

UNIVERSITE DU QUEBEC A CHICOUTIMI

MEMOIRE PRESENTE A

L'UNIVERSITE DU QUEBEC A CHICOUTIMI

COMME EXIGENCE PARTIELLE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE

MAITRISE EN SCIENCES APPLIQUEES
(RESSOURCES ET SYSTEMES)

PAR

SOHRAB BARAHMAND, B.Ing.
(GENIE ELECTRIQUE)

TENSION MINIMALE DE CONTOURNEMENT DES
ISOLATEURS GIVRES EN REGIME DE FONTE

FEVRIER 1985



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.

TITRE: LA TENSION MINIMALE DE CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS
GIVRES EN REGIME DE FONTE

Auteur: Sohrab Barahmand

RESUME

Les conducteurs et les isolateurs des lignes de transport électrique des régions froides canadiennes et québécoises sont souvent recouverts de glace et parfois ont à subir des changements rapides de température. Durant un réchauffement, un film d'eau peut se former en surface des dépôts de glace; en raison de la tension appliquée, ce film d'eau favorise l'apparition de décharges électriques qui peuvent se développer en un contournement électrique. Une étude expérimentale a été entreprise en vue d'étudier le rôle joué par le film d'eau sur le comportement électrique des isolateurs recouverts de glace. A cet effet, les variations de température se rapprochant de celles rencontrées dans la nature en régime de fonte ont été reproduites en laboratoire à l'intérieur d'une chambre réfrigérée.

La première partie du travail est consacrée à la mise au point d'une méthode pour mesurer la valeur de la tension minimale de contournement (V_{MF}) en régime de fonte. Les résultats montrent que la tension minimale de contournement est plus faible

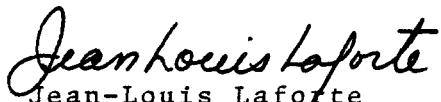
lorsque la tension appliquée sur la chaîne d'isolateurs est augmentée au moment où la température de la glace est entre -0.5 et 0°C. Les résultats indiquent de plus, que la tension minimale de contournement en régime de fonte (78 ± 3 kV), pour une chaîne de quatre isolateurs couverts de 2 cm de glace, est pratiquement semblable à celle mesurée en régime d'accumulation. En régime de fonte comme en régime d'accumulation, l'activité de décharge s'amorce dès la formation du film d'eau. Par la suite, le développement de l'arc blanc et du contournement dépend de l'épaisseur et de la longueur des glaçons ainsi que du niveau de la tension appliquée.

La seconde partie de l'étude porte sur les effets de la glace formée à partir de gouttelettes d'eau conductrice et de la contamination des isolateurs couverts de glace sur la valeur de la tension minimale de contournement en régime de fonte. L'addition de sel dans l'eau et la précontamination des isolateurs permettent de simuler respectivement deux conditions de contamination rencontrée, l'une dans les régions côtières et l'autre, au voisinage des industries. Les résultats indiquent que la valeur de la tension minimale de contournement mesurée en régime de fonte et celle en régime d'accumulation pour les deux types de pollution sont sensiblement les mêmes. En outre, la valeur de la tension minimale de contournement diminue d'une

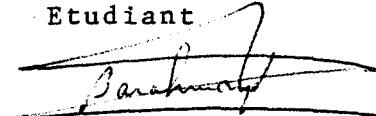
façon exponentielle, lorsque la conductivité de l'eau augmente. A partir d'une certaine limite ($200 \mu\text{S}/\text{cm}$) la tension de contournement reste constante.

Enfin, les observations visuelles des échantillons de glace formée sur les isolateurs ont permis de constater que le passage du courant de fuite se fait à l'intérieur des glaçons situés sur la ligne d'arc de la chaîne d'isolateurs. Ceci confirme le fait que le contournement des isolateurs couverts de glace est différent de celui des isolateurs humides et pollués. En effet, dans ce dernier, le mécanisme de contournement est relié au développement de bandes sèches sur la surface des isolateurs. Dans le cas des isolateurs recouverts de glace, le contournement dépend de la longueur et de l'épaisseur de la glace formée en bordure des jupes d'isolateurs ainsi que de la formation d'un film d'eau sur la surface de la glace.

Luan C. Phan
Directeur de thèse


Jean-Louis Laforte
Co-directeur

Sohrab Barahmand
Etudiant



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier sincèrement mon directeur de thèse le Dr Luan C. Phan, professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi pour les précieux conseils et l'encouragement qu'il a toujours manifesté tout au long de cette étude.

Je désire également remercier mon co-directeur le Dr Jean-Louis Laforte pour sa collaboration et ses conseils lors de la direction de ce travail.

Ma reconnaissance s'adresse à M. Claude d'Amours pour son aide technique ainsi qu'à M. Marcel Gauthier, ing. pour l'aide qu'il a apportée durant l'exécution des expériences.

Enfin, il m'est agréable d'exprimer ma gratitude à mes parents et mes amis qui, de près ou de loin, par l'encouragement et leurs conseils, ont efficacement contribué à la réalisation de cette étude.

TABLE DES MATIERES

| | PAGE |
|---|------|
| RESUME..... | i |
| REMERCIEMENTS..... | iv |
| TABLE DES MATIERES..... | v |
| LISTE DES TABLEAUX..... | viii |
| LISTE DES FIGURES..... | x |
| | |
| CHAPITRE I INTRODUCTION..... | 1 |
| 1.1 Influence des conditions météorologiques sur la tension de contournement des isolateurs en présence de glace..... | 7 |
| 1.2 Objectifs du présent travail..... | 12 |
| | |
| CHAPITRE II DESCRIPTION DES TECHNIQUES EXPERIMENTALES ET DES MESURES | 14 |
| 2.1 Montage expérimental..... | 14 |
| 2.2 Description du processus d'essai..... | 15 |
| 2.3 Paramètres d'essais..... | 20 |
| 2.3.1 Mesure de la teneur en eau et de la grosseur des gouttes d'eau..... | 20 |
| 2.3.2 Mesure de la densité de la glace..... | 23 |
| 2.4 Mesure de la température ambiante (T_a) de la chambre froide et celle de la glace (T_g)..... | 24 |
| | |
| CHAPITRE III TENSION MINIMALE DE CONTOURNEMENT EN REGIME DE FONTE..... | 34 |

| | | |
|---|--|----|
| 3.1 | Période d'accumulation et période de fonte..... | 36 |
| 3.2 | Méthodes de mesures de la tension minimale de contournement (V_{MF})..... | 36 |
| 3.3 | Résultats expérimentaux..... | 39 |
| 3.4 | Discussions..... | 45 |
| 3.5 | Influence du courant de court-circuit de la source sur la tension minimale de contournement (V_{MF}) | 46 |
| CHAPITRE IV TENSION MINIMALE DE CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS GIVRES ET POLLUES EN REGIME DE FONTE..... | | 50 |
| 4.1 | Préparation et mesure de la pollution artificielle..... | 51 |
| 4.2 | Tension V_{MF} en fonction de la longueur de la ligne d'arc de la chaîne d'isolateurs..... | 54 |
| 4.3 | Effet de la conductivité de l'eau et de la glace sur la tension V_{MF} | 59 |
| 4.4 | Tension minimale de contournement V_{MF} en fonction de la conductivité de l'eau..... | 63 |
| 4.5 | Effet de la conductivité de l'eau sur la variation de la température de la glace (T_g)..... | 65 |
| 4.6 | Tension minimale de contournement V_{MF} des isolateurs givrés en présence de la pollution.. | 70 |
| CHAPITRE V MECANISME DE CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS COUVERTS DE GLACE EN REGIMES DE FONTE ET D'ACCUMULATION..... | | 73 |
| 5.1 | Développement du courant de fuite et contournement électrique..... | 74 |

| | |
|--|----|
| 5.2 Effet du passage du courant de fuite sur le type de glace..... | 75 |
| 5.3 Influence de la contamination sur l'intensité du courant de fuite et la durée du régime transitoire..... | 79 |
| 5.4 Formation des traces d'érosion en régime de fonte..... | 88 |
| CONCLUSIONS..... | 91 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | 94 |

LISTE DES TABLEAUX

| | PAGE |
|--|------|
| TABLEAU I Dimension et type d'isolateur utilisé..... | 18 |
| TABLEAU II Tension minimale de contournement en régime de fonte par différentes méthodes.... | 41 |
| TABLEAU III Tension minimale de contournement en régime de fonte obtenue avec le régulateur de 2.5% d'impédance de court-circuit..... | 49 |
| TABLEAU IV Tension minimale de contournement en régime d'accumulation en l'absence de pollution..... | 55 |
| TABLEAU V Tension minimale de contournement en fonction du niveau de conductivité de l'eau... | 62 |
| TABLEAU VI Tension minimale de contournement pour différents niveaux de conductivité de l'eau.. | 66 |
| TABLEAU VII Tension minimale de contournement pour un niveau de pollution de 0.05 mg/cm^2 | 71 |

| | |
|--|----|
| TABLEAU VIII Valeurs du courant de fuite mesurées à différents niveaux de conductivité de l'eau..... | 80 |
|--|----|

LISTE DES FIGURES

| | PAGE |
|--|------|
| FIGURE 1.1 Modèle d'Obenaus..... | 5 |
| FIGURE 2.1 Montage expérimental utilisé pour simuler la formation de glace sur les isolateurs..... | 16 |
| FIGURE 2.2 Type d'isolateur utilisé..... | 17 |
| FIGURE 2.3 Bloc diagramme du circuit d'alimentation et du circuit de mesure..... | 21 |
| FIGURE 2.4 Variation de la température de l'air (T_a) en fonction du temps en régime de fonte... | 26 |
| FIGURE 2.5 a) Variation de T_a et de T_g en fonction du temps pour une ouverture de porte $\alpha=3^\circ$... | 27 |
| FIGURE 2.5 b) Variation de T_a et de T_g en fonction du temps pour une ouverture de porte $\alpha=12.2^\circ$. | 28 |
| FIGURE 2.5 c) Variation de T_a et de T_g en fonction du temps pour une ouverture de porte $\alpha=90^\circ$.. | 29 |
| FIGURE 2.6 a) Variation de T_g en fonction du temps pour une ouverture de porte $\alpha=3^\circ$ | 32 |
| FIGURE 2.6 b) Variation de T_g en fonction du temps pour une ouverture de porte $\alpha=12.2^\circ$ | 33 |
| FIGURE 3.1 Formation de la glace pendant la période d'accumulation..... | 37 |

| | | |
|------------|--|----|
| FIGURE 3.2 | Tension minimale de contournement en fonction du taux de variation de la température..... | 44 |
| FIGURE 4.1 | Tension minimale de contournement en fonction de la longueur de la ligne d'arc..... | 57 |
| FIGURE 4.2 | Tension minimale de contournement en fonction de chaque isolateur additionnel..... | 58 |
| FIGURE 4.3 | Aspect visuel de la glace déposée sur la chaîne d'isolateurs après 40 minutes d'accumulation sous une tension de 75 kV..... | 60 |
| FIGURE 4.4 | Formation des glaçons sur la surface d'isolateurs..... | 64 |
| FIGURE 4.5 | Relation entre la V_{MF} et la conductivité de l'eau utilisée..... | 67 |
| FIGURE 4.6 | Variation de la température de glace en fonction du temps..... | 69 |
| FIGURE 5.1 | Parcours du courant de fuite le long de la ligne d'arc entre les extrémités d'une chaîne d'isolateurs couverts de glace..... | 76 |
| FIGURE 5.2 | Effet du passage du courant de fuite sur les glaçons..... | 78 |
| FIGURE 5.3 | Activité de décharge enregistrée pendant la période d'accumulation de la glace en fonction de la conductivité de l'eau..... | 82 |

| | |
|--|----|
| FIGURE 5.4 Forme du courant de fuite pendant le passage de l'arc blanc à l'arc de contournement..... | 86 |
| FIGURE 5.5 Enregistrement du courant de fuite en condition de salinité..... | 89 |

CHAPITRE I

INTRODUCTION

La consommation d'énergie électrique augmente sans cesse toutes les années. Pour satisfaire la demande des consommateurs, il faut exploiter l'énergie hydro-électrique des régions de plus en plus éloignées. Dans ces conditions, les lignes de transport d'énergie doivent parfois traverser les régions montagneuses, des centres urbains et manufacturiers, ou passer proche des lacs ou au bord de la mer.

La transmission massive de l'énergie sur de grandes distances mérite une attention particulière. Elle trouve sa justification économique et technique lorsque de grandes quantités d'énergie sont disponibles à des coûts relativement bas dans des zones où leur utilisation locale ne peut être envisagée que dans un futur lointain. Il se pose alors le problème de la transmission de cette énergie à des centres industriels parfois très éloignés.

Par exemple, le réseau à 735 kV qui achemine l'énergie électrique vers Québec et Montréal produite par le com-

plexes hydro-électriques Manicouagan-Outardes et celui des chutes Churchill, parcourt une distance d'environ 1830 km. Ces lignes traversent sur les deux tiers de leur parcours une région froide, accidentée et parsemée de lacs. Le climat des régions traversées est rigoureux: la température minimale est parfois de -30°C près de Montréal et -50°C près des centrales hydro-électriques. Les vents peuvent atteindre des vitesses de 112 km/h.

Les isolateurs jouent un rôle primordial dans la sécurité du transport et de la distribution d'énergie. Dans ces conditions, les chaînes d'isolateurs suspendus sont exposées au givre et au verglas, ainsi que diverses formes de pollution.

Les chaînes d'isolateurs des réseaux électriques à haute tension sont exposées en général à trois phénomènes distincts qui peuvent causer des arcs de contournement:

- surtension par la foudre
- surtension de manœuvre
- contournement électrique des isolateurs engivrés et pollués.

Dans les pays nordiques, la neige, le givre et le verglas sont des facteurs non négligeables et plusieurs pannes d'électricité sont attribuables à des arcs de contournement sur des isolateurs couverts de glace et/ou de pollution.

Des particules en suspension dans l'air sous forme de sel de mer, de pollution industrielle et de pollution naturelle se déposent sur la surface des isolateurs. En présence d'humidité (brouillard, rosée, pluie, neige fondante, givre et verglas), une couche déposée devient conductrice.

Dans le cas des isolateurs humides et contaminés, à cause de la non-uniformité de la distribution du courant de fuite sur la surface des isolateurs, des zones sèches se forment et, dû à leurs grandes résistivités, elles supportent une partie importante de la tension appliquée. Lorsque le gradient de la tension est trop élevé, une décharge partielle se produit dans l'air. Dépendamment du degré de contamination et d'autres facteurs (niveau de tension, taux de pollution), un contournement électrique peut se produire.

Dans le cas des isolateurs engivrés, la présence de la haute tension et une augmentation de la température ambiante en haut de 0°C permet la formation d'un film d'eau sur la surface de la glace, ce qui donne naissance à des décharges électriques. L'amplitude et la fluctuation du courant de fuite dépendent des contraintes électriques et des conditions météorologiques (humidité, température, vent...). Si la tension est suffisamment élevée, des arcs partiels se produisent; cependant si d'autres conditions (longueur des glaçons, épaisseur de la glace...) s'ajoutent à cette dernière, les arcs partiels se développent jus-

qu'au contournement complet. Dans le cas contraire, les activités de décharges électriques arrêtent.

Des travaux considérables ont été entrepris en vue d'améliorer les propriétés diélectriques des isolateurs et de comprendre le mécanisme de contournement en présence de la glace et de la pollution.

En 1958, Obenous [2] a été le premier à proposer une théorie sur le mécanisme de contournement connu sous le nom de la "théorie d'extinction". Cette méthode a été complétée plus tard par Neumarker [3]. Le modèle utilisé, montré à la figure 1.1, présente un arc en série avec une résistance. La décharge est un contournement partiel sur la surface de l'isolateur et la résistance représente le reste de la surface non contournée par la décharge électrique qui peut varier en fonction du degré de contamination. Obenous a supposé que le contournement se produit si la décharge partielle saute par dessus la zone sèche pour atteindre la résistance.

La relation entre la tension et le courant est donnée par l'équation suivante:

$$V_{arc} = AI^{-n}X_{arc}$$

où X_{arc} = la longueur de la décharge

I = le courant de décharge

A, n = des constantes de décharge

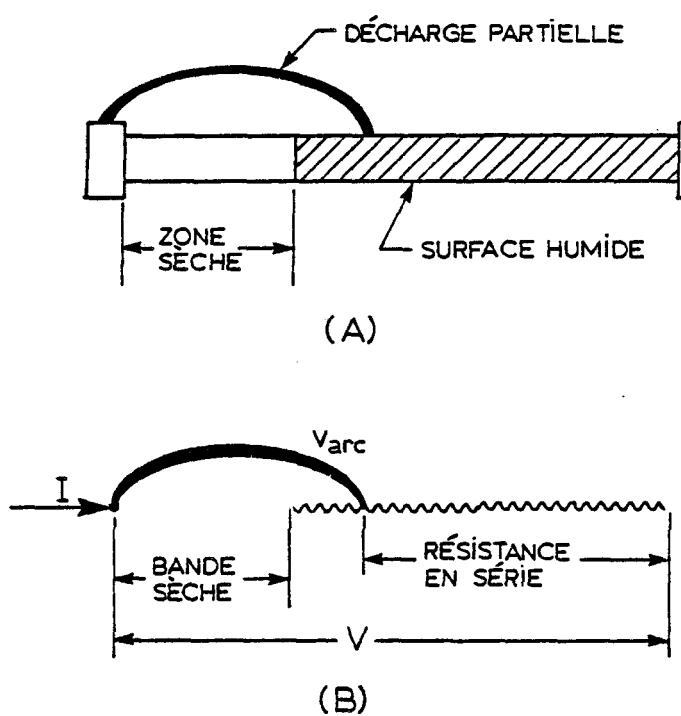


Figure 1.1 Modèle d'Obenau

Depuis ce temps, beaucoup d'autres théories ont été proposées. Toutefois, compte tenu que le contournement des isolateurs contaminés ou engivrés est très complexe, il n'y a pas unanimité sur le mécanisme de contournement.

Selon Hampton [4], le contournement des isolateurs pollués et humides est le résultat de la formation de bandes sèches. Quand l'humidité relative atteint des niveaux très élevés, il en résulte une augmentation considérable du courant de fuite. Après un certain temps, des décharges irrégulières commencent à apparaître. L'énergie dissipée par le courant de fuite dans les couches humides cause une évaporation qui permet le développement des "bandes sèches" sur chaque élément d'isolateur. Ainsi, la tension est concentrée aux bornes de ces bandes sèches; par la suite, l'activité des décharges augmente avec l'humidité relative en raison de l'équilibre thermique nécessaire entre l'humidification et le séchage sur la surface de l'isolateur. Si la tension est suffisamment élevée, le contournement se produit. Selon Hampton [4], l'arc devra s'éloigner si le gradient de la tension d'arc est plus élevé que celui de la tension de la couche contaminante. Sa théorie a été prouvée mathématiquement plus tard par Hesketh [5], qui a montré que ce critère n'est valable que pour certains types d'isolateurs.

En présence de la glace, selon Khalifa et Morris [6], une façon d'interpréter le contournement des isolateurs est de

se baser sur l'effet cumulatif de la chaleur dégagée par le courant de fuite. En raison de la non-uniformité de la résistance du parcours de ce dernier dans la glace, la température s'élève à plusieurs endroits où la densité de courant est élevée. Dû à l'élévation de la température dans ces zones, la conductivité de la glace augmente localement et ainsi, une autre augmentation de courant finira par le contournement.

Enfin, Watanabe [7] a remarqué que le contournement se produit sur les isolateurs couverts de glace quand la longueur de l'arc dépasse un certain niveau, dépendamment de la conductivité de l'eau utilisée pour former la glace.

1.1 Influence des conditions météorologiques sur la tension de contournement des isolateurs en présence de glace

Il existe un grand nombre de travaux de recherches [2,8,9], publiés dans des revues scientifiques, donnant les résultats des essais faits en variant des paramètres qui affectent le développement du contournement électrique et le niveau de la tension minimale de contournement (V_{MF}).

Les conditions météorologiques par la combinaison des paramètres suivants: température ambiante, teneur en eau, vitesse du vent..., sont un des facteurs importants qui influencent le taux d'accumulation, le type de la glace qui se forme sur les jupes des isolateurs, ainsi que le niveau de V_{MF} .

Hara et Phan [8] ont montré que la tension minimale de contournement des isolateurs est plus faible avec du givre lourd formé à -12°C et ayant une densité de 0.87 g/cm^3 . Ces résultats ont été vérifiés par Phan et Matsuo [9]. De plus, selon ces auteurs, la tension minimale de contournement (V_{MF}) en l'absence de pollution, diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la glace jusqu'à deux centimètres. Pour des épaisseurs plus grandes que cette valeur, V_{MF} reste sensiblement constante.

Fujimura et Naito [10] mentionnent que la tension de tenue des isolateurs couverts de glace peut baisser jusqu'à 60% de la tension de service lorsque, les glaçons sont suffisamment longs pour permettre de relier ensemble les jupes d'isolateurs. C'est pourquoi ils concluent que la tension de tenue dépend de la longueur des glaçons formés sur les isolateurs.

Khalifa et Morris [6] rapportent que la répartition de la tension le long d'une chaîne d'isolateurs devient de moins en moins uniforme, due à la présence de la glace. Cette non-uniformité s'accentue au fur et à mesure que l'épaisseur de la glace augmente.

Cherney [11] a procédé à des essais avec de la pluie verglaçante à la tension de service. Il a noté qu'aucun contournement n'a été observé à la tension de service avec des

isolateurs non contaminés et a conclu que l'effet de la pluie verglaçante peut être ignoré dans la conception des lignes de haute tension.

Selon Holte et Chairman [12], le champ électrique a un effet significatif sur l'accumulation des particules de pollution sur les isolateurs des lignes de transport électriques. Cet effet est plus important pour une tension continue.

Plusieurs études effectuées par différents chercheurs [9,13,22] ont montré que V_{MF} dépend non seulement de la sévérité du taux de contamination, mais aussi du type de contaminant et de la méthode utilisée pour contaminer les isolateurs artificiellement (la composition, l'application de la solution, etc.).

Des travaux ont été exécutés en vue de comprendre le comportement des isolateurs en présence de la glace et de la contamination.

Fujimura et Naito [10] indiquent que, lorsque la conductivité de l'eau utilisée pour former la glace est de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la tension de tenue des isolateurs est environ 25% plus basse que celle des isolateurs propres, et approximativement égale à celle d'une chaîne d'isolateurs de $0.06 \text{ mg}/\text{cm}^2$ de niveau de contamination.

