

MÉMOIRE

présenté

à

L' UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

Comme

exigence partielle pour l'obtention du grade de

MAÎTRE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(M. Sc. A.)

par

HOAN TIEN BUI, B. Ing.

**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DU MÉCANISME DE DÉVELOPPEMENT
DE LA DÉCHARGE ÉLECTRIQUE EN ARC DE CONTOURNEMENT
SUR LA SURFACE DE LA GLACE CONDUCTRICE**

Juin 1984



Mise en garde/Advice

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

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

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

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

TITRE DU MÉMOIRE

CONTRIBUTION A L'ETUDE DU MECANISME DE DEVELOPPEMENT DE LA DECHARGE ELECTRIQUE EN ARC DE CONTOURNEMENT SUR LA SURFACE DE LA GLACE CONDUCTRICE

RÉSUMÉ

Les études sur le contournement électrique des isolateurs verglacés ont débuté il y a une quinzaine d'années et dans toutes ces études on a toujours travaillé avec les isolateurs réels. Les résultats rapportés sont spécifiques pour chaque type d'isolateur et pour chaque condition d'expérience seulement. D'autre part, l'influence des variations de température sur le développement de l'arc de contournement n'a jamais été étudiée de façon systématique. C'est pour ces raisons que l'on ne peut pas déterminer exactement la condition la plus favorable au contournement des isolateurs verglacés et on ne peut pas expliquer le fait que le contournement se produit très souvent quand la température ambiante augmente, ou même quand la température n'augmente pas, mais il y a une couche d'eau couvrant la surface de la glace. Ce fait est aussi inexplicable si on se base uniquement sur les résultats obtenus à partir d'isolateurs réels.

En utilisant un modèle physique linéaire au laboratoire, nous pouvons étudier de façon systématique les influences du changement de température sur le développement de l'arc de contournement. Nous pouvons aussi vérifier de façon fiable les résultats théoriques trouvés analytiquement.

Dans la première partie de ce mémoire, nous passons en revue les travaux antérieurs sur ce sujet afin de pouvoir les comparer plus tard (dernière partie du mémoire) avec les résultats obtenus sur le modèle.

Dans la deuxième partie nous utilisons le modèle mathématique formulé par Odenaous pour déterminer de façon théorique les facteurs responsables du développement de l'arc de contournement quand la température augmente. Ensuite, en utilisant le modèle physique au laboratoire, nous vérifions les résultats ainsi trouvés.

Après confirmation par expériences, nous arrivons aux résultats suivants:

- 1) Quand la température augmente, la résistance de la glace en régime de fonte diminue, cette diminution est responsable du déplacement de la décharge pour devenir un arc de contournement.
- 2) Quand une couche de liquide couvre la surface de la glace, la résistance totale équivalente diminue et cette diminution est aussi responsable du déplacement de la décharge.
- 3) Avec la glace formée par des solutions de faible conductivité ($\rho \geq 20k\Omega$ cm), en passant du régime de congélation au régime de fonte, la résistivité de la glace diminue de 32% à 48%.
- 4) En régime de congélation si la glace est couverte d'une couche de liquide provenant de cette même glace fondue, sa résistivité diminue approximativement de 97% de sa valeur initiale.
- 5) En régime de fonte, si la glace est couverte d'une couche de liquide provenant de cette même glace fondue, sa résistivité diminue approximativement de 95% de sa valeur initiale.
- 6) Le cas 5 précédent est le cas le plus favorable au contournement électrique des isolateurs H.T. verglacés car la résistance électrique de la glace est la plus basse.
- 7) En régime de congélation, avec la glace à -10°C et couverte d'une couche de liquide, la tension de contournement diminue de 12% à 20% comparé à la glace "sèche".

A partir des résultats précédents, nous pouvons déduire les conclusions suivantes:

- a) avec une chaîne d'isolateurs verglacés suspendue verticalement, quand se produit une décharge partielle, l'eau provenant de la fonte de la glace s'écoule le long des isolateurs créant une couche de liquide à la surface de la glace, on a ainsi une probabilité très élevée de contournement;
- b) avec une chaîne d'isolateurs verglacés en position horizontale, quand se produit une décharge partielle, l'eau s'écoule autour d'un seul isolateur, elle ne peut pas former une couche reliant la haute et la basse tension et la probabilité de contournement est très réduite;
- c) Les conclusions a) et b) précédentes ne sont plus valables si la température ambiante est trop élevée ou si les rayons solaires sont trop intenses de telle sorte qu'il se crée en même temps une couche de liquide recouvrant la surface de la glace.

Dans la dernière partie du mémoire, nous comparons les résultats trouvés antérieurement sur les isolateurs réels avec ceux trouvés sur modèle dans ces travaux et nous montrons ainsi que tout les résultats trouvés antérieurement sont confirmés de façon générale par les résultats obtenus sur le modèle linéaire

Auteur du mémoire

Hoan T. Bui



Directeur de thèse

Dr Luan C. Phan



REMERCIEMENTS

J'exprime mes sincères sentiments de reconnaissance à mon directeur de thèse, le docteur Luan C. Phan, professeur titulaire au département des sciences appliquées et directeur du Groupe de recherche en ingénierie de l'environnement atmosphérique à l'Université du Québec à Chicoutimi. Ses conseils judicieux et les discussions stimulantes avec lui se sont avérés être une source de motivation essentielle à la réalisation de ces travaux.

J'envoie mes chaleureux remerciements au docteur Bui Ai, directeur du Laboratoire de Génie Electrique de Toulouse, associé au CNRS et au docteur Claude Huraux, professeur à l'Université Paul Sabatier pour avoir fourni l'équipement nécessaire à la conduite des expériences aussi bien que pour leur bienveillante disponibilité et leur étroite collaboration.

De l'assistance technique que j'ai reçue au Laboratoire de Génie Electrique, il m'est très agréable de souligner l'importante contribution de Monsieur José Pissolato jr., étudiant au doctorat à l'Université Paul Sabatier.

La partie des travaux expérimentaux exécutée à Toulouse a été rendue possible grâce à une bourse de recherche qui m'a été accordée à l'été 1983 par le gouvernement français dans le cadre d'un projet de coopération franco-québécois dirigé conjointement par les professeurs Phan et Huraux.

Je remercie le département des sciences appliquées de l'Université du Québec à Chicoutimi pour avoir fourni les conditions de travail propices à la réalisation de ces travaux de recherche.

Les figures sont l'oeuvre de Benoît Thériault. Céline Sergerie a accepté gentiment de mettre en forme ce document. Je les remercie pour leur compétence technique et leur dévouement professionnel.

NOMENCLATURE DES VOCABULAIRES ET DES SYMBOLES UTILISES

<u>Vocabulaire ou symbole</u>	<u>Equivalent en anglais</u>
Isolateur antibrouillard	Antifog insulator
Isolateur synthétique	Long rod synthetic insulator
Isolateur de sous-station	Station-post insulator
Isolateur céramique	} Porcelain standard insulator (cap & pin)
Isolateur porcelaine	
Isolateur en verre semi- conducteur	Semi-conductor glaze insulator
Isolateur en verre trempé	Glass insulator
Tension de tenue	Withstand voltage
Tension de contournement	Flashover voltage
Propriété isolante	} Insulation strength
Caractère isolant	
Givre mou	Soft rime
Givre dur	Hard rime
Verglas	Glaze
Régime de congélation	Icing period
Régime de fonte	Deicing period
Courant de fuite	Leakage current

- A } : Constantes de la caractéristique de décharge.
 n }
- V_{app} : La tension appliquée (supposée constante).
 V_d : La tension de décharge.
 V_g : La tension mesurée aux 2 extrémités de la couche de glace.
 V_c : La tension de contournement.
 U_E : Chute de tension cumulée aux électrodes.
 x : Longueur de la décharge.
 L : Longueur de la couche de glace.
 r : Résistance linéique de la glace.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.	i
NOMENCLATURE DES VOCABULAIRES ET DES SYMBOLES UTILISES . .	iii
TABLE DES MATIERES	v
<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>CHAPITRE I</u> - TRAVAUX ANTERIEURS SUR LE CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS POLLUES ET VERGLACES	7
1.1 TRAVAUX AU CANADA	9
1.1.1 Travaux de Khalifa et Morris	9
1.1.2 Travaux de Cherney	11
1.1.3 Travaux de Hara et Phan.	13
1.1.4 Travaux de Phan et Matsuo.	14
1.2 TRAVAUX AUX ETATS-UNIS.	17
1.2.1 Travaux de Kawai	17
1.2.2 Travaux de Schneider	19
1.2.3 Travaux de Renner, Hill et Ratz.	21
1.2.4 Travaux de Lee, Nellis et Brown.	23
1.2.5 Travaux de Charneski, Gaibrois et Whitney. . .	25
1.3 TRAVAUX AU JAPON.	26
1.3.1 Travaux de Fujimura, Naito, Hasegawa et Kawaguchi.	26
1.3.2 Travaux de Watanabe.	29
1.4 TRAVAUX EN SUISSE	32
1.4.1 Travaux de Meier et Niggli	32
<u>CHAPITRE II</u> - DECHARGE SUR LA SURFACE DE LA GLACE A DIFFERENTES TEMPERATURES.	34
2.1 INTRODUCTION.	35
2.2 DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE UTILISE	37
2.2.1 Le modèle.	37

2.2.2	Le montage expérimental.	41
2.2.3	Procédure expérimentale.	43
2.3	DETERMINATION DES CONSTANTES DE DECHARGE A ET n A DIFFERENTES TEMPERATURES.	46
2.3.1	Principe fondamental	46
2.3.2	Détermination de U_E	55
2.3.3	Détermination des constantes A et n.	55
2.3.4	Analyse des résultats.	58
2.4	EFFET DE LA POLARITE SUR LES CARACTERISTIQUES DE DECHARGE.	60
 <u>CHAPITRE III</u> - DETERMINATION DES FACTEURS RESPONSABLES DU DEPLACEMENT DE LA DECHARGE SOUS L'IN- FLUENCE DES CHANGEMENTS DE TEMPERATURE. . .		
3.1	INTRODUCTION.	64
3.2	ANALYSE THEORIQUE.	65
3.2.1	Les cas où r diminue	67
3.2.2	Les cas où r augmente.	72
3.3	VERIFICATIONS AU LABORATOIRE.	73
3.3.1	Variations du courant.	74
3.3.2	Effets de la diminution de la résistance électrique	76
3.3.3	Analyse des résultats.	82
 <u>CHAPITRE IV</u> - ANALYSE QUANTITATIVE ET COMPARAISON DES RESULTATS.		
4.1	INTRODUCTION.	86
4.2	VARIATIONS DE LA RESISTANCE ELECTRIQUE DE LA GLACE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE	86
4.3	ANALYSE QUANTITATIVE.	92
4.3.1	Calcul de la diminution de la résistance . . .	92
4.3.2	Calcul de la diminution de la tension de contournement.	98

4.4 DISCUSSION DES RESULTATS.	99
4.5 COMPARAISON ET ANALYSE DES RESULTATS TROUVES SUR ISOLATEURS REELS ET SUR MODELE LINEAIRE	101
<u>CONCLUSION</u>	105
BIBLIOGRAPHIE.	109

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le problème du contournement des isolateurs pollués et verglacés des lignes de transmission d'énergie électrique sous haute tension est un problème propre aux pays dont la température en hiver est basse pendant de longues périodes. Mais le nombre de pays qui sont affectés par ce problème étant réduit, la recherche dans ce domaine n'a pas atteint un niveau d'activité élevé.

Parmi ces pays, citons la Grande-Bretagne, la Norvège, la Finlande, la Suède, le Japon, l'URSS, les Etats-Unis et le Canada, qui subissent en tout ou en partie des hivers sévères. Mais excepté l'URSS avec son climat continental, les autres pays d'Europe ont un climat tempéré dû à la proximité de la mer. Pour eux, la formation de givre et de verglas sur les isolateurs ne constitue pas un problème de première importance qui peut susciter une activité poussée de recherche. De plus, bien que l'URSS a un climat sévère, on connaît très peu de ses efforts de recherche dans le domaine du transport de l'énergie électrique H.T. à basse température. Il reste donc les pays suivants qui s'intéressent à la recherche sur le contournement des isolateurs verglacés: les Etats-Unis, le Canada, le Japon et la Suisse. Le Japon et la Suisse ont de l'expérience avec le givrage surtout dû aux régions montagneuses par où ils doivent faire passer les lignes à haute tension. Les Etats-Unis rencontrent ce genre de problème seulement dans les états du nord et du centre. Le Canada doit

souvent affronter seul ce genre de problème sur le continent. De plus, avec le développement de l'énergie électrique au pays le problème devient de plus en plus pressant.

Grâce aux progrès techniques qui nous aident à endurer les climats sévères, l'homme peut maintenant pénétrer les régions les plus froides pour y exploiter les nouvelles sources d'énergie. Le transport de l'énergie électrique en régions froides devient ainsi un problème de première importance. Le projet de la Baie James au Québec constitue un exemple frappant.

Quand les isolateurs sont exposés à l'atmosphère dans les régions froides, ils subissent à la fois une contamination et un givrage à leur surface. La contamination est causée par l'accumulation des agents minéraux provenant de la poussière, des fumées d'usine, des excréments d'oiseaux, des dépouilles d'insectes, des pluies acides, etc., tandis que le givrage est causé soit par la pluie verglaçante, soit par le dépôt de neige suivi d'une période de fonte puis une période de congélation.

Qu'il s'agisse de l'eau de pluie ou de la neige, et qu'elle soit pure (conductivité nulle) ou non, la couche de glace couvrant la surface des isolateurs devient nécessairement conductrice à cause de la contamination. Quand la glace devient conductrice, la haute et la basse tensions s'approchent. Alors, le gradient de tension dans cette zone augmente et dès qu'il atteint une certaine valeur critique, la décharge se produit et le contournement est amorcé.

Une décharge sur isolateur pollué peut s'éteindre et ne pas conduire à un arc de contournement si la zone sèche est élargie par le réchauffement de la couche de contaminants par la chaleur provenant de la décharge. Mais une décharge sur isolateur verglacé peut facilement conduire à un arc de contournement car la chaleur dégagée de la décharge fait fondre la glace et facilite ainsi la diminution de la distance isolante, surtout si la direction d'écoulement de l'eau de fonte est favorable à une telle diminution.

Remarquons que les études du contournement des isolateurs pollués ont débuté il y a une cinquantaine d'années, alors que celles des isolateurs verglacés n'ont commencé que depuis une quinzaine d'années.

Une revue des travaux de recherches antérieurs montre que certains auteurs ont étudié le contournement des isolateurs pollués et verglacés, d'autres des isolateurs couverts seulement de neige naturelle ou de glace. Les résultats rapportés ne sont pas contradictoires mais ils sont spécifiques à chaque type de glace ou de neige à une certaine température et à chaque type d'isolateur seulement car on a toujours utilisé des isolateurs réels, ce qui donne des résultats qui, bien que proches de la réalité, ne nous permettent pas de tirer une réponse valable de façon générale à la question posée sur le mécanisme de propagation de la décharge à la surface de la glace.

Dans les travaux antérieurs sur les isolateurs pollués, plusieurs expériences ont été faites pour tenter d'expliquer le mécanisme impliqué dans le processus de propagation de la décharge à la surface d'une couche de contaminants. Jusqu'à présent, ces chercheurs n'ont pas vraiment cerné la nature de ce mécanisme, mais ils se retrouvent presque unanimement en accord sur les faits suivants:

1. Une force électrostatique existe, qui fait dévier la décharge dans le sens "d'écoulement" du courant.
2. L'ionisation de l'air au bout de la décharge facilite la propagation de l'arc.
3. Enfin, quand la décharge est suffisamment allongée et l'espace est suffisamment ionisé, on assiste à un processus de rupture diélectrique.

La propagation de la décharge sur la surface de la glace ne peut pas échapper à ces faits. Mais en plus elle est affectée par les changements de température de telle sorte qu'on a toujours observé des contournements pendant les changements de température ou d'état de la glace. Autrement dit, l'effet de la température sur la propagation de la décharge semble être un facteur primordial qui domine tous les autres facteurs comme nous le verrons plus tard. C'est la raison première qui nous a motivés à étudier le phénomène sur un modèle linéaire car sur un tel modèle on peut facilement faire varier un paramètre et étudier la variation des autres afin de mettre en évidence le ou les facteur(s) responsable(s).

Le but de ce mémoire est donc de présenter l'étude du mécanisme de propagation de la décharge à la surface de la glace conductrice sous l'influence des changements de température en utilisant un modèle physique linéaire.

Dans ce mémoire, le plan sera comme suit:

- Etant donné que nous travaillons avec un modèle physique qui est différent des isolateurs réels, il est nécessaire de faire un survol de tous les travaux antérieurs sur le contournement des isolateurs pollués et verglacés au chapitre I afin de les comparer avec les résultats obtenus plus tard sur modèle linéaire.
- Dans le deuxième chapitre nous calculerons les constantes de décharge A , n et U_E de la relation $V_d = Ax_i^{-n} + U_E$ régissant la tension de décharge sur la surface de la glace. Ce calcul est fait à différentes températures de la glace pour voir si ces constantes changent avec la température.
- Dans le troisième chapitre, nous analyserons mathématiquement et électriquement le modèle afin de déterminer les facteurs responsables du déplacement de la décharge sous l'influence des changements de température.
- Au quatrième chapitre, nous présenterons les résultats expérimentaux obtenus en laboratoire et une comparaison avec les résultats trouvés sur isolateurs réels présentés au chapitre I afin de tirer les conclusions.

CHAPITRE I

TRAVAUX ANTÉRIEURS SUR LE
CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS
POLLUÉS ET VERGLACÉS

CHAPITRE I

TRAVAUX ANTERIEURS SUR LE CONTOURNEMENT

DES ISOLATEURS POLLUES ET VERGLACES

Les travaux antérieurs sur le contournement des isolateurs pollués et verglacés peuvent être classés en 4 groupes selon les régions d'origine:

1.1 AU CANADA

- * M.M. Khalifa et R.M. Morris du Conseil National de Recherche (Ottawa).
- * E.A. Cherney de l'Hydro Ontario (Ontario).
- * L.C. Phan, M. Hara et H. Matsuo de l'Université du Québec à Chicoutimi (Québec).

1.2 AUX ETATS-UNIS

- * M. Kawai et H.M. Schneider de la Compagnie General Electric (Massachusetts).
- * P.E. Renner, H.L. Hill, O. Ratz, L.Y. Lee, C.L. Nellis et J.E. Brown de Bonneville Power Administration (Oregon).
- * M.D. Charneski, G.L. Gaibrois et B.F. Whitney de la Compagnie Detroit Edison (Michigan).

1.3 AU JAPON

- * T. Fujimura, K. Naito, Y. Hasegawa et T. Kawaguchi de la Compagnie N.G.K. Insulators (Nagoya).

* Y. Watanabe de l'Institut de recherche de l'électricité industrielle (Tokyo).

1.4 EN SUISSE

* A. Meier et W.M. Niggli de la Compagnie North-Eastern Swiss Power.

Dans ce chapitre, nous allons passer en revue les travaux de recherche rapportés par ces chercheurs en commençant par le Canada.

1.1 TRAVAUX AU CANADA

1.1.1 Travaux de Khalifa et Morris

Khalifa et Morris peuvent être considérés comme les pionniers dans ce domaine. C'est en 1965 qu'ils ont effectué des expériences de contournement en tension alternative sur différents types d'isolateurs givrés.

Le givre a été produit en pulvérisant de l'eau distillée ou de robinet à la surface des isolateurs dans une chambre froide où la température est maintenue entre -7°C et -12°C .

Les isolateurs utilisés sont un en porcelaine standard, un en verre trempé, un antibrouillard et un synthétique, tous sont suspendus en position verticale.

La pollution: les isolateurs ne sont pas pollués avant d'être givrés. Autrement dit, dans ces travaux on utilise les isolateurs propres.

La tension appliquée est la tension alternative dont le maximum peut atteindre 200 kV. La tension de contournement a été obtenue par la méthode "augmentation de tension", c'est-à-dire une tension quelconque est appliquée à la chaîne d'isolateurs pour un certain temps, si le contournement ne se produit pas on augmente cette tension et on l'applique de nouveau à la chaîne. On continue jusqu'à ce qu'on obtienne le contournement. Pendant le développement de l'arc de contournement la tension appliquée est gardée constante.

Le but de ces travaux est de déterminer le courant de fuite, la tension de contournement ainsi que les influences de la densité et de la conductivité du givre sur les performances des isolateurs givrés.

Résultats: les résultats suivants ont été rapportés dans [1]:

- (a) Pendant le développement de l'arc de contournement, le courant de fuite augmente.
- (b) Le contournement des isolateurs givrés est amorcé avec un courant de fuite plus faible que celui nécessaire pour amorcer le contournement des isolateurs pollués dans les zones industrielles et marines (considérées comme zones dont la pollution est la plus sévère).
- (c) Le givre à la surface des isolateurs crée une distribution non uniforme de la tension suivant la longueur de la chaîne d'isolateurs.

(d) La performance des isolateurs synthétiques est inférieure à celle des isolateurs céramiques de même longueur.

(e) La performance d'une chaîne double d'isolateurs en suspension est inférieure à celle d'une chaîne simple.

1.1.2 Travaux de Cherney

Utilisant des tensions alternatives Cherney a conduit ses expériences sur des isolateurs pollués et givrés artificiellement.

Le givre a été réalisé par pulvérisation de l'eau de robinet (conductivité = 356 $\mu\text{S}/\text{cm}$) dans une chambre froide où la température est maintenue entre -6°C et $-3,5^{\circ}\text{C}$. L'eau ainsi pulvérisée tombe sur les isolateurs dans une atmosphère calme (pas de vent).

Les isolateurs utilisés sont: 4 types d'isolateurs synthétiques et un type d'isolateur céramique, tous sont suspendus en position verticale.

La pollution est faite par pulvérisation d'une solution contenant 170 g de NaCl, 40 g de Kaolin et 1 g de photoflow* dans un litre d'eau. L'application de cette solution donne une surface contaminée avec un dépôt équivalent de densité de sel (ESDD) approximativement de $0,4 \text{ g}/\text{cm}^2$, ce qui est considéré comme un degré de contamination grave. Les isolateurs sont pollués avant d'être givrés.

* un liquide acide utilisé dans le développement du film pour rendre la surface du film homogène (sans tache).

Les tensions appliquées: une tension alternative de 145 kV a été appliquée aux isolateurs de type 230 kV et une autre de 318 kV a été appliquée aux isolateurs de type 500 kV. L'application de ces tensions est faite pendant toute la durée de formation de la glace jusqu'à ce que le contournement se produise. Si le contournement ne se produit pas après 3 heures, cette tension est considérée comme tension de tenue.

Le but de ces travaux est de déterminer et comparer la performance face au givrage des isolateurs synthétiques par rapport aux isolateurs céramiques et entre eux-mêmes.

Résultats: les résultats suivants ont été rapportés dans [2]:

- (a) Avec les isolateurs propres, il n'y a pas de contournement sous pluie verglaçante modérée.
- (b) Avec les isolateurs pollués, les isolateurs synthétiques avec jupes coniques et de diamètres alternés (une petite jupe intercalée d'une grande) se comportent mieux que les isolateurs synthétiques avec jupes en forme de disque et de diamètres uniformes. Leur comportement est aussi meilleur que celui des isolateurs céramiques classiques.
- (c) Les caractères isolants des isolateurs pollués sous pluie verglaçante dépendent de la sévérité des dépôts de glace qui relient les distances entre les jupes. Avec les isolateurs synthétiques sous les conditions de givrage modérées, cette sévérité augmente avec la tension et la longueur des isolateurs.

1.1.3 Travaux de Hara et Phan

Hara et Phan ont mené leurs expériences sur des isolateurs synthétiques et céramiques en tension alternative.

Le givre et le verglas ont été produits par pulvérisation de l'eau de robinet (conductivité = 275 $\mu\text{S}/\text{cm}$) à la surface des isolateurs dans une chambre froide où la température varie de 0°C à -20°C. L'angle d'arrivée des gouttelettes d'eau est de 45° par rapport à l'horizontale.

Les isolateurs utilisés sont: un type d'isolateur synthétique et un type d'isolateur céramique, tous deux sont en position verticale.

La pollution: les isolateurs ne sont pas pollués avant d'être givrés.

La tension appliquée: une tension alternative de 83 kV rms est appliquée à une chaîne d'isolateurs de 2 pieds de long.

Le but de ces travaux est de déterminer les courants de fuite ainsi que les tensions de contournement des 2 types d'isolateurs afin de comparer leur performance et de déterminer le type de glace le plus dangereux.

Résultats: les résultats suivants ont été rapportés dans [3]:

(a) Durant le développement de l'arc de contournement, le courant de fuite est presque constant (pour les 2 périodes, congélation et fonte).

- (b) Le givre formé à -12°C ($d = 0,87$) est le type de glace le plus dangereux. Le contournement se produit à une très faible épaisseur de ce type de glace.
- (c) La transition de l'arc blanc au contournement se produit à un courant de fuite ≥ 120 mA pour isolateurs synthétiques et 180 mA pour isolateurs céramiques.
- (d) Le contournement se produit avec une épaisseur de glace plus faible en régime de fonte qu'en régime de congélation.
- (e) L'épaisseur minimale de la glace à laquelle le contournement se produit est inversement proportionnelle au logarithme du taux d'augmentation de température en régime de fonte.
- (f) L'arc blanc se produit quand le courant de fuite dépasse une valeur seuil, qui est 18 mA. Cette valeur est indépendante du type de glace et du type d'isolateur. Elle est la même pendant les 2 périodes, congélation et fonte.
- (g) En régime de fonte la glace formée avec un vent de bas en haut (formant un angle de 45° par rapport à l'horizontal) est plus dangereuse que celle formée avec un vent de haut en bas.

1.1.4 Travaux de Phan et Matsuo

Dans leurs travaux récents, Phan et Matsuo ont effectué des expériences sur les isolateurs en verre trempé et synthétiques.

La glace a été produite de la même façon que celle décrite dans le paragraphe 1.1.3.

Les isolateurs utilisés sont 2 types d'isolateurs synthétiques et un type d'isolateur en verre trempé, tous sont en position verticale.

