

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة فرحات عباس – سطيف 1
UNIVERSITE FERHAT ABBAS –SETIF1

Thèse de Doctorat en Sciences

Présentée au département d'Electrotechnique
Faculté de Technologie
Pour obtenir le diplôme de
Doctorat en Sciences - Electrotechnique

Par

M^{me} Samia SATTA

Thème

***Contributions à l'étude des isolateurs dans les régions
exposées à la pollution***

Soutenue le : 09/12/2023 devant la commission d'examen composée de

Prof. Ahmed GHERBI	Prof. à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1	Président
Prof. Abdelhafid BAYADI	Prof. à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1	Directeur de thèse
Prof. Hamou NOURI	Prof. à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1	Examineur
Prof. Hocine MOULAI	Prof. à l'Université des Sciences et Technologies- USTHB, Alger	Examineur
Prof. Madjid TEGUAR	Prof. à l'école nationale polytechnique. Alger	Examineur
Dr. Khaled BELAOUCHET	M. C. A. à l'Université Mohamed Boudiaf, Msila	Examineur

ملخص

الهدف العام من هذا البحث هو إجراء دراسات تجريبية تهدف إلى تحليل تطور التفريغات الكهربائية المتوازية على الأسطح العازلة ذات الأحجام المختلفة والملوثة بشكل موحد. علاوة على ذلك ، يتعلق الأمر بإيجاد التكافؤ بين عدة تمثيلات نقطية - نقطية ومستوية مستوية. أجريت الدراسة تحت الجهد المتناوب (AC). تم تخصيص الجزء الأول من هذا العمل لدراسة تأثيرات العديد من العوامل على قوة العزل الكهربائي لتكوينات الأنظمة التي تم النظر فيها. هذه العوامل هي طول التسرب للعازل ودرجة التلوث وعرض السطح الملوث. تستخدم أسطح زجاجية مستطيلة للاختبار. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن هناك حد عرض يساوي تقريباً 8 سم يمكن أن تتطور بعدها عدة أقواس متوازية ومنتالية ومستقلة. يمثل هذا الحد الأدنى من الأداء الكهربائي للعزل ولم نلاحظ أي تأثير عليه.

في الجزء الثاني ، تم استخدام طريقة عددية لتحليل تأثير تكوينات النظام على المجال الكهربائي ، وأنشطة التفريغ الكهربائي للعزل. لتقييم توزيع المجال الكهربائي على طول خط التسرب للعازل ولتحديد المناطق الرئيسية للحقل الكهربائية ، تم استعمال برنامج COMSOL Multiphysic

الكلمات المفتاحية: الجهد المتناوب ، طول التفريغ الفعال ، الزجاج ، نموذج العازل ، درجة التلوث ، التلوث المنظم ، المجال الكهربائي، طريقة الحدود المنتهية.

Résumé

Ce travail présente une étude visant à analyser le développement de décharges parallèles sur des surfaces isolantes de différentes largeurs uniformément polluées. De plus, il s'agit de trouver une équivalence entre plusieurs configurations pointes-pointes et plan-plan. L'étude est réalisée sous tension alternative (AC).

La première partie de ce travail est consacrée à l'étude des effets de nombreux paramètres sur la rigidité diélectrique des configurations des systèmes considérées. Ces paramètres sont la longueur de la ligne de fuite, le degré de pollution et la largeur de la surface polluée. Des surfaces rectangulaires en verre sont utilisées pour les tests. Les résultats obtenus montrent qu'il existe une limite de largeur environ égale à 8 cm au-delà de laquelle plusieurs arcs, parallèles, consécutifs et indépendants peuvent se développer. Cette limite représente la performance électrique minimale de l'isolant et nous n'avons observé aucun effet de la conductivité volumique sur celle-ci.

Dans la deuxième partie, une méthode numérique est développée pour analyser l'influence des configurations du système sur le champ électrique, les activités de décharge électrique de l'isolation pour évaluer la distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolant et pour identifier les principales régions du champ critique, le logiciel COMSOL Multiphysics a été exploité.

