

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

(INGENIERIE)

PAR:

MARC-ANDRE DALLAIRE, B. ING.

(GENIE UNIFIE)

CONTOURNEMENT EN COURANT CONTINU ET ALTERNATIF  
DES ISOLATEURS GIVRES, PRECONTAMINES OU PROPRES

JANVIER 1992



### **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.

## AVANT-PROPOS

Le travail qui suit est une synthèse de tous les essais que nous avons effectués en vue d'étudier le contournement électrique des isolateurs antibrouillard en porcelaine précontaminés ou propres. Ceci, dans les régimes d'accumulation ou de fonte.

C'est donc une compilation des résultats expérimentaux obtenus. Les diverses difficultés rencontrées au cours de la réalisation et de l'interprétation des résultats des essais y sont relatées.

N.B.: Dans ce travail, des conclusions particulières sont incorporées à chacune des sections traitant d'un sujet spécifique. Pour une vue d'ensemble de ces conclusions, veuillez lire le résumé qui suit immédiatement à la page ii.

Les valeurs de tensions et de courants mentionnées dans cet ouvrage sont établies pour une chaîne de quatre isolateurs sous tension, sauf indications contraires.

## RESUME

Divers essais furent réalisés dans le but de déterminer le niveau de la tension minimale de contournement  $V_{MF}$  des isolateurs antibrouillard en porcelaine. Ceci, sous tension alternative ou continue, de polarité positive ou négative, dans les régimes d'accumulation ou de fonte.

De façon générale, les résultats obtenus ont montré qu'une augmentation de l'épaisseur de la glace accumulée provoque une diminution du niveau de la tension  $V_{MF}$ . Dans les mêmes conditions atmosphériques d'accumulation, la plus basse tension  $V_{MF}$  est rencontrée sous tension continue négative; même si dans ce dernier cas, aucune augmentation notable de la quantité de glace accumulée n'a été observée.

En régime d'accumulation, la tension appliquée aux isolateurs est augmentée immédiatement après la période d'accumulation de glace pour réaliser l'essai de contournement. Tandis qu'en régime de fonte, une longue période (de 3 à 5 heures) de réchauffement est intercalée entre la période d'accumulation et l'augmentation de la tension. En régime d'accumulation, la température ambiante a été maintenue constante pendant tout l'essai à environ  $-12^{\circ}\text{C}$ ; en régime de fonte, elle a été augmentée de  $-12^{\circ}\text{C}$  à environ  $0^{\circ}\text{C}$  avant l'augmentation de la tension. Afin de s'assurer de la présence d'une couche d'eau à la surface de la glace accumulée sur les isolateurs, il est préférable de prolonger le régime de fonte le plus longtemps possible lorsque la température de  $0^{\circ}\text{C}$  est atteinte. Cependant, il est préférable

d'appliquer plus rapidement la tension d'essai si de fortes décharges érodent la glace tout en entraînant un égouttement prématuré de l'eau de fonte.

En régime d'accumulation sous tensions alternatives ou continues, avec une précontamination modérée de  $0.05 \text{ mg/cm}^2$ , la tension  $V_{MF}$  diminue d'environ 16 % par rapport à sa valeur en l'absence de contamination. Une précontamination légère de  $0.01 \text{ mg/cm}^2$  provoque une diminution de la tension  $V_{MF}$  d'environ 4 % comparativement à celle mesurée avec des isolateurs propres. De façon générale, la tension  $V_{MF}$  est du même ordre de grandeur en courant alternatif (C.A.) qu'en courant continu négatif (C.C.-); elle est environ 18 % plus élevée en courant continu positif (C.C.+).

En régime de fonte, la plus basse tension  $V_{MF}$  est obtenue après avoir accumulé une quantité de givre lourd correspondant à une épaisseur d'au moins 2 cm de glace sur le conducteur témoin. Une baisse d'environ 4 % (3 kV) de la tension  $V_{MF}$  par rapport à sa valeur en régime d'accumulation a été observée pour les tensions alternatives et continues positives. Concernant la polarité négative, cette baisse de tension est de l'ordre de 24 % (18 kV).

Quelle que soit l'épaisseur de la glace accumulée ou la polarité de la tension (positive ou négative), le rapport entre l'énergie électrique fournie aux isolateurs et le volume d'eau éjectée des isolateurs pendant le test de contournement reste constant à  $2.1 \text{ ml/kJ}$ . En tension alternative,

le dit rapport est établi en fonction d'une puissance électrique apparente; la valeur obtenue est de 1.94 ml/kV.A.s.

En régime d'accumulation, des traces d'érosion sont observées à la surface des isolateurs avec une précontamination modérée de 0.05 mg/cm<sup>2</sup>. Des traces d'érosion similaires sont repérables sur des isolateurs non contaminés en régime de fonte sous tension alternative.

## REMERCIEMENTS

Je tiens très sincèrement à remercier mon directeur de thèse, le docteur Masoud Farzaneh, professeur titulaire au département des Sciences Appliquées à l'Université du Québec à Chicoutimi. Ses conseils et encouragements se sont avérés des plus utiles à la réalisation des travaux effectués.

J'exprime également mes plus sincères sentiments de reconnaissance envers le docteur J. Kiernicki pour les discussions enrichissantes ainsi que MM. Mounir Ben-Dalla, Claude D'Amours, Marcel Gauthier, Mario Hamel et Noriyoshi Sugawara pour le support technique et la précieuse collaboration apportés lors de la préparation et de la réalisation des diverses expériences.

## TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS . . . . .	i
RESUME . . . . .	ii
REMERCIEMENTS . . . . .	v
TABLE DES MATIERES . . . . .	vi
 CHAPITRE I - INTRODUCTION . . . . .	 1
1. Introduction . . . . .	2
1.1 Problématique et revue de la littérature . . . . .	2
1.2 Objectifs principaux du présent travail . . . . .	6
 CHAPITRE II - TECHNIQUES EXPERIMENTALES . . . . .	 7
2. Techniques expérimentales . . . . .	8
2.1 Source de haute tension . . . . .	8
2.2 Installation à l'intérieur de la chambre froide . . . . .	11
2.2.1 Isolateurs utilisés . . . . .	12
2.3 Procédure . . . . .	15
2.3.1 Période d'accumulation . . . . .	15
2.3.2 Description des régimes d'accumulation et de fonte . . . . .	16
2.4 Tension appliquée . . . . .	16
2.4.1 Tension de service . . . . .	17
2.4.2 Application de la tension d'essai en régime d'accumulation . . . . .	17
2.4.3 Application de la tension d'essai en régime de fonte . . . . .	18
2.4.4 Détermination de la tension minimale de contournement (VMF) . . . . .	19
 CHAPITRE III - ETUDE DU COURANT DE FUITE SOUS TENSION ALTERNATIVE . . . . .	 20
3. Etude du courant de fuite sous tension alternative . . . . .	21



3.1	Evolution du courant pendant un essai . . . . .	21
3.1.1	Provenance des décharges et nature du courant . . . . .	23
3.2	Observations visuelles associées au courant de fuite . . . . .	24
3.3	Corollaire sur la conductivité de la glace accumulée . . . . .	26
CHAPITRE IV - ETUDE DE LA TENSION MINIMALE DE CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS GIVRES EN REGIME D'ACCUMULATION . . . . .		27
4.	Etude de la tension minimale de contournement des isolateurs givrés en régime d'accumulation . . . . .	28
4.1	Effet de la polarité sur la quantité de glace accumulée . . . . .	28
4.1.1	Résultats expérimentaux . . . . .	28
4.1.2	Observations . . . . .	29
4.1.3	Conclusion . . . . .	30
4.2	Essais de contournement électrique sur des isolateurs précontaminés . . . . .	33
4.2.1	Procédure de contamination des isolateurs . . . . .	33
4.2.2	Niveau de contamination . . . . .	35
4.2.3	Tension appliquée pendant l'accumulation . . . . .	36
4.2.4	Résultats expérimentaux . . . . .	37
4.2.5	Observations . . . . .	37
4.2.6	Remarques . . . . .	38
4.2.7	Conclusion . . . . .	39
CHAPITRE V - ESSAIS DE CONTOURNEMENT EN REGIME DE FONTE AVEC DES ISOLATEURS PROPRES EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE GLACE ACCUMULÉE . . . . .		49
5.	Essais de contournement électrique en régime de fonte avec des isolateurs propres en fonction de l'épaisseur de glace accumulée . . . . .	50
5.1	Procédure expérimentale . . . . .	50
5.1.1	Installation de l'équipement supplémentaire . . . . .	50
5.1.2	Description de la procédure . . . . .	53
5.2	Détermination des conditions les plus sévères . . . . .	53

5.2.1	Réchauffement effectué avec 3 calorifères . . . . .	54
5.2.2	Réchauffement effectué avec 2 calorifères . . . . .	57
5.2.3	Réchauffement effectué avec 1 calorifère . . . . .	60
5.2.4	Conclusion . . . . .	61
5.3	Essais de contournement en tension alternative . . . . .	63
5.3.1	Résultats expérimentaux . . . . .	63
5.3.2	Observations . . . . .	64
5.3.3	Dégradation des isolateurs . . . . .	76
5.3.4	Conclusion . . . . .	76
5.4	Essais de contournement en tension continue . . . . .	77
5.4.1	Résultats expérimentaux . . . . .	78
5.4.2	Observations . . . . .	78
5.4.3	Conclusion . . . . .	80
5.5	Comparaison des résultats obtenus en fonction de la nature de la tension appliquée . . . . .	83
5.6	Observations sur l'expérimentation des essais en régime de fonte . . . . .	88
5.7	Effets de la durée et de la puissance de l'arc blanc sur la tension $V_{MF}$ . . . . .	89
5.7.1	Résultats expérimentaux . . . . .	90
5.7.2	Conclusion . . . . .	90
5.8	Relation entre l'énergie dégagée par l'arc blanc et le volume d'eau de fonte . . . . .	92
5.8.1	Résultats expérimentaux . . . . .	92
5.8.2	Conclusion . . . . .	92
5.9	Facteur de puissance en tension alternative . . . . .	94
5.9.1	Résultats expérimentaux . . . . .	94
5.9.2	Conclusion . . . . .	95
CHAPITRE VI - CONCLUSIONS . . . . .		104
6.	Conclusions . . . . .	105
REFERENCES . . . . .		108

## INTRODUCTION

## 1. Introduction

### 1.1 Problématique et revue de la littérature

L'augmentation constante de la consommation électrique nécessite régulièrement la construction de nouvelles centrales électriques. Pour certains pays, comme le Canada (et tout particulièrement la province de Québec), les autorités ont mis l'accent sur le développement et l'exploitation de l'énergie hydro-électrique. Cela signifie le harnachement de nouveaux cours d'eau dont le potentiel économique reste suffisamment concurrentiel par rapport aux autres formes de ressources énergétiques.

Cependant, les centrales ainsi aménagées sont souvent situées en des lieux qui sont de plus en plus éloignés des centres de consommation. Les lignes de transport d'énergie doivent dans ce cas traverser de vastes étendues parfois montagneuses, des centres urbains et industriels, passer tout proche des lacs ou au bord de la mer.

Sous les climats nordiques et semi-nordiques comme celui de notre province, ces conditions de parcours jumelées à la présence de diverses intempéries (neige, givre ou verglas) engendrent des situations défavorables propices à provoquer des pannes dans l'acheminement de l'énergie produite. Les chaînes d'isolateurs des réseaux électriques à haute tension, qui ont une fonction sécuritaire essentielle, ainsi que les structures portantes sont alors soumises à divers types de bris:

- rupture mécanique et effondrement dus au poids de la glace accumulée, ceci se produit surtout au niveau des pylônes porteurs et des câbles conducteurs;
- contournement électrique des isolateurs dû à une surtension par la foudre;
- contournement électrique des isolateurs dû à une surtension de manoeuvre;
- contournement électrique des isolateurs propres ou précontaminés et recouverts de givre.

C'est à ce dernier cas, le contournement des isolateurs en présence de glace atmosphérique, que nous nous sommes intéressés.

La contamination des isolateurs provient de particules en suspension dans l'air (sel de mer, poussières industrielles ou naturelles) qui se déposent sur leurs surfaces. En présence de manifestations de l'humidité atmosphérique (brouillard, pluie, rosée, neige fondante, givre ou verglas), une couche déposée devient conductrice d'électricité. Obenaus [1], Hampton [2], Neumarker [3] et Hesketh [4] ont étudié le cas des isolateurs humides et contaminés; selon eux, l'amorçage et le développement des arcs pouvant mener au contournement sont dus à la présence de bandes sèches à la surface des isolateurs. Lorsque le degré d'humidité relative est suffisamment élevé, des décharges électriques irrégulières commencent à apparaître; il

en résulte une évaporation causée par l'énergie dissipée lors de l'augmentation du courant de fuite; la répétition de ce cycle d'accroissement de l'humidité, des décharges, du courant de fuite et de l'évaporation entraîne la création puis l'élargissement de ces bandes sèches. Le parcours conducteur à la surface des isolateurs se trouve alors composé d'une succession de bandes alternativement humides et sèches, la chute de tension étant concentrée aux bornes de ces dernières; les décharges se développent en arcs passant au-dessus des bandes sèches et peuvent aboutir au contournement complet de la chaîne d'isolateurs; le contournement se produit lorsque la tension appliquée est suffisamment élevée pour que le gradient de la tension de l'arc soit supérieur au gradient de la tension de la couche contaminante. Khalifa et Morris [5] sont parmi les premiers chercheurs qui ont étudié l'effet de la glace atmosphérique sur la tension de contournement des isolateurs de ligne. Sous l'effet de la haute tension, il y a apparition de décharges électriques à la pointe des glaçons suspendus aux rebords des isolateurs; c'est là que le gradient est le plus intense. Il est à noter que si la température ambiante monte et atteint le point de fusion de la glace (tout près de  $0^{\circ}\text{C}$ ), l'apparition d'un film d'eau à la surface de la glace peut accélérer et accentuer ce processus. De la non-uniformité de la glace accumulée, résulte une augmentation de la densité de courant là où l'épaisseur de la glace est moindre. En ces endroits, la température de la glace augmente, celle-ci devient plus conductrice et le courant de fuite croît. Graduellement, les décharges se transforment en arcs partiels. Ceux-ci se propagent à la surface et à l'intérieur des glaçons, dans des canaux créés par la fonte locale de la glace. Les arcs

partiels finissent par se rejoindre pour former un long arc unique qui aboutira éventuellement au contournement complet. Selon Watanabe [6], cela se produit lorsque l'arc dépasse une certaine longueur. Cette longueur dépend de la conductivité électrique de l'eau utilisée pour former la glace [7].

La température ambiante, la vitesse du vent et la teneur en eau sont parmi les facteurs qui déterminent la quantité et le type de la glace accumulée et par conséquent influencent la tension minimale de contournement  $V_{MF}$ . Hara, Phan et Matsuo [7-8] ont montré que c'est en accumulant une épaisseur d'au moins deux centimètres de givre lourd (densité de  $0.87 \text{ g/cm}^3$ ) formé à  $-12^\circ\text{C}$  et à une vitesse de vent pouvant aller jusqu'à  $5.5 \text{ m/sec}$  qu'une valeur minimale de  $V_{MF}$  est obtenue.

Au cours d'essais réalisés par Cherney [9], la pluie verglaçante sans contamination n'a jamais provoqué de contournement sous la tension de service.

En présence de givre lourd et d'une précontamination modérée de  $0.05 \text{ mg/cm}^2$ , la tension  $V_{MF}$  subit une baisse d'environ  $20 \%$  par rapport à sa valeur sans contamination [8]. D'autres parts, Kawai [10] a noté qu'avec une légère précontamination ( $0.01$  et  $0.02 \text{ mg/cm}^2$ ), le niveau de la tension  $V_{MF}$  est à peine moins élevé qu'en l'absence de contamination.

Il est à noter que très peu d'études ont été réalisées dans le but de déterminer l'influence de la variation de la température ambiante sur la tension de contournement des isolateurs givrés, tout particulièrement sous tension continue.

## 1.2 Objectifs principaux du présent travail

Les objectifs suivants ont été fixés pour la présente étude:

- 1) En fonction de la nature de la tension appliquée, comparer la quantité de glace accumulée sur des isolateurs exposés aux mêmes conditions atmosphériques.
- 2) Immédiatement après l'accumulation de glace, déterminer la tension minimale de contournement des isolateurs précontaminés recouverts de deux centimètres de givre lourd.
- 3) Avec des isolateurs propres, déterminer le niveau de la tension  $V_{MF}$  en régime de fonte en fonction de l'épaisseur de la glace accumulée.

N.B.: Les régimes de fonte et d'accumulation sont définis à la section 2.3.2 du présent travail.



## **CHAPITRE II**

### **TECHNIQUES EXPERIMENTALES**

## 2. Techniques expérimentales

### 2.1 Source de haute tension

La haute tension en courant continu est produite à l'aide de l'ensemble présenté à la figure 1 de la page 10. Il s'agit d'un transformateur T, 120 kV, 125 kVA ayant une impédance de court-circuit d'environ 7 % et d'un circuit redresseur monté en doubleur de tension. Le transformateur est connecté à la sortie d'un régulateur Bonar Brentford de 600 V, 240 kVA d'une impédance de sortie de 2 %. Le courant de court-circuit à la sortie du transformateur est d'environ 11 A. Les caractéristiques des éléments constituant le redresseur sont les suivantes:

C1= 1.9  $\mu$ F (120 kV)

C2= 1.9  $\mu$ F (120 kV)

Rp= 13.6 k $\Omega$   $\pm$  20 % (résistance d'amortissement)

D1, D2: diodes à H.T. (120 kV)  $I_n$ = 2 A pendant 2 sec.

Lx= 9 A pendant 500 msec.

Rm: diviseur résistif de 140 M $\Omega$ .

Un des problèmes caractéristiques rencontrés avec la mesure de la tension de contournement en courant continu est la chute de tension inévitable qui se produit lors du contournement. En effet, même avec une source très puissante de 750 kV à 2.5 A, Naito et al. [11] ont observé que la chute de tension est d'environ 5 %. Pour diminuer cette imprécision au moment du contournement, il nous faut compenser manuellement la chute de tension en agissant sur la tension primaire du transformateur. L'erreur de

mesure est finalement d'environ 5 % en présence de la résistance de protection  $R_p$ .

Pour ce qui est des essais en tension alternative, la borne à haute tension de la chaîne d'isolateurs est tout simplement reliée directement à la sortie du transformateur.

La mesure du courant de fuite est assurée par une faible résistance d'une centaine d'ohms ( $100\ \Omega$ ) introduite en série dans le circuit de mise à la terre. Un système de sécurité à très forte impédance est branché en parallèle avec cette résistance. Lorsque le courant dépasse un niveau pré-établi ( $500\ \text{mA}$ ) pendant une période d'environ  $1/20$  de seconde (3 cycles), ce système interrompt automatiquement l'alimentation électrique des isolateurs. Ceci limite efficacement les dommages pouvant être causés aux installations au cours d'un contournement.

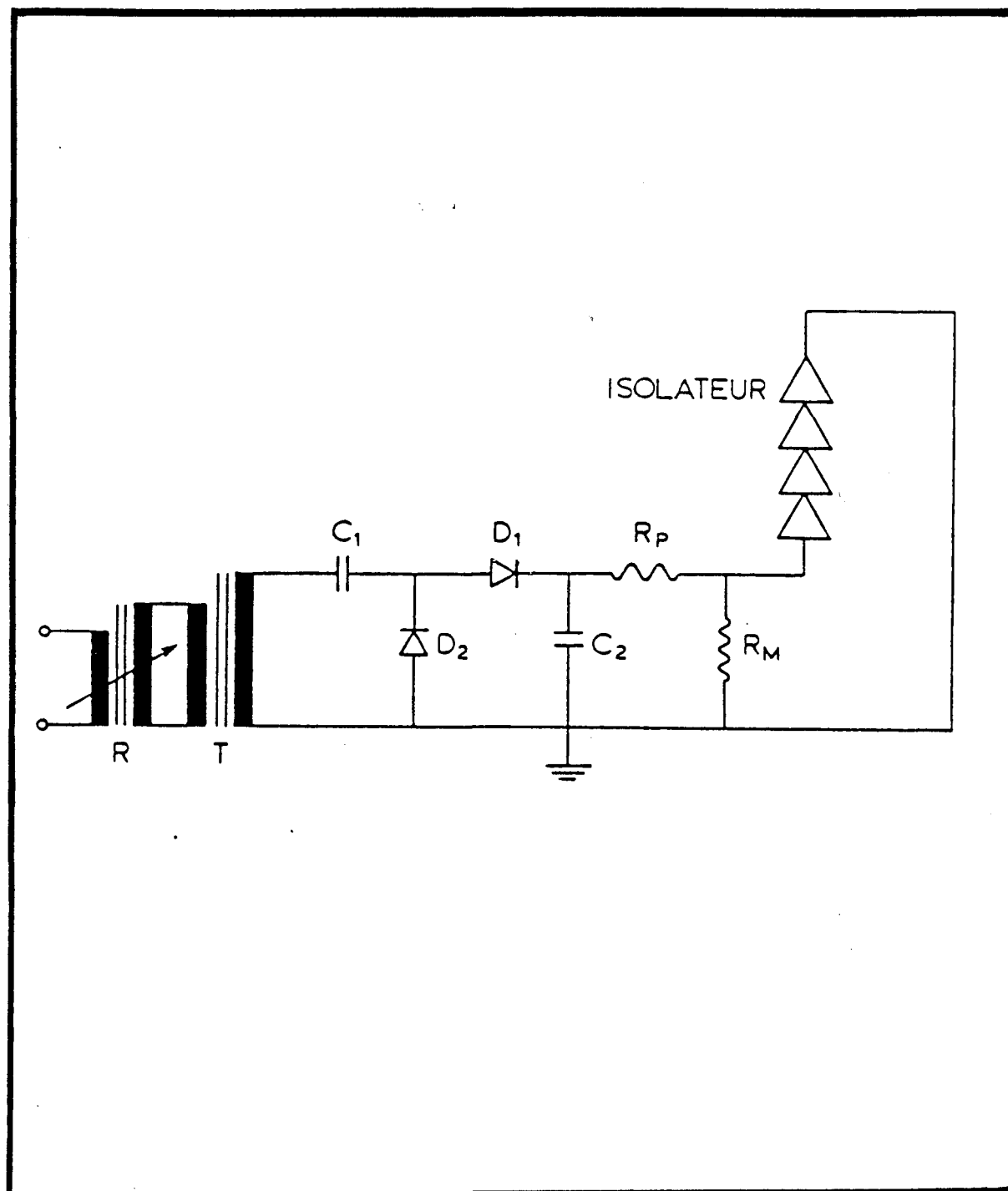


Figure 1: Source de haute tension en courant continu.

## 2.2 Installation à l'intérieur de la chambre froide

Les essais ont été effectués dans une chambre froide de 4.8 m X 2.8 m X 3.5 m dont la température minimale peut atteindre  $-35^{\circ}\text{C}$ . La figure 3 de la page 13 représente le montage expérimental utilisé pour simuler la formation de la glace sur les isolateurs. Le type de glace le plus sévère, soit le givre lourd (accumulé à  $-12^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ), est formé au cours de ces expériences. Les isolateurs sont suspendus verticalement dans la chambre froide alors que les gouttelettes surfondues sont dirigées sur les isolateurs presque horizontalement par un système de ventilateurs placés derrière une boîte rectangulaire contenant de petits tubes pour réduire la turbulence. Avant de commencer le dépôt de la glace, les isolateurs sont nettoyés et séchés soigneusement; ils sont ensuite installés dans la chambre froide pour y refroidir pendant au moins 90 minutes avant le début de chaque expérience.

Cinq gicleurs pneumatiques assurent la formation d'un brouillard de fines gouttelettes d'eau.

### 2.2.1 Isolateurs utilisés

Les isolateurs testés pendant les essais sont en porcelaine et semblables à ceux que l'on retrouve sur les lignes de transport d'énergie en courant continu. La figure 2, qui suit, illustre le type d'isolateurs utilisés pour effectuer les divers essais. Leurs caractéristiques sont les suivantes:

- isolateurs antibrouillard de marque NGK
- type: porcelaine
- nombre d'unité: 4
- pas: 17 cm
- diamètre: 32 cm
- distance de fuite: 54.5 cm
- résistance mécanique: 220 kN

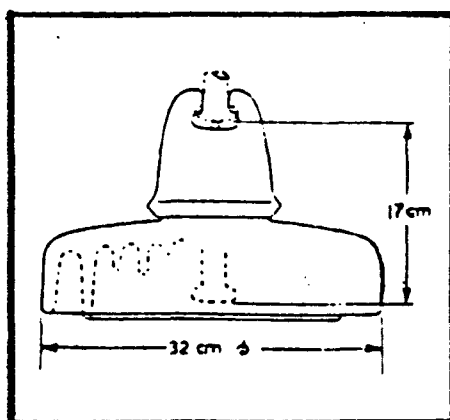


Figure 2: Type d'isolateurs utilisés.