La pollution: l'expérience est faite avec isolateurs propres ainsi qu'avec isolateurs pollués. La pollution est réalisée avec une solution de Kaolin K-6 et NaCl dans l'eau distillée. La densité équivalente de dépôt de sel est de $0,02 \text{ mg/cm}^2$.

La tension appliquée est la tension alternative et la méthode est l'augmentation de tension avec un incrément de 5 kV chaque fois.

Le but de ces travaux est de:

- * Mesurer la tension de contournement minimale des isolateurs en verre trempé et synthétique en présence de la glace la plus dangereuse (givre formé à -12°C).
- * Mesurer la distance entre les glaçons en fonction de l'épaisseur de la glace accumulée.
- * Trouver la relation entre la tension de contournement minimale et le nombre d'unités d'isolateurs.
- * Etudier la relation éventuelle entre le courant critique de contournement et la tension de contournement.
- * Etudier l'effet de la tension appliquée pendant la période de congélation sur la tension de contournement.
- * Etudier l'effet de la contamination sur la performance des isolateurs en verre trempé.

Résultats: les résultats suivants ont été rapportés en [4]:

- (a) Le givre dur formé à -12°C avec la densité de 0,87 est le type de glace le plus dangereux. La tension de contournement obtenue avec ce type de glace n'est que 40% de celle obtenue avec les isolateurs humides.
- (b) La tension minimale de contournement d'une courte chaîne d'isolateurs est linéairement proportionnelle à la somme de la distance entre jupes et la longueur de fuite d'un isolateur.
- (c) La tension minimale de contournement des isolateurs verglacés avec glace formée sans tension appliquée est plus élevée que celle obtenue sur isolateurs verglacés dont la glace est formée avec la H.T. appliquée.
- (d) La durée de l'impulsion du courant de fuite juste avant le contournement des isolateurs verglacés est beaucoup plus grande que celle des isolateurs pollués.
- (e) La tension minimale de contournement des isolateurs verglacés diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la glace, mais l'effet de l'épaisseur de glace diminue avec l'augmentation du degré de contamination.
- (f) L'effet de lavage causé par excès d'eau peut augmenter la concentration de contaminants près du bord des jupes contribuant ainsi à l'érosion de l'isolateur.

1.2 TRAVAUX AUX ETATS-UNIS

1.2.1 Travaux de Kawai

En 1970, Mikio Kawai a fait les tests sur les isolateurs couverts artificiellement de glace. Il a trouvé que le contournement se produit avec deux conditions de glace:

- * glace dure et sèche formée à la température $\leq -9,5^{\circ}\text{C}$.
- * glace formée à la température entre -7°C et -10°C en présence de brouillard.

La glace a été produite par pulvérisation de l'eau à la surface des isolateurs dans la chambre froide et aussi à l'extérieur (en hiver).

Les isolateurs utilisés sont: un enporcelaine standard, 2 antibrouillards et un synthétique, tous sont en position verticale.

La pollution: les expériences sont toutes faites avec les isolateurs propres.

La tension appliquée est la tension alternative, elle est de 70 à 150 kV rms pour les expériences dans la chambre froide et de 230 à 350 kV pour les expériences à l'extérieur. La tension appliquée a été augmentée le plus vite possible jusqu'à ce qu'on atteigne la valeur de l'expérience qui est de 11,5 kV par jupe pour la première condition de glace et de 9,85 kV par jupe pour la deuxième

condition de glace. A cette valeur la tension est gardée constante jusqu'à ce que le contournement se produise.

Le but de ces travaux est de développer une méthode expérimentale pour simuler les conditions naturelles, d'examiner la performance de différents types d'isolateurs incluant la relation non linéaire entre les caractères isolants et la longueur des isolateurs.

Résultats: les résultats suivants ont été rapportés dans [5]:

- (a) Deux conditions de givrage causant le contournement ont été observées. Ce sont le givre dur formé à la température $\leq -9,5^{\circ}\text{C}$ et la glace formée entre -7°C et -1°C en présence du brouillard. Dans ces 2 conditions les tensions de contournement sur les isolateurs propres sont basses.
- (b) Avec le givre dur formé à la température $\leq -9,5^{\circ}\text{C}$ le contournement se produit pendant une période chaude (augmentation de température) et peut être amorcé par les radiations solaires.
- (c) Le contournement dans la deuxième condition de givrage peut se produire sans amorçage dû aux radiations solaires.
- (d) La distribution non uniforme de la tension peut créer les étincelles aux 2 bouts de la chaîne d'isolateurs verglacés.
- (e) Les caractères isolants des isolateurs verglacés varient de façon non linéaire par rapport à la longueur des isolateurs. Dans le pire cas, la tension de contournement par unité d'isolateur est

de 10,5 kV par jupe pour un isolateur porcelaine de dimensions $5\frac{3}{4}$ x 10 pouces.

(f) L'épaisseur maximale de glace autour d'un isolateur est un pouce. Si cette condition se produit sur les lignes de transmission actuelles, il est très facile d'avoir le contournement sur les lignes EHV à la tension de service.

1.2.2 Travaux de Schneider

Les travaux de Schneider sont des travaux sur isolateurs ver-glacés artificiellement dans un site d'expérience à l'extérieur. L'effet de la longueur des chaînes d'isolateurs ainsi que de la sévérité du givrage sur la tension de contournement ont été étudiés.

La glace a été produite en pulvérisant de l'eau de robinet ($\rho \approx 35 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$) sur les isolateurs pendant une nuit où la température est au-dessous de $-2,8^\circ\text{C}$. Pendant toute la durée de formation de la glace la H.T. a été appliquée.

Les isolateurs utilisés sont un type d'isolateur en porcelaine standard, un type d'isolateur antibrouillard et un type d'isolateur synthétique en position verticale ainsi qu'en position en V.

La pollution: les isolateurs ne sont pas pollués avant d'être givrés.

La tension appliquée: deux valeurs de tension alternative de 288 kV et 318 kV ont été utilisées pour ces expériences. Ces ten-

sions sont appliquées aux isolateurs propres sans givre. Une fois que la formation de la glace commence, elle continue jusqu'à ce que le contournement se produise. Après 4 heures, si le contournement ne se produit pas, la tension appliquée est considérée comme tension de tenue.

Le but de ces travaux est de déterminer les propriétés isolantes des isolateurs verglacés en fonction de la longueur ainsi que du degré de sévérité du givrage.

Résultats: les résultats suivants ont été rapportés dans [6]:

- (a) Les propriétés isolantes des isolateurs en porcelaine standard augmentent avec augmentation de longueur de 24 à 30 jupes.
- (b) Sur une base de kV/unité d'isolateur, les propriétés isolantes diminuent avec augmentation du degré de sévérité de givrage.
- (c) Pour les isolateurs en porcelaine standard, la configuration en V donne des performances meilleures que celles de la configuration verticale et peut maintenir sans contournement jusqu'à 70% de plus de givrage.
- (d) En position verticale, la performance des isolateurs synthétiques est inférieure à celle des isolateurs en porcelaine standard.
- (e) La tension de contournement des grands isolateurs est linéairement proportionnelle à la longueur d'isolation. La distribution

non linéaire de la tension empêche la formation de la glace et par conséquent, le contournement.

(f) Il n'y a presque pas de différence entre les résultats de contournement obtenus avec la glace couverte d'eau et la glace couverte du liquide obtenu par la fonte de cette même glace.

1.2.3 Travaux de Renner, Hill et Ratz

Utilisant des tensions continues, Renner et ses collaborateurs ont mené des expériences sur les isolateurs verglacés artificiellement.

La glace a été produite par pulvérisation de l'eau de robinet ainsi que de l'eau distillée à la surface des isolateurs dans un site d'expérience à l'extérieur dont la température n'est pas précisée.

Les isolateurs utilisés sont un type d'isolateur en verre trempé, deux types d'isolateurs en porcelaine standard (un en position verticale et un en position inclinée) et un type d'isolateur en porcelaine de sous-station (porcelain station-post insulators).

La pollution est faite dans certains tests seulement et avec une solution se composant de quatre parties de ciment Portland et dix parties d'eau (en poids). Après trempage dans cette solution, les isolateurs sont laissés à sécher pendant au moins 12 heures.

La tension appliquée est la tension continue et l'application est réalisée par 2 méthodes. Dans la première méthode une tension de 400 kV est appliquée aux isolateurs puis la formation de la glace commence, celle-ci continue jusqu'à ce que le contournement se produise. A ce moment on baisse la tension et on continue à givrer les isolateurs jusqu'à ce que le contournement se produise de nouveau. Quand le contournement ne se produit plus on prend la dernière valeur comme tension de tenue.

Dans la deuxième méthode que l'on appelle la méthode de tension variable, on commence par 0 volt et on augmente la tension avec un taux de 2,5 kV/s jusqu'à ce que le contournement se produise (on ne précise pas quelle est la condition de la glace).

Le but de ces travaux est de déterminer la dégradation des propriétés isolantes des isolateurs causée par le givrage.

Résultats: les résultats suivants ont été rapportés dans [7]:

- (a) La tension minimale de contournement obtenue avec la polarité positive est légèrement supérieure à celle obtenue avec la polarité négative.
- (b) La dégradation des propriétés isolantes des isolateurs verglacés est plus importante que celle des isolateurs pollués.
- (c) La tension de contournement est fortement affectée par la résistivité de la glace et les contaminants.

- (d) L'effet de polarité sur les propriétés isolantes des isolateurs verglacés est négligeable.
- (e) La tension de contournement des isolateurs verglacés avec la glace sèche est plus élevée que celle obtenue avec la glace couverte d'eau.
- (f) En position verticale et avec un givrage léger, une chaîne simple d'isolateur se comporte mieux qu'une chaîne double, mais avec un givrage sévère il n'y a pas de différence.
- (g) En position inclinée, les isolateurs verglacés se comportent mieux qu'en position verticale.

1.2.4 Travaux de Lee, Nellis et Brown

Ce sont des travaux sur différents types d'isolateurs verglacés par deux types de glace: le givre et le verglas. L'avantage de différentes dispositions des isolateurs (verticale, en V et horizontale) a été déterminé.

La glace a été produite par pulvérisation de l'eau du robinet ($\rho \approx 6,9 \text{ k}\Omega \text{ cm}$ à 7°C) sur la surface des isolateurs dans une chambre froide où la température est maintenue entre 0 et -8°C .

Les isolateurs utilisés sont trois types d'isolateurs en porcelaine en positions verticale, horizontale et en V et en chaîne simple et chaîne triple, un type d'isolateur en verre trempé et un type d'isolateur synthétique.

La pollution: les isolateurs utilisés ne sont pas pollués avant d'être givrés.

La tension appliquée: une tension alternative de 320 kV rms a été appliquée aux isolateurs après que la formation de la glace eût commencé depuis deux minutes; cette tension est maintenue jusqu'à ce que le contournement se produise.

Le but de ces travaux est de comparer la performance des différentes configurations des chaînes d'isolateurs sous l'influence de deux types de glace, soit le givre et le verglas.

Résultats: les résultats suivants ont été rapportés dans [8]:

- (a) En présence du verglas et avec le même nombre d'isolateurs, une chaîne disposée en V se comporte mieux qu'une chaîne suspendue verticalement.
- (b) Pour deux chaînes d'isolateurs identiques, la tension de contournement obtenue avec la chaîne en position verticale est 20% plus basse que celle obtenue avec la chaîne en position horizontale.
- (c) L'influence de la formation des glaçons sur les propriétés isolantes des isolateurs verglacés est minime avec les chaînes en disposition horizontale.
- (d) Les chaînes d'isolateurs avec faible distance entre les jupes sont plus vulnérables aux accumulations de glace.
- (e) Les chaînes d'isolateurs en verre semi-conducteur sont moins vulnérables aux accumulations de glace en raison de la chaleur dégagée par un courant de fuite élevé.

1.2.5 Travaux de Charneski, Gaibrois et Whitney

Ce sont des travaux sur isolateurs propres sous pluie verglaçante artificielle afin de déterminer les performances des isolateurs synthétiques comparés aux isolateurs en porcelaine standard et aux isolateurs de sous-station (porcelain station-post insulators).

La glace a été formée par pulvérisation de l'eau de robinet ($\rho = 5 \text{ k}\Omega \text{ cm}$) sur les isolateurs dans une chambre froide où la température a été maintenue à -12°C .

Les isolateurs utilisés sont cinq types d'isolateurs synthétiques, un type d'isolateur en porcelaine standard (cap and pin) et trois types d'isolateurs de sous-station (porcelain station-post insulators) et tous sont en position verticale.

La pollution: les isolateurs utilisés sont propres.

La tension appliquée: une tension alternative maximale de 75 kV a été appliquée aux isolateurs pendant que la formation de la glace continue. L'évaluation de la performance d'un type d'isolateur est basée sur le nombre de contournements dans une heure de test. Si aucun contournement ne se produit pendant une heure, on augmente la tension par unité d'isolateur en court-circuitant un ou plusieurs isolateur(s) avec des papiers d'aluminium et on continue l'expérience.

Le but de ces travaux est de comparer les performances au contournement de différents types d'isolateurs propres sous pluie verglaçante.

Résultats: les résultats suivants ont été rapportés dans [9]:

- (a) La cause primaire du contournement est la distance insuffisante entre la haute et la basse tension résultant en un gradient de tension trop élevé.
- (b) La cause secondaire est la courte distance entre les jupes et la courte longueur de fuite. La contamination peut aggraver la situation.
- (c) Avec un gradient de tension normal de 1,95 kV/pouce, tous les isolateurs utilisés pour les lignes de transmission de la compagnie Détroit Edison à Détroit Michigan ne se contournent pas sous pluie verglaçante (ce sont des isolateurs conçus pour les lignes de transmission de 120 kV, 230 kV et 345 kV).
- (d) Pour les isolateurs en porcelaine des sous-stations, ceux utilisés pour la tension de 345 kV se contournent 65% des fois tandis que ceux utilisés pour les tensions de 120 kV et 230 kV ne se contournent pas.

1.3 TRAVAUX AU JAPON

1.3.1 Travaux de Fujimura, Naito, Hasegawa et Kawaguchi

Ce sont des travaux sur différents types d'isolateurs verglacés et enneigés et soumis aux différentes tensions.

La glace a été formée en pulvérisant de l'eau propre ou contaminée à -20°C dans une chambre froide.

La neige a été prise dans des régions montagneuses au Japon et gardée à -5°C . Cette neige est ensuite déposée sur les isolateurs de façon manuelle afin de simuler l'enneigement. La conductivité de l'eau provenant de cette neige fondue est de 15 à 25 $\mu\text{S cm}^{-1}$ à 20°C .

Les isolateurs utilisés sont: un type d'isolateur en porcelaine standard, un type d'isolateur synthétique, tous sont de 12 tonnes et un type d'isolateur de sous-station. Les expériences ont été faites avec les isolateurs en suspension ainsi qu'avec les isolateurs en tension mais on ne compare pas l'avantage de différentes dispositions des isolateurs.

La pollution: les expériences ont été faites séparément avec les isolateurs propres et pollués, verglacés et enneigés avec la glace ou la neige propre ainsi qu'avec les isolateurs propres verglacés et enneigés avec la glace ou la neige polluée.

La tension appliquée: les tensions ne sont appliquées aux isolateurs qu'après qu'ils soient verglacés ou enneigés artificiellement. Les expériences sont faites successivement avec les tensions alternative, continue et impulsionnelle, mais c'est seulement avec la tension alternative que les expériences furent faites soigneusement tandis qu'avec la tension continue, les résultats ob-

tenus avec la glace ne sont pas suffisants pour pouvoir entirer une conclusion. Avec la tension impulsionnelle, seulement les résultats obtenus avec la neige ont été rapportés. D'autre part, avec la tension continue, les expériences sont toutes faites avec la polarité négative à cause que la tension de tenue obtenue avec cette polarité est plus basse que celle obtenue avec la polarité positive.

Le but de ces travaux est de comparer les performances de deux types d'isolateurs (porcelaine et synthétique) verglacés et enneigés sous les différentes tensions alternative, continue et impulsionnelle.

Résultats: les résultats suivants ont été rapportés dans [10]:

- (a) Avec les isolateurs couverts de neige, il n'y a pas de différence substantielle entre les tensions de tenue obtenues avec les tensions alternatives et la tension continue si la quantité de neige est la même.
- (b) Si la conductivité de l'eau obtenue de la neige ou de la glace fondue est la même, la tension de tenue en tension continue obtenue avec la glace est légèrement plus basse que celle obtenue avec la neige.
- (c) Les tensions de tenue en tension alternative des isolateurs pollués et couverts de neige dépendent des conditions de la neige et du degré de contamination. Si la quantité de neige est cons-

tante, cette tension dépend de la conductivité de l'eau obtenue de cette neige fondue.

(d) La tension de tenue en courant alternatif des isolateurs couverts de neige est toujours plus élevée que celle obtenue avec les isolateurs pollués par le NaCl de même densité équivalente de dépôt de sel (ESDD).

(e) La tension de tenue en courant alternatif des isolateurs couverts de glace est approximativement 40% plus basse que celle des isolateurs couverts de neige si l'eau obtenue par la fonte de cette glace ou de cette neige a une conductivité qui se situe entre 500 et $3000 \mu\text{S cm}^{-1}$ (résistivité entre $2 \text{ k}\Omega\text{cm}$ et $0,33 \text{ k}\Omega\text{ cm}$).

(f) La tension de tenue en C.A. et en C.C. des isolateurs couverts de glace est plus élevée que celle des isolateurs contaminés avec du sel si la densité équivalente de dépôt de sel est la même.

(g) Avec les isolateurs couverts de neige, la tension de tenue impulsionnelle dépend de la condition de la neige et est proportionnelle à la longueur de la chaîne. Dans les conditions les plus défavorables (75% couvert de neige), leur tension de contournement n'est que 40% à 65% de celle obtenue avec la polarité positive (C.C.) dans les conditions humides avec isolateurs propres.

1.3.2 Travaux de Watanabe

Les travaux de Watanabe sont en quelque sorte similaires aux travaux de Fujimura, excepté les points suivants:

- 1) La température de l'expérience est toujours aux alentours de la température de congélation.
- 2) L'expérience est faite seulement avec les isolateurs en porcelaine, pas d'isolateur synthétique ni de sous-station.

La glace a été produite en pulvérisant de l'eau avec résistivité de $10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ sur la surface des isolateurs pendant la nuit (basse température mais l'auteur ne précise pas quelle est la température).

La neige a été prise dans des régions montagneuses au Japon. Cette neige est ensuite déposée sur les chaînes d'isolateurs de façon manuelle avec une épaisseur de 20 cm sur toute la surface de l'isolateur. La résistivité de cette neige fondue est de 140 à $200 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$.

Les isolateurs utilisés sont cinq types d'isolateurs en porcelaine (cap and pin) de dimensions différentes.

La pollution: les isolateurs utilisés sont propres.

Les tensions appliquées sont des tensions alternative, continue et impulsionnelle. Avec les tensions alternative et continue, une fois que la glace ou la neige a été déposée sur les isolateurs, on applique une tension constante et on attend le contournement. S'il ne se contourne pas, on change la glace ou la neige et on augmente la tension appliquée. L'opération continue jusqu'à ce que le contournement se produise. Pour la glace, la tension de con-

tournement a été mesurée avec deux conditions différentes pendant la mesure: sans pulvérisation de l'eau (glace sèche) et avec pulvérisation (glace humide). Avec la tension impulsionnelle, l'expérience a été faite en deux parties: dans la première partie, une tension continue est appliquée avant qu'une tension impulsionnelle de $160 \times 1500 \mu\text{s}$ soit appliquée, dans la deuxième partie, cette tension impulsionnelle est appliquée sans tension continue.

Le but de ces travaux est de comparer les performances des isolateurs en porcelaine verglacés ou enneigés avec celles des isolateurs contaminés afin de déterminer les critères de design des isolateurs dans les régions froides.

Résultats: les résultats ont été rapportés dans [11]:

- (a) L'effet de la glace et de la neige sur le contournement est plus sévère que celui de la contamination avec du sel pour toutes les trois tensions alternative, continue et impulsionnelle.
- (b) Le critère de design est de 75 kV/m pour les tensions alternative et continue et de 200 kV/m pour la tension impulsionnelle.
- (c) La tension minimale de contournement en C.C. obtenue avec la polarité positive est légèrement supérieure à celle obtenue avec la polarité négative et cette dernière est approximativement égale à celle obtenue avec le courant alternatif si celle-ci est exprimée en valeur efficace.

(d) La tension minimale de contournement des isolateurs en porcelaine de grandes dimensions est légèrement plus basse que celle obtenue avec les isolateurs en porcelaine de dimensions plus petites.

(e) Une chaîne simple d'isolateurs se comporte mieux qu'une chaîne double.

(f) Une chaîne d'isolateurs en porcelaine standard se comporte mieux qu'une chaîne d'isolateurs antibrouillard.

(g) La surtension de manoeuvre n'a pas d'influence sur la tension de contournement car elle est faible comparée à cette dernière.

1.4 TRAVAUX EN SUISSE

1.4.1 Travaux de Meier et Niggli

Ce sont des travaux réalisés au laboratoire pour déterminer l'influence de la glace et de la neige sur les isolateurs en position horizontale spécialement à haute altitude.

La glace: en utilisant les moules et avec l'eau de résistivité de $20 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$, on a créé une couche de glace d'épaisseur d'environ 3 cm sur toute la surface de l'isolateur. La température de la chambre froide peut être baissée jusqu'à -20°C . Etant donné que la neige est normalement fondue et ensuite congelée pour devenir une sorte de glace, l'expérience a été faite seulement avec la glace.

Les isolateurs utilisés sont un type d'isolateur synthétique et un type d'isolateur en porcelaine standard (en chaîne de cinq jupes), tous sont en position horizontale. Les capuchons des isolateurs en porcelaine sont soudés ensemble afin d'obtenir une chaîne parfaitement horizontale et droite.

La pollution: les isolateurs utilisés sont propres.

La tension appliquée est une tension alternative de 380 kV.

Le but de ces travaux est de déterminer les comportements fondamentaux des isolateurs verglacés, l'influence de la température sur le contournement ainsi que la distribution de tension des chaînes multiples d'isolateurs verglacés.

Résultats: les résultats suivants ont été rapportés dans [12]:

- (a) Les courants de fuite des isolateurs verglacés ou enneigés sont plus élevés que ceux des isolateurs humides.
- (b) Le courant de fuite dépend de l'épaisseur de la glace ou de la neige.
- (c) La température a une influence importante sur la performance des isolateurs verglacés face au contournement.

CHAPITRE II

DÉCHARGE SUR LA SURFACE DE LA
GLACE À DIFFÉRENTES TEMPÉRATURES

CHAPITRE II

DECHARGE SUR LA SURFACE DE LA GLACE

A DIFFERENTES TEMPERATURES

2.1 INTRODUCTION

Les phénomènes intervenant dans le mécanisme de la décharge sur la surface de la glace étant de nature très compliquée, il est nécessaire d'utiliser un modèle si on veut mettre en évidence l'effet des différents paramètres. Avec un modèle linéaire tel que montré à la figure 2.1, nous pouvons utiliser le schéma électrique d'Obenaus décrivant la décharge sur une surface poluée pour représenter une décharge sur la surface de la glace conductrice.

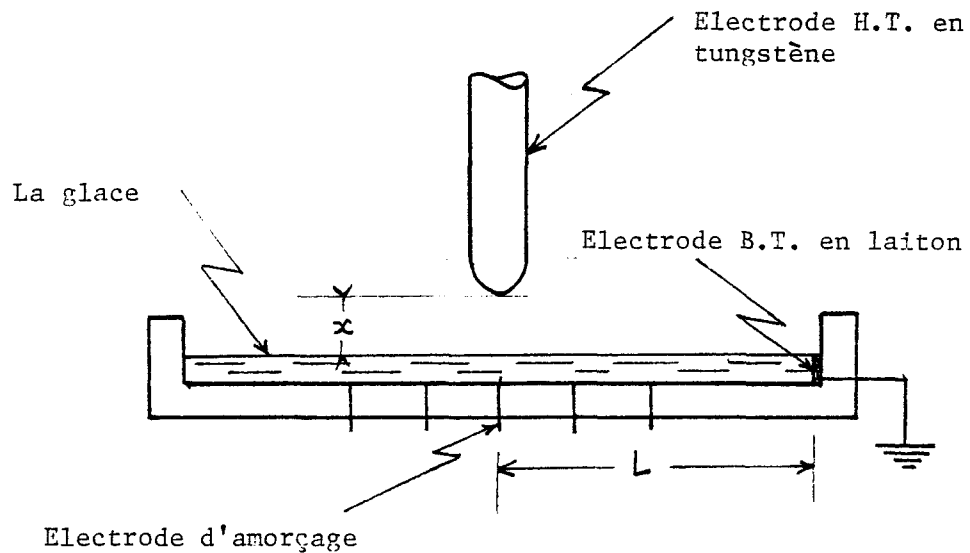


Figure 2.1 Schéma du modèle linéaire utilisé au laboratoire

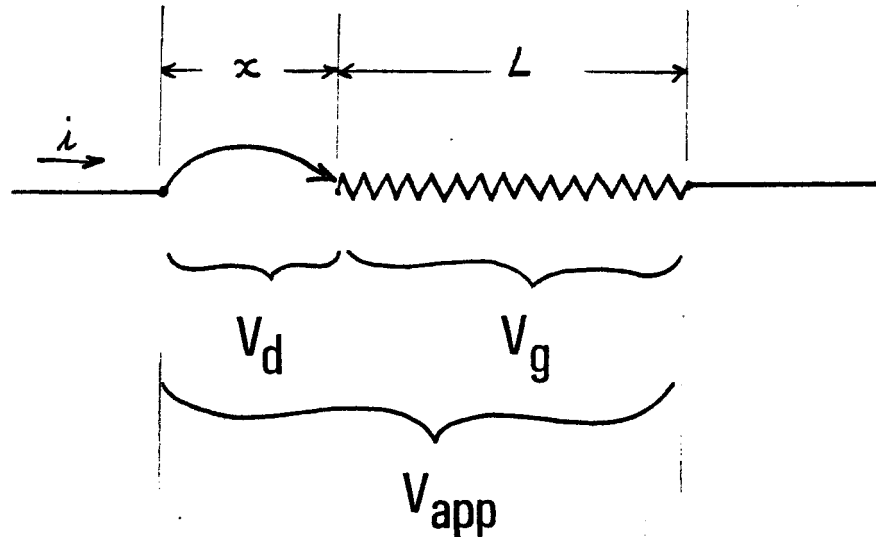


Figure 2.2 Schéma électrique d'Obenaus

On voit que:

V_{app} est la tension appliquée

V_d est la tension aux bornes de la décharge

V_g est la tension mesurée aux deux extrémités de la couche de glace.

