

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

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

PAR  
HATIM AKKAL

**ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES ANNEAUX DE GARDE SUR  
LES PERFORMANCES ÉLECTRIQUES DES ISOLATEURS  
DE POSTE T.H.T. RECOUVERTS DE GLACE**

SEPTEMBRE 2012

## RÉSUMÉ

L'objectif de cette recherche est de conduire une étude à la fois expérimentale et numérique sur l'utilisation et l'optimisation d'anneaux de garde équipant une colonne isolante standard constituée de deux isolateurs de poste sous conditions de glace sévères. Le choix s'est porté sur une colonne isolante standard du fait qu'elles sont les plus vulnérables en termes de contournement sous conditions de glace sévères. Au meilleur de nos connaissances, très peu de recherches ont étudié l'influence des anneaux de garde sous conditions propre et encore moins sous conditions de glace.

Dans un premier temps, une étude paramétrique basée sur l'utilisation des éléments finis a permis de démontrer que l'optimisation de l'uniformité de la distribution de potentiel le long de la colonne isolante est réalisé en n'utilisant qu'un seul anneau placé sur l'électrode H.T. dont la dimension et la position sont optimisées. Les résultats numériques et expérimentaux réalisés avec un seul anneau de garde standard sur l'électrode H.T. ont aussi démontré qu'une distribution plus uniforme de potentiel résulte en une distribution plus uniforme de glace le long de l'isolateur mais que cette uniformisation ne permet pas d'améliorer la tension de tenue de l'isolateur de poste sous conditions de glace sévères (15 mm d'épaisseur de glace radiale). Par conséquent, une meilleure uniformisation du dépôt de glace (moins d'intervalles d'air) résultant de l'utilisation d'anneaux de garde de forme standard ou optimisée n'est donc pas un gage d'amélioration des performances électriques sous glace d'une colonne isolante standard.

L'analyse des résultats issus de l'étude paramétrique a permis de démontrer qu'il existe un diamètre à partir duquel une séparation des lignes equipotentielles se produit, résultant en une dégradation de l'uniformité du potentiel au voisinage de la surface de la colonne isolante. Cette constatation ainsi que la solution apportée pour remédier à ce problème ont permis de proposer une utilisation originale des anneaux de gardes sous des conditions de glace. La solution consiste à relier électriquement le périmètre de l'anneau de garde à celui de l'électrode à l'aide d'un grillage métallique qui a pour autre fonction de protéger une partie de l'isolateur contre l'accumulation de glace, créant des intervalles d'air de grande dimension. L'anneau ainsi modifié se comporte donc comme une jupe auxiliaire sous condition de glace sévère mais avec une meilleure uniformisation de la distribution de potentiel sous conditions normales d'utilisation. Les résultats expérimentaux effectués avec deux anneaux de garde modifiés sur une colonne isolante ont montré une amélioration de 15% de la tension de tenue sous une accumulation de glace de 15mm d'épaisseur radiale par rapport à une colonne standard seule. Ce résultat obtenu est supérieur à celui obtenu avec les jupes auxiliaires sous des conditions identiques d'accumulation, ce qui démontre tout le potentiel de la solution proposée.

## ABSTRACT

The aim of this research is to carry out a study both experimental and numerical related to the use and optimization of the grading rings fitted on an insulating column consists of two standard post insulators under severe ice conditions. Our choice of a standard insulating column is motivated by the fact that this type of columns is most vulnerable in terms of flashover under severe ice conditions. Besides, to the best of our knowledge, very few studies have as yet handled the impact of grading rings under normal conditions, let aside under conditions of ice.

In the first place, a parametric study based on finite elements demonstrated that the optimization of the uniformity the potential distribution along the insulating column is achieved using only one ring placed on the HV electrode whose dimension and position are optimized. The ensuing numerical and experimental result is that a more uniform distribution of potential engenders a more uniform distribution of ice along the insulator. However, such standardization process does not allow the improvement the withstand voltage of the post insulator under severe conditions of ice (radial ice 15 mm thick). It follows that a better standardization of the ice deposit (settlement) (fewer air gaps) resulting from the use of standard or optimized grading rings is by no means a guarantee that the ice-covered electric performance of a standard insulating column will be improved.

The analysis of the results the parametric study came to has permitted the demonstration that there exists a diameter on the basis of which a separation of equipotential lines takes place resulting in a degradation of the potential uniformity in the vicinity of the area of the insulating column. This observation, together with the solution put forth to settle this problem, has led us to suggest an original use of the grading rings under icy conditions. The solution consists in electrically linking the perimeter of the grading ring to the electrode with a metal grating which will, at the same time, protect a part of the insulator against ice accumulation, hence creating larger air intervals. The modified ring will thus stand as an booster shed in severe ice conditions; however though, it represents a better standardization of the potential distribution under normal conditions of use. The results of the experiments conducted with two modified grading rings fitted on an insulating column have shown a 15% improvement of the withstand voltage in 15 mm thick nice in comparison with a standard column. The result achieved is higher (better) than the one archived using booster shed in identical conditions of ice accumulation, which evidences the potential of the suggested solution.

## **Remerciements**

Mes sincères remerciements vont à toutes les personnes qui ont participées de près ou de loin à la réalisation de ce travail de recherche.

En particulier, je tiens à remercier profondément mon directeur de recherche Mr Christophe Volat, professeur chercheur à l'université du Québec à Chicoutimi, pour la qualité de son encadrement, ses précieux conseils, ainsi que le soutien financier qu'il n'a cessé de m'apporter pour la réalisation de ce travail.

Je remercie également mon co-directeur de recherche, Mr Massoud Farzaneh, professeur chercheur et titulaire de la chaire industrielle CRSNG / Hydro-Québec / UQAC sur le givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques (CIGELE), pour ses conseils et son appui financier lors de la co-supervision de ce travail.

Je voudrais aussi remercier Mr Issouf Fofana, professeur-chercheur et titulaire de la chaire de recherche du Canada sur les isolants liquides et mixtes en électrotechnologie (ISOLIME) à l'université du Québec à Chicoutimi, pour son encouragement et son assistance durant mes études. De même, je tiens à remercier Mr Olivier Balima, professeur associé à l'université du Québec à Chicoutimi, pour sa collaboration et ses judicieux conseils en ce qui à trait aux travaux d'optimisation.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au Laboratoire de la CIGELE. À cet effet, je remercie l'équipe de recherche de la CIGELE, en particulier Mr Claude Damours et Mr Pierre Camirand, techniciens à la CIGELE pour leur aide et assistance durant la réalisation des tests expérimentaux.

Enfin, il m'est agréable d'exprimer mes chaleureux remerciements à mes parents, mon épouse, mes frères et ma sœur pour leur encouragement et leur soutien tout au long de mon cursus universitaire.

## Tables des matières

<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>IV</b>
<b>TABLES DES MATIERES .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS ET DES SYMBOLES.....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>XII</b>
<b>CHAPITRE : 1 INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>    1.1. . Problématique.....</b>	<b>1</b>
<b>    1.2. . Objectifs et méthodologie de la recherche .....</b>	<b>6</b>
1.2.1. Objectifs.....	6
1.2.2. Méthodologie .....	7
1.2.2.1. Détermination de la tension de tenue maximale sous condition de glace sévère d'une colonne isolante standard équipée d'un anneau de garde standard.....	8
1.2.2.2. Calcul des distributions du potentiel et du champ électrique avec un anneau de garde.....	8
1.2.2.3. Études paramétriques relatives à l'utilisation des anneaux de garde .....	9
1.2.2.4. Analyse des résultats et proposition de solutions d'amélioration .....	11
1.3. . Originalité de la recherche.....	11
1.4. . Structure du mémoire.....	12
<b>CHAPITRE 2: REVUE DE LITTÉRATURE.....</b>	<b>14</b>
2.1. . Processus de formation des dépôts de glace sur les isolateurs de poste.....	14
2.2. . Influence des intervalles d'air sur la tenue diélectrique des isolateurs de poste standard en période de fonte.....	17
2.3. . Définition et utilisation des anneaux de garde pour les isolateurs.....	25
2.3.1. Présentation générale des anneaux de garde .....	25
2.3.2. Fonctionnalité des anneaux de garde.....	26
2.4. . Utilisation des anneaux de garde sous différentes conditions atmosphériques.....	27
2.5. . Optimisation des anneaux de garde .....	31
2.6. . Conclusion .....	34
<b>CHAPITRE 3 : PROCÉDURES ET TESTS EXPÉRIMENTAUX.....</b>	<b>36</b>
3.1. . Équipements.....	37
3.1.1. Isolateur testé.....	37
3.1.2. Anneau de garde .....	39
3.1.3. Chambre climatique .....	40
3.1.4. Générateur de gouttelettes d'eau .....	41
3.1.5. Système de refroidissement.....	42
3.1.6. Système haute tension .....	42
3.1.7. Système d'acquisition de données .....	43
3.2. . Protocole de test .....	44
3.2.1. Séquence d'accumulation .....	44
3.2.2. Séquence de refroidissement.....	48

3.2.3. Séquence de fonte.....	48
3.2.4. Séquence d'évaluation .....	49
<b>CHAPITRE 4 : ÉTUDE NUMÉRIQUE DE L'INFLUENCE DU NOMBRE D'ANNEAUX DE GARDE SUR LES DISTRIBUTIONS DU POTENTIEL ET DU CHAMP ÉLECTRIQUE D'UNE COLONNE ISOLANTE EN DÉBUT DE PÉRIODE D'ACCUMULATION .....</b>	<b>51</b>
4.1. . Modélisation du début de la période d'accumulation.....	51
4.2. . Étude avec un anneau de garde sur l'électrode H.T .....	56
4.3. . Étude avec deux anneaux de garde.....	59
4.4. . Étude avec trois anneaux de garde .....	64
4.5. . Discussion des résultats .....	66
<b>CHAPITRE 5 : ÉTUDE PARAMÉTRIQUE ET ESSAIS EXPÉRIMENTAUX AVEC UN ANNEAU DE GARDE SUR L'ÉLECTRODE H.T .....</b>	<b>68</b>
5.1. . Présentation de l'algorithme développé.....	70
5.2. . Application à un anneau de garde sur l'électrode H.T.....	72
5.3. . Comparaison des résultats numériques avec et sans glaçons .....	80
5.4. . Validation expérimentale avec un anneau de garde standard .....	82
5.5. . Discussion des résultats .....	85
<b>CHAPITRE 6 : PROPOSITIONS DE MODIFICATION ET D'UTILISATION DES ANNEAUX DE GARDE SOUS CONDITIONS DE GLACE SÉVÈRE .....</b>	<b>88</b>
6.1. . Solution avec un seul anneau de garde modifié.....	89
6.2. . Amélioration avec deux anneaux de garde modifiés.....	94
6.1. . Discussion des résultats obtenus .....	99
<b>CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS SUR LES TRAVAUX À VENIR.....</b>	<b>102</b>
7.1. . Conclusions.....	102
7.2. . Recommandations.....	107
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>109</b>

## Liste des abréviations et des symboles

H.T.	Haute tension
T.H.T.	Très haute tension
2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel
CIGELE	Chaire industrielle sur le givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques
MEF	Méthode des éléments finis
MEFF	Méthode des Éléments Finis de Frontière
UQAC	Université du Québec à Chicoutimi
<i>R</i>	Rayon de l'anneau de garde
<i>d</i>	Diamètre du tube de l'anneau de garde
<i>H</i>	Position de l'anneau par rapport à l'électrode
<i>V<sub>TM</sub></i>	Tension de tenue maximale
$\epsilon_r$	Permittivité relative
<i>V<sub>b</sub></i>	Tension de claquage
<i>x</i>	Longueur de l'intervalle d'air
rms	valeur efficace

## Liste des figures

<b>Figure 1 :</b> Aspect général d'une accumulation de glace réalisée en régime humide sur un isolateur de poste standard [10].....	14
<b>Figure 2 :</b> Distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur de poste standard en porcelaine [10].....	16
<b>Figure 3 :</b> Distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur de poste standard en porcelaine après 5 minutes d'accumulation de glace [10].....	17
<b>Figure 4 :</b> Géométrie d'un dépôt de glace obtenue à la fin de la période d'accumulation sur un isolateur de poste standard avec présence de trois intervalles d'air.....	18
<b>Figure 5 :</b> Distributions du potentiel le long d'un isolateur de poste propre et recouvert de glace [10]. .....	19
<b>Figure 6 :</b> Distributions du potentiel le long d'un isolateur de poste recouvert de glace en fonction de la conductivité du film d'eau en période de fonte [12].....	20
<b>Figure 7 :</b> Arcs électriques partiels établis le long des intervalles d'air présents à la surface d'un isolateur de poste recouvert de glace [10]. .....	20
<b>Figure 8 :</b> Illustration d'un isolateur triple alternance propre (a) et recouvert de glace (b) et comparaison avec un isolateur standard recouvert de glace (c) sous les mêmes conditions expérimentales [14]. .....	22
<b>Figure 9 :</b> Illustration d'une jupe auxiliaire (a) et de son installation sur les isolateurs de poste (b) et de leur influence sur la géométrie du dépôt de glace (c) [15].....	23
<b>Figure 10 :</b> Exemples de géométries d'anneaux de garde [25].....	25
<b>Figure 11 :</b> Exemples d'utilisation des anneaux de garde sur un isolateur de poste (a) et un isolateur de ligne en composite (b) [26]. .....	25
<b>Figure 12 :</b> Isolateurs semi-conducteurs de poste 500 KV, équipés d'anneau de garde dans des conditions de givrage en Virginie [5].....	30
<b>Figure 13 :</b> Exemple de paramétrage de la géométrie d'un anneau de garde utilisé avec un isolateur composite de ligne [22].....	32
<b>Figure 14 :</b> Différentes géométries du tube constituant l'anneau de garde [19].....	34
<b>Figure 15 :</b> Colonne isolante standard en porcelaine (2 unités).....	38
<b>Figure 16 :</b> Colonne isolante équipée d'un anneau de garde ; (a) configuration réelle, (b) configuration testée en laboratoire.....	39
<b>Figure 17 :</b> Paramétrisation de la géométrie de l'anneau de garde.....	40
<b>Figure 18 :</b> Système d'arrosage.....	41
<b>Figure 19 :</b> Transformateur AC (350 kV-700 KVA).....	43
<b>Figure 20 :</b> Interface LabVIEW du système d'acquisition.....	43

<b>Figure 21 :</b> Système de refroidissement de l'eau d'accumulation.....	45
<b>Figure 22 :</b> Mesure de l'épaisseur de la glace accumulée sur les isolateurs par le cylindre témoin .....	46
<b>Figure 23 :</b> Épaisseur de glace mesurée sur le cylindre témoin au cours de la période d'accumulation.....	47
<b>Figure 24 :</b> Aspect visuel de la glace humide accumulée sur une colonne isolante standard constituée de deux unités d'isolateur de poste.....	47
<b>Figure 25 :</b> Évolution de la température de la chambre climatique pendant la période fonte.	49
<b>Figure 26 :</b> Différentes séquences de la procédure expérimentale. ....	50
<b>Figure 27 :</b> Géométrie des glaçons utilisée [10]. .....	53
<b>Figure 28 :</b> Présentation du modèle numérique de la colonne isolante équipée de l'anneau de garde.....	55
<b>Figure 29 :</b> Modélisation des glaçons présents entre les jupes de la colonne isolante. ....	55
<b>Figure 30 :</b> Distribution du potentiel le long de la colonne isolante glacée avec et sans anneau de garde.....	56
<b>Figure 31 :</b> Distribution du champ électrique le long de la colonne isolante glacée avec et sans anneau de garde.....	57
<b>Figure 32 :</b> Chutes de tension obtenue le long de chaque intervalle d'air pour l'unité supérieure de la colonne isolante avec et sans anneau de garde. ....	59
<b>Figure 33 :</b> Présentations des trois configurations étudiées avec deux anneaux de garde....	60
<b>Figure 34 :</b> Comparaison des distributions du potentiel obtenues avec la configuration 1 et avec un seul anneau positionné sur l'électrode H.T. ....	61
<b>Figure 35 :</b> Comparaison des distributions du champ électrique obtenues avec la configuration 1 et avec un seul anneau positionné sur l'électrode H.T. ....	61
<b>Figure 36 :</b> Comparaison des distributions du potentiel obtenues avec la configuration 2 .	62
<b>Figure 37 :</b> Comparaison des distributions du champ électrique obtenues avec la configuration 2. ....	62
<b>Figure 38 :</b> Comparaison des distributions du potentiel obtenues avec la configuration 3..	63
<b>Figure 39 :</b> Comparaison des distributions du champ électrique obtenues avec la configuration 3.....	63
<b>Figure 40 :</b> Distributions du potentiel le long de la colonne isolante équipée de trois anneaux de garde.....	65
<b>Figure 41 :</b> Distributions du champ électrique le long de la colonne isolante équipée de trois anneaux de garde. ....	65
<b>Figure 42 :</b> Distribution de la chute de tension le long de la colonne isolante équipée de trois anneaux de garde.....	66
<b>Figure 43 :</b> Algorithme développé pour l'étude paramétrique avec un anneau de garde sur l'électrode H.T .....	71

<b>Figure 44 :</b> Exemple d'évolution des distributions du potentiel obtenues pour différentes combinaisons des paramètres R et H .....	72
<b>Figure 45 :</b> Comparaison de la distribution de potentiel obtenu avec l'anneau optimisé .....	73
<b>Figure 46 :</b> Comparaison des distributions du champ électrique obtenues avec l'anneau optimisé et l'anneau standard positionné sur l'électrode H.T. ....	74
<b>Figure 47 :</b> Chutes de tension le long des intervalles d'air de l'unité du haut obtenus pour l'anneau de garde optimisé et l'anneau de garde standard positionné sur l'électrode H.T. ....	74
<b>Figure 48 :</b> Répartition des lignes équipotentielles obtenues pour l'anneau de garde optimisé.	
75	
<b>Figure 49 :</b> Distribution des lignes équipotentielles obtenues pour la colonne isolante propre équipée de l'anneau de garde standard. ....	76
<b>Figure 50 :</b> Illustration du lien électrique complet réalisé entre l'électrode H.T. et l'anneau standard. ....	77
<b>Figure 51 :</b> Distribution des lignes équipotentielles obtenues pour la colonne isolante propre avec l'ajout du lien électrique complet entre l'électrode H.T. et l'anneau de garde standard. ....	78
<b>Figure 52 :</b> Comparaison des distributions du champ électrique obtenues pour la colonne isolante propre équipée de l'anneau de garde standard avec et sans lien électrique complet.....	78
<b>Figure 53 :</b> Comparaison des distributions du potentiel obtenues pour la colonne isolante propre équipée de l'anneau de garde optimisé avec et sans lien électrique complet.....	79
<b>Figure 54 :</b> Comparaison des distributions du champ électrique obtenues pour la colonne isolante propre équipée de l'anneau de garde optimisé avec et sans lien électrique complet.....	79
<b>Figure 55 :</b> Distributions du potentiel obtenues avec l'anneau de garde standard pour la colonne isolante avec et sans glaçons. ....	81
<b>Figure 56 :</b> Distributions du champ électrique obtenues avec l'anneau de garde standard pour la colonne isolante avec et sans glaçons. ....	81
<b>Figure 57 :</b> Géométrie du dépôt de glace obtenue en fin d'accumulation pour une colonne isolante sans anneau de garde (a) et équipée d'un anneau de garde (b). ....	83
<b>Figure 58 :</b> Résultats des tests de détermination de la $V_{TM}$ obtenus par la colonne isolante sans anneau de garde pour une épaisseur radiale de glace de 15 mm.....	84
<b>Figure 59 :</b> Résultats des tests de détermination de la $V_{TM}$ obtenus par la colonne isolante équipée d'un anneau de garde standard sur l'électrode H.T. pour une épaisseur radiale de glace de 15 mm. ....	85

<b>Figure 60 :</b> Géométrie du dépôt de glace obtenue pour une accumulation de glace d'épaisseur radiale de 15mm dans le cas d'un anneau de garde équipé d'un grillage métallique fixé à l'électrode H.T. ....	90
<b>Figure 61 :</b> Résultats d'essai sur la colonne isolante équipée d'un anneau de garde standard modifié pour une épaisseur radiale de glace de 15 mm. ....	91
<b>Figure 62 :</b> Répartition des lignes équipotentielles obtenues en période de fonte pour la colonne isolante recouverte de glace équipée d'un anneau de garde modifiée. .	92
<b>Figure 63 :</b> Géométrie du dépôt de glace obtenue pour une épaisseur radiale de glace de 15mm et une conductivité d'eau d'accumulation de $30 \mu\text{S}/\text{cm}$ dans le cas de deux anneaux de garde modifiés fixés respectivement à l'électrode H.T. et flottante. ....	95
<b>Figure 64 :</b> Résultats d'essai sur la colonne isolante avec deux anneaux de garde modifiés pour une épaisseur radiale de glace de 15 mm et une conductivité d'eau d'accumulation de $30 \mu\text{S}/\text{cm}$ . ....	96
<b>Figure 65 :</b> Répartition des lignes équipotentielles obtenue pour la colonne isolante recouverte de glace équipée de deux anneaux de garde modifiés.....	96
<b>Figure 66 :</b> Évolution du courant de fuite au cours d'un essai ayant conduit à une tenue pour une tension appliquée de 315 kVrms. ....	98
<b>Figure 67 :</b> Apparition des arcs électriques partiels le long des deux intervalles d'air au cours de la période de fonte. ....	100

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Paramètres expérimentaux pour la formation de la glace en régime humide...	44
<b>Tableau 2</b> : Paramètres de simulation utilisés en période d'accumulation.....	53
<b>Tableau 3</b> : Paramètres de simulations utilisés en période de fonte .....	91
<b>Tableau 4</b> : Chutes de tension et tensions de claquage des intervalles d'air pour la colonne isolante glacée équipée d'un anneau de garde modifié.....	92
<b>Tableau 5</b> : Chutes de tension et tensions de claquage des intervalles d'air pour la colonne isolante glacée équipée de deux anneaux de garde modifiés.....	97

## CHAPITRE : 1

### INTRODUCTION

#### 1.1. Problématique

Les équipements H.T. présents dans les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique sont supposés opérer de façon fiable quelles que soient les conditions environnementales et météorologiques (tropical, arctique, côtier, atmosphère polluée, etc...) auxquelles ils sont soumis. Cela s'applique tout particulièrement aux isolateurs que l'on trouve en très grand nombre sur les réseaux électriques aériens et dont le rôle est d'assurer l'isolation électrique entre les parties portées à la H.T. ou entre les parties H.T. et les parties mises à la terre. Bien que le prix des isolateurs ne représentent qu'un faible pourcentage du coût total associé à la construction des lignes de transport, la fiabilité de ces derniers sous diverses conditions météorologiques est primordiale afin d'éviter toute interruption intempestive de la distribution en énergie électrique. Depuis plusieurs décennies, l'une des principales cibles des travaux de recherche et de développement dans le domaine de la transmission et de la distribution électrique a été la diminution du nombre et de la durée des interruptions de l'alimentation en énergie électrique des consommateurs dont une grande majorité est attribuable aux contournements des isolateurs qui sont directement exposés aux conditions atmosphériques.

Parmi les conditions atmosphériques auxquelles sont soumis les isolateurs, ce sont les accumulations de glace qui sont les plus dangereuses en terme de contournement électrique

[1-5]. Dans plusieurs régions froides telle que le Québec, les accumulations de glace sur les isolateurs employés dans les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique peuvent entraîner non seulement des dommages mécaniques sur les pylônes et les conducteurs, mais elles peuvent aussi affecter considérablement les performances électriques de ces derniers et entraîner des contournements électriques. Ces derniers se caractérisent principalement par un court-circuit complet de l'isolateur s'établissant entre la partie énergisée et la partie mise à la terre. Les coupures engendrées par les contournements électriques des isolateurs recouverts de glace sont souvent difficiles à identifier car certaines se produisent dans des lieux très éloignés et inhabités. Par conséquent, ceci rend leur observation très aléatoire et difficile. De plus, les interruptions issues de ces contournements surviennent dans la majorité des cas lors de périodes froides où le besoin en énergie électrique est vital.

Les études menées sur les phénomènes de contournement électrique des isolateurs recouverts de glace ont permis de mettre en évidence les paramètres principaux pouvant influencer le contournement de ces derniers [1-13]. Ainsi, les accumulations de glace réalisées en régime humide représentent les conditions les plus dangereuses en terme de contournement électrique, surtout au cours d'une période de réchauffement ou de fonte. En effet, au cours de cette période, un film d'eau conducteur se forme à la surface de la glace et modifie considérablement les distributions du potentiel et du champ électrique le long de l'isolateur recouvert de glace, comme il a été démontré dans plusieurs études antérieures [7-11]. Ceci mène à une augmentation importante de la chute de tension le long des intervalles d'air, les parties de l'isolateur non recouvertes de glace créée au cours de la période d'accumulation, entraînant ainsi la formation de décharges partielles le long de ces derniers

qui sont des les zones de concentration élevée de champ électrique créée par la non linéarité de la distribution du potentiel [8]. Les intervalles d'air ont donc un rôle important dans le processus de contournement des isolateurs recouverts de glace puisqu'ils sont le lieu d'initiation des arcs électriques partiels [7-10]. Si les conditions requises sont présentes, ces arcs électriques partiels peuvent se propager à la surface du dépôt de glace et entraîner le contournement complet de l'isolateur, provoquant ainsi un court-circuit entre l'électrode H.T. et l'électrode de mise à la terre [1, 12].

Au cours de la dernière décennie, les chercheurs et manufacturiers d'équipements d'isolation ont essayé d'améliorer les performances des isolateurs sous conditions de givrage atmosphériques sévères. Un intérêt particulier a cependant été porté sur les isolateurs T.H.T de poste standard en porcelaine puisque plusieurs études expérimentales et observations sur sites ont montré que ces derniers sont les plus vulnérables en terme de contournement lors d'accumulations de glace importantes [1-2]. Cette plus grande vulnérabilité est principalement due au fait que les isolateurs de poste sont soumis à un gradient de tension par unité de distance d'arc plus élevé et une distance inter-jupes plus faible que les isolateurs de ligne. Ainsi, quelques solutions ont été proposées, expérimentées en laboratoire ou encore utilisées sur les sites naturels, comme expliqué plus en détail dans la revue de littérature présentée au chapitre suivant [3, 5, 14-15]. Ces méthodes dites passives ont toutes un point commun, celui d'éviter la formation du pont de glace complet le long de l'isolateur et cela, par la création de plusieurs intervalles d'air artificiels. En effet, la présence de plusieurs intervalles d'air de longueur suffisante permet

d'augmenter la rigidité diélectrique de l'isolateur et par conséquent, d'augmenter la tension de contournement sous condition de glace sévère [3, 5, 8].

Parmi les méthodes proposées et éprouvées sur sites naturels, de nouveaux types d'isolateur de poste ayant une géométrie de jupes spécifiques de type « triple alternance » sont actuellement utilisés. La géométrie spécifique de ces jupes et leur espacement important permet de retarder la formation du pont de glace pour des accumulations de glace importantes [3, 5, 14]. Une autre stratégie proposée et testée en laboratoire vise à ajouter des jupes auxiliaires aux isolateurs de poste dans le but de créer artificiellement des intervalles d'air et inhiber ainsi la formation du pont de glace [5, 14]. De plus, afin d'accroître la rigidité diélectrique des isolateurs « triple alternance » sous conditions de glace sévères, il a été aussi proposé de recouvrir ces derniers d'un revêtement semi-conducteur dans le but d'uniformiser leur distribution du potentiel et du champ électrique qui agissent directement sur la formation des intervalles d'air, tel qu'expliqué précédemment [14].

En effet, d'après certains tests expérimentaux, le fait d'avoir une distribution plus uniforme du potentiel le long de l'isolateur permet une meilleure répartition des intervalles d'air et donc peut contribuer à améliorer les performances électriques sous condition de glace [3]. Dans cette optique, il apparaît intéressant de s'attarder sur l'utilisation des anneaux de garde dont sont équipés certains isolateurs de poste. Ces anneaux de garde sont généralement utilisés pour uniformiser la distribution du potentiel le long de l'isolateur afin

de réduire voir éliminer l'activité des décharges couronnes qui sont nuisibles pour l'isolateur et génèrent des perturbations électromagnétiques importantes [16-22].

Cependant, aux meilleurs de nos connaissances, il existe très peu de recherches systématiques entreprises pour étudier leur influence sur le comportement électrique des isolateurs de poste dans des conditions sévères de givrage atmosphérique. D'après les quelques observations réalisées sur sites et en laboratoire, il a été constaté, sans pour autant être démontré, que les anneaux de garde seraient en mesure de produire une distribution uniforme de glace, mais que cette dernière ne mènerait pas nécessairement à l'amélioration des performances électriques des isolateurs qui en sont équipés [5]. Dans une autre mesure, il a été avancé que les anneaux de garde pourraient être employés pour créer des intervalles d'air suffisamment grands pour permettre à l'isolateur glacé d'avoir une tension de tenue sous condition de glace plus élevée que la tension de service, mais cela reste encore à être démontré [3, 5].

Il existe donc un certain intérêt dans l'utilisation des anneaux de garde comme méthode probable permettant d'améliorer les performances électriques des isolateurs standard de poste sous conditions de glace sévères mais le peu d'études réalisées à ce sujet sont contradictoires et une étude systématique doit donc être entreprise pour en démontrer la validité. En effet, l'ajout d'anneaux de garde aux isolateurs de poste standard demeure actuellement, lorsque cela est possible, une solution économique à condition que leur influence positive sur les performances électriques des isolateurs sous condition de glace sévère soit démontrée.

## **1.2. Objectifs et méthodologie de la recherche**

### **1.2.1. Objectifs**

Au regard des différentes études menées à ce jour sur l'utilisation des anneaux de garde, la revue de littérature réalisée sur le sujet montre qu'il existe un manque de connaissances certain sur l'utilisation et l'application des anneaux de garde aux isolateurs de poste standard et de surcroît, sous conditions de givrage atmosphérique sévère. La majorité des études recensées sont, au meilleur de nos connaissances, orientées vers l'optimisation des anneaux de garde pour des applications exclusives aux isolateurs composites de ligne propres (exempts de dépôts polluants) dans la majorité des cas. Très peu d'études se sont concentrées sur les isolateurs de poste, mêmes propres, et encore moins sous conditions de pollution atmosphérique et précipitations froides.

Ce travail a donc pour objectif général d'accroître les connaissances relatives à l'utilisation des anneaux de garde équipant des isolateurs de poste standard sous conditions de glace. Plus spécifiquement, il s'agit, dans un premier temps, d'étudier expérimentalement l'influence d'un seul anneau de garde sur les performances électriques des colonnes isolantes standard soumis à des conditions d'accumulation de glace sévère. Cette étude se poursuit, dans un second temps, par une étude numérique paramétrique dans le but de déterminer les paramètres optimales d'un anneau de garde, à savoir son diamètre extérieur, le nombre ainsi que la position permettant d'obtenir la distribution de potentiel la plus uniforme. Enfin, à partir des résultats expérimentaux et numériques obtenus, il s'agit de proposer des solutions permettant d'augmenter la tension de tenue des colonnes

isolantes standard sous conditions d'accumulation de glace sévères en utilisant de nouvelles configurations d'anneaux de garde.

