_{eff}, est d'environ 28 A.

Le système de mesures électriques, également présenté à la figure 4.2, est composé d'un diviseur de tension capacitif et d'une résistance de mesure R_m qui permettent respectivement de mesurer la tension appliquée aux bornes des isolateurs, V_2 , et le courant de fuite, I_f . Les valeurs de la tension, V_2 , et du courant de fuite, I_f , sont mesurées par l'entremise d'un système de mesure analogique et d'un système d'acquisition numérique.

La fréquence d'acquisition du système numérique est de 2400 Hz et les données numériques, dont la résolution est de 12 bits, sont traitées en utilisant le logiciel Viewdac.

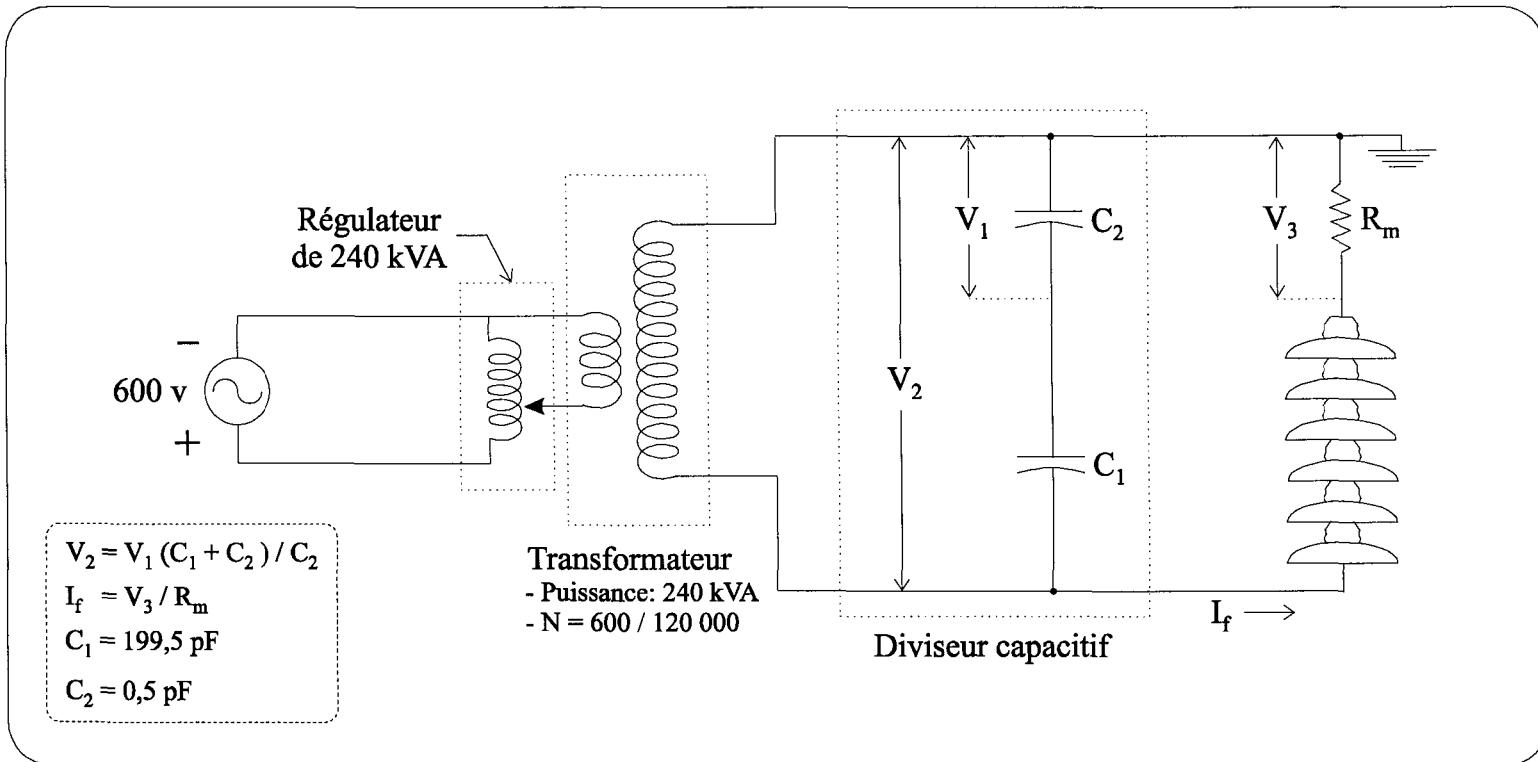


Fig. 4.2: Système d'alimentation à haute tension et système de mesures électriques.

4.2 Mesure des paramètres climatiques dans la chambre

Au cours de précédents essais réalisés dans la chambre climatique décrite à la section 4.1, l'ajustement des systèmes d'arrosage, de ventilation et de refroidissement furent déterminés pour différentes valeurs de teneur en eau, de diamètre des gouttelettes d'eau et de vitesse du vent [18]. Par conséquent, au cours de la présente étude, ces paramètres furent contrôlés en ajustant ces systèmes de façon à obtenir les conditions climatiques désirées. La description des méthodes qui furent utilisées afin de mesurer ces paramètres et celle utilisée pour mesurer la température dans la chambre climatique tout au cours des expérimentations, suivent maintenant.

4.2.1 Teneur en eau liquide contenue dans l'écoulement d'air

La teneur en eau liquide de l'écoulement d'air, τ , fut mesurée à l'aide de la méthode du petit cylindre qui est la suivante [58, 60]: un cylindre de 3,15 mm de rayon est placé de 30 secondes à 1 minute dans l'écoulement d'air portant les gouttelettes d'eau. Par la suite, le poids de glace accumulée sur ce cylindre est mesuré et la teneur en eau liquide est calculée à partir de l'équation 4.1.

$$\tau = \frac{\pi \cdot \rho_i}{E \cdot v \cdot T} \left[\left(\frac{m}{\pi \cdot \rho_i \cdot l} + r_i^2 \right)^{1/2} - r_i \right] \quad (4.1)$$

τ : Teneur en eau liquide (g/m³);

ρ_i : Densité de la glace accumulée sur le cylindre (g/m³);

E : Coefficient de capture des gouttelettes d'eau;

v : Vitesse de l'écoulement d'air (m/s);

T : Durée de l'accumulation (s);

m : Masse de la glace accumulée sur le cylindre (g);

l : Longueur du cylindre (m);

r_i : Rayon du cylindre (m).

4.2.2 Diamètre volumique des gouttelettes d'eau

Le diamètre volumique moyen des gouttelettes d'eau fut mesuré par la méthode suivante [32]: une lame, sur laquelle est étalée une solution de collargol à 10%, est placée un court laps de temps dans le courant d'air qui porte les gouttelettes d'eau. Au cours de cette étape, chaque gouttelette qui frappe la lame y laisse une trace circulaire. À partir du diamètre extérieur, D , des traces laissés par les gouttelettes, le diamètre volumique de celles-ci, d , est évalué à l'aide de la formule 4.2 (où la valeur de la constante k est

déterminée tel que décrit dans l'article référé plus haut). Le diamètre volumique moyen des gouttelettes d'eau est déterminé à partir d'un échantillon d'environ 1000 gouttelettes.

$$d = k \cdot D \quad (4.2)$$

4.2.3 Vitesse du vent

La vitesse du vent produit à 1,8 m de la lisière du venturi, V , fut mesurée à l'aide d'un anémomètre à fil chaud.

4.2.4 Température

Un thermocouple placé à l'intérieur de la chambre permet de mesurer la température à l'intérieur de celle-ci, T , tout au cours des expérimentations.

4.3 Détermination des caractéristiques du dépôt de glace

Lors de la présente étude, la densité de la glace n'a pas été déterminée en effectuant une mesure sur celle-ci, mais plutôt à partir des conditions climatiques qui prévalaient dans la chambre au moment de sa formation. La relation entre la densité de la glace et les conditions climatiques prévalant dans la chambre du GRIEA, au moment de sa formation, a été déterminée lors de précédents essais [18]. La méthode qui fut utilisée pour mesurer la densité de la glace est décrite dans les lignes qui suivent. Seront également décrites les méthodes utilisées au cours de la présente étude pour contrôler l'épaisseur de la glace et mesurer la longueur de l'intervalle d'air des dépôts de glace.

4.3.1 Densité de la glace

La densité de la glace, ρ , accumulée à la surface des isolateurs, fut déterminée tel que présenté à l'équation 4.3, par la mesure du poids et du volume d'un échantillon de cette glace. Le volume est obtenu en immergeant l'échantillon dans une huile minérale de faible densité. Afin d'éviter que l'huile ne pénètre dans les pores de l'échantillon de glace, ce dernier est préalablement enduit d'une mince couche de Formvar. Le volume de l'échantillon est déterminé en soustrayant le volume initial occupé par l'huile, à celui occupé par l'huile et l'échantillon de glace [18].

$$\rho = \frac{\text{Poids de glace}}{\text{Volume de glace}} \quad (4.3)$$

4.3.2 Épaisseur de référence de la glace

L'épaisseur de la glace accumulée à la surface des isolateurs n'est pas mesurée directement sur ces derniers. Elle est plutôt contrôlée par l'entremise d'un cylindre témoin placé à proximité de la partie supérieure des isolateurs, tout au cours de l'accumulation (voir figure 4.1) [18]. Ce cylindre, dont le diamètre est de 3,8 cm, effectue un tour à la minute. L'épaisseur de référence de la glace, ε , est déterminée à la fin de la période d'accumulation.

4.3.3 Longueur de l'intervalle d'air

Les dépôts de glace formés à la surface des isolateurs peuvent comporter quelques discontinuités ($d_1, d_2, d_3, \dots, d_i$), c'est à dire des espaces d'air non contournés par les glaçons qui se forment au bord des jupes des isolateurs (voir figure 4.3). Afin d'avoir une idée approximative de l'importance de ces discontinuités après les périodes d'accumulation, de

fonte et de l'essai de tenue, la longueur de chaque discontinuité est mesurée. Par la suite, la somme des longueurs des discontinuités est faite, $\sum d_i$, et est désignée comme étant la longueur de l'intervalle d'air, L , du dépôt de glace formé sur un isolateur composite ou sur une chaîne d'isolateurs IEEE.

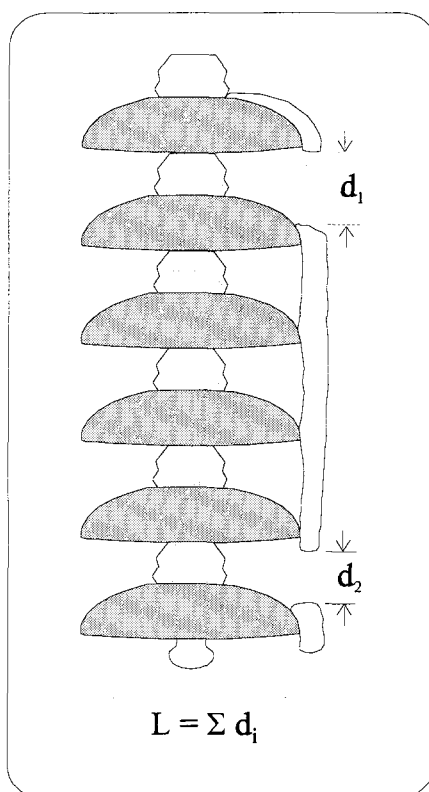


Fig. 4.3: Mesure de l'intervalle d'air, L .

4.4 Isolateurs testés

Les isolateurs testés au cours des expérimentations sont des isolateurs standards IEEE en porcelaine, des isolateurs composites en EPDM et des isolateurs composites en silicone. Leurs caractéristiques physiques sont présentées au tableau 4.1 et leur profil à la figure 4.4.

Tableau 4.1: Caractéristiques physiques des isolateurs testés

Caractéristiques des isolateurs	Type d'isolateur	
	Standard IEEE en porcelaine	Composites (en EPDM et en silicone)
Ligne de fuite (mm/unité)	305	2171
Diamètre des jupes (mm)	254	90 et 105
Pas (mm)	146	55
Nombre d'unité(s)	6	1
Distance d'arc (mm)	971	714
Surface isolante (cm ² /unité)	1599	3841
Résistance mécanique de rupture (kN)	67 à 87	120

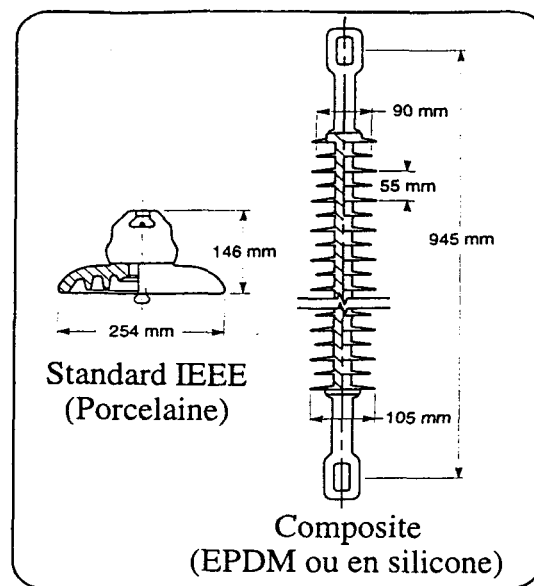


Fig. 4.4: Vue des isolateurs testés [18].

4.5 Définition des différents régimes d'essais

Les expérimentations, réalisées lors de la présente étude, ont eu lieu en régime d'accumulation et en régime de fonte. Le régime d'accumulation consiste à accumuler un dépôt de glace à la surface d'isolateurs, pour ensuite les soumettre à une tension d'essai, V_E . Pour ce qui est du régime de fonte, il consiste à accumuler un dépôt de glace à la surface d'isolateurs, pour ensuite augmenter la température ambiante aux isolateurs jusqu'au point de fonte de la glace. Dans le cas des essais en régime de fonte, ce n'est qu'après la période de fonte que les isolateurs sont soumis à une tension d'essai, V_E .

Il faut prendre note qu'en régime d'accumulation, une période d'environ 2 minutes après la période d'accumulation est requise pour la prise de photos. Dans le cas des essais réalisés en régime de fonte, une période d'environ 5 minutes est requise après la période d'accumulation pour la prise de photos et l'installation d'un dispositif de collection de l'eau de fonte de la glace.

Au cours des étapes d'accumulation et de fonte, les isolateurs sont sous tension. Les figures 4.5 et 4.6 présentent l'évolution de la tension en fonction des étapes réalisées au cours des essais en régime d'accumulation et en régime de fonte. Une description détaillée des différentes étapes expérimentales est présentée à la section 4.6.

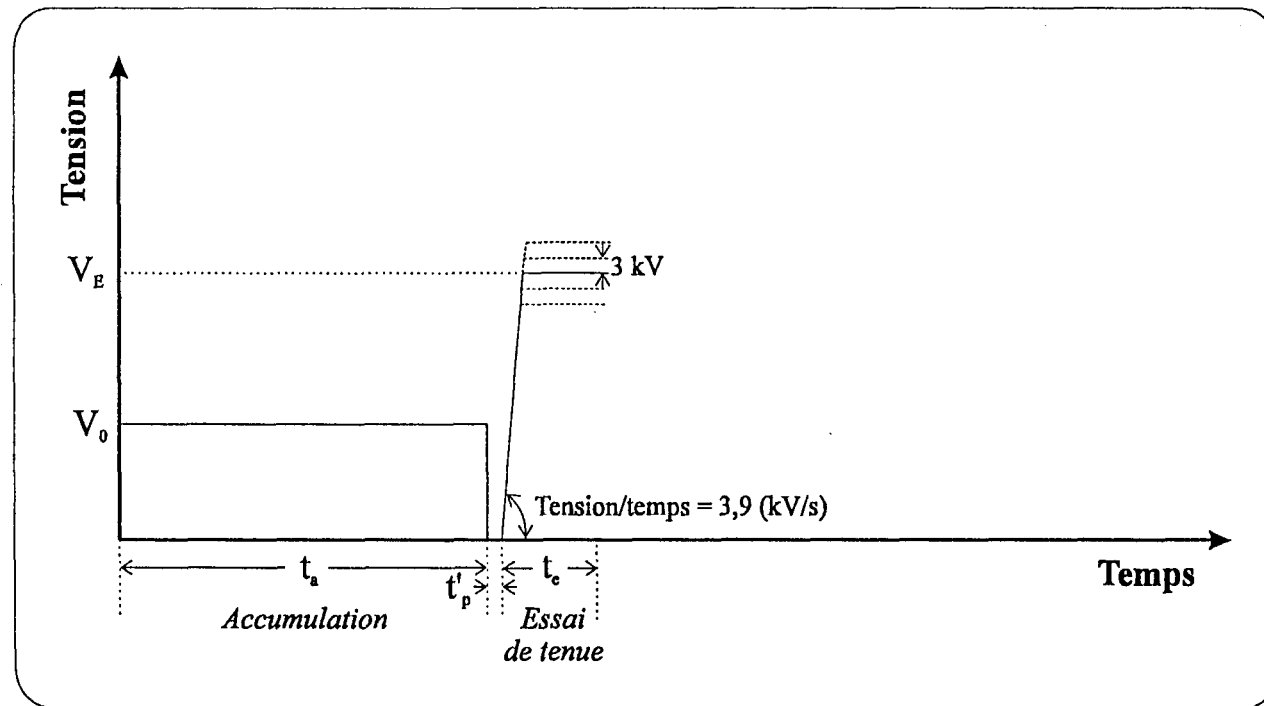


Fig. 4.5: Évolution de la tension appliquée aux bornes des isolateurs au cours des étapes réalisées en régime d'accumulation.