Nous avons donc:

$$V_{app} = V_d + V_g \quad (1)$$

Désignant par r la résistance linéique de la glace et i le courant passant dans la glace, on a :

$$V_g = Lri \quad (2)$$

Il a été montré expérimentalement que la tension de la décharge est donnée par la relation :

$$V_d = \frac{Ax}{i^n} + U_E \quad (3)$$

où x est la longueur de la décharge, A et n sont des constantes de décharge, U_E est la chute de tension cumulée aux électrodes (entre l'électrode HT et la glace).

Dans ce chapitre, nous tenterons de trouver les valeurs de A et n pour une décharge sur la surface de la glace et aussi de déterminer si elles varient avec la température. Il est pertinent de remarquer que jusqu'à présent, on n'a pu trouver dans la littérature scientifique aucun travail visant à déterminer ces constantes pour une décharge sur glace, ou à étudier leur invariabilité avec la température de la glace.

2.2 DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE UTILISE

2.2.1 Le modèle

Le modèle linéaire est représenté à la figure 2.3.

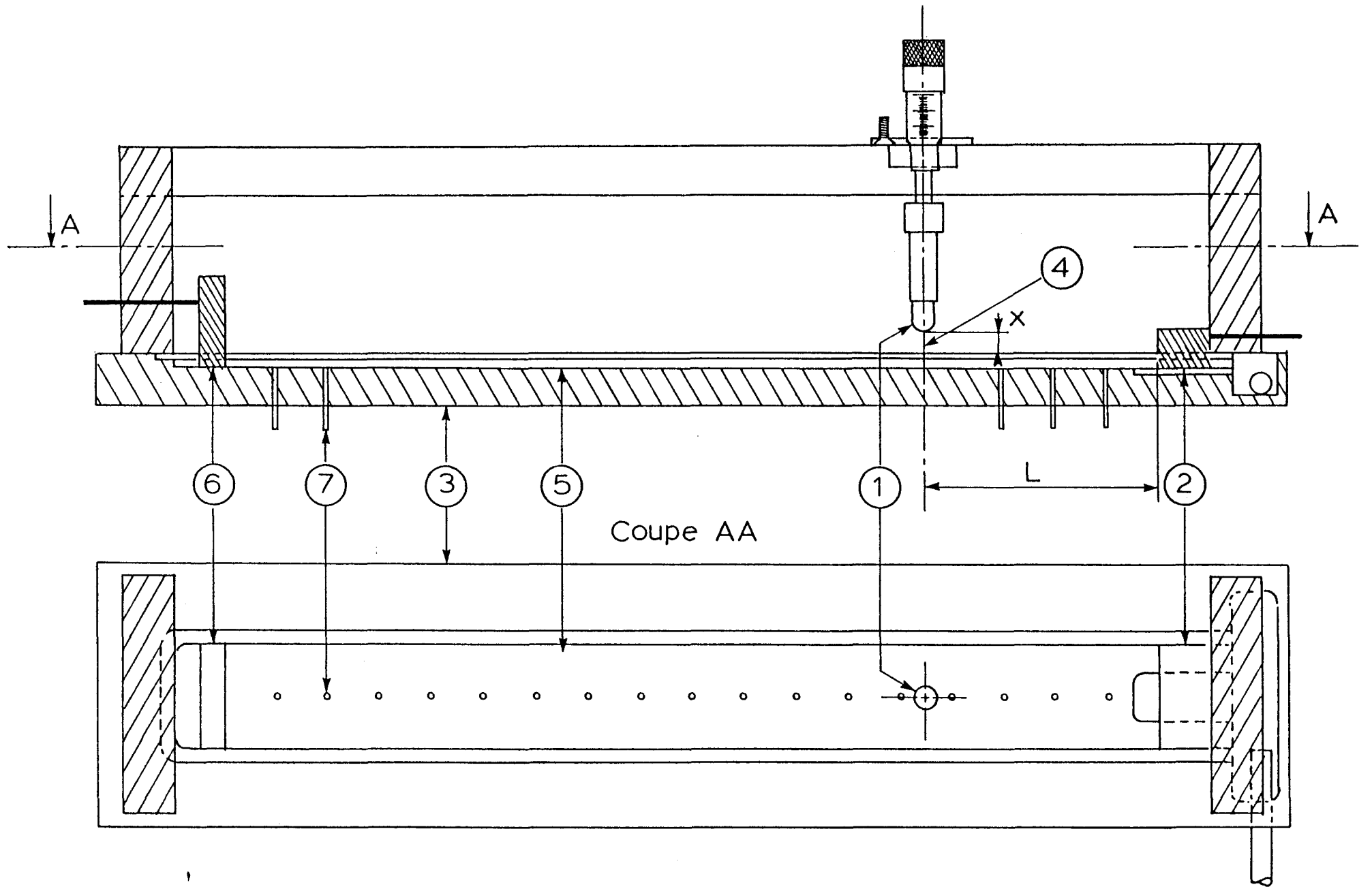


FIG. 2.3 Détails du modèle

Enumérons les principales composantes du modèle:

- # 1 : Electrode haute tension en tungstène de diamètre 0,8 cm, extrémité sphérique, mobile en hauteur et parallèlement à la rainure # 5.
- # 2 : Electrode basse tension en laiton (fixe).
- # 3 : Plaque de plexiglas servant de base du modèle, dans laquelle est creusée la rainure. Les éléments de support de l'électrode H.T. sont aussi en plexiglas.
- # 4 : La distance (x) entre l'électrode H.T. et la glace qui représente la distance entre 1 glaçon et 1 surface de la glace où se produit la décharge.
- # 5 : La rainure contenant la glace de dimensions: 36 cm de longueur, 4 cm de largeur et 3 mm de profondeur.
- # 6 : Electrode basse tension en laiton (mobile selon la longueur de la rainure).
- # 7 : Electrodes d'amorçage en platine de diamètre 0,1 cm. Elles émergent dans la rainure et sont en contact avec la glace. Elles peuvent aussi être utilisées comme des sondes de mesure. La distance entre elles est de 2 cm.

A une extrémité de la rainure est immergée l'électrode basse tension fixe (2). La glace dans la rainure a été formée en mettant une solution de NaCl de résistivité connue dans la rainure puis le modèle est installé dans un réfrigérateur de laboratoire de marque SECAS, fig. 2.5. La température dans le réfrigé-

rateur est contrôlée par l'intermédiaire d'un contrôleur qui assure le réglage de l'évaporation de l'azote liquide. La décharge se produit entre (1) et la glace quand on applique une tension suffisante entre ces deux points.

Notre choix dans la détermination d'un modèle a été guidé par l'idée que nous voulions maîtriser sur celui-ci un nombre maximum de paramètres.

Nous avons choisi un modèle dont le rapport entre la largeur et l'épaisseur de la glace est $4/0,25 = 16$ (il est à noter que nous avons produit une couche de glace d'épaisseur 0,25 cm dans la rainure de largeur 4 cm), ce qui correspond à une épaisseur approximative de 2,4 pouces de glace sur une chaîne d'isolateurs de porcelaine standard de diamètre 10 pouces.

En effet, pour une chaîne d'isolateurs de ce type, si elle est couverte d'un manchon de glace d'épaisseur 2,40 pouces, ce rapport sera $12,4\pi/2,4 = 16,23$.

Cette condition est considérée comme une condition de givrage très sévère dans la pratique. C'est pour cette raison que nous avons utilisé ce rapport dans toutes nos expériences afin d'obtenir des résultats qui correspondent le plus possible aux résultats réels dans les conditions pratiques les plus défavorables.

Pour la longueur de la glace, nous l'avons fixée à 10 cm, alors que le rapport entre la longueur et la largeur de la glace est $10/4 = 2,5$, ce qui correspond à une chaîne d'isolateurs ver-glacés décrite précédemment et se composant de: $(2,5 \times 12,4\pi) / 5,75 = 17$ isolateurs de 5,75 pouces de hauteur chacun.

2.2.2 Le montage expérimental

Le montage général schématisé sur la figure 2.4 est constitué de quatre parties:

- système d'alimentation de tension continue
- système d'amorçage de la décharge
- système de mesure des tensions et du courant
- le modèle linéaire dans la chambre froide.

Nous donnons ici la description sommaire des principaux éléments du montage.

- T₁ : Alternostat* d'alimentation permettant d'augmenter la tension d'alimentation de 0 à 220V au primaire du transformateur H.T.
- T₂ : Transformateur haute tension 220V - 30 kV; 2A.
- P : Pont redresseur H.T. , $I_{\max} = 150$ mA.
- C₁ : Batterie de condensateurs H.T. (se composant de 10 condensateurs de $C = 1,67 \mu\text{F} - 30$ kV chacun).
- A₁ : Circuit de décharge pour C₁.

* Transformateur à rapport continu, continûment variable

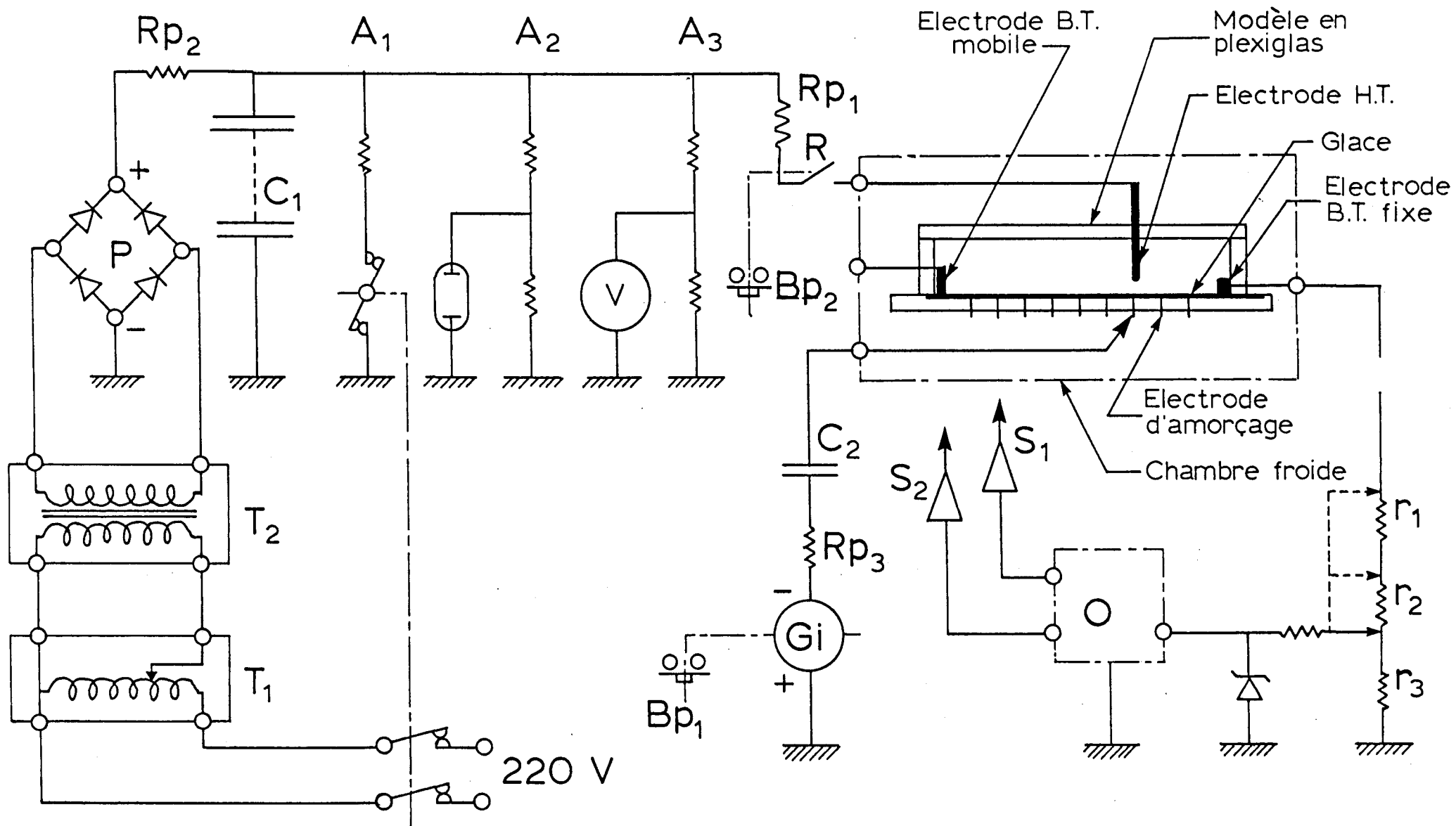


FIG. 2.4 Montage expérimental

A_2 : Circuit de signalisation et de protection de la H.T.

A_3 : Circuit de mesure de la H.T.

R_{p1} R_{p2} R_{p3}	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$	Résistances de protection, respectivement de	$\left\{ \begin{array}{l} 300 \Omega \\ 50 \text{ k}\Omega \\ 20 \text{ k}\Omega \end{array} \right.$
----------------------------------	--	--	---

G_i : Générateur d'impulsion VELONEX, modèle 360F, délivrant un créneau de tension réglable en durée et en amplitude jusqu'aux valeurs maximales de 31 kV, 100 μ s avec une intensité de 1A.

B_{p1} : Bouton poussoir de commande à distance de G_i .

B_{p2} : Bouton poussoir de commande à distance du relais H.T. (R) permettant d'appliquer la H.T. au modèle.

R : Relais H.T. immergé dans l'huile isolante.

C_2 : Condensateur d'isolement (≈ 1000 pF).

O : Oscilloscope à mémoire TEKTRONIX modèle 7633.

S_1 et S_2	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$	Sondes H.T., rapport de division 1/1000, impédance d'entrée et 100 M Ω , marque TEKTRONIX modèle P.6015.
----------------------	--	---

r_1 r_2 r_3	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$	Résistances de mesure du courant i , respectivement	$\left\{ \begin{array}{l} 49 \Omega \\ 49 \Omega \\ 1 \Omega \end{array} \right.$
-------------------------	--	---	---

2.2.3 Procédure expérimentale

Une solution de NaCl de résistivité 10 k Ω cm est versée dans la rainure du modèle jusqu'à une hauteur de 0,25 cm. Le modèle est ensuite installé dans le réfrigérateur. Le câblage nécessai-

re tel qu'indiqué à la figure 2.4 est réalisé. Un thermomètre installé dans la rainure nous permet de mesurer la température de la glace. Le bout du thermomètre est immergé dans le liquide grâce à un trou de 0,5 cm de profondeur se trouvant au fond de la rainure comme le montre la figure 2.6.

On contrôle la température dans le réfrigérateur à l'aide d'un système de contrôle automatique qui garde la température du réfrigérateur à la valeur désirée. La réfrigération se fait par évaporation de l'azote liquide.

Pour obtenir une haute tension continue, on augmente l'alternostat T_1 afin d'augmenter la tension alternative (de 0 à 220V) au primaire du transformateur de haute tension T_2 . A la sortie de T_2 un pont redresseur (P) assure la conversion de la H.T. alternative en H.T. continue. Cette tension est appliquée directement au banc de condensateurs. Ces derniers sont alors chargés à plein. L'application de cette tension continue aux électrodes du modèle se fait par l'intermédiaire d'un bouton poussoir qui, à l'aide d'un circuit électrique, ferme le relais R par action magnétique.

Dans la détermination des constantes de décharge A et n au paragraphe qui suit, pour minimiser l'instabilité de la décharge et pour réduire au minimum l'effet de l'énergie des condensateurs sur la température de la glace, nous n'avons utilisé qu'un seul condensateur.

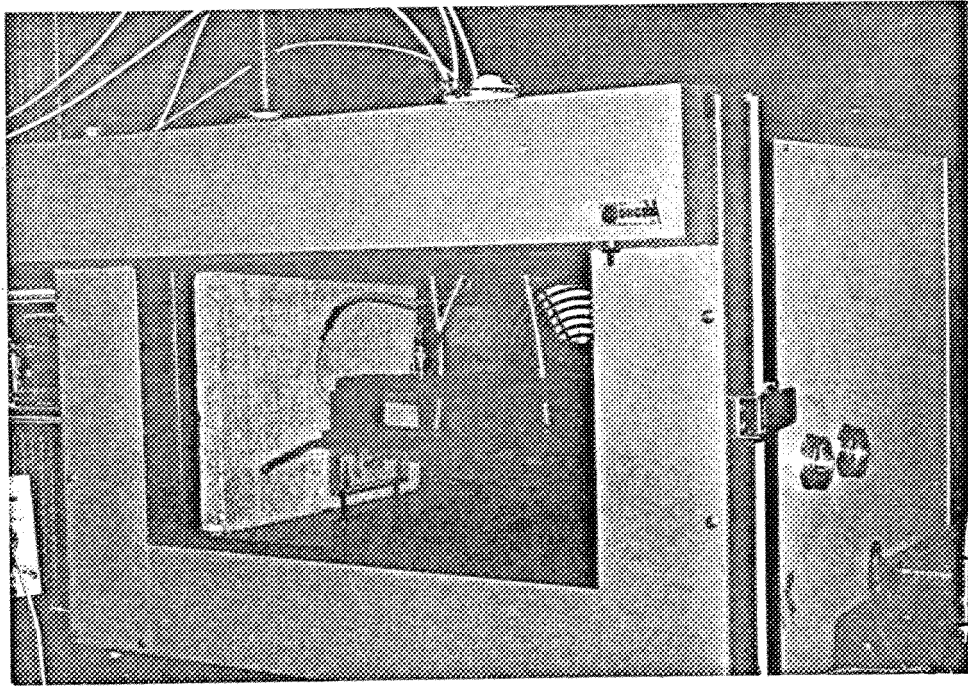


Figure 2.5 Le modèle installé dans le réfrigérateur de laboratoire marque SECAS.

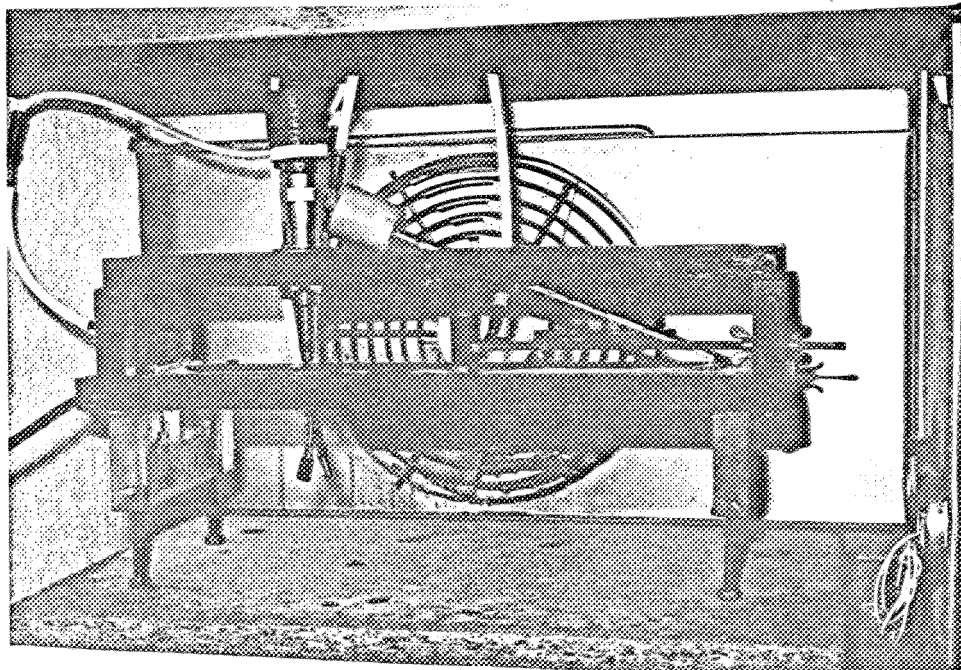


Figure 2.6 Le modèle, avec la glace et le câblage nécessaire.

Le circuit d'amorçage n'a pas été utilisé dans ces travaux; autrement dit, la décharge a été obtenue sans amorçage. On augmente la tension continue à une valeur quelconque et en utilisant le bouton poussoir BP₂, on l'applique aux électrodes, si la décharge ne se produit pas on augmente la tension de 0,5 kV et on l'applique de nouveau, on continue de cette façon jusqu'à ce que la décharge se produise, à ce moment l'oscilloscope enregistre la courbe $[V_d(i)]_{x=cte}$.

2.3 DETERMINATION DES CONSTANTES DE DECHARGE A ET n A DIFFERENTES TEMPERATURES

2.3.1 Principe fondamental

De la relation (3): $V_d = \frac{Ax}{i^n} + U_E$, on voit que la tension de décharge V_d est proportionnelle à la longueur de décharge x et inversement proportionnelle à la puissance n du courant de fuite i . Etant donné que A et n sont des constantes si x ne varie pas la courbe de V_d versus i est une courbe décroissante (Fig. 2.9). Si i ne varie pas la courbe de V_d versus x est une droite dont la valeur U_E est celle de V_d mesurée à $x = 0$, U_E est appelée la chute de tension cumulée aux électrodes pour une décharge quelconque.

Dans le cheminement suivi pour déterminer les constantes A et n , nous avons besoin de connaître la valeur de U_E . Pour déterminer U_E , il suffit de tracer les droites V_d versus x à i constant. Pour ce faire, sur les courbes de V_d versus i pour différentes longueurs de décharge, on choisit une valeur fixe

quelconque de i puis on détermine les valeurs correspondantes de V_d et de x , on peut alors tracer les courbes $[V_d(x)]_{i = \text{cte}}$ et ainsi déterminer U_E .

Le point important est de garder la longueur de décharge x constante pendant l'enregistrement des courbes $[V_d(i)]_{x = \text{cte}}$. Pour ce faire, nous avons disposé 2 électrodes B.T. aux 2 côtés de l'électrode H.T. et équidistantes de cette dernière. De cette manière, on obtient la même distribution linéaire de la tension aux 2 côtés de la décharge et 2 courants égaux circulant dans les 2 parties de la glace comme le montre la figure 2.7. La décharge entre l'électrode H.T. et la glace est donc fixée et par conséquent, sa longueur ne varie pas.

Les mesures sont faites à l'aide de 2 sondes H.T. S_1 et S_2 et d'un oscilloscope à mémoire. La tension de décharge est la différence de potentiel entre S_1 et S_2 quand une décharge se produit (Fig. 2.8), cette tension alimente les plaques verticales de l'oscilloscope. Le courant passant de la haute à la basse tension à travers la décharge alimente les plaques horizontales. On obtient ainsi des courbes de V_d versus i pour une longueur x donnée.

Si on change la distance x , on obtient une autre courbe correspondant à cette nouvelle valeur de x .

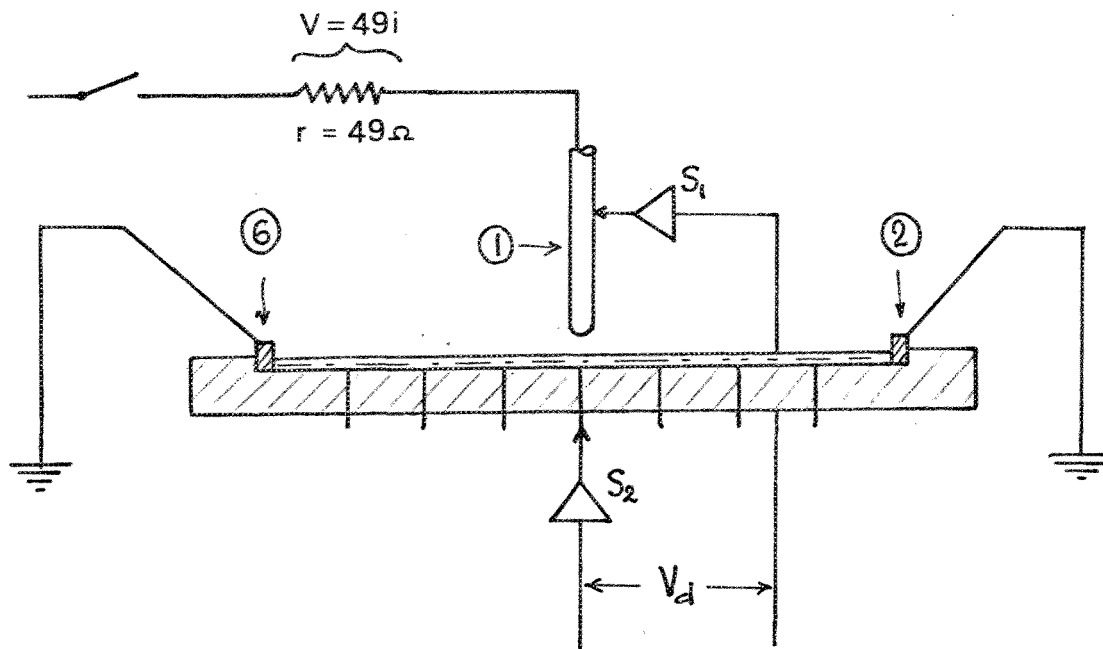


Figure 2.7 Montage pour obtenir une décharge de longueur fixe.

