



**Développement d'un modèle thermoélectrique numérique de formation
des bandes sèches à la surface des isolateurs composites pollués**

Par

Marc Alain Andoh

Sous la direction de Christophe Volat, PhD, Ing.

**Thèse présentée à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de
l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph. D.) en ingénierie**

Jury :

Issouf Fofana, Professeur, UQAC, Président du Jury

Gwenaël Gaborit, Professeur, Université Savoie-Mont-Blanc, Membre externe

Fethi Meghnefi, Professeur, UQAC, Membre interne

Québec, Canada

© Marc Alain Andoh, 2025

RÉSUMÉ

Le champ de recherche relatif à la problématique du contournement électrique des isolateurs composites pollués est assez impressionnant. La décharge à la surface des isolateurs pollués par voie humide est directement liée à la présence de bande sèche. Étant données les résistances inégales des couches polluées, la portion de plus faible résistance s'assèche plus rapidement en raison d'une grande quantité de chaleur générée par effet Joule. La résistance de la bande sèche devient plus grande et voit apparaître une chute de tension considérable, provoquant une décharge partielle et même le développement d'un contournement complet dans certaines conditions lorsque le gradient de potentiel surpasse la valeur critique du champ électrique de contournement. La création de bandes sèches est donc étroitement associée à la décharge à la surface des isolateurs. Toutefois, malgré le grand intérêt porté à la compréhension et à la modélisation des bandes sèches, très peu d'études ou de modèles sont dédiés à la formation des bandes sèches et aux phénomènes de pré-contournement des isolateurs composites dont leur utilisation est privilégiée dans les environnements pollués et/ou hostiles. Les tests de pollution et de contournement, en laboratoire, des isolateurs non céramiques reposent sur des adaptations des normes CEI 60507 et CEI 60815. Ces modèles de contournement dans leur ensemble ne permettent pas véritablement d'observer, de comprendre et de valider le processus de formation des bandes sèches sur les surfaces d'isolateurs pollués parcourues par les courants de fuite.

L'objectif principal de la présente thèse est donc de contribuer au développement d'un modèle numérique multiphysique permettant de simuler le processus de formation des bandes sèches présentes le long des isolateurs pollués. Le but de ce modèle étant de reproduire les essais sous pollution des isolateurs composites et d'étudier l'apparition de bandes sèches ainsi que les décharges partielles à travers celles-ci. L'atteinte de cet objectif s'est faite par le développement de différents modèles, la réalisation de divers tests expérimentaux et de plusieurs simulations numériques. Les résultats dans leurs ensembles ont été diffusés à travers trois articles de journaux. Préalablement au développement du modèle expérimental, des simulations thermoélectriques ont été effectuées sur une géométrie d'isolateur composite 69 kV. Ces simulations ont permis dans un premier temps de comprendre les interactions multiphysiques complexes entre les distributions de tension, de champ électrique, de température et de densité de courant. Les résultats obtenus montrent que la contrainte thermique est plus importante à la surface du fût de l'isolateur composite entre les jupes où la densité de courant est

maximale. Ces résultats ont été déterminants pour la conception de la géométrie simple des substrats des matériaux testés présentées dans le premier article.

Le premier article (*DEVELOPMENT OF A SIMPLE EXPERIMENTAL SETUP FOR THE STUDY OF THE FORMATION OF DRY BANDS ON COMPOSITE INSULATORS*) présente une nouvelle géométrie simplifiée d'un isolateur permettant d'étudier rapidement et plus simplement le processus naturel de formation de bandes sèches. Afin de reproduire expérimentalement la constriction des lignes de densité de courant sur la surface du fût de l'isolateur, le développement d'un nouveau dispositif géométrique simple, qui a ensuite été testé expérimentalement, a été proposé. Plusieurs valeurs de DDSE correspondant à un niveau de pollution élevé ont été utilisées pour chaque échantillon pollué. Ces derniers ont été placés dans une enceinte climatique à une humidité relative constante de 90 % et une température ambiante constante de 20 °C. Des séries de tests sous basse tension ont permis de déterminer la durée d'humidification optimale permettant d'obtenir la conductivité maximale de la couche de pollution. Les valeurs obtenues sont en accord avec la durée de 10 à 40 minutes recommandée dans la norme CEI 60507. Les tests effectués à une tension plus élevée ont démontré l'efficacité de la configuration proposée pour simuler le processus complexe de formation de bande sèche de manière reproductible en termes de comportement en matière de courant de fuite et de température. La configuration proposée est une méthode innovante et simple qui peut être facilement utilisée par l'industrie électrique pour développer de nouveaux matériaux dédiés à la prochaine génération d'isolateurs composites pour lignes aériennes sans nécessiter l'utilisation d'un laboratoire H.T. avec ses équipements coûteux ainsi que les essais sous pollution avec des isolateurs réels qui demeurent longs et fastidieux.

Le second article (*EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PARAMETERS INFLUENCING THE FORMATION OF DRY BANDS AND RELATED ELECTRIC FIELD*) présente une étude expérimentale menée pour déterminer l'influence de différents paramètres tels que la température ambiante, le niveau de pollution ainsi que le matériau du substrat sur la formation de bandes sèches en présence d'une couche de pollution. Pour étudier ces paramètres, la géométrie d'isolateur simplifiée présentée dans l'article précédent a été utilisée pour contrôler expérimentalement le processus complexe de formation de bandes sèches sur une surface polluée. Du plexiglas, du RTV et du verre ont été utilisés comme matériaux de construction du substrat. Le RTV et le verre ont été utilisés pour simuler respectivement une surface d'isolant composite et céramique. De plus, une sonde électrooptique (EO) a permis de mesurer l'évolution du champ électrique axial E à la surface de la couche polluée lors de la formation de la bande sèche. Les résultats ont montré que le matériau du

substrat, la température ambiante et le niveau de pollution influencent considérablement la formation des bandes sèches. Étant donné que la plupart des résultats obtenus ici étaient conformes à ceux de la littérature, il a été conclu que le modèle expérimental proposé peut fournir une méthode de test efficace et peu coûteuse pour développer de nouveaux matériaux et améliorer les performances diélectriques des isolants utilisés dans les environnements pollués. De même, la géométrie simple du modèle expérimental et la capacité de contrôler facilement les paramètres expérimentaux peuvent permettre à cet outil de valider les résultats de divers modèles numériques dans les études du comportement thermoélectrique des isolants pollués.

Le troisième article (*A SIMPLE THERMOELECTRICAL SURFACE APPROACH TO NUMERICALLY STUDY DRY BAND FORMATION ON POLLUTED INSULATORS*) présente une nouvelle méthode numérique simple permettant de modéliser numériquement et relativement simplement le processus complexe d'apparition d'une bande sèche sur un isolateur pollué. La méthode proposée combine une expression empirique de la conductivité surfacique de la couche de pollution en fonction de la température et de la DDSE et une approche surfacique pour la modélisation de la couche de pollution, utilisant des simulations thermoélectriques temporelles basées sur la méthode des éléments finis (MEF). En utilisant différents substrats, épaisseurs de couche de pollution et niveaux de DDSE, la fiabilité et les limites du modèle numérique thermoélectrique simple ont été étudiées. Les résultats numériques obtenus ont démontré que le modèle thermoélectrique proposé peut simuler dynamiquement l'apparition de la bande sèche conformément aux résultats expérimentaux en termes d'évolution temporelle de la température et de la résistance de la couche de pollution, ainsi que d'évolution de la chute de tension et du champ électrique le long de la zone de formation de la bande sèche. Les résultats démontrent également que le modèle permet de prendre en compte l'influence du substrat et de l'épaisseur de la couche de pollution, ces derniers étant directement reliés au processus thermique de la formation de la bande sèche. Par la suite, le modèle numérique surfacique thermoélectrique simple a été utilisé pour étudier l'apparition d'une bande sèche sur un isolateur de 69 kV uniformément pollué. Les résultats obtenus ont permis une simulation dynamique de l'apparition de la première bande sèche au centre de l'isolateur; et d'étudier en profondeur l'évolution de la température de surface, du potentiel électrique et des distributions du champ électrique le long de l'isolateur.

Le modèle thermoélectrique simple proposé, combiné au modèle empirique, permet de simuler l'influence d'une couche de pollution non uniforme. Il fournit ainsi un outil numérique simple pour étudier l'évolution des distributions du potentiel et du champ électrique le long d'un équipement

d'isolation uniformément et non uniformément pollué, afin d'identifier une zone de forte probabilité d'apparition de bande sèche en fonction du matériau et de la géométrie de l'isolateur. Ceci peut contribuer au développement de nouvelles méthodes d'atténuation pour améliorer les performances de tous les types d'isolateurs en conditions de pollution.

ABSTRACT

The field of research related to the problem of electrical flashover of polluted composite insulators is quite impressive. The discharge on the surface of wet-polluted insulators is directly linked to the presence of dry bands. Given the unequal resistances of the polluted layers, the portion with the lowest resistance dries out more quickly due to a large amount of heat generated by the Joule effect. The resistance of the dry band becomes greater and sees a considerable voltage drop, causing a partial discharge and even the development of a complete flashover under certain conditions when the potential gradient exceeds the critical value of the flashover electric field. The creation of dry bands is therefore closely associated with the discharge on the surface of the insulators. However, despite the great interest in understanding and modeling dry bands, very few studies or models are dedicated to the formation of dry bands and the pre-flashover phenomena of composite insulators, whose use is favored in polluted and/or hostile environments. Laboratory pollution and flashover tests for non-ceramic insulators are based on adaptations of IEC 60507 and IEC 60815. These flashover models do not truly allow for the observation, understanding, and validation of the dry band formation process on polluted insulator surfaces carrying leakage currents.

The main objective of this thesis is therefore to contribute to the development of a multiphysics numerical model to simulate the dry band formation process present along polluted insulators. The purpose of this model is to reproduce pollution tests on composite insulators and to study the appearance of dry bands as well as partial discharges across them. This objective was achieved through the development of various models, various experimental tests, and several numerical simulations. The overall results were disseminated through three journal articles. Prior to developing the experimental model, thermoelectric simulations were performed on a 69 kV composite insulator geometry. These simulations initially provided insight into the complex multiphysical interactions between voltage, electric field, temperature, and current density distributions. The results show that thermal stress is greatest on the surface of the composite insulator barrel between the skirts, where current density is highest. These results were instrumental in designing the simple geometry of the substrates for the tested materials presented in the first article.

The first paper (*DEVELOPMENT OF A SIMPLE EXPERIMENTAL SETUP FOR THE STUDY OF THE FORMATION OF DRY BANDS ON COMPOSITE INSULATORS*) presents a new simplified insulator geometry that allows for a rapid and simpler study of the natural process of dry band formation. To experimentally reproduce the constriction of current density lines on the surface of the insulator barrel, the

development of a new simple geometric device, which was then experimentally tested, was proposed. Several DDSE values corresponding to a high pollution level were used for each polluted sample. The latter were placed in a climatic chamber at a constant relative humidity of 90% and a constant ambient temperature of 20°C. A series of tests under low voltage allowed the determination of the optimal humidification duration allowing the maximum conductivity of the pollution layer. The values obtained agree with the duration of 10 to 40 minutes recommended in the IEC 60507 standard. The tests carried out at a higher voltage demonstrated the effectiveness of the proposed setup to simulate the complex dry band formation process in a reproducible manner in terms of leakage current and temperature behavior. The proposed configuration is an innovative and simple method that can be easily used by the electrical industry to develop new materials for the next generation of composite insulators for overhead lines without requiring the use of an HV laboratory with its expensive equipment, as well as pollution tests with real insulators, which remain long and tedious.

The second paper (*EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PARAMETERS INFLUENCING THE FORMATION OF DRY BANDS AND RELATED ELECTRIC FIELD*) presents an experimental study conducted to determine the influence of various parameters such as ambient temperature, pollution level, and the substrate material on the formation of dry bands in the presence of a pollution layer. To investigate these parameters, the simplified insulator geometry presented in the previous article was used to experimentally control the complex process of dry band formation on a polluted surface. Plexiglas, RTV, and glass were used as substrate construction materials. RTV and glass were used to simulate a composite and ceramic insulator surface, respectively. In addition, an electro-optical (EO) probe was used to measure the evolution of the axial electric field E at the surface of the polluted layer during dry band formation. The results showed that the substrate material, ambient temperature, and pollution level significantly influence the formation of dry bands. Since most of the results obtained here were consistent with those in the literature, it was concluded that the proposed experimental model can provide an efficient and low-cost testing method for developing new materials and improving the dielectric performance of insulators used in polluted environments. Similarly, the simple geometry of the experimental model and the ability to easily control experimental parameters allow this tool to validate the results of various numerical models in studies of the thermoelectric behavior of polluted insulators.

The third paper (*A SIMPLE THERMOELECTRICAL SURFACE APPROACH TO NUMERICALLY STUDY DRY BAND FORMATION ON POLLUTED INSULATORS*) presents a new, simple numerical method for numerically and relatively simply modeling

the complex process of dry band formation on a polluted insulator. The proposed method combines an empirical expression of the surface conductivity of the pollution layer as a function of temperature and DDSE and a surface approach for modeling the pollution layer, using time-domain thermoelectric simulations based on the finite element method (FEM). Using different substrates, pollution layer thicknesses, and DDSE levels, the reliability and limitations of the simple thermoelectric numerical model were investigated. The numerical results obtained demonstrated that the proposed thermoelectric model can dynamically simulate the appearance of the dry band in accordance with the experimental results in terms of the temporal evolution of the temperature and resistance of the pollution layer, as well as the evolution of the voltage drop and the electric field along the dry band formation zone. The results also demonstrate that the model can consider the influence of the substrate and the thickness of the pollution layer, the latter being directly related to the thermal process of the dry band formation. Subsequently, the simple thermoelectric surface numerical model was used to study the appearance of a dry band on a uniformly polluted 69 kV insulator. The results obtained allowed a dynamic simulation of the appearance of the first dry band in the center of the insulator; and to study in depth the evolution of the surface temperature, the electric potential and the electric field distributions along the insulator. The proposed simple thermoelectric model, combined with the empirical model, allows simulating the influence of a non-uniform pollution layer. It thus provides a simple numerical tool to study the evolution of potential and electric field distributions along uniformly and non-uniformly polluted insulation equipment, to identify a zone of high probability of dry band occurrence depending on the insulator material and geometry. This can contribute to the development of new mitigation methods to improve the performance of all types of insulators under pollution conditions.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ	ii
ABSTRACT	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	xiv
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES SIGLES	xxiii
LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS.....	xxiv
DÉDICACE	xxvii
REMERCIEMENTS	xxviii
CHAPITRE 1	1
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 INTRODUCTION	1
1.2 PROBLÉMATIQUE	2
1.3 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	8
1.4 MÉTHODOLOGIE	11
1.5 ORIGINALITÉS DE LA RECHERCHE.....	16
1.6 ORGANISATION DE LA THÈSE	18
CHAPITRE 2	20
REVUE DE LA LITTÉRATURE	20
2.1 CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS COMPOSITES	20
2.1.1.MODELES STATIQUES DE CONTOURNEMENT	23
2.1.2.MODELES DYNAMIQUES DE CONTOURNEMENT	24
2.1.3.MODELES NUMÉRIQUE DE PRÉDICTION DE LA TENSION DE CONTOURNEMENT	25
2.2 TESTS SOUS POLLUTION DES ISOLATEURS COMPOSITES	28
2.2.1.DENSITÉ DE DÉPÔT DE SEL ÉQUIVALENT (DDSE)	30
2.2.2.DENSITÉ DE DÉPÔT NON SOLUBLE (DDNS)	31
2.2.3.DIFFÉRENTES CLASSES DE POLLUTION	31
2.2.4.POLLUTION ARTIFICIELLE DES ISOLATEURS COMPOSITES HT ...	32
2.2.5.TEST DE LA COUCHE SOLIDE	37
2.2.6.TEST AU BROUILLARD SALIN.....	38

2.2.7. MODÉLISATION DU PHÉNOMÈNE D'HUMIDIFICATION D'UNE COUCHE DE POLLUTION À BASE DE KAOLIN ET DE CHLORURE DE SODIUM	40
2.3 FORMATION DES BANDES SÈCHES À LA SURFACE DES ISOLATEURS COMPOSITES.....	48
2.3.1. CRITÈRES DE FORMATION DES BANDES SÈCHES.....	50
2.3.2. IMPACT DE LA PRÉSENCE DES BANDES SÈCHES SUR LES PERFORMANCES DES ISOLATEURS DE LIGNES H.T. POLLUÉS ...	64
2.4 CONCLUSION PARTIELLE	78
CHAPITRE 3	80
DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE THERMOÉLECTRIQUE 2D AXISYMÉTRIQUE D'UN ISOLATEUR COMPOSITE 69 KV POLLUÉ	80
3.1 MODELISATION DE L'ISOLATEUR COMPOSITE 69 KV	80
3.2 MISE EN ÉQUATION	82
3.2.1. ÉQUATIONS ÉLECTRIQUES.....	82
3.2.2. ÉQUATIONS THERMIQUES	85
3.3 PROCÉDURE NUMÉRIQUE.....	86
3.3.1. DOMAINE DE CALCUL	86
3.3.2. MAILLAGE	88
3.4 RÉSULTATS DES SIMULATIONS ET DISCUSSIONS	89
3.4.1. DISTRIBUTIONS DE POTENTIEL ET DE CHAMP ÉLECTRIQUES.....	89
3.4.2. DISTRIBUTIONS DE TEMPÉRATURE	99
3.5 CONCLUSION PARTIELLE	105
CHAPITRE 4	106
DEVELOPMENT OF A SIMPLE EXPERIMENTAL SETUP FOR THE STUDY OF THE FORMATION OF DRY BANDS ON COMPOSITE INSULATORS	106
4.1 RESUMÉ	107
4.2 ABSTRACT	108
4.3 INTRODUCTION	109
4.4 THERMOELECTRIC SIMULATIONS OF 69 KV COMPOSITE INSULATOR	111
4.4.1. MODEL OF THE 69 KV INSULATOR.....	111
4.4.2. THERMOELECTRIC RESULTS OBTAINED FOR THE 69 KV COMPOSITE INSULATOR	114
4.5 DEVELOPMENT OF THE NEW EXPERIMENTAL MODEL FOR DRY BAND STUDIES.....	117

4.5.1.DESIGN OF THE NEW GEOMETRY	117
4.5.2.THERMOELECTRIC SIMULATION OF THE PROPOSED GEOMETRY 119	
4.6 EXPERIMENTAL TEST PROTOCOL	122
4.6.1.POLLUTION OF THE SAMPLE	122
4.6.2.EXPERIMENTAL SETUP AND PROCEDURE	124
4.7 EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION	128
4.7.1.ELECTRICAL CONDUCTIVITY PROFILE DURING LOW-VOLTAGE TEST	128
4.7.2.EXPERIMENTAL SIMULATION OF DRY BAND FORMATION	129
4.8 CONCLUSION.....	136
CHAPITRE 5	138
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PARAMETERS INFLUENCING THE FORMATION OF DRY BANDS AND RELATED ELECTRIC FIELD	138
5.1 RESUMÉ	139
5.2 ABSTRACT	140
5.3 INTRODUCTION	141
5.4 MATERIALS AND METHODS.....	144
5.4.1.CHARACTERISTICS OF THE EXPERIMENTAL MODELS	144
5.4.2.POLLUTION PROCEDURE IN EXPERIMENTAL MODELS	148
5.4.3.EXPERIMENTAL TEST SETUP	149
5.4.4.TEST PROCEDURE	151
5.5 PARAMETERS INFLUENCING THE DRY BAND FORMATION PROCESS	153
5.5.1.INFLUENCE OF POLLUTION LEVEL	153
5.5.2.INFLUENCE OF SUBSTRATE MATERIAL	156
5.5.3.INFLUENCE OF AMBIENT TEMPERATURE.....	158
5.6 AXIAL E-FIELD EVOLUTION ABOVE THE DRY BAND DURING DRY BAND FORMATION	163
5.6.1.EXPERIMENTAL E-FIELD EVOLUTION ABOVE AN ARTIFICIAL DRY BAND	163
5.6.2.E-FIELD SIMULATIONS WITH AN ARTIFICIAL DRY BAND	165
5.6.3.EXPERIMENTAL E-FIELD EVOLUTION DURING DRY BAND FORMATION.....	173
5.7 DISCUSSION	175

5.7.1.INFLUENCE OF PARAMETERS ON DRY BAND FORMATION.....	175
5.7.2.STUDY OF AXIAL E-FIELD EVOLUTION DURING DRY BAND FORMATION.....	180
5.8 CONCLUSION.....	182
CHAPITRE 6	184
A SIMPLE THERMOELECTRICAL SURFACE APPROACH TO NUMERICALLY STUDY DRY BAND FORMATION ON POLLUTED INSULATORS	184
6.1 RESUMÉ	185
6.2 ABSTRACT	186
6.3 INTRODUCTION	187
6.4 EMPIRICAL EQUATION OF THE POLLUTION LAYER SURFACE CONDUCTIVITY.....	191
6.4.1.EXPERIMENTAL SETUP.....	191
6.4.2.SURFACE CONDUCTIVITY OF THE POLLUTION LAYER AS A FUNCTION OF THE TEMPERATURE AND ESDD.....	193
6.5 THERMOELECTRIC NUMERICAL MODEL OF DRY BAND FORMATION .	198
6.5.1.PRESENTATION OF THE MODEL	198
6.5.2.VALIDATION OF THE THERMOELECTRICAL DRY BAND FORMATION SIMPLE MODEL	201
6.6 STUDY OF PARAMETERS INFLUENCING THE DRY BAND FORMATION	209
6.6.1.INFLUENCE OF THE SUBSTRATE THERMAL PROPERTIES.....	209
6.6.2.INFLUENCE OF THE POLLUTION LAYER THICKNESS.....	211
6.6.3.INFLUENCE OF THE POLLUTION LAYER ESDD.....	214
6.7 APPLICATION TO A POLLUTED COMPOSITE INSULATOR	217
6.7.1.POLLUTED COMPOSITE INSULATOR MODEL	217
6.7.2.NUMERICAL RESULTS RELATIVE TO THE ELECTRICAL PARAMETERS.....	219
6.7.3.NUMERICAL RESULTS RELATIVE TO THERMAL PARAMETERS ..	226
6.7.4.DISCUSSION OF THE RESULTS OBTAINED	230
6.8 CONCLUSION.....	233
CHAPITRE 7	236
CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS.....	236
7.1 CONCLUSION GÉNÉRALE	236
7.2 RECOMMANDATIONS POUR TRAVAUX FUTURS	240

LISTE DE RÉFÉRENCES	243
ANNEXES 1	254
RÉPÉTABILITÉ DE LA MÉTHODE EXPERIMENTALE	254
Répétabilité de la méthode d'application de la couche de pollution	254
Répétabilité de la méthode de mesure sous tension.....	256
ANNEXES 2	259
ABSORPTION DE LA COUCHE DE POLLUTION À BASE DE NACL+KAOLIN ...	259
Introduction.....	259
Modélisation mathématique de la conductivité électrique de la couche de pollution.....	260
Conclusion.....	266

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Équivalence entre pollution naturelle et pollution artificielle [3] ..	34
Tableau 2 : Différentes méthodes de test de pollution pour les isolateurs polymères [8]	35
Tableau 3 : Processus de pré-traitement des isolateurs polymériques pour les tests de pollution développés dans divers pays [8].....	36
Tableau 4 : Méthodes d'application de la couche de pollution dans différents pays [8]	38
Tableau 5 : Méthodes d'humidification de la couche de pollution dans différents pays [8]	38
Tableau 6 : Caractéristiques de l'isolateur composite Sediver [74].....	81
Tableau 7 : Propriétés thermoélectriques des matériaux.....	89
Table 8 : Sediver composite insulator characteristics [74].....	112
Table 9 : Thermoelectric properties of the materials.....	114
Table 10 : Experimental values of the axial E-field obtained for the EO sensor positioned at the center of the dry band at 5 mm from the surface.	165
Table 11 : Simulation parameters.	166
Table 12 : Values of the axial E-field at ± 1 mm around the center of the dry band at 7.5 mm from the surface.	170
Table 13 : Thermoelectrical parameters used for simulations.	199
Table 14 : Comparison of the experimental and numerical results of the pollution layer resistance obtained for an ESDD of 0.31 mg/cm^2 and applied voltages of 2, 4, and $6 \text{ kV}_{\text{rms}}$	203
Table 15 : Comparison of the experimental and numerical results of the temperature evolution in the middle of the dry band obtained for an ESDD of 0.31 mg/cm^2 and applied voltages of 2, 4, and $6 \text{ kV}_{\text{rms}}$	204
Table 16 : Sediver composite insulator characteristics [74].	217
Table 17 : Thermoelectric properties of materials.....	218
Tableau 18: Incertitude relative sur la mesure des DDSE	255
Tableau 19 : Incertitude relative sur la mesure des résistances électriques minimales des couches de pollution évaluées.....	256
Tableau 20 : Relevé typique des données des tests expérimentaux sous tension	257

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Image réelle (a) et vue en coupe (b) d'un isolateur composite [41]	21
Figure 2 : Modèle mono-arc d'Obenaus [36].....	24
Figure 3 : Modélisation en 2D du film d'eau recouvrant un isolateur de poste THT en présence de deux arcs électriques [46]	27
Figure 4 : Application de la poudre sèche de kaolin avec une brosse [8].	36
Figure 5 : Revêtement polluant par (a) trempage, (b) pulvérisation et (c) à l'aide de brosse [5].....	39
Figure 6 : Coupe transversale du modèle d'humidification [60]	42
Figure 7 : Évolution du coefficient osmotique avec la molalité [60].....	45
Figure 8 : Profil de température dans la plaquette [60]	47
Figure 9 : Évolution du courant de fuite (a) sans apparition de bande sèche, (b) avec apparition de bande sèche et (c) de la température avec création de bande sèche [15]	56
Figure 10 : Évolution de la conductance pour différents taux d'humidité [65]	57
Figure 11 : Variation de la puissance dissipée par effet joule le long du profil de l'isolateur ; $\sigma = 6 \cdot 10^{-7}$ S/m, $V = 14$ kV, $t_p = 0,5$ mm [65]	58
Figure 12 : Variation de la chute de tension dans l'arc en fonction de la longueur de la bande sèche [65].	59
Figure 13 : Organigramme du code d'évaluation de la tension de contournement [32].....	62
Figure 14 : Formation de bandes sèches pour différents niveaux de sévérité de la couche de pollution [66]	63
Figure 15 : Influence de la bande sèche sur la distribution de potentiel et de champ électrique le long d'un isolateur en verre pollué [31]	67
Figure 16 : Les cycles de courant de fuite correspondant à (a) sans bande sèche, (b) des décharges partielles sur bande sèche et (c) une phase d'arc [11]	68
Figure 17 : Système expérimental de test et pollution d'un modèle d'isolateur rectangulaire plan en verre [73]	71
Figure 18 : Relation entre la résistivité de surface et le courant de fuite [66]	72
Figure 19 : Formation de bandes sèches pour différents niveaux de sévérité de la couche de pollution [66]	73

Figure 20 : Impact des bandes sèches sur la tension critique de contournement [9].....	74
Figure 21 : Répartition du champ électrique le long d'un isolateur polymère (kV/cm) (a) Bande sèche à l'extrémité H.T. (b) Bande sèche à la partie médiane [33].....	75
Figure 22 : Morphologie (à gauche) et simulation numérique (à droite) d'un modèle d'isolateur plan pour (a): bande polluée continue, (b): discontinue avec 2 bandes sèches et (c): 3 bandes sèches [68].	76
Figure 23 : Distributions de potentiel pour un isolateur uniformément pollué avec différentes bandes sèches [68].	77
Figure 24 : Relation entre la conductance et le champ électrique [72]	78
Figure 25 : Géométrie de l'isolateur composite Sediver [74]	81
Figure 26 : Conditions aux limites (a) de flux $-n \cdot (-k \nabla) = h \cdot (T - T_{amb})$; (b) de tension $V = 0$ V; (c) de tension $V = 40$ kV. © M. A. Alain, 2023.....	87
Figure 27 : Exemple d'une partie du maillage de l'isolateur. © M.A. Andoh, 2023	88
Figure 28 : Distribution de potentiel électrique le long de l'isolateur composite 69 kV propre et sec : (a) surfacique, (b) isocontours, (c) le long de la ligne de fuite. © M. A. Alain, 2023	91
Figure 29 : Distribution de champ électrique le long de l'isolateur composite 69 kV propre et sec : (a) surfacique, (b) isocontours, (c) le long de la ligne de fuite. © M. A. Alain, 2023.....	92
Figure 30 : Distribution du potentiel électrique le long de l'isolateur composite 69 kV pollué et humide : (a) surfacique, (b) isocontours, (c) sur ligne de fuite. © M. A. Andoh, 2023	94
Figure 31 : Distribution du champ électrique le long de l'isolateur composite 69 kV pollué et humide : (a) surfacique, (b) isocontours, (c) le long de la ligne de fuite. © M. A. Andoh, 2023.....	95
Figure 32 : Comparaison des distributions de champ électrique pour l'isolateur propre et uniformément pollué. © M. A. Andoh, 2023.....	96
Figure 33 : Profils de distributions de potentiel et de champ électriques pour différentes valeurs de conductivité électrique de la couche de pollution. © M. A. Andoh, 2023	98
Figure 34 : Distribution de température (a) à la surface de l'isolateur, (b) le long de la ligne de fuite. © M. A. Alain, 2023.....	101

Figure 35 : Comparaison sur (a) une portion de couche de pollution entre (b), (c) la distribution de densité de courant et (d), (e) la distribution de température. © M.A. Andoh, 2023	102
Figure 36 : Profil radial de température de l'axe central à la surface de la couche de pollution. © M. A. Alain, 2023	103
Figure 37 : Variation des profils de températures (a) en fonction de la conductivité électrique, (b) en fonction de la conductivité thermique et (c) en fonction du coefficient de convection. © M. A. Alain, 2023	104
Figure 38 : Geometry of the Sediver composite insulator [74]	112
Figure 39 : E-field distribution at the surface of the polluted 69 kV composite insulator.	115
Figure 40 : Current density distribution.	116
Figure 41 : Temperature distribution.	116
Figure 42 : Geometry and dimensions (in mm) of the proposed experimental model.	118
Figure 43 : Thermoelectric simulation of the proposed geometry for a surface conductivity of 1 mS/m and an external temperature of 20 °C with (a) current line distribution represented by the red arrows and (b) surface temperature distribution.	120
Figure 44 : Results obtained along the axial distance of the model for a volume conductivity of 1 mS/m and an external temperature of 20 °C with (a) the current density distribution and (b) the surface temperature distribution.	121
Figure 45 : Results obtained along the vertical distance of the narrow part of the model for a volume conductivity of 1 mS/m and an external temperature of 20 °C with (a) the current density distribution and (b) the surface temperature distribution.	121
Figure 46 : View of Plexiglass geometry before and after the pollution layer was obtained after drying using a low-pressure gun with (a) clean sample and (b) polluted sample.	123
Figure 47 : Climate chamber.	125
Figure 48 : Low- and high-voltage test setup diagram.	127
Figure 49 : Example of three surface conductance evolutions obtained during the humidification period for an average ESDD of 1.34 mg/cm ²	129

Figure 50 : Examples of dry band formation obtained on the Plexiglass sample for an average ESDD of 1.34 mg/cm ² for applied voltages of (a) 2 kV, (b) 4 kV and (c) 6 kV.	132
Figure 51 : Examples of temperature distribution obtained with the IR camera in the zone of dry band formation (marked with red arrow) for applied voltages of (a) 2 kV, (b) 4 kV and (c) 6 kV for an average ESDD of 1.34 mg/cm ²	134
Figure 52 : Examples of evolution of the maximum current value and of the temperature measured at the center of the dry band as function of applied voltage, for average ESDD of 1.34 mg/cm ²	135
Figure 53 : Examples of temperature distribution evolution obtained with the IR camera in the dry band formation zone for an applied voltage of 2 kV and for an average ESDD of 1.34 mg/cm ² , where the maximum temperature T_{max} obtained inside the rectangular highlight zone is equal to (a) 34.6 °C at t = 0 s, (b) 60.8 °C and (c) 70.3 °C.	135
Figure 54 : Geometry and dimensions (in mm) of the experimental model.	145
Figure 55 : Production of RTV substrate to simulate the composite insulator surface.	147
Figure 56 : Contact angles obtained for the three RTV experimental models.	147
Figure 57 : Contact angles obtained for the three RTV experimental models after kaolin treatment.	148
Figure 58 : High-voltage test diagram.	150
Figure 59 : Electric field measurement system with (a) the optoelectronic converter and (b) the EO probe positioned above the dry band zone of formation.	150
Figure 60 : EO probe centered on an artificial dry band.	152
Figure 61 : Evolution of the average polluted layer resistance obtained for different ESDDs with the glass experimental model at an ambient temperature of 20°C.	154
Figure 62 : Correlation of ESDD with average pollution layer surface conductivity in the glass experimental model at an ambient temperature of 20 °C.	155
Figure 63 : Evolution of polluted layer resistance on different substrate materials, with an ambient temperature of 20 °C and average ESDD of 0.3 mg/cm ²	157

Figure 64 : Evolution of average pollution layer surface conductivity and average surface temperature in the middle of the dry band zone for different substrate materials, with an ambient temperature of 20 °C and average ESDD of 0.3 mg/cm ²	157
Figure 65 : Evolution of average polluted layer resistance as a function of the ambient temperature for Plexiglas substrate with an average ESDD of 0.96 mg/cm ²	158
Figure 66 : Evolution of average polluted layer resistance as a function of the ambient temperature for glass substrate with an average ESDD of 0.81 mg/cm ²	159
Figure 67 : Evolution of average polluted layer resistance as a function of the ambient temperature for RTV substrate with an average ESDD of 0.21 mg/cm ²	161
Figure 68 : Evolution of the average water mass absorbed by the pollution layer during the HV test as a function of the average mass of the pollution layer, under different ambient temperatures.....	161
Figure 69 : Evolution of the average polluted layer surface conductivity as a function of the ambient temperature for Plexiglas, glass, and RTV substrates with ESDDs of 0.96, 0.81, and 0.21 mg/cm ² , respectively.	162
Figure 70 : Evolution of the average axial E-field in the center of the dry band at 7.5 mm from the surface, obtained at an ambient temperature of 20 °C for Plexiglas substrate with an average ESDD of 0.52 mg/cm ²	164
Figure 71 : Numerical model with (a) the entire model with the climatic chamber and (b) a closed view of the experimental model with an artificial dry band with an 18 mm width.	166
Figure 72 : Vertical distribution of the axial E-field in the middle of the artificial dry band as a function of dry band width.	168
Figure 73 : Horizontal distribution of the axial E-field across the middle of the artificial dry band at a distance of 7.5 mm from the surface as a function of dry band width.	168
Figure 74 : Horizontal distribution of the axial E-field along the middle of the artificial dry band at a distance of 7.5 mm from the surface as a function of dry band width.	169
Figure 75 : Comparison of the numerical and experimental axial E-field values obtained in the middle of the artificial dry band at a distance of 7.5 mm from the surface.....	172

Figure 76 : Evolution of the axial E-field along the middle of the artificial dry band at a distance of 7.5 mm from the surface, as a function of dry band surface conductivity.....	172
Figure 77 : Evolution of the axial E-field and pollution layer resistance during the formation of a dry band with the RTV experimental model at an ambient temperature of 20 °C and an ESDD of 0.36 mg/cm ²	174
Figure 78 : Evolution of the axial E-field and pollution layer resistance during the formation of a dry band on glass substrate with an ambient temperature of 20 °C and ESDD of 0.16 mg/cm ²	175
Figure 79 : Geometry and dimensions (in mm) of the experimental model.	192
Figure 80 : Presentation of the organogram used to compute the pollution layer surface resistance as a function of the ESDD and the average temperature T in the dry band.....	196
Figure 81 : Presentation of the symmetric numerical model of the experimental setup.....	200
Figure 82 : Presentation of the finite element mesh used for the thermoelectrical simulations with a closed view of the mesh refinement in the dry band zone.....	200
Figure 83 : Comparison of the evolution of the polluted layer resistance for the Plexiglas substrate with an average ESDD of 0.31 mg/cm ² , as a function of the applied voltage.....	202
Figure 84 : Comparison of the evolution of the temperature in the middle of the dry band for the Plexiglas substrate with an average ESDD of 0.31 mg/cm ² , as a function of the applied voltage.	203
Figure 85 : Distribution of the potential along the axis of symmetry of the model obtained for an applied voltage of 4 kV _{rms} at time steps t of 0 s, 27 s, 54 s, and 61 s.....	206
Figure 86 : Distribution of the surface conductivity $\gamma_s(T, ESDD)$ along the axis of symmetry of the model obtained for an applied voltage of 4 kV _{rms} at time steps t of 0 s, 27 s, 54 s, and 61 s.	206
Figure 87 : Distribution of the temperature at the surface of the experimental Plexiglas substrate with an average ESDD of 0.31 mg/cm ² and for an applied voltage of 4 kV _{rms} at time steps t of a) 0 s, b) 27 s, c) 54 s, and d) 61 s.	208
Figure 88 : Comparison of the experimental and numerical evolutions of the axial E-field component measured in the middle of the dry band at 7.5 mm from the pollution layer surface for an applied voltage of 4 kV _{rms}	208

Figure 89 : Comparison of the evolution of the pollution layer resistance and the temperature in the middle of the dry band as a function of the substrate material and for an applied voltage of 2 kV _{rms} and an average ESDD of 0.31 mg/cm ²	210
Figure 90 : Comparison of the surface conductivity $\gamma_s(T, DDSE)$ along the axis of symmetry of the model as function of substrate material for an applied voltage of 2kV _{rms} at a time step t of 111 s and an average ESDD of 0.31 mg/cm ²	211
Figure 91 : Comparison of the pollution layer resistance as a function of the layer thickness obtained for the Plexiglas substrate, an applied voltage of 2kV _{rms} , and an ESDD of 0.31 mg/cm ²	213
Figure 92 : Dry band appearance time T _{DB} as a function of the pollution layer thickness obtained for the Plexiglas substrate, an applied voltage of 2kV _{rms} , and an ESDD of 0.31 mg/cm ²	213
Figure 93 : Evolution of the pollution layer resistance as a function of the ESDD obtained for the Plexiglass substrate with an applied voltage of 2 kVrms...	215
Figure 94 : Evolution of the pollution layer resistance as a function of the ESDD obtained for the glass substrate with an applied voltage of 2 kVrms.	216
Figure 95 : Evolution of the dry band appearance time T _{DB} as a function of the ESDD obtained for the glass substrate with an applied voltage of 2kV _{rms} . .	216
Figure 96 : Presentation of the numerical model with a) the 2D-axisymmetric 69 kV insulator and b) the corresponding meshed model.....	219
Figure 97 : Evolution of the leakage current and the pollution layer resistance obtained for an ESDD of 0.31 mg/cm ²	220
Figure 98 : Comparison of the potential distributions obtained for the clean and polluted insulators with an ESDD of 0.31 mg/cm ² at time steps of 0 s and 17 s.	220
Figure 99 : Comparison of the E-field distributions obtained for the clean and polluted insulators with an ESDD of 0.31 mg/cm ² at time steps of 0 s and 17 s.	221
Figure 100 : Distribution of the E-field and potential along the polluted insulator for an ESDD of 0.31 mg/cm ² at a time step of 17.5 s when the dry band is formed.	222
Figure 101 : Surface potential and equipotential lines' distribution obtained at time steps of 0 s and 17.5 s for the clean and polluted insulators with an ESDD of 0.31 mg/cm ²	223

Figure 102 : Closer view of the dry band zone appearance and the computational line in blue.	223
Figure 103 : Closer view of the evolution of the potential, E-field, and surface conductivity distributions along the dry band zone for an ESDD of 0.3 mg/cm ² with a) E-field distribution, b) potential distribution, c) E-field and potential distribution along the dry band at $t = 17.5$ s, and d) surface conductivity γ_s (T,ESDD).	225
Figure 104 : Evolution of the temperature distribution along the polluted insulator until the formation of the dry band with an ESDD of 0.3 mg/cm ² . ..	227
Figure 105 : Evolution of the maximum temperature at the surface of the insulator core at positions 1, 9, 10, 11, and 20 for an ESDD of 0.3 mg/cm ²	227
Figure 106 : Evolution of the surface temperature of the polluted insulator until the formation of the dry band with an ESDD of 0.3 mg/cm ²	229
Figure 107 : Closed view of the evolution of the temperature distribution at the surface of the polluted insulator until the formation of the dry band between positions 9 and 11 with an ESDD of 0.3 mg/cm ²	230
Figure 108 : The surface potential and equipotential lines' distribution obtained at time steps of 0 s and 5.5 s for the polluted insulator presented a non-uniform pollution layer with an ESDD of 0.31 mg/cm ²	232
Figure 109 : Organigramme du modèle avec variation de conductivité électrique	260
Figure 110 : Absorption d'eau de la couche de pollution pour différentes valeurs de DDSE (Données expérimentales) © M. A. Alain, 2023.	262
Figure 111 : Masse d'eau absorbée à la surface de l'échantillon lors de l'humidification en fonction du temps et de la DDSE. © M. A. Alain, 2023..	263
Figure 112 : Évolution de la conductivité électrique lors de l'humidification pour différentes valeurs de DDSE. © M. A. Andoh, 2023	264
Figure 113 : Conductivité électrique en fonction de la densité de sel et de la masse d'eau de la couche de pollution. © M. A. Andoh, 2023.	265

LISTE DES SIGLES

UQAC	Université du Québec à Chicoutimi
CIGELE	Chaire industrielle CRSNG / Hydro-Québec / UQAC sur le givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques
IPNETP	Institut Pédagogique National de l'Enseignement Technique et Professionnel
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques ()
DDSE	Densité de Dépôt de Sel Équivalent (mg/cm ²)
DCM	Méthode du cycle de poussière
DSL	Couche de sel sèche
HT	Haute tension
2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
EPDM	Éthylène-Propylène-Diène Monomère
CC	Courant continu
AC	Courant alternatif
MEF	Méthode des Éléments Finis
THT	Très Haute Tension
NaCl	Chlorure de sodium
BS	Bande sèche
PC	Ordinateur personnel
CEI	Commission Électrotechnique Internationale
RTV	Vulcanisation à température ambiante
EO	Électro-optique
DDNS	Densité de Dépôt Non Soluble
DAQ	Système d'acquisition de données
LC	Courant de fuite

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

Symbole/Abréviation	Signification
R	Résistance électrique (Ω)
C	Capacité d'un condensateur (F)
I_n	Intensité du courant nominal (A)
V	Tension électrique (V)
ρ_v	Densité volumique de charge
div	Divergence
rot	Rotationnel
χ_e	Susceptibilité électrique
χ_m	Susceptibilité magnétique
ϵ_0	Permittivité électrique du vide
ϵ	Permittivité électrique
σ	Conductivité électrique
μ_0	Perméabilité magnétique du vide
μ	Perméabilité magnétique
P	Polarisation
grad	Gradient
J	Densité volumique de courant (A/m ²)
D	Induction électrique (C/m ²)
M	Aimantation
H	Champ magnétique (A/m)

B	Champ électrique surfacique (V/m)
E	Intensité du champ électrique (V/m).
J_s	Densité de courant surfacique (A/m)
ρ_s	Résistivité électrique surfacique (Ω.m)
P_s, P_w	Puissance dissipée par effet joule par unité de surface (W/m ²)
P_e	Puissance par mètre carré nécessaire pour évaporer une unité de masse d'eau.
P_{conv}	Puissance dissipée par convection (W/m ²)
j	Unité imaginaire complexe
ω	Pulsation de la source
Δ	Laplacien
m_e	Masse d'eau condensée (kg)
T	Température (K)
T_a	Température ambiante (K)
σ	Conductivité de la couche de pollution (S/m).
t_p	Épaisseur de la couche de pollution (m).
ep	Épaisseur de la plaquette de test (m)
ρ_{NaCl}	Masse volumique du NaCl (kg/m ³)
ρ_{sol}	Masse volumique de la solution (kg/m ³)
t	Temps (s)
M_w	Masse molaire de l'eau (H ₂ O) (g/mol)
S	Surface de la plaquette de test (m ²)

k	Conductivité thermique du matériau (W/m.K)
ρ	Masse volumique
C_p	Capacité thermique
Q	Source de chaleur
h	Coefficient de convection (W/m ² .K)
b	Facteur de température

DÉDICACE

À toute ma famille

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à témoigner ma profonde gratitude envers mon directeur de thèse, le Professeur Christophe Volat, pour sa guidance experte, son soutien constant et ses précieux conseils tout au long de ce projet de recherche. Sa patience, son enthousiasme et sa passion pour la science m'ont inspiré à donner le meilleur de moi-même. À travers sa rigueur scientifique, la justesse de ses remarques, la pertinence de ses observations, Christophe a suscité en moi le désir de contribuer de façon originale à l'avancement des connaissances. Merci, Christophe, pour tous tes efforts, ton leadership et pour le modèle que tu incarnes pour moi. Cette thèse porte à plusieurs égards ton empreinte et témoigne de ton investissement dans ma formation scientifique. Merci de tout cœur pour cette relation humaine et chaleureuse vécue tout au long de ces nombreuses années.

Mes remerciements s'étendent également au Professeur Issouf Fofana qui, bien qu'il ne soit pas officiellement mon co-directeur de thèse, a fait partie de ceux qui m'ont beaucoup encouragé et qui m'a volontairement fait bénéficier de son expérience. Sa vision éclairée et ses critiques constructives ont grandement enrichi cette thèse. Je tiens à vous exprimer ma profonde reconnaissance pour votre générosité et votre disponibilité, Professeur Issouf.

Je suis reconnaissant envers les membres de mon comité d'évaluation (**Issouf Fofana**, Président du Jury; **Gwenaël Gaborit**, Membre externe; **Fethi Meghnefi**, Membre interne), pour leur expertise, leurs commentaires éclairés et leur disponibilité lors des différentes étapes de ce projet.

Un immense merci aux membres du laboratoire de physique des décharges; et particulièrement M. Luc Chatigny et le Professeur Stephan Brettschneider. Luc n'a ménagé aucun effort pour la préparation des tests expérimentaux et ce, de jour comme de nuit et souvent des fins de semaine. Leurs questionnements et les discussions des phénomènes observés durant les tests ont grandement contribué à orienter et enrichir cette thèse. Leur amitié et les encouragements ont été une source de résilience inestimable.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers l'Université du Québec À Chicoutimi (UQAC), pour avoir rendu possible la réalisation de cette thèse en offrant les ressources nécessaires et un environnement propice à la recherche.

Je n'oublierai pas de remercier ma famille pour leur amour, leur encouragement et leur soutien indéfectible tout au long de ce parcours académique. Leur sacrifice a été ma force et ma motivation.

Enfin, je dédie cette thèse à l'Institut Pédagogique National de l'Enseignement Technique et de la Formation Professionnelle (IPNETP – Côte d'Ivoire) qui a permis ce voyage doctoral.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 INTRODUCTION

L'électricité est la deuxième forme d'énergie la plus consommée au monde avec 19% du bilan énergétique total (Source : International Energy Agency). Du fait de l'éloignement des sites de production, cette énergie est généralement transportée sur de longues distances au moyen de lignes de transport aériennes à haute tension (HT) soutenues par des pylônes. La liaison mécanique et l'isolation électrique entre la ligne (composée de conducteurs nus) et les pylônes sont assurées par des isolateurs.

Trois technologies d'isolateurs ont été déployées dans le transport et la distribution d'électricité à travers le monde : les isolateurs en verre, en porcelaine et ceux en matériaux composites [1]. Les isolateurs en porcelaine et en verre sont utilisés depuis le début du transport d'énergie électrique et ont enregistré de très bonnes performances électrique et mécanique sur du long terme. Cependant, leurs performances n'ont pas toujours été satisfaisantes dans toutes les applications, notamment lors de fortes pollutions ou dans des zones de service sujettes aux armes à feu ou au vandalisme. Dans les deux cas, de graves problèmes ont surgi en ce qui concerne la nécessité d'une maintenance coûteuse impliquant un nettoyage ou un remplacement. Les isolateurs composites ont été mis au point il y a une trentaine d'années, en grande partie à cause de ces carences, puis introduits à l'échelle industrielle

dans les années 80 [1]. Ces isolateurs sont composés d'un axe central en fibre de verre, surmoulé par-dessus d'un boîtier (ou jupe) en matériau silicone ou éthylène-propylène-diène monomère (EPDM) présentant une excellente hydrophobicité. Cela implique que sous des conditions sévères de pollution atmosphérique, les isolateurs composites requièrent une longueur de fuite plus faible que leurs homologues en céramique pour le même niveau de tension ; ce qui réduit la longueur totale de l'isolateur, donc le poids total puis les coûts d'installation et de maintenance. Ils sont ainsi très prisés pour les zones fortement polluées et également dans les zones urbaines où ils résistent mieux au vandalisme [2].

1.2 PROBLÉMATIQUE

La pollution des isolateurs de lignes de transport est due à la présence et à l'accumulation de dépôts polluants sur leur surface. En présence d'humidité, ces dépôts se transforment en couches plus ou moins conductrices conduisant à une diminution considérable de la tension de tenue de ces isolateurs. Il existe plusieurs sources de pollution; entre autre, la pollution atmosphérique (ou naturelle), industrielle, hivernale, domestique ... [3]. Le contaminant de surface des isolateurs peut être décomposé en matériaux solubles et insolubles (ou inertes) dans l'eau. Il existe principalement quatre classes (ou niveaux) de pollution qui sont liées à l'environnement d'utilisation des isolateurs. Des tableaux de classification permettent de relier ces niveaux de pollution à la densité de dépôt de sel équivalent (DDSE) et à la conductivité électrique pour les besoins de tests de pollution en laboratoire [3]. Ces tests

sont réalisés suivant des procédures décrites dans les normes CEI 60507 (pour les systèmes à courant alternatif) et CEI 61245 (pour les systèmes à courant continu). La norme CEI 60507 suggère deux tests de pollution pour les isolateurs céramiques qui sont [4] :

- Le test au brouillard salin qui simule les conditions de pollution de zones voisines des côtes ;
- Le test de la couche solide (autrefois appelé le test au brouillard propre) qui simule les conditions de pollution industrielle des grandes villes.

Jusqu'à présent, il n'existe aucune norme pour les tests de pollution des isolateurs polymères (ou composites) [4]. Les méthodes de test de pollution actuellement normalisées en laboratoire et développées pour les isolateurs en céramique ne traitent généralement pas de manière adéquate les propriétés hydrophobes des isolateurs polymériques [5-7]. Pour l'élaboration de méthodes de test, le Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE) a utilisé deux approches différentes. La première approche repose sur l'adaptation des méthodes existantes pour le test des isolateurs céramiques et basée sur la CEI 60507, et la seconde concerne le développement de nouvelles méthodes de test [6]. Les tests de la couche solide et au brouillard salin reposent sur la norme CEI 60507 et nécessitent le pré-conditionnement de la surface de l'isolateur composite. La méthode du cycle de poussière (DCM) et de la couche de sel sèche (DSL) sont de nouvelles procédures développées pour le test des isolateurs polymériques qui ne requièrent pas de pré-conditionnement de ceux-ci [8].

Parmi les approches évoquées, le test de la couche solide est celui qui a le plus été utilisé à travers le monde pour l'adaptation à la réalisation des essais sous pollution des isolateurs composites [4]. Les essais sous pollution artificielle des isolateurs polymères utilisant cette méthode comportent les trois étapes suivantes :

- Phase de pré conditionnement, où les propriétés hydrophobes des isolateurs sont masquées par l'application d'une poudre inerte ou d'un autre agent mouillant ;
- Application de la couche de pollution par trempage, brossage ou pulvérisation d'une solution à base d'eau salée et d'un matériau inerte ;
et
- Le test de contournement ou de résistance, au cours duquel l'isolateur sous tension est exposé à un brouillard propre.

L'objet des essais sous pollution est de confirmer le degré de pollution spécifié tenu à la tension d'essai spécifiée. L'isolateur satisfait à cette spécification si aucun contournement ne se produit au cours de trois essais consécutifs exécutés selon les procédures de la norme [4]. La phase d'humidification dure entre 30-45 minutes avant l'application de la tension spécifiée. Le test doit également se faire dans l'intervalle de 1-2 jours après l'application de couche de pollution afin d'éviter le transfert d'hydrophobicité de la surface de l'isolateur à la couche de pollution et ainsi affecter les résultats des tests. Ces essais nécessitent des infrastructures importantes (grandes chambres d'humidification et de test, systèmes d'alimentation HT) pouvant

contenir des isolateurs réels et des niveaux de tension élevés pour se rapprocher des conditions en service normal des isolateurs.

Pour étudier les performances des matériaux des isolateurs tout en minimisant cette imposante logistique, plusieurs chercheurs ont conduit des travaux de modélisation expérimentale avec des modèles simplifiés des isolateurs réels [9-14]. Il y a eu également le développement de plusieurs modèles numériques avec des géométries réelles ou simplifiées des isolateurs [15].

En service, les isolateurs des lignes H.T. se couvrent d'une couche de pollution qui provient principalement de l'environnement dans lequel ces derniers sont plongés. Associée à la rosée du matin, à la pluie, ou au brouillard, cette couche de pollution devient conductrice et devient le siège d'un courant de fuite circulant vers la masse des pylônes. Dans certaines conditions favorables, il peut y avoir apparition de décharges partielles qui peuvent se propager sur la surface de l'isolateur pollué et mener au contournement complet de celui-ci [16]. Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension toute entière. Afin de contrer les effets néfastes des contournements et disposer d'infrastructures de transport et de distribution robustes et performantes, plusieurs travaux de recherches sont menés à travers le monde pour comprendre les phénomènes de pré-contournement des isolateurs.

Le champ de recherche relatif à la problématique du contournement électrique des isolateurs composites pollués est assez impressionnant [17-29].

En effet, plusieurs interruptions sur les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique ont été observées dans divers pays. Les conséquences économiques et humanitaires désastreuses, consécutives à ces interruptions, justifient l'étude et la compréhension de ces phénomènes perturbateurs. Les coupures engendrées par les contournements des isolateurs non-céramiques pollués sont souvent difficiles à identifier après incident et de plus, certains de ces contournements se produisent dans des lieux très éloignés et inhabités. Par conséquent, ceci rend leur observation très difficile et aléatoire [16]. Il est donc nécessaire de réaliser des tests en laboratoire afin d'approfondir les connaissances sur les phénomènes de contournement sous conditions de pollution atmosphérique.

La formation des bandes sèches est étroitement associée à la décharge à la surface des isolateurs. De nombreuses études sur la bande sèche et la décharge partielle à la surface des isolateurs ont été réalisées à travers le monde [9, 10, 13, 14, 30-33]. La plupart de ces études expérimentales sont basées sur un modèle idéalisé dans lequel la surface des isolateurs a été simplifiée sous forme de géométrie simple, telle qu'une forme géométrique rectangulaire ou conique, et où l'influence de la forme complexe des isolateurs n'est pas prise en compte [9, 10, 14, 34]. De plus, il faut aussi mentionner que ces études sont généralement basées sur une création artificielle des bandes sèches (zones propres ou pose de matériau isolant entre autres); ceci ne permet pas de comprendre les interactions multiphysiques caractérisant le phénomène.

D'un autre côté, des modèles numériques 2D et/ou 3D permettent d'analyser les distributions de potentiel et de champ électrique le long de géométries réelles d'isolateurs pollués [9, 31, 33]. Ces différentes études de modélisation mathématique et numérique ont permis notamment de comprendre l'influence des dimensions des bandes sèches, de leur nombre et leur localisation sur les distributions de potentiel et de champ électrique. Néanmoins, ces études dans leur ensemble n'intègrent pas le processus d'initiation et de formation des bandes sèches; celles-ci étant le plus souvent simulées par des zones propres (en remplacement de la couche de pollution) en des emplacements prédéfinis qui ne tiennent pas forcément compte des facteurs pouvant influencer la position de ces dernières.

Au regard de ce qui précède, il est important de conduire une étude pour développer un modèle numérique fiable de formation de bande sèche qui permette de caractériser adéquatement les phénomènes de pré-contournement des isolateurs polymériques pollués des lignes de transport d'énergie électrique haute tension. Ce modèle numérique pourra alors être couplé à un modèle numérique existant qui permet de déterminer la tension de contournement des isolateurs glacés et pollués en prenant en compte la présence de plusieurs arcs à la surface de l'isolateur [35-38]. L'association de ces deux modèles numériques permettra ainsi de mettre en place un laboratoire virtuel qui permettra de simuler un test d'isolateurs de ligne sous conditions de pollution atmosphériques.

1.3 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Un contournement électrique, est la conséquence de la combinaison de plusieurs paramètres influents et peut être décomposé en quatre grandes étapes : dépôt d'une couche solide de pollution sur la surface de l'isolateur, humidification progressive de la couche de pollution, développement de zones sèches et apparition d'arcs partiels et enfin extension de ses arcs partiels si les conditions sont favorables jusqu'au court-circuit complet de l'isolateur. Le séchage de certaines parties de la couche de pollution fait donc partie des phénomènes qui influencent significativement le contournement de l'isolateur. Ce séchage, qui est la source directe de l'apparition des bandes sèches, est dû à un échauffement local en raison de la circulation d'un courant de fuite et l'apparition de décharges partielles sur les couches mouillées [39]. Une fois que des arcs de bandes sèches se sont formés, ces derniers peuvent se propager à la surface de l'isolateur pollué et ainsi former un arc de contournement complet si la résistance par unité de longueur de la décharge est inférieure à la résistance par unité de longueur de l'électrolyte (contaminant liquide) sur la surface de l'isolateur [40].

La décharge à la surface des isolateurs pollués par voie humide est donc directement liée à la présence de bandes sèches. Étant données les résistances inégales des couches polluées, la portion de plus faible résistance s'assèche plus rapidement en raison d'une grande quantité de chaleur générée par effet Joule. La résistance de la bande sèche devient plus grande et voit apparaître à ses bornes une chute de tension considérable, provoquant une

décharge partielle et même le développement d'un contournement complet dans certaines conditions lorsque le gradient de potentiel surpasse la résistance de contournement [31].

Toutefois, malgré le grand intérêt porté à la compréhension et à la modélisation des bandes sèches, force est de constater qu'il n'existe véritablement pas d'étude ou de modèle dédié à la formation des bandes sèches et aux phénomènes de pré-contournement. Toutes les études mentionnées plus haut tiennent pour acquis l'existence de la ou des bandes sèches. Archad A. et al. [33], dans leurs simulations numériques d'isolateurs pollués, ont modélisé les bandes sèches comme des portions de surface d'isolateur propres, créant ainsi une rupture dans la couche de pollution. Pour leurs modèles expérimentaux, Hocine Terrab et Abdelhfid Bayadi [10] ont recouvert les parties des échantillons devant servir de bandes sèches avant d'appliquer les couches de pollution. Les tests de pollution et de contournement, en laboratoire, des isolateurs non céramiques reposent sur les normes CEI 60507 et CEI 60815. Il existe deux tests principaux qui sont le test de la couche solide pour simuler les conditions de pollution de type A et le test au brouillard salin pour les conditions de pollution de type B. Les modèles de contournement dans leur ensemble ne permettent pas véritablement d'observer, de comprendre et de valider le processus de création des bandes sèches sur les surfaces d'isolateurs pollués composites parcourues par les courants de fuite ou sujettes à des décharges partielles.

D'après la littérature [40], les bandes sèches sont créées dans les zones où il y a le plus de dégagement de chaleur générée par l'effet Joule des courants de fuite circulant dans les couches de pollution à la surface des isolateurs contaminés. Ainsi, mener une étude thermoélectrique complète des couches de pollution à la surface des isolateurs pollués devrait permettre de prédire les zones d'assèchement des couches de pollution pour une évaluation plus réaliste des phénomènes de pré-contournement.

Plusieurs publications présentent des modèles expérimentaux et numériques du contournement des isolateurs composites haute tension pollués. L'influence des bandes sèches dans les phénomènes de contournement est également abordée dans ces études. Les études expérimentales et numériques modélisent les bandes sèches comme des zones propres sur les surfaces polluées. Malgré un patrimoine riche de connaissances scientifiques et techniques relatives aux phénomènes de contournement des isolateurs de lignes haute tension (H.T.) pollués, il existe peu de travaux, aux meilleures de nos connaissances, traitant de façon détaillée le processus de création des bandes sèches. Pourtant, il est démontré qu'il y a une grande influence de ces dernières dans les phénomènes de pré-contournement des isolateurs de lignes HT. Le présent projet de thèse a donc pour objectif général de contribuer à l'avancement des connaissances sur les contournements des isolateurs composites de lignes de transport d'électricité. Il vise le développement d'un modèle numérique multiphysique permettant de simuler le processus de création des bandes sèches le long des isolateurs pollués. Le but de ce modèle est de reproduire les essais sous pollution des

isolateurs composites et d'étudier l'apparition de bandes sèches jusqu'au claquage de celles-ci. Ceci pourrait constituer le point de départ des modèles numériques de contournement des isolateurs HT classiques qui tiennent pour acquis l'existence d'un arc partiel établi.

La mise en place de ce modèle numérique passe par l'atteinte de plusieurs objectifs spécifiques qui peuvent se décliner en différentes parties comme suit (et non dans l'ordre) :

- Caractériser expérimentalement la formation des bandes sèches d'une couche de pollution sous conditions de brouillard (en utilisant les normes en vigueur) et ses paramètres influents en vue de proposer un critère empirique de formation de ces dernières.
- Développer un modèle numérique de la formation des bandes sèches (humidification et assèchement).
- Développer et valider un modèle numérique thermoélectrique 2D-axisymétrique qui puisse prendre en compte la formation des bandes sèches à la surface d'un isolateur composite pollué soumis à une tension de service.

1.4 MÉTHODOLOGIE

L'atteinte des différents objectifs de ce projet de recherche nécessite la mise en place conjointe d'une étude numérique et expérimentale selon une méthodologie qui comporte les étapes suivantes :

Étape 1 : Développement d'un modèle thermoélectrique 2D axisymétrique d'un isolateur composite 69 kV pollué

Cette étape permettra d'étudier les distributions de potentiel et de champ électrique le long d'un isolateur composite 69 kV recouvert d'une couche de pollution uniforme. L'étude thermoélectrique sera réalisée avec des paramètres électriques et thermiques constants afin de déterminer la corrélation entre la géométrie des jupes, les distributions de la densité de courant et de la température.

Étape 2 : Développement d'une géométrie simple pour simuler expérimentalement la formation des bandes sèches

Cette étape est cruciale puisque le modèle expérimental proposé sera utilisé dans les étapes suivantes. Il s'agit ici de développer un modèle simplifié d'isolateur qui permet de reproduire la formation des bandes sèches suivant le même processus physique observable sur les isolateurs réels, processus résultant principalement de la concentration de la densité de courant au niveau du fût de l'isolateur composite pollué. La géométrie proposée, développée à partir des résultats obtenus à l'étape 1, devra donc permettre de reproduire le processus de formation des bandes sèches sans aucune intervention initiale sur la couche de pollution, comme cela a été rapporté dans la littérature, tout en respectant les critères expérimentaux de répétabilité et de reproductibilité.

Étape 3 : Détermination de la durée optimale d'humidification

Cette étape consiste à réaliser une première série d'essais avec le modèle simplifié d'isolateur composite pollué développé à l'étape 2. Les mesures expérimentales seront réalisées au laboratoire Haute Tension de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) qui dispose d'une chambre climatique permettant de contrôler le taux d'humidification ainsi que la température ambiante. Cette étape sera axée sur les points suivants :

- Dépôt d'une couche de pollution avec différentes valeurs de DDSE sur la géométrie d'isolateur simplifié suivant le standard CEI 60507 et essai sous conditions contrôlées de brouillard.
- Mesure de l'évolution de la conductivité (ou résistivité) électrique de la couche de pollution en fonction de la durée d'humidification. Ces tests seront réalisés pour différentes valeurs de DDSE sous une tension appliquée faible afin de limiter au maximum l'échauffement de la couche de pollution.
- Les résultats obtenus permettront ainsi de déterminer la durée optimale de la période d'humidification pour laquelle la conductivité électrique de la couche de pollution atteint un plateau, tel que décrit suivant le standard CEI 60507.

Étape 4 : Détermination d'une relation empirique de la conductivité surfacique de la couche de pollution en fonction de la température et de la DDSE

Une fois la durée optimale d'humidification obtenue à l'étape précédente, les essais sous H.T peuvent débuter afin de fournir un courant de fuite assez

important pour entraîner la formation de la bande sèche au centre de l'échantillon pollué. Plusieurs séries d'essais seront alors réalisées en prenant soin d'enregistrer simultanément, pour différentes tensions appliquées et valeurs de DDSE, le courant de fuite ainsi que la température dans la zone de formation de la bande sèche. À partir des résultats obtenus, il sera alors possible d'établir une relation empirique de la conductivité électrique de la couche de pollution en fonction de la température moyenne de surface de la bande sèche et des niveaux de DDSE. En effet, la température de surface est directement liée à la puissance thermique produite par la circulation du courant de fuite dans la couche de pollution et donc responsable du taux d'évaporation de l'humidité contenue dans cette dernière. En procédant ainsi, il devient alors possible de s'affranchir de la prise en compte du processus d'évaporation qui demeure un phénomène complexe à modéliser tout en permettant de développer une formulation simple de conductivité électrique pouvant facilement s'intégrer dans un modèle numérique thermoélectrique.

Au cours des différents essais, il est également prévu de mesurer l'évolution du champ électrique axial dans la zone de formation de la bande sèche à l'aide d'un appareil électro-optique de mesure.

Étape 5 : Étude des paramètres pouvant influencer la formation des bandes sèches

Bien que le niveau de pollution (DDSE) soit le facteur le plus influent sur la conductivité électrique de la couche de pollution et conséquemment sur la formation des bandes sèches, il peut être intéressant d'étudier l'influence

d'autres paramètres importants que sont la température ambiante et le matériau constituant l'isolateur. Cependant, une telle étude réalisée avec des vrais isolateurs seraient quasi impossible par le fait de pouvoir disposer d'isolateur de géométrie identique mais constitués de matériaux différents. Cependant, l'utilisation de la géométrie simple développée à l'étape 2 permet de résoudre cette problématique car cette dernière peut être aisément fabriquée avec du verre, du plexiglas ou encore du RTV, permettant ainsi de simuler différents matériaux aux propriétés thermoélectriques différentes.

Étape 6 : Développement d'un modèle thermoélectrique plan pour valider les différents critères

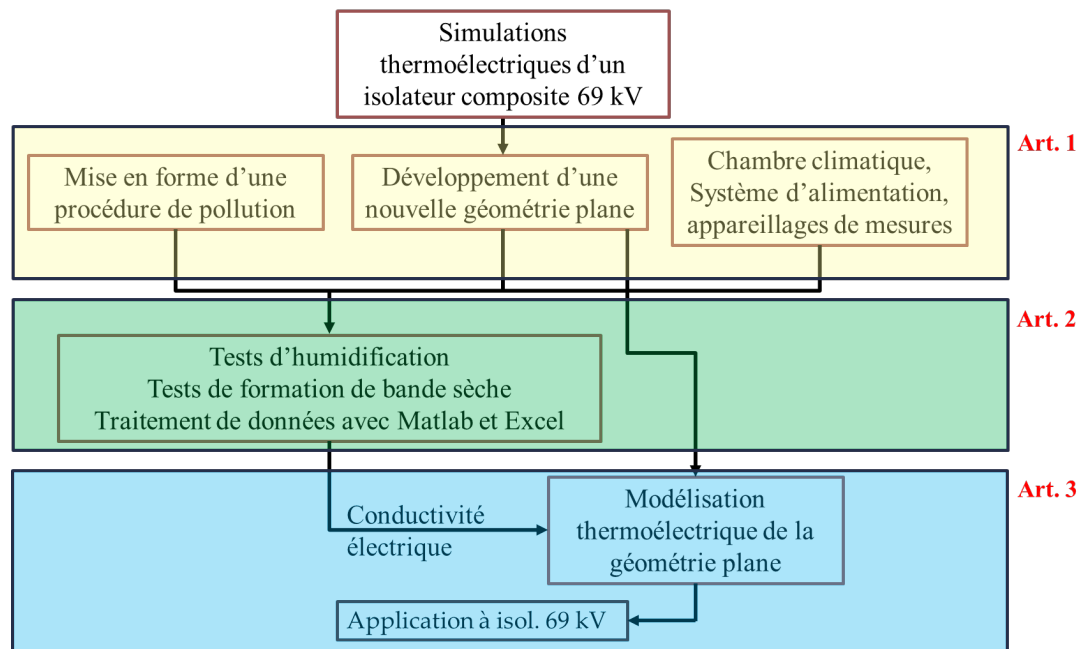
Cette étape consiste à développer un modèle numérique thermoélectrique de la géométrie simple utilisée à l'étape 2 afin d'y implanter la formulation empirique de la conductivité électrique de la couche de pollution élaborée à l'étape 4. Le modèle numérique sera développé avec le logiciel commercial par éléments finis Comsol Multiphysics en utilisant une approche surfacique pour la modélisation de la couche de pollution. L'implémentation sera ensuite validée d'après les différents résultats obtenus aux étapes 4 et 5.

Étape 7 : Modélisation d'un isolateur composite réel pollué

Cette étape consiste à utiliser le modèle numérique thermoélectrique et surfacique validé à l'étape 6 et de l'appliquer à un isolateur composite réel 69 kV qui a été utilisé à l'étape 1. Les simulations seront réalisées en axisymétrique et dans le domaine temporel. Les résultats obtenus seront alors

comparés à différentes observations expérimentales issues de la littérature afin de permettre une validation du modèle proposé.

Les résultats de l'étude de la formation de bande sèche ont été diffusés à travers trois articles de journaux suivant l'organigramme ci-après :



1.5 ORIGINALITÉS DE LA RECHERCHE

Bien qu'il existe de nombreuses études portant sur le contournement des isolateurs composites de lignes haute tension sous conditions de pollution atmosphérique, les phénomènes de pré-contournement restent assez mal connus. En effet, des études montrent assez bien l'impact des bandes sèches sur le contournement des isolateurs. Cependant, la majorité de celles-ci supposent généralement l'existence de ces bandes sèches à des localisations prédéfinies. Les contributions de ce projet peuvent être ainsi libellées :

- L'accroissement des connaissances théoriques sur le processus de formation des bandes sèches le long des isolateurs composites pollués utilisés sur les lignes de transport d'électricité haute tension et les principaux paramètres pouvant influencer ce dernier.
- Le développement d'une méthode simple de mise en œuvre permettant d'étudier expérimentalement la formation des bandes sèches sur différents matériaux constituant les isolateurs des lignes aériennes de transport. En effet, la géométrie simplifiée proposée dans cette recherche permet de reproduire fidèlement la formation des bandes sèches et de ce fait, peut être utilisée par les manufacturiers d'isolateurs pour étudier de nouveaux matériaux sans nécessiter une infrastructure haute tension imposante, comme cela serait le cas pour des tests normalisés.
- Le développement d'une équation empirique simple de la variation de la conductivité électrique surfacique d'une couche de pollution permettant de caractériser implicitement l'absorption et l'évaporation des surfaces des isolateurs pollués. Les résultats, une fois implémentés au sein de modèles numériques, devront permettre le calcul et la détermination plus exacte de l'apparition et de la localisation de bandes sèches.
- Enfin, le développement d'un modèle numérique thermoélectrique simple basé sur une approche surfacique et permettant de reproduire

le processus d'apparition des bandes sèches le long des isolateurs pollués.

Ce modèle de formation de bande sèche et de création du premier arc pourra alors être couplé avec le modèle de M. Jabbari [36, 37] pour le développement du laboratoire virtuel de test des isolateurs recouverts de glace. Cela représentera une avancée importante dans le domaine de l'isolation puisque qu'un tel modèle pourra se substituer aux essais expérimentaux qui sont fastidieux et coûteux. Ainsi, l'on pourra tester à très faibles coûts de nouvelles géométries d'isolateurs composites destinés aux environnements pollués.