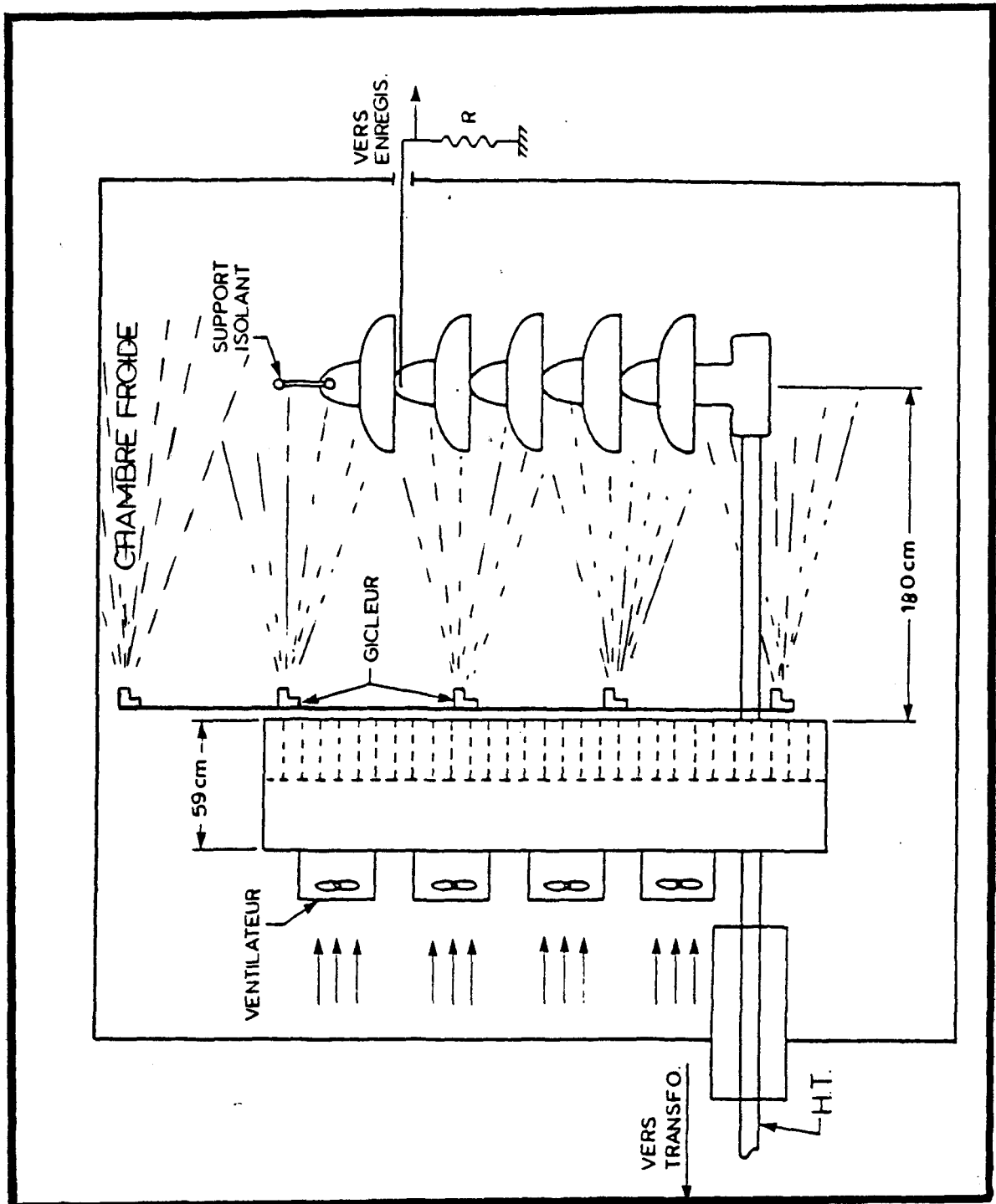


Figure 3: Montage expérimental utilisé pour simuler la formation de glace sur les isolateurs.

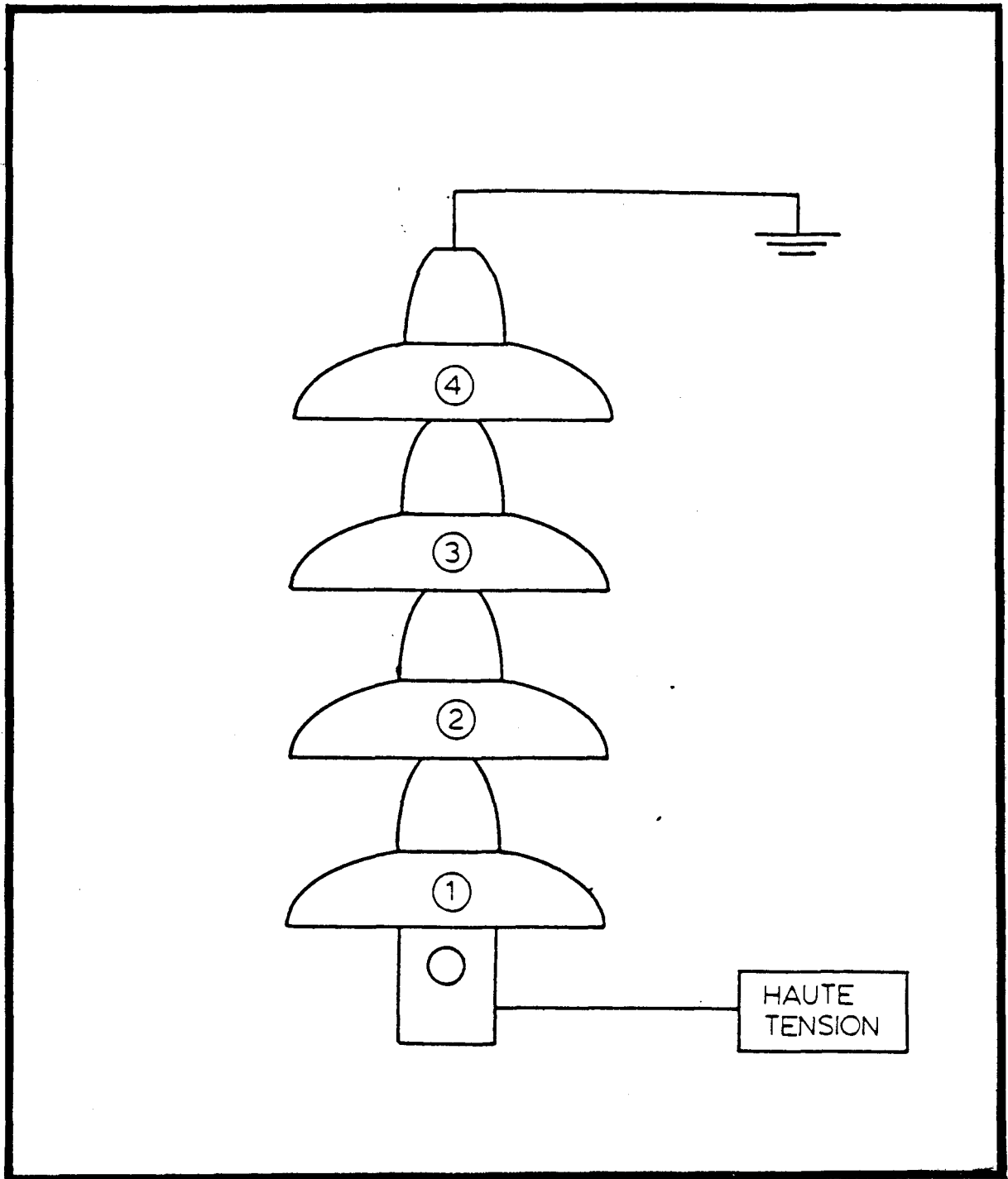


Figure 4: Identification des isolateurs utilisés pour les tests de contournement.



## 2.3 Procédure

### 2.3.1 Période d'accumulation

Les expériences peuvent être réalisées en régime d'accumulation ou de fonte sur des isolateurs propres ou précontaminés. La première étape de chacun de ces essais est cependant identique. Elle consiste à accumuler la glace sous forme de givre lourd sur un côté de la chaîne d'isolateurs. C'est la période d'accumulation.

Pour produire le givre lourd, les paramètres expérimentaux dans la chambre froide étaient les suivants:

- vitesse du vent: 3.3 m/s;
- conductivité de l'eau:  $73 \pm 6 \mu\text{S/cm}$  à  $20^\circ\text{C}$  (eau du robinet);
- température ambiante:  $-12^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ;
- diamètre moyen des gouttelettes d'eau: 85  $\mu\text{m}$  (pression d'eau et d'air à l'entrée des gicleurs: 25 et 15 psig respectivement);
- débit total de l'eau: 0.7 l/min (avec 5 gicleurs).

Les conditions atmosphériques ci-dessus favorisent la formation du givre lourd d'une densité de  $0.87 \text{ g/cm}^3$ :

Egalement dans ces conditions, la glace s'accumule avec un taux constant de 1.33 cm par heure. L'épaisseur de glace est mesurée sur un conducteur témoin d'un diamètre de 3.8 cm placé au-dessus de la chaîne

d'isolateurs et qui révolutionne à 1 tour par minute [8]. Ce conducteur n'est pas sous tension. L'épaisseur de la glace accumulée sur le conducteur témoin donne une indication de la quantité de la glace accumulée sur la chaîne d'isolateurs; cette épaisseur constitue le paramètre d'essai expérimental.

### 2.3.2 Description des régimes d'accumulation et de fonte

Un essai est réalisé en régime d'accumulation lorsque la tentative de contournement est faite dans les quelques minutes qui suivent la fin de la période d'accumulation du givre lourd sur les isolateurs. En régime de fonte, une longue période (de 3 à 5 heures) de réchauffement est intercalée entre la période d'accumulation et la tentative de contournement. En régime d'accumulation, la température ambiante demeure constante à environ  $-12^{\circ}\text{C}$ . En régime de fonte, la température à l'intérieur de l'enceinte réfrigérée se stabilise en fin de compte aux environs du point de fusion de la glace.

### 2.4 Tension appliquée

Pendant la durée d'un essai, la chaîne d'isolateurs est continuellement sous tension. Au cours de la période d'accumulation, l'application de cette tension est interrompue à toutes les 20 minutes pour une durée d'environ 2½ minutes alors que l'on doit pénétrer dans l'enceinte réfrigérée. Cette

opération est nécessaire pour dégager le givre incrusté dans les grillages; ce qui assure une meilleure circulation d'air et permet d'obtenir une vitesse de vent plus régulière. Au cours du temps, cette régularisation favorise une accumulation de glace plus uniforme.

#### 2.4.1 Tension de service

La tension de service  $V_0$  est celle qui est appliquée au cours de la période d'accumulation. Son niveau est habituellement de 60 kV (15 kV par isolateur), sauf indications contraires.

#### 2.4.2 Application de la tension d'essai en régime d'accumulation

Lors des essais réalisés en régime d'accumulation, la procédure d'application de la tension est la suivante. Durant la période d'accumulation, lorsque la glace accumulée sur le conducteur témoin atteint l'épaisseur désirée, les ventilateurs ainsi que la projection des gouttelettes d'eau sont arrêtées.

Une série de manipulations routinières: prise de photos de l'état de la glace accumulée sur les isolateurs, diminution de la sensibilité de l'enregistreur du courant de fuite par exemple; sont à ce moment effectuées en l'absence de haute tension. Après le délai de 2½ minutes, la tension

d'essai  $V_a$  est alors appliquée directement à un niveau prédéterminé; elle y est maintenue jusqu'à la fin de l'essai. Il est à noter que pendant toutes ces étapes, la température ambiante demeure toujours à environ  $-12^{\circ}\text{C}$ .

Etant donné le niveau de contrôle obtenu sur la régulation de la source de tension, l'écart entre les différentes valeurs choisies ne peut être réduit à un minimum inférieur à 3 kV. Les valeurs de la tension d'essai  $V_a$  correspondent donc à des multiples entiers de 3 kV, la référence de départ étant la tension de service  $V_o$  de 60 kV.

#### 2.4.3 Application de la tension d'essai en régime de fonte

D'abord, on effectue l'accumulation d'une épaisseur prédéterminée de glace sous forme de givre lourd sur quatre unités d'isolateurs. Après avoir accumulé la glace, la projection du brouillard de gouttelettes d'eau est alors interrompue en même temps que les ventilateurs sont arrêtés.

Une série de manipulations: prise de photos de la glace accumulée sur les isolateurs, pose des éléments chauffants, etc...; est effectuée dans la chambre froide. Cette opération dure de 4 à 5 minutes. La température ambiante est toujours maintenue à  $-12^{\circ}\text{C}$ .

Ensuite, le système de refroidissement est arrêté et la température de la chambre est augmentée. C'est la période de fonte qui commence. Lorsqu'un

film d'eau est formé à la surface de la glace, la tension  $V_0$  appliquée durant l'accumulation de glace est réajustée à une valeur prédéterminée  $V_a$  en attente du résultat final (contournement ou tenue de l'arc blanc). Des essais complémentaires [16 à 19] montrent d'ailleurs que la glace fondant en premier lieu produit de l'eau ayant une conductivité électrique relativement élevée. Ceci augmente les probabilités de contournement [20].

Il est à noter que jusqu'à l'application de la tension d'essai, c'est la tension de service  $V_0$  (15 kV par isolateur, sauf indications contraires) qui est appliquée au montage. Elle est cependant évidemment interrompue chaque fois qu'on doit pénétrer à l'intérieur de la chambre froide.

#### 2.4.4 Détermination de la tension minimale de contournement ( $V_{mf}$ )

L'abréviation  $V_{mf}$  provient de l'expression anglaise: Minimum Flashover Voltage. Comme son nom l'indique, pour des conditions d'accumulation particulières, la tension  $V_{mf}$  est celle où au moins un contournement s'est produit; et qu'en deçà de laquelle aucun contournement n'a jamais été observé au cours de trois essais au minimum. On considère qu'il y a contournement de la chaîne d'isolateurs lorsque les bornes de la haute tension et de mise à la terre sont reliées par un arc lumineux et continu. Le courant de fuite atteint subitement des niveaux supérieurs à 500 mA.

### CHAPITRE III

#### ETUDE DU COURANT DE FUITE SOUS TENSION ALTERNATIVE

### 3. Etude du courant de fuite sous tension alternative

#### 3.1 Evolution du courant pendant un essai

D'un essai à un autre, bien qu'évoluant selon la même tendance, la variation du courant de fuite n'est cependant pas exactement et rigoureusement identique. De façon globale, la figure 5 qui suit en est une représentation schématique [7].

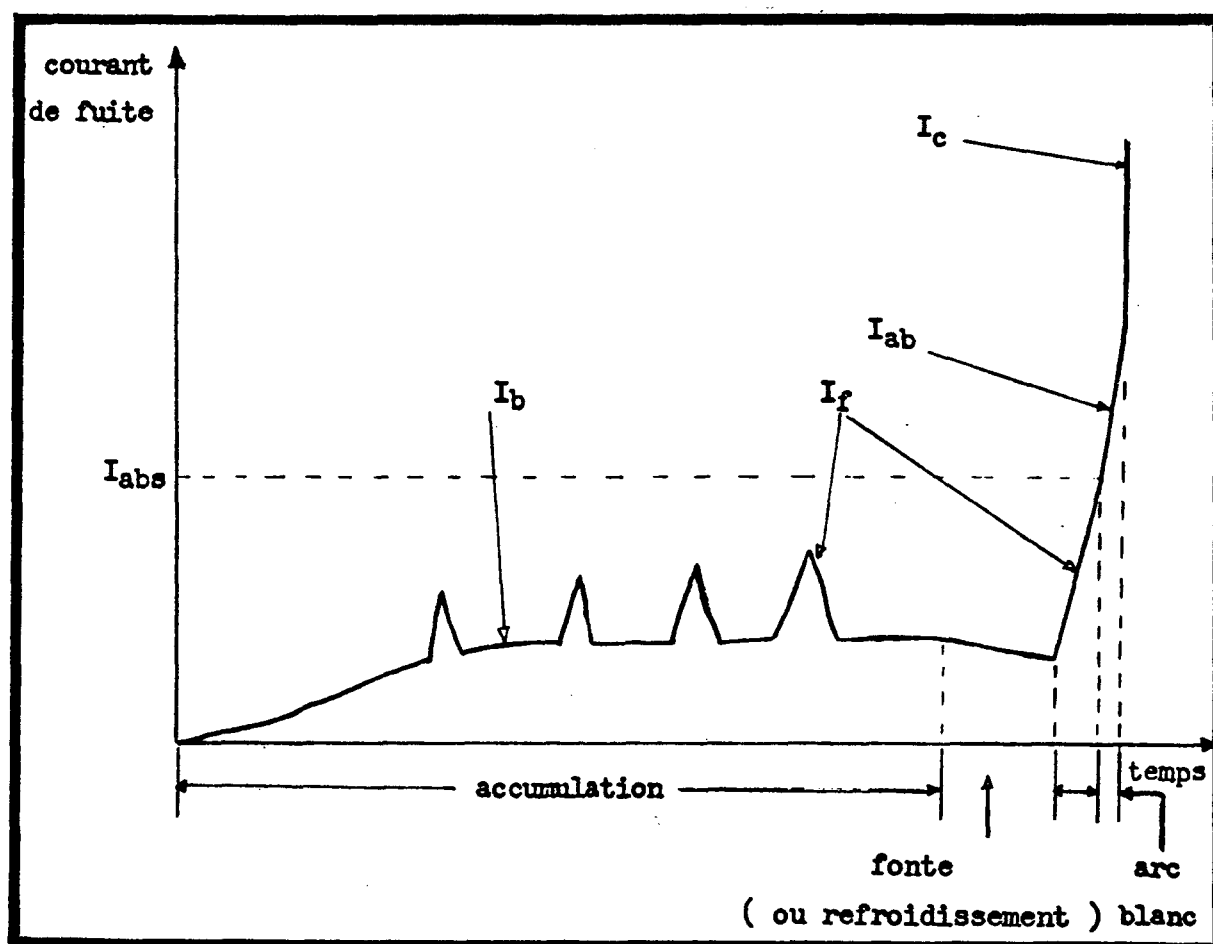


Figure 5: Représentation schématique de l'évolution du courant de fuite au cours d'un essai réalisé sous tension alternative.

Les composantes du courant sont les suivantes (c.f. figure 5 de la page précédente).

- $I_b$ : Courant de fuite de base. Il est lié à de relativement faibles décharges partielles d'une intensité maximale d'environ 1 mA. L'égouttement de l'eau à l'extrémité des glaçons provoque des variations aléatoires de son amplitude.
- $I_f$ : Courant de fonte. Il se produit de façon quasi simultanée avec  $I_b$ . Il apparaît moins fréquemment que ce dernier, mais il possède une bien plus forte intensité maximale (de 30 à 70 mA). Il se propage dans un film d'eau (d'une conductivité sensiblement supérieure à celle de la glace) situé à la surface de la glace accumulée.
- $I_{ab}$ : Courant d'arc blanc. Après une période de refroidissement ou de fonte (sans projection de gouttelettes d'eau) et suivant la présence de décharges de fonte provoquées par l'application de la tension d'essai  $V_a$ , le courant  $I_f$  atteint une valeur de seuil  $I_{abs}$  d'environ 20 mA. À ce moment s'amorce l'arc blanc. Le passage de  $I_f$  à  $I_{ab}$  est très rapide et quasi imperceptible. Il se produit lorsque le taux de fonte de la glace due à l'énergie dissipée par le courant de fonte est supérieur au taux de reformation de la glace due à la basse température. La transformation des effluves de fonte en un arc blanc est accompagnée d'une remarquable augmentation de l'intensité lumineuse dans la colonne de décharge. L'arc blanc



désigne l'intense activité électrique concentrée en une trace d'air ionisé très lumineuse qui précède un éventuel arc de contournement.

- $I_c$ : Courant de contournement. Il se produit évidemment si la tension d'essai  $V_a$  qui est appliquée est suffisamment élevée. Lorsque le courant  $I_{ab}$  atteint un seuil situé entre 200 et 250 mA, l'arc blanc s'allonge et aboutit au contournement complet de la chaîne d'isolateurs. Il est à noter que même si la tension appliquée est égale ou légèrement supérieure au niveau de la tension  $V_{MF}$ , il arrive parfois que la tenue d'un arc blanc soit observée.

### 3.1.1 Provenance des décharges et nature du courant

L'activité électrique associée avec les courants de fuite  $I_b$  et  $I_f$  est une manifestation de l'effet couronne. L'activité de décharge électrique est principalement localisée entre les glaçons suspendus à un isolateur et la glace accumulée sur la surface de l'isolateur immédiatement situé en dessous de ces glaçons. L'activité électrique est essentiellement concentrée entre l'isolateur inférieur et la borne soumise à la haute tension.

Le courant de base  $I_b$  provient de décharges partielles allant de la pointe effilée des glaçons vers le plan que forme la surface de la borne soumise à la haute tension (le sabot enserrant le câble conducteur).

Le courant de fonte  $I_f$  provient de plus fortes effluves dont l'origine est une aspérité sur la borne haute tension qui peuvent aller s'échouer sur la surface concave formée par l'ensemble des glaçons s'égouttant du rebord de l'isolateur inférieur. Ces décharges peuvent aussi contourner cet isolateur en se propageant à l'intérieur de la couche de glace et former ainsi un canal conducteur qui facilitera par la suite l'amorce puis le développement d'un éventuel contournement.

Le courant d'arc blanc  $I_{ab}$  est très difficile à distinguer du courant de fonte  $I_f$ ; car il en est l'extension et il se développe de la même façon par le même chemin. On peut cependant les différencier par le fait qu'en présence de  $I_{ab}$ , les décharges du courant de base  $I_b$  s'atténuent jusqu'à disparaître. Ce qui n'est pas le cas lorsqu'il y a successivement présence des courants de fuite  $I_b$  et  $I_f$ .

### 3.2 Observations visuelles associées au courant de fuite

Pendant les vingt premières minutes d'un essai, une couche de glace se forme sur les isolateurs et les glaçons s'allongent de plus en plus. Un courant de fuite essentiellement résistif est alors enregistré. Lorsque les glaçons suspendus à un isolateur sont assez près (de 1 à 2 cm) de la coupole de celui placé en-dessous, de faibles décharges partielles localisées à l'extrémité de chaque glaçon sont observées.

Ensuite, les glaçons entre les isolateurs 2 et 1 ainsi que 3 et 2 (c.f. figure 4 de la page 14) joignent respectivement la surface des isolateurs 1 et 2, formant ainsi un pont de glace entre ceux-ci. Les décharges, plus intenses, sont maintenant localisées aux pointes des glaçons provenant des isolateurs 1 et 4. Les glaçons de l'isolateur 4 atteignent progressivement l'isolateur 3, l'activité électrique se concentre donc maintenant dans la zone de la borne haute tension. On est en présence du courant de base  $I_b$  à partir d'environ vingt-cinq minutes après le début de l'essai.

Cette activité électrique fait fondre les glaçons qui raccourcissent, ceci provoque l'éjection de gouttelettes d'eau. Les décharges partielles cèdent alors leur prédominance au profit des effluves plus intenses qui sont issus de la borne inférieure (soumise à la haute tension). Le courant de fonte  $I_f$  creuse alors son canal entre la glace et l'isolateur 1. Lorsque l'eau contenue dans le canal s'écoule et quitte l'isolateur, le courant  $I_f$  diminue jusqu'à disparaître. Ensuite, les décharges partielles (avec le courant  $I_b$ ) provenant des glaçons nouvellement reformés redominent graduellement par la suite. Ce cycle d'alternance entre  $I_b$  et  $I_f$  se poursuit tout au long de la période d'accumulation.

Pendant une période de fonte (ou de refroidissement), la projection des gouttelettes d'eau sur le montage est interrompue. Il n'y a maintenant que de faibles décharges partielles (avec le courant  $I_b$  s'y rattachant) s'atténuant progressivement. Il est à noter que c'est la tension de service  $V_o$  qui est appliquée.

Par la suite, la tension d'essai  $V_a$  est appliquée. Les décharges reprennent et se poursuivent de plus en plus fortes, provoquant des effluves beaucoup plus intenses qui sont d'abord localisés aux isolateurs 1 et 4. Si la tension est assez élevée, les deux arcs blancs prolongeront leurs canaux respectifs jusqu'aux isolateurs centraux; le contournement complet sera alors obtenu. Sinon, les arcs blancs seront maintenus autour des coupoles des isolateurs situés près des bornes à haute tension et de mise à la terre. Il est à noter qu'une plus courte période de refroidissement facilite l'obtention d'un contournement.

### 3.3 Corollaire sur la conductivité de la glace accumulée

À la fin de plusieurs essais, la conductivité électrique d'échantillons de glace restante a été examinée. Ces échantillons étaient pris à divers endroits sur chacun des isolateurs. Nous avons remarqué que la glace accumulée en premier lieu possède une plus grande conductivité électrique et une texture ressemblant à du verglas. C'est cette glace que l'on retrouve à la surface immédiate des isolateurs et au voisinage des glaçons. Le verglas se forme quand une quantité d'eau se refroidit et gèle uniformément. Ceci est conforme à d'autres observations faites antérieurement: concentration de l'activité électrique aux extrémités de la chaîne d'isolateurs; et formation du canal conducteur à l'intérieur de la couche de glace, puis remplissage de celui-ci par l'eau de fonte lors du passage des courants  $I_{ab}$  et  $I_f$ .

## **CHAPITRE IV**

### **ETUDE DE LA TENSION MINIMALE DE CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS GIVRES EN REGIME D'ACCUMULATION**

#### 4. Etude de la tension minimale de contournement des isolateurs givrés en régime d'accumulation

##### 4.1 Effet de la polarité sur la quantité de glace accumulée

Pour des conditions d'accumulation données, une variation du niveau de la tension  $V_{MF}$  en fonction de la polarité appliquée peut être observée. Cette valeur sous tension alternative ou continue de polarité négative est sensiblement la même, bien qu'elle soit généralement plus élevée dans le premier cas. Elle est toujours relativement beaucoup plus élevée en tension continue de polarité positive [22].

Il a été aussi observé que pour une même polarité, le niveau de la tension  $V_{MF}$  diminue lorsqu'augmente l'épaisseur (donc la quantité) de la glace accumulée [22].

Il peut donc exister une relation entre la polarité de la tension appliquée et le poids de la glace accumulée sur les isolateurs.

##### 4.1.1 Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux des essais réalisés sur une chaîne de cinq isolateurs non contaminés exposés à de similaires conditions d'accumulation sont compilés au tableau 1 de la page 31. La tension appliquée est de 15 kV par unité. La période d'accumulation dure 90 minutes. À la fin de ce

délai, les isolateurs sont recouverts de givre lourd dont l'épaisseur atteint 2 cm sur le conducteur témoin.

#### 4.1.2 Observations

En polarité négative, à cause de décharges très accentuées, il ne reste presque plus de glaçons sous l'isolateur inférieur après la période d'accumulation. Par contre, presque aucun glaçon n'est tombé en polarité positive (c.f. figure 6 de la page 32). Pour tenir compte cet état de choses, comparer le poids de glace accumulée sur les quatre isolateurs supérieurs pourrait également être à considérer. Cette façon d'envisager les choses ne modifierait cependant pas la conclusion de la présente étude.