De telles pistes de solutions permettront d'initier des recherches plus poussées qui seront d'un grand intérêt pour l'industrie du transport et de la distribution de l'énergie électrique ainsi que celle des fabricants d'équipements. Ces derniers particulièrement bénéficieront directement des retombées reliées à ce projet puisque actuellement, il n'existe aucune règle particulière ou norme relative au dimensionnement et au positionnement des anneaux de garde le long des isolateurs propres et encore moins lorsque ces derniers sont sujets aux accumulations de glace.

### **1.2.2. Méthodologie**

L'atteinte des objectifs de ce projet de recherche nécessite à la fois une approche numérique et expérimentale relative au comportement des colonnes isolantes sous condition de glace équipées d'anneaux de garde. Compte tenu des infrastructures disponibles actuellement à la CIGELE, les recherches sont réalisées sur une colonne isolante standard en porcelaine soumises à des accumulations de glace réalisées en régime humide qui s'apparente le plus au verglas. La méthodologie proposée peut se décrire selon les quatre étapes suivantes :

### **1.2.2.1. Détermination de la tension de tenue maximale sous condition de glace sévère d'une colonne isolante standard équipée d'un anneau de garde standard**

Cela représente le point de départ de cette recherche puisqu'il s'agit de vérifier l'influence d'un anneau de garde de géométrie standard sur la tension de tenue d'une colonne isolante soumise à une accumulation de glace sévère correspondant à 15mm d'épaisseur de glace (radiale) mesurée à l'aide du cylindre témoin. Il s'agit ici de déterminer la tension de tenue maximale en période de fonte et de vérifier l'influence de la présence de l'anneau de garde sur l'uniformité du dépôt de glace obtenu en fin d'accumulation.

### **1.2.2.2. Calcul des distributions du potentiel et du champ électrique avec un anneau de garde**

Cette étape est entièrement complémentaire à la partie expérimentale puisqu'elle permet d'étudier théoriquement et numériquement les distributions du potentiel et du champ électrique le long de la colonne isolante équipée d'un anneau de garde dont le comportement électrique a été étudié expérimentalement lors de l'étape précédente. Les études proposées sont réalisées exclusivement au début de la période d'accumulation puisque c'est au cours de cette période que sont créés les intervalles d'air qui régissent l'uniformité du dépôt de glace. Étant donné que l'accumulation de glace est réalisée en régime humide, les simulations doivent tenir compte de la présence de glaçons entre les jupes de la colonne isolante et du film d'eau à leur surface en suivant le principe de modélisation déjà utilisée dans une étude antérieure [6].

Les simulations sont réalisées à l'aide du logiciel commercial d'éléments finis COMSOL Multiphysics© qui a été utilisé dans une étude antérieure pour modéliser les distributions du potentiel et du champ électrique le long de colonnes isolantes recouvertes de glace en période de fonte [6, 12]. À cet effet, une configuration 2D axisymétrique est utilisée afin d'obtenir des résultats plus rapides comparée aux simulations 3D, avec une bonne précision, comme il a été démontré dans [12].

#### **1.2.2.3. Études paramétriques relatives à l'utilisation des anneaux de garde**

À partir de la modélisation de la colonne isolante recouverte de glace proposée à l'étape 2, une étude paramétrique est proposée. Cette étape consiste, dans un premier temps, à étudier numériquement l'influence des paramètres géométriques principaux de l'anneau de garde sur la distribution du potentiel et du champ électrique le long de la colonne isolante en début de période d'accumulation, à savoir le rayon  $R$  de l'anneau, le diamètre  $d$  du tube de l'anneau et enfin sa position  $H$  par rapport à l'électrode H.T. Il est important de mentionner que pour les différentes études paramétriques réalisées, la topologie globale de l'anneau de garde, c'est-à-dire sa forme géométrique globale qui est un anneau tubulaire de forme circulaire, est conservée et que seuls les paramètres  $R$ ,  $d$  et  $H$  sont modifiés. Ce choix conservateur est basé sur l'étude paramétrique présentée par [18] pour laquelle différentes formes de tubes constituant l'anneau ont été étudiés et les résultats obtenus ont montré qu'un tube de forme circulaire permettait d'obtenir la meilleure répartition du potentiel le long de l'isolateur.

Pour chacune des variations des trois paramètres étudiés  $R$ ,  $d$  et  $H$  de l'anneau de garde, les distributions du potentiel, du champ électrique ainsi que la chute de tension le long des différents intervalles d'air formés par les glaçons sont déterminées et la configuration optimale de l'anneau de garde est retenue en vue de produire une distribution du potentiel la plus uniforme possible le long de la colonne isolante.

La seconde partie de cette étude paramétrique reprend la même démarche que l'étude paramétrique précédente mais en prenant en compte la présence de deux puis trois anneaux de garde. Les études paramétriques sont conduites après validation de la ou des configurations initiales retenues parmi les suivantes :

- Un anneau de garde sur l'électrode H.T. et un sur l'électrode flottante (électrode du milieu),
- Un anneau de garde sur l'électrode H.T. et un sur l'électrode mise à la terre,
- Un anneau de garde sur l'électrode flottante (électrode du milieu) et un sur la mise à la terre,
- Un anneau de garde sur chaque électrode métallique.

L'étude paramétrique proposée est réalisée avec les mêmes outils utilisés à l'étape précédente, à savoir COMSOL Multyphysics© et Matlab.

#### **1.2.2.4. Analyse des résultats et proposition de solutions d'amélioration**

Cette dernière étape présente une analyse des différents résultats issus des études expérimentales et numériques réalisées aux étapes précédentes dans le but de proposer des solutions permettant d'améliorer la performance des colonnes isolantes sous conditions de glace sévère par l'ajout d'anneaux de garde. Pour ce faire, une étude conjointe numérique et expérimentale a été réalisée dans le but de proposer une solution efficace et innovante.

### **1.3. Originalité de la recherche**

Au meilleur de nos connaissances, il existe actuellement aucune étude dédiée exclusivement au comportement électrique sous conditions de glace sévère des isolateurs de poste standard équipés d'anneaux de garde. Cela est un manque important dans le domaine de la fiabilisation des réseaux électriques puisqu'un grand nombre d'isolateurs de poste, qui sont les plus susceptibles d'être responsable de contournement électrique sous glace, en sont équipés. Les interruptions de service inhérentes aux contournements sous glace des ces derniers sont d'autant plus graves qu'elles surviennent à des moments où l'approvisionnement continu en énergie électrique est essentielle au bien être des citoyens canadiens. Les récentes tempêtes de verglas ont clairement démontré que les accumulations de glace demeurent un élément essentiel dans la conception des équipements d'isolation afin d'assurer la fiabilité des réseaux aériens de distribution et de transmission de l'énergie électrique. De ce fait, le projet de recherche proposé est une contribution importante à la conception et l'utilisation des anneaux de garde sur les lignes T.H.T en service dans les régions froides. L'expertise qui sera développée dans ce projet pourra ainsi être transférée à

l'industrie canadienne de l'électricité, lui permettant de diversifier ses choix sur une base solide et scientifique afin de soutenir de manière innovatrice la qualité de la distribution d'électricité aux utilisateurs. De plus, ces résultats permettront de fournir des pistes de solution et recommandations quant à la mise en place d'un projet de recherche plus important sur l'optimisation des anneaux de garde en région froides employés non seulement sur les isolateurs de postes mais, à plus grande échelle, sur les différents isolateurs de lignes qui en sont équipés. Une approche similaire d'optimisation pourra aussi être appliquée aux cornes de garde qui peuvent être utilisées sur les lignes moyenne et haute tension.

#### **1.4. Structure du mémoire**

Le présent mémoire de maîtrise est organisé en sept chapitres qui se présentent comme suit :

Le premier chapitre est une introduction du travail de recherche. Il explique la problématique, les objectifs, la méthodologie adoptée et l'originalité de cette étude.

Le deuxième chapitre présente la revue de littérature pertinente en lien direct avec la présente recherche. Un intérêt particulier a été porté sur le processus de formation de la glace sur les isolateurs ainsi que les différents paramètres influençant le processus de contournement sous glace de ces derniers. De même, une revue détaillée des études relatives à l'utilisation et l'optimisation des anneaux de garde est présentée avec une majorité dédiée aux isolateurs composite de ligne.

Les équipements du laboratoire de la CIGELE, les procédures expérimentales employées dans cette recherche, les types d'isolateurs utilisés et le système d'acquisition, ainsi que les résultats des tests de contournement de l'isolateur de poste sans anneau de garde sont exposés au troisième chapitre.

Quant au quatrième chapitre, nous effectuons une comparaison de la distribution du potentiel et du champ électrique obtenue dans les premiers instants de la période d'accumulation de glace pour une colonne isolante avec et sans anneaux de garde.

Le cinquième chapitre présente les résultats relatifs à l'optimisation de l'utilisation de l'anneau de garde sur l'électrode H.T. sous des conditions de glace à l'aide d'un algorithme développé à cet effet. De plus, nous exposons la validation expérimentale des tests de contournement de la colonne isolante recouverte de glace équipée d'un anneau de garde.

Par la suite, le sixième chapitre est consacré à la proposition des solutions pour l'amélioration de l'utilisation des anneaux de garde sous conditions de glace. Les configurations proposées sont validées expérimentalement par des tests réalisés au laboratoire de la CIGELE et via une modélisation numérique.

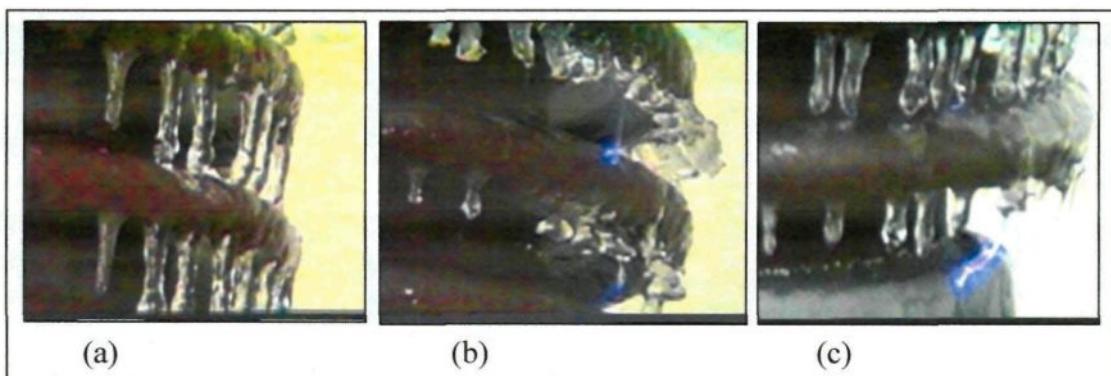
Enfin, le septième chapitre présente les conclusions générales ainsi que des recommandations pour les travaux futurs.

## CHAPITRE 2

### REVUE DE LITTÉRATURE

#### 2.1. Processus de formation des dépôts de glace sur les isolateurs de poste

La formation de la glace sur les isolateurs de lignes et de poste, aussi bien en laboratoire que sur le terrain, a fait l'objet de nombreuses études scientifiques [1-2]. La formation de dépôts de glace à la surface des chaînes d'isolateurs et des isolateurs de poste se fait généralement en régime humide, par impacts de gouttelettes d'eau surfondues de gros diamètre, qui se caractérise par la présence en continu d'un film d'eau et la formation de glaçons [1-2]. Au cours d'une période d'accumulation réalisée en régime humide, les glaçons se forment entre les jupes de l'isolateur, grandissent et finissent par atteindre le dessus de la jupe suivante (figure 1-a). Cependant, à certains endroits le long de l'isolateur, généralement au voisinage des électrodes, des décharges électriques partielles apparaissent à l'extrémité des glaçons avant que ceux-ci n'atteignent la jupe suivante, ce qui a pour effet de stopper leur croissance par fonte de ces derniers (voir figures 1-b et 1-c).

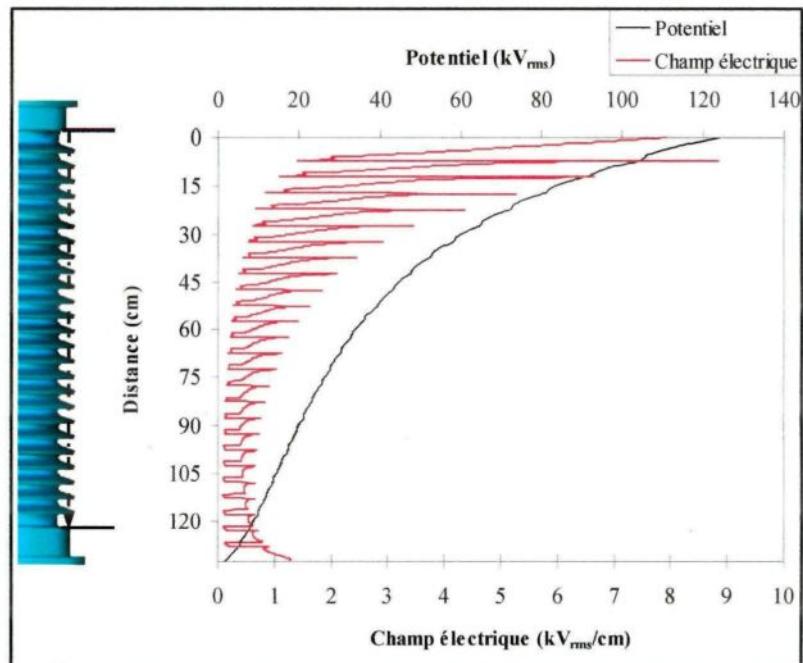


**Figure 1 :** Aspect général d'une accumulation de glace réalisée en régime humide sur un isolateurs de poste standard [10].

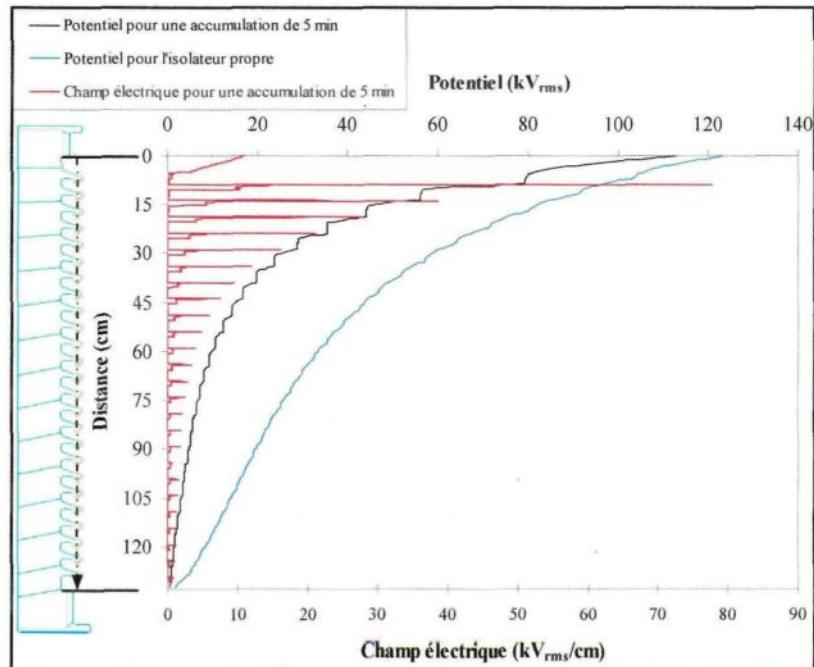
Ces décharges partielles sont dues à des valeurs élevées de champ électrique au voisinage des électrodes. En effet, en l'absence d'anneaux de garde, il a été démontré numériquement que la distribution du potentiel le long de l'isolateur de poste propre est fortement non-uniforme (voir figure 2) puisque qu'une chute de tension importante est obtenue au voisinage de l'électrode haute tension ainsi qu'une chute de tension moindre au niveau de la mise à la terre [7-10]. Cela entraîne des valeurs élevées de champ électrique près des électrodes métalliques de l'isolateur (figure 2) qui sont à l'origine de l'activité électrique (décharges couronne et arcs partiels) à l'extrémité des glaçons au cours de la période d'accumulation de glace (figure 3).

Cela a clairement été démontré dans des études antérieures portant sur la simulation numérique de la distribution du potentiel et du champ électrique en période d'accumulation [10]. En effet, les résultats de la figure 3 montrent clairement que le champ électrique à l'extrémité des glaçons formés dès les premiers instants de la période d'accumulation de glace et situés près de l'électrode portée à la haute tension devient suffisamment important pour être en mesure d'entraîner l'apparition de décharges partielles à leur extrémité et provoquer ainsi la fonte prématûre de ces derniers [8, 10], tel qu'illustré à la figure 1-b.

Toujours d'après l'étude numérique réalisée par [10], la fonte des glaçons situés près des électrodes métalliques se poursuit tout au long de l'accumulation, ce qui donne lieu à la création des intervalles d'air, tel qu'illustré à la figure 4. La formation des intervalles d'air au cours de la période d'accumulation est donc un processus dynamique qui est principalement contrôlé par la distribution du potentiel le long de l'isolateur. Ces derniers jouent un rôle important dans la tenue diélectrique des isolateurs de poste sous condition de glace, tel qu'expliqué plus en détail dans la section suivante.



**Figure 2 :** Distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur de poste standard en porcelaine [10].

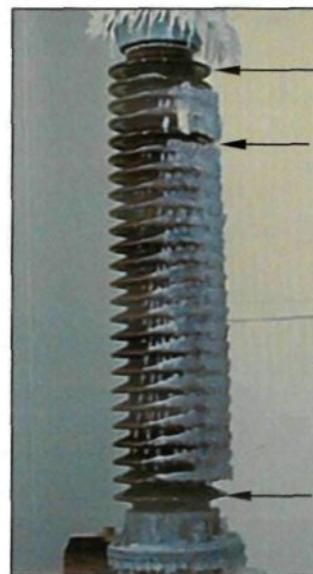


**Figure 3 :** Distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur de poste standard en porcelaine après 5 minutes d'accumulation de glace [10].

## 2.2. Influence des intervalles d'air sur la tenue diélectrique des isolateurs de poste standard en période de fonte

Tel que décrit précédemment, la création des intervalles d'air se produit au cours de la période d'accumulation de glace sur l'isolateur. Ainsi, une fois l'accumulation terminée, il est généralement observé, pour des dépôts de glace d'épaisseur importante, une surface de glace entrecoupée d'intervalles d'air créés au cours de la période d'accumulation au voisinage des électrodes, comme le montre la figure 4. D'autres intervalles d'air sont parfois observables le long des isolateurs (figure 4). Leur processus de formation est le

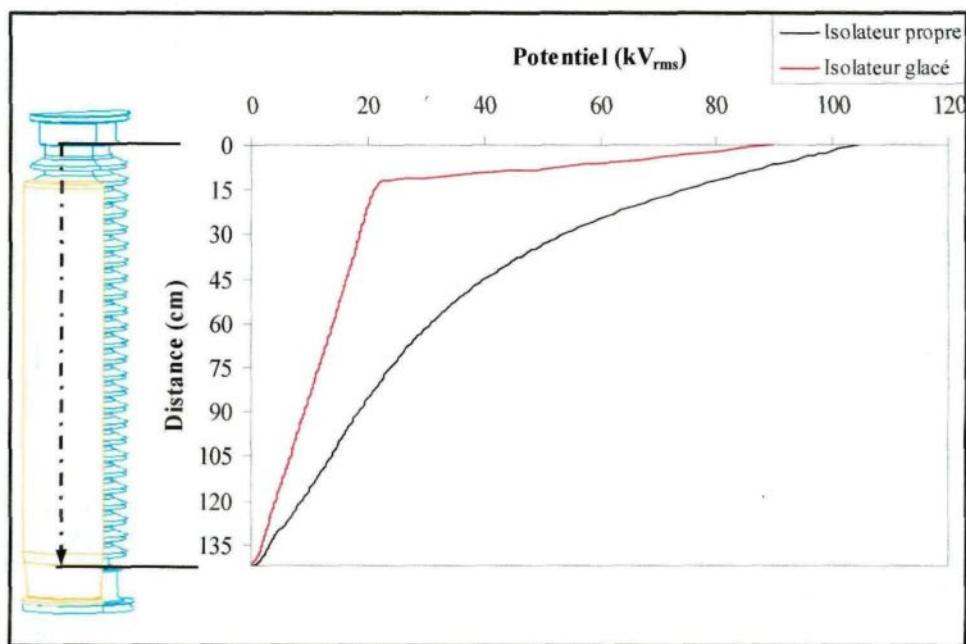
même que ceux présents au voisinage des électrodes mais leur position ainsi que leur nombre demeurent cependant aléatoires.



**Figure 4 :** Géométrie d'un dépôt de glace obtenue à la fin de la période d'accumulation sur un isolateur de poste standard avec présence de trois intervalles d'air.

La majorité des études s'accordent à dire que le danger de contournement apparaît principalement lors des périodes de fonte qui sont générées par une combinaison de plusieurs facteurs (rayonnement solaire, augmentation de la température, activité électrique combinée à une épaisseur de glace importante) [1-4]. Dans cette situation, il a été démontré que c'est principalement la présence du film d'eau de fonte de conductivité élevé et présent à la surface du dépôt de glace qui est à l'origine d'une modification importante de la distribution du potentiel le long de l'isolateur glacé [6-10]. Cela se matérialise par une augmentation importante de la chute de tension aux bornes des intervalles d'air, tel que démontrée par [10]. Les figures 5 et 6 illustrent très bien l'influence de la couche de glace de permittivité élevée (figure 5) et la présence du film d'eau conducteur (figure 6) sur la

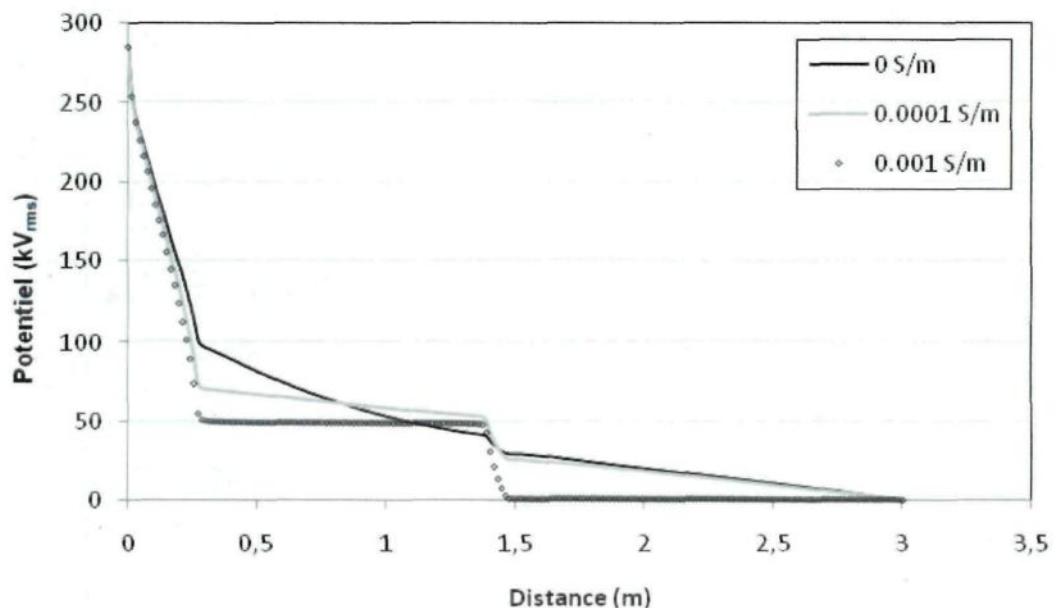
redistribution du potentiel le long de l'isolateur recouvert de glace [10, 12]. En particulier, les résultats de la figure 6 mettent en évidence le fait que la chute de tension le long des différents intervalles d'air augmente avec l'augmentation de la conductivité électrique du film d'eau présent en période de fonte.



**Figure 5 :** Distributions du potentiel le long d'un isolateur de poste propre et recouvert de glace [10].

Par conséquent, si la chute de tension le long des intervalles d'air est suffisante, des arcs électriques partiels s'établissent le long de ces derniers, comme illustré à la figure 7 [7-10]. Si les conditions surfaciques requises sont présentes, ces arcs électriques se propagent à la surface du dépôt de glace jusqu'au contournement électrique de l'isolateur [13]. Le contournement se traduit par un court-circuit entre la partie portée à la haute tension et la mise à la terre.

Il existe donc un lien évident et direct entre la distribution du champ électrique le long de l'isolateur, la formation des intervalles d'air, la naissance des arcs électriques partiels et le contournement électrique.



**Figure 6 :** Distributions du potentiel le long d'un isolateur de poste recouvert de glace en fonction de la conductivité du film d'eau en période de fonte [12].

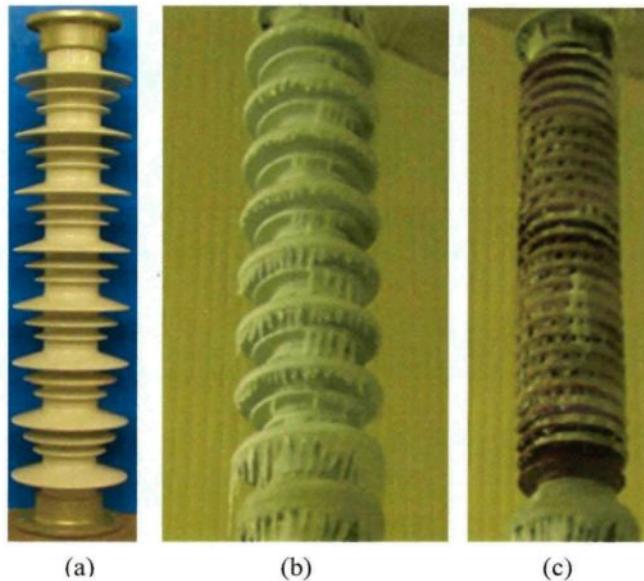


**Figure 7 :** Arcs électriques partiels établis le long des intervalles d'air présents à la surface d'un isolateur de poste recouvert de glace [10].

Les travaux menés à la CIGELE au cours des dernières années en collaboration avec Hydro-Québec ont permis de développer de nouvelles méthodes permettant d'améliorer la tenue des isolateurs de poste sous des conditions de glace sévères. Ces travaux se sont basés sur le fait que les intervalles d'air créés au cours de la période d'accumulation peuvent, si leur nombre est suffisant [5], inhiber le processus de contournement des isolateurs de poste sous tension de service [3,5]. Partant de ce principe, les méthodes proposées ont pour objectif de créer artificiellement des intervalles d'air lors du processus d'accumulation en ralentissant la formation du pont de glace entre les jupes de l'isolateur soumis aux précipitations verglaçantes. Pour ce faire deux solutions ont été étudiées.

La première solution proposée est une nouvelle géométrie d'isolateur de poste en porcelaine dont le diamètre des jupes est alterné afin d'obtenir une distance inter-jupes plus importante que les isolateurs standard tout en conservant une distance de fuite au moins équivalente. Ce nouveau type d'isolateur dit « triple alternance », présenté à la figure 8-a, a donné des résultats très satisfaisants avec une amélioration de plus de 22% de la tension de tenue par rapport aux isolateurs standard sous les mêmes conditions de glace [5, 14]. La comparaison de l'accumulation de glace obtenue pour l'isolateur triple alternance (figure 8-b) avec l'isolateur de poste standard (figure 8-c) permet de mettre en évidence l'efficacité de ce nouveau type d'isolateur qui, sous les mêmes conditions expérimentales, permet d'éviter la formation du pont de glace entre les jupes en créant autant d'intervalles d'air qu'il y a de jupes de plus grand diamètre. De plus, ce nouveau type d'isolateur possède un revêtement semi-conducteur qui permet une meilleure uniformisation de la distribution du

potentiel, ce qui semble ainsi améliorer la répartition des intervalles d'air le long de l'isolateur. Ces isolateurs sont actuellement utilisés par Hydro-Québec dans les nouvelles constructions de postes de distribution et d'interconnexion dans des zones identifiées à haut risque en terme de verglas.

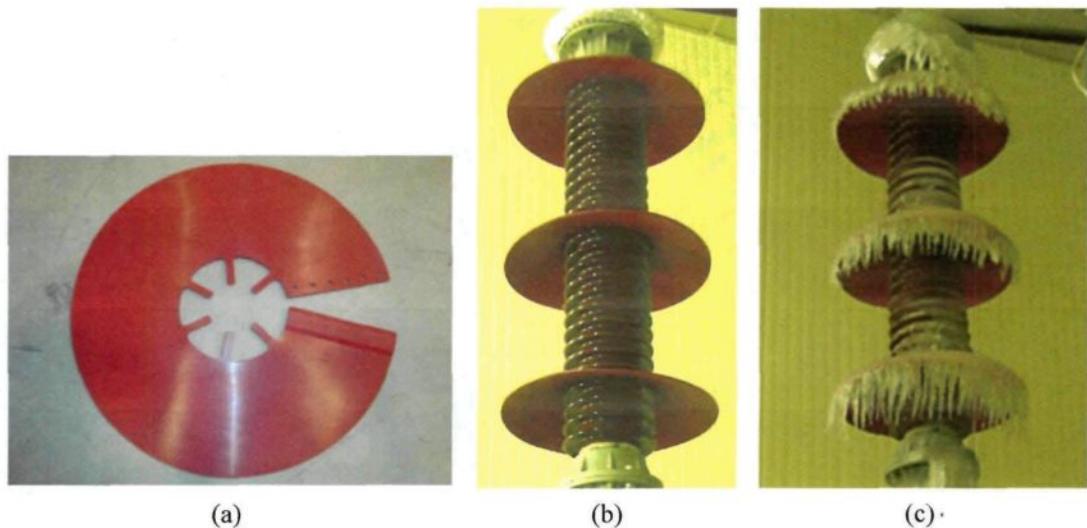


**Figure 8 :** Illustration d'un isolateur triple alternance propre (a) et recouvert de glace (b) et comparaison avec un isolateur standard recouvert de glace (c) sous les mêmes conditions expérimentales [14].

La seconde solution proposée et testée au laboratoire de la CIGELE est une solution applicable pour les isolateurs existants puisqu'il serait trop coûteux de remplacer tous les isolateurs standard de poste par des isolateurs triple alternance. Cette solution passe par l'augmentation du diamètre extérieur de certaines jupes et de la distance entre ces dernières. Cet augmentation du diamètre est réalisé par des pièces additives, respectant certaines contraintes diélectriques et mécaniques, qui permettent d'améliorer, à moindre coût, le comportement des isolateurs de postes déjà en place dans les postes T.H.T. d'interconnection. Ces pièces additives, appelées jupes auxiliaires (traduction française de l'appellation anglaise «booster sheds») ont été initialement développées en Angleterre pour

une utilisation en environnement fortement pollué [23]. Il y a quelques années, des tests effectuées à la CIGELE, en partenariat avec Hydro-Québec, sur des isolateurs de poste ont permis de démontrer l'efficacité des jupes auxiliaires dans des conditions d'accumulation de glace sévères [5, 15].

La figure 9-a présente une vue d'ensemble d'une jupe auxiliaire, la figure 9-b le montage de plusieurs jupes sur un isolateur de poste et enfin la figure 9-c présente la géométrie de l'accumulation de glace obtenue en fin d'accumulation pour les mêmes conditions expérimentales que celles utilisées à la figure 8.



**Figure 9 :** Illustration d'une jupe auxiliaire (a) et de son installation sur les isolateurs de poste (b) et de leur influence sur la géométrie du dépôt de glace (c) [15].