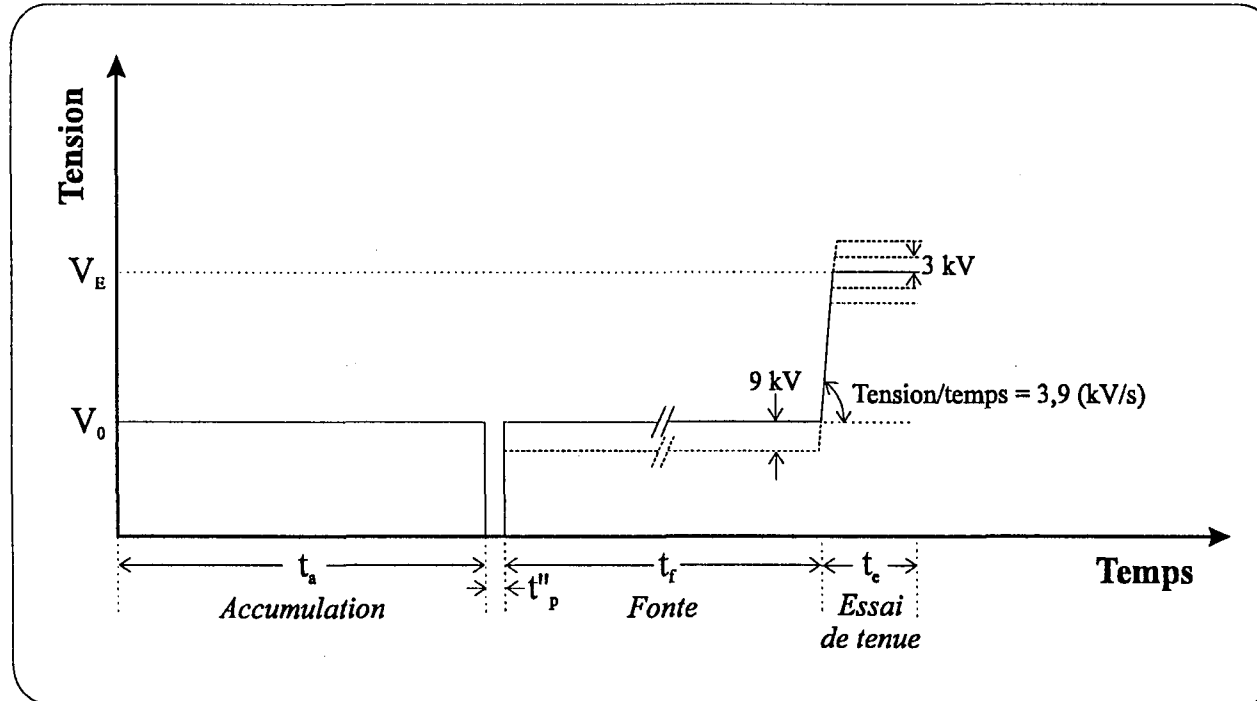


Fig. 4.6: Évolution de la tension appliquée aux bornes des isolateurs au cours des étapes réalisées en régime de fonte.

- t_a : Durée de l'étape d'accumulation (1,5 h);
 t_f : Durée de l'étape de fonte (environ 0,5 h ou 5 h);
 t_e : Durée de l'essai de tenue (durée maximale: 0,5 h);
 t'_p : Temps nécessaire pour la prise de photos (2,5 min.);
 t''_p : Temps nécessaire pour la prise de photos et l'installation
 du dispositif de collection de l'eau de fonte (5 min.);
 V_0 : Tension de service;
 V_E : Tension d'essai.

4.6 Étapes expérimentales

Les étapes expérimentales qui ont permis de mener à bien les expérimentations sont les suivantes:

L'étape de contamination;

L'étape d'accumulation;

L'étape de fonte;

L'étape de l'essai de tenue.

Il faut prendre note qu'au cours des étapes d'accumulation, de fonte et de l'essai de tenue, l'intensité du courant de fuite, I_f , et de la tension aux bornes des isolateurs, V_2 , ont été enregistrées par le système de mesure analogique. Également, au cours de l'essai de tenue, ces données ont été enregistrées par le système de mesure numérique.

4.6.1 Étape de contamination

a) Contamination

L'étape de contamination, qui n'est réalisée que lors des essais avec contamination, consiste à contaminer la surface d'isolateurs propres et secs avec une solution aqueuse contenant du sel (NaCl) et du kaolin. Comme nous le verrons plus bas, la méthode d'application de cette solution varie en fonction du type d'isolateur.

Isolateurs standards IEEE

L'application de la solution de contamination à la surface des isolateurs standards IEEE en porcelaine est effectuée conformément à la prescription de la norme internationale

CEI 507 [37]. Les isolateurs sont donc préalablement nettoyés et séchés. Par la suite, ils sont trempés dans une solution aqueuse de sel et de kaolin, et séchés au moins 12 heures avant l'étape d'accumulation. La composition de la solution de contamination permettant d'obtenir une densité du dépôt de sel, DDS, de $0,05 \text{ mg/cm}^2$ à la surface des isolateurs IEEE est présentée au tableau 4.2.

Tableau 4.2: Composition de la solution de contamination des isolateurs IEEE permettant d'obtenir une densité de dépôt de sel (NaCl) équivalent, DDS, de $0,05 \text{ mg/cm}^2$.

Solution de contamination des isolateurs IEEE (DDS = $0,05 \text{ mg/cm}^2$)	
Volume d'eau déminéralisée	24 l
Poids de kaolin	960 g
Poids de sel	630 g

Isolateurs composites en EPDM et en silicone

La surface des isolateurs composites est habituellement hydrophobe. C'est pourquoi, le trempage régulier des isolateurs composites dans une solution aqueuse de sel et de kaolin

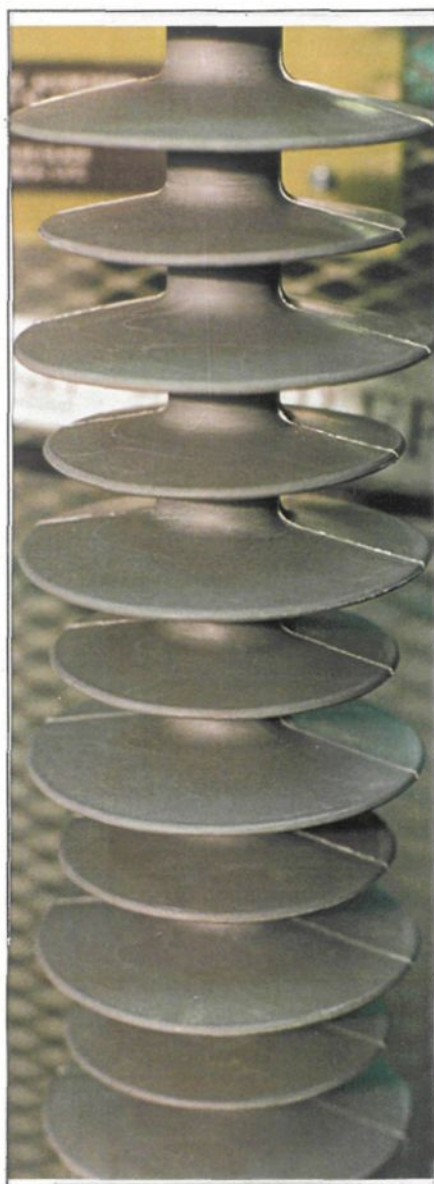
mène à une distribution inégale de la solution de contamination à leur surface. La photo présentée à la figure 4.7 présente un isolateur composite en silicone qui fut trempé dans une solution aqueuse de sel et de kaolin. Cette photo permet de bien voir jusqu'à quel point la solution de contamination se distribue de façon non uniforme à la surface des isolateurs composites.



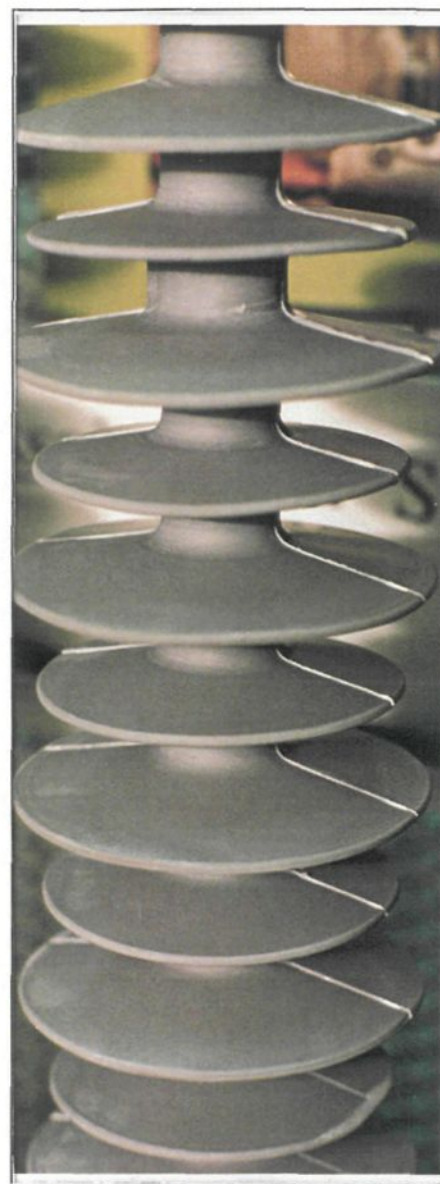
Fig. 4.7: Isolateur composite en silicone qui a été trempé dans une solution aqueuse de sel (NaCl) et de kaolin.

Afin que le dépôt de sel et de kaolin adhère plus uniformément à la surface des isolateurs composites, l'application d'une mince couche de kaolin sec à leur surface est effectuée avant l'étape de trempage [9]. La figure 4.8 présente un isolateur composite en EPDM et un isolateur composite en silicone, qui furent recouverts d'une mince couche de

kaolin sec, puis trempés dans une solution aqueuse de sel et de kaolin. En comparant les photos présentées aux figures 4.7 et 4.8, on voit bien que le dépôt de sel et de kaolin est nettement plus uniforme lorsque les isolateurs composites sont préalablement recouverts d'une couche de kaolin sec.



(a)



(b)

Fig. 4.8: Isolateurs composites, en EPDM (a) et en silicone (b), contaminés (préalablement recouverts d'une mince couche de kaolin sec).

La méthode qui fut utilisée pour contaminer les isolateurs composites est celle proposée par A. De La O, R. S. Gogur et J. Chang [9]. Voici les étapes de cette méthode:

- Application d'une couche fine et uniforme de kaolin sec à la surface de l'isolateur avec un pinceau doux;
- Humidification de la surface recouverte de kaolin avec un pulvérisateur d'eau;
- Trempage de l'isolateur dans la solution aqueuse de sel (NaCl) et de kaolin;
- Secouement de l'isolateur en position horizontale afin d'éviter la formation de taches occasionnées par un surplus de solution à la surface de l'isolateur;
- Séchage de l'isolateur, légèrement incliné par rapport à la verticale, durant une période de 12 heures pour les isolateurs en EPDM et de 3 heures pour les isolateurs en silicone.

L'inclinaison donnée aux isolateurs, lors de la période de séchage, permet de mieux redistribuer la contamination à la surface des isolateurs. En ce qui a trait à la durée de la période de séchage, elle avait été déterminée, par l'auteur de la présente méthode, en fonction du temps nécessaire pour que les isolateurs recouvrent leur hydrophobicité. Cependant, même après une semaine, les isolateurs composites (en EPDM et en silicone) que nous avons contaminés, ne semblaient pas avoir recouvré leur hydrophobicité.

La solution aqueuse utilisée afin de contaminer la surface des isolateurs composites est composée de 24 l d'eau, de 960 g de kaolin et d'une quantité variable de sel. Le tableau

4.3 présente le poids de sel contenu dans cette solution, en fonction de la densité de dépôt de sel équivalent voulue, soit $0,05 \text{ mg/cm}^2$ ou $0,1 \text{ mg/cm}^2$. Il faut prendre note que pour un même niveau de contamination, la quantité de sel utilisée varie en fonction du type d'isolateur composite contaminé.

Tableau 4.3: Poids de sel (NaCl) dans la solution de contamination, composée de 24 l d'eau et de 960 g de kaolin, en fonction du DDS et du type d'isolateur composite.

Poids de sel de la solution de contamination		
Type d'isolateur		
DDS (mg/cm^2)	EPDM	Silicone
0,05	1 100 g	800 g
0,1	2 500 g	1 350 g

b) Vérification du niveau de contamination

La densité du dépôt de sel, DDS, à la surface des isolateurs contaminés est vérifiée selon la méthode de mesure recommandée par la norme CEI 507 [37]. Un isolateur, dit "isolateur témoin", est choisi au hasard parmi une série d'environ 6 isolateurs contaminés.

Sa surface est lavée en entier ou en partie à l'aide d'une éponge que l'on rince dans un volume d'eau déminéralisée prédéterminé. Le tableau 4.4 présente les dimensions de la surface lavée, S , et le volume d'eau ayant servi à son lavage, V , en fonction du type d'isolateur. Une fois que le lavage de la surface contaminée est terminé, la conductivité de l'eau ayant servi à son lavage est mesurée. Par la suite, la salinité de cette eau est déterminée à partir de sa résistivité, grâce à l'abaque A.1 présenté en annexe. Finalement, l'équation 4.4 permet d'établir la densité du dépôt de sel, DDS (mg/cm^2), à partir de la salinité, S_a (mg/ml), du volume d'eau, V (ml), et de la surface lavée, S (cm^2). Dans le cas où la différence entre la densité du dépôt de sel mesurée et celle désirée ne dépasse pas 15%, la série d'isolateurs contaminés est admise pour la suite de l'expérimentation.

$$DDS = \frac{S_a \cdot V}{S} \quad (4.4)$$

Tableau 4.4: Dimensions de la surface lavée, S , et du volume d'eau servant à son lavage, V , en fonction du type d'isolateur.

	Type d'isolateur	
	IEEE	Composites (en EPDM et en silicone)
S (cm²)	1599 (un isolateur au complet)	1842 (3 sections de 110 mm de long)
V (ml)	1000	750

4.6.2 Étape d'accumulation

L'étape d'accumulation consiste à accumuler un dépôt de glace à la surface des isolateurs propres ou contaminés. Les conditions climatiques prévalant dans la chambre au cours de la formation de la glace, telles qu'elles sont présentées au tableau 4.5, sont les suivantes: la température dans la chambre est de -12°C , le diamètre volumique moyen des gouttelettes d'eau est de $80\text{ }\mu\text{m}$, la vitesse du vent est de $3,3\text{ m/s}$ et la teneur en eau liquide est de $6,8\text{ g/m}^3$. Ces conditions permettent de former une glace dite en régime humide [18]. La densité des glaçons d'un dépôt de glace formé dans ces conditions est de

0,9 g/cm² et celle du reste du dépôt est de 0,87 g/cm² [18]. De plus, la conductivité de l'eau utilisée pour former cette glace est de 80 µS/cm (à 20°C).

Tableau 4.5: Conditions dans la chambre climatique du GRIEA permettant d'obtenir un dépôt de glace formé en régime humide à la surface des isolateurs.

Conditions climatiques au cours de l'accumulation			
T	d	V	τ
-12°C	80 µm	3,3 m/s	6,8 g/m ³

T : Température dans la chambre climatique;

d : Diamètre volumique moyen des gouttelettes d'eau;

V : Vitesse du vent à la surface des isolateurs;

τ : Teneur en eau liquide de l'écoulement d'air.

La durée de la période d'accumulation est de 90 minutes. Après cette période, l'épaisseur de la glace accumulée sur le cylindre témoin est de 1,5 cm et le poids de glace accumulé à la surface des isolateurs est de l'ordre de 4,4 kg, pour les isolateurs IEEE, et de l'ordre de 2,3 kg pour les isolateurs composites (en EPDM et en silicone).

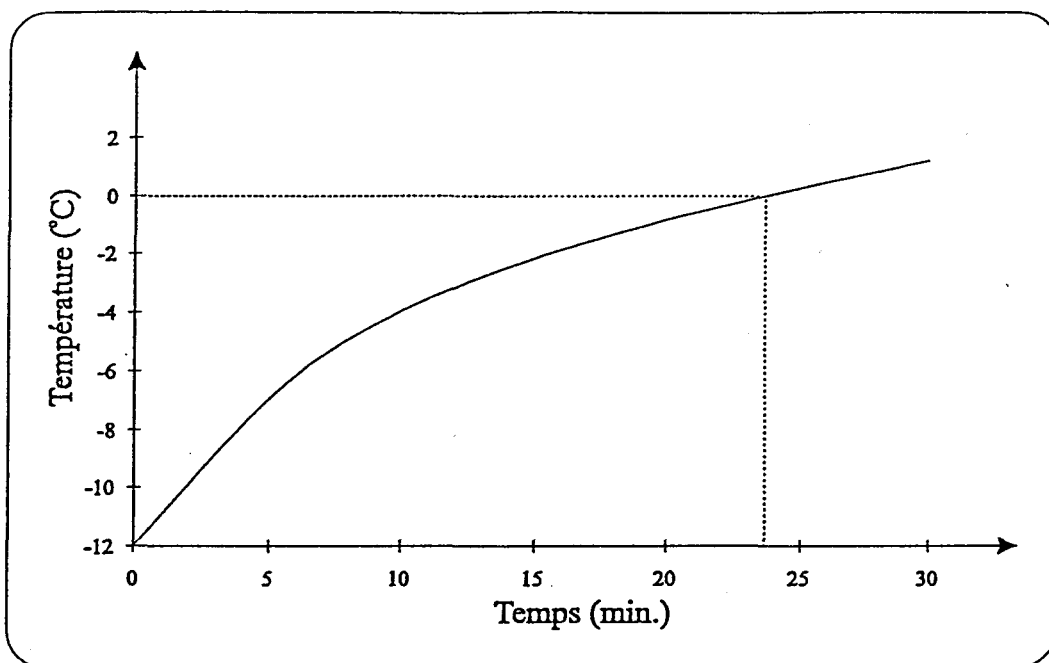
Tout au cours de la période d'accumulation, les isolateurs sont soumis à une tension, V_0 . La valeur de cette tension est de 10 kV par unité pour les isolateurs IEEE et de 51 kV par unité pour les isolateurs composites (en EPDM et en silicone). Ces valeurs de tension correspondent à celles des tensions de service auxquelles sont soumis les isolateurs des lignes d'Hydro-Québec, de 69 kV, 120 kV et 161 kV.

4.6.3 Étape de fonte

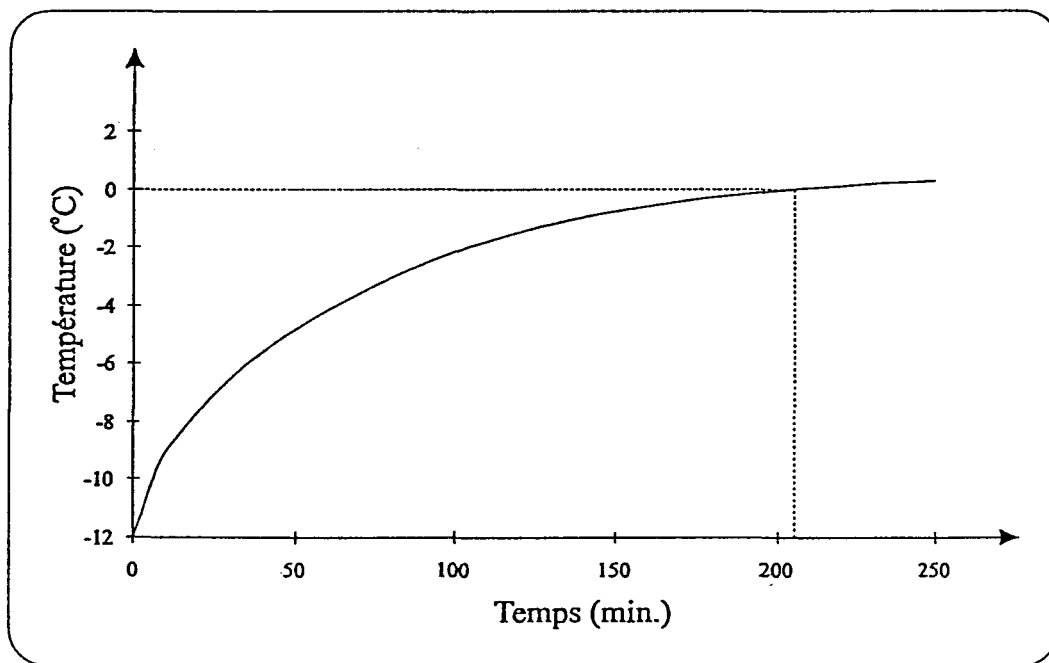
L'étape de fonte consiste à réchauffer la glace présente à la surface des isolateurs, jusqu'à obtenir un film d'eau manifeste à sa surface. Pour ce faire, la température dans la chambre climatique est augmentée de -12°C jusqu'à un peu plus de 0°C .