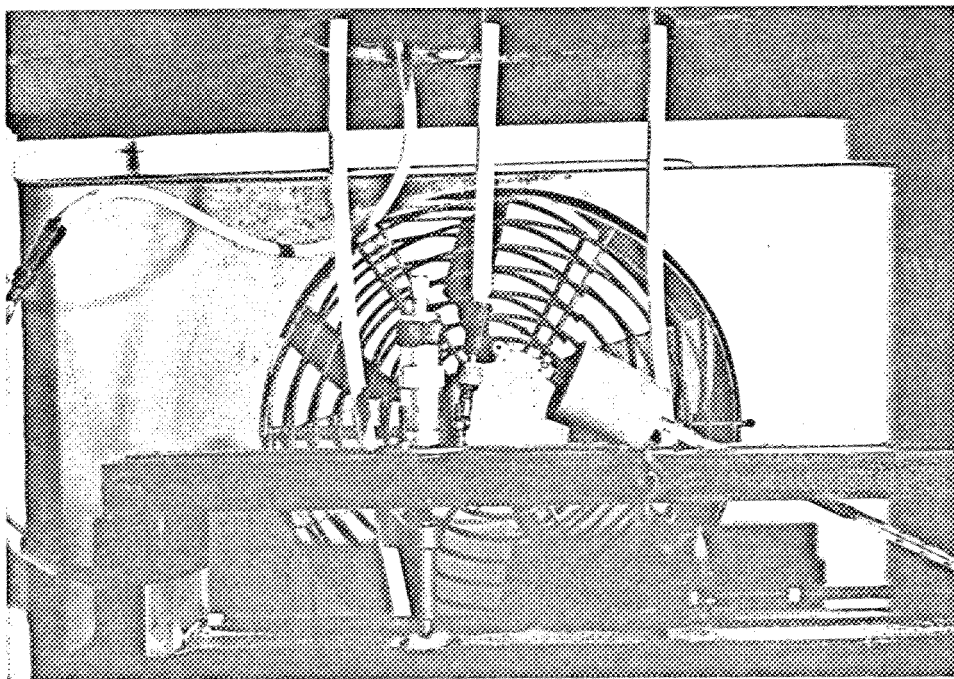


Figure 2.8 Décharge de longueur fixe sur la surface de la glace conductrice.

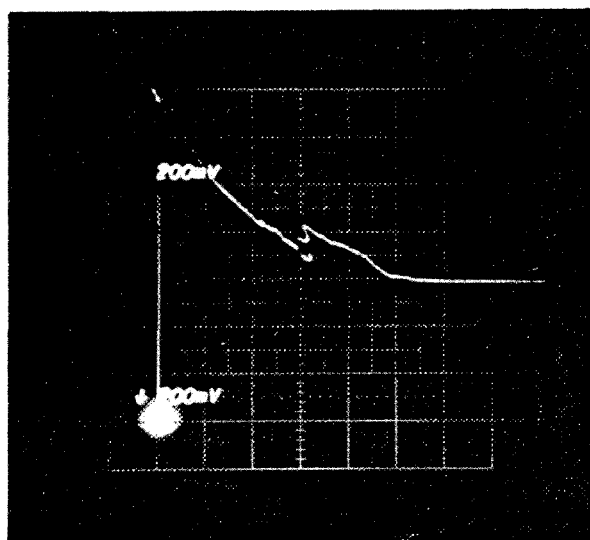
Avec un appareil POLAROID, on photographie les courbes montrées à la figure 2.9.

A noter qu'il faut alimenter les plaques de l'oscilloscope horizontales aussi bien que verticales avec une tension et non avec un courant. Pour les plaques horizontales, on a donc fait passer le courant i au travers d'une résistance de 49Ω connectée en série avec la décharge et on alimente les plaques avec la tension aux bornes de cette résistance. Cette tension étant égale à $49 i$, on en déduit i .

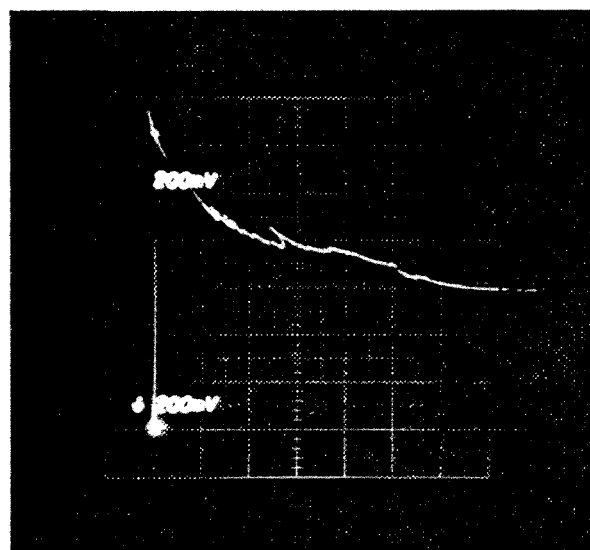
L'échelle selon l'axe des ordonnées a été ajustée à 200 mV/division , avec un rapport de $1/1000$ dû aux sondes H.T. la tension réelle correspondant à une division est de 200V . L'échelle selon l'axe des abscisses a été ajustée à $0,67\text{V/division}$, on en déduit le courant i correspondant à chaque division, qui est: $0,67\text{V} \div 49 \Omega = 0,0136\text{A}$ ou $13,6 \text{ mA}$.

Les courbes photographiées $[V_d(i)]_x$ dont 2 sont montrées à la figure 2.9, sont retracées et regroupées selon la polarité et la température. On les trouve:

- * Aux figures 2.10 et 2.11 pour la polarité positive et avec la glace respectivement à -10°C et -25°C .
- * Aux figures 2.12 et 2.13 pour la polarité négative et avec la glace respectivement à -10°C et -25°C .



Polarité positive
 $x = 10$ cm
 Température = -10°C



Polarité positive
 $x = 10$ cm
 Température = -25°C

Figure 2.9 Courbes de $[V_d(i)]_x$ obtenues avec différentes températures de la glace.

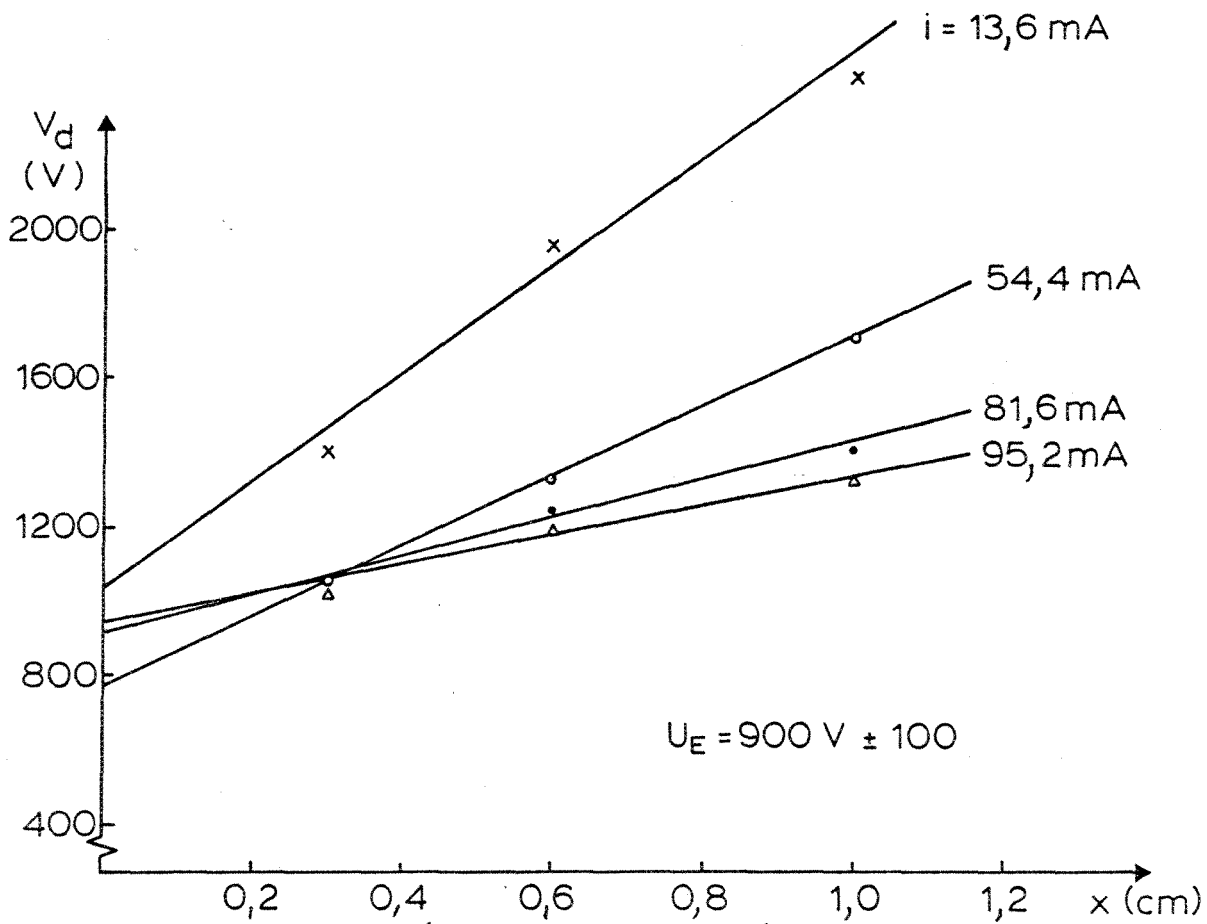
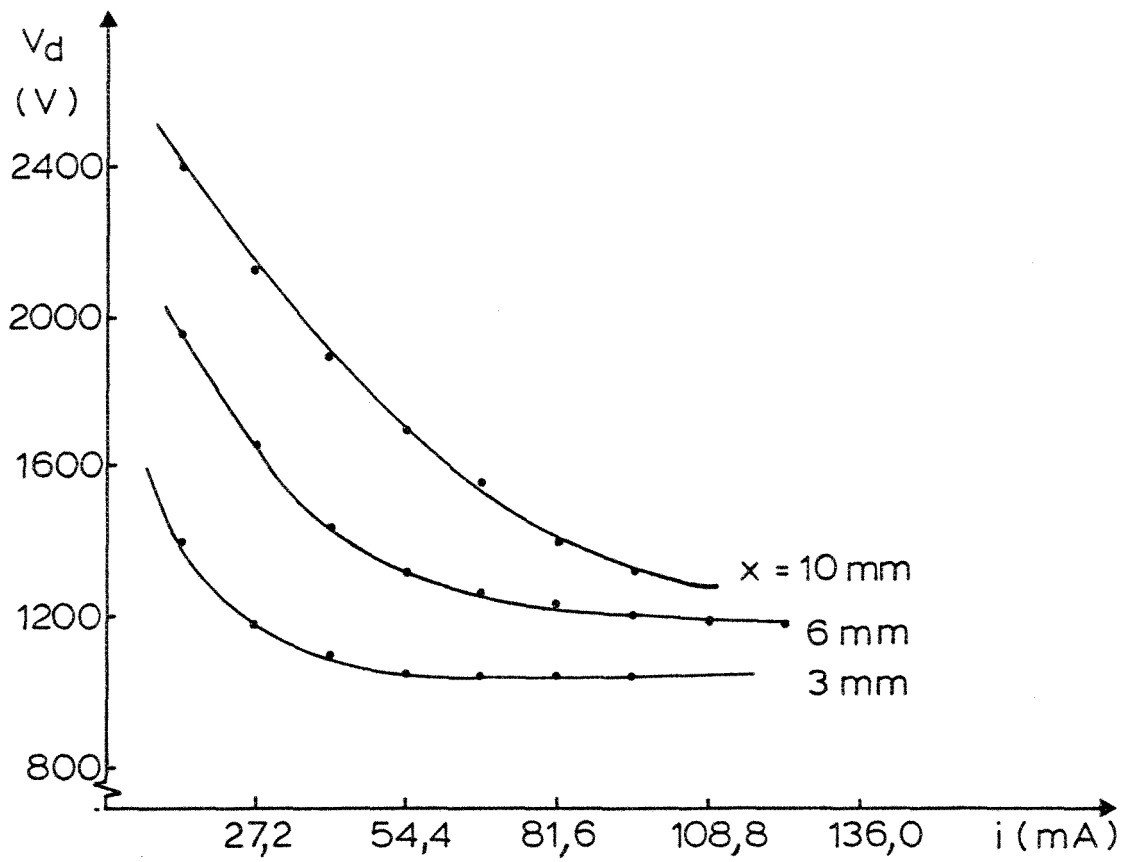


FIGURE 2.10 CARACTÉRISTIQUE DE DÉCHARGE SUR GLACE A -10°C , POLARITÉ POSITIVE

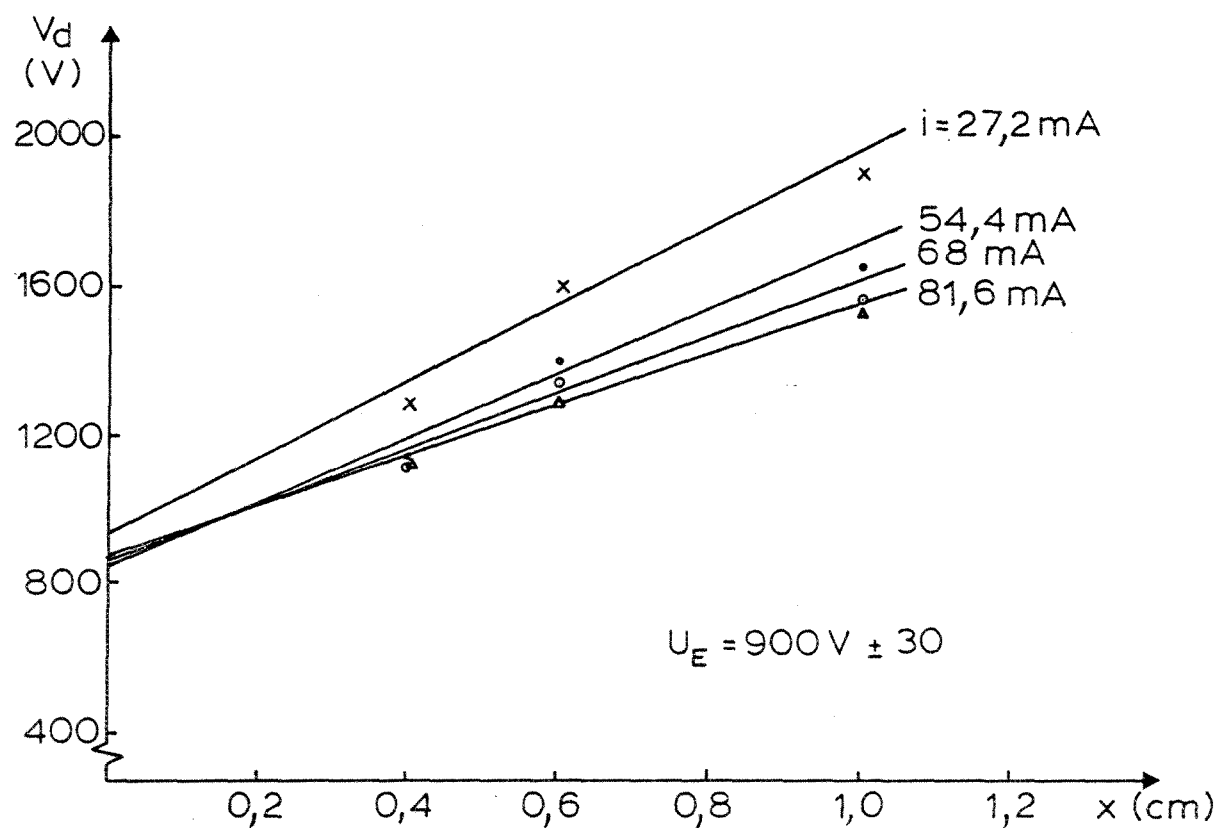
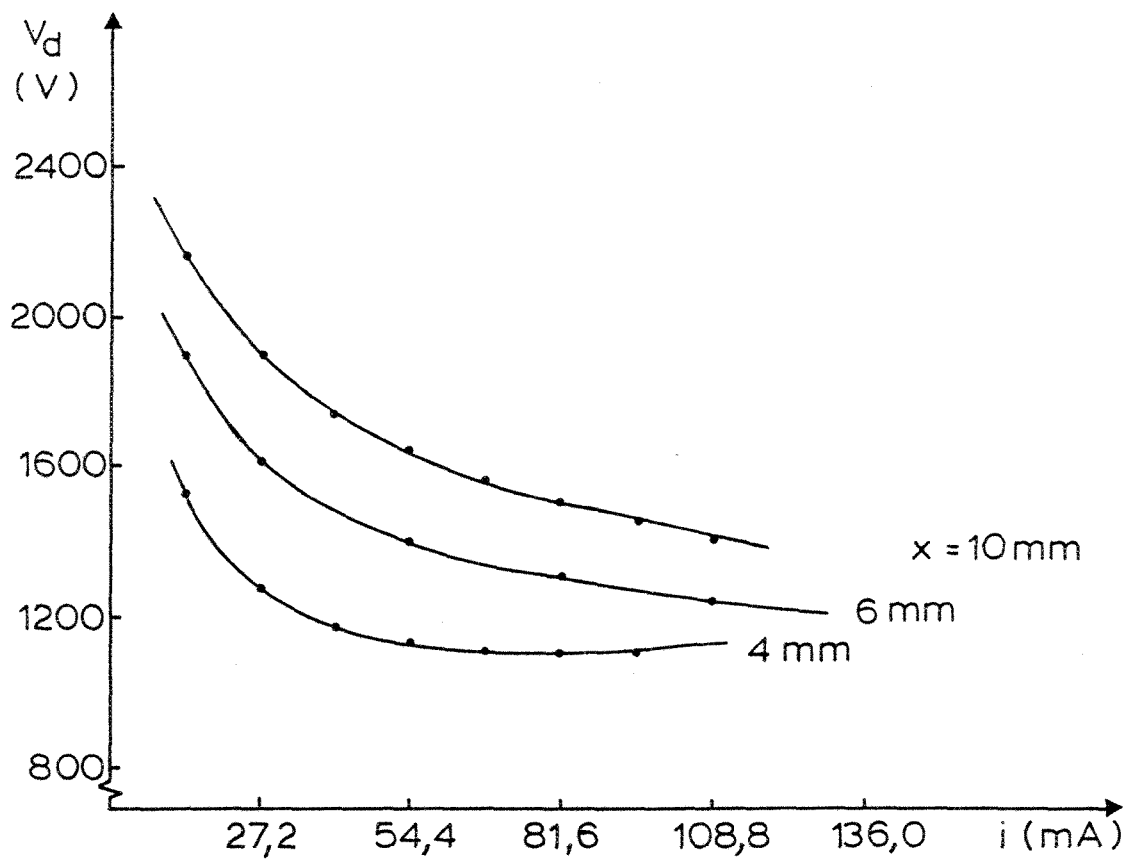


FIGURE 2.11 CARACTÉRISTIQUE DE DÉCHARGE SUR GLACE A -25°C, POLARITÉ POSITIVE

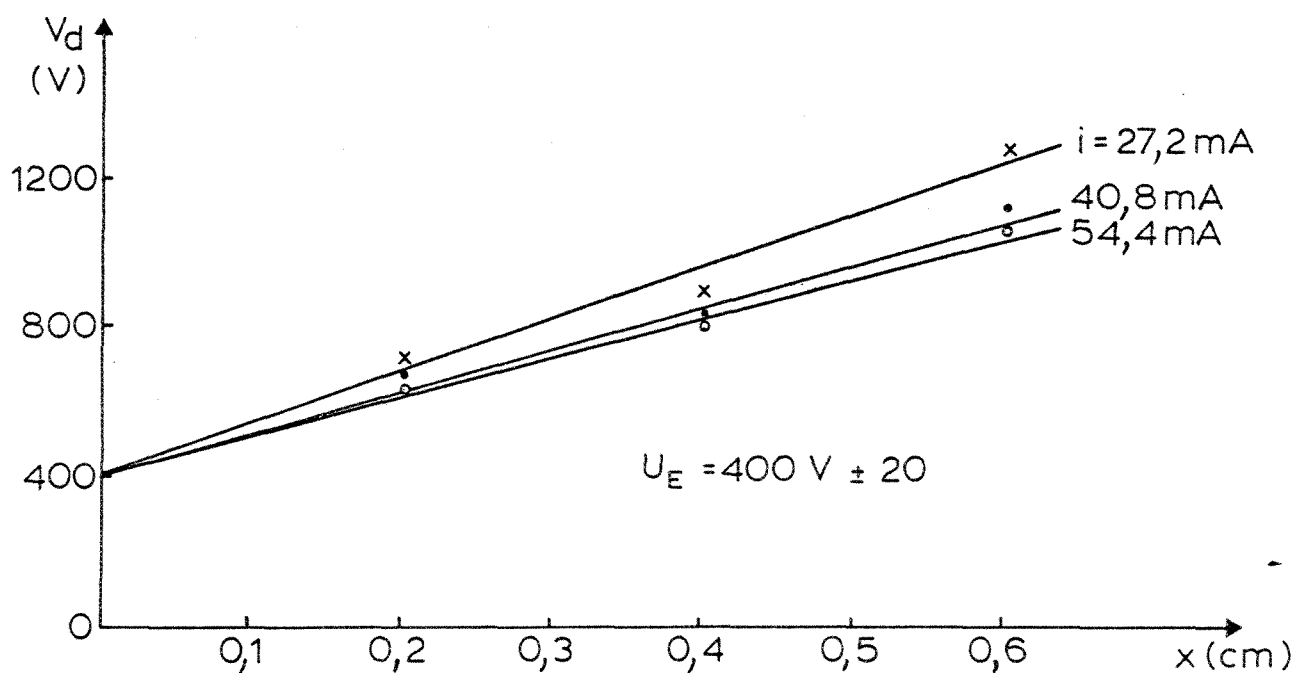
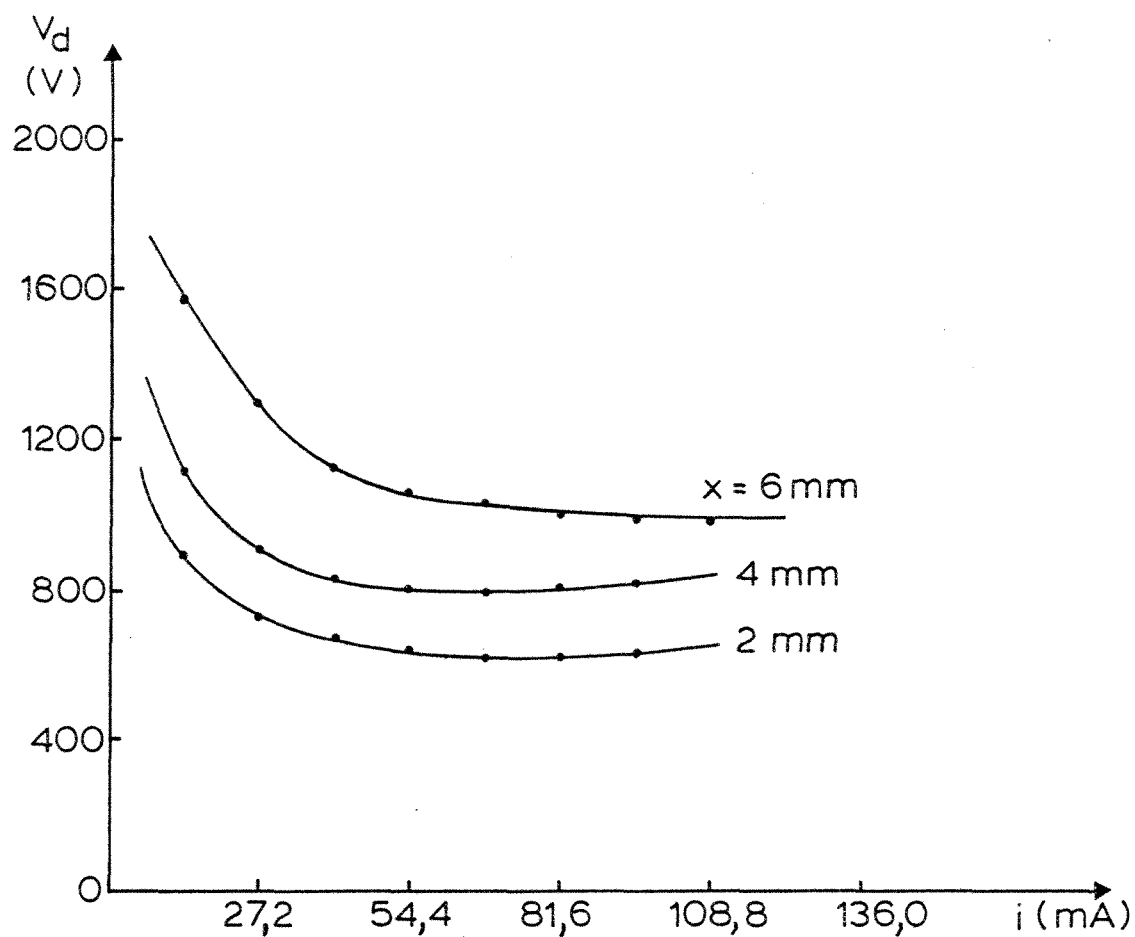