La figure 9-c illustre très bien l'efficacité des jupes auxiliaires pour créer artificiellement des intervalles d'air de longueur importante et cela, en protégeant certaines sections de l'isolateur qui sont alors exemptes de glace. Les résultats expérimentaux ont démontré que l'ajout de jupes auxiliaires a ainsi permis d'augmenter, sous 15 mm

d'épaisseur radiale de glace, la tension de tenue de la colonne isolante de 22% par rapport au cas de non utilisation de jupes, ce qui est un gain énorme. Les résultats obtenus ne sont toutefois pas optimums puisqu'il reste encore des études à réaliser pour optimiser le nombre, la position et les dimensions des jupes. En particulier, la dimension des jupes restent encore problématique puisque qu'elles agissent comme des parapluies protégeant de grandes sections d'isolateur qui ne sont pas lavées naturellement (pluie), ce qui peut poser certains problèmes dans les zones à forte pollution atmosphérique et ainsi restreinte l'utilisation de ces dernières [5, 23].

En résumé, les intervalles d'air créés lors de la période d'accumulation jouent un rôle déterminant dans le comportement électrique des isolateurs de poste sous condition de glace puisqu'ils peuvent, dépendamment de leur nombre, provoquer ou inhiber le processus de contournement. Cela a bien été compris par les chercheurs et manufacturiers qui ont utilisés ce concept pour développer des méthodes permettant d'augmenter la tension de tenue des isolateurs recouverts de glace. Les méthodes proposées visent à créer artificiellement des intervalles d'air en jouant sur la géométrie propre de l'isolateur. Cependant, il est intéressant de penser qu'il serait possible d'agir sur la formation des intervalles d'air en agissant directement sur la distribution du potentiel de l'isolateur tel que démontré par plusieurs études numériques. À cet effet, une étude systématique sur l'utilisation des anneaux de garde avec des isolateurs de poste sous conditions de glace est donc justifiée puisque ces anneaux ont une influence directe sur la distribution du potentiel le long de ces derniers, tel que décrit dans la section suivante.

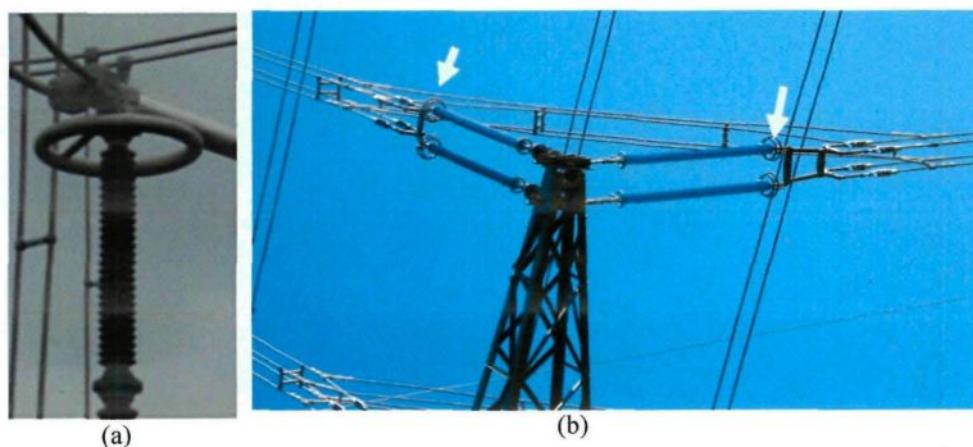
## 2.3. Définition et utilisation des anneaux de garde pour les isolateurs

### 2.3.1. Présentation générale des anneaux de garde

Les anneaux de garde se présentent sous la forme d'un anneau métallique ouvert ou fermé (figure 10), généralement en l'aluminium, pour des questions de mise en forme, de légèreté et de résistance à la corrosion. De part leur fonctionnalité, telle qu'expliquée à la section suivante, les anneaux de garde sont fixés aux extrémités métalliques des isolateurs de poste (figure 11-a) ou de ligne (figure 11-b) et sont donc soumis au même potentiel que ces dernières.



**Figure 10 :** Exemples de géométries d'anneaux de garde [25].



**Figure 11 :** Exemples d'utilisation des anneaux de garde sur un isolateur de poste (a) et un isolateur de ligne en composite (b) [26].

### 2.3.2. Fonctionnalité des anneaux de garde

La revue de littérature permet de mettre en évidence que l'ajout d'un ou plusieurs anneaux aux isolateurs, qu'ils soient de ligne ou de poste, permet d'assurer une ou plusieurs fonctions qui sont les suivantes [16] :

- Une meilleure répartition du champ électrique à l'intérieur ou extérieur du matériau constituant l'isolateur afin d'éviter toute décharge électrique partielle à l'intérieur des diélectriques (micro cavités ou défauts), à l'interface entre les différents matériaux ou encore à la surface des matériaux sous conditions de pluie ou de pollution atmosphérique.
- Une réduction de l'intensité du champ électrique dans l'air autour des extrémités métalliques de l'isolateur et des équipements avoisinants afin de prévenir l'apparition des décharges couronnes qui sont responsables des perturbations radiophoniques, bruits audibles et pertes énergétiques.
- La protection de l'électrode métallique de l'isolateur contre l'arc électrique en gardant l'arc à distance de l'isolateur et en permettant de fixer la racine de l'arc à l'anneau de garde pour prévenir toute détérioration.

L'ajout des anneaux de garde aux isolateurs de poste et de ligne n'est pas automatique du fait qu'il existe plusieurs facteurs à prendre en compte dans la décision et qui plus est, il n'existe pas réellement de règles établies précisément [16]. Les facteurs principaux à considérer sont relatifs aux dimensions des parties métalliques des extrémités des isolateurs ainsi que les dimensions et les types de connexion entre ces derniers et les parties portées à

la haute tension ou mises à la terre. La recommandation d'installer ou pas des anneaux de garde est généralement émise par les manufacturiers qui doivent non seulement tenir compte des différentes dimensions géométriques mais aussi des conditions locales environnementales (humidité, pollution, altitude, ect.) en procédant, soit à des tests expérimentaux, soit à des simulations numériques dans le but de guider leur choix [16, 24]. Cependant, en règle générale, certains manufacturiers recommandent, pour les isolateurs de poste en porcelaine, l'ajout d'un anneau de garde pour des niveaux de tension allant jusqu'à 500kV et deux anneaux de garde pour des niveaux de tension supérieurs [16, 24]. Pour les isolateurs composites de ligne, l'utilisation d'un anneau de garde est recommandée à partir de niveaux de tension de 220/230 kV pour les parties portées à la haute tension et un anneau de garde à chaque extrémité de l'isolateur composite (un à la H.T. et un à la mise à la terre) à partir de 500kV.

#### **2.4. Utilisation des anneaux de garde sous différentes conditions atmosphériques**

Les isolateurs des lignes aériennes et des postes de transport et d'interconnexion des réseaux électriques sont exposés à diverses conditions climatiques comme la pluie, la pollution atmosphérique ou encore les accumulations de glace. Le point commun entre ces différentes conditions atmosphériques est qu'elles affectent et modifient les conditions surfaciques des isolateurs qui provoquent une augmentation de l'activité électrique pouvant contribuer à :

- une dégradation accélérée de la surface de l'isolateur dans le cas de décharges partielles initiées à l'extrémité des gouttes d'eau et une augmentation des perturbations radiophoniques et du bruit audible[27-28].
- l'apparition d'arcs électriques partiels dont les pieds en contact avec l'isolateur peut endommager non seulement la surface isolante mais aussi les parties métalliques et même entraîner des bris mécaniques dans des cas de pollution ou de précipitations froides [16].
- le contournement complet de l'isolateur sous condition de pollution sévère couplée avec la pluie ou encore sous conditions de précipitations verglaçantes importantes [1-4, 27-29].

L'initiation des activités électriques à la surface des isolateurs sous différentes conditions atmosphériques sont toutes dues à la modification partielle voir totale des distributions du potentiel et du champ électriques. En effet, que ce soit la présence des gouttes d'eau, d'une couche de pollution, de bandes sèches ou encore de dépôts de glace, d'intervalles d'air ou de film d'eau ou un amalgame de toutes ces conditions, une redistribution du potentiel le long de l'isolateur s'effectue. La non-uniformité de la redistribution du potentiel qui en découle est à l'origine des activités électriques nuisibles qu'il convient d'amoindrir afin de protéger les isolateurs contre tout dommage éventuel. Cela peut être réalisé en utilisant des isolateurs recouverts d'un revêtement semi-conducteur dont l'efficacité a été démontrée dans le cas de pollution sévère [30]. Cela dit, ce type d'isolateur sont généralement utilisés dans des zones de pollution atmosphérique importante puisque qu'ils sont plus coûteux que les isolateurs standard à l'achat mais aussi

à l'utilisation (pertes causées par le courant circulant en permanence dans le revêtement semi-conducteur) [30].

L'autre solution pouvant être utilisée concernant l'uniformisation de la distribution du potentiel sous conditions climatiques critiques consiste en l'ajout d'anneaux de garde sur les isolateurs existants. Tel que décrit à la section précédente, les anneaux de garde, utilisés adéquatement, sont en mesure de réduire l'activité électrique au voisinage des isolateurs propres et ces derniers sont généralement utilisés pour cela. Mais qu'en est-il de leur utilisation et de leur influence sous des conditions climatiques sévères. À cet effet, la revue de littérature montre qu'il existe, au meilleur de nos connaissances, très peu d'études réalisées sur ce sujet. La majorité des études relatives à l'utilisation des anneaux de garde se concentrent exclusivement sur l'optimisation de ces derniers pour des applications impliquant des isolateurs propres [18-27]. Très peu d'études se sont concentrées exclusivement sur le potentiel effectif des anneaux de garde à réduire l'activité électrique engendrée par une modification de l'état de surface des isolateurs.

D'après certaines études [16], l'utilisation des anneaux de garde serait en mesure d'éviter, sous certaines conditions de pollution, l'amorçage des bandes sèches à proximité de l'électrode haute tension de l'isolateur, mais cela reste encore à démontrer par des recherches plus poussées. De même, dans le cas des accumulations de glace sur les isolateurs, quelques études expérimentales et observations faites sur sites naturels ont été effectuées concernant l'influence des anneaux de garde sur la tenue diélectrique des isolateurs de poste recouverts de glace [5]. En effet, il a été observé que les isolateurs de

poste équipés d'anneaux de garde semblaient présenter une distribution de glace plus uniforme mais que cette uniformité des dépôts de glace ne conduisait pas forcément à une amélioration des performances électriques des isolateurs. Dans d'autres cas, l'utilisation des anneaux de garde avec les isolateurs de poste semblaient conduire à la création d'un intervalle d'air de dimension importante (voir figure 12) pouvant être suffisant pour éviter le contournement de l'isolateur sous tension de service [5].

Au regard de la revue de littérature, il est remarquable de constater qu'il existe un manque flagrant d'études systématiques portant sur le potentiel d'utilisation des anneaux de garde pour réduire l'activité électrique à la surface des isolateurs sous conditions climatiques sévères, aussi bien dans le cas de la pollution atmosphérique que dans le cas d'accumulations de glace.



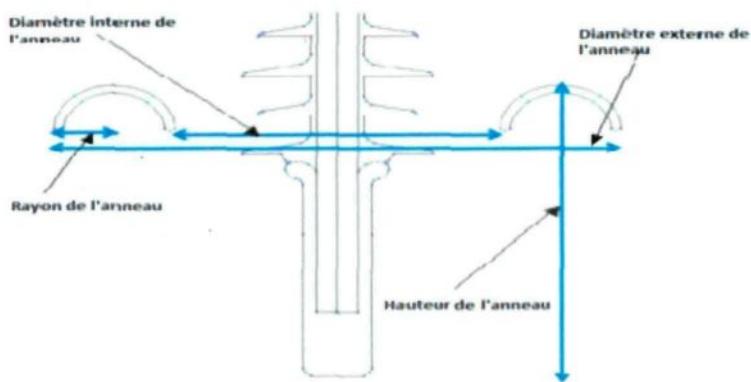
**Figure 12 :** Isolateurs semi-conducteurs de poste 500 KV, équipés d'anneau de garde dans des conditions de givrage en Virginie [5].

## 2.5. Optimisation des anneaux de garde

Tel que discuté à la section précédente, le rôle des anneaux de garde consiste en partie à réduire le champ électrique près des parties métalliques situées aux extrémités des isolateurs et d'uniformiser la distribution du potentiel le long de ces derniers. L'utilisation adéquate des anneaux de garde dépend donc beaucoup de la géométrie du champ électrique et des parties métalliques environnantes. Les manufacturiers et chercheurs ont donc deux solutions afin de dimensionner et positionner adéquatement les anneaux de gardes : les tests expérimentaux et la simulation numérique. Dans la majorité des cas, la simulation numérique est préférée aux tests expérimentaux puisqu'elle requiert peu d'infrastructure, réduisant ainsi les coûts d'étude, et permet de tester des nombreuses configurations d'anneaux de garde par l'utilisation de méthodes d'optimisation. Les tests expérimentaux sont généralement utilisés pour valider les configurations finales d'anneaux de garde obtenues à partir des résultats numériques.

Nombreuses études ont été réalisées sur l'optimisation des anneaux de garde [16-22]. La majorité des études recensées se sont concentrées sur les isolateurs de lignes en composite puisque ces derniers sont plus sensibles aux dégradations engendrées par les activités électriques inhérentes à une distribution du potentiel non uniforme [16]. Les différentes études d'optimisation ont été réalisées par modélisation numérique en utilisant soit la méthode des éléments finis (MEF) [17-20], soit la méthode des éléments finis de frontière (MEFF) [20-22]. Ces deux méthodes sont tout à fait adaptées au calcul de champ électrique et au problème d'optimisation.

Pour ce qui est des méthodes d'optimisation utilisées, une seule approche est en générale préconisée dans les différentes études rapportées afin d'optimiser l'utilisation des anneaux de garde. Le choix se porte généralement sur l'utilisation de l'étude paramétrique [17-22] où la géométrie de l'anneau est paramétrée par un nombre réduit de variables (voir exemple de la figure 13), ce qui limite considérablement la variété des formes possibles (ou admissibles). L'étude paramétrique consiste donc à étudier l'influence de chacun des paramètres géométriques de l'anneau de garde sur les distributions du potentiel et du champ électrique le long de l'isolateur afin de déterminer la meilleure configuration de paramètres ou la meilleure géométrie conduisant à la meilleure uniformisation de la distribution du potentiel et du champ électrique.



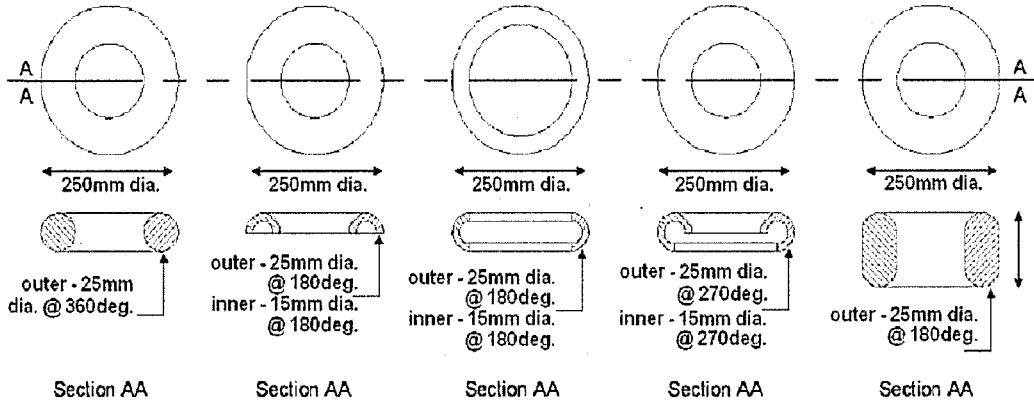
**Figure 13 :** Exemple de paramétrage de la géométrie d'un anneau de garde utilisé avec un isolateur composite de ligne [22].

Toutes les études recensées dans la présente revue de littérature ont été réalisées sur des isolateurs composites de ligne [16-22]. De plus, la grande majorité de ces études paramétriques se sont attachées à étudier une à une l'influence de trois paramètres principaux permettant de caractériser l'anneau de garde, soit le diamètre externe de l'anneau, sa position et le rayon de l'anneau (figure 13). Toutes ces études confirment que

ces trois paramètres ont une influence à différents niveaux sur les distributions du potentiel et du champ électrique le long de l'isolateur. Les résultats obtenus peuvent ainsi être résumés comme suit :

- L'augmentation du rayon de l'anneau (en gardant les deux autres paramètres constants) a une influence notable sur la réduction de l'intensité du champ électrique à la surface de l'anneau de garde et une influence moindre sur les distributions du potentiel et du champ électrique le long de l'isolateur.
- L'augmentation du diamètre externe de l'anneau de garde (en gardant les deux autres paramètres constants) diminue sensiblement le champ électrique à la surface de l'anneau et plus moindrement affecte les distributions du potentiel et du champ électrique le long de l'isolateur.
- La modification de la hauteur de l'anneau de garde (en gardant les deux autres paramètres constants) procure une modification notable des distributions du potentiel et du champ électrique le long de l'isolateur, beaucoup plus que celles obtenues avec la modification du diamètre externe de l'anneau et de son rayon.

D'autres études se sont concentrées sur l'influence de la géométrie du tube constituant l'anneau de garde en gardant les autres paramètres constants, tel qu'illustiqué à la figure 14 [19]. Ainsi, pour la même position, le même diamètre externe et le même rayon de l'anneau, ces études ont montré que l'utilisation d'un tube de section circulaire permet d'obtenir les meilleurs résultats en termes de réduction du champ électrique et d'uniformisation de la distribution du potentiel.



**Figure 14 :** Différentes géométries du tube constituant l'anneau de garde [19].

## 2.6. Conclusion

La revue de littérature a permis de mettre en évidence le manque notable d'études systématiques relatives à l'utilisation des anneaux de garde sous des conditions atmosphériques sévères et particulièrement sous conditions de glace. De part leur rôle d'uniformisation des distributions de potentiel et de champ électrique le long des isolateurs qui en sont équipés, les anneaux de garde peuvent donc contribuer à influencer le processus d'accumulation de glace sur les isolateurs et potentiellement influencer la tension critique de contournement, ce qui reste à démontrer. A cet effet, il est nécessaire d'entreprendre des recherches afin de pouvoir déterminer le rôle des anneaux de garde comme moyen d'augmenter la tenue diélectrique des isolateurs et particulièrement les isolateurs de poste, au même titre que les jupes auxiliaires ou les isolateurs triples alternance. À cet effet, les méthodes numériques seront d'un grand secours afin de permettre d'initier des études paramétriques, telles que réalisées dans les études antérieures sur les isolateurs de ligne propres, mais appliquées cette fois au isolateurs de poste recouverts de glace. Ces études paramétriques permettront ainsi d'identifier l'influence de différentes configurations

d'anneaux de garde sur la distribution du potentiel et du champ électrique en présence de glace ou de glaçons.

## **CHAPITRE 3**

### **PROCÉDURES ET TESTS EXPÉRIMENTAUX**

Pour les besoins de cette recherche, plusieurs séries de tests expérimentaux ont été réalisées au pavillon de recherche sur le givrage atmosphérique de la CIGELE à l'Université du Québec à Chicoutimi. En effet, le pavillon de recherche sur le givrage atmosphérique dispose de toute l'infrastructure nécessaire afin d'étudier expérimentalement la performance des isolateurs soumis à des accumulations de glace. En particulier, les différents tests expérimentaux réalisés ont permis de déterminer la tension de tenue maximale ( $V_{TM}$ ), en période de fonte, d'une colonne isolante constituée de deux unités d'isolateurs de poste recouvertes de glace formée en régime humide sans et avec anneau de garde, et de créer une banque de données d'enregistrements de la forme du courant de fuite. À cet effet, un système d'acquisition de données réalisé sous l'environnement LabVIEW a été utilisé.

Ce chapitre présente donc les équipements du laboratoire de la CIGELE, les procédures expérimentales employées et le système d'acquisition développé.

### **3.1. Équipements**

#### **3.1.1. Isolateur testé**

Le type d'isolateurs utilisé pour les besoins de cette recherche est une colonne isolante standard de poste en porcelaine. Ce type de colonnes isolantes est employé dans les postes extérieurs de transformation et d'interconnexion du réseau électrique à 735 kV d'Hydro-Québec. Pour cette étude et de par la limitation de la tension de sortie du transformateur de test disponible au laboratoire, uniquement les unités du bas et du centre d'une colonne isolante standard ont été considérées. Les caractéristiques principales des isolateurs utilisés dans notre étude sont présentées à la figure 15.

Plusieurs études expérimentales et observations sur les sites ont permis de démontrer que les colonnes isolantes sont plus susceptibles d'avoir des contournements lors de périodes d'accumulations de glace que les isolateurs de ligne [1]. Leur fragilité diélectrique provient du fait qu'elles possèdent une distance inter-jupes faible, ce qui entraîne une formation du pont de glace plus rapide combinée à un stress électrique plus important que les isolateurs de ligne [1]. Ainsi, la majorité des contournements électriques qui ont pu être répertoriés au Québec ont été observés sur les colonnes isolantes dans les postes à 735 kV [1].

	<b>Unité du bas</b>	<b>Caractéristiques</b>
	<b>Unité centrale</b>	<b>Caractéristiques</b>
<b>Distance d'arc totale testée : 2,7 m</b>		

Hauteur 1542 mm  
 Distance d'arc 1360 mm  
 Ligne de fuite 3500 mm

Partie supérieure  
 Diamètre intérieur 181 mm  
 Diamètre extérieur 275 mm

Partie inférieure  
 Diamètre intérieur 200 mm  
 Diamètre extérieur 294 mm

Jupes  
 Nombre 25  
 Pas 50 mm  
 Portée 45 mm  
 Angle supérieur 24,5°  
 Angle inférieur 6°

Hauteur 1542 mm  
 Distance d'arc 1360 mm  
 Ligne de fuite 3500 mm

Partie supérieure  
 Diamètre intérieur 154 mm  
 Diamètre extérieur 246 mm

Partie inférieure  
 Diamètre intérieur 168 mm  
 Diamètre extérieur 262 mm

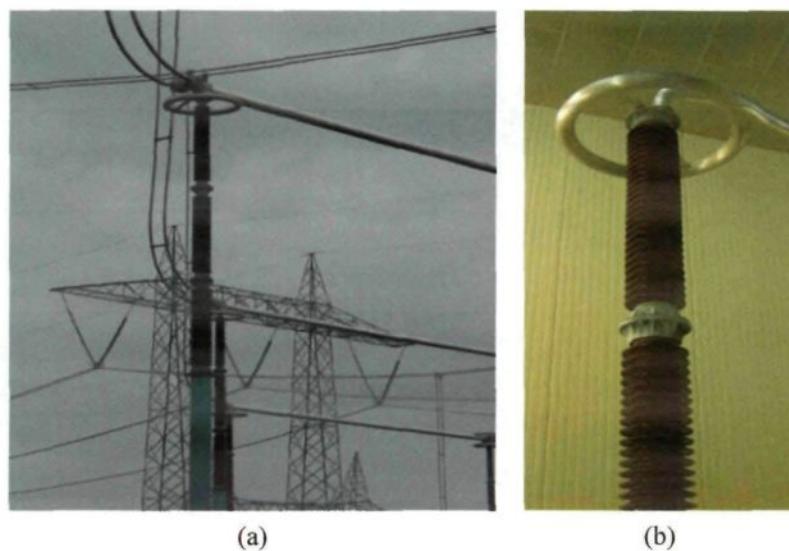
Jupes  
 Nombre 26  
 Pas 50 mm  
 Portée 45 mm  
 Angle supérieur 24,5°  
 Angle inférieur 6°

**Figure 15 :** Colonne isolante standard en porcelaine (2 unités).

### 3.1.2. Anneau de garde

Sur les lignes de transmission aériennes et les postes de distribution et d'interconnexion, l'utilisation des anneaux de garde permet d'assurer une meilleure répartition du gradient de tension à l'intérieur et à l'extérieur du diélectrique constituant l'isolateur afin d'éviter toute décharge électrique partielle, spécifiquement au voisinage des parties portées à la haute tension.

Les anneaux de garde simples sont principalement utilisées dans les postes sur les colonnes isolantes positionnées en terminaison des jeux de barres, tel qu'illustre à la figure 16-a. La figure 16-b présente la configuration utilisée en laboratoire.

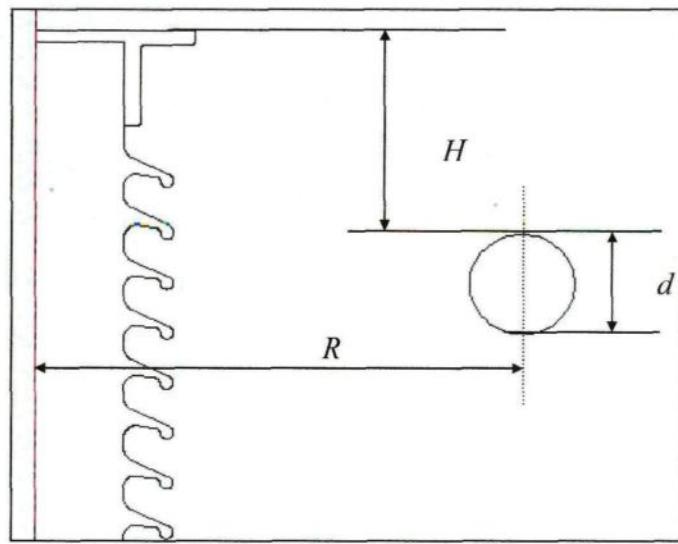


**Figure 16 :** Colonne isolante équipée d'un anneau de garde ; (a) configuration réelle, (b) configuration testée en laboratoire

Les anneaux de garde testés se présentent sous forme d'un anneau métallique fermé en aluminium. Pour la présente étude, la géométrie de l'anneau de garde a été définie par trois

paramètres (figure 17), soit le rayon  $R$  de l'anneau de garde, le diamètre  $d$  du tube et la position  $H$  de l'anneau par rapport à l'électrode. Pour l'anneau de garde standard utilisé pour notre recherche, les valeurs des trois paramètres sont :

- $R = 508$  mm,
- $d = 203$  mm,
- $H = 102$  mm.



**Figure 17 :** Paramétrisation de la géométrie de l'anneau de garde.

### 3.1.3. Chambre climatique

Tous les tests expérimentaux réalisés au cours de cette recherche ont été effectués dans la chambre climatique du laboratoire de haute tension et de givrage atmosphérique de la CIGELE. Cette chambre a une dimension de  $5,8 \times 5,6 \times 10 \text{ m}^3$  (l x L x h), ce qui permet de tester des isolateurs relativement longs.

### 3.1.4. Générateur de gouttelettes d'eau

La chambre climatique est équipée d'un système d'arrosage (voir figure 18), constitué d'un ensemble de huit gicleurs air/eau superposés et montés sur des supports oscillants. Les gicleurs permettent de produire des gouttelettes d'eau dont la taille peut être contrôlée en ajustant manuellement le débit d'eau et d'air .



Figure 18 : Système d'arrosage.

Ce système d'arrosage est placé devant un groupe de ventilateurs qui permettent de fournir le vent nécessaire au transport aéroporté et au refroidissement des gouttelettes d'eau produites par les gicleurs. La conception spécifique de la convergence et de la forme du nid d'abeille situé devant la sortie des ventilateurs permet d'obtenir une vitesse de vent relativement uniforme le long des isolateurs installés verticalement à une distance approximative de 2,1 m des gicleurs [5]. La vitesse du vent est contrôlée et ajustée électroniquement. La disposition des gicleurs et la direction du vent assurent que les

gouttelettes d'eau surfondues arrivent sur les isolateurs avec un angle d'incidence moyen de 53° par rapport à la verticale [1-2].

### **3.1.5. Système de refroidissement**

La chambre climatique est équipée d'un système de refroidissement installé au plafond afin de faciliter la circulation de l'air et l'uniformisation de la température dans tout le volume de la chambre climatique. La chambre est refroidie par l'intermédiaire de trois compresseurs frigorifiques dont la capacité totale est de 372,86 kW. La température peut ainsi atteindre -60 °C et avec une précision de ± 0,2 °C.

### **3.1.6. Système haute tension**

La colonne isolante standard en porcelaine testée est soumise à une tension électrique équivalente à la tension de service utilisée sur les postes d'interconnexion d'Hydro-Québec, c'est-à-dire  $105 \text{ kV}_{\text{rms}}/\text{m}$  de distance d'arc [5]. Pour une distance d'arc de 2,7 m pour les deux unités testées, cela correspond à une tension appliquée de  $285 \text{ kV}_{\text{rms}}$ .

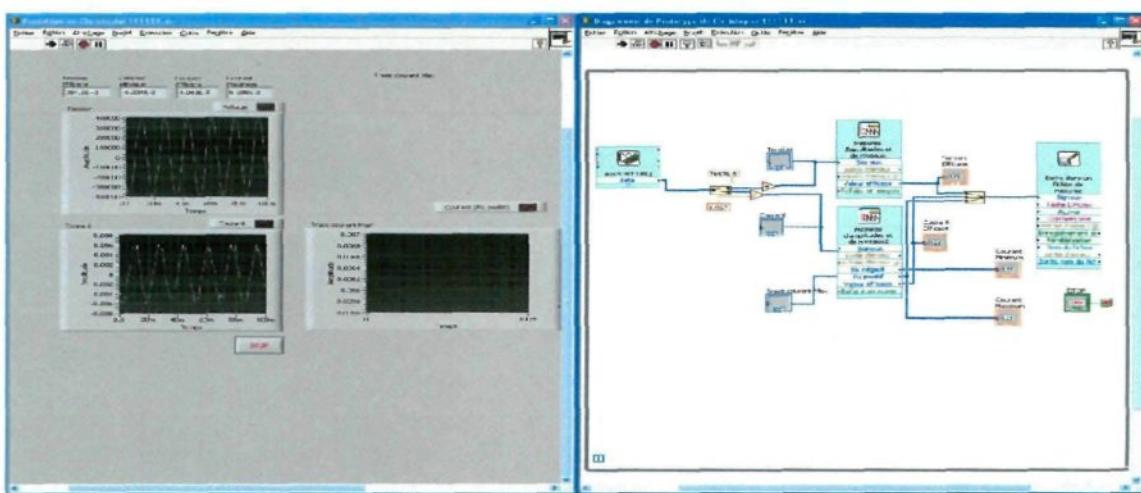
Une traversée haute tension ayant une enveloppe composite remplie de gaz SF<sub>6</sub> assure l'alimentation des isolateurs sous test à partir d'un transformateur haute tension de 350 kV-700 KVA situé dans la salle haute tension du pavillon de recherche sur le givrage atmosphérique (figure 19).



**Figure 19 :** Transformateur AC (350 kV-700 KVA).

### **3.1.7. Système d'acquisition de données**

Pendant toute la durée des tests, l'évolution de la tension appliquée et du courant de fuite sont enregistrés par l'intermédiaire d'un système d'acquisition de données. Ce dernier se compose d'un logiciel commercial (LABVIEW version 8.5.1), d'un ordinateur et d'une carte d'acquisition de données. La figure 20 présente l'interface programmée en LabVIEW. Les différentes données sont enregistrées sous le format Excel afin d'en faciliter le traitement et l'analyse.