Les résultats obtenus montrent que le poids moyen de glace accumulée par unité d'isolateur est pratiquement indépendant de la polarité de la tension appliquée pendant la période d'accumulation.

#### 4.1.3 Conclusion

En se basant sur les travaux réalisés antérieurement par d'autres chercheurs, dans les mêmes conditions atmosphériques, c'est en polarité négative qu'est rencontrée la tension  $V_{MF}$  la plus basse. Ceci ne semble pas lié à une quelconque augmentation de la quantité de glace lorsqu'une tension continue de polarité négative est appliquée.



TABLEAU 1: Résumé des mesures du poids de la glace.

Les valeurs pour chaque type de polarité sont des moyennes établies à partir de trois essais distincts.

## POIDS DE LA GLACE ACCUMULEE (en kg)

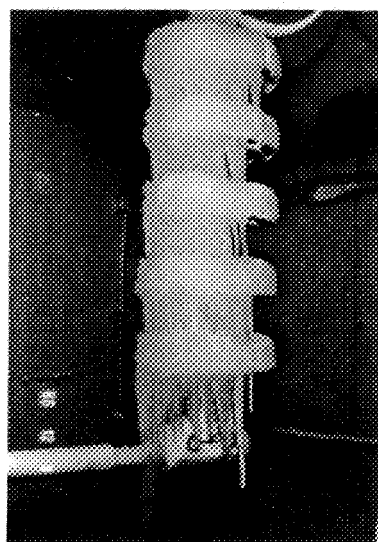
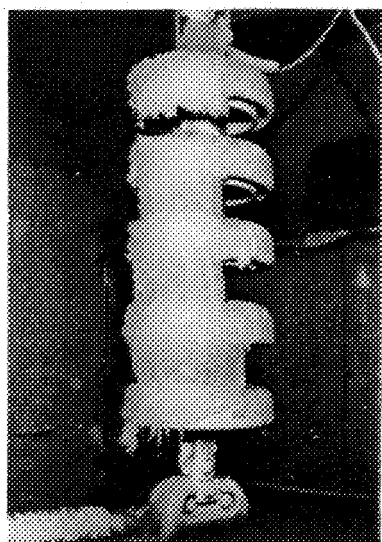
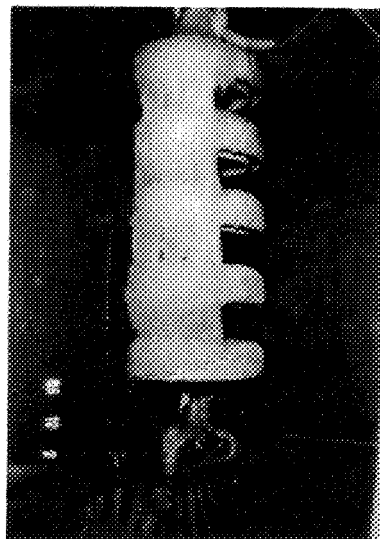
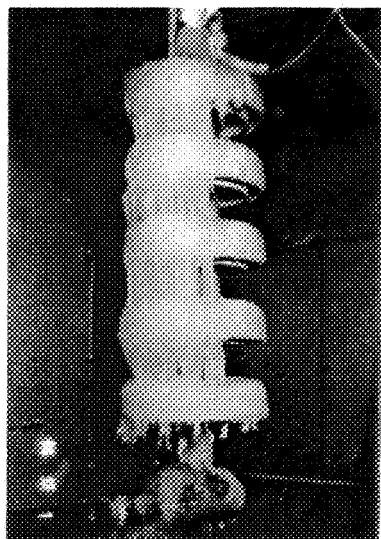
Nature de la tension appliquée	sur l'isolateur					Total des cinq isolateurs
	#1	#2	#3	#4	#5	
C.C. +	1.055	1.660	1.133	1.233	1.833	6.915 (Wm: 1.383)
C.C. -	0.843	1.503	1.378	1.232	1.680	6.636 (Wm: 1.327)
C.A.	0.850	1.600	1.345	1.272	1.758	6.825 (Wm: 1.365)
SANS TENSION	1.520	1.673	1.358	1.362	2.210	8.033 (Wm: 1.607)

Wm: Poids moyen de glace déposée par isolateur.

L'isolateur du bas est le #1, il est relié à la borne haute tension; alors que le #5 est celui du haut, il est relié à la mise à la terre.

C.C. +

C.C. -



C.A.

SANS TENSION

Figure 6: Aspect physique de la glace accumulée sur les isolateurs dans les mêmes conditions atmosphériques pendant 90 minutes pour différentes natures de la tension appliquée.

#### 4.2 Essais de contournement électrique sur des isolateurs précontaminés

Le but de cette série d'essais est de déterminer la tension minimale de contournement ( $V_{mf}$ ) d'une chaîne de quatre isolateurs précontaminés et recouverts d'une épaisseur de 2 cm de givre lourd.

Les essais ont été réalisés pour les tensions alternatives et continues. Le degré de contamination des isolateurs en porcelaine est soit nul, léger ( $0.01 \text{ mg/cm}^2$ ) ou modéré ( $0.05 \text{ mg/cm}^2$ ).

Ces essais furent effectués en suivant la procédure établie pour le "régime d'accumulation". Elle est décrite à la section 2 du présent travail.

##### 4.2.1 Procédure de contamination des isolateurs

Les isolateurs doivent être précontaminés avant d'être suspendus à l'intérieur de la chambre froide. La contamination est effectuée par la méthode de trempage. Les isolateurs sont d'abord nettoyés avec une solution de 0.1 % de phosphate de sodium, ils sont rincés à l'eau distillée puis après séchage, ils sont immergés dans une solution composée de kaolin K-6 et de NaCl dissoute dans 10 litres d'eau distillée. La quantité de kaolin est toujours de 400 g, celui-ci est utilisé pour faciliter l'adhésion du dépôt contaminant à la surface des isolateurs. La quantité de sel est de

55 ou 255 g; pour obtenir des taux de contamination respectifs de 0.01 ou 0.05 mg/cm<sup>2</sup>. Les isolateurs sont à nouveau séchés, puis ils sont suspendus dans l'enceinte réfrigérée au moins 90 minutes avant que l'essai ne commence.

Le niveau moyen de contamination superficielle ainsi déposée est mesuré de la façon suivante: cinq isolateurs dont un témoin sont trempés à plusieurs reprises dans la solution contaminante et séchés à l'air libre.

La surface (interne et externe) de l'isolateur témoin est alors lavée avec une éponge propre dans 0.5 litre d'eau distillée. La résistivité de l'eau collectée est alors mesurée. Cette résistivité est rapportée à une température de référence de 20°C à l'aide d'un facteur de correction dont la variation est représentée à la figure 7 de la page 41. A partir de cette résistivité corrigée, la salinité de l'eau est établie à l'aide de la figure 8 de la page 42.

Avec cette valeur, le taux de contamination expérimentale est déterminé comme suit:

$$T = \frac{CV}{A}$$

Où:

- T: taux réel de contamination à calculer en mg/cm<sup>2</sup>
- C: quantité équivalente de sel (salinité) en g/l
- A: surface (totale) lavée de l'isolateur en cm<sup>2</sup> = 4040 cm<sup>2</sup>
- V: volume d'eau recueillie en cm<sup>3</sup> = 500 cm<sup>3</sup>

#### 4.2.2 Niveau de contamination

Le fait d'effectuer les essais avec des niveaux de contamination légers et modéré qui sont inférieurs à un taux de contamination de 0.1 mg/cm<sup>2</sup>, permet d'éviter le contournement électrique des isolateurs au début de la période d'accumulation alors que la tension de service est appliquée. De tels contournements accidentels avec ce dernier taux (0.1 mg/cm<sup>2</sup>), furent observés au cours d'autres essais réalisés antérieurement [13].

Le choix des taux de contamination de 0.01 et 0.05 mg/cm<sup>2</sup> permet également d'obtenir des résultats comparables avec ceux des travaux antérieurs.

#### 4.2.3 Tension appliquée pendant l'accumulation

Habituellement, une tension de service de 15 kV par unité est appliquée à la chaîne d'isolateurs durant la période d'accumulation de la glace. Cependant, en présence de contamination, il est difficile d'appliquer la même valeur de tension sans avoir soit le contournement, soit la chute d'une importante quantité de glace. Pour fixer une valeur appropriée de tension pendant l'accumulation, une dizaine de tests préliminaires furent effectués en appliquant différentes valeurs de tension C.A., C.C.- et C.C.+ . Ces résultats ont montré qu'avec une légère précontamination de  $0.01 \text{ mg/cm}^2$ , il est toujours possible d'appliquer une tension de 15 kV par isolateur sans observer l'apparition de l'arc de contournement ou la chute considérable de glaçons. Par contre, avec cette même tension et pour une précontamination modérée de  $0.05 \text{ mg/cm}^2$ , on a souvent remarqué la chute d'un nombre important de glaçons suspendus à l'isolateur inférieur. Ceci est dû probablement à l'effet thermique des décharges électriques, qui est relativement élevé à ces niveaux de tension et de contamination. Pour cette raison, la tension appliquée a été réduite à une valeur de 13.5 kV par isolateur pour une précontamination modérée tandis qu'elle a été maintenue à 15 kV par unité pour des taux de contamination nuls et légers.

Les figures 9a et 9b de la page 43 permettent de comparer la quantité des glaçons suspendus à l'isolateur inférieur pour l'application d'une tension continue de polarité négative égale à 15 kV (figure 9a) et à 13.5 kV (figure 9b) par isolateur.

#### 4.2.4 Résultats expérimentaux

Les résultats des essais de contournement sont compilés au tableau 2 de la page 44. Cette compilation est résumée au tableau 3 de la page 45.

La variation du niveau de la tension minimale de contournement (tension  $V_{mf}$ ) en fonction du taux de contamination et de la nature de la tension appliquée est représentée graphiquement à la figure 10 de la page 46.

#### 4.2.5 Observations

Au cours de travaux antérieurs [8-13], il a été montré qu'en présence de glace, l'arc de contournement (sous tension alternative) laissait des traces d'érosion à la surface des isolateurs trempés ou composites. Ces traces se présentent sous diverses formes, allant de légères cicatrices aux chenilles relativement profondes. Par ailleurs, avec les isolateurs en porcelaine non contaminés, aucune trace d'érosion n'a été observée pendant les essais de contournement [15]. Pendant nos essais, il n'y avait effectivement aucune trace d'érosion avec des taux de contamination nuls et très légers ( $0.01 \text{ mg/cm}^2$ ). Par contre, avec une précontamination modérée de  $0.05 \text{ mg/cm}^2$ , des traces d'érosion ont été observées après le contournement sous tension continue. Cependant, même en appliquant la tension  $V_{mf}$  de 63 kV C.A., il n'y avait pas de traces d'érosion sous tension alternative.

Les photos des figures 11 et 12 aux pages 47 et 48 montrent les traces d'érosion en polarité positive (figure 11) et en polarité négative (figure 12) sur l'unité 3 (c.f. figure 4 page 14).

#### 4.2.6 Remarques

- 1) Au cours d'autres travaux de recherche [12-14], la tension  $V_{MF}$  des isolateurs en porcelaine en l'absence de contamination fut établie à 72 kV C.A. et à 75 kV C.C.-. Dans le même temps, pour des isolateurs en verre trempé, cette valeur était de 75 kV C.A..

Au cours de nos essais, nous avons réussi à obtenir les deux tensions  $V_{MF}$  de 75 kV; pour les isolateurs en verre trempé en C.A. et pour ceux qui sont en porcelaine en C.C.-. Cependant, même au bout d'une quinzaine d'essais réalisés dans des conditions similaires, nous n'avons pu obtenir de contournement à 72 kV C.A. avec des isolateurs en porcelaine.

Pour quatre isolateurs en porcelaine recouverts de 2 cm de givre lourd sans contamination, notre tension  $V_{MF}$  est donc de 75 kV C.A..



- 2) Il existe un écart opérationnel de 3 kV entre les niveaux de la tension  $V_{MF}$  et de la tension de tenue, ce qui procure une certaine marge de manoeuvre lors de l'interprétation des résultats. Il est donc raisonnable de tracer des créneaux de passage larges de 3 kV lorsqu'on désire représenter graphiquement les résultats obtenus. C'est ce qui est effectué à la figure 10 de la page 46.

#### 4.2.7 Conclusion

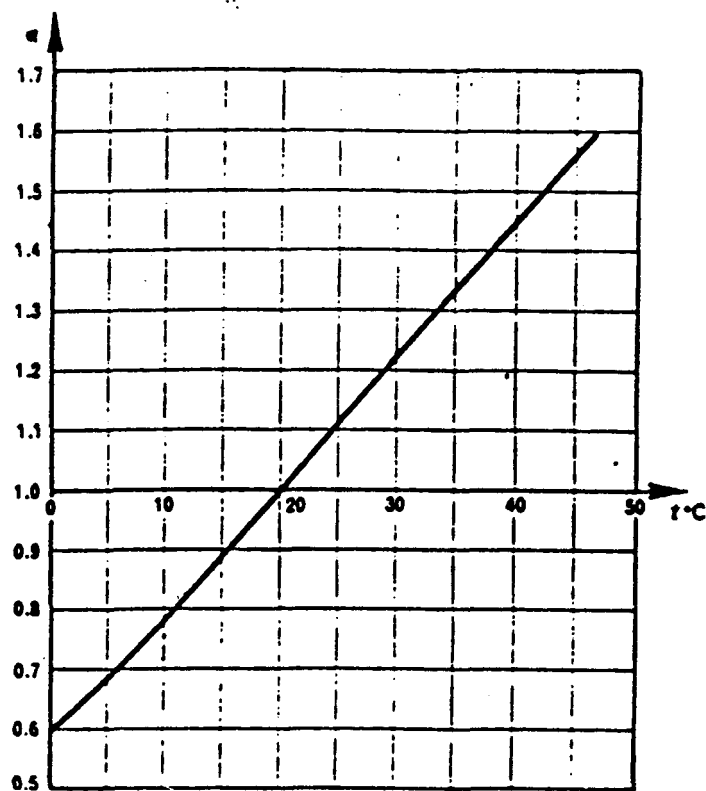
Des essais de contournement des isolateurs antibrouillard en porcelaine précontaminés puis recouverts de givre lourd qui ont été réalisés, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Pour une précontamination légère de  $0.01 \text{ mg/cm}^2$ , la baisse du niveau de la tension minimale de contournement (tension  $V_{MF}$ ) est de 8 % en C.C.- (de 75 à 69 kV), de 4 % en C.A. (de 75 à 72 kV) et nul en C.C.+ (stable à 87 kV).
- Pour une précontamination modérée de  $0.05 \text{ mg/cm}^2$ , la baisse de tension  $V_{MF}$  est de 16 % en C.C.- et en C.A. (de 75 à 63 kV) et de 17 % en C.C.+ (de 87 à 72 kV).
- Le niveau de la tension minimale de contournement en tension continue de polarité négative tend à être légèrement inférieur à celui mesuré sous

tension alternative. Pour les niveaux de contamination examinés, la tension  $V_{MF}$  mesurée en polarité positive est d'environ 18 % plus élevée par rapport à celle mesurée en polarité négative pour un même niveau de contamination.

L'ensemble de ces résultats expérimentaux est conforme globalement aux conclusions tirées des diverses expériences semblables effectuées antérieurement, soit qu'une augmentation du degré de contamination provoque une diminution du niveau de la tension minimale de contournement.

N.B. : Pour chacune des trois différentes natures de tension, le calcul du pourcentage de la baisse de niveau de la tension  $V_{MF}$  est effectuée par rapport à une valeur de référence. Cette valeur de référence est le niveau de la tension  $V_{MF}$  établi en l'absence de contamination lorsqu'une épaisseur de glace de 2 cm est accumulée sur le conducteur témoin.



$$\rho_{20} = \rho_t \times \alpha$$

où  $\rho_{20}$  et  $\rho_t$  indiquent la résistivité à 20 °C et t °C.

Figure 7: Facteur de correction de température pour la résistivité d'une solution aqueuse de chlorure de sodium (NaCl) telle qu'utilisée lors des essais sous pluie et sous contamination artificielle.

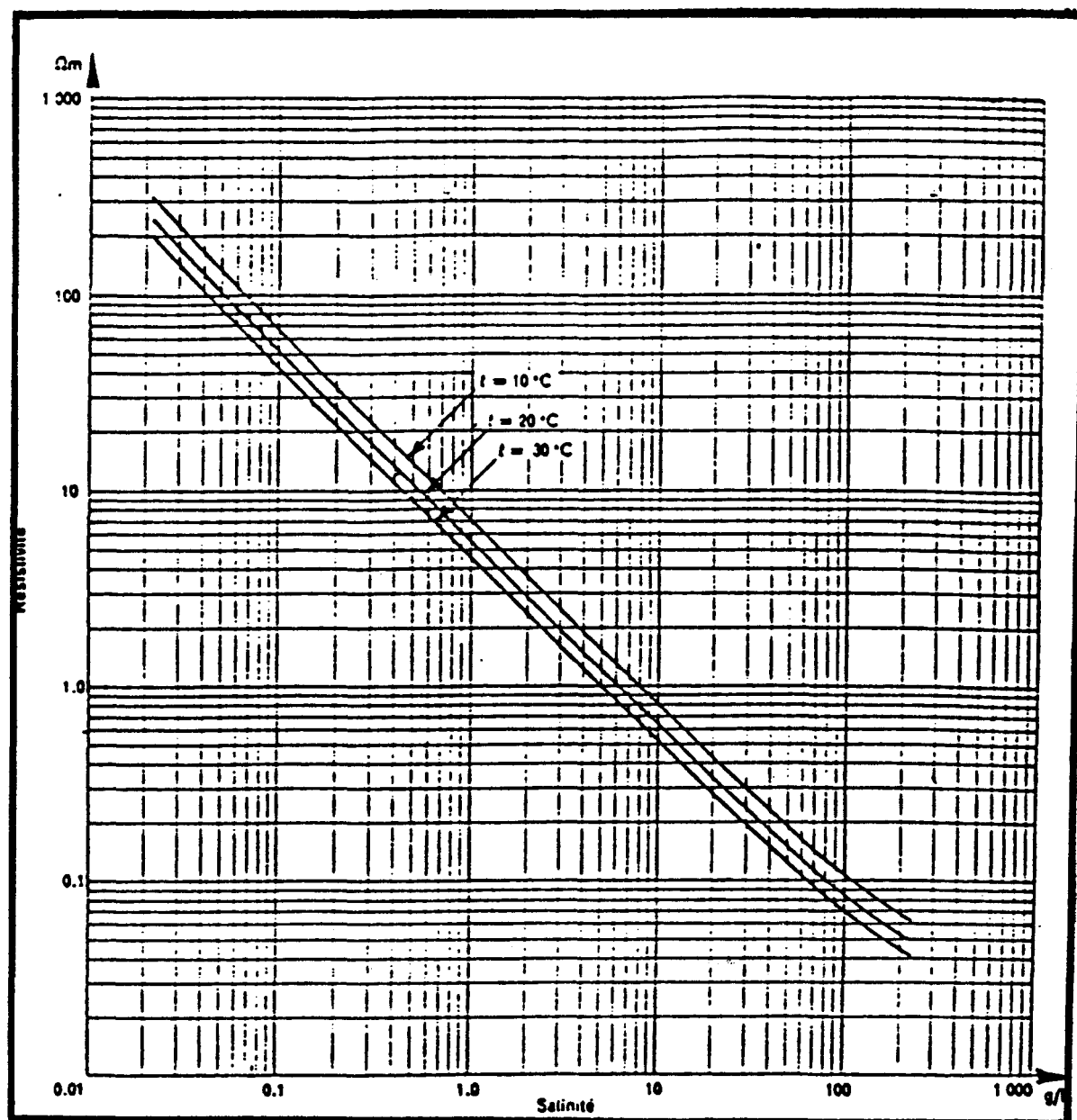


Figure 8: Résistivité de la solution de chlorure de sodium (NaCl), en fonction de la salinité et de la température de la solution.

Note: La salinité est exprimée en grammes par litre à la température de  $20^\circ C$ .



Figure 9a



Figure 9b

Figure 9: Aspect du recouvrement de glace sur l'isolateur inférieur (no 1) après un temps d'accumulation de 90 minutes donnant une épaisseur de glace de 2 cm. Le taux de contamination est modéré ( $0.05 \text{ mg/cm}^2$ ).

9a) tension appliquée de -15 kV par unité (C.C.-)

9b) tension appliquée de -13.5 kV par unité (C.C.-)

**Tableau 2:** Compilation des résultats des essais de contournement des isolateurs précontaminés en régime d'accumulation.

Taux de contamination	nature de la tension appliquée	V <sub>0</sub> (kV)	V <sub>a</sub> (kV)	Résultats	V <sub>MF</sub> (kV)
nul, 0.00 mg/cm <sup>2</sup>	C.C.+	60		Obtenus au cours d'essais réalisés antérieurement par d'autres équipes [15]	87
	C.A.	60	75 72	3 tenues, 2 contournements 15 tenues	75
	C.C.-	60		Obtenus au cours d'essais réalisés antérieurement par d'autres équipes [15]	75
léger, 0.01 mg/cm <sup>2</sup>	C.C.+	60	87 84	2 contournements 3 tenues	87
	C.A.	60	72 69	1 contournement 3 tenues	72
	C.C.-	60	69 66	2 contournements 3 tenues	69
modéré, 0.05 mg/cm <sup>2</sup>	C.C.+	54	72 69	2 contournements 3 tenues	72
	C.A.	54	63 60	2 tenues, 1 contournement 3 tenues	63
	C.C.-	54	63 60	2 contournements 3 tenues	63

**Tableau 3:** Résumé des résultats obtenus avec quatre isolateurs en porcelaine recouverts de 2 cm de givre lourd.

Taux de contamination (mg/cm <sup>2</sup> )	Tension minimale de contournement V <sub>MF</sub> (kV)		
	C.C.-	C.C.+	C.A.
0.00	-75	+87	75
0.01	-69	+87	72
0.05	-63	+72	63

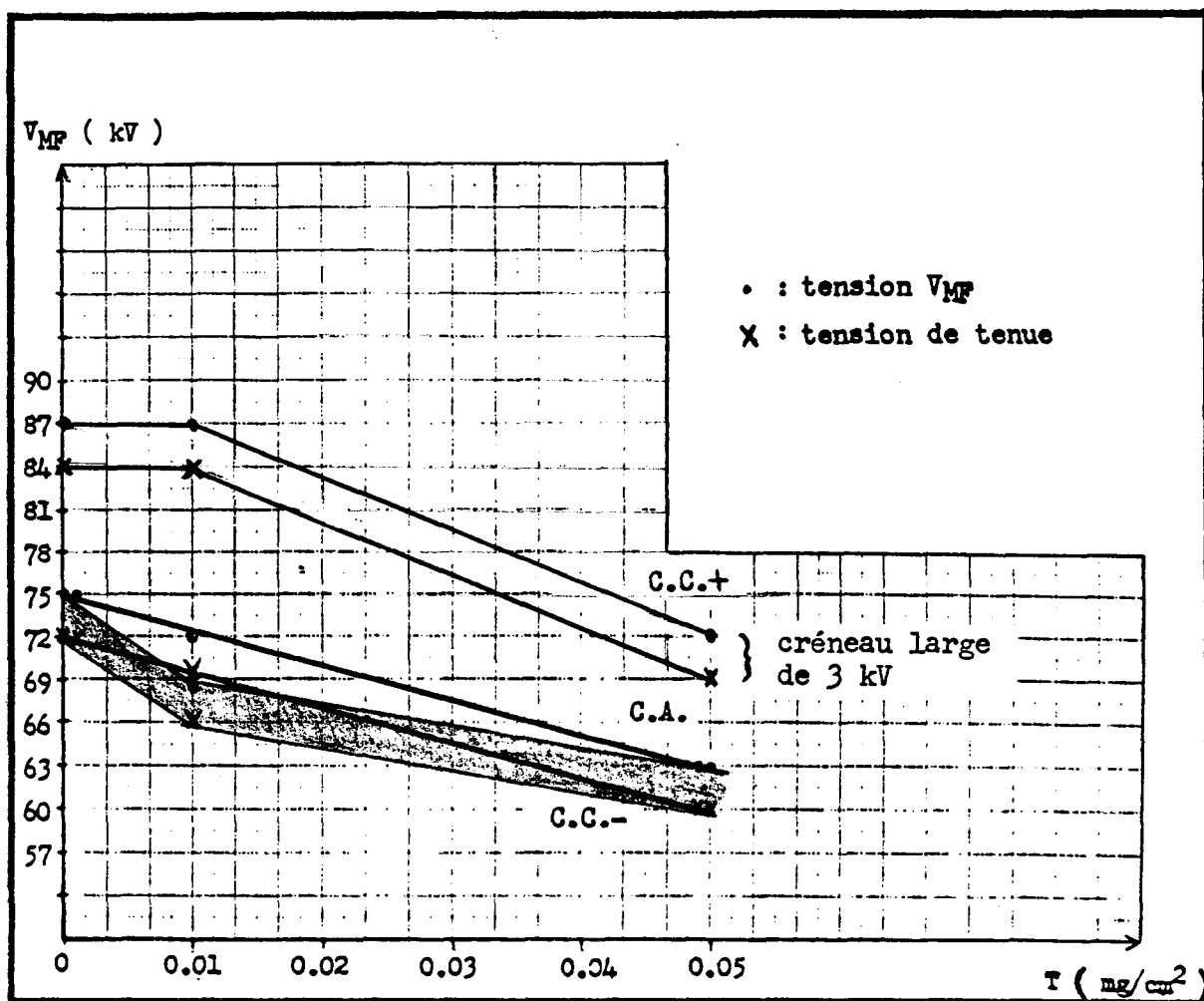


Figure 10: Variation du niveau de la tension  $V_{MF}$  en fonction du taux de contamination et de la nature de la tension appliquée.

Chaque couple de points (  $\dot{x}$  ) sert à délimiter un créneau large de 3 kV par lequel une courbe pourrait passer. C'est pourquoi la courbe représentant les essais en C.C.- pourrait être tracée un peu plus bas que celle des essais en C.A..





Figure 11: Traces d'érosion observées sur l'unité numéro 3 pendant des essais de contournement en C.C.+. Une coloration artificielle des traces d'érosion a été faite pour une meilleure visualisation.