1.6 ORGANISATION DE LA THÈSE

La présente thèse s'articule autour de sept (7) chapitres qui permettent de structurer l'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de ce projet de recherche. Le **premier chapitre** (Introduction générale) permet de justifier de la pertinence du sujet qui a été traité dans ce travail. Il y est d'abord présenté l'introduction générale qui conduit à dégager la problématique du sujet. Par la suite, une définition de l'objectif principal et des objectifs spécifiques à atteindre à travers ce projet est proposée. La méthodologie générale pour l'atteinte des objectifs susmentionnés y est également présentée. Enfin, les contributions de cette étude à la communauté scientifique ont été détaillées dans l'originalité. Le **deuxième chapitre** est consacré à la revue de la littérature. Ce chapitre couvre trois axes de recherche interreliés que sont le contournement des

isolateurs, les tests sous pollution des isolateurs composites et la formation des bandes sèches à la surface des isolateurs composites. Ce dernier axe permet de situer ce projet de recherche par rapport à l'avancement des connaissances sur le sujet traité. Le **troisième chapitre** présente les résultats de simulations thermoélectriques du modèle géométrique numérique d'un isolateur composite réelle 69 kV. Les résultats ont permis de comprendre les distributions de potentiel, de champ électrique, de densité de courant et de température le long de l'isolateur. Les **chapitres quatre (4), cinq (5) et six (6)** sont des retranscriptions d'articles de journaux élaborés dans le cadre du projet pour la diffusion des résultats de recherche. Ainsi, le **chapitre quatre** présente une nouvelle géométrie développée pour permettre une cueillette plus simple des données nécessaires à la création et la validation d'un modèle numérique de formation de bande sèche. Le **chapitre cinq** présente la démarche expérimentale, les résultats des tests expérimentaux et la validité des données recueillies en regard à la littérature existante. Le **chapitre six** dévoile le modèle numérique développé dans le cadre de ce projet de recherche et sa validation par comparaison aux résultats expérimentaux recueillies lors des tests.... Enfin, Le **septième** et dernier chapitre de cette thèse présente les conclusions et les contributions de ce travail de recherche. En outre, des recommandations pour des travaux futurs qui découlent de cette étude sont présentées.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS COMPOSITES

Les isolateurs composites pour les lignes électriques sont composés principalement de trois parties (Figure 1) : le noyau (ou fût ou tige) en fibre de verre, la gaine (encore appelée enveloppe, revêtement ou jupe) en matériau caoutchouc silicone ou en Éthylène-Propylène-Diène Monomère (EPDM) et des terminaux (ou extrémités) métalliques. Le noyau est l'élément qui assure la fonction mécanique de l'isolateur en traction, en flexion, en torsion et en compression. Il est généralement formé d'une matière synthétique stratifiée réalisée à partir de fibres de verre imprégnées d'une résine et mises en forme par pultrusion des fibres de verre imprégnées de résine [41]. Le revêtement élastomère d'un isolateur composite se présente sous la forme d'une gaine recouvrant la tige sur toute sa longueur et sur laquelle sont disposées des ailettes radiales espacées le long de la gaine. Généralement, l'enveloppe élastomère est formée par divers procédés (extrusion, moulage par compression ou moulage par injection du matériau élastomère) ; l'enveloppe étant, dans tous les cas, chauffée pour provoquer la vulcanisation du matériau élastomère [41]. L'enveloppe peut être formée directement sur le noyau isolant ou de manière séparée, avant ou après la fixation des extrémités sur celui-ci. Le matériau du revêtement est le plus souvent à base d'EPDM ou de silicone ou encore d'un mélange d'EPDM et de silicone. Pour former et vulcaniser une

enveloppe à base d'un tel élastomère, par moulage ou par extrusion, il est nécessaire d'atteindre des températures généralement supérieures à 130°C [35]. Les extrémités permettent l'accrochage mécanique au pylône et au câble HT. Les matériaux les plus communément utilisés sont : la fonte, l'aluminium forgé ou usiné, le fer et l'acier forgé galvanisé à chaud. Elles sont assemblées par une liaison à sertissage coaxial pour assurer une haute résistance mécanique et aussi pour éliminer les infiltrations d'eau. Les armatures peuvent être fixées sur la tige avant, après ou en deux étapes lors de la formation de l'enveloppe sur l'âme.

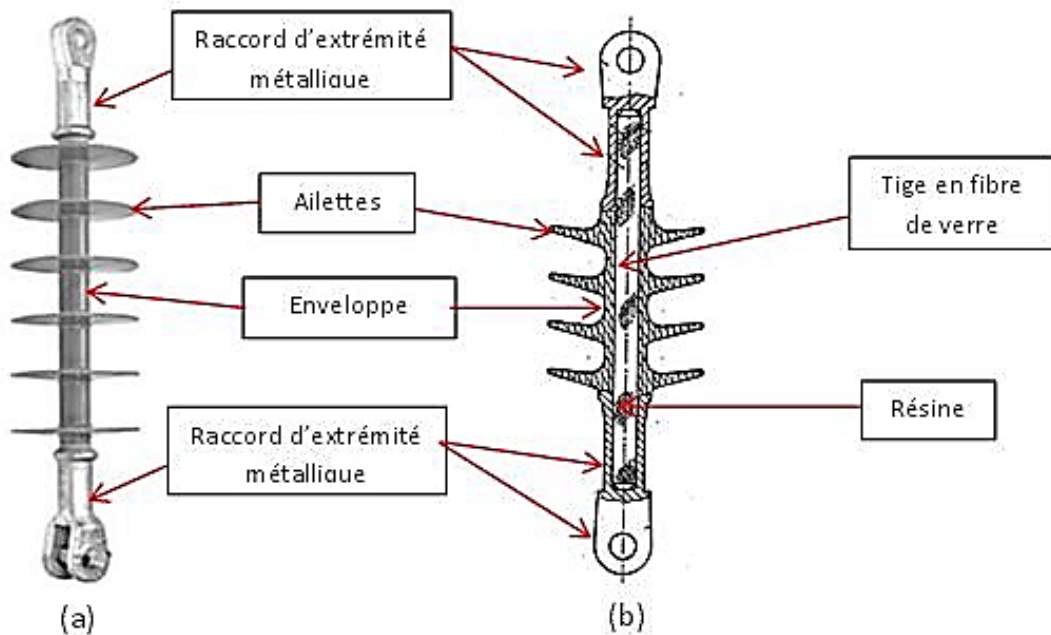


Figure 1: Image réelle (a) et vue en coupe (b) d'un isolateur composite [41]

Une des caractéristiques principales d'un isolateur haute tension sera sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est placé [28]. Le contournement électrique d'un isolateur HT est une décharge disruptive accompagnée d'étincelles qui se déplacent sur la surface de l'isolateur, de l'électrode H.T vers l'électrode de mise à la terre et établit un pont conducteur entre ses deux dernières (plasma ionique favorisant le déplacement des charges électriques d'une électrode vers l'autre); en d'autres mots un court-circuit. Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension. Une des caractéristiques principales d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est placé [28]. De nombreux travaux ont été menés depuis plusieurs décennies pour comprendre les mécanismes conduisant au contournement électrique des isolateurs pollués. Ils ont permis de se munir d'outils permettant la prédiction de ce phénomène afin d'éviter la mise hors service du réseau électrique. Les isolateurs composites ont des propriétés hydrophobes et de régénération de surface à la suite de l'apparition de décharges partielles. Celles-ci leurs valent d'être privilégiés par rapport aux isolateurs en matériaux céramiques dans les zones de pollution sévère [12]. Le contournement est la conséquence de la combinaison de plusieurs facteurs et peut être décrit en quatre étapes [3] :

- **1^{ère} étape : dépôt de pollution** (apportées et déposées par le vent) sur la surface des isolateurs.

- **2^{ème} étape : humidification de la pollution** par le brouillard, la condensation et la petite pluie.
- **3^{ème} étape : développement de zones sèches** par évaporation de la couche de pollution humidifiée due au courant de fuite.
- **4^{ème} étape : Apparition d'arc électrique** à travers la bande sèche ainsi formée.

Afin de reproduire le phénomène de contournement sur des modèles d'isolateurs simplifiés et de le décrire par des équations simples, de nombreux modèles mathématiques et numériques de propagation de la décharge ont été développés [17, 25, 38, 42-49]. Le point commun entre les différents modèles provient du fait qu'ils sont en grande majorité basés sur le modèle d'Obenaus qui modélise un seul arc électrique en série avec une résistance résiduelle [36, 50]. On distingue ainsi des modèles de contournement statiques, dynamiques et numériques de prédiction du contournement des isolateurs [36].

2.1.1. MODÈLES STATIQUES DE CONTOURNEMENT

Les modèles statiques sont des modèles mathématiques permettant essentiellement la détermination ou prédiction de la tension de contournement des isolateurs sous conditions de pollution. Ces modèles, sont principalement basés sur les contributions importantes de Obenaus [13], de Neumaker [34], de Wilkins [35] et de Rizk [36] qui ont permis de développer des modèles 'mono-arc' qui modélisent un seul arc électrique en série avec une résistance résiduelle. La Figure 2 illustre le modèle d'Obenaus dont le concept se

présente sous la forme d'une décharge cylindrique de longueur x en série avec une résistance résiduelle R_p caractérisant la couche de pollution en série avec l'arc électrique. Néanmoins, la prise en compte d'un seul arc partiel limite l'applicabilité de ces modèles à des isolateurs ayant de faibles distances d'arc, inférieures au mètre [36].

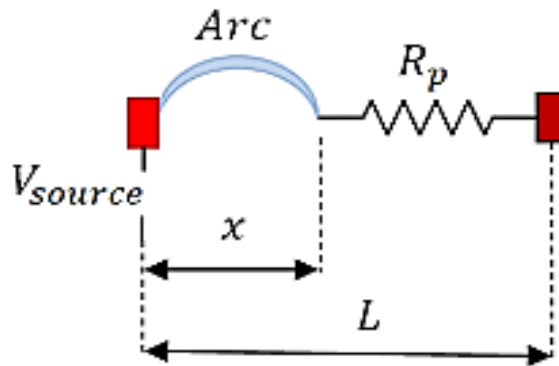


Figure 2 : Modèle mono-arc d'Obenaus [36].

2.1.2. MODÈLES DYNAMIQUES DE CONTOURNEMENT

Les modèles dynamiques de contournement quant à eux permettent de suivre plusieurs paramètres qui évoluent dans le temps [51]. Contrairement aux modèles statiques, cela permet de se rapprocher le plus possible de la réalité des phénomènes physiques qui sont évolutifs. Tous les modèles dynamiques appliquent des critères de propagation et de vitesse de l'arc électrique afin que leur propagation soit dépendante du temps. Dépendamment des modèles étudiés, les critères de propagation permettent principalement de valider si, pour les conditions présentes, à une longueur

d'arc donnée, l'arc est dans une position stable ou non. Des critères de propagation principaux ont été adoptés par un grand nombre de chercheurs, en fonction du domaine d'application [29]. Tout comme le critère de propagation, il existe plusieurs approches permettant de calculer la vitesse de propagation de l'arc lors du processus de contournement [36]. Des relations empiriques et analytiques, entre la variation de la vitesse de la décharge et les paramètres physiques qui la caractérisent, ont été établies par de nombreux chercheurs. Ces derniers ont constaté que la vitesse de propagation de l'arc est sensible à la conductivité de la surface conductrice, à l'intensité de la lumière émise, au courant qui traverse le canal d'arc et à la distance parcourue [29]. En s'appuyant sur ces critères, deux classes de modèles dynamiques peuvent être mises en évidence à partir de la littérature : les modèles dynamiques mono-arc et les modèles multi-arc. Les modèles mono-arc (en CC et CA) considèrent l'existence et le développement d'une décharge partielle tandis que les modèles multi-arc (en CA) prennent en compte l'existence de deux arcs ou plus [36].

2.1.3. MODÈLES NUMÉRIQUE DE PRÉDICTION DE LA TENSION DE CONTOURNEMENT

De nos jours avec le développement de l'outil informatique, il existe des modèles numériques qui utilisent principalement la méthode des éléments finis (MEF) afin de calculer les chutes de tensions et le courant le long de l'isolateur pollué, au lieu d'utiliser une implémentation mathématique plus rigide. Cela

permet de s'affranchir de la géométrie de l'isolateur qui doit demeurer simple dans le cas des modèles mathématiques pour calculer la résistance résiduelle basée sur les formulations analytiques. Aydogmus et Cebeci [48] ont été les premiers à utiliser la MEF pour élaborer un modèle de prédiction de la tension de contournement des isolateurs pollués. Yang et al [43, 44] ont proposé des modèles, basés également sur la MEF, en CC et en CA, qui s'appliquent aux isolateurs recouverts de glace. Ce sont des modèles mono-arc qui sont applicables aux isolateurs de longueurs inférieures à un mètre. Volat et al. [52] ont développé un modèle qui consiste à résoudre le modèle mono-arc proposé par Obenaus en utilisant la MEF pour calculer le courant de fuite circulant à la surface de la couche de glace et également pour déterminer le champ électrique moyen dans cette dernière. Ces modèles 'mono-arc' utilisant la MEF offrent le principal avantage d'être applicables quelle que soit la géométrie du dépôt de glace, mais ils restent limités à des isolateurs ayant des distances d'arc inférieures au mètre [36]. Pour remédier à ce problème, les auteurs [46] ont proposé une amélioration du modèle numérique mono-arc afin d'étendre le modèle à des distances d'arc allant jusqu'à deux mètres en prenant en compte la présence d'un deuxième arc partiel s'établissant entre l'électrode de mise à la terre et la surface du dépôt de glace. Ce modèle prend donc en compte la présence de deux arcs électriques partiels en contact avec la surface de glace et les électrodes métalliques, tel qu'illustré à la Figure 3 .

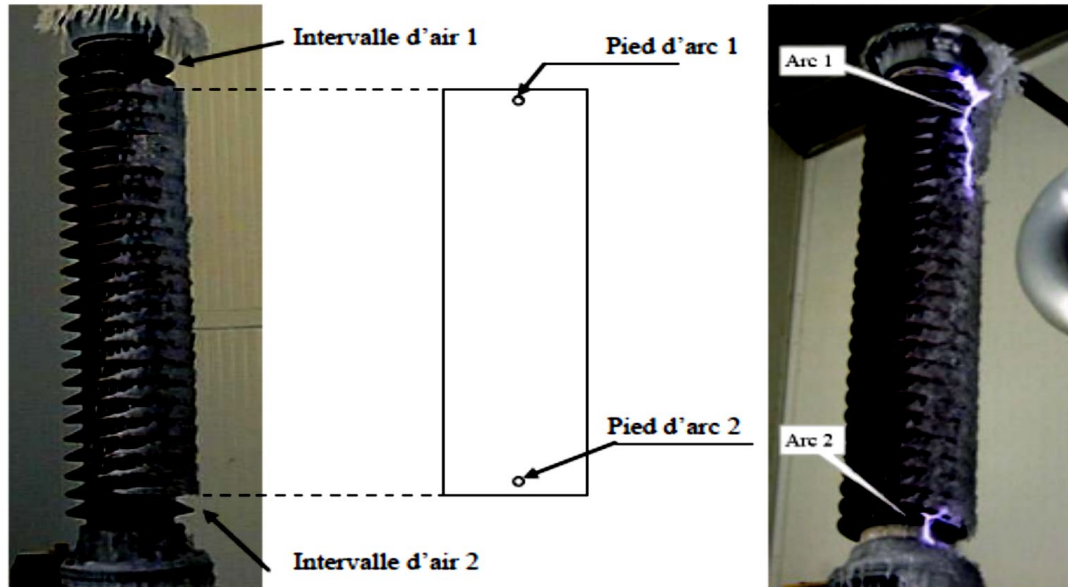


Figure 3 : Modélisation en 2D du film d'eau recouvrant un isolateur de poste THT en présence de deux arcs électriques [46]

Ce modèle est basé en grande partie sur le modèle mono-arc développé par le même chercheur en utilisant également un incrément de tension, qui est encore applicable dans le cas où les arcs ont un seul pied d'arc en contact permanent avec une électrode métallique dont le potentiel est imposé (portée à la H.T. ou à la mise à la terre). Ce modèle numérique bi-arc a été validé pour des isolateurs de poste recouverts de glace de distance d'arc égale à deux mètres. Au-delà de cette longueur, plusieurs arcs partiels sont présents et le modèle n'est donc plus applicable [36]. Ainsi, Jabbari M. [36-38], dans son projet de thèse a développé un modèle numérique générique multi-arcs de prédiction de la tension de contournement des isolateurs recouverts de glace. Ce modèle multi-arcs proposé reprend le modèle bi-arcs, alors considéré comme un module, au sein duquel est implémenté la formulation de Mayr pour le calcul de la résistance d'arc. Le critère de vitesse utilisé est celui proposé

par Gallimberti couplé au critère de propagation de Hampton. La comparaison des résultats numériques avec les résultats expérimentaux issus de la littérature ont permis de démontrer la validité du modèle dynamique numérique multi-arcs avec une erreur relative moyenne inférieure à 5% et cela, pour des distances d'arc allant jusqu'à 4 mètres. Ainsi, pour l'ensemble de ces modèles, l'on considère préalablement l'existence d'au moins un arc partiel établi. Dans ce projet de thèse, l'accent est donc mis sur la compréhension de l'ensemble des phénomènes qui concourent à la formation et l'établissement de ce premier arc qui conduit plus tard au contournement. Dans ce qui suit, l'on s'intéressera aux travaux relatifs aux essais sous pollution des isolateurs composites, à la formation des bandes sèches et le développement d'arcs partiels à travers celles-ci.

2.2 TESTS SOUS POLLUTION DES ISOLATEURS COMPOSITES

La pollution des isolateurs de lignes de transport est due à la présence et à l'accumulation de dépôts polluants sur leur surface. En présence d'humidité, ces dépôts se transforment en couches plus ou moins conductrices conduisant à une diminution considérable de la tension de tenue de ces isolateurs [3]. Il existe plusieurs sources de pollution; entre autre, la pollution atmosphérique (ou naturelle), industrielle, hivernale, domestique, la pollution mixte qui peut combiner plusieurs sources de pollution [3].

Le contaminant de surface des isolateurs peut être décomposé en matériaux solubles et insolubles (ou inertes) dans l'eau. Les composés

solubles sont exprimés en termes de Densité de Dépôts de Sel Équivalente (DDSE). Ce paramètre a été largement utilisé dans les tests de contamination artificielle pour caractériser la sévérité de la pollution extérieure. Cependant, il existe certains endroits à proximité de zones industrielles, telles que les usines de ciment et de papier, les machines lourdes et les grandes routes, où les contaminants ne sont pas solubles dans l'eau, ce qui donne de faibles valeurs de DDSE. Pourtant, le dépôt de cette contamination peut être suffisamment important pour favoriser un film d'eau épais et un courant de fuite important pouvant entraîner un contournement [53]. La partie non soluble de la pollution est désignée dans la littérature par la densité de dépôts non solubles (DDNS). Les procédures d'évaluation de la DDSE et de la DDNS sont décrites par la norme CEI 60815 [54].

L'objet des essais sous pollution est de confirmer le degré de pollution spécifié tenu à la tension d'essai spécifiée. L'isolateur satisfait à cette spécification si aucun contournement ne se produit au cours de trois essais consécutifs exécutés selon les procédures de la norme [4]. La phase d'humidification dure entre 30-45 minutes avant l'application de la tension spécifiée. Le test doit également se faire dans l'intervalle de 1-2 jours après l'application de couche de pollution afin d'éviter le transfert d'hydrophobicité de la surface de l'isolateur à la couche de pollution et ainsi affecter les résultats des tests. Ces essais nécessitent des infrastructures importantes (grandes chambres d'humidification et de test, systèmes d'alimentation H.T.) pouvant contenir des isolateurs réels et des niveaux de tension élevés pour se rapprocher des conditions en service normal des isolateurs.

Pour étudier les performances des matériaux des isolateurs tout en minimisant cette imposante logistique, plusieurs chercheurs ont conduit des travaux de modélisation expérimental avec des modèles simplifiés des isolateurs réels [9-14]. Il y a eu également le développement de plusieurs modèles numériques avec des géométries réelles ou simplifiées des isolateurs [15].

2.2.1. DENSITÉ DE DÉPÔT DE SEL ÉQUIVALENT (DDSE)

La DDSE est utilisée comme un paramètre de base pour l'évaluation du comportement d'isolateurs sur site. Elle est le dépôt équivalent exprimé en mg de NaCl par cm² de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel, lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau. La densité du dépôt de sel équivalent est donnée comme suit [3] :

$$DDSE = \frac{S_a \cdot V}{A} \quad (1)$$

Avec :

V le volume de la suspension en cm³ ;

A la surface nettoyée en cm² ;

S_a la salinité exprimée en kg/m³. Elle peut être déterminée à partir de la conductivité électrique de la suspension de rinçage et de table contenue dans la norme CEI 60507 [4].

2.2.2. DENSITÉ DE DÉPÔT NON SOLUBLE (DDNS)

La DDNS correspond à la quantité de produits polluants non solubles présents dans une couche de pollution. La détermination de la DDNS s'effectue comme suit :

- La solution obtenue par la méthode de la DDSE est filtrée à l'aide d'un papier filtre.
- Le dépôt non soluble restant après filtrage est séché puis pesé.
- La DDNS peut être calculée par la formule suivante [3] :

$$DDNS = \frac{1000 \cdot (m_f - m_i)}{A} \quad (2)$$

où :

m_f est la masse du papier filtre contenant la pollution après séchage en g ;

m_i est la masse initiale du papier filtre en g ;

A est la surface lavée de l'isolateur en cm^2 .

2.2.3. DIFFÉRENTES CLASSES DE POLLUTION

Il existe principalement quatre classes (ou niveaux) de pollution qui sont liées à l'environnement d'utilisation des isolateurs. Le Tableau 1 de classification permet de relier ces niveaux de pollution à la DDSE et à la conductivité électrique pour les besoins de tests de pollution en laboratoire [3].

2.2.4. POLLUTION ARTIFICIELLE DES ISOLATEURS COMPOSITES HT

Plusieurs tests sont réalisés en laboratoire pour la détermination des tensions de contournement des isolateurs des lignes haute tension. Les procédures de test sont décrites par la norme CEI 60507 [4] pour les systèmes à courant alternatif et dans la norme CEI 61245 [55] pour les systèmes à courant continu. La norme CEI 60507 suggère deux tests de pollution pour les isolateurs céramiques. Ce sont :

- Le test au brouillard salin qui simule les conditions de pollution de zones voisines des côtes ;
- Le test de la couche solide (autrefois appelé le test au brouillard propre) qui simule les conditions de pollution industrielle des grandes villes.

Jusqu'à présent, il n'existe aucune norme pour les tests de pollution des isolateurs polymères. Dans le même temps, les services publics et les fabricants doivent souvent déterminer le niveau de pollution des isolateurs polymères en raison de leur utilisation accrue. Les méthodes de test de pollution actuellement normalisées en laboratoire et développées pour les isolateurs en porcelaine et en verre ne traitent généralement pas de manière adéquate les propriétés hydrophobes dynamiques de surface des isolateurs polymériques [5-7].

Pour l'élaboration de méthodes de test, le CIGRE a utilisé deux approches différentes : l'une repose sur l'adaptation des méthodes existantes pour le test des isolateurs céramiques et basée sur la CEI 60507, et la seconde concerne

le développement de nouvelles méthodes de test [6]. Comme l'on peut le lire dans le Tableau 2 ci-dessus, les tests de la couche solide et au brouillard salin reposent sur la norme CEI 60507 et nécessitent le pré-conditionnement de la surface de l'isolateur composite ; tandis que la méthode du cycle de poussière (DCM) et de la couche de sel sèche (DSL) sont de nouvelles procédures développées pour le test des isolateurs polymériques qui ne requièrent pas de pré-conditionnement de ceux-ci [8].

Tableau 1 : Équivalence entre pollution naturelle et pollution artificielle [3]

NIVEAU DE POLLUTION		ENVIRONNEMENT	POLLUTION ARTIFICIELLE : SÉVÉRITÉ ÉQUIVALENTE	
			Conductivité de la couche μS	Couche solide Densité de NaCl équivalente kg/m^2
I	LEGER	- Zones sans industries et avec faible densité de maisons équipées d'installations de chauffage. - Zones avec faible densité d'industries ou de maisons, mais soumises à des vents ou des pluies fréquentes. - Toutes les régions agricoles. - Toutes ces zones doivent être situées loin de la mer (10 à 20 km) ou à haute altitude et ne doivent, en aucun cas, être exposées aux vents venant de la mer.	3 à 11	0.025 à 0.1
II	MOYEN	- Zones avec des industries ne produisant pas de fumées polluantes, ou avec une densité moyenne de maisons équipées de chauffages. - Zones avec forte densité de maisons ou d'industries, mais exposées à de vents fréquents et propres, ou à des pluies. - Zones exposées au vent de mer, mais pas trop proches de la côte.	11 à 20	0.1 à 0.2
III	FORT	- Zones à forte densité d'industries et banlieues de grandes villes avec forte densité d'appareils de chauffage polluant. - Zones proches de la mer, ou en tout cas exposé à un vent relativement fort venant de la mer.	20 à 37	0.2 à 0.4
IV	TRÈS FORT	- Zones généralement peu étendues, soumises à des poussières conductrices et à des fumées industrielles produisant des dépôts conducteurs particulièrement épais. - Zones généralement peu étendues, très proches de la côte et exposées à des vents forts et très polluants venant de la mer	37 à 50	0.4 à 1.1

Tableau 2 : Différentes méthodes de test de pollution pour les isolateurs polymères [8]

Method		Test voltage	Conditioning required	Time consumption	Comments
IEC 507 Salt-fog		AC & DC ¹⁾	yes ²⁾	hours	Different ranking order from that found in natural testing stations. In salt fog tests, mandatory pre-conditioning with flashovers, too much water during salt fog application ^{71,72} . Withstand test with no or modified conditioning may prove representative.
Quick salt-fog		AC & DC	yes ²⁾	hours	Many flashovers not representative. Flashover level too low.
Clean fog	IEC 507 artificial pollution layer	AC & DC	yes ³⁾	hours to day	Solid Layer pollution application not representative. Clean-fog wetting has good representativity.
	natural pollution layer	AC & DC	no	hours to day	Good representativity
Rapid clean-fog		AC & DC	- ⁴⁾	hours	Many flashovers not representative. Flashover level too low.
Dust-cycle method		AC & DC	no	days ⁵⁾	Representativity has to be proven; no reference material available yet.
Dry-salt layer		AC & DC	no	hours to day	Representativity has to be proven; no reference material available yet.

Le but de la procédure de pré-conditionnement est de masquer temporairement les propriétés hydrophobiques de la surface de l'isolateur composite afin de pouvoir appliquer la couche de pollution. Pour ce pré-traitement, de la poudre de kaolin sec (ou un matériau équivalent tel que le Tonoko) est appliquée sur la surface de l'isolateur à l'aide d'une éponge, d'un coton ou d'un pinceau comme l'exemple à la Figure 113. Cette couche de kaolin doit être appliquée le plus uniformément possible, en particulier sur les zones qui sont difficiles à atteindre, comme le passage de la jupe à l'ailette [8]. Après l'application de kaolin sec, la majeure partie de la poudre est soufflée, par exemple à l'air comprimé, laissant une fine couche uniforme recouvrant l'enveloppe de l'isolateur. Cette fine couche est hydrophilique et l'on obtient une surface équivalente à celle d'un isolateur céramique. Le Table 9 présente une comparaison des procédures de pré-conditionnement dans divers pays.

Tableau 3 : Processus de pré-traitement des isolateurs polymériques pour les tests de pollution développés dans divers pays [8]

Country	Type of material for preconditioning	Application method	Control of results
China	Kieselguhr or sometimes kaolin	Brush or pads of soft cotton wool.	Visual and wettability class (WC) according to
Russia	Porcelain powder (before firing) with low Al_2O_3 content (<5%)	Cloth or repetitive dipping in a suspension or repetitive spraying.	Visual and wettability class (WC)
Sweden	Kaolin	Brush	Visual and wettability class (WC)
Japan	Tonoko	Insulator surface is wetted with a very-fine water spray. Thick layer of Tonoko is sprinkled on wetted surface.	
USA	Kaolin	Dry cotton swabs	Visual and wettability class (WC)



Figure 4 : Application de la poudre sèche de kaolin avec une brosse [8].

2.2.5. TEST DE LA COUCHE SOLIDE

Parmi les méthodes conventionnelles, le test de la couche solide est le plus répandu. La méthode de test convient pour simuler principalement une pollution de type A, « lorsqu'une pollution solide avec un composé non soluble est déposée sur la surface de l'isolateur. Ce dépôt devient conducteur lorsqu'il est mouillé » [8]. La suspension de pollution contient généralement du kaolin comme composé non soluble (40 g) dans un litre (1 L) d'eau de robinet, un gramme (1 g) de Triton X-100 comme agent mouillant et d'une quantité appropriée de chlorure de sodium (NaCl) permettant d'atteindre une conductivité volumique comprise entre 2,9 et 20,0 S/m [6, 54, 56, 57]. Pour son application aux isolateurs polymères, un conditionnement de la surface est nécessaire pour inhiber l'effet d'hydrophobicité de surface. Trois méthodes sont utilisées pour l'application de la couche de pollution. Il s'agit de l'immersion de l'échantillon de test dans la solution polluante, l'aspersion (ou la pulvérisation) sur la surface à polluer ou l'application méticuleuse du contaminant à la brosse sur la surface de l'isolateur [5, 6]. Le Tableau 4 présente les méthodes d'application des couches de pollution et des temps de séchage avant test de différents pays à travers le monde et la Figure 5 présente des résultats obtenus avec ces différents types d'application de la couche de pollution. D'après ces résultats, la méthode d'application à la brosse présente une meilleure uniformité de la couche que les deux autres méthodes d'application de la couche de pollution. Le Tableau 5 présente les phases d'humidification des couches de pollution dans différents pays.

Tableau 4 : Méthodes d'application de la couche de pollution dans différents pays [8]

Country	Type of inert material used in slurry	Application method for the pollution layer	Elapsed time before test
China	Kieselguhr	Brushing or dipping	< 3 to 5 h – Hydrophilic state 96 h – Hydrophobic state
Russia	Porcelain powder (before firing) with low Al_2O_3 content (<5%)	Dipping or spraying	24-36 h – Hydrophilic state
Sweden	Kaolin	Spraying	24 h – Hydrophilic state
Japan	Tonoko and Kaolin	Flow on	0 – 8 days
USA	Roger's kaolin	Dipping or flow on	3 - 7 days

Tableau 5 : Méthodes d'humidification de la couche de pollution dans différents pays [8]

Country	Type of wetting and input rate	Time to reach maximum current in wetting phase
China	Steam fog, 0,05 kg/m ³ /h	15 – 30 min
Russia	Steam fog, Very high	20 – 40 min
Sweden	Steam fog, 0,05 kg/m ³ /h	15 – 60 min (100 min for UHV insulators)
Japan	Steam fog 0,15 – 0,2 kg/m ³ /h	40-60 min
USA	Steam fog 0,05 – 0,3 kg/m ³ /h	20- 60 min

2.2.6. TEST AU BROUILLARD SALIN

Le test au brouillard salin représente la pollution de type B ; celle des sites de pollution où des électrolytes liquides sont déposés sur l'isolateur avec très peu ou pas de composés non solubles. En d'autres termes, la pollution de type B est le plus souvent associée aux zones côtières où de l'eau salée ou un brouillard conducteur est déposé sur l'isolateur [6].

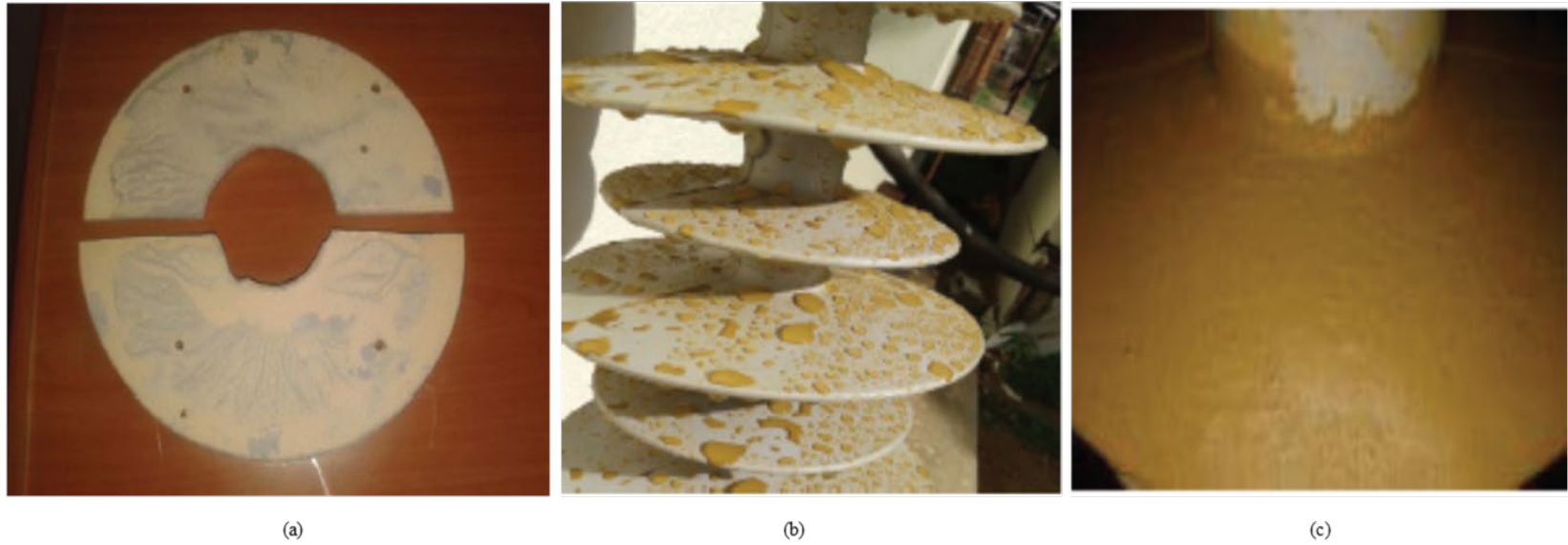


Figure 5 : Revêtement polluant par (a) trempage, (b) pulvérisation et (c) à l'aide de brosse [5]

L'essai se déroule en deux parties : le pré-conditionnement consistant à nettoyer la surface et à appliquer la couche de kaolin pour masquer l'hydrophobicité et l'essai de tenue dont la méthodologie est décrite dans la norme IEC 60507 [4]. Le brouillard salin est généré à l'aide d'un humidificateur avec un débit maximal qui peut être ajusté pour modifier le niveau d'humidité, mesuré à l'aide d'un capteur d'humidité. L'expérience est réalisée à différents niveaux de tension et de conductivité de la suspension saline. Cette conductivité est ajustée en modifiant la concentration de NaCl ajouté et mesurée à l'aide d'un conductimètre [58]. Étant donné que le processus de mouillage est moins efficace avec les isolateurs en polymère qu'avec les unités en porcelaine, un brouillard plus épais que celui utilisé pour les isolateurs en porcelaine devrait être utilisé pour les isolateurs en polymère hydrophobe [59]. Un deuxième facteur important qui influence les résultats des essais de contournement des isolateurs en polymère est le temps de repos (intervalle entre la fin de la contamination et l'application de la tension).

2.2.7. MODÉLISATION DU PHÉNOMÈNE D'HUMIDIFICATION D'UNE COUCHE DE POLLUTION À BASE DE KAOLIN ET DE CHLORURE DE SODIUM

Dans son étude du phénomène d'humidification des dépôts naturels et artificiels, J-Y Saison [60] détaille le comportement physico-chimique de la couche de pollution artificielle à base de kaolin et de chlorure de sodium. L'auteur a ainsi développé plusieurs équations qui décrivent les phénomènes d'absorption de la suspension de pollution sur des plaquettes rectangulaires en présence de tensions intermittentes

ou permanentes sous différentes conditions d'humidification et de température. Il a pu ainsi montrer l'évolution du courant dans la couche de pollution en fonction du taux de kaolin ou de NaCl. L'on peut retenir qu'au-dessus d'un seuil de 0.4 mg/cm^2 , le kaolin devient un composé inerte dans la solution et n'influence donc plus la conduction électrique. En dessous de ce seuil, l'ajout de kaolin dans une solution salée réduit la conductivité de celle-ci. Par ailleurs, l'auteur montre également que s'il est stocké en environnement ambiant, le kaolin se sature rapidement en eau et par conséquent, il n'absorbe plus de vapeur d'eau lors de l'humidification de la couche de pollution. L'étude du phénomène d'humidification peut donc être réduite, dans une certaine mesure, au seul composé NaCl. Les phénomènes de conduction électrique dans la couche de pollution mettent en jeu le transport de masse en phase gazeuse, la condensation de la vapeur d'eau, la dissolution des cristaux de sel et le transport des ions en solution. La Figure 6 présente une coupe transversale du modèle d'humidification étudié. La coupe est réalisée dans le sens de la largeur de la plaquette. Le mélange NaCl+kaolin+eau définit l'épaisseur de la couche conductrice. Il y a création d'une couche de diffusion au-dessus de la surface de la solution.

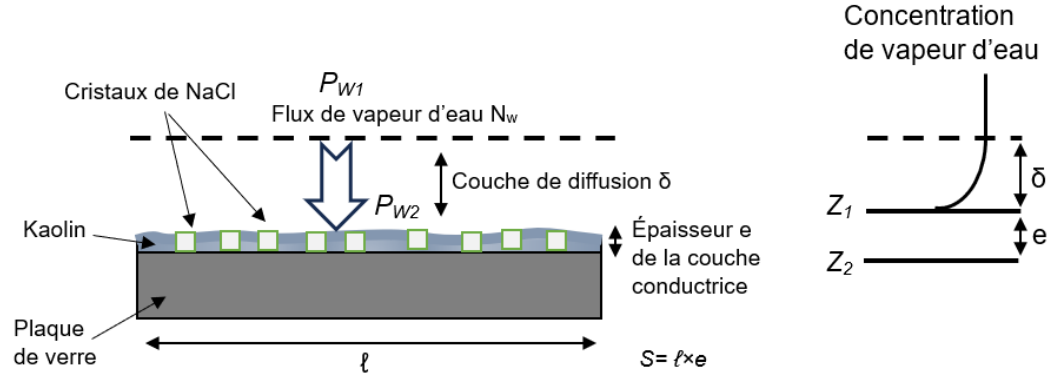


Figure 6 : Coupe transversale du modèle d'humidification [60]

Lors de l'humidification de la couche, la perte de masse ***dm*** d'un cristal de NaCl (dissolution) se traduit par l'équation :

$$dm = -(-0,47 * d_{kaolin} + 1,2) * C_{OHR} * 1,45.10^{-6} * \left(\frac{m}{\rho_{NaCl}}\right)^{\frac{2}{3}} * (C_s - C) \quad (3)$$

* dt

Avec :

dm : perte de masse de NaCl en gramme

d_{kaolin} : densité de dépôt de kaolin (NSDD)

$$C_{OHR} = \frac{0,2174*HR^2 - 33,924*HR + 1329,647}{3,318*HR - 236,237} : \text{coefficient tenant compte de l'humidité relative}$$

(HR)

ρ_{NaCl} : masse volumique du NaCl

m : masse du cristal de sel (supposé cubique d'arête 3 μm)

C_s = 0,3176 g/cm³ : concentration à saturation d'une solution de NaCl

C : concentration réelle de NaCl dans la solution en g/cm³

t : temps en seconde

La masse d'eau m_e déposée sur la plaquette par condensation pendant dt s'obtient par l'équation :

$$m_e = \alpha_c * M_w * S * \frac{P_T * D}{R * T_a * \delta} * \text{Log} \left(\frac{P_T - p_{w1}}{P_T - p_{w2}} \right) * dt \quad (4)$$

Avec :

$\alpha_c = 0.05$: coefficient de condensation du NaCl

$M_w = 18.0159$: masse molaire de l'eau (H₂O) en g/mol

S : surface de la plaquette de test en cm²

P_T : pression atmosphérique

p_{w1} et p_{w2} : pressions de vapeur d'eau à la limite de la couche de diffusion et au-dessus de la plaque respectivement

$D = 1,87.10^{-6} * T_a^{2,072}$: coefficient de diffusion eau-air en cm²/s

$R = 82,05$: constante des gaz parfaits

$\delta = z_2 - z_1 \approx 0,01$: épaisseur de la couche de diffusion en cm

Au début de l'humidification, les cristaux de sel, par leurs propriétés hygroscopiques, auront tendance à attirer la vapeur d'eau pour former une solution saturée. La pression de vapeur d'eau $p_{w2.\text{initiale}}$ au début de l'humidification est donc prise égale à la pression de vapeur saturante de l'eau d'une solution de chlorure de sodium et s'obtient par l'équation :

$$p_{w2_{initiale}} = P_{sat} = \exp(-2,27 \cdot 10^{-4} * T^2 + 0,1954 * T - 34,8943) \quad (5)$$

Où T est la température de la surface de la couche en kelvin K.

Par ailleurs, la pression de vapeur à la limite de la couche de diffusion est calculée par l'équation :

$$p_{w1} = P_{sat} * \frac{HR}{100} \quad (6)$$

Les équations (3) et (4) permettent de calculer la molalité $\mathbf{b}$ de la solution qui elle-même permet de déduire la molarité (ou concentration molaire) C_{NaCl} en calculant le volume de la solution via sa masse volumique ρ_s exprimée en fonction de la molalité :

$$\rho_s = -0,00123 * \mathbf{b}^2 + 0,04045 * \mathbf{b} + 1.00011 \quad (7)$$

La molalité conduit également au calcul de l'activité de l'eau a_w dans la solution selon l'équation :

$$a_w = \exp\left(-\nu * \mathbf{b} * M_w * \frac{\Phi_s}{1000}\right) \quad (8)$$

Avec ν et Φ_s le nombre d'ions formés lors de la dissociation du NaCl et le coefficient osmotique respectivement. Le coefficient osmotique Φ_s peut être déterminé pour une solution de NaCl seul suivant les expressions de la Figure 7.

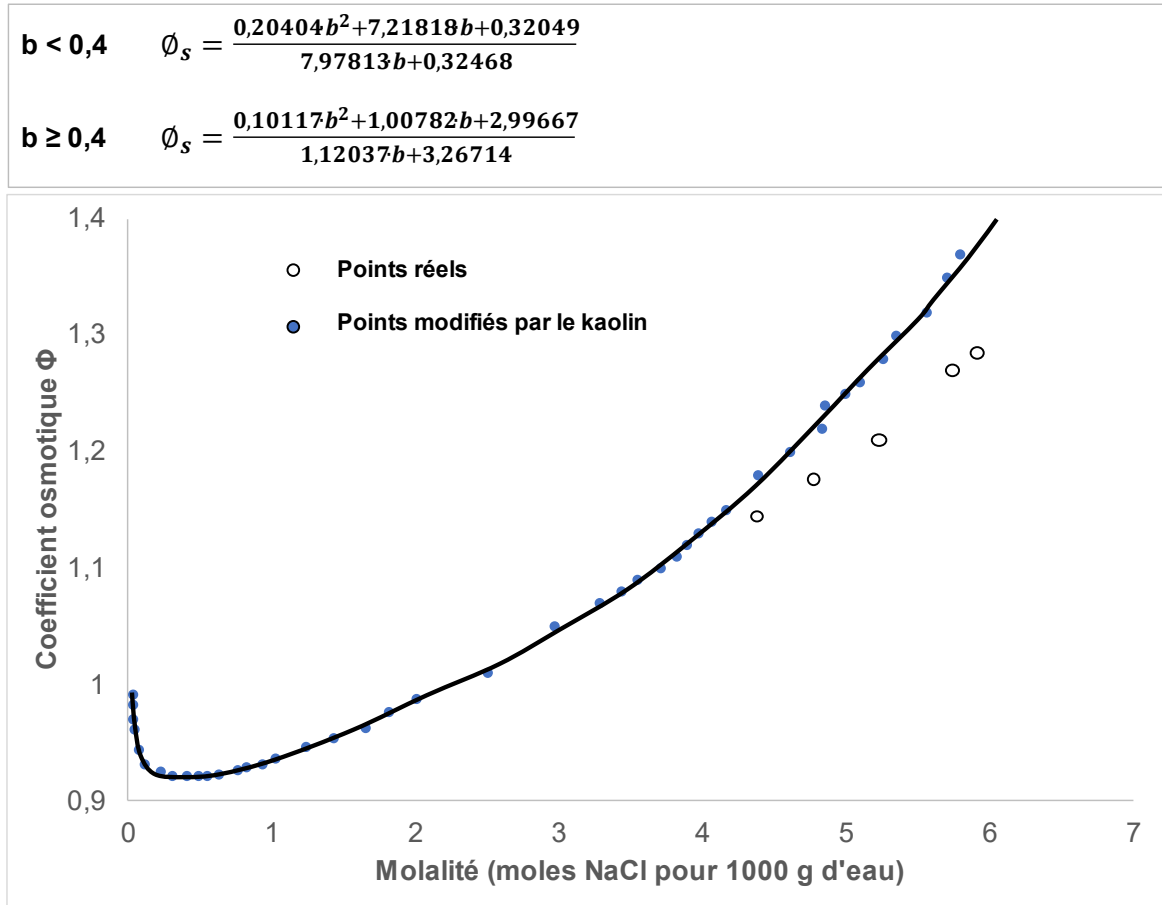


Figure 7 : Évolution du coefficient osmotique avec la molalité [60]

L'activité de l'eau calculée à partir de l'équation (8) permet ensuite le calcul de la pression de vapeur d'eau p_{w2} à la surface de la solution par l'équation :

$$p_{w2} = a_w * P_{sat} \quad (9)$$

La variation de la conductivité γ de la solution de chlorure de sodium en tenant compte de l'influence du kaolin peut s'écrire sous la forme :

$$C_{NaCl} \leq 0,2 \text{ mole/l} : \quad \gamma = \kappa * (0,0047 + 100,2897 * C_{NaCl} - 51,2699 * C_{NaCl}^2 + 43,6209 * C_{NaCl}^3) \quad (10)$$

$C_{NaCl} > 0,2 \text{ mole/l} :$

$$\gamma = \kappa * (1,39608 + 86,156 * C_{NaCl} - 10,47197 * C_{NaCl}^2 + 0,41226 * C_{NaCl}^3)$$

Comme cela a été signifié plus haut, le kaolin influence la conductivité de la solution pour des concentrations surfaciques inférieures à $0,4 \text{ mg/cm}^2$. Le coefficient κ (matérialisant l'influence du kaolin) peut être calculé par l'une des expressions suivantes selon le cas approprié :

$$\begin{aligned} d_{kaolin} < 0,4 \text{ mg/cm}^2 : \quad \kappa &= 1 - \exp(-7 * d_{kaolin}) \\ k_{eau} = \frac{m_{kaolin}}{m_e} \leq 0,4 : \quad \kappa &= 1,529 * k_{eau}^2 - 1,432 * k_{eau} \\ k_{eau} = \frac{m_{kaolin}}{m_e} > 0,4 : \quad \kappa &= 0.66 \end{aligned} \quad (11)$$

Si un courant électrique traverse la solution, il s'ensuit une élévation de température par effet joule. La dissipation de la chaleur est schématisée sur la Figure 8 ci-dessous.

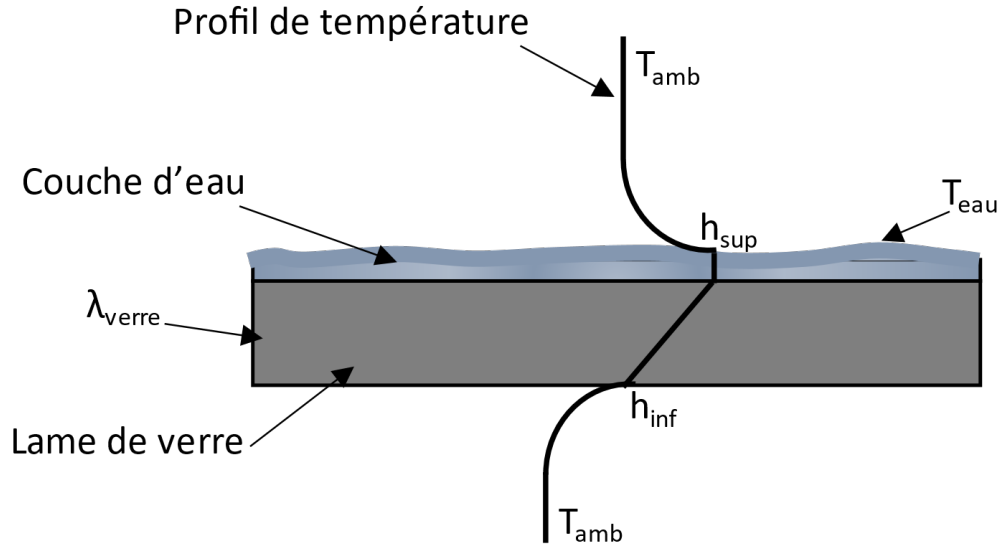


Figure 8 : Profil de température dans la plaquette [60]

La température de la couche d'eau peut être calculée suivant l'équation :

$$T = \frac{\frac{U * I}{S} + T_a * \left(h_{sup} + \frac{1}{\frac{1}{h_{inf}} + \frac{e}{\lambda_{plaque}}} \right)}{h_{sup} + \frac{1}{\frac{1}{h_{inf}} + \frac{e}{\lambda_{plaque}}}} \quad (12)$$

Avec :

U : tension appliquée entre les deux électrodes

I : le courant qui traverse la couche de pollution

S : la surface de la plaquette de test

h_{sup} : coefficient de convection entre la couche et l'air ambiant

h_{inf} : coefficient de convection entre le dessous de la plaque et l'air ambiant

e : épaisseur de la plaquette

Ainsi, il est possible de suivre l'évolution du courant dans la couche à travers le calcul de la conductivité de la solution à chaque itération en calculant la valeur de

température puis les pressions de vapeur d'eau, la masse de NaCl dissoute et la quantité d'eau condensée. Cette étude détaille bien le comportement d'une couche de pollution artificielle à base de kaolin et de chlorure de sodium en phase d'humidification. Il faut cependant noter ici que l'aspect lié à l'évaporation éventuelle de la couche et pouvant conduire à l'assèchement de celle-ci n'est pas abordée. De plus l'épaisseur de la couche n'est prise en compte dans l'étude thermique qui ne mentionne pas la conductivité thermique de celle-ci. Néanmoins, ces fondamentaux constituent une excellente base de compréhension des phénomènes physico-chimiques lors de l'humidification de la couche de pollution. Le comportement de la couche de pollution dans les phases d'évaporation doit être également détaillé pour mieux comprendre la création des bandes sèches à la surface des isolateurs pollués.

2.3 FORMATION DES BANDES SÈCHES À LA SURFACE DES ISOLATEURS COMPOSITES

Comme cela a été mentionné dans les paragraphes précédents, le contournement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en quatre grandes étapes : dépôt d'une couche de pollution solide sur la surface de l'isolateur, humidification progressive de la couche de pollution, développement de zones sèches et apparition d'arcs partiels sur celles-ci et enfin extension des arcs partiels si les conditions sont favorables jusqu'à court-circuiter l'isolateur [39]. Le séchage de certaines parties de la couche de pollution fait donc partie des phénomènes qui influencent le contournement de l'isolateur. Ce séchage est dû à un échauffement local en raison de courants de fuite et de décharges partielles sur les couches

mouillées [39]. Étant données les résistances inégales des couches polluées, la portion avec la plus faible résistance s'assèche plus rapidement en raison d'une grande quantité de chaleur générée par effet joule. La résistance de la bande sèche devient plus grande et voit apparaître une chute de tension plus élevée, provoquant une décharge partielle, voir même le développement d'un contournement complet dans certaines conditions lorsque le gradient de potentiel surpasse la résistance de contournement [31]. La présence de bandes sèches à la surface de l'isolateur pollué a donc été identifiée comme un facteur très important qui influence le contournement des isolateurs.

La problématique de la formation des bandes sèches a été abordée au début des années 1930 [28]. Par la suite, plusieurs chercheurs ont proposé des modèles plus ou moins complexes en vue de la modélisation et de la prédiction de la formation des bandes sèches sur des surfaces d'isolateurs simples et des isolateurs réels. Les modèles simplifiés les plus usuels reposent sur des géométries rectangulaires des matériaux étudiés sur lesquels la plupart du temps, les bandes sèches sont créées artificiellement par l'absence de pollution [9-14]. D'autres chercheurs comme Texier et *al.* [15] ont simplement ajouté un trou au milieu de la géométrie rectangulaire polluée afin d'être en mesure de contrôler la zone d'apparition de la bande sèche en dehors des zones proches des électrodes de mise sous tension. Les géométries simples permettent un meilleur contrôle de la zone d'apparition de la bande sèche et de se prémunir d'une logistique de test trop imposante et onéreuse. Cependant, les résultats qui en résultent sont difficilement transposables aux isolateurs réels.

2.3.1. CRITÈRES DE FORMATION DES BANDES SÈCHES

Les premières études portant sur l'initiation de la bande sèche sur une surface polluée s'appuient sur l'évaluation de la résistance de surface de la couche de pollution. Salthouse [61] a développé un critère d'initiation de la formation de la bande sèche par la mesure de la résistance de la surface d'un échantillon pollué en fonction du degré de pollution, de l'humidité relative, de la tension appliquée et du temps. Considérant un spécimen plat et rectangulaire pollué placé dans un environnement humide ; à l'équilibre, le taux d'évaporation est égal au taux d'absorption d'humidité de la couche. D'après l'étude, ce taux d'absorption est fonction de l'humidité et de la différence de température de surface et ambiante ; ce résultat est confirmé par les travaux de Saison J.Y. [60]. Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée aux électrodes, la chaleur dissipée par le courant de fuite circulant dans la couche de pollution élève la température de surface au-dessus de la température ambiante et il y a évaporation. Cette perte d'humidité devient significative lorsqu'elle provoque une variation mesurable de la résistance de la couche de pollution. C'est la première étape de la formation de la bande sèche. Si la résistivité surfacique ρ_s est connue, le champ électrique surfacique E_s est défini par :

$$E_s = \rho_s \cdot J_s \quad (13)$$

Avec J_s la densité de courant surfacique.

Par ailleurs, la puissance dissipée par effet joule par unité de surface est donnée par :

$$P_s = E_s \cdot J_s = \frac{E_s^2}{\rho_s} \quad (14)$$

Cette puissance est perdue par convection à la surface et par conduction dans le corps de l'isolateur. La puissance dissipée par convection est traduite par l'expression :

$$P_{conv} = h_{sup} \cdot \Delta T \quad (15)$$

Avec h_{sup} et ΔT représentant le coefficient de convection et la variation de température respectivement.

Faisant l'hypothèse que la conduction est négligeable devant la convection, l'auteur peut écrire à l'équilibre que :

$$P_{conv} = P_s \quad (16)$$

Et donc :

$$h_{sup} \cdot \Delta T = \frac{E_s^2}{\rho_s} \quad (17)$$

Si l'élévation de température minimum nécessaire pour causer un changement mesurable de la résistivité de surface est connue, alors le champ électrique minimum pour initier l'évaporation est donné par :

$$E_{s_{mini}} = \sqrt{h_s \cdot \Delta T_{mini} \cdot \rho_s} \quad (18)$$

Et ainsi, la tension minimum pour initier la perte d'humidité est de la forme :

$$V_{mini} = G \cdot \sqrt{\{R_s(0)\}} \quad (19)$$

Avec

$R_s(0)$: Résistance de surface à l'instant initial

G : Constante qui dépend de la géométrie du système, du coefficient de convection et de la différence de potentiel minimum.

À l'analyse des équations utilisées, l'on observe que les propriétés de la couche de pollution et les grandeurs électriques sont ramenées à la surface de la couche. Cela suppose que la couche de pollution doit être très mince pour ramener la production de puissance volumique à une puissance surfacique pour l'analyse du bilan thermique car le courant circule dans tout le volume de la couche de pollution et non uniquement en surface. Des contributions intéressantes se dégagent de cette étude expérimentale. En effet, l'auteur montre qu'il ne peut se former de bande sèche qu'en présence de non-uniformité dans la couche de pollution et que l'élévation de température nécessaire pour initier l'évaporation de l'eau est d'au moins 0,2 °C au-dessus de la température ambiante. Cela correspond à des pertes de puissance par unité de de l'ordre de 0,9 mW/cm² [60]. À partir d'un certain moment, la résistance de la couche de pollution s'assimile presque à la résistance de la bande sèche. Celle-ci étant fonction de la résistance de surface initiale et de la valeur du carré de la tension appliquée entre les électrodes [60].

Johan O. Löberg et Edward C. Salthouse [62], poursuivant les travaux précédents de Salthouse, ont étudié l'accroissement de largeur de la bande sèche à la surface des isolateurs pollués humides. Dans leur approche, ils ont adopté comme expression de la résistivité surfacique celle obtenue par Smail et al [63] dans leur étude sur la résistance électrique de films humides sur des surfaces vitrées :

$$\rho_s = \rho_{s0} \cdot e^{\alpha \cdot \Delta T} \quad (20)$$

où α et ΔT sont respectivement le coefficient de température et la variation de température au-dessus de la température ambiante.

Pour simuler la couche de pollution, les auteurs ont utilisé du gel de silice dopé avec une solution de chlorure de cobalt dans du méthanol. Ceci leur a permis d'obtenir une indication visuelle de la taille de la bande sèche et sa localisation. L'étude montre aussi que l'augmentation de la résistance de surface indiquée par le pic de la caractéristique tension-courant coïncide avec un changement marqué de la distribution de tension le long de la surface, formant la bande dite sèche. Les résultats des expérimentations ont globalement montré que les température et tension minimale d'évaporation de la couche sont fonction de la résistivité initiale de la couche de pollution ; et plus celle-ci est élevée, plus la tension minimale l'est. Le taux de variation de la largeur de la bande sèche avec la tension augmente avec la décroissance de la résistivité de surface. Ainsi, plus faible est la résistivité de surface, plus faible est la tension minimale nécessaire pour initier une bande sèche et plus rapide est la formation de celle-ci avec l'augmentation de la tension [62]. La distribution de température de surface peut être déduite de celle de la résistivité. La puissance dissipée par unité de surface et la largeur de la bande sèche sont intimement liées sur un large éventail de résistances initiales. Les auteurs ont ainsi confirmé que l'augmentation de la résistance résulte de l'évaporation de la couche de pollution humide qui est elle-même causée par l'augmentation de la température de surface au-dessus de la valeur ambiante.

Dans la majorité des études récentes, la formation des bandes sèches est basée sur le calcul du bilan électrique et thermique de la couche de pollution traversée par le courant de fuite [64]. Texier et al. [15] ont développé un modèle de formation d'une bande sèche sur un isolateur pollué par du chlorure de sodium (NaCl). Leur modèle était basé sur les hypothèses suivantes :

- a) La température de la couche de pollution était uniforme.
- b) La perte de chaleur à travers le support de plexiglas était négligeable.
- c) La résistance électrique $R(t,T)$ de la couche de pollution dépendait de la masse résiduelle d'humidité $m_e(t)$ suivant la relation :

$$R(t,T) \cdot m_e(t) = \text{constante} \quad (21)$$

- d) L'évaporation de l'humidité implique deux mécanismes de diffusion : la diffusion des gaz sur la surface de pollution et la diffusion de la vapeur à travers la couche de pollution. En raison de la faible épaisseur de la couche de pollution, le second mécanisme pouvait être négligé. Le taux d'évaporation est approximativement proportionnel à la différence de température entre la couche de pollution (T) et l'environnement ambiant (T_a), la surface (S) de la couche de pollution et un coefficient empirique (D) :

$$\frac{dm_e}{dt} = -D \cdot S \cdot (T - T_a) \quad (22)$$

- e) Une zone sèche apparaît lorsque la masse résiduelle d'humidité m_e devient plus petite qu'une masse critique de valeur (m_{eL}) déduite de leurs mesures expérimentales.

L'équation du modèle est basée sur le bilan d'énergie électrique et thermique entre des instants t et $t+dt$:

$$m_e \cdot C_p \cdot dT = R \cdot i^2 \cdot dt - h \cdot S \cdot (T - T_a) \cdot dt + L \cdot dm_e \quad (23)$$

avec :

h : coefficient global de transfert de chaleur qui est la somme de deux termes : les coefficients de transfert de chaleur convectif et radiatif h_c et h_r ; la conduction thermique à travers l'isolateur étant alors négligée.

$$h = h_c + h_r = 3.19 \cdot (T - T_a)^{0.25} + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^2 + T_a^2) \cdot (T - T_a) \quad (24)$$

L : chaleur latente de vaporisation de l'eau

C_p : chaleur spécifique

L'expression de la résistance critique d'un électrolyte en fonction de la température étant donnée par :

$$R(T) = R_0 \cdot e^{\frac{W_0}{k \cdot T}} \quad \text{avec} \quad \frac{W_0}{k} = \text{constante}$$

et en tenant compte de l'hypothèse c), l'on peut écrire l'expression de la résistance de la couche de pollution sous la forme :

$$R(t, T) = R_0 \cdot \frac{m_e(0)}{m_e(t)} e^{\frac{W_0}{k \cdot T}} \quad (25)$$

L'on doit ajouter la loi d'Ohm :

$$i(t) = \frac{U}{R(t, T)} \quad (26)$$

et la condition d'apparition de la zone sèche :

$$m_e(t_s) = m_{eL} \quad (27)$$

À partir de ces équations du modèle, l'on peut observer que l'accent est mis sur l'évaporation de l'eau de la couche de pollution. L'une des conditions initiales suppose donc que la couche de pollution est déjà humidifiée. D'après les auteurs,

le modèle a permis d'expliquer de manière satisfaisante les données expérimentales présentées à la Figure 9. Ainsi, à tension appliquée constante, le courant augmente d'abord puis diminue après une valeur maximale. L'évolution de la température est similaire, bien que la température maximale se produise plus tard ; la masse de la suspension de pollution diminue, d'abord lentement, puis plus rapidement et enfin à nouveau lentement ; une zone sèche apparaît, avec un décalage caractéristique ; en régime de convection naturel, le bilan énergétique montre que 60 à 87% de l'énergie dissipée par effet Joule est utilisée pour la vaporisation de l'eau [15].

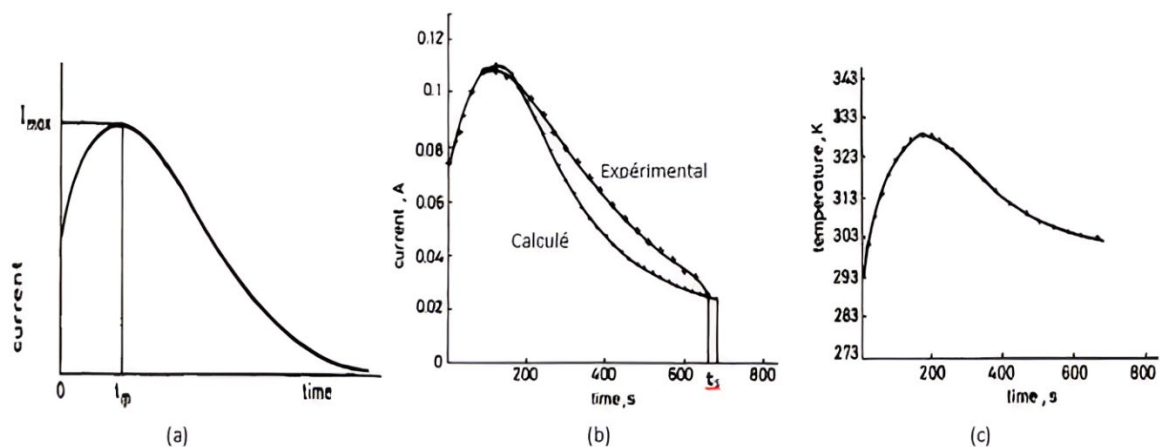


Figure 9 : Évolution du courant de fuite (a) sans apparition de bande sèche, (b) avec apparition de bande sèche et (c) de la température avec création de bande sèche [15]

Dans la même approche, D. L. Williams et. Al. [65] ont mené une étude expérimentale et numérique pour développement de bandes sèches à la surface d'isolateurs en porcelaine. Dans leur démarche, ils ont évalué l'évolution temporelle de la conductance de la surface polluée en faisant varier le taux d'humidification (voir Figure 10). Dans le modèle, la formation de la bande sèche est essentiellement gouvernée par la puissance dissipée dans la couche de pollution due au chauffage

ohmique par rapport au taux de dépôt d'humidité sur la surface polluée. Le chauffage ohmique est à l'origine du taux de dissipation d'énergie nécessaire à l'évaporation.

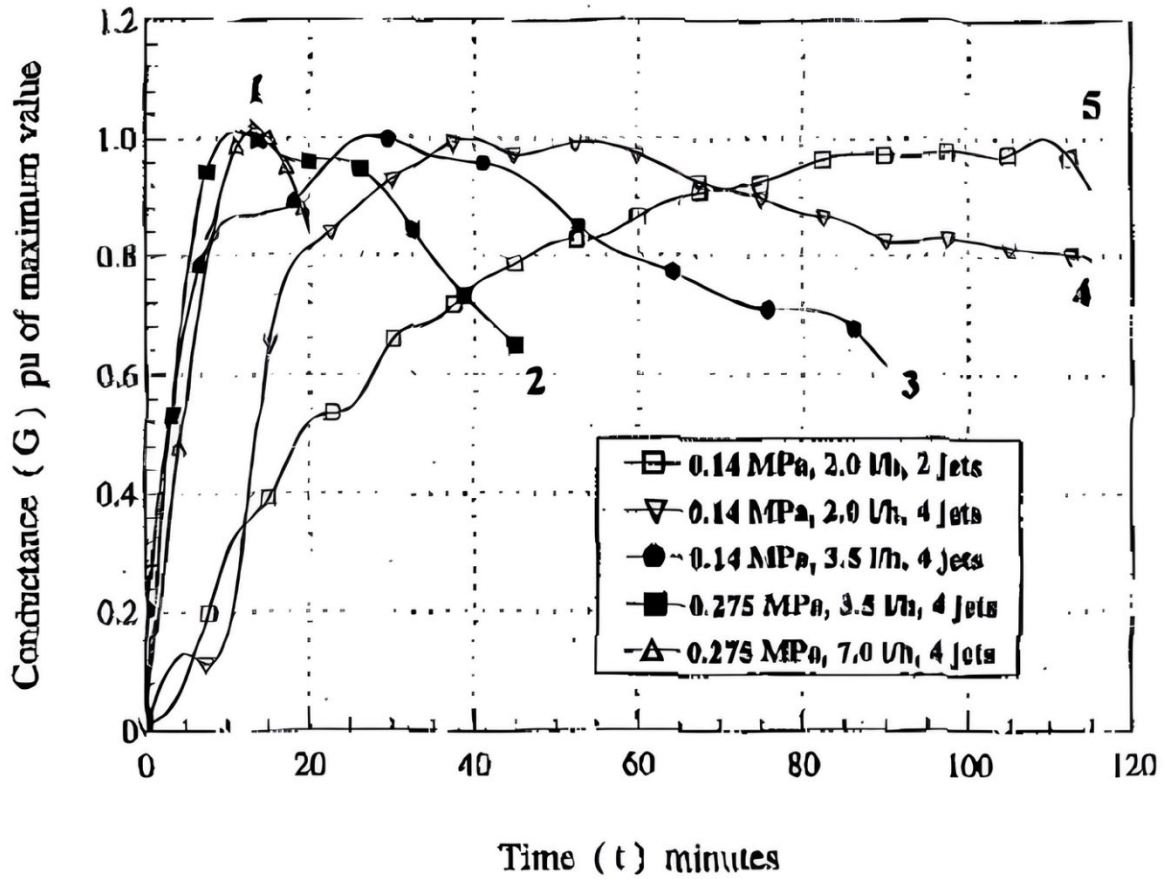


Figure 10 : Évolution de la conductance pour différents taux d'humidité [65]

Puisque le taux d'évaporation ne doit pas être inférieur au taux de mouillage, on a [29] :

$$P_w(\text{W/m}^2) = \sigma \cdot E^2 \cdot t_p \quad (28)$$

$$P_e(\text{W/m}^2) = L \cdot w \quad (29)$$

Où

P_w : Puissance dissipée par mètre carré le long de la couche de pollution.

P_e : Puissance par mètre carré nécessaire pour évaporer une unité de masse d'eau.

E : Intensité du champ électrique le long de la couche de pollution (V/m).

σ : est la conductivité de la couche de pollution (S/m).

t_p : Épaisseur de la couche de pollution (m).

L : Chaleur latente de vaporisation de l'eau, 2270 J/g.

w : Taux d'humidification ($\text{g/m}^2\cdot\text{s}$).

Dans ce modèle, le critère d'initiation d'une bande sèche est donné par :

$$P_w > P_e \quad (30)$$

Ainsi, en simulation 2D, il a été possible d'identifier la création d'une bande sèche et sa localisation le long de la ligne de fuite de l'isolateur pollué. La Figure 11 présente la courbe de puissance dissipée et la ligne de puissance d'évaporation pour un taux d'humidification donné. Les zones de dépassement indiquent la présence de zones sèches selon l'étude.

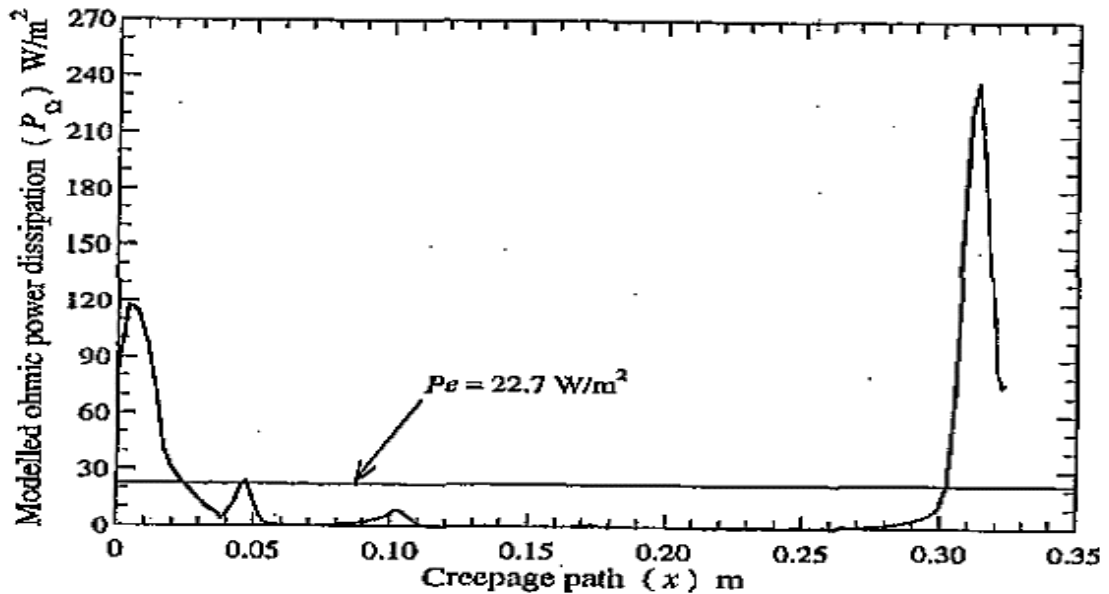


Figure 11 : Variation de la puissance dissipée par effet joule le long du profil de l'isolateur ; $\sigma = 6 \cdot 10^{-7}$ S/m, $V = 14$ kV, $t_p = 0,5$ mm [65]

De plus, les résultats ont montré qu'il existe une relation linéaire entre la tension d'essai et la longueur de la bande sèche. La longueur de la bande sèche a été approximée à partir de la ligne de fuite en surface sur laquelle les arcs partiels se sont étendus. La Figure 12 montre la variation de la chute de tension à travers la bande sèche en fonction de la longueur de celle-ci. Le modèle est utilisé pour prédire la dissipation de puissance dans la couche de pollution en simulant la bande sèche par une zone propre. De plus le modèle ne calcule pas automatiquement les propriétés électriques et thermique de la bande sèche. Une fois la variation de dissipation de puissance en fonction des zones propres intégrée, le modèle procède par comparaison de puissance pour conclure à la création de la bande sèche.