Au cours de l'étape de fonte, les systèmes d'arrosage, d'échangeur thermique et de contrôle de la température sont arrêtés. La chaleur nécessaire pour réaliser l'augmentation de la température dans la chambre climatique provient de l'extérieur de la chambre par échange thermique non forcé. Deux régimes de fonte de la glace sont obtenus en fonction du taux d'augmentation de la température dans la chambre. Il s'agit des régimes de fonte lente et de fonte rapide. En fonte lente, la température augmente doucement durant une période d'environ 5 heures à un taux moyen de $0,04^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Tandis qu'en fonte rapide, elle augmente de façon brusque durant une période d'environ 30 minutes à un taux moyen

de $0,4^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Les courbes de la figure 4.9 présentent, pour chacun des régimes de fonte, une évolution typique de la température dans la chambre climatique, au cours de la fonte.



(a)



(b)

Fig. 4.9: Évolution de la température dans la chambre climatique au cours de la fonte lente (a) et de la fonte rapide (b).

L'angle d'ouverture de la porte de la chambre froide, nécessaire à la réalisation de chacun des régimes de fonte, est présenté au tableau 4.6. On y remarque qu'en fonte rapide, l'ouverture de la porte est plus importante pour les isolateurs IEEE que pour les isolateurs composites (en EPDM et en silicone). En fait, au cours des trente minutes de la fonte rapide, une ouverture de 35° s'est avérée insuffisante pour obtenir un film d'eau à la surface de la glace accumulée sur les isolateurs IEEE.

Tableau 4.6: Angle d'ouverture de la porte de la chambre climatique
en fonction du taux de fonte et du type d'isolateur.

Taux d'augmentation de la température	Angle d'ouverture de la porte de la chambre	
	Type d'isolateur	
	IEEE	Composites (en EPDM et en silicone)
lent (0,04°C/min.)	0°	0°
rapide (0,4°C/min.)	65°	35°

Au cours des fontes lente et rapide, les isolateurs sont soumis à une tension dont la valeur est de 51 kV pour tous les isolateurs testés. Il faut prendre note que, pour les isolateurs IEEE, une tension de 51 kV représente 15% de moins que la tension qui leur est appliquée au cours de l'accumulation de glace. En fait, lors d'essais préliminaires en

régime de fonte lente, de fortes décharges, causant une chute excessive de glace, ont eu lieu avec ce type d'isolateur. Afin d'atténuer les risques d'une importante perte de glace, cette baisse de 15% de la tension c'est avéré nécessaire.

On considère généralement que la période de fonte est terminée lorsque les conditions suivantes sont remplies:

- la température dans la chambre a atteint une valeur légèrement supérieure à 0°C;
- le temps prévu pour chacun des régimes de fonte touche à sa fin (0,5 h ou 5 h).

Lorsque les deux conditions qui viennent d'être énumérées sont remplies, deux autres critères peuvent aussi être pris en considération afin de déterminer la fin de la période de fonte:

- le volume d'eau de fonte recueilli;
- l'intensité du courant de fuite.

Le volume d'eau de fonte et l'intensité des décharges peuvent être considérés, car ils sont de bons indices de l'état de fonte de la glace qui recouvre les isolateurs.

4.6.4 Étape de l'essai de tenue

L'étape de l'essai de tenue consiste à soumettre les isolateurs recouverts de glace à une tension d'essai, V_E , afin de vérifier leur tenue électrique. Pour ce faire, la tension appliquée aux bornes des isolateurs est augmentée rapidement à un taux de 3,9 kV/s, jusqu'à la tension d'essai, V_E .

Si, au cours de l'essai de tenue, un arc électrique relie les deux bornes des isolateurs, on dit que le résultat de l'essai est un contournement, C. Dans le cas contraire, si aucun contournement n'a lieu dans les 30 minutes suivant l'application de la tension d'essai, V_E , on dit que le résultat de l'essai est une tenue, T.

Dans le cas où le résultat de l'essai est une tenue, les valeurs crêtes maximales, positive et négative, du courant de fuite, $I_{\max} (+)$ et $I_{\max} (-)$, et l'énergie dissipée par l'arc, E, sont déterminés à partir des données numériques enregistrées au cours de cet essai. L'énergie, E, est alors calculée à partir de l'équation 4.5.

$$E = \int_0^T i_f(t) \cdot v_E(t) \cdot dt, \quad \text{Joules} \quad (4.5)$$

$i_f(t)$: Valeur instantanée du courant de fuite (A);

$v_E(t)$: Valeur instantanée de la tension d'essai (V);

T : Durée de l'essai (s).

4.7 Méthode d'évaluation de la tension de tenue maximale, V_{TM}

Les valeurs des tensions de tenue maximale, V_{TM} , d'isolateurs recouverts de glace, présentées dans cette étude, ont été trouvées à partir de la définition suivante. La tension de tenue maximale est le niveau de tension pour lequel 3 tenues sont obtenues sur un maximum de 4 essais, et pour lequel 2 contournements sont obtenus à un niveau de tension plus élevé de 3 kV. Cette définition de la tension de tenue maximale est celle de la norme CEI 507 [37].

CHAPITRE V

RÉSULTATS ET ANALYSE DES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

5.1 Introduction

La présentation des résultats expérimentaux est divisée en deux parties. Dans la première, on y présente les résultats des essais réalisés avec des isolateurs non contaminés. Les essais sans contamination avaient pour but de d'étudier l'influence d'une période de fonte de la glace sur la tension de tenue maximale, V_{TM} , d'isolateurs recouverts de glace. Ces essais ont été effectués, lors de la présente étude, en régime de fonte rapide et, au cours de travaux réalisés antérieurement, en régime de fonte lente [3] et d'accumulation [15]. À partir des tensions de tenue maximales trouvées avec les différents régimes d'essais, le régime critique d'essais des isolateurs, c'est-à-dire celui pour lequel la tension de tenue maximale des isolateurs est la plus faible, fut déterminé.

En ce qui concerne la seconde partie, on y présente les résultats des essais réalisés avec des isolateurs préalablement contaminés. Les essais avec contamination avaient pour but

d'étudier l'influence de la contamination sur la tension de tenue maximale, V_{TM} , d'isolateurs recouverts de glace. La tension de tenue maximale des isolateurs contaminés et recouverts de glace, fut trouvée pour des niveaux de contamination léger ($0,05 \text{ mg/cm}^2$) et moyen ($0,1 \text{ mg/cm}^2$). Les essais avec contamination avaient lieu en régime d'accumulation ou en régime d'essais le plus critique (tel que déterminé à partir des résultats des essais sans contamination).

Tous les résultats présentés dans ce chapitre concernent des isolateurs recouverts d'un dépôt de glace uniforme, formé en régime humide et dont l'épaisseur de référence est de 1,5 cm.

Il faut également prendre note qu'en annexe, on retrouve les paramètres caractérisant chaque essai de tenue, c'est-à-dire: la valeur efficace de la tension d'essai, V_E ; le résultat de l'essai de tenue (tenue ou contournement), R; les valeurs crêtes maximales du courant, $I_{\max (+)}$ et $I_{\max (-)}$; l'énergie dissipée par le courant de fuite, E; et la durée de l'arc, t. On y retrouve également les valeurs des longueurs des intervalles d'air mesurées après les étapes d'accumulation, Lap_{acc} , de fonte, Lap_{fonte} , et de l'essai de tenue, Lap_{essai} , de même que le volume d'eau de fonte de la glace, recueilli au cours de la fonte, V_f , et de l'essai de tenue, V_e .

5.2 Essais sans contamination

Lors des essais sans contamination, les isolateurs testés en régime de fonte rapide étaient les isolateurs standards IEEE et les isolateurs composites en EPDM et en silicone, alors que ceux testés en régime de fonte lente et d'accumulation étaient les isolateurs standards IEEE et composites en EPDM.

5.2.1 Tensions de tenue maximales, V_{TM} , des isolateurs testés en fonction des différents régimes d'essais

Les valeurs des tensions de tenue maximales des isolateurs non contaminés et soumis aux différents régimes d'essais sont présentées au tableau 5.1 et à la figure 5.1. Si l'on compare les tensions de tenue maximales trouvées avec ces différents régimes d'essais, on remarque que: les valeurs les plus faibles de tensions de tenue maximales ont été trouvées lors des essais en régime de fonte lente, pour les isolateurs IEEE (75,4 kV/m), et en régime de fonte rapide pour les isolateurs composites en EPDM (88,2 kV/m). Le régime critique d'essais est donc celui de fonte lente pour les isolateurs IEEE et de fonte rapide pour les isolateurs composites en EPDM. Il est à noter, que les tensions de tenue maximale trouvées en régime critique d'essais sont plus de 10% plus faibles que celles trouvées lors

des essais réalisés en régime d'accumulation. Finalement, les valeurs des tensions de tenue maximales des isolateurs composites en EPDM et en silicone, trouvées en régime de fonte rapide, sont identiques, soit de 88,2 kV/m.

Tableau 5.1: Tensions de tenue maximales par unité testé, V_{TM} , ou par mètre de distance d'arc, V_{TM}/m , des isolateurs non contaminés, en fonction du régime d'essais.

Valeurs des tensions de tenue maximales						
Type d'isolateurs						
Régimes d'essais	Standards IEEE		Composites en EPDM		Composites en silicone	
	V_{TM} (kV)	V_{TM}/m (kV/m)	V_{TM} (kV)	V_{TM}/m (kV/m)	V_{TM} (kV)	V_{TM}/m (kV/m)
Accumulation [15]	81	84,8	72	100,8	-	-
Fonte lente [3]	72	75,4	66	92,4	-	-
Fonte rapide (voir annexe A.1.1)	78	81,7	63	88,2	63	88,2

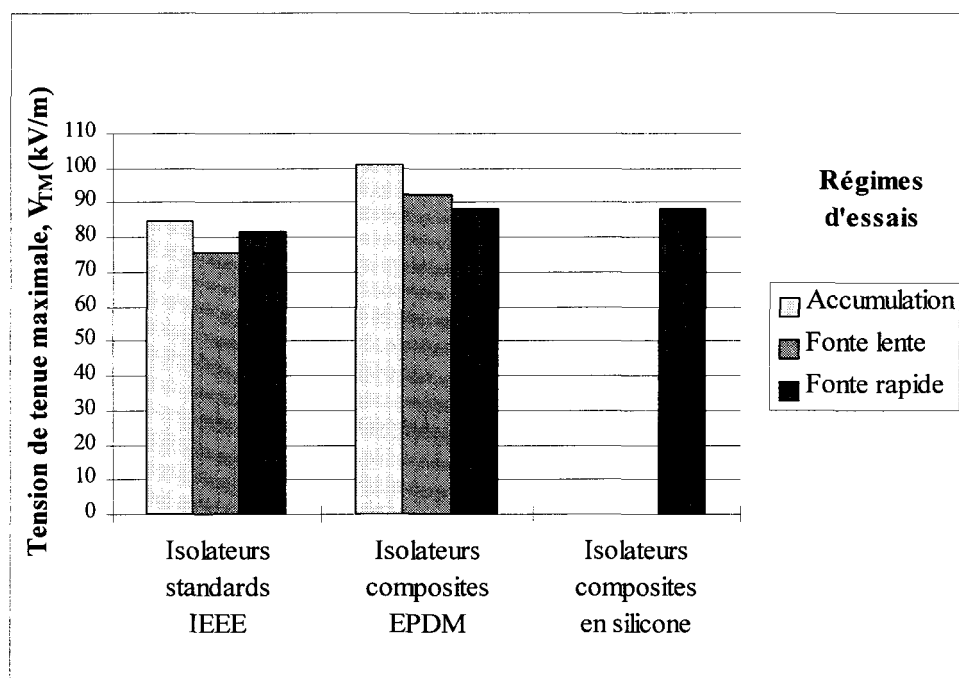


Fig. 5.1: Tensions de tenue maximales par mètre de distance d'arc, V_{TM}/m , des isolateurs non contaminés, en fonction du régime d'essais.

5.2.2 Observations faites au cours des étapes de fonte et de l'essai de tenue (régime de fonte rapide)

Dans cette section, il est question d'observations faites lors des essais réalisés en régime de fonte rapide. De plus, en raison du but poursuivi lors des essais sans contamination, les observations présentées concernent principalement les étapes de fonte et de l'essai de tenue.

a) Essais avec les isolateurs IEEE

Une évolution typique de la valeur efficace du courant de fuite des isolateurs IEEE, au cours de la période de fonte rapide, est présentée à la figure 5.2. On y remarque que le courant de fuite varie peu et qu'il est très faible, soit d'environ $1 \text{ mA}_{\text{eff}}$. Également au cours de cette période, la surface de la glace et l'extrémité des glaçons, qui recouvrent les isolateurs, fondent lentement et de façon graduelle. D'ailleurs, ce n'est que vers la fin de la période de fonte que la glace est entièrement recouverte d'une mince couche d'eau. Par conséquent, le volume d'eau de fonte de la glace recueilli au cours de cette période ne dépasse pas 40 ml.

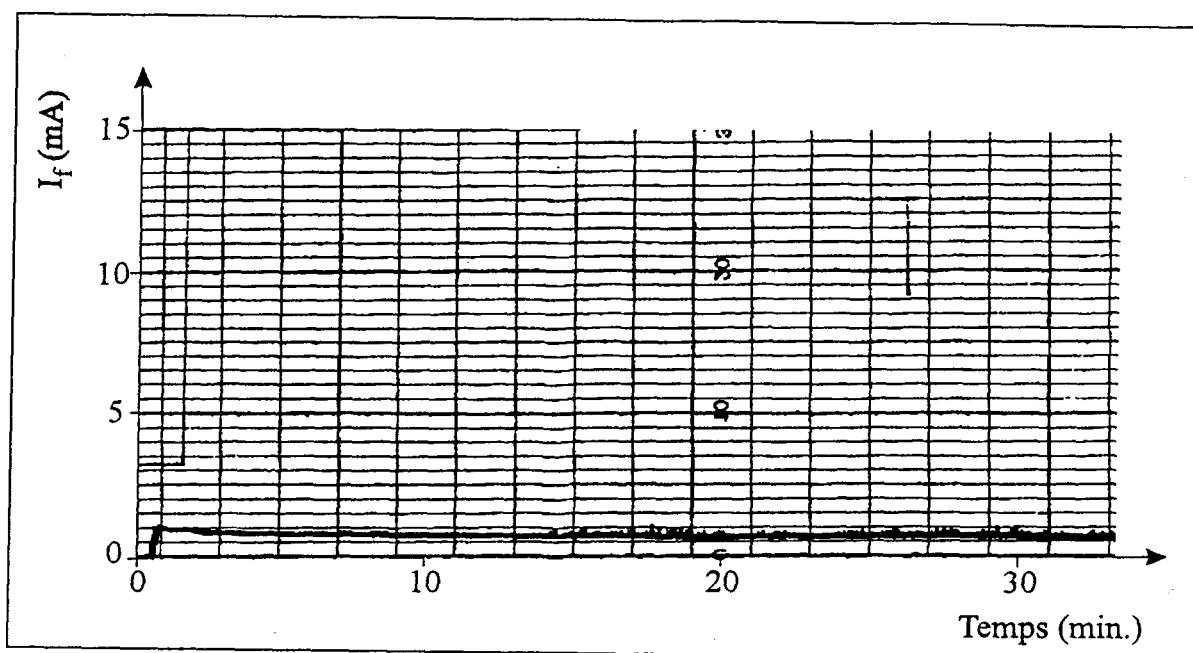


Fig. 5.2: Évolution typique du courant de fuite, I_f (valeur efficace), au cours de la fonte rapide (isolateurs IEEE non contaminés).

Au cours des essais de tenue, le courant de fuite varie aléatoirement jusqu'à atteindre des valeurs crêtes relativement élevées, comprises entre 290 mA et 870 mA, ou jusqu'au contournement des isolateurs. À la figure 5.3 on peut voir un tracé montrant l'évolution du courant de fuite d'isolateurs IEEE au cours de cette période, alors que les valeurs crêtes maximales du courant, $I_{\max} (+)$ et $I_{\max} (-)$, sont de 869,1 mA et de -724,1 mA, et que le résultat de l'essai est une tenue. L'énergie dissipée par le courant de fuite au cours de l'essai de tenue est très élevée. Par exemple, dans le cas où l'essai de tenue ne mène pas au contournement des isolateurs, l'énergie dissipée par le courant de fuite est comprise entre

345 kJ et 707 kJ. La dissipation d'une telle énergie cause inévitablement une fonte accélérée à la surface du dépôt et à l'extrémité des glaçons, et parfois même la chute de morceaux de glace. En résultante, le volume d'eau de fonte de la glace recueilli au cours de cette période varie entre 370 ml et 1600 ml.