Mots Clés : Tension alternative, Longueur effective de décharge, tension de contournement, verre, modèle d'isolateur, Degré de pollution, Pollution uniforme, COMSOL Multiphysics, champ électrique.

Abstract

This work presents a study aiming to analyze the development of parallel discharges on insulating surfaces of different sizes uniformly polluted. Moreover, it is aimed to find equivalence between multiple point-point and plane-plane configurations. The study is carried out under alternating current (AC) voltage.

The first part of this work is devoted to study the effects of many parameters on the electric strength of the considered air gap system configurations are presented. These parameters are the length of the creepage distance, the pollution degree and the contaminated surface width. Glass rectangular surface are used for the tests. Finally, a video camera system is used to support this investigation by laboratory observations of the full process of flashover mechanism. The obtained results show that there is a width limit approximately equal to 8 cm beyond which several arcs, parallel, consecutive and independent can develop. This limit represents the minimal electrical performance of the insulation and we did not observe any effect of the volume conductivity on it.

In the second part, a numerical method is developed for analyzing the influence of the system configurations on the electric field, the electric discharge activities of the insulation. To evaluate the distribution of the electric field along the insulator's creepage distance and to identify the main regions of the critical field, the COMSOL Multiphysics software has been exploited.

Key Words: Alternative voltage, Effective discharge length, Flashover, Glass laboratory, insulator model, Pollution degree, Uniform pollution, COMSOL Multiphysics, electric field.

Déclaration

Ce travail n'a pas été déjà accepté et n'est pas soumis en considération pour un diplôme quelconque.

Signé (Samia SATTA)

Déclaration 1

Cette thèse est soumise pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT Science.

Signé (Samia SATTA)

Déclaration 2

Cette thèse est le résultat de mes propres investigations, sauf indication contraire.

D'autres sources sont reconnues par des références explicites. Une bibliographie est jointe en annexe.

Signé (Samia SATTA)

Liste Des Travaux Scientifiques

Publication Internationale

1. **Satta S**, Bayadi A., et Boudissa R., "Alternating current flashover voltage of a uniform polluted glass flat insulator under parallel electric discharges effect", International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol. 12, No. 4, August 2022, pp. 3454~3465.

Communications Internationales

1. **Satta S**, Bayadi A., Aouabed F., Boudissa R., "Pollution effect on flashover voltage and electric arc development: Comparison between glass plates and real porcelain insulator", International Conference on Electrical Engineering, Electronics and Automatics ICEEA'10, Bejaia, Algeria, 2-3 November 2010
2. **Satta S**, Bayadi A., Aouabed F., Boudissa R., "Distribution de la tension et du champ électrique le long de l'isolateur en porcelaine sous conditions de pollution", 2ème journées internationales d'électrotechnique, de maintenance et de compatibilité électromagnétique, JIEMCEM 2010, Oran, Algeria, 2010.
3. Aouabed F., Bayadi A., **Satta S**, R. Boudissa R., "Etude de la Distribution de la tension et du champ électrique à la surface de l'isolateur synthétique par la méthode des éléments finis", 2ème journées internationales d'électrotechnique, de maintenance et de compatibilité électromagnétique, JIEMCEM 2010, Oran, Algeria, 2010.
4. Aouabed F., Bayadi A., **Satta S**, Boudissa R., "Conductivity effect on the flashover voltage of polymeric insulator under AC voltage", 45th International universities power engineering Conference, UPEC 2010, Cardiff, Wales, UK, September 2010.
5. Aouabed F., Bayadi A., **Satta S**, R. Boudissa R., "Développer un circuit de l'isolateur synthétique sous pollution en utilisant L' EMTP", Second International Conférence On System and Information Processing, ICSIP'2011, Guelma, Algeria, 15-17 May 2011.
6. **Satta S**, Bayadi A., Boudissa R., "Pollution effect on flashover voltage on a porcelain insulator under AC voltage", 2nd International Conference on Electrical Engineering,

Electronics and Automatics CIEEA'13, Oran, Algeria, 24-25 November 2013.