**Figure 20 :** Interface LabVIEW du système d'acquisition.

### 3.2. Protocole de test

#### 3.2.1. Séquence d'accumulation

Cette séquence permet de déposer une épaisseur prédéterminée de glace sur l'isolateur sous test à partir des gouttelettes d'eau surfondues. Les conditions expérimentales sont réglées de façon à obtenir un régime d'accumulation dit humide dans le but de produire une glace qui s'apparente fortement à celle résultante des pluies verglaçante [32-33]. Tel que mentionné précédemment, ce type de glace est considéré comme étant le plus dangereux dû à la formation rapide d'un pont de glace sur une grande partie de la surface exposée de l'isolateur [32-33]. Les paramètres expérimentaux permettant d'obtenir une accumulation de glace en régime humide sont présentés dans le **Tableau 1**.

**Tableau 1 : Paramètres expérimentaux pour la formation de la glace en régime humide**

Paramètre d'essai	Valeur du paramètre
Température nominale l'air ambiant durant l'accumulation	-12 °C
Température de l'eau d'accumulation	3 °C
Grosseur des gouttelettes	80 µm
Conductivité nominale de l'eau	30 µS/cm
Intensité des précipitations	34 mm/h
Angle d'incidence	53 °
Vitesse du vent	3,3 m/s
Épaisseur nominale de la glace sur le cylindre témoin	15 mm

La conductivité de l'eau d'accumulation est un paramètre très important lors des essais sous condition de givrage. Le niveau de conductivité est ajusté avant chaque test en utilisant de l'eau distillée à laquelle est ajoutée une quantité prédéterminée de sel. Au Québec, la conductivité de la pluie se situe en moyenne autour de 30 µS/cm [7].

L'eau servant à l'accumulation est préalablement refroidie à une température de 3°C suivant les recommandations décrite dans [3] à l'aide d'un système de refroidissement, tel que présenté à la figure 21.



**Figure 21 :** Système de refroidissement de l'eau d'accumulation.

Il est à noter qu'à la veille de chaque test, la chambre climatique est refroidie à la température de -12°C durant toute la nuit afin que l'isolateur sous test soit porté à la même température que celle de l'air ambiant durant l'accumulation de glace.

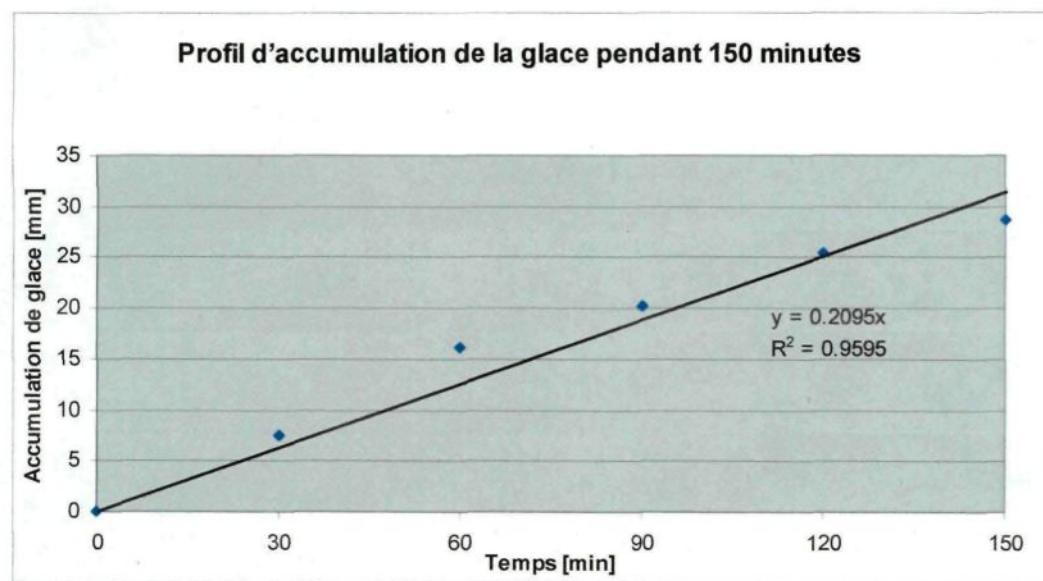
L'épaisseur de la glace accumulée sur l'isolateur est mesurée de façon indirecte à l'aide d'un cylindre témoin de 3,8 cm de diamètre et de 60 cm de longueur tournant à une vitesse de rotation de 1 tour/min (figure 22) [1]. L'épaisseur de la glace déposée sur l'isolateur correspond en fait à l'épaisseur de glace mesurée directement sur le cylindre témoin et obtenue sous les mêmes conditions environnementales. Les résultats de la figure 23 montrent que l'épaisseur radiale est directement proportionnelle au temps d'accumulation.

Ainsi, par exemple, pour un temps d'accumulation d'environ 70 min, une épaisseur radiale de 15mm est ainsi obtenue avec les paramètres expérimentaux présentés au Tableau 1.

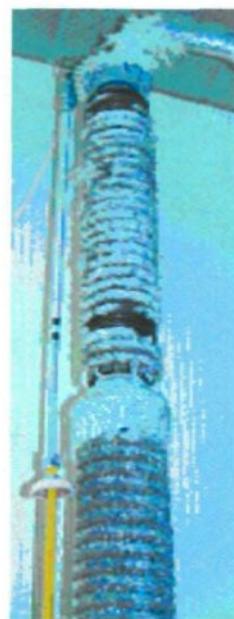
Durant la période d'accumulation, la colonne isolante standard en porcelaine est soumis à une tension électrique équivalente à la tension de service utilisée sur les postes d'interconnexion de d'Hydro-Québec, c'est-à-dire  $285 \text{ kV}_{\text{rms}}$ . Une fois l'épaisseur de glace désirée obtenue (15 mm), le système d'arrosage d'eau est arrêté et la tension d'alimentation coupée. La figure 24, présente l'aspect visuel de la glace obtenue en fin d'accumulation.



**Figure 22 :** Mesure de l'épaisseur de la glace accumulée sur les isolateurs par le cylindre témoin.



**Figure 23 :** Épaisseur de glace mesurée sur le cylindre témoin au cours de la période d'accumulation.



**Figure 24 :** Aspect visuel de la glace humide accumulée sur une colonne isolante standard constituée de deux unités d'isolateur de poste.

### **3.2.2. Séquence de refroidissement**

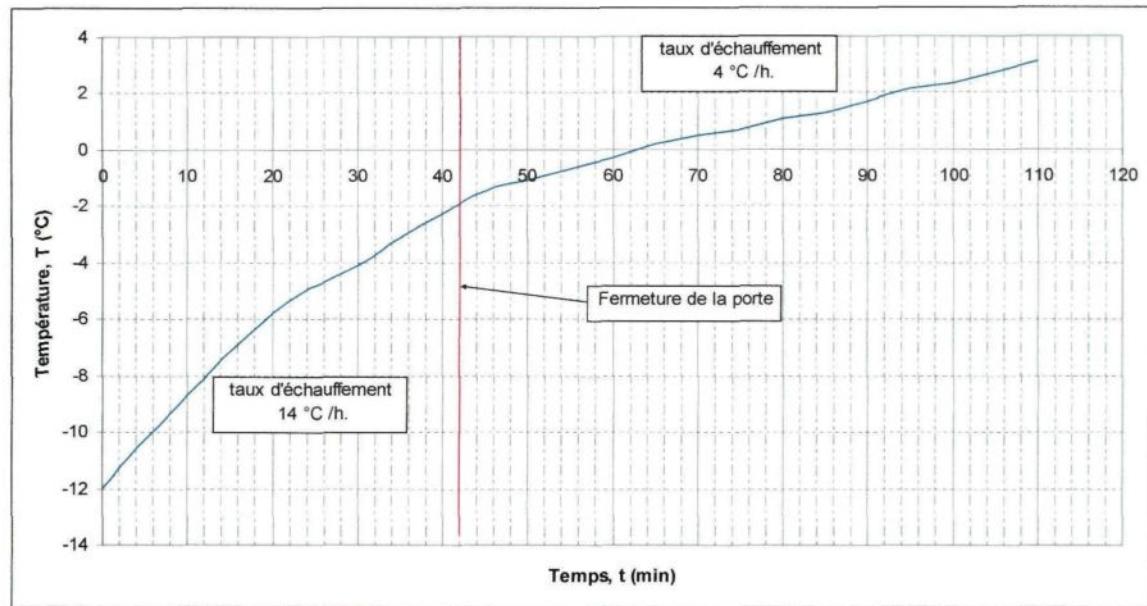
La séquence de refroidissement, d'une durée de 20 minutes, s'effectue à une température identique à celle utilisée en période d'accumulation, soit -12°C, en présence de vent et en absence de tension d'alimentation. Cela permet de garantir que le film d'eau résiduel présent à la surface de glace est entièrement gelé tout en permettant une meilleure adhésion de la glace à la surface de l'isolateur afin d'éviter toute chute prématurée de cette dernière au cours de la séquence de fonte.

### **3.2.3. Séquence de fonte**

Une fois la période de refroidissement écoulée, les ventilateurs ainsi que le système de refroidissement de la chambre climatique sont arrêtés et la colonne isolante est soumise à nouveau à la tension de service de 285 kV<sub>rms</sub>. La température de la chambre climatique est alors augmentée graduellement en combinant l'ouverture de la porte et l'utilisation des chauffages électriques d'appoint. Cette accroissement de la température est réalisée en deux étapes (voir figure 25) [1, 5] :

- De -12 °C à -2 °C avec un taux d'échauffement moyen de 14 °C/h,
- De -2 °C à +3 °C avec un taux d'échauffement moyen de 4 °C /h.

Au début de cette période, le système d'acquisition de données est mis en marche, suivi de la mise sous tension de l'isolateur.



**Figure 25 :** Évolution de la température de la chambre climatique pendant la période fonte.

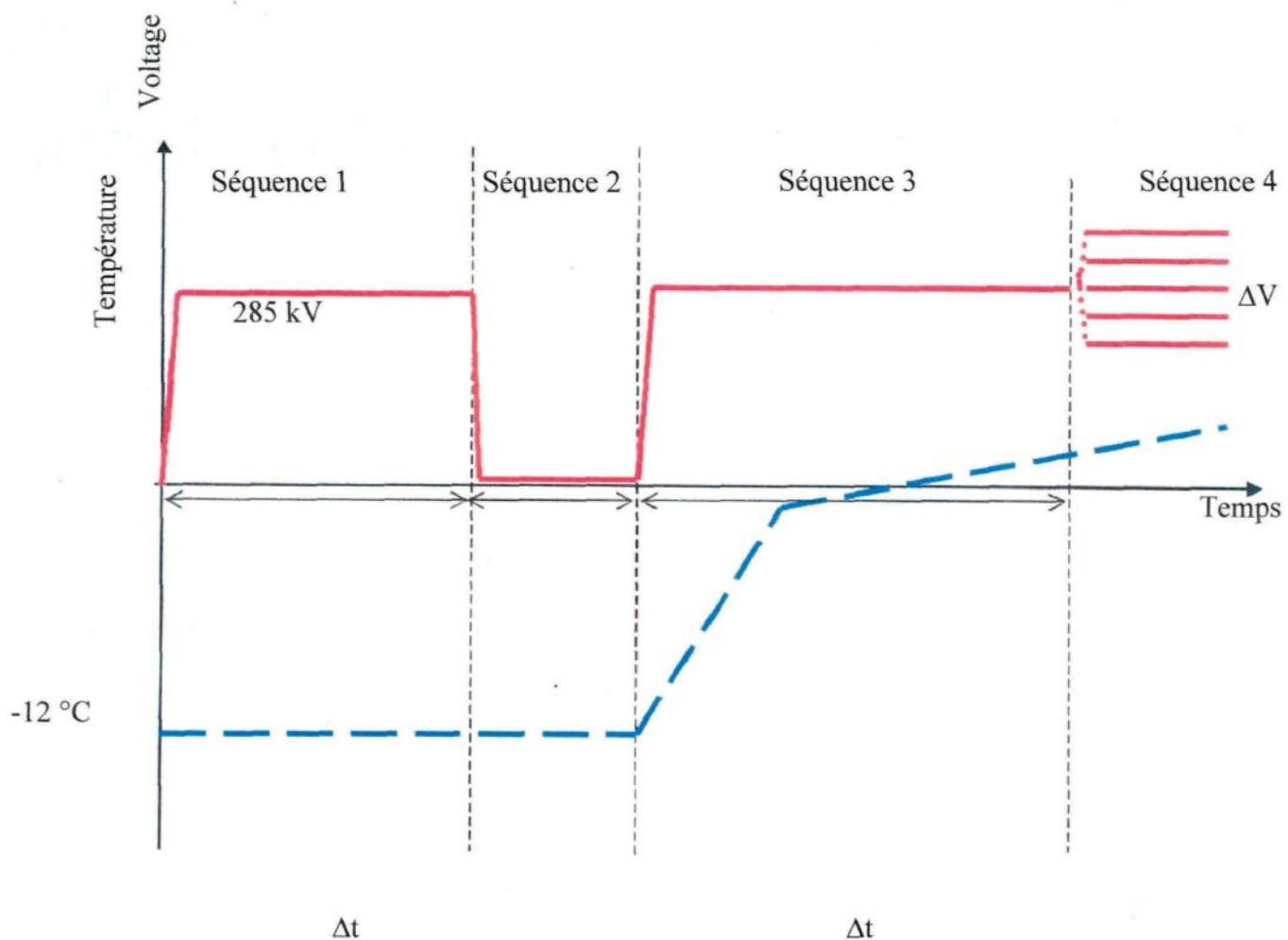
### 3.2.4. Séquence d'évaluation

L'évaluation des performances électriques de la colonne isolant a été basée sur la procédure de détermination de la tension de tenue maximale  $V_{TM}$  développée à la CIGELE [34-35]. La tension d'essai est appliquée lorsque le courant de fuite dépasse le seuil des 20 mA de façon soutenue. Dans le cas contraire, la tension d'essai est appliquée dès que le température dans la chambre climatique atteint -1 °C.

Pour déterminer la  $V_{TM}$ , un nombre minimal de 5 tests est nécessaire. Pour le premier test, le niveau de tension d'essai appliqué est généralement équivalent à la tension de service. Dépendamment du résultat obtenu, contournement ou tenue, la tension d'essai pour le test suivant est réduite ou augmentée d'un palier égale à 5 % de la tension d'essai initiale. Pour cette recherche, le palier utilisé est équivalent à 15 kV. Il est à noter que chaque test

d'évaluation est normalement accompli en une journée et effectué pour une seule instance de glace. Un test est considéré comme une tenue lorsque la température de la chambre atteint +3°C sans qu'il y ait eu de contournement.

Les différentes séquences relatives à la méthode utilisée pour l'évaluation de la tension de tenue maximale sont résumées à la figure 26.



**Figure 26 :** Différentes séquences de la procédure expérimentale.

## CHAPITRE 4

### **ÉTUDE NUMÉRIQUE DE L'INFLUENCE DU NOMBRE D'ANNEAUX DE GARDE SUR LES DISTRIBUTIONS DU POTENTIEL ET DU CHAMP ÉLECTRIQUE D'UNE COLONNE ISOLANTE EN DÉBUT DE PÉRIODE D'ACCUMULATION**

L'étude proposée vise principalement à étudier numériquement l'influence de un ou plusieurs anneaux de garde sur les distribution du potentiel et du champ électrique le long de la colonne isolante obtenues dans les premiers instants de la période d'accumulation de glace.

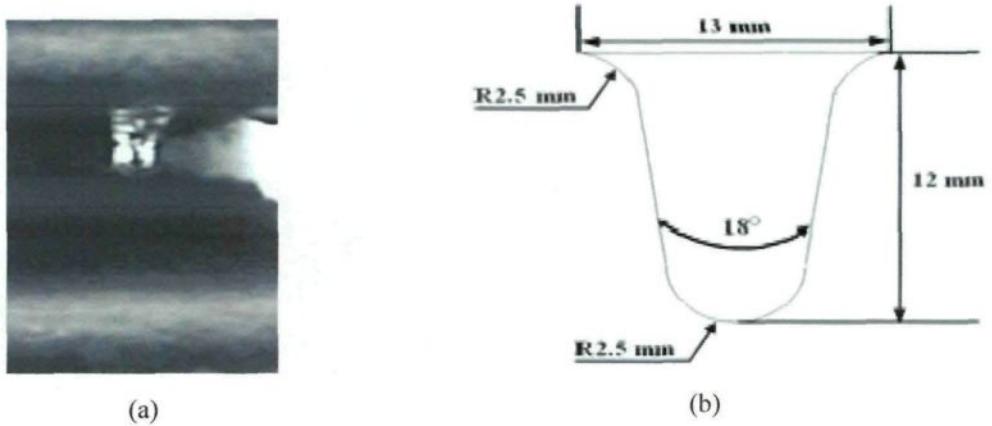
#### **4.1. Modélisation du début de la période d'accumulation**

Tel que présenté dans la revue de littérature, il a été démontré que la géométrie du dépôt de glace accumulée à la surface de l'isolateur est fortement influencée par la distribution du potentiel le long de ce dernier [8-10]. En particulier, ce sont les décharges partielles prenant naissance à l'extrémité des glaçons au cours de la période d'accumulation qui sont responsables de la création des intervalles d'air. Ce sont donc ces dernières qui modèlent la géométrie finale du dépôt de glace [8-10]. Cela est particulièrement vrai pour les glaçons qui se forment sur les premières jupes de la colonne isolante au voisinage de l'électrode H.T. puisque l'intensité du champ électrique y est la plus importante, expliquant du même coup la présence d'intervalles d'air à ces endroits précis [7, 11]. De plus, l'ajout d'un ou plusieurs anneaux de garde permet d'uniformiser la distribution du potentiel le long de l'isolateur et ainsi réduire l'intensité du champ électrique au voisinage de l'électrode H.T.

Le but des simulations proposées est donc de vérifier dans quelle mesure l'ajout d'un ou plusieurs anneaux de garde permet de modifier les distributions du potentiel et du champ électrique, d'influencer la croissance des glaçons et de déterminer quel en est l'effet sur le processus d'accumulation.

Afin de modéliser les premiers instants de l'accumulation de glace, la présence des glaçons entre toutes les jupes de la colonne isolante a donc été prise en compte. La modélisation des glaçons utilisée est extraite de simulations issues d'une étude antérieure réalisée en 3D [9-10]. Dans cette étude, la géométrie des glaçons présentées à la figure 27 a été utilisée. Cette géométrie reflète les dimensions moyennes des glaçons formés en régime humide sous les conditions environnementales identiques à celles utilisées dans nos tests expérimentaux [9]. Les dimensions retenues correspondent à une géométrie de glaçons obtenue après 5 minutes d'accumulation, temps qui correspond en général à l'apparition des premières décharges partielles à la pointe de ces derniers [10].

Comme les glaçons sont formés en régime humide, il faut également prendre en compte la présence d'un film d'eau à leur surface. Le tableau 2 résume les paramètres relatifs aux différents matériaux utilisés dans les simulations numériques dont les valeurs sont tirées d'études antérieures [9].



**Figure 27 :** Géométrie des glaçons utilisée [10].

**Tableau 2 : Paramètres de simulation utilisés en période d'accumulation**

	Porcelaine	Air	Glace	Film d'eau
$\varepsilon_r$	6	1	75	81
Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 20°C	0	0	0	30
Épaisseur (mm)	-	-	30	0.15

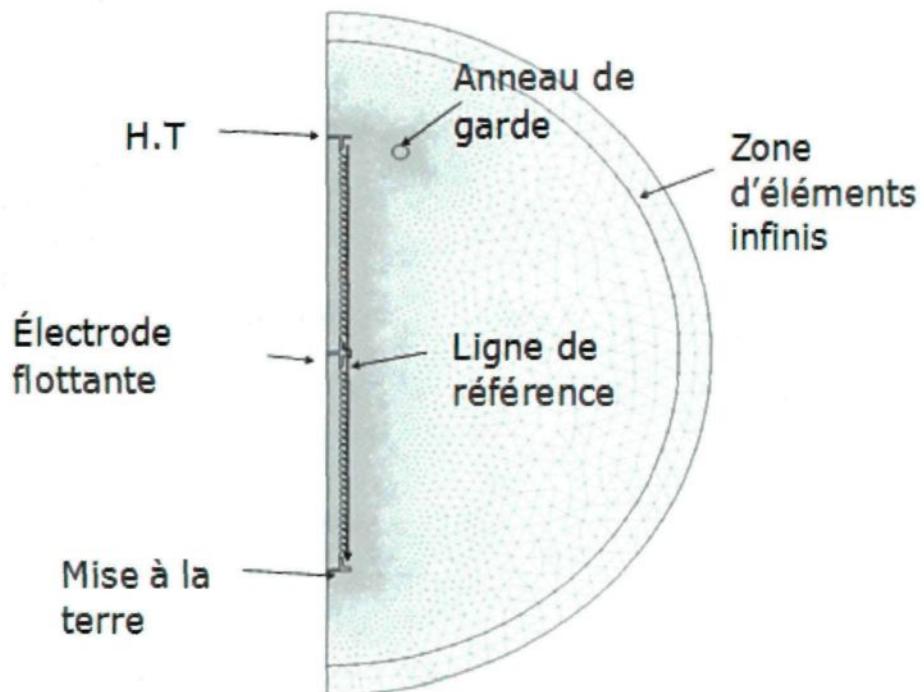
Toutes les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel commercial d'éléments finis COMSOL Multiphysics. Notre choix s'est porté sur ce logiciel car il offre de nombreuses fonctionnalités qui permettent de simuler aisément la présence du film d'eau conducteur à la surface des glaçons de par l'utilisation de conditions aux frontières spécifiques pour les surfaces conductrices de faible épaisseur, tel que décrit en détail dans [11]. De plus, COMSOL Multiphysics permet de prendre en compte les problèmes ouverts par l'utilisation d'éléments infinis, ce qui permet de diminuer grandement la taille du problème. Enfin, COMSOL Multiphysics a déjà été utilisé avec succès dans une étude antérieure portant sur la modélisation des isolateurs de poste recouverts de glace en période de fonte [12].

Afin de simplifier la taille du problème, il a été décidé d'utiliser une modélisation axisymétrique de la colonne isolante en début de période d'accumulation. En effet, l'utilisation d'une symétrie axisymétrique permet de réduire considérablement la taille du problème comparé aux simulations tridimensionnelles tout en obtenant des résultats satisfaisants, tel que démontré dans [10, 12].

La figure 28 présente le modèle numérique de la colonne isolante glacée équipée d'un anneau de garde. L'anneau est modélisé comme une surface équipotentielle portée au même potentiel que l'électrode à laquelle il est rattaché. Pour la modélisation de la colonne isolante sans anneau, il suffit simplement de modifier la condition aux frontières imposées sur l'anneau de garde qui devient une condition de continuité. Il est à noter que par soucis de simplification, la présence de glaçons sur l'anneau de garde n'a pas été prise en compte dans les simulations [7].

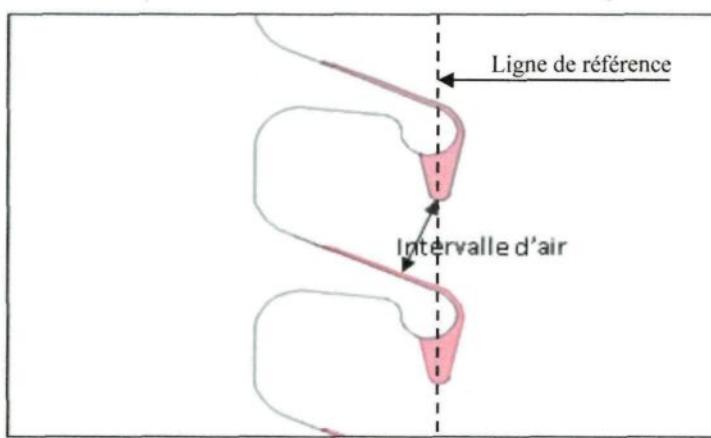
Pour les simulations, un maillage d'environ 400500 éléments triangulaires quadratiques a été utilisé (voir figure 28).

Les distributions du potentiel et du champ électrique ont été calculées suivant la même ligne de référence qui est présentée à la figure 28. Cette ligne passe par l'extrémité de chaque glaçon. 5000 points ont été utilisés le long de cette dernière pour déterminer la distribution de potentiel et 10000 points pour la distribution du champ électrique.



**Figure 28 :** Présentation du modèle numérique de la colonne isolante équipée de l'anneau de garde.

La figure 29 présente une vue plus précise de la modélisation des glaçons présents entre les jupes de la colonne isolante. Cette figure permet aussi de définir l'intervalle d'air qui sera considéré dans les sections suivantes dont la longueur représente la distance minimale entre l'extrémité du glaçon et la surface opposée de glace.



**Figure 29 :** Modélisation des glaçons présents entre les jupes de la colonne isolante.

#### 4.2. Étude avec un anneau de garde sur l'électrode H.T

Cette partie porte sur l'étude de la colonne isolante en début d'accumulation et équipée d'un anneau de garde standard sur l'électrode H.T. Cette configuration représente la configuration standard utilisée dans les postes, tel que présentée à la figure 16. Les distributions du potentiel et du champ électrique sont comparées aux distributions obtenues avec la colonne isolante recouvertes de glaçons mais sans anneau de garde.

Les figures 30 et 31 présentent respectivement les distributions du potentiel et du champ électrique obtenues avec et sans anneau de garde le long de la ligne de référence (voir figures 28) passant par l'extrémité des glaçons (figure 29). Les résultats obtenus montrent que l'ajout de l'anneau de garde entraîne une meilleure uniformisation de la distribution du potentiel le long de la colonne isolante (figure 30). Cette uniformisation se traduit principalement par une diminution importante de l'intensité du champ électrique au voisinage de l'électrode H.T (figure 31).

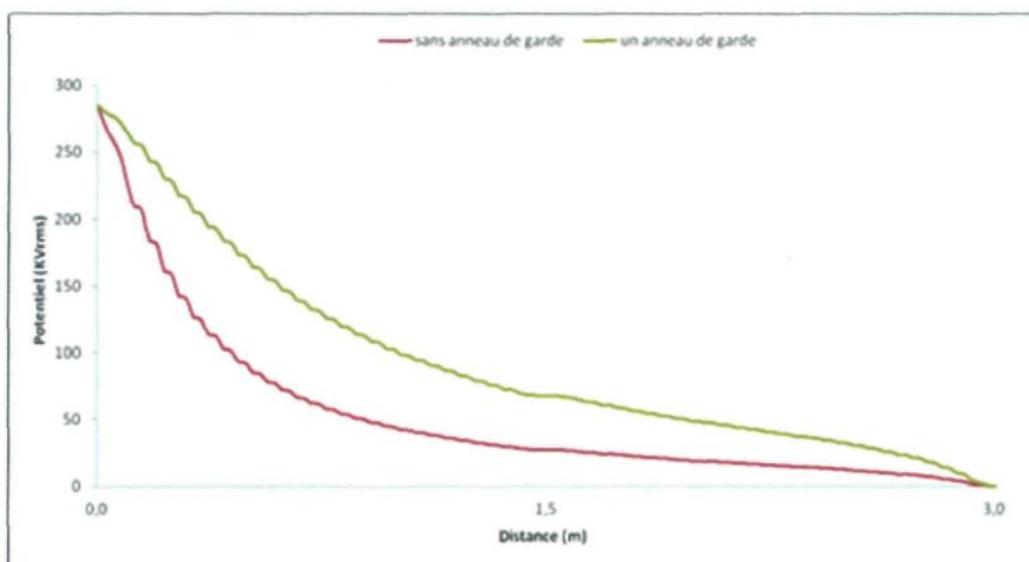
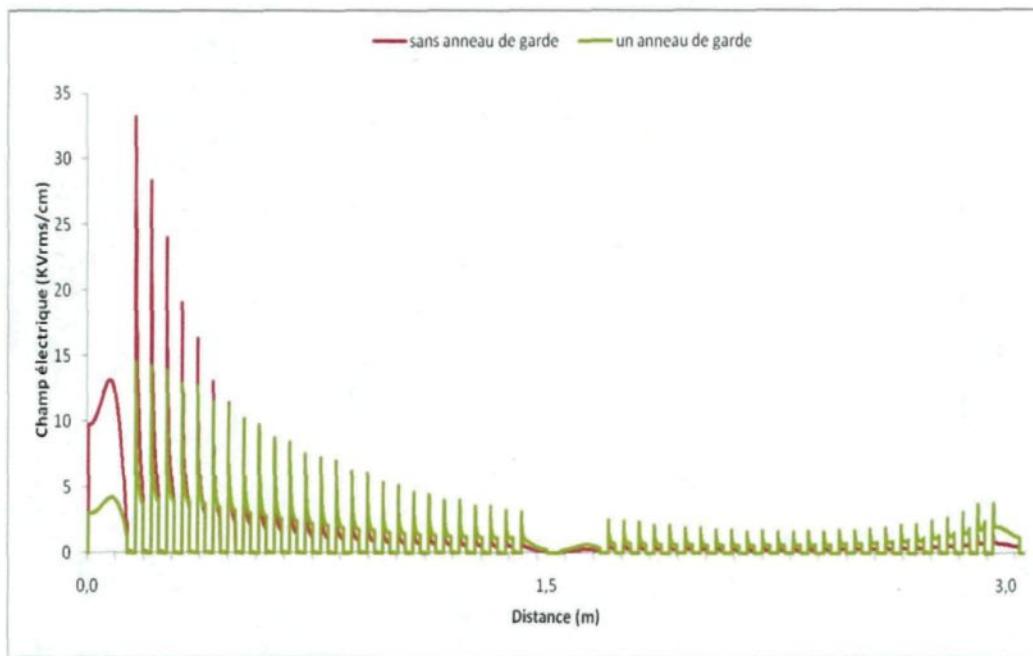


Figure 30 : Distribution du potentiel le long de la colonne isolante glacée avec et sans anneau de garde.



**Figure 31 :** Distribution du champ électrique le long de la colonne isolante glacée avec et sans anneau de garde.

En effet, d'après la figure 31, on peut remarquer que la distribution du champ électrique présente des pics étroits dont les valeurs maximales correspondent en fait au champ électrique à l'extrémité de chaque glaçon. Ainsi, l'ajout de l'anneau de garde permet une réduction de plus de 50% de l'intensité du champ électrique à l'extrémité des glaçons présents sur les trois premières jupes.