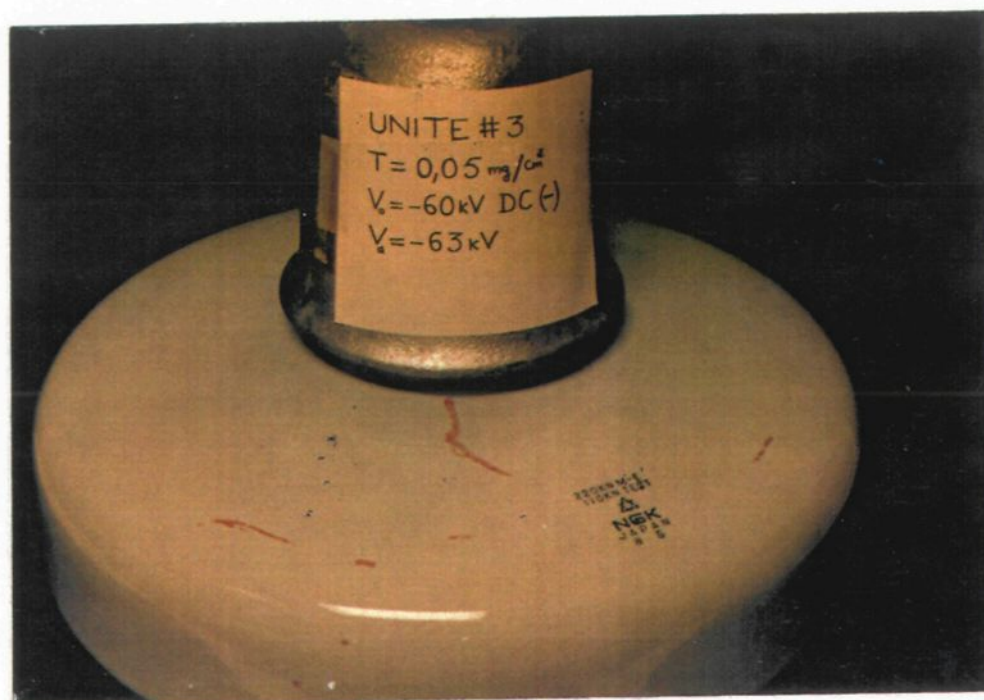


Figure 12: Traces d'érosion observées sur l'unité numéro 3 pendant des essais de contournement en C.C.-. Une coloration artificielle des traces d'érosion a été faite pour une meilleure visualisation.

## CHAPITRE V

ESSAIS DE CONTOURNEMENT EN REGIME DE  
FONTE AVEC DES ISOLATEURS PROPRES EN  
FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DE GLACE ACCUMULÉE

## 5. Essais de contournement électrique en régime de fonte avec des isolateurs propres en fonction de l'épaisseur de glace accumulée

L'objectif de cette série d'essais est de déterminer la tension minimale de contournement des isolateurs recouverts de givre lourd pendant une période de fonte. L'épaisseur de la glace varie entre 0.5 et 2.5 cm et la tension appliquée peut être de nature alternative ou continue de polarité positive et négative.

On considère que l'on est en régime de fonte lorsque la température à l'intérieur de l'enceinte est entre  $-1^{\circ}\text{C}$  et  $0^{\circ}\text{C}$ . Ceci provoque la fonte de la glace, c'est-à-dire qu'il y a présence d'un film d'eau à la surface de la glace accumulée.

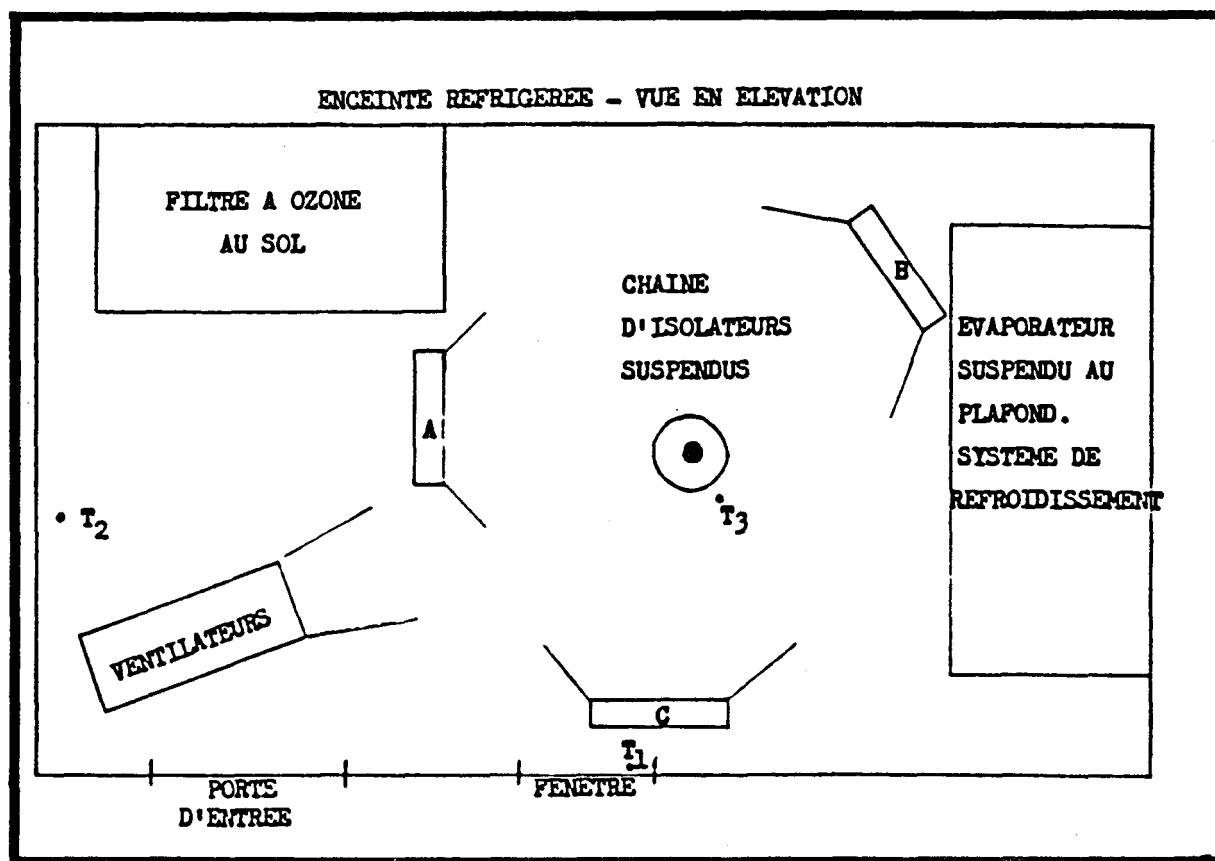
### 5.1 Procédure expérimentale

#### 5.1.1 Installation de l'équipement supplémentaire

La période de fonte a été créée en utilisant des éléments chauffants électriques, d'une puissance nominale de 1.5 kW chacun, dans la chambre froide.

Les éléments chauffants sont répartis de façon à réchauffer le plus uniformément possible l'intérieur de l'enceinte réfrigérée. Trois thermomètres sont disposés à l'intérieur de celle-ci afin d'enregistrer la

température en différents endroits stratégiques . La figure 13 qui suit illustre comment cet équipement supplémentaire est disposé à l'intérieur de l'enceinte réfrigérée.



A,B,C: emplacements possibles (au sol) des éléments chauffants.

T<sub>1</sub>,T<sub>2</sub>,T<sub>3</sub>: thermomètres témoins situés à 1.5 m du sol

T<sub>1</sub>: derrière la fenêtre

T<sub>2</sub>: thermomètre mural encastré

T<sub>3</sub>: à 7 cm des isolateurs

Figure 13: Installation de l'équipement supplémentaire dans la chambre froide pour les essais en régime de fonte.

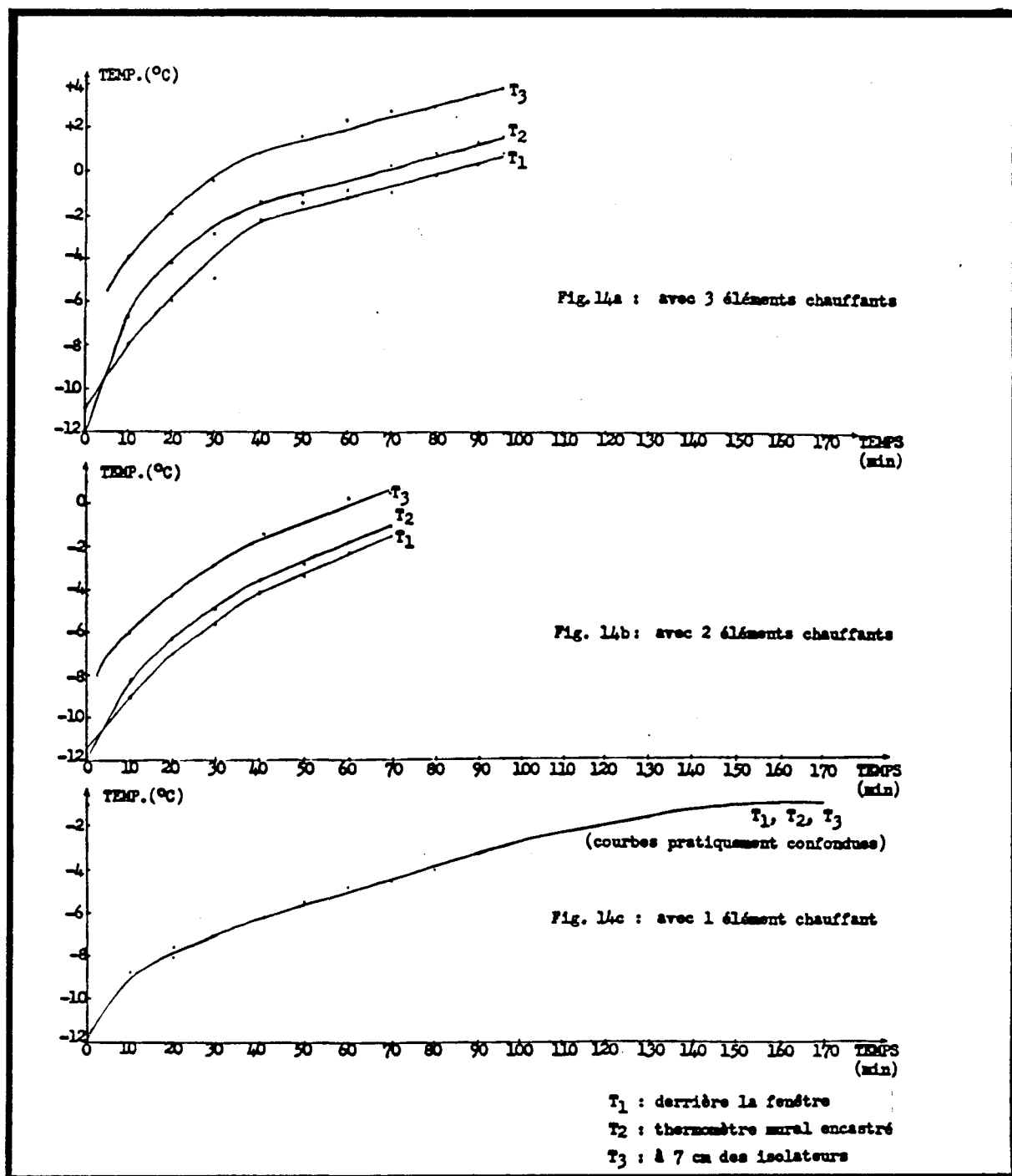


Figure 14: Variation de la température en fonction du temps écoulé durant la période de fonte.

### 5.1.2 Description de la procédure

La procédure détaillée pour effectuer des essais en régime de fonte est décrite aux sections 2.3 et 2.4 du présent travail.

### 5.2 Détermination des conditions les plus sévères

D'ores et déjà, il est connu que les conditions d'accumulation les plus sévères, résultant en l'obtention d'une tension  $V_{mf}$  la plus basse possible, sont rencontrées lorsqu'on accumule une épaisseur d'au moins 2 cm de givre lourd. Il est important aussi de vérifier si en régime de fonte, la modification d'autres paramètres peut entraîner une variation de la valeur de cette tension  $V_{mf}$ .

L'objectif de cette série d'essais est de vérifier si une modification du taux de réchauffement de l'enceinte réfrigérée provoque une variation du niveau de la tension minimale de contournement. Le cas échéant, nous devons utiliser le nombre de calorifères avec lequel les conditions les plus défavorables sont rencontrées; c'est-à-dire que la plus basse tension  $V_{mf}$  est obtenue.

Cette série d'essais préliminaires fut réalisée pour une épaisseur de glace de 2 cm avec l'application d'une tension alternative. Les résultats sont compilés au tableau 4 de la page 62.

### 5.2.1 Réchauffement effectué avec 3 calorifères

Les calorifères sont localisés aux emplacements A, B et C (c.f. figure 13 de la page 51).

Tout au long de la période de fonte, l'écart entre les indications des trois thermomètres varie entre 3 et 4°C. À partir d'environ 30 minutes, la température près des isolateurs passe au dessus de 0°C et atteint même 3.75°C après 96 minutes de réchauffement (c.f. figure 14a de la page 52), alors qu'il reste toujours de la glace à l'état solide. L'intérieur de la chambre froide ne semble donc pas en état d'équilibre thermique.

Parfois, il y a auto-amorçage d'un arc sous la coupole de l'isolateur inférieur alors que c'est la tension de service  $V_0$  qui est appliquée. Ceci se produit lorsqu'il y a suffisamment d'assez longs glaçons suspendus à cet isolateur. Lorsque ce phénomène se produit, la température près des isolateurs varie entre 2.5 et 3°C.

La figure 15 de la page suivante montre deux états de glace accumulée. La distinction entre les deux se situe surtout au niveau de la quantité et de la longueur des glaçons suspendus à l'isolateur inférieur.



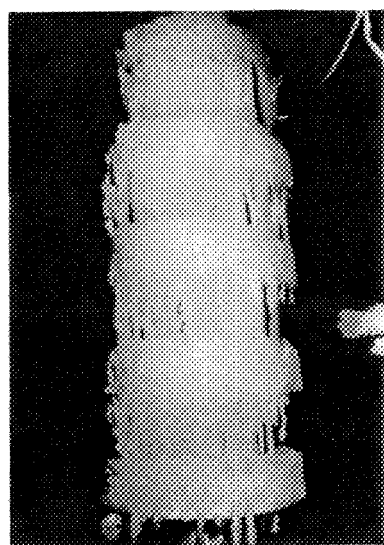


Figure 15a

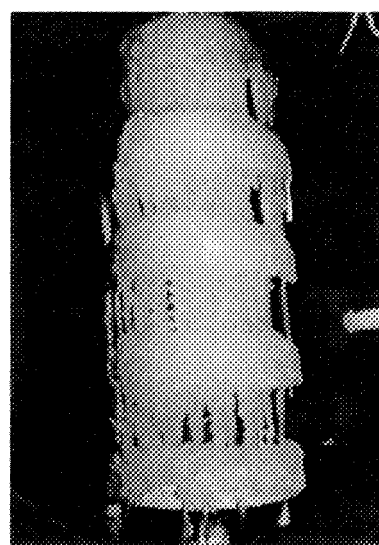


Figure 15b

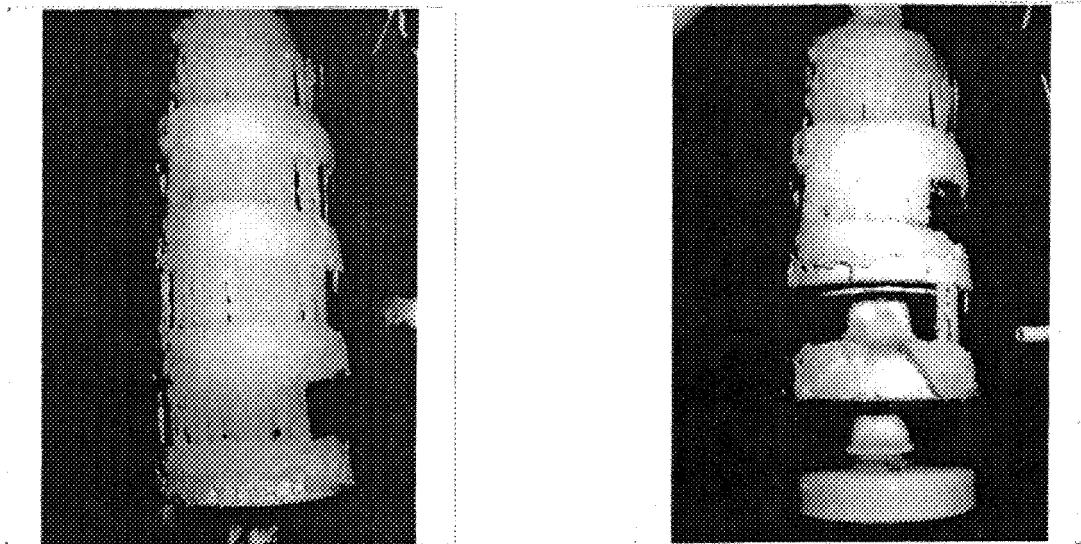
Figure 15a: Accumulation de glace provoquant l'auto-amorçage d'un arc blanc à la tension de service  $V_0$ .

Figure 15b: Accumulation de glace ne provoquant pas l'auto-amorçage d'un arc blanc à la tension de service  $V_0$ .

Note: Les photos sont prises à la fin de la période d'accumulation.

Le résultat est que même avec une tension d'essai de 78 kV C.A., le contournement complet de la chaîne d'isolateurs n'a pas encore été observé; alors que la tension  $V_{MF}$  en régime d'accumulation est de 75 kV C.A.. Il est à noter que le courant de fuite supporté est très élevé, il est d'environ 345 mA.

Etant donné que le réchauffement ne se produit pas en état d'équilibre, la température de certains objets ayant une plus faible capacité thermique, dont les isolateurs, augmente plus rapidement. Une quantité considérable d'énergie thermique est dégagée lors de la propagation de l'arc blanc. Il en résulte un décollement de la glace d'après la surface des isolateurs. Il y a effondrement de la glace accumulée, ce qui empêche le contournement. La figure 16 qui suit illustre ce propos.



avant l'application de  $V_a$

après avoir appliqué  $V_a$

Figure 16: Accumulation de 2 cm dont la glace s'est effondrée à l'application de la tension d'essai  $V_a$  de 78 kV C.A..

### 5.2.2 Réchauffement effectué avec 2 calorifères

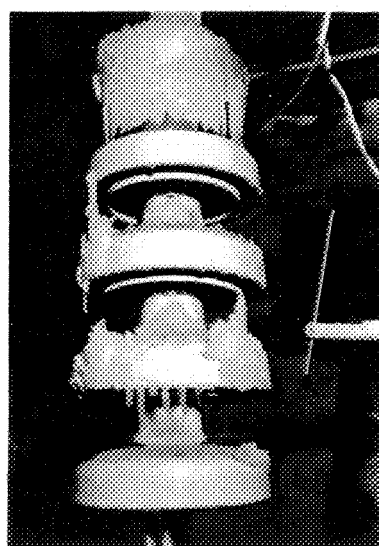
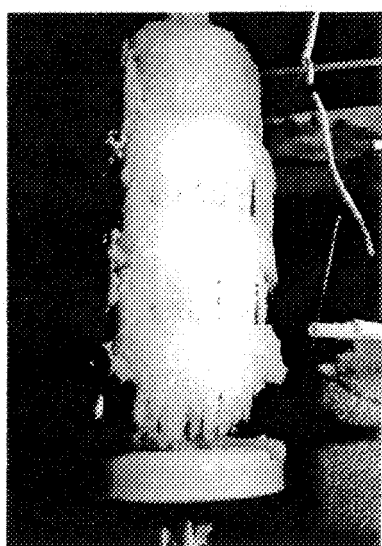
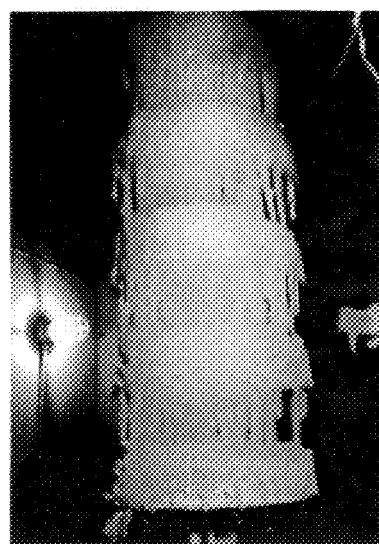
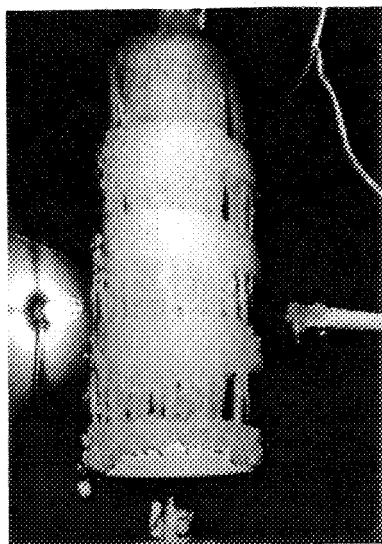
Les calorifères sont localisés aux emplacements A et B (c.f. figure 13 de la page 51).

Cette fois-ci, l'écart maximal entre les lectures des trois thermomètres varie entre 2 et 3°C. Au plus, la température près des isolateurs atteint 1,25°C après environ 85 minutes de réchauffement.

Quand l'auto-amorçage d'un arc blanc se produit à la tension de service  $V_0$  (60 kV C.A.), la température ambiante près des isolateurs se situe d'ailleurs à ce niveau de 1.25°C.

Le contournement fut obtenu avec l'application d'une tension d'essai de 78 kV C.A.. Il est à noter qu'à cette occasion, il n'y avait pas assez de glaçons suspendus à l'isolateur inférieur pour provoquer des décharges et encore moins pour obtenir l'auto-amorçage d'un arc blanc. Lorsque la tension d'essai fut appliquée, de l'eau s'égouttait régulièrement. La température près des isolateurs indiquait alors 0.25°C.

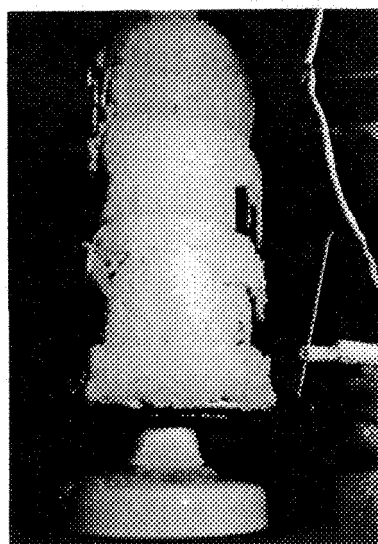
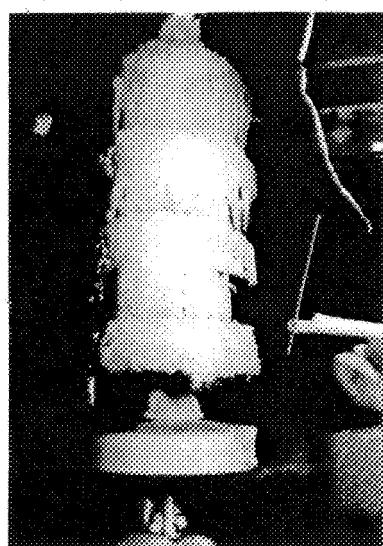
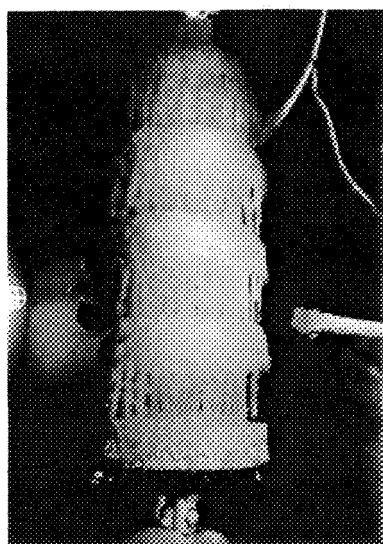
Avec une tension d'essai inférieure à la tension  $V_{mf}$  de 78 kV C.A., l'effondrement de la glace accumulée peut se produire. La figure 17 qui suit illustre diverses possibilités d'effondrement de la glace en fonction de la valeur de la tension d'essai  $V_a$  qui est appliquée.



pas d'effondrement partiel  
 $V_a$ : 78 kV C.A.  
 contournement

effondrement prononcé  
 $V_a$ : 75 kV C.A.  
 tenue

Figure 17: Possibilités d'effondrement de la glace accumulée selon la valeur de la tension d'essai  $V_a$  appliquée. Les photos du haut montrent l'état de la glace juste après la période d'accumulation.



effondrement partiel  
 Va: 75 kV C.A.  
 tenue

effondrement partiel  
 Va: 75 kV C.A.  
 tenue

Figure 17 (suite): Possibilités d'effondrement de la glace accumulée selon la valeur de la tension d'essai  $V_a$  appliquée. Les photos du haut montrent l'état de la glace juste après la période d'accumulation.

Ce phénomène d'effondrement de la glace accumulée peut s'expliquer de la façon suivante. Lorsqu'on applique une tension d'essai  $V_a$  inférieure à la tension  $V_{MF}$  de 78 kV C.A., la durée de l'arc blanc pouvant mener à un éventuel contournement tend à être plus longue. L'amas de glace absorbe alors une plus grande quantité d'énergie thermique due à la présence de cet arc blanc. Les probabilités que la glace s'effrite ou qu'elle se détache de la surface des isolateurs sont alors augmentées.

### 5.2.3 Réchauffement effectué avec 1 calorifère

Le calorifère est situé à l'emplacement A (c.f. figure 13 de la page 51).

Les trois thermomètres donnent sensiblement la même lecture, l'écart maximal entre les trois n'excède jamais 0.5 °C. On semble donc très près d'un équilibre thermique à l'intérieur de la chambre froide.