FIGURE 2.12 CARACTÉRISTIQUE DE DÉCHARGE SUR GLACE A -10°C , POLARITÉ NÉGATIVE

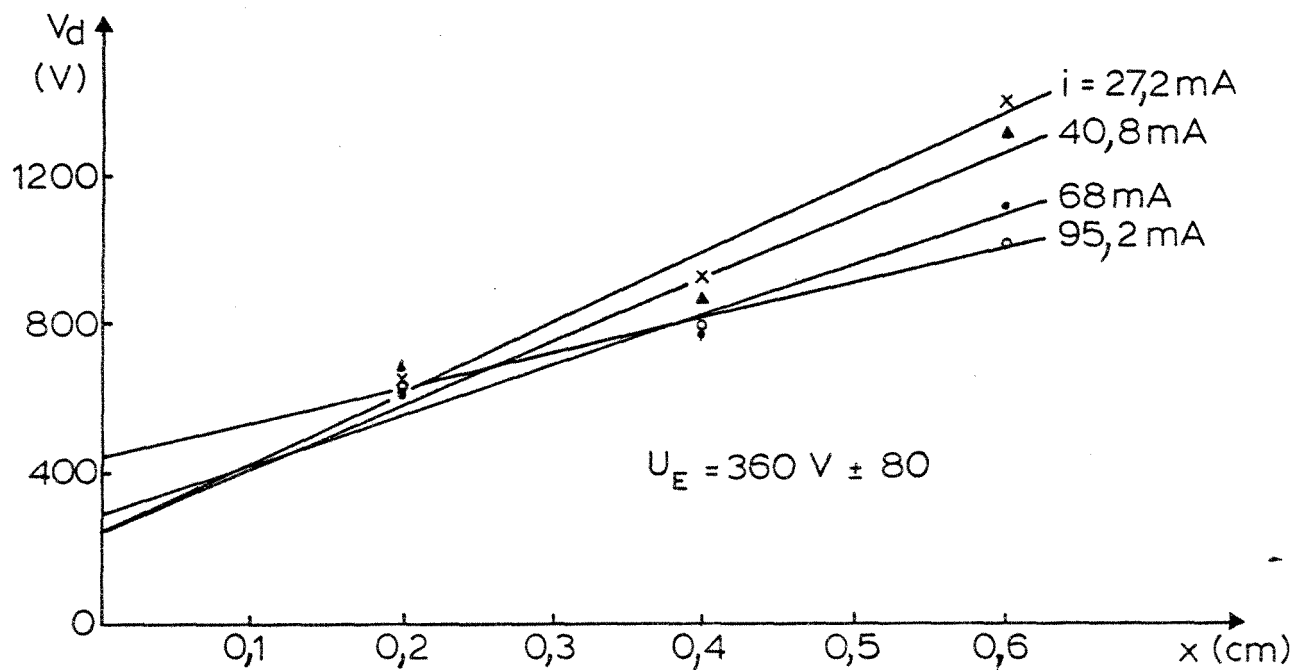
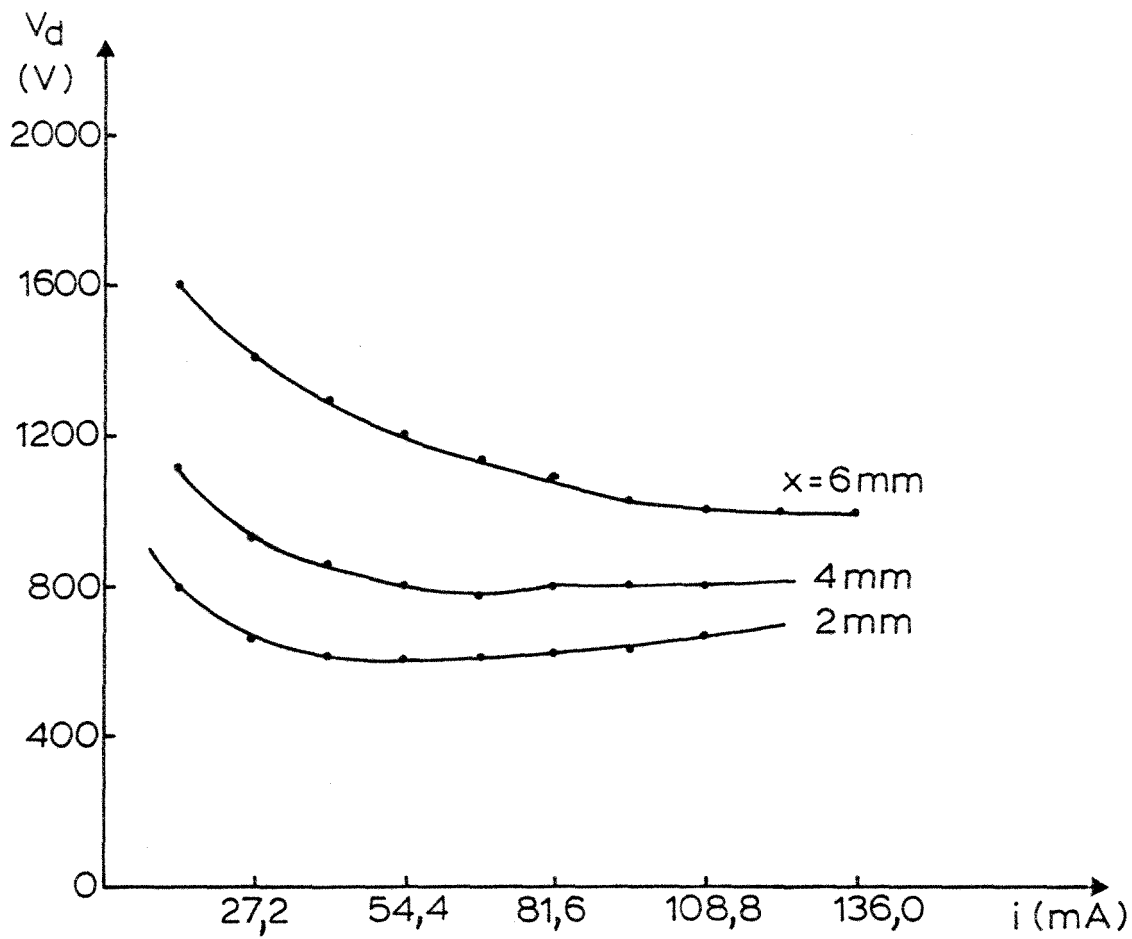


FIGURE 2,13 CARACTÉRISTIQUE DE DÉCHARGE SUR GLACE A -25°C, POLARITÉ NÉGATIVE

2.3.2 Détermination de U_E

Sur le réseau des courbes $[V_d(i)]_x$, à partir d'une valeur fixe du courant i on peut déterminer différentes valeurs de V_d correspondant aux différentes longueurs de décharge. Par exemple, de la figure 2.10, pour un courant $i = 0,0544A$ avec $x = 0,3$ cm on trouve $V_d = 1060V$, avec $x = 0,6$ cm on trouve $V_d = 1360V$ et avec $x = 1,0$ cm on trouve $V_d = 1700V$.

On peut donc tracer les droites $[V_d(x)]_{i=cte}$ telles que montrées à la 2^e moitié des figures 2.10 à 2.13. L'intersection de ces droites avec l'axe des ordonnées nous donne la valeur de la chute de tension cumulée aux électrodes U_E .

Avec la polarité positive appliquée à l'électrode H.T. on obtient une valeur de U_E aux alentours de 900V et ceci ne dépend pas de la température de la glace: $U_E = 900 \pm 50V$. Si la polarité négative est appliquée à l'électrode H.T., on obtient une valeur de U_E aux alentours de 400V et ceci aussi ne varie pas avec la température de la glace: $U_E = 400 \pm 20V$.

2.3.3 Détermination des constantes A et n

Une fois que la valeur de U_E est connue, on la substitue dans l'équation (3) $V_d = Ax i^{-n} + U_E$ et on utilise les courbes $[V_d(i)]_x$ pour choisir 2 autres valeurs de i qui donnent 2 ensembles de valeurs de V_d et x , on les substitue ensuite dans la

relation (3), on obtient ainsi 2 équations avec 2 inconnues A et n que l'on peut résoudre.

Pour s'assurer que les valeurs trouvées représentent de façon fidèle les courbes enregistrées, nous avons calculé, pour chaque température et polarité, au moins trois ensembles de valeurs de A et n puis prenons la moyenne de ces 3 valeurs.

Les valeurs moyennes pour chaque polarité et deux températures différentes sont inscrites au tableau 2.1. Nous remarquons que pour la même polarité, A et n ne varient pas beaucoup avec la température.

Tableau 2.1

Valeurs de U_E , A et n calculées pour différentes températures et polarités

Polarité	Positive		Négative	
T (°C)	-10	-25	-10	-25
U_E (V)	900 ± 100	900 ± 50	400 ± 20	360 ± 80
A	169	163	370	386
n	0,59	0,53	0,40	0,39

Etant donné que la dispersion des résultats est inévitable à cause de la sensibilité des échelles de l'oscilloscope et de l'instabilité de la décharge et que l'écart de variation des résultats est faible, on peut considérer que ces constantes de décharge ne varient pas avec la température de la glace et on peut

prendre les valeurs moyennes pour chaque polarité. Ainsi:

Pour la polarité positive:

$$U_E = 900 \pm 50 \text{ volts}$$

$$A = 166$$

$$n = 0,56$$

Pour la polarité négative:

$$U_E = 400 \pm 20 \text{ volts}$$

$$A = 380$$

$$n = 0,39$$

Nous savons que la décharge est très sensible à l'atmosphère dans laquelle elle brûle. Les valeurs des constantes de décharge A et n trouvées par différents auteurs sur des surfaces autres que celle de la glace sont très différentes les unes des autres dépendamment des conditions d'expérience. Le tableau suivant en donne un résumé:

Tableau 2.2

Valeurs de A et n de l'équation $V_d = Axi^{-n} + U_E$

relevées par différents auteurs

Auteur	Tension alimentée	A	n	Conditions d'expérience
Hampton [13]	Continue	63	0,76	Décharge dans l'air entre 2 électrodes sphériques en platine.
		530	0,24	Décharge dans la vapeur d'eau entre l'électrode métallique et une colonne d'eau.

Labadie [14]	Continue (+)	220	0,31	Décharge entre l'électrode sphérique en tungstène et une surface d'électrolyte.
Jolly [15]	Alternative	189 à 307	0,44	Décharge sur une surface polluée, i et V en valeur instantanée.
Alston et Zoledziowski [16]	Alternative	63	0,76	Décharge dans l'air entre 2 plaques planes diam. = 3,7 cm, distance = 20 cm, i et V en valeur crête.
Plueksawan [17]	Continue (+)	164	0,43	Décharge entre l'électrode sphérique en tungstène et une surface d'électrolyte.
	Alternative	122	0,57	Décharge entre l'électrode sphérique en tungstène et une surface d'électrolyte, i et V en valeur efficace.

2.3.4 Analyse des résultats

Ces résultats montrent qu'avec les mêmes conditions d'expérience, on arrive à des valeurs très proches les unes des autres. En effet, examinons les cas suivants:

(a) Alston & Zoledziowski [16] et Hampton [13] ont trouvé les mêmes valeurs $A = 63$, $n = 0,76$ pour une décharge dans l'air sec entre 2 électrodes métalliques semblables.

Alston et Zoledziowski utilisent deux électrodes en cuivre de diamètre 3,7 cm et distantes de 20 cm. Hampton utilise deux électrodes sphériques en platine de distance 15 mm mais dont le diamètre n'est pas mentionné. Cependant, vu la distance réduite

entre les deux électrodes, leur diamètre doit être aussi réduit. D'autre part, dans ces deux travaux, les deux électrodes sont identiques, ce qui nous amène à penser que les champs électriques dans les deux cas doivent être presque identiques. La seule différence qui existe alors entre ces deux travaux est la tension alimentée, l'une alternative, l'autre continue.

(b) Labadie, Plueksawan et l'auteur ont utilisé le même modèle du Laboratoire de Génie électrique à Toulouse. Pour la polarité positive, nous avons trouvé les valeurs suivantes:

Labadie:	$A = 220, n = 0,31$	} sur la surface de l'électrolyte
Plueksawan:	$A = 164, n = 0,43$	
L'auteur	$A = 166, n = 0,56$	sur la surface de la glace

Nous voyons que les résultats ne diffèrent que de façon modeste quand on utilise les mêmes équipements ou quand on opère dans des conditions d'expérience semblables.

On peut conclure que pour chaque condition ou chaque équipement, il faut déterminer un ensemble de constantes de décharge propres à cette condition ou à cet équipement.

Notre but dans cette partie du travail a été de vérifier les changements éventuels de ces constantes avec la température de la glace. Nous pouvons conclure qu'il n'y a pas de changement.

2.4 EFFET DE LA POLARITE SUR LES CARACTERISTIQUES DE DECHARGE

Dans la détermination des constantes A et n de la décharge sur la surface de la glace, nous avons appliqué successivement les polarités positive et négative à l'électrode métallique et nous avons trouvé différentes valeurs pour différentes polarités.

En invoquant la théorie de la charge d'espace, nous pouvons expliquer cette différence.

D'après Sigmond [18] et Trinh [19] quand la polarité positive est appliquée à l'électrode métallique, la cathode (la glace) est isolée de la zone d'ionisation par la zone de dérive (drift zone).

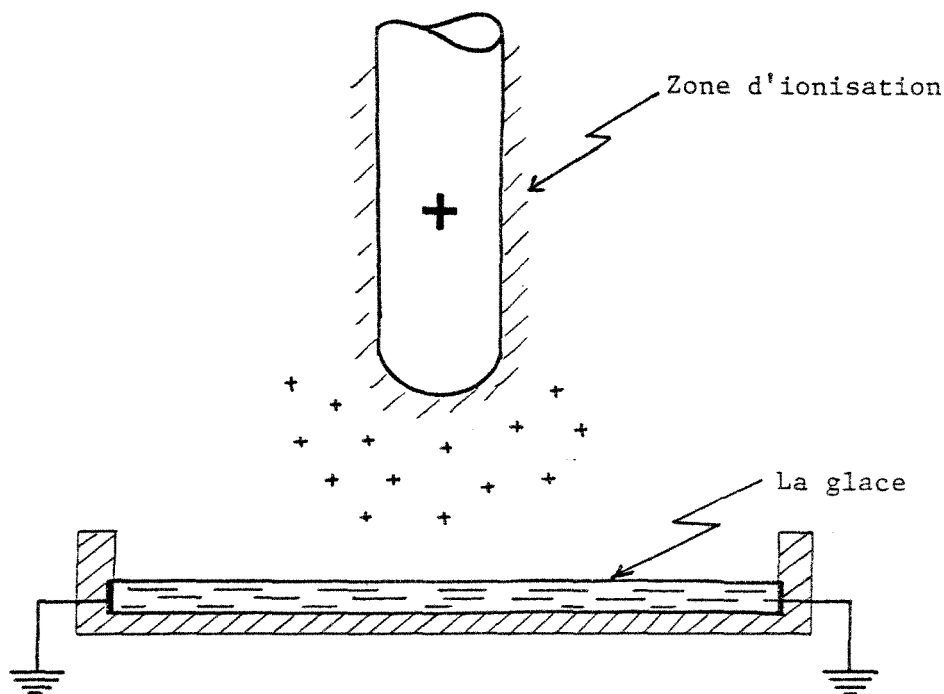


Figure 2.14 Charge d'espace pour polarité positive.

ce qui a pour effet de retarder ou de bloquer le processus de génération des électrons secondaires par impact des ions positifs à la surface de la cathode. Alors les ions positifs générés par l'anode restent autour d'elle. La charge d'espace positive domine complètement l'espace entre les deux électrodes, ce qui a pour effet d'élever le potentiel de l'anode, par conséquent, la chute de tension cumulée aux électrodes U_E est élevée (Fig. 2.14).

Par contre, si la polarité négative est appliquée à l'électrode métallique, la surface de la cathode constitue la zone d'ionisation et assure un approvisionnement immédiat d'électrons secondaires émis par impact des ions positifs sur la cathode (Fig. 2.15).

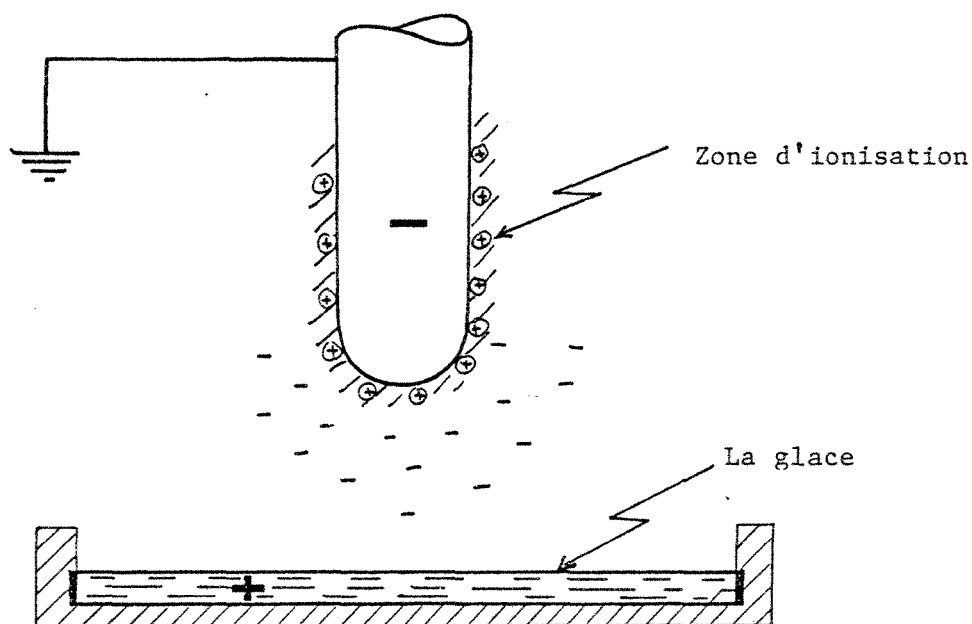


Figure 2.15 Charge d'espace pour polarité négative.

Au fur et à mesure que la cathode absorbe les ions positifs, l'espace entre les deux électrodes devient chargé négativement. La charge d'espace positive domine seulement la zone d'ionisation (autour de la cathode), ce qui a pour effet d'élever le potentiel de la cathode, en conséquence la chute de tension cumulée aux électrodes U_E baisse. C'est pour cette raison que nous avons trouvé: $U_E^+ = 900 \pm 50$ volts et $U_E^- = 400 \pm 20$ volts.

Il est évident que quand la décharge brûle dans deux atmosphères différentes, les constantes de décharge sont nécessairement différentes.

CHAPITRE III

DÉTERMINATION DES FACTEURS
RESPONSABLES DU DÉPLACEMENT
DE LA DÉCHARGE SOUS L'INFLUENCE
DES CHANGEMENTS DE TEMPÉRATURE

CHAPITRE III
DETERMINATION DES FACTEURS RESPONSABLES DU
DEPLACEMENT DE LA DECHARGE SOUS L'INFLUENCE
DES CHANGEMENTS DE TEMPERATURE

3.1 INTRODUCTION

Dans le premier chapitre, nous avons passé en revue des travaux antérieurs concernant le contournement électrique des isolateurs H.T. verglacés. Certains auteurs ont trouvé que le contournement se produit presque toujours au moment de l'augmentation de la température ambiante et/ou sous l'effet des radiations solaires. D'autres ont trouvé que le contournement se produit pendant la période de fonte de la glace couvrant les isolateurs. Dans tous ces cas, les résultats montrent que l'augmentation de la température joue un rôle important dans le processus du développement de l'arc de contournement.

Cependant, Mikio Kawai [5] a trouvé que le contournement se produit même avec la glace "mouillée" dans une condition mixte de glace et de brume sans un amorçage par les rayons solaires ni une augmentation de la température ambiante. Ce phénomène, n'étant pas d'origine reliée à une augmentation de température, peut être expliqué de façon formelle au chapitre IV une fois que les facteurs responsables du déplacement de la décharge auront été déterminés à la fin de ce chapitre.

Dans ce chapitre, nous tenterons de trouver ces facteurs et en même temps, avec les résultats expérimentaux obtenus, d'expliquer comment ce(s) facteur(s) peut(peuvent) amorcer l'allongement de la décharge.

Nous commençons par l'analyse théorique du modèle mathématique puis en utilisant le modèle physique, nous vérifions les conclusions tirées de cette analyse.

3.2 ANALYSE THEORIQUE

Comme il a été mentionné au début du chapitre II, grâce au modèle physique choisi, nous pouvons utiliser les formulations électrique et mathématique d'Obenaus pour fins d'analyse.

Reprenons le circuit électrique décrit à la figure 2.2 et la relation mathématique régissant les tensions décrites dans ce circuit:

$$V_{\text{app}} = \left(\frac{Ax}{i^n} + U_E \right) + Lri \quad (4)$$

où $V_d = \frac{Ax}{i^n} + U_E$ est la tension de l'arc brûlant entre l'électrode métallique et la surface de la glace.

Etant donné que les constantes de décharge A et n et la chute de tension aux électrodes U_E ont été déterminées au chapitre II et qu'il a été prouvé qu'elles ne varient pas avec la température de la glace, il ne nous reste que x, L, r et i à étudier.

L et x sont reliés par la relation $(x+L) = \text{constante}$ (la longueur totale de la cathode à l'anode). Ainsi, quand x augmente, L doit nécessairement diminuer, ce qui correspond au cas où la décharge tend vers le contournement. Par ailleurs, on sait que L ou x ne peut pas varier seul. Leur variation résulte des variations de r ou de i, ainsi l'analyse revient à faire l'étude de la variation de r et de i sous l'influence des changements de température.

Quand la température varie, la résistance électrique de la glace change en conséquence. D'autre part, pendant le déplacement de la décharge sur la surface de la glace, le courant peut diminuer, rester constant ou augmenter. Nous allons donc étudier ces 3 possibilités combinées avec 2 cas de changement de la résistance électrique de la glace. Pour ne pas compliquer le tableau de comparaison de façon inutile, nous avons éliminé le cas $r = \text{constante}$ (température fixe) parce que ceci résulterait en un courant constant, par conséquent tout est constant y compris la longueur de la décharge, donc pas de possibilité de contournement. Le tableau 3.1 montre les différentes possibilités quand un changement de la température ambiante arrive. Dans l'analyse de chacun des cas le raisonnement est basé sur les faits suivants:

(1) La tension appliquée (V_{app}) aux deux électrodes est constante. Autrement dit, la somme $[\frac{Ax}{i^n} + U_E] + Lri$ est une constante.

(2) A un instant donné les valeurs de L (longueur de la couche de glace) et x (longueur de la décharge) sont prises fixes. Autrement dit, le raisonnement est axé sur les variations de r et de i. Les variations de L et de x viennent après parce qu'elles ne sont que les conséquences des variations de r et de i. On ne doit donc pas en tenir compte dans le raisonnement pour trouver la cause de l'allongement de l'arc.

3.2.1 Les cas où r diminue

Cas I : i diminue: ce cas est impossible car quand la résistance diminue, si le courant n'augmente pas, il faut au moins qu'il soit constant.

Cas IIa: i est constant: pour une valeur fixe quelconque de L, la tension de la glace (Lri) diminue et par conséquent, la tension de décharge augmente, ce qui implique une augmentation de x. Le fait que x augmente (allongement de la décharge) contribue à la diminution de L (car $x + L = \text{constante}$) résultant ainsi en une diminution additionnelle de Lri . On a donc une sorte de rétroaction positive qui continue jusqu'au contournement. Dans ce cas, pendant le déplacement de la décharge, la diminution de Lri , causée par la diminution de L, fait augmenter la tension de décharge par augmentation de x et quand la tension de la glace est nulle ($L = 0$), le contournement se termine. On a nécessairement:

$$V_{\text{app}} = \left(\frac{Ax}{i^n} + U_E \right) + \cancel{Lri} = V_c \quad (5)$$

TABLEAU 3.1

POSSIBILITES DE CONTOURNEMENT QUAND LA TEMPERATURE CHANGE

i	T ↗				T ↘			
	r ↘				r ↗			
	Lri	$\frac{Ax}{i^n} + U_E$	x	RÉSULTATS	Lri	$\frac{Ax}{i^n} + U_E$	x	RÉSULTATS
↘ (I)				IMPOSSIBLE	(Ia) ↘			IMPOSSIBLE
					(Ib) ^{Cst}			IMPOSSIBLE
					(Ic) ↗	↘	↘	ARC S'ÉTEINT
CONSTANT (II)	(IIa) ↘	↗	↗	CONTOURNEMENT	(IIb) ↗	↘	↘	ARC S'ÉTEINT
↗ (III)	(IIIa) ↘	↗	↗	CONTOURNEMENT	(III d) ↗	↘	↘	ARC S'ÉTEINT
	(IIIb) ^{Cst}	Cst	Cst	ARC SE MAINTIENT				
	(IIIc) ↗	↘	↘	ARC S'ÉTEINT				

Nous voyons donc qu'une décharge peut se développer sous l'influence d'une diminution de la résistance électrique de la glace pour devenir un arc de contournement et pendant ce développement le courant i reste constant.

Cas IIIa: i augmente légèrement mais r diminue fortement de telle sorte que la tension de la glace diminue, ce qui implique une augmentation de la tension de décharge entraînant ainsi un allongement de la décharge. Ce fait contribue à la diminution de L et une diminution additionnelle de la tension de la glace comme le cas IIa précédent. Le phénomène continue jusqu'à contournement complet. Dans ce cas, outre l'augmentation de la tension de décharge telle que décrite au cas IIa, il faut ajouter la chute de cette tension à cause de l'augmentation de i , ainsi, quand le contournement se produit c'est cette tension qui est égale à la tension de contournement mais elle est toujours inférieure à la tension appliquée à cause de l'augmentation de i .

$$\left(\frac{Ax}{i^n} + U_E\right) = V_c < V_{app} \quad (6)$$

Le fait que la tension de la glace diminue tandis que i augmente s'explique de façon simple. Nous savons que r est beaucoup plus grand que i (r est de l'ordre des dizaines à centaines de $k\Omega$, i est de l'ordre des milliampères), ainsi une forte diminution de r dépasse de beaucoup en influence les augmentations minimales de i . Il en résulte une diminution de la tension de la glace.

Le fait que la tension de décharge augmente tandis que i augmente est aussi explicable. Etant donné que $n < 1$ et que l'augmentation de i est minime, la diminution de la tension de la décharge causée par l'augmentation de i est très faible comparée à l'augmentation de cette tension causée par la chute de la résistance de la glace.

Prenons par exemple le cas de la polarité positive ($n = 0,56$). Une augmentation de 20% du courant i entraîne une diminution de seulement 9,7% de la tension V_a et même une augmentation énorme de 400% du courant entraînera une diminution de seulement 54% de la tension V_a .

En effet, pour un courant $i = 0,020$ A, nous avons $V_a = Ax i^{-n} = Ax (0,02)^{-0,56} = 8,94 Ax$. Une augmentation de i de 20% donne:

$$V_a = Ax(0,024)^{-0,56} = 8,07 Ax$$

et une diminution de V_a de:

$$\left(\frac{8,07 - 8,94}{8,94} \right) \times 100 = -9,7\%$$

Une augmentation du courant de 400% donne:

$$V_a = Ax(0,080)^{-0,56} = 4,11 Ax$$

et une diminution de V_a de:

$$\left(\frac{4,11 - 8,94}{8,94}\right) \times 100 = -54\%$$

Par contre, comme conséquence de l'augmentation de la température, une forte diminution de la résistance électrique peut atteindre 97% de sa valeur initiale (prouvée au chapitre IV) résultant en une diminution semblable de la tension de la glace (car L et i sont faibles) et par conséquent, une augmentation semblable de V_a .