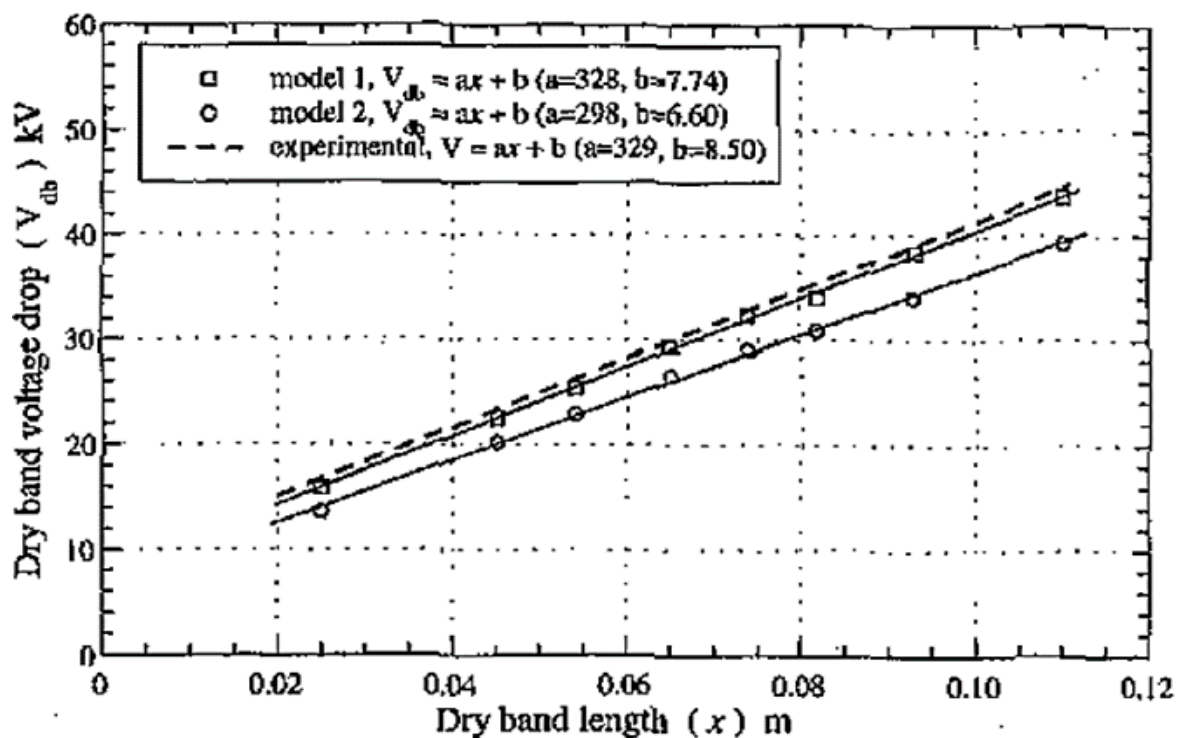


Figure 12 : Variation de la chute de tension dans l'arc en fonction de la longueur de la bande sèche [65].

En s'appuyant sur le même critère de puissance dissipée, L. Bo and R. S. Gorur [32] ont développé un modèle de contournement d'isolateur sous différentes conditions de pollution qui a la particularité de prendre en compte l'apparition de la bande sèche et l'initiation de décharge partielle à travers celle-ci. Comme dans l'étude précédente [65], ils s'appuient sur le critère selon lequel la puissance dissipée par effet joule dans la couche de pollution doit être supérieure au taux de condensation sur la surface polluée pour former des bandes sèches. La puissance dissipée par unité de surface est donnée par l'expression :

$$P_w(W/m^2) = \frac{E \cdot I}{2\pi \cdot R} \quad (31)$$

Où R , E et I représentent le rayon de l'isolateur réel, le champ électrique et le courant de fuite respectivement.

La quantité d'eau pouvant être évaporée dans un temps donné est calculée à partir de la distribution du champ électrique, du taux d'humidification, du courant de fuite, du diamètre de l'isolateur (principalement la tige ou partie étroite) et la valeur de chaleur latente d'évaporation de l'eau. Si cela dépasse l'épaisseur supposée d'eau à la surface de l'isolateur, alors une bande sèche est supposée formée. La puissance par mètre carré (ou la densité de puissance) nécessaire pour évaporer une unité de masse d'eau est celle donnée par l'équation (32). La largeur de la bande sèche initiale est calculée en fonction du champ électrique requis pour déclencher une décharge dans l'air. Une hypothèse supplémentaire faite ici est que la bande sèche supporte la majeure partie de la tension d'alimentation, car la résistance de la bande sèche est beaucoup plus élevée que la partie humide de

l'isolateur. Si l'arc est capable de ponter la bande sèche, il sautera, mais si le courant résultant ne peut pas maintenir l'arc, il deviendra instable et s'éteindra [32]. La valeur minimale du courant nécessaire au maintien de l'arc est comprise entre 2 et 8 mA [32]. La Figure 13 présente l'organigramme général du code MATLAB d'évaluation de la tension de contournement. Le programme utilise la tension d'alimentation pour vérifier si la bande sèche peut être pontée. Si non (et ceci se produit sur les isolateurs avec un grand espacement entre les ailettes), le programme introduit un autre critère qui augmentera la conductivité de la pollution jusqu'à ce que le courant de fuite atteigne 8 mA [32]. Le modèle s'appuie largement sur des mesures expérimentales de la tension de contournement et de la résistance de surface dans des conditions humides des isolateurs en porcelaine ou en matériaux composites. Selon les auteurs, les prédictions du modèle montrent un bon accord avec les résultats expérimentaux.

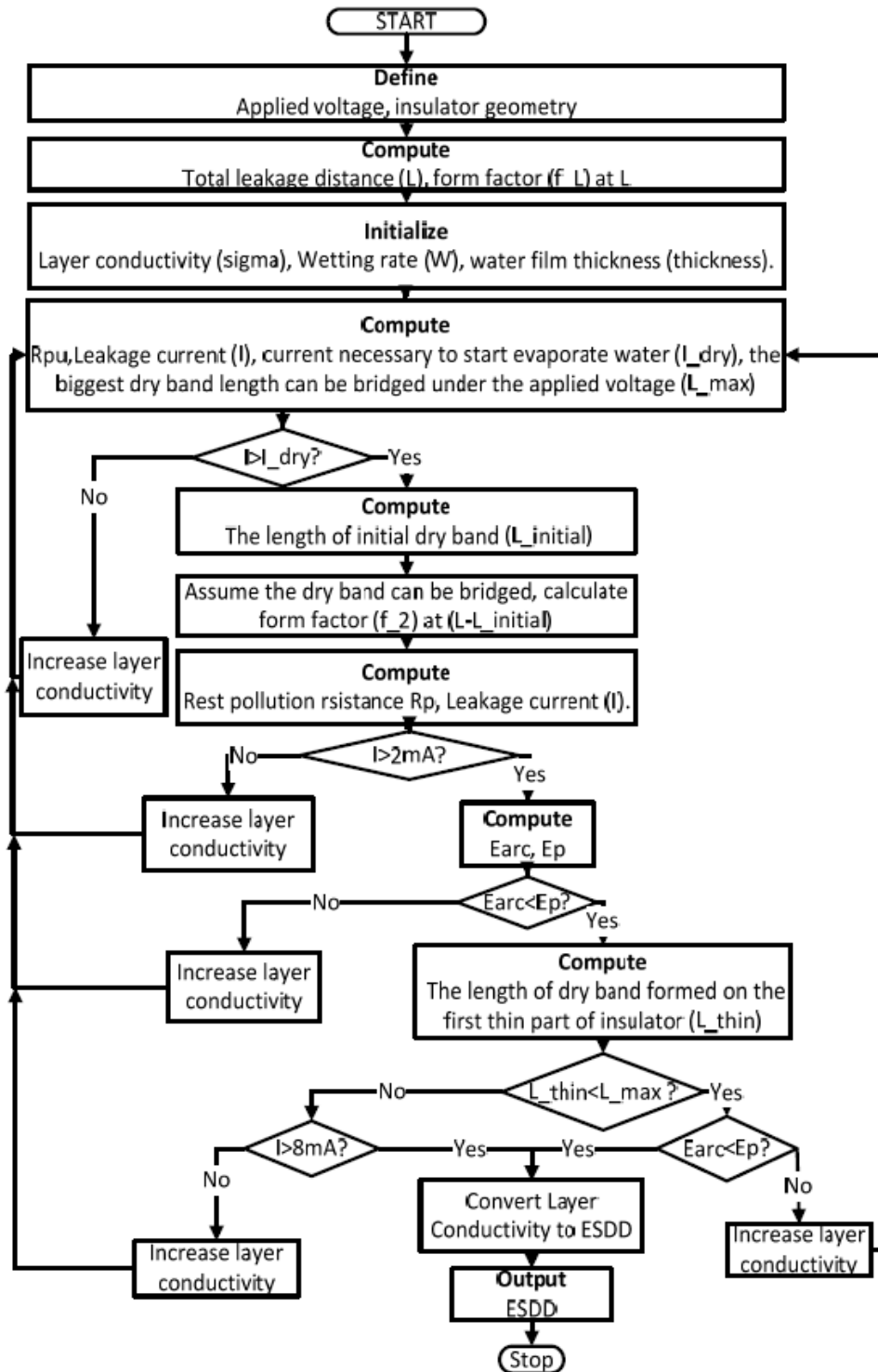


Figure 13 : Organigramme du code d'évaluation de la tension de contournement [32]

Enfin, certaines études utilisent un critère de champs électrique pour déterminer la formation de bande sèche à la surface de l'isolateur [66]. En effet, l'intensité du champ électrique est plus élevée dans la bande sèche lorsqu'elle est créée. Le logiciel commercial COMSOL Multiphysics [67] a été utilisé pour simuler une surface d'isolateur polluée afin de déterminer la variation dans la formation de bandes sèches en fonction de la tension appliquée. Les résultats de la simulation montrent que lorsque le sel de CaCl_2 liquide est utilisé en tant que couche de pollution, la largeur de la bande sèche est plus grande que celle de la couche de pollution contenant du NaCl ou d'autres mélanges de sels [66]. De plus, l'intensité du champ électrique est plus élevée dans la bande sèche comme présenté sur la Figure 14.

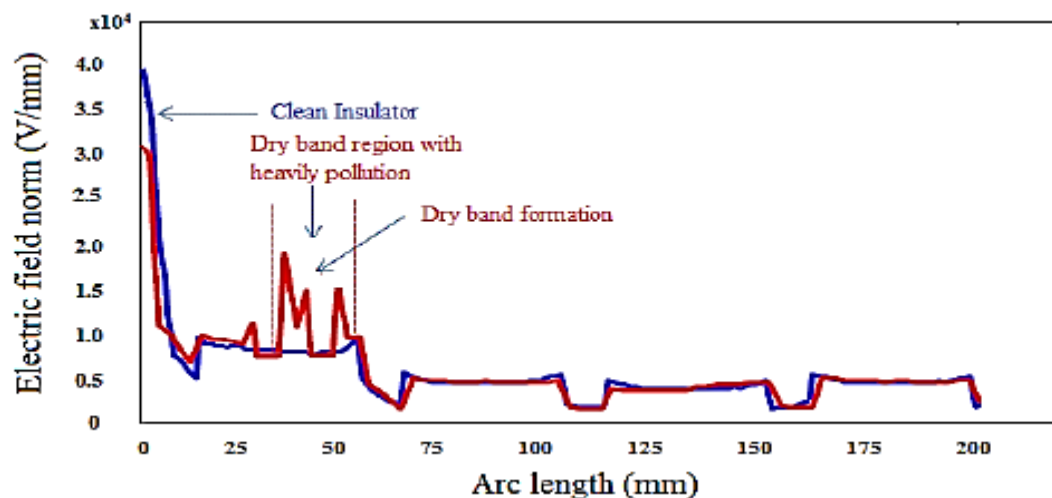


Figure 14 : Formation de bandes sèches pour différents niveaux de sévérité de la couche de pollution [66]

2.3.2. IMPACT DE LA PRÉSENCE DES BANDES SÈCHES SUR LES PERFORMANCES DES ISOLATEURS DE LIGNES H.T. POLLUÉS

Cette dernière décennie, les études relatives aux bandes sèches se sont axées principalement sur l'influence de la présence de bandes sèches sur la performance des isolateurs pollués [9-11, 14, 30, 31, 33, 34, 66, 68-72]. J.-b. Zhou et al. [31] ont étudié la formation des bandes sèches et leur influence sur la distribution du champ électrique le long d'une chaîne d'isolateurs en verre pollués. Dans cet article, les auteurs utilisent la méthode des éléments finis (MEF) pour construire un modèle tridimensionnel basé sur la forme réelle des isolateurs avec des bandes sèches et analyser la distribution du champ électrique sous tension alternative. À l'aide de la méthode d'analyse harmonique quasi statique sous le logiciel commercial ANSYS, le modèle permet d'effectuer l'étude approfondie de l'influence de la création, la position en surface, la largeur, l'angle et le nombre de bandes sèches sur la distribution de potentiel et de champ électrique en surface de la chaîne d'isolateurs pollués (voir Figure 15). Les auteurs sont parvenus à la conclusion que :

- La création de bandes sèches induit une distorsion dans la répartition de potentielle à la surface des isolateurs, ce qui a pour effet d'accroître l'intensité du champ de la bande sèche. L'intensité du champ électrique est très différente selon les positions sur la bande sèche le long de la direction circonférentielle, avec une valeur maximale au centre et diminuant du centre aux bords.
- Lorsque les bandes sèches se créent à différentes positions sur la surface de l'isolateur dans la direction axiale, l'intensité du champ maximale a une

variation asymétrique de type U, c'est-à-dire qu'elle est plus élevée sur les bandes sèches proches des extrémités et plus faibles pour celles éloignées des électrodes.

- L'intensité maximale du champ diminue de façon non linéaire sur la bande sèche avec l'augmentation de la largeur et augmente avec l'angle. L'expansion de la bande sèche le long de la direction circonférentielle entraîne une augmentation de la force du champ et l'expansion de la bande sèche le long de la direction axiale, une diminution de la résistance.
- L'intensité maximale du champ électrique sur la bande sèche diminue avec l'augmentation du nombre de bandes sèches. Plusieurs bandes sèches créées simultanément auront la capacité d'affaiblir l'intensité du champ les unes des autres. La nouvelle bande sèche empêchera la création et l'expansion de l'arc électrique sur les bandes sèches précédemment créées.

Il faut noter ici que la bande sèche est matérialisée par un espace d'air dans le modèle géométrique.

R. T. Waters et al. [11] ont réalisé des tests de plan incliné d'échantillons de caoutchouc de silicone préparés avec des motifs texturés. Ils ont observé que des bandes sèches stables étaient formées sur les surfaces texturées contrairement aux surfaces planes non texturées classiques du même matériau. Des observations simultanées de l'activité de décharge dans la bande sèche et du courant de fuite ont montré clairement que le courant le plus faible se produit pendant les décharges actives dans la bande sèche et que le courant le plus important coïncide avec les intervalles où aucune décharge n'a été vue. Ceci implique que la conductance du

canal de décharge est inférieure à celle de la couche de pollution. La Figure 16 montre les formes d'onde d'une alternance du courant de fuite pour différents états de la surface polluée. La forme d'onde sinusoïdale indique un courant de conduction dans une couche de pollution continue sans bandes sèches, alors qu'elle devient plus déformée avec les décharges de la bande sèche. La forme de l'onde devient encore plus déformée lorsqu'un arc électrique est observé.

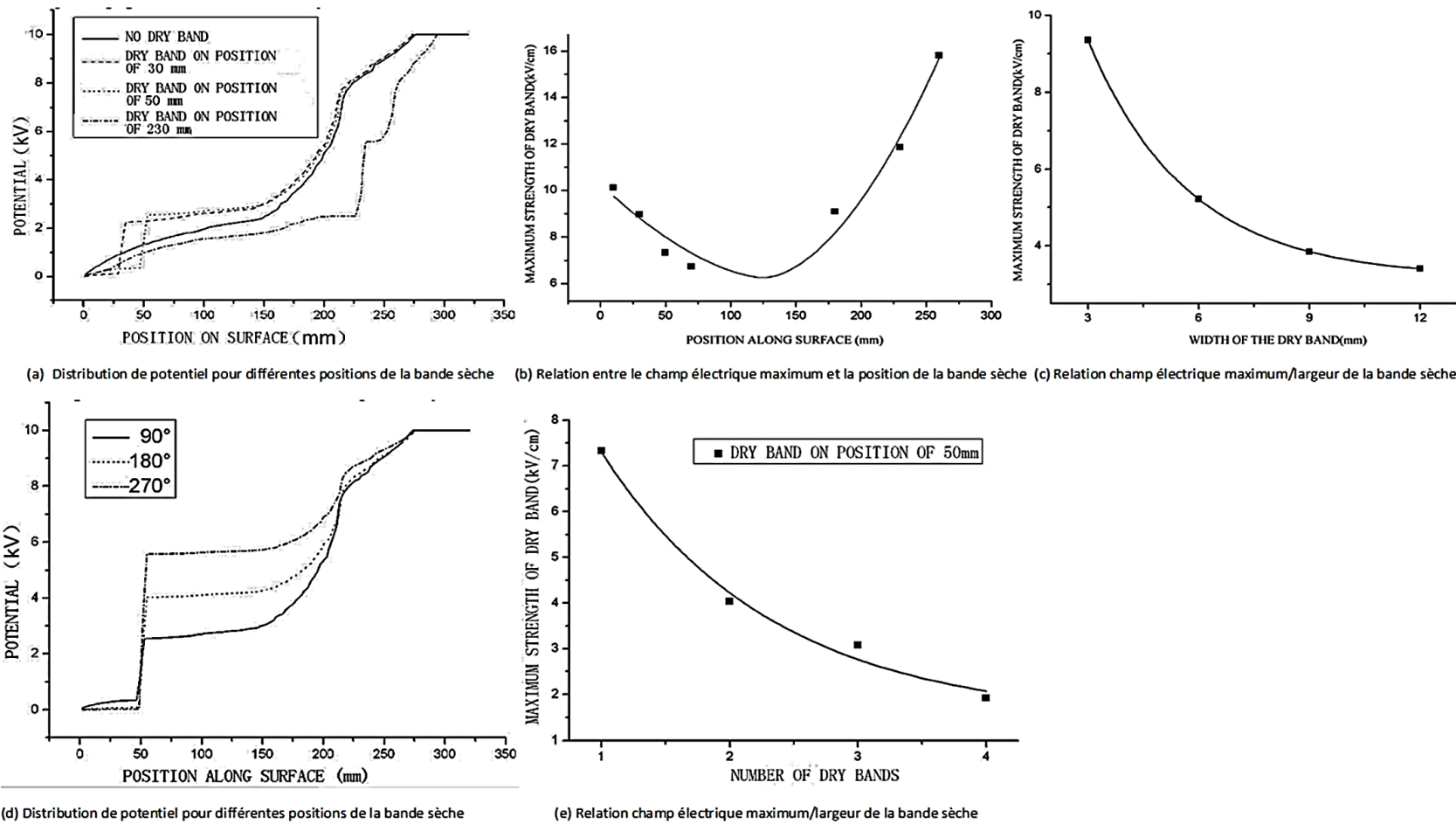


Figure 15 : Influence de la bande sèche sur la distribution de potentiel et de champ électrique le long d'un isolateur en verre pollué [31]

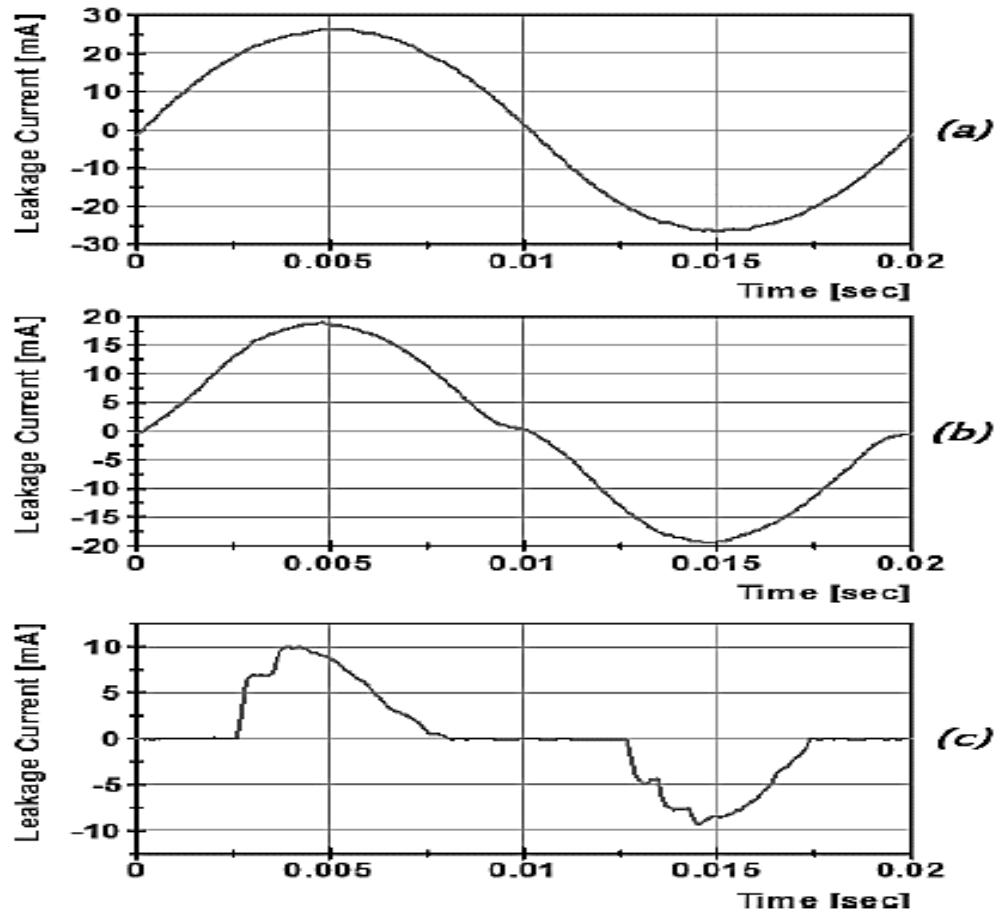


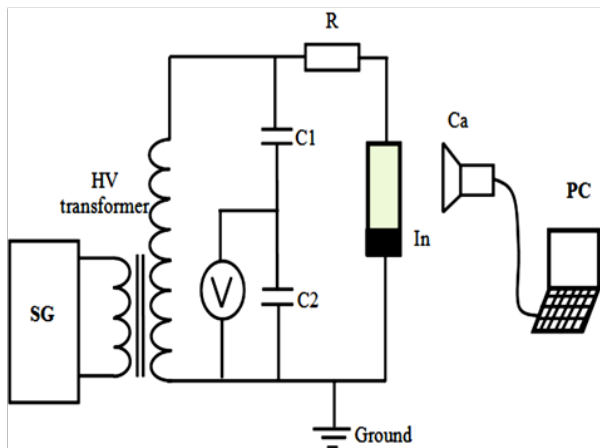
Figure 16 : Les cycles de courant de fuite correspondant à (a) sans bande sèche, (b) des décharges partielles sur bande sèche et (c) une phase d'arc [11]

H. Terrab et A. Bayadi [10] ont présenté une étude expérimentale de l'effet de la répartition de la couche de pollution et de sa conductivité sur les performances de la surface isolante, en tenant compte de la longueur, de la position et du nombre de bandes sèches. Cette enquête est basée sur l'utilisation de la méthodologie de conception d'expériences et de la technique statistique d'analyse de variance pour évaluer et déterminer l'effet de chaque facteur. Les travaux expérimentaux ont été effectués au laboratoire LGEG de l'Université de Guelma. Le montage expérimental (Figure 17a) utilisé comprend un générateur de courant alternatif, une cellule de test. Le modèle d'isolateur est un plan rectangulaire en verre de 6 mm d'épaisseur, 50

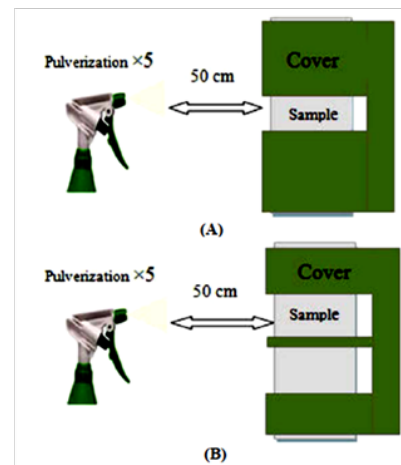
mm de largeur et 150 mm de longueur totale. L'électrode de masse est constituée d'une bande d'acier en contact avec le modèle expérimental. L'électrode HV est constituée d'une pointe en acier. La pollution est préparée à l'aide d'un simple électrolyte d'eau et de chlorure de sodium. Dans un premier temps, la surface isolante est nettoyée à l'eau et séchée avec un mouchoir en papier. Ensuite, il est parfaitement nettoyé à l'alcool pour assurer la parfaite propreté du modèle étudié. Le contrôle de la couche de pollution est obtenu en masquant les parties de l'isolateur souhaitées, puis par application de 5 pulvérisations à une distance de 50 cm à l'aide d'un pulvérisateur adéquat (Figures 17b et 17c). La tension appliquée est augmentée suivant une pente constante jusqu'au contournement. À partir de ce travail, les auteurs ont montré que la rigidité diélectrique de la surface polluée augmente avec l'augmentation du nombre de bandes sèches et de leur largeur. Les bandes sèches peuvent être considérées comme une barrière potentielle dans la couche conductrice qui rend la tension de contournement de la pollution non uniforme discontinue et supérieure à celle d'une distribution uniforme.

Majid Hussain et al. [66] , dans leur étude sur la formation de bandes sèches sur des isolateurs HT pollués par différents mélanges de sels, ont montré que la non-uniformité de la distribution des contaminants, l'humidification et le processus de séchage conduit au développement et à la formation de multiples bandes sèches sur la surface de l'isolateur. Les résultats des tests ont montré que la formation de bandes sèches n'est pas uniforme avec différents mélanges de sels. La formation de bandes sèches a été étudiée par la mesure de la résistivité de la surface de l'isolateur et du courant de fuite. Les résultats de résistivité superficielle et de courant

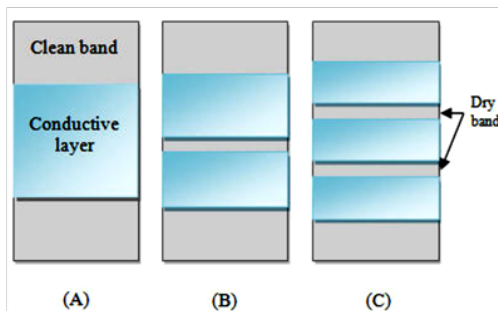
de fuite ont montré que les bandes sèches apparaissaient plus rapidement lorsque le chlorure de calcium (CaCl_2) était utilisé seul ou avec des sels autres que le chlorure de sodium (NaCl). De façon générale, la largeur d'une bande sèche augmente avec le niveau d'humidité. La Figure 18 montre la relation entre le courant de fuite et la résistivité de surface en présence de bande sèche.



(a) Système expérimental, SG: contrôle tension, transformateur HT, R: résistance de limitation (2.5 MΩ), V: mesure de tension DMI 551, C1 and C2: diviseurs de tension capacitifs (100 pF), In: modèle d'isolateur, Ca: camera, PC: personal computer



(b) Procédure de pulvérisation: (A) couche non uniforme de 20 mm au milieu du modèle d'isolateur, (B) couche discontinue non uniforme de 50 mm avec une bande sèche en position centrale.



(c) Configuration de pollution: (A) couche non uniforme de 50 mm au milieu du modèle d'isolateur, (B) couche discontinue non uniforme de 50 mm avec une bande sèche en position médiane, (C) couche discontinue non uniforme de 50 mm avec deux bandes sèches en position médiane.

Figure 17 : Système expérimental de test et pollution d'un modèle d'isolateur rectangulaire plan en verre [73]

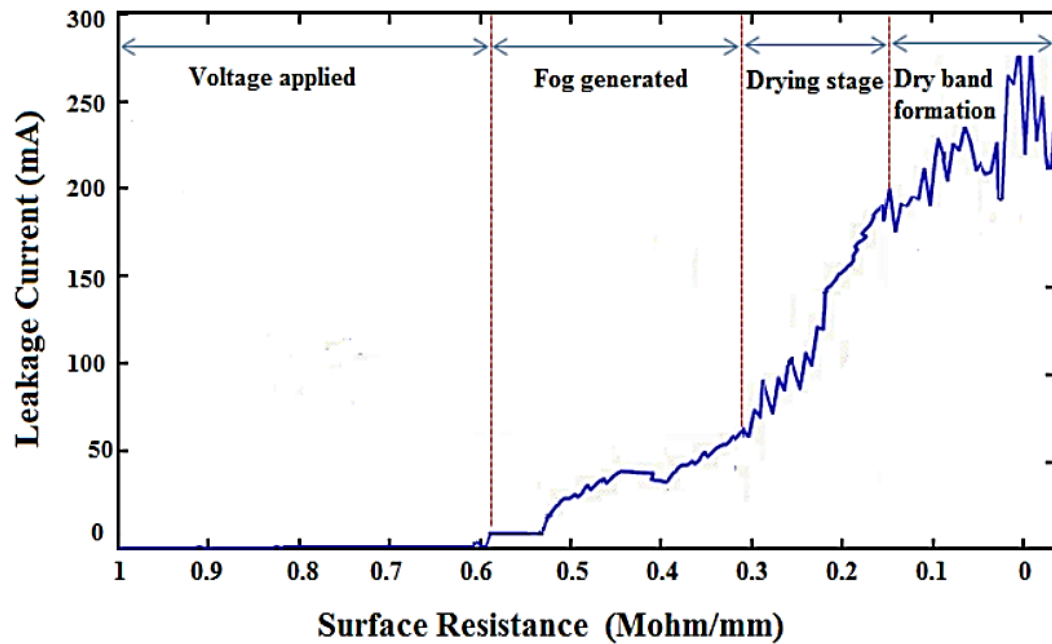
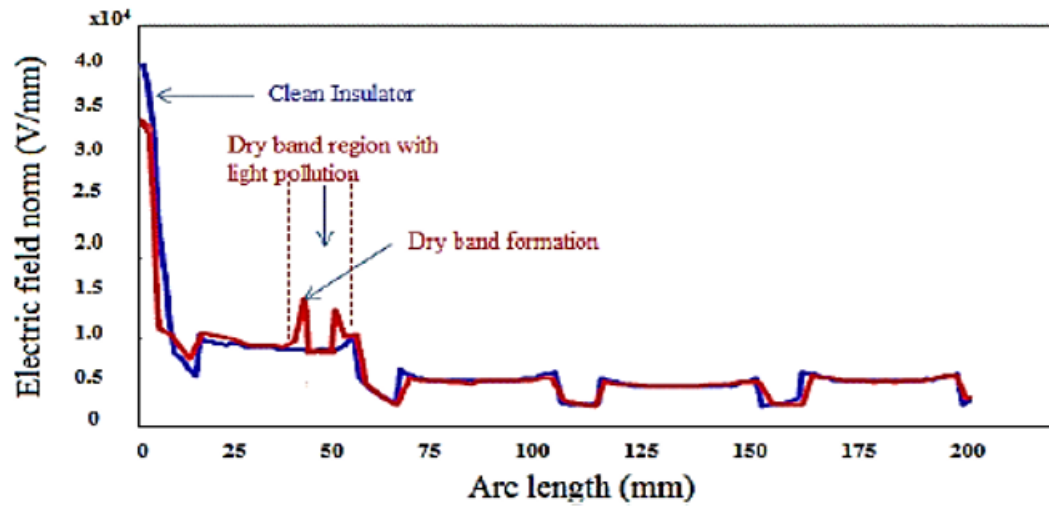
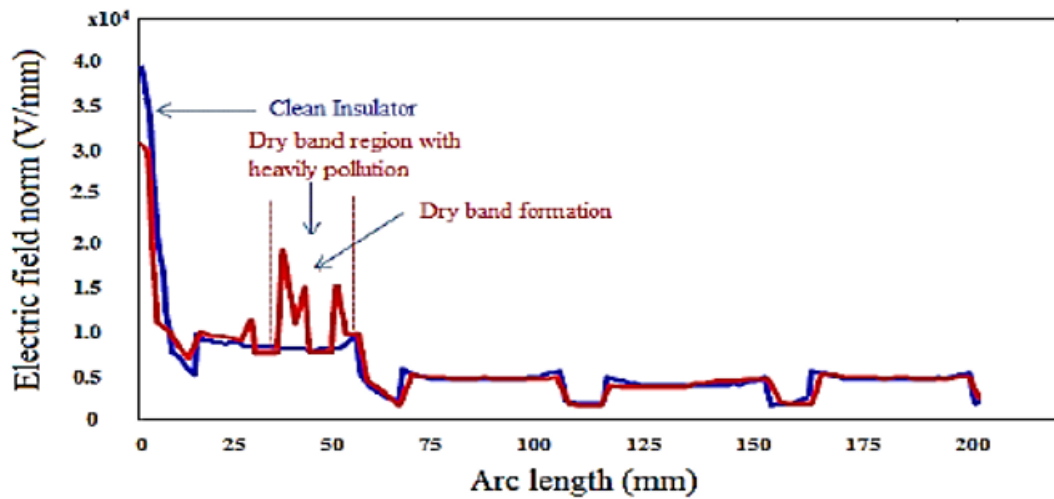


Figure 18 : Relation entre la résistivité de surface et le courant de fuite [66]

Le logiciel commercial COMSOL Multiphysics a été utilisé pour simuler une surface isolante afin de déterminer la variation de la formation de bandes sèches en fonction de la tension appliquée. Les résultats de la simulation montrent que lorsque le sel de CaCl_2 liquide est utilisé en tant que couche de pollution, la largeur de la bande sèche est plus grande que celle de la couche de pollution contenant du NaCl ou d'autres mélanges de sels. De plus, la magnitude du champ électrique est plus élevée dans la bande sèche comme présenté sur la Figure 19.



(a) Dry Band Formation with Lower Pollution Level



(b) Dry Band Formation with Higher Pollution Level

Figure 19 : Formation de bandes sèches pour différents niveaux de sévérité de la couche de pollution [66]

A. Nekahi et al. [9] ont étudié la formation de bandes sèches sur une surface rectangulaire de dimensions 10 cm $\times$ 4 cm $\times$ 0.6 cm en caoutchouc de silicone et leur effet sur les caractéristiques de contournement. La pollution a été appliquée selon la méthode de la couche solide modifiée basée sur la norme CEI 60507. Des bandes sèches (zones propres) de différentes largeurs ont été insérées au niveau

de la masse, de la partie haute tension et du milieu des échantillons. Les expériences ont été menées dans une chambre climatique et des valeurs spécifiques de température ambiante et d'humidité relative ont été utilisées. La tension de contournement critique a été mesurée pour chaque cas et la Figure 20 présente les relations entre la largeur de bande sèche, l'emplacement et la tension de contournement critique.

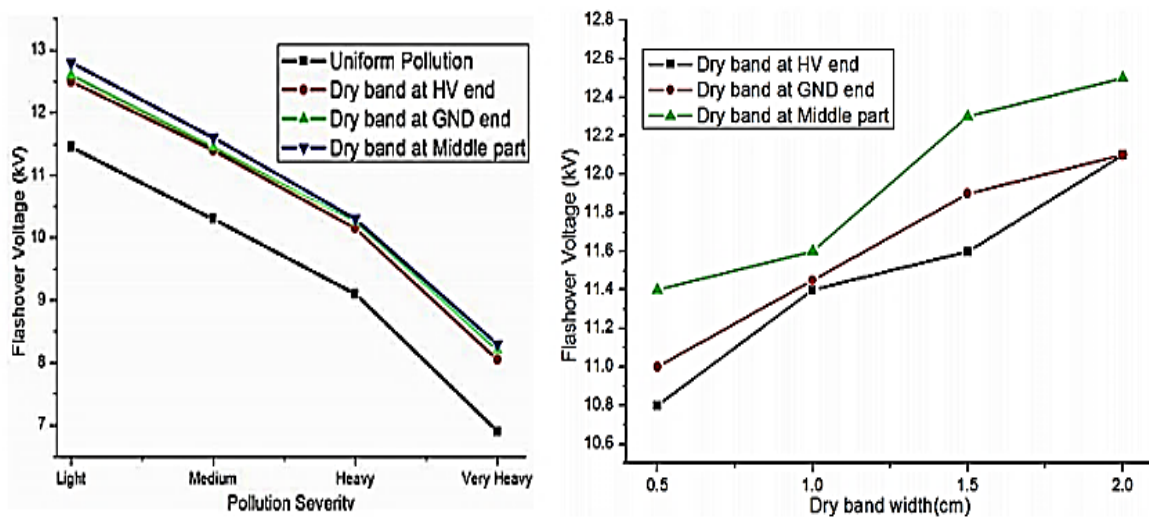


Figure 20 : Impact des bandes sèches sur la tension critique de contournement [9].

Les résultats de cette étude ont montré que la formation de bandes sèches augmentait la tension de contournement de l'isolateur en caoutchouc de silicone. En outre, l'augmentation de la tension de contournement était plus importante lorsque la bande sèche était située au milieu de l'isolateur par rapport aux emplacements situés à la terre et à l'alimentation H.T. La Figure 21 montre également que l'intensité du champ électrique est plus élevée aux extrémités de la bande sèche [33]. D'après les auteurs, ces résultats pourraient être utilisés pour améliorer les modèles mathématiques existants permettant de prévoir la tension critique de contournement des isolateurs polymères extérieurs.

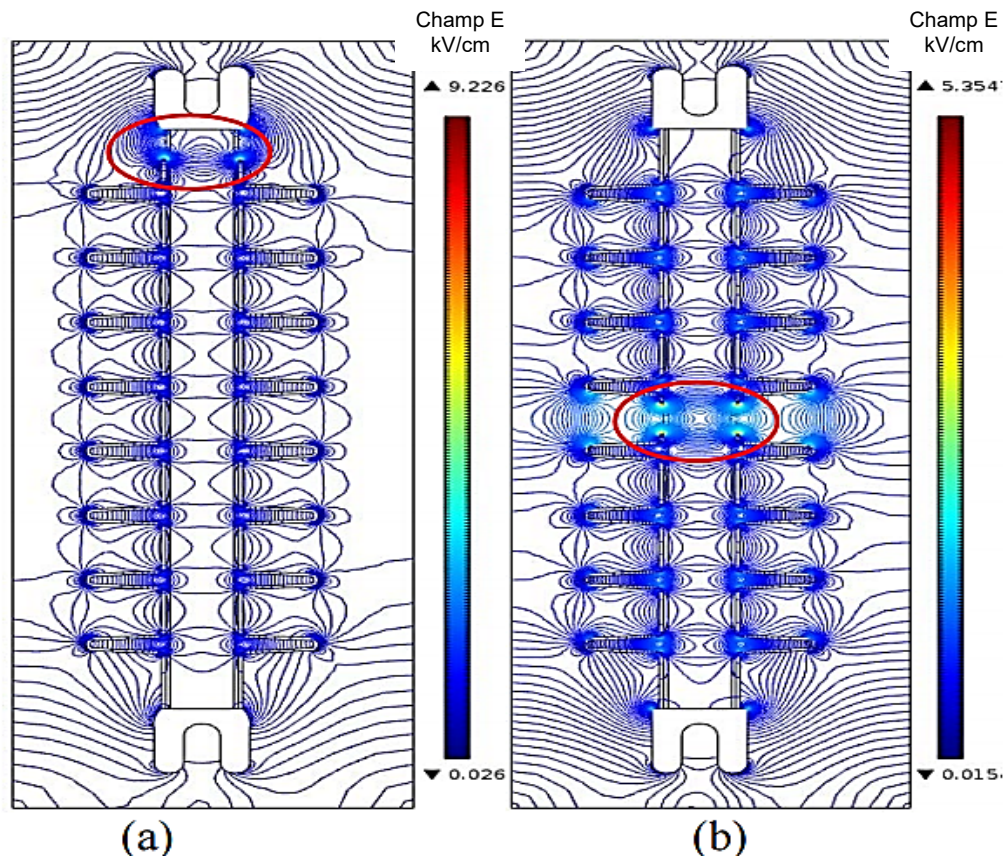


Figure 21 : Répartition du champ électrique le long d'un isolateur polymère (kV/cm)
 (a) Bande sèche à l'extrémité H.T. (b) Bande sèche à la partie médiane [33].

N. Dhahbi-Megrache et al. [68] ont réalisé une étude pour comprendre l'influence des bandes sèches et de la répartition de la pollution sur les performances de l'isolateur sous tension impulsionnelle. À la Figure 22 l'on peut observer les résultats des simulations de distribution de potentiel en fonction du nombre de bande sèche. Ces résultats indiquent que la bande sèche près des électrodes provoque des contraintes plus élevées (tension et intensité du champ électrique) que dans le cas d'une couche de pollution continue (Figure 22a). Il a été observé également des contraintes extrêmement élevées au niveau des bandes sèches ; ces contraintes dépendent principalement de la largeur et de l'emplacement des bandes sèches, comme illustré à la (Figures 22b et 22c). L'on observe également que si la chute de

tension le long des différentes bandes sèches est suffisamment élevée (en particulier pour celles formées près de l'électrode HT), des arcs partiels apparaissent le long de celles-ci ; et si les conditions requises sont réunies, il se produirait un contournement.

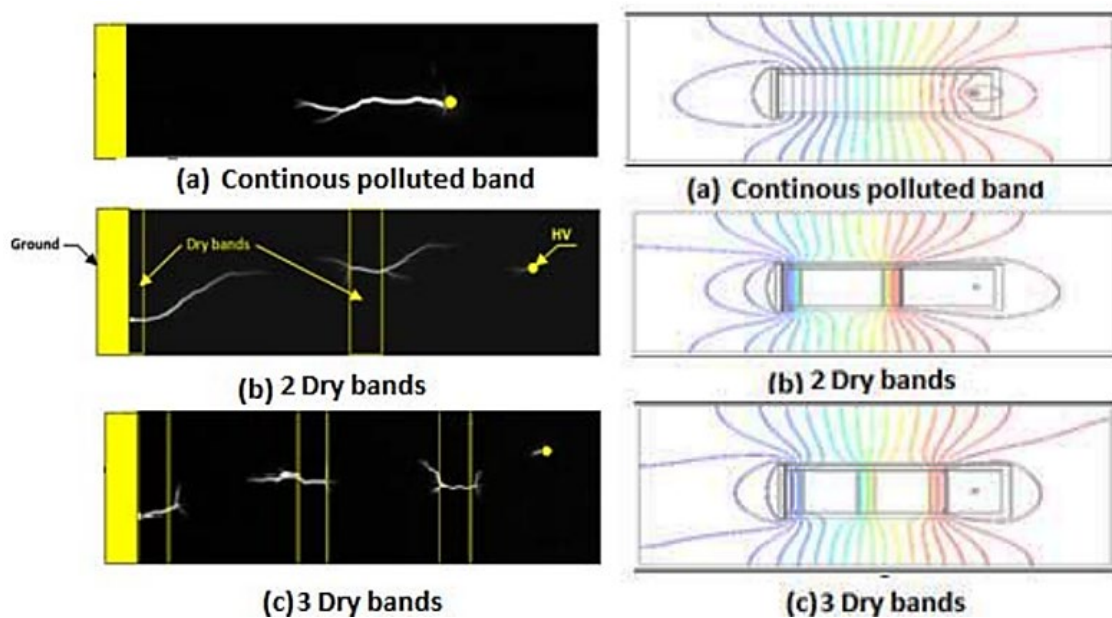


Figure 22 : Morphologie (à gauche) et simulation numérique (à droite) d'un modèle d'isolateur plan pour (a): bande polluée continue, (b): discontinue avec 2 bandes sèches et (c): 3 bandes sèches [68].

De la Figure 23, les auteurs ont conclu que l'augmentation du nombre de bandes sèches implique moins de discontinuité dans la distribution de la tension le long de l'isolateur, ce qui peut améliorer considérablement la tenue diélectrique de celui-ci.

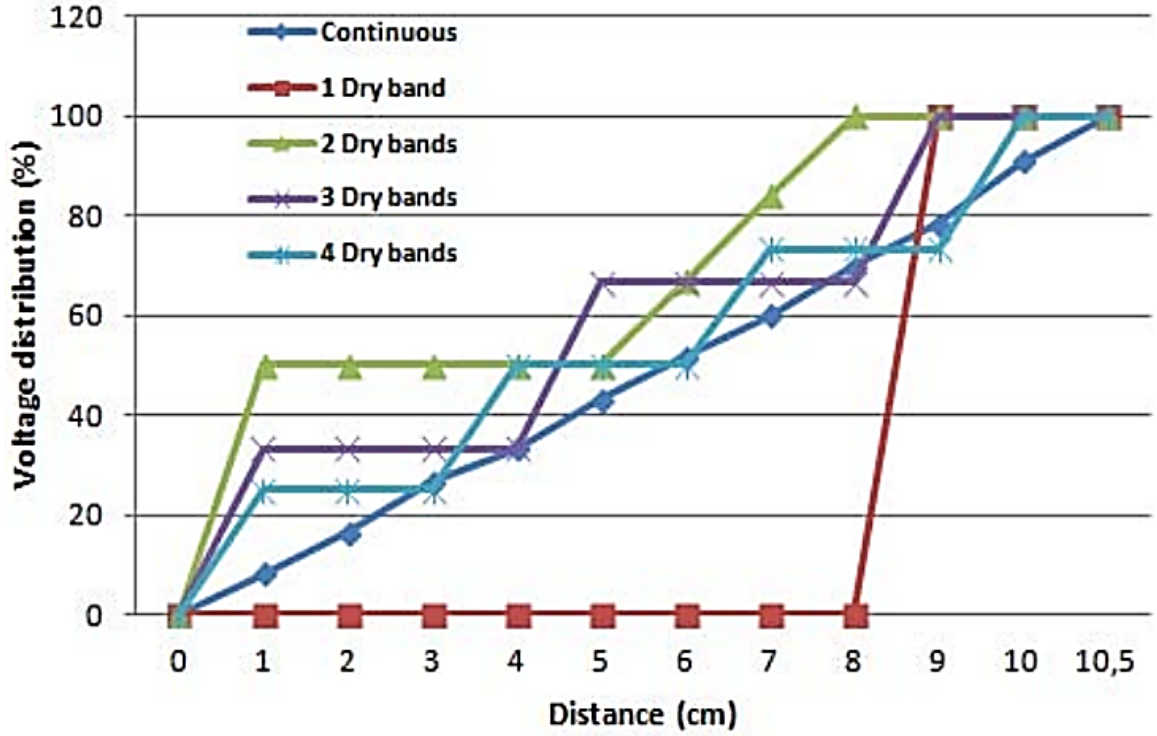


Figure 23 : Distributions de potentiel pour un isolateur uniformément pollué avec différentes bandes sèches [68].

Dans leurs récents travaux, des auteurs [71, 72] ont bâti un modèle numérique basé sur par la méthode des éléments finis (MEF) pour calculer le champ électrique et de la densité de courant le long de la géométrie d'un isolateur réel. Pour y parvenir, les auteurs ont développé un système expérimental afin de produire des données leur permettant d'élaborer une expression empirique de la conductivité de surface en fonction du champ électrique (voir Figure 24) :

$$G(\mu S) = 4.2 \times 10^{-6} e^{-9 \times 10^{-5}(E)} \quad (33)$$

Les résultats des simulations de champs électriques avec cette approche (conductance dynamique) sont plus précis que ceux utilisant des conductivités

constantes. Cependant, dans ce modèle, l'impact des paramètres tels que le matériau et la température n'est pas pris en compte.

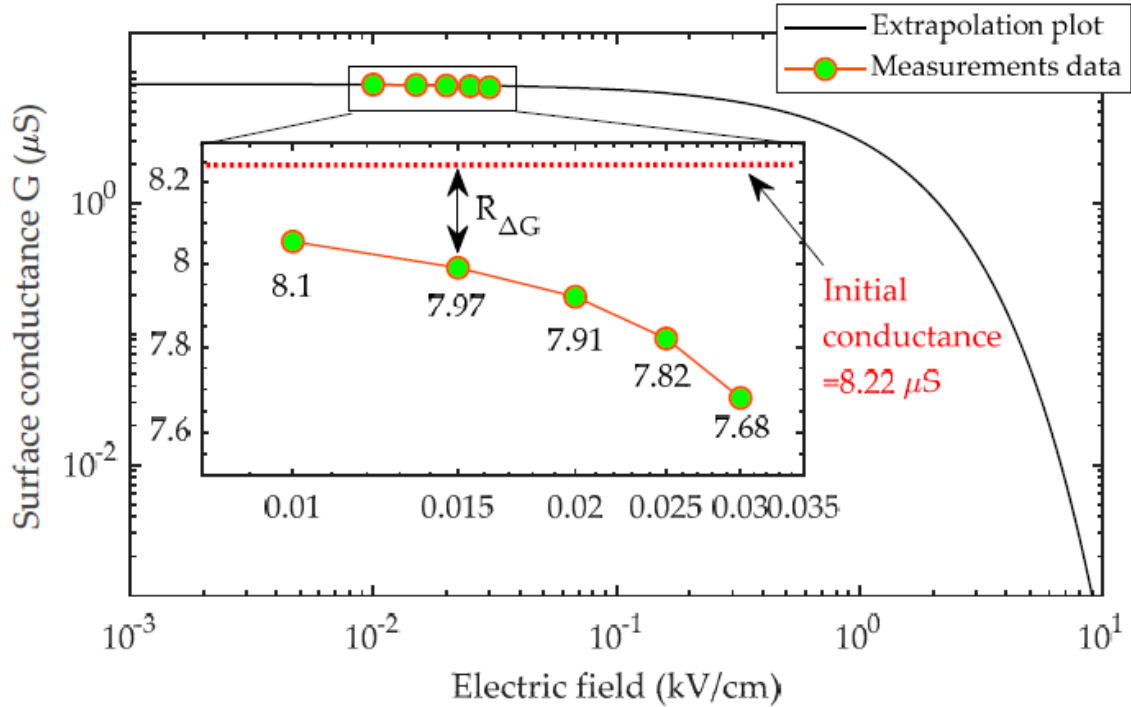


Figure 24 : Relation entre la conductance et le champ électrique [72]

2.4 CONCLUSION PARTIELLE

Les isolateurs, qu'ils soient en céramique ou en matériau composite, sont des pièces maitresses pour les lignes électriques haute tension et leur défaillance impacte très négativement la stabilité et la fiabilité des réseaux de fourniture d'électricité. Ces défaillances peuvent être d'ordre mécanique (rupture fragile), électrique (contournement) et environnemental (perte de propriétés diélectriques, pique d'oiseaux, ...). Le processus de contournement, est initié par l'apparition d'au moins un arc électrique partiel à la surface de l'isolateur. Ce premier arc partiel lui-

même provoqué par des phénomènes dits de pré-contournement mérite d'être bien compris afin d'améliorer les performances diélectriques des isolateurs composites contre les contournements. L'initiation de l'arc partiel met en jeu des phénomènes multiphysiques complexes dont l'étape initiale réside dans la formation d'une ou plusieurs bandes sèches qui concentrent l'essentiel de la contrainte électrique appliquée à l'isolateur. Le comportement de l'isolateur pollué en présence de ses bandes sèches est beaucoup traité à travers plusieurs études expérimentales et numériques. Ainsi, les dimensions, la position et le nombre de ces bandes sèches semblent exercer une influence significative sur les distributions de potentiel et de champ électriques à la surface de l'isolateur pollué. Dans la majorité des études, ces bandes sèches sont simulées par des zones propres en des emplacements préétablis. De plus, l'impact de certains paramètres tels que les caractéristiques des matériaux de l'isolateur et les contraintes thermiques n'est pas traité.

L'intérêt de ce projet de recherche réside dans le développement d'un modèle numérique multiphysique pouvant permettre de suivre l'évolution d'une couche de pollution humide jusqu'à l'apparition d'une bande sèche à un emplacement quelconque; ainsi que l'initiation d'un arc partiel à travers celle-ci. Le modèle devrait donc prendre en compte les propriétés physicochimiques de la couche de pollution (surtout la variation de la conductivité électrique) en fonction de la température (responsable de l'évaporation de la couche), du taux d'humidité et de la tension appliquée.

CHAPITRE 3

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE THERMOÉLECTRIQUE 2D AXISYMÉTRIQUE D'UN ISOLATEUR COMPOSITE 69 KV POLLUÉ

Le but de cette section est de justifier le développement d'une nouvelle géométrie simple permettant de reproduire le plus fidèlement le processus de formation des bandes sèches à la surface d'un isolateur pollué. Pour ce faire, il a été décidé de réaliser différentes simulations thermoélectriques en utilisant le modèle géométrique réel d'un isolateur composite qui est celle d'un isolateur *Sediver* 69 kV [74]. La plupart des modèles numériques rencontrés dans la littérature ne traitent pas le volet du transfert de chaleur dû à l'effet joule lors des calculs et simulations des distributions de potentiel et de champ électriques le long des isolateurs composites pollués. L'objectif de ce travail est donc de déterminer les profils de température, de potentiel et de champ électriques à la surface et le long d'un isolateur composite pollué d'une ligne moyenne tension de 69 kV afin d'analyser la répartition des contraintes thermique et électrique responsables de l'apparition des bandes sèches

3.1 MODELISATION DE L'ISOLATEUR COMPOSITE 69 KV

Pour déterminer les profils de potentiel électrique, de champ électrique et de température à la surface de l'isolateur composite, la simulation par éléments finis à travers le logiciel Comsol Multiphysics 5.4 a été réalisée. Deux principales physiques ont été utilisées : courant électrique et transfert thermique dans les solides. Le couplage entre les deux physiques a été réalisé en utilisant les pertes résistives,

dans chaque sous-domaine, issues de l'étude électrique comme source de chaleur dans l'étude thermique. Dans le but d'éviter les problèmes de singularité et de divergence dans le calcul de la solution numérique la modélisation bidimensionnelle (2D) axisymétrique a été utilisée. Le modèle géométrique adopté et les caractéristiques des différents matériaux sont présentés respectivement sur la Figure 25 et dans le Tableau 6. Une couche de pollution uniforme est appliquée à la surface de l'isolateur ; ceci représentant la situation la plus défavorable que l'on puisse rencontrer. La géométrie et les différentes dimensions ont été déterminées respectivement à partir des travaux de Gba Kone [41].

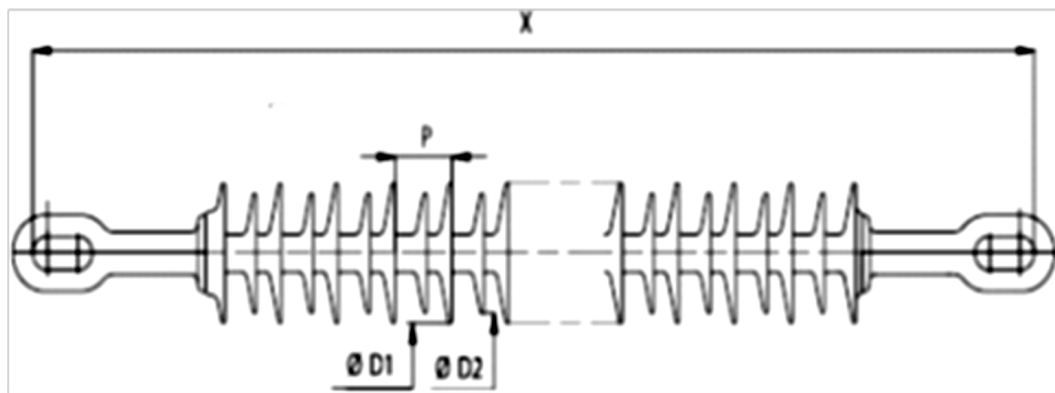


Figure 25 : Géométrie de l'isolateur composite Sediver [74]

Tableau 6 : Caractéristiques de l'isolateur composite Sediver [74]

Niveau de tension, kV	69
Longueur X, mm	866
$\phi D1$, mm	92
$\phi D2$, mm	72
Nombre d'ailettes	21
Distance de fuite, mm	1810

3.2 MISE EN ÉQUATION

3.2.1. ÉQUATIONS ÉLECTRIQUES

L'équation qui gouverne la répartition du potentiel et du champ électrique, dans un milieu donné, dérive des équations de Maxwell. Celles-ci sont formées par quatre équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques caractérisés par le champ magnétique **H** et l'induction magnétique **B** aux phénomènes électriques caractérisés par le champ électrique **E** et l'induction électrique **D**. Ces quatre équations sont :

$$rot\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (34)$$

$$rot\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (35)$$

$$div\vec{D} = \rho_V \quad (36)$$

$$div\vec{B} = 0 \quad (37)$$

Avec ρ_V la densité volumique de charge.

À ces équations, il convient d'ajouter les relations constitutives qui traduisent la réaction des matériaux sous l'action des champs. En effet, en présence d'un champ électrique **E**, il apparaît une polarisation du diélectrique (*Polarisation* $\mathbf{P} = \epsilon_0\chi_e\mathbf{E}$). De même, sous l'action d'un champ magnétique **H**, les matériaux magnétiques

s'aimantent (aimantation $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$). Aussi, la réaction d'un conducteur à l'application d'un champ électrique est traduite par la loi d'Ohm généralisée.

Les propriétés ci-dessus, conduisent aux relations constitutives pour les différents types de matériaux :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon \vec{E} \quad (38)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (39)$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu \vec{H} \quad (40)$$

Où χ_e , χ_m , ε_0 , ε , σ , μ_0 et μ désignent respectivement la Susceptibilité électrique, la Susceptibilité magnétique, la permittivité électrique du vide, la permittivité électrique, la conductivité électrique, la perméabilité magnétiques du vide et la perméabilité magnétique.

Lorsque l'on applique une différence de potentiel alternative, la dérivation des grandeurs électriques par rapport au temps revient à les multiplier par la quantité $j\omega$ où j est l'unité imaginaire et ω la pulsation de la source. En tenant compte des relations constitutives, les équations (34), (35) et (36) deviennent :

$$\text{rot} \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H} \quad (41)$$

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{\sigma E} + j\omega \vec{E} \quad (42)$$

$$\text{div}(\varepsilon \vec{E}) = \rho_V \quad (43)$$

Comme le champ magnétique est faible dans les équipements Haute Tension considérés, le second membre de l'équation (41) peut être négligé, ce qui donne [75]:

$$\text{rot} \vec{E} = 0 \quad (44)$$

L'équation (44) permet de dire que le champ E dérive d'un potentiel V avec :

$$\vec{E} = -\text{grad}(V) \quad (45)$$

L'introduction de la relation (45) dans l'équation (43) donne :

$$\text{div}(-\varepsilon \text{grad}(V)) = \rho_V \quad (46)$$

On obtient ainsi l'équation qui caractérise la répartition du potentiel dans un milieu de permittivité absolue ε avec une densité de charge volumique ρ_V .

Pour les matériaux diélectriques, généralement utilisés dans les appareillages haute tension, la densité volumique de charge ρ_V est nulle [76]. De plus, nous pouvons considérer que la permittivité est invariable dans l'espace. Avec ces hypothèses, on obtient l'équation de Laplace qui gouverne la répartition du potentiel dans les matériaux isolants :

$$\varepsilon \Delta V = 0 \quad (47)$$

Où Δ représente l'opérateur différentiel Laplacien.

Pour les milieux conducteurs, l'équation de base qui permet de déterminer la distribution de potentiel électrique est l'équation de continuité découlant de (35) [77].

$$\text{div} \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) = 0 \quad (48)$$

En combinant les équations (48), (39), (38) et (45) on obtient dans le domaine temporel l'équation suivante :

$$\nabla(-\sigma \nabla V) + \frac{\partial [\nabla \cdot (-\varepsilon \nabla V)]}{\partial t} = 0 \quad (49)$$

En régime permanent, cette équation (49) devient :

$$\nabla(-\sigma \nabla V) = 0 \quad (50)$$

3.2.2. ÉQUATIONS THERMIQUES

Le problème thermique a été résolu dans le domaine stationnaire et temporel (avec une variation de la conductivité électrique de la couche de pollution). Les pertes résistives, dans chaque sous-domaine, issues du module électrique représentent la source de chaleur dans le module thermique. L'équation générale de transfert de chaleur est :

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) + \rho C_p u \cdot \nabla T + Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (51)$$

Pour un problème de transfert de chaleur stationnaire par conduction dans un solide, l'équation résolue est :

$$(-k \nabla T) + \rho C_p u \cdot \nabla T + Q = 0 \quad (52)$$

Le chauffage par effet Joule est le couplage multiphysique utilisé et dans lequel le flux de courant électrique à travers un matériau conducteur entraîne des pertes de chaleur qui entraînent une élévation de la température. La charge thermique Q, par effet Joule, dans chaque sous-domaine est déterminée par la formule suivante :

$$Q = \sigma E^2 \quad (53)$$

3.3 PROCÉDURE NUMÉRIQUE

3.3.1. DOMAINE DE CALCUL

Le domaine de calcul est 2D (bidimensionnelle) axisymétrique.

Conditions initiales

Les conditions initiales appliquées aux différents domaines sont les suivantes :

- ✓ Physique électrique : $V = 0 \text{ V}$
- ✓ Physique thermique : $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$

Conditions aux limites

Les conditions aux limites qui ont été appliquées sont présentées sur la Figure 26. La Figure 26-a montre des conditions aux limites de flux de chaleur (Neumann). Celles-ci fixent la densité de flux thermique qui traverse la frontière du domaine. Cela correspond à la quantité d'énergie thermique qui entre ou sort de la frontière par unité de surface. C'est donc un flux de chaleur convectif qui a été défini entre la surface du modèle pollué et l'air ambiant maintenu à une température fixe. Le coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle h entre la surface et l'air ambiant a été fixé à $5 \text{ W/m}^2.\text{K}$. En plus, des conditions de continuité du flux de chaleur et de température constante de part et d'autre de la frontière entre deux matériaux différents ont été appliquées. Les Figure 26-b et Figure 26-c sont des conditions aux limites de Dirichlet qui fixent les valeurs de potentiels électriques aux électrodes (HT et masse).

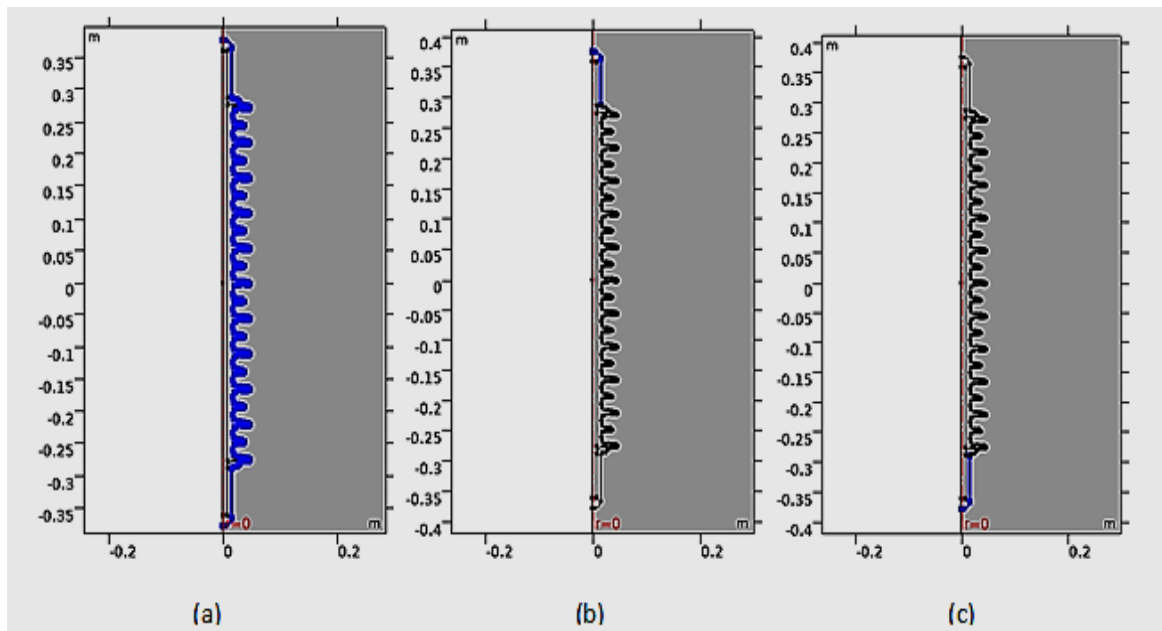


Figure 26 : Conditions aux limites (a) de flux $-n \cdot (-k \nabla) = h \cdot (T - T_{\text{amb}})$; (b) de tension $V = 0 \text{ V}$; (c) de tension $V = 40 \text{ kV}$. © M. A. Alain, 2023

3.3.2. MAILLAGE

La Figure 27 présente une partie du modèle maillé de l'isolateur destiné à la simulation. Des éléments triangulaires ont été choisis pour ce maillage. Le maillage a été appliqué manuellement à la géométrie afin que des maillages plus affinés puissent être appliqués à la région d'intérêt pour une précision améliorée. Une limite d'air est considérée autour du modèle d'isolant afin de minimiser l'effet des forces externes sur le champ électrique et la distribution de potentiel [33]. Le maillage complet consiste en 36571 éléments de domaine et 2969 éléments de frontière.

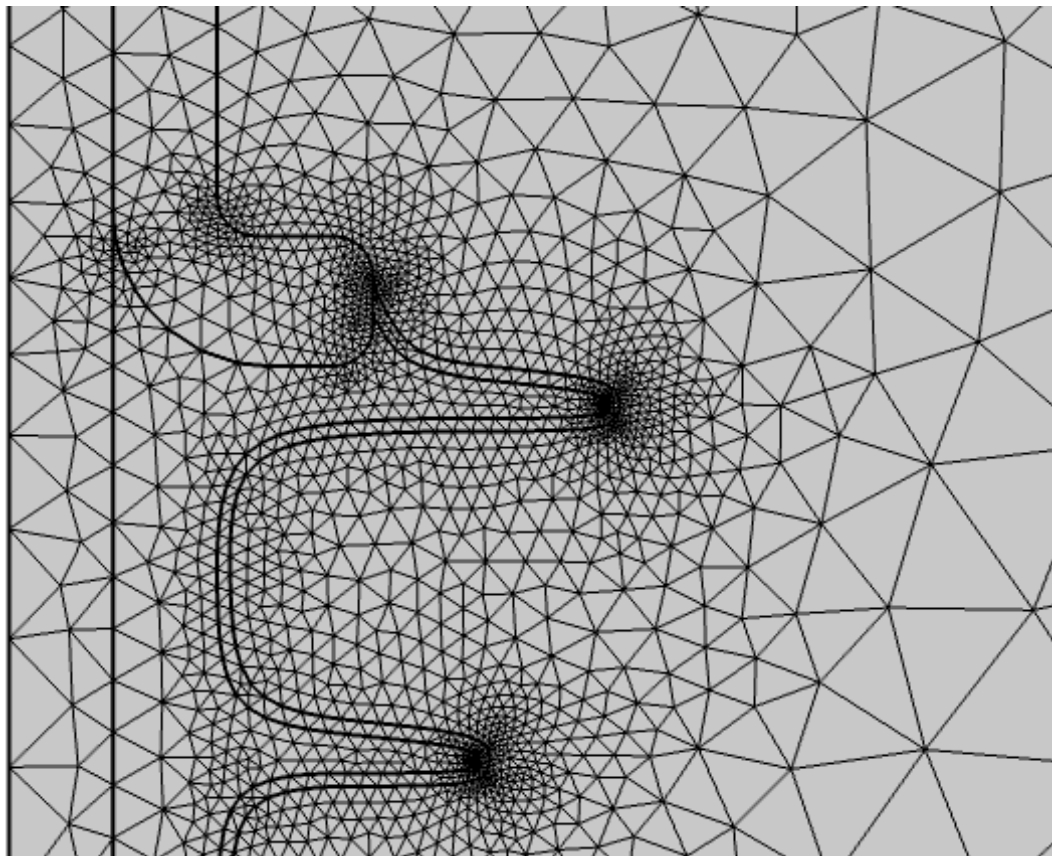


Figure 27 : Extrait du maillage de l'isolateur complet de 36571 éléments de domaine et 2969 éléments de frontière. © M.A. Andoh, 2023

3.4 RÉSULTATS DES SIMULATIONS ET DISCUSSIONS

Les simulations ont été réalisées à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM) 2D-axisymétrique dans Comsol Multiphysics®. La modélisation du système d'isolation peut être considérée comme un problème électro-quasi-statique (EQS) [78] ; le calcul du champ électrique et de la température ont été effectués en résolvant les équations de transfert de chaleur et de conduction électrique intégrées au logiciel. Les différentes propriétés thermoélectriques des matériaux sont présentées dans le Tableau 7 ci-après.

Tableau 7 : Propriétés thermoélectriques des matériaux

Matériau	Permittivité relative (ϵ_r)	Densité (kg/m^3)	Conductivité électrique (S/m)	Conductivité thermique (W/m.k)
Tige	7.2	2500	$1 * 10^{-14}$	0.04
Enveloppe	4.6	1200	$1 * 10^{-14}$	0.2
Electrodes	1	7850	$4.032 * 10^6$	44.5
Couche de pollution	81	2.6	10^{-3}	0.6
Air	1	Rho (pA,T)	$1 * 10^{-15}$	K(T)

3.4.1. DISTRIBUTIONS DE POTENTIEL ET DE CHAMP ÉLECTRIQUES

3.4.1.1 Isolateur propre et sec

Les Figure 28 et 29 présentent respectivement les distributions du potentiel et du champ électrique le long de l'isolateur composite 69 kV propre et sec. La ligne de fuite est mesurée le long de la surface de l'isolateur entre les électrodes HT et la

masse. Les résultats indiquent que le champ et le potentiel électriques sont maximum au niveau de l'électrode HT et décroissent jusqu'à des valeurs voisines de zéro au niveau de l'électrode reliée à la masse. Ces distributions sont non linéaires le long de la ligne de fuite de l'isolateur et les intensités de champ électrique sont plus grandes aux extrémités des ailettes puis décroissent jusqu'à une valeur minimale au niveau des jupes adjacentes. Ces profils de distribution sont comparables avec ceux trouvés dans la littérature [74, 79-81]. Les ondulations sont dues au fait que les mêmes isovaleurs peuvent rencontrer la ligne de fuite en différents points de la surface de l'isolateur [82].