Afin de déterminer si cette réduction importante du champ électrique peut inhiber l'apparition des décharges partielles à l'extrémité des glaçons présent aux trois premières jupes, il a été décidé de calculer la chute de tension le long des intervalles d'air (définis à la figure 29) de l'unité du haut ou l'intensité des pics de champ électriques sont les plus importants. Les valeurs de chutes de tension calculées peuvent être ainsi comparées aux tensions de claquage d'un intervalle d'air formé par un glaçon en configuration pointe-plan

données par l'équation (1). Cette équation, extraite d'une étude expérimentale, est donnée par [10] :

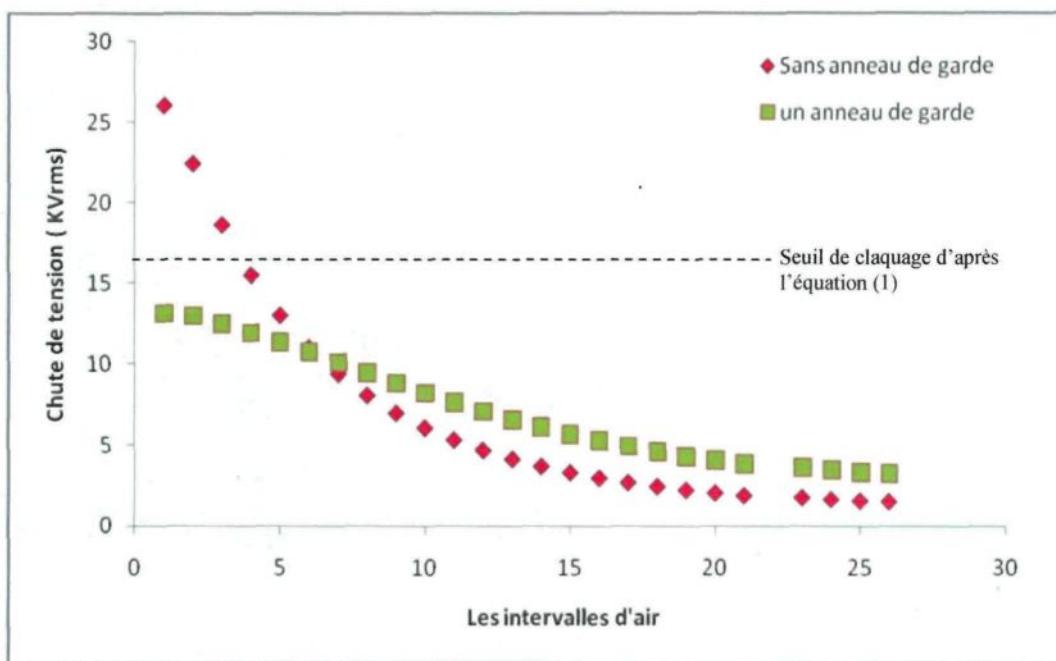
$$V_b (\text{kV}_{\text{rms}}) = 4,1x(\text{cm}) + 9,0 \quad (1)$$

où  $x$  est la longueur de l'intervalle d'air et  $V_b$  la tension de claquage de l'intervalle d'air.

Il est à noter que la tension de claquage donnée par l'équation (1) a été obtenue pour une température de  $+1^\circ\text{C}$ , ce qui suppose la présence d'un film d'eau à la surface du glaçon et peut donc être considéré équivalent à un régime humide [10].

Les résultats, présentés à la figure 32, montrent que l'ajout de l'anneau de garde entraîne effectivement une diminution importante de la chute de tension le long des quatre premiers intervalles d'air formés par les glaçons. Il est intéressant de noter que la réduction de la chute de tension obtenue est à l'image de la réduction du champ électrique. Ainsi, d'après l'équation (1), il faut environ  $15,3 \text{ kV}_{\text{rms}}$  de chute de tension pour pouvoir claquer l'intervalle d'air d'une longueur de  $1,53 \text{ cm}$  formé entre l'extrémité du glaçon et la surface de glace opposée. Donc d'après les résultats de la figure 32, des arcs électriques partiels sont susceptibles d'apparaître à l'extrémité des glaçons formés sur les trois premières jupes de l'isolateur du haut en l'absence d'anneau de garde, ce qui explique la présence de l'intervalle d'air obtenu en fin d'accumulation, tel qu'observé expérimentalement. Par contre, avec l'ajout de l'anneau de garde, les valeurs de chutes de tension le long de ces mêmes intervalles sont en dessous du seuil de claquage. Cela suppose donc que l'ajout de

l'anneau de garde permet d'inhiber la formation de l'intervalle d'air au voisinage de l'électrode H.T., tel que confirmé par les tests expérimentaux présentés à la section 5.



**Figure 32 :** Chutes de tension obtenue le long de chaque intervalle d'air pour l'unité supérieure de la colonne isolante avec et sans anneau de garde.

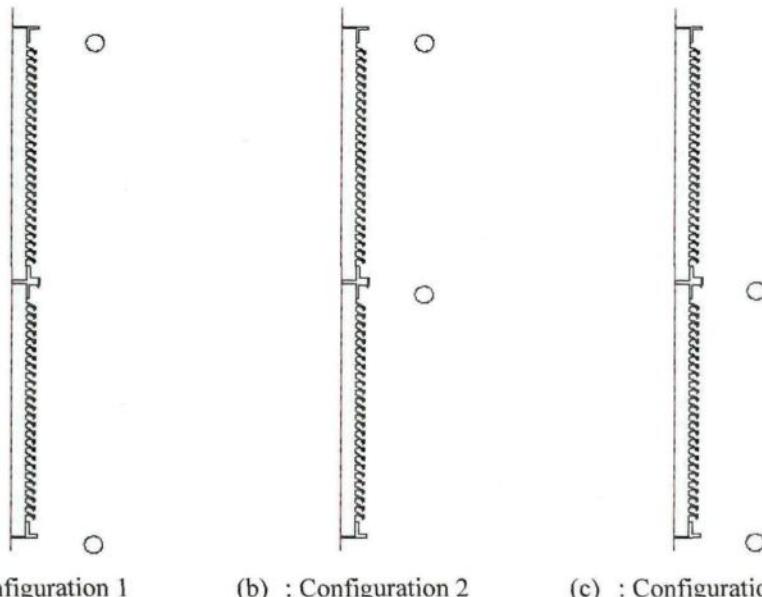
#### 4.3. Étude avec deux anneaux de garde

Cette partie porte sur l'étude de l'influence de l'ajout de deux anneaux de garde standard sur les distributions du potentiel et du champ électrique. La colonne isolante étudiée, constituée de deux unités d'isolateurs de poste, possède donc trois électrodes dont une est portée à la H.T., une est porté à un potentiel flottant (liaison mécanique entre les deux unités) et la dernière est mise à la terre. Dans ce contexte d'utilisation de deux anneaux de garde, toutes les configurations possibles de positionnement de ces derniers ont été étudiées, à savoir :

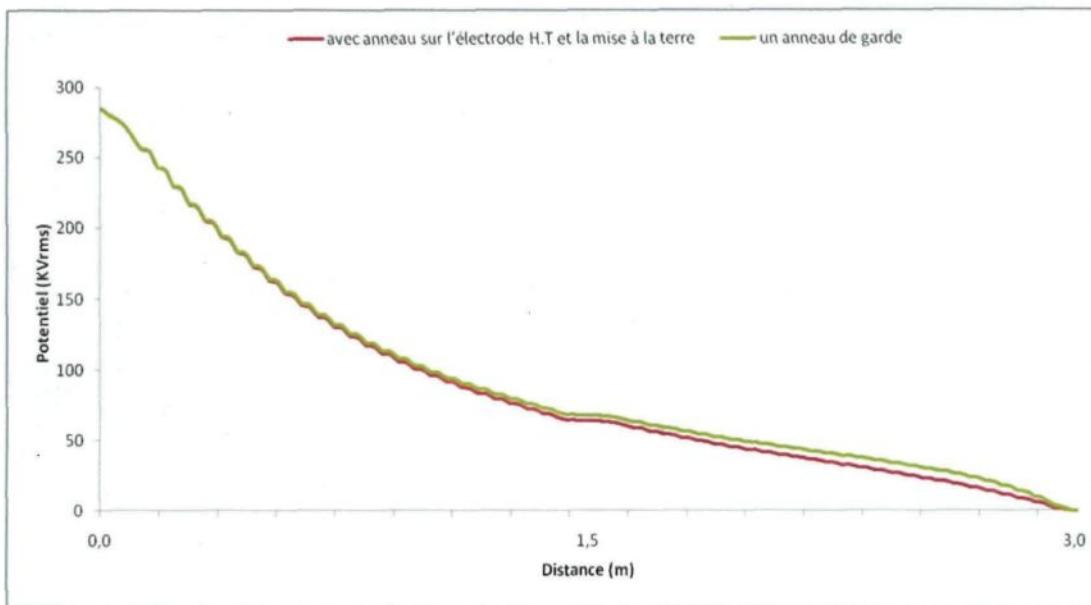
- Configuration 1 : un anneau de garde sur l'électrode H.T. et un autre sur l'électrode de mise à la terre (figure 33-a),
- Configuration 2 : un anneau de garde sur l'électrode H.T. et un autre sur l'électrode flottante (figure 33-b),
- Configuration 3 : un anneau de garde sur l'électrode flottante et un autre sur l'électrode de mise à la terre (figure 33-c).

Pour chaque configuration, les distributions du potentiel et du champ électrique ont été calculées suivant la même ligne de référence (voir figures 28 et 29) et comparées avec les distributions obtenues avec un anneau de garde sur l'électrode H.T.

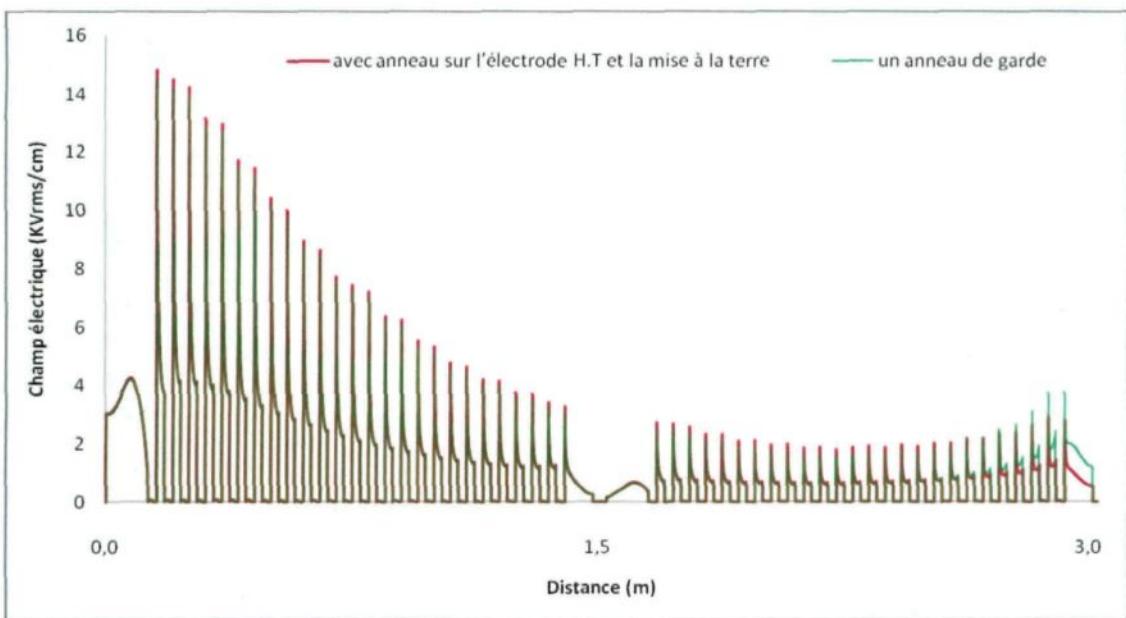
Les figures 34 et 35 présentent respectivement les distributions du potentiel et du champ électrique obtenues avec la configuration 1.



**Figure 33 :** Présentations des trois configurations étudiées avec deux anneaux de garde.

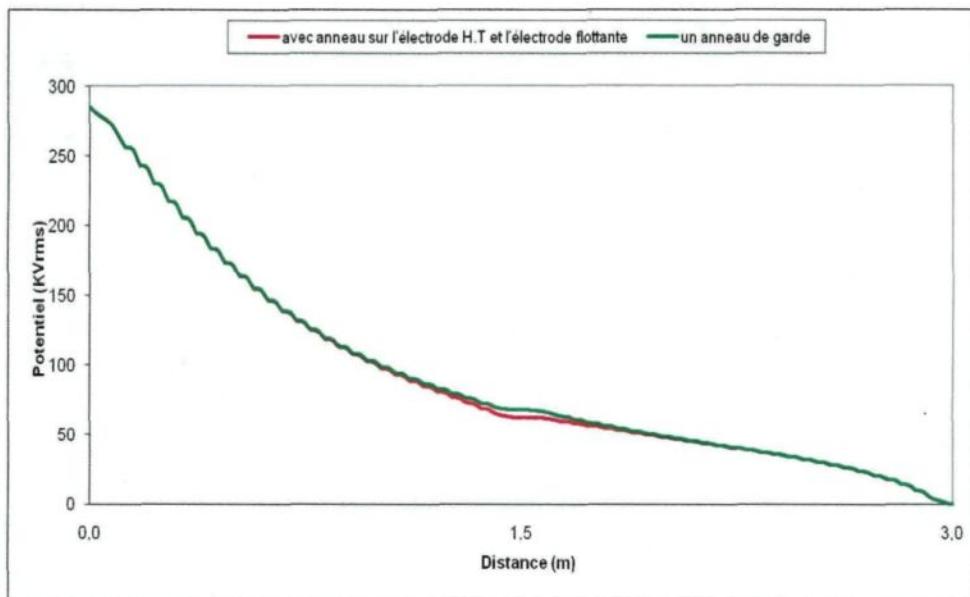


**Figure 34 :** Comparaison des distributions du potentiel obtenues avec la configuration 1 et avec un seul anneau positionné sur l'électrode H.T.

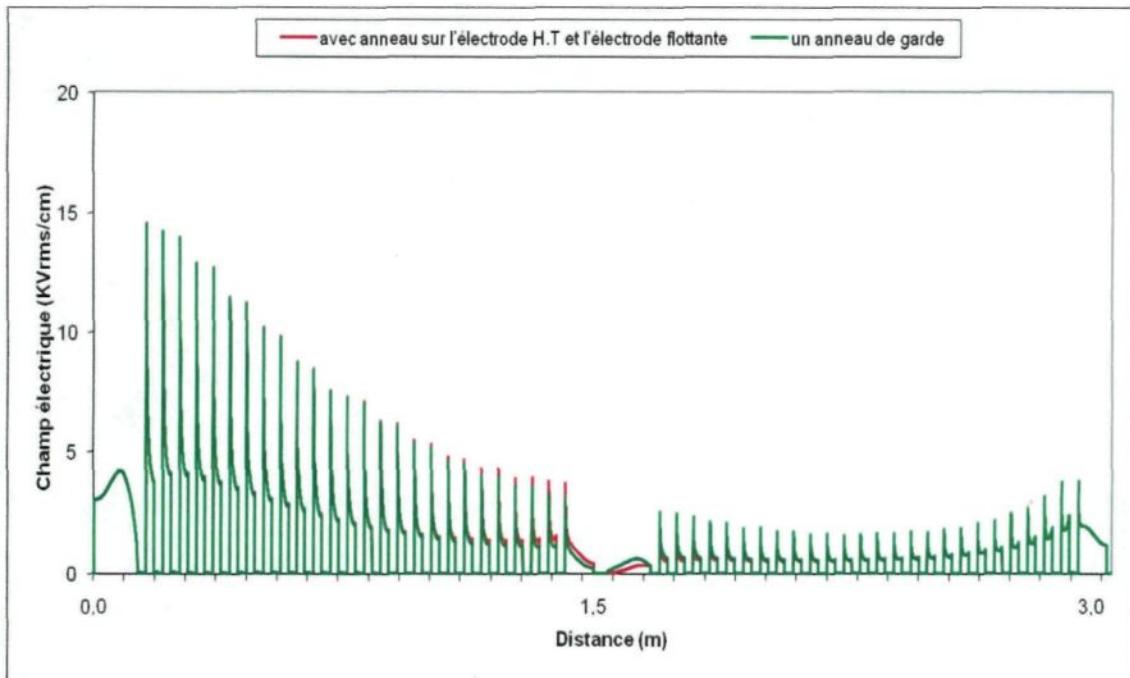


**Figure 35 :** Comparaison des distributions du champ électrique obtenues avec la configuration 1 et avec un seul anneau positionné sur l'électrode H.T.

Les figures 36 et 37 présentent respectivement les distributions du potentiel et du champ électrique obtenues avec la configuration 2.

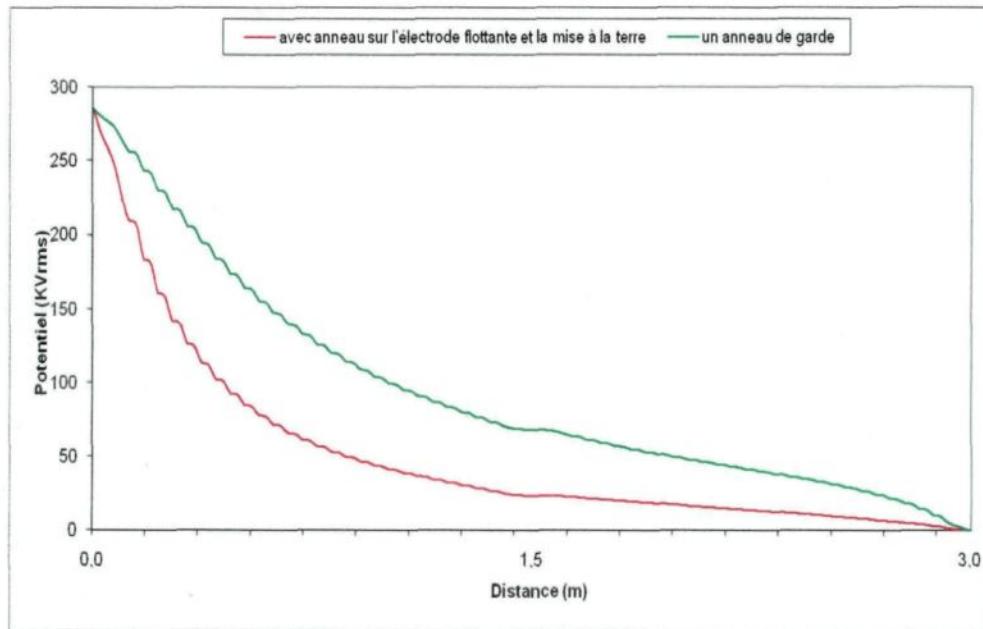


**Figure 36 :** Comparaison des distributions du potentiel obtenues avec la configuration 2.

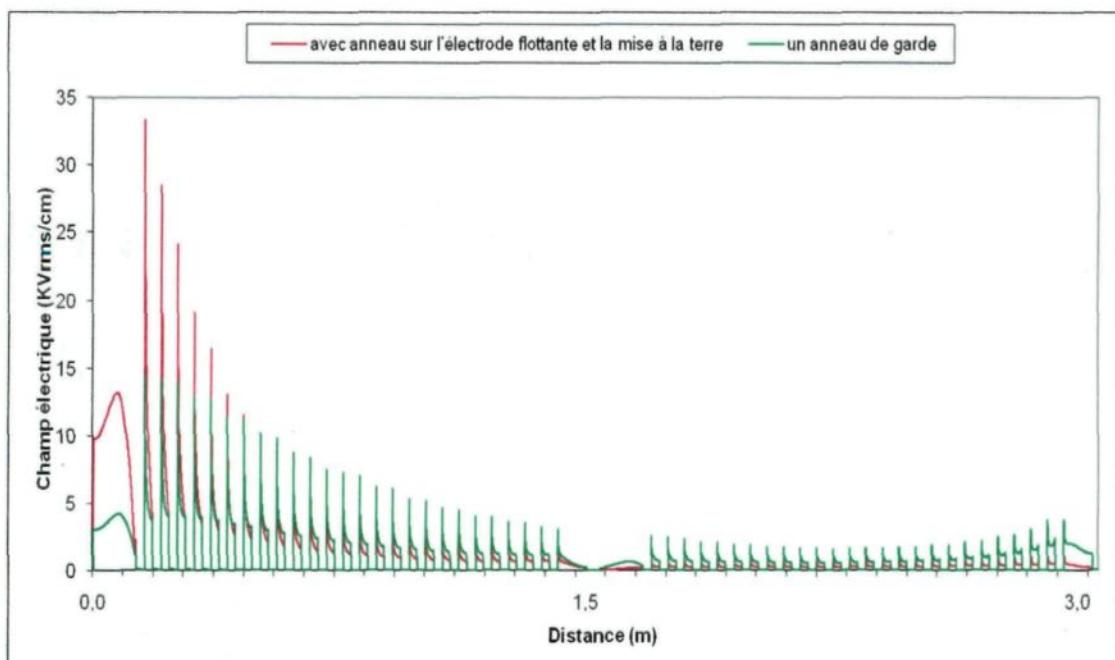


**Figure 37 :** Comparaison des distributions du champ électrique obtenues avec la configuration 2.

Les figures 38 et 39 présentent respectivement les distributions du potentiel et du champ électrique obtenues avec la configuration 3.



**Figure 38 :** Comparaison des distributions du potentiel obtenues avec la configuration 3.



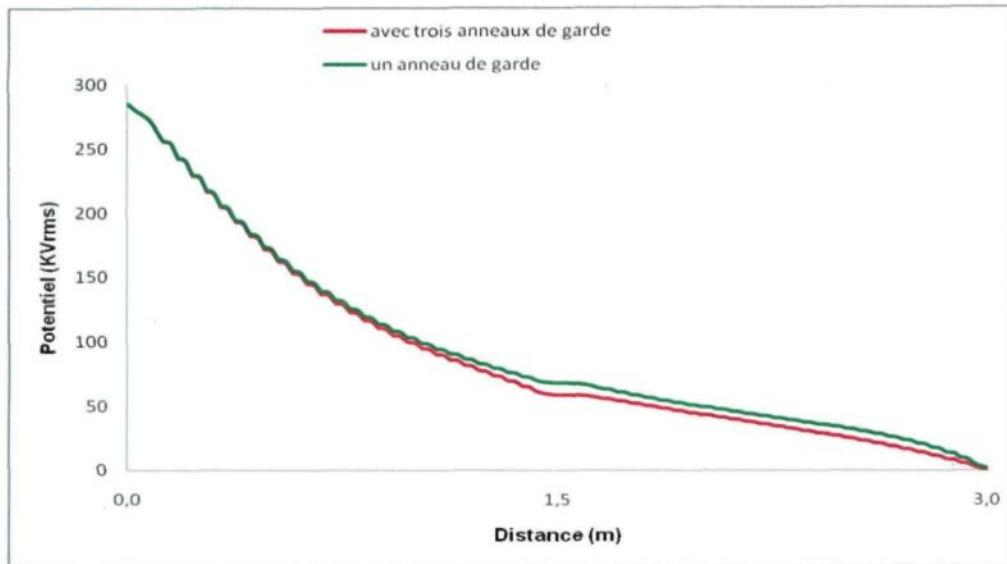
**Figure 39 :** Comparaison des distributions du champ électrique obtenues avec la configuration 3.

De façon générale, les résultats présentés aux figures 34 à 39 montrent que l'ajout d'un deuxième anneau de garde à la colonne isolante n'entraîne pas d'amélioration notable au niveau de la linéarisation de la distribution du potentiel et la réduction du champ électrique qui l'accompagne. Pour la configuration 1 (figure 33-a), on peut remarquer une amélioration de la distribution du potentiel le long de l'unité du bas de la colonne isolante (figure 34), ce qui se traduit par une réduction sensible du champ électrique au voisinage de l'électrode de mise à la terre (figure 35). Pour la configuration 2 (figure 33-b), une légère modification est observable au niveau de l'électrode flottante où est positionné le second anneau de garde (figures 36 et 37). Enfin, pour la configuration 3 (figure 33-c), l'ajout d'un anneau de garde sur l'électrode de mise à la terre et sur l'électrode flottante n'a pas de réelle influence sur la distribution du potentiel puisque cette dernière est très similaire à la distribution de potentiel de la colonne seule (figure 30). Cela démontre bien que pour obtenir une linéarisation du potentiel le long de la colonne isolante, au moins un anneau de garde placé sur l'électrode portée à la haute tension est nécessaire.

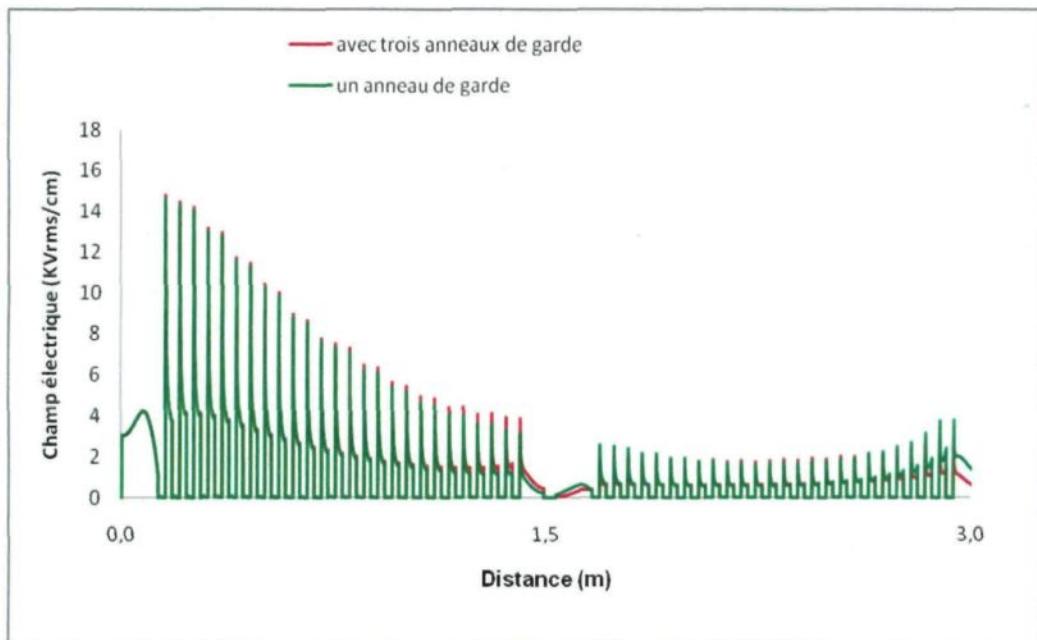
#### **4.4. Étude avec trois anneaux de garde**

Pour cette dernière partie, un anneau de garde standard a été placé sur chacune des trois électrodes. Les distributions du potentiel et du champ électrique sont respectivement présentées aux figures 40 et 41.

La figure 42, quant à elle, présente la distribution des chutes de tensions le long des intervalles d'air présents sur l'unité du haut de la colonne isolante.



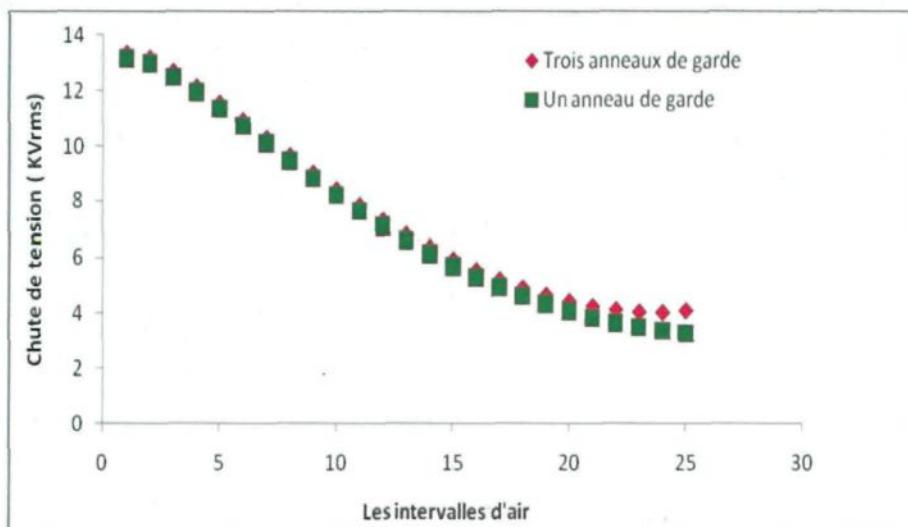
**Figure 40 :** Distributions du potentiel le long de la colonne isolante équipée de trois anneaux de garde.



**Figure 41 :** Distributions du champ électrique le long de la colonne isolante équipée de trois anneaux de garde.

Les différents résultats obtenus montre que l'ajout d'un anneau de garde sur chacune des électrodes de la colonne isolante ne permet pas d'obtenir une grande amélioration au niveau de l'uniformisation du potentiel et de la réduction du champ électrique par rapport à la

configuration à un seul anneau. Cette faible modification engendrée par l'utilisation de trois anneaux de garde se retrouve dans la distribution des chutes de tension obtenues le long des intervalles d'air de l'unité du haut (figure 42) où l'on peut remarquer une faible augmentation de ces dernières au niveau de l'électrode flottante et aucune modification au niveau de l'électrode H.T.



**Figure 42 :** Distribution de la chute de tension le long de la colonne isolante glacée équipée de trois anneaux de garde.

#### 4.5. Discussion des résultats

Les résultats numériques obtenus ont permis de démontrer que l'ajout d'un seul anneau de garde de géométrie standard sur l'électrode H.T. est la configuration la plus économique pour obtenir une distribution de potentiel la plus uniforme avec une réduction importante de l'intensité du champ électrique au voisinage de l'électrode H.T. Cette réduction importante du champ électrique au niveau des trois premières jupes du haut se traduit par une réduction significative de la chute de tension au niveau des trois premiers intervalles d'air, permettant

ainsi d'inhiber la formation de décharges partielles à l'extrémité des glaçons. L'absence de décharges partielles permet ainsi aux glaçons de croître librement au cours de l'accumulation de glace, ce qui favorise ainsi la formation du pont de glace et l'obtention d'un dépôt de glace plus uniforme le long de la colonne isolante. Cela sera confirmé par les tests expérimentaux présentés à la section 5.

Les résultats ont aussi démontrés que l'ajout d'anneaux de garde sur l'électrode flottante et de mise à la terre n'entraîne pas d'amélioration notable des distributions du potentiel et du champ électrique, et donc de réduction des chutes de tension au niveau des intervalles d'air. L'utilisation d'un seul anneau de garde sur l'électrode H.T. reste donc la solution la plus efficace. Dans ce contexte, il a été décidé d'effectuer une étude paramétrique afin de déterminer l'influence du rayon  $R$  de l'anneau de garde et de sa position  $H$  par rapport à l'électrode H.T. afin de déterminer les dimensions optimales permettant d'obtenir la meilleure uniformisation de la distribution de potentiel et réduction du champ électrique le long de la colonne isolante, tel que présenté à la section suivante.

## CHAPITRE 5

### ÉTUDE PARAMÉTRIQUE ET ESSAIS EXPÉRIMENTAUX AVEC UN ANNEAU DE GARDE SUR L'ÉLECTRODE H.T.

Tel que démontré par les résultats numériques présentés à la section précédente, l'ajout d'un anneau de garde de géométrie standard sur l'électrode H.T. permet de réduire l'intensité du champ électrique aux niveaux des premières jupes voisines de l'électrode H.T., ce qui permet de réduire le risque d'apparition de décharges partielles à l'extrémité des glaçons et d'obtenir ainsi une distribution de glace plus uniforme.

Dans ce contexte, il a été décidé d'effectuer une étude paramétrique avec un seul anneau de garde fixé à l'électrode H.T. afin de vérifier si les dimensions standard de ce dernier sont les dimensions optimales permettant d'obtenir la distribution de potentiel la plus uniforme possible.