7. **Satta S.**, Bayadi A., Boulanouar H., Boudissa R., "Distribution De La Tension Et Du Champ Electrique Des Plaques Isolantes Sous Condition De Pollution", 8nd International Conférence on Electrical Engineering, CEE'14, Batna, Algeria, 16-17 November 2014.
8. **Satta S.**, Bayadi A., Boulanouar H., Boudissa R., "L'effet Des Gouttes D'eaux Et La Couche De Pollution Sur La Distribution De tension et du champ électrique sur les materiaux isolant en silicone", 9nd International Conférence on Electrical Engineering On Robotics And Control, CEE'16, Batna, Algeria, 02-04 October 2016.
9. **Satta S.**, Bayadi A., Boudissa R., "The equivalence electrical performance between the plane-plane and multiple rods-rods configurations of a uniform polluted glass insulator", First International Congress On Mechanical Engineering, Constantine, Algeria, November 15 - 16, 2023,
10. **Satta S.**, Bayadi A., Boudissa R., "The equivalence electrical performance between the plane-plane and multiple rods-rods configurations of a uniform polluted glass insulator", The first International Conference on Electrical Engineering and Advanced Technologies, Batna, Algeria, November 5 - 6, 2023,
11. **Satta S.**, Bayadi A., Boudissa R., "The equivalence electrical performance between the plane-plane and multiple rods-rods configurations of a uniform polluted glass insulator", The Second Arab Conference on Mechanics and Engineering (ARCME'23), Biskra, Algeria ; December 10 - 12, 2023.

Communications nationales

1. **Satta S.**, Bayadi A, Aouabed F, Boudissa R., "Etude de la distribution de la tension et du champ électrique dans les conditions polluées", Première Conférence nationale sur l'électrotechnique CNE'01, Souk-Ahras, Algeria, 23-24 November 2010.
2. **Satta S.**, A. Bayadi, R. Boudissa, " Pollution effect on flashover voltage and Electric arc development Comparison between glass plates and real porcelain insulator ", La 1^{ère} Journées d'Ecole d'Automne sur les Matériaux Emergents (EAME'17), 27-28, Novembre 2017, Université l'UFA Sétif 1, Algérie.

3. **Satta S.**, Bayadi A, Messaoudi M. "Pollution effect on the surface of ceramic and glass insulator", Premières Journées d'Etudes Technologiques sur les Matériaux de Construction 1JEMC2019, Sétif, 26-27 novembre 2019.
4. **Satta S.**, Bayadi A., Boudissa R., "The equivalence electrical performance between the plane-plane and multiple rods-rods configurations of a uniform polluted glass insulator", The 2th National Conference on Electrical Engineering and its Applications (NCEEA'02), Guelma, Algeria 15 November, 2023.

Journées des Doctorants

1. **Satta S.**, Bayadi A, " Participation aux Journées des Doctorants" Université Setif, Avril 2012.
2. **Satta S.**, Bayadi A, "Participation aux Journées des Doctorants" Université Setif, Avril 2013.

الأستاذ المرحوم: " رابح بوديسة "
كان له أثر و أعماله بارزة داخل و
خارج الوطن في مجاله

LA HAUTE TENSION

فمنه تعلمنا أن للنجاح قيمة و معنى
ومنه تعلمنا كيف يكون التفاني و الاخلاص
في العمل لساعات طويلة

نسأل الله أن يتغمد روحه بواسع رحمته و
يسكنه فسيح جناته

انه سبحانه و تعالى ولي ذلك و
القادر عليه

الى طيور الجنة أولادي

" أمير و أصيل "

رحمة الله عليهم

سامية ساطة

Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord à Dieu LE TOUT-PUISSANT pour la force et la volonté qui m'a procuré pour terminer mon travail.