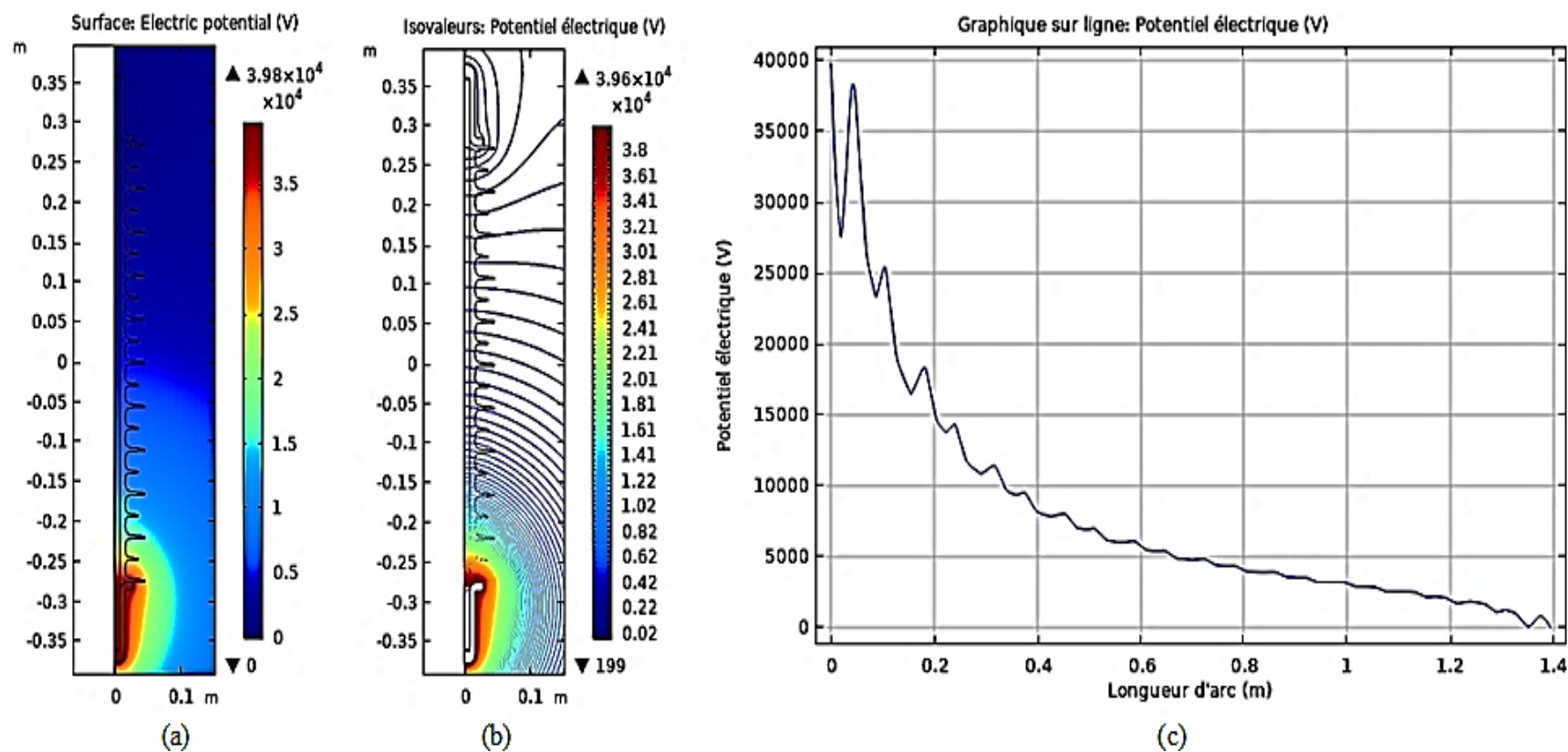


Figure 28 : Distribution de potentiel électrique le long de l'isolateur composite 69 kV propre et sec : (a) surfacique, (b) isocontours, (c) le long de la ligne de fuite. © M. A. Alain, 2023

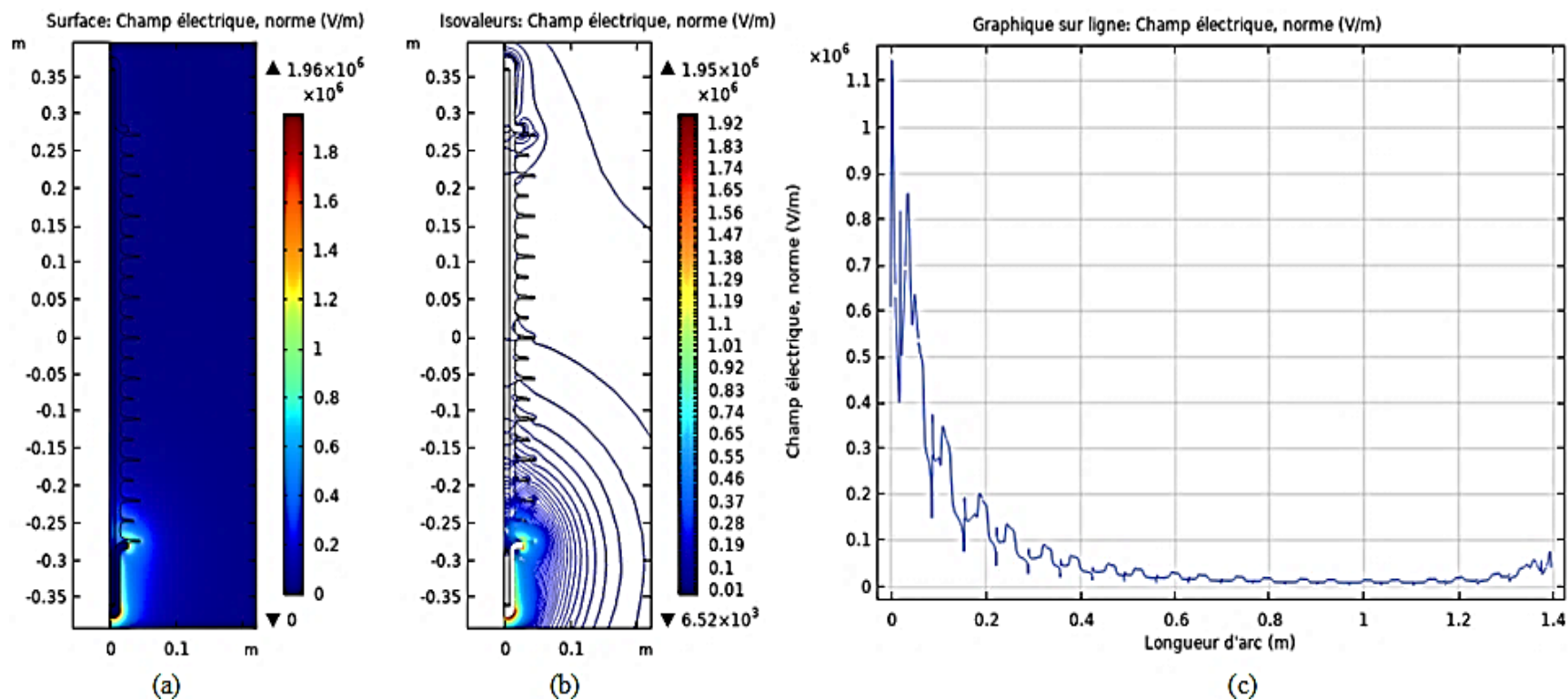


Figure 29 : Distribution de champ électrique le long de l'isolateur composite 69 kV propre et sec : (a) surfacique, (b) isocontours, (c) le long de la ligne de fuite. © M. A. Alain, 2023

3.4.1.2 Isolateur uniformément pollué

Les graphiques des Figure 30 et 31 présentent respectivement les distributions du potentiel et du champ électrique le long de l'isolateur composite 69 kV uniformément pollué. Les résultats montrent que les distributions sont affectées par la couche de pollution. La distribution du potentiel a un profil presque linéaire et traduit le fait que la couche de pollution simulée est de niveau très sévère selon l'étude de Arshad et al. [33]. De plus, on a une redistribution du champ électrique dont les intensités sont moins élevées au niveau de l'électrode H.T. et des trois premières ailettes. On observe également que l'intensité du champ électrique est beaucoup plus élevée dans la région de jonction entre la gaine et les ailettes que dans la partie médiane de la gaine entre deux ailettes successives. De plus, les lignes de contour du champ électrique sont également concentrées aux extrémités des ailettes à partir de l'électrode HT; la contrainte électrique étant maximale l'extrémité de la première. Ces graphiques sont en accord avec ceux trouvés dans la littérature [83].

Le graphique de la Figure 32 présente une comparaison entre les distributions de champ électrique de l'isolateur propre et l'isolateur uniformément pollué. Ici l'on remarque que les valeurs de l'intensité du champ électrique sont plus importantes à la surface de la couche de pollution qu'à la surface de l'enveloppe propre. Cependant, l'intensité du champ à la jonction de l'électrode HT et de la couche de pollution est plus faible que celle de la jonction entre l'électrode HT et l'enveloppe de l'isolateur propre. Par ailleurs, la distribution est plus régulièrement répartie sur la frontière entre l'enveloppe et la couche de pollution.

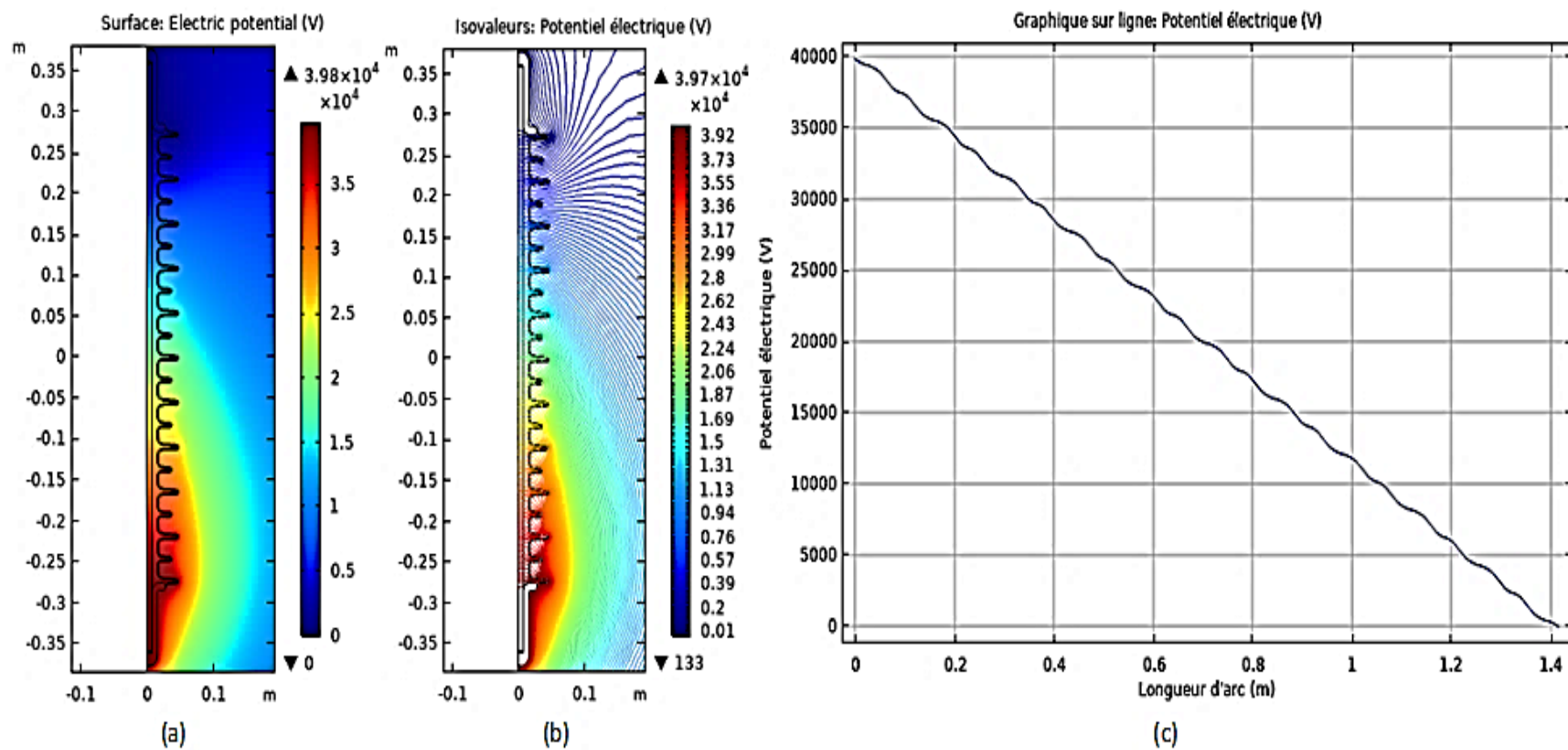


Figure 30 : Distribution du potentiel électrique le long de l'isolateur composite 69 kV pollué et humide : (a) surfacique, (b) isocontours, (c) sur ligne de fuite. © M. A. Andoh, 2023

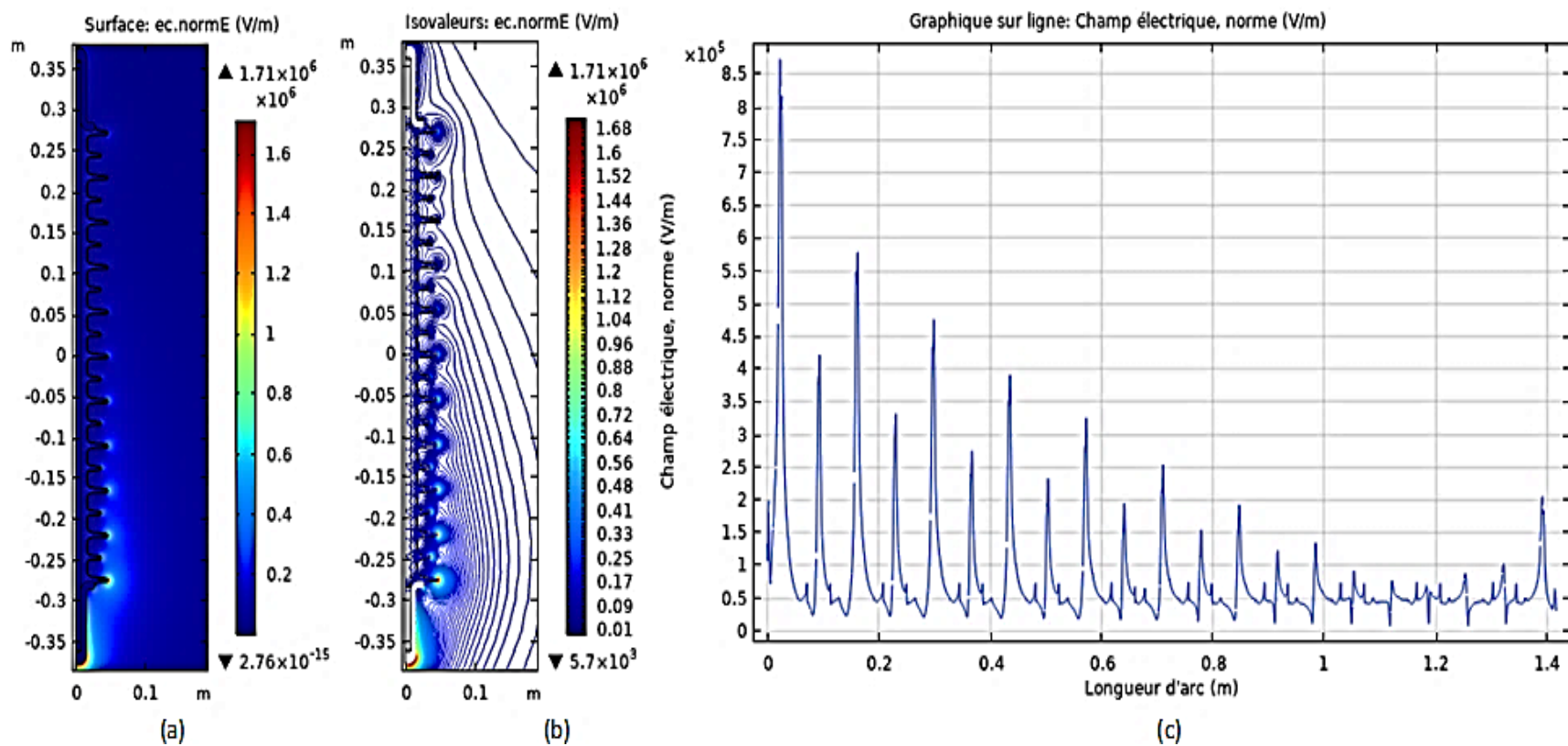


Figure 31 : Distribution du champ électrique le long de l'isolateur composite 69 kV pollué et humide : (a) surfacique, (b) isocontours, (c) le long de la ligne de fuite. © M. A. Andoh, 2023

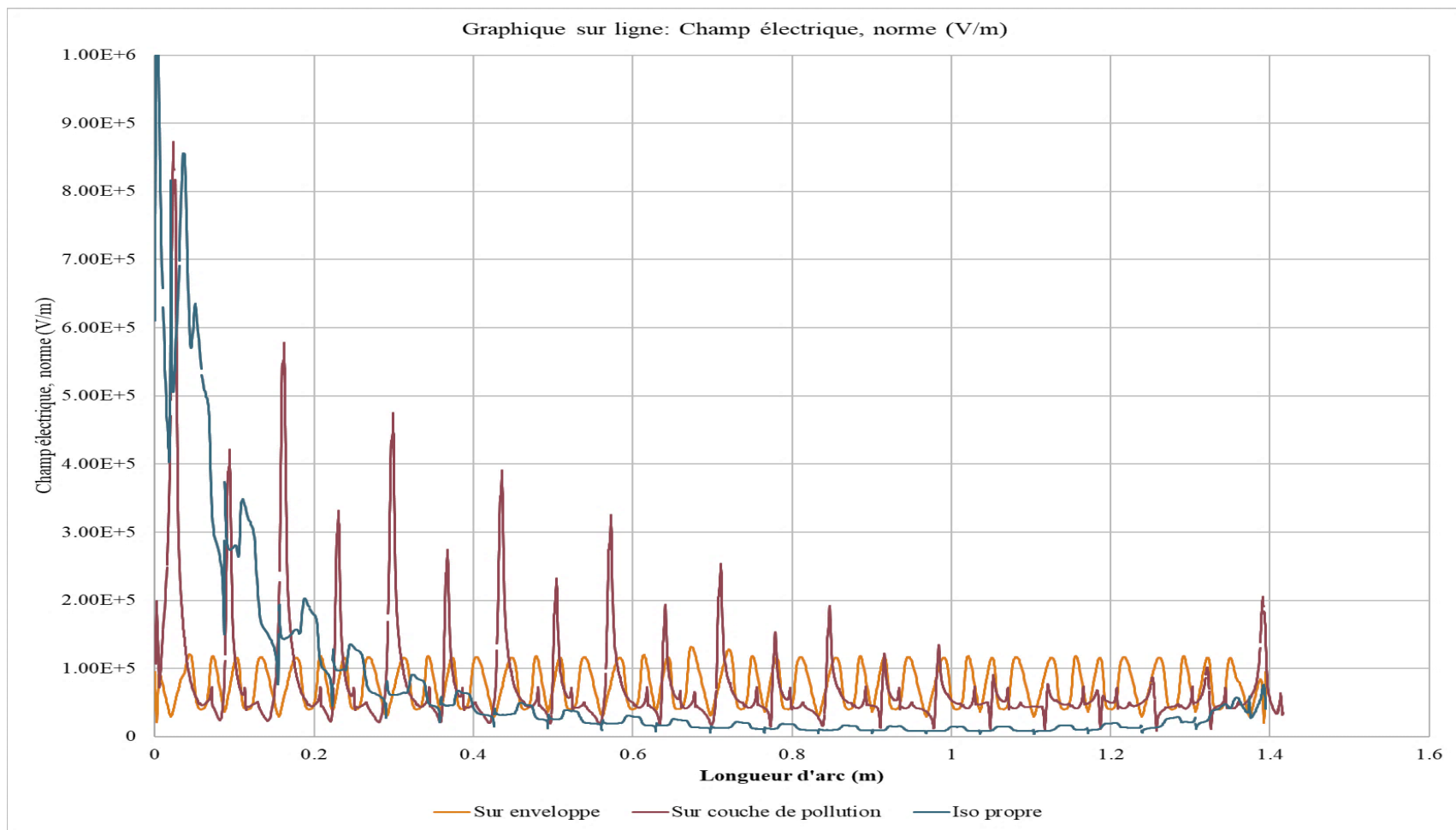


Figure 32 : Comparaison des distributions de champ électrique pour l'isolateur propre et uniformément pollué. © M. A. Andoh, 2023

3.4.1.3 Variation des distributions par rapport à la conductivité électrique

La Figure 33 présente les distributions de potentiel et de champ électrique par rapport à la variation de conductivité électrique. Lors des simulations, différentes valeurs ont été attribuées à la conductivité électrique. Ces graphiques montrent que pour les valeurs simulées les distributions de potentiel et de champs sont presque invariables. Cela est probablement dû au fait que la plus petite valeur de conductivité simulée dans ce travail (0.0001 S/m) représente déjà un niveau de pollution très sévère. Avec des valeurs de conductivité de l'ordre de $1\text{E-}12 \text{ S/m}$, des écarts sont très perceptibles.

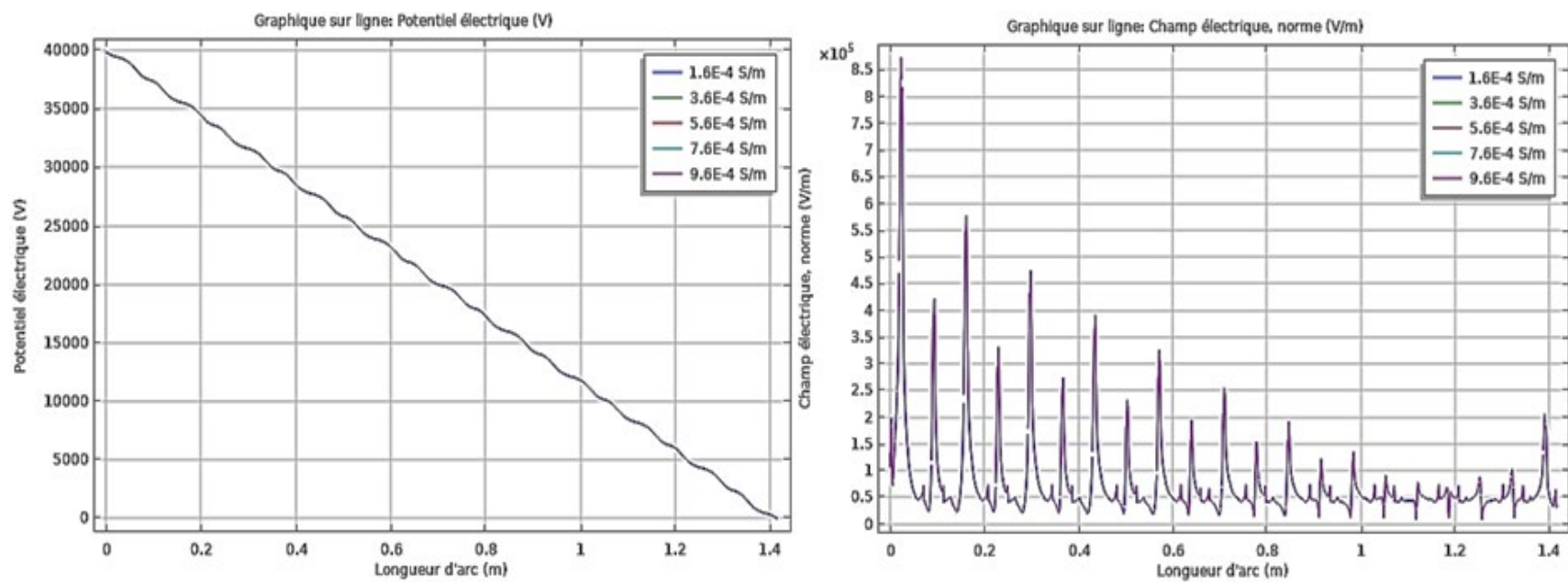


Figure 33 : Profils de distributions de potentiel et de champ électriques pour différentes valeurs de conductivité électrique de la couche de pollution. © M. A. Andoh, 2023

3.4.2. DISTRIBUTIONS DE TEMPÉRATURE

La Figure 34 présente la distribution de température obtenue à partir des caractéristiques de la couche de pollution de 1 mm. Le profil de température le long de la ligne de fuite peut être divisé en quatre zones : des températures très basses au niveau des deux électrodes et les températures les plus hautes au niveau des jupes. Les températures à la surface des petites ailettes (plus faibles que celles des jupes) sont plus élevées que celles des grandes ailettes. La distribution est longitudinalement symétrique bien que la distribution de champ électrique ne le soit pas. Cela montre bien que cette distribution est plutôt liée à la densité de courant dans la couche de pollution. A cet effet, la Figure 35 présente la distribution de densité de courant le long d'une portion de l'isolateur composite 69 kV. Ce profil de distribution concorde bien avec celui de la distribution de température. L'on observe bien que les zones de fortes densités de courant (jupe par exemple) coïncident avec les zones de température élevées.

La Figure 36 présente le profil de température le long d'un segment perpendiculaire à l'axe de symétrie de l'isolateur jusqu'à la surface de la couche de pollution. Ainsi, le profil obtenu démontre bien que les températures sont plus élevées au niveau de la couche de pollution (qui est la source de chaleur) et décroissent par conduction jusqu'au cœur de l'isolateur. Les simulations ont permis de vérifier que l'enveloppe et la tige ne contribuent pratiquement pas à la production de chaleur par effet Joule. Ceci est d'autant plus normal que ce sont des isolants électriques; ils ne sont donc pas le siège d'échauffement par effet Joule.

Les études paramétriques de la Figure 37 ont permis de saisir l'impact de la conductivité électrique, de la conductivité thermique et du coefficient de convection sur la distribution de température le long de l'isolateur composite 69 kV uniformément pollué. Ces graphiques démontrent que les températures augmentent avec l'augmentation de la conductivité électrique et diminuent avec l'augmentation de la conductivité thermique ou du coefficient de convection. Le choix de ces constantes doit donc être rigoureusement élaboré en fonction de l'environnement de l'étude et de la composition de la couche de pollution étudiée.

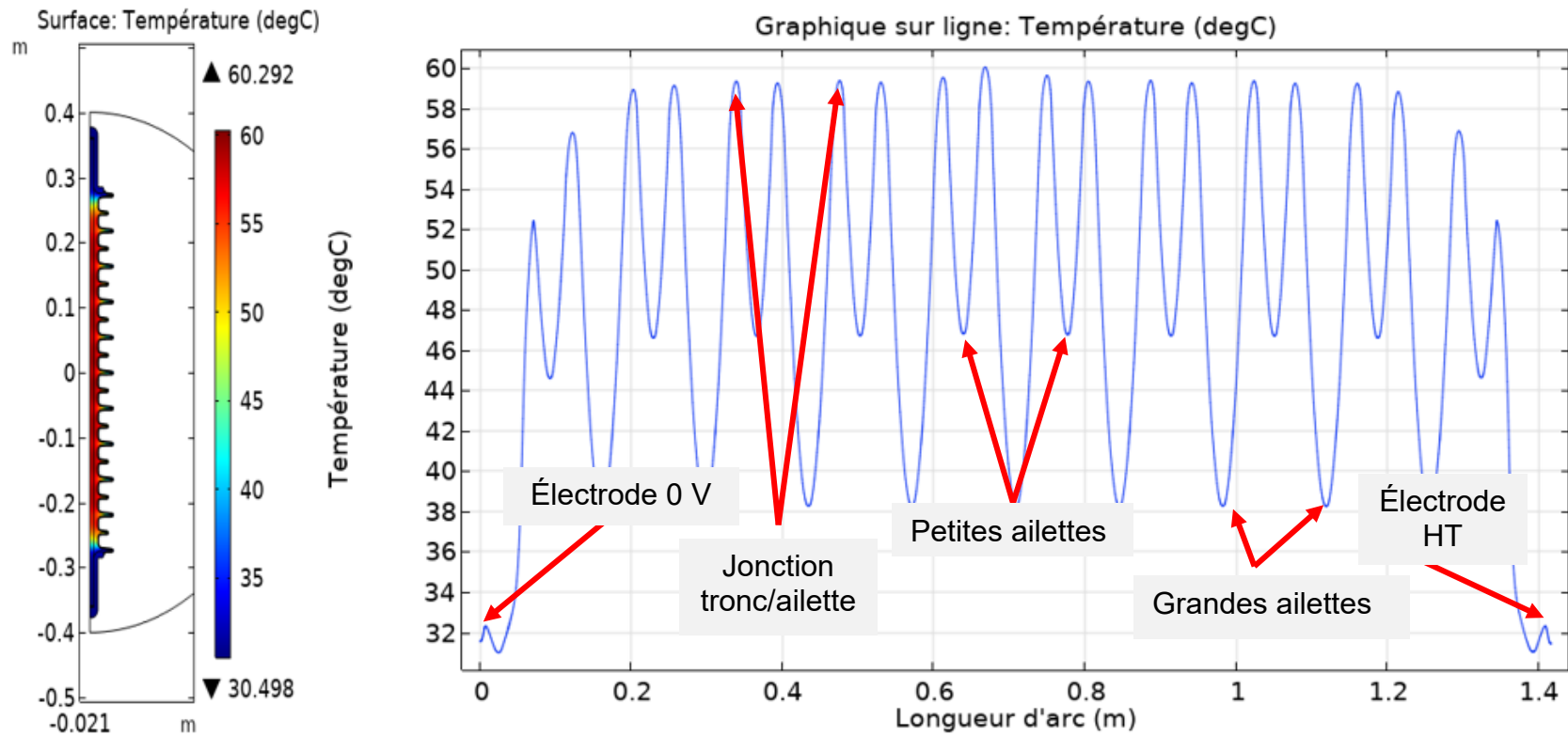


Figure 34 : Distribution de température (a) à la surface de l'isolateur, (b) le long de la ligne de fuite. © M. A. Alain, 2023

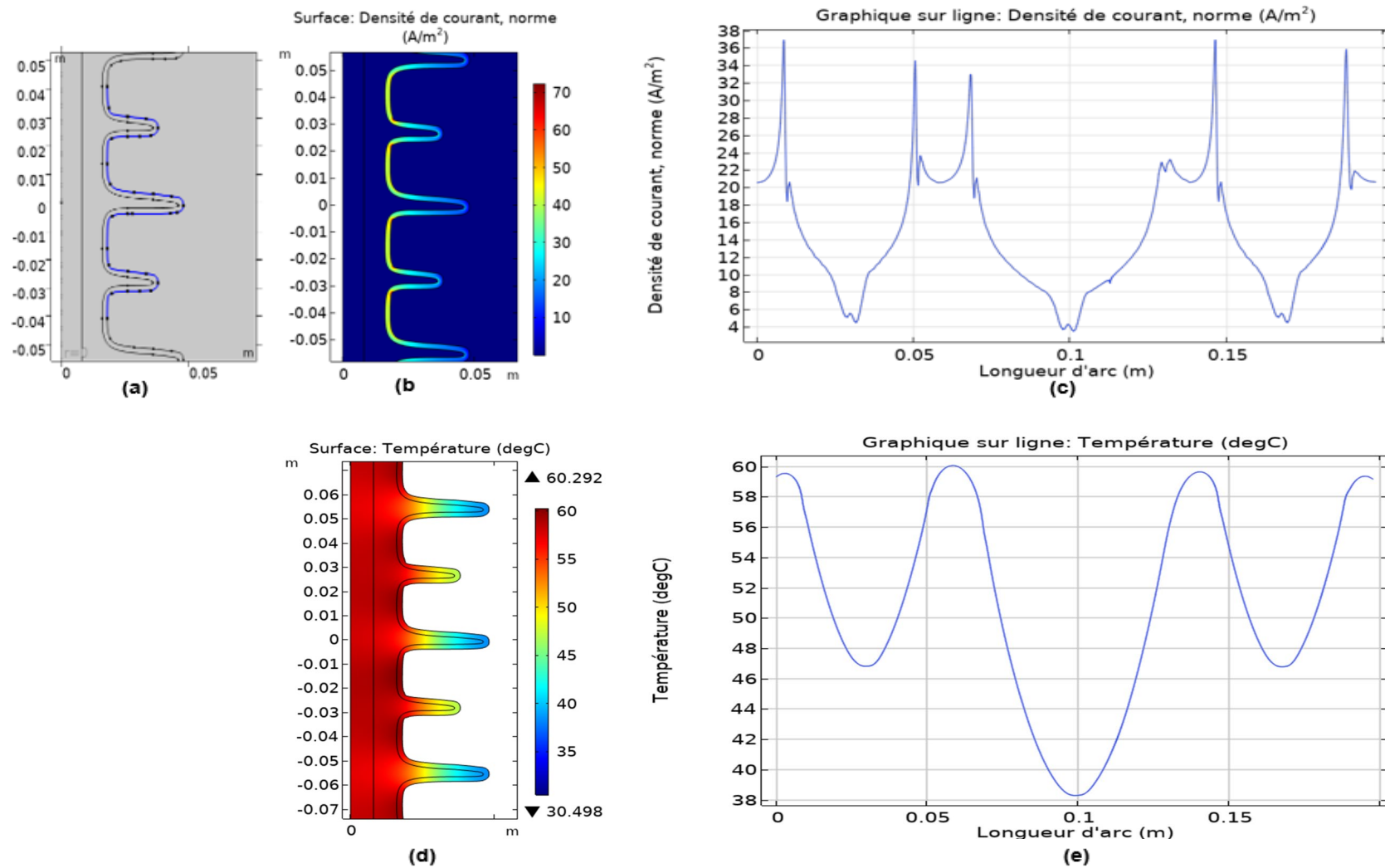


Figure 35 : Comparaison sur (a) une portion de couche de pollution entre (b), (c) la distribution de densité de courant et (d), (e) la distribution de température. © M.A. Andoh, 2023

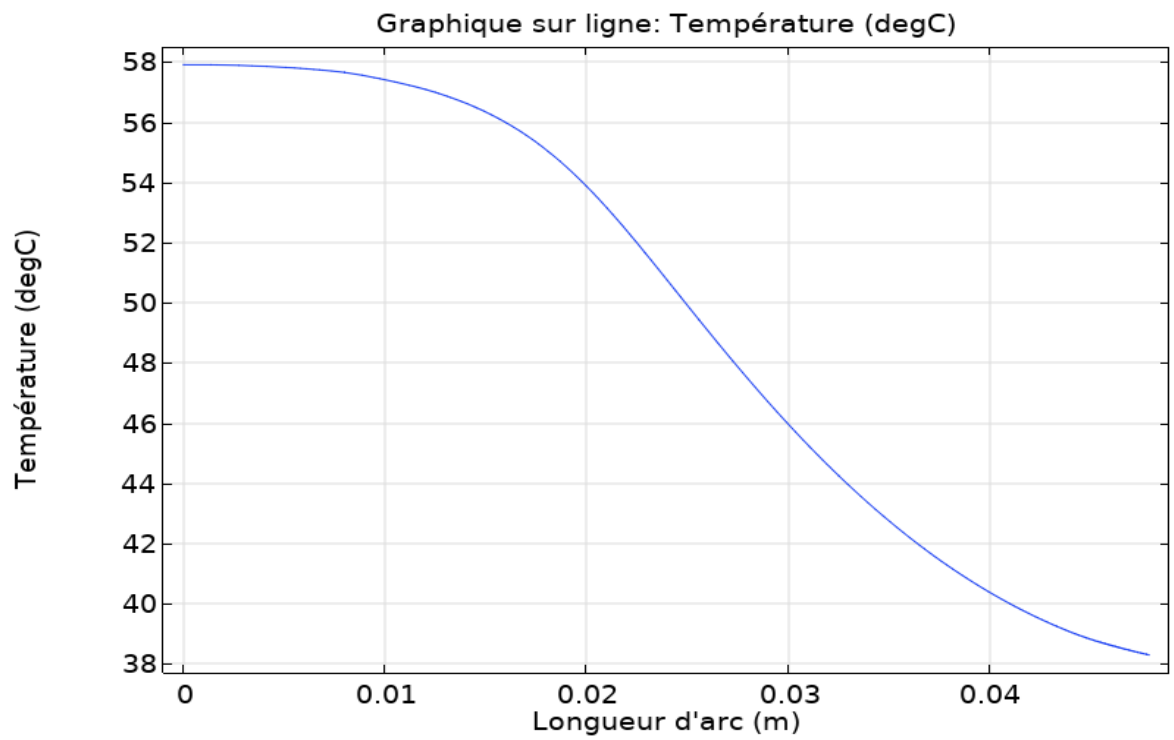


Figure 36 : Profil radial de température de l'axe central à la surface de la couche de pollution et traversant une grande ailette. © M. A. Alain, 2023

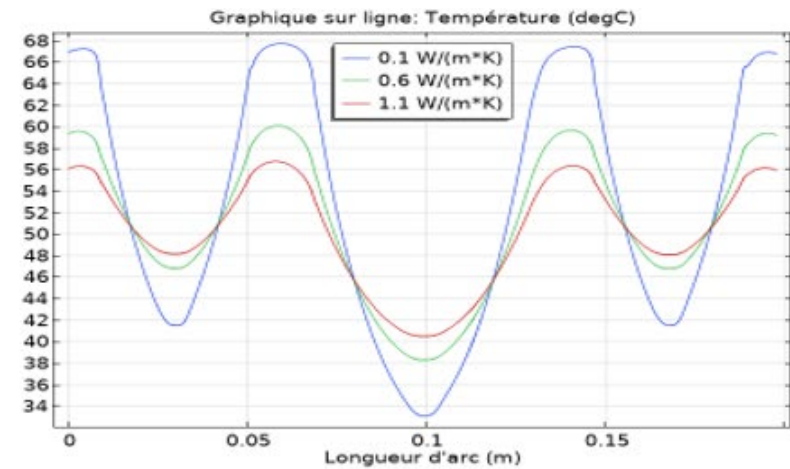
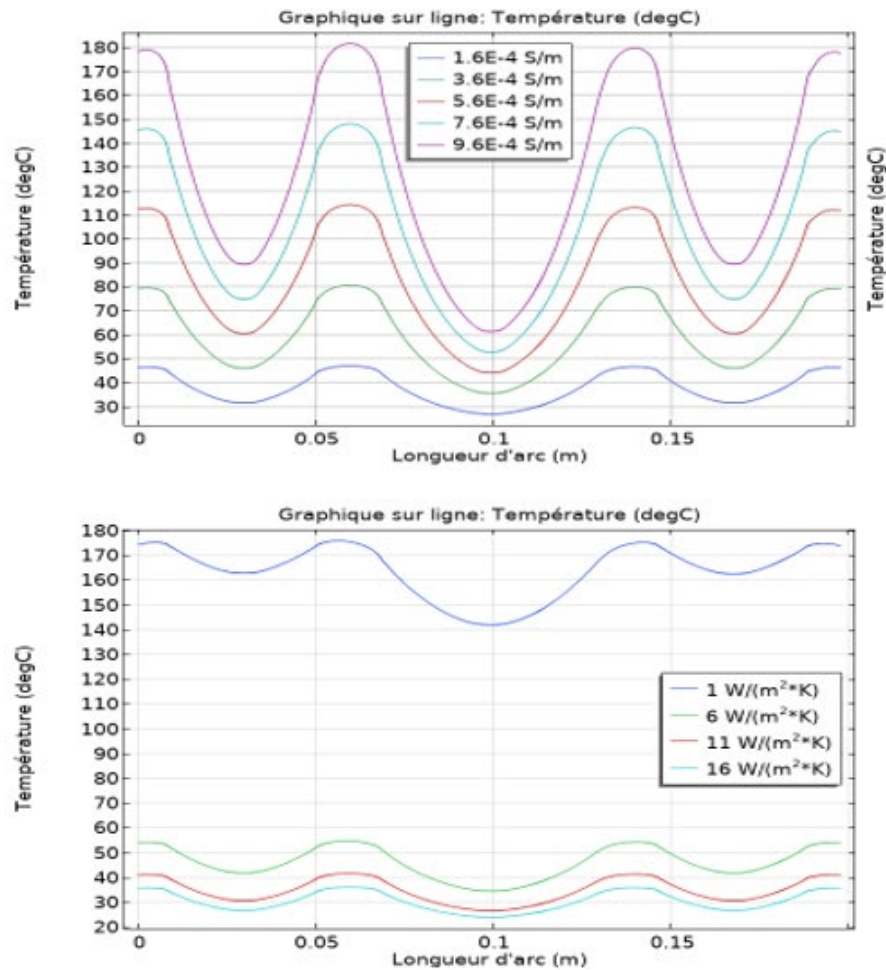


Figure 37 : Variation des profils de températures (a) en fonction de la conductivité électrique, (b) en fonction de la conductivité thermique et (c) en fonction du coefficient de convection. © M. A. Alain, 2023

3.5 CONCLUSION PARTIELLE

Les distributions de température, de potentiel et de champ électrique le long d'un isolateur composite 69 kV ont été simulées et analysées à l'aide du logiciel de simulation par élément finis COMSOL Multiphysics. Les profils de potentiel et de champ électrique obtenus sont en parfait accord avec ceux rencontrés dans la littérature. Selon le niveau de sévérité de la couche de pollution, le profil de distribution de potentiel est quasiment linéaire le long de la ligne de fuite. De plus, la pollution induit des intensités de champ électrique beaucoup plus élevées qu'à la surface de l'isolateur propre. À partir d'un certain niveau de pollution, les distributions de potentiel et de champ électrique sont quasiment insensibles aux variations de la conductivité électrique.

La distribution de température le long de l'isolateur 69 kV a été également investiguée. Les résultats ont montré que le profil de distribution n'est pas corrélé avec celui du champ électrique, mais plutôt avec les densités de courant électrique. Les graphiques ont montré une grande sensibilité de la distribution de température à la variation des quantités : conductivités électrique et thermique, ainsi qu'au coefficient de convection dans l'air. Par conséquent, il est important de s'assurer une évaluation précise de ces valeurs lors des essais.

CHAPITRE 4

DEVELOPMENT OF A SIMPLE EXPERIMENTAL SETUP FOR THE STUDY OF THE FORMATION OF DRY BANDS ON COMPOSITE INSULATORS

Energies 2022, 15(14), 5108; <https://doi.org/10.3390/en15145108>

Submission received: 4 June 2022 / Revised: 29 June 2022 / Accepted: 5 July
2022 / Published: 13 July 2022

Author Contributions: Thermoelectric simulations were performed by K.G. and M.-A.A., who was also responsible for the experimental investigation and the original draft preparation, whereas validation, review and editing, visualization and supervision were under the responsibility of C.V., who was also responsible for funding acquisition. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

4.1 RESUMÉ

Cet article présente une nouvelle géométrie pour l'étude de la formation de bandes sèches. Tout d'abord, une simulation thermoélectrique d'un isolant composite uniformément pollué de 69 kV a été réalisée (Chapitre 2 pour plus de détails). Les résultats obtenus montrent que la contrainte thermique est plus importante à la surface de la tige où la densité de courant est maximale. Afin de reproduire expérimentalement la constriction des lignes de densité de courant sur la surface de la tige isolante, qui est à l'origine de la formation de bandes sèches, le développement d'un nouveau dispositif géométrique simple, qui a ensuite été testé expérimentalement, a été proposé. A cet effet, une valeur de DDSE correspondant à un niveau de pollution élevé a été utilisée pour chaque échantillon pollué, et les échantillons ont été placés dans une enceinte climatique à une humidité relative constante de 90 % et une température ambiante constante de 20°C. Des tests en basse tension ont permis de déterminer la durée d'humidification qui correspond à la conductivité maximale de la couche polluée. Les valeurs obtenues sont en accord avec la durée de 10 à 40 minutes recommandée dans la norme CEI 60507. De plus, les tests effectués à une tension plus élevée ont démontré l'efficacité de la configuration proposée pour simuler le processus complexe de formation de bande sèche de manière reproductible en termes de comportement en matière de courant de fuite et de température. La configuration proposée est une méthode nouvelle et simple qui peut être facilement utilisée par l'industrie électrique pour développer de nouveaux matériaux pour la prochaine

génération d'isolateurs composites pour lignes aériennes sans nécessiter d'équipement HT coûteux.

4.2 ABSTRACT

This paper introduces a new geometry for the study of dry band formation. Firstly, a thermoelectric simulation of a 69 kV uniformly polluted composite insulator was performed. The results obtained show that thermal stress is greater at the rod surface where current density is maximum. To experimentally reproduce the constriction of current density lines on the insulator rod surface, which is the cause of dry band formation, the development of a new simple geometric setup, which was then tested experimentally, was proposed. For this purpose, an ESDD value corresponding to a high level of pollution was used for each polluted sample, and the samples were placed in a climate chamber at constant 90% relative humidity and a constant ambient temperature of 20 °C. Low-voltage tests permitted the determination of the wetting duration, which corresponds to the maximum surface conductance of the polluted layer. The values obtained agree with the 10–40 min duration recommended in IEC 60507. Moreover, the tests performed at a higher voltage demonstrated the efficiency of the proposed setup to simulate the complex process of dry band formation in a reproducible way in terms of leakage current and temperature behavior. The proposed setup is a new and simple method that can be easily used by the electrical industry to develop new material for the next generation of overhead line composite insulators without requiring costly HV equipment.

4.3 INTRODUCTION

Electrical energy is generally transported over long distances using high-voltage (HV) overhead transmission lines supported by pylons. The mechanical connection and electrical insulation between the lines and the pylons are provided by insulators. In polluted environments, these lines are subjected to flashover phenomena, which can negatively affect the quality and reliability of the electrical energy supply. The field of research on the electrical flashover of polluted composite insulators is quite extensive because of the disastrous economic and humanitarian consequences resulting from the interruption of electrical supply [16-18, 20, 22, 24, 26]. Power outages caused by polluted insulator flashovers are often difficult to identify after an incident, and, moreover, some occur in remote and uninhabited places. It is therefore necessary to continue carrying out re-search to deepen our knowledge of flashover phenomena under atmospheric pollution conditions. According to the literature, insulator flashover takes place in four steps: the deposition of a solid layer of pollution on an insulator surface, the progressive wetting of the pollution layer, the development of dry zones and the initiation of partial arcs and, finally, the extension of partial arcs to flashover if conditions are favorable. The drying of certain parts of the pollution layer is therefore one of the phenomena that influence the circumvention of the insulator. This drying, which is the direct consequence of the appearance of dry bands, is due to local heating linked to leakage currents and partial discharges on wet layers [39]. Once dry band arcs have formed, they can propagate to flashover if the

resistance per unit length of the discharge is less than the resistance per unit length of the liquid contaminant on the insulator surface [40].

Numerous studies on dry bands and partial arc discharge on the surface of insulators have been carried out around the world. Most of the experimental studies are based on the use of simple rectangular geometries, where dry bands are simulated by clean zones [9, 10, 14, 34]. Thus, in some cases, dry bands are artificially formed by masks made of an acrylic glass strip, which is removed after wetting is completed [9, 10, 14, 34]. Another method consists of making a hole in the center of the rectangular geometry model in order to fix the location of the dry strip and prevent its formation near the power supply electrodes [15]. Even though these methods allow the position and width of the dry bands to be controlled, they do not allow for the reproduction of the real process of dry band formation induced by a local rise in temperature. Thus, these methods only permit the electrical behavior of the sample under test to be studied, making us incapable of understanding the behavior of a real composite insulator exposed to pollution. In addition, even though there are numerical studies in the literature making it possible to understand the influence of the dimensions of dry bands, their number, and their location on potential and electric field distribution, they do not discuss the initiation process and the formation of dry bands. These are most often simulated by air at predefined locations. Archad A. et al. [33], in their numerical simulations of polluted insulators, modeled dry bands as clean portions, thus creating a break in the pollution layer. Numerical simulations [33, 83] and infrared thermography

images [84] also show that, for composite insulators, electrical and thermal stresses are relatively greater at the junctions between the rod and sheds [33, 83]. Unfortunately, these results cannot be observed using rectangular geometries.

In this context, this paper presents a new and simple geometry permitting the re-production of the electrothermal process of dry band formation, which can be found on real polluted composite insulators. The proposed geometry allows, in the first step, for the study of the behavior of the conductance of the polluted layer during the wet-ting phase, which meets the specifications of IEC 60507 [4]. Moreover, the proposed geometry permits, in a simple manner, the investigation of the electrothermal behavior of the polluted layer leading to the formation of dry bands.

4.4 THERMOELECTRIC SIMULATIONS OF 69 KV COMPOSITE INSULATOR

4.4.1. MODEL OF THE 69 kV INSULATOR

In this section, we describe a quick thermoelectric numerical simulation that was carried out using a 69 kV Sediver composite insulator with a uniform pollution layer [74]. The aim of this simulation is to verify the location of the concentration of the leakage current, as well as the maximum temperature, as reported in the literature [33, 83, 84]. The general geometry and characteristics of the insulator used in this study are shown in Figure 38 and Table 8.

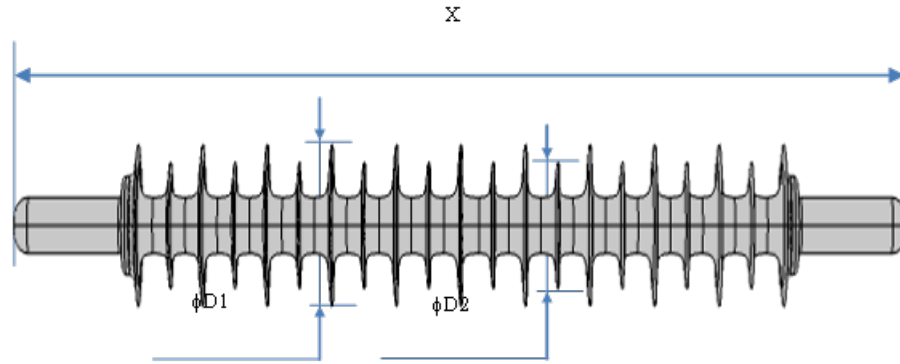


Figure 38 : Geometry of the Sediver composite insulator [74]

Table 8 : Sediver composite insulator characteristics [74].

Voltage level, kV	69
Length X, mm	866
$\phi D1$, mm	92
$\phi D2$, mm	72
Shed number	21
Leakage distance, mm	1410

As the 69 kV Sediver composite insulator is supposed to be uniformly polluted, simulations can be performed using a 2D-axisymmetric finite element method (FEM) with the commercial software Comsol Multiphysics® from COMSOL, Inc., Burlington, USA, version 5.5. Due to the low leakage current value flowing on the surface of the polluted insulator, the magnetic energy can be negligible compared to the electric energy. In this situation, the modeling of the polluted insulator may be considered as an electro-quasi-static (EQS) problem. Thus, the electric field can be decoupled from the magnetic field, which means that the electric field E can be expressed only in terms of the electric potential gradient as follows [78]:

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (54)$$

where E and V represent the electric field (V/m) and the electric potential (V), respectively.

The temperature computation is considered as a heat transfer in solids problem; this can be described by the following heat conduction expressed in Equation (23), which can be applied in homogeneous and isotropic media for a steady state [78]:

$$(-k\nabla T) + Q = 0 \quad (55)$$

where T , k and Q represent the temperature (K), thermal conductivity (W/(m·K)) and the heat source (W/m³), respectively.

The multiphysics coupling between the two forms of physics is obtained using the resistive heat of each subdomain in the electric field module as a heat source in the heat transfer module. The heat source Q describes the heat generation within the domain and is determined by [78]

$$Q = \sigma E^2 \quad (56)$$

The different simulations were performed using the thermoelectric properties presented in Table 9. The pollution was modeled using a uniform layer with a constant thickness of 1 mm. A phase-to-ground voltage of 39.84 kV was applied to the composite insulator.

Table 9 : Thermoelectric properties of the materials.

Materials	Relative Permittivity (ϵ_r)	Density (kg/m³)	Electrical Conductivity (S/m)	Thermal Conductivity (W/m·K)
Rod	7.2	2500	1×10^{-14}	0.04
Envelop	4.6	1200	1×10^{-14}	0.2
Metal ends	1	7850	4.032×10^6	44.5
Pollution layer	81	2.6	10^{-3}	0.6
Air	1	1.225	1×10^{-15}	0.024

4.4.2. THERMOELECTRIC RESULTS OBTAINED FOR THE 69 KV COMPOSITE INSULATOR

This section presents the E-field, current density and temperature distribution computed at the surface of the polluted layer along the leakage distance of the insulator, as shown in Figures

Figure 39, Figure 40 and Figure 41 respectively. From the results obtained, it can be observed that the maximum E-field values are obtained at the extremity of the insulator sheds. Conversely, the temperature and current density reach maximum values at the insulator rod surface. These results, which agree with those of previous works [33, 83], demonstrate that the thermal stress present on a polluted composite insulator is higher at the rod surface where the current density is maximum. As illustrated by the results in Figure 40, it can also be observed that the current density at the insulator rod surface is about 3.5 time greater than that at the shed extremity. Thus, the presence of greater thermal stress combined with a higher current density increases the probability of the appearance of a dry band on the rod surface. Consequently,

any development of a new geometry to study dry band formation must integrate this fact by using one part of a large section to represent the sheds and one part of a small section to represent the rod surface.

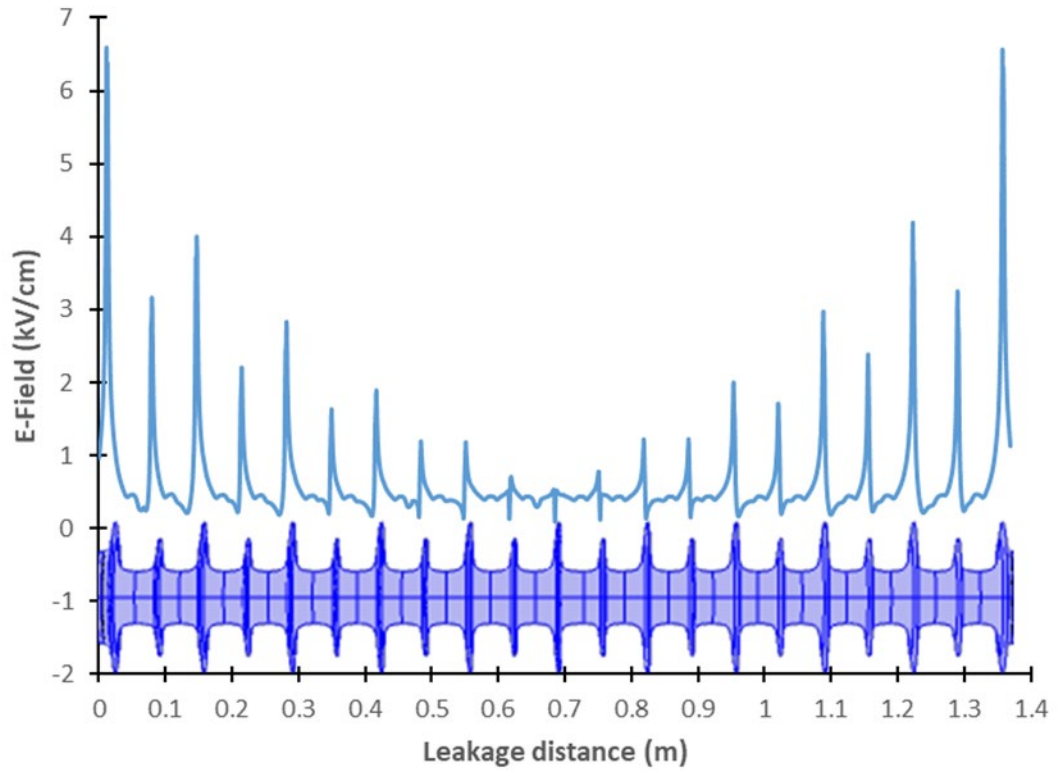


Figure 39 : E-field distribution at the surface of the polluted 69 kV composite insulator.

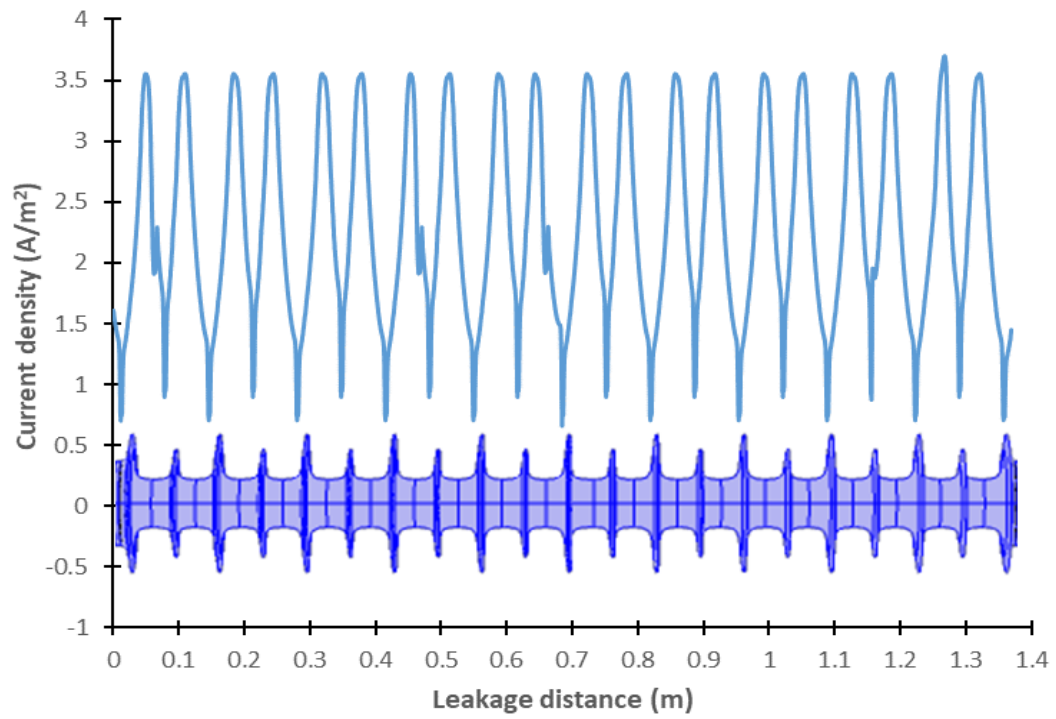


Figure 40 : Current density distribution.

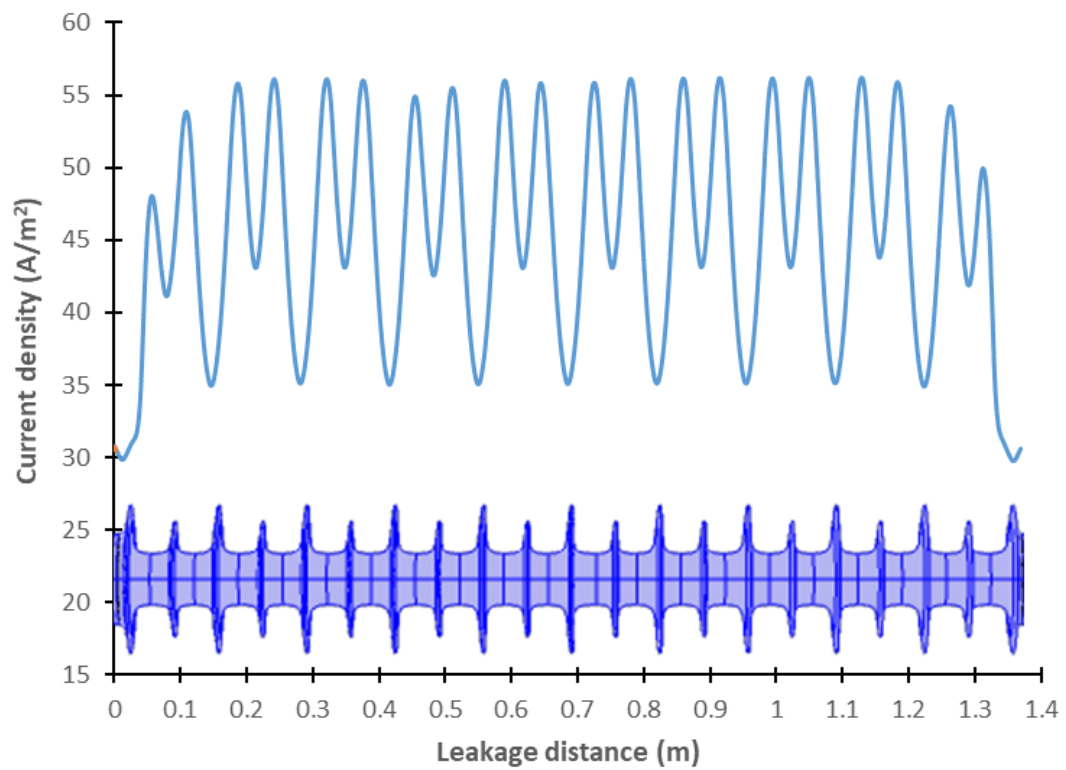


Figure 41 : Temperature distribution.

4.5 DEVELOPMENT OF THE NEW EXPERIMENTAL MODEL FOR DRY BAND STUDIES

4.5.1. DESIGN OF THE NEW GEOMETRY

Figure 42 presents the final version of the new geometry and its dimensions used to simulate the real process of dry band formation observed during the pollution tests of composite insulators. The choice of the size and geometry of the model was guided by several considerations. Firstly, it had to simulate the constriction of leakage current lines on the rod surface (between insulator sheds) accordingly with Figure 3. As such, the geometry had to contain a larger part, corresponding to the shed, and a smaller one, corresponding to the rod. Secondly, the chosen geometry had to be simple and symmetrical in order to allow for the calculation of the analytical relation between the conductivity and the resistance of the pollution layer. Moreover, the dimensions of the chosen geometry had to be small enough to facilitate both the pollution layer application and the wetting and test phases using a small climatic chamber. Finally, the dimensions depended on mechanical considerations considering the material used in the fabrication. For example, in the case of glass material, the thinner part of the sample should be large enough to support the cutting process.

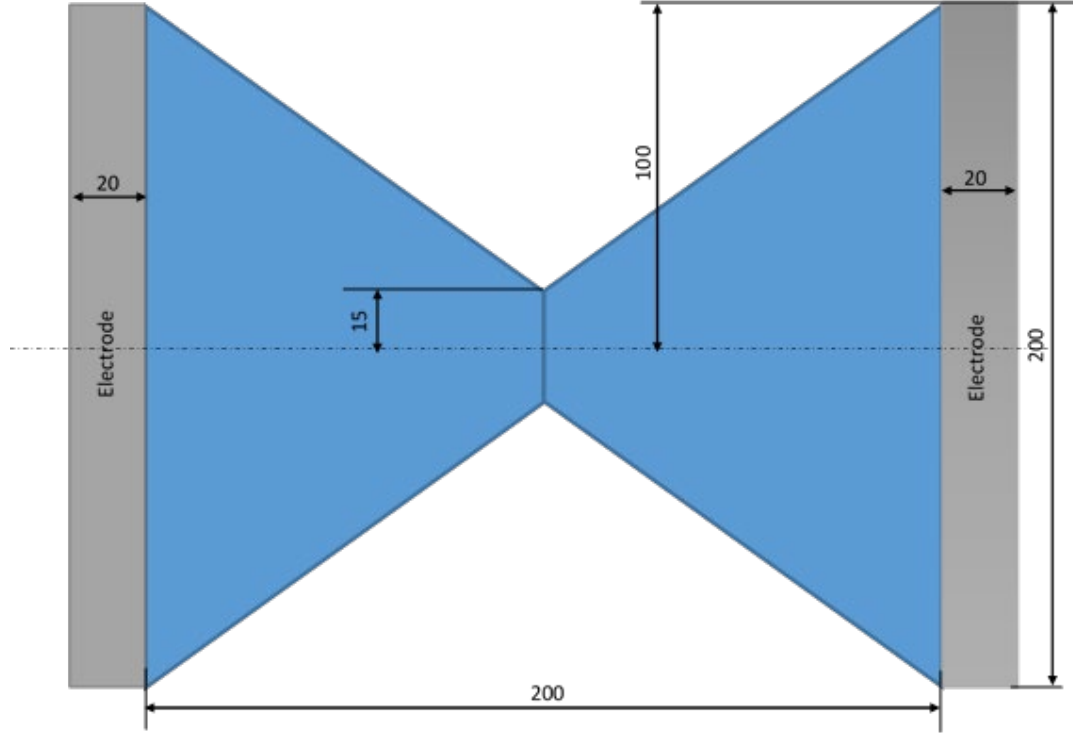


Figure 42 : Geometry and dimensions (in mm) of the proposed experimental model.

For numerical simulations, it is necessary to know the electrical conductivity and thickness of the pollution layer. Experimentally, however, it is only possible to measure the electrical resistance of the entire pollution layer. In spite of this, the proposed simple geometry allows for the analytical determination of the electrical surface conductivity from the electrical resistance measured. Hence, the surface conductivity $\gamma(S)$ of the pollution layer as a function of the total resistance $R(\Omega)$ can be approximated as follows:

$$\gamma = \frac{2.232}{R} = 2.232 \frac{I}{V_{ap}} \quad (57)$$

where I (A) is the current, and V_{ap} (V) is the applied voltage measured during the humidification test.

From Equation (25), it can be concluded that the form factor of the proposed geometry is equal to 2.232.

4.5.2. THERMOELECTRIC SIMULATION OF THE PROPOSED GEOMETRY

To verify the validity of the proposed new geometry concept, a 3D thermoelectric simulation was performed with the proposed geometry using the commercial software Comsol Multiphysics. For the simulation and, at first, approximation, the polluted insulator values of 2 were used. The polluted layer thickness was assumed to be constant and fixed at 1 mm. The applied voltage was fixed at 2 kV, and the external temperature was fixed at 20 °C.

Figure 43 presents the profiles of the current line distribution (Figure 43a) and the surface temperature (Figure 43b) obtained after 70 s, which corresponds to the time required to obtain some hot spots at around 100 °C at specific points on the surface sample for the simulation parameters used. Figures Figure 44 and Figure 45 present the corresponding current density and surface temperature obtained along the axial distance (horizontal axis of symmetry) and the narrow part (vertical axis of symmetry) of the model, respectively.

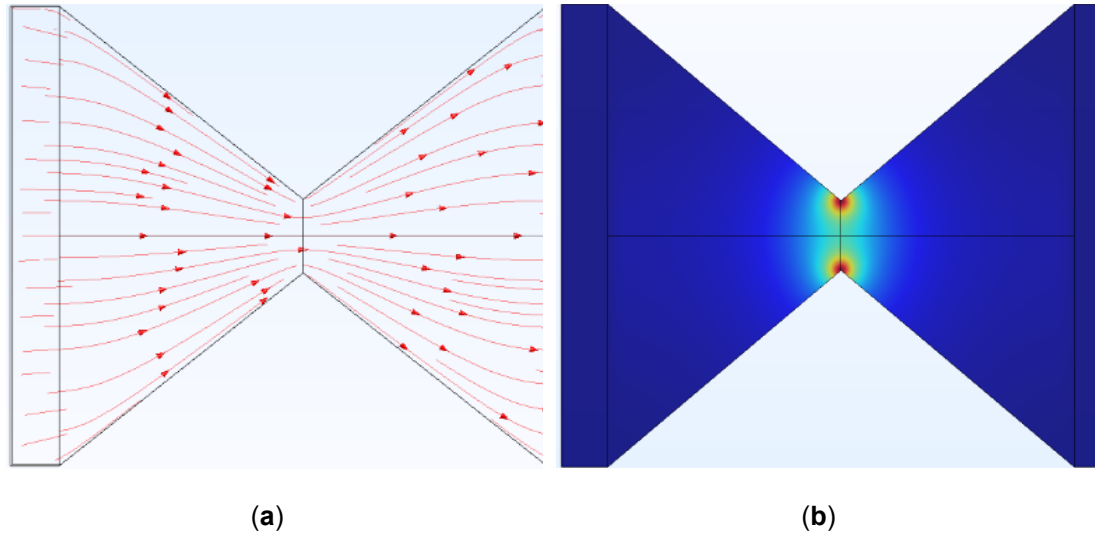


Figure 43 : Thermoelectric simulation of the proposed geometry for a surface conductivity of 1 mS/m and an external temperature of 20 °C with (a) current line distribution represented by the red arrows and (b) surface temperature distribution.

As a general observation, the results show that the current density is effectively greater at the narrow part of the model, as expected, which results in an increase in the temperature at the same place, as both are directly linked. More specifically, it can be observed in Figure 44a that the current density at the center of the model (middle of the narrow part) is around 3.3 times higher than that at the electrodes (larger part), which is of the same aspect ratio order as that obtained for the 69 kV composite insulator (Figure 40). Moreover, it can also be observed in Figure 44a that the current density is almost uniform along the narrow part of the geometry, except for the two extremities of the narrow part. At these two specific points, the current density increases drastically by a factor 4 (Figure 45a), resulting in the appearance of hot spots, as illustrated in Figures Figure 43b and Figure 45b, where the highest temperature values are measured at the two sharp points. From these results, it can be concluded that

dry band formation is initiated at the two identified sharp points of the geometry, where the temperature is the highest and extends along the narrow part of the geometry and where the average temperature is maximum. This assumption is validated in the next section on the experimental testing of the proposed geometry.

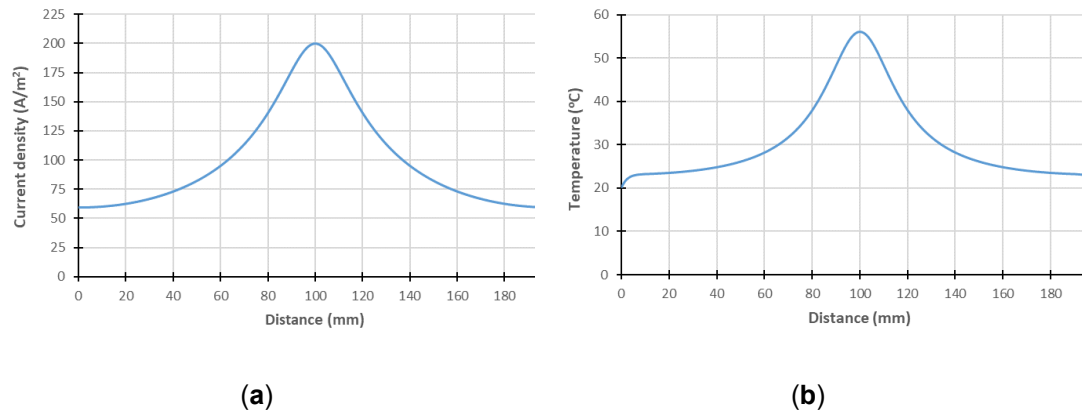


Figure 44 : Results obtained along the axial distance of the model for a volume conductivity of 1 mS/m and an external temperature of 20 $^{\circ}C$ with (a) the current density distribution and (b) the surface temperature distribution.

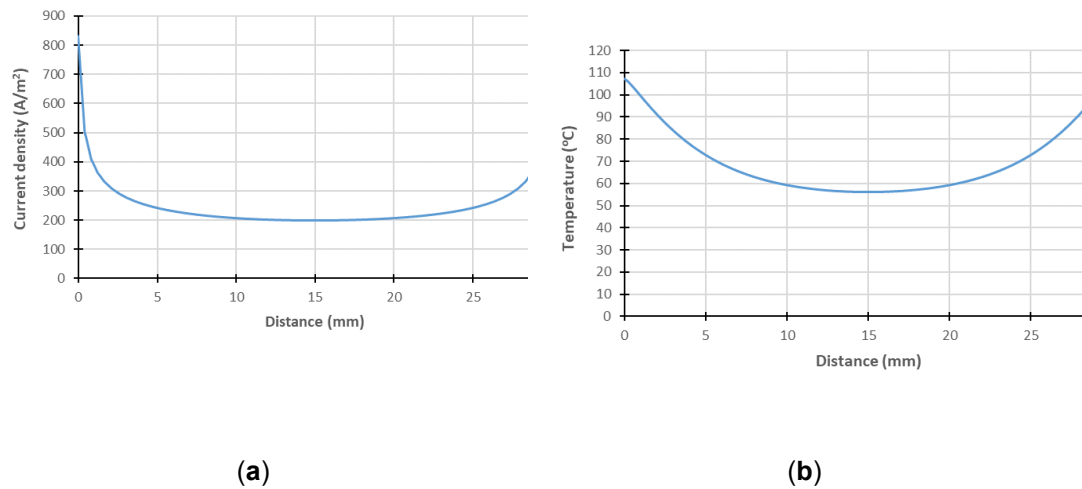


Figure 45 : Results obtained along the vertical distance of the narrow part of the model for a volume conductivity of 1 mS/m and an external temperature of 20 $^{\circ}C$ with (a) the current density distribution and (b) the surface temperature distribution.

4.6 EXPERIMENTAL TEST PROTOCOL

In order to validate the capacity of the proposed geometry to simulate the process of dry band formation, several tests in a climatic chamber were performed. These experiments permitted the development of a test protocol, including the application of the polluted layer, the control of the humidification period and the final tests under different applied voltages.

4.6.1. POLLUTION OF THE SAMPLE

In order to validate the proposed geometry, five samples were produced (Figure 9), and they were made of 5 mm-thick Plexiglas plates according to the geometry described in Figure 42. Aluminum tape was used as an electrode in the voltage test. The pollution solution was applied on the surface of the samples using a spraying system consisting of a low-pressure compressed-air gun and a compressor both from FUJISPRAY SEMI-PRO2 from Fujispray systems, Toronto, Canada. The gun was placed vertically between 15 and 20 cm from the surface of the samples. This method of application results in more uniform pollution layers on the surface of the tested samples. Once applied, the pollution layer was allowed to dry at room temperature for at least 24 h as recommended by IEC 60507 [4]. Figure 46b presents a view of the pollution layer obtained on the Plexiglas sample after drying using the low-pressure gun.

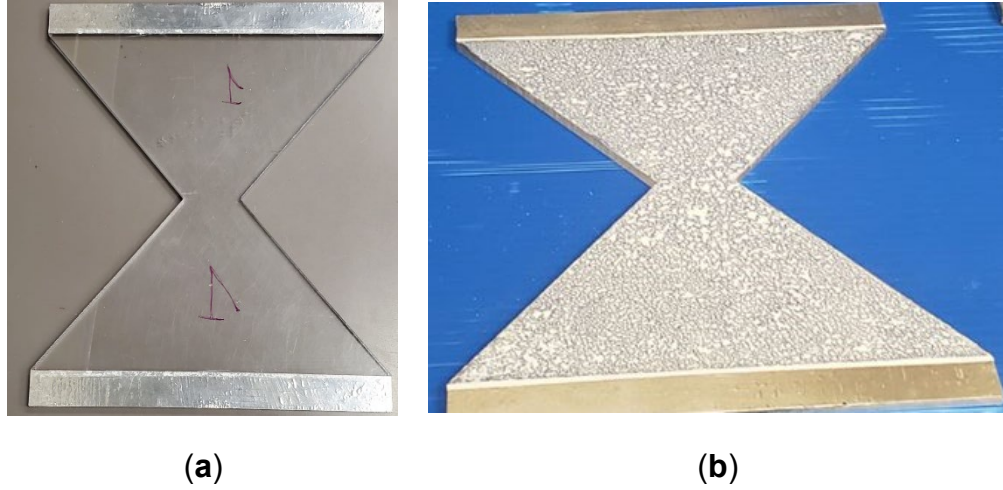


Figure 46 : View of Plexiglass geometry before and after the pollution layer was obtained after drying using a low-pressure gun with (a) clean sample and (b) polluted sample.

For the preliminary tests, the pollution solution was made from 500 mL of demineralized water, 33 g of salt and 40 g of kaolin; this corresponds to an average salt deposition density (ESDD) value of $1.34 \text{ mg/cm}^2 \pm 5.53\%$, which was obtained from a measurement performed on height samples following Standard IEC 60507 [4] and using the following equations:

$$\text{ESDD} = (S_a \times V_s)/A \quad (58)$$

where A is the sample surface area in cm^2 , V_s is the solution volume in cm^3 , and S_a is the pollution solution salinity in mg/cm^3 , which is given by

$$S_a = (5.7 \times \sigma_{20})^{1.03} \quad (59)$$

where σ_{20} is the pollution layer conductivity at 20°C in mS/cm .