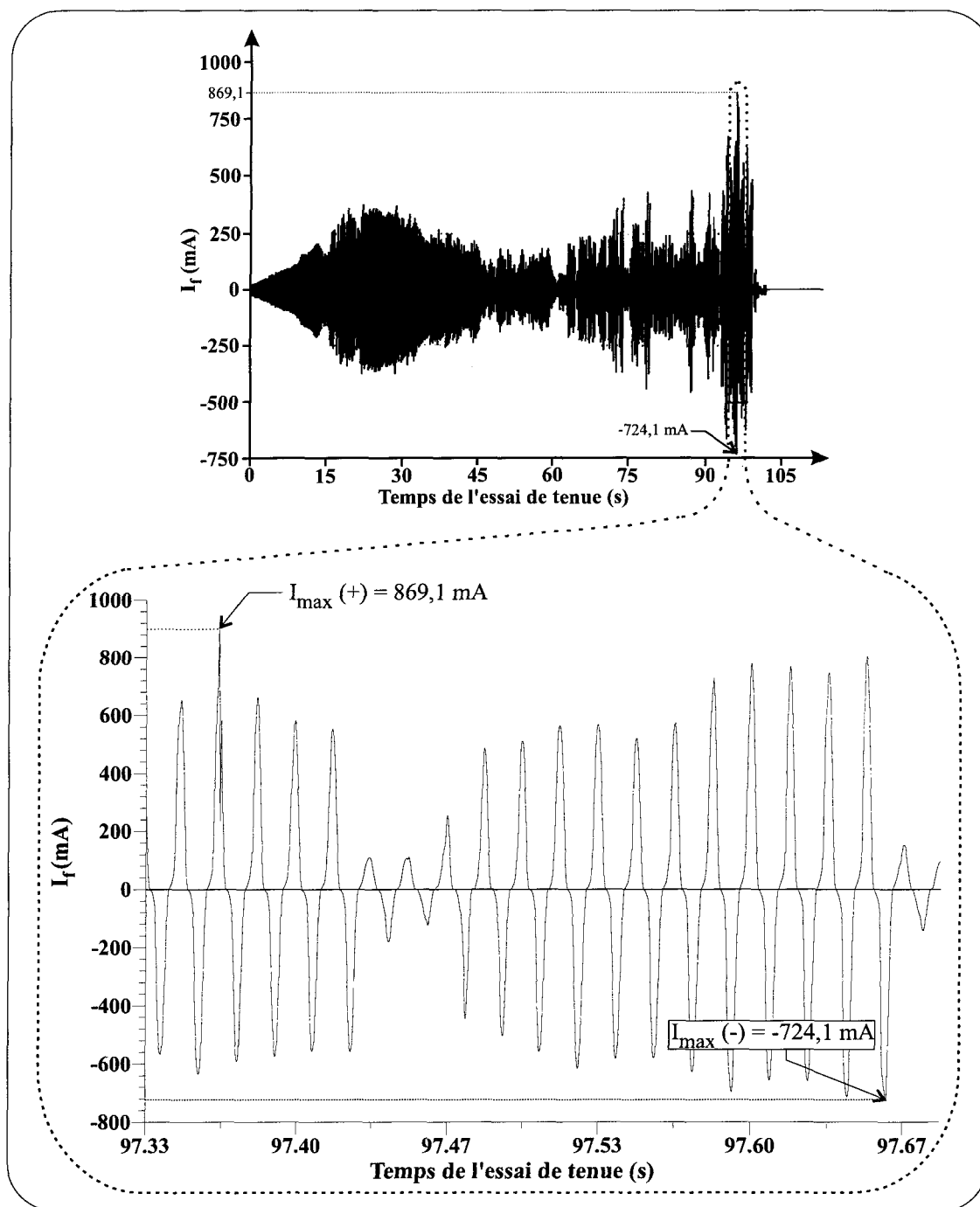


Fig. 5.3: Évolution de courant de fuite, I_f , d'isolateurs IEEE non contaminés, au cours de l'essai de tenue ($V_E = 75 \text{ kV}$ et $R = \text{tenue}$).

Au cours des étapes de fonte rapide et de l'essai de tenue, l'eau de fonte de la glace fut recueillie et sa conductivité fut mesurée à différents intervalles. Comme on peut le voir à la figure 5.4, au fur et à mesure que le volume d'eau recueilli augmente, sa conductivité diminue, passant de 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à environ 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lorsque le volume total d'eau de fonte atteint 1000 ml.

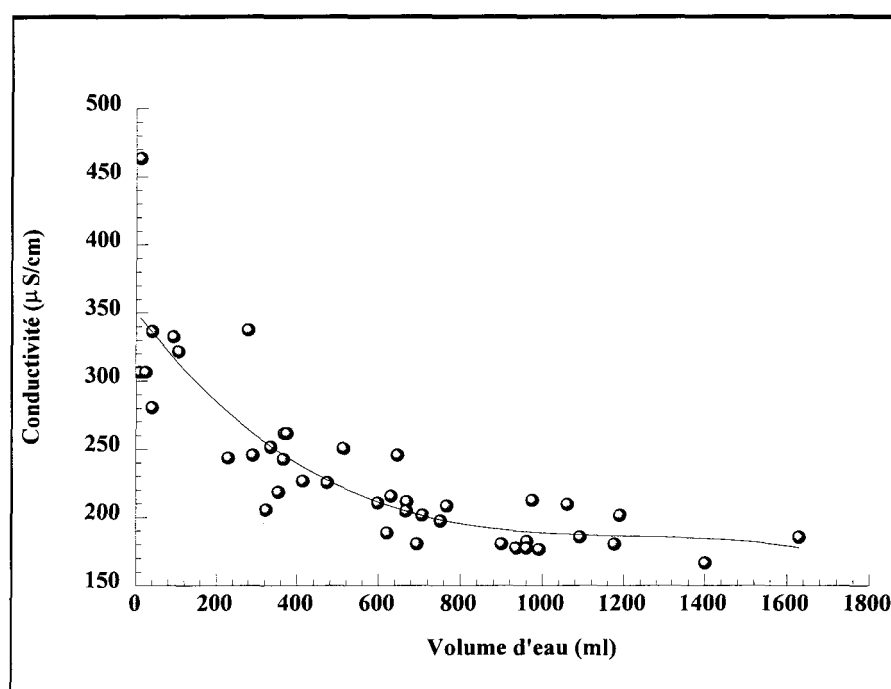


Fig. 5.4: Conductivité de l'eau (à 20°C) de fonte de la glace en fonction du volume total d'eau recueilli (isolateurs IEEE non contaminés)⁴.

⁴ Les points sont lissés par une régression polynomiale du 3^e ordre (coefficient de corrélation: -0.77).

Les photos de la figure 5.5 montrent l'aspect visuel d'isolateurs IEEE après les étapes d'accumulation et de l'essai de tenue. Dans ce cas précis, la longueur de l'intervalle d'air après les étapes d'accumulation, Lap_{acc} , et de l'essai de tenue, Lap_{essai} , était respectivement de l'ordre de 0 mm et 290 mm.



(a)



(b)

Fig. 5.5: Aspect visuel d'isolateurs IEEE après les étapes d'accumulation (a) et de l'essai de tenue (b).

b) Essais avec les isolateurs composites (en EPDM et en silicone)

Au cours des expérimentations réalisées avec les isolateurs composites en EPDM et en silicone, il a été constaté que les observations concernant ces deux types d'isolateurs sont à toutes fins utiles les mêmes. Ainsi, les observations faites au cours des essais en régime de fonte rapide, concernant ces deux types d'isolateurs, seront présentées simultanément.

Une évolution typique de la valeur efficace du courant de fuite des isolateurs composites (en EPDM et en silicone) au cours de la période de fonte rapide est présentée à la figure 5.6. On y remarque que le courant de fuite évolue de façon aléatoire. De plus, une série de fortes décharges est généralement observée au cours de cette période. Ces fortes décharges durent de 2 à 4 minutes et peuvent survenir à tout instant à partir de la cinquième minute de fonte, soit lorsque la température dans la chambre est à -7°C . L'intensité du courant maximum qui est atteint lors de ces fortes décharges varie entre $5 \text{ mA}_{\text{eff}}$ et $200 \text{ mA}_{\text{eff}}$ et l'énergie dissipée par ces dernières varie entre 20 kJ et 690 kJ. En corollaire, l'énergie thermique dissipée lors d'une série de fortes décharges peut occasionner une fonte accélérée à la surface du dépôt et à l'extrémité des glaçons. Cette fonte de la glace peut également être accompagnée par la chute d'importants morceaux de glace. Le volume d'eau de fonte de la glace, qui est recueilli au cours de la période de fonte rapide, est fonction de l'énergie dissipée par les décharges et il varie entre 0 ml et 500 ml.

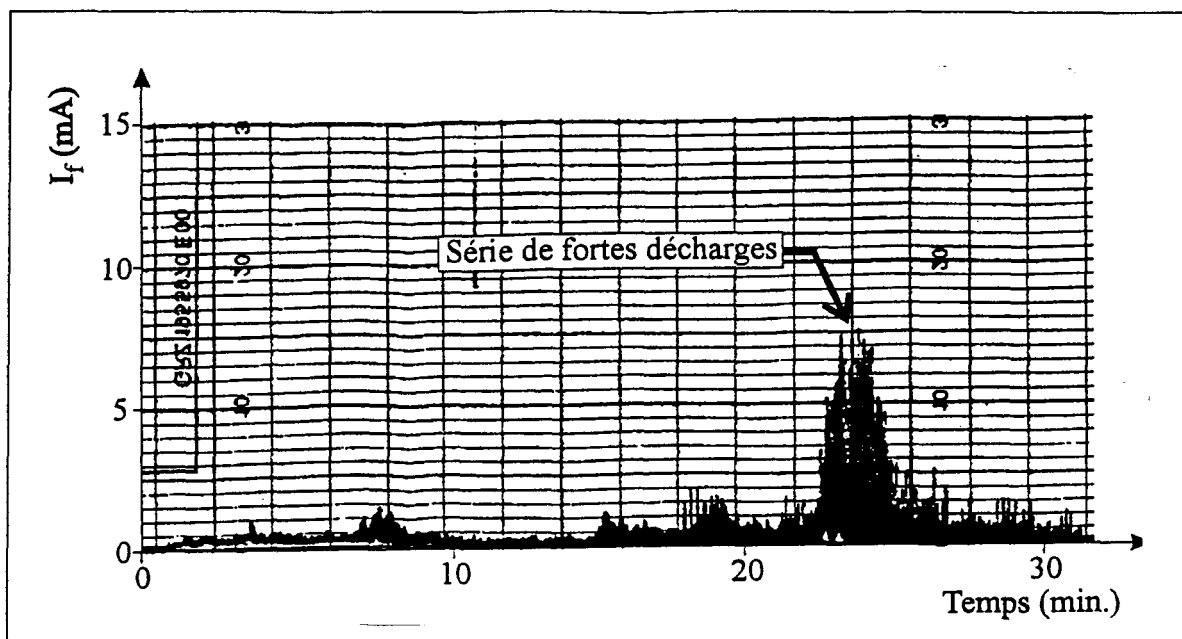


Fig. 5.6: Évolution typique du courant de fuite, I_f (valeur efficace), au cours de la période de fonte rapide (isolateurs composites en EPDM et en silicone non contaminés).

Au cours de l'essai de tenue, il n'y a pas toujours amorçage d'un arc pouvant mener au contournement des isolateurs. En effet, lorsqu'une perte importante de glace a lieu au cours de la période de fonte, aucun arc ne s'amorce dans les intervalles d'air et le contournement ne peut avoir lieu. Il a d'ailleurs été observé que lorsque l'intervalle d'air est plus grand ou égal à 110 mm, les décharges sont très faibles (la valeur crête du courant est inférieure à 2 mA) et la probabilité que les isolateurs soient contournés par un arc électrique semble pratiquement nulle. Dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque la perte de glace est peu importante au cours de la période de fonte, il y a généralement amorçage d'un

arc pouvant mener au contournement. Le courant de fuite peut alors, dans le cas d'une tenue, atteindre jusqu'à 400 mA (valeur crête) et dissiper jusqu'à 425 kJ.

Les valeurs de la conductivité de l'eau de fonte de la glace, mesurées à différents intervalles au cours des périodes de fonte rapide et de l'essai de tenue, sont présentées à la figure 5.7 en fonction du volume totale d'eau de fonte recueillie. Selon ces données, on remarque que la conductivité de l'eau de fonte tend à diminuer en fonction du volume total d'eau recueillie, passant ainsi d'environ 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à près de 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lorsque le volume total d'eau recueilli dépasse 1000 ml. Cependant, cette décroissance de la conductivité d'eau de fonte de la glace est nettement moins marquée que celle observée lors des essais réalisés avec les isolateurs IEEE (voir figure 5.4). Cette différence de résultat en fonction du type d'isolateur testé peut s'expliquer en partie par le fait que, lors des essais réalisés avec les isolateurs composites, la chute de morceaux de glace (lors de la période de fonte rapide) peut être relativement importante, ce qui n'est pas le cas lors des essais réalisés avec les isolateurs IEEE. Par conséquent, l'eau de fonte recueillie lors des essais réalisés avec les isolateurs composites n'est pas le résultat d'une fonte graduelle de la surface de la glace.

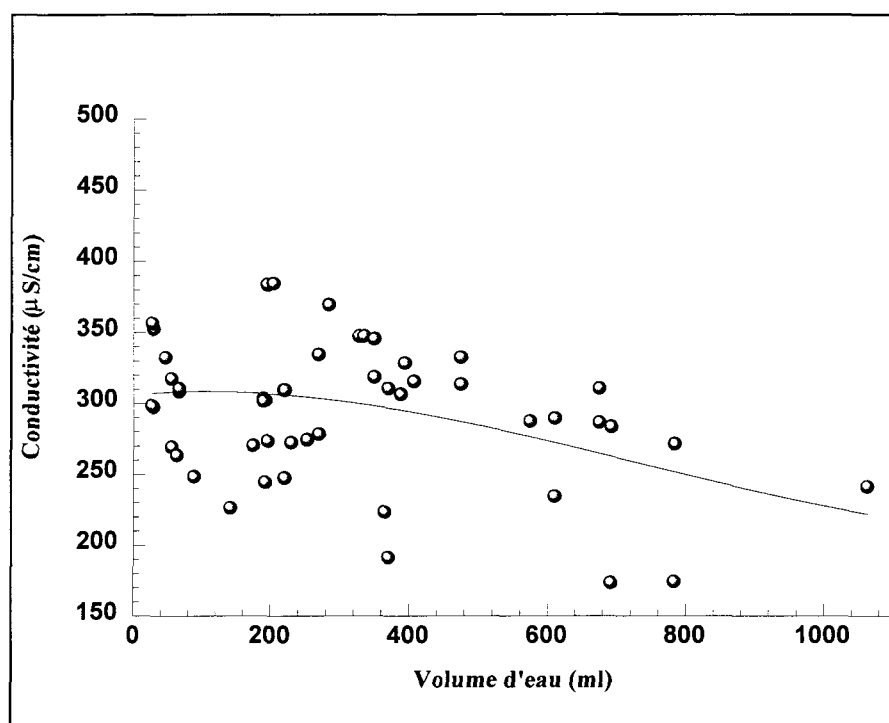
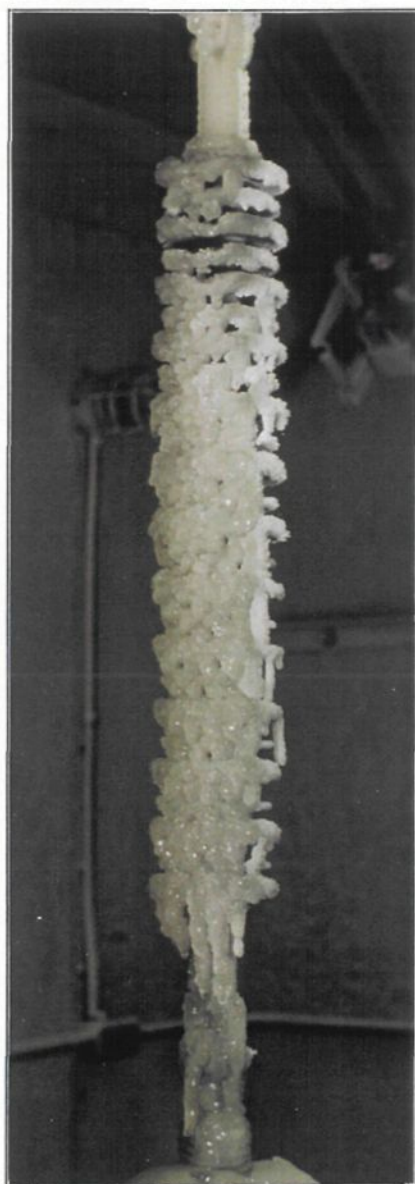


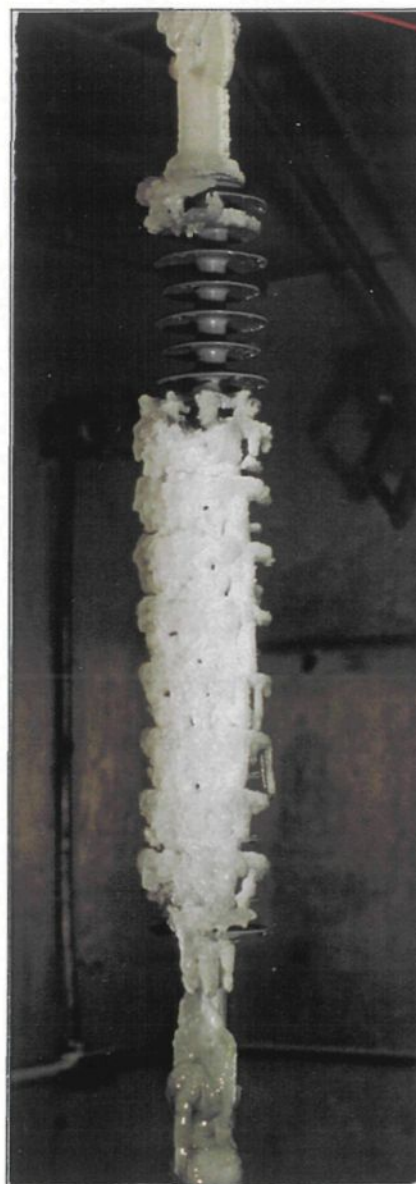
Fig. 5.7: Conductivité de l'eau (à 20°C) de fonte de la glace en fonction du volume total d'eau recueilli (isolateurs composites, EPDM et en silicone, non contaminés)⁵.

Les photos des figures 5.8 et 5.9 présentent l'aspect visuel d'isolateurs composites, en EPDM et en silicone, après les étapes d'accumulation et de l'essai de tenue. Dans ce cas en particulier, la longueur de l'intervalle d'air après les étapes d'accumulation, $L_{ap_{acc}}$, et de l'essai de tenue, $L_{ap_{essai}}$, était respectivement de l'ordre de 0 mm et de 140 mm, et cela pour les deux types d'isolateurs composites.

⁵ Les points sont lissés par une régression polynomiale du 3^e ordre (coefficient de corrélation: -0.37).