Selon Watanabe [7], les effets de la neige et de la glace sont plus sévères que ceux de la contamination. Mais Khalifa et Morris [6] rapportent que la tension de contournement d'une chaîne d'isolateurs couverts de glace formée à partir de l'eau distillée et l'eau de robinet est sensiblement la même.

Dans le but de mieux connaître la performance de différents types d'isolateurs en présence de la pollution et du givre, de nombreux travaux ont été réalisés.

Hara et Phan [8] ont noté que, pour chaque type d'isolateur, il existe un seuil de courant de fuite pendant les secondes qui précèdent le claquage. Ainsi, l'énergie dissipée à travers les glaçons pour faire fondre la glace durant l'arc blanc* est plus importante dans le cas des isolateurs en porcelaine que celle associée à des isolateurs composites.

D'une part, Schneider [13] mentionne que la tension de contournement des isolateurs engivrés est linéairement proportionnelle à la longueur de la chaîne d'isolateurs. D'autre part, Phan et Matsuo [9] rapportent que la tension V_{MF} d'une courte

* l'arc blanc: quand un arc produit un contournement partiel de la chaîne d'isolateurs à ces deux extrémités

chaîne d'isolateurs est linéairement proportionnelle à la distance de fuite. Par contre, selon ces auteurs, la tension V_{MF} par unité diminue de 35 kV/unité à 19 kV/unité quand le nombre d'isolateurs augmente de un à quatre.

Les isolateurs des lignes de transport d'énergie électrique sont divisés en deux groupes:

- a) l'isolateur classique ou traditionnel capot-tige en verre trempé ou en porcelaine...
- b) l'isolateur composite de matière synthétique.

L'isolateur classique est constitué d'un matériau isolant, avec les extrémités métalliques supportant les efforts mécaniques. Par contre, un isolateur composite est constitué d'au moins deux matériaux isolants, un noyau en fibre de verre et un revêtement en matière synthétique fournissant la ligne de fuite et protégeant le noyau.

Le poids et l'épaisseur de glace accumulée sur la chaîne d'isolateurs dépendent de la géométrie de l'isolateur. Sur celui de type classique, en porcelaine ou en verre trempé avec de grandes surfaces de jupes, il y a plus de glace accumulée que sur les isolateurs synthétiques. Pour ces derniers, par contre, en raison de la faible distance interjupe, les jupes sont reliées plus rapidement ensemble, ce qui produit des pics d'amplitude de courant plus élevés, susceptibles de se transfor-

mer en arcs de contournement à une accumulation de la glace plus faible qu'avec les isolateurs classiques.

Selon Phan et Matsuo [9], en présence d'une pollution très légère (0.01 et 0.02 mg/cm^2) et du givre lourd, la tension V_{MF} des isolateurs en verre trempé N-16 est environ 25% au-dessus de la tension de service. Par ailleurs, la tension de tenue diélectrique des isolateurs composites en présence du givre lourd et d'une pollution modérée (0.05 mg/cm^2) est supérieure à la tension nominale de service.

Il existe d'autres facteurs qui peuvent influencer la tension V_{MF} des isolateurs engivrés: la vitesse et la direction du vent, la variation de la température, ainsi que la conductivité de l'eau, etc... Cependant, ces paramètres ont été très peu étudiés et développés.

1.2 Objectifs du présent travail

Le Canada et surtout la province de Québec sont des régions qui subissent occasionnellement des variations de température relativement importantes (1.3°C/h). Le réchauffement est dû au déplacement d'une masse d'air chaud ou à la radiation solaire. Les effets combinés d'un réchauffement rapide de la température, de la présence de la glace et de la haute tension provoquent la formation d'un film d'eau sur la surface de la

glace et donnent naissance à des décharges électriques partielles qui peuvent se développer en contournement électrique.

Dans le présent travail, nous nous proposons d'effectuer une étude expérimentale comprenant deux parties distinctes ayant les objectifs suivants:

Pour la première:

1. Simuler au laboratoire les changements de température sur les isolateurs couverts de glace et déterminer le taux moyen de la variation de la température sur la surface de la glace et la température à l'intérieur de la chambre froide.
2. De mettre au point une méthode pour appliquer la haute tension en régime de fonte et déterminer la tension minimale de contournement (V_{MF}).

Pour la deuxième partie, il s'agit de:

1. Déterminer la tension minimale de contournement des isolateurs couverts de glace formée à partir de gouttelettes d'eau présentant différents niveaux de conductivité.
2. Etudier l'effet de la contamination et de la température sur la tension minimale de contournement en régime de fonte.

CHAPITRE II

DESCRIPTION DES TECHNIQUES EXPERIMENTALES ET DES MESURES

2.1 Montage expérimental

Les expériences sont réalisées dans une chambre froide de dimension $4.8 \times 2.8 \times 3.5$ m, où on peut atteindre une température de $-35^{\circ} \pm 1^{\circ}$ C. Les gouttelettes d'eau sont produites, pour former la glace sur la surface des isolateurs, par cinq gicleurs pneumatiques installés sur un support vertical placé à une distance de 1.7 m de l'axe vertical des isolateurs. La grosseur des gouttelettes d'eau (taille 85 μ m) peut être contrôlée en ajustant les pressions d'eau et d'air qui alimentent les gicleurs.

Quatre ventilateurs sont montés sur une boîte rectangulaire de dimension 28x59x11 cm permettant ainsi de produire un vent transportant les gouttes d'eau sur la surface de la chaîne d'isolateurs. Afin de produire un profil de vitesse relativement uniforme sur toute la longueur de la chaîne d'isolateurs, des tubes de 4 cm de diamètre et 20 cm de longueur sont placés devant l'écoulement d'air dirigé vers les isolateurs à

l'intérieur de la boîte (voir figure 2.1). Les isolateurs sont suspendus à un support placé au centre de la chambre froide, dans le même plan vertical que celui des gicleurs.

La haute tension appliquée sur la chaîne d'isolateurs est fournie par un transformateur de 120 kV, 125 kVA, ayant un courant de court-circuit de 14 A. Le primaire de ce dernier est connecté à un régulateur de 150 kVA ayant un courant de court-circuit d'environ 4 A; l'impédance de court-circuit est environ de 7.5% (voir figure 2.3).

Plus tard, ce régulateur a été remplacé par un nouveau régulateur plus puissant, de sorte que la source (transformateur plus régulateur) puisse fournir un courant de court-circuit de 11 A; l'impédance de court-circuit du nouveau régulateur est environ de 2.5%.

2.2 Description du processus d'essai

Au début de chaque expérience, les isolateurs sont lavés avec un détergent (sodium phosphate tribasique) et rincés à l'eau de robinet, puis suspendus à l'air ambiant pendant 2 à 3 heures pour le séchage. Ensuite, ils sont placés dans la chambre froide pendant au moins 2 heures pour être en équilibre thermique avec la température ambiante des essais.

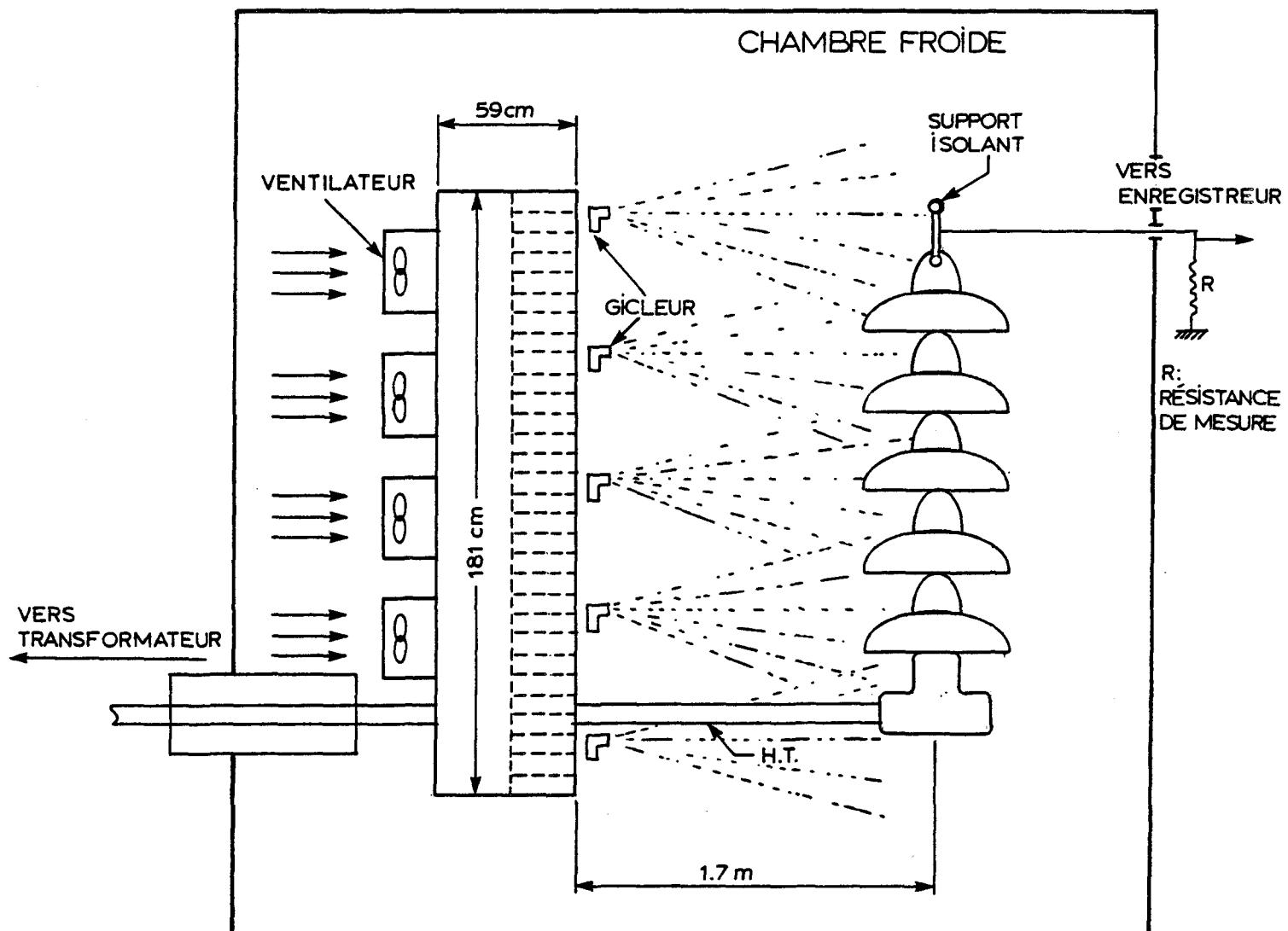


Figure 2.1 Montage expérimental utilisé pour simuler la formation de glace sur les isolateurs

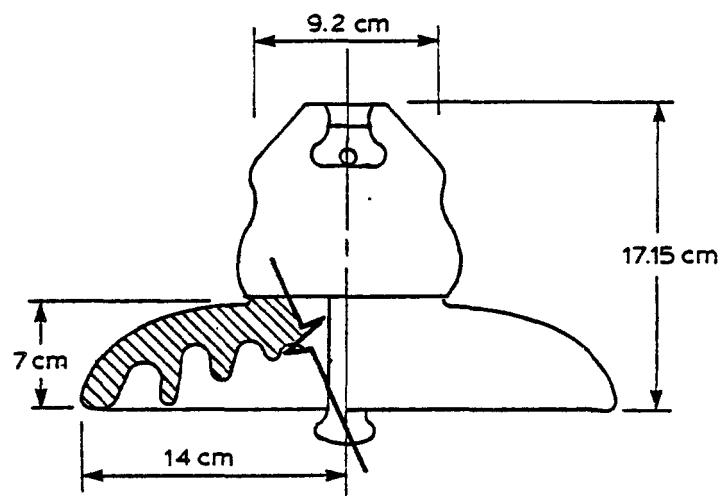


Figure 2.2 Type d'isolateur utilisé

TABLEAU I: Dimension et type d'isolateur utilisé

| Isolateur | Type | Diamètre de l'isolateur (cm) | Diamètre du capot (cm) | Distance de fuite | Pas (cm) |
|-----------|-------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------|----------|
| N-16 | Capot tige verre trempé | 28 | 9.2 | 38 | 17.15 |

La contamination des isolateurs est effectuée selon la "méthode de trempage". Il s'agit de tremper l'objet en essai dans une solution composée d'un mélange de Kaolin K-6 et de sel (NaCl) dissous dans l'eau distillée. Une fois cette étape terminée, les isolateurs sont suspendus à l'air ambiant pour le séchage.

Dans le cas de la contamination directe où l'on augmente la conductivité de l'eau, une quantité déterminée de sel est dissoute dans un litre d'eau, puis versée dans un réservoir contenant 160 litres d'eau et ensuite brassée.

Pendant la période d'accumulation, une tension a.c. constante de 15 kV/unité (isolateurs en verre trempé) correspondant à la tension de service d'environ 87 kV/m du réseau 735 kV d'Hydro-Québec est appliquée à la chaîne d'isolateurs.

Le courant de fuite est mesuré à travers une résistance de 100Ω placée dans le circuit de la masse. La tension aux bornes de cette résistance, qui est proportionnelle à la valeur du courant de fuite, est mesurée à l'aide d'un voltmètre Hewlett Packard 4100. Ce courant comprend le courant à 60 cycles et celui des décharges impulsives à haute fréquence. La sortie du voltmètre donne une tension maximale de 1.5 volt d.c. proportionnelle à la valeur d'entrée et reliée à un enregistreur.

Pour mieux visualiser le passage du régime transitoire entre l'arc blanc et celui de contournement, on enregistre simultanément sur une bande magnétique le courant de fuite à 60 cycles ainsi que la tension appliquée sur la chaîne d'isolateurs. Le schéma de circuit d'alimentation et de mesure est illustré à la figure 2.3. Pour protéger ces derniers, un relai est placé dans le circuit primaire du régulateur de façon à couper l'alimentation du transformateur, trois cycles après qu'une impulsion de courant de fuite dépasse 1.2 A.

2.3 Paramètres d'essais

Le taux d'accumulation et le type de glace formée sur la surface des isolateurs dépendent des conditions météorologiques. La nature de la neige ou de la glace est déterminée par la résistivité volumique et la teneur en sel d'une part, et la teneur en eau, la température de l'air, le diamètre des gouttes d'eau et la vitesse du vent d'autre part.

2.3.1 Mesure de la teneur en eau et de la grosseur des gouttes d'eau

La teneur en eau est mesurée par la méthode proposée par Rush et Wardlaw [14]. Cette méthode consiste à faire accumuler la glace sur un cylindre lisse de 3.15 mm de diamètre et de 12 mm de longueur gardé en rotation pendant 30 secondes, ensuite on le pèse. En connaissant le diamètre initial du cylindre, sa longueur, la densité de la glace, la durée de l'exposition et le coefficient de captation, on détermine la teneur en eau (w)

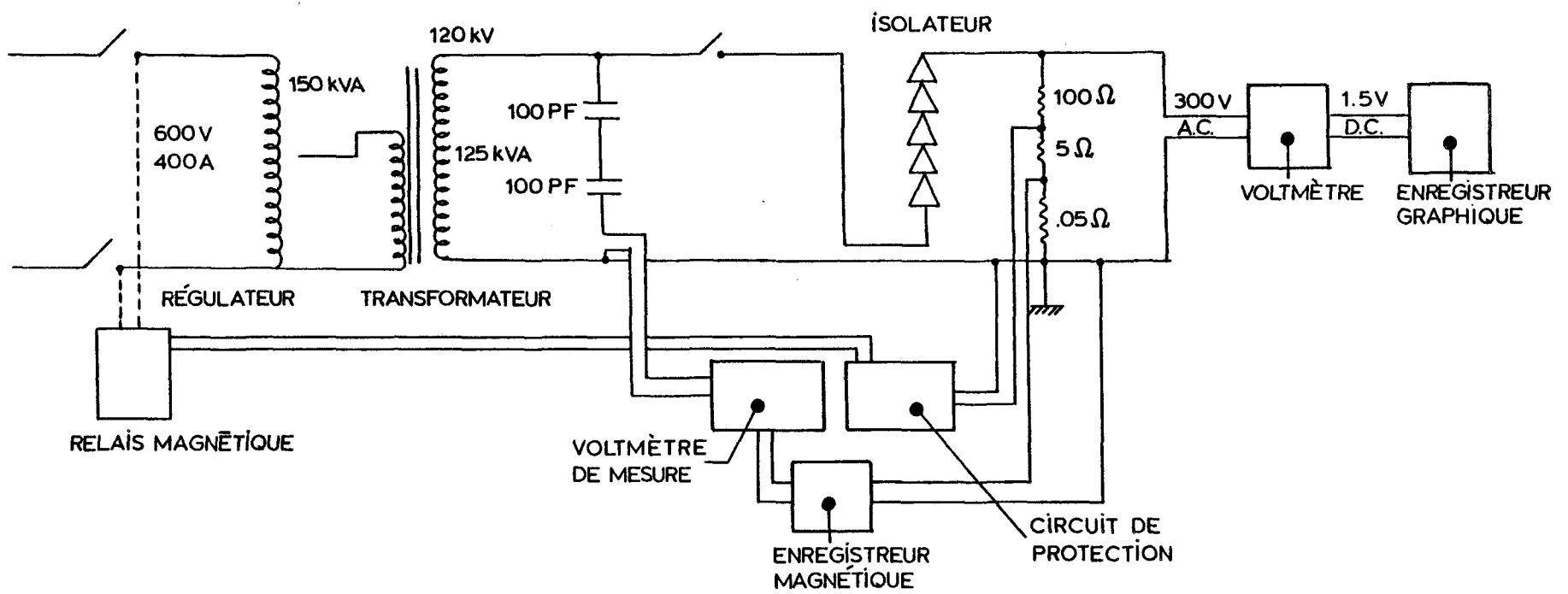


Figure 2.3 Bloc diagramme du circuit d'alimentation et du circuit de mesure

par l'expression suivante:

$$w = \frac{1000\pi}{V_i \eta t} \left[\sqrt{\frac{V_i \cdot m \cdot 100}{\pi l}} + r_i^2 - r_i \right]$$

où

w : teneur en eau en (g/cm^3)

t : temps d'exposition (s)

r_i : rayon initial du cylindre (mm)

l : longueur du cylindre (cm)

V_i : volume massique de la glace (cm^3/g)

m : masse de la glace accumulée (g)

η : coefficient de captation du cylindre

V : vitesse du vent (m/s)

La taille et le diamètre des gouttes d'eau sont déterminés à partir des traces qu'ils laissent sur une lamelle de microscope enduite d'argent colloidal appelé collargol. L'examen des lamelles permet de déterminer une valeur moyenne de diamètres rapportés au nombre de gouttelettes, ainsi qu'une valeur moyenne de diamètres rapportés au volume d'eau que contiennent les gouttelettes. A partir des abaques, on trouve une valeur moyenne de diamètre des gouttes d'eau.

2.3.2 Mesure de la densité de la glace

La densité de la glace est déterminée par le poids et le volume d'un échantillon de la glace. Son volume est obtenu en l'immergeant dans une huile minérale légère. Pour empêcher la pénétration de l'huile à l'intérieur de la glace, l'échantillon est couvert par une couche mince de Formvar. En connaissant le volume et le poids de la glace, on détermine sa densité. Toutes les mesures sont effectuées à l'intérieur de la chambre froide.

Selon Phan et Matsuo [9], un mélange de givre lourd et de verglas formé à une température de -12°C est la glace la plus sévère dû au fait que la valeur de la tension de contournement mesurée dans ce cas est plus basse que celle des isolateurs couverts de verglas et de givre léger.

Pour produire ce type de glace dans notre laboratoire, les conditions atmosphériques suivantes sont utilisées:

Vitesse du vent : 5.5 m/s

Teneur en eau : 2.2 g/m³

Diamètre moyen des gouttelettes d'eau : 85 µm

Densité de la glace : 0.87 g/cm³

Conductivité de l'eau utilisée : 57, 100, 150, 200,
300 µS/cm

Pression d'eau : 23 psi

Pression d'air : 15 psi

Température : $-12^\circ \pm 1^\circ\text{C}$

L'augmentation de l'épaisseur de la glace sur la surface des isolateurs est mesurée à des intervalles réguliers sur un conducteur témoin de 3.8 cm de diamètre tournant à une vitesse constante de un tour par minute.

2.4 Mesure de la température ambiante (T_a) de la chambre froide et celle de la glace (T_g)

Tel que déjà mentionné, la variation de la température dans la nature est simulée au laboratoire à l'aide d'une chambre froide, en utilisant différentes ouvertures de la porte. La procédure d'expérimentation se fait de la façon suivante: la glace est accumulée sur la surface de l'isolateur pendant un temps déterminé, c'est la période d'accumulation. Ensuite, la température à l'intérieur de la chambre froide est augmentée pour atteindre près de zéro degré, c'est la période de fonte. Le taux d'augmentation de la température varie avec l'angle d'ouverture de la porte de la chambre froide. Trois ouvertures sont utilisées à cette fin.

La température (T_a) est mesurée par l'intermédiaire d'un thermocouple cuivre-constantan installé à l'intérieur de la chambre froide et relié à un enregistreur. La figure 2.4 présente la variation de T_a en fonction du temps. Les taux moyens d'augmentation de T_a durant la période de fonte sont de 6.5, 14.4, 72°C/h correspondant à des ouvertures de 3°, 12.2° et de 90° respectivement.

La température de la glace (T_g) est mesurée dans deux cas différents, soit immédiatement après la période d'accumulation, soit deux heures après cette période. Ces mesures sont prises par une thermistance en l'absence de haute tension et par un thermomètre (précision 0.1°C) en présence de haute tension.