Tel que décrit précédemment, l'auto-amorçage (avec la tension de service  $V_0$ ) d'un arc blanc ne s'est jamais produit. Cependant, juste avant d'appliquer la tension d'essai  $V_a$ , l'activité de décharges ainsi que l'intensité du courant de fuite augmentaient sensiblement lorsque l'état des glaçons le permettait.

Le contournement fut obtenu avec l'application d'une tension d'essai  $V_a$  de 72 kV C.A..

Avec une tension d'essai de 69 kV C.A., le plus fort courant de fuite fut obtenu en appliquant celle-ci lorsque les trois températures stagnaient entre  $-1$  et  $0^{\circ}\text{C}$ , c'est-à-dire après 150 à 170 minutes de réchauffement. D'ailleurs, cette stagnation thermique est le signe qu'une transformation à chaleur latente se produit: la fonte de la glace.

#### 5.2.4 Conclusion

Les conditions de fonte les plus sévères sont obtenues en n'effectuant la période de fonte (avec la tension de service  $V_0$ ) qu'avec un seul calorifère de 1.5 kW et en n'appliquant la tension d'essai  $V_a$  qu'après environ 165 minutes (entre 150 et 180 minutes) de réchauffement lorsque les températures à l'intérieur de la chambre froide sont stagnantes entre  $-1^{\circ}\text{C}$  et  $0^{\circ}\text{C}$ . Le taux moyen d'échauffement de l'air ambiant est d'environ  $4^{\circ}\text{C}$  par heure.

L'ensemble des résultats expérimentaux de cette série d'essais préliminaires sont compilés au tableau 4 de la page suivante.

**Tableau 4:** Compilation des résultats des essais préliminaires en vue de déterminer les plus sévères conditions en régime de fonte sous tension alternative.

$\epsilon$  : 2 cm,  $V_0$ : 60 kV C.A., 4 isolateurs en porcelaine.

nombre d' éléments chauffants	temps de fonte (min)	taux moyen d'échauffement sur $T_3^*$ (°C/h)	$V_a$ (kV C.A.)	$T_3^*$ finale (°C)	période d' amorçage de l'arc (min)	résultat	$V_{MF}$ (kV C.A.)
3	60	15.25	69	3.25	6:45	tenue, I max : 132 mA	≥ 78
	111	8.38	69	3.5	auto- amorçage	tenue, I max : 160 mA	
	66	13.64	72	3.0	auto- amorçage	tenue, I max : 220 mA	
	70	12.21	72	2.25	< 0:05	tenue, I max : 205 mA	
	96	9.84	72	3.75	< 0:05	tenue, I max : 236 mA	
	80	11.63	75	3.5	< 0:05	tenue, I max : 262 mA	
	66:30	12.86	75	2.25	< 0:05	tenue, I max : 175 mA	
	76:15	11.61	78	2.75	auto- amorçage	tenue, I max : 345 mA	
2	88	9.03	75	1.25	auto- amorçage	tenue, I max : 200 mA	78
	80	9.94	75	1.25	auto- amorçage	tenue, I max : 260 mA	
	70	10.50	78	0.25	1:50	contournement	
	75	9.80	75	0.25	1:30	tenue, I max : 280 mA	
1	140	5.04	75	-0.25	< 0:05	contournement	<u>72</u>
	125	5.40	72	-0.75	0:50	tenue, I max : 248 mA	
	115	5.74	72	-1.0	< 0:05	tenue, I max : 216 mA	
	130	5.31	72	-0.5	immédiat	contournement	
	130	5.31	69	-0.5	0:15	tenue, I max : 175 mA	
	130	4.73	69	-1.75	7:00	tenue, I max : 195 mA	
	170	3.88	69	-1.0	1:40	tenue, I max : 250 mA	

$T_3$ : Température à 7 cm des isolateurs

L'auto-amorçage d'un arc blanc se produit avec la tension de service  $V_0$ ; la tension d'essai  $V_a$  est à ce moment immédiatement appliquée. La période d'amorçage de l'arc (avec la tension  $V_a$ ) est observée lorsqu'il n'y a pas d'auto-amorçage.



### 5.3 Essais de contournement en tension alternative

Puisque la recherche des conditions de fonte les plus sévères fut effectuée en tension alternative, il était donc préférable de commencer les essais en utilisant celle-ci pour conserver le contexte d'opération et de comparaison des observations.

Les résultats pour une épaisseur de glace de 2 cm peuvent être extraits de la section 5.2.3; il ne reste plus qu'à expérimenter avec des épaisseurs de 2.5, 1.5, 1 et 0.5 cm.

#### 5.3.1. Résultats expérimentaux

Les résultats obtenus sont compilés au tableau 5 de la page 66.

La variation du niveau de la tension  $V_{mf}$  en fonction de l'épaisseur de la glace accumulée est représentée graphiquement à la figure 18 de la page 67.

Lorsque la tension de service  $V_0$  était appliquée au cours de la période de fonte, l'auto-amorçage d'un arc blanc sous la coupole de l'isolateur inférieur (du côté de la borne haute tension) n'a jamais été observé.

Le courant maximal de tenue décroît continuellement à mesure que l'épaisseur de la glace accumulée diminue. Simultanément, la valeur de la tension augmente. Il semble donc que la diminution de l'épaisseur de la glace provoque une augmentation de la résistance du parcours de fuite supérieure à l'augmentation de la tension d'essai  $V_a$  devant être appliquée.

### 5.3.2 Observations

Par rapport aux essais réalisés avec une épaisseur de glace de 2 cm, aucun autre comportement particulier additionnel n'a été observé avec des épaisseurs de 2.5 et 1.5 cm.

À la fin de la période d'accumulation correspondant à une épaisseur de glace de 1 cm sur le conducteur témoin, les glaçons suspendus à l'isolateur 2 (c.f. figure 4 de la page 14) venaient à peine d'atteindre la coupole de l'isolateur inférieur. La jonction du pont ainsi formé est plutôt faible et précaire. Au cours de la période de fonte, un espace d'air se crée graduellement à cet endroit. C'est là qu'apparaîtront les décharges électriques qui autrement (épaisseur de glace de 1.5, 2 ou 2.5 cm), se produisent entre les glaçons suspendus à l'isolateur inférieur et la borne haute tension. La création de cet espace est due à une augmentation locale de la densité de courant provoquant un échauffement suivi de la fonte de la pointe des glaçons à la dite jonction.

Pour une épaisseur de glace de 0.5 cm, ce phénomène est encore plus marqué. Des espaces du même type sont alors repérés entre tous les isolateurs sous tension. La résistivité électrique globale du parcours de fuite est alors tellement augmentée que le courant de fuite en période de fonte se stabilise à 0.3 mA, par rapport à environ 0.8 mA pour des épaisseurs de glace de 2.5, 2, 1.5 et 1 cm. Il en résulte que même en appliquant une tension d'essai allant jusqu'à 105 kV C.A., l'arc blanc produit est de courte durée (de 30 à 40 secondes) avec un courant d'intensité de 45 mA. Le contournement complet de la chaîne d'isolateurs n'a pas encore été observé pour cette épaisseur. La figure 19 de la page 68 visualise bien ces espaces d'air dont l'importance varie selon la durée de la période d'accumulation.

Concernant l'évolution du courant de fuite et le sort réservé à l'amas de glace, diverses possibilités peuvent se présenter. Les figures 20 à 22 des pages 69 à 75 illustrent quelques scénarios typiques qui se sont réalisés lors d'essais de contournement réussi ou de tenue de l'arc blanc.

**Tableau 5:** Compilation des résultats des essais de contournement électrique des isolateurs en porcelaine en régime de fonte sous tension alternative.

Taux moyen d'échauffement de l'air ambiant de 4°C par heure, tension de service  $V_0$  de 60 kV C.A., 4 isolateurs sous tension.

épaisseur de la glace (cm)	$V_a$ (kV C.A.)	résultat	$V_{MF}$ (kV C.A.)
2.5	69	tenue, I max : 270 mA	72
	69	tenue, I max : 140 mA	
	72	contournement	
	69	tenue, I max : 230 mA	
	69	tenue, I max : 340 mA	
2	72	tenue, I max : 245 mA	72
	72	contournement	
	69	tenue, I max : 175 mA	
	69	tenue, I max : 195 mA	
	69	tenue, I max : 250 mA	
1.5	75	contournement	75
	72	tenue, I max : 150 mA	
	75	contournement	
	72	tenue, I max : 180 mA	
	72	tenue, I max : 180 mA	
1	78	tenue, I max : 135 mA	84
	81	tenue, I max : 145 mA	
	84	tenue, I max : 165 mA	
	87	contournement	
	84	contournement	
	81	tenue, I max : 145 mA	
	81	tenue, I max : 165 mA	
0.5	90	tenue, I max : 45 mA	≥ 105
	93	tenue, I max : 45 mA	
	102	tenue	
	105	tenue	

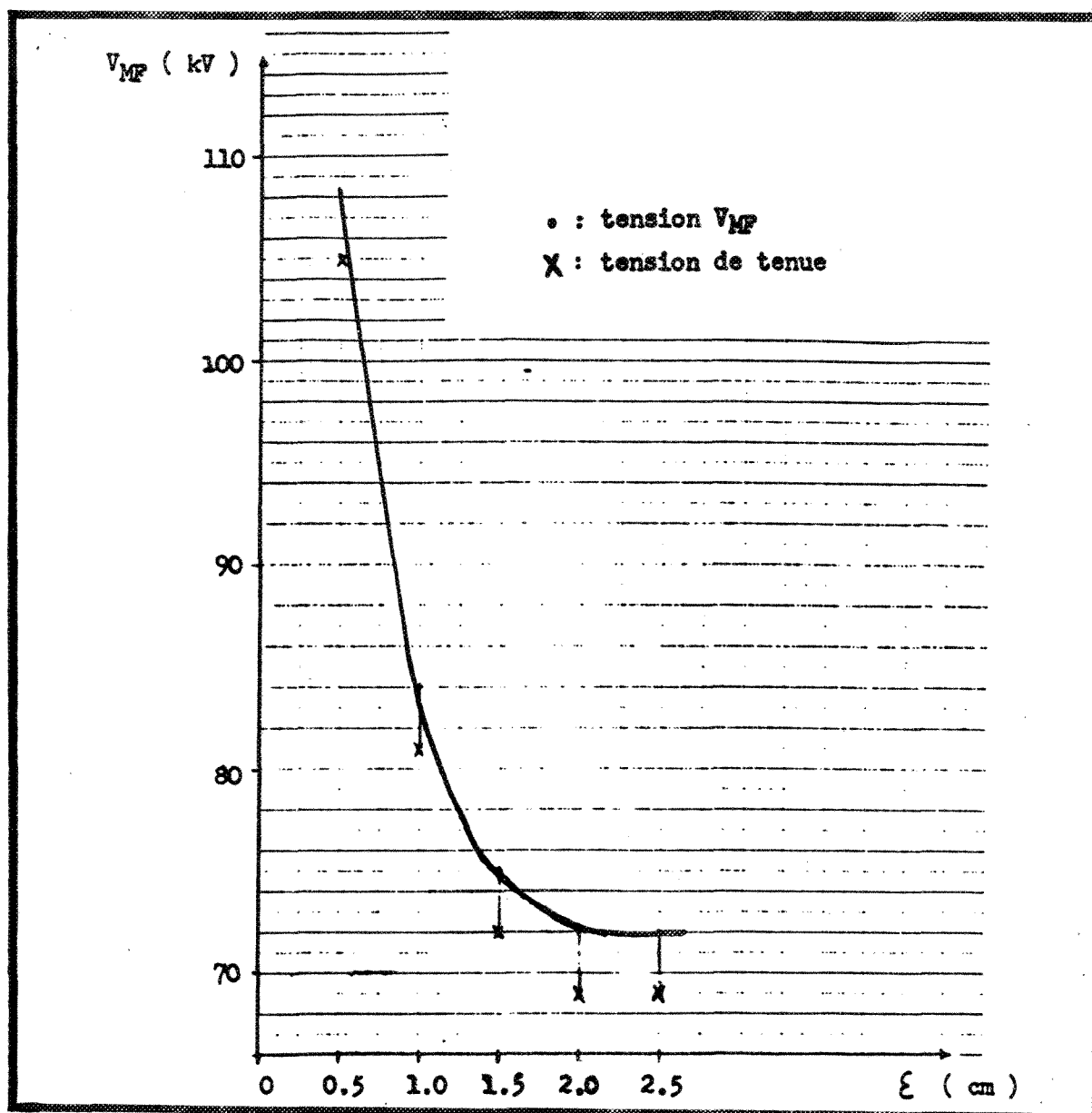


Figure 18: Variation du niveau de la tension minimale de contournement  $V_{MF}$  en fonction de l'épaisseur de glace accumulée, en régime de fonte sous tension alternative.

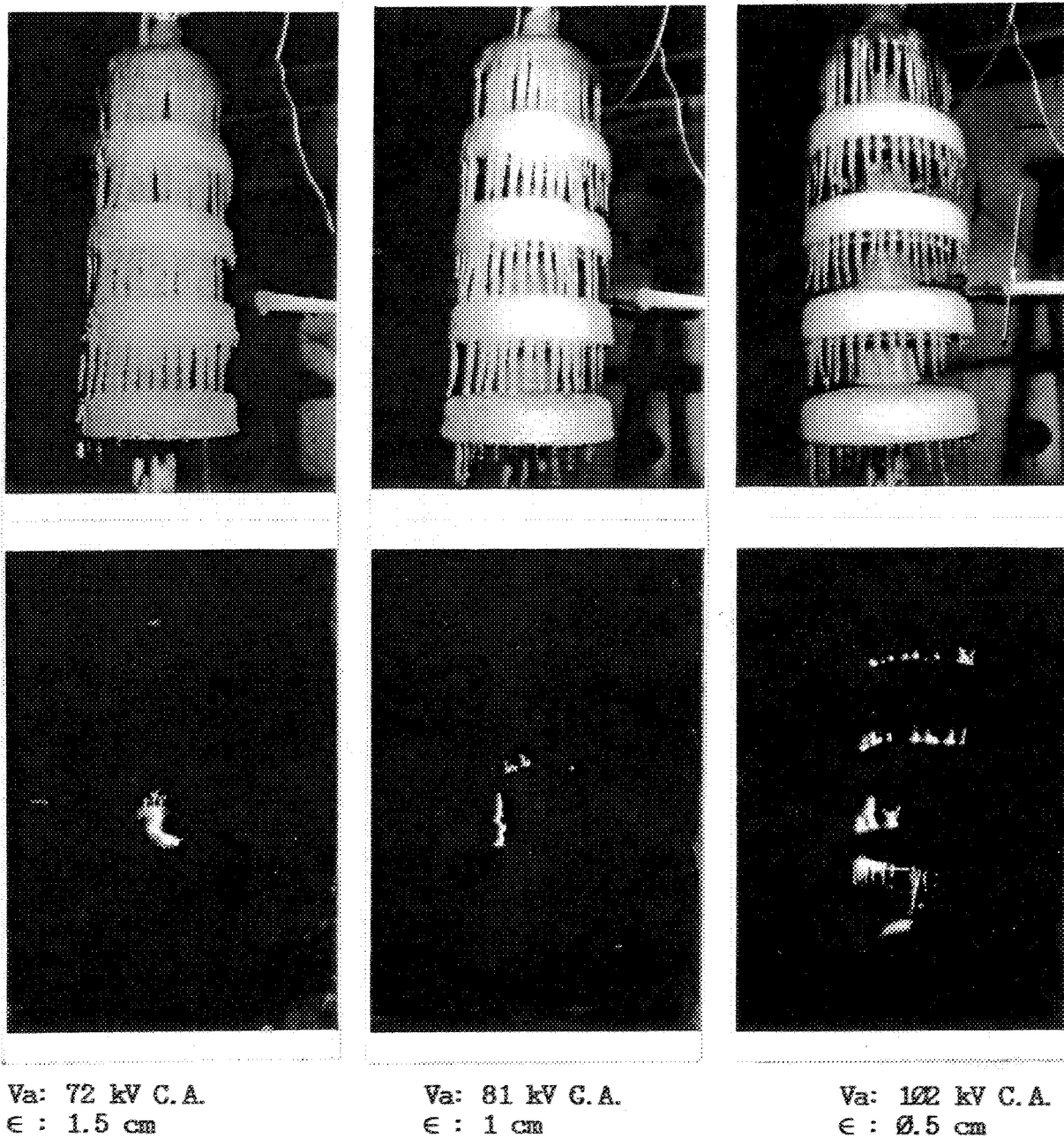


Figure 19: Photos prises à la fin de la période d'accumulation et au début de l'application de la tension d'essai  $V_a$  (tension de tenue de l'arc blanc). Elles offrent une bonne visualisation des espaces entre les isolateurs selon l'épaisseur de la glace ( $\epsilon$ ).

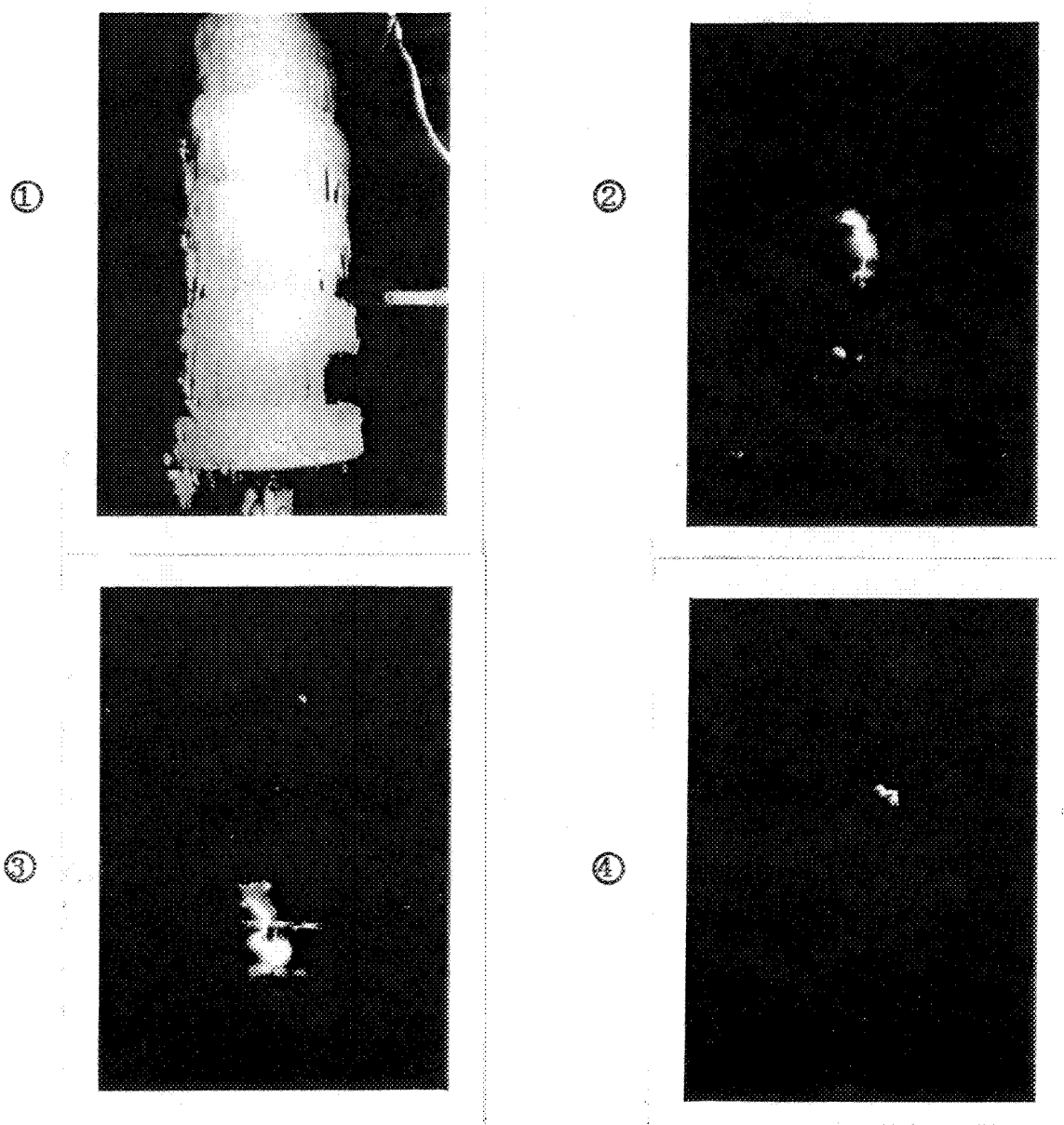


Figure 20a: Séquence chronologique de photos montrant l'évolution et l'obtention d'une tenue de l'arc blanc avec rupture du pont de glace.  
 $\epsilon$  : 2.5 cm  
 $V_a$ : 69 kV C.A.

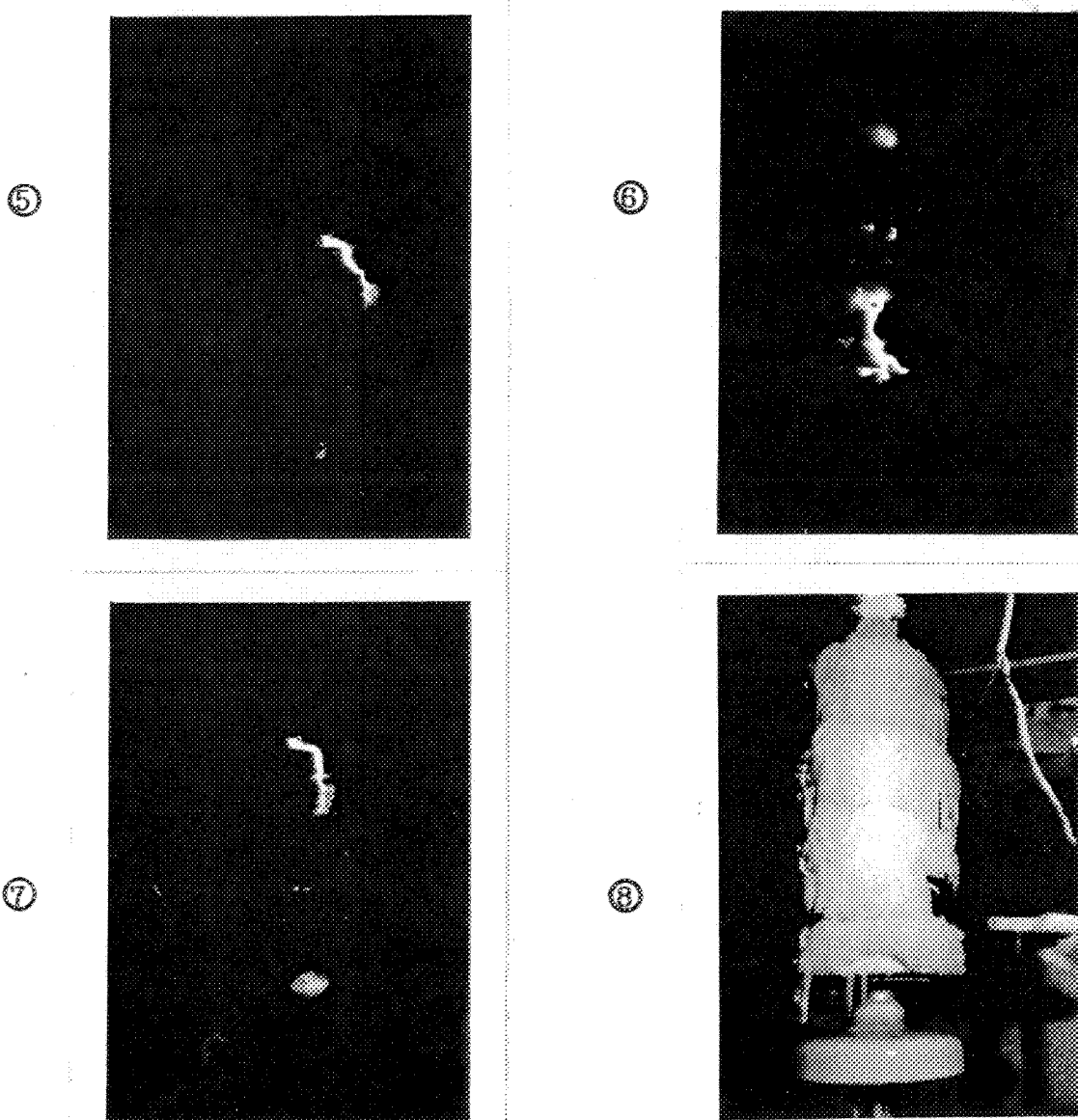


Figure 20a (suite): Séquence chronologique de photos montrant l'évolution  
et l'obtention d'une tenue de l'arc blanc avec rupture  
du pont de glace.  
 $\epsilon$  : 2.5 cm  
 $V_a$ : 69 kV C.A.