(a)

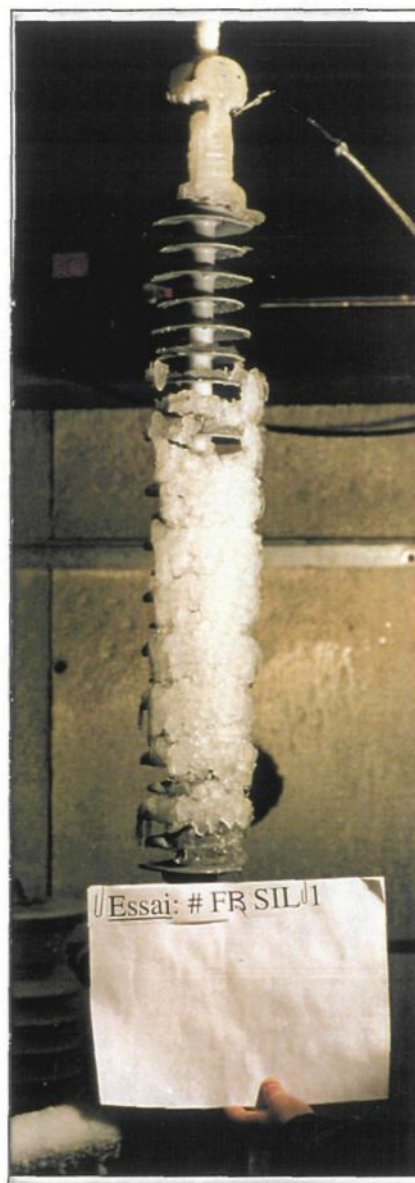


(b)

Fig. 5.8: Aspect visuel d'isolateurs composites en EPDM après les étapes d'accumulation (a) et de l'essai de tenue (b).



(a)



(b)

Fig. 5.9: Aspect visuel d'isolateurs composites en silicone après les étapes d'accumulation (a) et de l'essai de tenue (b).

5.2.3 Discussion

Au cours de la période de fonte, deux sources de chaleur fournissent de l'énergie thermique au dépôt de glace recouvrant les isolateurs. Ces sources de chaleur sont les suivantes:

- L'énergie thermique provenant de l'extérieur de la chambre par échange thermique non forcé;
- L'énergie thermique dissipée lors du passage du courant de fuite à travers le dépôt et à sa surface.

L'énergie thermique qui est transmise au dépôt de glace engendre une transformation progressive de son état. Cette transformation est caractérisée par les phénomènes suivants:

- Au fur et à mesure que la glace se réchauffe, un film d'eau se forme à sa surface. Puisque l'eau est de l'ordre de 100 à 1000 fois plus conductrice que la glace [2, 41, 61], la conductivité à la surface de la glace est augmentée de façon significative. Dans le cas où un mince film d'eau est déjà présent à la surface de la glace, le réchauffement du dépôt causera l'épaississement de ce dernier.
- Par la suite, plus le dépôt de glace se réchauffe, plus le film d'eau s'épaissit. L'épaisseur maximale du film d'eau, qui est d'environ 0,17 mm [25], est atteinte

lorsque l'eau commence à couler à la surface du dépôt. L'épaississement du film d'eau augmente la conductivité à la surface de la glace [25]. Par contre, lorsque l'eau commence à couler à la surface du dépôt, elle emporte avec elle la forte concentration d'impuretés qui se trouve initialement à la surface de la glace. Par conséquent, au fur et à mesure que l'eau coule à la surface de la glace, la conductivité du film d'eau diminue [23]. Comme il a été montré aux figures 5.4 et 5.7, au cours de la fonte de la glace, la conductivité du film d'eau peut diminuer jusqu'à atteindre 40% de sa valeur initiale.

- Également au cours de la période de fonte, la longueur de l'intervalle d'air augmente. En effet, des décharges qui ont lieu à l'extrémité des glaçons causent leur fonte. De plus, des morceaux de glace peuvent se détacher du reste du dépôt et chuter. Plus la période de fonte de la glace est avancée, plus la perte de glace causée par la fonte des glaçons et la chute de morceaux de glace est importante. Pour cette raison, comme on peut le voir au tableau 5.2, les intervalles d'air les plus importants ont été mesurés à la fin de la période de fonte lente. L'augmentation de l'intervalle d'air engendre donc un allongement de la ligne de fuite effective des isolateurs recouverts de glace et, en outre, la diminution du gradient de tension à leur surface.

Tableau 5.2: Valeurs minimales et maximales de l'intervalle d'air en fonction du régime de fonte (mesures prises immédiatement après l'étape de fonte).

Régimes de fonte	Longueur de l'intervalle d'air après la fonte (mm)		
	IEEE	En EPDM	En silicone
Rapide	0-75	0-140	0-110
Lente[3]	75-145	85-140	-

La transformation de l'état du dépôt de glace influence donc inévitablement la tenue électrique des isolateurs qui en sont recouverts. De plus, l'ampleur de cette transformation est fonction de la quantité d'énergie thermique transmise au dépôt de glace, de même que du volume initial du dépôt. En effet, plus le dépôt de glace est volumineux, plus l'énergie nécessaire à la transformation de son état, par exemple pour la formation d'un film d'eau à sa surface, est importante.

Dans le cas qui nous occupe, les isolateurs IEEE, à cause de leurs dimensions, accumulent presque deux fois plus de glace que les isolateurs composites. Le dépôt de glace qui recouvre les isolateurs IEEE nécessite donc beaucoup plus de chaleur pour atteindre le même état de fonte que celui accumulé sur les isolateurs composites. Cela est d'autant plus vrai, que l'inertie thermique des isolateurs IEEE en porcelaine est plus grande que celle des isolateurs composites (en EPDM et en silicone). En conséquence, pour une

même durée de fonte et un même taux de fonte, l'état de fonte des dépôts de glace recouvrant les isolateurs IEEE est certainement moins avancé que celui des dépôts de glace recouvrant les isolateurs composites. Également, l'énergie thermique transmise aux dépôts de glace au cours de la période de fonte lente est plus importante que celle transmise au cours de la période de fonte rapide. À partir de là, on peut mieux comprendre pourquoi la plus faible tension de tenue maximale des isolateurs IEEE recouverts de glace a été trouvée en régime de fonte lente, alors que celle des isolateurs composites en EPDM recouverts de glace a été trouvée en régime de fonte rapide.

Effectivement, au cours de la fonte rapide, l'énergie fournie à un dépôt de glace, recouvrant une chaîne d'isolateurs IEEE, suffirait à peine à causer la formation d'un film d'eau, alors qu'elle serait amplement suffisante pour réchauffer un dépôt recouvrant un isolateur composite, et cela jusqu'à former un épais film d'eau à la surface de la glace. Tandis qu'au cours de la fonte lente, l'énergie fournie au dépôt de glace des isolateurs IEEE serait suffisante pour entamer sa fonte jusqu'à ce qu'à la formation d'un épais film d'eau à sa surface. Alors qu'au cours de cette même période, l'énergie transmise au dépôt d'un isolateur composite suffirait non seulement à former un épais film d'eau à sa surface, mais aussi à causer la chute d'importants morceaux de glace, de même que la perte de la forte concentration d'impuretés qui se trouve initialement à la surface de la glace.

Enfin, à partir de ce qui vient d'être discuté, on peut admettre que le régime critique d'essais des isolateurs composites en silicone est très certainement le même que celui des isolateurs composites en EPDM (soit le régime de fonte rapide), car ces deux types d'isolateurs ont le même profil, ils accumulent la même quantité de glace et ils sont tout deux faits principalement de matière synthétique. D'ailleurs, cette hypothèse est vivement renforcée par le fait que les isolateurs composites, en EPDM et en silicone, ont la même tension de tenue maximale en régime de fonte rapide et que leur courant de fuite évolue de la même façon tout au cours des expérimentations.

5.3 Essais avec contamination

Lors des essais avec contamination, les essais avec un niveau de contamination léger ($0,05 \text{ mg/cm}^2$) ont été effectués avec les trois types d'isolateurs décrits au chapitre 5. Les isolateurs IEEE ont alors été soumis au régime d'accumulation et au régime critique d'essais (régime de fonte lente). Alors que les isolateurs composites (en EPDM et en silicone) n'ont pour leur part été soumis qu'au régime critique d'essais (régime de fonte rapide).

En ce qui a trait aux essais avec un niveau de contamination moyen ($0,1 \text{ mg/cm}^2$), ils n'ont eu lieu qu'avec les isolateurs composites (en EPDM et en silicone). Lors de ces

essais, les isolateurs composites ont été soumis au régime critique d'essais (régime de fonte rapide).

5.3.1 Tensions de tenue maximales, V_{TM} , des isolateurs testés en fonction du niveau de contamination

a) Contamination légère ($0,05 \text{ mg/cm}^2$)

Essais en régime d'accumulation

Le tableau 5.3 et la figure 5.10 présentent les valeurs des tensions de tenue maximales des isolateurs IEEE, soumis au régime d'accumulation, en fonction du niveau de contamination. Pour les isolateurs contaminés légèrement ($0,05 \text{ mg/cm}^2$), la valeur de la tension de tenue maximale est de $78,5 \text{ kV/m}$, ce qui représente une diminution de 7% par rapport à celle trouvée lors des essais sans contamination [15].

Tableau 5.3: Tensions de tenue maximales par unité, V_{TM} , et mètre de distance d'arc, V_{TM}/m , des isolateurs standards IEEE soumis au régime d'accumulation, en fonction du niveau de contamination.

DDS (mg/cm ²)	Valeurs des tensions de tenue maximales	
	V_{TM} (kV)	V_{TM}/m (kV/m)
0 [15]	82	84,8
0,05 (voir annexe A.1.3)	76	78,5

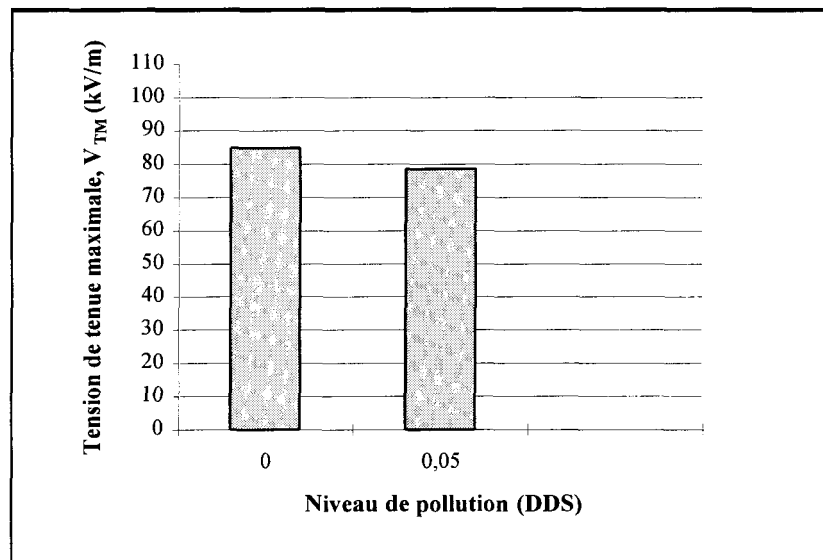


Fig. 5.10: Tensions de tenue maximales par mètre de distance d'arc, V_{TM}/m , des isolateurs standards IEEE soumis au régime d'accumulation, en fonction du niveau de contamination.

Essais en régime critique d'essais

Les valeurs des tensions de tenue maximales des isolateurs IEEE et composites (en EPDM et en silicone) légèrement contaminés ($0,05 \text{ mg/cm}^2$) et soumis à leur régime critique d'essais, sont présentées au tableau 5.4 et à la figure 5.11. Elles sont de $72,25 \text{ kV/m}$, pour les isolateurs IEEE, et de $84,0 \text{ kV/m}$, pour les isolateurs composites (en EPDM et en silicone). On y retrouve également les tensions de tenue maximales des isolateurs non contaminés et soumis aux mêmes régimes d'essais. On remarque que les valeurs des tensions de tenue maximales des isolateurs IEEE et composites (en EPDM et

en silicone) légèrement contaminés sont de l'ordre de 5% plus faibles que celles trouvées lors des essais sans contamination.

Tableau 5.4: Valeurs des tensions de tenue maximales par mètre de distance d'arc, V_{TM}/m , des isolateurs contaminés et soumis au régime critique d'essais, en fonction du niveau de contamination.

Valeurs des tensions de tenue maximales, V_{TM} (kV/m)									
Type d'isolateurs									
Régime d'essais	Standards IEEE			Composites en EPDM			Composites en silicone		
	DDS (mg/cm ²)			DDS (mg/cm ²)			DDS (mg/cm ²)		
	0	0,05	0,1	0	0,05	0,1	0	0,05	0,1
Fonte lente	75,4 [*]	72,25 [*]	-	-	-	-	-	-	-
Fonte rapide	-	-	-	88,2 [*]	84,0 [*]	♦	88,2 [*]	84,0 [*]	♦

* Résultat de travaux réalisés antérieurement [15].

♦ Voir annexe A.1.2

♦ Contournement sous tension de service ($V_0 = 71,4$ kV/m) au cours de la fonte rapide.

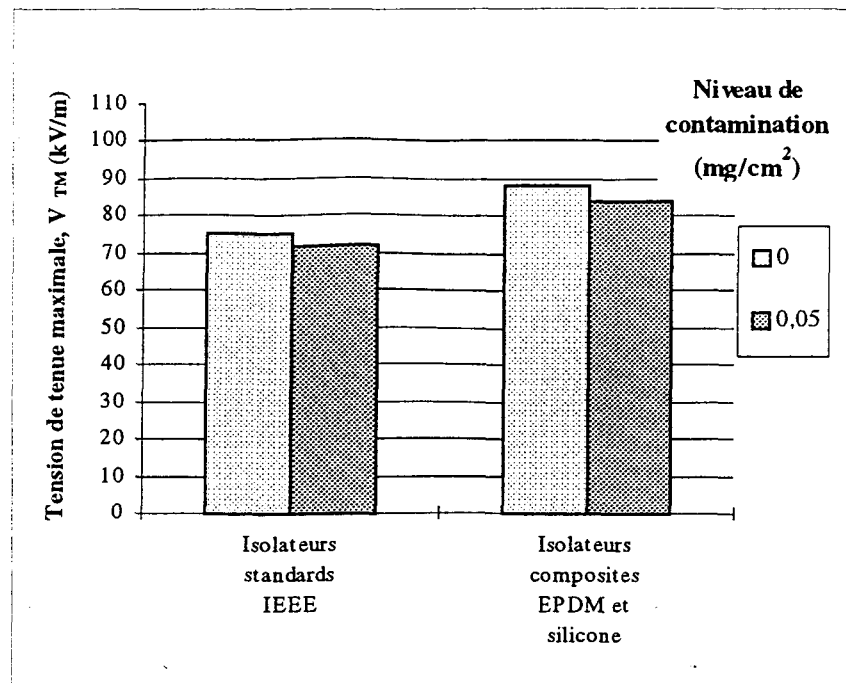


Fig. 5.11: Tensions de tenue maximales par mètre de distance d'arc, V_{TM}/m , des isolateurs contaminés et soumis au régime critique d'essais, en fonction du niveau de contamination.

b) Contamination moyenne (0,1 mg/cm²)

Les essais réalisés avec les isolateurs composites (en EPDM et en silicone) dont le niveau de contamination était moyen (0,1 mg/cm²) et qui furent soumis à leur régime critique d'essais (fonte rapide), n'ont pu permettre de trouver leur tension de tenue maximale. En effet, de telles conditions d'essais ont mené au contournement des isolateurs

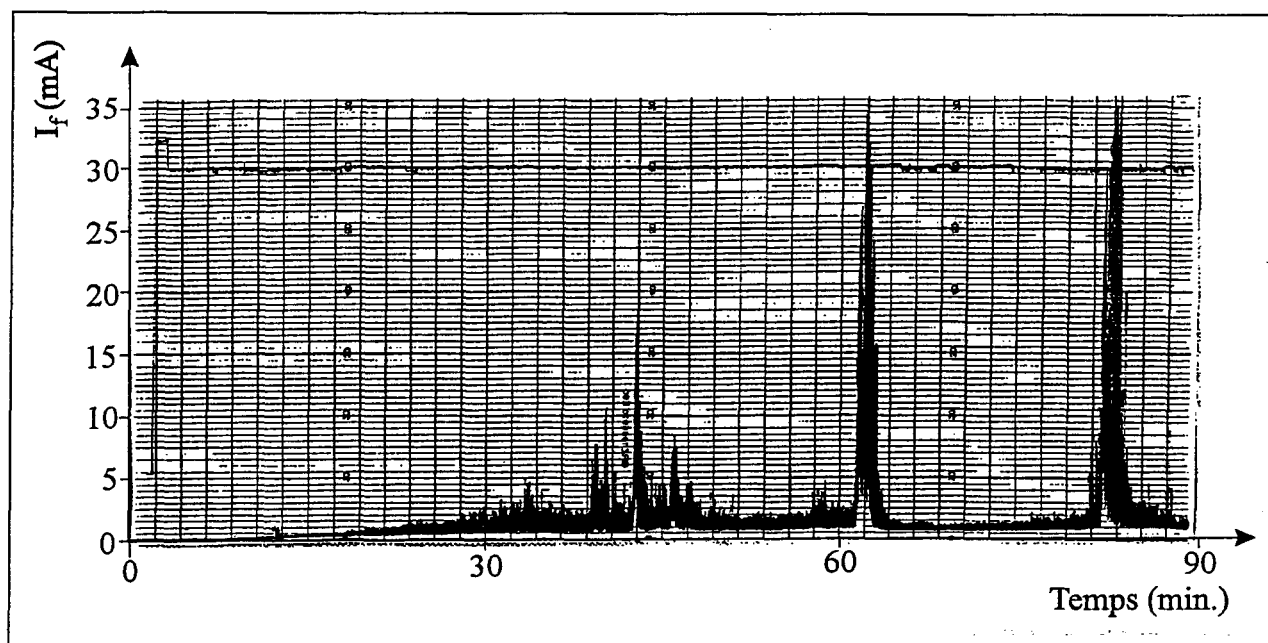
composites lors de la période de fonte. Au cours de cette période, la tension de service, à laquelle les isolateurs composites étaient soumis, a donc été suffisante pour occasionner leur contournement. Dès que le contournement se produisait au cours de la période de fonte, l'expérimentation était arrêtée et reprise depuis le début. Pour les isolateurs composites en EPDM et en silicone, le contournement au cours de cette période a été observé à deux reprises. Aussi, leur tension de tenue maximale, telle que décrite au chapitre 4, n'a pu être trouvée.