Comme on peut voir sur la figure 2.5 (a,b,c), la température T_g mesurée deux heures après la période d'accumulation atteint pratiquement la température T_a de la chambre froide pour les trois ouvertures. Avec une ouverture de 3°, on constate sur la figure 2.5a que la tendance de la variation de T_a et T_g est similaire jusqu'à une température de -2°C, tandis qu'elles sont différentes à de grandes ouvertures (figure 2.5b,c). De plus, pour une ouverture de 3° il existe un régime transitoire de courte durée avant que l'équilibre thermique entre T_a et T_g soit établi. Ce régime transitoire disparaît au fur et à mesure que

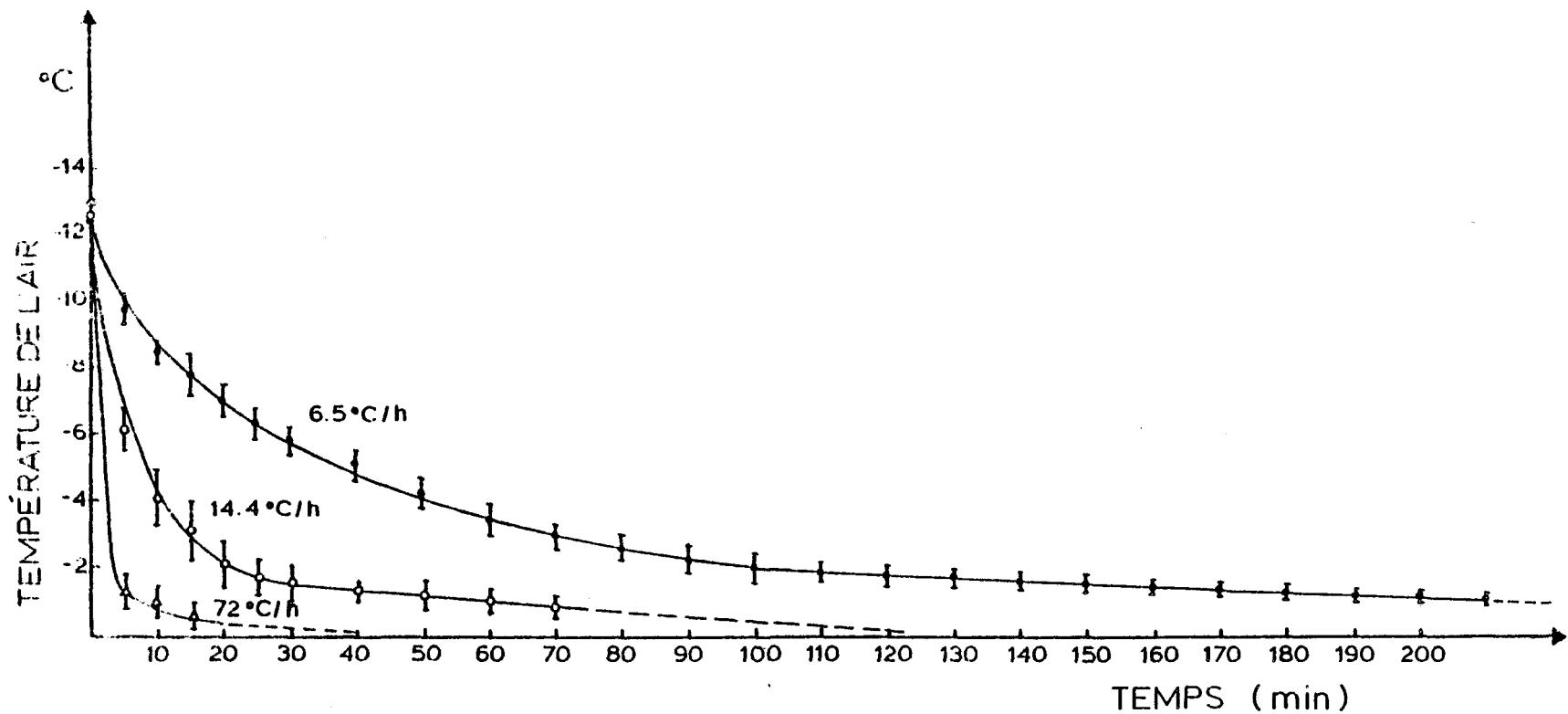


Figure 2.4 Variation de la température de l'air (T_a) en fonction du temps en régime de fonte

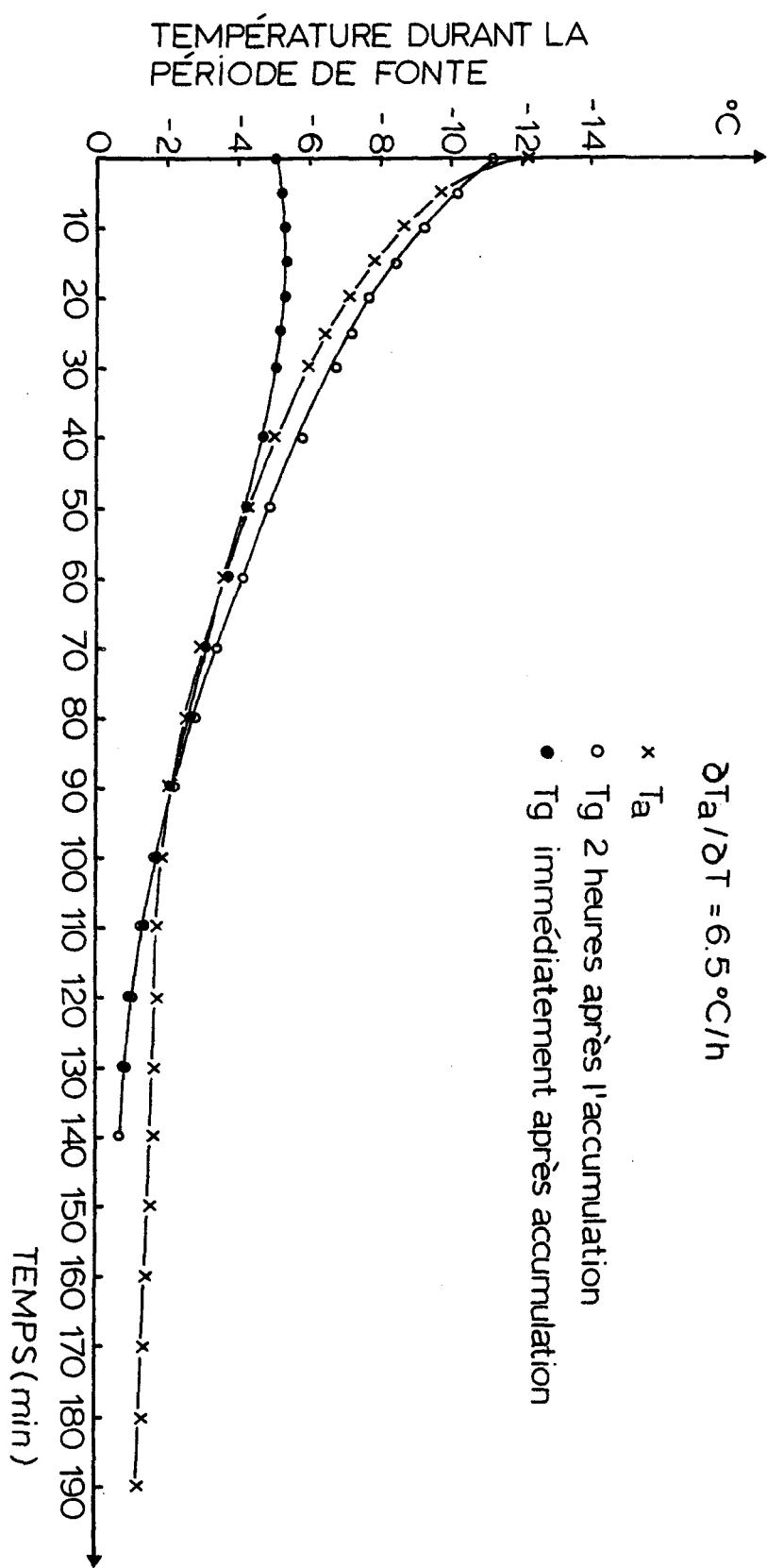


Figure 2.5 a) Variation de T_a et de T_g en fonction du temps pour une ouverture de porte $\alpha = 30^\circ$

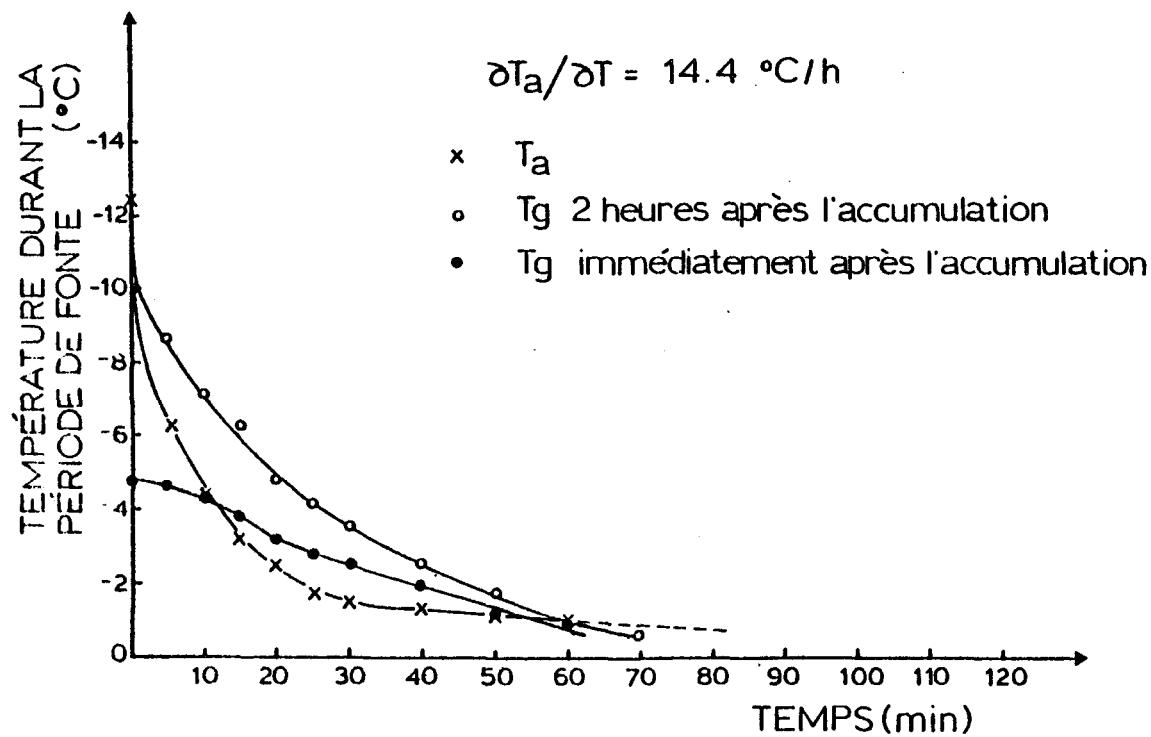


Figure 2.5 b) Variation de T_a et de T_g en fonction du temps pour une ouverture de porte $\leq 12.2^\circ$

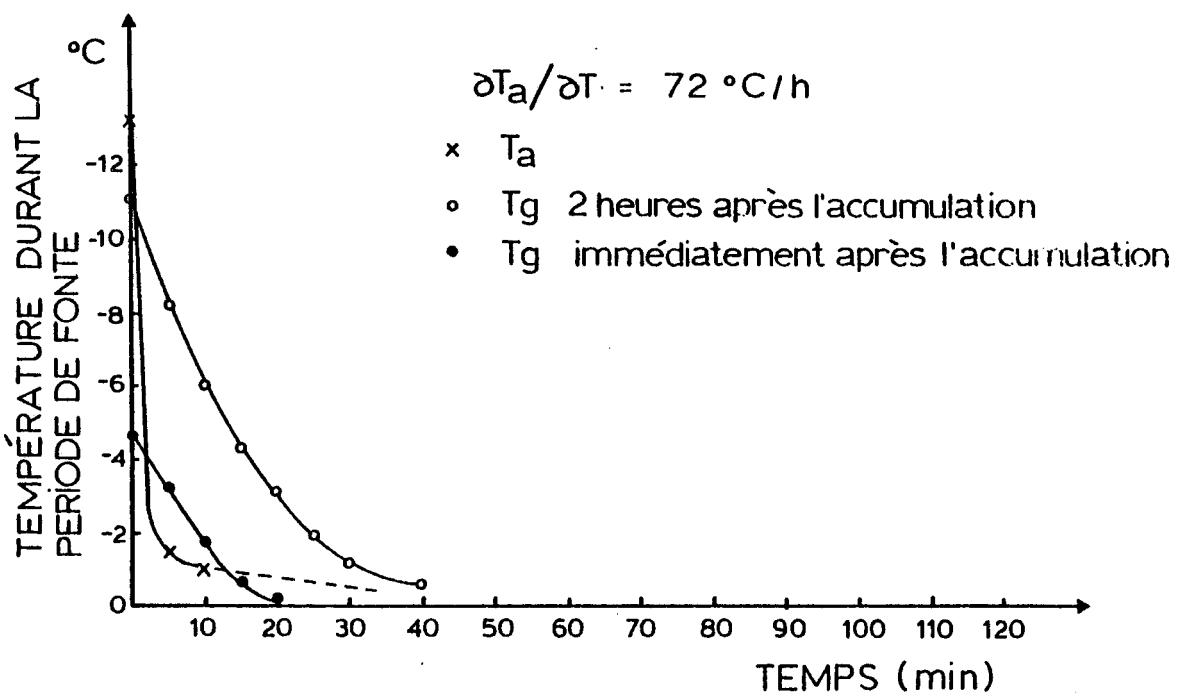


Figure 2.5 c) Variation de T_a et de T_g en fonction du temps pour une ouverture de porte $\alpha = 90^\circ$

l'ouverture augmente dû au fait que le taux d'augmentation de T_g est plus lent que celui de T_a .

La température de la glace mesurée à la fin de la période d'accumulation, ou dès le début de la période de fonte est environ de -4.5°C . Cette valeur est presque la même en l'absence ou en présence de la haute tension (voir figure 2.6 a, b).

Le fait que T_g mesurée en présence de la haute tension soit légèrement plus élevée que T_g mesurée en l'absence de haute tension peut s'expliquer, à mon avis, par la chaleur dégagée par les décharges partielles dès le début de l'ouverture de la porte de la chambre froide. Par la suite, ces décharges partielles disparaissent lors de la solidification du film d'eau formé sur la surface de la glace après l'arrêt des gicleurs.

Il est bon de mentionner que les mesures expérimentales de la température T_a et T_g présentées sur chacune des courbes sont des valeurs moyennes des résultats de 7 à 8 essais. Ces mesures obtenues à l'intérieur de notre chambre froide sont relatives et ne représentent peut-être pas exactement la variation de la température dans la nature.

Au Canada, particulièrement dans la province de Québec, le taux moyen d'augmentation de la température varie entre $1^{\circ}\text{C}/\text{h}$

à 35°C/h [8]. Toutefois, le taux de 72°C/h qui correspond à une ouverture de la porte de la chambre froide de 90°, n'est pas réaliste. Ce taux a été utilisé en vue de faire une comparaison avec d'autres ouvertures de la porte de la chambre froide.

L'objectif visé dans ces mesures est de déterminer le temps requis pour la formation d'un film d'eau sur la surface de la glace et l'importance qu'il a sur l'apparition de la décharge électrique et sur la valeur de la tension minimale de contournement (V_{MF}) qu'on verra dans le chapitre suivant.

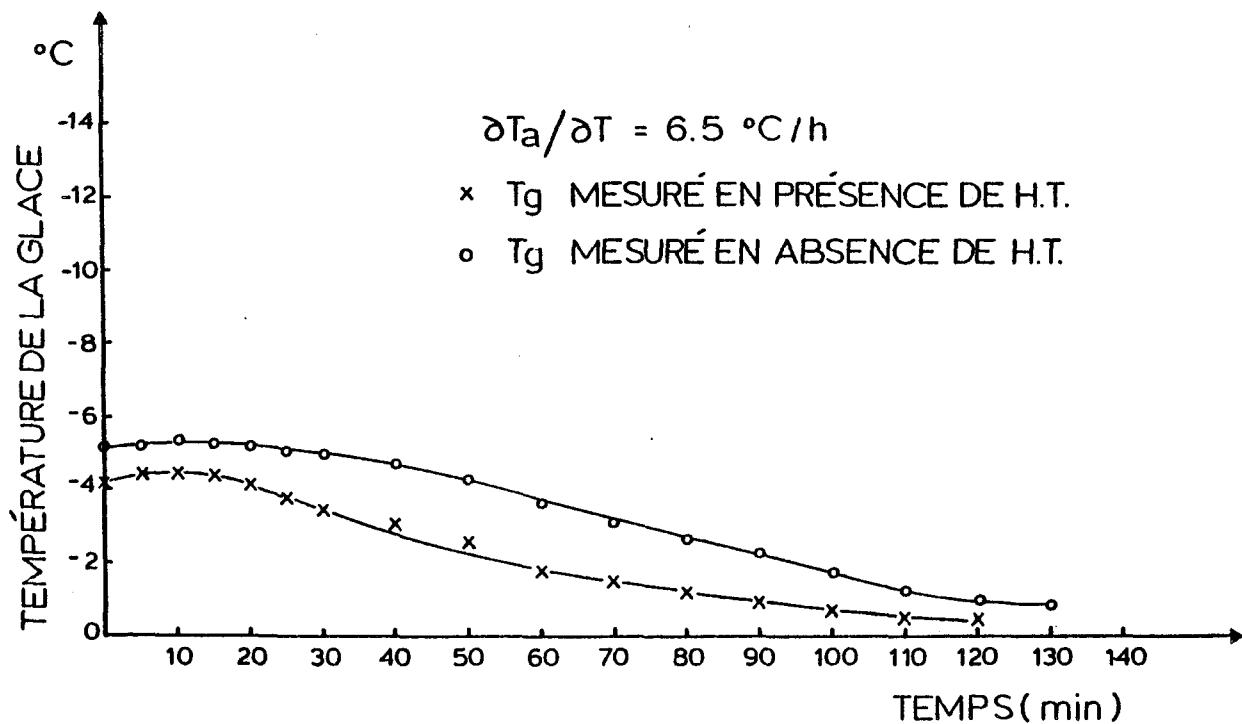


Figure 2.6 a) Variation de T_g en fonction du temps pour une ouverture de porte $\alpha = 3^\circ$

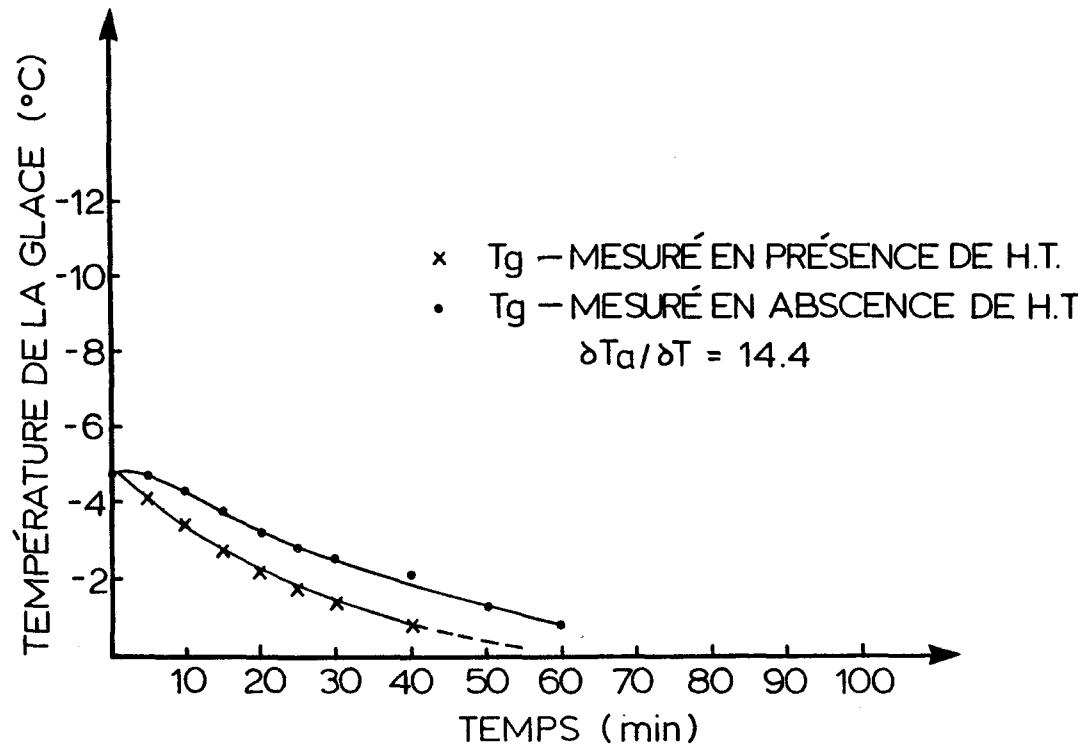


Figure 2.6 b) Variation de T_g en fonction du temps pour une ouverture de porte $\alpha = 12.2^\circ$

CHAPITRE III

TENSION MINIMALE DE CONTOURNEMENT EN REGIME DE FONTE

Une grande partie de ce chapitre est consacrée à mettre au point une méthode valable pour déterminer la valeur de la tension minimale de contournement (V_{MF}) des isolateurs en-givrés en régime de fonte.

A ma connaissance, il n'y a pas de méthode standard établie pour mesurer V_{MF} , ni en régime de fonte ni en régime d'accumulation, pour les isolateurs couverts de glace. Le processus d'application de la haute tension pour déterminer V_{MF} en laboratoire varie d'un auteur à l'autre, ce qui provoque des contradictions et des écarts considérables sur les résultats obtenus.

Khalifa et Morris [6] ont maintenu durant leurs tests la tension constante pour éliminer tout effet d'augmentation de la tension le long de la chaîne d'isolateurs.

Fujimura et Naito [10] ont déterminé V_{MF} par deux méthodes différentes: la méthode de la tension constante et la méthode d'augmentation de la tension. Ainsi, ils ont montré que la tension de tenue mesurée pour des isolateurs couverts de neige par la première méthode est de 20 à 30% inférieure à celle obtenue par la deuxième méthode, et cela dans les mêmes conditions d'expérimentation.

Phan et Matsuo [19] ont établi une méthode pour mesurer V_{MF} des isolateurs couverts de glace. Elle consiste à appliquer la même tension que celle pendant la période de formation de la glace, soit la tension de service V_o , à laquelle on ajoute en plus 5 KV (ΔV), une fois que la période d'accumulation est terminée. Si le contournement n'a pas lieu pendant les cinq premières minutes, la tension sera augmentée de 5 KV, c'est-à-dire $V_o + 2 \Delta V$ pour un deuxième intervalle de cinq minutes. Ce processus est continué jusqu'à la formation d'un arc de contournement et on note le premier niveau de tension où l'arc blanc se produit.