Cas IIIb: i augmente fortement, r diminue légèrement de telle sorte que le produit Lri reste constant. Ce cas est possible mais peu probable. En effet, quand la résistance diminue légèrement, il n'y a pas de raison pour que i augmente fortement. Mais si un tel cas se produit, l'arc est maintenu pour un certain temps, pendant ce temps la chaleur dégagée par la décharge fait fondre la glace, ce qui a pour effet de diminuer fortement la résistance et on se retrouve dans le cas IIIa précédent.

Cas IIIc: i augmente fortement, r diminue légèrement de telle sorte que la tension de la glace augmente. Ce cas est aussi très peu probable dû à la même raison citée précédemment (cas IIIb), mais si un tel cas se produit, l'arc doit s'éteindre à cause de la diminution de la tension de décharge.

3.2.2 Les cas où r augmente

Cas Ia: i diminue fortement mais r augmente légèrement de telle sorte que le produit Lri diminue. Ce cas est impossible dû à la même raison citée au cas IIIa.

Cas Ib: i diminue fortement mais r augmente légèrement de telle sorte que le produit Lri reste constant. Ce cas est aussi impossible car si ce produit reste constant, le terme $(\frac{Ax}{i^n} + U_E)$ ne peut pas être constant pendant que i diminue fortement.

Cas Ic: i diminue légèrement mais r augmente fortement de telle sorte que le produit Lri augmente. Il en résulte que le terme $(\frac{Ax}{i^n} + U_E)$ diminue (car la somme de 2 termes est une constante), ce qui conduit à une extinction de la décharge.

Cas IIb: i est constant mais r augmente (avec n'importe quel taux d'augmentation de r), ce qui résulte en une augmentation de la tension de la glace et par conséquent, une diminution de la tension de décharge. Alors, pour satisfaire à cette condition x doit diminuer et la décharge s'éteint.

Cas IIIc: i augmente. Obligatoirement la tension de la glace (Lri) augmente et la tension de décharge diminue et on est dans la même situation que le cas (IIb) précédent.

De cette analyse, nous pouvons tirer les points suivants:

- * Quand le courant diminue, quel que soit le changement de la résistance électrique de la glace, la décharge ne peut pas se développer en arc de contournement (cas I, Ia, Ib et Ic).
- * Quand la température ambiante baisse (r augmente), il n'y a pas possibilité de contournement sur la surface de la glace (cas Ia, Ib, Ic, IIb et IIIId).
- * Quand la température ambiante s'élève (r diminue), il y a deux possibilités de contournement, l'une correspond à un courant de fuite constant (cas IIa), l'autre correspond à un courant de fuite qui augmente pendant le développement de la décharge (cas IIIa).

Nous pouvons donc conclure que c'est la diminution de la résistance électrique de la glace (ou l'augmentation de la température ambiante) qui provoque l'allongement de la décharge sur la surface de la glace pour devenir un arc de contournement, et que pendant le développement de la décharge, le courant demeure constant ou augmente.

3.3 VERIFICATIONS AU LABORATOIRE

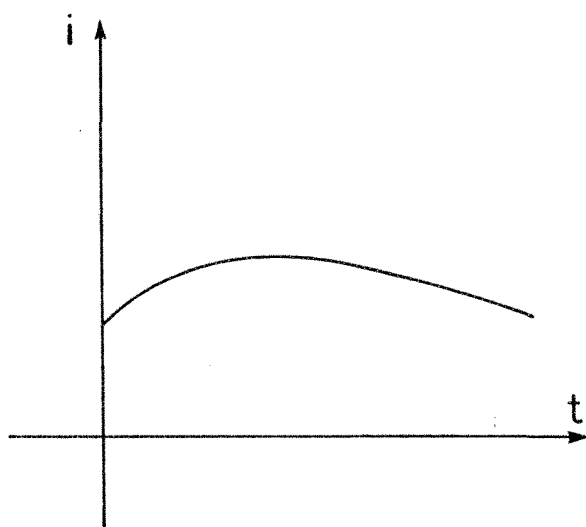
Pour vérifier les résultats de l'analyse théorique faite à la section précédente, nous avons réalisé les expériences suivantes au laboratoire:

3.3.1 Variations du courant

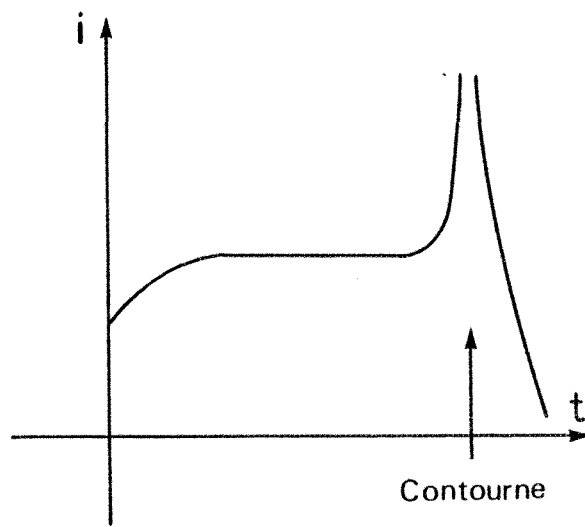
Nous savons que quand une tension trop faible est appliquée aux électrodes, le contournement ne se produit pas. Il existe une valeur critique à partir de laquelle le contournement se produit. On l'appelle tension minimale de contournement V_c .

Comme nous l'avons vu au cas II du paragraphe 3.2.1, quand la résistance électrique de la glace diminue, une décharge peut se développer pour devenir un arc de contournement avec un courant constant et dans ce cas, la tension appliquée est égale à la tension de contournement.

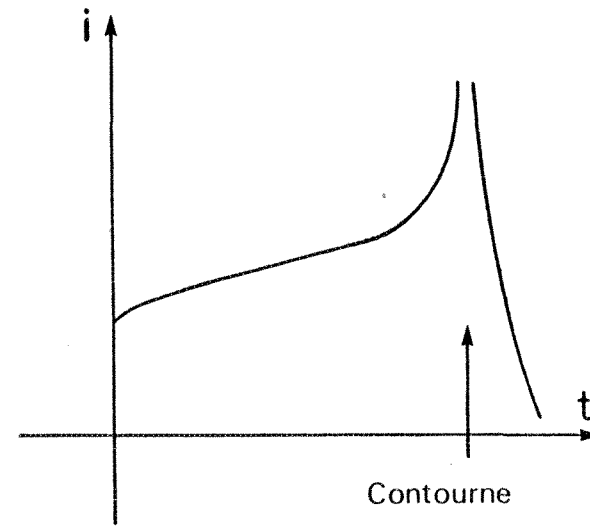
Pour vérifier ce fait, nous avons utilisé le modèle décrit au chapitre II. Nous appliquons une tension qui au départ est inférieure à la tension de contournement; si le contournement ne se produit pas, nous augmentons la tension de 0,5 kV et nous l'appliquons de nouveau aux électrodes. Nous continuons ainsi jusqu'à ce que le contournement se produise. De cette manière la tension à laquelle on obtient le contournement peut être considérée comme tension minimale de contournement et par conséquent, $V_{app} \approx V_c$. La courbe de $i(t)$ enregistrée par l'oscilloscope montre que pendant le déplacement de la décharge sur la surface de la glace le courant est presque constant. Au moment où le contournement se produit, le spot représentant la valeur du courant sur l'écran de l'oscilloscope sort des limites utilisables sur l'appareil, on a une discontinuité dans la courbe.



$$V_{app.} < V_c$$



$$V_{app.} \approx V_c$$



$$V_{app.} > V_c$$

Figure 3.1 Variations du courant i en fonction du temps pendant le développement de la décharge.

Au cas IIIa du paragraphe 3.2.1, quand la résistance électrique de la glace diminue, une décharge peut se développer pour devenir un arc de contournement avec un courant qui augmente toujours et dans ce cas, la tension de contournement est inférieure à la tension appliquée à cause de l'augmentation continue du courant.

Nous avons vérifié ce fait en utilisant la même disposition que celle utilisée précédemment mais cette fois nous avons appliqué une tension qui est bien supérieure à la tension de contournement. L'oscillogramme $i(t)$ montre que le courant augmente pendant le déplacement de la décharge, tel qu'on peut voir à la figure 3.1.

Ces résultats sont bien en accord avec ceux trouvés sur isolateurs verglacés dans les travaux de HARA et PHAN [3] et avec ceux trouvés sur une couche d'électrolyte d'un modèle physique dans les travaux de PEYREGNE [20] et d'IZZULARAB [21].

3.3.2 Effets de la diminution de la résistance électrique

Dans l'analyse théorique faite à la section 3.2, nous sommes arrivés à la conclusion que c'est la diminution de la résistance électrique de la glace qui provoque l'allongement de la décharge.

Pour vérifier ce fait nous avons réalisé, sur modèle physique, les contournements sur la surface de la glace "sèche" et

sur la surface de la glace couverte d'une couche de liquide. Nous avons trouvé qu'avec n'importe quelle température de la glace, la tension de contournement obtenue avec la glace "sèche" est toujours supérieure à celle obtenue avec la glace couverte d'une couche de liquide, ce qui montre que la diminution de la résistance électrique de la glace facilite le contournement. Puisque la résistance du liquide est inférieure à celle de la glace quand la glace est couverte d'une couche de liquide, la résistance équivalente (du liquide en parallèle avec la glace) est plus basse que celle de la glace sèche et même plus basse que celle du liquide.

Pour réaliser cette manipulation, nous avons utilisé une solution de NaCl de résistance linéique $1000 \Omega \text{ cm}^{-1}$ pour produire de la glace dans la rainure du modèle. Afin d'obtenir la tension de contournement sur la surface de la glace "sèche" et celle sur la surface de la glace couverte d'une couche de liquide dans les mêmes conditions d'expérience, nous avons procédé de la façon suivante:

A une température fixe quelconque, nous amorçons le contournement sur la surface de la glace sèche. Une fois que la tension minimale de contournement à cette température a été obtenue, nous soufflons de l'air chaud ($\approx 80^\circ\text{C}$) à la surface de la glace à l'aide d'un tuyau en nylon passant à travers une ouverture se trouvant sur le côté gauche du réfrigérateur (figure

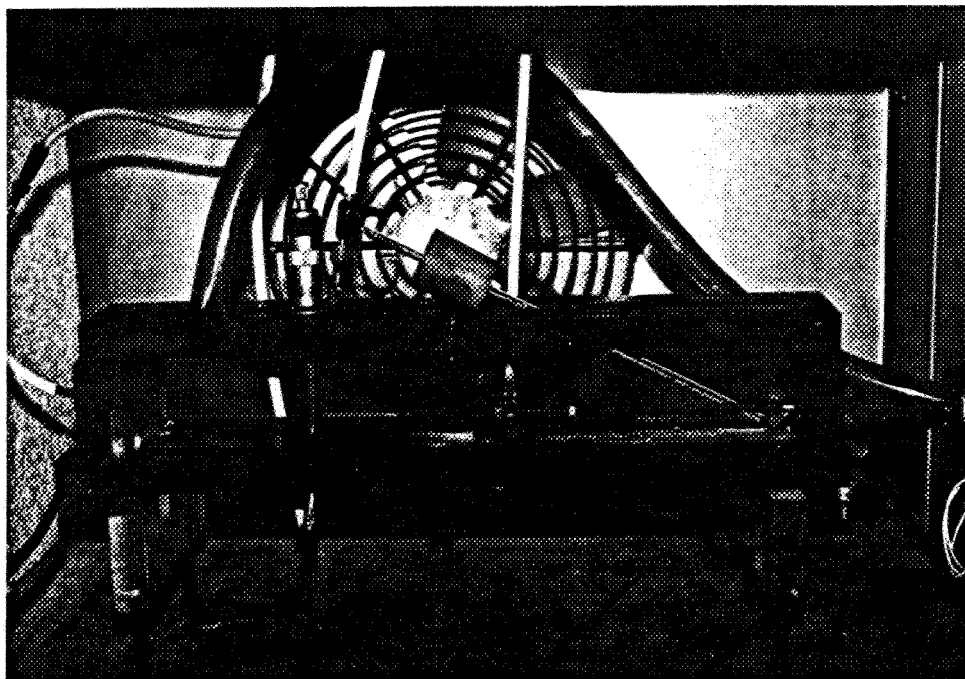


Figure 3.2 Montage pour créer une couche de liquide à la surface de la glace.

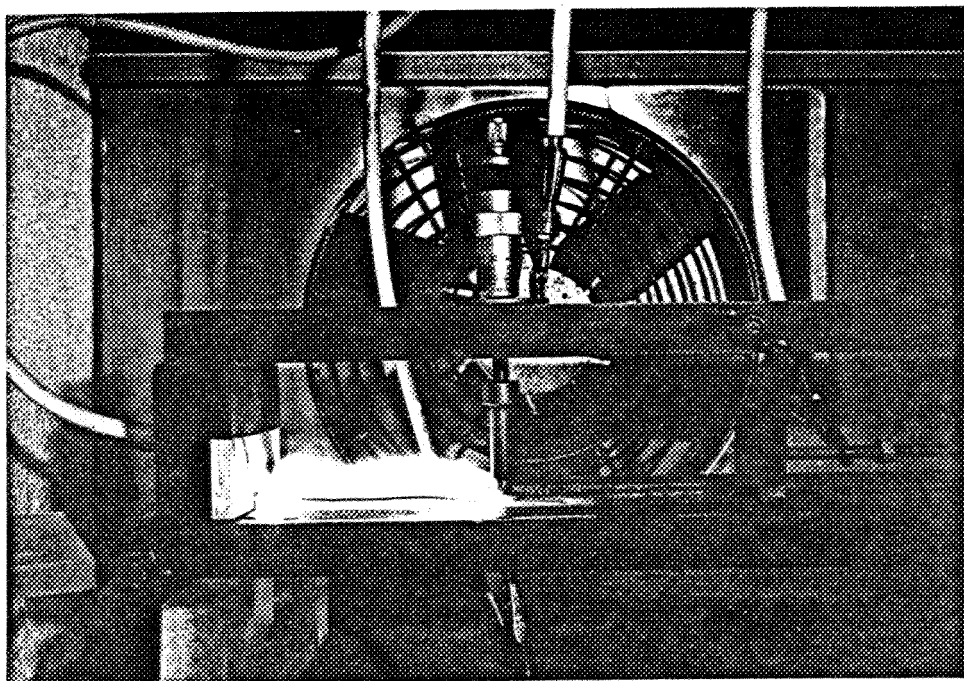


Figure 3.3 Arc de contournement électrique sur la surface de la glace du modèle physique.

3.2). Cette opération dure environ 15 secondes, quand une couche mince de liquide est observée sur la surface de la glace nous arrêtons alors l'air chaud et procédons immédiatement à l'amorçage du contournement.

Il est à noter que quand nous exécutons le contournement avec la glace "sèche" il se crée une couche très mince et non homogène de liquide sur la surface de la glace. Le soufflage d'air chaud a pour but de rendre la couche plus homogène. Cette couche a une épaisseur estimée de 0,5 mm.

Pour obtenir la tension minimale de contournement nous appliquons aux électrodes principales une tension de départ de valeur un peu plus basse que celle de contournement; en même temps une impulsion de 10 kV d'amplitude, 0,1 ms de durée et de polarité inverse est appliquée à l'électrode d'amorçage. Si le contournement ne se produit pas nous augmentons la tension appliquée de 0,5 kV et nous l'appliquons de nouveau, toujours avec la même impulsion d'amorçage. Nous continuons de cette façon jusqu'à ce que le contournement se produise comme le montre la figure 3.3.

L'opération précédente commence à la température la plus élevée (-5°C). Après chaque mesure, on baisse lentement la température afin d'obtenir de nouveau une glace vraiment sèche qui sera prête pour l'expérience suivante.

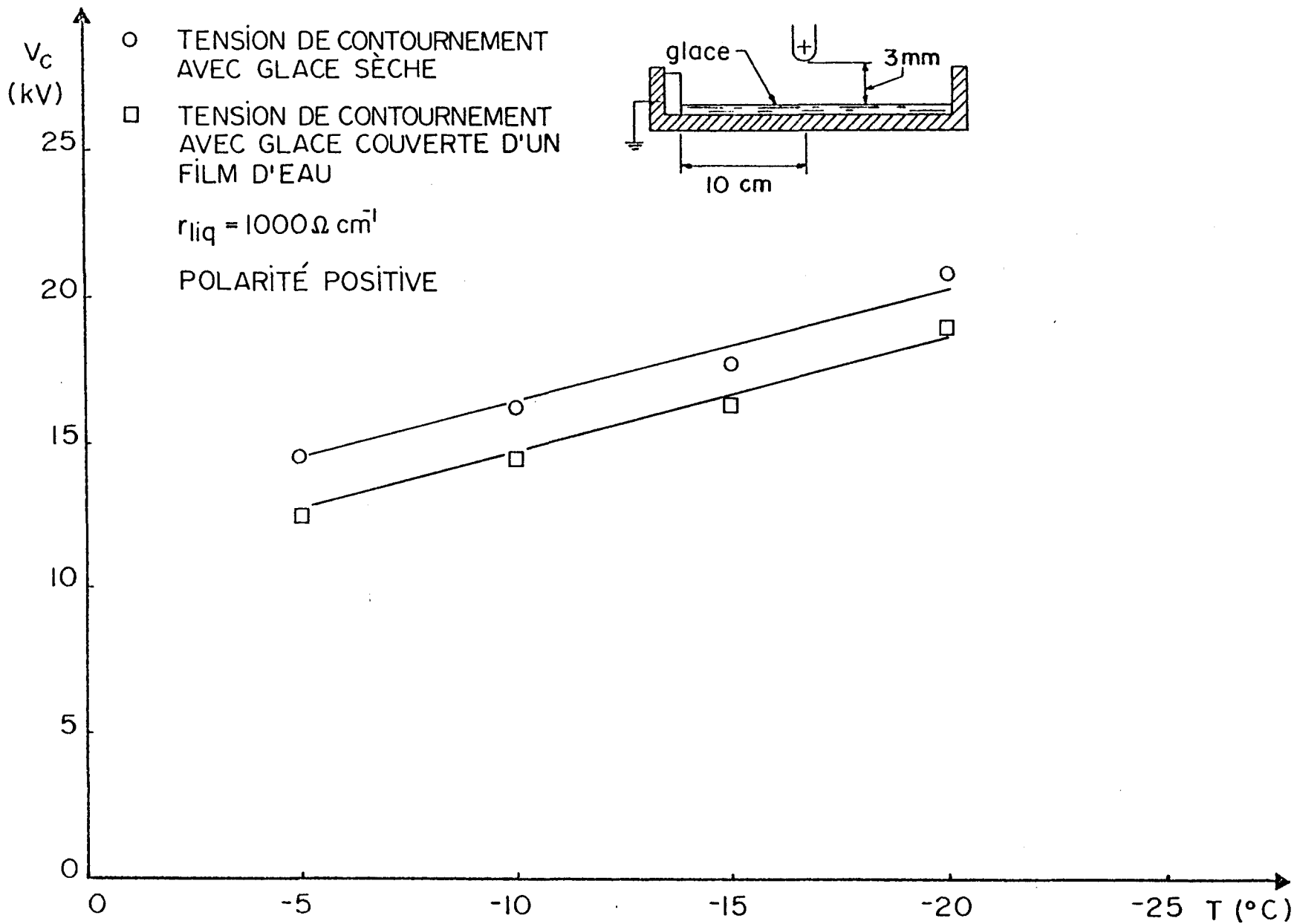


FIG. 3.4 COMPARAISON DES TENSIONS DE CONTOURNEMENT OBTENUES AVEC GLACE SÈCHE ET GLACE COUVERTE D'UN FILM D'EAU

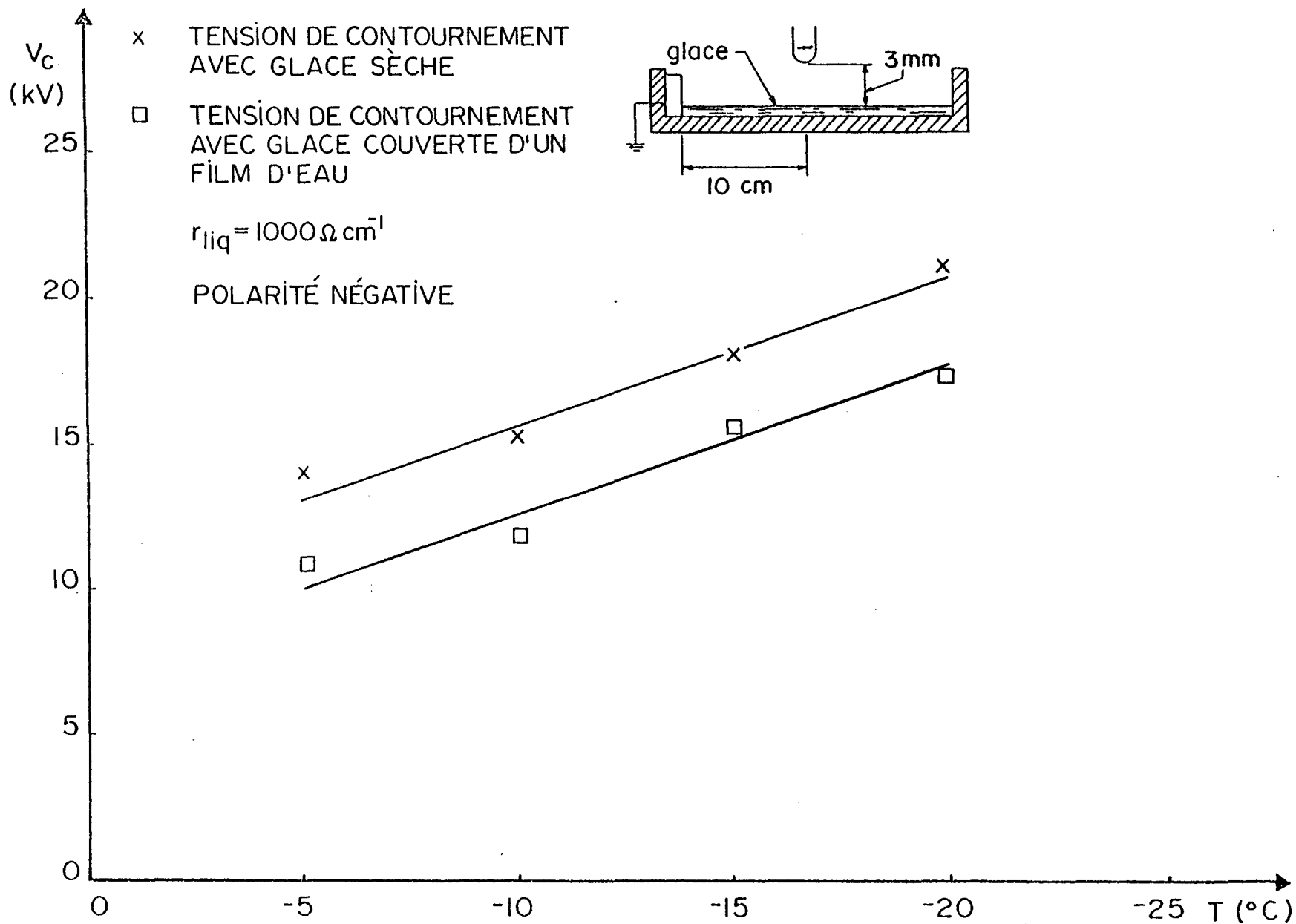


FIG.3.5 COMPARAISON DES TENSIONS DE CONTOURNEMENT OBTENUES AVEC GLACE SÈCHE ET GLACE COUVERTE D'UN FILM D'EAU

Avec la polarité positive appliquée à l'électrode métallique, nous trouvons que la tension de contournement obtenue avec la glace couverte de liquide est plus basse que celle obtenue avec la glace dite "sèche" de 2 kV (fig. 3.4), avec la polarité négative cette différence est approximativement de 3 kV (fig. 3.5). Nous pouvons conclure que c'est la couche de liquide qui cause la baisse de la tension de contournement, autrement dit la diminution de la résistance électrique de la glace facilite le contournement.

Une analyse quantitative de la diminution de la résistance ainsi que celle de la tension minimale de contournement correspondant sera présentée au chapitre IV.

3.3.3 Analyse des résultats

Pour analyser les résultats obtenus à la section précédente nous avons mesuré les tensions de contournement sur la surface de la glace "sèche" respectivement avec 2 polarités différentes. Les résultats nous montrent que celle obtenue avec la polarité positive est légèrement supérieure (1 kV) à celle obtenue avec la polarité négative (figure 3.6). Ce fait est bien en accord avec ceux trouvés par Renner [7] et Fujimura [10] sur isolateurs réels couverts de glace et aussi en accord avec les résultats trouvés par Peyrègne [20] sur la surface d'un électrolyte dans un modèle physique.