5.3.2 Observations au cours des expérimentations

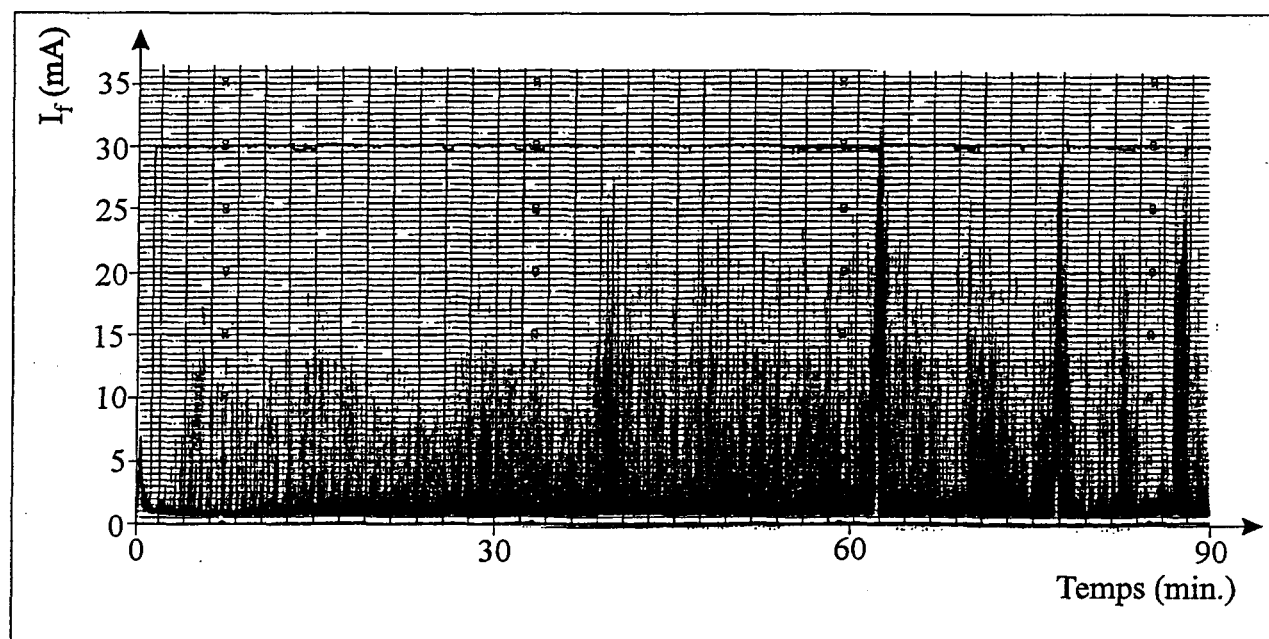
a) Période d'accumulation de la glace

Les diagrammes des figures 5.12 et 5.13 présentent des évolutions typiques de la valeur efficace du courant de fuite, I_f , des isolateurs contaminés et non contaminés, au cours de la période d'accumulation. On y remarque que l'intensité moyenne du courant de fuite au cours de l'accumulation est manifestement plus élevée lorsque les isolateurs sont préalablement contaminés. De plus, au cours de la première minute d'accumulation, le courant de fuite des isolateurs contaminés est particulièrement intense. Par la suite son intensité diminue, tout en demeurant plus élevée que lors d'accumulations de glace à la surface d'isolateurs non contaminés. Cette diminution de l'intensité du courant de fuite

après une minute d'accumulation est probablement due au lavage partiel de la surface des isolateurs, par l'eau ruisselant à leur surface.

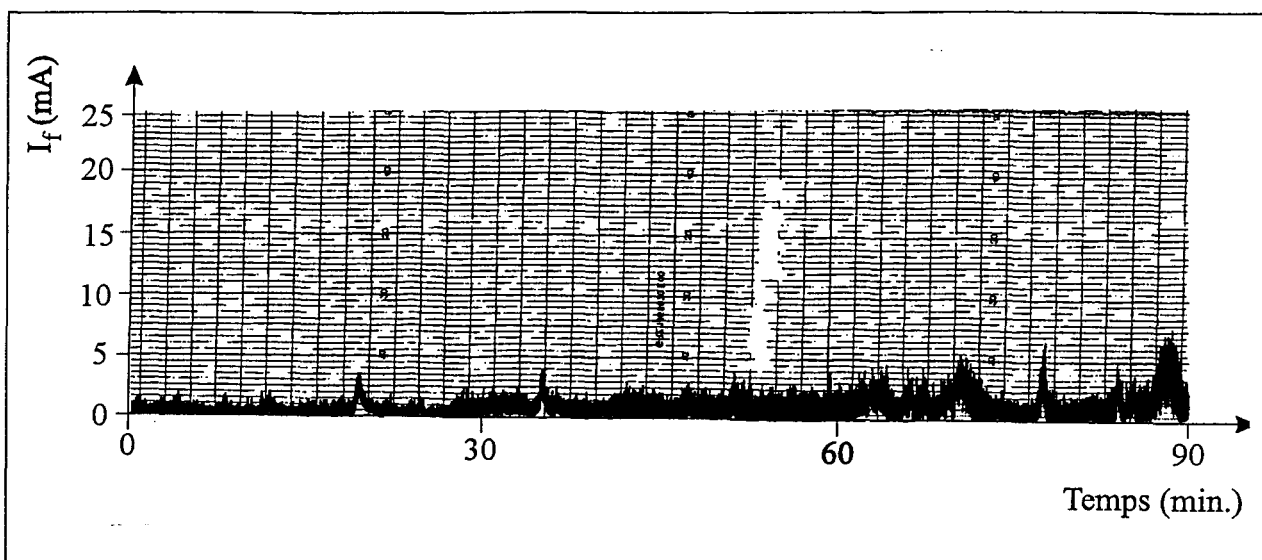


(a)

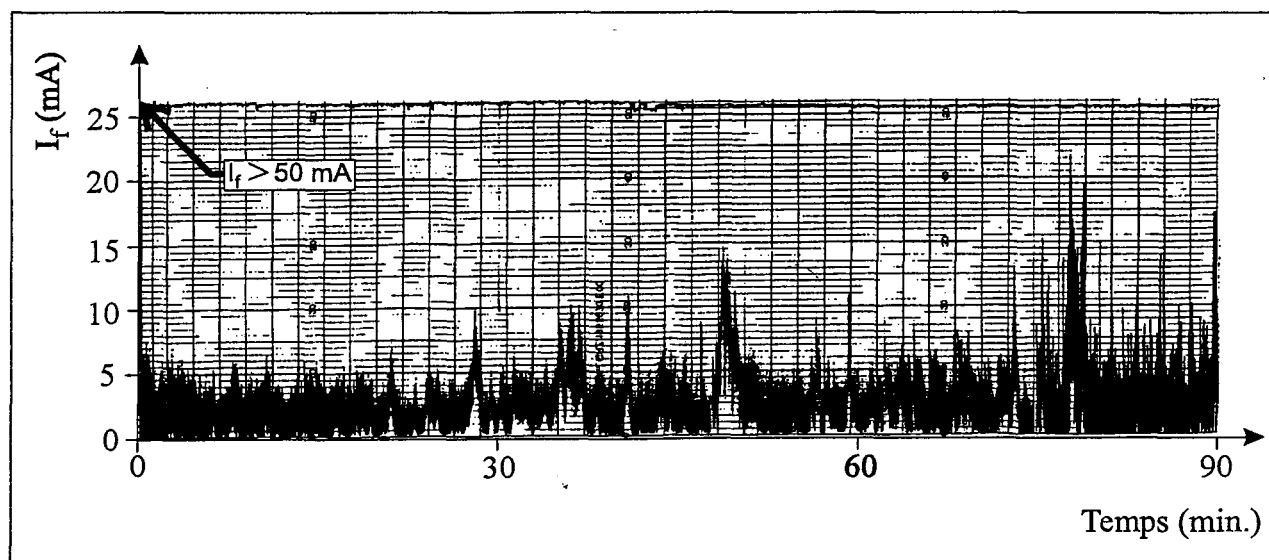


(b)

Fig. 5.12: Évolution typique du courant de fuite, I_f (valeur efficace), au cours de l'accumulation (isolateurs IEEE non contaminés (a) et contaminés, $DDS = 0,05 \text{ mg/cm}^2$, (b)).



(a)



(b)

Fig. 5.13: Évolution typique du courant de fuite, I_f (valeur efficace), au cours de l'accumulation (isolateurs composites en EPDM ou en silicone, non contaminés (a) et contaminés, $\text{DDS} = 0,1 \text{ mg/cm}^2$, (b)).

b) Période de fonte de la glace

La figure 5.14 présente une évolution typique de la valeur efficace du courant de fuite des isolateurs IEEE légèrement contaminés ($0,05 \text{ mg/cm}^2$), au cours de la période de fonte lente. Au cours de cette période, le courant de fuite tend à augmenter en fonction du temps jusqu'à une certaine valeur relativement élevée, à partir de laquelle il diminue brusquement. Cette diminution soudaine de l'intensité du courant de fuite est causée par une fonte importante des glaçons ou par la chute de morceaux de glace. Il a également été observé que le courant de fuite atteignait généralement sa valeur maximale lorsque la période de fonte lente était débutée depuis environ 2 heures et 30 minutes. À ce moment de la période de fonte lente, la température dans la chambre est de l'ordre de -1°C .

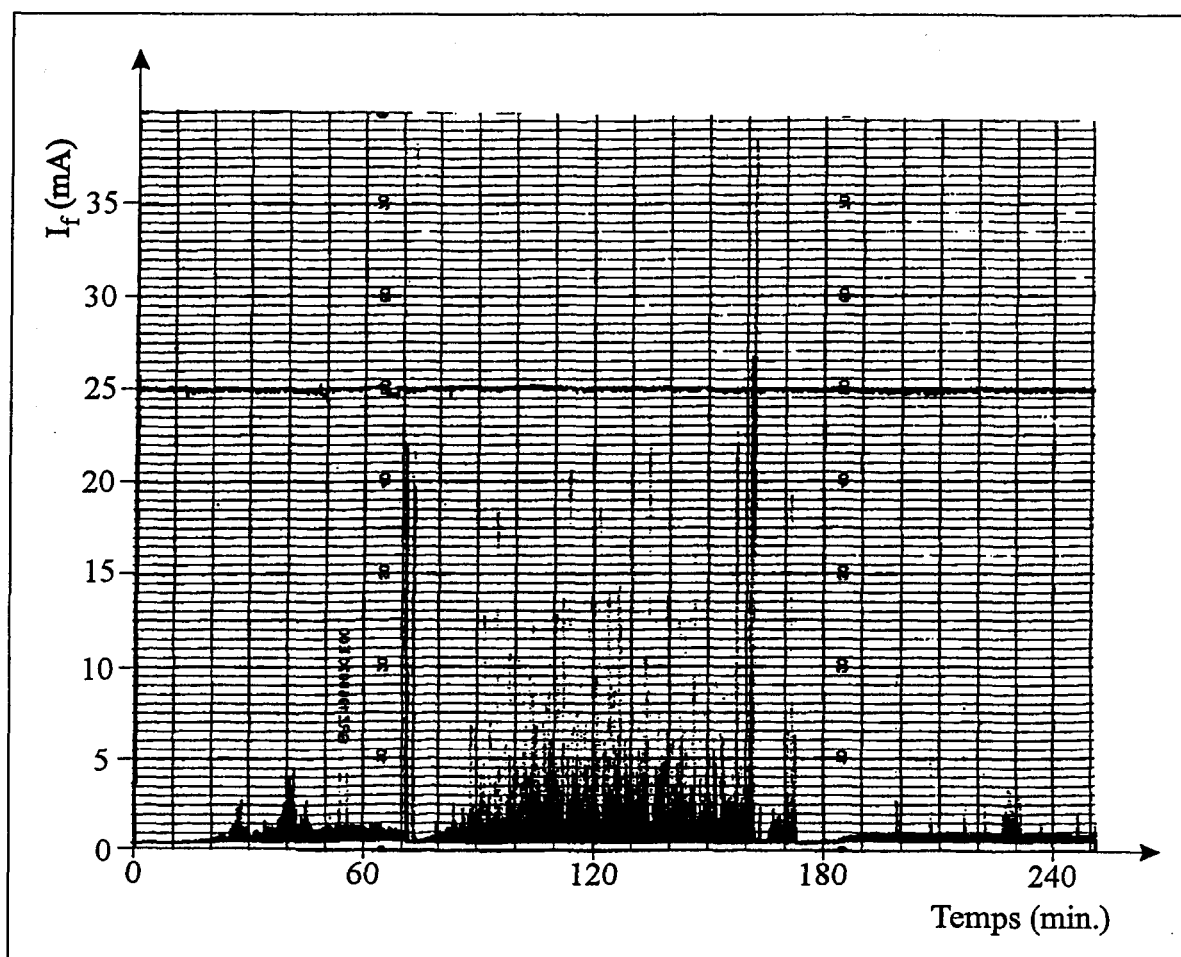


Fig. 5.14: Évolution typique du courant de fuite, I_f (valeur efficace), au cours de la fonte lente (isolateurs IEEE contaminés, $\text{DDS} = 0,05 \text{ mg/cm}^2$).

En ce qui concerne l'intensité du courant de fuite au cours de la période de fonte rapide des essais réalisés avec des isolateurs composites (en EPDM et en silicone), elle augmente en fonction du niveau de la contamination appliquée préalablement à leur surface (comparer les figures 5.6 et 5.15). À tel point d'ailleurs, qu'avec un niveau de

contamination moyen ($0,1 \text{ mg/cm}^2$), un contournement pouvait se produire au cours de la fonte rapide. C'est ainsi que, lors de deux expérimentations, un contournement s'est produit au cours de la fonte, et cela, pour les deux types d'isolateurs composites (en EPDM et en silicone). Le tableau 5.5 présente le temps de la fonte, t_f , et la température dans la chambre, T , au moment où ces contournements se sont produits. De plus, à la figure 5.15, on peut voir une évolution typique de la valeur efficace du courant de fuite d'isolateurs composites, dont le niveau de contamination était moyen, au cours d'une période de fonte rapide alors que le contournement s'est produit après environ 27 minutes de fonte.

Tableau 5.5: Temps de la fonte, t_f , et température dans la chambre, T , lors des contournements en période de fonte rapide ($\text{DDS} = 0,1 \text{ mg/cm}^2$).

Type d'isolateur composite	t_f (min.)	température (°C)
EPDM	4	-7,3
EPDM	20	-0,8
silicone	27	+0,4
silicone	25	+0,3

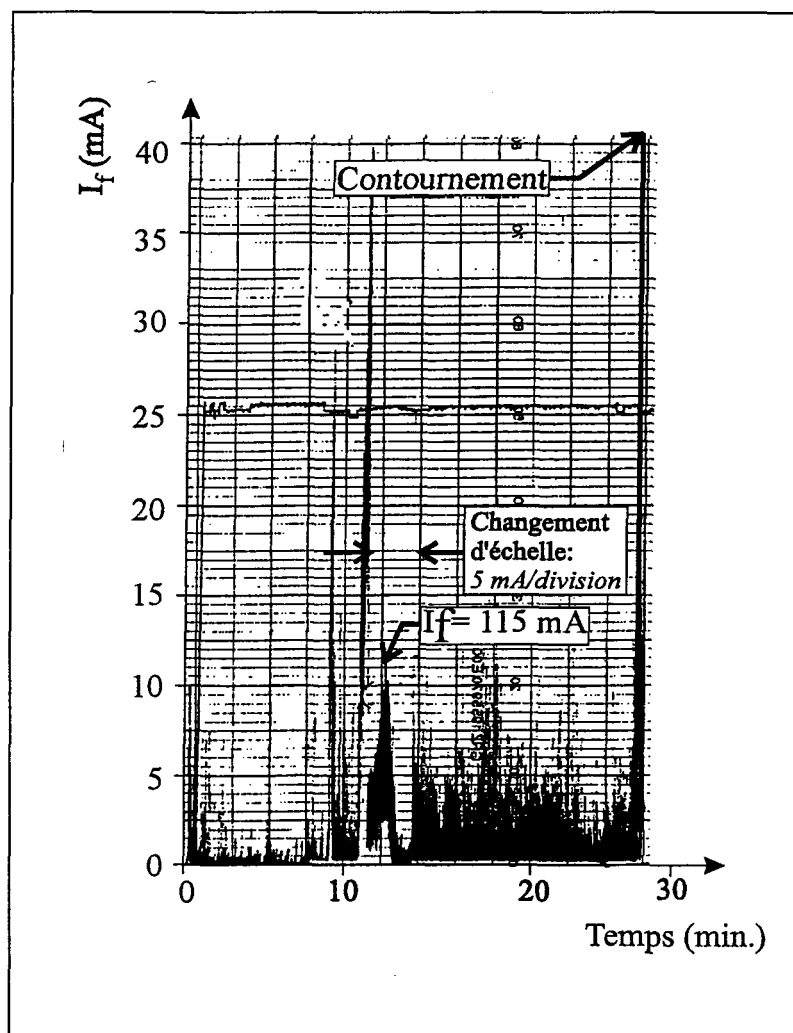


Fig. 5.15: Évolution typique du courant de fuite, I_f , au cours de la fonte rapide (isolateurs composites en EPDM ou en silicone contaminés, $DDS = 0,1 \text{ mg/cm}^2$).

c) Période de l'essai de tenue

Comme nous venons de le voir, lors des essais avec contamination, les décharges sont plus importantes, au cours de l'accumulation et de la fonte, que lors des essais sans contamination. Pour cette raison, la fonte des glaçons et la chute de morceaux de glace étaient plus importantes lors des essais avec contamination. En résultante, la longueur de l'intervalle d'air, mesurée après les étapes d'accumulation et de fonte, tend à être plus importante lors des essais avec contamination que lors des essais sans contamination. Le tableau 5.6 présente les valeurs minimales et maximales des longueurs des intervalles d'air mesurées immédiatement après la période de fonte (soit juste avant l'essai de tenue), en fonction du niveau de contamination.

Tableau 5.6: Valeurs minimales et maximales de l'intervalle d'air en fonction du niveau de contamination (mesures prises immédiatement après l'étape de fonte).

Longueur de l'intervalle d'air après la fonte (mm)			
Type d'isolateurs			
DDS (mg/cm ²)	IEEE (fonte lente)	En EPDM (fonte rapide)	En silicone (fonte rapide)
0	75-145	0-140	0-110
0,05	50-220	110-165	85-385
0,1	-	110-165	-

Au cours des essais de tenue réalisés avec les isolateurs composites (en EPDM et en silicone), si l'intervalle d'air mesuré après la période de fonte rapide était trop grand, aucun arc ne s'amorçait. Ce phénomène avait aussi été observé au cours des essais en régime de fonte rapide réalisés avec des isolateurs composites non contaminés (voir section 5.2.2-b). Par contre, en ce qui a trait aux essais avec contamination, il semble que la longueur de l'intervalle d'air, pour laquelle aucun arc ne peut s'amorcer, est plus élevée que lors des essais sans contamination. C'est ainsi que lors des essais sans contamination, aucun arc ne s'est amorcé lorsque l'intervalle d'air était supérieur à 110 mm, tandis que lors des essais avec un niveau de contamination moyen (0,1 mg/cm²), des contournements ont été

observés pour des longueurs d'intervalle d'air de 165 mm, alors que les isolateurs étaient sous tension de service.