Pour déterminer le niveau estimé de V_{MF} , dans l'expérience suivante, après l'arrêt de l'accumulation de la glace la tension est montée rapidement à $V_o + (n-1)\Delta V$, $V_o + (n\Delta V)$ ou $V_o + (n+1)\Delta V$ et ainsi V_{MF} est située entre ces trois valeurs.

Dans le présent travail, les expériences sont effec-

tuées en deux étapes: période d'accumulation de la glace sur la surface de l'isolateur et période de fonte.

3.1 Période d'accumulation et période de fonte

a) Période d'accumulation:

Il s'agit de faire accumuler de la glace grâce au montage décrit dans le chapitre précédent. L'épaisseur de la glace est mesurée à des intervalles réguliers sur le conducteur témoin. Une tension de 15 kV/unité (V_0) correspondant à 87 kV/m est appliquée à la chaîne d'isolateurs pendant cette période. La figure 3.1 montre l'aspect visuel de la formation de la glace.

b) Période de fonte:

Elle consiste à faire augmenter la température ambiante à l'intérieur de la chambre froide en ouvrant la porte de celle-ci, une fois que la période d'accumulation est terminée.

3.2 Méthodes de mesures de la tension minimale de contournement (V_{MF})

Quatre méthodes sont utilisées pour mesurer la valeur de la tension V_{MF} . Elles sont classifiées de la façon suivante:

Méthode A: après la période d'accumulation, on coupe la tension pendant deux heures en gardant la température T_a , à

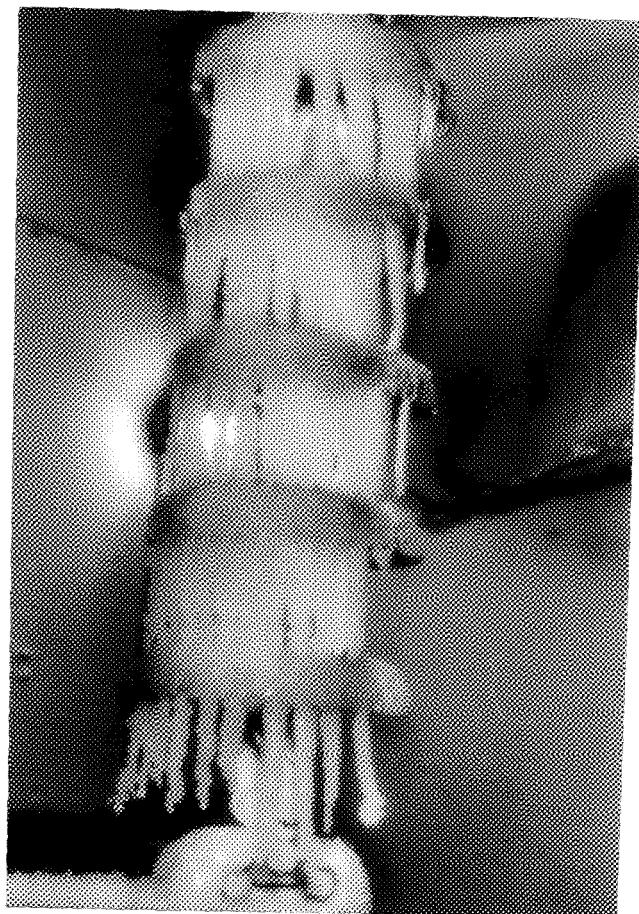


Figure 3.1: Formation de la glace pendant la période d'accumulation

4 isolateurs N-16 sous tension

$V_0 = 60 \text{ kV}$

épaisseur de la glace $\epsilon = 2 \text{ cm}$

l'intérieur de la chambre froide, constante (-12°C). Ensuite on ouvre la porte de la chambre froide tout en augmentant la haute tension jusqu'à une valeur fixe (supérieure à la tension V_o). S'il n'y a pas de contournement pendant les dix premières minutes, dans la prochaine expérience on applique une tension égale à celle utilisée précédemment en ajoutant 5 kV. On continue le processus jusqu'à l'obtention du contournement. La tension mesurée est considérée comme la tension V_{MF} . L'augmentation de la tension par des niveaux de 5 kV est appelée "méthode de palière".

Méthode B: immédiatement après la période d'accumulation, on ouvre la porte de la chambre froide et on augmente la tension de la même manière que dans la méthode A (la méthode de palière) pour déterminer la valeur de V_{MF} .

Méthode C: elle est similaire à la méthode A, à l'exception du fait que la tension V_o est appliquée durant deux heures.

Méthode D: après la période d'accumulation, on ouvre la porte de la chambre froide en gardant la tension V_o constante jusqu'à ce que la température ambiante (T_a) atteigne -1.5°C, puis on monte la tension de la même manière que dans la méthode A. Sur la figure 2.4a on peut voir qu'à cette valeur, la température de la glace se situe entre -0.5 et 0°C.

L'influence du taux d'augmentation de la température et l'épaisseur de la glace en tant que paramètres d'essais en régime de fonte de la glace a été étudiée par Hara et Phan [8]. Selon ces auteurs, l'épaisseur de la glace à laquelle le contournement se produit est linéairement, mais inversement proportionnelle au logarithme du taux d'augmentation de la température. Ils indiquent aussi, pour des taux élevés d'augmentation de la température en régime de fonte, que le contournement arrive à l'épaisseur de glace plus basse que celle en période d'accumulation. En raison de ces résultats et pour établir une comparaison entre ces méthodes, on a décidé de garder l'épaisseur de la glace constante et égale à 2 cm.

3.3 Résultats expérimentaux

En vue de déterminer la tension V_{MF} en régime de fonte et de faire un choix approprié entre les différentes méthodes, une série de tests a été réalisée pour chaque méthode. Dans le tableau III,

V_E : tension d'essai appliquée en régime de fonte

t_D : temps écoulé pendant la période de fonte avant l'apparition des premières décharges électriques

α : degré d'ouverture de la porte de la chambre froide

V_{MF} : tension minimale de contournement.

Les résultats des essais mentionnés au tableau II sont illustrés graphiquement à la figure 3.2. Comme on peut le constater, la tension la plus basse est obtenue par la méthode D, soit pour la plus petite ouverture de la porte de la chambre froide ($\alpha = 3^\circ$). Par contre, la tension minimale la plus élevée est obtenue par la méthode A. Ces résultats pourraient être explicables par la solidification du film d'eau sur la surface de la glace pendant l'interruption de deux heures. Pendant cette interruption de la tension, la glace atteint la température T_a , c'est-à-dire -12°C . Le tableau II indique également que le temps d'apparition des premières décharges (t_D) diminue quand la tension augmente. En fait, quand le niveau de la tension est élevé, une certaine énergie libérée sous forme de chaleur permet de faire fondre la glace et les glaçons qui se trouvent proches de "l'électrode" de la haute tension.

Dans le cas de la méthode B, quand on augmente la tension dès l'ouverture de la porte de la chambre froide, les températures T_a et T_g n'ont pas suffisamment le temps de varier. Ainsi, la température de la glace reste inférieure à zéro degré.

La valeur de la tension V_{MF} obtenue par la méthode C est aussi élevée, parce que la tension V_o , appliquée pendant l'interruption de deux heures, n'est peut-être pas assez élevée

TABLEAU III: Tension minimale de contournement en régime de fonte par différentes méthodes

| Méthode | V_E kV | t_D (min) | Contournement | α degré | V_{MF} (kV) |
|---------|-------------|----------------|---------------|-------------------|------------------|
| A | 70 | 80 | non | 3 | |
| | 75 | 78 | non | " | |
| | 80 | 45 | non | " | 90 |
| | 85 | 38 | non | " | |
| | 90 | 24 | oui | " | |
| B | 75 | IM* | non | 3 | |
| | 80 | " | non | " | 85 |
| | 85 | " | oui | " | |
| | 80 | " | non | 90 | |
| | 85 | " | oui | " | 85 |

*IM: l'apparition de décharge immédiate

4 isolateurs
tension de ser-
vice: 60 kV

TABLEAU III (SUITE)

| Méthode | V_E kV | t_D (min) | Contournement | α degré | V_{MF} (kV) |
|---------|-------------|----------------|---------------|-------------------|------------------|
| C | 75 | 45 | non | 3 | |
| | 80 | 28 | non | " | 85 |
| | 85(2)* | 20 | oui(2)** | " | |
| | 80 | 19 | non | 12.2 | |
| | 85(2) | 12 | non(2) | " | 90 |
| | 90 | 3 | oui | " | |
| | 85 | 5 | non | 90 | |
| | 90 | 5 | non | " | |
| | 95 | 4 | non | " | |
| | 100 | 3 | oui | " | 100 |

* le chiffre entre parenthèses dans la colonne V_E présente le nombre d'expériences auxquelles cette tension a été appliquée

** le chiffre entre parenthèses dans la colonne contournement présente le nombre de contournements ou tension de tenu obtenu

TABLEAU II (SUITE)

| Méthode | V_E (kV) | t_D (min) | Contournement | α degré | V_{MF} (kV) |
|---------|---------------|----------------|---------------|-------------------|------------------|
| D | 70 | 71 | non | 3 | |
| | 75(2) | 69 | oui(1) | 3 | |
| | 80(2) | 71 | oui(2) | 3 | 75 |
| | 85(4) | 80 | oui(4) | " | |
| | 70 | 17 | non | 14.4 | |
| | 75(2) | 21 | oui(1) | " | 75 |
| | 80 | 20 | non | " | |
| | 85 | 20 | oui | " | |
| | 75 | 6 | non | 90 | |
| | 80(2) | 5 | oui(1) | " | 80 |
| | 85(3) | 8 | oui(1) | " | |

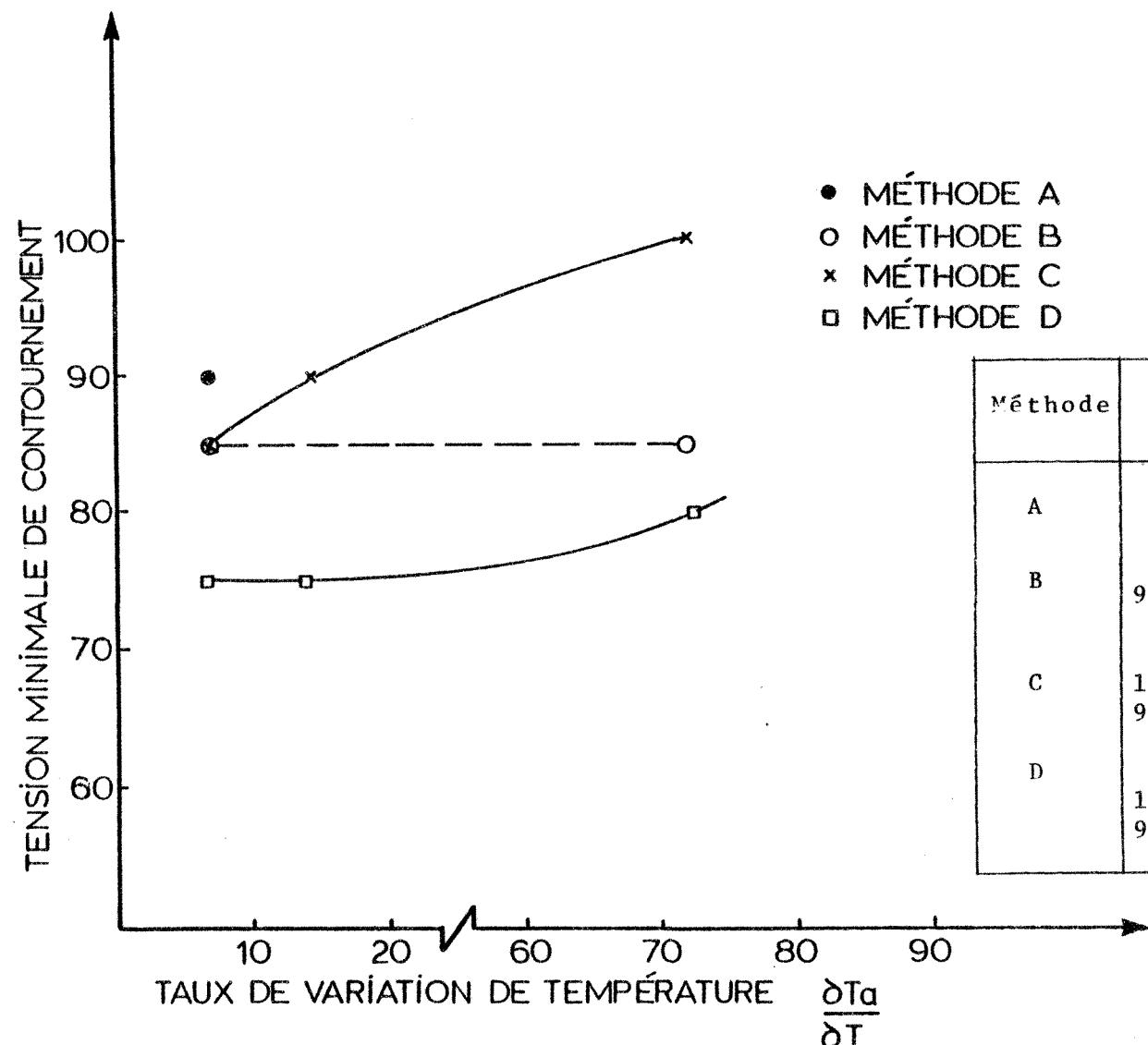


Figure 3.2 Tension minimale de contournement en fonction du taux de variation de la température

pour empêcher la solidification du film d'eau sur la surface de la glace, ce qui enlève la possibilité de former un film d'eau à la surface de la glace.

3.4 Discussions

Le contournement des isolateurs engivrés, en plus d'être influencé par les paramètres déjà mentionnés auparavant, reste un phénomène aléatoire. Les résultats montrés dans le tableau II pour la méthode D indiquent que la probabilité d'avoir un contournement à 75 kV est faible; par contre, celle à 85 kV est très élevée. Ainsi, on a calculé la tension correspondant à la probabilité de 50% de la tension de contournement qui est égale à 80.3 kV. Cette valeur est basée sur une quinzaine de tests effectués dans la même condition d'expérimentation pour un réchauffement de 6.5°C/h.

La tension la plus basse est obtenue quand la température T_g est au voisinage de zéro degré, ce qui laisse entendre la présence d'un film d'eau sur la surface de la glace. Cette tension est sensiblement la même que celle obtenue en régime d'accumulation.

L'apparence physique de la décharge électrique et le développement de l'arc de contournement sont similaires en régime de fonte et en régime d'accumulation. Dans les deux cas,

on observe d'abord l'effet couronne au bout des glaçons et ensuite l'activité de décharges s'amorce aux deux extrémités des isolateurs, soit la partie proche de l'électrode de haute tension et celle rattachée à la masse. Au fur et à mesure que de la glace fond, le courant de fuite augmente le long de la chaîne d'isolateurs jusqu'à l'apparition des arcs blancs. Si le niveau de la tension est suffisant, le contournement complet de la chaîne d'isolateurs se produit; dans le cas contraire, l'activité de décharge est ralentie pour s'arrêter quand la glace disparaît de la surface de l'isolateur.

Il est bon de mentionner que le rôle du film d'eau est de faire amorcer l'activité de décharges. Par la suite, les glaçons fondent sous l'effet de la chaleur dégagée par la décharge partielle et le courant de fuite et le contournement se produit si les conditions ci-haut mentionnées sont respectées.

3.5 Influence du courant de court-circuit de la source sur la tension minimale de contournement (V_{MF})

L'influence du courant de court-circuit du transformateur en tant que paramètre d'essai, dans le cas des isolateurs contaminés et humides, a été étudiée par l'Association Canadienne de l'Electricité [26] ainsi que par la Commission

Electrotechnique Internationale [25]. Dans leurs recommandations, il est mentionné que le courant du court-circuit exigé dépend du rapport entre la résistance série R_s et la réactance en régime établi X_s de la source d'alimentation.

Les résultats dont on a fait mention au paragraphe 3.3 ont été obtenus avec une source de tension composée d'un transformateur 120 kV, 125 kVA ayant un courant de court-circuit de 14 A et un régulateur de 150 kVA ayant un courant de court-circuit d'environ 4 A. Ce dernier régulateur a été remplacé par un autre plus puissant augmentant ainsi le courant de court-circuit de la source jusqu'à 11 A (impédance de court-circuit d'environ 2.5%). Les expériences ont été effectuées de nouveau avec le nouveau régulateur dans les mêmes conditions que précédemment et les résultats sont montrés dans le tableau III.

Les résultats obtenus avec les deux régulateurs sont sensiblement les mêmes, ce qui montre qu'un courant de court-circuit de quatre ampères suffit pour les isolateurs couverts de glace où la longueur de la chaîne d'isolateurs est courte. Cela peut s'expliquer par le fait que le mécanisme de contournement des isolateurs en présence de glace peut être différent de celui des isolateurs contaminés et humides. Dans le dernier cas, le mécanisme de contournement est relié seulement à la for-

mation de bandes sèches. Dans le cas des isolateurs couverts de glace, le mécanisme de contournement dépend plutôt de la longueur et de l'épaisseur de la glace puisque le passage du courant de fuite le long de la chaîne d'isolateurs se fait à l'intérieur des glaçons.

Il convient de noter ici que, dans le cas des isolateurs givrés, la formation des bandes sèches peut se produire en dessous et au-dessus de la surface des isolateurs situés respectivement proches de la haute tension et la masse où commence le développement de l'arc partiel.

TABLEAU III: Tension minimale de contournement en régime de fonte obtenue avec le régulateur de 2.5% d'impédance de court-circuit

| Nombre Essais | V_E (kV) | Iw.T (mA) | Contournement | degré | V_{MF} (kV) | Remarque |
|---------------|------------|-----------|---------------|-------|---------------|------------------------|
| 2 | 75 | 200 | non | 3 | | pas de contournement |
| 1 | 78 | 260 | oui | " | 78 | |
| 3 | 80 | 220 | oui | " | | une fois contournement |
| 1 | 77 | 180 | non | 14.4 | | |
| 1 | 78 | 150 | oui | " | 78 | |
| 3 | 80 | 217 | oui | " | | une fois contournement |
| 1 | 82 | 320 | oui | " | | |

V_E : tension d'essai appliquée en régime de fonte

Iw.T: courant maximal enregistré

V_{MF} : tension minimale de contournement

CHAPITRE IV

TENSION MINIMALE DE CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS GIVRES ET POLLUES EN REGIME DE FONTE

Le comportement des isolateurs couverts de glace face au changement de la température, a été étudié au chapitre précédent. Ainsi, on a pu développer une méthode sur laquelle on peut baser une gamme d'expériences pour mesurer la valeur V_{MF} en régime de fonte. Ce chapitre est consacré à la détermination de la valeur de la tension V_{MF} en présence de la glace et de la pollution. Une comparaison entre le régime de fonte et le régime d'accumulation y est aussi abordée.

La contamination est un des problèmes les plus importants en ce qui concerne l'isolation extérieure, et ce problème préoccupe depuis longtemps les ingénieurs. La difficulté majeure dans l'étude des isolateurs sujets à la contamination est de simuler au laboratoire les conditions naturelles.

Un certain nombre de méthodes ont été mises au point au cours des dix dernières années pour évaluer l'efficacité des isolateurs contaminés. Une revue complète des méthodes d'essais les plus répandues de la contamination artificielle

des isolateurs à haute tension a été documentée par une étude du CIGRE [26,27]. Toutefois, la plupart de ces méthodes ont été abandonnées. Néanmoins, certaines d'entre elles simulent les conditions naturelles de très près.

Deux méthodes de contamination sont utilisées dans le présent travail. Elles sont assez différentes l'une de l'autre et reflètent les particularités du mécanisme de contamination dans les régions industrielles et côtières. Ce sont:

a) la méthode directe (semblable à la méthode du brouillard salin), où l'on varie la conductivité de l'eau formant la glace sur la surface de l'isolateur;

b) la méthode de trempage où on pré-dépose une couche contaminée sur la surface de l'isolateur avant de débuter la période d'accumulation.

4.1 Préparation et mesure de la pollution artificielle

Le taux moyen de pollution peut être classé d'après le rapport du CIGRE #33-75, de la façon suivante:

a) pollution non significative $0.0075 \text{ à } 0.015 \text{ mg/cm}^2$

| | |
|--------------------------|--|
| b) pollution très légère | 0.015 à 0.03 mg/cm ² |
| c) pollution légère | 0.03 à 0.06 mg/cm ² |
| d) pollution moyenne | 0.06 à 0.12 mg/cm ² |
| e) pollution élevée | 0.12 à 0.24 mg/cm ² |
| f) pollution très élevée | 0.24 à 0.43 mg/cm ² |
| g) pollution extrême | supérieure ou égale à 0.43 mg/cm ² |

Les méthodes de contamination utilisées sont:

1) Augmentation de la conductivité de l'eau (méthode directe): l'eau de robinet de notre laboratoire a une conductivité qui varie entre 50 et 65 µS/cm. Pour augmenter la conductivité de l'eau, une quantité donnée de sel correspondant à un niveau de conductivité désiré est dissoute dans un litre d'eau, ce mélange est alors versé dans un réservoir contenant 160 litres d'eau de robinet. La conductivité de l'eau dans le réservoir est mesurée avant et après chaque expérience. Cinq niveaux sont utilisés dans ces expériences, soit 57 µS/cm (l'eau de robinet), 100, 150, 200 et 300 µS/cm.