This ESDD value, which corresponds to a very severe level of pollution [18, 57, 65, 85], also demonstrated the repeatability of the pollution application method.

The measurements were performed using a scale RADWAG PS 1000.R1 with

a readability of 0.001 g and a conductivity meter Yokogawa SC72 SC Meter with a resolution of 0.001 $\mu\text{S}/\text{cm}$ –0.1 $^{\circ}\text{C}$.

4.6.2. EXPERIMENTAL SETUP AND PROCEDURE

The tested samples were deposited in a climate chamber, Envirotronics Grand Rapids. MI49508 (Figure 47), to control ambient humidity (with a steam generator) and temperature. The samples were first weighed, cleaned and dried before the pollution layers were applied. The polluted and weighed sample was then deposited into the climate chamber set at a humidity level of $95 \pm 5\%$ and an average temperature of $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$. At the end of a series of tests, the salt deposition density (ESDD) on the surface of the samples was measured using Equation (26).



Figure 47 : Climate chamber.

Concerning the tests performed under applied voltage, two different tests were carried out. The first test, called the low-voltage procedure, was developed to measure the evolution of the pollution layer conductivity during the humidification phase. The second test, called the dry band test procedure,

was performed at a higher applied voltage in order to simulate the appearance of a dry band. These two procedures are described in more detail in the following sections.

4.6.2.1 Low-Voltage Test Procedure

In order to measure the evolution of the electrical conductivity of the pollution layer during the humidification phase, the procedure schematized in Figure 48 was used. In this procedure, an alternating voltage is delivered via a 0–240 V Variac supplied by a fixed 120 V sector. To prevent the pollution layer from heating up (which can affect its resistivity), an electronic switch is inserted in the circuit to energize the sample only for the time required to measure the electric current and voltage. A Tektronix P6015A probe with a bandwidth of 75 MHz is used to measure the voltage drop between the two electrodes of the sample under test. A 1 Ohm resistor shunt is used for the indirect measurement of the current through the sample. An NI USB-6216 acquisition card, driven by MATLAB software from The MathWorks, Natick, USA, version R2018a, enables measurement data to be acquired and saved for future processing.

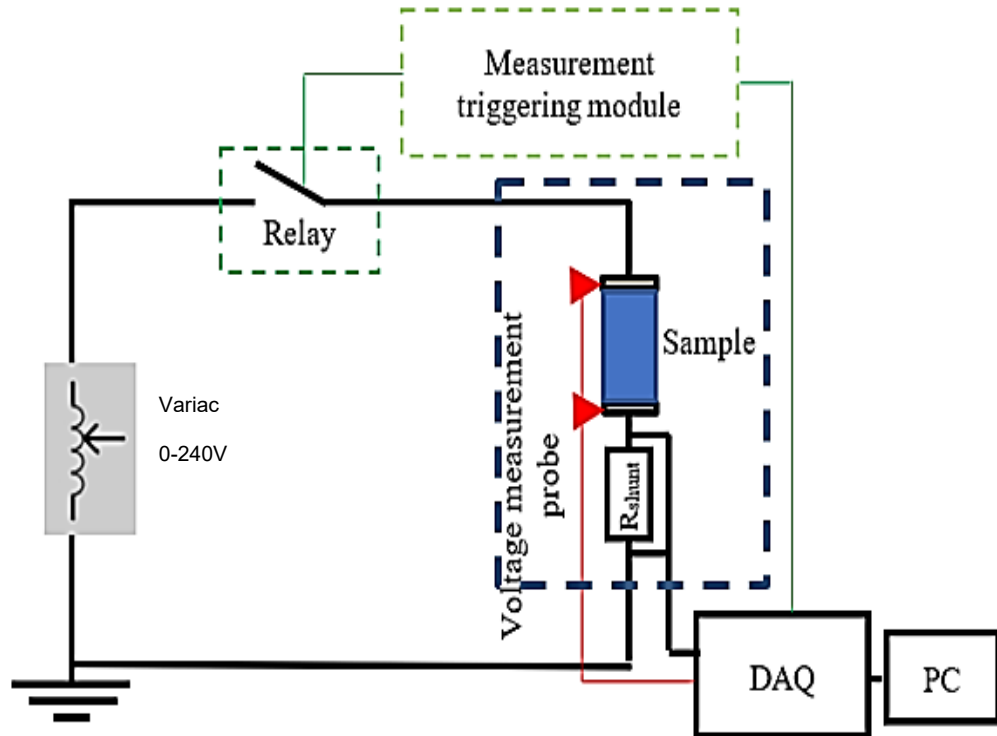


Figure 48 : Low- and high-voltage test setup diagram.

4.6.2.2 Dry Band Test Procedure

High-voltage tests were also carried out with the new geometry to observe the effectiveness of dry band formation in the stress zone. The Variac (Figure 48) was replaced with a high-voltage source, while the electronic switch was removed from the system. A thermal camera Optris PI400 from Optris infrared sensing, Portsmouth, USA, was added to measure and record the temperature distribution on the pollution layer surface over the dry band zone formation. At the end of each series of tests, the ESDD of the samples was evaluated according to the procedure described in IEC 60507.

4.7 EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

4.7.1. ELECTRICAL CONDUCTIVITY PROFILE DURING LOW-VOLTAGE TEST

The humidification test enables the evolution of the electrical resistance of the pollution layer to be followed during the humidification stage by measuring the electric current at low voltage. This permits the verification of the repeatability of the application pollution method, as well as the determination of the duration of the humidification necessary to reach the maximum conductivity, which corresponds to the maximum leakage current value on the surface of the polluted sample during the dry band test procedure.

Figure 49 presents an example of the evolution of the resistance and the conductance of the pollution layer obtained for three samples with similar ESDD values during the humidification period. The surface conductivity is simply determined using Equation (25). The results in Figure 49 show that the humidification phase is repeatable for the same order of ESDD. Indeed, the results demonstrate that the evolution of the surface conductivity follows, for an average ESDD of $1.34 \text{ mg/cm}^2 \pm 5.53\%$ for the three samples presented, the same pattern with a maximum average value of about $0.162 \text{ mS} \pm 4.90\%$ obtained for an average time of $810 \text{ s} \pm 1.84\%$. When the pollution layer is dry, its electrical resistance is very high, and its electrical conductivity very low. When the sample is placed inside the climate chamber, the water absorption starts, as well as the dissolution of the salt in the water. The electrical conductivity of the layer increases to a maximum value, which corresponds to

the saturation of the pollution layer with water. The results obtained with the proposed geometry are in good agreement with those from the clean fog test, which was performed on composite insulators, as reported in the literature [60]. Hence, the results obtained demonstrate that the proposed simple geometry, combined with the use of a climate chamber with an integrated humidification system, is sufficient to adequately simulate the humidification process of a polluted layer in a repeatable way in accordance with the international standard requirements [4].

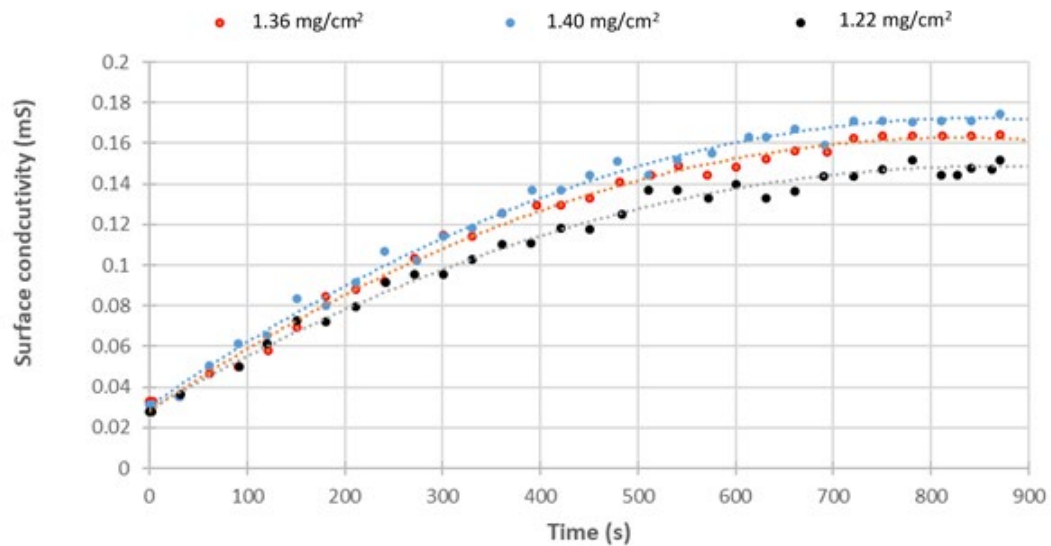


Figure 49 : Example of three surface conductance evolutions obtained during the humidification period for an average ESDD of 1.34 mg/cm².

4.7.2. EXPERIMENTAL SIMULATION OF DRY BAND FORMATION

Once the polluted sample reached its maximum surface conductivity, which was defined during the humidification test, HV was applied in order to generate the formation of the dry band. Preliminary tests were performed for

an average ESDD of 1.34 mg/cm^2 and for three different applied voltages: 2 kV (Figure 50a), 4 kV (Figure 50b) and 6 kV (Figure 50c).

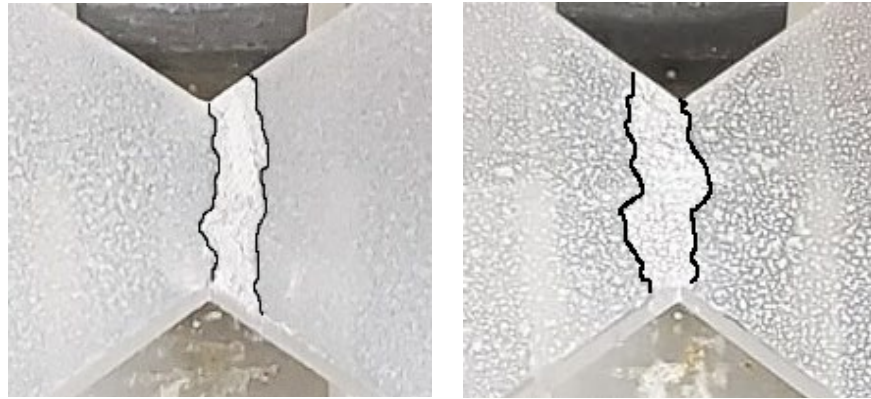
From the results of Figure 13, it can be observed that the dry bands obtained for the different applied voltages form appropriately in the middle of the geometry, as expected due to the results of the thermoelectric simulations. Despite the random character of dry band formation, it can be observed that the dry bands obtained for the ESDD values of the same order are quite similar in dimension and position for the same applied voltage. This confirms the repeatability of the proposed geometry and its ability to simulate the complex process of dry band formation. When the applied voltage is increased to 4 kV, for an equivalent average ESDD value, the width of the dry band increases significantly, as illustrated by the results in Figure 13b. The same is observed for an applied voltage of 6 kV (Figure 50c), with an increase in the width of the dry band. This observation is in good agreement with the literature [60-62, 86]. In fact, when the voltage is higher, thermal energy is more important, as it leads to greater evaporation, so the dry area is larger for the same level of pollution present on the sample surface. This is confirmed by the examples in Figure 51, which presents the IR imaging of the dry band obtained for the maximum temperature for each applied voltage. In this figure, it can be observed that the zone of the maximum temperature extends with the increase in the applied voltage, resulting in an increase in the dry band width, as observed in Figure 50. This also confirms that more thermal energy is provided for the formation of the dry band as the applied voltage is increased.

As expected, this is also observed in Figure 52, which shows the evolution of the temperature for different applied voltages, as well as the maximum current value, which was measured at the center of the dry band formation zone. As it can be observed, the evolution of the temperature obtained in the center of the dry band formation zone depends on the applied voltage. In particular, it can be observed that the time to the appearance of a dry band decreases as the applied voltage is increased. As previously mentioned, higher applied voltages generate greater thermal energy and, consequently, accelerate the process of evaporation and the formation of dry bands. However, it is interesting to note that the maximum temperature reached does not seem to be significantly affected by the applied voltage, as its value, which is around 70 °C, is the same for each applied voltage.

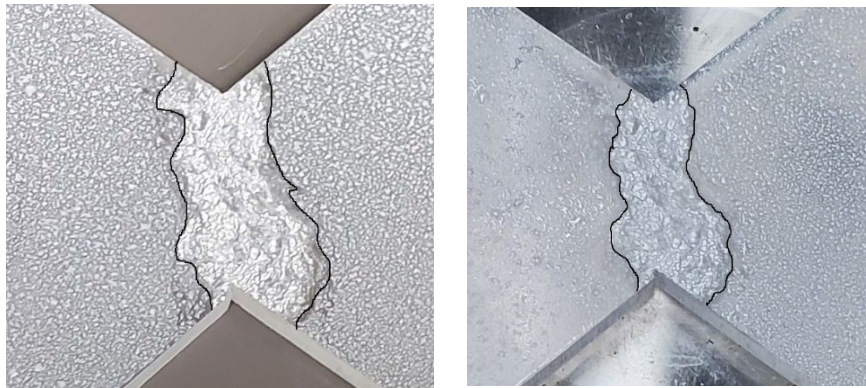
Concerning the evolution of the current in Figure 52, it is interesting to observe that the current is somewhat constant during the dry band formation process until it suddenly drops. This drop occurs at the moment that the formation of the dry band is completed along the narrow part of the sample, as well as corresponding to the maximum temperature at the center of the dry band. When the formation of the dry band is completed, the equivalent resistive circuit is interrupted and almost becomes capacitive with a drastic reduction in the current intensity flowing in the pollution layer. This results in less thermal energy dissipating in the pollution layer, which explains the sudden decrease in temperature observed in Figure 52.

Finally, the current evolution in Figure 52 confirms the validity and repeatability of the pollution layer application method due to the fact that its

maximum value is somewhat proportional to the applied voltage, which is expected for the same order of ESDD values.



(a)



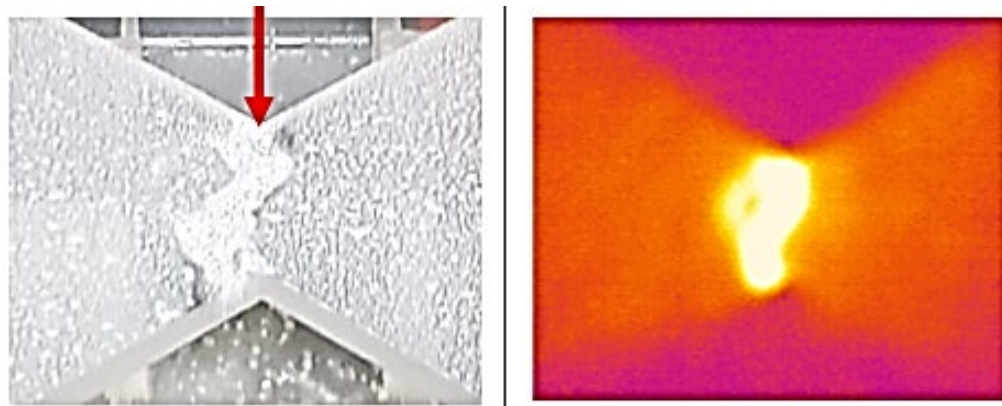
(b)



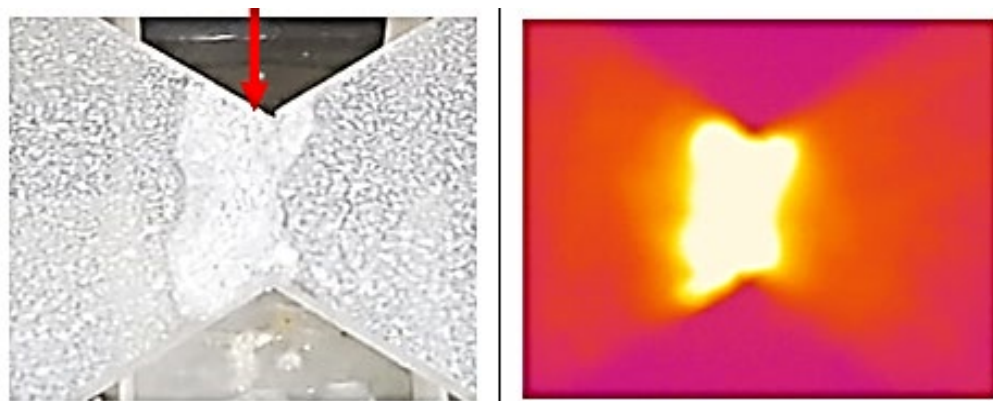
(c)

Figure 50 : Examples of dry band formation obtained on the Plexiglass sample for an average ESDD of 1.34 mg/cm^2 for applied voltages of (a) 2 kV, (b) 4 kV and (c) 6 kV.

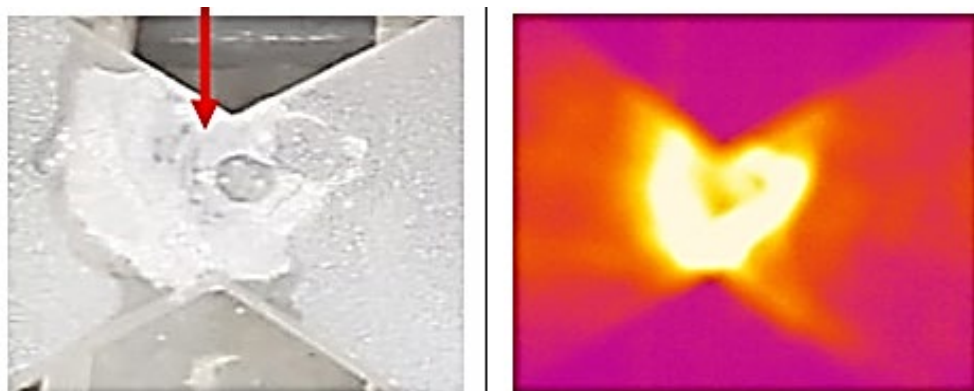
As a final observation, Figure 53 presents, for an applied voltage of 2 kV, the thermal IR imaging of the dry band formation at three distinct times regarding the evolution presented in Figure 52 obtained for the same applied voltage. Hence, Figure 53a corresponds to the time $t = 2$ s after the application of 2 kV in Figure 52, Figure 53b corresponds to the time $t = 66$ s, and Figure 53c corresponds to the time $t = 117$ s. The temperature showing in the three subfigures in Figure 53 is the average temperature measured inside the rectangular highlighted zone in white, whereas T_{max} is the maximum temperature measured inside that same zone. As it can be observed in this figure, the maximum temperature is obtained at the sharp edge of the sample geometry, as confirmed by the simulation results in Figure 45b. In Figure 53a–c, it can be seen that the temperature increases with time from the sharp edges to the center of the geometry, as expected from the simulation results. In other words, this means that the formation of the dry band is initiated at the two sharp edge extremities and progresses to the middle of the geometry until a complete dry band is formed.



(a)



(b)



(c)

Figure 51 : Examples of temperature distribution obtained with the IR camera in the zone of dry band formation (marked with red arrow) for applied voltages of (a) 2 kV, (b) 4 kV and (c) 6 kV for an average ESDD of 1.34 mg/cm^2 .

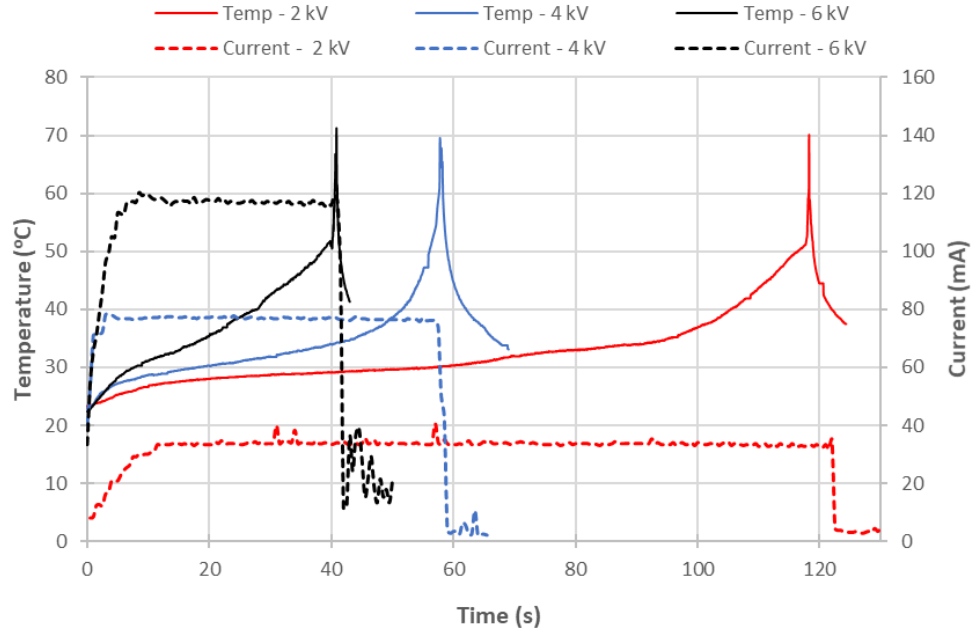


Figure 52 : Examples of evolution of the maximum current value and of the temperature measured at the center of the dry band as function of applied voltage, for average ESDD of 1.34 mg/cm².

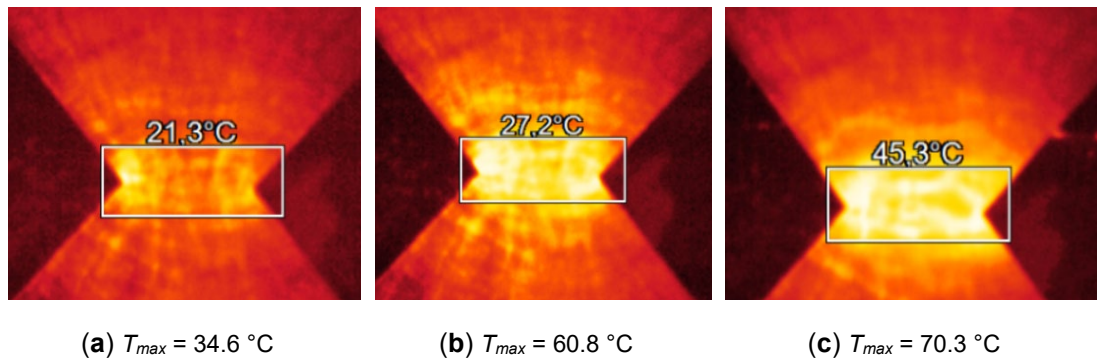


Figure 53 : Examples of temperature distribution evolution obtained with the IR camera in the dry band formation zone for an applied voltage of 2 kV and for an average ESDD of 1.34 mg/cm², where the maximum temperature T_{max} obtained inside the rectangular highlight zone is equal to (a) 34.6 °C at $t = 0$ s, (b) 60.8 °C and (c) 70.3 °C.

4.8 CONCLUSION

In this paper, a new simple geometry to experimentally simulate the complex process of dry band formation on the surface of polluted composite insulators was proposed and validated. The proposed geometry simply simulates the effect of current line constriction obtained on the rod of a polluted composite insulator where dry band formation is generally observed.

The first step of the development of the proposed geometry was to use numerical simulations to determine the E-field, temperature and current density distributions along a 69 kV uniformly polluted composite insulator. The results obtained were then compared to the results obtained from the thermo-electrical simulations of the proposed geometry covered with a uniform pollution layer. The results obtained clearly demonstrate that thermal stresses and current density are more significant on the narrow part of the proposed geometry, allowing for the numerical results obtained for the polluted composite insulator at the rod surface to be correctly reproduced.

The second step was to experimentally test a proposed geometry model made of Plexiglass using a climate chamber to reproduce fog conditions. The different tests conducted used a heavy level of pollution with an average ESDD of 1.34 mg/cm^2 . Low-voltage tests were used to determine the wetting duration, which corresponds to the maximum surface conductance of the polluted layer. The values obtained agree with the 10–40 min duration recommended in IEC 60507. The preliminary simulations performed with a high voltage demonstrated that using the proposed geometry allows the complex process

of dry band formation to be correctly reproduced in a controlled manner. Excellent repeatability was obtained in terms of ESDD values, as well as in terms of current, temperature and the dimensions of the dry bands, depending on the applied HV voltage.

Hence, the preliminary results demonstrate that the proposed geometry permits the easy study and characterization of the different parameters influencing the formation of dry bands on composite insulators. By combining the simplicity of the proposed geometry with a small climate chamber and a small HV source, it becomes easy to test different materials (RTV, glass, superhydrophobic materials, etc.) in order to evaluate their behavior under atmospheric pollution at a reduced time and price compared to full-scale insulator tests. The influence of the material and pollution severity on the proposed geometry will be addressed in a future paper. Moreover, the repeatability obtained with the proposed geometry can be very useful to develop and validate numerical models aiming to simulate the process of dry band formation or partial arc initiation and propagation on the surface of polluted insulators, as will be featured in future papers using the proposed geometry.

CHAPITRE 5

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF PARAMETERS INFLUENCING THE FORMATION OF DRY BANDS AND RELATED ELECTRIC FIELD

Energies 2024, 17, 2373.

<https://doi.org/10.3390/en17102373>

Submission received: 10 April 2024 / Revised: 30 April 2024 /

Accepted: 11 May 2024 / Published: 15 May 2024

Author Contributions: Numerical simulations were performed by M.-A.A., who was also responsible for the experimental investigation and the original draft preparation. Validation, review and editing, visualization, and supervision were the responsibility of C.V., who was also responsible for funding acquisition. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

5.1 RESUMÉ

Cet article présente une étude expérimentale menée pour déterminer l'influence de paramètres tels que la température ambiante, le niveau de pollution et le matériau du substrat sur la formation de bandes sèches le long d'une couche de pollution. Pour étudier l'influence de ces paramètres, nous avons utilisé une géométrie d'isolateur simplifiée, développée dans nos travaux précédents, pour contrôler expérimentalement le processus complexe de formation de bandes sèches sur une surface polluée. La géométrie simple du modèle expérimental a permis l'utilisation du plexiglas, du RTV et du verre comme matériaux de construction du substrat. Le RTV et le verre ont été utilisés pour simuler respectivement une surface d'isolant composite et céramique. De plus, une sonde électrooptique (EO) a permis de mesurer l'évolution du champ électrique axial E à la surface de la couche polluée lors de la formation de la bande sèche. Les résultats ont montré que le matériau du substrat, la température ambiante et le niveau de pollution influencent considérablement la formation des bandes sèches. Les effets des deux premiers paramètres sont directement associés aux phénomènes de transfert thermique dans le matériau du substrat et à l'interface air ambiant/substrat. L'effet du troisième paramètre est lié à l'absorption et à l'évaporation de la couche de pollution. De plus, l'apparition de la bande sèche peut être clairement identifiée par une augmentation rapide de la résistance de la couche de pollution et du champ E axial dans la zone de la bande sèche. La valeur du champ E axial est influencée principalement par la largeur de la bande sèche et par la résistance de la couche de pollution, qui dépend directement de la durée d'humidification. Enfin, étant donné

que la plupart des résultats obtenus ici étaient conformes à ceux de la littérature, nous concluons que le modèle expérimental proposé peut fournir une méthode de test efficace et peu coûteuse pour développer de nouveaux matériaux et solutions pour améliorer les performances diélectriques des isolateurs utilisés dans les environnements pollués. De même, la géométrie simple du modèle expérimental et la capacité de contrôler facilement les paramètres expérimentaux peuvent permettre à cet outil de valider les résultats de divers modèles numériques dans les études du comportement thermoélectrique des isolateurs pollués.

5.2 ABSTRACT

This paper presents an experimental investigation conducted to determine the influence of parameters such as the ambient temperature, pollution level, and substrate material on the formation of dry bands on polluted layers. To investigate these parameters, we applied a simplified insulator geometry, developed in our previous work, to experimentally control the complex process of dry band formation on a polluted surface. The simple geometry of the experimental model enabled the use of Plexiglas, RTV, and glass as construction substrate materials. RTV and glass were used to simulate a composite and ceramic insulator surface, respectively. Moreover, an electrooptic (EO) probe enabled the measurement of the axial E-field evolution at the surface of the dry band during dry band formation. The results indicated that the substrate material, ambient temperature, and pollution level substantially influence dry band formation. The effects of the first two parameters are directly associated with heat transfer phenomena in the substrate material and

at the ambient air/substrate interface. The effect of the third parameter is associated with absorption and evaporation of the pollution layer. In addition, the appearance of the dry band can be clearly identified by a rapid increase in both the pollution layer resistance and the axial E-field in the dry band area. The value of the axial E-field is influenced primarily by the width of the dry band and by the pollution layer resistance, which is directly dependent on the humidification duration. Finally, because most of the results obtained herein were in accordance with those in the literature, we conclude that the proposed experimental model may provide an effective and inexpensive testing method for developing new materials and solutions for improving the dielectric performance of insulators used in polluted environments. Similarly, the simple geometry of the experimental model and the ability to easily control the experimental parameters may enable this tool to validate the results of various numerical models in studies of the thermoelectrical behavior of polluted insulators.

5.3 INTRODUCTION

Dry band formation is a major parameter influencing the development of flashover phenomena on high-voltage polluted surfaces [9, 10, 30, 34, 57, 62, 65, 66, 68-70, 85, 87-90], as well as the distribution of the potential and electric field along these surfaces [15, 31, 32, 91-97]. Flashover of polluted insulators is a complex phenomenon induced by partial arcs initially established along dry bands and propagating along the insulator surface, owing to local heating of the pollution layer induced by a local increase in leakage current density [10, 62, 87]. As dry bands are primarily responsible for polluted insulator flashover, many studies have been

conducted on this phenomenon in recent decades [9, 10, 30, 34, 57, 62, 65, 66, 68-70, 85, 87-90].

Experimental investigations have identified several parameters significantly influencing polluted insulator flashover, including the pollution level, characterized by the equivalent salt deposit density (ESDD) and the non-soluble deposit density (NSDD) [66, 69, 85, 89, 94, 95]; ambient temperature and humidity [70, 88]; and the position, number, and width of the dry bands [34, 68, 70]. In general, the flashover voltage of a polluted insulator increases with increasing ESDD/NSDD, ambient temperature, and humidity. Moreover, the number of dry bands has a greater influence on flashover voltage than the positions of the dry bands.

Efforts to identify the parameters significantly influencing polluted insulator flashovers have been aimed at identifying the parameters influencing the initiation and growth of dry bands on polluted insulators [9, 10, 30, 34, 57, 62, 65, 66, 68-70, 85, 88-90]. ESDD and fog concentration have been found to affect the formation and location of dry bands [57, 88]. Moreover, measurement of the surface resistance or conductivity of the pollution layer has been found to provide a significant indication of the pollution state of the insulator. In particular, surface conductivity increases with ESDD and significantly decreases in the presence of dry bands [34, 57]. Other studies conducted on real insulators have also highlighted that surface resistance is affected by the insulator material [32, 94]. For example, the inert materials glass and EPDM have surface resistances 10 and 3.5 times lower than that of silicone, respectively. Silicone rubber, such as RTV, can be considered an active material because of its ability to retain and recover surface hydrophobicity [32]. Similarly, the

shape of the insulator and the presence of a textured surface (rather than a smooth surface) also affect the surface resistance of polluted surfaces [57, 69].

Another aspect of dry band formation at the surface of a polluted insulator is the influence on the potential and E-field distribution along the polluted surface. Many studies have examined this topic, but most have used numerical approaches on real insulators or rectangular plates [15, 31, 32, 91-97]. The results have generally suggested that the presence of dry bands leads to redistribution of the potential along the polluted surface, where voltage drops can be observed along the different dry bands. These voltage drops are responsible for the rapid increase in the E-field value along different dry bands [15, 31, 32, 91-97].

Despite the interesting results obtained from both experimental and numerical investigations, the literature has indicated the difficulties in investigating the influence of combinations of several parameters with the same experimental model used as a polluted insulator. In particular, studying the parameters influencing pollution severity, such as the material substrate, can be highly challenging. Indeed, among the few relevant studies conducted, only the surface conductivity of the pollution layer in real polymeric and glass insulators has been compared [32, 94]. These studies do not appear to have considered the effects of insulator geometry on the evolution of surface conductivity, including the formation and location of dry bands. A major difficulty lies in studying real insulators with identical geometries but made from different materials. A similar concept has been used with a textured insulator surface condition [57, 98]. Instead of using real insulators, several studies have used rectangular or triangular models to study the behavior of polluted insulators on which dry bands were artificially created [9, 34, 70, 88, 89]. These

models have aided in the investigation of classical parameters, such as the ESDD, ambient temperature, and humidity level, on flashover voltage; however, they have not considered dry band formation in the dynamic evolution of pollution layer resistance.

We recently proposed a new experimental model of simple insulator geometry that enables experimental simulation of the complex phenomenon of dry band formation in a controlled and repetitive manner [99]. Due to its simple and small geometry, the proposed model can be easily made with different materials. Because all other known influencing parameters can be easily controlled, this model facilitates studies of the effects of various parameters on dry band formation along polluted insulators. This article presents experimental results obtained with the proposed experimental model, wherein the influence of Plexiglas, glass, and RTV as materials, with different ESDDs and ambient temperatures, was investigated. By using an electrooptic (EO) sensor for E-field measurement together with the proposed experimental model, we recorded the evolution of the axial E-field during dry band formation. These measurements were also correlated with the evolution of pollution layer resistance as well as the average temperature in the dry band area.

5.4 MATERIALS AND METHODS

5.4.1. CHARACTERISTICS OF THE EXPERIMENTAL MODELS

As described in detail in our previous article [99], the experimental model used in this study has a simple geometry (

Figure 54). Developed from a numerical investigation, the model enables the experimental simulation of dry band formation by locally increasing the leakage current in the middle of the model.

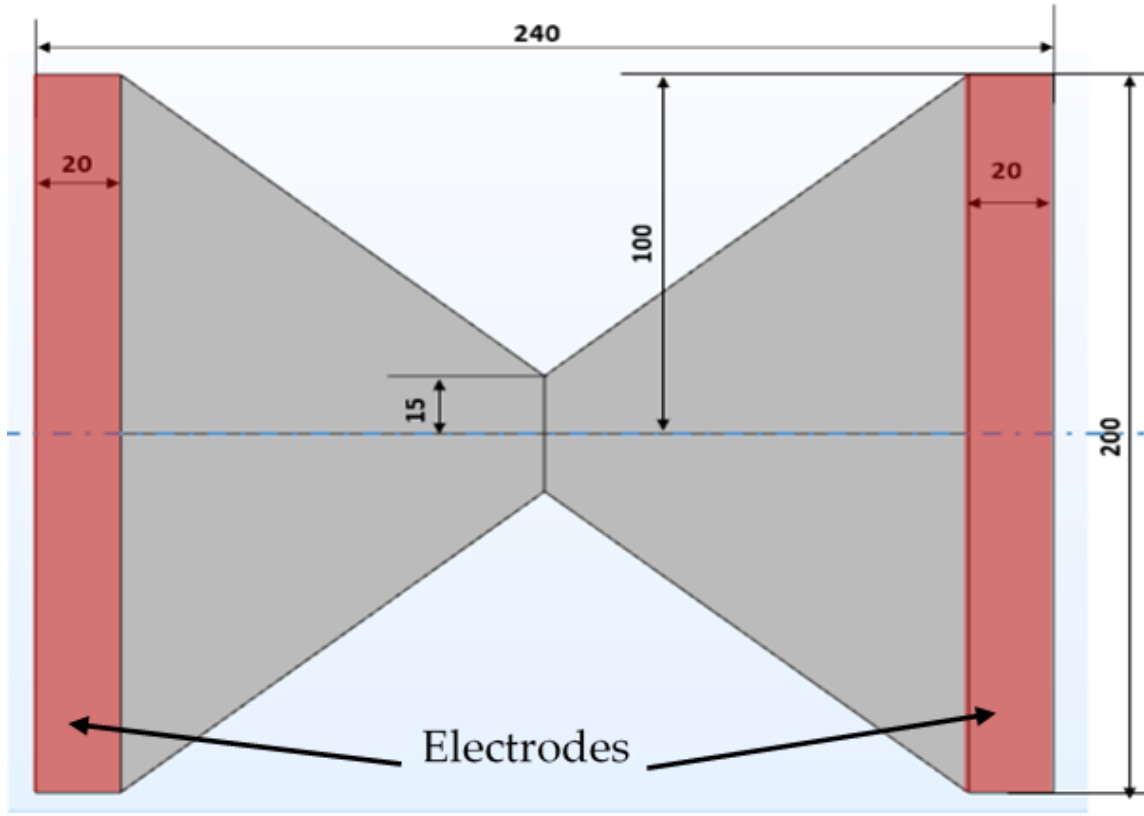


Figure 54 : Geometry and dimensions (in mm) of the experimental model.

The main advantage of the model lies in its simple and symmetrical geometry, thus allowing for the study of various material substrates, which can be easily cut to obtain the desired shape. Moreover, because of the small dimensions of the experimental model, the experimental setup is not complicated, and only a small climatic chamber for the humidification process and an electrical source are required. The voltage is applied using aluminum tape electrodes, as illustrated in

Figure 54. To study the influence of the material substrate on dry band formation, we fabricated several experimental models with Plexiglas, glass, and RTV. Because Plexiglas was principally used in our initial study [99], it served as a reference for comparison of the behaviors of the experimental models made of glass and RTV. Glass material with a thickness of 6 mm was used to simulate a glass and ceramic type insulator, whereas RTV was used to simulate a composite insulator type. To simulate the surface of a composite insulator, we formed an RTV layer on 3–4 mm thick PVC samples (Figure 55). The RTV layer was obtained by mixing two liquid components followed by curing at room temperature for 24 h. Figure 56 presents the measurement of the contact angles for the three RTV experimental models. The contact angle varied from 104.5° to 107.6° , representing a relative difference of approximately 3%, and also demonstrated that the RTV coating was a hydrophobic surface. These values are of the same order as those obtained for silicone rubber surfaces used for simulating polymer insulator surfaces in different studies [100, 101].

To mask the hydrophobicity of the RTV coating, we used kaolin powder according to the instructions in CIGRE, WG C4.303 [8]. With this recommended method, the hydrophobicity of the RTV experimental model was substantially reduced (Figure 57). After treatment, the contact angle obtained varied from 28.61° to 32.11° , corresponding to a relative difference of approximately 12% among the three RTV experimental models. These results also confirm that the method used to mask the hydrophobicity of the RTV coating is repeatable.

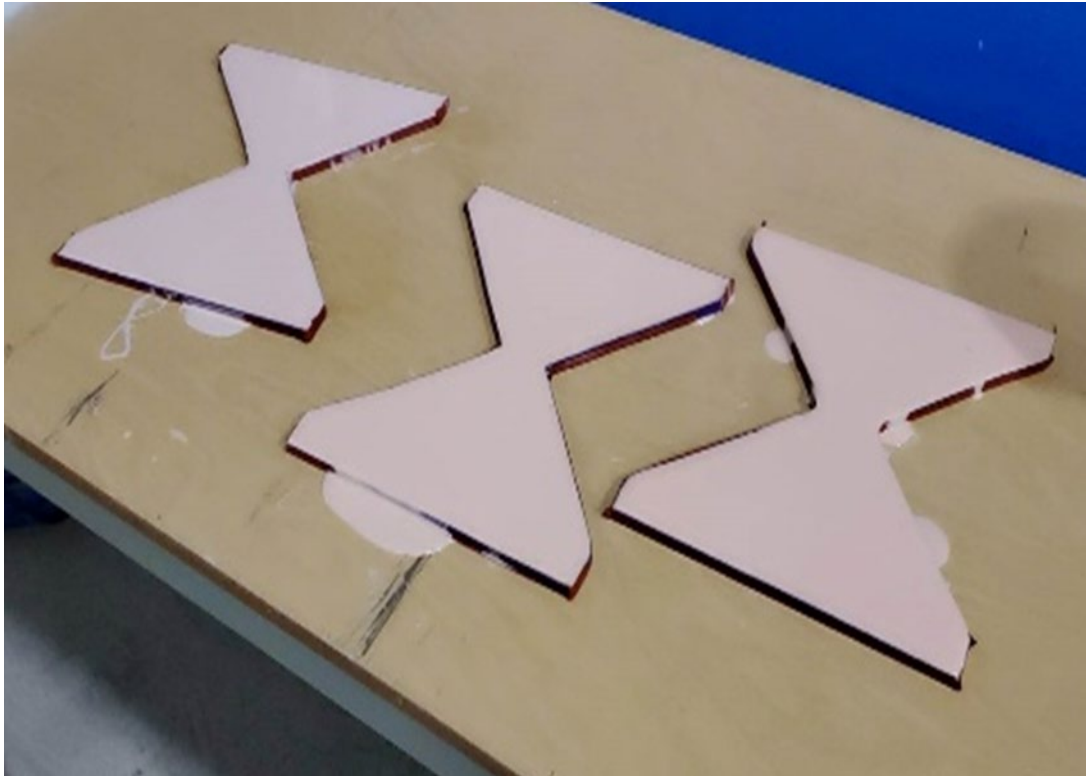


Figure 55 : Production of RTV substrate to simulate the composite insulator surface.

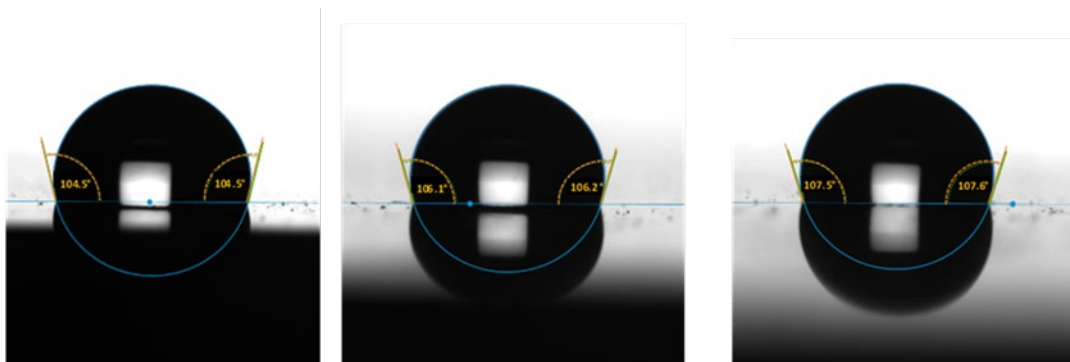


Figure 56 : Contact angles obtained for the three RTV experimental models.

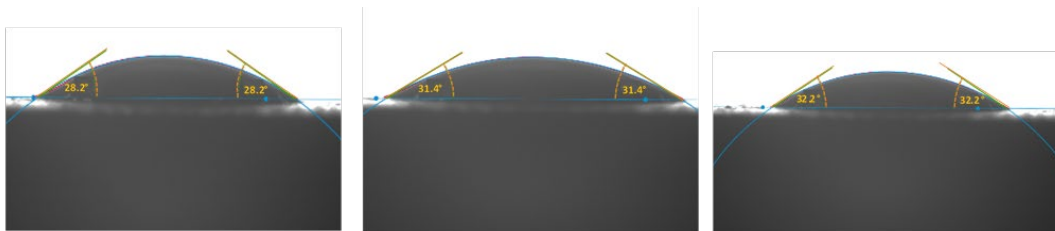


Figure 57 : Contact angles obtained for the three RTV experimental models after kaolin treatment.

5.4.2. POLLUTION PROCEDURE IN EXPERIMENTAL MODELS

The application of pollution on the experimental models made of Plexiglas, glass, and kaolin-treated RTV coatings followed the same procedure as extensively described in our initial work [99]. The pollution suspension was produced from various formulations based on 500 mL of demineralized water, 20 g of kaolin, and various quantities of salt, to simulate high, moderate, and light pollution [99, 101]. These quantities were weighed with a PS 1000 R1 scale from Radweg Canada, Ontario, with a readability of 0.001 g. The pollution solution was applied on the surfaces of the experimental models with a spraying system, model SEMI-PRO2 from Fuji Spray Canada, Ontario, consisting of a low-pressure compressed-air gun and a compressor. The gun was placed vertically 15–20 cm from the surfaces of the samples. This method of application resulted in the formation of relatively uniform pollution layers on the surfaces of the tested samples. Once applied, the pollution layer was allowed to dry at room temperature for at least 24 h, as recommended by IEC 60507 [4].

5.4.3. EXPERIMENTAL TEST SETUP

Figure 58 presents the setup used to study the different parameters influencing dry band formation. This setup comprised a climatic chamber measuring $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ with controlled humidity and temperature, a 100 kV transformer, and a data acquisition system to record the applied voltage and the leakage current. The measurement of the E-field above the middle of the dry band was performed with an EO sensor from Kapteos (Figure 55), which has successfully been used for various HV applications in several studies [74, 102, 103]. This sensor is composed of an optoelectronic converter (Figure 59a), which converts the optical information generated by the EO E-field probe (Figure 59b) into an analog electrical signal. This signal is directly proportional to the single component of the E-field measured by the 5 mm diameter EO probe and can be directly read by a data acquisition system. Being composed of only dielectric material, the EO probe is non-invasive and offers natural galvanic isolation for use in high-voltage environments [74]. Moreover, the EO probe is highly selective, as it only allows the measurement of the component of the E-field orthogonal to it [102].

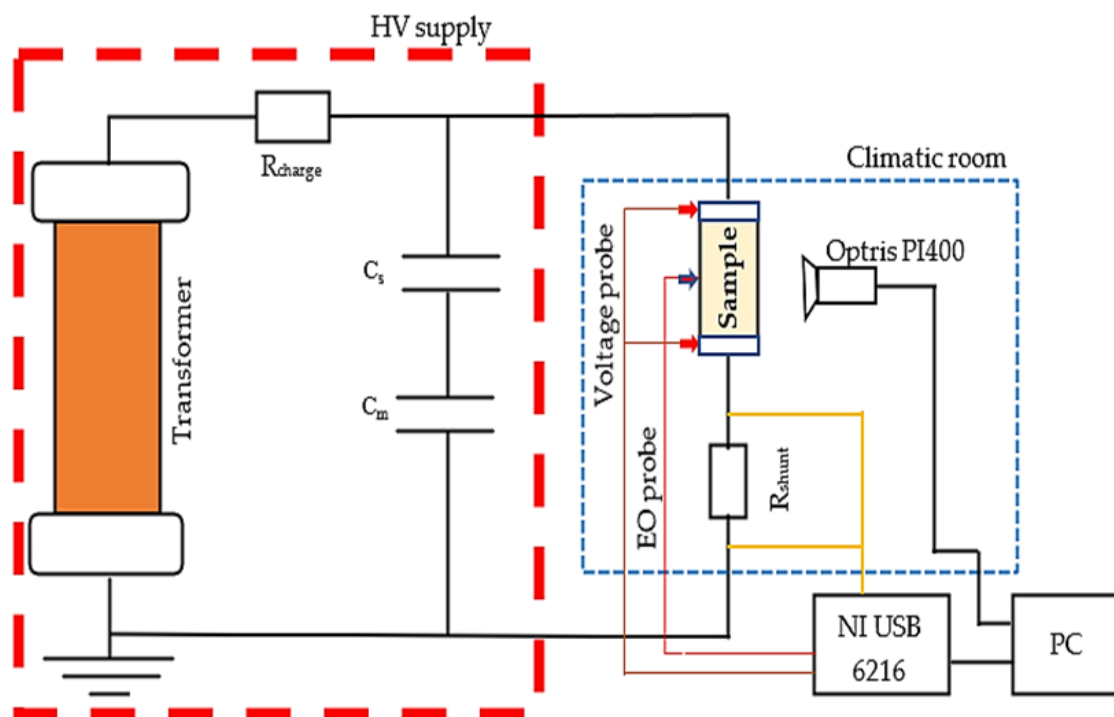


Figure 58 : High-voltage test diagram.



(a)



(b)

Figure 59 : Electric field measurement system with (a) the optoelectronic converter and (b) the EO probe positioned above the dry band zone of formation.

5.4.4. TEST PROCEDURE

The procedure for studying dry band formation in dedicated experimental models, as previously described in detail [99], is summarized as follows:

- Each polluted and weighed sample was placed into the climate chamber set at the desired temperature, controlled at ± 1 °C, for a minimum of 3 h, to allow the experimental model to reach the same temperature as that of the climate chamber.
- The humidity of the chamber was set at $95 \pm 5\%$ and was generated by steam for a duration of 810 s, the time previously demonstrated to be required to reach the maximum surface conductivity [87].
- A high voltage of 2 kV_{rms} was then applied, and the leakage current was recorded, to automatically compute the pollution layer resistance until the dry band had completely formed.
- At the end of each test, the ESDD on the surface of the samples was measured and determined as previously described [99] .

For each experimental condition, three experimental models of the same substrate material were polluted with the same kaolin and salt solution and tested under the same conditions. From the three tested samples, the evolution of the average pollution layer resistance was determined for each experimental condition.

For the measurement of evolution of the E-field during dry band formation, two different test series were performed. In the first series, the E-field above the dry band was measured as a control. A dry band of controlled width was created during the pollution process with a mask (Figure 60). The EO probe was positioned 5 mm above the surface, at the center of the dry band, and oriented to measure the axial

component of the E-field parallel to the surface. Three dry band widths were used: 6.4 mm, 12.8 mm, and 18 mm. These values represented the average width obtained in the previously reported preliminary results [99]. For this series, high voltage was applied at the same time as the humidification of the climatic chamber to measure the evolution of the E-field above the artificial dry band during the humidification of the dry pollution layer.



Figure 60 : EO probe centered on an artificial dry band.

The second series of E-field measurements was performed during dry band formation (Figure 59b), as previously described [99]. The EO probe was also positioned 5 mm above the sample surface in the region of dry band formation. The evolution of the axial E-field was recorded after the application of high voltage, when the surface conductivity peaked, i.e., after 810 s of humidification, as previously demonstrated [99].

5.5 PARAMETERS INFLUENCING THE DRY BAND FORMATION PROCESS

As demonstrated in our prior work [99], the main advantage of the proposed experimental model lies in its ability to experimentally reproduce the complex process of dry band formation on composite insulators in a repetitive and controlled manner. However, owing to its simple geometry, the proposed experimental model also enables the assessment of the influence of various parameters, such as the pollution level, environmental temperature, and substrate material, on dry band formation. Such studies are generally difficult to perform with real insulators with different geometries and materials.

5.5.1. INFLUENCE OF POLLUTION LEVEL

The influence of the pollution level on dry band formation was studied with the experimental model made with glass. All tests were conducted at 20 °C with ESDDs of 0.14 mg/cm², 0.22 mg/cm², 0.3=1 g/cm², and 0.83 g/cm². These values correspond to mean, heavy, and very heavy pollution level according to [4, 8]. Figure 61 presents the evolution of the average pollution layer resistance recorded after a humidification period of 810 s with an applied voltage of 2 kV_{rms}.

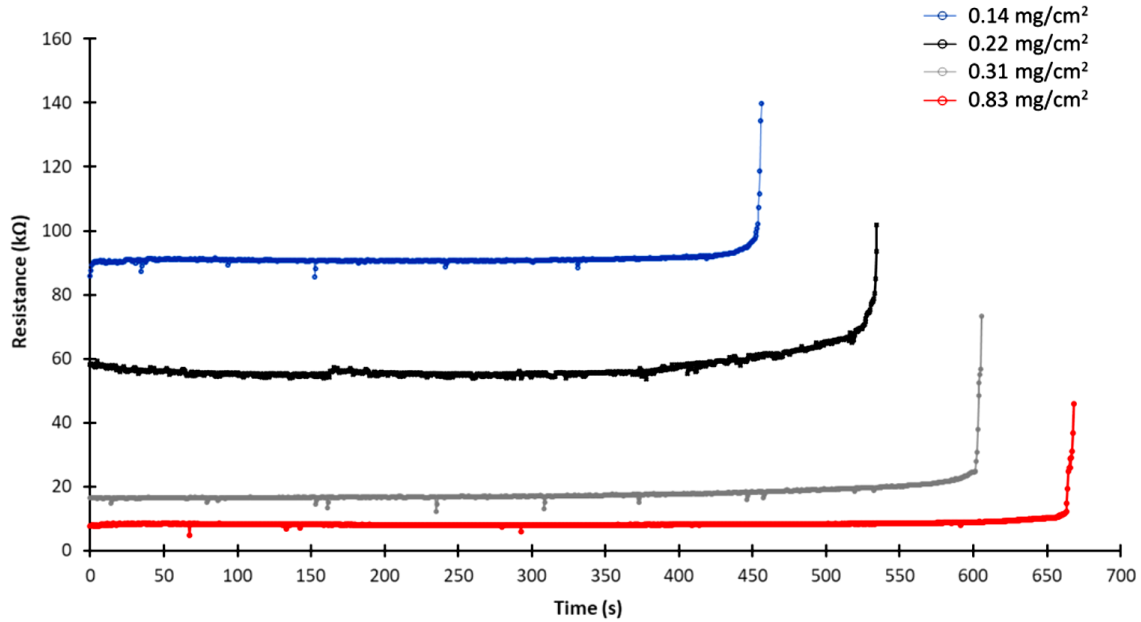


Figure 61 : Evolution of the average polluted layer resistance obtained for different ESDDs with the glass experimental model at an ambient temperature of 20°C.

The evolution of the polluted layer resistance clearly indicated the appearance of the dry band, which corresponded to a rapid increase in the resistance value. As expected, the resistance of the pollution layer was inversely proportional to the ESDD. When the ESDD and, consequently, the quantity of salt is high, the pollution layer absorbs more water, thus resulting in greater layer thickness. Furthermore, with more salt dissolution, thus resulting in a greater salt concentration, the conductivity of the pollution layer increases and its electrical resistance consequently decreases [60]. Moreover, as demonstrated in Figure 61, dry band formation was delayed as the ESDD increased, despite a lower pollution layer resistance resulting in a greater leakage current. This finding is attributable to the pollution layer absorbing more water with increasing ESDD, thus requiring more thermal energy

and time to evaporate. Hence, these results suggest that the dry band formation time is longer with higher levels of pollution under the same environmental conditions. Figure 62 presents the correlation of the ESDD and the average surface conductivity of the pollution layer, as previously determined [99], corresponding to the results in Figure 61. The average surface conductivity was determined with the average pollution layer resistance values obtained immediately before the appearance of the dry band. The average surface conductivity of the glass experimental model increased linearly with increasing ESDD, as demonstrated by the linear fitted curve obtained. The correlation obtained between surface conductivity and ESDD was in accordance with results previously obtained for real EPDM, porcelain, and RTV insulators [4].

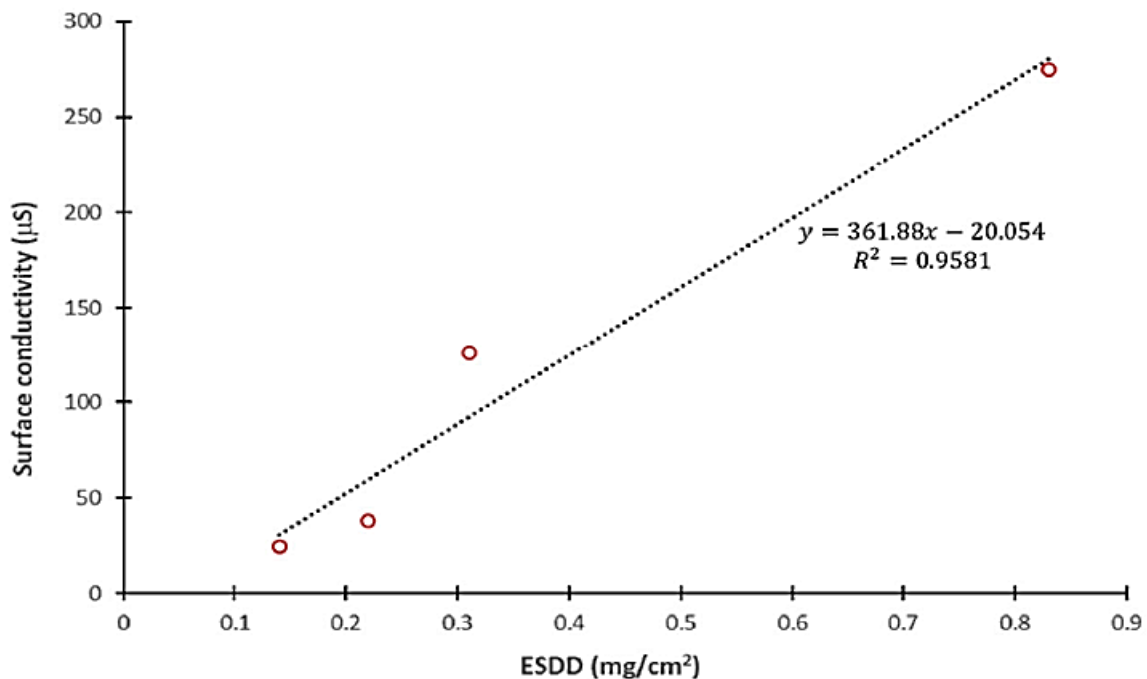


Figure 62 : Correlation of ESDD with average pollution layer surface conductivity in the glass experimental model at an ambient temperature of 20 °C.

5.5.2. INFLUENCE OF SUBSTRATE MATERIAL

Three experimental models made of Plexiglas, solidified liquid RTV (to simulate a composite insulator surface), and glass were polluted at the same average ESDD of 0.3 mg/cm^2 and tested under the same ambient temperature of 20°C . The results (Figure 62) indicated that the evolution of pollution layer resistance was strongly dependent on the substrate material. The average resistance value of the RTV substrate before dry band appearance was approximately five times greater than the average resistance of glass and approximately two times greater than that of Plexiglas. Moreover, the dry band on the Plexiglas model appeared more quickly than that on the RTV model and much more quickly than that on the glass model. Figure 64 presents the corresponding average surface layer conductivity and average surface temperature measured at the middle of the zone of dry band appearance with an IR camera. A strong correlation was observed between the maximum surface temperature and the appearance of the dry band. For the Plexiglas sample, the maximum average temperature reached 99.5°C , as compared with 81.7°C for the RTV substrate, and 33.7°C for the glass substrate.

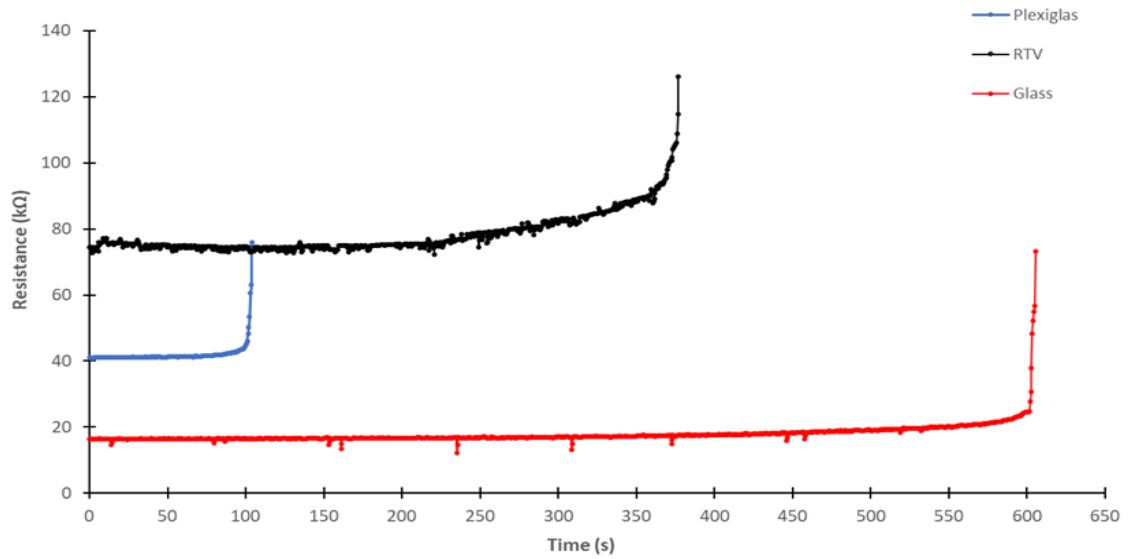


Figure 63 : Evolution of polluted layer resistance on different substrate materials, with an ambient temperature of 20 °C and average ESDD of 0.3 mg/cm².

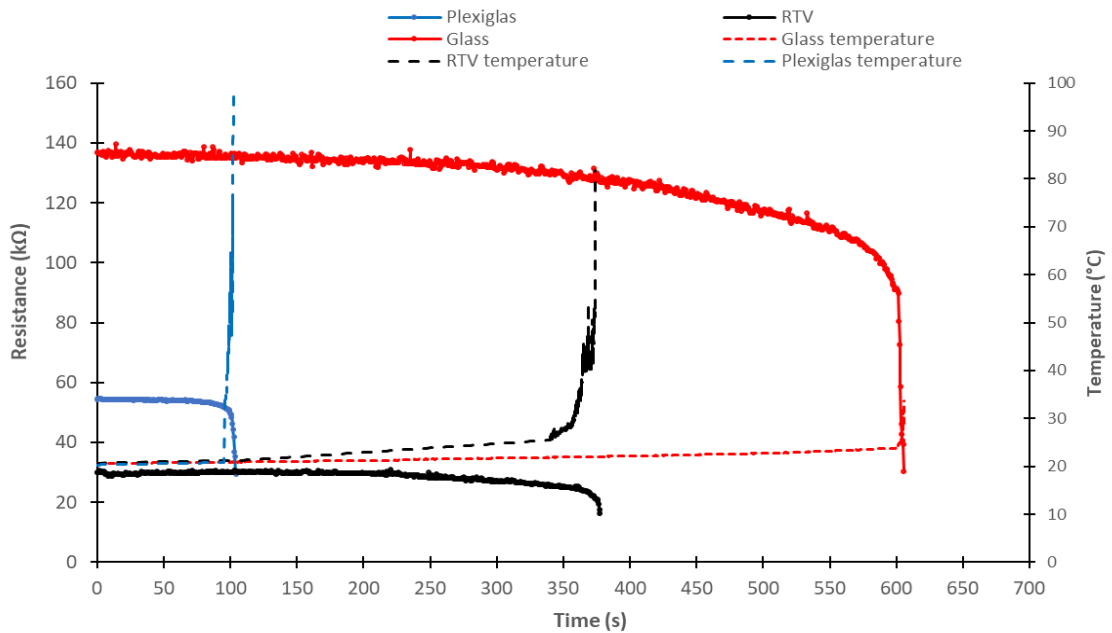


Figure 64 : Evolution of average pollution layer surface conductivity and average surface temperature in the middle of the dry band zone for different substrate materials, with an ambient temperature of 20 °C and average ESDD of 0.3 mg/cm².

5.5.3. INFLUENCE OF AMBIENT TEMPERATURE

This section presents the influence of the ambient temperature on the dry band appearance time. Several test series were performed for the three material substrates under four temperatures: 3 °C, 10 °C, 20 °C, and 30 °C. These temperatures simulated dry band formation under environmental conditions ranging from cold humid weather to warm humid weather. The results are presented in

Figure 65–Figure 67 for the Plexiglas, RTV, and glass substrates, respectively.

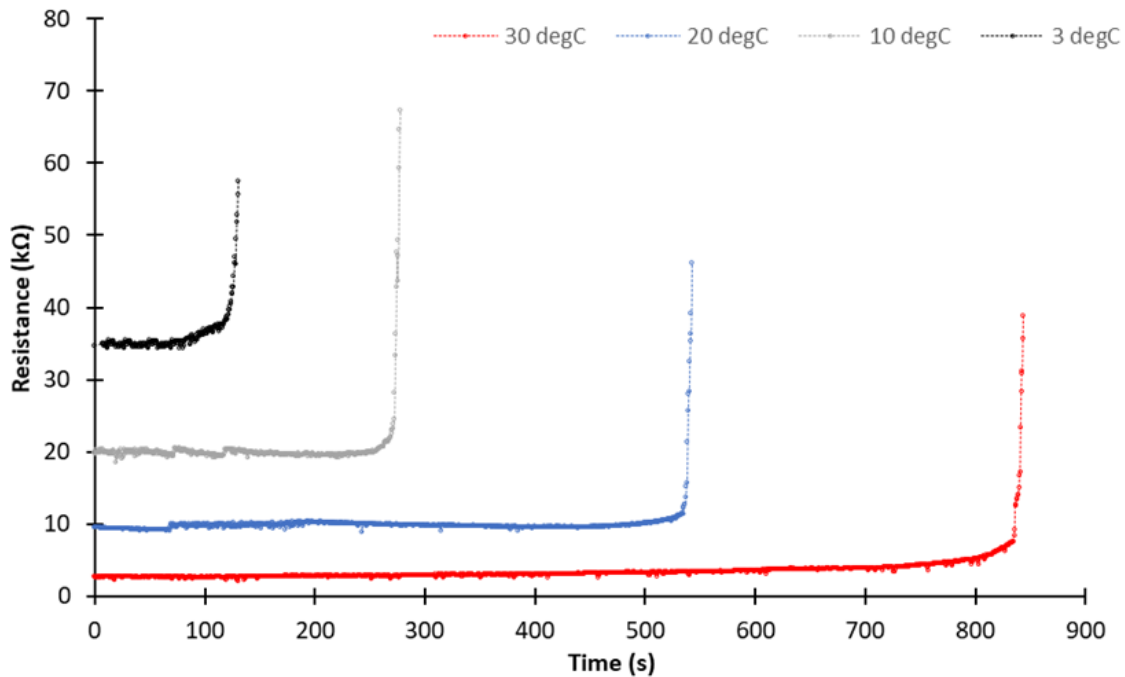


Figure 65 : Evolution of average polluted layer resistance as a function of the ambient temperature for Plexiglas substrate with an average ESDD of 0.96 mg/cm².

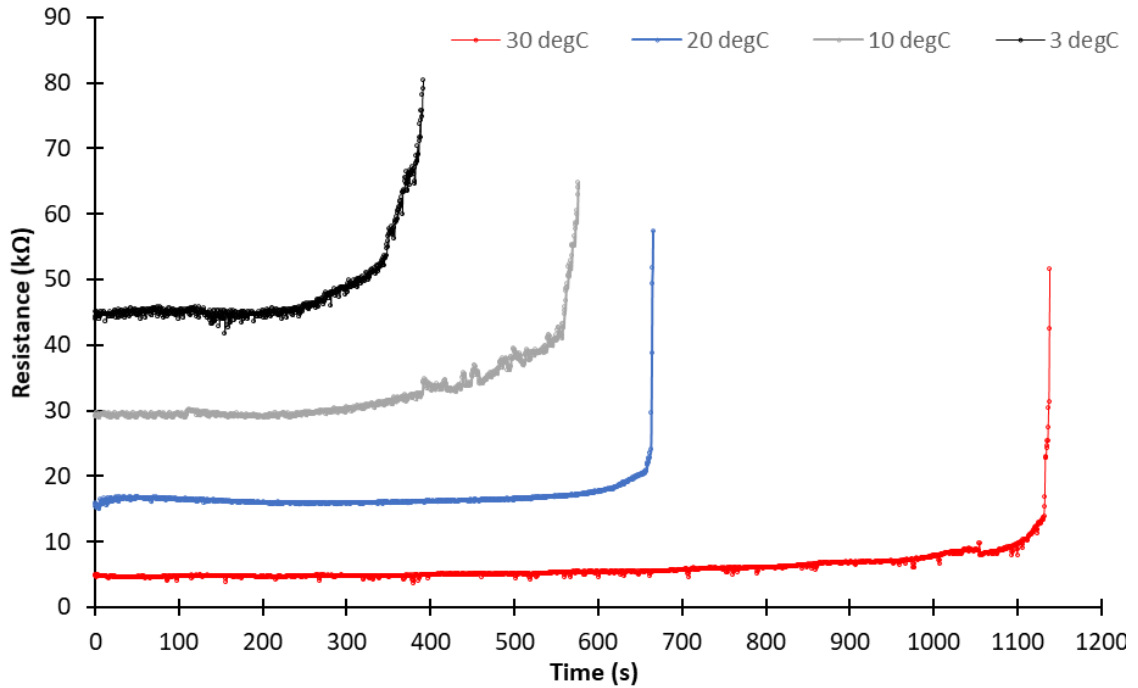


Figure 66 : Evolution of average polluted layer resistance as a function of the ambient temperature for glass substrate with an average ESDD of 0.81 mg/cm².

According to the evolution of the average pollution layer resistance (

Figure 65–Figure 67), the dry band appearance time significantly increased with decreasing ambient temperature. This observation was valid for the three substrate materials and for different ESDDs. The influence of temperature on the dry band appearance time was explained by two phenomena. First, the amount of water absorbed during the humidification phase decreased with decreasing ambient temperature. To demonstrate this phenomenon, we measured the water mass absorbed during the HV test with different ambient temperatures and pollution layer masses. The results (Figure 68) demonstrated that the mass of absorbed water for the same pollution layer mass (or ESDD) significantly increased with increasing ambient temperature. In addition, for the same ambient temperature, the absorbed

water mass increased with increasing pollution layer mass. These results are in accordance with the results obtained from a mathematical model of pollution layer humidification proposed in [60].

The second phenomenon was the rate of water evaporation of the pollution layer, which is directly associated with the temperature gradient between the surface and the ambient air via the Clausius–Clapeyron equation, as described in [93] and in the experimental investigation presented in [61]. As reported in [61], the initiation of dry band formation occurred when the power dissipated in the pollution layer became sufficient to raise the surface temperature by less than 1 °C above the ambient temperature. Hence, this condition can be more rapidly reached when the ambient temperature decreases, thereby promoting faster evaporation.

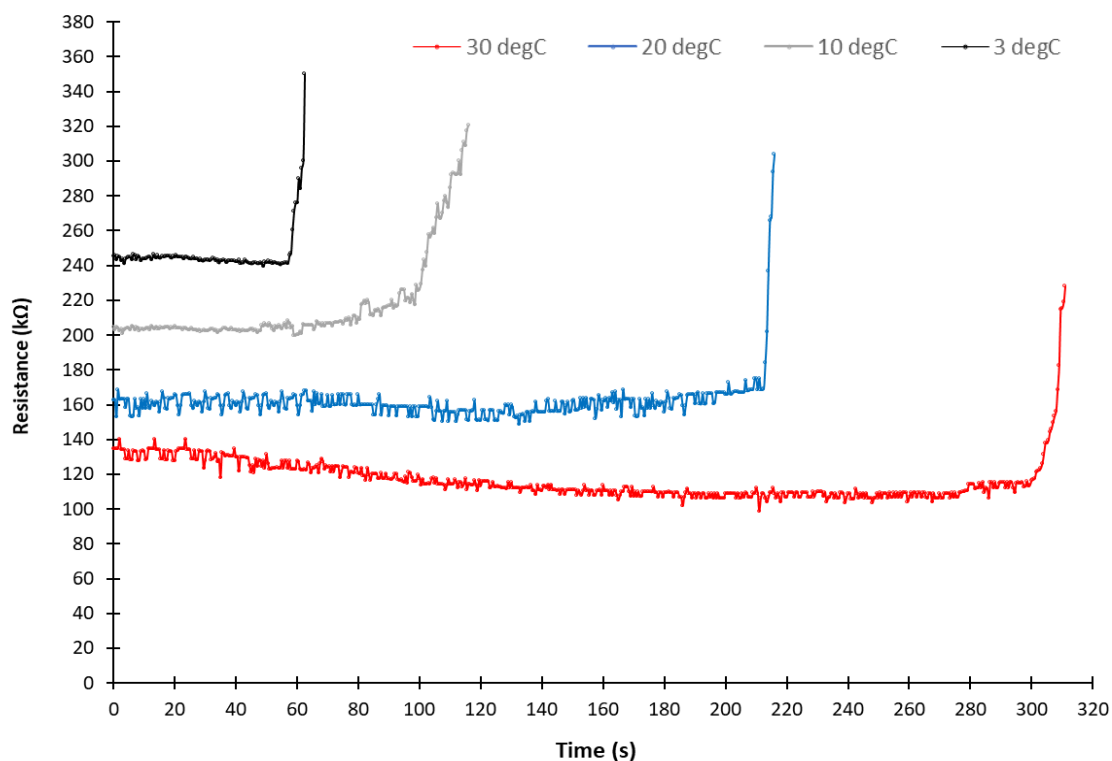


Figure 67 : Evolution of average polluted layer resistance as a function of the ambient temperature for RTV substrate with an average ESDD of 0.21 mg/cm²

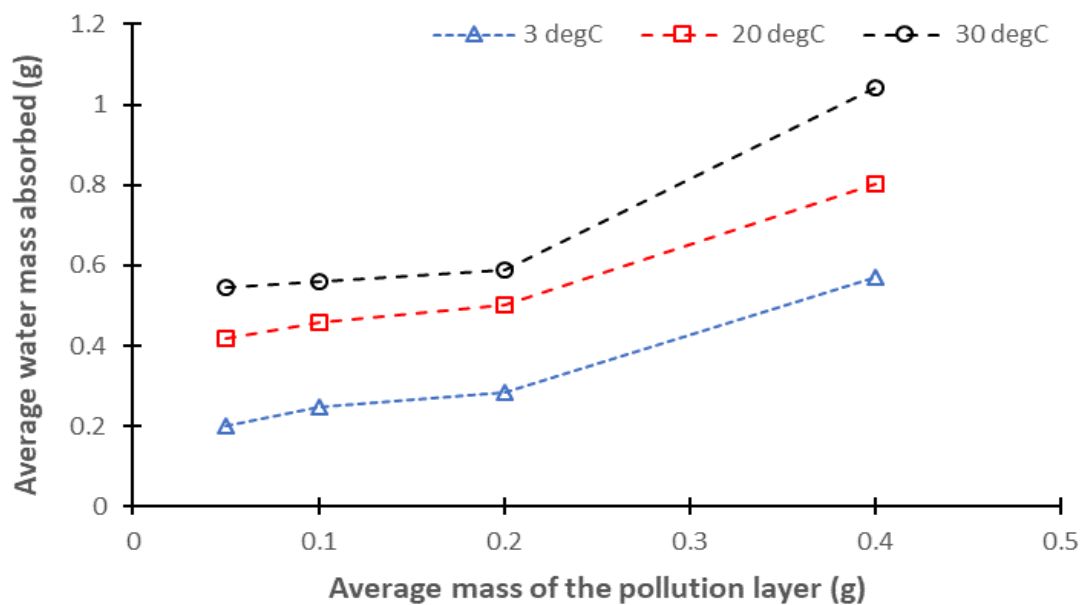


Figure 68 : Evolution of the average water mass absorbed by the pollution layer during the HV test as a function of the average mass of the pollution layer, under different ambient temperatures.