En ce qui concerne les isolateurs IEEE légèrement contaminés ($0,05 \text{ mg/cm}^2$) et soumis au régime de fonte lente, aucun des intervalles d'air mesurés après la période de fonte lente n'a été suffisamment important pour que les décharges soient quasi nulles au cours de l'essai de tenue. Par conséquent, il y avait toujours un arc qui s'amorçait et qui pouvait s'allonger jusqu'au contournement des isolateurs.

La figure 5.16 présente l'évolution de la conductivité de l'eau de fonte de la glace recouvrant des isolateurs IEEE légèrement contaminés ($0,05 \text{ mg/cm}^2$), en fonction du volume total d'eau recueilli. Cette eau fut recueillie au cours de la fonte lente et de l'essai de tenue. On y remarque que la conductivité de l'eau diminue en fonction du volume de glace fondue, passant de $3000 \text{ }\mu\text{S/cm}$ à environ $500 \text{ }\mu\text{S/cm}$ lorsque plus de 1000 ml d'eau est recueillie. Si l'on compare cette courbe avec celle obtenue lors d'essais sans contamination (figure 5.4), réalisés avec le même type d'isolateurs, on note que la conductivité de l'eau de fonte de la glace est nettement plus élevée lors des essais avec contamination. Concrètement, au début de la fonte de la glace, la conductivité de l'eau recueillie est jusqu'à 8,5 fois plus élevée qu'au cours des essais sans contamination.

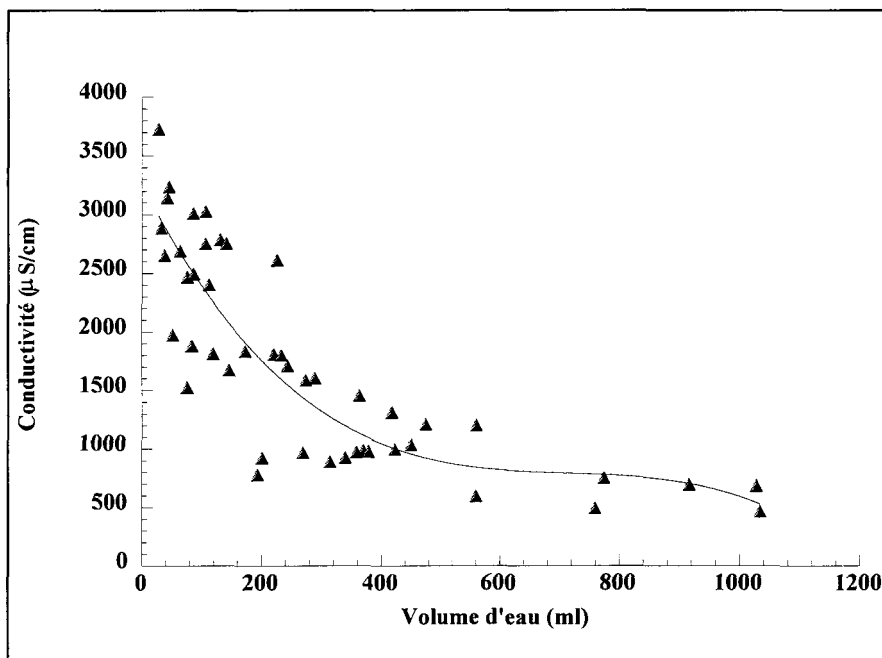


Fig. 5.16: Conductivité de l'eau (à 20°C) de fonte de la glace en fonction du volume total d'eau recueilli (isolateurs IEEE contaminés, DDS = 0,05 mg/cm²)⁶.

Pour ce qui est des essais réalisés avec les isolateurs composites contaminés, la glace tombait davantage qu'elle ne fondait. Pour cette raison, l'évolution de la conductivité de l'eau de fonte de la glace en fonction du volume d'eau recueilli n'a pu être établie de façon convenable pour ce type d'isolateurs.

⁶ Les points sont lissés par une régression polynomiale du 3^e ordre (coefficient de corrélation: -0.75).

CHAPITRE VI

CONCLUSION

À la lumière des résultats des essais réalisés en régime de fonte rapide, de fonte lente [3] et d'accumulation [15] avec des isolateurs (IEEE standards et composites, en EPDM et en silicone) propres ou contaminés (DDS de $0,05 \text{ mg/cm}^2$ ou de $0,1 \text{ mg/cm}^2$) recouverts d'un dépôt de glace uniforme, formé en régime humide et dont l'épaisseur de référence est de 1,5 cm, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

6.1 Conclusions relatives aux essais sans contamination

- L'augmentation de la température ambiante jusqu'au point de fonte de la glace cause une diminution de la tension de tenue maximale, V_{TM} , des isolateurs recouverts de cette glace. De plus, cette diminution de la tension de tenue maximale est fonction du taux d'augmentation de la température ambiante jusqu'au point de fonte de la glace et de la quantité de glace qu'accumulent les isolateurs. À cause de cela, la plus faible tension de tenue maximale des isolateurs IEEE fut trouvée en régime de fonte lente [3], tandis que

celle des isolateurs composites en EPDM, fut trouvée en régime de fonte rapide. Le régime de fonte lente pour les isolateurs IEEE et celui de fonte rapide pour les isolateurs composites (en EPDM et en silicone) sont donc considérés comme les régimes d'essais les plus critiques, car ils mènent aux tensions de tenue maximales les plus faibles. Les valeurs des tensions de tenue maximales trouvées en régime critique d'essais sont plus de 10% plus faibles que celles trouvées en régime d'accumulation.

- Au cours de la fonte rapide, l'intensité du courant de fuite des isolateurs IEEE est très faible, tandis que lors d'essais réalisés avec les isolateurs composites (en EPDM et en silicone) de très fortes décharges peuvent être observées au cours de cette période.
- Au cours de la fonte rapide, la fonte du dépôt de glace recouvrant les isolateurs IEEE est graduelle et un faible volume d'eau de fonte est obtenu, tandis que lors des essais réalisés avec les isolateurs composites (en EPDM et en silicone) un grand volume d'eau de fonte de la glace pouvait être recueilli au cours de cette période, si l'énergie dissipée par les décharges était élevée.
- Pour tous les isolateurs testés en régime de fonte rapide, la conductivité de l'eau de fonte de la glace diminue en fonction du volume de glace fondue. Au début de la fonte, elle est de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui est environ 4 fois plus que la conductivité de l'eau ayant servi à la formation de la glace. Par la suite, elle diminue jusqu'à atteindre de 25% à 40% de sa valeur initiale (lorsque plus de 1000 ml d'eau de fonte est recueillie).

- La longueur de l'intervalle d'air est généralement plus grande après une période de fonte lente, qu'après une période de fonte rapide.
- Lors des essais en régime de fonte rapide, réalisés avec les isolateurs composites (en EPDM et en silicone), il a été observé qu'à partir d'une certaine longueur de l'intervalle d'air, en l'occurrence 110 mm, les décharges demeurent généralement très faibles (la valeur crête du courant est inférieure à 2 mA) au cours de l'essai de tenue, et la probabilité de contournement devient quasi nulle.

6.2 Conclusions relatives aux essais avec contamination

- En régime d'accumulation, la tension de tenue maximale des isolateurs IEEE légèrement contaminés ($0,05 \text{ mg/cm}^2$) est de l'ordre de 7% plus faible que celle des isolateurs IEEE non contaminés.
- En régime critique d'essais, la tension de tenue maximale des isolateurs IEEE et composites (en EPDM et en silicone) légèrement contaminés ($0,05 \text{ mg/cm}^2$) est de l'ordre de 5% plus faible que lors des essais sans contamination.
- En régime critique d'essais, réalisé avec des isolateurs composites (en EPDM et en silicone) dont le niveau de contamination est moyen ($0,1 \text{ mg/cm}^2$), la tenue électrique des isolateurs diminue à un point tel qu'un contournement peut avoir lieu au cours de la fonte, alors que les isolateurs sont sous tension de service.

- Au cours de la première minute d'accumulation, les isolateurs contaminés sont lavés partiellement par l'eau qui ruisselle à leur surface. La diminution rapide du courant de fuite au cours de cette période en témoigne.
- L'intensité du courant de fuite, I_f , au cours des étapes d'accumulation et de fonte augmente en fonction du niveau de la contamination appliquée à la surface des isolateurs.
- La longueur des intervalles d'air mesurée après les étapes d'accumulation et de fonte tend à être plus élevée au cours des essais avec contamination que lors des essais sans contamination.
- Au cours des essais réalisés en régime de fonte rapide avec des isolateurs composites dont le niveau de contamination est moyen ($0,1 \text{ mg/cm}^2$), la longueur de l'intervalle d'air, pour laquelle aucun arc ne s'amorce, est jusqu'à 1,5 fois plus élevée que lors des essais sans contamination.
- La conductivité de l'eau de fonte de la glace recouvrant les isolateurs IEEE légèrement contaminés ($0,05 \text{ mg/cm}^2$), est jusqu'à 8,5 fois plus élevée que lors des essais sans contamination.

6.3 Suggestions pour de futurs travaux

Les résultats obtenus au cours de la présente étude ont suscité quelques questions qu'il pourrait être intéressant d'approfondir dans d'autres travaux au cours desquels des essais en régime de fonte seraient réalisés.

- Comme il a été démontré lors des essais réalisés en régime de fonte, le taux d'augmentation de la température ambiante jusqu'au point de fonte de la glace influence la tenue électrique des isolateurs recouverts de glace. Lors de la présente étude, seulement deux taux de fonte furent testés. Il serait donc très intéressant d'étudier l'influence de taux de fonte autres que ceux testés, sur la tension de tenue maximale d'isolateurs recouverts de glace. Cela permettrait principalement d'avoir une idée plus juste de l'effet de la fonte sur la tenue électrique des isolateurs recouverts de glace.
- Lors de récents travaux réalisés en régime d'accumulation [3], la méthode de la tension de tenue maximale et la méthode de tenue 50% s'étaient toutes deux avérées acceptables pour évaluer la tenue électrique d'isolateurs recouverts de glace. Cependant, l'état du dépôt de glace (longueur de l'intervalle d'air, conductivité du dépôt de glace, etc.) semble varier davantage, d'un essai à l'autre, après l'étape de fonte qu'après l'étape d'accumulation. En réaction à cela, il serait avantageux de vérifier si, lors d'essais en régime de fonte, la méthode de 50% ne serait pas davantage appropriée pour trouver la tension de tenue des isolateurs recouverts de glace que la méthode de la tension de tenue maximale, telle qu'utilisée lors de la présente étude.

ANNEXE

A.1 Paramètres caractérisant chaque essais de tenue

A.1.1 Essais sans contamination en régime de fonte rapide

Type d'isolateur: **IEEE**

Niveau de pollution: **0 mg/cm²**

Régime d'essais: fonte rapide

No. de l'essai	V _E (kV)	R	E (kJ)	I _{max} (+) (mA)	I _{max} (-) (mA)	V _{TM} /m (kV/m)	t (sec)	Lap _{acc} (mm)	Lap _{fonte} (mm)	Lap _{essai} (mm)	V _f (ml)	V _e (ml)
1	75	T	706.5	869.1	-724.1	81,7	104	0	50	290	-	-
2	78	T	579.5	369.7	-376.9		114	0	50	145	2	1176
3	78	T	663.0	776.4	-771.5		63	50	75	195	0	1631
4	81	C	-	-	-		12	50	50	50	-	370
5	81	C	-	-	-		12	75	75	145	10	504
6	75	T	345.4	393.1	-331.1		73	0	50	245	40	727
7	78	C	-	-	-		28	0	50	220	12	1049
8	75	T	550.6	293.5	-296.4		118	0	0	145	10	1392
9	78	T	380*	290*	-		70	0	50	145	25	1068

Type d'isolateur: **EPDM**

Niveau de pollution: **0 mg/cm²**

Régime d'essais: **fonte rapide**

No. de l'essai	V _E (kV)	R	E (kJ)	I _{max} (+) (mA)	I _{max} (-) (mA)	V _{TM} /m (kV/m)	t (sec)	Lap _{acc} (mm)	Lap _{fonte} (mm)	Lap _{essai} (mm)	V _f (ml)	V _e (ml)
1	69	C	-	-	-	88,2	23	0	0	0	0	375
2	66	C	-	-	-		25	0	0	0	0	350
3	63	T	~ 0	1,0	-1,4		Δ	0	140	-	500	140
4	63	T	424,0	411,1	-416,0		63	0	55	110	0	657
5	63	T	~ 0	~ 0	-		Δ	0	85	85	196	132
6	66	T	240	234	-200		68	0	30	140	335	218
7	66	C	-	-	-		33	0	-	55	0	407

Type d'isolateur: **silicone**

Niveau de pollution: **0 mg/cm²**

Régime d'essais: fonte rapide

No. de l'essai	V _E (kV)	R	E (kJ)	I _{max} (+) (mA)	I _{max} (-) (mA)	V _{TM} /m (kV/m)	t (sec)	Lap _{acc} (mm)	Lap _{fonte} (mm)	Lap _{essai} (mm)	V _f (ml)	V _e (ml)
1	66	C	-	-	-	88,2	36	0	85	140	67	717
2	63	T	333,2	381	-377		63	55	85	195	28	1035
3	66	C	-	-	-		18	0	0	85	56	165
4	63	T	~ 0*	1.1*	-		Δ	0	55	55	475	-
5	63	T	~ 0*	0.4*	-		Δ	0	110	110	190	420

A.1.2 Essais avec contamination en régime d'essais le plus critique

Type d'isolateur: **IEEE**

Niveau de pollution: **0.05 mg/cm²**

Régime d'essais: fonte lente

No. de l'essai	V _E (kV)	R	E (kJ)	I _{max} (+) (mA)	I _{max} (-) (mA)	V _{TM} /m (kV/m)	t (sec)	Lap _{acc} (mm)	Lap _{fonte} (mm)	Lap _{essai} (mm)	V _f (ml)	V _e (ml)
1	75	C	-	-	-	72,25	8	75	145	145	86	188
2	72	T	470*	651*	-		62	50	145	145	46	988
3	72	T	16,7	66,4	-65,4		8	75	75	290	289	74
4	72	C	-	-	-		25	50	50	145	323	241
5	72	C	-	-	-		5	50	75	75	107	-
6	69	T	327,9	482,9	-479,5		90	75	75	365	370	658
7	69	T	11,1	142,1	-146,0		20	75	145	145	131	95
8	69	T	21,4	406,7	-406,7		63	50	220	220	423	137

Type d'isolateur: **EPDM**

Niveau de pollution: **0,05 mg/cm²**

Régime d'essais: fonte rapide

No. de l'essai	V _E (kV)	R	E (kJ)	I _{max} (+) (mA)	I _{max} (-) (mA)	V _{TM} /m (kV/m)	t (sec)	Lap _{acc} (mm)	Lap _{fonte} (mm)	Lap _{essai} (mm)	V _f (ml)	V _e (ml)
1	63	C	-	-	-	84	6	0	110	140	230	0
2	60	T	0,4	3,4	-2,9		Δ	0	165	165	-	-
3	60	T	1,3	68,8	-65,4		2	0	110	110	35	104
4	63	C	-	-	-		20	85	110	110	320	219
5	60	T	2,8	68,8	-70,8		Δ	0	110	140	257	253

Type d'isolateur: **EPDM**

Niveau de pollution: **0,1 mg/cm²**

Régime d'essais: fonte rapide

No. de l'essai	V _E (kV)	R	E (kJ)	I _{max} (+) (mA)	I _{max} (-) (mA)	V _{TM} /m (kV/m)	t (sec)	Lap _{acc} (mm)	Lap _{fonte} (mm)	Lap _{essai} (mm)	V _f (ml)	V _e (ml)
1	60	T	1,3	26,9	-31,7	**	Δ	30	165	165	259	363
2	51 [✧]	C	-	-	-		-	55	110	-	325	-
3	60	C	-	-	-		1	30	140	140	529	0
4	57	T	3*	18*	-		Δ	0	165	165	715	360
5	51 [✧]	C	-	-	-		-	30	165	-	630	-

Type d'isolateur: **silicone**

Niveau de pollution: **0,05 mg/cm²**

Régime d'essais: **fonte rapide**

No. de l'essai	V _E (kV)	R	E (kJ)	I _{max} (+) (mA)	I _{max} (-) (mA)	V _{TM} /m (kV/m)	t (sec)	Lap _{acc} (mm)	Lap _{fonte} (mm)	Lap _{essai} (mm)	V _f (ml)	V _e (ml)
1	63	C	-	-	-	84	2	0	140	140	334	0
2	60	C	-	-	-		2	0	165	165	272	0
3	57	C	-	-	-		10	0	85	85	395	0
4	54	T	~ 0	2,4	-3,9		Δ	30	140	495	568	77
5	57	T	3,3	302,2	-313,0		15	-	165	165	482	209
6	60	T	~ 0	6,8	-6,3		Δ	-	140	140	590	200
7	60	T	~ 0	1,0	-1,5		Δ	-	195	440	40	170
8	63	C	-	-	-		5	-	110	110	146	0
9	60	T	1,04	5,9	-6,3		Δ	0	385	385	183	78

Type d'isolateur: **silicone**

Niveau de pollution: **0,1 mg/cm²**

Régime d'essais: fonte rapide

No. de l'essai	V _E (kV)	R	E (kJ)	I _{max} (+) (mA)	I _{max} (-) (mA)	V _{TM} /m (kV/m)	t (sec)	Lap _{acc} (mm)	Lap _{fonte} (mm)
1	51 [*]	C	-	-	-	**	-	-	-
2	51 [*]	C	-	-	-		-	-	140

A.1.3 Essais avec contamination en régime d'accumulation

Type d'isolateur: **IEEE**

Niveau de pollution: **0,05 mg/cm²**

Régime d'essais: accumulation

No. de l'essai	V _E (kV)	R	E (kJ)	I _{max} (+) (mA)	I _{max} (-) (mA)	V _{TM} /m (kV/m)	t (sec)	Lap _{acc} (mm)	Lap _{essai} (mm)
1	75	C	-	-	-	78,5	47	0	75
2	72	T	858,9	538,6	-535,2		167	75	145
3	75	T	918,5	482,4	-460,4		146	75	290
4	78	C	-	-	-		-	75	220
5	75	T	360*	297*	-		130	50	195
6	78	T	485*	269*			84	75	290
7	78	C	-	-	-		62	75	145
8	75	T	429,2	522,9	-530,3		111	75	145

A.1.4 Autres

Type d'isolateur: **IEEE**

Niveau de pollution: **0,05 mg/cm²**

Régime d'essais: fonte rapide

No. de l'essai	V _E (kV)	R	E (kJ)	I _{max} (+) (mA)	I _{max} (-) (mA)	V _{TM} /m (kV/m)	t (sec)	Lap _{acc}	Lap _{fonte} (mm)	Lap _{essai} (mm)	V _f (ml)	V _e (ml)
1	75	T	580*	>707*	-	***	30	-	-	-	748	1168

Type d'isolateur: **silicone**

Niveau de pollution: **0,1 mg/cm²**

Régime: **accumulation**

No. de l'essai	V _E (kV)	R	E (kJ)	I _{max} (+) (mA)	I _{max} (-) (mA)	V _{TM} /m (kV/m)	t (sec)	Lap _{acc}	Lap _{essai} (mm)	V _e (ml)
1	57	T	10,9	343,3	-137,2	***	145	-	-	90

A.1.5 Lexique

V_E	: Tension d'essai.
R	: Résultat de l'essai de tenue.
E	: Énergie dissipée par le courant de fuite, I_f , au cours de l'essai de tenue.
$I_{\max}(+)$: Valeur crête maximale (alternance positive) du courant de fuite, I_f , au cours de l'essai de tenue.
$I_{\max}(-)$: Valeur crête maximale (alternance négative) du courant de fuite, I_f , au cours de l'essai de tenue.
V_{TM}/m	: Tension de tenue maximale par mètre de distance d'arc, pour la série d'essai.
t	: Durée des fortes décharges et de l'arc électrique au cours de l'essai de tenue.
Lap_{acc}	: Longueur de l'intervalle d'air après l'étape d'accumulation.
Lap_{fonte}	: Longueur de l'intervalle d'air après l'étape de fonte.
Lap_{essai}	: Longueur de l'intervalle d'air après l'étape d'essai de tenue.
V_f	: Volume d'eau de fonte de la glace recueillie au cours de la période de fonte.
V_e	: Volume d'eau de fonte de la glace recueillie au cours de l'essai de tenue.
*	: Valeur calculée à partir du tracé analogique.
Δ	: Courant de fuite très faible au cours de l'essai de tenue.
◆	: Contournement à 51 kV au cours de la fonte.
**	: Tension de tenue maximale non trouvée (contournement au cours de la fonte).
***	: Tension de tenue maximale non trouvée (essai préliminaire).