2) Méthode de trempage (contamination pré-déposée): il s'agit d'immerger les isolateurs dans une solution composée de Kaolin K-16 et de NaCl dissoute dans l'eau distillée. Le niveau moyen de pollution déposé sur la surface de l'isolateur est mesuré comme suit: deux jupes d'isolateur en verre trempé de

même type d'isolateurs sont trempés dans la solution contaminante et laissés sécher à l'air libre. La surface des échantillons pollués est alors lavée avec une éponge dans 0.5 litre d'eau distillée. La conductivité de l'eau collectée est mesurée et ramenée à une température de référence de 20°C à l'aide d'un facteur de correction [25]. La quantité équivalente de NaCl dans la solution est déterminée à l'aide d'une abaque qui donne la relation entre la conductivité et la concentration de NaCl en g/l. A partir de cette valeur, on détermine le taux de la pollution par la relation suivante:

$$T = \frac{CV}{A} \quad (1)$$

où

T: taux de la pollution en mg/cm²

C: quantité équivalente de sel en g/l

A: la surface lavée de l'isolateur en cm²

V: volume d'eau recueilli en cm³

La surface totale d'un isolateur en verre trempé N-16 (une jupé) est de 2222 cm². Quant à la quantité équivalente C de NaCl, elle est reliée à la conductivité L par la relation suivante:

$$C = aL + b \quad (2)$$

a et b sont des constantes qui sont connues pour différents intervalles de conductivité entre 0 et 100 µg et entre 100 et 200 µg. La conductivité mentionnée dans la relation (1)

doit être mesurée à 20°C. En pratique, on mesure la conductivité de l'eau recueillie au lavage à la température ambiante et on déduit ensuite L par la formule de Kohlrausch. Le taux de pollution choisi dans les expériences est de 0.05 mg/cm². La raison de ce choix provient du fait que, pour les taux de 0.01 et 0.02 mg/cm² correspondant à une pollution très légère, Phan et Matsuo [19] ont montré que la valeur de la tension minimale de contournement (V_{MF}) des isolateurs précontaminés à ce degré de pollution est presque égale à celle des isolateurs propres, soit 75 kV pour quatre isolateurs.

4.2 Tension V_{MF} en fonction de la longueur de la ligne d'arc de la chaîne d'isolateurs

Le nombre d'isolateurs en verre trempé utilisés dans cette série d'expériences est de 5 étant donné que la source de haute tension peut fournir un courant de court-circuit relativement élevé.

En vue d'établir une comparaison entre deux chaînes d'isolateurs propres et contaminés, composée chacune de cinq isolateurs, une série de tests est effectuée en l'absence de pollution. Les résultats sont présentés au tableau IV où V_0 est la tension appliquée pendant la période d'accumulation, V_E la tension d'essai, N le nombre d'isolateurs utilisés et V_{MF} la tension minimale de contournement.

TABLEAU IV: Tension minimale de contournement en régime d'accumulation en l'absence de pollution

| N | V_o (kV) | V_E (kV) | Contournement | V_{MF} (kV) | Remarque |
|---|---------------|---------------|---------------|------------------|-------------------------|
| 5 | 75 | 90 | non | | |
| 5 | 75 | 92 | non | | |
| 5 | 75 | 95 | oui | 93 | |
| 5 | 75 | 93 | oui | | Nombre d'essais: 2 fois |

La tension minimale de contournement, pour un à quatre isolateurs, a déjà été déterminée par Phan et Matsuo [9]. Leurs résultats tendent à montrer que la tension V_{MF} est proportionnelle à la longueur de la ligne d'arc qui correspond à la somme d'une distance de fuite d'un isolateur et de $(N-1)$ fois le pas où N est le nombre d'isolateurs dans la chaîne (voir figure 4.1).

Pour des épaisseurs de 1 et 2 cm de glace, les résultats obtenus montrent que la valeur de la tension minimale de contournement (V_{MF}) est très voisine (55 et 50 kV respectivement) quand la longueur de la ligne d'arc est de 55 cm (2 isolateurs). Par contre, pour les mêmes épaisseurs de glace, la tension V_{MF} devient respectivement de 100 à 80 kV quand la longueur de la ligne d'arc est de 90 cm (4 isolateurs), soit un écart d'environ 20%. En d'autres termes, l'influence de l'épaisseur de la glace sur la tension V_{MF} s'accentue quand le nombre d'isolateurs augmente dans la chaîne d'isolateurs (voir figure 4.1).

De plus, on observe sur la figure 4.2 que la tension minimale de contournement par unité d'isolateur diminue jusqu'à la 5^e unité quand la longueur de la chaîne d'isolateurs augmente. Cela confirme les résultats obtenus par Phan et Matsuo [9].

Il est bon de mentionner, une fois de plus, que l'objectif principal de ces essais est d'établir une comparaison

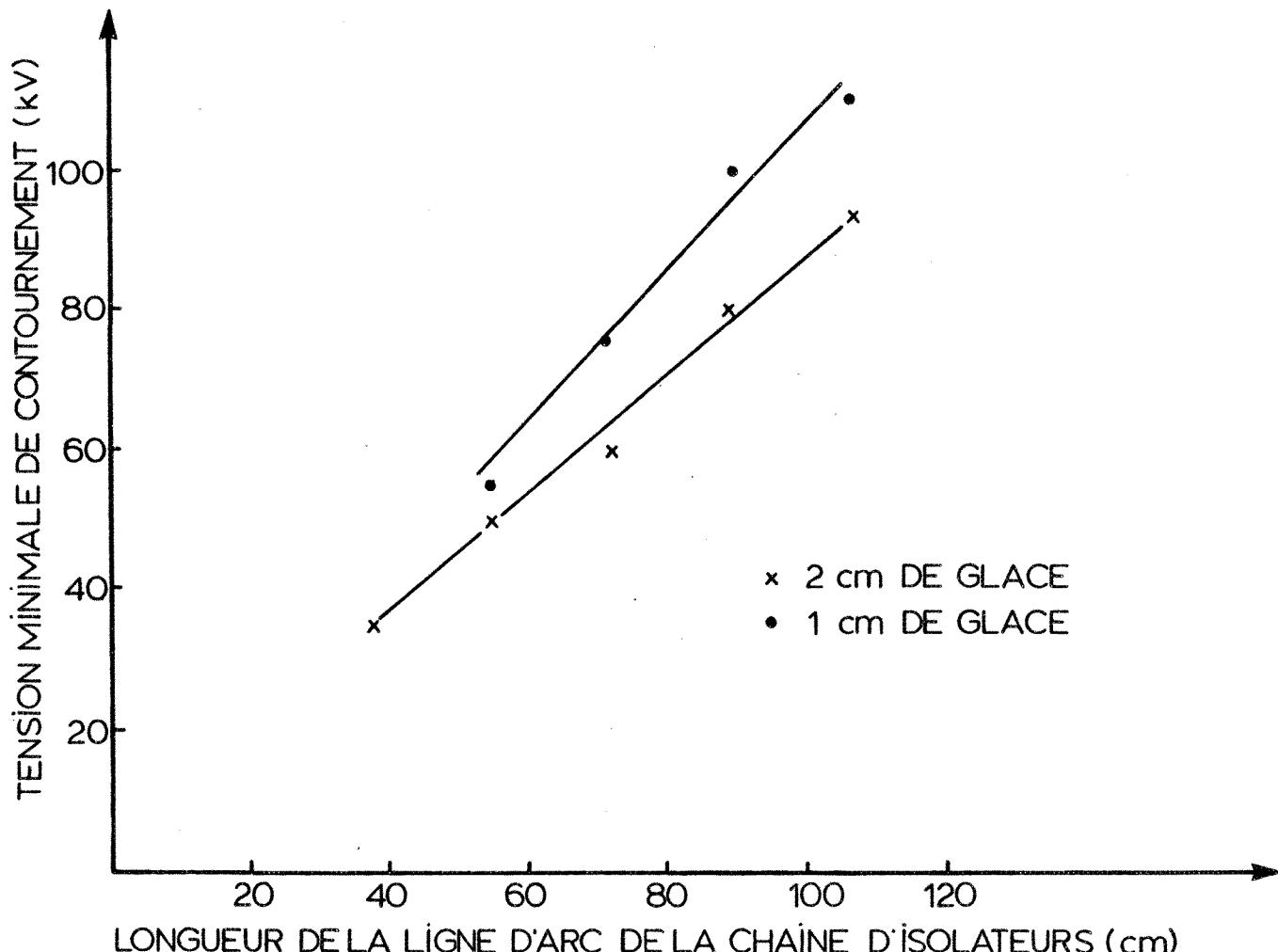


Figure 4.1 Tension minimale de contournement en fonction de la longueur de la ligne d'arc

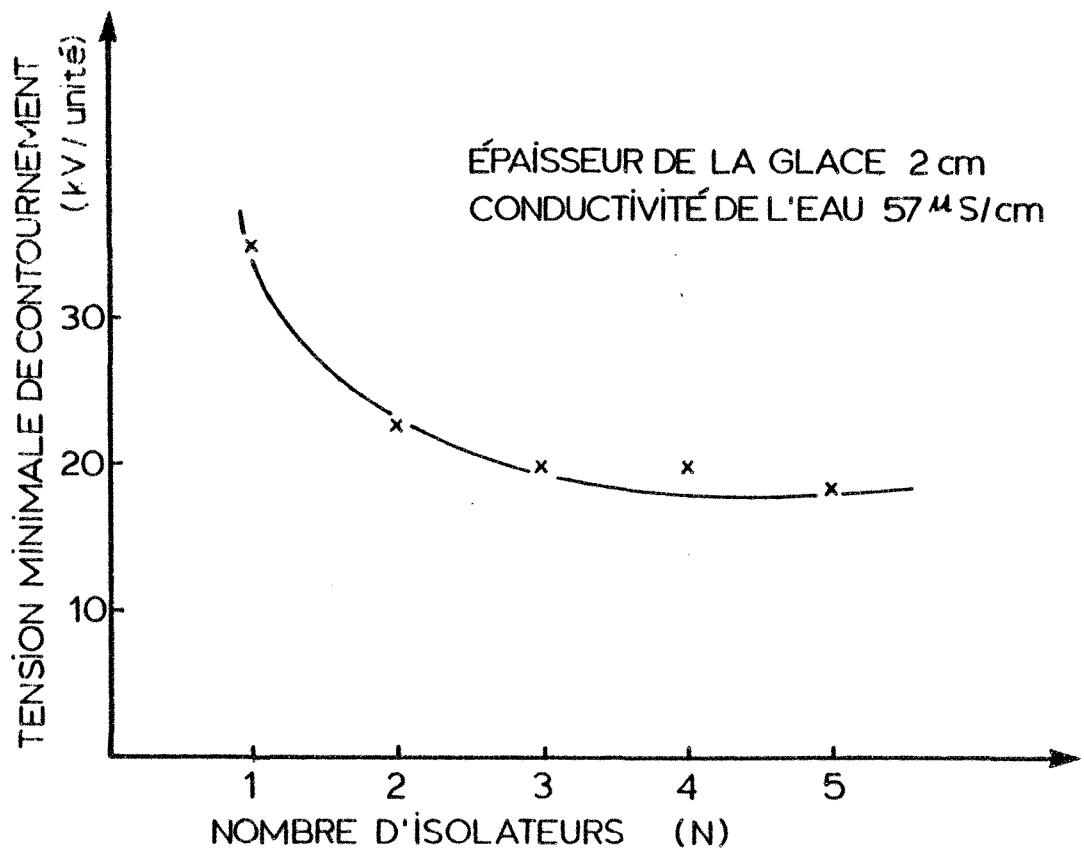


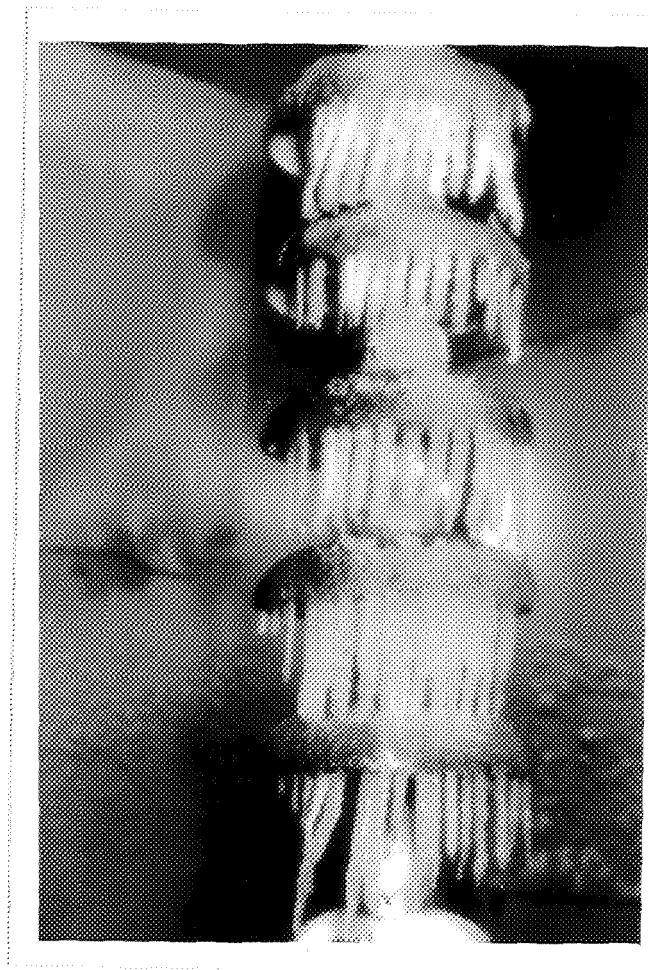
Figure 4.2 Tension minimale de contournement en fonction de chaque isolateur additionnel

entre le régime de fonte et le régime d'accumulation.

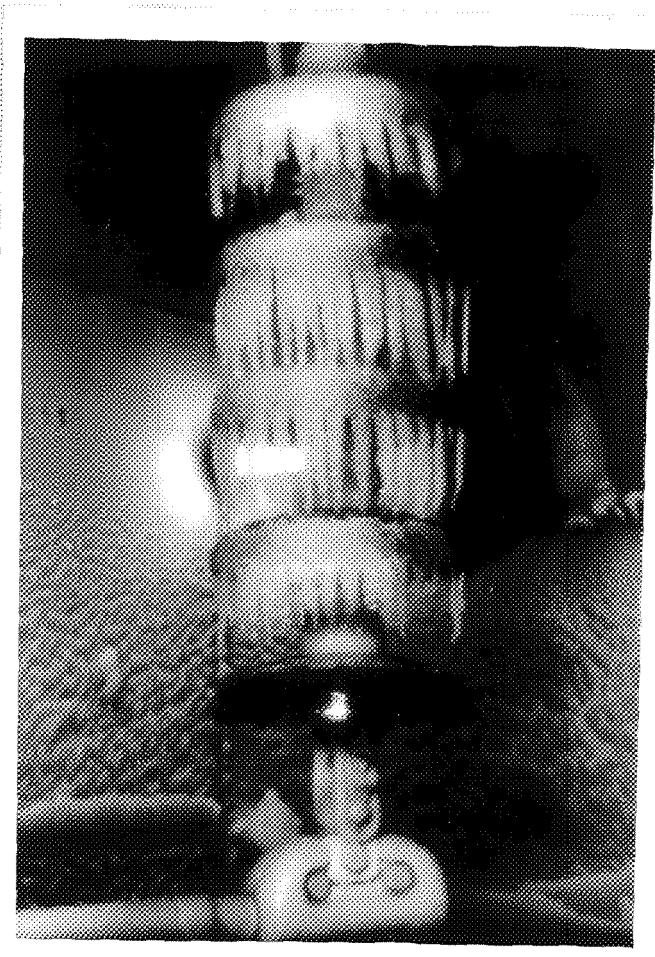
4.3 Effet de la conductivité de l'eau et de la glace sur la tension V_{MF}

Comme mentionné auparavant, l'épaisseur de la glace est mesurée sur un conducteur témoin à des intervalles réguliers. Le temps nécessaire pour obtenir une épaisseur de glace de 2 cm est environ 1h30 min. Une tension de 15 kV/unité, soit 75 kV, est appliquée pendant la période d'accumulation. La figure 4.3 présente l'apparence de la glace formée sur la chaîne d'isolateurs après 40 minutes d'accumulation. On observe que pendant la période d'accumulation, la quantité de glace accumulée sur la surface de l'isolateur dépend du niveau de la conductivité de l'eau utilisée. En effet, plus la conductivité de l'eau augmente, moins il y a de glace et glaçons sur les jupes d'isolateurs proches des électrodes, surtout l'électrode du bas qui reçoit la haute tension. On remarque aussi qu'aux extrémités de la chaîne d'isolateurs, la longueur des glaçons diminue (électrode masse) et ils disparaissent complètement au-dessus de l'électrode haute tension, (voir figure 4.3 b).

Le tableau IV présente également la tension minimale de contournement (V_{MF}) pour une conductivité de l'eau de 57 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (l'eau de robinet). Les résultats correspondant à l'eau de 150 et 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sont montrés au tableau V, où N représente



a) Conductivité de l'eau:
 $150 \mu\text{S}/\text{cm}$
N. isolateurs sous tension:
5 unités



b) Conductivité de l'eau:
 $300 \mu\text{S}/\text{cm}$
N. isolateurs sous tension:
5 unités

Figure 4.3 Aspect visuel de la glace déposée sur la chaîne d'isolateurs après 40 minutes d'accumulation sous une tension de 75 kV

le nombre d'isolateurs, ϵ l'épaisseur de la glace accumulée sur le conducteur témoin et C la conductivité de l'eau utilisée.

On remarque au tableau V que le contournement se produit pendant la période d'accumulation, pour des épaisseurs de glace variant entre 1.4 et 1.8 cm, lorsque la conductivité de l'eau passe de 57 à 150 et 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, l'épaisseur et la longueur des glaçons diminuent pour une augmentation de la conductivité de l'eau. Ceci serait attribuable à l'augmentation du courant de fuite pendant la période d'accumulation. Pour l'eau de robinet, l'activité de décharge commence environ 20 minutes après la période d'accumulation lorsque les glaçons relient les jupes d'isolateurs ensemble. Par contre, pour une conductivité de 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$, l'activité de décharge débute environ 14 minutes après, ce qui correspond à 3/4 de la longueur du pas de l'isolateur. Pour une conductivité de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ cette activité commence dès l'accumulation de la glace. L'amplitude de courant de fuite pendant l'accumulation est proportionnelle au niveau de la conductivité de l'eau qui augmente en fonction du temps.

La distribution de la tension le long de la chaîne d'isolateurs est probablement influencée par des gouttes d'eau conductrices qui forment la glace et les glaçons sur la surface de l'isolateur. Cela facilite le passage du courant de fuite

TABLEAU V: Tension minimale de contournement en fonction du niveau de conductivité de l'eau

| N | C μS/cm | V _O (kV) | V _E (kV) | ε (cm) | Contour- nement | Remarque |
|---|------------|------------------------|------------------------|-----------|--------------------|-------------------------------------|
| 4 | 57 | 60 | 75 | 2 | non | |
| " | " | " | 80 | " | oui | |
| " | " | " | 78 | " | oui | 78KV est la tension contournement |
| " | 150 | 60 | 60 | 1.7 | oui | Contournement après 80 min d'acc. |
| " | " | 60 | 60 | 1.65 | oui | Contournement après 69 min d'acc. |
| 5 | " | 75 | 75 | 1.63 | oui | Contournement après 65 min d'acc. |
| " | " | " | " | 1.63 | oui | Contournement après 65 min d'acc. |
| " | " | " | " | 1.5 | oui | Contournement après 60 min d'acc. |
| " | 150 | 60 | 70 | 2 | oui | V _O appliquée 12KV/unité |
| " | 300 | 75 | 75 | 1.82 | oui | Contournement après 53 min d'acc. |
| " | " | 75 | " | 1.6 | oui | Contournement après 65 min d'acc. |

vers la masse. De plus, au fur et à mesure que la longueur des glaçons augmente, la distance d'air formée par les glaçons et les jupes adjacentes diminue (voir figure 4.4). Cela permet une augmentation du courant de fuite dans le temps.

En résumé, on peut dire qu'il existe un équilibre entre la quantité de la glace fondue et le courant de fuite ainsi que l'épaisseur de la glace accumulée au moment de l'arc de contournement, pendant la période d'accumulation.

4.4 Tension minimale de contournement V_{MF} en fonction de la conductivité de l'eau

En raison du contournement pendant la période d'accumulation, il a été décidé de diminuer l'épaisseur de la glace, d'abord de 1.5 cm et ensuite à 1 cm pour ne pas avoir de contournement pendant la période d'accumulation. Ainsi, on peut mesurer la tension minimale de contournement en fonction de la conductivité de l'eau.

Les résultats présentés au tableau VI montrent que la tension minimale de contournement (V_{MF}) en présence de 1 cm de glace, mais en l'absence de pollution, est de 107 kV pour cinq isolateurs. Pour une épaisseur de glace égale à 2 cm, dans la même condition que précédemment, la tension V_{MF} est de 93 kV soit une baisse de 13%. Le tableau VI montre aussi que

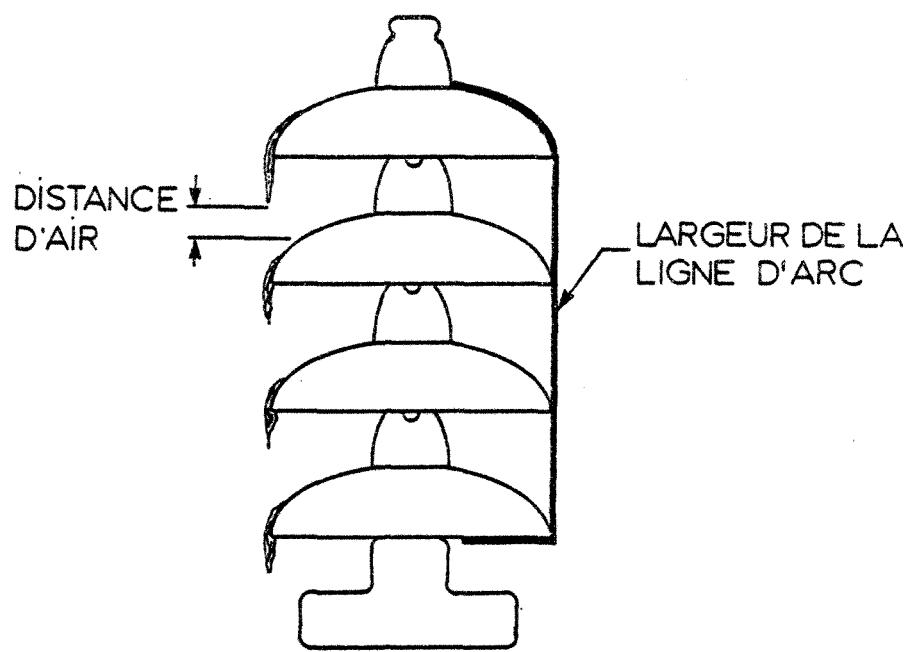


Figure 4.4 Formation des glaçons sur la surface d'isolateurs

TABLEAU VI: Tension minimale de contournement pour différents niveaux de conductivité de l'eau

| Nombre Essais | N | C ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | V_o (kV) | V_E (kV) | ϵ (cm) | Contour- nement | V_{MF} (kV) |
|------------------|---|----------------------------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|------------------|
| 2 | 5 | 300 | 75 | 80 | 1.5 | oui | |
| 2 | " | " | 75 | 75 | 1.2 | oui | |
| 3 | " | 57 | 75 | 107 | 1 | non | |
| 2 | " | " | 75 | 110 | " | oui | 110 |
| 3 | 5 | 100 | 75 | 85 | " | non | |
| 3 | " | " | " | 87 | " | oui | 87 |
| 3 | 5 | 150 | 75 | 80 | " | non | |
| 2 | " | " | 75 | 83 | " | oui | 83 |
| 2 | " | 200 | 75 | 75 | " | non | |
| 3 | " | " | 75 | 78 | " | oui | 78 |
| 1 | " | " | " | 80 | " | oui | |
| 3 | 5 | 300 | 75 | 75 | " | non | |
| 2 | " | " | " | 78 | 1 | oui | 78 |

les tensions minimales de contournement (V_{MF}) correspondant au niveau de conductivité de l'eau de 200 et 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sont égales. De plus, la tension minimale de contournement d'une chaîne composée de 5 isolateurs couverts de 1 cm de glace formée à partir des gouttelettes d'eau dont la conductivité est de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ équivaut à celle d'une chaîne composée de 4 isolateurs couverts de 2 cm de glace propre.