L'étude paramétrique proposée consiste donc à déterminer numériquement l'influence des paramètres géométriques principaux de l'anneau de garde présentés à la figure 17, soit le rayon  $R$  de l'anneau et sa position  $H$  par rapport à l'électrode H.T. sur la distribution du potentiel et du champ électrique le long de la colonne isolante en début de période d'accumulation. Il est important de mentionner que dans cette étude, la topologie globale de l'anneau de garde, c'est-à-dire sa forme géométrique globale qui est un anneau tubulaire de

forme circulaire ainsi que le diamètre  $d$  du tube sont conservés et que seuls les paramètres  $R$  et  $H$  sont modifiés. Ce choix conservateur est basé sur les résultats issus d'études antérieures réalisées sur les isolateurs composites de ligne [16-20] qui ont permis de démontrer qu'un anneau de forme tubulaire demeure la meilleure configuration en terme de réduction de l'intensité du champ électrique à la surface de l'anneau et au voisinage de l'électrode H.T. Qui plus est, ces études antérieures ont montré que le diamètre du tube constituant l'anneau de garde a une influence moindre par rapport aux paramètres  $R$  et  $H$ .

L'étude paramétrique proposée est réalisée par le couplage du logiciel commercial COMSOL Multiphysics© avec le logiciel Matlab au sein duquel a été implémenté l'algorithme nécessaire au calcul d'optimisation. Le modèle numérique utilisé est identique à celui de la figure 28 qui prend en compte la présence de glaçons en début de période d'accumulation.

Les contraintes imposées pour l'étude paramétrique sont les suivantes :

- Le champ électrique à la surface de l'anneau de garde doit être au dessous d'une valeur seuil fixée à 17 kV/cm d'après [20],
- La distance entre l'anneau de garde et l'électrode de mise à la terre ne devra pas être plus petite que la distance d'arc de la colonne isolante afin de ne nuire aux performances de cette dernière sous conditions normales d'utilisation .

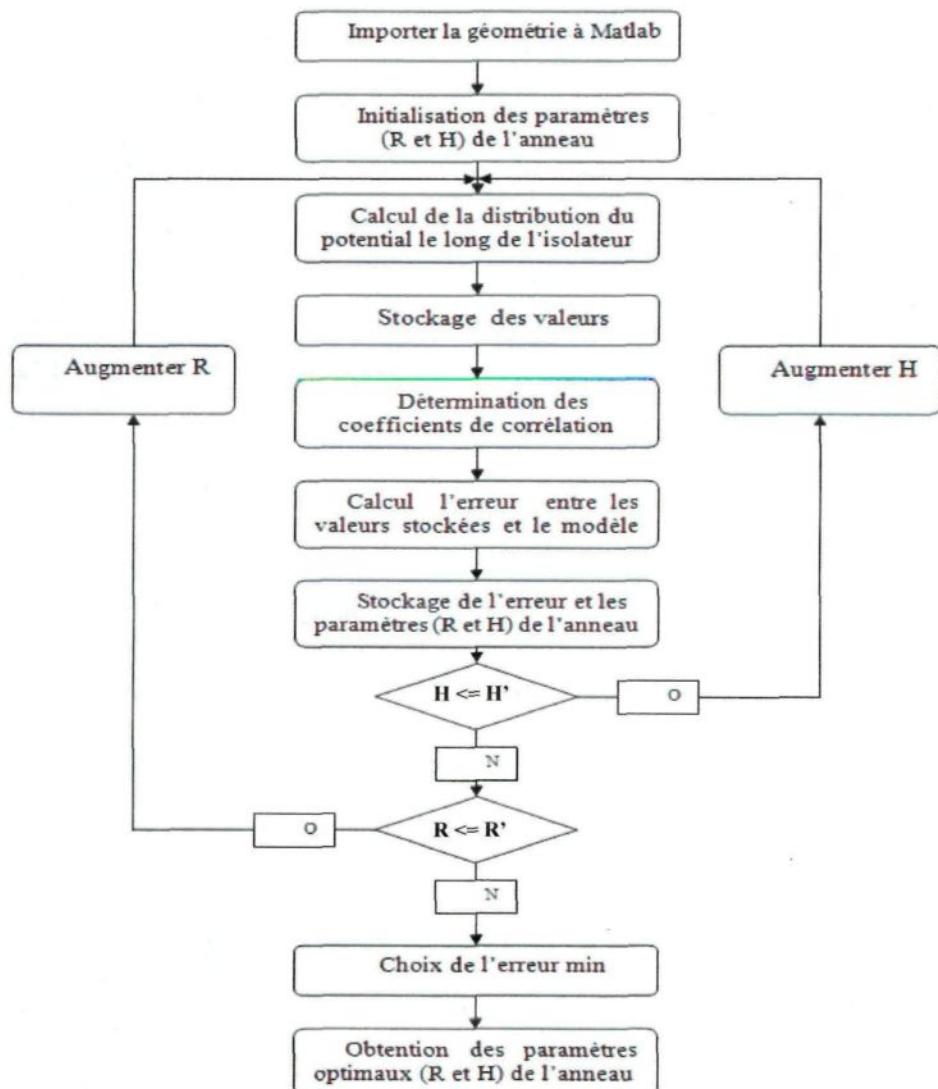
### 5.1. Présentation de l'algorithme développé

L'étude paramétrique proposée consiste donc à calculer les distributions du potentiel obtenues pour différentes valeurs des paramètres  $R$  et  $H$  et de les comparer par moindre carré avec une distribution de potentiel considérée idéalement uniforme le long de la colonne isolante. À cet effet, un algorithme spécifique, présenté à la figure 43, a été développé et implémenté sous Matlab qui est couplé avec COMSOL Multiphysics<sup>©</sup>.

Pour chaque valeur du vecteur  $(R, H)$ , la distribution du potentiel le long de la colonne isolante est calculée avec COMSOL Multiphysics<sup>©</sup> et les valeurs de potentiel sont stockées. Par la suite, l'algorithme détermine les coefficients de corrélation linéaire ( $a$  et  $b$ ) de la droite des moindres carrés ( $y = ax + b$ ) ainsi que l'erreur entre les valeurs stockées et le modèle linéaire obtenu. Les valeurs obtenues de l'erreur et du vecteur  $(R, H)$  correspondantes sont stockées. Par la suite, les contraintes imposées sont vérifiées. Si les conditions ne sont pas atteintes les valeurs du vecteur  $(R, H)$  sont incrémentées. Les valeurs optimales sont obtenues lorsque l'erreur minimale est atteinte.

Il est important de rappeler que lors des simulations, ce sont principalement les valeurs des paramètres  $R$  et  $H$  qui ont été modifiées puisque la valeur initiale du diamètre  $d$  du tube de l'anneau de garde standard permettait de respecter la contrainte imposée concernant la valeur du champ électrique à la surface de l'anneau de garde fixée à 17 kV/cm d'après [20]. De plus, il faut ajouter que les simulations ont été réalisées en prenant en compte la présence des glaçons afin de vérifier l'influence des paramètres  $(R, H)$  sur les chutes de

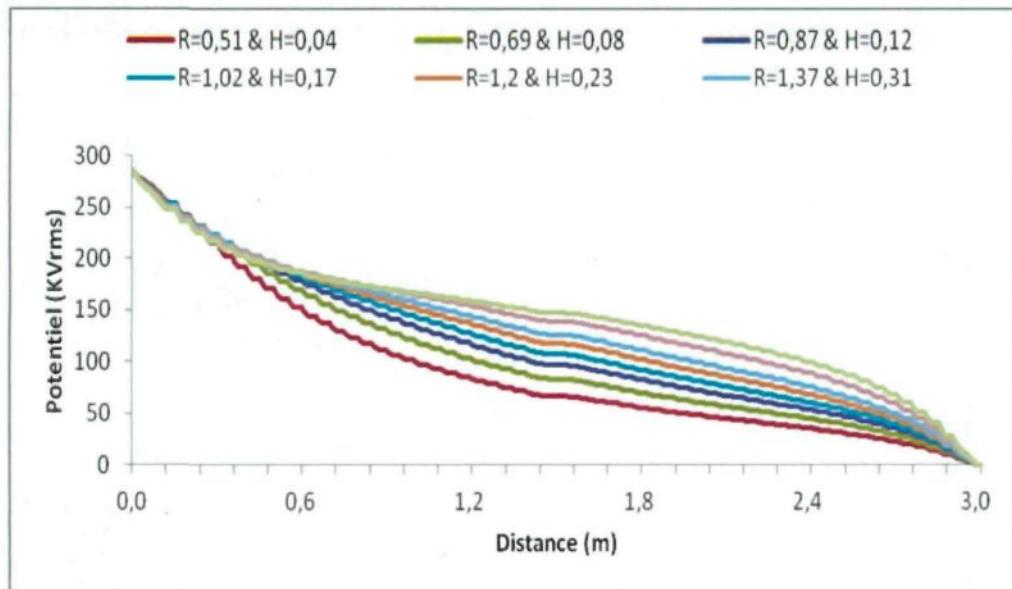
tension le long des intervalles d'air. Dans ce contexte, les paramètre de simulations utilisés sont identiques à ceux utilisés dans les simulations précédentes qui sont résumés dans le tableau 2.



**Figure 43 :** Algorithme développé pour l'étude paramétrique avec un anneau de garde sur l'électrode H.T.

## 5.2. Application à un anneau de garde sur l'électrode H.T.

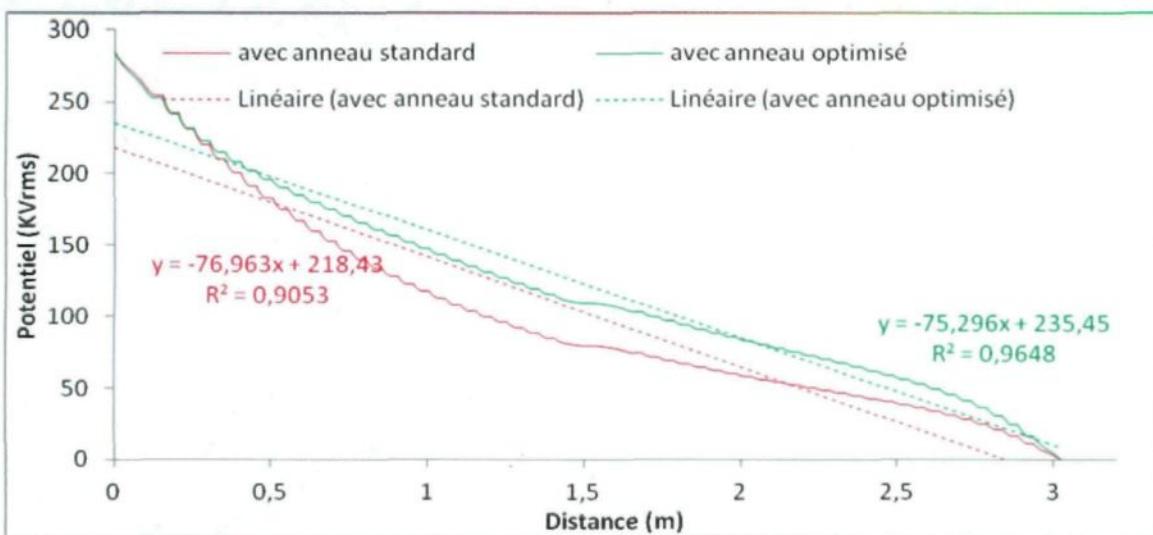
La figure 44 présente l'évolution des distributions de potentiel obtenues pour quelques couples de valeurs ( $R, H$ ). Les résultats obtenus montrent une amélioration de la linéarité de la distribution du potentiel en augmentant les valeurs de ( $R, H$ ) jusqu'à une certaine limite ( $R', H'$ ). Cependant, au-delà de cette limite, la distribution de potentiel perd sa linéarité. Cette limite représente donc la valeur optimale du vecteur ( $R, H$ ). D'après les résultats obtenus, les valeurs optimales sont  $R = 1\text{m}$ ,  $H = 0,14\text{m}$ , qui peuvent être comparées aux valeurs de l'anneau de garde standard avec  $R = 0,508 \text{ m}$  et  $H = 0,102 \text{ m}$ .



**Figure 44 :** Exemple d'évolution des distributions du potentiel obtenues pour différentes combinaisons des paramètres R et H.

Les figures 45 et 46 présentent respectivement une comparaison entre la distribution du potentiel et du champ électrique le long de la colonne isolante glacée obtenue avec l'anneau optimisé et l'anneau de garde standard. Les résultats de la figure 44 démontrent bien

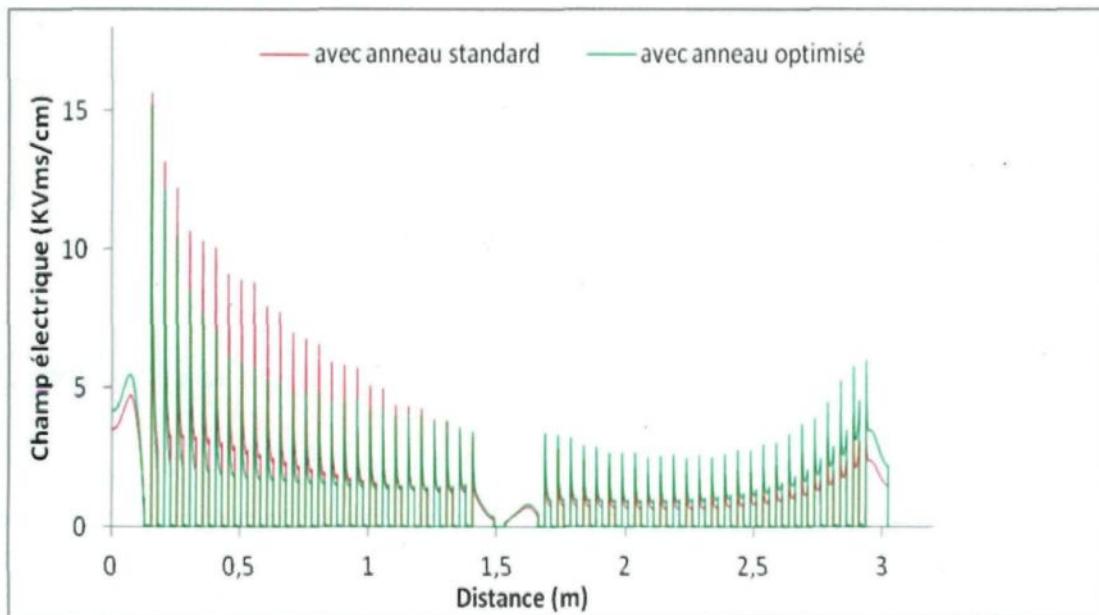
qu'avec l agrandissement du rayon  $R$  de l anneau de garde jusqu à sa valeur optimale permet d obtenir une distribution de potentiel beaucoup plus uniforme, comme le démontre le coefficient de régression linéaire égale à 0,97 contre 0,91 pour l anneau standard. Cela se traduit par une meilleure distribution du champ électrique, comme le montre la figure 46, accompagnée à une réduction de sa valeur à l extrémité des glaçons au niveau des jupes de l unité du haut incluant les premières jupes situées proche de l électrode H.T. Cependant, cette diminution du champ est accompagnée également d une augmentation de ce dernier au niveau de l unité du bas (figure 46) au voisinage de l électrode de mise à la terre.



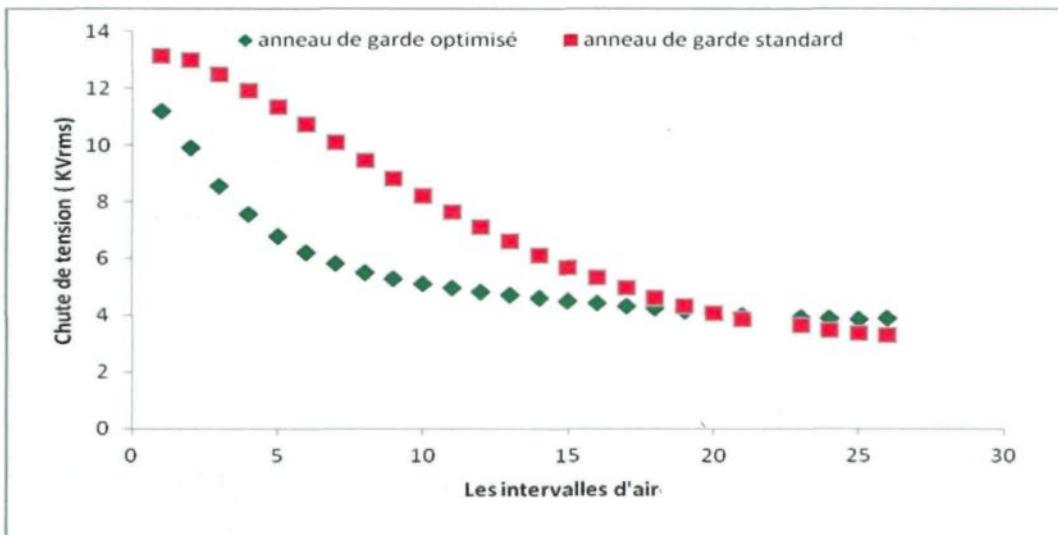
**Figure 45 :** Comparaison de la distribution de potentiel obtenu avec l anneau optimisé.

Néamoins, l augmentation de l intenit é du champ électrique le long de l unité n est pas assez important pour pouvoir initier le claquage des intervalles d air, comme le montre les résultats de la figure 47 qui présente le calcul de la chute de tension obtenues pour l unité du haut. Les résutlats démontrent clairement la réduction des chutes de tensions le long des dix-septs premiers intervalles d air de l unité du haut avec une légère augmentation à partir

de la dix-huitième jupe. À partir de cette jupe, le champ à l'extrémité des glaçons reste plus ou moins constant, ce qui indique que la probabilité d'avoir des claquages sur l'unité du bas est nulle.

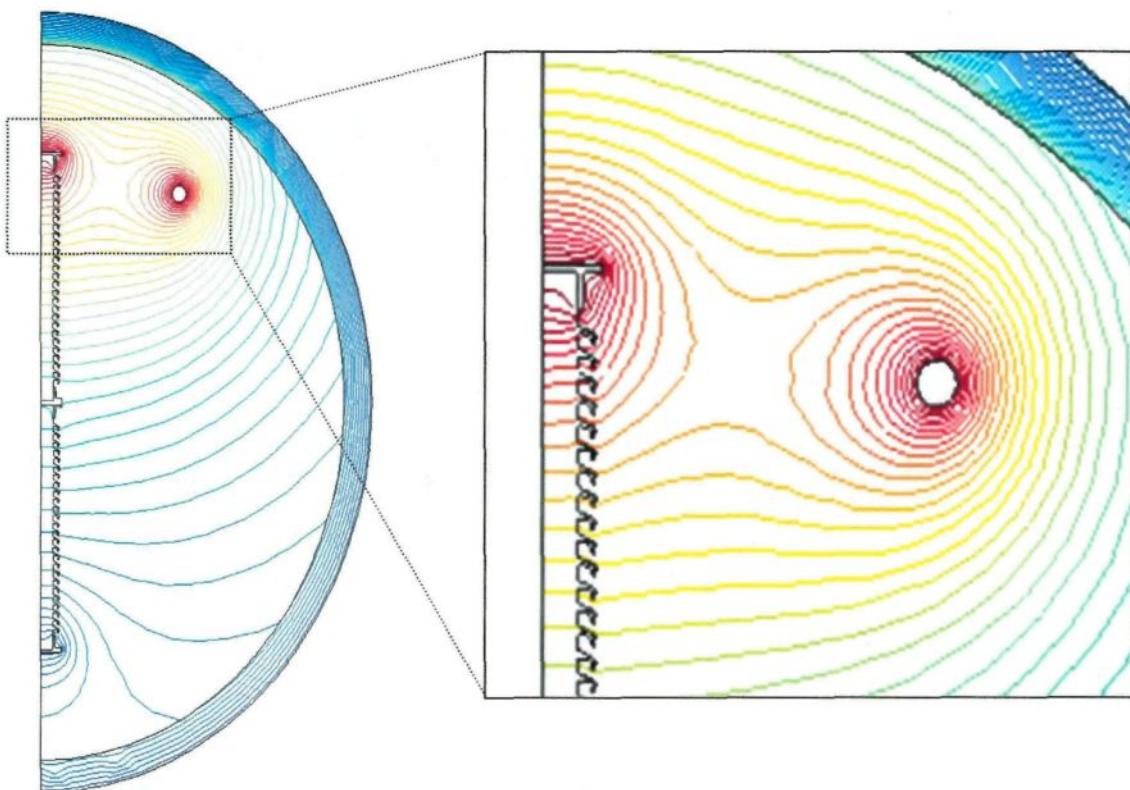


**Figure 46 :** Comparaison des distributions du champ électrique obtenues avec l'anneau optimisé et l'anneau standard positionné sur l'électrode H.T.



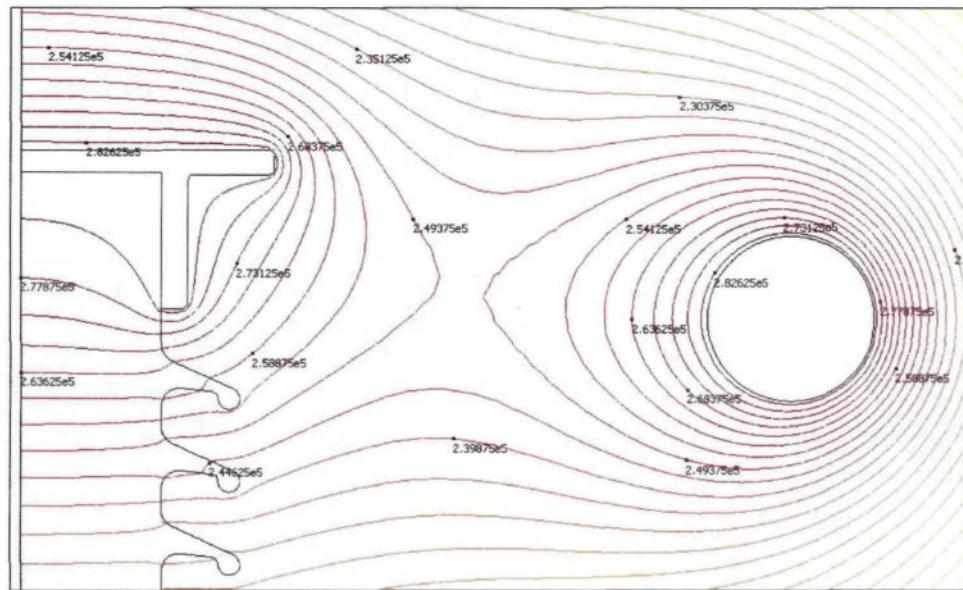
**Figure 47 :** Chutes de tension le long des intervalles d'air de l'unité du haut obtenus pour l'anneau de garde optimisé et l'anneau de garde standard positionné sur l'électrode H.T.

La modélisation numérique avec l'anneau de garde optimisé a aussi permis de mettre en évidence l'influence du rayon  $R$  de l'anneau sur la répartition des lignes équipotentielles autour de l'ensemble électrode H.T. et anneau de garde. En effet, tel qu'illustré à la figure 48, les lignes équipotentielles au niveau de l'anneau et de l'électrode H.T. sont séparées malgré le fait que les deux sont portés au même potentiel. En fait, cette séparation des lignes équipotentielles ne provient pas de la simulation axisymétrique utilisée mais est le résultat de la méthode de fixation de l'anneau sur l'électrode H.T. qui, comme le montre la figure 16, est réalisée en deux endroits ponctuels par l'intermédiaire de pattes de fixation. Il n'est donc utile de tenir compte de ces fixations dans la simulation axisymétrique.



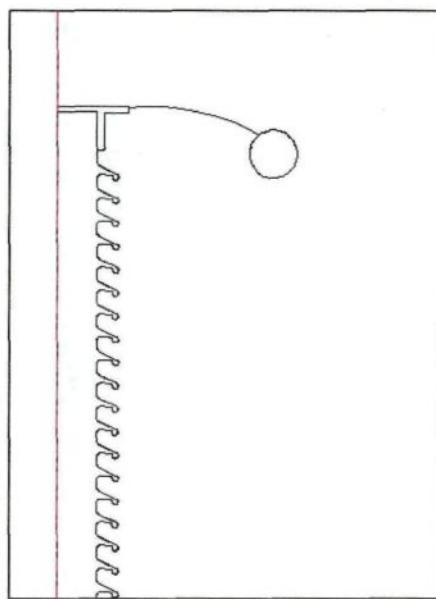
**Figure 48 :** Répartition des lignes équipotentielles obtenues pour l'anneau de garde optimisé.

Cette séparation des lignes équipotentielle permet aussi de confirmer les résultats obtenus au cours de l'étude paramétrique selon lesquels, la linéarité de la distribution de potentiel est perdue pour des valeurs élevées de  $R$ . En effet, plus la valeur de  $R$  augmente et plus la séparation obtenue est importante. Une étude plus poussée dans cette direction a permis de mettre en évidence que la séparation est déjà présente pour l'anneau de garde standard, comme le montre les résultats de la figure 49 obtenus pour la colonne isolante propre. La séparation s'effectue à partir de l'équipotentielle de valeur égale à  $245 \text{ kV}_{\text{rms}}$  en considérant que la différence de potentiel entre deux lignes équipotentielles est fixée à  $4,75 \text{ kV}_{\text{rms}}$ . Cette valeur de séparation peut être comparée aux  $211 \text{ kV}_{\text{rms}}$  obtenus pour l'anneau de garde optimisé.



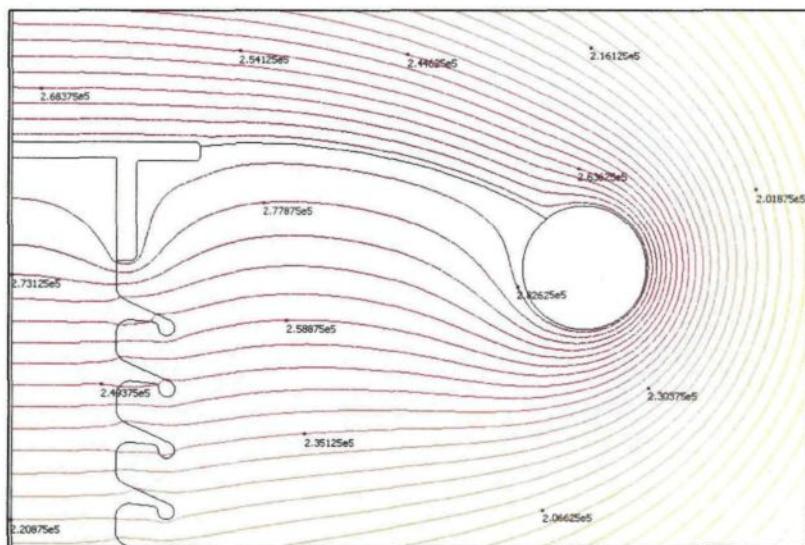
**Figure 49 :** Distribution des lignes équipotentielle obtenues pour la colonne isolante propre équipée de l'anneau de garde standard.

Dans une optique d'amélioration de la distribution du potentiel et du champ électrique le long de la colonne isolante, nous avons pensé à étudier l'influence de l'ajout d'un lien électrique complet entre l'anneau de garde et l'électrode H.T. Ce lien électrique complet, illustré à la figure 50, va permettre d'éviter la séparation des lignes équipotentielles puisque que dorénavant, l'assemblage électrode-ajout-anneau de garde va se comporter comme une seule équipotential sur  $360^\circ$ . La figure 51 présente la distribution des lignes équipotentielles obtenue avec l'anneau standard et l'ajout du lien électrique complet.

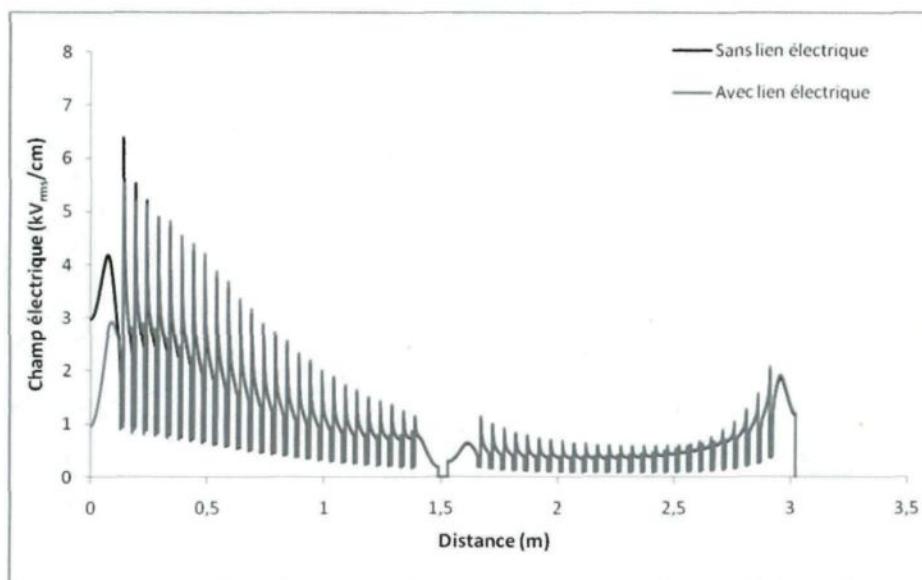


**Figure 50 :** Illustration du lien électrique complet réalisé entre l'électrode H.T. et l'anneau standard.

La figure 51 démontre que l'ajout du lien électrique complet permet ainsi d'éviter la séparation des lignes équipotentielles autour de l'ensemble électrode-anneau. La répartition des équipotentielles autour de l'ensemble électrode-anneau ainsi obtenue permet de réduire l'intensité du champ électrique au voisinage de l'électrode H.T, comme le démontre les résultats des figure 52. Cependant, cela n'affecte en rien le champ électrique au niveau des jupes et du restant de la colonne isolante.



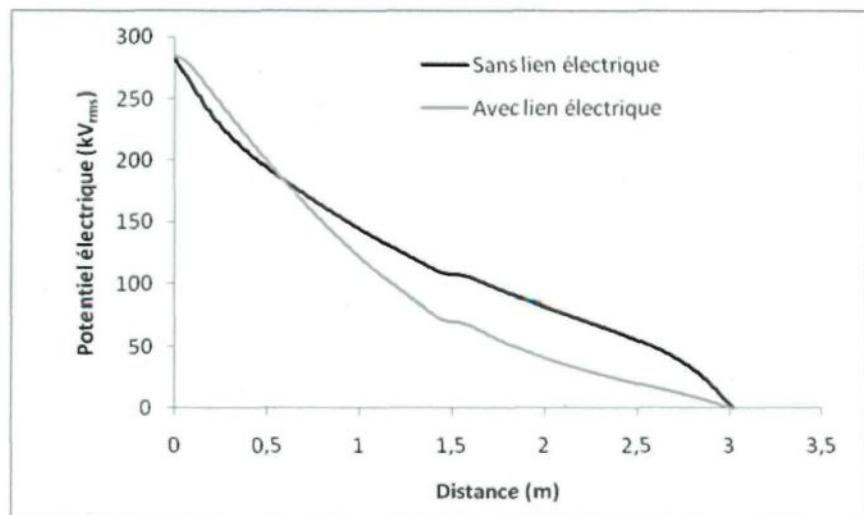
**Figure 51 :** Distribution des lignes équipotentielles obtenues pour la colonne isolante propre avec l'ajout du lien électrique complet entre l'électrode H.T. et l'anneau de garde standard.