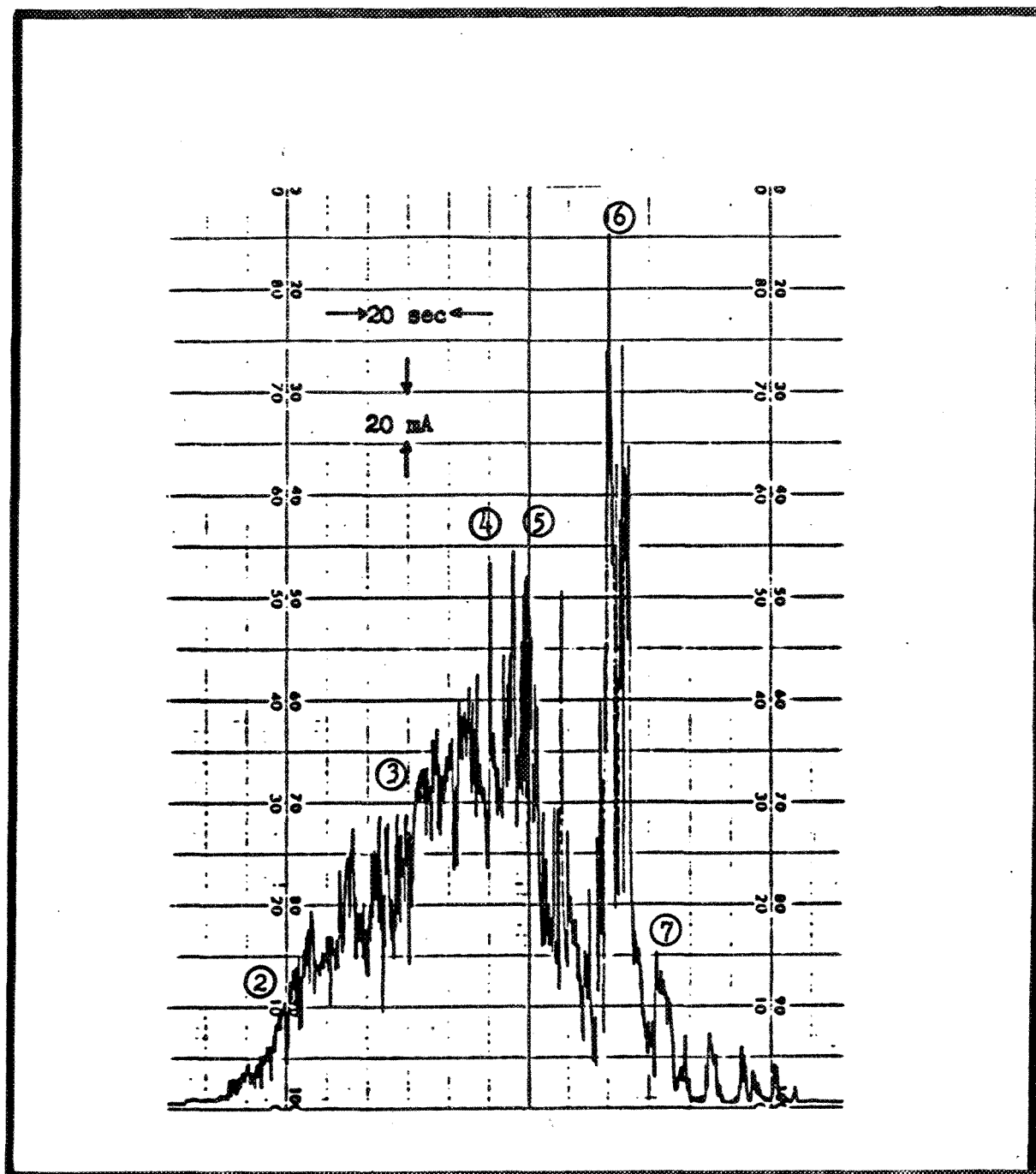


Figure 20b: Courant de fuite correspondant aux photos de la figure 20a.

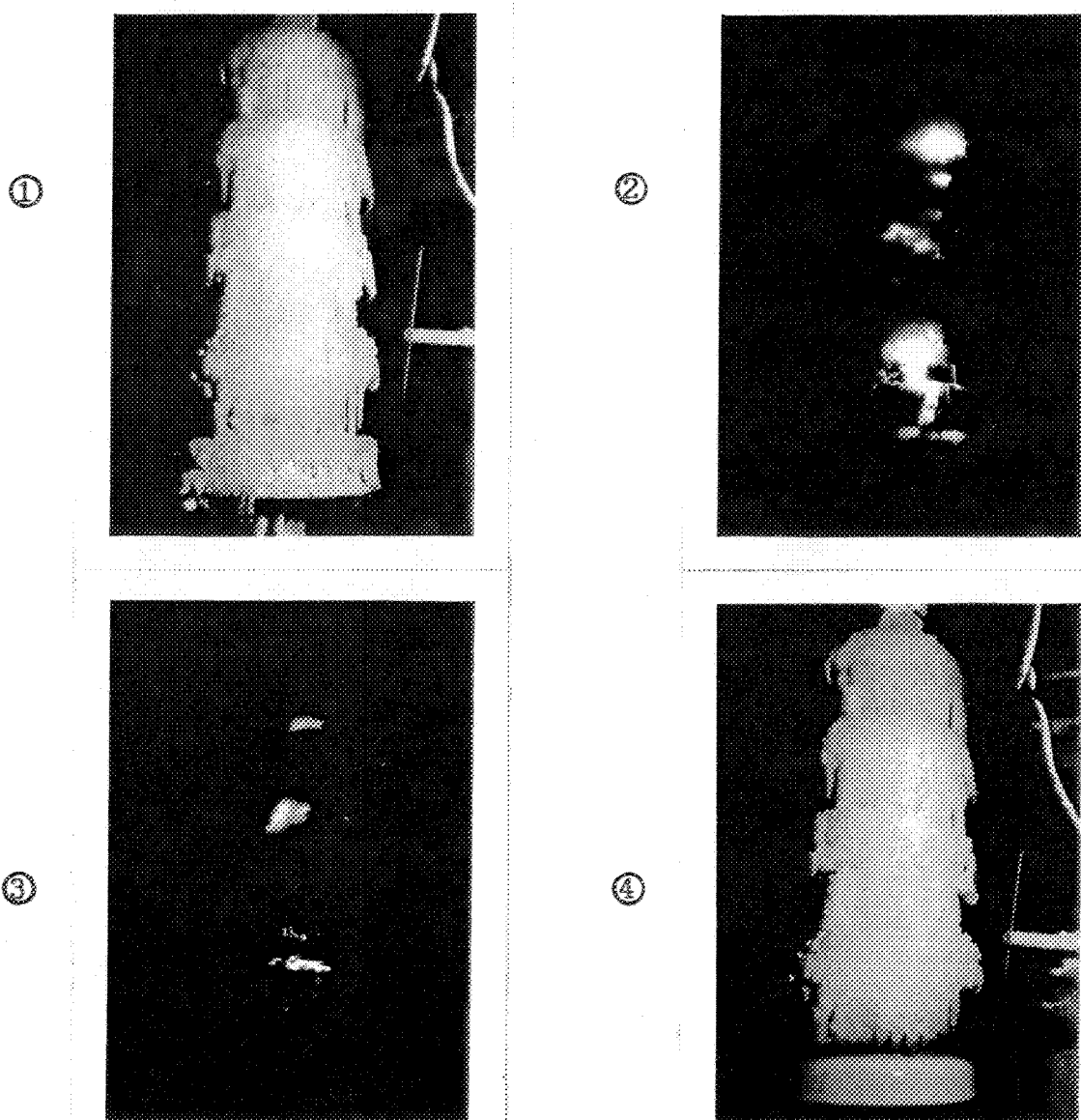


Figure 21a: Séquence chronologique de photos montrant l'évolution et l'obtention d'une tenue de l'arc blanc sans rupture du pont de glace.  
 $\epsilon$  : 2.5 cm  
 $V_a$ : 69 kV C.A.

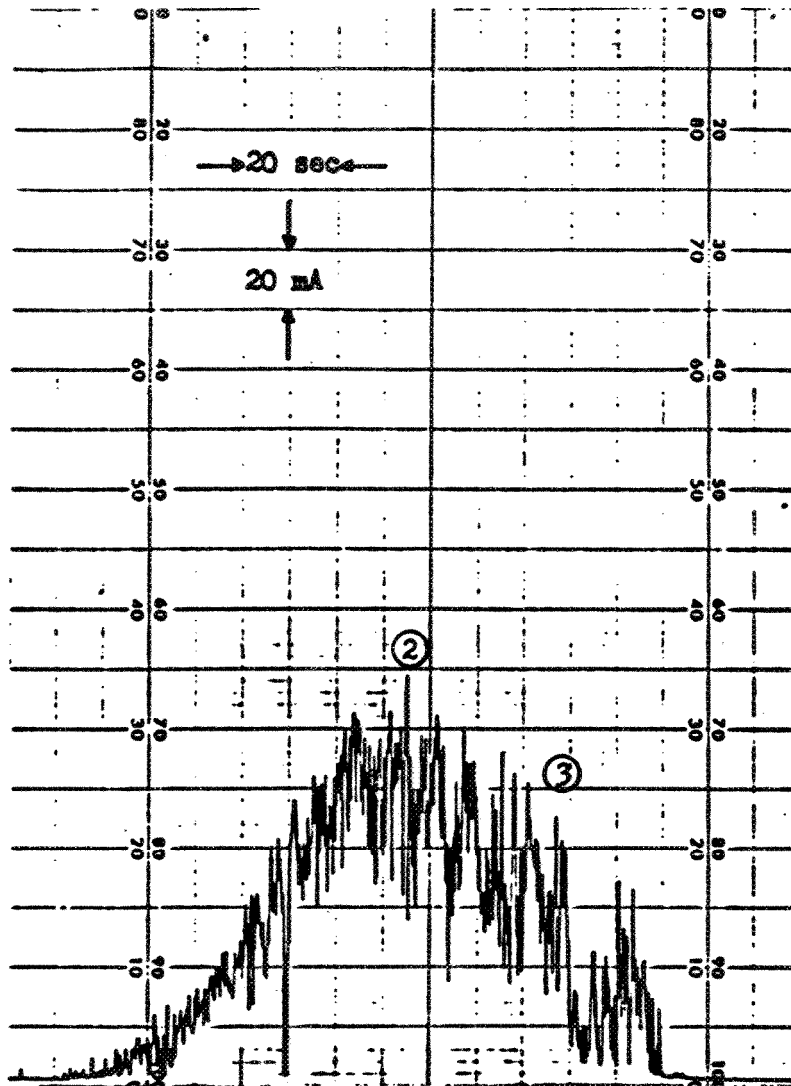


Figure 21b: Courant de fuite correspondant aux photos de la figure 21a.

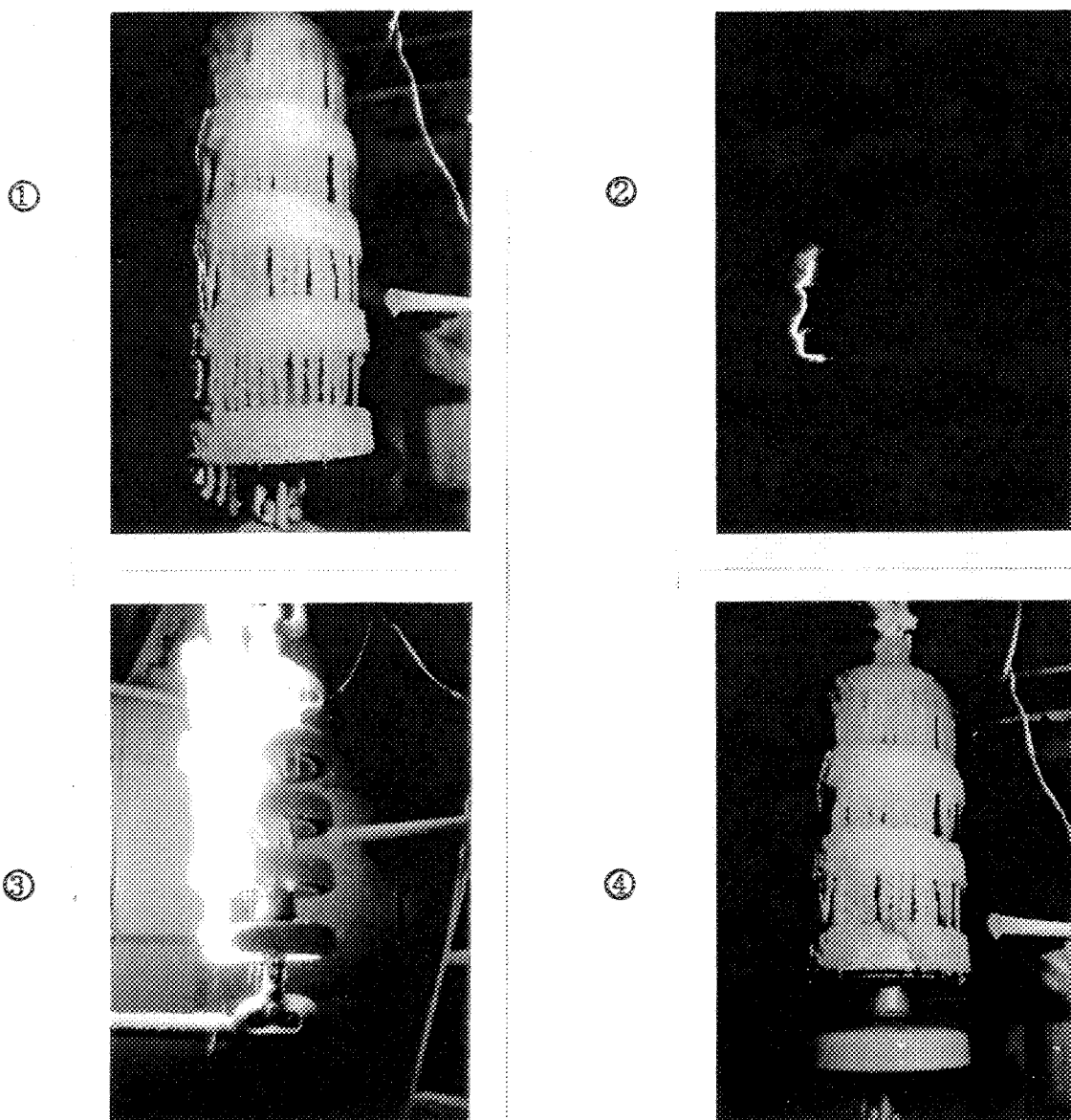


Figure 22a: Séquence chronologique de photos montrant l'évolution et l'obtention d'un contournement complet de la chaîne d'isolateurs.

$\epsilon$  : 1.5 cm

$V_a$ : 75 kV C.A.

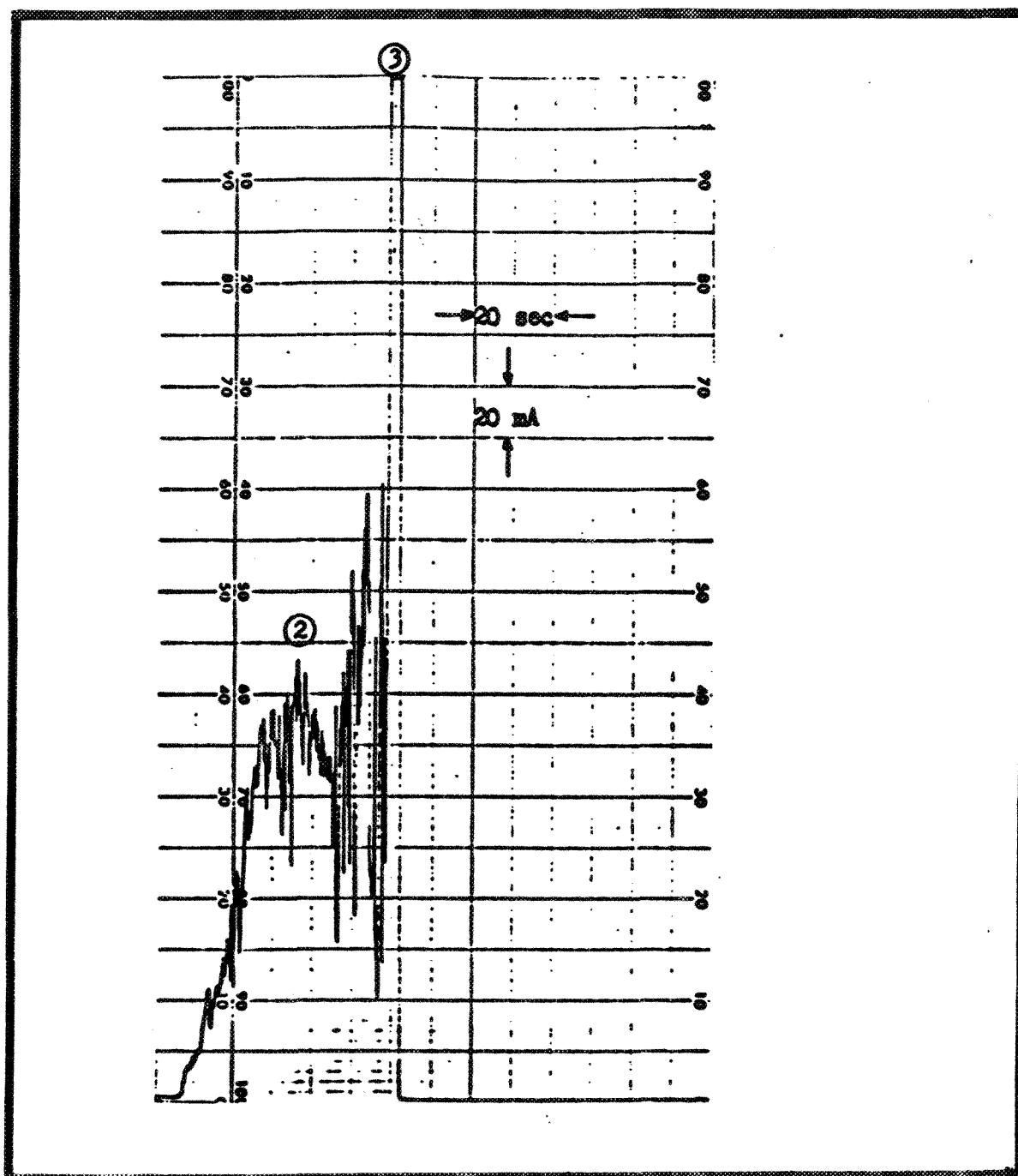


Figure 22b: Courant de fuite correspondant aux photos de la figure 22a.

### 5.3.3 Dégradation des isolateurs

Des traces d'érosion semblables à celles constatées avec de la précontamination (c.f. figures 11 et 12 aux pages 47 et 48) ont été observées à la surface des isolateurs après qu'il y ait eu contournement. Cependant, cette fois-ci, ces traces étaient localisées au pourtour de la jupe des isolateurs 2,3 ou 4 (c.f. figure 4 de la page 14).

### 5.3.4 Conclusion

Des essais de contournement des isolateurs en porcelaine propres en régime de fonte sous tension alternative, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Les conditions de fonte les plus sévères sont rencontrées en n'utilisant qu'un seul élément chauffant de 1.5 kW durant la période de réchauffement alors que le taux d'augmentation de la température de l'enceinte réfrigérée était d'environ 4°C par heure (en moyenne). La période de fonte est de 3 heures.
- Par rapport au régime d'accumulation, le régime de fonte provoque une baisse pouvant aller jusqu'à 4 % (3 kV pour une chaîne de quatre isolateurs en porcelaine sous tension) de la valeur de la tension

minimale de contournement. Ceci, pour des conditions d'accumulation donnant une épaisseur de glace de 2 cm sur le conducteur témoin.

- L'obtention d'une tension  $V_{mf}$  la plus basse possible se réalise avec une accumulation de givre lourd d'au moins 2 cm.
- Des traces d'érosion similaires à celles observées lorsqu'il y a précontamination sont détectées à la surface des isolateurs.

Sur la valeur de la tension minimale de contournement, le régime de fonte sans contamination semble avoir le même effet qu'une précontamination légère ( $0.01 \text{ mg/cm}^2$ ) des isolateurs en régime d'accumulation. C'est-à-dire une baisse de 4 % (3 kV pour une chaîne de quatre isolateurs sous tension).

#### 5.4 Essais de contournement en tension continue

La procédure expérimentale est essentiellement la même que celle qui a été suivie lors des essais en tension alternative.

De plus, la glace fondue lorsque la tension d'essai  $V_a$  est appliquée fut également recueillie, et son volume mesuré.

La glace encore à l'état solide qui s'écroule en même temps que l'eau de fonte s'égoutte n'est pas incluse quand ces mesures sont effectuées. Ces renseignements seront utilisés ultérieurement à la section 5.8.

#### 5.4.1 Résultats expérimentaux

Les résultats obtenus sont compilés aux tableaux 6 et 7 des pages 81 et 82 respectivement pour les polarités négatives et positives.

Dans l'ensemble, les phénomènes observés sont les mêmes qu'en tension alternative.

Avec les deux polarités, l'amplitude maximale du courant de fuite semble plutôt constante. En fonction de l'épaisseur de glace accumulée, la variation du courant de fuite ( $I_{\max}$ ) ne suit pas de tendance aussi marquée qu'en tension alternative.

#### 5.4.2 Observations

Sous tension continue négative, un certain nombre d'essais sont entièrement réalisés en maintenant la tension à un niveau constant. Il était alors nécessaire d'attendre l'auto-amorçage d'un arc blanc. La



température ambiante était alors stationnaire à environ  $0^{\circ}\text{C}$  depuis au moins une heure. Dans sa totalité, la période de fonte dure en moyenne 5 heures.

En tension alternative, il y a de fortes décharges intermittentes qui surviennent environ 3 heures après le début de la période de fonte; ces décharges érodent la pointe des glaçons suspendus aux isolateurs. Ces décharges n'apparaissent pas en polarité positive. La période de fonte en polarité positive peut donc être plus longue qu'en tension alternative. Cependant, cette prolongation de la période de fonte ne devrait pas excéder 1 heure 30 minutes; car la glace accumulée sur les isolateurs commence à fondre de façon excessive. En résumé, la période de fonte en polarité positive (jusqu'à l'application de la tension  $V_a$ ) dure environ 4 heures 30 minutes.

Dans le calcul du taux moyen d'échauffement de l'air ambiant, on ne tient pas compte de la période de temps où la température ambiante est stabilisée à environ  $0^{\circ}\text{C}$ . On ne considère que la période initiale d'environ 3 heures où la température augmente (de  $-12^{\circ}\text{C}$  à  $0^{\circ}\text{C}$ ). Au cours de cette dernière période, la procédure expérimentale est toujours la même. Le taux moyen d'échauffement est donc le même en tension continue qu'en tension alternative, soit environ  $4^{\circ}\text{C}$  par heure.

### 5.4.3 Conclusion

Des essais de contournement des isolateurs en porcelaine propres en régime de fonte sous tension continue, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- En moyenne, la période de fonte est de 4:30 heures en polarité positive; et de 5 heures en polarité négative. En effet, dans ce dernier cas, il faut parfois attendre l'auto-amorçage de l'arc blanc alors que la tension de service  $V_0$  est appliquée.
- Par rapport au régime d'accumulation, le régime de fonte provoque une baisse pouvant aller jusqu'à 24 % (18 kV) en polarité négative et de 3.4 % en polarité positive. Ceci pour une épaisseur de 2 cm de givre lourd sur une chaîne de quatre isolateurs. L'obtention d'une tension  $V_{MF}$  la plus basse possible nécessite une épaisseur minimale de 2 cm.

**Tableau 6:** Compilation des résultats des essais de contournement électrique des isolateurs en porcelaine en régime de fonte sous tension continue de polarité négative.

Taux moyen d'échauffement de l'air ambiant de 4°C par heure, tension de service  $V_0$  de 60 kV C.C.-\*, 4 isolateurs sous tension.

épaisseur de la glace (cm)	$V_a$ (kV C.C.-)	résultat	$V_{MF}$ (kV C.C.-)
2.5	57	contournement	57
	54	tenue, I max : 172 mA	
	54	tenue, I max : 208 mA	
	54	tenue, I max : 180 mA	
2	57	contournement	57
	54	tenue, I max : 220 mA	
	54	tenue, I max : 188 mA	
	54	tenue, I max : 155 mA	
1.5	54	tenue, I max : 168 mA	60
	60	contournement	
	57	tenue, I max : 175 mA	
	57	tenue, I max : 135 mA	
1	57	tenue, I max : 185 mA	69
	69	contournement	
	66	tenue, I max : 125 mA	
	66	tenue, I max : 155 mA	
0.5	66	tenue, I max : 105 mA	78
	78	contournement	
	75	tenue, I max : 149 mA	
	75	tenue, I max : 217 mA	
	75	tenue	

\*: Pour les essais où la tension  $V_a$  est inférieure à 60 kV, la tension de service  $V_0$  prend la même valeur que la tension  $V_a$ . Tous les essais concernant les fortes épaisseurs (1.5, 2 et 2.5 cm) sont donc entièrement réalisés en maintenant la tension à un niveau constant (la valeur de la tension d'essai  $V_a$ ).

**Tableau 7:** Compilation des résultats des essais de contournement électrique des isolateurs en porcelaine en régime de fonte sous tension continue de polarité positive.

Taux moyen d'échauffement de l'air ambiant de 4°C par heure, tension de service  $V_0$  de 60 kV C.C., 4 isolateurs sous tension.

épaisseur de la glace (cm)	$V_a$ (kV C.C.+)	résultat	$V_{MF}$ (kV C.C.+)
2.5	84	tenue, I max : 270 mA	84
	84	tenue, I max : 250 mA	
	84	contournement	
	81	tenue, I max : 190 mA	
	81	tenue, I max : 180 mA	
	81	tenue, I max : 175 mA	
2	84	contournement	84
	81	tenue, I max : 190 mA	
	81	tenue, I max : 190 mA	
	81	tenue, I max : 185 mA	
	81	tenue, I max : 175 mA	
1.5	90	contournement	90
	87	tenue, I max : 265 mA	
	87	tenue, I max : 200 mA	
	87	tenue, I max : 190 mA	
1	96	contournement	96
	93	tenue, I max : 160 mA	
	93	tenue, I max : 140 mA	
	93	tenue	
0.5	102	contournement	102
	99	tenue, I max : 120 mA	
	99	tenue, I max : 80 mA	
	99	tenue, I max : 60 mA	

### 5.5 Comparaison des résultats obtenus en fonction de la nature de la tension appliquée

Sous tension continue positive ou négative, il n'y a pas de profondes traces d'érosion comme c'est le cas avec la tension alternative. À la limite, il y avait un écaillage superficiel de l'émail sur le dessus de l'isolateur du haut, tout près du capuchon métallique relié à la mise à la terre. En tension continue, l'arc blanc (menant au contournement éventuel) se propage dans l'air à la surface de la glace; alors qu'en tension alternative, l'arc semble se propager entre la glace et la surface des isolateurs.

La fonte dure plus longtemps en tension continue qu'en tension alternative (5 heures en C.C.- et 4.5 heures en C.C.+ par rapport à 3 heures en C.A.). Le fait est qu'en tension alternative, la présence de décharges partielles originaires de la pointe des glaçons suspendus à l'isolateur inférieur provoque l'érosion et la fonte prématurée de la glace; la tension d'essai  $V_a$  doit alors être appliquée avant que la température ambiante n'ait atteint  $0^{\circ}\text{C}$ .