Les résultats obtenus dans ce tableau sont aussi présentés graphiquement à la figure 4.5. Comme on peut le voir, la tension V_{MF} diminue d'une façon exponentielle quand la conductivité de l'eau passe de 57 à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et pour des conductivités plus grandes que 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ cela tend vers une constante.

Comme nous le verrons dans le prochain paragraphe, la tension minimale de contournement pour une conductivité de l'eau égale à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est comparable à celle des isolateurs précon-taminés avec un degré de pollution de 0.05 mg/cm^2 .

4.5 Effet de la conductivité de l'eau sur la variation de la température de la glace (T_g)

En vue d'établir une comparaison entre les régimes d'accumulation et de fonte en présence de la pollution, une série d'expériences a été réalisée en régime de fonte.

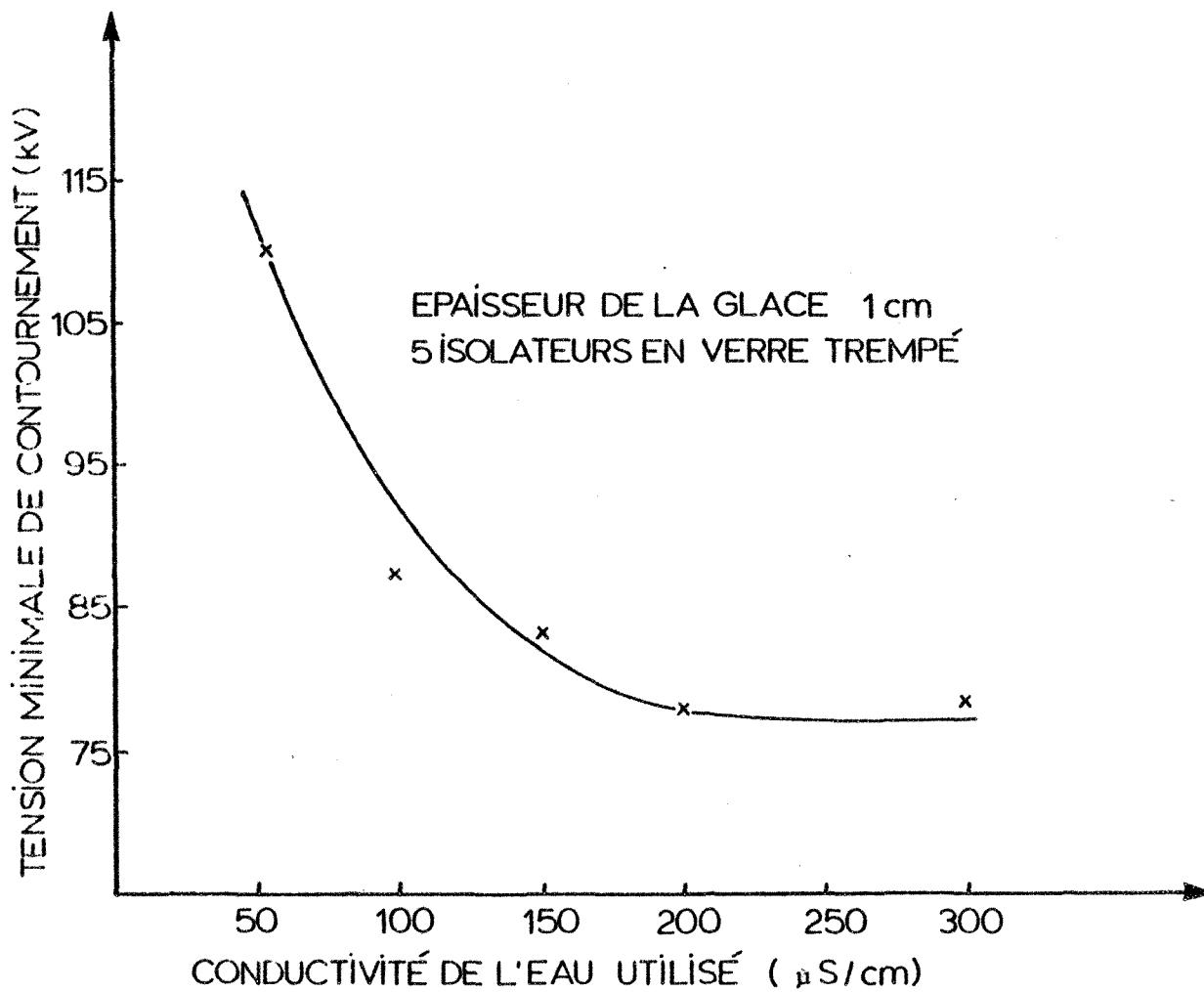


Figure 4.5 Relation entre la V_{MF} et la conductivité de l'eau utilisée

De ce qui précède, et en tenant compte des résultats obtenus dans le chapitre 3, un réchauffement de $6.5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ est choisi $\alpha=3^{\circ}$ et la méthode "D" est utilisée pour déterminer la tension minimale de contournement.

La figure 4.6 montre le taux de la variation de température de la glace "polluée" (c'est-à-dire la glace formée à partir des gouttelettes d'eau à haute conductivité), pour trois niveaux de conductivité de l'eau utilisée, soit $57 \mu\text{S}/\text{cm}$ (l'eau de robinet), 150 et $300 \mu\text{S}/\text{cm}$. Comme on peut le constater sur la figure 4.6, l'allure et la forme de la variation de la température en fonction du temps sont essentiellement les mêmes pour les trois niveaux utilisés. Par contre, on observe sur cette figure que le point d'équilibre entre la température ambiante et celle de la glace se déplace vers la droite quand la conductivité de l'eau utilisée passe de 57 à $300 \mu\text{S}/\text{cm}$. En d'autres termes, quand la conductivité de l'eau augmente, la durée du temps d'équilibre entre les températures de la chambre et de la glace augmentent. La valeur de la tension V_{MF} est mesurée dans le cas de la glace polluée ($300 \mu\text{S}/\text{cm}$) en régime de fonte. Les résultats obtenus ont montré que la valeur de la tension V_{MF} , aussi bien en régime d'accumulation qu'en régime de fonte, sont pratiquement les mêmes à $\pm 3\%$ de précision. De ce qui précède, avec les résultats déjà obtenus, on a donc

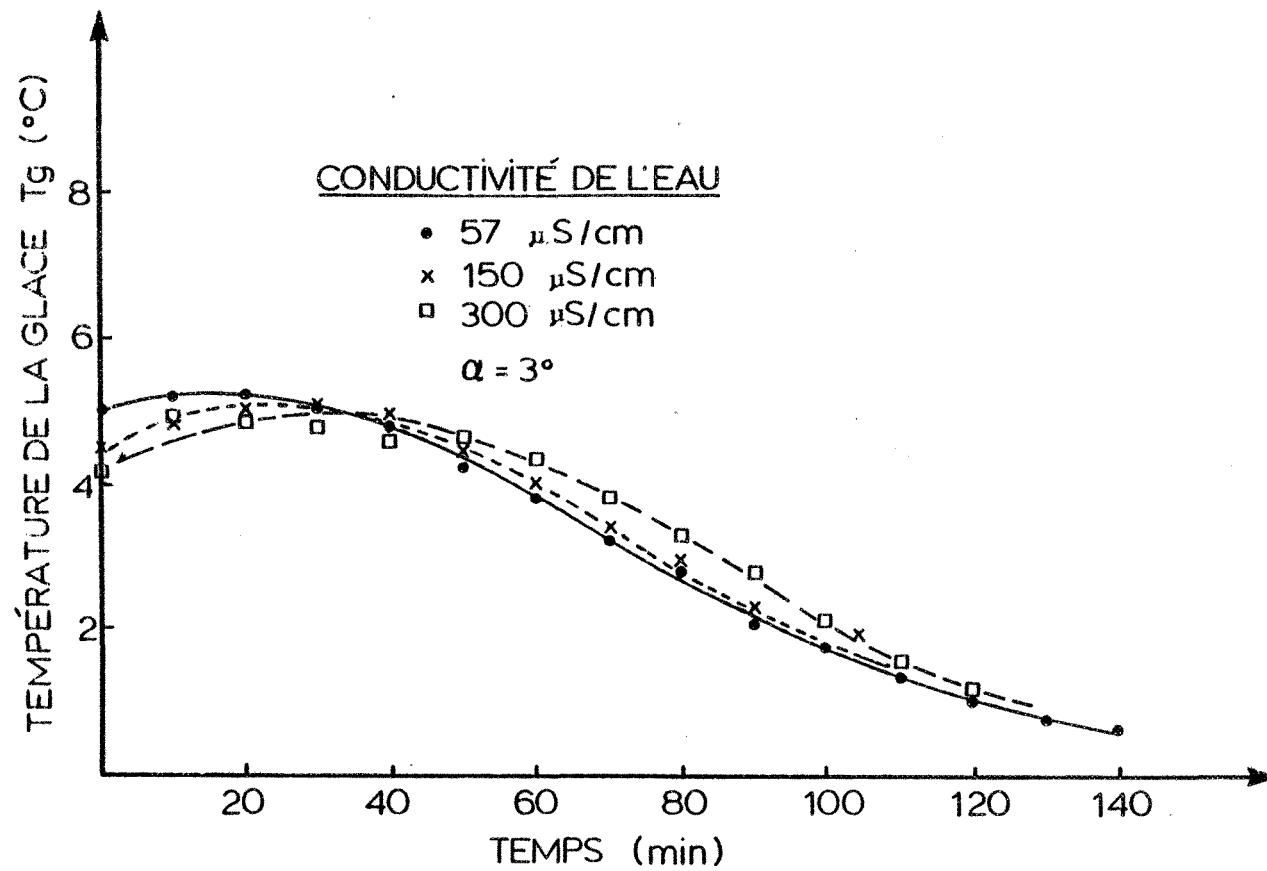


Figure 4.6 Variation de la température de glace en fonction du temps

conclu que, pour des isolateurs givrés, la valeur de la tension V_{MF} à différents niveaux de conductivité de l'eau est pratiquement la même en régime de fonte qu'en régime d'accumulation.

4.6 Tension minimale de contournement V_{MF} des isolateurs givrés en présence de la pollution

Afin d'étudier l'influence de la contamination en présence de la glace sur la valeur de la tension minimale de contournement (V_{MF}) en régime de fonte de la glace et de faire une comparaison avec le régime d'accumulation, une série de tests a été réalisée. Les isolateurs sont contaminés par la méthode de trempage. Un taux de pollution de 0.05 mg/cm^2 est choisi à cette fin. La méthode "D" est utilisée en régime de fonte de la glace avec un réchauffement de 6.5°C/h pour mesurer la valeur de la tension.

Les résultats obtenus, illustrés au tableau VII, montrent bien que les valeurs de la tension minimale de contournement mesurées dans les deux régimes (accumulation et fonte) sont pratiquement les mêmes. De plus, on constate que la tension V_{MF} correspond à celle obtenue pour la même chaîne d'isolateurs mais couverts de glace formée avec de l'eau dont la conductivité est de $200 \mu\text{S/cm}$ (voir tableau VI à la page 65).

TABLEAU VII: Tension minimale de contournement pour un niveau de pollution de 0.05 mg/cm^2

| N | T (mg/cm^2) | V_o (kV) | V_E (kV) | (cm) | Contournement | V_{MF} (kV) |
|---|---------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|
| 5 | 0.05 | 75 | 75 | 1 | non | |
| 5 | " | " | 78 | " | oui | |
| 5 | " | " | 80 | " | non | |
| 5 | " | " | 80 | " | oui | 78 |

a) régime de fonte

| N | T (mg/cm^2) | V_o (kV) | V_E (kV) | (cm) | Contournement | V_{MF} (kV) |
|---|---------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------|
| 5 | 0.05 | 75 | 78 | 1 | non | |
| " | " | " | 78 | " | oui | |
| " | " | " | 80 | " | non | |
| " | " | " | 80 | " | oui | 78 |
| " | " | " | 80 | " | oui | |

b) régime d'accumulation

Une comparaison entre les tableaux VI et VII nous montre que la tension minimale de contournement en l'absence de pollution est de 110 kV, mais celle en présence de contamination de niveau de 0.05 mg/cm^2 ou $200 \mu\text{s/cm}$ est 78 kV, ce qui représente une baisse de 29%.

En résumé, à partir des différents résultats, on peut conclure que les valeurs de la tension minimale de contournement dans les deux régimes d'accumulation et de fonte sont sensiblement les mêmes et cela en l'absence ou en présence de pollution.

CHAPITRE V

MECANISME DE CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS COUVERTS DE GLACE EN REGIMES DE FONTE ET D'ACCUMULATION

Comme déjà mentionné au chapitre I, le mécanisme de contournement des isolateurs pollués et humides est basé sur la formation des bandes sèches sur leur surface, dû au dégagement de la chaleur produit par le passage du courant de fuite à travers les couches humides et contaminées.

Dans notre cas, c'est-à-dire en présence de glace et à partir des résultats obtenus précédemment, on a mesuré la tension de contournement en régime de fonte et d'accumulation, et on a observé le contournement dans les deux situations pour des valeurs de tensions identiques. Selon les travaux publiés par Fujimura et Naito [10] d'une part et Hara et Phan [8] d'autre part, la longueur des glaçons (ou plutôt la distance entre l'extrémité des glaçons et la surface immédiatement en dessous) est un des facteurs déterminants dans le mécanisme de contournement des isolateurs givrés. De plus, la présence d'un film d'eau sur la surface de la glace permet l'amorçage des activités de décharges. L'épaisseur de la glace et la longueur des

glaçons au moment du passage du courant de fuite sont deux autres facteurs à considérer dans le mécanisme de contournement des isolateurs couverts de glace.

5.1 Développement du courant de fuite et contournement électrique

Pendant la période d'accumulation, l'activité de décharge commence au bout des glaçons formés au bord des jupes d'isolateurs lorsqu'ils atteignent une certaine longueur. Celle-ci dépend de la conductivité de l'eau utilisée ou le degré de pollution. Par exemple, pour une conductivité de 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$, l'activité de décharge commence lorsque les glaçons atteignent $3/4$ du pas de la chaîne d'isolateur. Le courant de fuite augmente au fur et à mesure que l'épaisseur de la glace augmente. Mais après quelque temps, dû à l'échauffement local au bout des glaçons, les pointes formées par des gouttes d'eau deviennent moins effilées; par conséquent, le courant de fuite diminue en attendant que d'autres glaçons se forment. Ce phénomène donne une forme aléatoire au courant de fuite qui n'est pas semblable d'une expérience à l'autre. En régime de fonte comme en régime d'accumulation, si le niveau de la tension est suffisamment élevé, la décharge se transforme en un arc partiel et en un arc blanc; ensuite l'arc de contournement a lieu.

5.2 Effet du passage du courant de fuite sur le type de glace

Le passage du courant de fuite de la haute tension vers la masse se fait par l'intermédiaire des glaçons de la façon suivante: une fois l'activité de décharge amorcée, on observe au bout des glaçons proches de la haute tension, des étincelles ayant une couleur entre le bleu et le violet. Ce sont des points où se trouve concentrée la décharge électrique. Au fur et à mesure que l'épaisseur de la glace augmente, l'activité de décharge s'accroît pour former les arcs partiels dont la couleur est entre le bleu et le jaune. Le passage du courant vers la masse se fait à travers le centre des glaçons. On observe en effet des trous à l'intérieur des glaçons situés sur la ligne d'arc. Une fois arrivés à la hauteur de la jupe, les arcs s'infiltrent entre la surface de contact de l'isolateur et la glace pour rejoindre les glaçons situés au-dessus (voir figure 5.1). Le phénomène se répète de la même façon jusqu'à l'isolateur relié à la masse. Les passages du courant de fuite et de l'arc à l'intérieur des glaçons sont probablement dus d'une part à une diminution considérable de la résistivité de la glace fondue sous la chaleur dégagée lors des décharges partielles et, d'autre part, au film d'eau formé en surface de la glace et qui n'est pas nécessairement uniforme en régime de fonte. En régime d'accumulation, le même mécanisme joue et

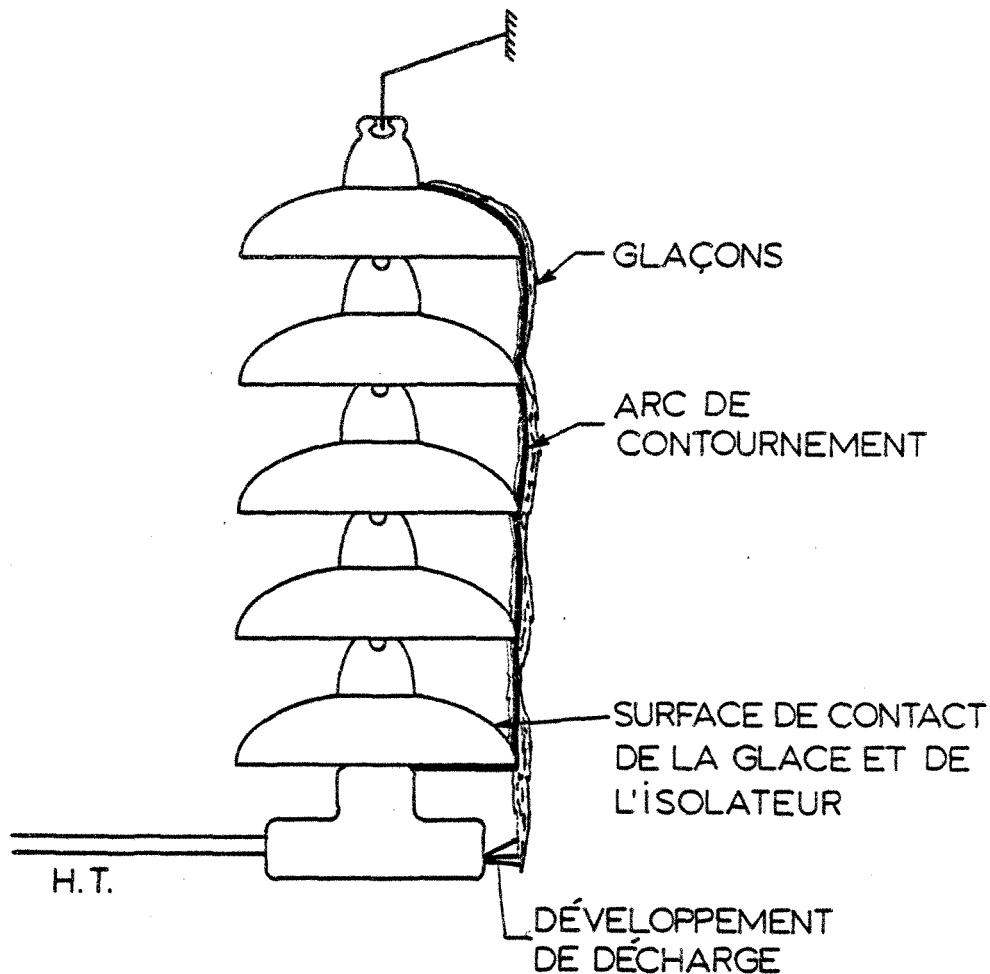


Figure 5.1 Parcours du courant de fuite le long de la ligne d'arc entre les extrémités d'une chaîne d'isolateurs couverts de glace

cela s'explique par la courte durée d'existence du film d'eau lors de la déposition de la glace sur l'isolateur. D'autre part, comme le courant passe par les endroits où il rencontre moins de résistance, alors le passage se fait à l'intérieur des glaçons tel que le démontre la figure 5.1.

En présence d'un taux élevé de pollution et au début de la période d'accumulation, le passage du courant de fuite se fait sur la surface de l'isolateur. Puis, une fois que les glaçons sont formés, le parcours a lieu à l'intérieur des glaçons.

La figure 5.2 (a,b,c) montre bien la trace du parcours du courant de fuite à l'intérieur des glaçons pour trois niveaux de conductivité de l'eau soit 57 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (l'eau de robinet), 150 et 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Chaque photo présente deux échantillons de glaçons recueillis lors de la même expérience sur la chaîne d'isolateurs. L'extrémité supérieure est reliée au bord de la jupe de l'isolateur et l'extrémité inférieure montre le bout des glaçons. La direction de parcours du courant de fuite est du bas vers le haut, c'est-à-dire, de la haute tension vers la masse.