Figure 69 presents the evolution of the average surface resistance of the pollution layer before dry band appearance as a function of the ambient temperature, as well as the corresponding fitted curves obtained for the three substrates. As expected, the surface conductivity increased with increasing temperature for all substrates. However, this increase was more pronounced with the Plexiglas and glass substrates than with the RTV substrate. For the Plexiglas and glass substrates, an exponential fitted curve was obtained, in contrast to the linear fitted curve for the RTV.

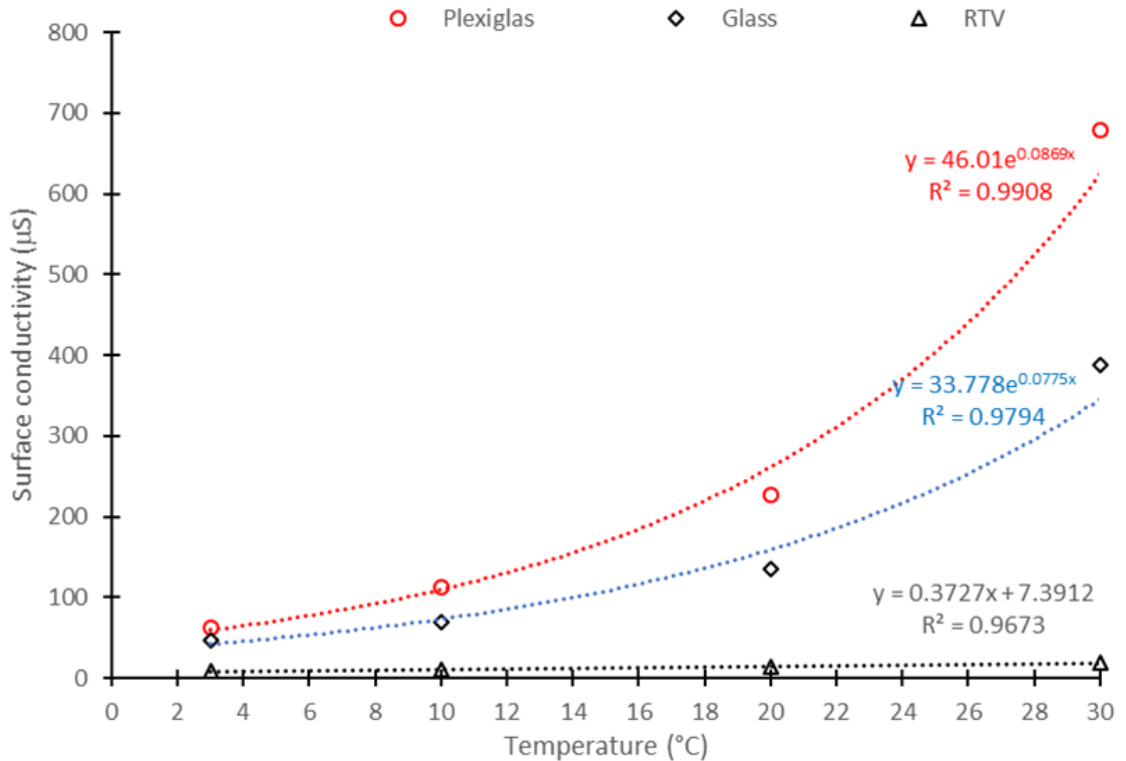


Figure 69 : Evolution of the average polluted layer surface conductivity as a function of the ambient temperature for Plexiglas, glass, and RTV substrates with ESDDs of 0.96, 0.81, and 0.21 mg/cm², respectively.

5.6 AXIAL E-FIELD EVOLUTION ABOVE THE DRY BAND DURING DRY BAND FORMATION

5.6.1. EXPERIMENTAL E-FIELD EVOLUTION ABOVE AN ARTIFICIAL DRY BAND

We first measured the evolution of the axial component of the E-field above a dry band, which was artificially created on the experimental model, as explained previously and illustrated in Figure 60. A 2 kV_{rms} voltage was applied after the pollution layer had initially dried, and the axial E-field evolution was recorded during the humidification process. The axial E-field evolution was measured for three dry band widths of 6.4 mm, 12.8 mm, and 18 mm, corresponding to the average widths of dry bands during the formation process obtained in our previous work [99] . The EO probe was positioned 5 mm above the surface. With a diameter of 5 mm, the axial E-field was assumed to have been measured at 7.5 mm above the experimental model surface. The results obtained for the three dry band widths artificially created on the Plexiglas model are presented in Figure 70. The axial E-field evolution for each dry band was determined by the average obtained from three different tests with the same dry band width.

The results (Figure 70) indicated that the evolution of the axial E-field during the humidification process followed the same pattern for the three dry band widths. In particular, the E-field value was initially constant and ostensibly of the same order (between 0.032 and 0.053 kV/cm) for the three dry bands when the humidification persisted until a certain level of conductivity was reached in the pollution layer. At that time, between 40 and 60 s, the axial E-field value started to increase rapidly

until saturation was reached. The maximum or saturation value reached by the axial E-field was obtained when the voltage drop along the dry band was near the 2 kV_{rms} applied voltage. This finding also explains why the maximum axial E-field value decreased as the dry band width increased.

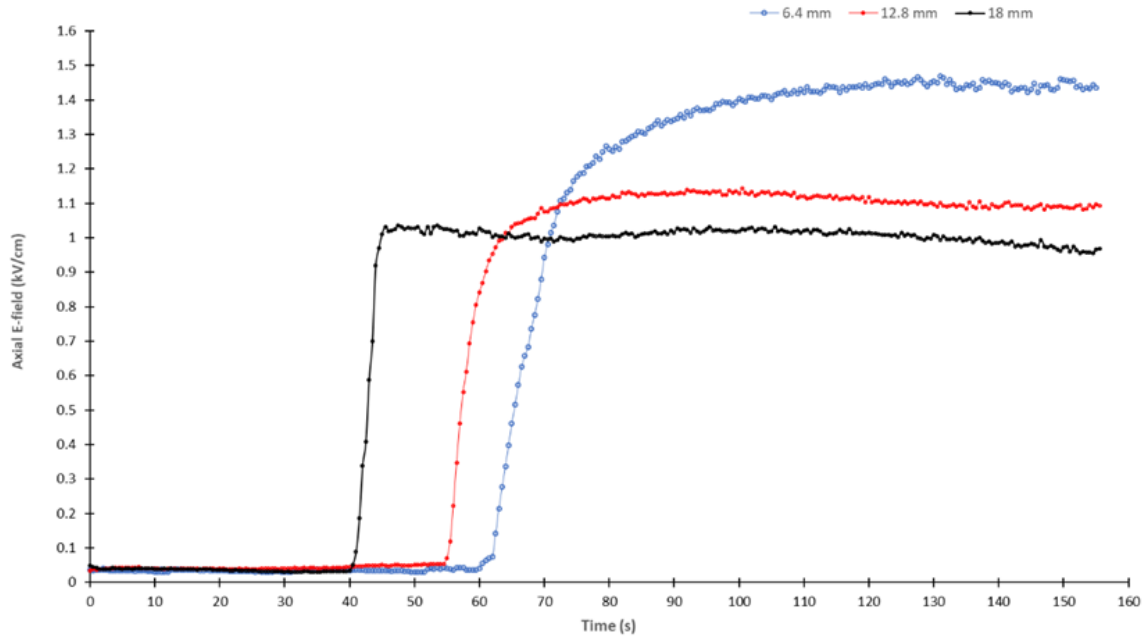


Figure 70 : Evolution of the average axial E-field in the center of the dry band at 7.5 mm from the surface, obtained at an ambient temperature of 20 °C for Plexiglas substrate with an average ESDD of 0.52 mg/cm².

Table 10 presents the experimental value of the axial E-field and the average value obtained at saturation when the voltage drop along the dry band was equal to the applied voltage. The experimental results presented in Table 10 also include the maximum and minimum values of the axial E-field obtained during dry band formation.

Table 10 : Experimental values of the axial E-field obtained for the EO sensor positioned at the center of the dry band at 5 mm from the surface.

Dry Band Width (mm)	E-Field Minimum (kV/cm)	E-Field Maximum (kV/cm)	Average E-Field (kV/cm)
6.4	1.11	1.47	1.44
12.8	0.97	1.14	1.12
18	0.97	1.04	1.01

5.6.2. E-FIELD SIMULATIONS WITH AN ARTIFICIAL DRY BAND

Using controlled dry band widths as well as controlled experimental conditions also enabled numerical simulation of the experimental models to determine the value of the axial E-field along the dry band. The simulations were performed in three dimensions to correctly simulate the experimental model inside the climatic chamber (Figure 71a), which features a grounded metallic envelope (0 V potential). Figure 71b presents a closed view of the Plexiglas experimental model with a dry band with an 18 mm width. All the simulations were performed using the general commercial software Comsol Multiphysics®, version 6.0, based on the finite element method, which is well adapted to simulation of the E-field around a polluted insulator [91-93, 97]. The simulation parameters used are presented in **Erreur! Source du renvoi introuvable..**

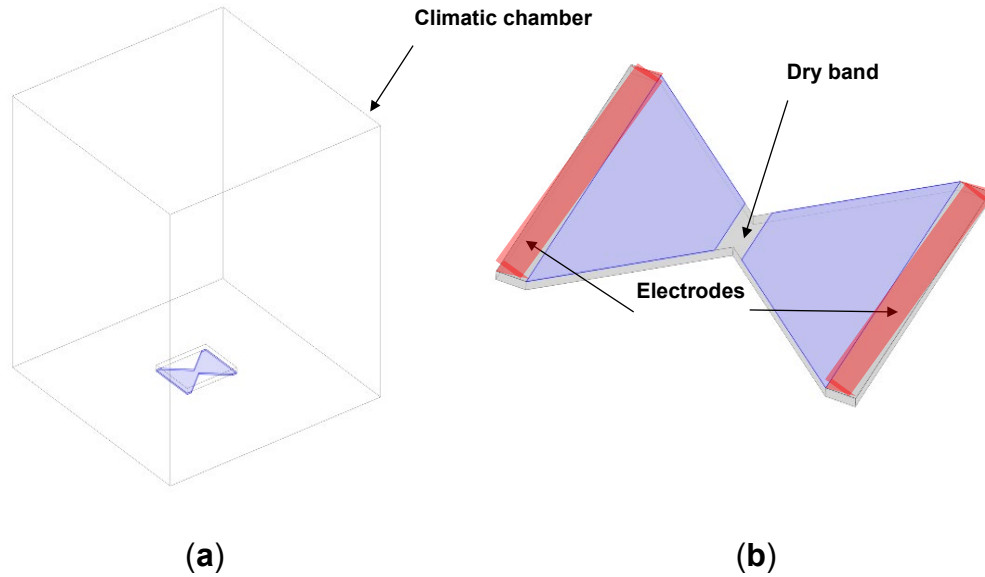


Figure 71 : Numerical model with (a) the entire model with the climatic chamber and (b) a closed view of the experimental model with an artificial dry band with an 18 mm width.

The value of the relative permittivity of the pollution layer was fixed at 80 as it can be regarded as a perfect electrolyte solution when fully saturated with water [104, 105].

Table 11 : Simulation parameters.

Materials	Relative Permittivity	Conductivity
		(S/m)
Air	1	0
Plexiglas	3.2	10^{-16}
Pollution layer	80	variable

To compare the simulation with the experimental results, we computed the axial E-field distribution along three reference lines: one vertical line situated in the

middle of the dry band and extending from the surface of the model to a distance of 10 mm; one horizontal line 18 mm in length situated at 7.5 mm from the surface and extending across the middle of the dry band; and one horizontal line 30 mm length situated at 7.5 mm from the model surface and extending along the middle of the dry band. The results obtained for the three dry band widths (6.4, 12.8, and 18 mm) are presented in Figure 72-Figure 74, respectively. As shown in Figure 72, the axial E-field value decreased rapidly as the distance from the model surface increased and the width of the dry band decreased. In addition, as shown in Figure 73, the axial E-field had a higher value on the side of the HV value than on the side of the ground. However, along the middle of the dry band, the evolution of the axial E-field value in Figure 74 did not appear to significantly vary.

Table 12 presents the numerical results including the vertical and horizontal axial E-field values obtained numerically. The values were computed at the center of the dry band at 7.5 mm and also at ± 1 mm from the center of the dry band in the vertical and horizontal directions across the dry band.

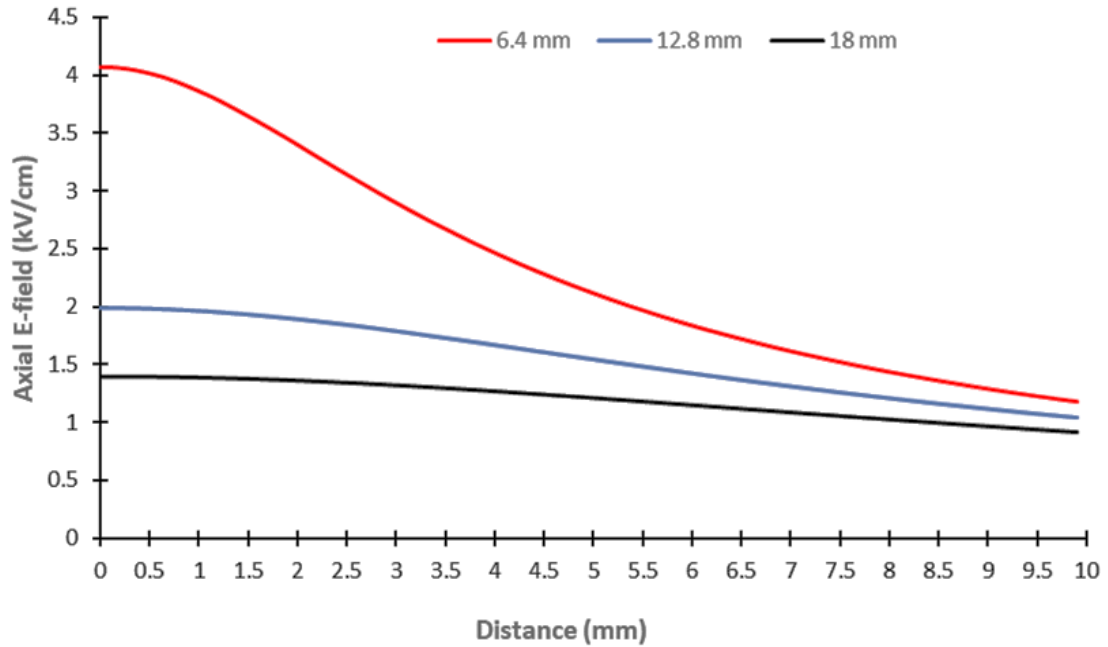


Figure 72 : Vertical distribution of the axial E-field in the middle of the artificial dry band as a function of dry band width.

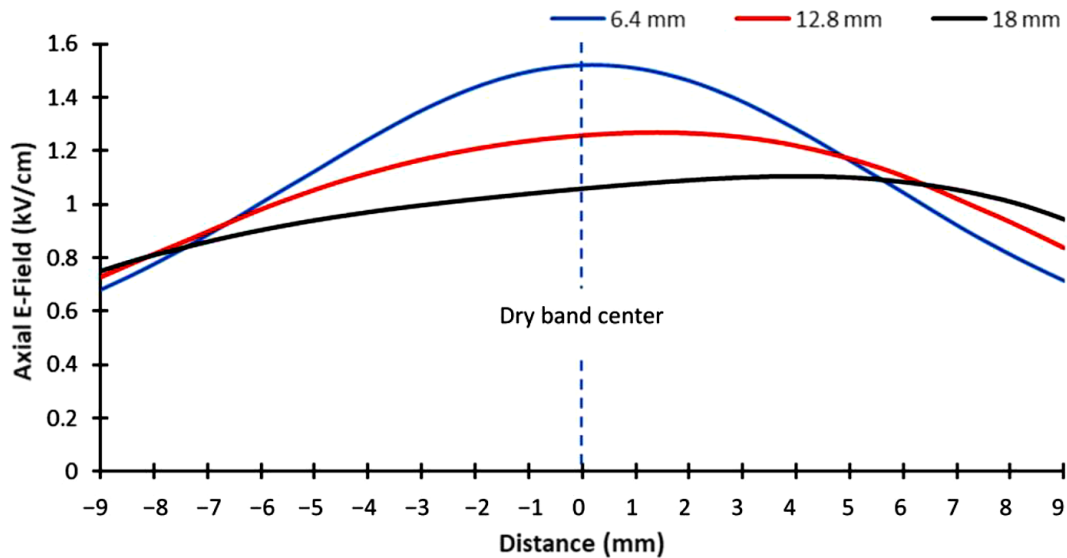


Figure 73 : Horizontal distribution of the axial E-field across the middle of the artificial dry band at a distance of 7.5 mm from the surface as a function of dry band width.

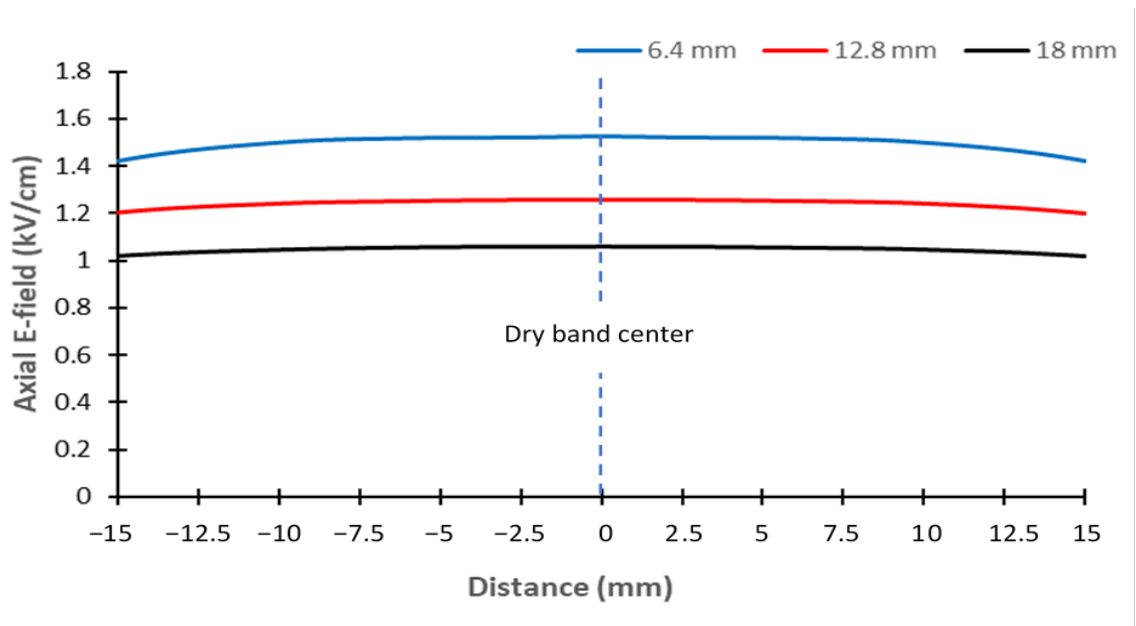


Figure 74 : Horizontal distribution of the axial E-field along the middle of the artificial dry band at a distance of 7.5 mm from the surface as a function of dry band width.

Table 12 : Values of the axial E-field at ± 1 mm around the center of the dry band at 7.5 mm from the surface.

	Axial E-Field at	Axial E-Field	Axial E-Field at
Orientation	−1 mm	at 0 mm	+1 mm
	(kV/cm)	(kV/cm)	(kV/cm)
6.4 mm dry band width			
Vertical	1.72	1.52	1.36
Horizontal	1.50		1.51
12.8 mm dry band width			
Vertical	1.37	1.26	1.16
Horizontal	1.24		1.27
18 mm dry band width			
Vertical	1.12	1.06	1.00
Horizontal	1.03		1.07

The results in Table 12 demonstrate that the axial E-field value varied more significantly in the vertical direction with a small dry band width. However, the axial E-field variation appeared to be more important in the horizontal direction with increasing dry band width. Comparison of the results in Tables Table 10 and Table 12 indicates good agreement, given that the position of the EO probe above the surface was not exact and varied by approximately ± 1 mm. Hence, the discrepancies between the numerical axial E-field values at the centers of the dry bands (0 mm) and the experimental average values were 5.6%, 12.5%, and 5.0% for 6.4 mm, 12.8 mm, and 18 mm, respectively. To better visualize the results, Figure 75 presents a

comparison between the experimental and numerical axial E-field values, with the error bars corresponding to the maximum discrepancy obtained, which was 12.5%. Moreover, Figure 75 presents the linear regressions obtained for both experimental and numerical results. As can be observed, the axial E-field value decreased linearly with the increase in the dry band width.

We conducted a final simulation of the axial E-field evolution at the center of the dry band, 7.5 mm from the experimental model surface, as a function of the surface conductivity of the pollution layer. The results obtained for the three dry band widths are presented in

Figure 76. The numerical results in

Figure 76 show that the evolution of the axial E-field followed the same behavior as that in the experimental results in Figure 70. Because the surface conductivity of the pollution was very low, the axial E-field values for the three dry band widths had similar values of approximately 0.052 kV/cm. This value is similar to the experimental values of approximately 0.04 kV/cm. As the humidification of the pollution layer increased, its conductivity and the voltage drop along the dry band increased. However, the numerical results demonstrated that the surface conductivity of the pollution layer did not need to be high (approximately 1.10^{-21} S) to obtain the maximum axial E-field value. This result explains why the maximum value of the axial E-field was obtained rapidly in the experiments during the humidification process of the pollution layer.

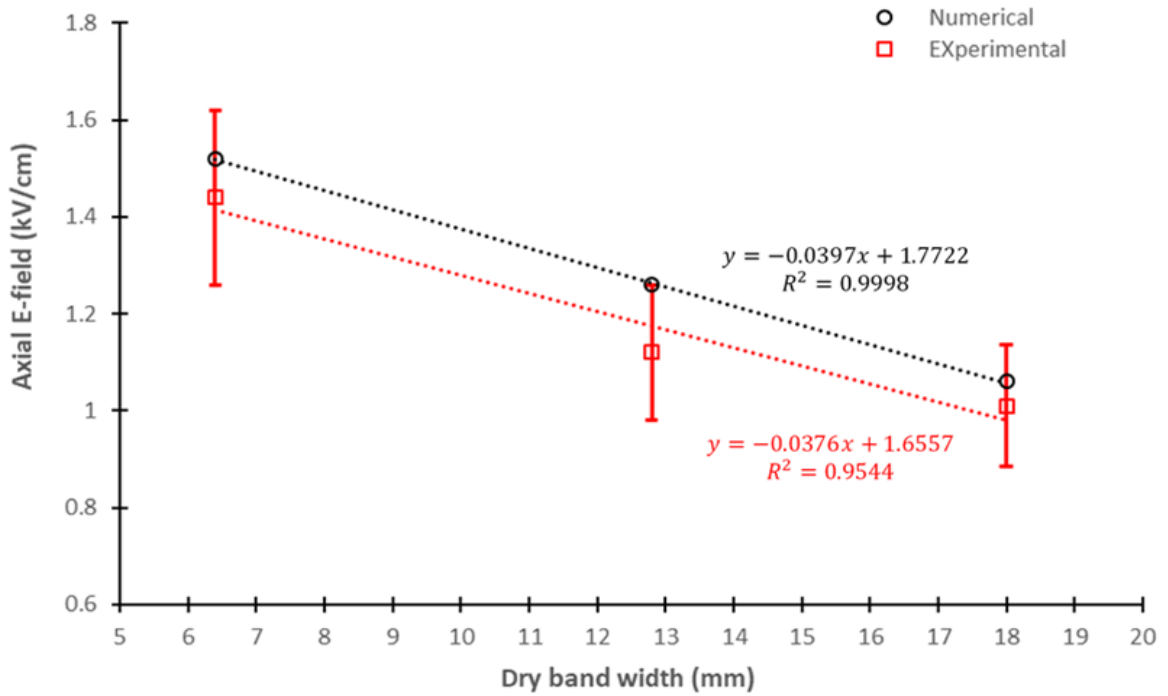


Figure 75 : Comparison of the numerical and experimental axial E-field values obtained in the middle of the artificial dry band at a distance of 7.5 mm from the surface.

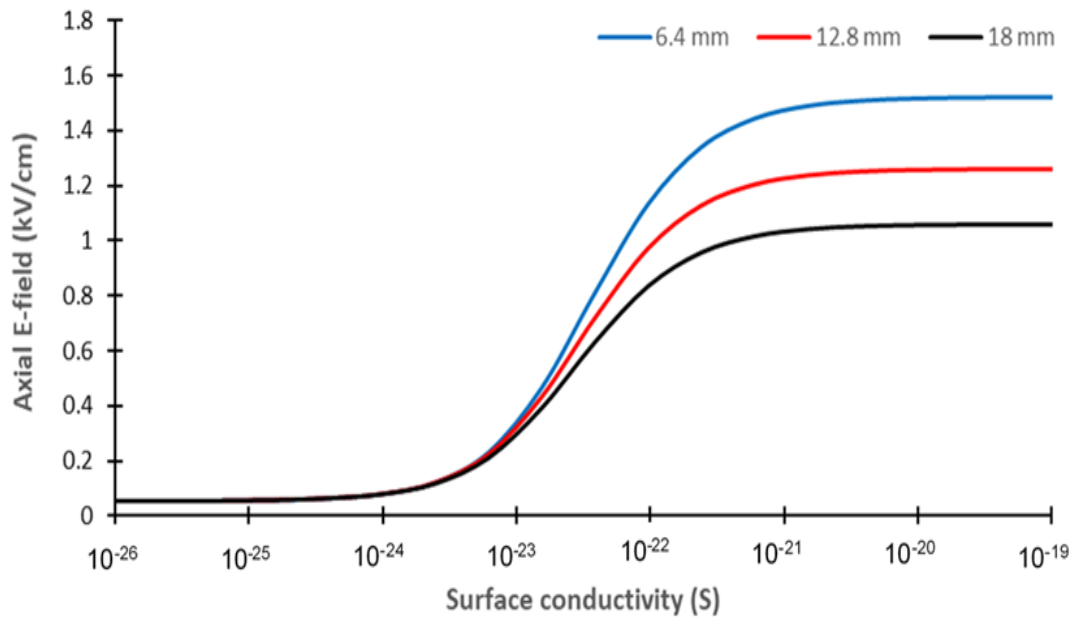


Figure 76 : Evolution of the axial E-field along the middle of the artificial dry band at a distance of 7.5 mm from the surface, as a function of dry band surface conductivity.

5.6.3. EXPERIMENTAL E-FIELD EVOLUTION DURING DRY BAND FORMATION

The E-field evolution was experimentally measured during dry band formation, according to the experimental procedure in Section 5.4.4. The 2 kV_{rms} voltage was applied after 810 s of humidification, and the EO probe was positioned at the center of the experimental model in the zone of dry band formation, as illustrated in Figure 59b, and at 5 mm above the surface. As described previously, this position is equivalent to measuring the axial E-field at 7.5 mm from the surface of the experimental model. The EO probe was positioned 5 mm from the surface to avoid pollution deposition on the probe during dry band formation, as was observed during preliminary measurements. In addition, in contrast to the experimental tests conducted with an artificial dry band, in this experiment, the primary challenge was exactly positioning the EO probe near the middle of the dry band, even if the area of dry band formation was known. As demonstrated in our previous work [99], the proposed experimental model enabled repeated correct simulations of dry band formation in a very small zone. However, the width and exact geometry of the dry band exhibited a random behavior that was difficult to control. Therefore, the measurement of the axial E-field during dry band formation was difficult to reproduce under the same conditions with significant repeatability. Despite this constraint, we were able to record the evolution of the axial E-field. The results are presented in Figure 77 for the RTV substrate with an ESDD of 0.36 g/cm² at an ambient temperature of 20 °C. Figure 78 presents another axial E-field evolution during the

dry band formation obtained for the glass substrate with an ESDD of 0.16 g/cm^2 at an ambient temperature of 20°C .

As shown in Figures Figure 77 and Figure 78, the evolution of the axial E-field is similar to that obtained for the artificial dry band tests in Figure 70. Indeed, even with high humidification of the pollution layer, the axial E-field value remained very low, at approximately 0.05 kV/cm . However, as the dry band began to appear, a rapid increase in the axial E-field was observed as a maximum or saturation value was reached. As explained for the artificial dry band tests, this maximum value was obtained when the voltage drop along the dry band was equal to the applied voltage. Moreover, the rapid increase in the axial E-field correlated with the rapid increase in pollution resistance, thus confirming that this was due to the appearance of the dry band.

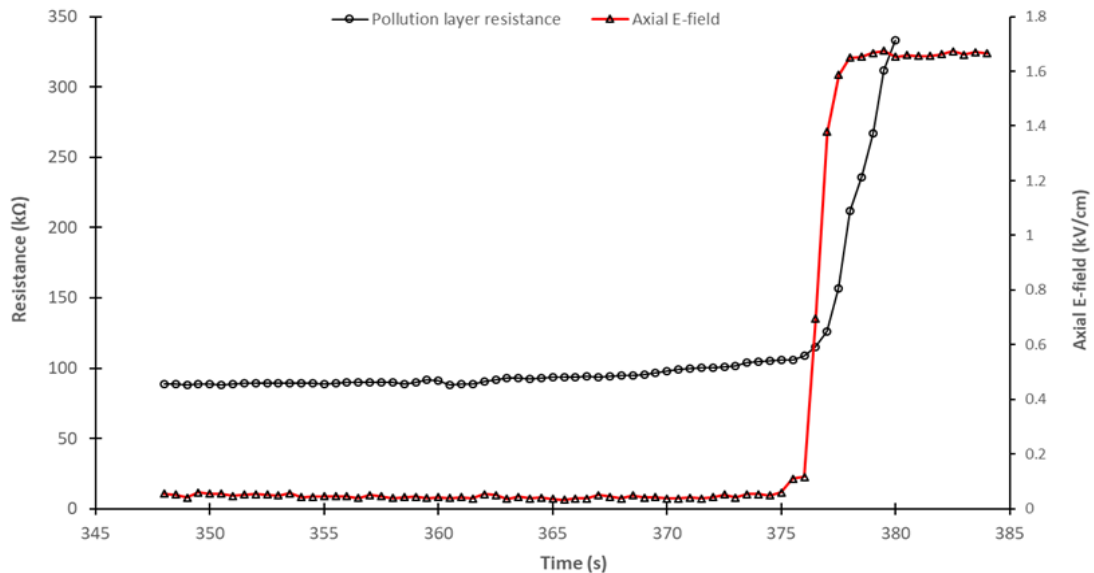


Figure 77 : Evolution of the axial E-field and pollution layer resistance during the formation of a dry band with the RTV experimental model at an ambient temperature of 20°C and an ESDD of 0.36 mg/cm^2 .

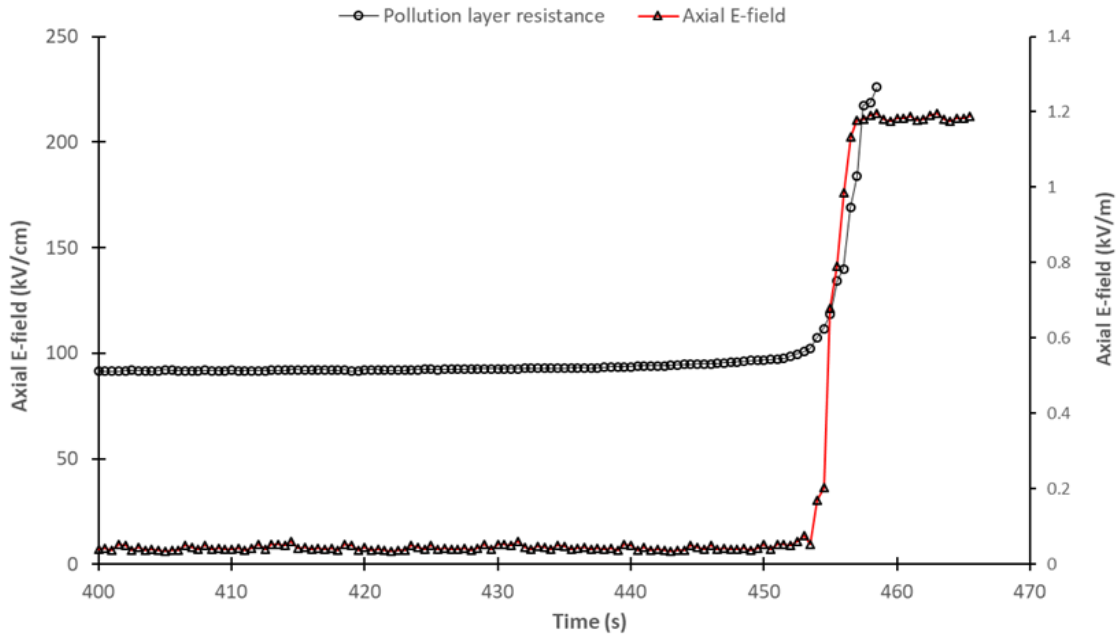


Figure 78 : Evolution of the axial E-field and pollution layer resistance during the formation of a dry band on glass substrate with an ambient temperature of 20 °C and ESDD of 0.16 mg/cm².

5.7 DISCUSSION

5.7.1. INFLUENCE OF PARAMETERS ON DRY BAND FORMATION

In general, the evolution of the pollution layer resistance obtained for the different experimental tests demonstrated that dry band formation occurs rapidly, within approximately 10 s. This observation is in agreement with previous studies, both experimental and numerical, on polluted insulators, in which the appearance time of the dry band was 1.6–19 s [93, 96]. The rapid increase in the pollution layer resistance observed in Figure 63, and

Figure 65–Figure 67 is directly correlated with a rapid increase in temperature (see Figure 64) in the middle of the sample where the dry band is formed. This rapid increase occurs at the moment the dry band formation is completed, along the narrow part of the sample where the leakage current density is the highest, as explained in detail in [99] . When the formation of the dry band is completed, the equivalent resistive circuit is interrupted and almost becomes capacitive, with a drastic reduction in the current intensity flowing in the pollution layer, leading to a significant increase in the pollution layer resistance.

The ESDD (Figure 61) significantly influenced the appearance time of the dry band, which increased with increasing ESDD. Simultaneously, the pollution layer resistance decreased with an increase in the ESDD. However, in all experimental tests, the humidity level, ambient temperature, and applied voltage were consistent. The rapid dry band formation with low ESDD was defined not only by the leakage current intensity but also by the humidification process of the pollution layer, as explained previously. This aspect was confirmed by the results in Figure 68, in which the average water mass absorbed by the pollution layer increased with the increasing average mass of the pollution layer, and consequently increasing ESDD. These observations may also explain the increase in flashover voltage of polluted insulators with decreasing ESDD reported in several studies [87]. The flashover process of polluted insulators is dynamic and complex, and it is governed principally by the surface conductivity, leakage current, and arc propagation [93]. Generally, experimental and numerical investigations have not considered the influence of dry band formation, which can be significant in the complex process of flashover.

Another notable result was the influence of the substrate material. A comparison of the results in Figure 10 indicated that, for the same ESDD and humidity level, the pollution layer resistance was significantly higher for the RTV substrate than for the Plexiglas and glass substrates. As previously explained [32, 94], Plexiglas and glass are considered inert materials, whereas RTV is considered an active material because of its hydrophobicity recovery capability. This capability explains the average pollution layer resistance value obtained for the RTV, which was approximately 4.4 times and 1.9 times higher than that of glass and Plexiglas, respectively (Figure 63). These results were of the same order as those previously obtained for RTV, EPDM, and porcelain insulators [32, 94].

Another notable finding was the influence of the substrate material on the appearance time of the dry band (Figure 63 and Figure 64). The differences observed among substrates are attributable to the differences in the thermal conductivity K of each material [106, 107]. For glass, K is approximately 1.4 W/m.K, a value much higher than those of RTV (approximately 0.29 W/m.K) and Plexiglas (approximately 0.19 W/m.K). This conclusion appears to be justified by the results in Figure 64, in which the maximum average temperature reached at the middle of the dry band was highest for Plexiglas (99 °C), followed by RTV (82 °C) and glass (34 °C). The value obtained for the glass substrate seems to be in accordance with experimental measurements performed on a real wet contaminated ceramic insulator [108]. These observations suggested that the higher thermal conductivity of the glass substrate decreased the temperature at the surface of the pollution layer by allowing for better thermal conduction through the sample thickness. Consequently, a lower surface temperature resulted, as confirmed by the results in

Figure 64, thus delaying dry band formation. The findings also confirmed that the appearance time of the dry band was higher for RTV than for Plexiglas, which has a lower thermal conductivity. Therefore, we concluded that a material with higher thermal conductivity can delay the appearance of the dry band by more efficiently dissipating the increased temperature inside the dry band zone. Thus, the time delay may be sufficient to decrease the surface conductivity of the pollution layer under rain conditions, for example, to avoid the flashover of the insulator.

Regarding the effects of ambient temperature, our results suggested that the appearance time decreased significantly with decreasing ambient temperature, as demonstrated in [60, 61]. However, the results also demonstrated that the resistance of the pollution layer markedly increased as the temperature decreased. The flashover of polluted insulators is a complex phenomenon involving the presence of dry bands and an equilibrium between the applied voltage and the pollution layer resistance, thus inducing partial arc propagation. As demonstrated by several studies, the flashover voltage decreases with decreasing temperature. In general, this decrease is primarily attributed to the decrease in pollution layer conductivity with temperature [9, 87, 89]. Hence, from the results obtained in Figures Figure 66–Figure 68, we propose that the early dry band formation may also contribute to a decrease in the flashover of polluted insulators under low-temperature ambient temperatures. The results in Figures Figure 68 and Figure 69 also demonstrate that dry band formation is governed by dependent parameters including the ambient temperature, humidification process, leakage current, and heat exchange between interfaces.

As proposed in [93], the thermal energy balance in the pollution layer in the absence of partial arcs at the insulator surface can be expressed as follows [93]:

$$W_{evaporation} = W_{leakage} - W_{convection} - W_{conduction} \quad (60)$$

where

- $W_{convection}$ is the thermal convection energy at the pollution surface, which is the same for the three material substrates with the same geometry;
- $W_{evaporation}$ is the energy needed to evaporate the water of the polluted layer, governed by the Clausius–Clapeyron equation and dependent on the pollution layer temperature;
- $W_{conduction}$ is the thermal conduction energy, dependent on the thermal conductivity K of each material;
- $W_{leakage}$ is the leakage current injection energy, directly dependent on the pollution layer resistance.

$W_{evaporation}$ is the thermal energy responsible for dry band formation dependent on the pollution layer temperature. Under the same experimental conditions, $W_{convection}$ can be considered to be the same for the three substrates. In that particular situation and from Equation (61), it can be posited that $W_{evaporation}$ depends on the difference $W_{leakage} - W_{conduction}$, where $W_{conduction}$ is the only thermal energy directly affected by the substrate material via its thermal conductivity K .

From the results presented in Figures Figure 63 and Figure 64, $W_{leakage}$ is higher for the glass substrate compared to Plexiglas and RTV as the pollution layer resistance of glass is lower. However, as the results in Figure 63 indicate, dry band formation

for the glass is delayed compared to that for RTV and Plexiglas. Consequently, the glass substrate must present a higher value of $W_{conduction}$ in order to maintain low $W_{evaporation}$ compared to RTV and Plexiglas. To achieve this, the glass must have a higher thermal conductivity K .

5.7.2. STUDY OF AXIAL E-FIELD EVOLUTION DURING DRY BAND FORMATION

The use of a special EO sensor enabled, to our knowledge, the first study of the evolution of the E-field during dry band formation. The first series of E-field measurements performed on artificial dry bands allowed us to study the evolution of the axial E-field during the humidification period of the pollution layer under applied voltage. As shown in Figure 70, the axial E-field at the center of the dry band increased with decreasing dry band width, in agreement with the results presented in several numerical studies [15, 32, 91-95]. These results are also in good agreement with the numerical results in Tables Table 10 and Table 12, given that the exact position of the EO probe can vary by ± 1 mm with respect to the evaluation point of the axial E-field in the numerical model. This good agreement is confirmed by the results outlined in Figure 75, proving that the axial E-field values decrease linearly with the increase in dry band width. The significant discrepancy between numerical and experimental results also confirmed that the EO probe can serve as an adequate and useful tool for studying the influence of dry bands on the dielectric behavior of real polluted insulators. The results also demonstrated that the increase in the voltage drop along the dry band is a very fast process that rapidly increases

the axial E-field until a maximum or saturation value is reached. This value corresponds to the situation in which the voltage drop along the dry band equals the applied voltage. The rapid increase in the axial E-field occurs quite rapidly in the humidification period with respect to the 810 s required to obtain the maximum surface resistance of the pollution layer, as demonstrated in our previous work [99]. Therefore, the pollution layer need not be very humid to obtain the maximum voltage drop along the dry band. This observation is confirmed by the experimental results in Figure 70 and numerical results in

Figure 76. These results allow the conclusion to be drawn that the surface conductivity of the pollution layer does not need to be very high, only approximately 10^{-21} S, to permit the maximum value of the axial E-field to be obtained at the center of the dry band.

Finally, during dry band formation, we observed that the axial E-field evolution was similar to that obtained with the artificial dry band. The similarity was observed both in the evolution of the axial E-field and in the maximum value obtained once the dry band was created. The rapid increase in the axial E-field correlated with the rapid increase in pollution layer resistance as well as the surface temperature. Consequently, in terms of E-field behavior, experimental models with artificial dry bands can serve as a simple way to study E-field behavior inside dry bands. Such studies can be used to determine the minimum E-field value for initiation of a partial arc along the dry band. These results may be useful in validating numerical models.

5.8 CONCLUSION

The simple geometry of the proposed experimental model enabled the parameters influencing dry band formation on polluted insulators to be examined. We studied the influence of Plexiglas, RTV, and glass materials with the same experimental model geometry on pollution layer parameters, such as the resistance and appearance time, which characterized dry band formation as well as the evolution of the axial E-field. A major advantage of the proposed experimental model is that such studies would be difficult to perform with real insulators. Moreover, the proposed experimental tests do not require costly test equipment, thus providing a substantial advantage for companies wishing to develop and test new materials and surface designs for improving insulator performance under polluted environments. Moreover, the proposed model enabled direct measurement and the first reported examination of the evolution of the axial E-field above the dry band during dry band formation with the use of an EO sensor.

The different experimental results obtained demonstrated that our simple geometric model provides a simple and efficient method to evaluate the effects of substrate material and environmental parameters (ambient temperature and ESDD) on polluted insulators. All of our results were in accordance with findings in the literature obtained on real insulators. In particular, for the same experimental conditions, the material substrate significantly influenced the surface resistivity of the pollution layer as well as the appearance time of the dry band. As the thermal conductivity of the material increased, the appearance time of the dry band also

increased. We further demonstrated that the dry band's appearance was delayed as the ambient temperature and ESDD increased.

This study of the evolution of pollution layer resistance and axial E-fields highlights that dry band formation is a rapid process, as also described in the literature. The dry band's appearance is characterized by a rapid and correlated increase in the pollution resistance and the axial E-field. The axial E-field reaches a maximum value when the voltage drop along the dry band equals the applied voltage, and it consequently directly influences the dry band width.

Finally, the results presented herein provide a new understanding of the influence of several parameters on dry band formation along polluted ceramic and non-ceramic insulators. In future work, the proposed experimental model may be used to study the parameters influencing partial arc formation along dry bands and subsequent propagation until the occurrence of flashover. The proposed experimental model also provides a tool for validating numerical models of dry band formation and arc propagation to flashover. It offers a simpler geometry than that of real insulators, allowing for easy material substrate modification without requiring sophisticated research infrastructure. Some of the proposed applications of the proposed experimental model will be presented in our future paper involving the validation of a numerical model of dry band formation.

CHAPITRE 6

A SIMPLE THERMOELECTRICAL SURFACE APPROACH TO NUMERICALLY STUDY DRY BAND FORMATION ON POLLUTED INSULATORS

Energies 2025, 18, 2412.

<https://doi.org/10.3390/en18102412>

Submission received: 27 March 2025 / Revised: 29 April 2025 /

Accepted: 6 May 2025 / Published: 8 May 2025

Author Contributions: Numerical simulations were performed by M.-A.A. and K.G. M.-A.A. was also responsible for the experimental investigation and the original draft preparation. Validation, review and editing, visualization, and supervision were the responsibility of C.V., who was also responsible for funding acquisition. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors thank the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada for financial support (Discovery grant RGPIN-2019-06700).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

6.1 RESUMÉ

Cet article présente une méthode thermoélectrique surfacique temporelle simple permettant d'étudier numériquement l'apparition d'une bande sèche sur un isolateur pollué. La méthode proposée combine une expression empirique de la conductivité électrique surfacique de la couche de pollution, exprimée en fonction de la température et de la densité de dépôt de sel équivalente (DDSE), et une approche surfacique pour la modélisation de la couche de pollution, utilisant des simulations thermoélectriques temporelles basées sur la méthode des éléments finis (MEF). En utilisant différents substrats, épaisseurs de couche de pollution et niveaux de DDSE, la fiabilité et les limites du modèle numérique thermoélectrique simple ont été étudiées. Les résultats numériques obtenus ont démontré que le modèle thermoélectrique proposé peut simuler dynamiquement l'apparition de la bande sèche conformément aux résultats expérimentaux en termes d'évolution temporelle de la température et de la résistance de la couche de pollution, ainsi que d'évolution de la chute de tension et du champ électrique le long de la zone de formation de la bande sèche. Les résultats démontrent également l'influence du substrat et de l'épaisseur de la couche de pollution, qui influencent directement l'aspect thermique de la formation de la bande sèche. Un modèle numérique surfacique thermoélectrique simple a été utilisé pour étudier l'apparition d'une bande sèche sur un isolateur de 69 kV uniformément pollué. Les résultats obtenus ont permis une simulation dynamique de l'apparition de la première bande sèche, apparue au centre de l'isolateur, et d'étudier en profondeur l'évolution de la température de surface, du potentiel électrique et des distributions du champ électrique le long de l'isolateur. Le

modèle thermoélectrique simple proposé, combiné au modèle empirique, permet de simuler l'influence d'une couche de pollution non uniforme. Il fournit ainsi un outil numérique simple pour étudier l'évolution des distributions du potentiel et du champ électrique le long d'un équipement d'isolation uniformément et non uniformément pollué, afin d'identifier une zone de forte probabilité d'apparition de bande sèche en fonction du matériau et de la géométrie de l'isolateur. Ceci peut contribuer au développement de nouvelles méthodes d'atténuation pour améliorer les performances de tous les types d'isolateurs en conditions de pollution.

6.2 ABSTRACT

This paper presents a simple thermoelectrical temporal surface method to numerically study the appearance of a dry band on a polluted insulator. The proposed method combines an empirical expression of the pollution layer surface conductivity, expressed as function of the temperature and equivalent salt deposit density (ESDD), and a surface approach for modeling the pollution layer, using thermoelectrical temporal simulations based on the finite element method (FEM). Using different material substrates, pollution layer thicknesses, and ESDD levels, the reliability and limitations of the simple thermoelectrical numerical model have been studied. The numerical results obtained demonstrated that the proposed thermoelectrical model can dynamically simulate the dry band appearance in accordance with the experimental results in terms of the temporal evolution of the temperature and the pollution layer resistance, as well as the evolution of the voltage drop and E-field along the dry band formation zone. The results also demonstrate the influence of the material substrate and the pollution layer thickness, which

directly influence the thermal aspect of the dry band formation. The simple thermoelectrical numerical surface model was used to study the dry band appearance on a uniformly polluted 69 kV insulator. The results obtained enabled a dynamic simulation of the appearance of the first dry band, which appeared in the middle of the insulator, and to deeply investigate the evolution of the surface temperature, electric potential, and E-field distributions along the insulator. The proposed simple thermoelectrical model combined with the empirical model is able to simulate the influence of a non-uniform pollution layer. Hence, the proposed model provides a simple numerical tool to study the evolution of potential and E-field distributions along uniformly and non-uniformly polluted insulation equipment, to identify the probability of a region of high dry band appearance relative to the insulator material and geometry. This can aid in the development of new types of mitigation methods to improve the performance of all types of insulators under polluted conditions.

Keywords: *dry band, thermoelectric empirical equation, FEM numerical temporal modeling, polluted insulator, influencing parameters*

6.3 INTRODUCTION

During their service life, outdoor insulators are exposed to atmospheric pollution, due to environmental contamination such as natural and chemical pollutants and industrial dusts and ashes [65, 69]. However, the contamination originates, it leads to the formation of a pollution layer at the insulator surface, which becomes electrically conductive with the absorption of moisture from the

environment [65]. In that situation, a leakage current (LC) can flow at the insulator surface, and the intensity depends directly on the resistance of the pollution layer. The latter depends on the nature and quantity of the contaminants present in the pollution layer, as well as the material on the surface of the insulator [32, 109]. When the leakage current is sufficiently high, the absorbed moisture starts to evaporate under LC Joule heating and heat transfer between air and the insulator surface material [108, 110]. Moisture evaporation generally occurs in the pollution layer, where the LC density is the highest, and leads to the formation of dry bands, a zone along the insulator with an electrical conductivity close to zero [62, 111]. The formation of dry bands causes noticeable distortion in the E-field and potential distributions along the surface of polluted insulators [33, 72, 93, 109, 112]. The local increase in the voltage drop along the dry band and the resulting local increase in the E-field strength can be responsible for partial electric arc ignition [93]. Partial arcs can deteriorate the insulator surface by cracking and insulation degradation, especially for composite insulators, and can propagate along the polluted insulator surface to create a complete flashover, resulting in power outages [32, 65, 69, 93, 112].

The use of numerical tools such as finite or boundary element methods (FEM or BEM) remains a rapid and cost-effective solution to study the influence of dry bands on the E-field distribution along polluted insulators [33, 68, 72, 89, 91, 113, 114]. However, in most of the numerical studies proposed, the dry bands are simply modeled as an area of very low or no conductivity compared to the rest of the pollution layer, which generally presents a constant conductivity value along the insulator [32, 62]. With such an assumption, the dry band location must be imposed,

and only stationary E-field modeling can be performed. More recently, some authors have proposed an approach to numerically simulate E-field distribution along polluted composite insulators [72]. For this, the authors established an empirical non-linear relation between the pollution surface conductance as a function of the E-field obtained along the pollution surface given by [72]:

$$G = xe^{-yE}, \quad (62)$$

where $G(\mu S)$ is the pollution surface conductance, $E(kV/cm)$ is the E-field along the polluted insulator, and x and y are constants experimentally determined by curve-fitting and dependent on the type of composite insulator. Equation (62) can easily be implemented in FEM software to determine the distribution of the E-field along a polluted composite insulator to identify the insulator area more prone to dry band formation. However, this approach does not consider the thermal parameters involved in the dry band formation, as proposed in other studies [32, 62, 65, 93, 115].

Dry band formation remains a complex phenomenon involving several physical quantities in both the thermal and electrical domains, which govern the drying process of a heterogeneous semi-liquid layer representing the pollution layer. Thus, numerical models must be able to capture, as accurately as possible, the influence of different and interconnected parameters such as the electric field distribution, pollution electrical conductivity and moisture content, and the heat transfer influencing the dry band formation. This leads to the development of complex numerical models, which can only be used on flat geometry or eventually require the implementation of a specific numerical method that is difficult for electrical industry engineers to use [32, 62, 65, 93, 115].

In our previous studies, a new experimental model of a simple flat insulator geometry that enables the experimental simulation of the complex phenomenon of dry band formation in a controlled and repetitive manner was presented [99, 116]. Due to its simple and small geometry, the zone of dry band formation is perfectly controlled, which permits the measurement of the evolution of the surface temperature and, for the first time, the axial E-field in the middle of the dry band as a function of the pollution layer resistance. The results obtained provide a new understanding of the influence of several parameters (substrate material, ESDD level, and ambient temperature) on dry band formation along polluted ceramic and non-ceramic insulators. Following experimental studies, this paper presents a new empirical formation of the pollution layer surface conductivity as a function of the surface temperature and ESDD level established from the results obtained previously. This new empirical formulation was then implemented in the commercial FEM based software Comsol Multiphysics® using a specific thermoelectrical surface condition to model the pollution layer [67]. As demonstrated in several studies, Comsol Multiphysics® is a powerful tool to model complex thermoelectric multiphysical field coupling as demonstrated in several studies [117-120]. Different temporal simulations were then performed to study the validity and limitations of the new pollution model by using simple flat insulator geometry as well as a real 69 kV composite insulator.

6.4 EMPIRICAL EQUATION OF THE POLLUTION LAYER SURFACE CONDUCTIVITY

6.4.1. EXPERIMENTAL SETUP

Figure 79 presents the geometry of the experimental model used to determine the empirical equation of the pollution layer surface conductivity as function of the ESDD and the temperature. As explained in detail in our previous paper [116], the simplicity of the setup geometry enables precise control of the zone of appearance of the dry band in the middle of the model, which is identified in blue in Figure 79. The control of the dry band appearance permits the precise measurement of the evolution of the surface temperature and axial E-field in the dry band zone and the study of the influence of several parameters such as the material substrate, the ESDD level, the applied voltage, and the ambient temperature [116]. Moreover, the simple geometry of the model permits the easy calculation of the surface conductivity γ_s (S) from the pollution layer resistance R (Ω), which can be expressed for the model as follows [99]:

$$\gamma_s = \frac{2.232}{R}. \quad (63)$$

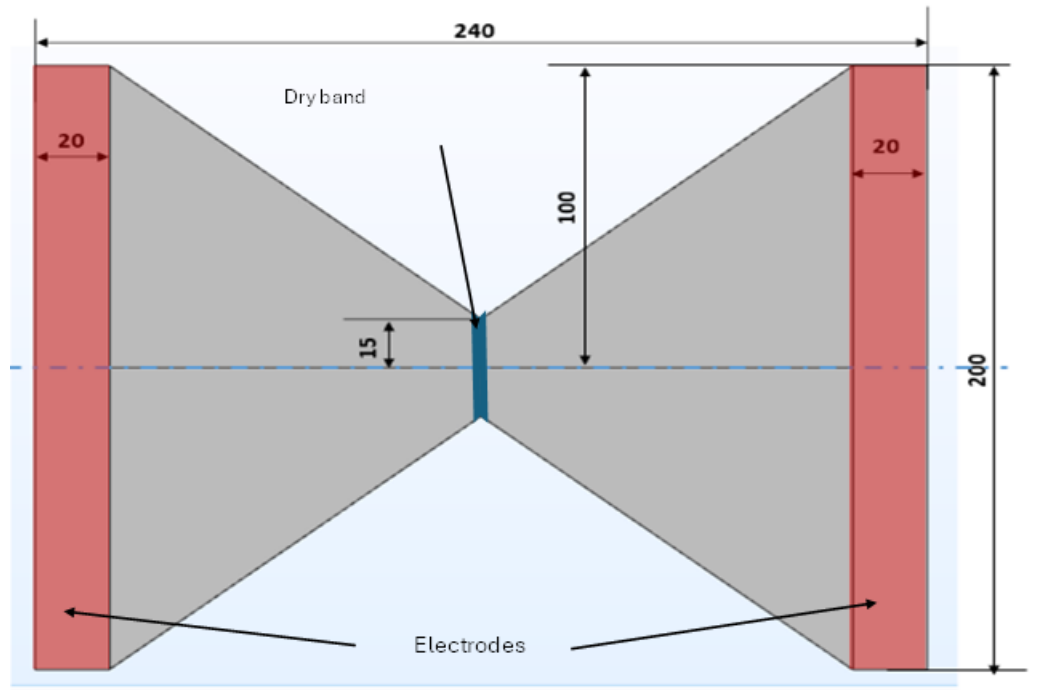


Figure 79 : Geometry and dimensions (in mm) of the experimental model.

As explained in detail in [99], the experimental procedure used for all the tests is summarized as follows:

- Using a spraying system, the pollution layer made with kaolin and salt solution was sprayed on the experimental model and allowed to dry at room temperature for at least 24 hours.
- Each polluted model was then placed into a small climate chamber (1m×1m×1.2m) set at the desired ambient temperature (at $\pm 1^{\circ}\text{C}$) for a minimum of 3 hours.
- The humidity of the chamber was set at $95 \pm 5\%$, which was generated by steam for a duration of 810 s, the time previously demonstrated to be required to reach the maximum surface conductivity [116].
- The desired voltage was applied to the polluted model, and the leakage current was recorded, to automatically compute the pollution layer

resistance until the dry band had completely formed. Simultaneously, the average temperature in the middle of the dry band was also recorded using an IR camera.

- Finally, the ESDD was measured and determined following the procedure described in [99].

To decrease the influence of the experimental parameters, three experimental models of the same substrate material were polluted with the same kaolin and salt solution and tested under the same conditions.

6.4.2. SURFACE CONDUCTIVITY OF THE POLLUTION LAYER AS A FUNCTION OF THE TEMPERATURE AND ESDD

6.4.2.1 Procedure and simplifying assumptions

The mathematical modeling of the electrical surface conductivity of the pollution layer as a function of the temperature and ESDD was carried out from the results of experimental tests under applied voltages of 2 kV_{rms} and 4 kV_{rms}. Several test series using a Plexiglas substrate material were then conducted for different ESDD levels. For each test, the evolution of the average temperature T and the axial E-field in the middle of the dry band with the pollution layer resistance R were simultaneously recorded [116]. Different tests were conducted for an ESDD level varying from 0.31 mg/cm² to 1.31 mg/cm². As described in the following, the test results obtained were processed to extract the evolution of the electrical conductivity of the pollution layer as function of the average dry band temperature and the ESDD. From the experimental observations, several assumptions were made to establish the pollution layer surface conductivity:

- The dry band is uniformly formed in the middle of the flat sample in the stress zone, as illustrated in Figure 79.
- The increase in the surface temperature along the flat insulator model occurs principally in the dry band zone, as observed experimentally [99]. This means that the temporal variation in the conductivity (or resistance) of the entire pollution layer is essentially governed by the evolution of the pollution layer conductivity in the dry band zone. In other words, all the electrical parameters such as the pollution layer resistance of leakage current (LC) are governed by the evolution of the dry band resistance.

These hypotheses make it possible to bring the starting geometry back to the zone of appearance of the dry band.

6.4.2.2 Empirical pollution surface conductivity equation

The empirical equation of $\gamma_s = f(ESDD, T)$ was derived using a specific treatment of the data obtained using Matlab curve fitting tools, as presented in the flowchart in Figure 80. For each test using a Plexiglas substrate and an applied voltage of 4 kV, the evolution of the pollution layer resistance and temperature in the dry band zone were recorded. From these experimental data, the evolution of the surface conductivity γ_s , as well as the average temperature in the middle of the dry band, were computed, as presented in Figure 80, for an ESDD of 0.83 mg/cm². Matlab fitting curve tools were then used to determine a mathematical expression for each of the experimental surface conductivity and temperature evolutions (see Figure 80). For the surface conductivity γ_s , the general mathematical expression obtained is of the following form:

$$\gamma_s(t) = Ae^{k_1 t} + Be^{k_2 t}. \quad (64)$$

where A , B , k_1 , and k_2 are constant coefficients depending on the ESDD level.

For the temperature T , the general mathematical expression is more complicated and can be expressed as follows:

$$T = a_1 e^{-\left(\frac{t-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 e^{-\left(\frac{t-b_2}{c_2}\right)^2} + a_3 e^{-\left(\frac{t-b_3}{c_3}\right)^2} + a_4 e^{-\left(\frac{t-b_4}{c_4}\right)^2} + a_5 e^{-\left(\frac{t-b_5}{c_5}\right)^2}. \quad (65)$$

where a_1 to a_5 , b_1 to b_5 , and c_1 to c_5 are constant coefficients depending on the ESDD level.

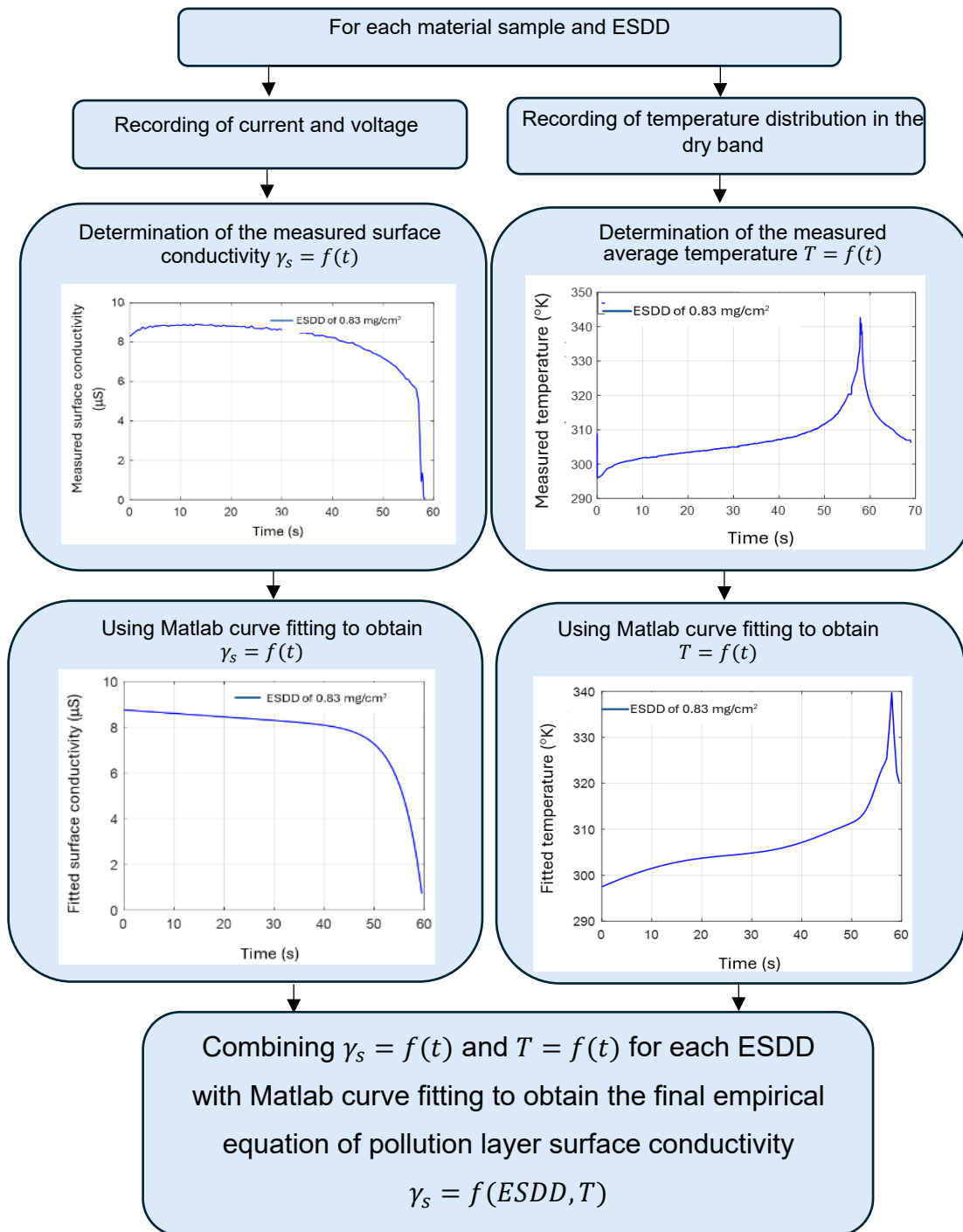


Figure 80 : Presentation of the organogram used to compute the pollution layer surface resistance as a function of the ESDD and the average temperature T in the dry band.

By combining Equations 64 and 65, it becomes possible to express the surface conductivity of the pollution layer as function of its temperature T , eliminating the time dependence. Using Matlab curve fitting tools, the new expression of γ_s obtained shows a linear relation with the temperature T , which can be expressed as follows:

$$\gamma_s(T) = \alpha T + \beta. \quad (66)$$

where α and β are two constant coefficients depending on the ESDD level. For an ESDD of 0.31 mg/cm², $\alpha = -0.053$, and $\beta = 17.27$, and for an ESDD of 1.31 mg/cm², $\alpha = -0.044$, and $\beta = 15.48$.

Finally, putting together all the empirical formulations of Equation 66 obtained for all the ESDD levels, the expression of the pollution layer surface conductivity γ_s as a function of the surface temperature T and ESDD level can be obtained. Hence, the surface conductivity $\gamma_s(S)$ can then be expressed as function of the surface temperature $T(^{\circ}\text{K})$ and ESDD level (mg/cm²) as follows:

$$\gamma_{s(T,ESDD)} = 1.857 \times 10^{-7}T + 3.655 \times 10^{-4} \times ESDD - 2.934 \times 10^{-4}T \times ESDD - 0.663 \times 10^{-4}. \quad (67)$$

Equation 67 is valid only for the duration of the dry band formation defined from the end of the humidification where the voltage is applied to the complete formation of the dry band in the narrow part of the model (Figure 79). Hence, for the same ESDD value, when the surface temperature T is equal to the ambient temperature (20°C or 293.15°K), the surface conductivity γ_s equals the value obtained at the end of the humidification period. As the surface temperature T increases to 340°K (or

66.85°C), the $\gamma_s(T, ESDD)$ value decreases linearly, until it reaches a value close to zero.

6.5 THERMOELECTRIC NUMERICAL MODEL OF DRY BAND FORMATION

6.5.1. PRESENTATION OF THE MODEL

The numerical model used for all the simulations, presented in Figure 81, considers the simplified insulator model and the climatic chamber. Due to symmetry considerations and to decrease the computation time, only half of the experimental setup was modeled. All the simulations were performed using Comsol Multiphysics ©, as it permits the easy coupling of electrical and thermal simulations. Moreover, this commercial software offers the possibility of using specific electrical and thermal boundary conditions to model a thin layer (the pollution layer) [67]. If both the current density and the temperature along the thin layer thickness can be considered as constant, the latter can then be modeled using a specific thermoelectrical boundary condition, where the layer thickness does not need to be discretized using a very small number of finite elements [78, 91]. This modeling strategy permits significantly decreasing the number of finite elements required to model the thin layer, as the surface of the insulator envelop is treated as a specific thin electrothermal boundary condition. This is useful when the dimensional ratio is important in the numerical model, for example by comparing the thickness of the pollution layer (fixed at 0.5 mm) to the length of the climatic chamber (1.2 m). In addition, using the surface approach for the polluted layer facilitates the implementation of the empirical formulation of the pollution surface conductivity given by Equation 67, as this can be

directly used in the FEM software material interface. The different thermoelectrical parameters used for the simulation are presented in Table 13.

The different thermoelectric simulations have to be performed using a temporal study in order to simulate the formation of the dry band and then estimate its appearance time. After a preliminary convergence study, the mesh size was fixed with an increase in its density in the dry band zone appearance (see Figure 82). In addition, the convergence study also permitted fixing the time step used for the temporal studies at 1 s.

Table 13 : Thermoelectrical parameters used for simulations.

Materials	ϵ_r	Conductivity	k (W/m.K)	C_p (J/kg.K)
<i>Air</i>	1	10^{-30} (S/m)	0.030	1009
<i>Plexiglas</i>	2.27	1.67×10^{-18} (S/m)	0.19	1450
<i>Pollution layer</i>	81	$\gamma_s(T, ESDD)$ (S)	0.61	4190
<i>Glass</i>	4.1	10^{-15} (S/m)	1.2	835
<i>RTV</i>	2.7	1.3×10^{-17} (S/m)	0.29	1460

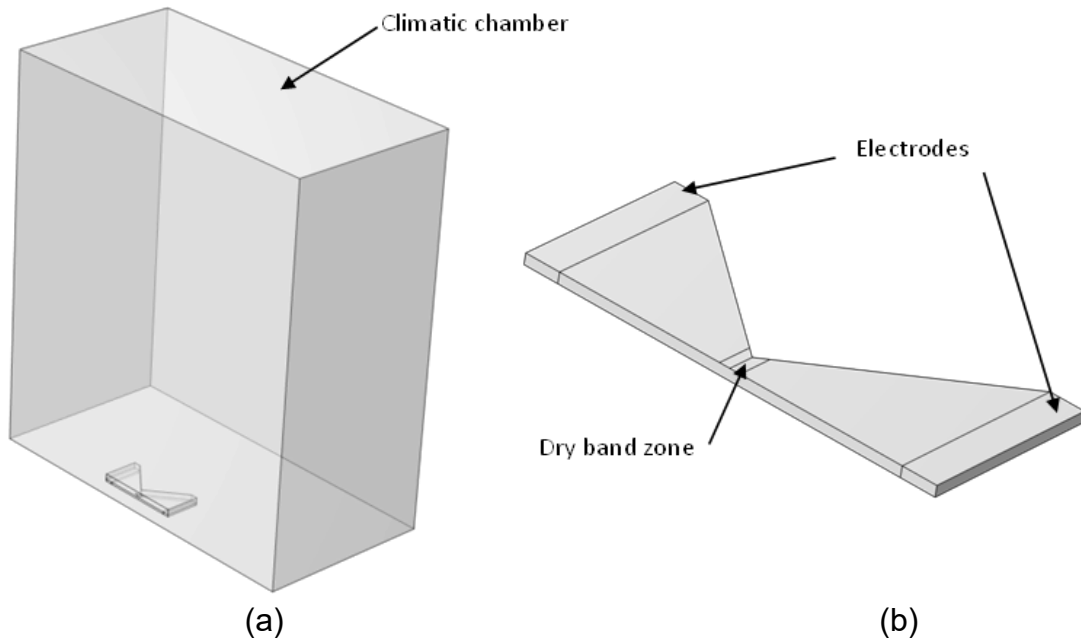


Figure 81 : Presentation of the symmetric numerical model of the experimental setup.

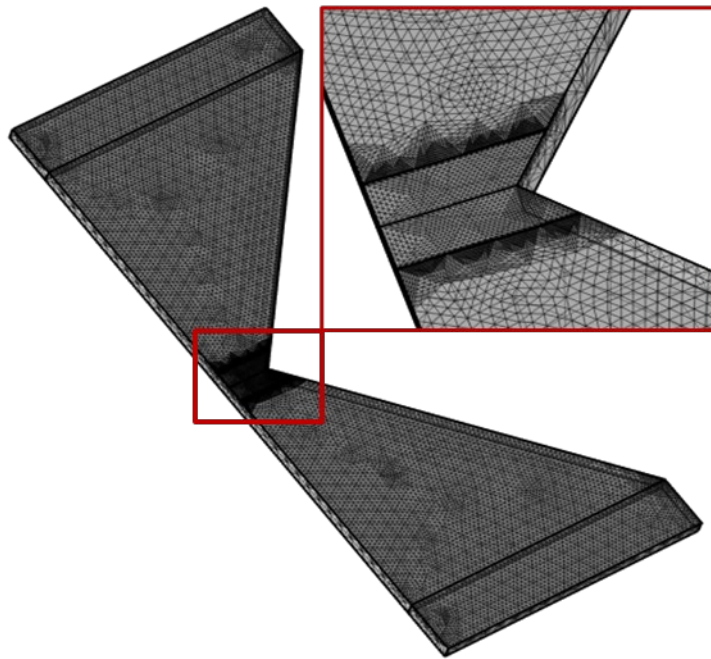


Figure 82 : Presentation of the finite element mesh used for the thermoelectrical simulations with a closed view of the mesh refinement in the dry band zone.