En polarité positive, le régime de fonte a le même effet qu'en tension alternative, c'est-à-dire une baisse de 3 kV (pour quatre isolateurs) de la tension  $V_{mf}$  par rapport à ce qu'elle est en régime d'accumulation sans contamination. Ceci, pour une épaisseur de glace de 2 cm sur le conducteur témoin.

Cette valeur de 3 kV représente une baisse relative de 4 % en tension alternative et de 3.4 % en polarité positive.

Cette baisse de la tension  $V_{MF}$  est plus importante en polarité négative, soit 24 % (18 kV). Alors que la température ambiante est stable à environ 0°C, la chaleur fournie par le calorifère continue à effectuer un certain travail; la transformation latente de la glace en eau est alors entreprise et partiellement effectuée. Ultérieurement, l'énergie devant être fournie par l'arc blanc pour compléter cette transformation devrait donc être moindre. Le film d'eau produit permet d'obtenir une résistance de parcours (résistance en série avec l'arc) la plus faible possible. Ce film d'eau doit continuellement être reformé afin que la faible résistance de parcours dure aussi longtemps que l'arc est présent; ceci permet le développement et l'allongement de l'arc blanc jusqu'au contournement complet de la chaîne d'isolateurs. Plus la transformation latente de la glace en eau est avancée avant que l'arc blanc n'apparaisse, plus il est possible de diminuer le niveau de la tension  $V_{MF}$ .

Jusqu'à une épaisseur d'environ 1 cm, la quantité de glace accumulée augmente à la fois en épaisseur et en longueur verticale. A partir d'une épaisseur de 1.5 cm, l'augmentation ne se fait plus qu'en fonction de l'épaisseur de l'amas de glace. Les espaces entre les isolateurs sont tous comblés par les glaçons qui s'égouttent des isolateurs supérieurs. La croissance des glaçons suspendus à l'isolateur inférieur est arrêtée par

l'apparition des effluves originaires de la borne haute tension; ces effluves sont apparentés avec le courant de fonte  $I_f$  (c.f. section 3.2).

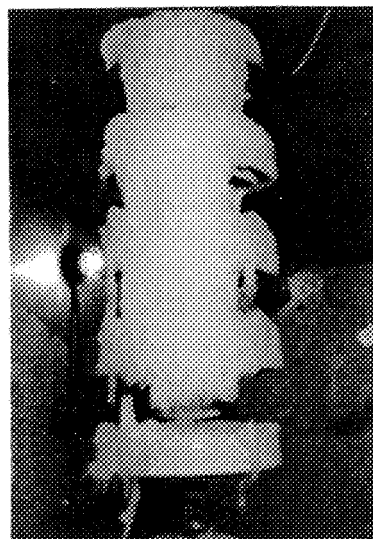
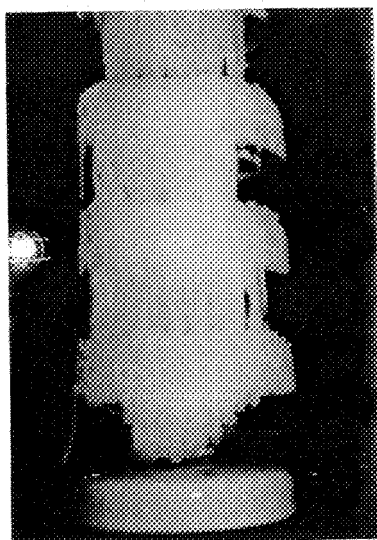
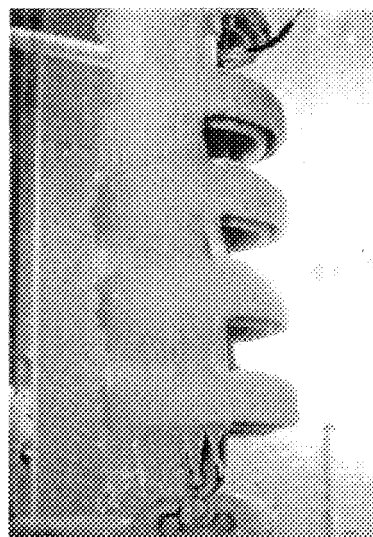
Si la quantité de glace accumulée est suffisante, le même volume d'eau de fonte peut s'égoutter tout en conservant le même support solide sur lequel peut reposer le film d'eau nécessaire pour faciliter le contournement. Avec les trois natures de tension appliquée, c'est ce qui se produit lorsque l'épaisseur de glace sur le conducteur témoin est d'au moins 2 cm; la tension  $V_{mf}$  reste alors constante à son niveau le plus bas possible. La figure 23 de la page 87 montre qu'il n'y a pas beaucoup de différence dans l'aspect physique de l'amas de givre accumulé sur les isolateurs; ceci, lorsque l'épaisseur de glace accumulée sur le conducteur témoin ( $\epsilon$ ) passe de 2 à 2.5 cm.

Pour les épaisseurs allant de 1 à 2.5 cm, la même tendance est observée en ce qui concerne le niveau de la tension  $V_{mf}$ ; peu importe la nature de la tension appliquée. Dans les trois cas, la tension minimale de contournement correspondant à une épaisseur de 1 cm est de 12 kV plus élevée que celle correspondant à une épaisseur de 2.5 cm.

En ce qui concerne l'épaisseur de 0.5 cm, la plus grande différence est notée en présence de la tension alternative. En effet, la tension minimale de contournement n'a pas encore pu être mesurée dans ce cas. C'est que l'activité électrique à l'extrémité des glaçons augmente lorsque ceux-ci s'approchent très près des isolateurs inférieurs; la trop courte période

d'accumulation (pour obtenir une épaisseur de glace de 0.5 cm sur le conducteur témoin) empêche la formation de solides ponts de glace entre les isolateurs. La figure 19 de la page 68 illustre les conséquences qu'aura ce phénomène lorsque la tension d'essai  $V_a$  sera appliquée. Ce phénomène ne se produit pas en tension continue. La résistance du parcours de fuite en tension alternative pour une épaisseur de 0.5 cm est ainsi beaucoup plus élevée qu'en tension continue positive ou négative. En tension alternative, l'amplitude maximale de la tension est d'environ 41 % plus élevée que le niveau de la tension efficace; l'augmentation de l'intensité des décharges de type effet couronne et la difficulté à former les ponts entre les isolateurs peuvent être expliqués par cette particularité des essais réalisés sous tension alternative.





$\epsilon : 2 \text{ cm}$

$\epsilon : 2.5 \text{ cm}$

Figure 23: Photos montrant l'état de la glace avant et après l'apparition d'un arc blanc. Les essais sont entièrement réalisés en maintenant la tension appliquée à un niveau constant de 54 kV C.C.- ( $V_0$  est égale à  $V_a$ ).

## 5.6 Observations sur l'expérimentation des essais en régime de fonte

De manière générale, en régime de fonte, il semble qu'il soit préférable d'attendre que la température ambiante ait atteint le point de fusion de la glace ( $0^{\circ}\text{C}$ ). Cependant, si des décharges partielles de plus en plus fortes érodent les glaçons tout en faisant fondre prématurément la glace, la tension d'essai  $V_a$  devra être appliquée alors que la température ambiante est légèrement inférieure à  $0^{\circ}\text{C}$  (environ  $-1^{\circ}\text{C}$ ); c'est le cas en tension alternative.

Si l'épaisseur de glace est suffisante pour procurer un support solide capable de servir de soutien au film d'eau (épaisseur de glace d'au moins 1.5 cm), le taux de réchauffement doit être le plus bas possible. Ceci minimise l'égouttement massif de l'eau de fonte, et diminue les possibilités d'avoir un auto-amorçage d'un arc blanc à la tension de service  $V_o$ .

La transformation latente de la glace en eau à  $0^{\circ}\text{C}$  peut donc être entreprise et partiellement complétée. Il faut alors attendre le plus longtemps possible avant d'appliquer la tension d'essai  $V_a$ ; sans faire complètement fondre la glace évidemment. Si c'est un essai réalisé en maintenant la tension à un niveau constant ( $V_o$  égale  $V_a$ ), il faut forcément attendre l'auto-amorçage de l'arc blanc. Si la tension  $V_a$  est supérieure à la tension  $V_o$ , et qu'il y a de fortes décharges avec un écoulement élevé de l'eau de fonte, il faut appliquer la tension  $V_a$  sans attendre l'auto-amorçage de l'arc blanc à la tension  $V_o$ . Si les fortes décharges et

l'écoulement élevé de l'eau de fonte ne se manifestent pas, il faut attendre l'auto-amorçage de l'arc blanc avec la tension  $V_0$ , puis appliquer la tension  $V_a$ .

Si l'épaisseur de glace est vraiment faible et qu'il y a des espaces d'air entre la pointe des glaçons et le dessus des coupoles des isolateurs (épaisseur de glace inférieure à 0.5 cm en tension alternative), le taux de réchauffement doit être plus élevé. Ceci provoque initialement un égouttement massif de l'eau de fonte. Il faut alors appliquer la tension  $V_a$  le plus vite possible; l'auto-amorçage avec la tension  $V_0$  est toujours possible.

#### 5.7 Effets de la durée et de la puissance de l'arc blanc sur la tension

##### $V_{MF}$

Il est intéressant de vérifier si certains paramètres (ou variables) peuvent être liés à la détermination de la tension minimale de contournement ( $V_{MF}$ ) lors du régime de fonte.

Une des principales observations à analyser est le fait que la tension  $V_{MF}$  la plus basse est rencontrée en polarité négative, et la plus élevée l'est en polarité positive; et ceci, quelle que soit l'épaisseur de glace accumulée. Les variables concernées sont la durée de l'arc blanc et que la puissance moyenne dégagée par celui-ci [21].

### 5.7.1 Résultats expérimentaux

Les résultats compilés dans le tableau 8 de la page 91 sont ceux qui furent établis en fonction d'une épaisseur de 2 cm de glace accumulée sur le conducteur témoin.

### 5.7.2 Conclusion

Les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Pour une nature de tension donnée, la puissance moyenne dégagée est supérieure lorsque l'arc blanc mène au contournement. L'énergie dégagée est à peu près la même, mais la durée de l'arc est beaucoup plus courte que lorsqu'il y a tenue de l'arc blanc.
- La plus basse valeur de la tension  $V_{MF}$  est obtenue en C.C.-, lorsque la période de transition (ou la durée de l'arc) est la plus courte.
- Lorsqu'il y a tenue de l'arc blanc, la plus longue durée de celui-ci fut observée en polarité positive; la plus courte en tension alternative. Ce paramètre ne semble donc pas avoir d'influence sur le fait que la plus basse valeur de la tension  $V_{MF}$  soit rencontrée en polarité négative.

**Tableau 8:** Compilation des résultats obtenus concernant la durée de l'arc blanc et la puissance développée.

nature de la tension appliquée	$V_a$ ( kV )	résultat	durée de l'arc ( sec. )	énergie dégagée ( kJ ou kV.A.s )	puissance moyenne dégagée ( kW ou kVA )
C.C.-	57	contournement	65	569.8	8.8
	54	tenue, I max : 220 mA	130	707.6	5.4
	54	tenue, I max : 188 mA	120	582.6	4.9
	54	tenue, I max : 155 mA	120	595.3	5.0
	54	tenue, I max : 168 mA	150	690.1	4.6
C.C.+	84	contournement	95	1008.0	10.6
	81	tenue, I max : 180 mA	128	910.4	7.1
	81	tenue, I max : 175 mA	145	724.9	5.0
	81	tenue, I max : 185 mA	138	583.2	4.2
	81	tenue, I max : 190 mA	198	822.0	4.2
C.A.	72	contournement	75	504.0	6.7
	69	tenue, I max : 176 mA	85	531.2	6.3
	69	tenue, I max : 195 mA	100	586.3	5.9
	69	tenue, I max : 250 mA	65	515.3	7.9

## 5.8 Relation entre l'énergie dégagée par l'arc blanc et le volume d'eau de fonte

Le but de cette étude est premièrement d'observer si ces deux variables suivent une tendance donnée lorsqu'elles sont établies en fonction de l'épaisseur de glace accumulée sur le conducteur témoin. Puis, il est utile de les comparer entre elles.

### 5.8.1 Résultats expérimentaux

Les résultats sont compilés au tableau 9 de la page 96. Les différents regroupements sont représentés aux figures 24 à 30 des pages 97 à 103 inclusivement. Il est à noter que l'eau de fonte n'avait pas été récupérée lors des essais réalisés en tension alternative. Pour chaque essai, l'énergie est calculée en considérant la tension  $V_a$  appliquée lors de cet essai: pour les contournements, c'est la tension  $V_{mf}$ ; pour les tenues, c'est la tension de tenue, qui est de 3 kV inférieure à la tension  $V_{mf}$ .

### 5.8.2 Conclusion

Les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- En fonction de l'épaisseur, les deux variables (l'énergie dégagée et le volume d'eau) suivent à peu près la même tendance: une croissance assez rapide suivie d'un ralentissement plus ou moins prononcé survenant quand l'épaisseur de glace sur le conducteur témoin est d'environ 2 cm. C'est le cas pour les trois types de tension.
- Les figures 29 et 30 montrent que la variation du volume d'eau de fonte en fonction de l'énergie électrique fournie aux isolateurs est la même, quelle que soit la polarité de la tension appliquée. La pente est également la même, quelle que soit l'épaisseur de la glace. Le rapport est de 2.1 ml d'eau par kJ d'énergie fournie.

Quelle que soit la résistance du parcours de fuite (variations de l'épaisseur de glace, refroidissement ou fonte, etc...), le même rapport (2.1 ml/kJ) devrait être conservé. La composante active de l'énergie électrique fournie aux isolateurs fait fondre la glace. Ce transfert d'énergie calorifique semble donc toujours s'effectuer de façon similaire.

L'énergie nécessaire pour produire un ml d'eau à partir de la glace à 0°C est d'environ 0.335 kJ, 0.70 kJ sont donc requis pour obtenir 2.1 ml d'eau. Le transfert d'énergie entre l'arc blanc et l'eau de fonte s'effectue alors avec des pertes de 30 % (radiation, évaporation, convection avec l'air ambiant, etc...). Ces pertes peuvent être même plus élevées si on considère le fait qu'une partie de la transformation latente de la glace en

eau a déjà été effectuée par la chaleur provenant du calorifère, alors que l'arc blanc ne s'était pas encore développé.

### 5.9 Facteur de puissance en tension alternative

Une série de huit essais menés en tout dernier lieu permettent de déterminer le facteur de puissance moyen lorsqu'il y a tenue d'un arc blanc sur une chaîne d'isolateurs couverts de givre lourd.

#### 5.9.1 Résultats expérimentaux

La glace était accumulée sur une épaisseur d'au moins 2.5 cm. Le taux de réchauffement de la température ambiante était très élevé; de sorte qu'il fallait appliquer la tension d'essai  $V_a$  après une période de fonte d'à peine une dizaine de minutes. Cette tension était d'environ 75 kV C.A. répartie sur quatre isolateurs antibrouillard en porcelaine. Le calcul du rapport moyen donne une valeur de 1.94 ml/kV.A.s (variant de 1.52 à 2.24). C'est associé à une puissance apparente, alors que le 2.1 ml/kJ est associé à une puissance active.



### 5.9.2 Conclusion

Dans le cas présent, le facteur de puissance est donc de 0.92 (soit 1.94 divisé par 2.1). Au cours de la tenue de l'arc blanc, le déphasage moyen entre le courant et la tension serait alors d'environ  $22^\circ$  (soit l'arccos de 0.92). L'enregistrement simultané de la tension appliquée et du courant de fuite montre que ce dernier est légèrement en avance; c'est donc un déphasage capacitif.

**Tableau 9:** Compilation des résultats expérimentaux concernant le volume d'eau de fonte, l'énergie électrique fournie aux isolateurs et l'épaisseur de glace accumulée ( € ).

épaisseur de glace ( cm )	C.A.	C.C.-		C.C.+	
	énergie dégagée ( kV.A.s )	énergie dégagée ( kJ )	volume d' eau de fonte ( ml )	énergie dégagée ( kJ )	volume d' eau de fonte ( ml )
2.5	671.5	668.6	1650	680.4	1840
	658.6	731.7	1260	858.6	1860
	449.2	—	—	882	1690
	671.3				
	moy. : 613 cont. : 560.5	moy. : 700 cont. : 721	moy. : 1155 cont. : 1660	moy. : 807 cont. : 756	moy. : 1797 cont. : 1120
2	531.2	707.6	1230	910.4	2040
	586.3	582.6	1290	724.9	1690
	515.3	595.3	1330	583.2	1530
		690.1	1570	822	1700
	moy. : 545 cont. : 504	moy. : 645 cont. : 569.8	moy. : 1355 cont. : 1710	moy. : 760 cont. : 1008	moy. : 1740 cont. : 1640
1.5	503.7	642	1110	730.8	1140
	504.9	485	1040	696	1250
	385.9	565	1220	565	1080
	moy. : 465 cont. : 450.3	moy. : 564 cont. : 543.8	moy. : 1123 cont. : 1560	moy. : 664 cont. : 504.6	moy. : 1157 cont. : 960
1	326.3	263.2	790	446	710
	308.9	339.1	860	290.1	690
	279.9	283.9	780	—	740
	moy. : 305 cont. : 412.5	moy. : 295 cont. : 395.1	moy. : 810 cont. : 760	moy. : 368 cont. : —	moy. : 713 cont. : 540
0.5	111.1	145.8	240	53.5	300
	93.7	205.8	460	59.4	280
	—	—	—	83.1	—
	moy. : 103 cont. : 119	moy. : 175 cont. : 119	moy. : 350 cont. : 190	moy. : 65 cont. : —	moy. : 290 cont. : 540
moy. : moyenne des essais où il y a eu terme de l'arc blanc cont. : valeur lorsqu'il y a eu contournement					

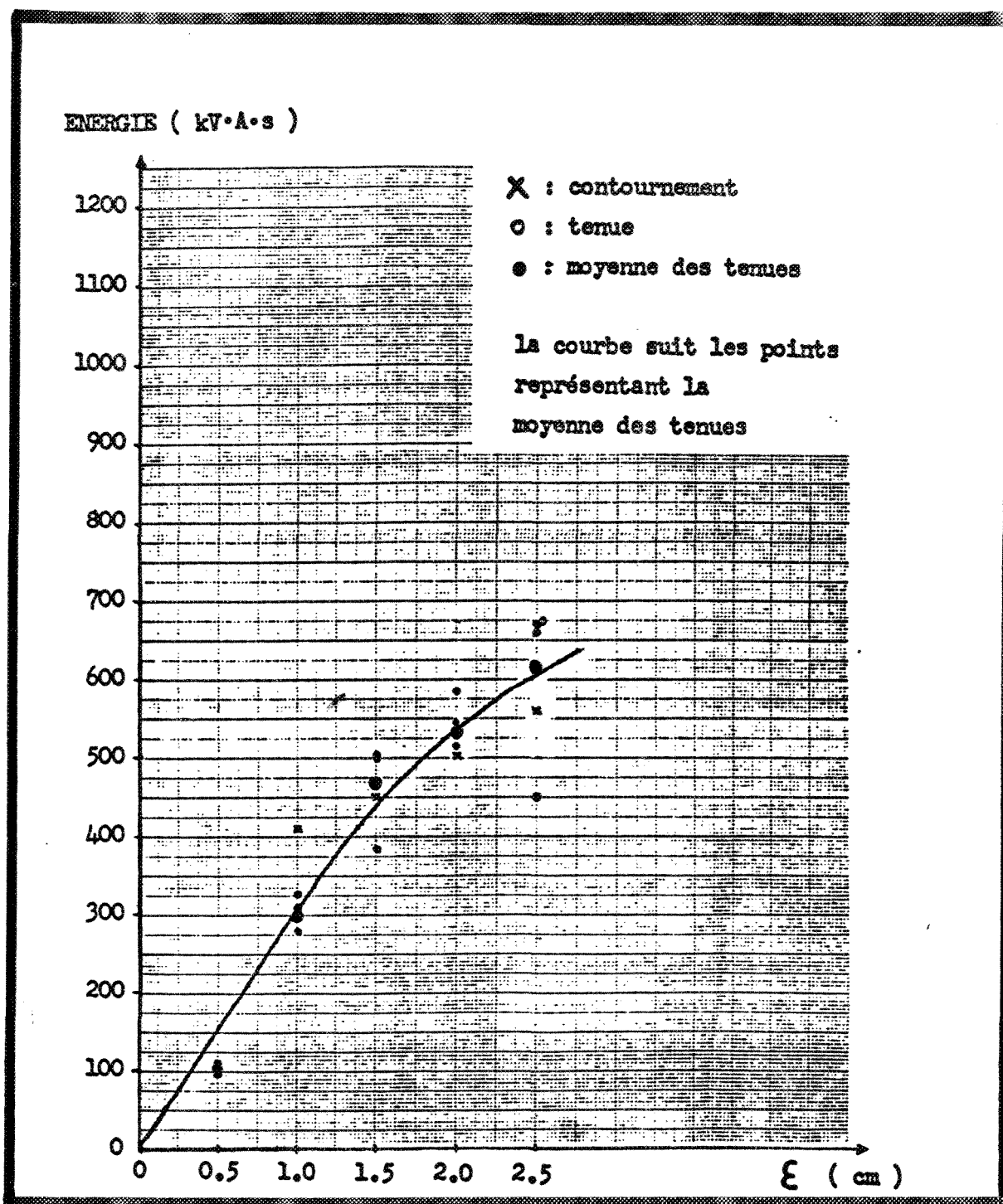


Figure 24: Variation de l'énergie électrique fournie aux isolateurs en fonction de l'épaisseur de glace ( $\xi$ ); en tension alternative.

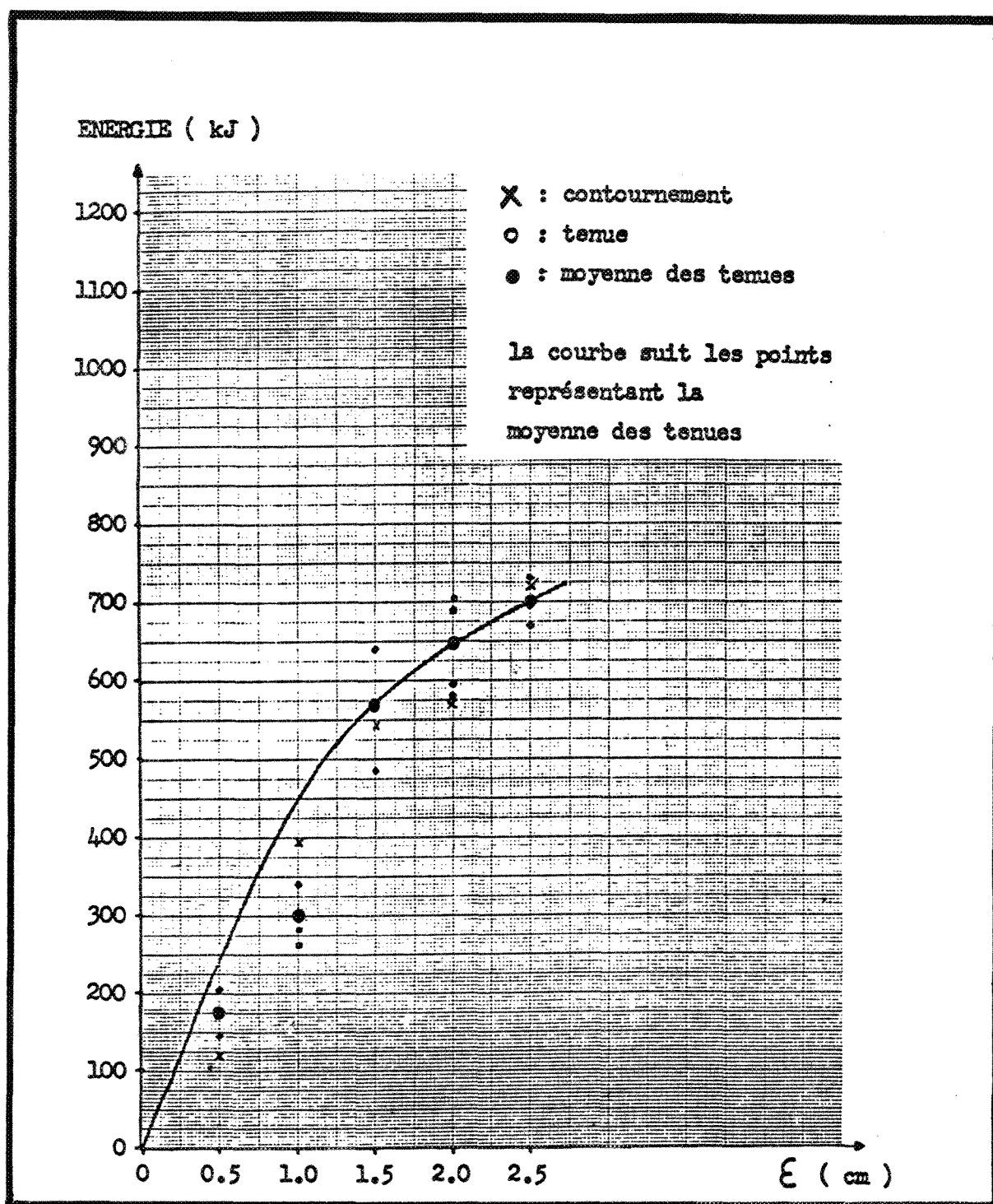


Figure 25: Variation de l'énergie électrique fournie aux isolateurs en fonction de l'épaisseur de glace ( $\epsilon$ ); en tension continue de polarité négative.