Cette interprétation du parcours du courant de fuite

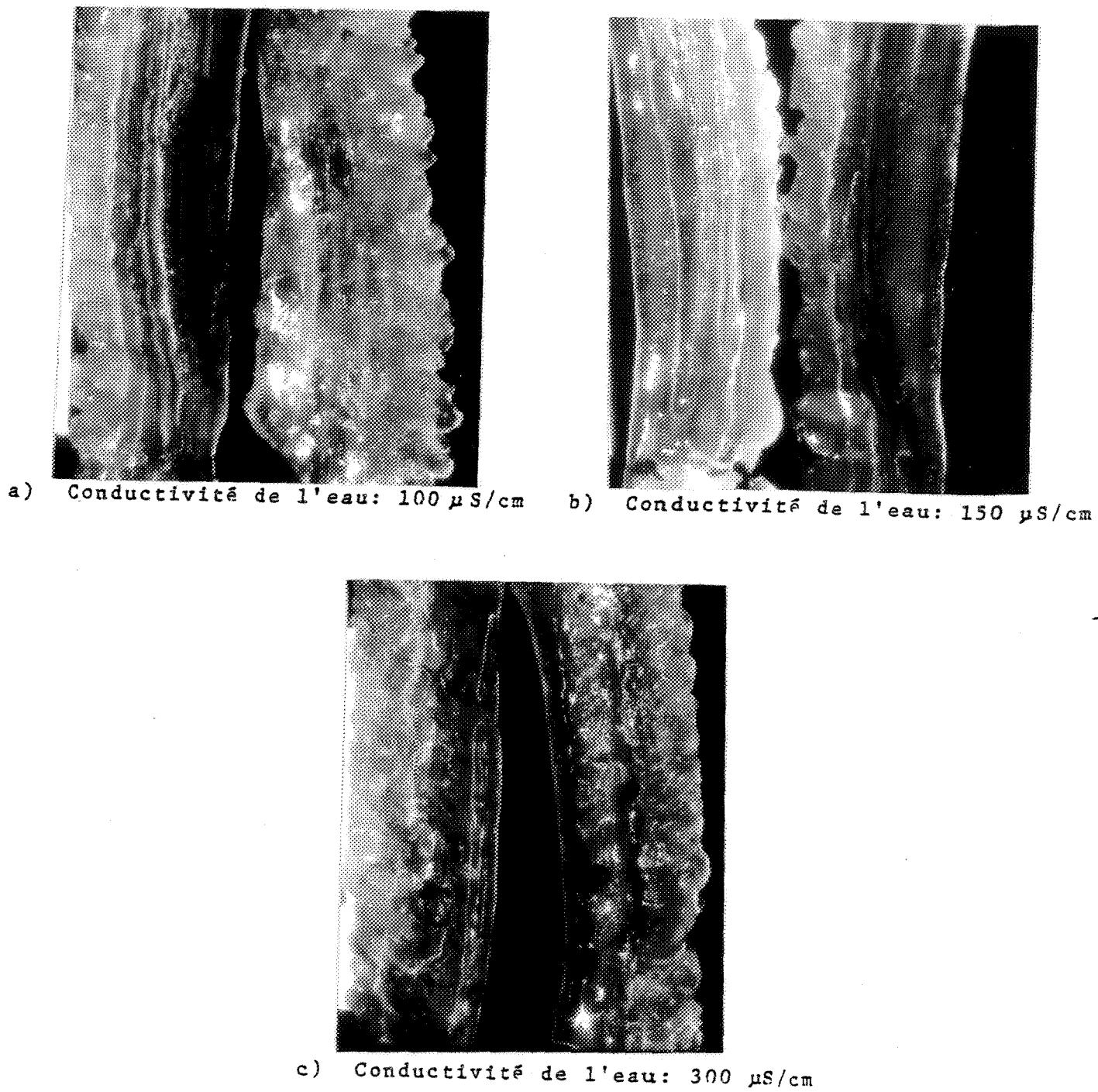


Figure 5.2 Effet du passage du courant de fuite sur les glaçons

est en accord avec la méthode proposée par Phan et Matsuo [9] pour calculer la tension V_{MF} en fonction du nombre de jupes d'isolateurs dans une chaîne.

De ce qui précède, on peut conclure que le mécanisme de contournement des isolateurs pollués et couverts de glace est probablement différent de celui des isolateurs humides et pollués.

5.3 Influence de la contamination sur l'intensité du courant de fuite et la durée du régime transitoire

Les courants de fuite pendant la période d'accumulation, pour différents niveaux de salinité de l'eau sont montrés au tableau VIII. Ce tableau présente les valeurs du courant de fuite (I_d) pendant la période d'accumulation et les valeurs du courant de la demi-période précédant immédiatement le contournement ou la tenue ($I_{F.T}$ ou $I_{W.T}$). Comme on peut le constater la valeur du courant de fuite augmente en fonction du niveau de pollution. Avec une conductivité de l'eau de 57 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la valeur minimale du courant de fuite pendant la période d'accumulation correspond à environ 30 ± 7 mA. Par contre, à 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, l'amplitude du pic de courant dépasse 200 mA. En ce qui concerne la valeur du courant, juste avant le contournement ($I_{F.T}$), on n'a pas pu établir une relation évidente avec le degré de pollution.

TABLEAU VIII: Valeurs du courant de fuite mesurées à différents niveaux de conductivité de l'eau

| C μS/cm | I_d (mA) | Régime d'accumulation | | Régime de fonte |
|------------|---------------|--------------------------------|--|--------------------------------|
| | | $I_{w.T}$ ou $I_{F.T}$ (mA) | | $I_{w.T}$ ou $I_{F.T}$ (mA) |
| 57 | 30 ± 7 | 196 ± 20 | | 226 ± 30 |
| 100 | 79 ± 5 | 195 ± 10 | | - |
| 150 | 160 ± 20 | 308 ± 52 | | - |
| 200 | 170 ± 10 | 230 ± 30 | | - |
| 300 | > 200 | 300 ± 20 | | - |

| Taux de pollution (mg/cm ²) | I_d (mA) | $I_{w.T}$ ou $I_{F.T}$ (mA) | $I_{w.T}$ ou $I_{F.T}$ (mA) |
|--|---------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0.05 | 145 ± 20 | 160 ± 30 | 206 ± 50 |

I_d : courant de fuite pendant la période d'accumulation

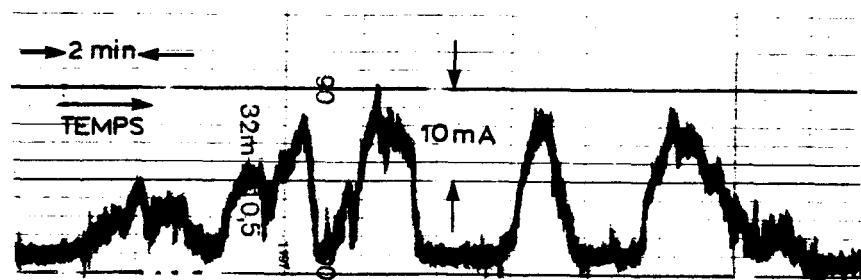
$I_{w.T}$: courant maximal après une tension de tenue

$I_{F.T.}$: courant juste avant le contournement

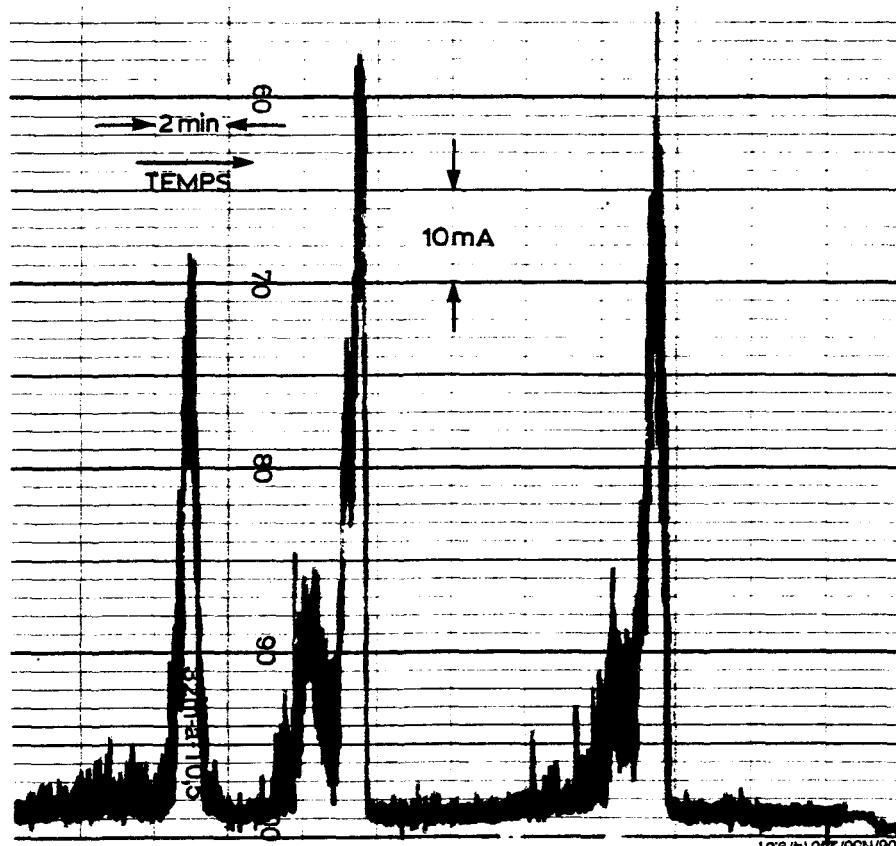
La figure 5.3 montre les enregistrements du courant de fuite à différents degrés de pollution. Sur la figure 5.3 a, avec une conductivité d'eau à $57 \mu\text{S}/\text{cm}$, on remarque l'absence des impulsions de décharge pendant la période d'accumulation. Les pics de courant apparaissent sous la forme de groupes d'impulsions et s'accroissent au fur et à mesure que la conductivité de l'eau augmente (voir figure 5.3 b,c,d).

Le courant de fuite des isolateurs couverts avec une couche contaminante (figure 5.3 e) est constitué d'impulsions isolées ou de trains d'impulsions de niveaux variables qui sont répartis aléatoirement dans le temps. La valeur moyenne mesurée est basée sur l'amplitude de l'impulsion la plus élevée dans chaque expérience.

Le courant de fuite au moment du passage de l'arc blanc à l'arc de contournement en régime de fonte d'accumulation, ainsi qu'en l'absence et en présence de pollution est montré à la figure 5.4 (a,b). Comme on peut le constater, la durée du régime transitoire entre l'arc blanc et le contournement est plus longue en régime de fonte qu'en régime d'accumulation. Cela est probablement dû au changement des caractéristiques de la glace produite pendant la période de fonte, permettant plus difficilement le passage du courant ce qui, en fait, prolonge la durée du régime transitoire entre les deux arcs. On remarque aussi qu'une augmentation du niveau de pollution diminue ce temps en régime de fonte comme

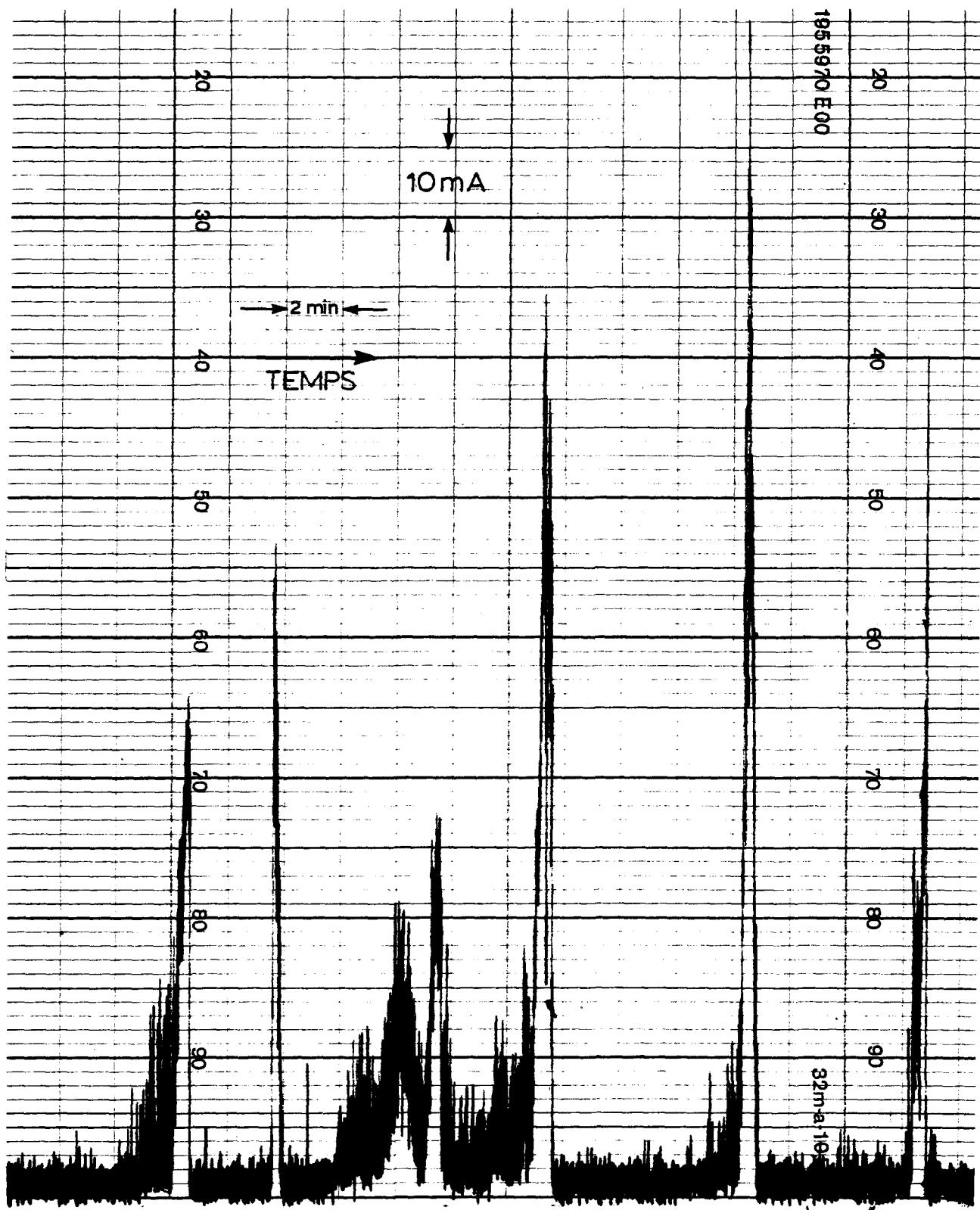


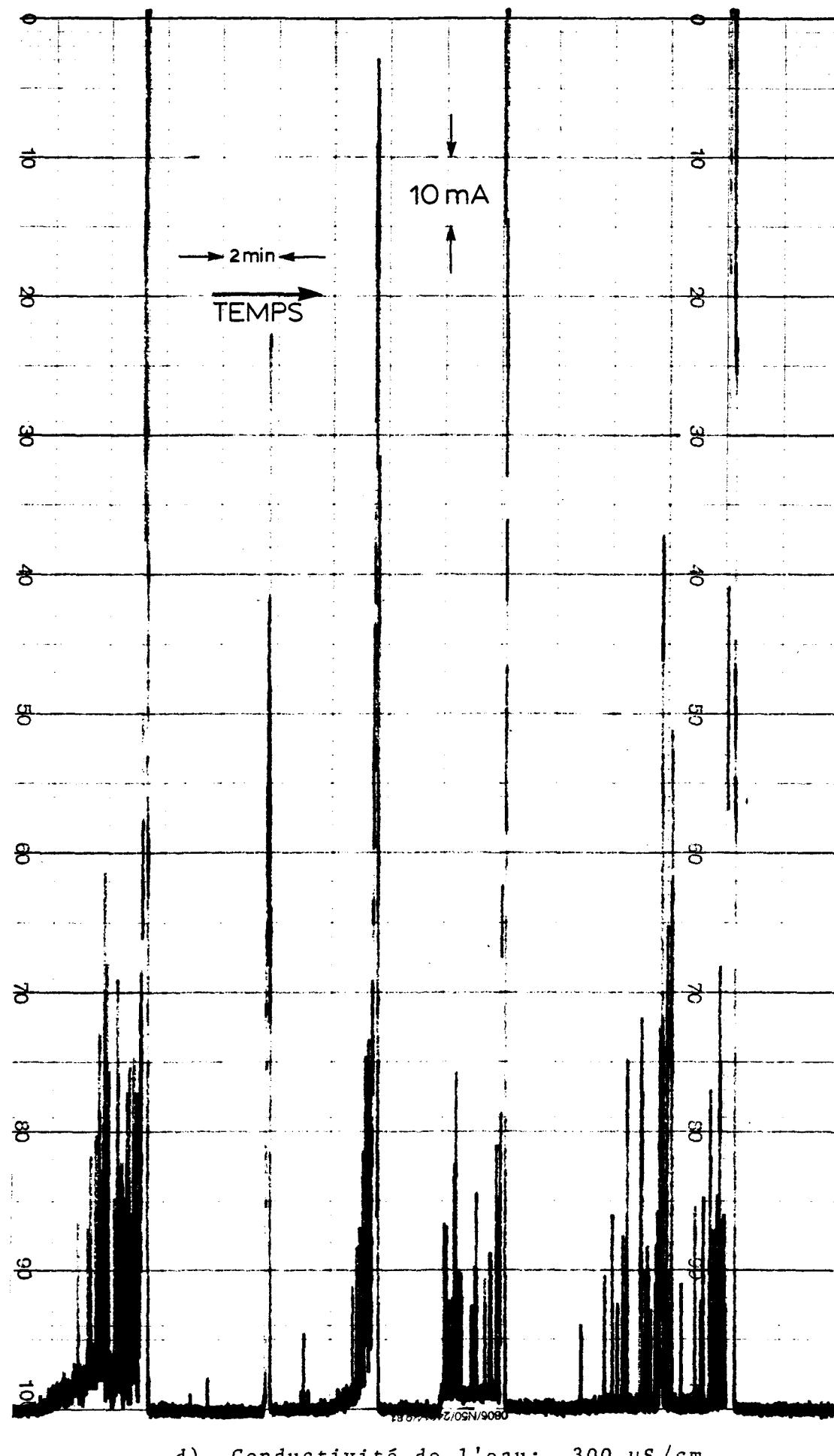
a) Conductivité de l'eau: $57 \mu\text{S}/\text{cm}$



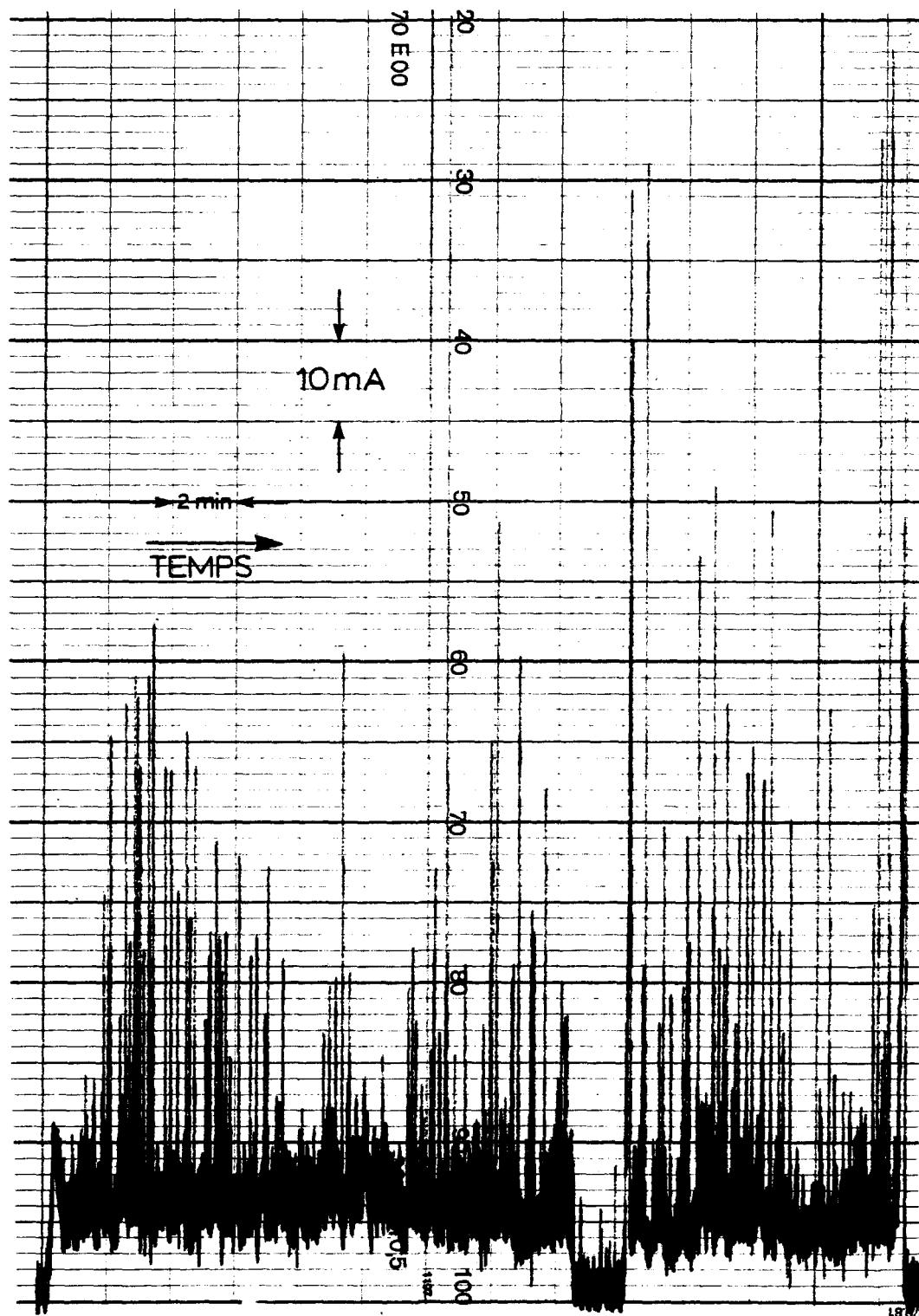
b) Conductivité de l'eau: $150 \mu\text{S}/\text{cm}$

Figure 5.3 Activité de décharge enregistrée pendant la période d'accumulation de la glace en fonction de la conductivité de l'eau