6.5.2. VALIDATION OF THE THERMOELECTRICAL DRY BAND FORMATION SIMPLE MODEL

The first simulations were performed to verify the validity of the empirical surface conductivity formulation given by Equation 67, as well as its implementation in the numerical model using a surface approach for the pollution layer. For this, the experimental results obtained in the previous research with a Plexiglas substrate, an ESDD of 0.31 mg/cm^2 , and applied voltages of 2 kV, 4 kV, and 6 kV were used for comparison [116]. For all the tests, the ambient temperature of the climatic chamber was fixed at 20°C . Figures 83 and 84 present the comparison between the experimental and numerical results obtained for the pollution layer resistance and temperature in the middle of the dry band, respectively.

As shown in Figure 83, a relatively good concordance was obtained between the experimental resistance measurements and the resistance in the numerical semi-empirical model. As observed, the pollution layer resistance evolution experimentally and numerically followed the same pattern, which was observable in our previous studies independent of the ESDD value and material substrate [99, 116]. This pattern is principally characterized by a very slow linear increase in the resistance layer followed by a sudden jump in the latter that corresponds to the appearance of the dry band [99, 116]. For comparison purposes, the average pollution layer resistance R_{av} obtained during its slow linear increase was computed, as well as the dry band appearance time T_{DB} corresponding to the sudden increase in the resistance value. Hence, the comparison of R_{av} permits to validate the electrical part of the thermoelectric simulation while the comparison of T_{DB} permits

to validate the thermal one. The value of T_{DB} for the numerical results was determined using the criterion of a minimum 10% increase in the pollution layer resistance at the next time step. The value of T_{DB} obtained was also used to compute the numerical R_{av} value. The results obtained numerically were then compared to the experimental ones, as presented in Table 14.

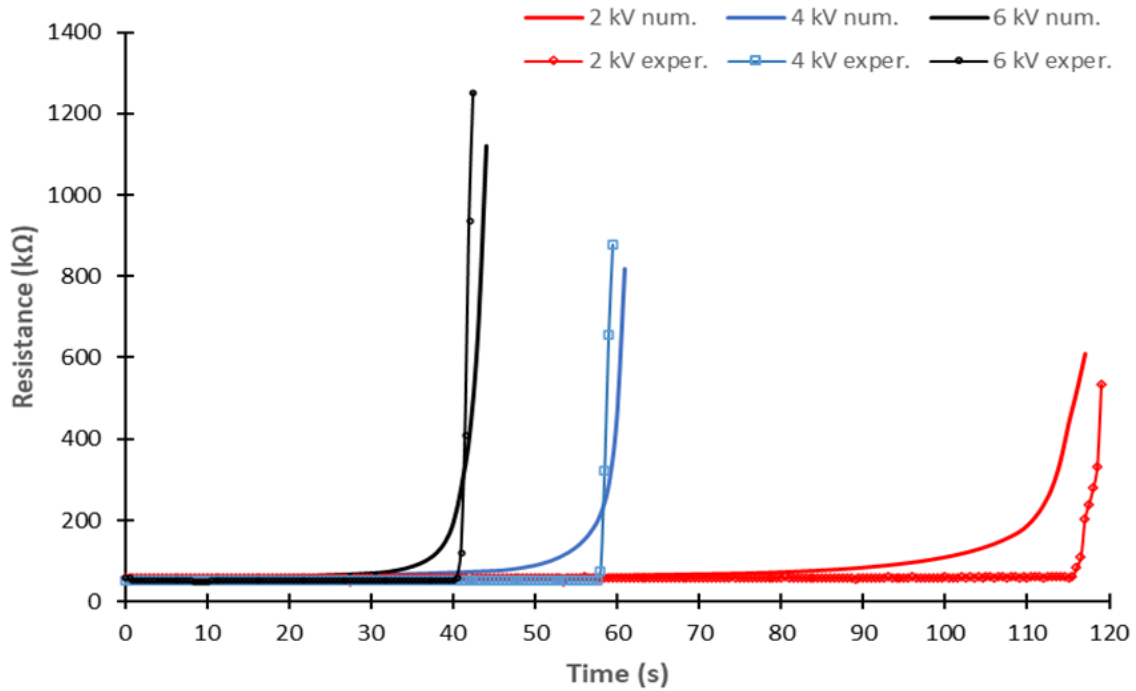


Figure 83 : Comparison of the evolution of the polluted layer resistance for the Plexiglas substrate with an average ESDD of 0.31 mg/cm^2 , as a function of the applied voltage.

As shown in Table 14, a relatively good concordance was obtained between both the experimental and numerical pollution resistance layer evolution. Indeed, regarding the R_{av} values, a maximum discrepancy of 18.1 % was obtained for 6 kV_{rms} . For the dry band appearance time, T_{DB} , a maximum discrepancy of 7.5% was obtained for an applied voltage of 6 kV_{rms} .

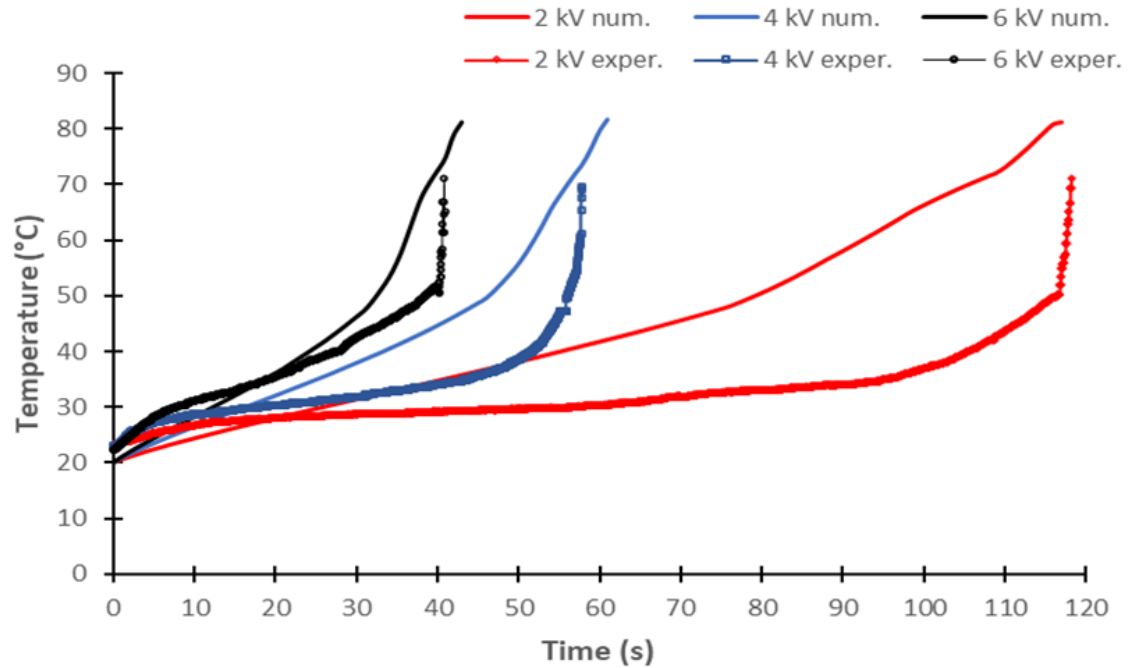


Figure 84 : Comparison of the evolution of the temperature in the middle of the dry band for the Plexiglas substrate with an average ESDD of 0.31 mg/cm², as a function of the applied voltage.

Table 14 : Comparison of the experimental and numerical results of the pollution layer resistance obtained for an ESDD of 0.31 mg/cm² and applied voltages of 2, 4, and 6 kV_{rms}.

Applied voltage (kV_{rms})	R_{av} exp. (kΩ)	R_{av} num. (kΩ)	T_{DB} exp. (s)	T_{DB} num. (s)	R_{av} discrepancy (%)	T_{DB} discrepancy (%)
2	59.2	69.5	118	111	17.4	5.9
4	52.2	66.7	58	54	13.4	6.9
6	51.6	60.9	40	37	18.1	7.5

For the evolution of the temperature obtained in the middle of the dry band zone (Figure 84), some differences between the experimental and simulation results can be observed. In particular, the numerical temperature seems to increase more rapidly than the experimental one. This can be explained by the fact that the rate of heat exchange at the surface of the pollution layer in the numerical thermal model

was simplified relative to the experimental model. In particular, a small air velocity of around 2.3 m/s at the surface of the polluted model was measured in the climate room during the different tests, which was ignored in the simulation for simplification purposes. To compare the results, the average temperature T_{av} obtained for the time interval T_{DB} given in Table 14 was computed as well as the maximum temperature T_{max} .

The results presented in Table 15 show that the discrepancies obtained are of the same order as those obtained for the pollution layer resistance. Hence, these results demonstrate that the surface approach used for the thermoelectrical simulation is valid, as is the implementation of the semi-empirical expression of the surface conductivity proposed in this work.

Table 15 : Comparison of the experimental and numerical results of the temperature evolution in the middle of the dry band obtained for an ESDD of 0.31 mg/cm² and applied voltages of 2, 4, and 6 kV_{rms}.

Applied voltage (kV_{rms})	T_{av} exp. (°C)	T_{av} num. (°C)	T_{max} exp. (°C)	T_{max} num. (°C)	T_{av} discrepancy (%)	T_{max} discrepancy (%)
2	36.5	42.6	71.2	80.9	16.7	13.6
4	33.2	37.5	69.5	81.9	13.0	17.8
6	31.9	36.5	71.8	81.3	14.4	13.2

The numerical model also permits computing the evolutions and distributions of other electrical quantities such as the axial E-field and electrical potential, as well as the surface conductivity $\gamma_s(T, ESDD)$ given by Equation 67. Figure 85 presents an example of the distribution of the electrical potential at the surface of the pollution layer along the axis of symmetry of the experimental model obtained at 4 kV_{rms} for the following times: 0 s, 27 s, 54 s, and 61 s. Figure 86 presents the distribution of

the surface conductivity $\gamma_s(T, ESDD)$ along the same potential reference line, and Figure 87 presents the corresponding temperature distribution at the surface of the experimental model for the same time step.

The results shown in Figures 85 to 87 clearly illustrate the principle of dry band formation and the evolution of the relative electrical quantities. When the voltage is applied to the polluted sample ($t = 0$ s), the surface temperature and conductivity $\gamma_s(T, ESDD)$ are both constant and minimal and maximal, respectively (Figure 86 and 87a). This results in a quasi-linear distribution of the potential along the symmetry axis of the model (Figure 85). As time passes, the temperature in the dry band zone increases to its maximum (81.9 °C) from the edge of the narrow part of the sample (Figure 87b) to the middle part of the sample (Figure 87c) to complete the dry band formation (Figure 87d). The local increase in the temperature in the dry band zone leads to a local decrease in the surface conductivity $\gamma_s(T, ESDD)$, as illustrated in Figure 86. As the surface conductivity $\gamma_s(T, ESDD)$ decreases, the voltage drop across the dry band increases, as demonstrated in Figure 85, to finally equal most of the applied voltage of 4 kV_{rms} at $t = 61$ s.

Moreover, the results shown in Figures 85 and 86 permit determination of the width of the dry band, which is sensibly equal to 3 mm and of the same order as the values obtained experimentally [19].

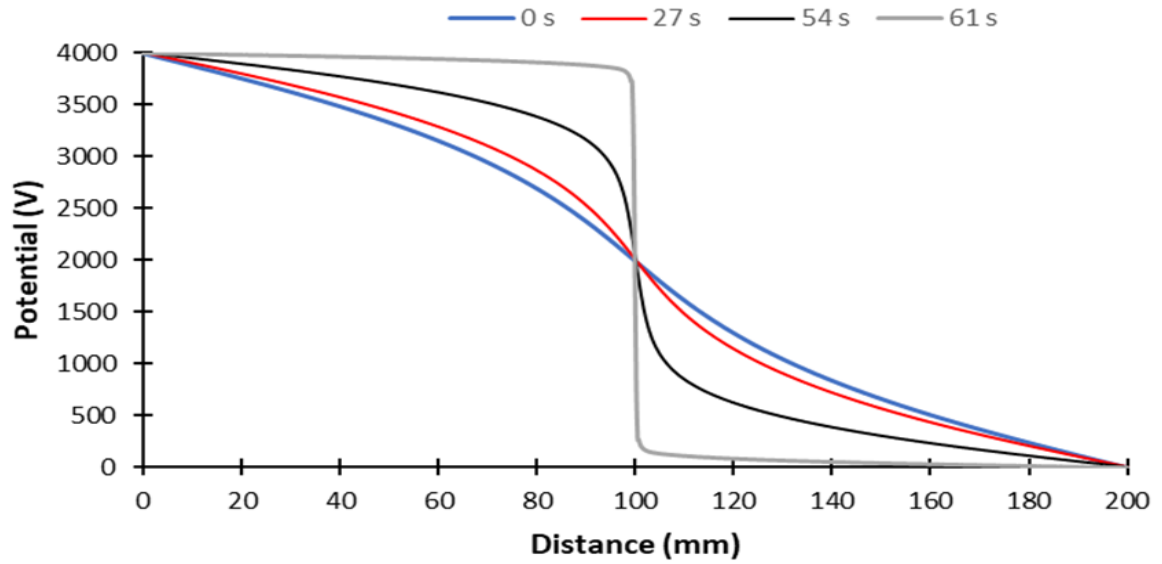


Figure 85 : Distribution of the potential along the axis of symmetry of the model obtained for an applied voltage of 4 kV_{rms} at time steps t of 0 s, 27 s, 54 s, and 61 s.

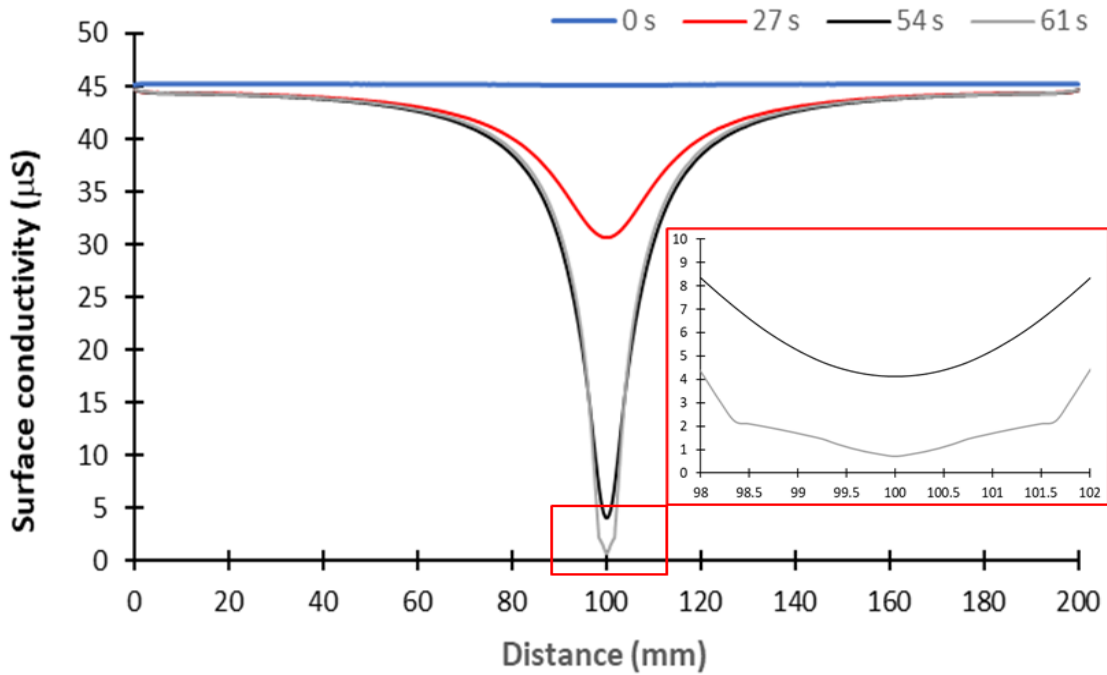


Figure 86 : Distribution of the surface conductivity $\gamma_s(T, ESDD)$ along the axis of symmetry of the model obtained for an applied voltage of 4 kV_{rms} at time steps t of 0 s, 27 s, 54 s, and 61 s.

Finally, the last electrical quantity studied is the evolution of the axial E-field component in the middle of the dry band zone and at 7.5 mm from the surface of the pollution layer. The evolution of this quantity was experimentally measured using a specific electro-optic E-field sensor as presented in our previous paper [116]. Figure 88 presents the comparison of the experimental and numerical evolutions of the axial E-field component corresponding to the results presented in Figures 83 and 84 for an applied voltage of 4 kV_{rms}. As observed, the numerical evolution of the axial E-field is similar to the experimental with a final value of the same order, around 1.6 kV/cm. However, the main difference is the sudden increase in the axial E-field for the experimental results, where the increase is more progressive for the numerical ones. This also can be observed in the evolution of the pollution layer resistance (Figure 83) and the temperature (Figure 84).

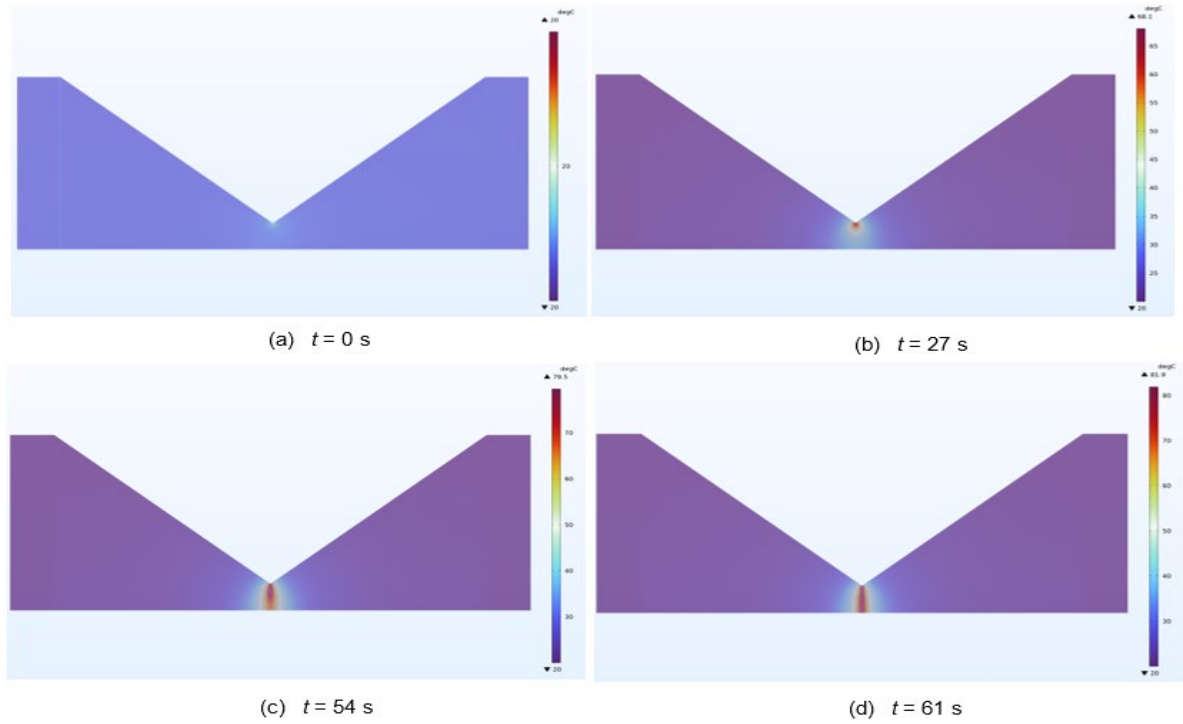


Figure 87 : Distribution of the temperature at the surface of the experimental Plexiglas substrate with an average ESDD of 0.31 mg/cm^2 and for an applied voltage of $4 \text{ kV}_{\text{rms}}$ at time steps t of a) 0 s, b) 27 s, c) 54 s, and d) 61 s.

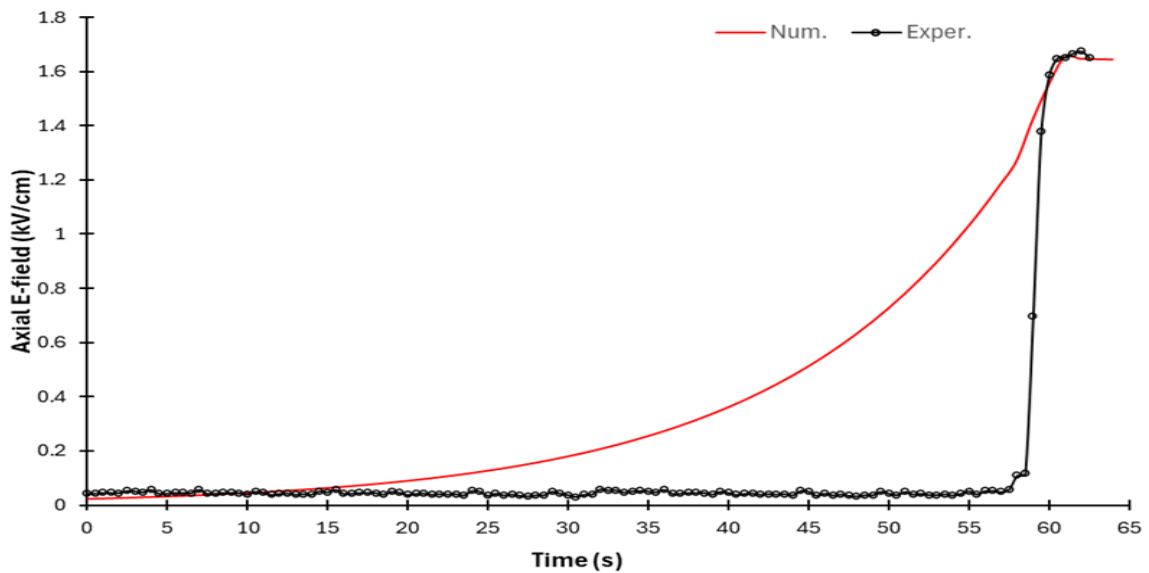


Figure 88 : Comparison of the experimental and numerical evolutions of the axial E-field component measured in the middle of the dry band at 7.5 mm from the pollution layer surface for an applied voltage of $4 \text{ kV}_{\text{rms}}$.

6.6 STUDY OF PARAMETERS INFLUENCING THE DRY BAND FORMATION

The results presented in the previous section validated the numerical model of the dry band formation using an empirical formulation of the temperature and ESDD-dependent surface conductivity of the pollution layer. Then, with this model, it is possible to study the influence of different model parameters that can influence the formation of the dry band and to verify the limitations of the numerical simulations.

6.6.1. INFLUENCE OF THE SUBSTRATE THERMAL PROPERTIES

Next, the influence of the thermal properties of the material substrate was investigated. For this, a comparison was performed using three substrate materials: Plexiglas, RTV, and glass, whose thermal properties are presented in Table 13. Figure 89 presents the evolution of the pollution layer resistance and the corresponding temperature evolution in the middle of the dry band. The dry band appearance time T_{DB} is directly affected by the material substrate and, consequently, by its thermal properties, particularly by the thermal conductivity. Indeed, from Table 13, the thermal conductivity of the RTV and glass substrate is around 1.5 and 6.1 times higher than for Plexiglas, respectively. By comparison, the dry band appearance time T_{DB} for the RTV and glass substrate is around 1.3 and 5.5 times higher than for Plexiglas, respectively.

From Figure 89, it can be observed that the increase in the temperature in the dry band zone is lower for the glass substrate, compared to RTV and Plexiglas. The temperature increase rate before the appearance of the dry band can be estimated as 0.28°C/s for the glass substrate, 0.52°C/s for the RTV, and 0.58°C/s for the

Plexiglas. The higher thermal conductivity of the glass slows the temperature increase in the dry band zone, which in turns reduces the decrease in the surface conductivity of the pollution layer $\gamma_s(T, ESDD)$, resulting in a delay in the appearance of the dry band, as demonstrated by the results in Figure 90. This phenomenon was observed during the experimental tests presented in our previous paper with the same substrate materials and where the influence of the material thermal conductivity was discussed [20]. From the experimental results obtained, it was found that the T_{DB} for the glass and RTV substrate was around 6 and 3.7 times higher than the Plexiglas, respectively. The main difference in the numerical T_{DB} for the RTV substrate compared to the experimental value is attributed to its larger surface conductivity obtained for the same ESDD, which is due to its hydrophobicity recovery capability, as explained in [116].

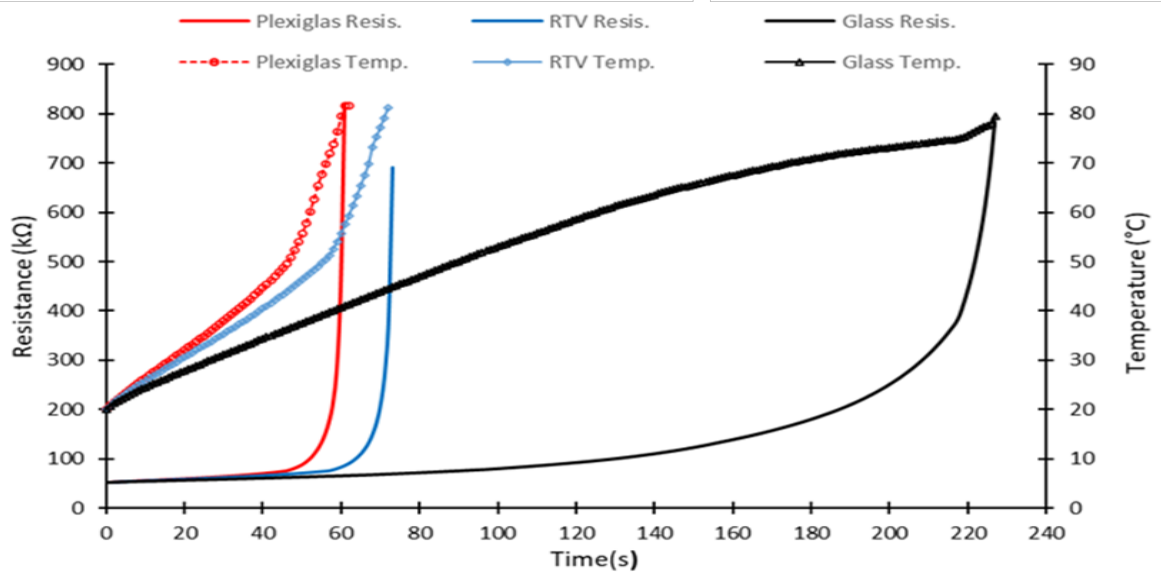


Figure 89 : Comparison of the evolution of the pollution layer resistance and the temperature in the middle of the dry band as a function of the substrate material and for an applied voltage of 2 kV_{rms} and an average ESDD of 0.31 mg/cm².

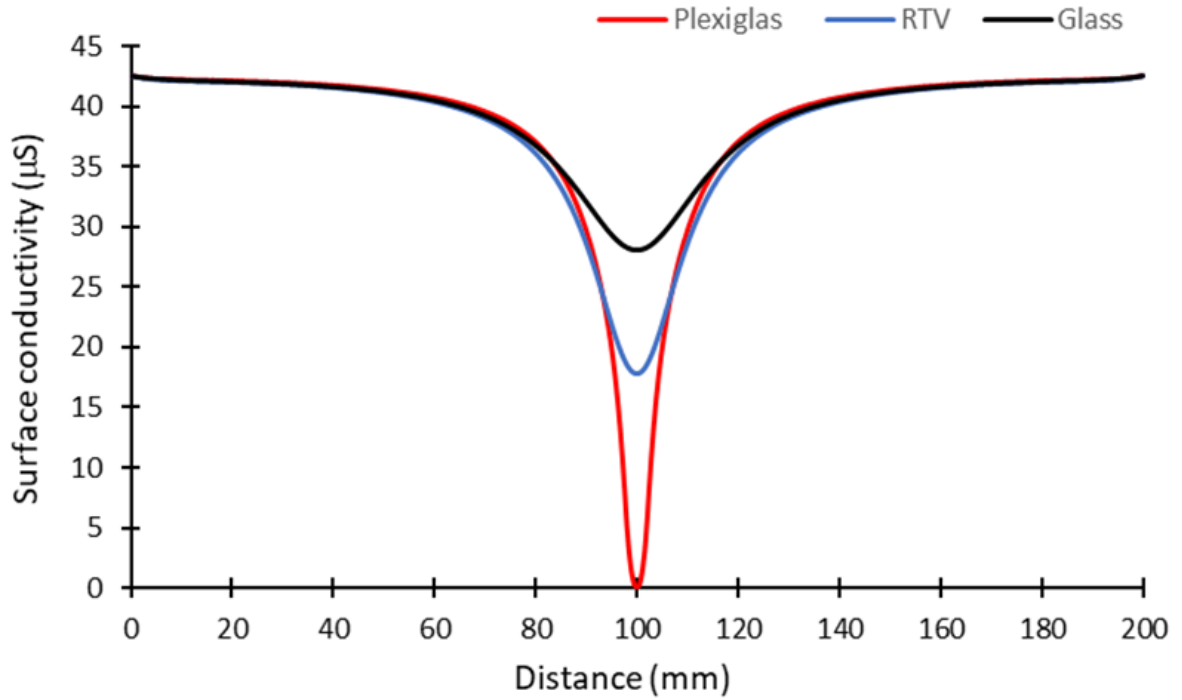


Figure 90 : Comparison of the surface conductivity $\gamma_s(T, DDSE)$ along the axis of symmetry of the model as function of substrate material for an applied voltage of $2kV_{rms}$ at a time step t of 111 s and an average ESDD of 0.31 mg/cm^2 .

6.6.2. INFLUENCE OF THE POLLUTION LAYER THICKNESS

As mentioned previously, the different numerical models of the formation of a dry band on a simple polluted insulator geometry use a surface approach in order to simulate the thermoelectrical behavior of the pollution layer. Even if the thickness of the pollution layer is not physically modeled, the FEM software takes it into account for the thermal part of the modeling. However, for the electrical part, the surface conductivity expression $\gamma_s(T, DDSE)$ is divided by the thickness of the pollution layer in order to obtain the same volume electrical conductivity and, consequently, the same resistance for the pollution layer. In this condition, as the applied voltage is the same, the leakage current flowing in the pollution layer is the same and,

consequently, the Joule effect energy, which is also the thermal energy injected in the pollution layer.

Figure 91 presents the comparison of the pollution layer resistance obtained with different pollution layer thicknesses, for the same ESDD of 0.31 mg/cm^2 , an applied voltage of $2 \text{ kV}_{\text{rms}}$, and a Plexiglas substrate. The results obtained demonstrate the dependency of the dry band appearance time T_{DB} on the thickness of the pollution layer. Moreover, from the results of Figure 92, T_{DB} increases linearly with the increase in the pollution layer thickness, for the same pollution layer surface resistance and substrate material. This result demonstrates that the pollution layer thickness can play a significant role in the appearance of the dry band by influencing the temperature distribution inside the pollution layer. The greater the thickness of the layer, the longer it will take for the dry band to appear. However, such results are difficult to verify experimentally as the measurement of the pollution layer thickness remains a complex task depending on the method used to apply the pollution layer, the method employed during the humidification phase, and the material substrate [121].

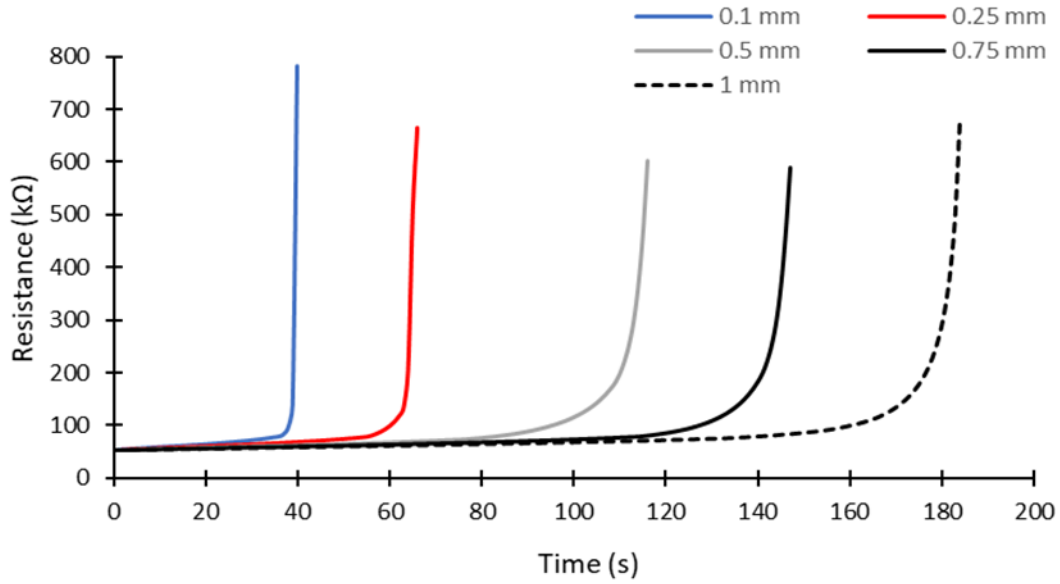


Figure 91 : Comparison of the pollution layer resistance as a function of the layer thickness obtained for the Plexiglas substrate, an applied voltage of 2kV_{rms} , and an ESDD of 0.31 mg/cm^2 .

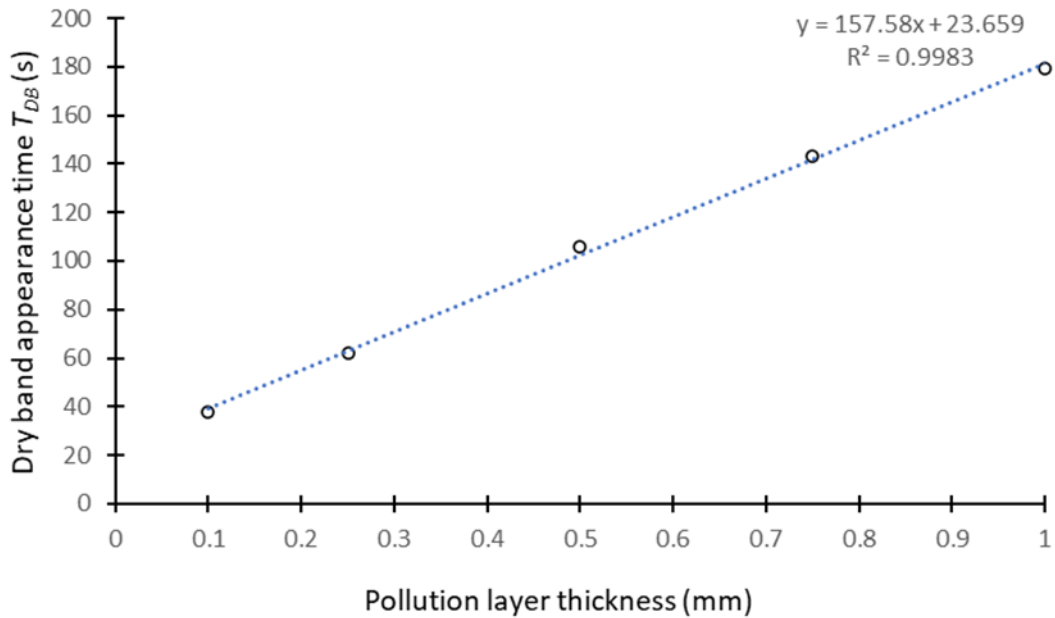


Figure 92 : Dry band appearance time T_{DB} as a function of the pollution layer thickness obtained for the Plexiglas substrate, an applied voltage of 2kV_{rms} , and an ESDD of 0.31 mg/cm^2 .

6.6.3. INFLUENCE OF THE POLLUTION LAYER ESDD

In this subsection, the influence of the ESDD level on the dry band formation on both the Plexiglas and glass substrate is described. The simulations were performed for a pollution layer thickness of 0.5 mm with an applied voltage of 2 kV_{rms}. Figures 93 and 94 present the evolution of the pollution layer resistance as function of the ESDD level for the Plexiglas and glass substrate, respectively. The appearance of the dry band is delayed, as the ESDD level increases, as demonstrated by the results shown in Figure 95. Here, the dry band appearance time (T_{DB}) was computed as a function of the ESDD level for the Plexiglas and glass substrates. It is interesting to note that T_{DB} decreases drastically, as the ESDD level increases, following a regression power curve. This trend can be observed both for both substrates.

As expected from Equation 67, the surface conductivity $\gamma_s(T, ESDD)$ increases linearly with the increase in the ESDD level. In that situation, for the same applied voltage, the leakage current flowing in the pollution layer increases, leading to a reduction in the dry band appearance time. From the results shown in Figure 95, the formation of the dry band seems to significantly slow as the ESDD level increases. However, this result does not seem to be representative of the experimental results obtained in our previous study, where the opposite phenomenon was obtained for a glass substrate [116]. Indeed, in our previous study, the dry band appearance time T_{DB} increased with the ESDD level, following a power function [116]. This significant difference in the experimental and numerical results can be attributed to the thickness of the pollution layer used in the simulations, which was kept constant and

equal to 0.5 mm. As reported in [60] and also verified in our previous work [99], as the ESDD level increases, the quantity of water absorbed by the pollution layer increases too, leading to an increase in its thickness. This means that as the ESDD level increases, the thickness of the pollution layer should be increased in order to better simulate its influence on the thermal process associated with the dry band formation.

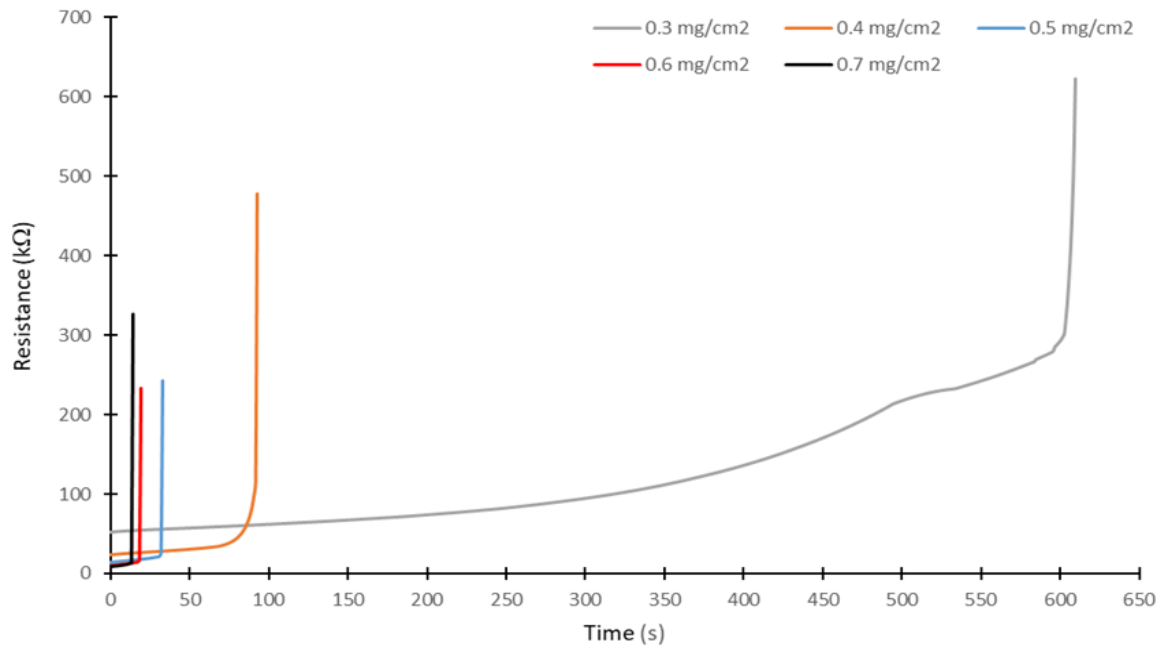


Figure 93 : Evolution of the pollution layer resistance as a function of the ESDD obtained for the Plexiglass substrate with an applied voltage of 2 kVrms.

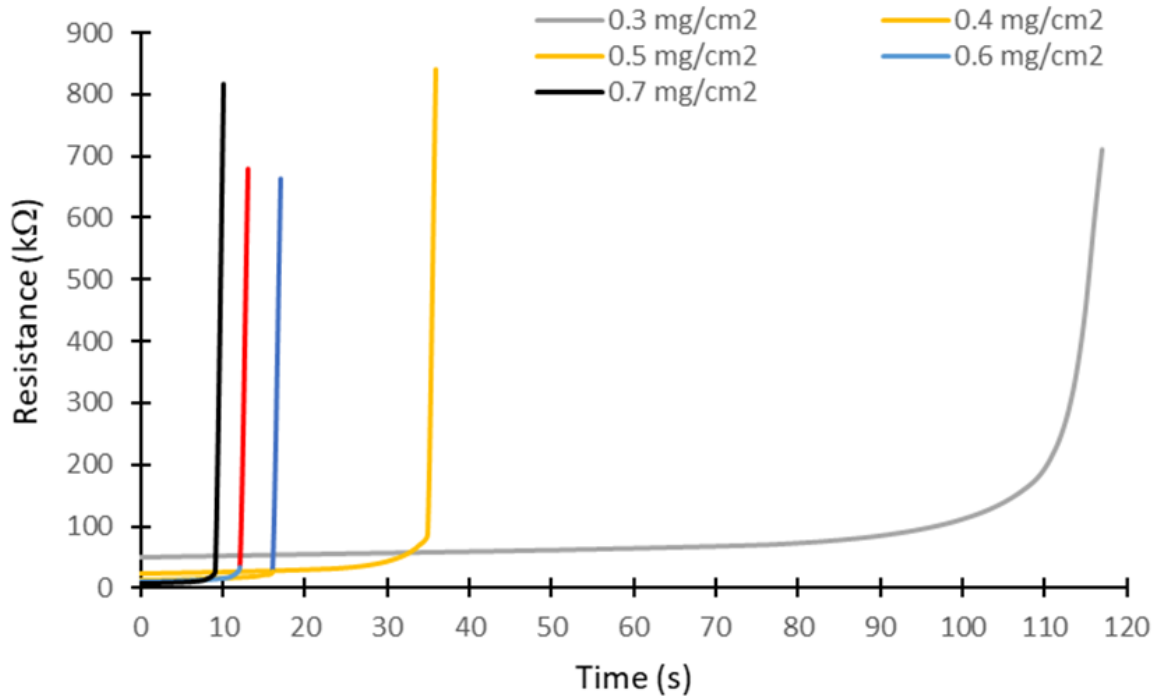


Figure 94 : Evolution of the pollution layer resistance as a function of the ESDD obtained for the glass substrate with an applied voltage of 2 kVrms.

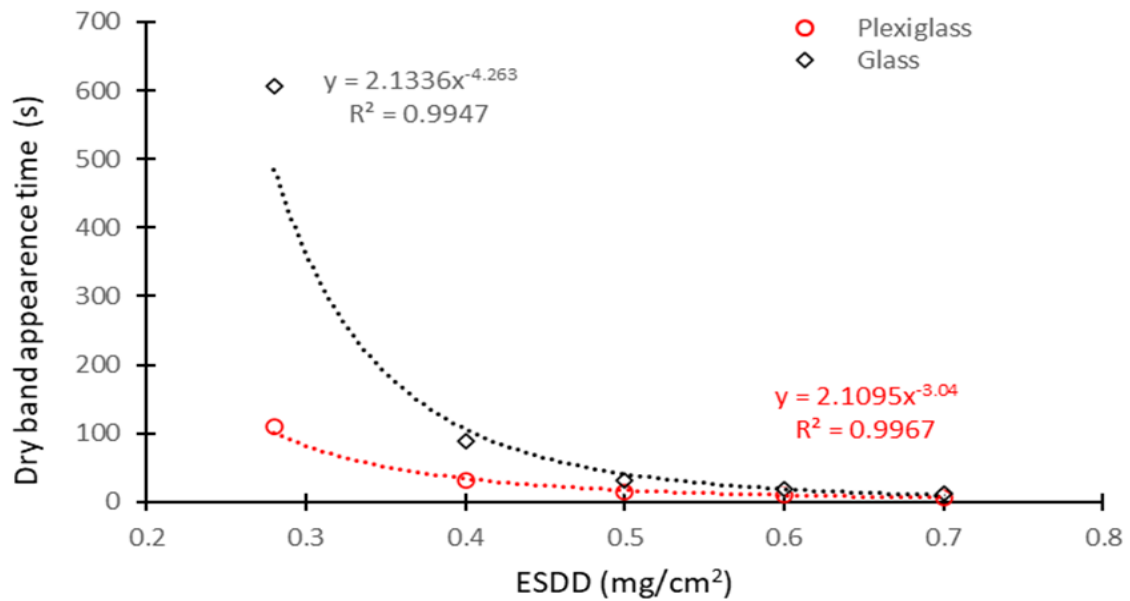


Figure 95 : Evolution of the dry band appearance time T_{DB} as a function of the ESDD obtained for the glass substrate with an applied voltage of 2kV_{rms}.

6.7 APPLICATION TO A POLLUTED COMPOSITE INSULATOR

6.7.1. POLLUTED COMPOSITE INSULATOR MODEL

For this part of the study, the empirical formulation of the surface conductivity $\gamma_s(T, ESDD)$ given by equation (67) was applied to a uniformly polluted 69 kV Sediver composite insulator. As the pollution layer was considered uniform along the entire surface of the insulator, a 2D-axisymmetric finite element method (FEM) using the commercial software Comsol Multiphysics® was then employed. The dimensions of the composite insulator are presented in Table 16. The different simulations were performed using the thermoelectric properties presented in Table 17.

Table 16 : Sediver composite insulator characteristics [74].

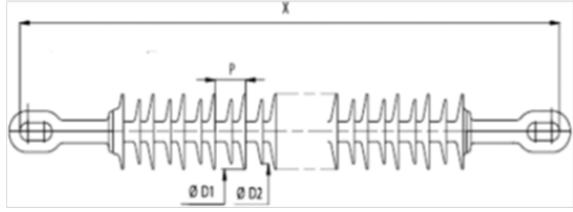
Voltage level, kV	69	
Length X, mm	866	
ØD1, mm	92	
ØD2, mm	72	
Shed number	21	
Leakage distance, mm	1395	

Table 17 : Thermoelectric properties of materials.

Materials	Relative permittivity (ϵ_r)	Density (kg/m^3)	Electrical conductivity (S/m)	Thermal conductivity (W/m.k)
Rod	7.2	2500	1×10^{-12}	0.04
Envelop	4.6	1200	1×10^{-12}	0.29
Metal ends	1	7850	4.032×10^6	44.5
Pollution layer	81	2.6	10^{-3}	0.6
Air	1	1.225	1×10^{-15}	0.024

Figure 96 presents the 2D-axisymmetric model of the 69 kV Sediver composite insulator, where the pollution layer was considered as a uniform layer with a constant thickness of 0.5 mm. Moreover, the surface approach used previously was employed to model the pollution layer to significantly decrease the computation time, as explained for the simple polluted insulator model. Due to the small number of elements compared to the 3D model used previously (Figure 82), the time step used in the temporal thermoelectrical simulation was fixed at 0.5 s with a phase-to-ground voltage of 39.84 kV applied to the composite insulator.

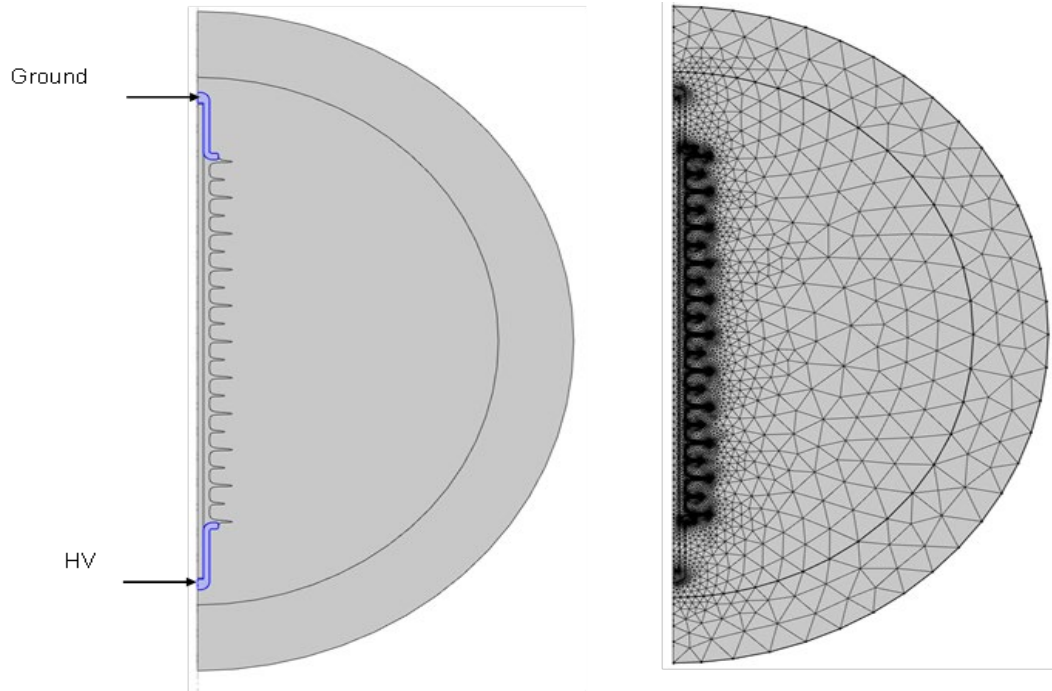


Figure 96 : Presentation of the numerical model with a) the 2D-axisymmetric 69 kV insulator and b) the corresponding meshed model.

6.7.2. NUMERICAL RESULTS RELATIVE TO THE ELECTRICAL PARAMETERS

Figure 97 presents the evolution of the leakage current and the pollution layer resistance obtained for an ESDD of 0.31 mg/cm^2 . The appearance of the dry band leads to a drastic decrease in the leakage current and a sudden increase in the pollution layer resistance, which occur at 17 s. This time step corresponds to the beginning of the dry band formation. The sudden decrease in the leakage current, corresponding to a loss of surface conductivity is strongly indicative of the formation of local drying, as experimentally observed on composite insulators [110].

Figures 98 and 99 present the comparison of the potential and E-field distributions along the clean insulator compared to the distributions obtained for the

polluted insulator at time steps of 0 s and 17 s with an ESDD of 0.31 mg/cm^2 . The distributions were computed along the leakage distance of the insulator.

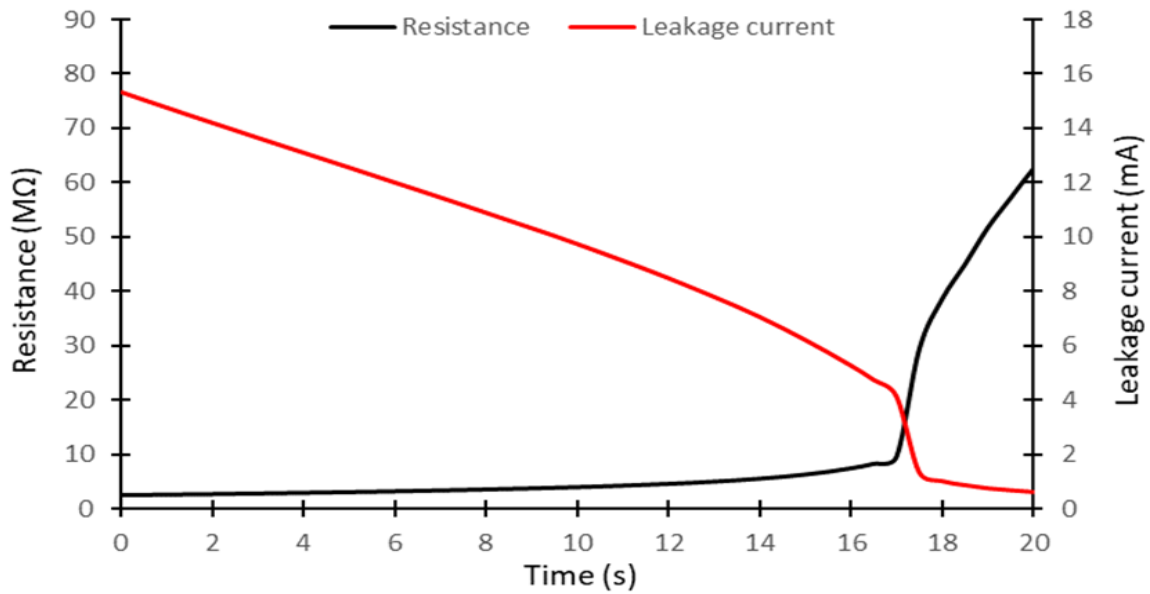


Figure 97 : Evolution of the leakage current and the pollution layer resistance obtained for an ESDD of 0.31 mg/cm^2 .

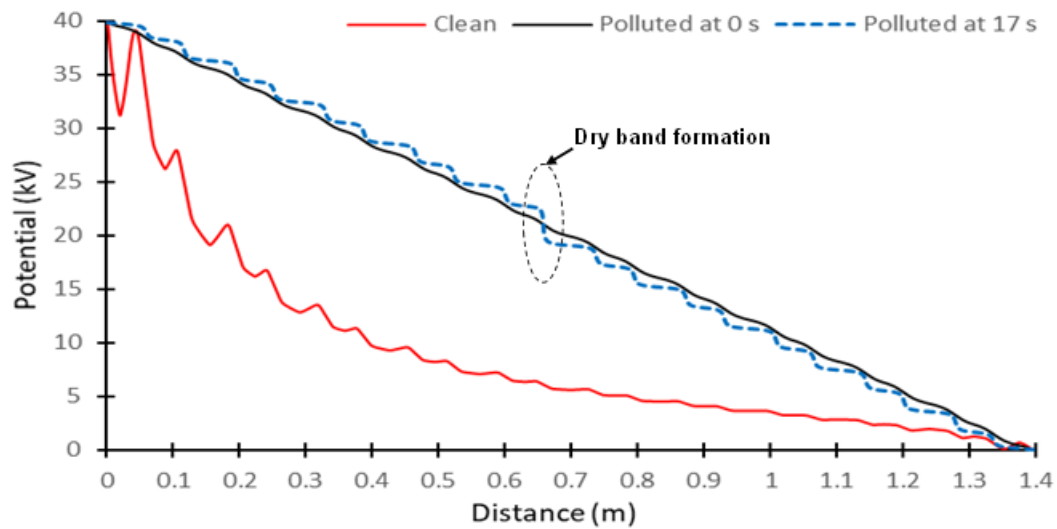


Figure 98 : Comparison of the potential distributions obtained for the clean and polluted insulators with an ESDD of 0.31 mg/cm^2 at time steps of 0 s and 17 s.

Figure 100 presents the distribution of the E-field and potential along the polluted insulator at time step of 17.5 s when the dry band is formed. Compared to the distributions shown in Figures 98 and 99, the results in Figure 100 clearly demonstrate the presence of the dry band in the middle of the insulator, where most of the voltage applied to the insulator is also applied to the dry band, resulting in a large increase in the E-field strength, which is largely sufficient to induce a partial arc along the dry band.

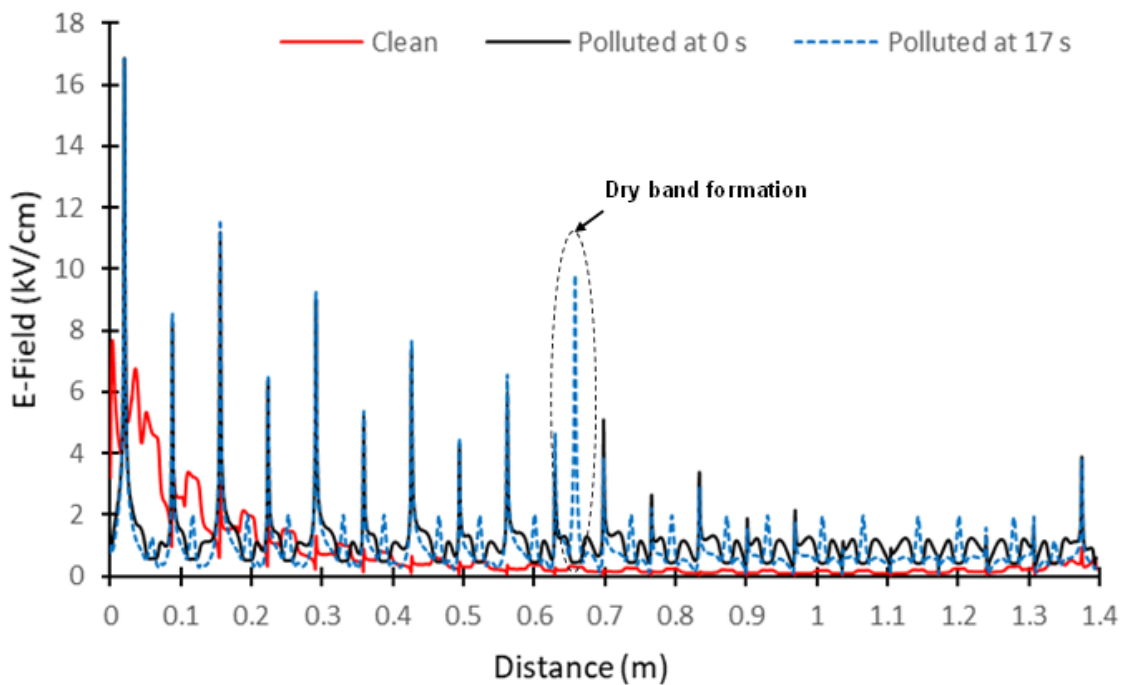


Figure 99 : Comparison of the E-field distributions obtained for the clean and polluted insulators with an ESDD of 0.31 mg/cm^2 at time steps of 0 s and 17 s.

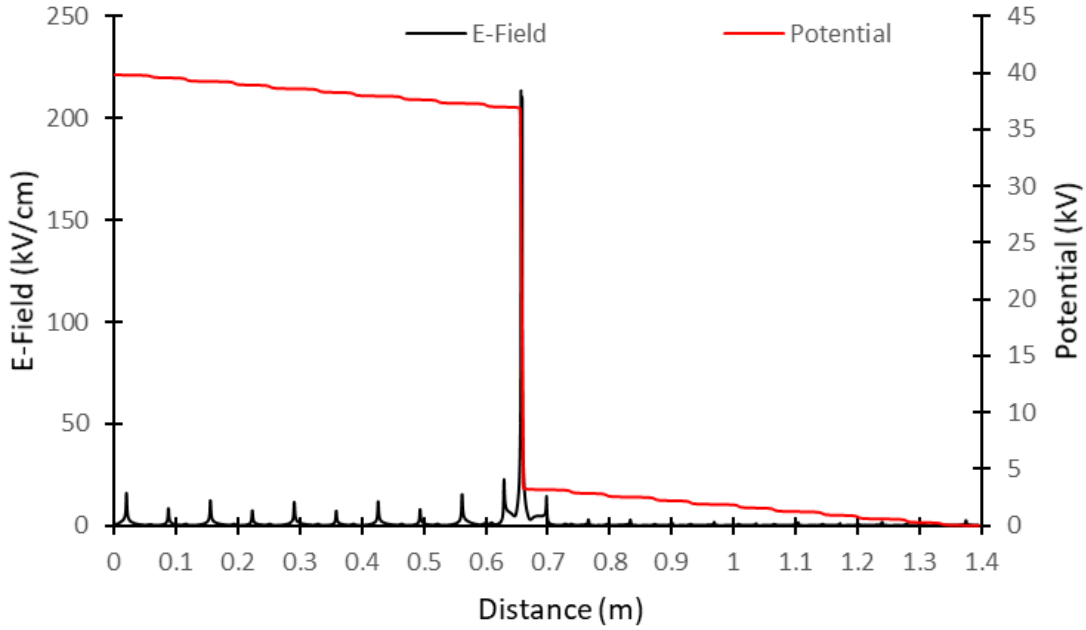


Figure 100 : Distribution of the E-field and potential along the polluted insulator for an ESDD of 0.31 mg/cm^2 at a time step of 17.5 s when the dry band is formed.

The position and the influence of the dry band on the potential distribution along the polluted insulator is clearly visible in Figure 101, which shows the surface potential and equipotential line distribution obtained for the clean insulator (Figure 101a), the polluted insulator at $t = 0 \text{ s}$ (Figure 101b), and the polluted insulator at $t = 17.5 \text{ s}$ (Figure 101c), where the dry band is present in the middle of the insulator. The influence of the pollution layer on the potential distribution is also clearly illustrated.

To closely see what occurs in the zone of the dry band appearance, the evolution of the potential, E-field, and surface conductivity distribution was computed along the reference line in blue in Figure 102. The results obtained for the different distributions for time steps of 0, 5, 10, 15, 17, and 17.5 are presented in Figure 103.

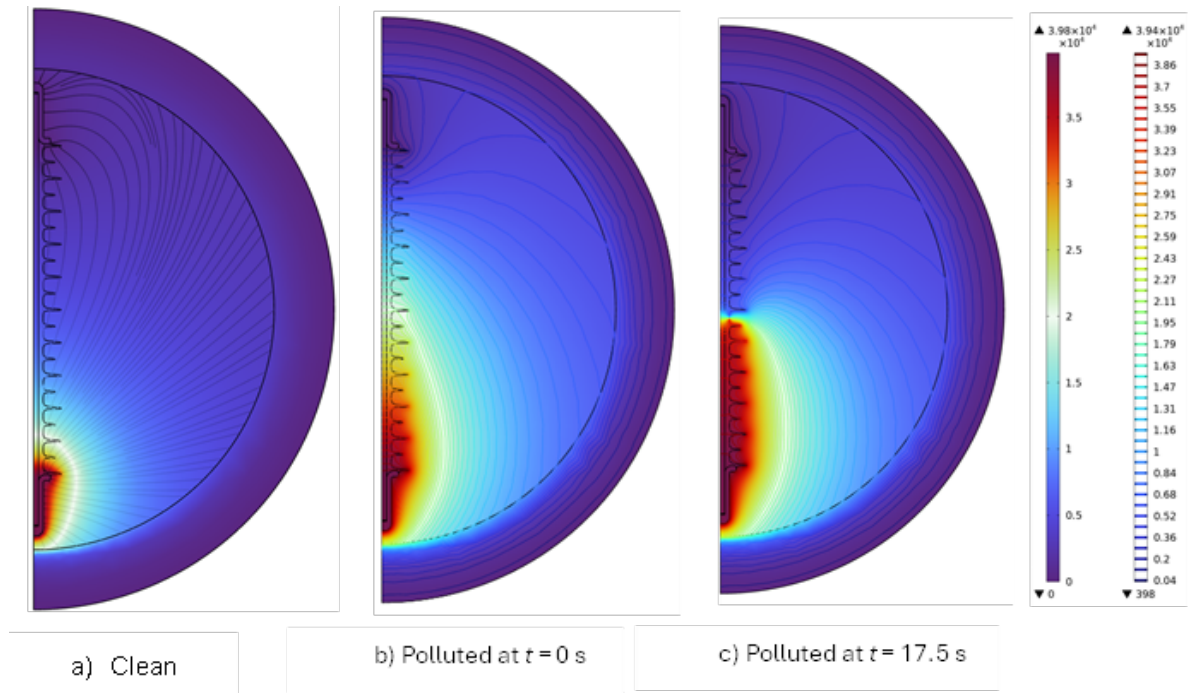


Figure 101 : Surface potential and equipotential lines' distribution obtained at time steps of 0 s and 17.5 s for the clean and polluted insulators with an ESDD of 0.31 mg/cm^2 .

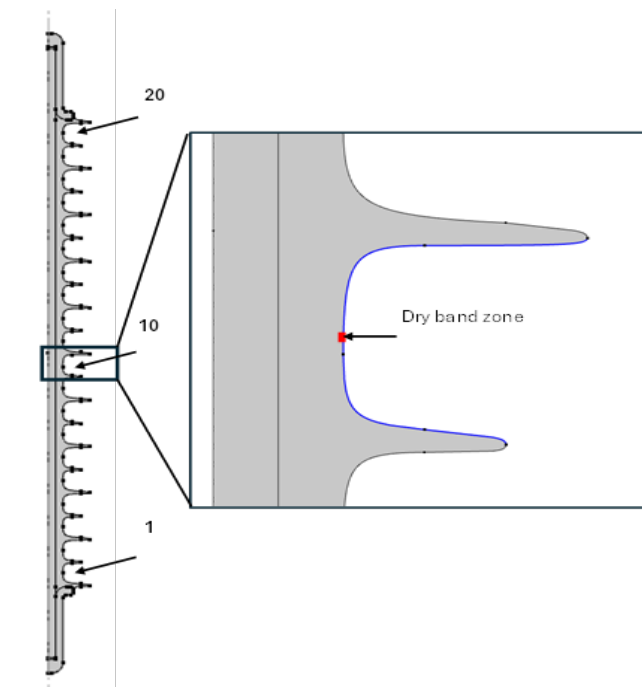


Figure 102 : Closer view of the dry band zone appearance and the computational line in blue.

The closer view of the different distributions presented in Figure 103 clearly shows the evolution of the E-field (Figure 103a) and potential (Figure 103b) distributions before the appearance of the dry band. As the surface conductivity $\gamma_s(T, ESDD)$ decreases locally in the dry band zone (Figure 103d), the voltage drop along the dry band zone increases, as well as the E-field strength (Figures 103b and 103a). At $t = 17.5$ s, the dry band is completely formed as observed in the closer view of Figure 103d, where the surface conductivity value is close to zero at a distance of around 2 mm, which represents the width of the dry band. This leads to a sudden increase in the voltage drop, as well as a significant increase in the E-field strength along the dry band, as demonstrated by the results in Figure 103c.

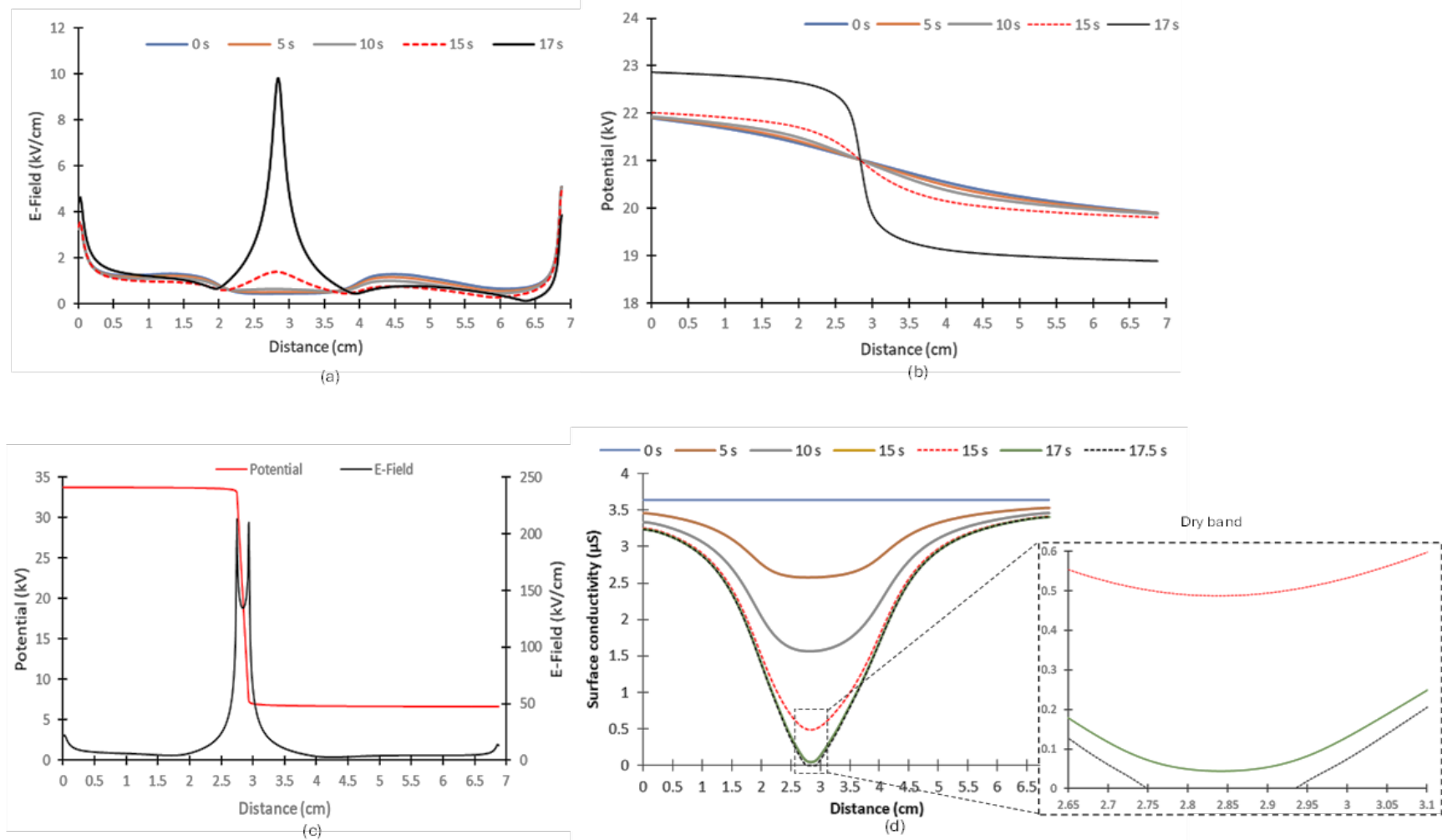


Figure 103 : Closer view of the evolution of the potential, E-field, and surface conductivity distributions along the dry band zone for an ESDD of 0.3 mg/cm^2 with a) E-field distribution, b) potential distribution, c) E-field and potential distribution along the dry band at $t = 17.5 \text{ s}$, and d) surface conductivity γ_s (T,ESDD).

6.7.3. NUMERICAL RESULTS RELATIVE TO THERMAL PARAMETERS

Figure 104 presents the evolution of the surface temperature distribution along the insulator leakage distance. As expected, the maximum surface temperatures are obtained between the sheds at the surface of the insulator rod, whose positions are numbered in Figure 102: position 1 is close to the HV, and position 20 is close to the ground. As the time increases, the maximum temperature at each position between sheds increases in the same manner until 15 s. After that time, the equality between the maximum temperatures is lost at position 10 (middle of insulator), where the maximum temperature seems to increase more rapidly than the other positions (9 and 11, for example at 69.6°C) until 116°C, except positions 1 and 10 (insulator extremities), where a decrease in the maximum temperature is observed compared to other positions (9 and 11, for example). The maximum temperature at positions 2 to 9 and 11 to 19 remains the same during the formation of the dry band.

To illustrate this phenomenon, the evolution of the maximum temperature at positions 1, 9, 10, 11, and 20 for the time step in Figure 104 are computed and presented in Figure 105. The maximum temperatures remain the same until 15 s, where the maximum temperature at position 10 increases rapidly to 116°C at 17.5 s when the dry band is completely formed. This can be compared to the 69.6°C obtained at positions 9 and 11 and to the 65.9°C at positions 1 and 20. Except at position 10 where the dry band is formed, the maximum temperature at the other positions does not increase between 17 s and 17.5 s (Figure 105).

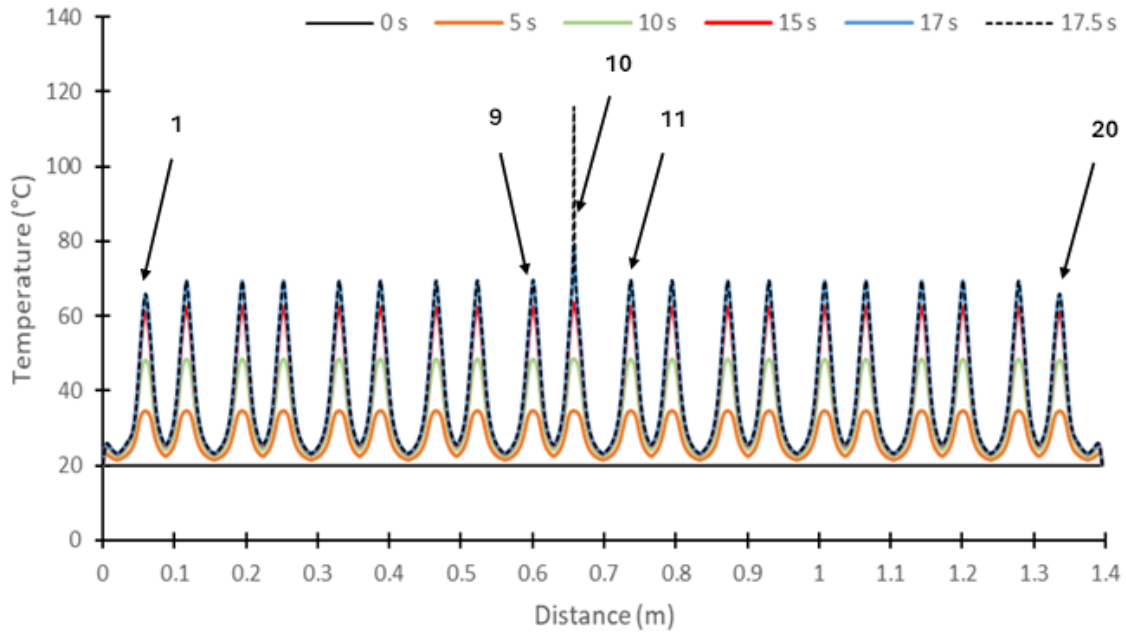


Figure 104 : Evolution of the temperature distribution along the polluted insulator until the formation of the dry band with an ESDD of 0.3 mg/cm^2 .