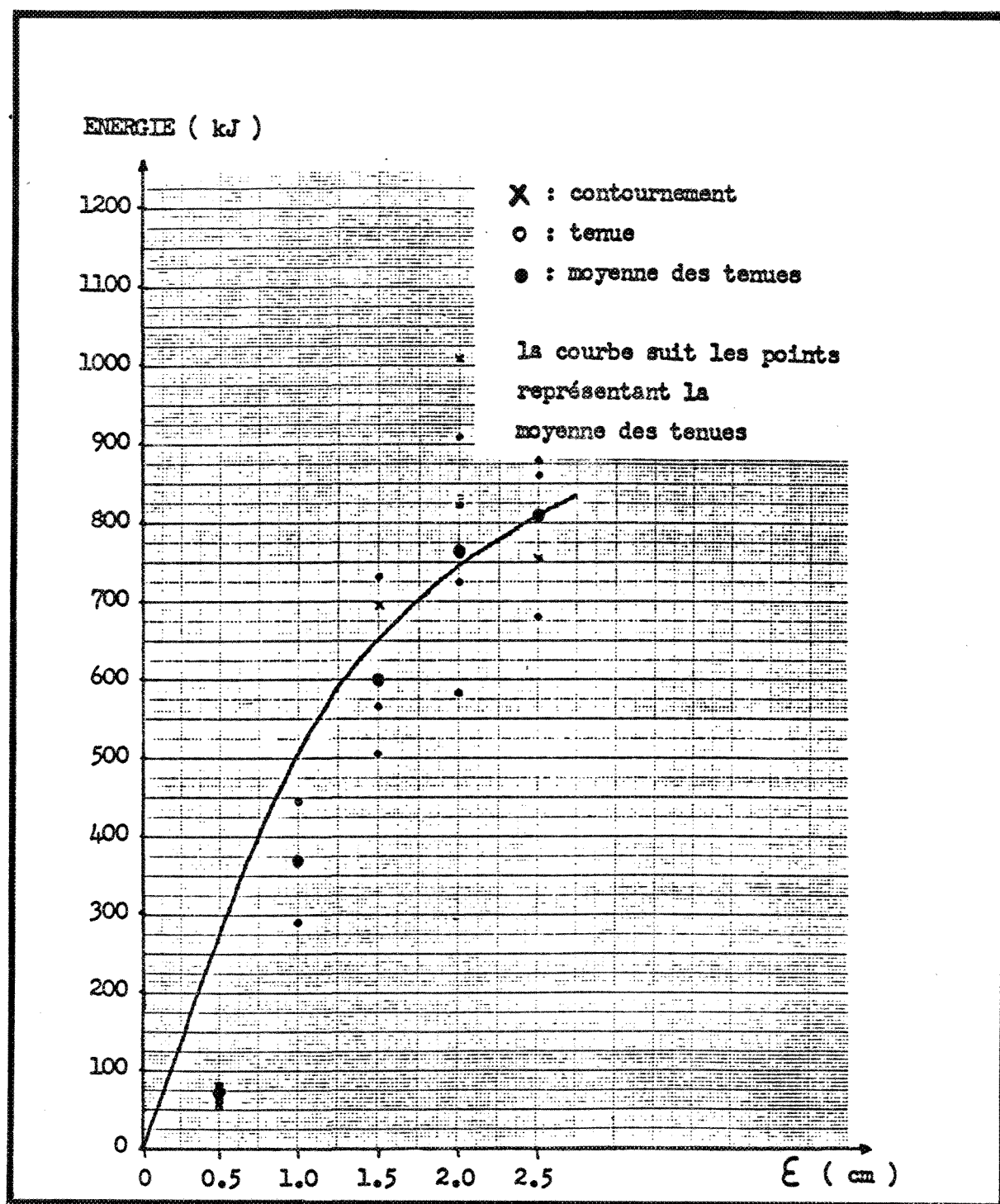


Figure 26: Variation de l'énergie électrique fournie aux isolateurs en fonction de l'épaisseur de glace ( $\epsilon$ ); en tension continue de polarité positive.

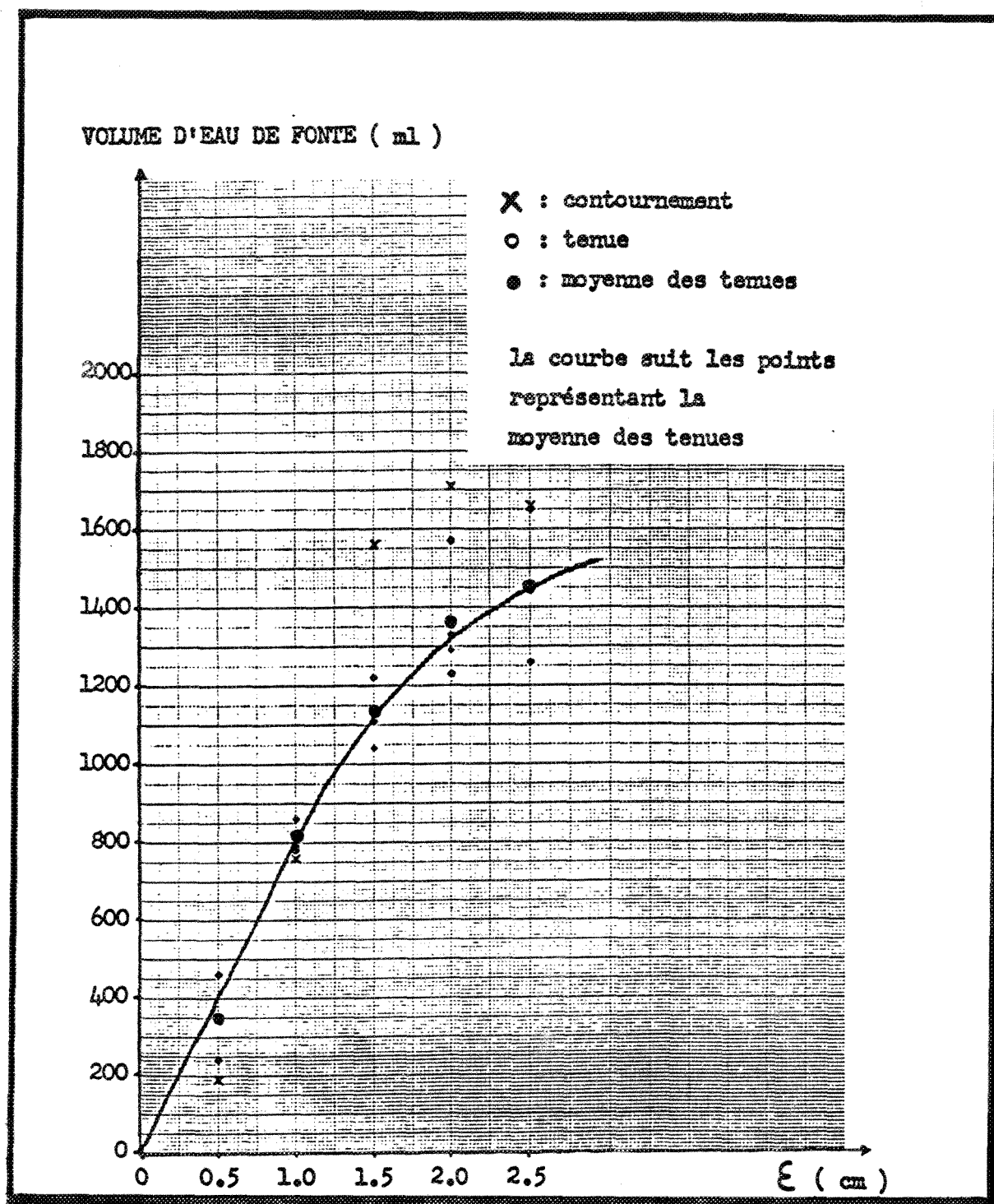


Figure 27: Variation du volume d'eau de fonte en fonction de l'épaisseur de glace (  $\epsilon$  ); en tension continue de polarité négative.

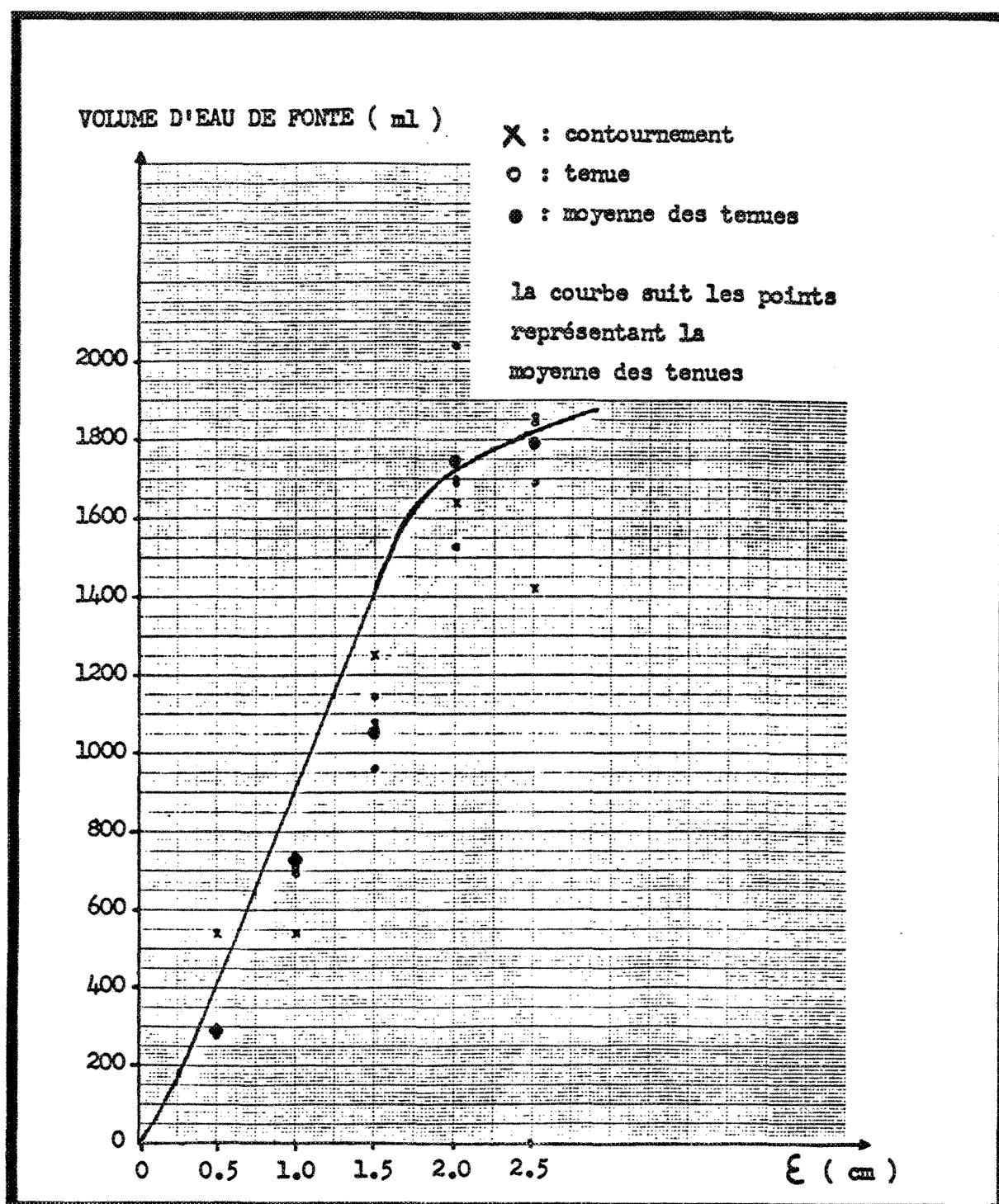


Figure 28: Variation du volume d'eau de fonte en fonction de l'épaisseur de glace ( $\xi$ ); en tension continue de polarité positive.

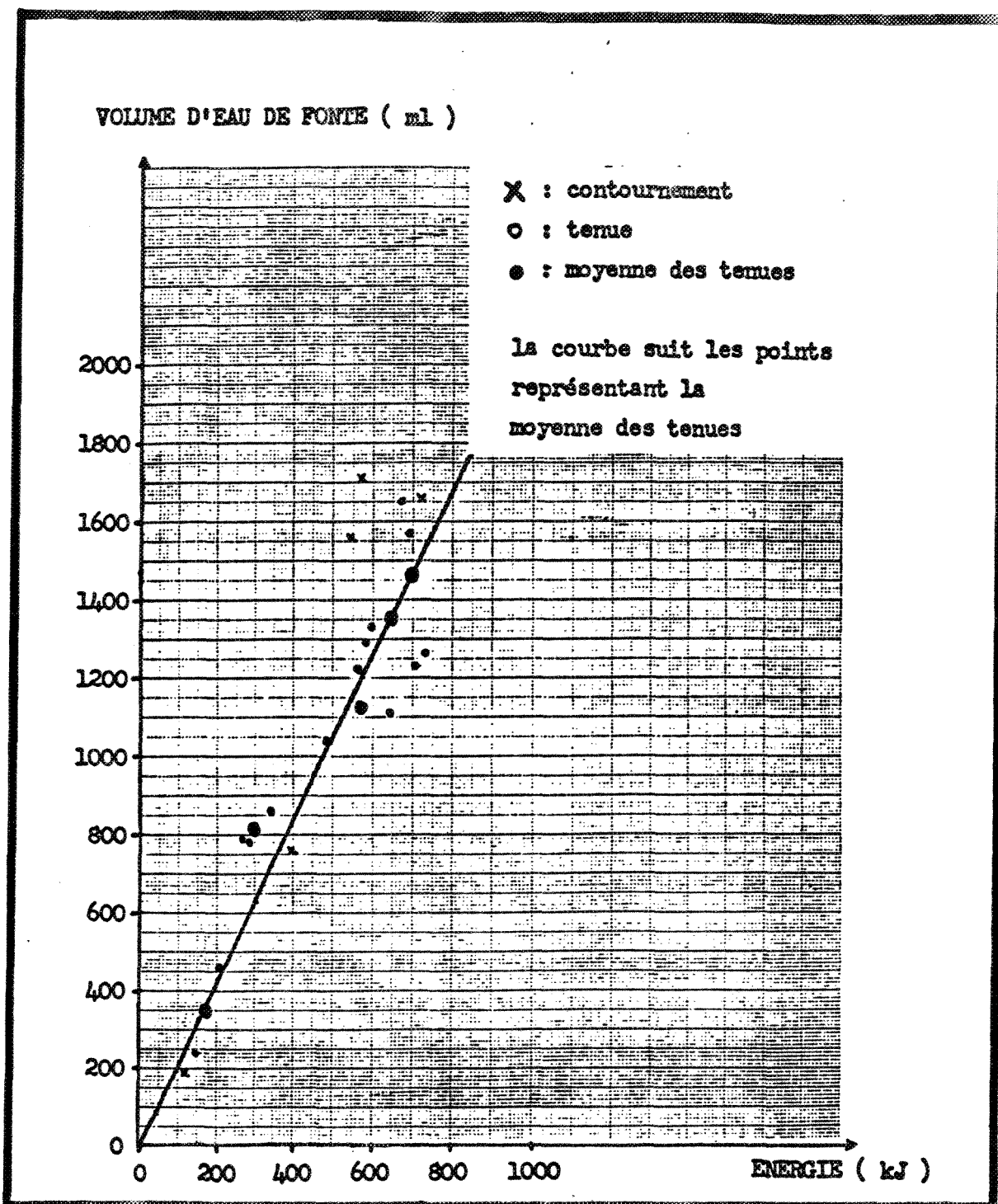


Figure 29: Variation du volume d'eau de fonte en fonction de l'énergie électrique fournie aux isolateurs; en tension continue de polarité négative.



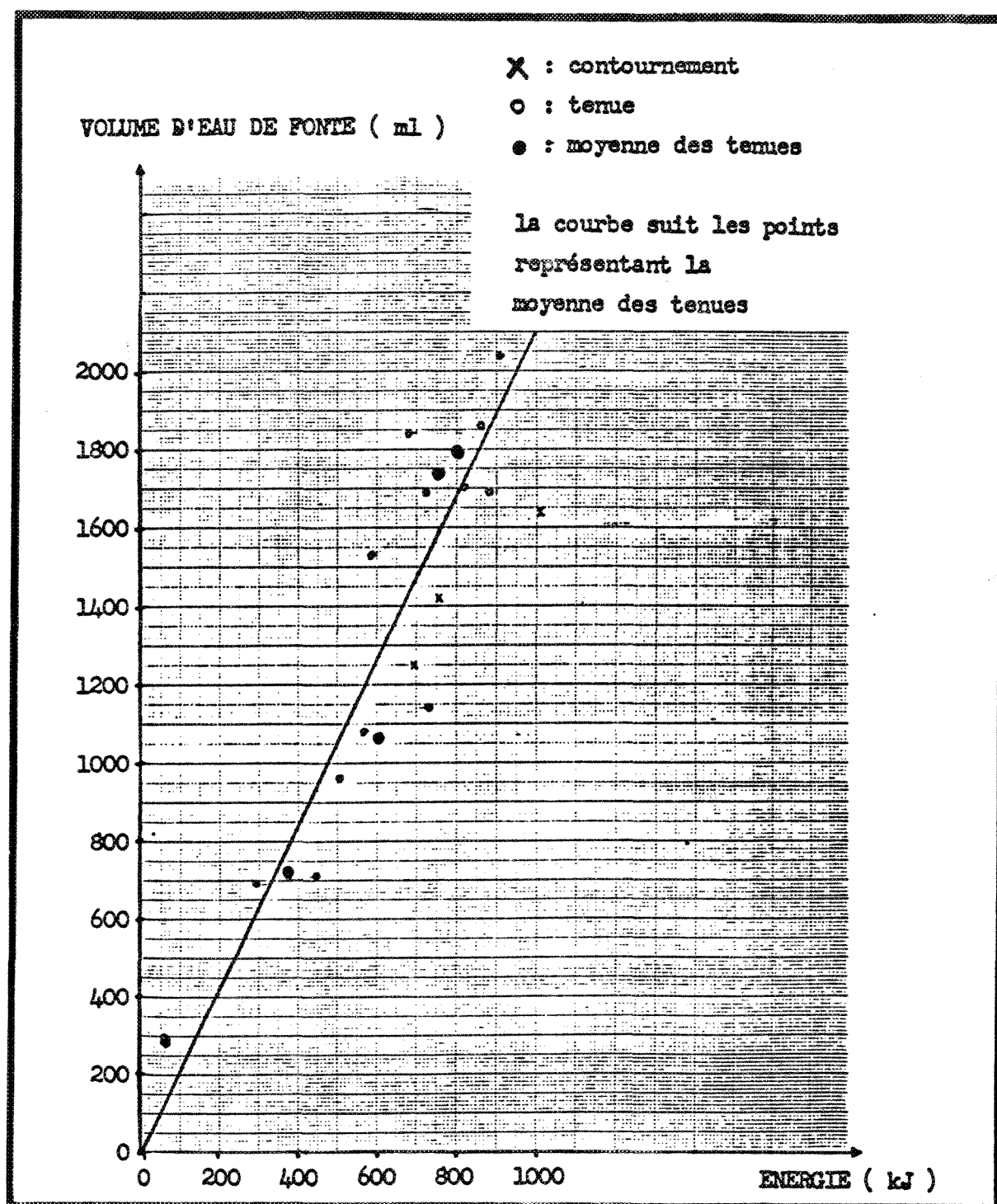


Figure 30: Variation du volume d'eau de fonte en fonction de l'énergie électrique fournie aux isolateurs; en tension continue de polarité positive.

## CHAPITRE VI

## CONCLUSIONS

## 6. Conclusions

De tous les essais que nous avons réalisés en utilisant une chaîne de 4 unités d'isolateurs antibrouillard en porcelaine, les conclusions suivantes sont tirées:

- La nature de la tension appliquée ne semble pas avoir d'influence notable en ce qui concerne la quantité de glace accumulée sur les isolateurs.
- En régime d'accumulation sans contamination pour une épaisseur de glace de 2 cm, le niveau de la tension  $V_{MF}$  est de 75 kV en tension alternative et continue de polarité négative, il est de 87 kV en tension continue de polarité positive.
- En régime d'accumulation pour une épaisseur de glace de 2 cm, une contamination légère de  $0.01 \text{ mg/cm}^2$  entraîne une baisse de la tension  $V_{MF}$  d'environ 4 %; pour une contamination modérée de  $0.05 \text{ mg/cm}^2$ , cette baisse de tension se situe entre 16 et 17 %. Ceci est applicable aux trois natures de tension. Quel que soit le degré de précontamination des isolateurs, la tension  $V_{MF}$  a légèrement tendance à être moins élevé en C.C.- qu'en C.A.; elle est environ 18 % plus élevée en C.C.+.
- Lorsqu'une période de réchauffement suit immédiatement la période d'accumulation (régime de fonte), les conditions les plus défavorables sont rencontrées quand le taux de réchauffement de l'air ambiant est

d'environ 4°C par heure. Plus le réchauffement est effectué lentement, plus les conditions sont défavorables; c'est-à-dire que le contournement est plus facilement obtenu.

- Le régime de fonte semble avoir le même effet en tension alternative qu'en tension continue de polarité positive, soit une baisse d'environ 4 % (3 kV) du niveau de la tension  $V_{MF}$  pour une épaisseur de glace de 2 cm. Cette baisse de tension est de 24 % (18 kV) en tension continue de polarité négative.
- Pour les trois natures de tension en régime de fonte, le plus bas niveau de la tension minimale de contournement est atteint lorsque l'épaisseur de glace accumulée (sur le conducteur témoin) est d'au moins 2 cm. Dans les trois cas, le même écart de 12 kV pour la valeur de la tension  $V_{MF}$  est détecté entre les épaisseurs de 2.5 et 1 cm. Lorsque l'épaisseur de glace accumulée diminue, le niveau de la tension minimale de contournement tend à augmenter.
- En régime de fonte sous tension continue, le rapport entre l'énergie dissipée par l'arc blanc et le volume d'eau de fonte éjectée lors du développement de celui-ci est de 2.1 ml d'eau par kJ d'énergie électrique dégagée. Ce rapport reste constant quelle que soit l'épaisseur de glace accumulée.

- Sous tension alternative en régime d'accumulation pour une épaisseur de glace accumulée de 2.5 cm, nous avons calculé un rapport moyen de 1.94 ml d'eau éjectée par k.V.A.s d'énergie électrique dégagée par l'arc blanc. En tension alternative, ce rapport est associé à une puissance apparente (en tension continue, il est associé à une puissance active). Le facteur de puissance moyen pour cette quantité de givre lourd accumulé sur des isolateurs antibrouillard en porcelaine serait alors de 0.92 (1.94 divisé par 2.1).

N.B.: Les différents calculs de baisse de tension ont été effectués par rapport à une valeur de référence, cette valeur est le niveau de la tension  $V_{NF}$  établie en régime d'accumulation sans contamination pour une épaisseur de glace accumulée sur le conducteur témoin de 2 cm.

# REFERENCES

- [1] Obenaus, F., "Contamination Flashover and Creepage Path Length", Deutsche Elektrotechnik, 12, pp. 135-136.
- [2] Hampton, B., "Flashover Mechanism of Polluted Insulation", Proc. IEEE, III, pp. 985-990 (1964).
- [3] Neumarker, G., "Contamination State and Creepage Path", Deutsche Abad., Berlin, 1, pp. 352-359 (1959).
- [4] Hesketh, S., "General Criterion for the Prediction of Pollution Flashover", Proc. IEEE, No. 114, pp. 531-532 (1967).
- [5] Khalifa, M.M., Morris, R.M., "Performance of Line Insulators under Rime Ice", IEEE Trans. Power App. Syst., v. PAS-86, pp. 692-698, Juin 1967.
- [6] Watanabe, Y., "Flashover Tests of Insulators Covered with Ice or Snow", IEEE PES Summer Meeting, paper F-77-750-5, Juillet 1978.
- [7] Hara, M. and Phan, C.L. "Leakage Current and Flashover Performance of Ice Insulators", IEEE Trans. Power App. & Syst., Vol. PAS-98, pp. 849-859, 1979.
- [8] Phan L.C. and Matsuo H., "Minimum Flashover Voltage of Ice Insulators", IEEE Transactions on Electrical Insulation, v. EI-18, No. 6, Décembre 1983, pp. 605-618.
- [9] 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, Février 1980, pp. 46-52.
- [10] 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.
- [11] Naito, K., Kawaguchi, T. et Goino, Y., "DC  $\pm$  750 kV Testing Equipment for Contamination Tests on UHV class DC Insulators", 4th Intern. Sym. on H.V. Eng. (4th ISH), Athènes, Sept. 1983, article no. 51.02.
- [12] Sugawara, N., Farzaneh, M., "On the role of water film in the mechanism of flashover of iced insulators", 1986 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Washington DC, USA, Juin 1986.

# REFERENCES (SUITE)

- [13] Phan L.C., Matsuo, H., Martin, R. et Vovan, L., "Flashover Performance of Precontaminated Insulators in presence of Hard Rime", Trans. of the Can. Elect. Ass., V. 22, 1983.
- [14] Farzaneh, M., Sugawara, N. et Laforte, J.L., "Effects of wind and de-icing on the minimum flashover voltage of H.V. insulators", IEEE, 1985 Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectrical Phenomena, pp. 356-364, Octobre 1985.
- [15] Phan, L.C. et al., "Essais de tenue électrique sur les isolateurs couverts de glace", Rapport pour la direction de l'ingénierie des lignes d'Hydro-Québec, Janvier 1985.
- [16] Farzaneh, M. et al. "Interception of supercooled droplets by energized line insulators", 6th Intern. Sym. on H.V. Eng. (6th ISH), New Orleans, Sept. 1989, article no. 42.26.
- [17] Farzaneh, M., Dallaire, M.A., "Interception of supercooled fog droplets by energized insulators", Ontario Hydro Research Division Toronto, contrat no. 17-30301-11, pp. 36-41, Mai 1988.
- [18] Farzaneh, M., Dallaire, M.A., "The relationship between the liquid water content and the icing rate of insulators", Ontario Hydro Research Division Toronto, contrat no. 18-33471-11, pp. 19-24, Février 1989.
- [19] Farzaneh, M., Kiernicki, J., Dallaire, M.A., "Measurement of electrical parameters of iced insulators during the de-icing period", Ontario Hydro Research Division Toronto, contrat no. 19-38717-11, pp. 26-36, Juin 1990.
- [20] Barahmand, S., "Tension minimale de contournement des isolateurs givrés en régime de fonte", Université du Québec à Chicoutimi, pp. 59-67, Février 1985.
- [21] Farzaneh, M., Kiernicki, J., et Dallaire, M.A., "AC and DC flashover performance of iced-covered insulators during a de-icing period", 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Tokyo, Automne 1990.
- [22] Farzaneh, M., Sugawara, N., "A study of AC and DC flashover performances of insulators during ice accretion", Third International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Vancouver, Mai 1986.