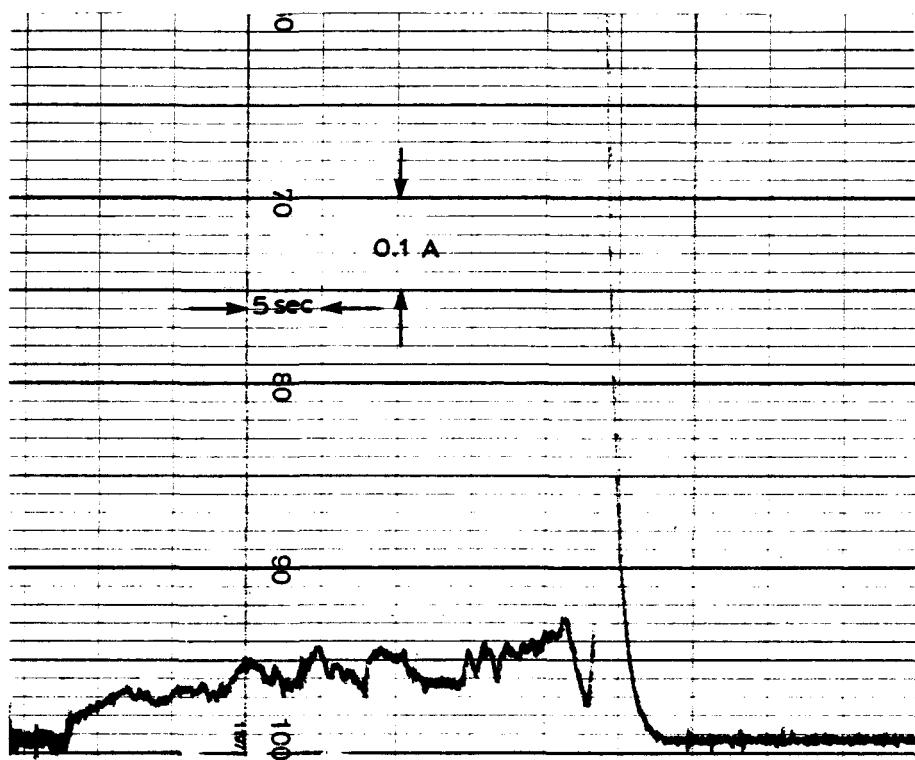
c) Conductivité de l'eau: $200 \mu\text{S}/\text{cm}$



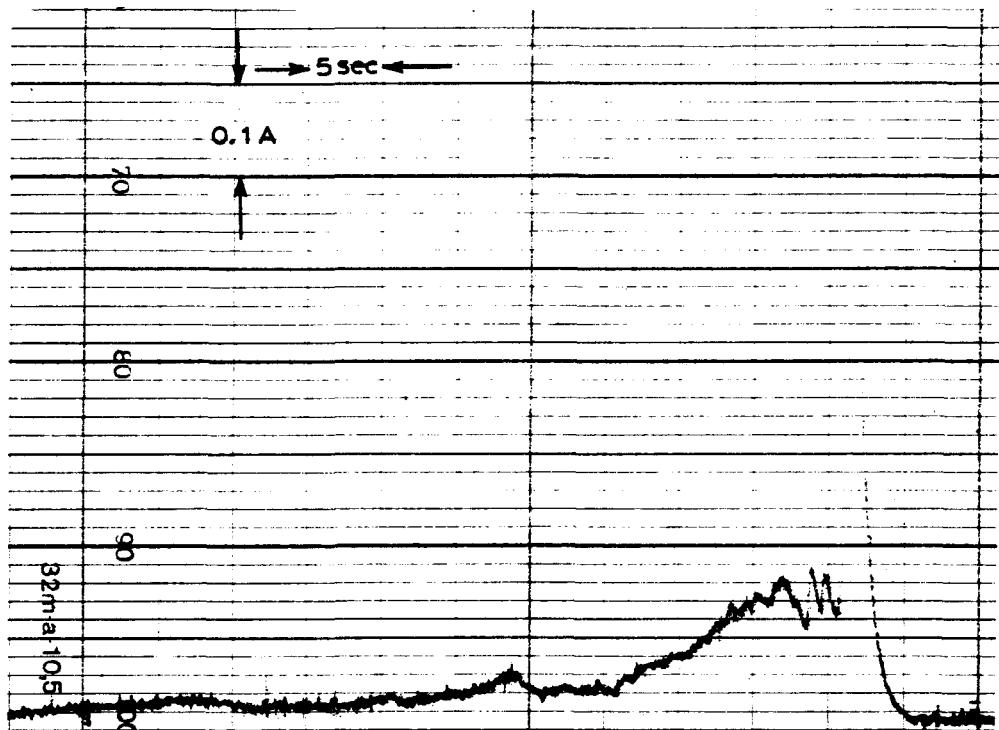
d) Conductivité de l'eau. 300 $\mu\text{s}/\text{cm}$



e) Taux moyen de pollution: 0.05 mg/cm^2

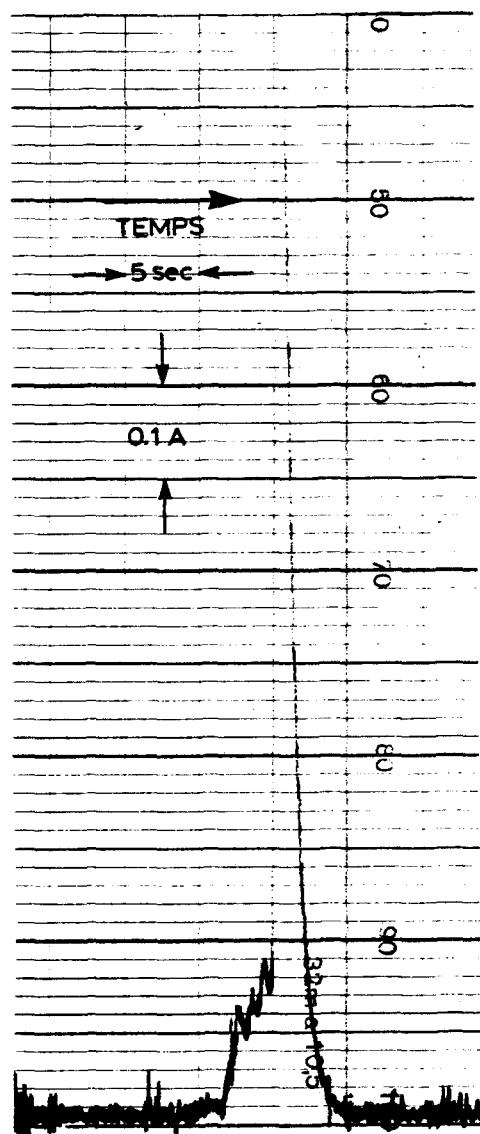


a) Régime d'accumulation de la glace
($c = 57 \mu\text{s}/\text{cm}$)

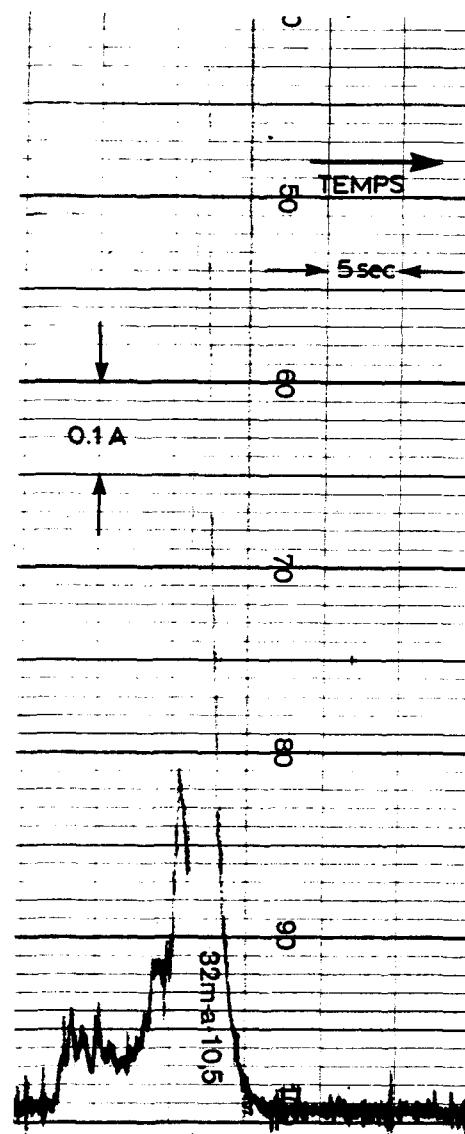


b) Régime de fonte ($c = 57 \mu\text{s}/\text{cm}$)

Figure 5.4 Forme du courant de fuite pendant le passage de l'arc blanc à l'arc de contournement



c) régime d'accumulation
0.05 mg/cm²



d) régime de fonte
0.05 mg/cm²

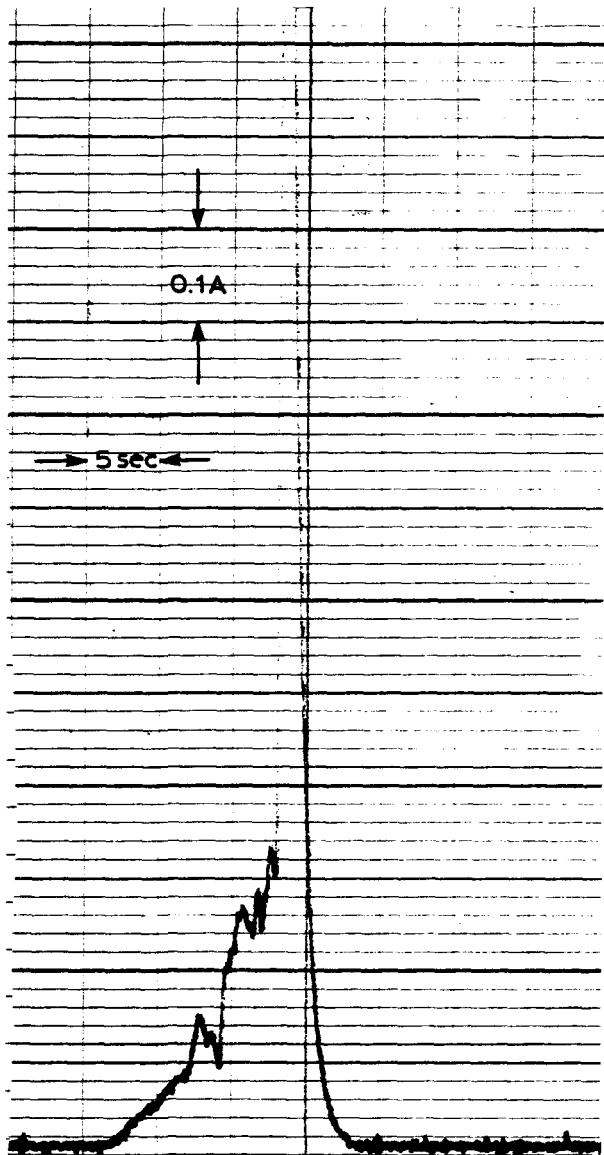
en régime d'accumulation (voir figure 5.5).

5.4 Formation des traces d'érosion en régime de fonte

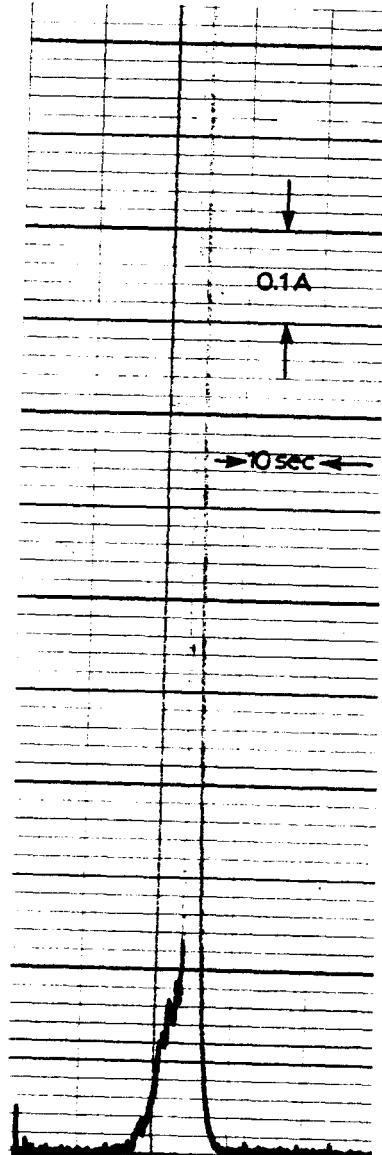
La dégradation de la surface des isolateurs couverts de glace est souvent observée après le passage de l'arc de contournement en régime de fonte. Elle peut se traduire par la fusion locale en raison d'une haute densité de courant à la racine de l'arc. Lorsque le courant augmente, l'arc est plus stable et se trouve donc en contact avec les isolateurs pendant une période plus longue.

Selon Phan et Matsuo [9], en présence de la glace, les traces d'érosion sont placées sur la ligne d'arc, par conséquent, sur le bord extérieur de la plupart des jupes d'isolateurs. Dans notre étude, on a observé, dans la plupart des expériences, la formation d'érosion en bordure des jupes à l'endroit où l'arc se trouve en contact avec la surface des isolateurs et passe rejoindre les glaçons situés au-dessus (voir figure 5.1).

En présence de la glace et de la pollution, on constate que la longueur, et même la profondeur des traces d'érosion, diminuent lorsque le taux de pollution augmente. Cela est dû probablement au fait que le temps de développement de l'arc partiel en arc de contournement diminue



a) c: $150 \mu\text{S}/\text{cm}$



b) c: $300 \mu\text{S}/\text{cm}$

Figure 5.5 Enregistrement du courant de fuite en condition de salinité

lorsque le niveau de contamination augmente (voir figures 5.4 et 5.5).

Il est bon de mentionner ici que les types d'érosion obtenus en régime de fonte et en régime d'accumulation de la glace sont semblables dans les deux cas; l'érosion est observée toujours après le passage d'un arc de contournement.

CONCLUSIONS

Les essais de tenue et de contournement électrique en tension alternatif des isolateurs en verre trempé recouverts de glace dans des conditions de température simulant le régime de fonte permettent de tirer les principales conclusions qui suivent:

1. Pour une chaîne de quatre isolateurs couverts de 2 cm de glace, la tension minimale de contournement en régime de fonte est la plus faible (78 ± 3 kV) lorsque la tension appliquée est augmentée au moment où la température de la glace est entre -0.5°C à 0°C . Ceci indique clairement que la tension V_{MF} dépend de la présence du film d'eau sur la surface de la glace.
2. La tension minimale de contournement des isolateurs givrés en régime de fonte est sensiblement égale à celle mesurée en régime d'accumulation.
3. Dans nos conditions d'expérimentation, où la longueur de la chaîne d'isolateurs est relativement courte, une source de haute

tension ayant un courant de court-circuit de quatre ampères s'est révélée être adéquate.

Lorsque l'on ajoute l'effet de la pollution:

4. La valeur de la tension minimale de contournement diminue lorsque la conductivité de l'eau utilisée pour former la glace passe de 57 à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Pour des conductivités plus grandes que 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la valeur de V_{MF} reste constante. Il en est de même pour le degré de contamination; ainsi, un degré de pollution de 0.05 mg/cm^2 correspond à un taux d'augmentation de la conductivité de l'eau de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et se trouve alors à réduire de 40% la valeur de V_{MF} . D'autre part, lorsque la conductivité de l'eau et le taux de pollution augmentent, l'intensité du courant de fuite augmente pendant la période d'accumulation.

5. Le contournement des isolateurs couverts de glace dépend de l'épaisseur et de la longueur des glaçons à la surface des isolateurs. Cela laisse entendre que le mécanisme de contournement des isolateurs givrés diffère de celui des isolateurs humides et contaminés. Cette différence provient d'une part, de l'amorçage de l'activité de décharge qui, dans le cas des isolateurs couverts de glace, dépend de la présence d'une couche d'eau liquide recouvrant la surface de la glace et, d'autre part, il y

a le passage du courant de fuite et de l'arc qui se fait à l'intérieur des glaçons situés sur la ligne d'arc de la chaîne d'isolateurs. Pour sa part, le contournement des isolateurs humides et contaminés est relié à la formation de bandes sèches sur la surface des isolateurs.

6. Sur le plan pratique, les résultats de cette étude contribuent au développement d'une méthode normalisée pour éprouver le comportement électrique des isolateurs dans les conditions les plus sévères de givrage.

BIBLIOGRAPHIE

1. Kawai M., "Tests on Salt Contaminated Insulators in Artificial and Natural Wet Conditions": IEEE Trans. PAS v PAS-89, (9), Sept. 1969, pp. 1394-1399
2. Obenaus F., "Contamination Flashover and Creepage Path Length": Deutsche, Elektrotechnik, 12, pp. 135-136
3. Neumarker G., "Contamination State and Creepage Path": Deutsche Ahad., Berlin, 1, pp. 352-359 (1959)
4. Hampton B., "Flashover Mechanism of Polluted Insulation": Proc.IEE, III, pp. 985-990 (1964)
5. Hesketh S., "General Criterion for the Prediction of Pollution Flashover": Proc. IEE, No. 114, (1967) pp. 531-532.
6. Khalifa M.M., Morris R.M., "Performance of Line Insulators under Rime Ice": IEEE Trans. Power App. Syst., v. PAS-86, pp. 692-698, June 1967
7. Watanabe Y., "Flashover Tests of Insulators Covered with ice or Snow": IEEE PES Summer Meeting, paper F-77-750-5,

July 1978

8. Hara M. and Phan L.C., "A Study of the Leakage Current of H.V. Insulators Under Glaze and Rime": Can. Elect. Eng. Jour., No.3, 1978, pp. 15-22
9. Phan L.C. and Matsuo H., "Minimum Flashover Voltage of Ice Insulators": IEEE Transactions on Electrical Insulation, v. EI-18, No.6, Dec. 1983, pp. 605-618
10. Fujimura T., Naito K., Hasegawa Y. and Kawaguchi T., "Performance of Insulators Covered with Snow or Ice": IEEE Trans. on Power App. and Syst., v. PAS-98, Oct. 1979, pp. 1621-1631
11. Cherney E.A., "Flashover Performance of Artificially Contaminated and Iced Long-rod Transmission Line Insulators": IEEE Trans. on Power App. and Syst., v. PAS-99, Feb. 1980, pp. 46-52
12. Holte K.C., Chairman, Alexander D.E., Baker D.M., "Application of Insulators in a Contaminated Environment": IEEE Trans. on Power App. and Syst., v. PAS-98, No.5, Sept./Oct. 1979
13. Schneider H.M., "Artificial Ice Tests on Transmission Line Insulators - A Progress Report": IEEE PES Summer Meeting, Paper A 75 491-1, San Francisco, July 1975
14. Rush C.K. and Wardlaw R.L., "Icing Measurements with

a simple Rotating Cylinder": Laboratory Report LR-2-6,
National Aeronautical Establishment, Ottawa, September
1957

15. Meier A. and Niggli, "The Influence of Snow and Ice Deposits on Supertension Transmission Line Insulator Strings with Special Reference to High Altitude Operation": in Progress in Overhead Lines and Cables for 220 KV and above, IEE Conf. Publ. 44, London, England, Sept. 1968, pp. 386-395
16. Phan C.L. and Laforte J.L., "The Influence of Electr-freezing on Ice Formation on H.V.D.C. Transmission Lines": Cold Reg. Res. and Tech., v. 4, No. 1, (1981) pp. 15-25
17. Lee L.Y., Nellis C.L. and Brown S.E., "60 Hz Tests on Ice Coated 500 KV Insulator Strings": IEE PES Summer Meeting, Paper A75-499-4, San Francisco, 1975
18. Renner P.E., Hill H.L. and Ratz O., "Effect of Icing on DC Insulation Strength": IEEE Trans. on Power App. and Syst., v. PAS-90, June 1971, pp. 1201-1206
19. Phan L.C., Matsuo H., Martin R. and Vovan L., "Flash-over Performance of Precontaminated Insulators in Presence of Hard Rime": Trans. of the Can. Elect. Ass., v. 22, 1983

20. Macey R.E., "The Performance of High Voltage, Outdoor Insulation in Contaminated Environments": Trans. of S.A. IEEE, April 1981, pp. 80-92
21. Phan L.C., Matsuo H. et Barahmand S., "Essai de tenue diélectrique sur les isolateurs précontaminés et engivrés": Rapport de recherche présenté à Hydro-Québec, février 1983
22. Phan L.C., Barahmand S., Matsuo H., Vovan L., and Martin R., "Ice Accretion on Insulators of High-Voltage Transmission Lines": 2nd International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Trondheim, Norway, June 19-22, 1984
23. Lambeth P., "Effect of Pollution on High-Voltage outdoor Insulators": Proc. IEEE, Rev. v. 118, No. 9R, Sept. 1971, pp. 1107-1130
24. Kawai M., "AC Flashover Tests at Project VHV on Ice-Coated Insulators": IEEE Trans. PAS, v. PAS-89, Nov./ Dec. 1970, pp. 1800-1807
25. Commission Electrotechnique Internationale, "Techniques des Essais à Haute Tension": Publication 60-2, première édition 1978
26. Association Canadienne de l'Electricité, "Méthode normalisée d'essai de contamination pour des systèmes

- d'isolation à haute tension": Rapport d'études, contrat no. 78-77, Ontario Hydro
27. Grégoire C., Sforzini M., Labbith P.J., Verma M.P., "A Critical Comparison of Artificial Pollution Test Methods for H.V. Insulators": CIGRE Report 33-75 (SC)09 IWD, 1975
28. IEC Report, "Artificial Pollution tests on High-Voltage Insulators to be used on AC Systems": Publication 507, 1975
29. Wu C.T. and Cheng T.C., "Formation Mechanisms of Clean Zones During the Surface Flashover of Contaminated Insulator": IEEE T-ET-13, No.3, June 1978, pp. 149-156
30. Takasu K. and al., "Influence of Voltage Source Capacity on DC Withstand Voltage Characteristics of Artificially Polluted Insulators (Part I)": CRIEPI Report No. 175017, Oct. 1975
31. Kawai M., "Flashover Tests at Project VHV on Salt-Contaminated Insulators, Part II": IEEE Trans. Power App. and Syst., v. PAS-89, No. 8, (Nov./Dec. 1970) pp. 1701-1799
32. Bui H.T., Phan L.C., "HVDC Flashover on the Surface of Conductive Ice": Proc. of the 1984 International Symp. on Elect. Insulation, Montreal, June 11-13, 1984

33. Baker A.C., Kawai M., "A Study on Dynamic Voltage Distribution on Contaminated Insulator Surface": IEEE Power Eng. Society Meeting, New York, January 1973
34. Noboru A., "AC Fog Withstand Test on Contaminated Insulators by Steam Fog" IEEE Trans. on Power Appar. and Syst., v. PAS-101, No. 11, Nov. 1982, pp. 4316-4323
35. Fujimura T., Naito K. and Irie, T., "Performance of Semiconducting Glaze Insulators Under Adverse Conditions": IEEE Trans. on Power App. and Syst., v. PAS-97, No. 3, May/June 1978, pp. 763-771
36. Loberg O.J. and Salthouse C.E., "Dry-Band Growth on Polluted Insulation": IEEE Trans. on Elect. Insulsations, v. EI-6, No. 3, Sept. 1971