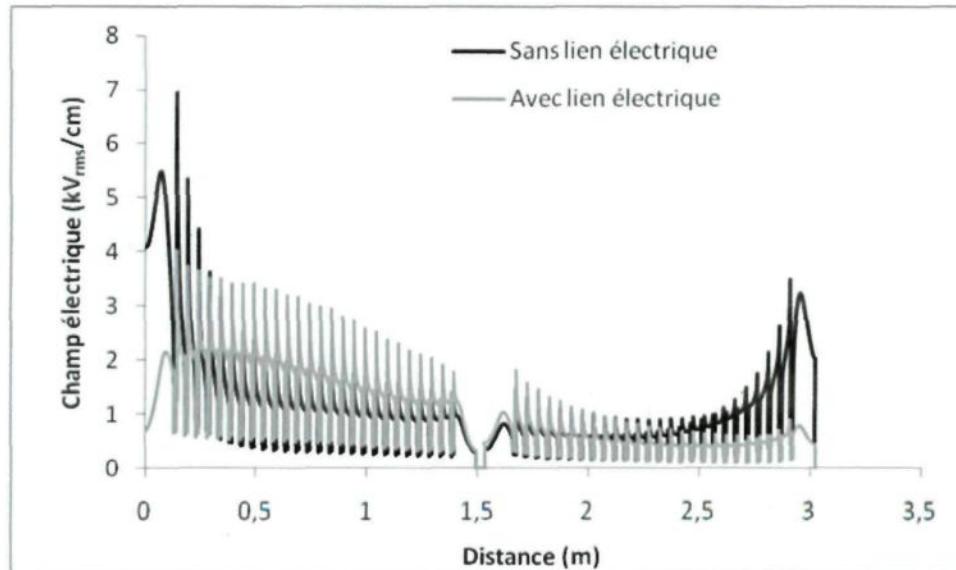
**Figure 52 :** Comparaison des distributions du champ électrique obtenues pour la colonne isolante propre équipée de l'anneau de garde standard avec et sans lien électrique complet.

La même remarque peut être faite pour ce qui est de l'anneau de garde optimisé avec et sans lien électrique complet, comme démontré à la figure 53. En effet, l'ajout du lien électrique permet une diminution importante du champ électrique au voisinage de

l'électrode H.T., des trois premières jupes ainsi qu'au niveau des jupes de l'unité du bas qui sont proches de la mise à la terre. En fait, une décroissance presque linéaire du champ électrique est obtenue par l'ajout du lien électrique. La figure 54 présente les distributions du champ électrique obtenues avec la colonne isolante propre équipée de l'anneau de garde optimisée avec et sans lien électrique.



**Figure 53 :** Comparaison des distributions du potentiel obtenues pour la colonne isolante propre équipée de l'anneau de garde optimisé avec et sans lien électrique complet.

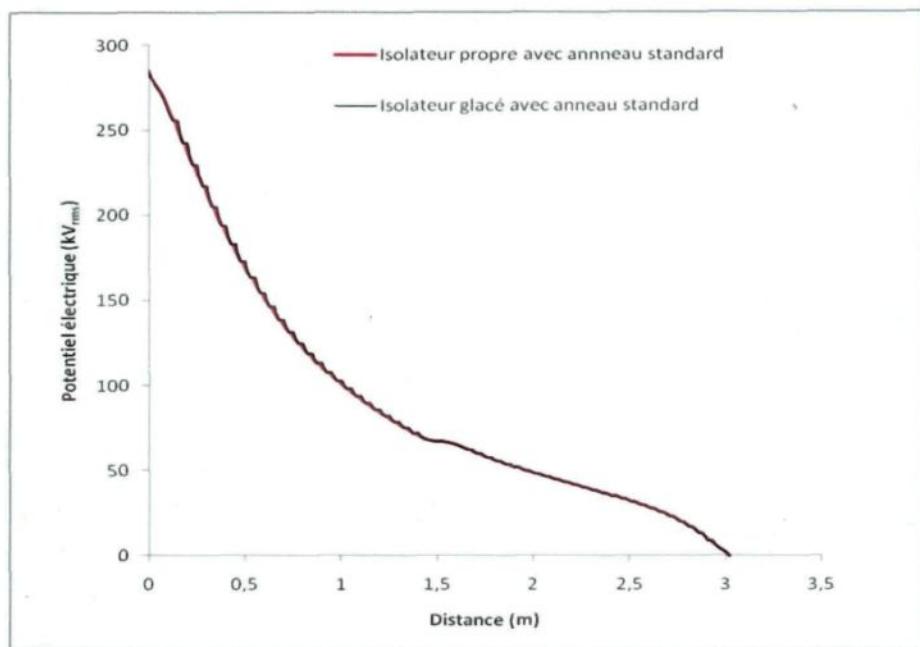


**Figure 54 :** Comparaison des distributions du champ électrique obtenues pour la colonne isolante propre équipée de l'anneau de garde optimisé avec et sans lien électrique complet.

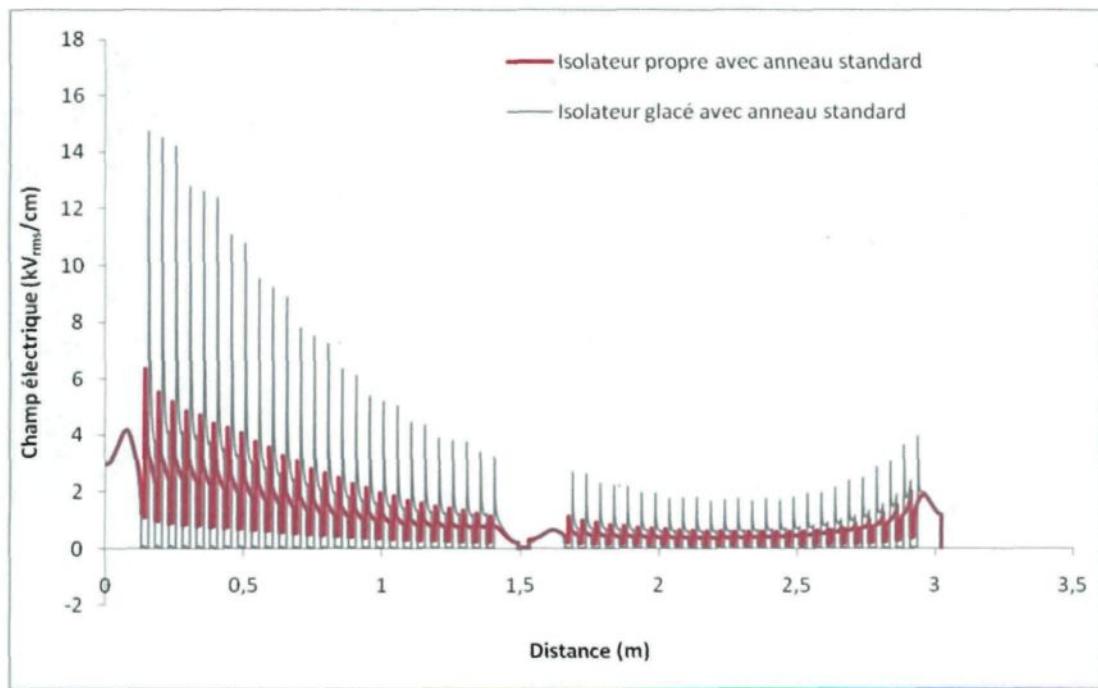
### 5.3. Comparaison des résultats numériques avec et sans glaçons

Il s'agit ici de comparer les distributions de potentiel et de champ électrique obtenues avec un anneau de garde standard pour la colonne isolante avec et sans glaçons. Le but ici est de démontrer que la prise en compte des glaçons n'influencent en rien l'uniformisation de la distribution du potentiel et la réduction du champ électrique le long de la colonne isolante obtenue avec l'ajout de l'anneau de garde. De plus, cela permet de démontrer que les résultats des simulations obtenus avec la prise en compte des glaçons restent applicable aux colonnes isolantes propres.

Les simulations ont été réalisées avec un anneau de garde standard. Les distributions du potentiel et du champ électrique ont été calculées suivant la même ligne de référence que celle présentée aux figure 28 et 29. Les résultats obtenus sont présentés respectivement aux figures 55 et 56. La comparaison des distributions de potentiel présentées à la figure 55 montre que la présence des glaçons n'affecte en rien la tendance générale de la distribution. De même, les résultats de la figure 56 démontrent que la présence des glaçons affectent les valeurs maximales du champ électrique au niveau des jupes, ce qui normal puisque leur présence entraîne une élévation locale de ce dernier à leur extrémité de part un rayon de courbure faible (2,5 mm). Cependant, il est possible de remarquer que la tendance dans la distribution du champ électrique demeure identique avec et sans glaçons. De plus, au voisinage immédiat des différentes électrodes, où la glace n'est pas présente, les valeurs de champs électriques obtenues pour la colonne isolante propre et glacée sont identiques.



**Figure 55 :** Distributions du potentiel obtenues avec l'anneau de garde standard pour la colonne isolante avec et sans glaçons.



**Figure 56 :** Distributions du champ électrique obtenues avec l'anneau de garde standard pour la colonne isolante avec et sans glaçons.

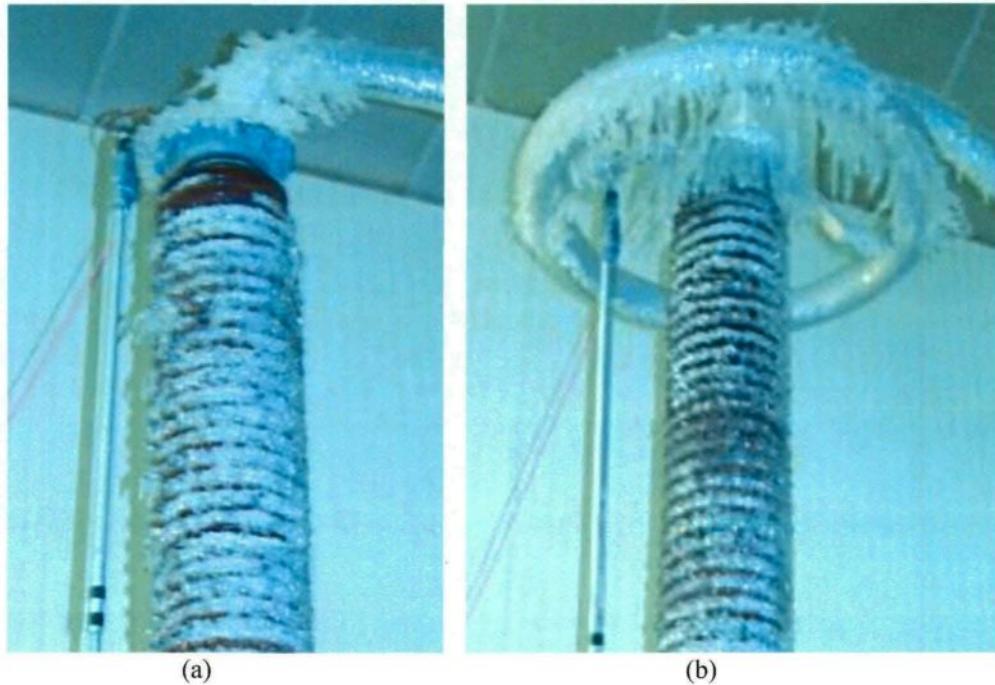
Les résultats présentés précédemment permettent de démontrer que les glaçons n'ont en fait qu'une influence localisée au niveau de l'espace inter-jupes pour ce qui est de la distribution du champ électrique. Dans ces conditions, il est possible d'affirmer que les résultats obtenus à partir des simulations numériques réalisées pour une colonne isolante standard durant les premiers instants d'une accumulation de glace sont aussi applicables pour une colonne isolante propre, aussi bien pour les résultats issus de l'étude paramétrique que ceux dérivés de l'ajout d'un lien électrique complet et cela, dans le but de réduire l'intensité du champ électrique au voisinage de l'électrode H.T.

#### **5.4. Validation expérimentale avec un anneau de garde standard**

Afin de valider les résultats numériques obtenus, il a été décidé d'effectuer des tests expérimentaux afin de déterminer la tension de tenue maximale  $V_{TM}$  de la colonne isolante standard équipée d'un anneau de garde. Les tests ont été réalisés avec un anneau de garde standard puisque ce dernier était disponible au laboratoire de la CIGELE et que cela évitait d'en fabriquer un ayant les dimensions optimales déterminées précédemment. Les résultats obtenus ont été comparés aux résultats expérimentaux réalisés avec une colonne standard sans anneau de garde.

Les tests ont été réalisés avec une accumulation de glace formée en régime humide pour une épaisseur de 15 mm mesurée à l'aide du cylindre témoin. Les procédures d'accumulation et de détermination de la tension de tenue maximale sont identiques à celles décrites au chapitre 3. La figure 57 présente la géométrie du dépôt de glace obtenue en fin

d'accumulation pour la colonne isolante sans anneau de garde (figure 57-a) et avec anneau de garde (figure 57-b).

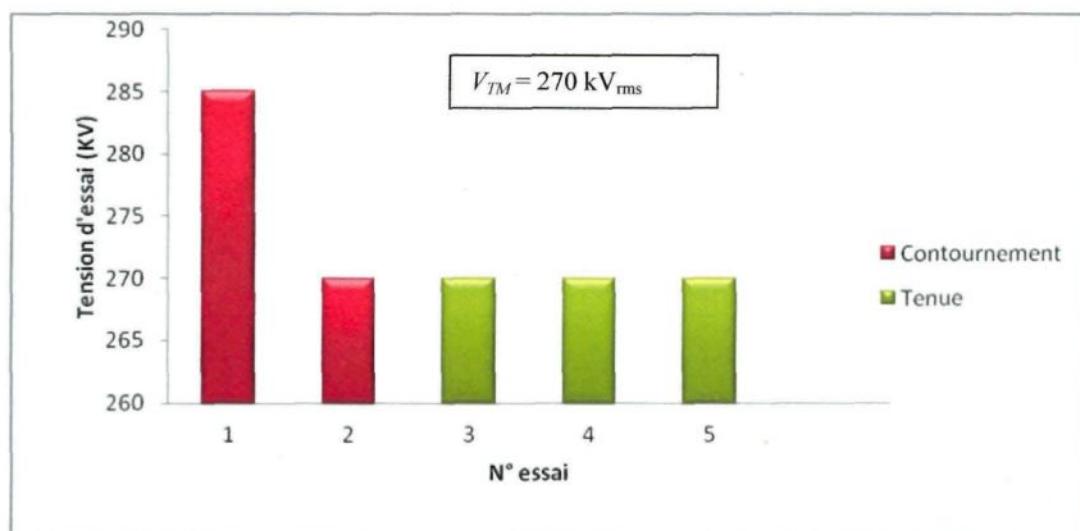


**Figure 57 :** Géométrie du dépôt de glace obtenue en fin d'accumulation pour une colonne isolante sans anneau de garde (a) et équipée d'un anneau de garde (b).

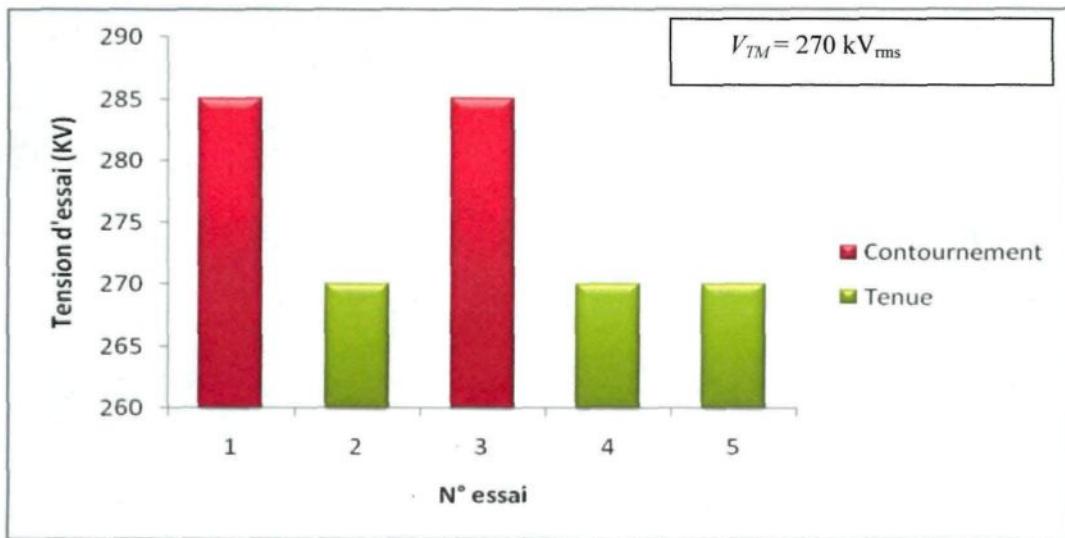
Dans un premier temps, il est possible de remarquer qu'en l'absence d'anneau de garde (figure 57-a), un intervalle d'air s'est formé sur les trois premières jupes de l'unité du haut au voisinage de l'électrode H.T. Cela valide donc les résultats de simulation, présentés à la figure 32 du chapitre 4, qui prédisaient l'apparition de décharges partielles à l'extrémité des glaçons présents sur les trois premières jupes en cours de la période d'accumulation. Cependant, avec l'ajout de l'anneau de garde, figure 57-b, l'intervalle d'air proche de l'électrode H.T. a disparu, ce qui également valide les résultats numériques présentés à la figure 32 et démontre clairement l'influence de la distribution du potentiel sur le processus d'accumulation et de formation des intervalles d'air. Cela confirme donc que l'ajout de

l'anneau de garde permet une meilleur uniformisation de la distribution du potentiel le long de la colonne isolante, résultant en un dépôt de glace plus uniforme.

Les figures 58 et 59 présentent les résultats des tests de tension de tenue maximale obtenus respectivement sans et avec l'anneau de garde positionné sur l'électrode H.T. les tests ont été réalisés selon la procédure expérimentale présentée à la section 3 du chapitre III. Les résultats démontrent que l'ajout de l'anneau de garde n'a pas d'influence sur la tension de tenue maximale d'une colonne isolante sous 15 mm de glace radiale. En effet, la tension de tenue maximale de  $270 \text{ kV}_{\text{rms}}$  déterminée est identique à celle obtenue sans anneau de garde qui reste inférieure de 5% à la tension de service fixée à  $285 \text{ kV}_{\text{rms}}$ . Cela démontre donc que l'ajout d'un anneau de garde ne permet pas d'améliorer la performance d'une colonne isolante sous conditions d'accumulation de glace sévères et cela, malgré une meilleure uniformisation du dépôt de glace.



**Figure 58 :** Résultats des tests de détermination de la  $V_{TM}$  obtenus par la colonne isolante sans anneau de garde pour une épaisseur radiale de glace de 15 mm.



**Figure 59 :** Résultats des tests de détermination de la  $V_{TM}$  obtenus par la colonne isolante équipée d'un anneau de garde standard sur l'électrode H.T. pour une épaisseur radiale de glace de 15 mm.

### 5.5. Discussion des résultats

L'étude paramétrique a permis de révéler qu'il est possible d'améliorer grandement la linéarité de la distribution du potentiel le long de la colonne isolante en agissant sur les paramètres ( $R$ ,  $H$ ) de l'anneau de garde, soit son rayon et sa position par rapport à l'électrode H.T. Les simulations ont ainsi permis d'identifier des valeurs optimales pour  $R$  et  $H$  qui permettent d'obtenir une meilleure uniformité de la distribution du potentiel le long de la colonne et une réduction sensible de l'intensité du champ électrique au voisinage de l'électrode H.T.

Les simulations numériques ont aussi permis de démontrer qu'il existe une séparation des lignes equipotentielles pour l'anneau de garde standard et que cette séparation s'accentue avec l'augmentation du rayon  $R$  de l'anneau. La séparation des lignes equipotentielles résulte du système de fixation de l'anneau de garde à l'électrode H.T. qui

est réalisé en deux points seulement. Cela implique que même si l'anneau de garde et l'électrode sur laquelle il est fixé sont portés au même potentiel, les équipotentielles ne sont pas réparties uniformément autour de l'ensemble. Afin de solutionner ce problème, il a été proposé d'ajouter un lien électrique complet entre l'électrode H.T. et l'anneau de garde. Avec cet ajout, les simulations numériques ont démontré que la séparation des lignes équipotentielles a disparu, ce qui se traduit par une amélioration de la distribution du potentiel le long de la colonne isolante ainsi qu'une diminution notable du champ électrique au voisinage de l'électrode H.T. et cela, aussi bien pour l'anneau de garde standard que l'anneau de garde optimisé.

De plus, il a été démontré que les résultats issus des simulations numériques obtenues pour la colonne isolante standard glacée sont directement applicables à une colonne isolante propre dans le but d'obtenir une distribution de potentiel plus uniforme ainsi qu'une réduction importante du champ électrique au niveau de l'électrode H.T.

Enfin, les résultats relatifs à la détermination de la tension tenue maximale ont permis de démontrer que l'ajout de l'anneau de garde permet effectivement d'obtenir une distribution plus uniforme de la glace le long de la colonne isolante en évitant la formation de l'intervalle d'air au voisinage de l'électrode H.T., tel que cela avait été prévu par les simulations numériques. Cependant, l'uniformisation du dépôt de glace obtenue par l'ajout de l'anneau de garde standard n'a pas d'effet sur la tension de tenue maximale qui reste identique à celle obtenue sans anneau de garde. Ces résultats sont en accord avec les résultats obtenus avec un isolateur composite 500 kV rapportés dans la littérature [5].

Il apparaît donc que l'ajout d'un anneau de garde, de dimension standard ou optimisée ne permettent pas d'améliorer les performances des colonnes isolantes standard sous conditions d'accumulation de glace sévère. Cependant, l'ajout d'un lien électrique complet, en améliorant la distribution du potentiel, peut être utiliser comme une jupe auxiliaire dans le but de créer un intervalle d'air artificiel de longueur importante sous l'anneau de garde. Comme l'utilisation des jupes auxiliaires a démontré une augmentation importante de la tension de tenue maximale sous conditions de glace sévère [5], il a donc été décidé de proposer et de tester une nouvelle configuration d'anneau de garde basée sur cette approche, tel que présenté dans le chapitre suivant.

## CHAPITRE 6

### **PROPOSITIONS DE MODIFICATION ET D'UTILISATION DES ANNEAUX DE GARDE SOUS CONDITIONS DE GLACE SÉVÈRE**

D'après les résultats obtenus aux chapitres précédents, il a été démontré que l'ajout d'un anneau de garde à la colonne isolante permet une meilleure uniformisation du potentiel le long de cette dernière et une réduction importante de l'intensité du champ électrique au niveau des premières jupes proches de l'électrode H.T., ce qui a pour effet direct l'absence d'intervalle d'air dans cette région et un dépôt de glace plus uniforme. Cependant, l'uniformité de la glace n'est pas un gage d'une amélioration de la tenue diélectrique sous condition de glace sévère puisqu'il a été démontré que l'ajout d'un anneau de garde standard ne permet pas d'améliorer la tension de tenue maximale de la colonne isolante recouverte de glace.

Comme l'uniformisation du dépôt de glace ne semble pas être une solution adéquate pour augmenter la tension de tenue maximale des colonnes isolantes, il a été décidé de se tourner vers le principe utilisé par les jupes auxiliaires dont l'ajout vise à créer des intervalles d'air supplémentaires permettant d'augmenter la distance de fuite de la colonne isolante sous condition de glace et pouvant ainsi supporter la tension appliquée à cette dernière [5]. Il a donc été décidé de proposer une solution originale exploitant ce principe tout en permettant de donner une nouvelle fonction à l'anneau de garde, fonction identique

à celle d'une jupe auxiliaire. La solution proposée consiste donc à ajouter un grillage métallique entourant l'anneau de garde en contact avec ce dernier et avec l'électrode. Le grillage métallique, constitué de mailles très fine ( $2 \times 2 \text{ mm}^2$ ), va donc protéger la partie de l'isolateur en dessous de ce dernier contre l'accumulation de glace tout en permettant une amélioration notable des distributions du potentiel et du champ électrique le long de la colonne isolante et cela, particulièrement lorsque le diamètre de l'anneau est grand. L'anneau ainsi équipé va donc agir comme une jupe auxiliaire en créant artificiellement un intervalle d'air de longueur importante en dessous de l'électrode sur laquelle il est fixé.

### **6.1. Solution avec un seul anneau de garde modifié**

Afin de valider ce concept, une série de tests expérimentaux a été réalisée avec l'anneau de garde équipé du grillage et positionné sur l'électrode H.T. puisque cela constitue la solution la plus économique et efficace, tel qu'il a été démontré par les simulations numériques. L'anneau utilisé est de forme standard et donc identique à celui utilisé dans les tests expérimentaux présentés précédemment.

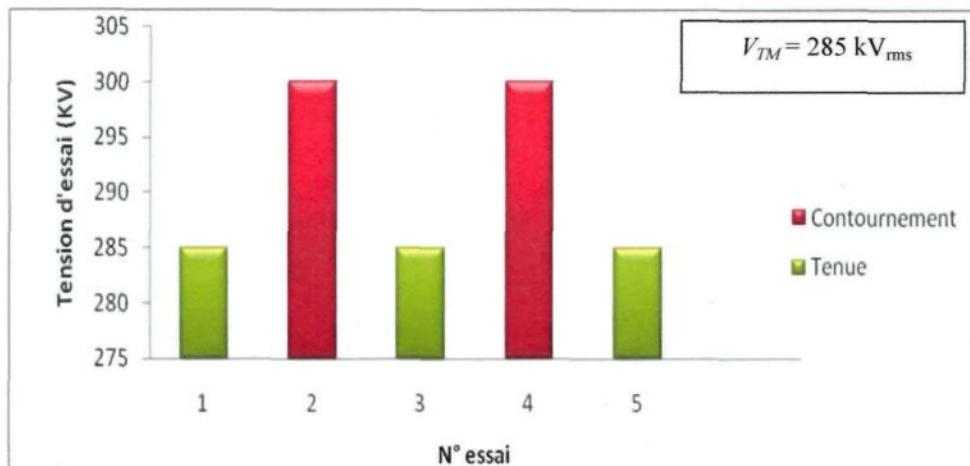
Les procédures d'accumulation et de test sont identiques à celle utilisées précédemment afin de pouvoir comparer les améliorations obtenues. La figure 60 présente le dépôt de glace obtenu en fin d'accumulation. Il est intéressant de noter que l'ajout du grillage permet donc d'empêcher le pont de glace de se former sur les dix premières jupes de la colonne isolante, permettant ainsi que créer un intervalle d'air de longueur importante.



**Figure 60 :** Géométrie du dépôt de glace obtenue pour une accumulation de glace d'épaisseur radiale de 15mm dans le cas d'un anneau de garde équipé d'un grillage métallique fixé à l'électrode H.T.

L'étape suivante consiste donc à déterminer la tension de tenue maximale de la configuration proposée. Pour cela, cinq tests ont été nécessaires dont les résultats sont présentés à la figure 61. Ainsi, d'après les résultats obtenus, la solution proposée permet d'accroître la  $V_{TM}$  de la colonne isolante de seulement 5% par rapport à la configuration utilisant un anneau de garde standard, soit équivalente à la tension de service.

Afin d'expliquer ce résultat décevant, il a été décidé d'effectuer une modélisation de la colonne isolante équipée de l'anneau de garde en période de fonte. La simulation a été réalisée en axisymétrie, tel qu'illustré à la figure 62, en utilisant les paramètres résumés dans le tableau 3.



**Figure 61 :** Résultats d'essai sur la colonne isolante équipée d'un anneau de garde standard modifié pour une épaisseur radiale de glace de 15 mm.

**Tableau 3 : Paramètres de simulations utilisés en période de fonte**

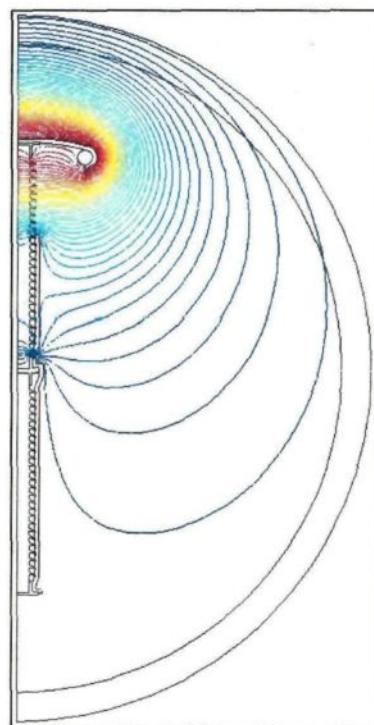
	<b>Porcelaine</b>	<b>Air</b>	<b>Glace</b>	<b>Film d'eau</b>
$\epsilon_r$	6	1	75	81
<b>Conductivité (<math>\mu\text{S/cm}</math>) à 20°C</b>	0	0	0	300
<b>Épaisseur (mm)</b>	-	-	30	0.15

Afin de modéliser la période de fonte, un film d'eau conducteur a été pris en compte à la surface du dépôt de glace et ce dernier a été modélisé suivant les mêmes directives que celles utilisées lors des simulations des glaçons en période d'accumulation. La figure 62 présente la répartition des lignes equipotentielle autour de la colonne isolante recouverte de glace. Les equipotentielle sont principalement réparties dans les deux intervalles d'air créés, résultat de la présence du film d'eau conducteur à la surface du dépôt de glace, tel que démontré dans [6]. À partir des résultats numériques, il est possible de calculer les chutes de tension obtenues le long des deux intervalles pour une tension appliquée équivalente à la tension de service, soit  $285 \text{ kV}_{\text{rms}}$ . Les chutes de tension peuvent être

ensuite comparées à la tension  $V_b$ (kV) requises pour claquer un intervalle d'air sans glaçons de longueur  $x$  (cm) déterminée expérimentalement et donnée par [5] :

$$V_b = 4,1x + 3,8 \quad (2)$$

Les résultats comparatifs sont présentés dans le tableau 4.



**Figure 62 :** Répartition des lignes équipotentielles obtenues en période de fonte pour la colonne isolante recouverte de glace équipée d'un anneau de garde modifiée.

**Tableau 4 : Chutes de tension et tensions de claquage des intervalles d'air pour la colonne isolante glacée équipée d'un anneau de garde modifié**

	Intervalle d'air supérieur	Intervalle d'air inférieur
<b>Longueur (cm)</b>	57	4
<b>Chute de tension (kV<sub>rms</sub>)</b>	227	55
<b><math>V_b</math> (kV<sub>rms</sub>)</b>	237,5	20,2

D'après les résultats du tableau 4, environ 80% de la tension appliquée se retrouve aux bornes de l'intervalle d'air supérieur contre 19% pour l'intervalle d'air inférieur. Pour la

tension de service, la chute de tension de l'intervalle d'air supérieur est inférieure à la tension de claquage  $V_b$  correspondante, ce qui n'est pas le cas pour l'intervalle d'air inférieur. Ainsi, Pour la tension de service, on peut remarquer que c'est l'intervalle d'air inférieur qui va claquer en premier. Cependant, le claquage de ce dernier n'entraîne pas forcément le claquage de l'intervalle d'air supérieur, tel qu'il a été observé expérimentalement. Par contre, lorsque la tension appliquée durant le test est équivalente à 300 kV<sub>rms</sub> (tension de contournement d'après la figure 61), la chute de tension le long de l'intervalle d'air supérieur grimpe à 240 kV<sub>rms</sub> et cette dernière devient donc supérieure à  $V_b$ , d'après les valeurs du tableau 4. Dans ce cas, un arc électrique partiel est présent le long de chaque intervalle d'air, ce qui explique en grande partie les contournements obtenus expérimentalement pour ce niveau de tension, tel que présenté à la figure 61.