A.2 Abaque de la résistivité de la solution aqueuse contenant du sel en fonction de sa salinité

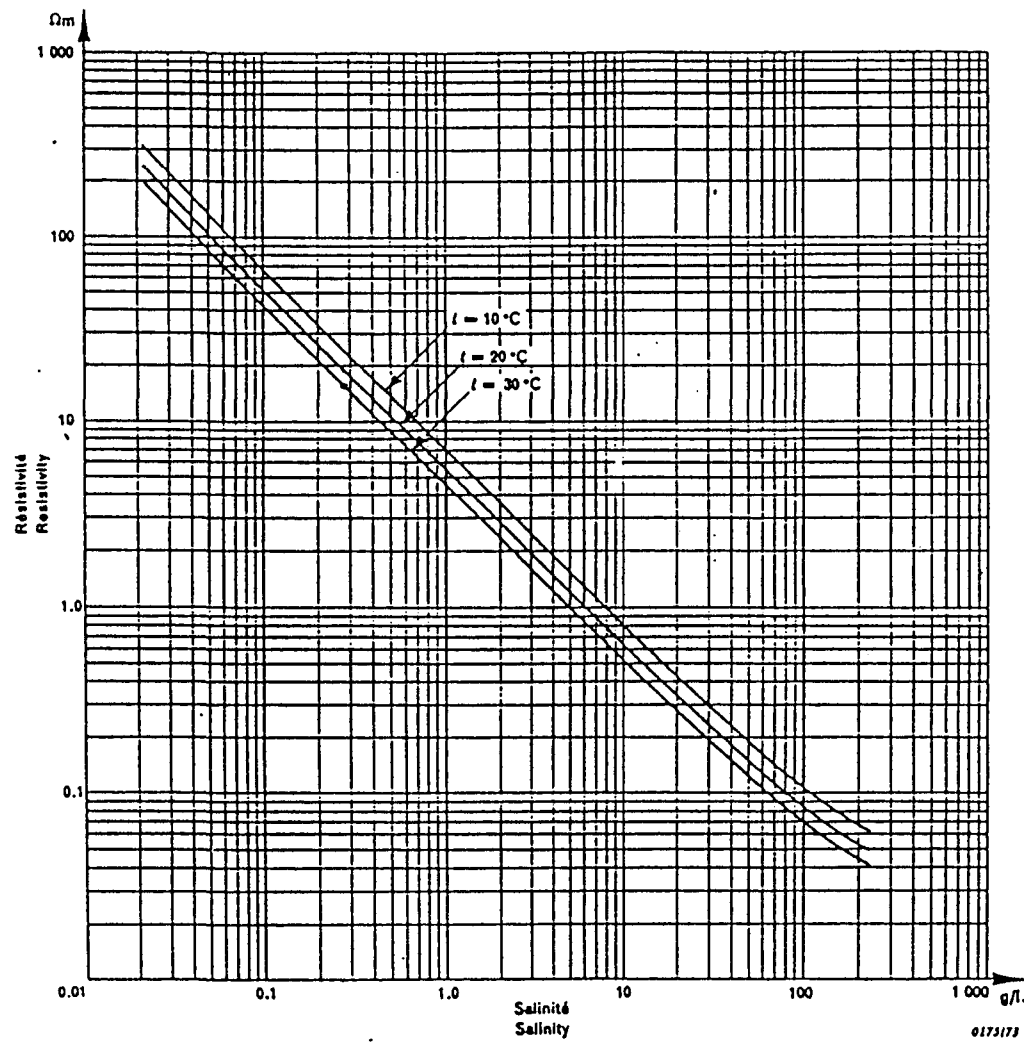


Tableau A.1: Résistivité de la solution aqueuse contenant du sel en fonction de sa salinité [38]

BIBLIOGRAPHIE

1. S. Barahmand, "Tension minimale de contournement des isolateurs givrés en régime de fonte", Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi, S.E., Février 1985.
2. P.G. Buchan, "Electrical Conductivity of Insulator Surface Ices", Ontario-Hydro Research Division, Electrical Research Department, Report 86-31-K, pp. 1-17, Mai 1986.
3. R. Chaarani, "Détermination de la tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM", Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi, S.E., 1996.
4. 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, 1982.
5. E.A. Cherney, "Flashover Performance of Artificially Contaminated and Iced Long-Rod Transmission Line Insulators", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-99, pp. 46-52, Février 1980.

6. E.A. Cherney et al., "Application of Composite Insulators to Transmission lines", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-102, No.5, pp. 1226-1234, Mai 1983.
7. A. Cimador et S. Vitet, "La pollution des isolations externes", Journal Épure, No. 27, pp. 43-54, Paris, Août 1990.
8. Commission Électrotechnique Internationale, rapport de la CEI, "Guide pour le choix des isolateurs sous pollution", publication 815, première édition, Genève, Suisse, 1986
9. A. De La O, R.S. Gogur et J. Chang, "AC Clean Fog on Non-Ceramic Insulating Materials and a Comparison with Porcelain", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, pp. 2000-2008, Octobre 1994.
10. J.F. Drapeau "Effects of January 14, 1995 Ice Storm Event on Hydro-Québec Transmission equipment Service Continuity", Proceedings of the 7th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Chicoutimi, Canada, pp. 462, Juin 1996.
11. M. Farzaneh, "Effect of Ice Thickness and Voltage Polarity on The Flashover Voltage on Ice Covered High Voltage Insulators", Proceedings of 7th International Symposium on HV Engineering, Dresden, Allemagne, Vol. 4, Papier 43.10, pp. 203-206, Août 1991.
12. M. Farzaneh, M.A. Dallaire, O.T. Melo et A.E. Boyer, "Interception of Supercooled Droplets by Energized Line Insulators", 6th International Symposium on High Voltage Engineering, La Nouvelle-Orléans, États-Unis, Papier 42.26, Août/Septembre 1989.

13. M. Farzaneh et J.F. Drapeau, "AC Flashover Performance of Insulators Covered with Artificial Ice", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, Avril 1995
14. M. Farzaneh et J. Kiernicki, "Détermination de la tension de contournement d'une colonne isolante recouverte de glace en fonction de la conductivité de l'eau", Rapport de l'UQAC présenté à l'Hydro-Québec (IREQ), pp. 1-10, janvier 1993.
15. M. Farzaneh et J. Kiernicki, "Développement d'une méthode standardisée de mesure de la tension de contournement des isolateurs recouverts de glace, Étape 4A, tension de tenue maximale en régime d'accumulation et effet de l'épaisseur de glace sur la tension de tenue maximale des isolateurs recouverts de glace humide", Rapport de contrat pour l'IREQ, mai 1995.
16. 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, Mars/Avril 1995.
17. M. Farzaneh, J. Kiernicki et M.A. Dallaire, "AC and DC Flashover Performance of Ice-Covered Insulators during a De-Icing Period", 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Tokyo, Japon, Papier No. B-48, pp. 1-4, Septembre 1990.
18. M. Farzaneh, J. Kiernicki et J.F. Drapeau, "Ice Accretion on Energized Line Insulators", International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 228-233, Septembre 1992.

19. M. Farzaneh, J. Kiernicki et J.F. Drapeau, "AC Flashover Performance of Ice-Coated Post Insulators", 6th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Budapest, Hongrie, pp. 253-257, Septembre 1993.
20. M. Farzaneh, J. Kiernicki et R. Martin, "A Laboratory Investigation of Flashover Performance of Outdoor Insulators Covered with Ice", Proceedings 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Brisbane, Australie, pp. 483-486, Juillet 1994.
21. M. Farzaneh et J.L. Laforte, "Effect of Voltage Polarity on Ice Accretion on Short String Insulators", Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 113, pp. 179-184, Mai 1991.
22. M. Farzaneh et J.L. Laforte, "Effect of Voltage Polarity on Icicles Grown on Line Insulators", International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 2, No. 4, pp. 298-302, December 1992.
23. M. Farzaneh et O.T. Melo, "Properties and Effect of Freezing Rain and Winter Fog on Outline Insulators", Cold Region Science and Technology, Vol.19, pp. 33-46, 1990
24. M. Farzaneh, N. Sugawara et J.L. Laforte, "Effect of Wind and De-Icing on the Minimum Flashover Voltage of HV Insulators", IEEE Insulation and Dielectric Phenomena, Amherst, Octobre 1985.
25. M. Farzaneh, J. Zhang et X. Chen, "A Laboratory Study of Leakage Current and Surface Conductivity of Ice Samples", IEEE CEIDP Annual Report 1994, No. 94CH3456-1, pp. 631-638, 1994.

26. M. Farzaneh, J. Zhang et X. Chen, "Modeling of the AC Arc Discharge on Ice Surfaces", IEEE PES Winter Meeting, USA, Papier 96WM 078-6 PWRD, Janvier 1996 (accepté pour publication dans la revue Trans. On Power Delivery).
27. S.M. Fikke, "Possible Effects of Contaminated Ice on Insulator Strength", 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Tokyo, 1990.
28. S.M. Fikke, J.E. Hanssen et L. Rolfseng, "Long Range Transported Pollution and Conductivity on Atmospheric Ice on Insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, pp. 1311-1321, Juillet 1993.
29. S.M. Fikke, T.M. Ohnstad, H. Förster et L. Rolfseng, "Effect of Long Range Airborne Pollution on Outdoor Insulation", Nordic Insulation Symposium, NORD-IS 94, pp. 103-112, Vaasa, Juin 1994.
30. J.S. Forest, "The performance of High Voltage Insulators in Polluted Atmospheres", Conference Paper IEEE Winter Meeting, New York, 1969.
31. T. Fujimura, K. Naito, Y. Hasegawa et K. Kawagushi, "Performance of Insulators Covered with Snow or Ice", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-98, No.5, pp. 1621-1631, Octobre 1979.
32. S. Godard, "Mesure des gouttelettes de nuage avec un film de Collargol", Bulletin de l'Observatoire du Puy de Dôme, No. 2, pp. 41-46, 1960
33. S. Gubanski et R. Hartings, "Swedish Research on The Application of Composite Insulators in Outdoor Insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 5, Septembre/Octobre 1995.

34. M. Hara et C.L. Phan “Leakage Current and Flashover Performance of Iced Insulators”, IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-98, No 3, pp. 849-859, Mai/Juin 1979.
35. Hydro-Québec, “Vocabulaire illustré des lignes aériennes de transport et de distribution d’électricité, Fascicule 2 : les conducteurs et les isolateurs”, Hydro-Québec, décembre 1983.
36. I. Imai and Ichiro, “Studies on Ice Accretion”, Research on Snow and Ice, No. 1, pp. 35-44, 1953.
37. International Electrotechnical Commission, “Artificial Pollution Tests on High Voltage Insulators to be Used on AC Systems”, International Standard IEC 507, Avril 1991.
38. X. Jiang, S. Wu, C. Sun, L. Gu et J. Zhang, “Study of Flashover Performance and Discharge Mechanism of Iced Insulators”, 6th International Symposium on High Voltage Engineering, Nouvelle Orléans, USA, Papier 13.04, pp. 1-4, Août/Septembre 1989.
39. C.G. Jung, “Chimie générale McQuarrie/rock”, 3^e édition, De Boeck Université, Belgique, 1992.
40. K. Kannus et V. Verkkonen, “Effect of Ice Coating on the Dielectric Strength on High Voltage Insulators”, Proceedings of the 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Paris, France, pp.296-300, Septembre 1988.

41. K. Kannus et V. Verkkonen, "Effect of Ice Coating on the Dielectric Strength on High Voltage Insulators", Proceedings of the 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Paris, France, pp. 296-300, 1993.
42. K. Kannus, V. Verkkonen et E. Lakervi, "Effects of Ice Coating on the AC Performance of Medium Voltage Insulators", Nordic Symposium on Electrical Insulation, NORD-IS 86, Esbo, Finlande, pp.1-11, Juin 1986.
43. G.G. Karady, H.M. Schneider et F.A.M. Rizk, , "Review of CIGRE and IEEE Research into Pollution Performance of Nonceramic Insulators : Field aging Effects and Laboratory Test Techniques", CIGRE 33-103, Août/Septembre 1994
44. 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, 1970.
45. M.M. Khalifa et R. M. Morris, "Performance of Line Insulators Under Rime Ice", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-86, No 6, pp. 692-698, Juin 1967.
46. D. Kuroiwa, "Icing and Snow Accretion", Monograph Series of Research, Institute of Applied Electricity, Japan, pp. 1-30, 1958.
47. D. Kuroiwa, "Icing and Snow Accretion on Electric Wires", U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Research Report 123, pp. 1-10, 1965.
48. J.L. Laforte, "Technologie de l'environnement nordique", notes du cours 6MIG918-11, S.E., Chicoutimi, 1995.

49. L.Y. Lee, C.L. Nellis et J.E. Brown, “60 Hz Tests on Ice Coated 500 kV Insulator Strings”, IEEE/PES Summer Meeting, Papier A75-499-4, San Francisco, USA, 1975.
50. G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lalot et C. Dubanton, “Les propriétés dielectriques de l’air et les très hautes tensions”, Collection de la direction des études et recherches d’électricité de France, Éditions Eyrolles, Paris, 1984.
51. J.S.T. Looms, “Insulators for High Voltages”, Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1988.
52. L. Makkonen, “Estimating Intensity of Atmospheric Ice Accretion on Stationary Structures”, Journal of Applied Meteorology, Vol. 20, pp. 595-600, 1981.
53. H. Matsuda, H. Komuro et K. Takasu, “Withstand Voltage Characteristics of Insulator String Covered with Snow or Ice”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, pp. 1243-1250, Juillet 1991.
54. H. Oguchi et al., “Icing on Electric Wires”, Research on Snow and Ice, No. 1, pp. 45-49, 1953.
55. C.L. Phan, M.A. Allaire et P. McComber, “Accumulation du verglas et du givre sur les nouveaux isolateurs sous H.T.”, Canadian Electrical Engineering journal, Vol.2, No. 4, pp. 24-28, 1977.
56. C.L. Phan et H. Matsuo, “Minimum Flashover Voltage of Iced Insulators”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-18, No. 6, Décembre 1983.

57. C.L. Phan, H. Matsuo, R. Martin et L. Vovan, "Flashover Performance of Precontaminated Insulators in Presence of Hard Rime", Transactions of the Canadian Electrical Association, Vol. 22, 1983.
58. C.K. Rush et R.L. Wardlaw, "Icing Measurements with a Single Rotation Cylinder", National Aeronautical Establishment of Canada, LR-206, pp. 1-18, 1957.
59. L. Shu, C. Sun, J.Zhang et L. Gu, "AC Flashover Performance on Iced and Polluted Insulators for High Altitude Regions", Proceedings of 7th International Symposium on High Voltage Engineering, Dresden, Allemagne, Vol. 4, Papier 43.13, pp.303-306, Août 1991.
60. J.R. Stallabrass, "An Appraisal of the Single Rotating Cylinder Method of Liquid Water Content Measurement", National Research Council Canada, Report LTR-LT-92, pp. 1-36, 1978.
61. F. Su et Y. Jia, "Icing on Insulator String of HV Transmission Lines and the Harmfulness", Proceedings of 3rd International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 655-662, Singapore 1993.
62. N. Sugawara et M. Farzaneh, "On the Role of Water Film in the Mechanism of Flashover in Iced Insulators", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Washington DC, États-Unis, pp. 281-286, Juin 1986.
63. N. Sugawara et K. Hokari, "Leakage Current Depending on the Insulator Shapes and their Ice Accreted Conditions", Proceedings of the 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Paris, France, pp.291-295, Septembre 1988.

64. N. Sugawara, K. Hokari, R. Matsuoka et K. Naito, "Insulation Properties of Iced Various Insulators during Freezing Rain and De-Icing", 6th International Symposium on High Voltage Engineering, Nouvelle Orléans, États-Unis, Vol. 3, Papier 47.33, pp. 1-4, Août/Septembre 1989.
65. N. Sugawara, K. Hokari, T. Nosaka, Y. Tatokoro et K. Mizumura, "Insulation Resistance of Transmission Line Insulators Depending on the Accretion of Ice", 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Tokyo, Japon, Papier B4-9, pp. 1-6, Octobre/Novembre 1990.
66. C. Sun, L. Gu, X. Jiang et J. Zhang, "AC Flashover Performance of Iced Insulators ", Proceedings 2nd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Beijing, Chine, Vol. 1, pp. 249-252, Septembre 1988.
67. R.J. Vong, J.T. Sigmon, S.F. Mueller, "Cloud Water Deposition to Appalachian Forest", Environment Sciences and Technologies, Vol. 25, No. 6, 1991.
68. Y. Watanabe, "Flashover Tests of Insulators Covered with Ice or Snow", IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-97, No.5, pp. 1788-1794, Septembre 1978.