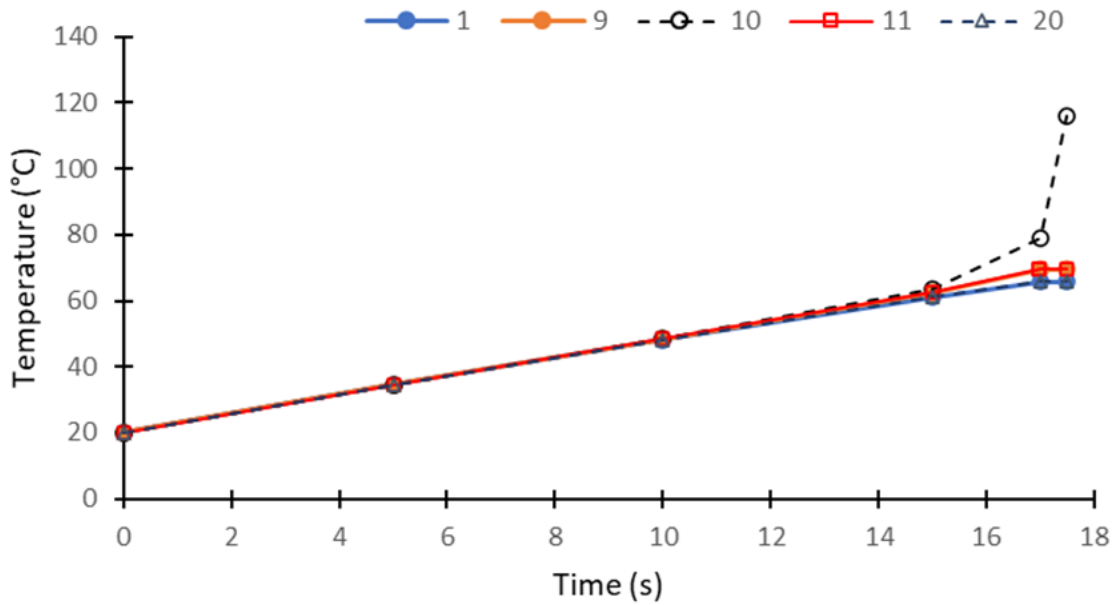


Figure 105 : Evolution of the maximum temperature at the surface of the insulator core at positions 1, 9, 10, 11, and 20 for an ESDD of 0.3 mg/cm^2 .

Figure 106 presents the evolution of the temperature distribution at the surface of the polluted insulator corresponding to the time steps used in Figure 104. As observed previously, the maximum temperatures occur at the insulator rod surface between the sheds. The maximum temperatures evolve in the same manner (Figures 106a to 106c) and start to change until the complete formation of the dry band, whose position is clearly observable in Figure 106f.

Finally, Figure 107 presents a closer view of the surface temperature along a portion of the leakage distance between positions 9 and 11 to see in detail the temperature evolution in the dry band zone. The difference in the formation of the dry band due to the local temperature increase is noticeable only in the last 2.5 s, where a sudden increase in the temperature distribution is obtained compared to positions 9 and 11. The sudden change in the local temperature explained the formation of the dry band at this particular position.

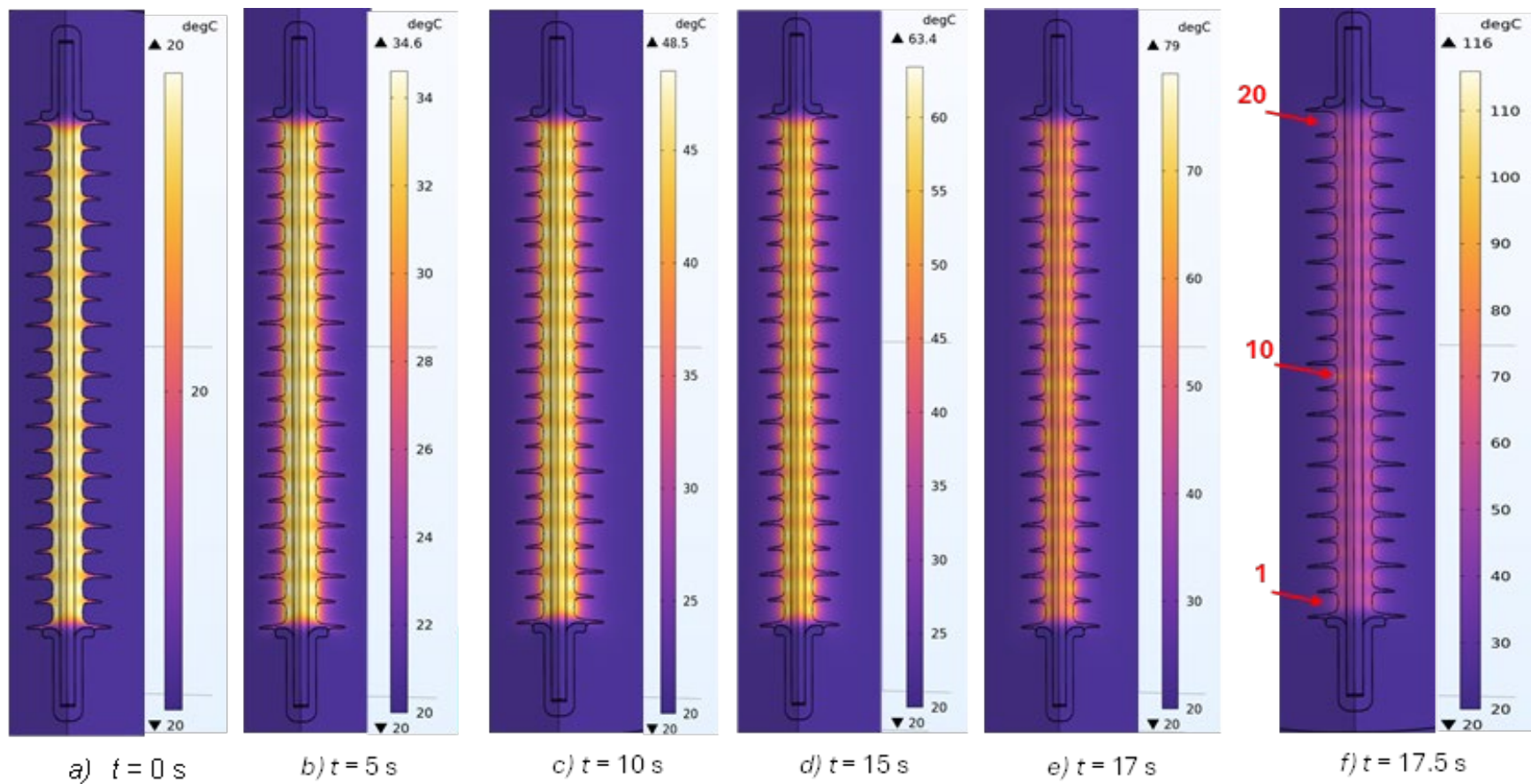


Figure 106 : Evolution of the surface temperature of the polluted insulator until the formation of the dry band with an ESDD of 0.3 mg/cm^2 .

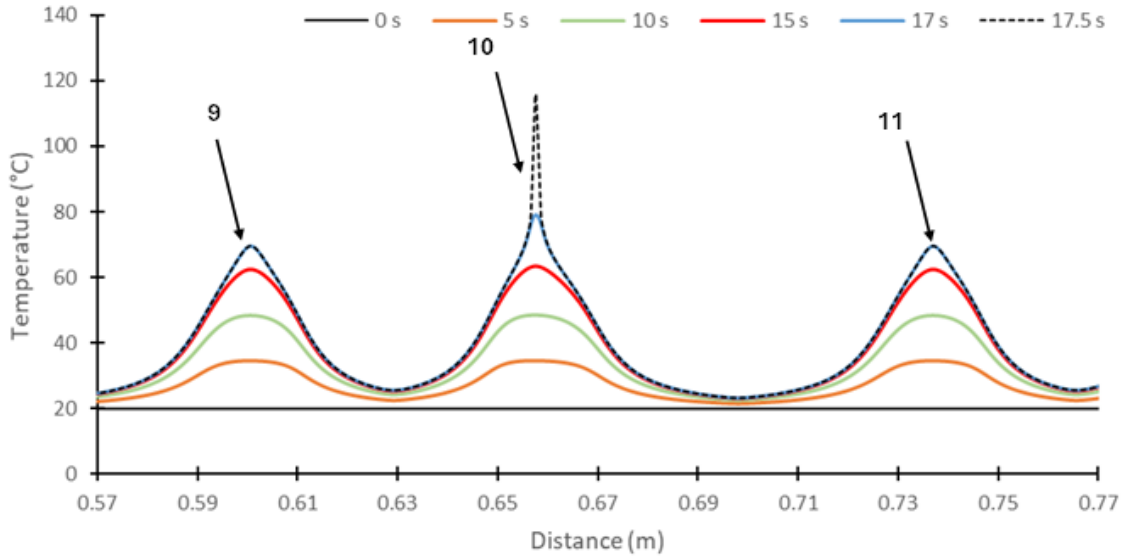


Figure 107 : Closed view of the evolution of the temperature distribution at the surface of the polluted insulator until the formation of the dry band between positions 9 and 11 with an ESDD of 0.3 mg/cm^2 .

6.7.4. DISCUSSION OF THE RESULTS OBTAINED

The different results presented in this section seem to demonstrate that under the specific condition of a uniformly polluted insulator, the dry band seems to appear at the insulator rod surface between the sheds, which is consistent with the experimental observations of real composite insulators [72, 84, 110]. However, the results also reveal that the first dry band seems to form in the middle of the insulator (position 10 on Figure 102), as illustrated by the results shown in Figures 101 and 106. This result is also consistent with the experimental observation reported in [84, 110]. The results also demonstrate that under a uniform pollution layer, the distribution of the surface temperature at the rod surface is sensibly the same along the insulator but starts to differ only in the few last seconds before the dry band formation, as illustrated by the results shown in Figures 104 to 107. This means that a small local change in the surface temperature, as observed in Figure 107, can suddenly lead to the formation of the dry band along the polluted insulator, as reported in [84].

Such a situation can be found with a non-uniform pollution distribution along the insulator, which can be obtained either by a different surface conductivity distribution or by a different pollution layer thickness [122-124]. From the different on-site observations, the contamination of the insulator bottom shed surface appears more serious than on the top by a factor of up to 20, especially for the sheds close to the HV insulator end [124]. To illustrate this, a simulation with a non-uniform pollution distribution was performed by simply modifying the thickness of the pollution layer (1 mm instead of 0.5 mm) on the bottom of the first three sheds, as illustrated by the blue lines of the closer view in Figure 108a. As shown in Figure 108b, the dry band appears after 5.5 s, but now it is formed at position 1 close to the HV electrode. This result demonstrates that the non-uniformity of the pollution layer directly influences the position of the dry bands, and this non-uniformity can easily be taken into account with the numerical method proposed in this work. The simulation results have also permitted a detailed study of the evolution of the potential and E-field distribution in the dry band formation zone. As illustrated in Figure 103c, the E-field distribution obtained along the dry band of 2 mm width presents a typical U-shape distribution, which was obtained in different simulations of polluted insulators [33, 72, 112].

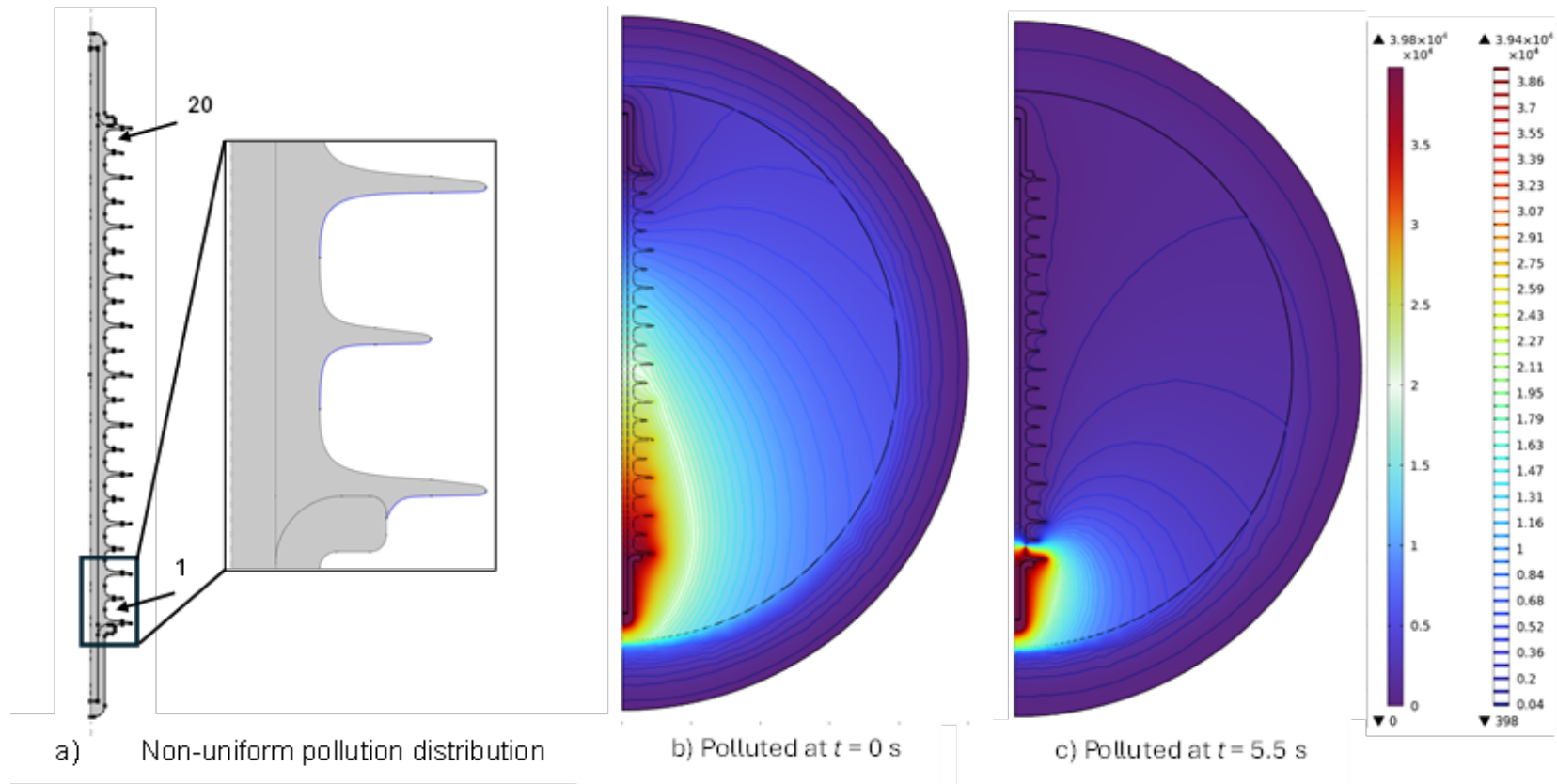


Figure 108 : The surface potential and equipotential lines' distribution obtained at time steps of 0 s and 5.5 s for the polluted insulator presented a non-uniform pollution layer with an ESDD of 0.31 mg/cm^2 .

6.8 CONCLUSION

The use of a simple flat geometry permitted experimental simulation of the complex phenomenon of the formation of a dry band on polluted insulators. By precisely controlling the zone of the dry band appearance and recording the evolution of the surface temperature and pollution layer resistance, it was possible to define a simple expression of the surface conductivity of a pollution layer as function of the average surface temperature inside the dry band and the ESDD. Hence, for a fixed ESDD value, the surface conductivity $\gamma_s(T, ESDD)$ decreases linearly with the increase in the surface temperature.

Due to its simplicity, the surface conductivity expression was easily implemented in the commercial FEM software Comsol Multiphysics, which enables modeling the pollution layer using a specific thermoelectrical boundary condition. This combination led us to propose, to the best of our knowledge, the first simple thermoelectric surface model of a pollution layer, which can simulate the temporal evolution of the pollution layer resistance until the formation of the dry band, considering the electrothermal properties of the insulator material. The proposed pollution layer model was validated with experimental results on a Plexiglas substrate, where a maximum discrepancy of 18.1 % was obtained for the average pollution layer resistance and 17.8 % for the maximum temperature. For the temporal part of the simulations, a maximum discrepancy of 7.5% was obtained in the dry band appearance time.

The results also demonstrated that the thermoelectric surface model can consider the influence of the thermal properties of the substrate materials on which the pollution layer is deposited. This represents a significant advantage over models based solely on E-field considerations to express the thermal power dissipated in the pollution layer.

The different simulations also permitted highlighting the thermal influence of the pollution layer thickness on the time to dry band formation as well as the influence of the ESDD level. In particular, the proposed model was not able to reproduce the experimental results where the dry band appearance time increased with the ESDD level increase. This significant difference can be explained by the fact that as the ESDD level increased, the pollution layer increased, which can result in an increase in the dry band appearance time. It might then be interesting to define a relationship between the ESDD level and the pollution layer thickness, which could then be easily implemented in the numerical model.

Moreover, the proposed thermoelectric surface model was used to axisymmetrically simulate in 2D a uniformly polluted 69 kV composite insulator. As demonstrated, under uniform pollution, the dry band appears in the middle of the insulator length. The model also permits following the temporal evolution of the surface temperature, the potential, and the E-field distributions, which are of great interest for the comprehension of the insulator behavior under polluted conditions. It was also demonstrated by a simple simulation that the thermoelectrical surface model can easily consider a non-uniform pollution layer with a dry band formed between the first two sheds close to the HV electrode.

In conclusion, the thermoelectric surface model can provide an interesting tool to numerically study the influence of different parameters relative to the pollution layer and the insulator material and geometry. Hence, the proposed model can help to study and develop new types of mitigation methods to improve the performance of all type of insulators under polluted conditions. In addition, these new mitigation methods could then be easily tested with the simple flat insulator geometry used in our previous studies, which can experimentally reproduce the formation of a dry band.

CHAPITRE 7

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

7.1 CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent projet de recherche avait pour objectif principal le développement d'un modèle numérique thermoélectrique permettant de simuler le processus de création des bandes sèches le long des isolateurs pollués. Le but de ce modèle étant de reproduire numériquement les essais sous pollution des isolateurs composites afin de pouvoir étudier l'apparition de bandes sèches jusqu'au claquage de celles-ci. Ce dernier pourra ainsi constituer le point de départ des modèles numériques de contournement des isolateurs HT classiques qui tiennent pour acquis l'existence d'un arc partiel établi. Les travaux conduits ont été essentiellement axés sur :

- le développement d'un système expérimental simple permettant de reproduire le processus complexe de formation des bandes sèches dans le but de développer une formulation empirique de la conductivité électrique de la couche de pollution en fonction de la température de surface et de la DDSE ;
- le développement du modèle numérique thermoélectrique simple permettant de simuler la formation de la bande sèche à la surface de l'isolateur composite pollué.

Les travaux, dont les résultats ont été diffusés à travers les trois articles de journaux présentés dans ce manuscrit, ont permis de développer un nouveau dispositif géométrique simple pour l'étude expérimentale de formation des bandes sèches. Les résultats obtenus lors des essais de cette géométrie ont clairement

montré que la contrainte thermique et la densité de courant sont plus importantes dans la partie cintrée de la géométrie, permettant ainsi d'obtenir une excellente reproductibilité de l'apparition de la bande sèche dans cette zone. En combinant la simplicité de la géométrie proposée avec une petite chambre climatique et une petite source H.T., il devient alors plus facile de tester différents matériaux (RTV, verre, matériaux superhydrophobes, etc.) afin d'évaluer leur comportement sous pollution atmosphérique dans un temps et un prix réduit par rapport aux tests d'isolateurs à grande échelle. Comme la méthode de test développée dans cette recherche ne nécessite pas d'équipements de test coûteux, cela permet d'offrir aux différents intervenants de l'industrie électrique une solution économique leur permettant de développer et tester de nouveaux matériaux et conceptions de surface dans le but d'améliorer les performances des isolateurs dans différents environnements pollués.

Le modèle proposé a également permis pour la première fois, aux meilleures de nos connaissances, la mesure directe de l'évolution du champ électrique axial au-dessus d'une bande sèche lors de sa formation à l'aide d'un capteur EO. Les différents résultats expérimentaux obtenus ont démontré que notre modèle géométrique simple offre une méthode simple et efficace pour évaluer les effets du matériau du substrat et des paramètres environnementaux (température ambiante et DDSE) sur les isolateurs pollués. Pour les mêmes conditions expérimentales, le substrat influence significativement la résistivité superficielle de la couche de pollution ainsi que le temps d'apparition de la bande sèche. L'augmentation de la conductivité

thermique du matériau entraîne également une augmentation du temps d'apparition de la bande sèche. Il a également été possible de démontrer que l'apparition de la bande sèche était retardée avec l'augmentation de la température ambiante.

Cette étude de l'évolution de la résistance de la couche de pollution et des champs électriques axiaux met en évidence que la formation de la bande sèche est un processus rapide, comme décrit dans la littérature. L'apparition de la bande sèche se caractérise par une augmentation rapide et corrélée de la résistance de la couche de pollution et du champ électrique axial. Le champ électrique axial atteint une valeur maximale lorsque la chute de tension le long de la bande sèche est égale à la tension appliquée, et influence donc directement la largeur de la bande sèche. Ainsi, les résultats présentés ici apportent une nouvelle compréhension de l'influence de plusieurs paramètres sur la formation de la bande sèche le long des isolateurs céramiques et non céramiques pollués.

En contrôlant précisément la zone d'apparition de la bande sèche et en enregistrant l'évolution de la température de surface et de la résistance de la couche de pollution, il a été possible de définir une expression simple mais tout aussi importante de la conductivité électrique de surface d'une couche de pollution en fonction de la température moyenne de surface $\gamma_s(T, ESDD)$ au centre de la bande sèche et de la DDSE. Ainsi, pour une valeur de DDSE fixée, la conductivité de surface $\gamma_s(T, ESDD)$ diminue linéairement avec l'augmentation de la température de surface.

Grâce à sa simplicité, l'expression de la conductivité de surface a ainsi pu facilement être implémentée dans le logiciel commercial de modélisation par éléments finis Comsol Multiphysics ; ce qui a permis de modéliser la couche de pollution à l'aide d'une condition thermoélectrique de surface spécifique. Cette combinaison nous a conduit à proposer, aux meilleures de nos connaissances, le premier modèle thermoélectrique surfacique d'une couche de pollution, capable de simuler l'évolution temporelle de la résistance de la couche de pollution jusqu'à sa formation, en tenant compte des propriétés thermoélectriques du matériau constituant l'équipement d'isolation. Le modèle de couche de pollution proposé a été validé par des résultats expérimentaux sur un substrat en plexiglas, où un écart maximal de 18,1 % a été obtenu pour la résistance moyenne de la couche de pollution et de 17,8 % pour la température maximale. Pour la partie temporelle des simulations, un écart maximal de 7,5 % a été obtenu pour le temps d'apparition de la bande sèche.

Les simulations ont également démontré que le modèle de surface thermoélectrique peut prendre en compte l'influence des propriétés thermiques des matériaux du substrat sur lequel la couche de pollution est déposée. Cela représente un avantage significatif par rapport aux modèles basés uniquement sur des considérations de champ électrique pour exprimer la puissance thermique dissipée dans la couche de pollution.

Également, le modèle surfacique thermoélectrique proposé a été utilisé pour simuler axisymétriquement en 2D un isolateur composite de 69 kV uniformément pollué. Le modèle a permis de suivre l'évolution temporelle de la température de surface, du potentiel et des distributions du champ électrique,

qui sont d'un grand intérêt pour la compréhension du comportement de l'isolateur pollué. Une simulation simple a également démontré que le modèle surfacique thermoélectrique peut facilement considérer une couche de pollution non uniforme par une simple modification de l'épaisseur de cette dernière sur la partie inférieure des jupes qui sont moins exposées au processus de lavage naturel.

En conclusion, le modèle de surface thermoélectrique peut fournir un outil intéressant pour étudier numériquement l'influence de différents paramètres relatifs à la couche de pollution, au matériau et à la géométrie de l'isolateur. Le modèle proposé peut donc contribuer à l'étude et au développement de nouvelles méthodes d'atténuation afin d'améliorer les performances de tous types d'isolateurs en conditions de pollution. De plus, ces nouvelles méthodes d'atténuation pourraient être facilement testées avec la géométrie simple de l'isolateur plat utilisée dans nos travaux, et qui permet de reproduire expérimentalement la formation d'une bande sèche.

7.2 RECOMMANDATIONS POUR TRAVAUX FUTURS

Les différentes simulations ont permis de mettre en évidence les limitations du modèle surfacique proposé en ce qui a trait à l'influence thermique de l'épaisseur de la couche de pollution et le niveau de DDSE sur le temps de formation de la bande sèche. En particulier, le modèle proposé n'a pas pu reproduire les résultats expérimentaux où le temps d'apparition de la bande sèche augmentait avec l'augmentation du niveau de DDSE. Cette différence significative peut s'expliquer par le fait qu'avec l'augmentation du

niveau de DDSE, l'épaisseur de la couche de pollution augmente, ce qui entraîne une augmentation du temps d'apparition de la bande sèche à cause principalement du processus d'évaporation de l'eau présente dans la couche de pollution. Il pourrait alors être intéressant de définir une relation entre le niveau de DDSE et l'épaisseur de la couche de pollution, relation qui pourrait ensuite être facilement implémentée dans le modèle numérique.

Il serait également intéressant de pouvoir intégrer l'initiation de l'arc électrique qui est le point de départ de la majorité des études de propagation et de contournement des isolateurs électriques. Une fois cette étape réalisée, le modèle numérique ainsi amélioré pourrait alors être couplé à un modèle numérique existant, également basé sur la MEF, et qui permet de déterminer la tension de contournement des isolateurs glacés et pollués en prenant en compte la présence de plusieurs arcs à la surface de l'isolateur. L'association de ces deux modèles numériques permettra ainsi de mettre en place un laboratoire virtuel qui permettra de simuler un test d'isolateurs de ligne sous conditions de pollution atmosphériques.

Le traitement des données des tests d'humidification a permis d'élaborer une expression empirique de la conductivité électrique de la couche de pollution à base de kaolin et de sel. Cette formulation pourrait être appliquée à un model électro-thermo-diffusique développé sous le logiciel commercial Comsol Multiphysics afin de reproduire le phénomène de formation de bande sèche à la surface d'un isolateur pollué. Cependant, faisant intervenir une troisième interface pour l'absorption et l'évaporation, cette modélisation s'avère plus complexe pour l'usage des électriciens. L'approche à deux

interfaces thermoélectriques a donc été retenue dans nos travaux présentés plus haut dans le troisième article de journal. Nous laissons néanmoins ces résultats de formulation empirique pour de futurs modélisateurs plus aguerris du domaine diffusique, que nous pensons pourraient améliorer la précision des modèles numériques.

LISTE DE RÉFÉRENCES

1. INMR. *A Review of Insulator Failure Modes*. 2017 november 11, 2017 [cited 2018 septembre 23]; Available from: <http://www.inmr.com/review-insulator-failure-modes/>.
2. Kone, G., *Contribution à l'amélioration de la méthode en ligne de mesure de champ électrique pour détecter la présence de défauts internes au sein des isolateurs composites*. 2015.
3. Bouzeroura, A. and R. Boudissa, *Etude du developpement d'arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue*. 2009, Université Abderrahmane Mira-Bejaia.
4. IEC, *IEC 60507 : Artificial pollution tests on high voltage ceramic and glass insulators to be used on AC systems*. 2013.
5. Pushpa, Y.G. and N. Vasudev. *Artificial pollution testing of polymeric insulators by CIGRE round robin method-withstand & flashover characteristics*. in *2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*. 2017.
6. Gutman, I. and A. Dernfalk, *Pollution tests for polymeric insulators made of hydrophobicity transfer materials*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010. 17(2): p. 384-393.
7. Matsuoka, R. and K. Sakanishi, *Consideration into CIGRE round robin contamination test of polymer insulators*. 2012. 409-412.
8. CIGRE and WG C4.303, *Artificial Pollution Test for Polymer Insulators : Results of Round Robin Test*. 2013, CIGRE. p. 37.
9. Nekahi, A., S. McMeekin, and M. Farzaneh. *Influence of dry band width and location on flashover characteristics of silicone rubber insulators*. in *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), 2016*. 2016. IEEE.
10. Terrab, H. and A. Bayadi, *Experimental study using design of experiment of pollution layer effect on insulator performance taking into account the presence of dry bands*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014. 21(6): p. 2486-2495.
11. Waters, R., et al., *Dry-band Discharges on Polluted Silicone Rubber Insulation: Control and Characterization*. Vol. 18. 2011. 1995-2003.
12. Karady, G.G., M. Shah, and R.L. Brown, *Flashover mechanism of silicone rubber insulators used for outdoor insulation-I*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995. 10(4): p. 1965-1971.

13. Slama, M.E.-A., H. Hadi, and S. Flazi. *Dynamic modeling of the temporal evolution of DC flashover discharge current with liquid electrolyte and ice pollution layer*. in *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2007*. 2007. IEEE.
14. Nekahi, A., S. McMeekin, and M. Farzaneh, *Effect of pollution severity and dry band location on the flashover characteristics of silicone rubber surfaces*. *Electrical Engineering*, 2017. 99(3): p. 1053-1063.
15. Texier, C. and B. Kouadri, *Model of the formation of a dry band on an NaCl-polluted insulation*. Vol. 133. 1986. 285-290.
16. Slamet, H., *Contribution a l'etude du modèle développée d'un isolateur pollué*. 2013, usto.
17. Beroual, A., N. Dhahbi Megriche, and W. Arfaoui, *Computer package for selecting high voltage insulators for different contamination conditions*. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013. 20(4): p. 1428 - 1435.
18. Bessedik, S.A., *Contournement des isolateurs pollués*. 2015, University of sciences and technology in Oran.
19. Dhahbi-Megriche, N. and A. Beroual, *Dynamic model of discharge propagation on polluted surfaces under impulse voltages*. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 2000. 147(5): p. 279-284.
20. Yang, Q., et al., *Electrical circuit flashover model of polluted insulators under AC voltage based on the arc root voltage gradient criterion*. *Energies*, 2012. 5(3): p. 752-769.
21. SLAMA, M., et al., *Etude du dépôt de pollution responsable du contournement des isolateurs des lignes aériennes du réseau électrique THT national*. *Sciences & Technologie. B, Sciences de l'ingénieur*, 2007(25): p. 43-50.
22. Bouhmama, M., et al., *Experimental modeling of the flashover of polluted insulator in the presence of a metal plate using RSM technique*. *Journal of Power Technologies*, 2018. 97(4): p. 342-346.
23. Karady, G.G., M. Shah, and R. Brown, *Flashover mechanism of silicone rubber insulators used for outdoor insulation-I*. *IEEE transactions on power delivery*, 1995. 10(4): p. 1965-1971.
24. Nekahi, A., S. McMeekin, and M. Farzaneh. *Investigating flashover behaviour of silicone rubber insulators under contaminated conditions*. in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2015 IEEE Conference on*. 2015. IEEE.

25. Dhahbi-Megriche, N. and A. Beroual. *Model for calculation of flashover characteristics on polluted insulating surfaces under DC stress*. in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1998. Annual Report. Conference on*. 1998. IEEE.
26. BOUHAMAMA, M., *Modélisation du contournement sur isolateur réel pollué*. 2018.
27. Kimbakala, S.D., *Modélisation dynamique des décharges se propageant sur des surfaces isolantes polluées avec des dépôts discontinus sous différentes formes de tension*. 2007, Ecole Centrale de Lyon.
28. Megriche, N.D., *Modélisation dynamique des décharges sur les surfaces d'isolateurs pollués sous différentes formes de tension: élaboration d'un critère analytique de propagation*. 1998, Ecole Centrale de Lyon.
29. Dhahbi-Megriche, N., A. Beroual, and L. Krähenbühl, *A new proposal model for flashover of polluted insulators*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1997. 30(5): p. 889.
30. Chrzan, K.L. and F. Moro, *Concentrated Discharges and Dry Bands on Polluted Outdoor Insulators*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007. 22(1): p. 466-471.
31. Zhou, J.-b., B. Gao, and Q.-g. Zhang. *Dry band formation and its influence on electric field distribution along polluted insulator*. in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*. 2010. IEEE.
32. Bo, L. and R. Gorur, *Modeling flashover of AC outdoor insulators under contaminated conditions with dry band formation and arcing*. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012. 19(3).
33. Nekahi, A., S. McMeekin, and M. Farzaneh, *Numerical computation of electric field and potential along silicone rubber insulators under contaminated and dry band conditions*. *3D Research*, 2016. 7(3): p. 25.
34. Dhofir, M., D.D. Andaru, and R.N. Hasanah. *The influence of conduction band location on the leakage current level of a glass insulator*. in *Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE), 2017 5th International Conference on*. 2017. IEEE.
35. Jean Marie GEORGE, G.T., Sandrine Prat *Procédé de fabrication d'un isolateur composite utilisant une résine à haute performance thermique*. 2014.
36. Jabbari, M., *Développement d'un modèle numérique générique de prédiction de la tension de contournement des isolateurs recouverts de glace*. 2018.

37. Jabbari, M., C. Volat, and I. Fofana, *Numerical Modelling of Ice-Covered Insulator Flashover: The Influence of Arc Velocity and Arc Propagation Criteria*. Vol. 11. 2018. 2807.
38. Jabbari, M., C. Volat, and I. Fofana, *Development of a New Bi-Arc Dynamic Numerical Model for Modeling AC Flashover Processes of EHV Ice-Covered Insulators*. *Energies* (19961073), 2018. 11(10): p. 2792.
39. Hadjrioua, F., D. Mahi, and M.E.-A. Slama, *Electro-thermal dynamic model using the analytical arc parameters for the prediction of the critical flashover condition on the HVDC polluted insulator*. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017. 11(2): p. 427-436.
40. Bastidas-Erazo, P.D., *Study of Degradation of Composite Insulators at Material Interfaces*, in *Faculty of Science and Engineering*. 2018, The University of Manchester. p. 268.
41. Kone, G., *Contribution à l'amélioration de la méthode en ligne de mesure de champ électrique pour détecter la présence de défauts internes au sein des isolateurs composites*. 2015.
42. Dhahbi-Megriche, N. and A. Beroual. *Computation of Electrical Potential Distribution along Insulator covered with Thin Conductive Pollution Layer*. in *Proceedings of the Fourth International Conference on Engineering & MIS 2018*. 2018. ACM.
43. Yang, Q., et al., *A new AC flashover model of ice-covered HV insulators based on numerical electric field analysis*. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2008. 2(4): p. 600-609.
44. Yang, Q., et al., *Modeling of DC Flashover on Ice-Covered HV Insulators Based on Dynamic Electric Field Analysis*. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007. 14(6): p. 1418-1426.
45. Waters, R.T., et al., *Partial-arc and spark models of the flashover of lightly polluted insulators*. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010. 17(2): p. 417-424.
46. Volat, C., M. Farzaneh, and N. Mhaguen, *Improved FEM models of one-and two-arcs to predict AC critical flashover voltage of ice-covered insulators*. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011. 18(2): p. 393-400.
47. Taheri, S., M. Farzaneh, and I. Fofana, *Electrical performance evaluation of EHV post insulators covered with ice under different air gap configurations*. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2014. 21(6): p. 2619-2627.

48. Aydogmus, Z. and M. Cebeci, *A new flashover dynamic model of polluted HV insulators*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004. 11(4): p. 577-584.
49. Akkal, H., C. Volat, and M. Farzaneh, *Improving electrical performance of ehv post station insulators under severe icing conditions using modified grading rings*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013. 20(1): p. 221-228.
50. Jabbari, M., C. Volat, and I. Fofana. *Comparison of Different Residual Resistance Calculation Methods used in Predictive Insulator Flashover Models*. in *2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. 2018.
51. Salem, A.A. and R. Abd-rahman. *A Review of the Dynamic Modelling of Pollution Flashover on High Voltage Outdoor Insulators*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. IOP Publishing.
52. Volat, C., M. Farzaneh, and N. Mhaguen. *Calculation of critical flashover voltage of ice-covered insulators using the finite element method*. in *2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 2009.
53. Sundararajan, R. and R.S. Gorur, *Role of non-soluble contaminants on the flashover voltage of porcelain insulators*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996. 3(1): p. 113-118.
54. Albano, M., et al., *Artificial pollution layer characterization on conventional and textured silicone-rubber insulators*. 2015.
55. Rajamani, P., et al., *Development of Laboratory Test Method to Perform Artificial Pollution Test on Composite Insulators Intended for HVDC Applications by Solid Layer Method*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024. 31(1): p. 439-447.
56. Charalampidis, P., et al., *Silicone rubber insulators for polluted environments part 1: enhanced artificial pollution tests*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014. 21(2): p. 740-748.
57. Albano, M., et al., *Silicone rubber insulators for polluted environments part 2: textured insulators*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014. 21(2): p. 749-757.
58. Khaled, A., A. El-Hag, and K. Assaleh. *Equivalent salt deposit density prediction of outdoor polymer insulators during salt fog test*. in *2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. 2016.
59. Naderian, A., M. Sanaye-Pasand, and H. Mohseni. *A review of artificial contamination withstand test methods of high voltage outdoor insulators*. in

Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. 2004.

60. SAISON, J.Y., *Etude du phénomène d'humidification de dépôts naturels et artificiels de pollution sur des isolateurs électriques*. 1994.
61. C. Salthouse, E., *Initiation of dry bands on polluted insulation*. Vol. 115. 1968.
62. Loberg, J.O. and E.C. Salthouse, *Dry-Band Growth on Polluted Insulation*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1971. EI-6(3): p. 136-141.
63. Smail, G.G., R.J. Brooksbank, and W.M. Thornton, *The electrical resistance of moisture films on glazed surfaces*. Journal of the Institution of Electrical Engineers, 1931. 69(411): p. 427-436.
64. Slama, A., *Etude expérimentale et modélisation de l'influence de la constitution chimique et de la répartition de la pollution sur le contournement des isolateurs haute tension*. 2011, Ecole Centrale de Lyon.
65. Williams, D.L., et al., *Formation and characterization of dry bands in clean fog on polluted insulators*. Vol. 6. 1999. 724-731.
66. Hussain, M., et al., *Dry Band Formation on HV Insulators polluted with Different Salt Mixtures*. 2015.
67. BV, C. and C. OY, *COMSOL Multiphysics User's Guide© COPYRIGHT 1998–2010 COMSOL AB*. 1998.
68. Dhahbi-Megriche, N., M.E.-A. Slama, and A. Beroual. *Influence of dry bands on polluted insulator performance*. in *2017 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*. 2017. IEEE.
69. Albano, M., A. Haddad, and N. Bungay, *Is the dry-band characteristic a function of pollution and insulator design?* 2018. 1-4.
70. Nekahi, A., S. McMeekin, and M. Farzaneh, *Measurement of surface resistance of silicone rubber sheets under polluted and dry band conditions*. Electrical Engineering, 2018. 100(3): p. 1729-1738.
71. Ahmed, R., et al., *Field-dependent pollution model under polluted environments for outdoor polymeric insulators*. Polymers, 2022. 14(3): p. 516.
72. Salem, A., et al., *Investigation of High Voltage Polymeric Insulators Performance under Wet Pollution*. Polymers, 2022. 14: p. 1236.
73. Slama, M.E.-A., *Etude expérimentale et modélisation de l'influence de la constitution chimique et de la répartition de la pollution sur le contournement des isolateurs haute tension*. 2011, Ecully, Ecole centrale de Lyon.

74. Kone, G., C. Volat, and H. Ezzaïdi, *Numerical investigation of electric field distortion induced by internal defects in composite insulators*. High voltage, 2017. 2(4): p. 253-260.
75. Volat, C., *Modélisation Physique et Numérique par la Méthode des Elements Finis de Frontière de la Distribution du Potentiel et du Champ électrique le Long d'un Isolateur Standard de poste 735 kV recouvert de glace*. 2002.
76. Chandrasekar, C.M.a.S., *Finite Element Modeling for Electric Field and Voltage Distribution along the Polluted Polymeric Insulator*. World Journal of Modeling and Simulation, 2012. 8(4): p. 310-320.
77. Staubach, C., S. Kempen, and F. Pohlmann. *Calculation of electric field distribution and temperature profile of end corona protection systems on large rotating machines by use of finite element model*. in *Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on*. 2010.
78. Kone, G. and C. Volat. *Comparison of the Volume and Surface Approaches to Compute Temperature and Electric Field Along the Stress-Grading on Stators Bars*. in *2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. 2018. IEEE.
79. Que, W., *Electric Field and Voltage Distributions along Non-ceramic Insulators*. 2002, The Ohio State University.
80. Kontargyri, V., et al. *Calculation of the electric field on an insulator string using the finite elements method*. in *Proceedings of the 38th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2003)*. 2003.
81. Kontargyri, V., et al., *Simulation of the electric field on composite insulators using the finite elements method*. WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 2004. 3(5): p. 1318-1322.
82. Krzma, A. and M. Khamaira, *Computation of the Electric Field and Voltage Distributions over the Polluted Surface of Silicone-Rubber Insulators*. Vol. 116. 2018. 50009-50012.
83. Muniraj, C. and C. Dr.S, *Finite element modeling for electric field and voltage distribution along the polluted polymeric insulator*. Vol. 8. 2012. 310-320.
84. Slama, M.E.A., et al., *Monitoring of Dry Bands and Discharge Activities at the Surface of Textured Insulators with AC Clean Fog Test Conditions*. Energies, 2021. 14: p. 2914.
85. Chakraborty, R. and B. Reddy, *Investigation on the Pollution Performance of Silicone Rubber Insulator Samples*. 2016.

86. Raghuveer, M.R. and E. Kuffel, *Experimental and Analytical Studies of Factors Which Affect Flashover Voltage on Polluted Insulation Surfaces*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974. PAS-93(1): p. 312-320.
87. Salem, A.A., et al., *Pollution flashover voltage of transmission line insulators: Systematic review of experimental works*. IEEE Access, 2022. 10: p. 10416-10444.
88. Liang, F., et al., *Factors affecting dry-band formation on the surface of polluted insulator*. Vol. 38. 2012. 2604-2610.
89. Mughal, M., et al., *Influence of Single and Multiple Dry Bands on Critical Flashover Voltage of Silicone Rubber Outdoor Insulators: Simulation and Experimental Study*. Energies, 2018. 11(6): p. 1335.
90. Yang, H., et al., *Study on surface conductivity distribution of pollution layer during the propagation of local arc on the wet polluted insulation surface*. AIP Advances, 2022. 12(1): p. 015311.
91. Volat, C. *Comparison between the use of surface and volume conductivity to compute potential distribution along an insulator in presence of a thin conductive layer*. in *Electrical Insulation Conference (EIC), 2013 IEEE*. 2013. IEEE.
92. Jabbari, M., C. Volat, and I. Fofana. *Application of a new dynamic numerical model to predict polluted insulator flashover voltage*. in *2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. 2014.
93. He, J., K. He, and B. Gao, *Modeling of Dry Band Formation and Arcing Processes on the Polluted Composite Insulator Surface*. Energies, 2019. 12(20): p. 3905.
94. Gorur, R.S., et al., *Surface resistance measurements on nonceramic insulators*. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001. 16(4): p. 801-805.
95. Slama, M., et al., *Experimental Study and Modeling of the Effect of ESDD/NSDD on AC Flashover of SiR Outdoor Insulators*. Energies 2022, 15, 3782. 2022, s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published
96. Bi, J., et al. *Thermal Characteristics of the Polluted Silicone Rubber During the Formation Process of Dry Band and Arc Discharge*. in *2023 IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*. 2023. IEEE.
97. Das, A., et al. *Electric stress analysis of a contaminated polymeric insulating surface in presence of dry bands*. in *2016 International Conference on Intelligent Control Power and Instrumentation (ICICPI)*. 2016. IEEE.

98. Montoya, G., I. Ramirez, and J.I. Montoya, *Correlation among ESDD, NSDD and leakage current in distribution insulators*. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2004. 151(3): p. 334-340.
99. Andoh, M.-A., K. Gbah, and C. Volat, *Development of a Simple Experimental Setup for the Study of the Formation of Dry Bands on Composite Insulators*. Energies, 2022. 15(14): p. 5108.
100. Tokoro, T., S. Kojima, and M. Nagao. *Effect of surface condition on the evaluation of hydrophobicity of polymer insulator*. in *Proceedings of 2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials*. 2011. IEEE.
101. Miyoshi, M., H. Homma, and H. Goshima. *Effect of Local Arc Discharge on Hydrophobicity Decrease of Silicone Rubber Surface:-Investigation on Hydrophobicity Change by Measuring Water Drop Velocity and Surface Analysis*. in *2020 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*. 2020. IEEE.
102. Gaborit, G., et al., *Single shot and vectorial characterization of intense electric field in various environments with pigtailed electrooptic probe*. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014. 42(5): p. 1265-1273.
103. Gaborit, G., et al., *A nonperturbative electrooptic sensor for in situ electric discharge characterization*. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013. 41(10): p. 2851-2857.
104. ZHANG, P., et al. *Simulation of Radial Electric Field and Voltage Distribution of 500kV MOA Under Different Conditions of Pollution*. in *2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. 2020. IEEE.
105. Nour-Masmoudi, H. and N. Dhahbi-Megrache. *Effect of pollution layer discontinuity due to the dry bands presence on potential and electric field along insulator*. in *2022 5th International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies (IC_ASET)*. 2022. IEEE.
106. Baudot, A., J. Mazuer, and J. Odin, *Thermal conductivity of a RTV silicone elastomer between 1.2 and 300 K*. Cryogenics, 1998. 38(2): p. 227-230.
107. Hartwig, G., *Polymer properties at room and cryogenic temperatures*. 1995: Springer Science & Business Media.
108. Zhang, D. and F. Meng, *Research on the interrelation between temperature distribution and dry band on wet contaminated insulators*. Energies, 2019. 12(22): p. 4289.
109. Gençoğlu, M.T. and M. Cebeci, *The pollution flashover on high voltage insulators*. Vol. 78. 2008. 1914-1921.

110. Albano, M., et al., *Infrared Analysis of Dry-band Flashover of Silicone Rubber Insulators*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016. Volume 23: p. 304-310.
111. Yang, H., et al., *Study on surface conductivity distribution of pollution layer during the propagation of local arc on the wet polluted insulation surface*. AIP Advances, 2022. 12: p. 015311.
112. Gao, B., et al., *Effect of dry band on electric field distribution of polluted insulator*. Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering, 2009. 35: p. 2421-2426.
113. S, E., N. Morales, and A. E., *Solution of low frequency complex fields in polluted insulators by means of the finite element method*. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 1997. 4: p. 10-16.
114. Rasolonjanahary, J.L., L. Krahenbuhl, and A. Nicolas, *Computation of electric fields and potential on polluted insulators using a boundary element method*. IEEE Transactions on Magnetics, 1992. 28(2): p. 1473-1476.
115. Wang, L., et al. *Research about the thermoelectric coupling of insulator surface dry band and COMSOL simulation*. in *The 16th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2020)*. 2020.
116. Andoh, M.A. and C. Volat, *Experimental Investigation of Parameters Influencing the Formation of Dry Bands and Related Electric Field*. Energies, 2024. 17: p. 2373.
117. Luo, D., et al., *Transient thermal analysis of a thermoelectric-based battery thermal management system at high temperatures*. Energy, 2025. 318: p. 134833.
118. Luo, D., et al., *Performance improvement of an automotive thermoelectric generator by introducing a novel split fin structure*. Applied Energy, 2025. 382: p. 125218.
119. Chen, Y.-X., et al., *Realizing high thermoelectric performance via selective resonant doping in oxyselenide BiCuSeO*. Nano Research, 2023. 16(1): p. 1679-1687.
120. Yu, H., et al., *Flexible temperature-pressure dual sensor based on 3D spiral thermoelectric Bi₂Te₃ films*. Nature Communications, 2024. 15(1): p. 2521.
121. George, J.m., et al., *Field Experience and Laboratory Investigation of Glass Insulators having a Factory-applied Silicone Rubber Coating*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014. 21: p. 2594-2601.
122. Mohammadi Savadkoohi, E., et al., *Experimental investigation on composite insulators AC flashover performance with fan-shaped non-uniform pollution*

- under electro-thermal stress*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020. 121: p. 106142.
123. Wei, D., et al., *Investigations on AC pollution flashover performance of insulator string under different non-uniform pollution conditions*. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015. 10.
 124. Zhang, Z., et al., *Non-Uniform Distribution of Contamination on Composite Insulators in HVDC Transmission Lines*. Applied Sciences, 2018. 8: p. 1962.

ANNEXES 1

RÉPÉTABILITÉ DE LA MÉTHODE EXPERIMENTALE

En métrologie, une mesure est répétable lorsqu'on vérifie la proximité de l'accord entre les résultats des mesures successives du même mesurande, effectuées dans les mêmes conditions de mesure. Les conditions de répétabilité sont :

- Même procédé de mesure,
- Même observateur,
- Même instrument de mesure,
- Même conditions,
- Même emplacement,
- Répétition sur une courte période.

La reproductibilité quant à elle vérifie la proximité de l'accord entre les résultats des mesures du même mesurande, effectuées dans des conditions de mesures différentes. Pour pouvoir obtenir la répétabilité (ou la reproductibilité) d'une série de mesures, il faut tout d'abord évaluer s'il existe des valeurs aberrantes afin de valider les mesures réalisées en laboratoire. La répétabilité (ou reproductibilité) en calculant l'écart maximal entre la moyenne des mesures et la mesure la plus éloignée.

Répétabilité de la méthode d'application de la couche de pollution

La répétabilité de la méthode de production des échantillons pollués a été déterminée à travers l'évaluation de la densité de dépôt de sel de différentes séries d'échantillons, ainsi que par la comparaison des résistances électriques

minimales d'une série d'échantillons à la fin des tests d'humidification. En effet, différentes formulations de la solution de pollution à base de NaCl et de kaolin ont été utilisées pour réaliser plusieurs séries d'échantillons dont les DDSE ont été évaluées à la fin de chaque série de tests. Le Tableau 18 résume les incertitudes relatives pour chacune des séries comprenant de trois à quatre échantillons. L'on peut remarquer que dans l'ensemble, les incertitudes relatives restent inférieures à 10% pour les différentes séries de production, témoignant ainsi d'une bonne répétabilité de la méthode d'application.

Tableau 18: Incertitude relative sur la mesure des DDSE

Série n°:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nombre de pulvérisations	16	9	9	8	9	8	16	8	6	4
DDSE moyenne (mg/cm ²)	3,7	1,5	1,4	1,3	1,1	2,1	3,2	1,5	1,3	1,0
Incertitude relative (%)	5,7	1,7	2,4	4,7	2,2	4,9	4,4	5,5	4,4	3,7

De même, parmi les échantillons humidifiés, ceux ayant fait l'objet d'évaluation de résistance électrique de la couche de pollution sont présentés dans le Tableau 19 ci-après. L'on note également une bonne répétabilité de la méthode d'application de la couche de pollution pour chaque série de production d'échantillons pollués avec des incertitudes moyennes globalement inférieures à 13%. L'incertitude est plus importante pour la couche avec 16 pulvérisations et peut être due au déversement de la solution de pollution. En effet, avec des couches de plus en plus épaisses, les temps d'attente entre les pulvérisations successives doivent être beaucoup plus longs pour permettre à la couche de sécher avant l'application d'une couche supplémentaire. De plus,

ces niveaux de pollution sont peu réalistes au regard des formulations rencontrées dans la littérature où l'on utilise des niveaux de pollution faibles ou moyennes. Ces résultats confortent donc quant à la répétabilité du système expérimental d'étude des bandes sèches.

Tableau 19 : Incertitude relative sur la mesure des résistances électriques minimales des couches de pollution évaluées

Serie n°:	4	5	7	9
Nombre de pulvérisations	8	9	16	6
Resistance moyenne minimum R_{min} (Ω)	5654	6809	5358	12923
Incertitude relative (%)	4,5	2,1	12,9	4,7

Répétabilité de la méthode de mesure sous tension

Le tableau 20 présente une fiche type de données recueillies lors des tests expérimentaux sous tension. Les grandeurs en jaune (masse de la couche de pollution ; volume, conductivité et température de la solution après nettoyage du substrat, surface du substrat et délai d'apparition de la BS) sont des valeurs mesurées. Les grandeurs en vert (température de la chambre climatique et tension de consigne de la génératrice HT lors des tests sous tension) sont des seuils fixés et celles en bleu (facteur de température, conductivité volumique et densité de dépôt de sel équivalent) sont des grandeurs calculées. De façon générale, les incertitudes sur le temps d'apparition de la bande sèche pour les différentes séries de mesure restent inférieures à 12%. Ceci représente une bonne répétabilité pour le système expérimental étant donné le caractère imprévisible et aléatoire des décharges électriques partielles.

Tableau 20 : Relevé typique des données des tests expérimentaux sous tension

	m _{init.} (g)	Temp. test (°C)	Tension (kV)	m _{finale} (g)	Volume sol. (cm ³)	Conductivité sol. (S/m)	Temp. Sol. (°C)	b	σ ₂₀ (S/m)	Surface pl. (cm ²)	DDSE (mg/cm ²)	Tps apparition BS (sec.)
Ech. RTV 2	301,550	10	2	301,945	370	0,083	21,2	0,023	0,081	319,0	0,521	17
Ech. RTV 3	322,046	10	2	322,429	400	0,078	22,9	0,022	0,073	319,0	0,509	16
Ech. RTV 4	295,400	10	2	296,107	360	0,088	21,4	0,023	0,085	319,0	0,537	20,5
Ech. RTV 5	313,838	10	2	314,370	405	0,075	21,7	0,023	0,072	319,0	0,505	15,5
Moyenne											0,518	17,25
Incertitude relative (%)												10,14
Ech. VER 1	389,879	30	2	391,650	335	0,065	21,6	0,023	0,062	319,0	0,361	167,5
Ech. VER 2	389,256	30	2	390,800	425	0,071	21,7	0,023	0,068	319,0	0,500	183
Ech. VER 3	391,772	30	2	393,100	400	0,073	22,7	0,022	0,069	319,0	0,478	178
Ech. VER 4	393,818	30	2	395,016	413	0,060	23,0	0,022	0,056	319,0	0,396	150
Moyenne											0,434	169,63

Incertitude relative (%)												11,57
Ech. PL 1	220,651	20	2	222,854	480	0,057	22,2	0,023	0,054	319,0	0,447	24,5
Ech. PL 2	220,027	20	2	221,650	372	0,089	23,0	0,022	0,083	319,0	0,539	27
Ech. PL 3	220,544	20	2	222,192	430	0,080	21,9	0,023	0,076	319,0	0,573	30
Moyenne											0,520	27,17
Incertitude relative (%)												9,82

ANNEXES 2

ABSORPTION DE LA COUCHE DE POLLUTION À BASE DE NACL+KAOLIN

Introduction

Cette partie présente les résultats de tests expérimentaux (humidification et H.T.) réalisés sur des échantillons de plexiglas et de verre. Ici, l'accent est particulièrement mis sur la modélisation mathématique de la couche de pollution à base de kaolin et de sel. En effet, étant donné l'importance que revêt la conductivité électrique pour les simulations thermoélectriques de la couche de pollution, et le manque d'études spécifiques sur le sujet ; il semble primordial d'obtenir cette variation de la conductivité électrique afin d'alimenter le modèle sous Comsol Multiphysics. C. Texier et B. Kouadri [15] ont proposé une expression de la résistance électrique globale de la couche de pollution utilisée dans leur modèle de formation de zone sèche. Leur approche, bien que permettant de conclure à la formation d'une zone sèche à l'issue du dépassement d'un seuil critique de masse d'eau, ne permet pas de localiser la zone sèche par simulation.

Les premières analyses effectuées sur les données des tests HT avaient permis d'élaborer des expressions de la conductivité électrique de la couche de pollution en fonction de la température (*Voir chapitre 6 de cette thèse*). En plus l'opportunité nous était donnée d'analyser ces données disponibles dans la perspective de modèles numériques intégrant des interfaces d'absorption ou

d'évaporation d'eau. Dans ce qui suit, les données expérimentales sont recoupées afin d'obtenir en bout de ligne la variation de la conductivité électrique volumique de la couche de pollution en fonction de la masse d'eau en surface de l'échantillon. Il serait par la suite possible de construire un modèle de formation de bande sèche à l'aide de trois interfaces physiques couplées suivant l'organigramme de la Figure 58 : High-voltage test diagram.

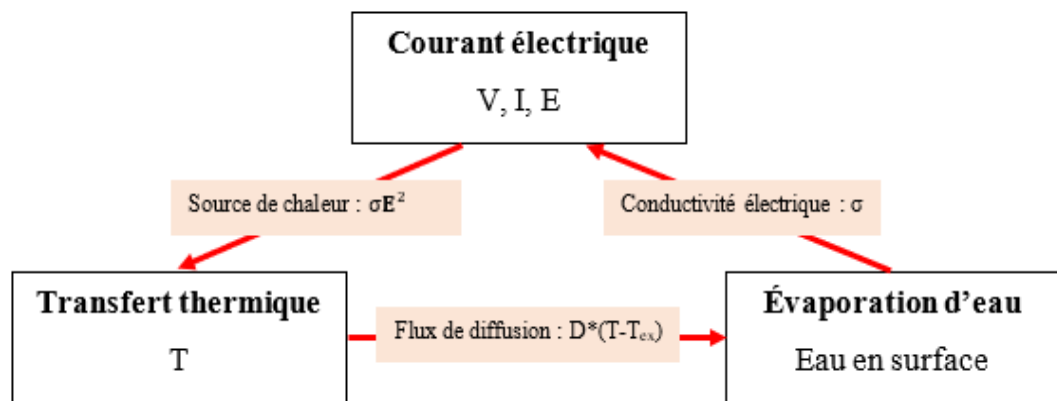


Figure 109 : Organigramme du modèle avec variation de conductivité électrique

Modélisation mathématique de la conductivité électrique de la couche de pollution

La conductivité électrique de la couche de pollution dépend de la quantité d'eau, de sel et de kaolin. Dans ce rapport, l'accent est porté sur la recherche d'une expression de la conductivité électrique de la couche de pollution en fonction de la quantité d'eau et de sel à la surface de du substrat à un instant t donné. Dans cette approche, la quantité de sel est maintenue à des valeurs standards à raison de 40 g/l de solution polluante. La démarche se décline en deux phases principales :

- à partir des mesures de masse d'eau absorbée et de DDSE pour un taux d'humidité relative fixé à 95 %, l'on peut construire une fonction d'absorption d'eau :

$$m_{eau} = f(t, DDSE) \quad (68)$$

- à partir de mesures complémentaires de tensions, courants et DDSE et de la géométrie particulière de l'échantillon, l'on peut construire une expression de la conductivité électrique :

$$\sigma = f(t, DDSE) \quad (69)$$

Afin de rendre l'expression de la conductivité électrique indépendante de la géométrie des échantillons testés, l'on cherchera une expression de la conductivité électrique de la forme :

$$\sigma = f(m_{eau}, DDSE) \quad (70)$$

Une fois cette formule obtenue, le modèle pourrait être simulé selon l'organigramme décrit sur la Figure 58 : High-voltage test diagram.

La DDSE varie dans un intervalle de **0,3 à 2,6 g/cm²**.

Évolution de la quantité d'eau absorbée en fonction de la DDSE et de la durée d'humidification

Les tests d'absorption d'eau de la couche de pollution ont été réalisés à partir de différents niveaux de sel dans les solutions polluantes et différents nombres de pulvérisation de celles-ci à la surface des échantillons en plexiglas et en verre. La Figure 110 montre l'absorption d'eau obtenue pour une couche de pollution avec différentes valeurs ESDD. Comme on peut le constater, pour un temps défini, plus la quantité de sel à la surface de l'échantillon est

importante, plus la quantité d'eau absorbée est importante. Cette tendance concorde avec les travaux de J. Y. Saison [60].

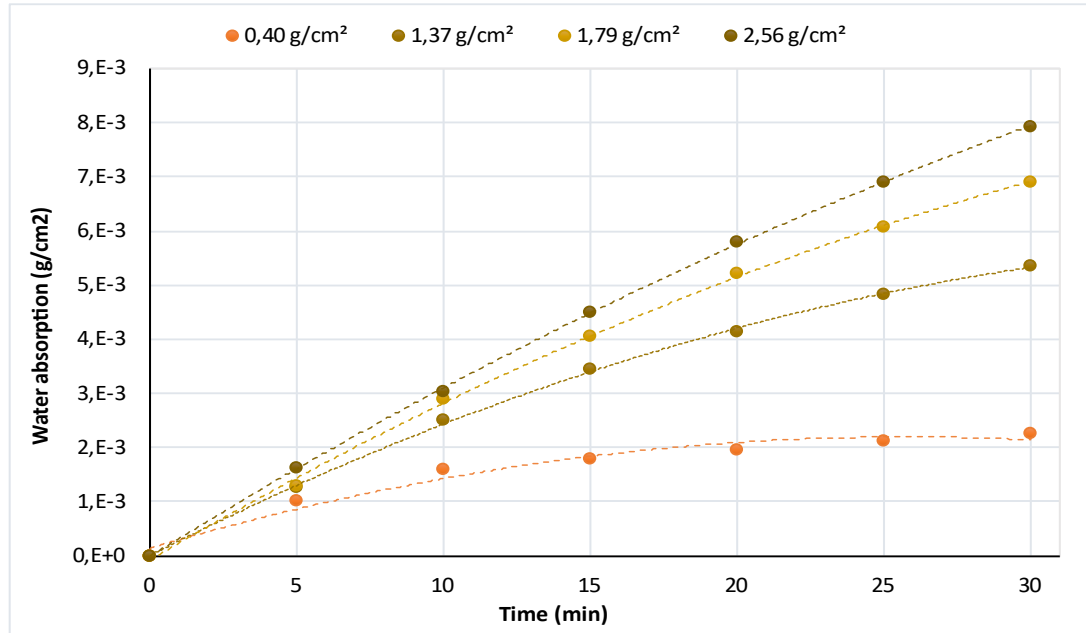


Figure 110 : Absorption d'eau de la couche de pollution pour différentes valeurs de DDSE (Données expérimentales) © M. A. Alain, 2023

La Figure 111 présente l'évolution de l'absorption d'eau à la surface de la couche de pollution lors de l'humidification a été générée à partir des données précédentes à l'aide des courbes de régression dans Matlab. Les différentes données ont été approximées par une fonction de la forme :

$$m_{eau} = a \cdot DDSE \cdot (1 - e^{\frac{-t}{60 \cdot b}}) \quad (71)$$

Avec $a = 0.007309$ et $b = 46.23$

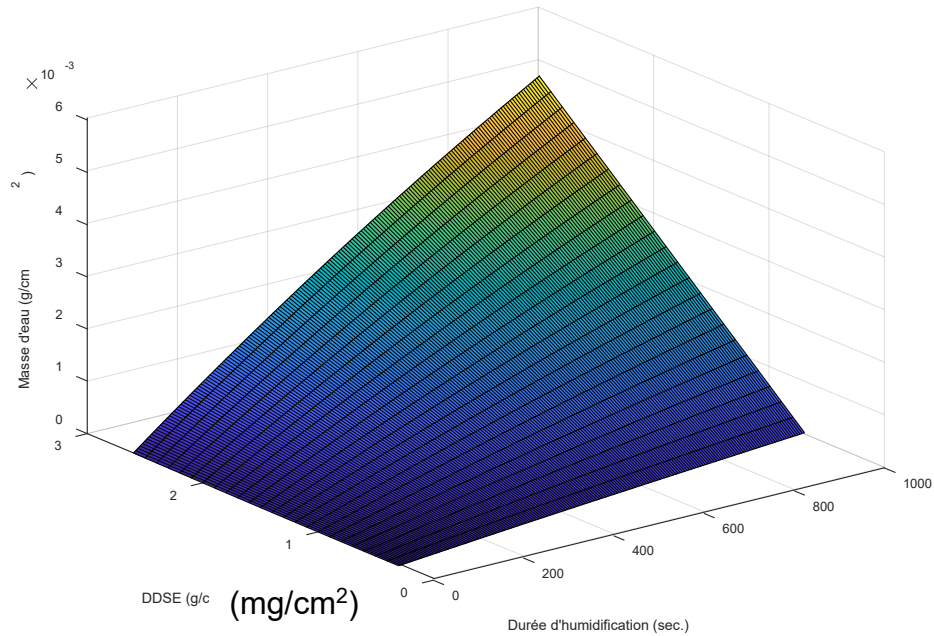


Figure 111 : Masse d'eau absorbée à la surface de l'échantillon lors de l'humidification en fonction du temps et de la DDSE. © M. A. Alain, 2023

Évolution de la conductivité de la couche de pollution en fonction de la DDSE

Lors des tests d'absorption d'eau, les échantillons sont périodiquement sortis de la chambre climatique pour être pesés. Afin de minimiser les erreurs sur les valeurs de quantité d'eau, il n'a pas été possible de réaliser simultanément les mesures de courant et tension sur les échantillons testés. Plusieurs autres séries de tests ont donc été conduites séparément afin d'évaluer l'évolution de la conductivité électrique de la couche de pollution à partir des mesures de courant et de tension aux bornes des échantillons. Le traitement des données de mesures (courant et tension) et le calcul de la conductivité qui en découle sont données sur la Figure 112. Comme pour l'absorption d'eau, l'évolution de la conductivité électrique peut être

approximées (dans les limites de DDSE et de temps) par une fonction de la forme :

$$\sigma = a \cdot DDSE \cdot (1 - e^{\frac{-t}{60 \cdot b}}) \quad (72)$$

Avec $a = 56.54$ et $b = 9.559$

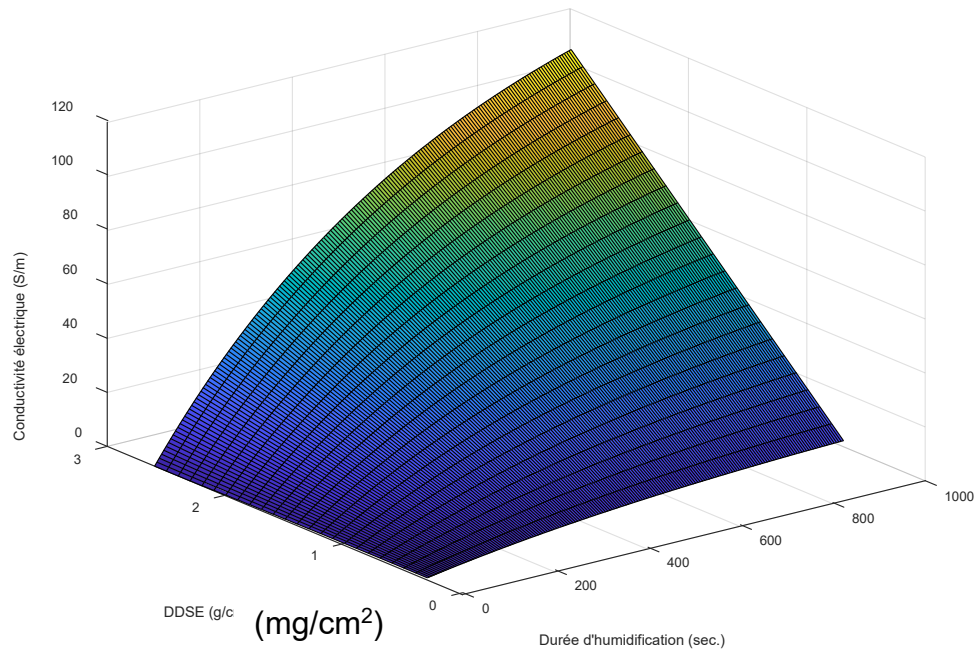


Figure 112 : Évolution de la conductivité électrique lors de l'humidification pour différentes valeurs de DDSE. © M. A. Andoh, 2023

Expression de la conductivité électrique en fonction de la masse d'eau et de la DDSE dans la couche de pollution

Une fois obtenues les expressions de la quantité d'eau absorbée et celle de la conductivité électrique en fonction de la DDSE et de la durée d'humidification, l'étape suivante consiste à éliminer le temps afin d'exprimer la conductivité électrique en fonction de la quantité d'eau et de la DDSE de la

couche de pollution. Cette opération est traitée à l'aide d'un code Matlab et permet d'obtenir le graphique de la Figure 113. Cette figure montre que la conductivité électrique peut être approximée linéairement à la quantité d'eau et de chlorure de sodium dans la couche de pollution

suivant les équations suivantes :

$$\begin{aligned}
 m_{eau} \in [0, 2 \cdot 10^{-5}]; \sigma &= 1.15 \cdot 10^6 \cdot DDSE \cdot m_{eau} + 10^{-18}) \\
 m_{eau} \in [2 \cdot 10^{-5}, 6 \cdot 10^{-3}]; \sigma &= 2.09 \cdot 10^{-13} + 1.08 \cdot 10^4 \cdot m_{eau} + 22.87 \cdot DDSE)
 \end{aligned} \tag{73}$$

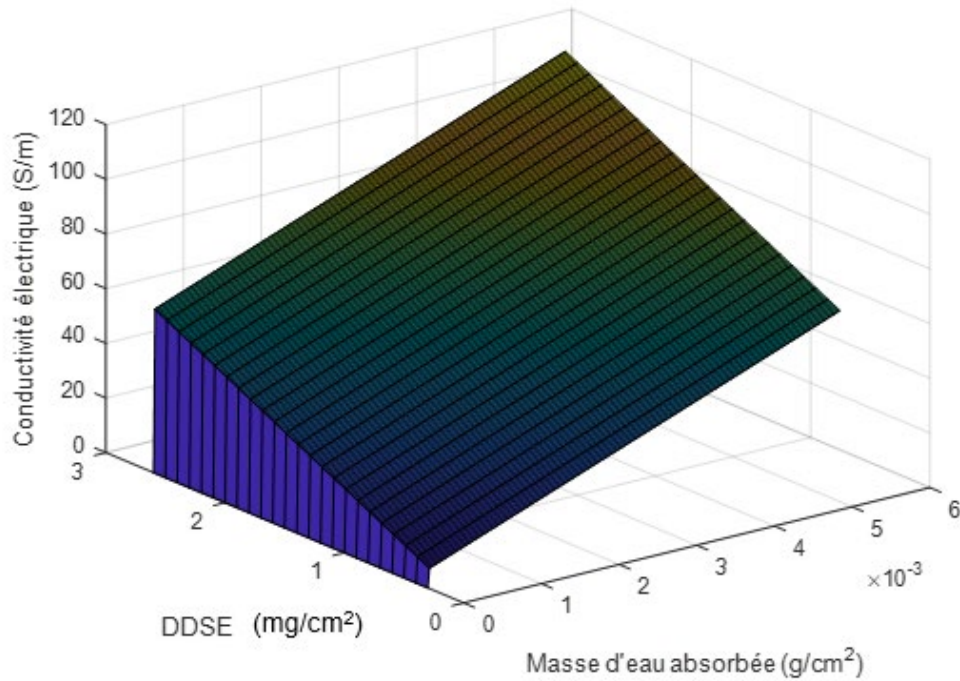


Figure 113 : Conductivité électrique en fonction de la densité de sel et de la masse d'eau de la couche de pollution. © M. A. Andoh, 2023

Conclusion

Le traitement des données des tests d'humidification a permis d'élaborer une expression empirique de la conductivité électrique de la couche de pollution à base de kaolin et de sel. Cette formulation pourrait être appliquée à un model électro-thermo-diffusique développé sous le logiciel commercial Comsol Multiphysics afin de reproduire le phénomène de formation de bande sèche à la surface d'un isolateur pollué. Cependant, faisant intervenir une troisième interface pour l'absorption et l'évaporation, cette modélisation s'avère plus complexe pour l'usage des électriciens. L'approche à deux interfaces a donc été retenue dans nos travaux présentés plus haut dans le troisième article de journal. Nous laissons néanmoins ces résultats de formulation empirique pour de futurs modélisateurs plus aguerris du domaine diffusique.