Les résultats numériques obtenus permettent donc de démontrer que la création d'un intervalle d'air de grande taille résultant de l'ajout d'un seul anneau de garde modifié ne permet pas d'augmenter significativement la tension de tenue maximale de la colonne isolante. Cela est principalement dû au fait que l'intervalle d'air ainsi créé doit supporter 80% de la tension appliquée et que sa longueur n'est donc pas suffisante pour pouvoir supporter une tension plus importante. Dans ces circonstances, il devient nécessaire d'augmenter la distance de fuite, ce qui peut être réalisé soit en augmentant le diamètre de l'anneau de garde modifié ou encore en créant un deuxième intervalle d'air de longueur importante qui peut être obtenu par l'ajout d'un deuxième anneau de garde modifié sur l'électrode flottante. Cette deuxième solution a été retenue puisque comme l'a démontré la simulation en période de fonte, le deuxième intervalle d'air crée naturellement (voir figure

60) doit supporter seulement 19% de la tension appliquée. Ainsi, avec un intervalle d'air inférieur artificiel de longueur plus importante, il est indéniable que la tension de tenue de la colonne isolante en sera augmentée puisqu'une tension plus importante sera nécessaire pour claquer ce dernier.

## 6.2. Amélioration avec deux anneaux de garde modifiés

Tel que mentionné précédemment, l'addition d'un anneau de garde équipé d'un grillage métallique sur l'électrode flottante a pour but essentiellement d'augmenter la distance de fuite en présence du dépôt de glace en créant artificiellement un second intervalle d'air. Le deuxième anneau ajouté est identique à celui fixé à l'électrode H.T. La géométrie de glace obtenue sous les mêmes conditions expérimentales précédentes en fin d'accumulation est présentée à la figure 63.

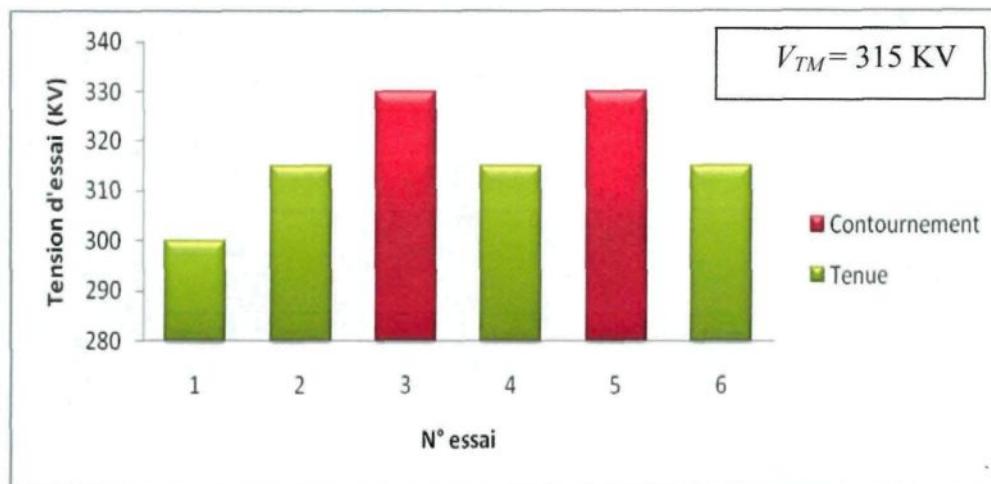
D'après la figure 63, l'ajout du second anneau de garde modifié permet de protéger les huit premières jupes situées sous l'électrode flottante contre 10 jupes pour l'anneau modifié fixé à la H.T. L'intervalle d'air ainsi créé est donc de longueur légèrement inférieure à l'intervalle d'air supérieur. La détermination de la tension de tenue maximale, dont les résultats sont présentés à la figure 64, démontre cependant tout l'intérêt de cet ajout puisque qu'une valeur de  $V_{TM}$  de 315kV<sub>rms</sub> a été obtenue. Cela représente une amélioration de 16,6% par rapport à la valeur de 270 kV<sub>rms</sub> obtenue pour l'anneau de garde standard. Cela est à comparer avec l'amélioration de 5% obtenue avec l'ajout d'un seul anneau de garde modifié. Ce gain peut être comparé au gain obtenu sous les mêmes conditions

expérimentales d'accumulation de glace pour la même colonne isolante équipée de quatre jupes auxiliaires avec un gain de 22% obtenu par rapport à une colonne isolante sans jupes, soit environ 5,5% par jupe auxiliaire [5].

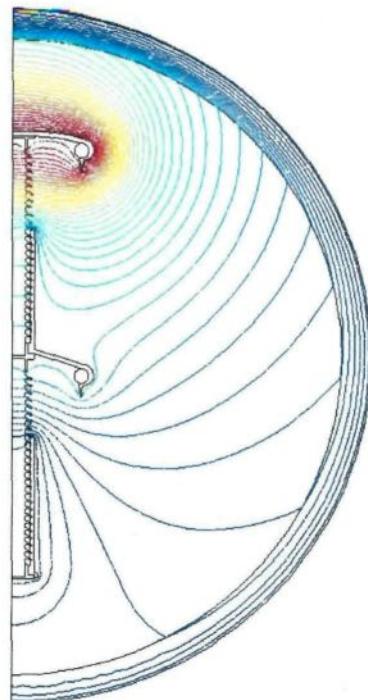


**Figure 63 :** Géométrie du dépôt de glace obtenue pour une épaisseur radiale de glace de 15mm et une conductivité d'eau d'accumulation de  $30 \mu\text{S}/\text{cm}$  dans le cas de deux anneaux de garde modifiés fixés respectivement à l'électrode H.T. et flottante.

Comme pour la solution avec un seul anneau de garde modifié, il a été décidé de modéliser la configuration en période de fonte de la colonne isolante équipée de deux anneaux de garde modifiés en utilisant les mêmes paramètres que ceux du tableau 4. La figure 65 présente la répartition des lignes équipotentielles ainsi obtenues.



**Figure 64 :** Résultats d'essai sur la colonne isolante avec deux anneaux de garde modifiés pour une épaisseur radiale de glace de 15 mm et une conductivité d'eau d'accumulation de  $30 \mu\text{S}/\text{cm}$ .



**Figure 65 :** Répartition des lignes équipotentielles obtenue pour la colonne isolante recouverte de glace équipée de deux anneaux de garde modifiés.

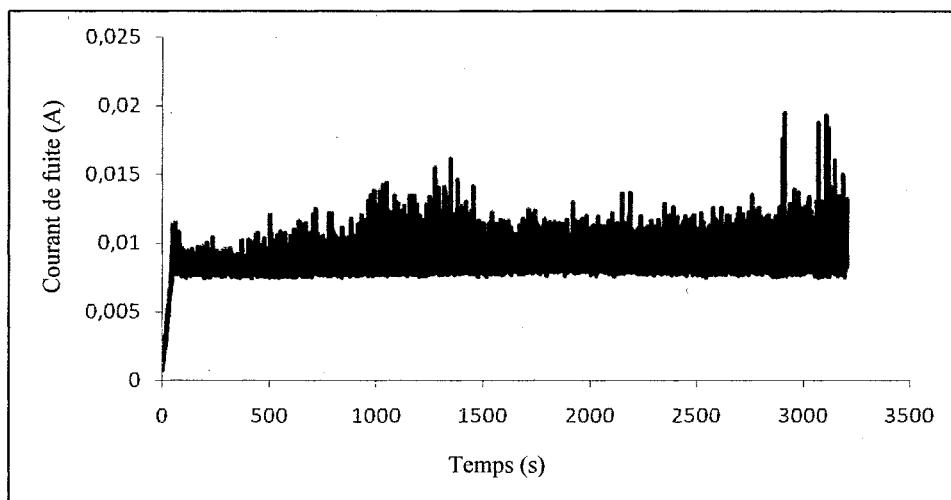
Les chutes de tension et tensions de claquage des intervalles d'air correspondantes sont présentées dans le tableau 5. D'après les résultats numériques obtenus, la chute de tension le long de l'intervalle d'air supérieur représente 73% de la tension appliquée (fixée à 285 kV<sub>rms</sub>), ce qui représente une baisse de 7% par rapport à la configuration à un seul anneau de garde modifié. Pour l'intervalle d'air inférieur créé par l'ajout du second anneau de garde modifié, la chute de tension représente 26% de la tension appliquée, soit une augmentation de 7% par rapport à l'ajout d'un seul anneau modifié. Donc l'ajout du second anneau modifié a permis dans un premier temps de modifier la redistribution du potentiel le long de la colonne isolante recouverte de glace.

**Tableau 5 : Chutes de tension et tensions de claquage des intervalles d'air pour la colonne isolante glacée équipée de deux anneaux de garde modifiés**

	Intervalle d'air supérieur	Intervalle d'air inférieur
<b>Longueur (cm)</b>	57	42
<b>Chute de tension (kV<sub>rm</sub>)</b>	208	74
<b><math>V_b</math> (kV<sub>rms</sub>)</b>	237,5	176,0

De plus, en comparant les chutes de tension aux tensions de claquage  $V_b$  calculées à partir de l'équation 2, il est possible de noter que c'est dorénavant l'intervalle d'air supérieur qui va cliquer en premier de part une chute de tension plus importante par rapport à sa tension de claquage. En effet, la chute de tension le long de l'intervalle d'air supérieur représente 87,5% de la tension de claquage contre seulement 42% pour l'intervalle d'air inférieur. Le claquage initial de l'intervalle d'air supérieur a effectivement été observé au cours des tests expérimentaux, validant ainsi les résultats numériques.

L'ajout du second anneau de garde modifié a donc permis d'augmenter la distance d'arc tout en diminuant la chute de tension le long de l'intervalle d'air supérieur. Ainsi, avec une tension  $V_b$  de 237,5 kV<sub>rms</sub> nécessaire pour claquer ce dernier, cela requiert donc une tension appliquée de 325,3 kV<sub>rms</sub> d'après les résultats du tableau 5. Cette valeur de tension requise se situe entre la tension de tenue de 315 kV<sub>rms</sub> et la tension de contournement de 330 kV<sub>rms</sub> relevées au cours des tests expérimentaux. Il a été effectivement observé expérimentalement que le claquage de l'intervalle d'air supérieur se produisait pour une tension appliquée de 330 kV<sub>rms</sub> et que ce dernier ne se produisait pas pour une tension appliquée de 315 kV<sub>rms</sub> équivalente à la valeur de  $V_{TM}$ . Cette observation est confirmée par l'analyse de l'évolution du courant de fuite mesuré au cours d'un test de tenue effectué à 315 kV<sub>rms</sub>, tel que présenté à la figure 66. Il est possible de noter que le courant de fuite ne dépasse jamais les 20 mA, valeur considérée comme le seuil d'apparition des arcs électriques partiels issus du claquage des intervalles d'air [5].



**Figure 66 :** Évolution du courant de fuite au cours d'un essai ayant conduit à une tenue pour une tension appliquée de 315 kV<sub>rms</sub>.

Il a été aussi observé expérimentalement que lorsque le claquage de l'intervalle d'air supérieur était obtenu, cela conduisant automatiquement au claquage du second intervalle d'air, ce qui conduisait dans la majorité des cas, au contournement de l'isolateur. Cela est normal puisque le claquage de l'intervalle d'air supérieur entraîne une redistribution du potentiel le long de la colonne isolante, tel que démontré dans [7], conduisant à une augmentation de la chute de tension le long du second intervalle d'air, l'intervalle d'air inférieur. Si les conditions surfaciques sont adéquates, l'augmentation de la chute de tension au niveau de l'intervalle d'air inférieur est suffisante pour entraîner le claquage de ce dernier, tel qu'observé expérimentalement.

Enfin, il est intéressant de signaler que lors du claquage des deux intervalles d'air, les arcs électriques partiels s'établissaient prioritairement entre l'anneau de garde modifié et la surface de glace, tel qu'illustré à la figure 67. Cela ajoute un autre avantage à l'utilisation des anneaux de garde modifiés puisque ces derniers permettent de protéger la surface de la colonne isolante non recouvertes de glace contre les piqûres et détériorations produites par les arcs électriques en éloignant ces derniers de la surface de l'isolateur.

### **6.1. Discussion des résultats obtenus**

Les résultats expérimentaux et numériques ont permis de démontrer le potentiel fort intéressant de l'ajout de deux anneaux de garde modifiés afin d'accroître la tension de tenue maximale d'une colonne isolante standard sous conditions d'accumulation de glace sévère. L'utilisation d'un grillage métallique ajouté à l'anneau de garde permet donc à ce dernier

de se comporter comme une jupe auxiliaire en protégeant des accumulations de glace la surface de la colonne isolante en dessous de l'anneau, créant ainsi artificiellement un intervalle d'air de longueur importante, tout en améliorant la répartition du potentiel le long de la colonne isolante.



**Figure 67 :** Apparition des arcs électriques partiels le long des deux intervalles d'air au cours de la période de fonte.

Il a été démontré que l'addition d'un seul anneau de garde modifié sur l'électrode H.T. n'était pas suffisant pour obtenir un gain notable au niveau de la tension de tenue maximale, ce qui était principalement dû au fait que l'intervalle d'air ainsi créé doit supporter presque la totalité de la tension appliquée à la colonne isolante, tel que démontré par les simulations numériques. Cependant, l'ajout d'un second anneau de garde modifié

sur l'électrode flottante permet de réduire la chute de tension le long de l'intervalle d'air supérieur tout en augmentant considérablement la distance d'arc. De cette façon, le pourcentage de tension nécessaire pour claquer l'intervalle d'air supérieur devient plus importante, ce qui augmente du même coup la valeur de la tension de tenue maximale. Ce principe d'influence des intervalles d'air créés artificiellement a clairement été mis en évidence grâce aux simulations numériques dont les résultats ont pu être validés par les observations expérimentales.

Enfin, il a été observé expérimentalement que les anneaux de garde modifiés jouent un rôle de protection de la colonne isolante puisqu'ils permettent d'éloigner les arcs électriques partiels de la surface de cette dernière qui s'établissent prioritairement entre l'extrémité de l'anneau de garde et la surface de glace.

## CHAPITRE 7

### CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS SUR LES TRAVAUX À VENIR

#### 7.1. Conclusions

La présente étude avait pour but de déterminer l'influence d'un anneau de garde standard sur la performance électrique d'une colonne isolante 735 kV constituée de deux unités d'isolateur de poste standard en porcelaine soumis à des accumulations de glace sévères et de proposer des solutions afin d'optimiser les performances de cette dernière. L'étude a été réalisée en utilisant conjointement des tests expérimentaux et des simulations numériques. Les tests expérimentaux ont été réalisés pour des conditions d'accumulation de glace en régime humique équivalentes à une épaisseur de glace radiale de 15mm. Quant aux simulations numériques, ces dernières ont été réalisées en configuration axisymétrique par le biais d'un logiciel commercial d'éléments finis, Comsol Multiphysics, en modélisant une colonne isolante en début d'accumulation de glace, ce qui a nécessité la prise en compte de glaçons formés entre les jupes.

Les différents résultats obtenus ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'étude numérique relative à l'influence du nombre d'anneaux de garde de géométrie standard a permis de démontrer que l'ajout d'un seul anneau de garde

sur l'électrode H.T. de la colonne isolante est la solution la plus économique pour obtenir la meilleure uniformité dans la distribution de potentiel.

- Toujours d'après les simulations numériques, l'ajout de l'anneau de garde standard à l'électrode H.T. permet une diminution importante de l'intensité du champ électrique le long des premières jupes proches de l'électrode H.T., ce qui se traduit par une diminution de la chute de tension aux bornes des intervalles d'air créés par la présence des glaçons. Cette diminution de la chute de tension permet d'inhiber la formation des décharges partielles à l'extrémité des glaçons, empêchant ainsi l'intervalle d'air de se former et se traduisant par l'obtention d'un dépôt de glace plus uniforme.
- Les tests expérimentaux réalisés en laboratoire sous conditions d'accumulation de glace ont permis de mettre en évidence le fait que l'ajout de l'anneau de garde standard permet effectivement d'obtenir une répartition de la glace plus uniforme le long de la colonne isolante avec absence de l'intervalle d'air au voisinage de l'électrode H.T., ce qui permet de valider les résultats des simulations numériques. Cependant, les tests expérimentaux ont aussi révélé que l'uniformité du dépôt de glace n'est pas un gage d'amélioration des performances de la colonne isolante sous conditions de glace sévères puisque la détermination de la tension de tenue maximale  $V_{TM}$  obtenue avec l'anneau de garde standard reste identique à celle obtenue sous les mêmes conditions expérimentales sans ce dernier.

- L'étude paramétrique réalisée avec un anneau de garde positionné sur l'électrode H.T. a permis de déterminer une valeur optimale du rayon de l'anneau  $R$  et de sa position  $H$  dont les valeurs respectives de 1m et 0,14m permettent d'obtenir la meilleure linéarisation de la distribution de potentiel le long de la colonne isolante avec et sans glaçons.
- L'étude paramétrique a aussi permis de mettre en évidence la séparation des lignes équipotentielles au voisinage de l'ensemble électrode H.T. et anneau de garde. Cette séparation des lignes équipotentielles est observable pour la géométrie standard de l'anneau de garde et s'amplifie avec l'augmentation de son rayon  $R$ . Cela provient principalement de système de fixation de l'anneau à l'électrode qui est réalisé par deux points de contact seulement. Ainsi, l'ensemble électrode H.T. et anneau de garde, malgré le fait qu'il soit au même potentiel, n'est pas une unité uniforme en termes d'équipotentielles, ce qui influence l'intensité du champ électrique au voisinage de l'électrode H.T.
- Les simulations numériques ont permis de démontrer que le fait de créer un lien électrique complet entre l'électrode H.T. et l'anneau de garde permet d'éviter la séparation des lignes équipotentielles, améliorant ainsi la linéarisation de la distribution de potentiel et la réduction de l'intensité du champ électrique au voisinage de l'électrode H.T. Pratiquement, un tel lien électrique peut être aisément réalisé par l'ajout d'un grillage métallique reliant électriquement et entièrement la circonférence entre l'électrode H.T. à celle de l'anneau de garde.

- Les tests expérimentaux ont permis de mettre en évidence le fait que l'ajout du grillage métallique permet à l'anneau de garde standard de se comporter comme une jupe auxiliaire. En effet, les mailles très fines de ce dernier empêche la glace de se former sur la surface de la colonne isolante protégée par l'anneau de garde ainsi modifié, résultant en la création d'un intervalle d'air de longueur importante.
- L'ajout d'un anneau de garde modifié à l'électrode H.T. a seulement permis d'accroître la tension de tenue maximale de la colonne isolante recouverte de glace de 5% par rapport au cas avec un anneau de garde standard. Ce faible gain est dû, d'après les résultats découlant d'une simulation numérique, au fait que l'intervalle d'air créé par l'ajout de l'anneau modifié doit supporter plus de 80% de la tension appliquée. Par conséquent, une longueur d'intervalle d'air plus importante est nécessaire afin de pouvoir supporter une chute de tension suffisante pouvant éviter le claquage de ce dernier.
- L'ajout d'un second anneau de garde modifié sur l'électrode flottante a permis d'obtenir un gain significatif de 16,6% par rapport à l'anneau standard, soit 8,3% par anneau de garde modifié. Ce gain est supérieur au gain obtenu avec une colonne isolante équipée de quatre jupes auxiliaires qui est estimé à 22%, soit 5,5% par jupe auxiliaire. La modélisation numérique a permis de démontrer que l'ajout du second anneau modifié permet de réduire de 7% la chute de tension le long de l'intervalle d'air inférieur tout en augmentant la distance d'arc total, ce qui contribue à augmenter la tension de tenue maximale.

- Les différents résultats expérimentaux et observations faites au cours des tests ont permis de valider la plupart des résultats numériques. Cela démontre que la modélisation proposée et simplifications effectuées de la colonne isolante standard en période d'accumulation et de fonte sont justifiées et pertinentes. Cela démontre aussi que les simulations numériques sont des outils totalement complémentaires aux tests expérimentaux afin de permettre une meilleure utilisation et dimensionnement des équipements d'isolation sous conditions de glace.
- Les différents résultats numériques, quoiqu'étant été obtenus pour une colonne isolante en début de période d'accumulation avec présence de glaçons, sont tout aussi applicable dans le cadre de colonnes isolantes propres, tel que démontré par les simulations numériques. Ces résultats peuvent donc servir à améliorer l'utilisation des anneaux de garde sous conditions normales afin de diminuer l'activité des décharges couronnes dans les postes de transport et d'interconnexion.

D'un point de vue plus général, les résultats présentés dans ce mémoire ont permis d'accroître les connaissances générales sur l'utilisation des anneaux de garde qui équipent les colonnes isolantes standard utilisées dans les postes, spécifiquement sous conditions de glace et plus généralement sous conditions normales. Ainsi, d'après les différents résultats expérimentaux et numériques, une solution simple et innovante a été proposée afin de donner une seconde fonction aux anneaux de garde qui est d'accroître les performances de colonnes isolantes sous conditions de glace sévères. La solution proposée reste économique

et demeure une alternative intéressante aux jupes auxiliaires, du fait que l'utilisation adéquate d'un grillage métallique peut prévenir l'accumulation de glace sur une partie de la surface de la colonne isolante sans pour autant protéger cette dernière contre le ruissèlement de l'eau de pluie qui favorise le lavage naturel de la surface. Le second avantage réside dans l'amélioration de l'uniformisation de la distribution du potentiel induit par l'anneau modifié qui permet une réduction de l'intensité du champ électrique au voisinage de l'électrode H.T. et donc une diminution des activités des décharges couronnes sous conditions normales d'utilisation. Enfin, le troisième avantage a rapport avec la protection de la surface de la colonne isolante lors de l'apparition des arcs partiels sous conditions de glace et ainsi augmenter la durée de vie de cette dernière.

## 7.2. Recommandations

Les recommandations proposées sont principalement orientées vers une application pratique de la solution proposée dans la présente étude. Ces dernières peuvent se résumer comme suit :

- Il serait intéressant de pouvoir déterminer la taille optimale des mailles du grillage métallique qui permettrait un passage plus aisément de la pluie afin de faciliter le lavage naturel de l'isolateur tout en permettant de protéger la surface de l'isolateur contre les accumulations de glace.
- Il serait intéressant d'effectuer des tests supplémentaires avec les anneaux modifiés sous des conditions de glace encore plus sévères que celles utilisées dans la présente étude.

- De plus, dans un souci d'économie, il serait aussi intéressant d'effectuer une nouvelle étude visant à optimiser la solution proposée en ce qui à trait aux dimensions optimales des anneaux de garde équipés de grillage, optimisation qui prendrait en compte la présence des intervalles d'air créés artificiellement par les anneaux modifiés.
- En dernier lieu, il est important de discuter sur le fait que tous les résultats présentés dans le cadre de cette recherche ont été obtenus pour une colonne isolante formée de deux unités d'isolateurs de poste standard alors que normalement dans les postes, une telle colonne est constituée de trois unités d'isolateurs de distance d'arc identique ou de quatre isolateurs de longueur plus faible. Il serait important de vérifier l'impact de l'ajout d'un troisième isolateur sur la distribution totale de la colonne isolante et sur l'influence de l'ajout de l'anneau de garde standard et modifié. Ces simulations pourraient être simplement réalisées pour une colonne isolante propre.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. Farzaneh (*Chair*) et al, « *Selection of Line Insulators with respect to Ice and Snow, Part I: Context and Stresses* ». A position paper prepared by the IEEE Task Force on icing performance of line insulators, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 22, no. 4, pp. 2289-2296, octobre 2007.
- [2] M. Farzaneh (*Chair*) et al., « Selection of Line Insulators with respect to Ice and Snow, Part II: Selection Methods and Mitigation Options ». A position paper prepared by the IEEE Task Force on icing performance of line insulators, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 4, pp. 2297-2304, 2007.
- [3] Farzaneh. « Mitigation Options to Improve Network Reliability in Winter Flashover Conditions », Chapitre 7 du livre « Atmospheric Icing of Power Networks », Springer, Berlin, 36 p, août 2008.
- [4] CIGRE Task Force 33.04.09, « Influence of ice and snow on the flashover performance of outdoor insulators, part I: Effects of ice », ELECTRA, no.187, pp. 91-111, décembre 1999.
- [5] Masoud Farzaneh, William A. Chisholm, Insulators for Icing and Polluted Environments, IEEE Press Series on Power Engineering, octobre 2009.
- [6] N. Sugawara et M. Farzaneh, « On the role of water film in the mechanism of flashover of iced insulator, » dans Proc. IEEE Int. Symp. Electrical Insulation, Washington, D.C, pp. 281-286, juin 1986.
- [7] C. Volat et M. Farzaneh, « 3D Modeling of Potential and Electric Field Distributions along an EHV Ceramic Post Insulator Covered with Ice. Part I: Effects of Air Gaps and Partial Arcs ». IEEE Trans. on Power Delivery, vol.20, pp. 2006-2013, juillet 2005.
- [8] C. Volat, M. Farzaneh et A. Gakwaya, « Dynamic variations of potential and electric field distributions around an ice-covered insulator during ice accretion », International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Chester, England, session 4b, juin 2000.
- [9] C. Volat et M. Farzaneh, « A simple axisymmetric model for calculation of potential distribution along ice-covered post station insulators during a melting period», CEIDP 2008 Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Quebec, Canada, pp. 232-235, octobre 2008.
- [10] C. Volat, Thèse de doctorat, «Modélisation Physique et Méthode Numérique par la Méthode de Éléments Finis de Frontière de la Distribution du Potentiel et du Champ Électrique le Long d'un Isolateur Standard de Post 735 KV Recouvert de Glace », UQAC, juin 2002
- [11] M. Farzaneh et C.Volat, « Electric field modelling around an ice-covered insulator using boundary element method » Proc.2000 IEEE Int. Symp. Electrical Insulation, Anaheim, Californie, pp. 349-355, avril 2000.
- [12] C. Volat, M. Farzaneh et N. Mhaguen, « Calculation of Critical Flashover Voltage of Ice-Covered Insulators Using the Finite Element Method », IEEE CEIDP 2009 Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Virginia Beach, États-Unis, 4p, octobre 2009.

- [13] X. Chen, M.Farzaneh et J. Zhang, «Factors influencing flashover characteristics along ice surfaces, » Proc. 7th Int. Workshop on Atmospheric Icing of structures, Chicoutimi, P.Q, pp. 77-81, juin 1996.
- [14] M. Farzaneh et C. Volat, « Étude de la Tension de Tenue des Isolateurs de Poste en présence de Glace atmosphérique en vue d'un choix approprié de type et configuration d'isolateurs de postes à 735 KV ». rapport soumis à Hydro-Québec TransÉnergie, Direction expertise et support technique de transport, Vol. 2 : Étude comparative des performances électriques des isolateurs de poste et de ligne, 29 pages, février 2005.
- [15] M. Farzaneh et C. Volat, « Étude de la tension de tenue des isolateurs de postes en présence de glace atmosphérique en vue d'un choix approprié de type et configuration d'isolateurs de postes à 735 kV. Volume 3: Étude en vue de l'amélioration de la tenue diélectrique des isolateurs de poste standard par l'ajout de jupes auxiliaires ». rapport soumis à Hydro-Québec TransÉnergie, Direction expertise et support technique de transport, Vol. 3, 40 pages, février 2005.
- [16] CIGRE Working Group 22.03, «Use of Stress control Rings on Composite Insulators », ELECTRA N°.143, pp. 68-71, août 1992.
- [17] T. Xie et Z. Peng, « Study on the voltage-sharing performance of porcelain insulators on 750 KV compact double circuit transmission line», 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Harbin, China, pp. 192-195, 19-23 juillet 2009.
- [18] W. Sima, K. Wu, Q. Yang et C.N Sun, « Corona Ring Design of ±800KV DC Composite Insulator Based on Computer Analysis», Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Chine, pp. 457-460, 2006.
- [19] B.Vancia, T.K. Saha et T. Gillespie, « Electric Field Modelling of Non-Ceramic High Voltage Insulators », Australasian Universities Power Engineering Conference, 2005
- [20] K. Eleperuma, T. P. Saha et T. Gillespie. « Electric Field Modelling of Non-ceramic High Voltage Insulators ». Australian Journal of Electrical & Electronics Engineering, Vol. 4, No. 3, 2008.
- [21] I. Sebestyén, « Optimization for High Voltage Composite Insulators Using Experimental Desing Theory », Proc. 11<sup>ième</sup> Inter. Symp. On Electromagnetic Fields in Electrical Enginnering, Maribor, Slovénie, papier I-15, pp. 95-98, 18-20 septembre 2003.
- [22] S. Dessanti, F. Moro et R. Turri, « A critical field criterium for assessing RIV inception levels on HV devices », Proc. 15<sup>ième</sup> Inter. Symp. On High Voltage Engineering, papier T3-479, Ljubljana, Slovénie, 27-31 août 2007.
- [23] C.H.A. Ely, P.J. Lambeth et J.S.T. Looms, « The Booster Shed: Prevention of Flashover of Polluted Substation Insulators in Heavy », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 6, Nov/Dec 1978.
- [24] Y. Porcheron, « Isolateurs », Techniques de l'ingénieur, section D 4425, pp. 1-9,1996.
- [25] <http://www.alibaba.com/showroom/insulator-grading-ring.html>.
- [26] <http://www.helitecnics.com/index.php?lang=fr>.
- [27] A.J. Phillips, D.J. Childs et H.M. Schneider, « Aging of Non-Ceramic Insulators due to Corona from Water Drops », IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 14, No. 3, pp. 1081-1089, juillet 1999.
- [28] E. Nasser, «Contamination Flashover of Outdoor Insulation", ETZ-A, Vol. 93, pp. 321-325, 1972.

- [29] J. Y. Saison, « Etude du Phénomène d'Humidification de Dépôts Naturels et Artificiels de Pollution sur des Isolateurs Electriques », Thèse de Doctorat de l'Université de Strasbourg, 1992.
- [30] O. Elsasser, K. Feser et F. Messerer, « Flashover Behavior of Semiconducting Glazed Insulators Under Positive Lightning Impulse Stress at Different Climatic Conditions », Annual Report on Electrical Insulation an Dielectric Phenomena, vol.1, pp. 203-206, octobre 2000.
- [31] K. Kannus, "Aspect of the Electrical Performance of High Voltage insulator and Metal Oxide Surge Arresters under Various Environmental Stresses", Tamplere University of Technology, Publications 229,1998.
- [32] M. Farzaneh et J. Kiernicki, "Contourement Électrique des Isolateurs Recouverts de Glace", Revue canadienne de génie électrique et informatique, vol.22, no.3, pp.95-109, juillet 1997.
- [33] Task Force 33.04.09, "Influence of Ice and Snow on The Flashover Performance of Outdoor Insulators, Part I: Effects of Ice", ÉLECTRA, No. 187, pp. 91-111, décembre 1999.
- [34] M. Farzaneh et R.Chaarani, «Performances électriques de divers types et configurations d'isolateurs sous conditions de glace atmosphérique artificielle». Rapport pour Hydro-Québec, avril 1999, 44p.
- [35] M. Farzaneh, J.-F. Drapeau, S. Brettschneider et M. Roy, « Étude comparative de performance électrique des isolateurs externes dans des conditions de glace atmosphérique en vue du choix adéquant d'isolateurs de postes à 735 KV». Colloque « le givrage atmosphérique et ses effets sur les équipements des réseaux électriques» organisé par la CIGELE,69<sup>e</sup> congrès de l'ACFAS, Université de sherbrooke, mai 2001