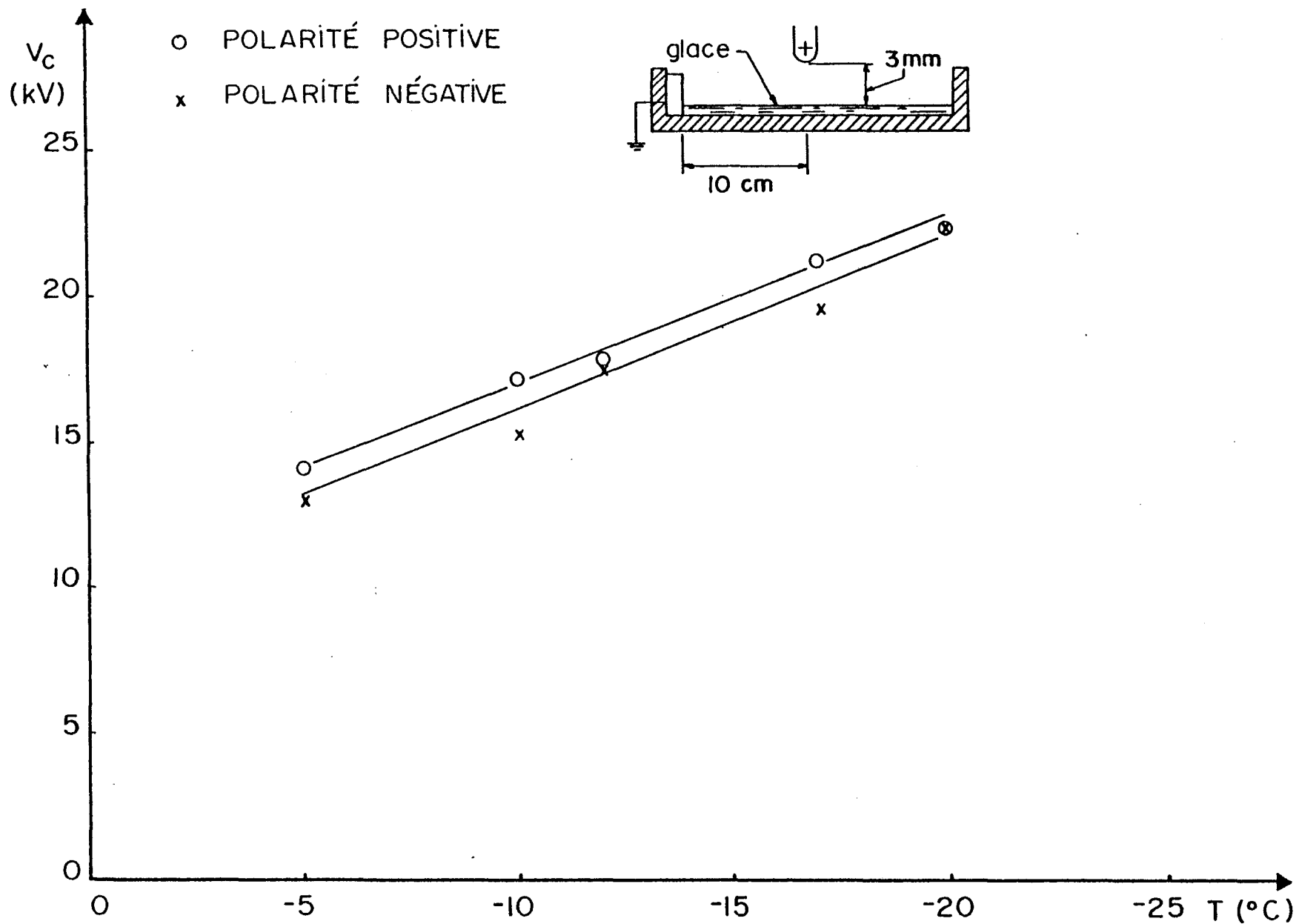


FIG. 3.6 TENSION MINIMALE DE CONTOURNEMENT EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE (GLACE SÈCHE, $r_{liq} = 10^3 \Omega \text{cm}^{-1}$)

L'explication de la différence des résultats trouvés aux figures 3.4 et 3.5 est possible si on se réfère aux résultats trouvés par Peyrène, qui montrent que pour le contournement sur la surface d'un électrolyte dans une rainure de même dimension que celle de notre glace, la tension de contournement obtenue avec la polarité positive est environ 4 kV supérieure à celle obtenue avec la polarité négative.

Si nous comparons les résultats de la figure 3.6 avec ceux de Peyrène, nous voyons que plus la résistance de la glace (ou de l'électrolyte) est faible, plus la tension obtenue avec la polarité négative est basse, ce qui explique pourquoi nous avons trouvé une différence de 3 kV pour la polarité négative à la fig. 3.5 tandis qu'avec la polarité positive (fig. 3.4), cette différence n'est que 2 kV.

Il est à noter que nous ne pouvons pas utiliser une solution de résistance plus élevée car à basse température cette résistance devient excessivement grande, ce qui demande une tension de contournement beaucoup plus élevée que celle que notre source peut fournir (maximum de la source: 25 kV).

Dans la pratique, la résistivité du liquide obtenu de la fonte de la neige ou de la glace naturelle des régions non industrialisées se situe entre 27 et 53 k Ω cm pour les Etats-Unis [7] et entre 50 et 200 k Ω cm pour le Japon [10 et 11].

CHAPITRE IV

ANALYSE QUANTITATIVE ET
COMPARAISON DES RÉSULTATS

CHAPITRE IV

ANALYSE QUANTITATIVE ET COMPARAISON

DES RESULTATS

4.1 INTRODUCTION

Aux 2^e et 3^e chapitres, nous avons montré que les caractéristiques de décharge ne changent pas avec la température de la glace et que le déplacement de la décharge pour devenir un arc de contournement est amorcé par une diminution de la résistance électrique de la glace résultant d'une augmentation de la température ambiante.

Dans ce chapitre, nous étudierons de façon quantitative les variations de la résistance électrique de la glace ainsi que celles de la tension de contournement en fonction de la température de la glace afin de déterminer le pourcentage de diminution de la tension minimale de contournement quand la température augmente. Enfin dans la dernière partie du chapitre nous comparerons nos résultats avec ceux obtenus par les autres auteurs dans les travaux antérieurs cités au chapitre I.

4.2 VARIATIONS DE LA RESISTANCE ELECTRIQUE DE LA GLACE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

Pour étudier cette variation nous avons utilisé trois solutions de chlorure de sodium avec les résistances linéiques respectivement de $1 \text{ k}\Omega \text{ cm}^{-1}$, $10 \text{ k}\Omega \text{ cm}^{-1}$ et $20 \text{ k}\Omega \text{ cm}^{-1}$. Nous préparons ces solutions en faisant dissoudre du NaCl pur dans de l'eau distillée. Un conductimètre TACUSSEL a été utilisé pour détermi-

ner la résistivité (ρ) des solutions. Ces solutions sont versées dans des petites boîtes en plastique de dimensions: 4 cm de largeur, 20 cm de longueur et 1 cm de hauteur. Ces boîtes sont placées dans le réfrigérateur décrit au chapitre II. Pour mesurer la résistance de la glace, 2 plaques en cuivre sont placées verticalement dans ces boîtes avec une distance de 2 cm entre les 2 plaques et sont reliées à l'appareil de mesure à l'aide de fils électriques passant à travers un trou sur une paroi du réfrigérateur. Les plaques en cuivre sont bien brossées avec du papier sablé afin d'obtenir un bon contact avec l'eau et la glace. La résistance de la glace a été mesurée à l'aide d'un multimètre digital de marque Keithley 616.

Etant donné que la résistance de la glace à basse température est très grande, pour être certain que l'on est toujours dans la zone fiable des échelles de mesure de l'équipement, nous avons connecté la glace en parallèle avec une résistance en carbone de valeur $R_1 = 4 \text{ M}\Omega$.

Pour pouvoir mesurer les 3 résistances dans un court intervalle de temps (à la même température), nous avons réalisé un système de commutateur qui nous permet de changer instantanément les fils de connexion entre chaque boîte de glace et l'appareil de mesure. Alors à chaque température de la glace lue sur le thermomètre immergé dans la glace, nous pouvons mesurer en même temps toutes les 3 résistances des 3 types de glace. Le schéma

du montage de mesure est donné à la figure 4.1.

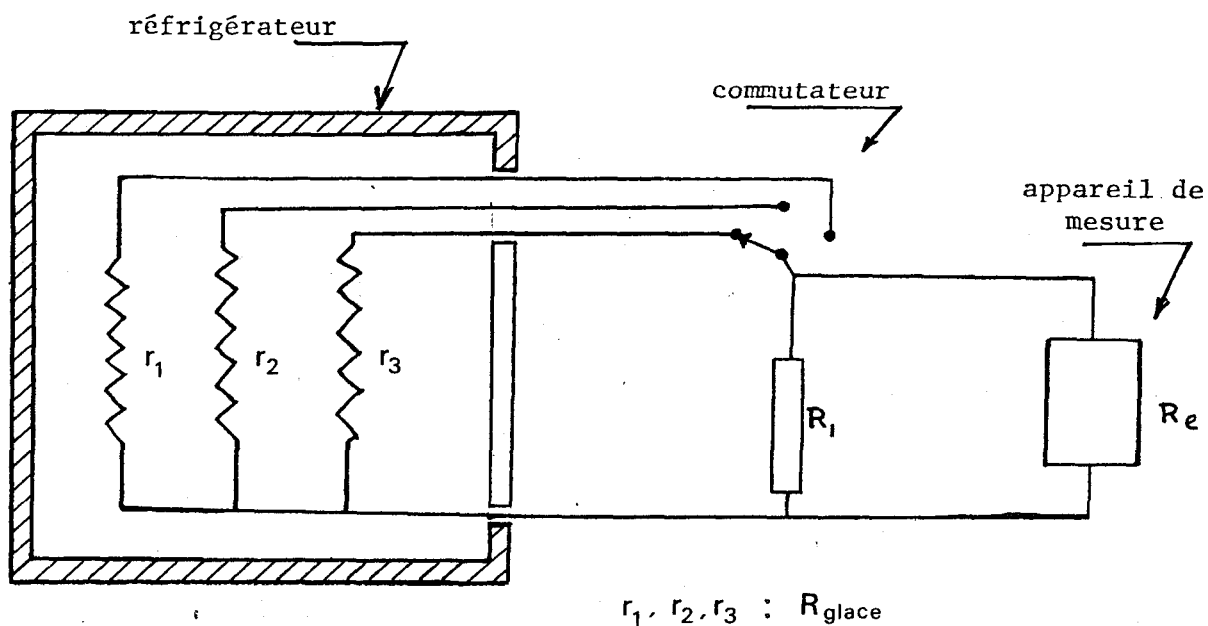


Figure 4.1 Disposition pour mesurer la résistance de la glace

Avec cette disposition, l'appareil de mesure nous donne la résistance équivalente R_e des 2 résistances R_{glace} et R_1 en parallèle. Avec les valeurs mesurées nous pouvons donc calculer la résistance de la glace à l'aide de la relation $R_{\text{glace}} = \frac{R_e \cdot R_1}{R_1 - R_e}$.

La résistance R_1 , mesurée avec notre appareil de mesure à la température ambiante de la salle d'expérience, vaut seulement 3,975 M Ω . Nous utilisons donc cette valeur dans le calcul de la résistance de la glace.

Etant donné que nous nous intéressons seulement aux changements de la résistance de la glace en fonction de la température, nous ne notons que les valeurs correspondant aux températures au-dessous de 0°C et avec un intervalle de 2°C.

Pendant la période de congélation, la température est abaissée lentement et la résistance électrique est enregistrée. Au-dessous de -40°C, nous remarquons que la résistance de la glace est excessivement grande, ce qui se manifeste par le fait que la valeur mesurée R_e est presque égale à R_1 .

Pour la période de fonte nous arrêtons la réfrigération et nous attendons que la température de la glace monte. Nous enregistrons la résistance au fur et à mesure que la température monte.

Les résultats obtenus pour 3 types de glace sont présentés au tableau suivant dans lequel r_1 , r_2 et r_3 sont respectivement les résistances linéiques de la glace formée par le liquide de résistance linéique $1 \text{ k}\Omega \text{ cm}^{-1}$, $10 \text{ k}\Omega \text{ cm}^{-1}$ et $20 \text{ k}\Omega \text{ cm}^{-1}$.

Tableau 4.1

Variations de la résistance électrique de la
glace en fonction de la température

T (°C)	CONGELATION			FONTE		
	r ₁	r ₂	r ₃	r ₁	r ₂	r ₃
0°	0,35·10 ⁵	0,60·10 ⁵	1,3·10 ⁵	0,25·10 ⁵	1,62·10 ⁵	1,30·10 ⁵
-2	0,91·10 ⁵	45,7 ·10 ⁵	56,5·10 ⁵	0,68·10 ⁵	32·10 ⁵	29·10 ⁵
-4	1,33·10 ⁵	49,7 ·10 ⁵	61·10 ⁵	0,82·10 ⁵	61·10 ⁵	56·10 ⁵
-6	1,5 ·10 ⁵	63·10 ⁵	98,4·10 ⁵	0,86·10 ⁵	81·10 ⁵	99·10 ⁵
-8	1,68·10 ⁵	76,4 ·10 ⁵	136·10 ⁵	1,30·10 ⁵	111·10 ⁵	113·10 ⁵
-10	1,81·10 ⁵	81·10 ⁵	173·10 ⁵	1,30·10 ⁵	140·10 ⁵	157·10 ⁵
-12	1,94·10 ⁵	86·10 ⁵	211·10 ⁵	1,56·10 ⁵	180·10 ⁵	166·10 ⁵
-14	2,10·10 ⁵	90,6·10 ⁵	248·10 ⁵	1,95·10 ⁵	290·10 ⁵	241·10 ⁵
-16	2,50·10 ⁵	136,5·10 ⁵	459·10 ⁵	2,40·10 ⁵	331·10 ⁵	316·10 ⁵
-18	2,90·10 ⁵	169,7·10 ⁵	827·10 ⁵	2,70·10 ⁵	385·10 ⁵	490·10 ⁵
-20	3,40·10 ⁵	203·10 ⁵	1195·10 ⁵	3,73·10 ⁵	490·10 ⁵	812·10 ⁵
-22	4,20·10 ⁵	278·10 ⁵	1416·10 ⁵	6,25·10 ⁵	667·10 ⁵	909·10 ⁵
-24	4,95·10 ⁵	290·10 ⁵	1736·10 ⁵	44·10 ⁵	1033·10 ⁵	1195·10 ⁵
-26	6,00·10 ⁵	331·10 ⁵	2237·10 ⁵	106·10 ⁵	1416·10 ⁵	1195·10 ⁵
-28	7,40·10 ⁵	347·10 ⁵	2237·10 ⁵	309·10 ⁵	1735·10 ⁵	1560·10 ⁵
-30	13,60·10 ⁵	525·10 ⁵	3140·10 ⁵	698·10 ⁵	1560·10 ⁵	1735·10 ⁵
-32	30·10 ⁵	612·10 ⁵	3930·10 ⁵	1195·10 ⁵	1955·10 ⁵	1955·10 ⁵
-34	385·10 ⁵	612·10 ⁵	5247·10 ⁵	1560·10 ⁵	1955·10 ⁵	1955·10 ⁵
-36	1955·10 ⁵	858·10 ⁵	5247·10 ⁵	1955·10 ⁵	2237·10 ⁵	2237·10 ⁵
-38	3930·10 ⁵	1560·10 ⁵	7880·10 ⁵	2237·10 ⁵	2237·10 ⁵	2237·10 ⁵
-40	3930·10 ⁵	7880·10 ⁵	7880·10 ⁵	3140·10 ⁵	2613·10 ⁵	2613·10 ⁵

Nous remarquons les points importants suivants:

- (1) A la limite entre liquide et solide (glace) la résistance électrique augmente énormément. Par exemple, pour la glace formée avec la solution dont $r_{\text{liq}} = 20 \text{ k}\Omega \text{ cm}^{-1}$, de 0°C à -2°C la résistance électrique a augmenté de $56,5 \div 1,3 = 43$ fois.
- (2) Pour les solutions de résistance linéique inférieure à $20 \text{ k}\Omega \text{ cm}^{-1}$, du point de congélation à la température -20°C l'augmentation de la résistance est faible mais il existe toujours un changement abrupt à une température critique quelconque au-dessous de -30°C . Dans notre expérience cette température est entre -32 et -36°C pour la solution avec $r = 1 \text{ k}\Omega \text{ cm}^{-1}$ et entre -38°C et -40°C pour la solution avec $r = 10 \text{ k}\Omega \text{ cm}^{-1}$ (fig. 4.2).
- (3) Pour les solutions dont la résistance linéique est relativement élevée ($r \geq 20 \text{ k}\Omega \text{ cm}^{-1}$) l'augmentation de la résistance est graduelle et à la même température la résistance mesurée pendant la période de fonte est toujours inférieure à celle mesurée pendant la période de congélation. Par exemple, à -2°C la résistance mesurée pendant la période de fonte ne vaut que $(29 \div 56,5) \cdot 100 = 52\%$ de celle mesurée en période de congélation et à -20°C elle ne vaut que $(812 \div 1195) \cdot 100 = 68\%$ de celle mesurée en période de de congélation. Il en résulte une diminution de 32% (-20°C) à 48% (-2°C) de la résistance électrique de la glace si on passe de la période de congélation à la période de fonte.

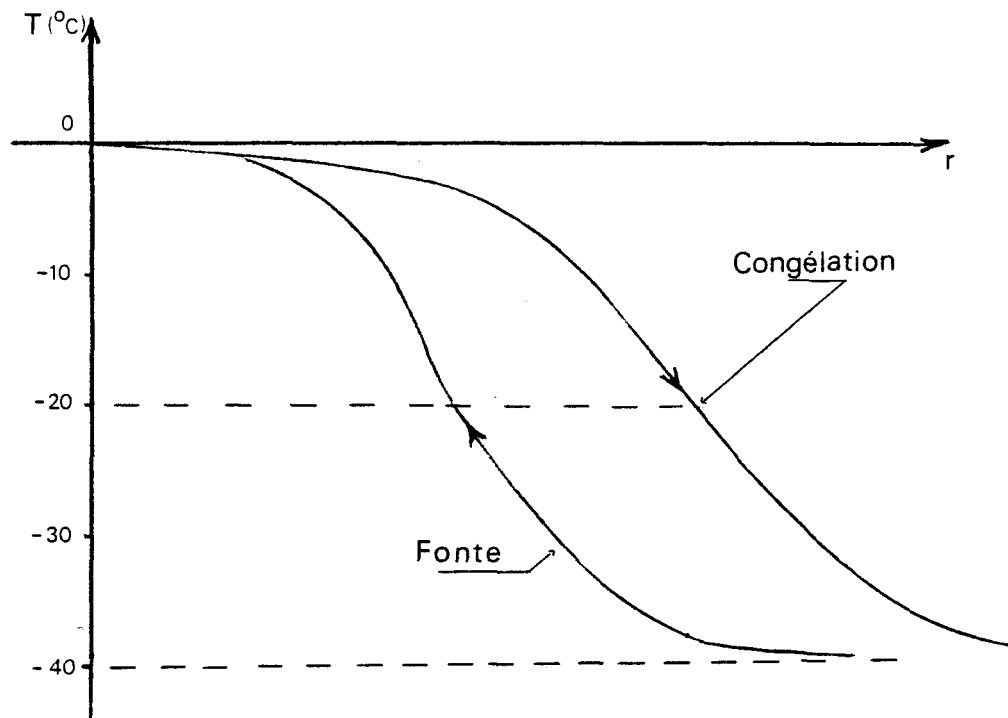


Figure 4.2 Forme de la courbe donnant la température versus la résistance pour de la glace formée par du liquide avec $r \geq 20 \text{ k}\Omega \text{ cm}^{-1}$.

4.3 ANALYSE QUANTITATIVE

A partir des remarques précédentes et des résultats obtenus au chapitre III, nous pouvons analyser de façon quantitative les diminutions de résistance ainsi que celles des tensions de contournement correspondantes une fois qu'une augmentation de température survient.

4.3.1 Calcul de la diminution de la résistance

Dans ce calcul, nous prenons comme exemple la glace formée par le liquide de résistance linéique égale à $20 \text{ k}\Omega \text{ cm}^{-1}$ (ou $\rho =$

20 k Ω cm car dans notre cas la section est égale à l'unité), ce qui est le cas le plus près de la réalité car comme nous l'avons vu à la fin du chapitre III, la résistivité de l'eau fondue de la neige ou de la glace naturelle aux Etats-Unis se situe entre 27 et 53 k Ω cm.

Calculons pour la glace à -2°C:

(a) Si on se trouve en régime de fonte de la glace, la résistance électrique de la glace a diminué de 48% de sa valeur en période de congélation, tel que nous avons calculé dans la remarque # 3.

(b) Si on n'est pas en régime de fonte mais si la glace est couverte d'une couche de liquide fondu de cette glace, nous pouvons calculer le pourcentage de diminution de la résistance comme suit:

Du tableau 4.1, à -2°C et en congélation, la résistance de la glace est $56,5 \cdot 10^5 \Omega \text{ cm}^{-1}$, mais à 0°C, à l'état liquide, cette résistance ne vaut que $1,3 \cdot 10^5 \Omega \text{ cm}^{-1}$. Etant donné que nous avons maintenant une couche de glace en parallèle avec une couche de liquide, la résistance totale sera:

$$R_t = \frac{R_{\text{glace}} \cdot R_{\text{liq.}}}{R_{\text{glace}} + R_{\text{liq.}}}$$

$$R_t = \frac{(56,5 \cdot 1,3) 10^{10}}{(56,5 + 1,3) 10^5} = 1,27 \cdot 10^5 \Omega \text{ cm}^{-1}$$

Nous voyons que la résistance totale est encore plus faible que celle du liquide. Il en résulte une diminution de $[(56,5 - 1,27) / 56,5] \cdot 100 = 97,7\%$ de la résistance en période de congélation.

(c) Si on est en régime de fonte et la glace est couverte d'une couche de liquide, la résistance totale équivalente sera plus faible:

$$R_t = \frac{(29 \times 1,3) 10^{10}}{(29 + 1,3) 10^5} = 1,24 \times 10^5 \Omega \text{ cm}^{-1}$$

Cette résistance est encore plus faible que celle du liquide. Si on la compare avec celle de la glace en période de fonte on a une diminution de $[(29 - 1,24)/29] 100 = 95,7\%$.

C'est un pourcentage de diminution moindre que celui trouvé en (b) mais la valeur est plus basse dans ce cas, ce qui explique pourquoi on a trouvé que le contournement se produit presque toujours au moment de l'augmentation de la température ambiante et sous l'effet des rayons solaires [5], [6].

A l'aide de ces calculs nous pouvons maintenant expliquer le fait que Mikio Kawai [5] a observé des contournements avec la glace "mouillée" dans une condition mixte de glace et de brume sans un amorçage par les rayons solaires ni une augmentation de la température ambiante telle que citée au début du chapitre III. En effet, nous sommes dans le cas (b) précédent: une forte diminution de la résistance de la glace causée par la couche de liquide à la surface de la glace a pour effet d'augmenter la tension de décharge et par conséquent de causer un allongement obligatoire de la décharge.

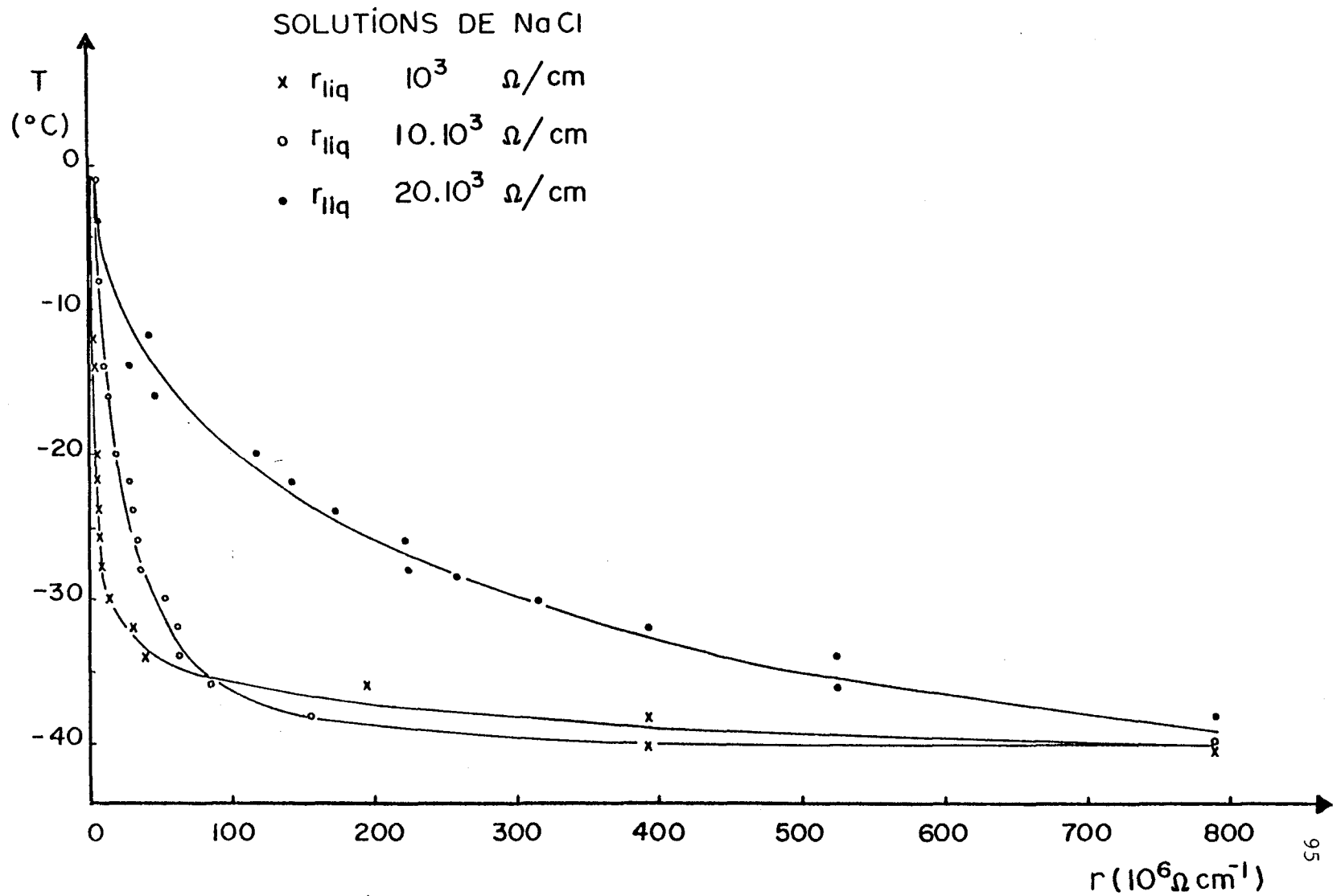


FIG. 4.3 TEMPÉRATURE DE LA GLACE EN FONCTION DE SA RÉSISTANCE

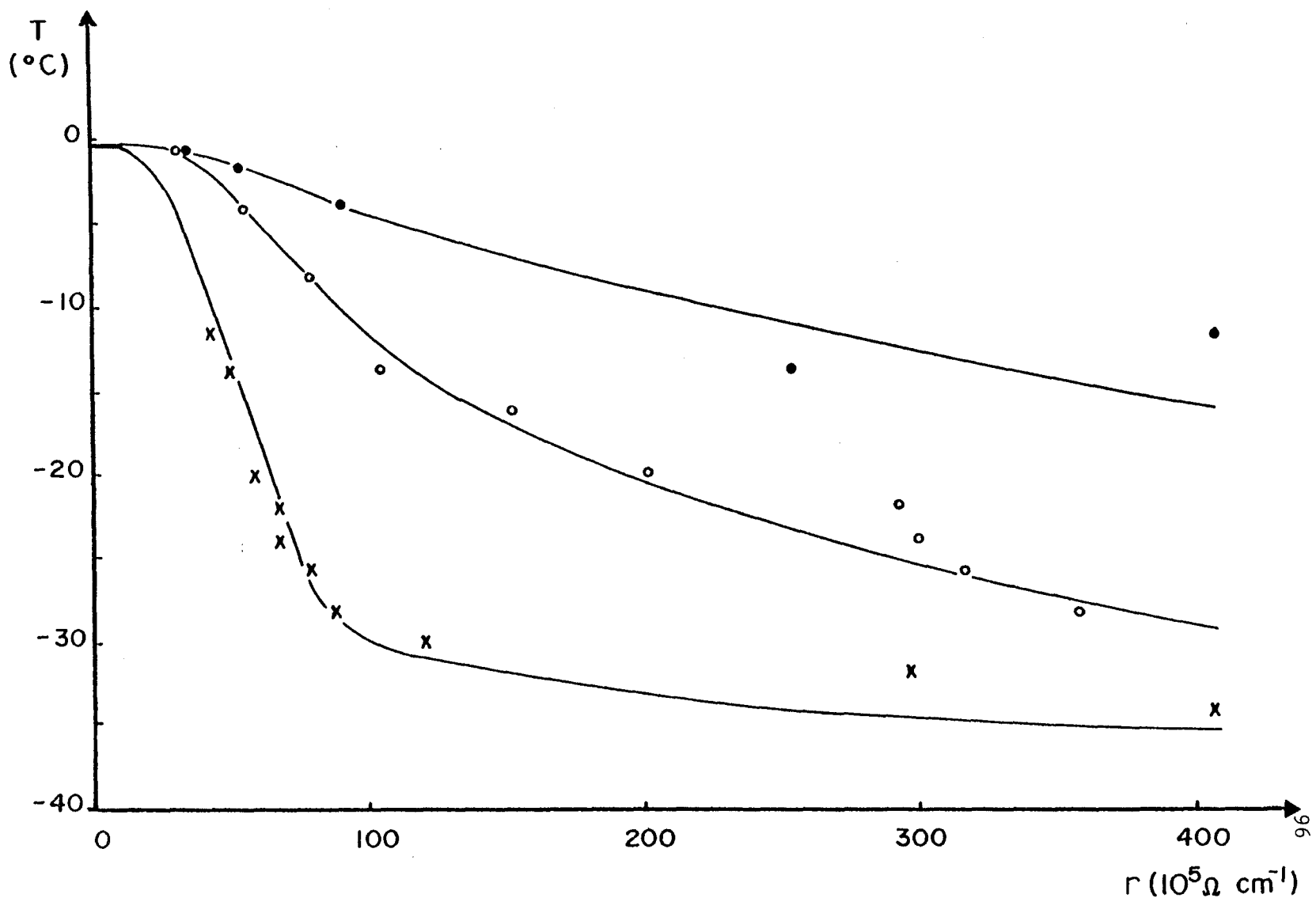


FIG. 4.4 TEMPÉRATURE DE LA GLACE EN FONCTION DE SA RÉSISTANCE (PETITE VALEUR DE r)

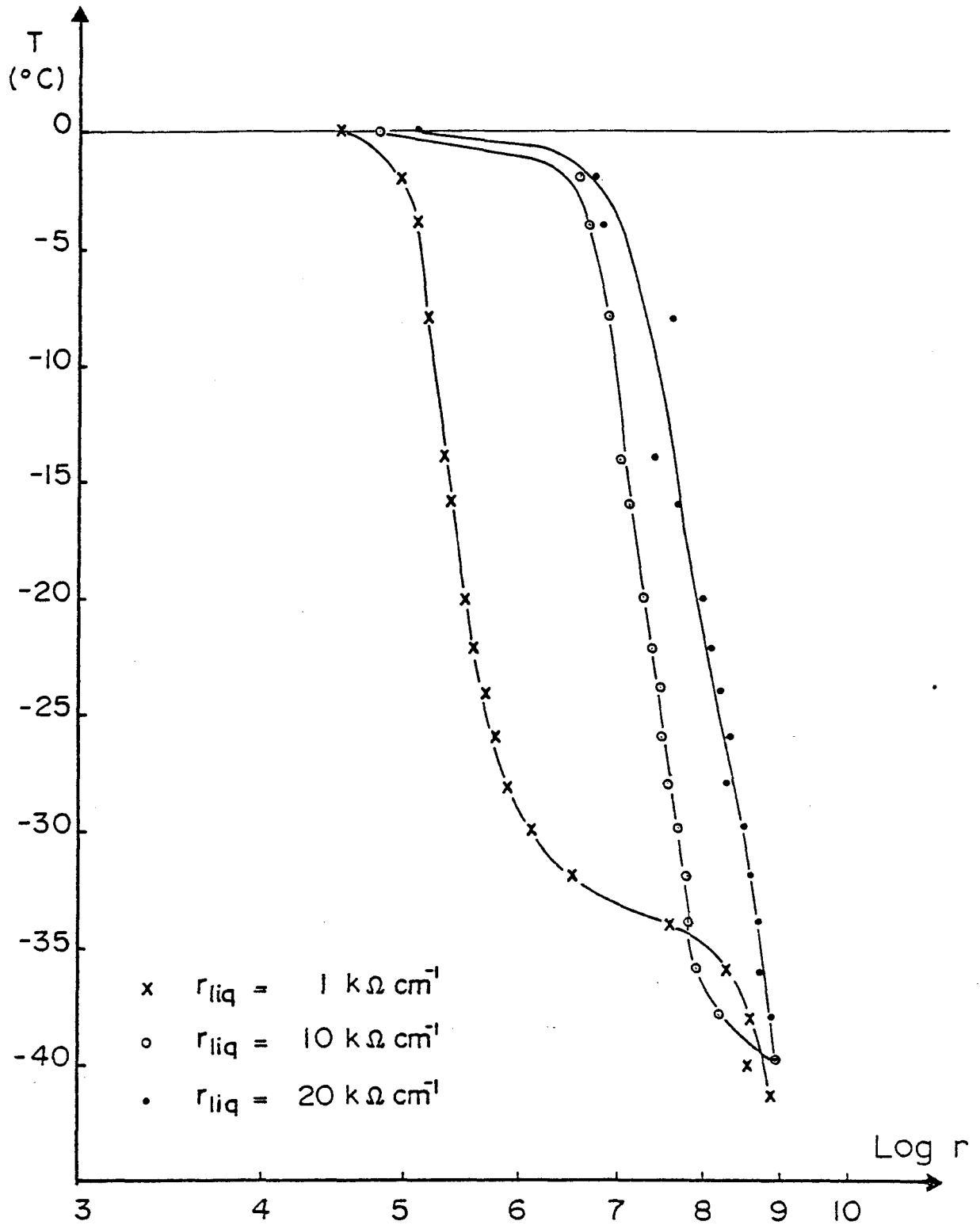


FIG. 4.5 TEMPÉRATURE DE LA GLACE EN FONCTION DE LOG(r)

4.3.2 Calcul de la diminution de la tension de contournement

Au sujet de la diminution de la tension de contournement correspondant à la diminution de la résistance de la glace, nous avons obtenu les résultats avec 2 restrictions suivantes:

1^e) Comme déjà mentionné au chapitre III, à cause de la limite de tension fournie par la source, nous sommes obligés d'utiliser une solution de $1 \text{ k}\Omega \text{ cm}^{-1}$ pour réaliser les contournements sur glace couverte d'une couche d'eau, donc ce n'est pas le même cas que 4.3.1.

2^e) Pour obtenir une tension de contournement sur la glace "sèche" avant d'obtenir une tension de contournement sur la glace "humide", nous sommes obligés de baisser la température pendant les mesures, autrement dit la glace est en régime de congélation et non pas en régime de fonte.

Pour déterminer le pourcentage de diminution de la résistance et celui de la tension de contournement correspondant, nous pouvons prendre une température arbitraire de -10°C par exemple. Du tableau 4.1 nous avons, en période de congélation:

$$r_1(0^{\circ}\text{C}) = 0,35 \cdot 10^5 \Omega \text{ cm}^{-1}$$

$$r_1(-10^{\circ}\text{C}) = 1,81 \cdot 10^5 \Omega \text{ cm}^{-1}$$

Quand cette glace est couverte d'une couche de liquide de $r_1 = 0,35 \cdot 10^5 \Omega \text{ cm}^{-1}$ la résistance équivalente sera:

$$r = \frac{(1,81 \times 0,35) 10^{10}}{(1,81 + 0,35) 10^5} = 0,293 \cdot 10^5 \Omega \text{ cm}^{-1}$$

donc une diminution de:

$$[(1,81 - 0,293)/1,81] \cdot 100 = 83,8\%$$

De la figure 3.4, pour la polarité positive, une diminution correspondante de la tension de contournement peut être calculée qui est: $(2 \div 16) \cdot 100 = 12,5\%$.

De la figure 3.5, pour la polarité négative, cette diminution est de: $(3 \div 15) \cdot 100 = 20\%$.

4.4 DISCUSSION DES RESULTATS

(a) Au tableau 4.1 nous avons observé que, pour les 2 régimes de congélation et de fonte, seulement la résistance de la glace formée par le liquide de résistivité $\geq 20 \text{ k}\Omega \text{ cm}$ (r_3) suit la forme d'hystérésis de la courbe montrée à la figure 4.2. Les autres glaces formées par les liquides de résistivité plus faible ne le font pas.

Quand une solution est congelée ce sont les molécules des composantes dont le point de congélation est le plus haut qui gèlent en premier. Dans notre cas, ce sont les molécules d'eau qui gèlent avant celles du chlorure de sodium. Il y a donc un effet de "rejet d'impureté" à la surface de la solution: plus la solution contient d'impureté (NaCl) plus cet effet est impor-

tant, ce qui perturbe la mesure de la résistance électrique de la glace car la solution n'est plus homogène. Ainsi la conclusion voulant que, quand on passe du régime de congélation au régime de fonte, la résistance électrique de la glace diminue de 32% à 48%, tel que montré à la section 4.3.1, est bonne seulement pour la glace formée par un liquide de résistivité $\geq 20 \text{ k}\Omega \text{ cm}$.

Il a été mentionné à la fin du chapitre III que la résistivité de l'eau obtenue de la fonte de la glace ou de la neige naturelle dans la plupart des régions d'Amérique du Nord se situe entre 27 et 53 $\text{k}\Omega \text{ cm}$ [7] et au Japon entre 50 et 200 $\text{k}\Omega \text{ cm}$ [10 et 11]. On peut appliquer ces données dans la pratique, excepté pour des régions fortement polluées.

(b) La résistance équivalente d'une couche de glace en parallèle avec une couche de liquide dépend de la résistance de ces 2 couches. Il est évident que si l'épaisseur de ces 2 couches change, la résistance totale change en conséquence. Notre calcul montré à la section 4.3.1 a été basé sur les résistances linéiques du liquide et de la glace, il nous donne donc une idée générale sur la diminution de la résistance totale quand la glace est couverte d'une couche de liquide, il ne nous donne pas un pourcentage réel pour tous les cas.

4.5 COMPARAISON ET ANALYSE DES RESULTATS TROUVES SUR ISOLATEURS REELS ET SUR MODELE LINEAIRE

Au chapitre III nous avons montré qu'une augmentation de la température ambiante amorce le déplacement de la décharge sur la surface de la glace pour devenir un arc de contournement.

Au début de ce chapitre (IV) nous avons aussi calculé le pourcentage de diminution de la résistance de la glace correspondant aux augmentations de la température et celui de la diminution de la tension de contournement quand la glace (en régime de congélation) est couverte d'une couche de liquide.

Maintenant nous pouvons comparer ces résultats avec ceux trouvés antérieurement sur les isolateurs réels et en même temps vérifier ces derniers tout en suivant l'ordre de présentation suivi au chapitre I.

(1) La conclusion (e) de Khalifa et Morris voulant que la performance d'une chaîne double d'isolateurs en suspension est inférieure à celle d'une chaîne simple et la conclusion semblable (f) de Renner, Hill et Ratz sont facilement acceptables. En effet, avec 2 chaînes d'isolateurs verglacés en parallèle, si la résistivité de la glace diminue la résistance totale équivalente sera plus faible que la plus faible des deux, tel que nous l'avons montré à la section 4.3.1, donc plus facile à contourner.

(2) L'analyse faite par Hara et Phan [3] montre que le courant de fuite, pendant le développement de l'arc de contournement, a une composante de base qui est constante. Ce résultat montre que dans les expériences réalisées par ces auteurs, la tension de contournement est approximativement égale à celle appliquée et le contournement s'est produit juste au moment opportun (à l'instant même où les conditions favorables viennent d'être atteintes).

Par contre, Khalifa et Morris ont conclu dans leur conclusion (a) que pendant ce temps le courant de fuite augmente. Il est probable que leurs conditions d'expériences ont favorisé une trop grande diminution de la résistance de la glace pendant un court intervalle de temps, ce qui résulte en une augmentation du courant. Dans ce cas le contournement s'est produit un peu tôt et si c'est le cas la tension de contournement doit être plus basse que celle appliquée.

(3) Phan et Matsuo [4] ont confirmé que si la glace est couverte d'une couche d'eau (causée par les décharges dues à la tension appliquée pendant la formation de la glace), la tension de contournement en tension alternative diminue de 13% comparée à la glace sèche. Avec le modèle linéaire et la glace à -10°C , nous avons trouvé une diminution de 12,5% pour la polarité positive et de 20% pour la polarité négative.

(4) Lee, Nellis et Brown ont montré dans leur conclusion (b) que

la tension de contournement obtenue avec une chaîne d'isolateurs en position verticale est 20% plus basse que celle obtenue avec la même chaîne en position horizontale. Nous remarquons que ce pourcentage se situe dans la gamme des pourcentages ci-haut mentionnée.

Avec la position verticale des isolateurs, l'eau, une fois créée par décharge ou par effet des rayons solaires, coule à la surface de la glace pour former une couche sur toute la surface reliant la haute et la basse tension, c'est donc une glace couverte d'une couche de liquide. La diminution de la tension de contournement dans ce cas a été montrée à la section 4.3.2.

(5) Les conclusions (d) de Hara et Phan, (e) de Phan et Matuso, (b) et (c) de Kawai, (a) et (b) de Schneider, (c) et (f) de Renner, Hill et Ratz, (d) et (e) de Watanabe et (c) de Meier et Niggli sont les résultats de la diminution de la résistance de la glace, soit dû au régime de fonte, soit dû à l'augmentation de l'épaisseur de la glace, tel que montré au chapitre III.

(6) Les conclusions (c) de Phan et Matsuo, (b) de Kawai, (c) de Schneider, (e) et (g) de Renner, Hill et Ratz et (a), (b) et (c) de Lee, Nellis et Brown sont les résultats de la présence d'une couche de liquide à la surface de la glace.

Nous voyons que tous les résultats trouvés antérieurement (excepté ceux trouvés sur les différents types d'isolateurs, qui

sont dus à la forme géométrique de ces isolateurs) peuvent être vérifiés de façon générale par les résultats trouvés sur le modèle linéaire et peuvent être ramenés à 2 causes principales: la diminution de la résistance de la glace en régime de fonte et l'effet de la présence d'une couche de liquide à la surface de la glace.

CONCLUSION

CONCLUSION

Nous avons, dans ce mémoire, rendu compte de notre contribution à l'étude du mécanisme de développement de la décharge à la surface de la glace sous l'influence des changements de température. En résumé, nous sommes arrivés avec le modèle linéaire, aux résultats suivants:

1. L'augmentation de la température ambiante cause une diminution de la résistance de la glace (en régime de fonte), c'est un facteur important dans le mécanisme de déplacement de la décharge sur la surface de la glace conductrice.
2. Avec la glace formée par un liquide de faible conductivité ($\rho \geq 20 \text{ k}\Omega \text{ cm}$), du régime de congélation au régime de fonte la résistivité diminue de 32% à 48%.
3. La couche de liquide qui couvre la surface de la glace est le facteur primordial qui suscite le déplacement de la décharge sur la surface de la glace. La diminution de résistance dans ce cas est beaucoup plus importante que celle du cas (1).
4. En régime de congélation si la glace est couverte d'une couche de liquide provenant de cette même glace fondue sa résistivité diminue approximativement de 97% de sa valeur initiale.
5. En régime de fonte si la glace est couverte d'une couche de liquide provenant de cette même glace fondue, sa résistivité di-

minue d'environ 95% de sa valeur initiale. C'est le cas le plus vulnérable au contournement car la résistance de la glace subit 2 diminutions (régime de fonte et couche de liquide).

6. En régime de congélation, avec la glace à -10°C et couverte d'une couche de liquide, la tension de contournement diminue de 12,5% à 20% dépendamment de la polarité appliquée à l'électrode H.T.

Dans la pratique on observe toujours des contournements quand il fait chaud et sous l'influence des rayons solaires (cas 5). Le temps chaud fait diminuer la résistance de la glace de 32% à 48% et le rayonnement solaire fait fondre la glace créant une couche de liquide à sa surface. On observe aussi dans la pratique des contournements sur des isolateurs verglacés qui ne sont pas exposés à une atmosphère chaude mais qui sont couverts d'une couche d'eau [5]. C'est la deuxième possibilité de contournement car, bien que la résistance totale de la glace soit légèrement supérieure à celle du cas 5, il y a une chute importante (97%) de cette résistance (cas 4).

A partir de ces résultats obtenus sur le modèle, nous pouvons déduire les conclusions suivantes:

(a) Si une chaîne d'isolateurs verglacés est suspendue verticalement quand il y a une décharge partielle, l'eau provenant de la fonte de la glace s'écoule le long des isolateurs créant ainsi

une couche de liquide à la surface de la glace. Dans ce cas, on a une probabilité très élevée de contournement.

(b) Si une chaîne d'isolateurs verglacés est en position horizontale, quand il y a une décharge partielle, l'eau provenant de la fonte de la glace s'écoule autour d'un seul isolateur, elle ne peut pas former une couche reliant la haute et la basse tension, évitant ainsi un contournement. C'est pour cette raison que la plupart des chercheurs ont trouvé que la performance d'une chaîne d'isolateurs verglacés en position horizontale est meilleure que celle d'une chaîne en position verticale. Il est à noter que cette remarque est valable seulement si la température ambiante est relativement basse ou s'il n'y a pas de radiation solaire intense. Autrement, il pourra se créer en même temps une couche de liquide sur toute la surface de la glace et la position horizontale perd son avantage.

(c) La position en V des chaînes d'isolateurs verglacés est la position intermédiaire entre la verticale et l'horizontale, sa performance est aussi intermédiaire.

La comparaison des résultats obtenus sur le modèle avec ceux obtenus sur les isolateurs réels présentée à la fin du chapitre IV se fait de façon très satisfaisante, ce qui devrait servir de validation au modèle. Ainsi, il a été montré que le modèle proposé est un outil fiable pour l'étude de la performance des isolateurs verglacés dans différentes conditions atmosphériques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M.M. KHALIFA et R.M. MORRIS
Performance of Line Insulators Under Rime Ice. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-86, No 6, Juin 1967, pp. 692-698.
- [2] E.A. CHERNEY
Flashover Performance of Artificially Contaminated and Iced Long-Rod Transmission Line Insulators. IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-99, No 1, Jan/Fév. 1980, pp. 46-52.
- [3] M. HARA et L.C. PHAN
Leakage Current and Flashover Performance of Iced Insulators. IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-98, No 3, May/Juin 1979, pp. 849-859.
- [4] L.C. PHAN et H. MATSUO
Minimum Flashover Voltage of Iced Insulators. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI 18, No 6, Dec. 1983, pp. 605-617.
- [5] M. KAWAI
AC Flashover Test at Project UHV on Ice-Coated Insulators. IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-89, Dec. 1970, pp. 1800-1805.

- [6] H.M. SCHNEIDER
Artificial Ice Tests on Transmission Line Insulators - A
Progress Report. IEEE paper No A75 491-1 PES Summer Meet-
ing, San Francisco, Juillet 1975.
- [7] P.E. RENNER, H.L. HILL et O. RATZ
Effect of Icing on DC Insulation Strength. IEEE Transac-
tions on PAS, Vol. PAS-90, Juin 1971, pp. 1201-1206.
- [8] L.Y. LEE, C.L. NELLIS et J.E. BROWN
60 Hz Tests on Ice Coated 500 kV Insulator Strings. IEEE
paper No A75 499-4, PES Summer Meeting, San Francisco,
Juillet 1975.
- [9] M.D. CHARNESKI, G.L. GAIBROIS et B.F. WHITNEY
Flashover Tests of Artificially Iced Insulators. IEEE
Transactions on PAS, Vol. PAS-101, No 8, Août 1982, pp.
2429-2433.
- [10] T. FUJIMURA, K. NAITO, Y. HASEGAWA et T. KAWAGUCHI
Performance of Insulators Covered with Snow or Ice. IEEE
Transactions on PAS, Vol. PAS-98, No 5, Sept/Oct. 1979,
pp. 1621-1631.
- [11] Y. WATANABE
Flashover Tests of Insulators Covered with Ice or Snow.
IEEE paper No F77 570-5, PES Summer Meeting, Mexico City,
Juillet 1977.

- [12] A. MEIER et W.M. NIGGLI
The Influence of Snow and Ice Deposits on Supertension
Transmission Line Insulator Strings with Special Reference
to High Altitude Operation. IEE Conference. Pub. 44, Lon-
don England, Sept. 1968, pp. 386-395.
- [13] B.F. HAMPTON
Flashover Mechanism of Polluted Insulation. Proceedings IEE,
Vol. III, No 5, Mai 1964, pp. 985-990.
- [14] J.C. LABADIE
Etude de la validité du modèle électrique du contournement
des isolateurs haute tension pollués. Thèse de docteur de
3e cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, Mai
1977.
- [15] D.C. JOLLY
Physical Processes in the Flashover of Insulators with
Contaminated Surfaces. Thèse Ph.D. M.I.T., Cambridge,
Massachusetts U.S.A., Mai 1971.
- [16] L.L. ALSTON et S. ZOLEDZIOWSKI
Growth of Discharges on Polluted Insulation. Proceedings
IEE, Vol. 110, No 7, Juillet 1963, pp. 1260-1266.

- [17] W. PLUEKSAWAN
Etude de la dégradation d'une surface isolante sous l'influence d'une décharge électrique superficielle. Thèse Docteur Ingénieur. Université Paul Sabatier, Toulouse, France, Oct. 1982.
- [18] J.M. MEEK et J.D. CRAGGS editors
Electrical Breakdown of Gases. John Wiley & Sons, 1978.
- [19] N.G. TRINH
A Systematic Study of Corona Discharges in Air at Atmospheric Pressure. Thèse de doctorat ès Sciences, Université Laval, 1968.
- [20] G. PEYREGNE
Etude en régime dynamique du contournement par décharges de surfaces isolantes rendues faiblement conductrices. Thèse Docteur Ingénieur, Université Paul Sabatier, 1981.
- [21] M.A. IZZULARAB
Etude des paramètres géométriques du profil d'un isolateur H.T. en vue d'améliorer sa tenue au contournement en milieu pollué. Thèse Docteur Ingénieur, Université Paul Sabatier, 1983.
- [22] H.T. BUI, L.C. PHAN, C. HURAUX et J. PISSOLATO
HVDC Flashover on the Surface of Conductive Ice. Proceedings, 1984 IEEE International Symposium on Electrical Insulation 84CH 1964-6-EI, pp. 85-88.

- [23] T.C. CHENG et C.T. WU
Performance of HVDC Insulators Under Contaminated Conditions. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. E.I. 15, No 3, June 1980, pp. 270-286.
- [24] A.M. RAHAL et C. HURAUX
Flashover Mechanism of High Voltage Insulators. IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol. PAS-98, No 6, Nov/Dec. 1979, pp. 2223-2231.
- [25] G. PEYREGNE, A.M. RAHAL et C. HURAUX
Flashover of a Liquid Conducting Film. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI 17, No 1, Feb. 1982, pp. 10-19.
- [26] D.C. JOLY, T.C. CHENG et D.M. OTTEN
Dynamic Theory of Discharge Growth over Contaminated Insulator Surfaces. Paper No C74 068-3, IEEE PES Winter Meeting, New York, N.Y. Jan. 27-Feb. 1, 1974.
- [27] D.C. JOLY
Contamination Flashover, part I & II, Paper No T72 199-3. IEEE PES Winter Meeting, New York, N.Y. Jan. 30-Feb. 4, 1972.

- [28] R. WILKINS et A.A.J. Al-BAGHDADI
Arc Propagation along an Electrolyte Surface. Paper 6564S,
Proceedings IEE, Vol. 118, No 12, Dec. 1971, pp. 1886-1892.
- [29] R. WILKINS
Flashover Voltage of High-Voltage Insulators with Uniform
Surface - Pollution Films. Proceedings IEE, Vol. 116, No 3,
March 1969, pp. 457-465.
- [30] H. MATSUO, Y. YUNOKI, T. OSHIGE et N. MITA
Impulse Discharge on Contaminated Surface. Electrical Engi-
neering in Japan, Vol. 89, No 9, 1969, pp. 26-34.
- [31] F.A.M. RISK
Mathematical Models for Pollution Flashover. Technical paper.
Electra No 78, pp. 75-91.