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de thèse, **Prof : A. BAYADI**, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail doctoral. Je lui suis reconnaissante de m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa grande compétence, de sa rigueur intellectuelle, de son dynamisme, et de son efficacité certaine que je n'oublierai jamais. Qu'il soit aussi remercié pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués.

Je tiens à remercier mon Co-directeur **Prof : R. BOUDISSA** pour sa constante présence au sein du laboratoire de Haute Tension de Bejaia ainsi que ses précieux conseils dans le domaine de la recherche scientifique.

J'adresse mes remerciements au **professeur Ahmed GHERBI**, pour avoir accepté de juger ce travail et m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je remercie les membres de jury, chacun par son nom, qui m'ont honoré en acceptant d'examiner ce travail.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Sétif, le

SATTA Samia

Table des matières

Abréviations et symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Chapitre 01

INTRODUCTION GENERALE

1.1 Contexte général	1.1
1.2 Problématique	1.2
1.3 Objectif.....	1.3
1.4 Structure de la thèse.....	1.3

Chapitre 02

DECHARGES ELECTRIQUES ET CONTOURNEMENT

2.1 Introduction	2.1
2.2 Contournement sous tension alternative.....	2.1
2.3 Arc de contournement	2.2
2.4 Influence de divers paramètres sur le contournement.....	2.3
2.4.1 Nombre de décharges partielles	2.4
2.4.2 Influence de la polarité.....	2.9
2.4.3 Influence des paramètres de la source	2.11
2.4.4 Chute de potentiel	2.11
2.4.5 Temps de contournement.....	2.12
2.4.6 Constitution chimique de la pollution	2.13
2.5 Mesure du degré de sévérité de pollution d'un site	2.14
2.5.1 Méthodes de mesures indirectes.....	2.14
2.5.1.1 Analyse physico-chimique de la pollution	2.14
2.5.1.2 Facteurs météorologiques	2.15
2.5.1.3 Indice de pollution... ..	2.16
2.5.2 Méthodes de mesures directes.....	2.16
2.5.2.1 Méthode de la densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)	2.16
2.5.2.2 Méthode de mesure de la conductivité électrique de la pollution	2.18
2.5.2.3 Méthode de la conductance superficielle	2.18
2.5.2.4 Méthode du courant de fuite	2.19
2.5.3 Mesure de la pollution en temps réel (Monitoring Sur site)	2.20
2.5.3.1 Avertisseur basé sur le comptage d'impulsions du courant de fuite.....	2.21
2.5.3.2 Avertisseur basé sur la mesure du courant de fuite	2.21
2.5.3.3 Avertisseur basé sur la mesure de la DDSE	2.21
2.5.4 Techniques d'essais sous pollution artificielle	2.21
2.5.4.1 Méthode de la couche solide ou du brouillard propre	2.22

2.5.4.2	Méthode de la pollution liquide	2.23
2.5.4.3	Méthode du brouillard salin	2.23
2.6	Isolateur en verre	2.24
2.6.1	Différents types du verre	2.24
2.6.1.1	Fibre de verre.....	2.24
2.6.1.2	Les verres moulés.....	2.25
2.6.1.3	Verre recuit	2.25
2.6.1.4	Verre trempé	2.25
2.6.2	Propriétés du verre	2.26
2.6.3	Inconvénients du verre isolant	2.28
2.6.4	Nature des matériaux	2.29
2.6.5	Choix du profil d'isolateur	2.29
2.6.6	Effet du diamètre	2.30
2.6.7	Choix du matériau verre	2.31
2.7	Conclusion	2.32

Chapitre 03

REVUE DE LITTERATURE

3.1.	Introduction.....	3.1
3.2	Performance diélectrique d'une isolation polluée sous tension continue.....	3.1
3.3	Equivalence électrique entre les deux systèmes d'électrodes plan-plan et pointes-pointes protégé par barrière.....	3.6
3.4	Influence de la forme des électrodes sur le contournement des isolateurs	3.8
3.5	Conclusion.....	3.9

Chapitre 04

ÉQUIVALENCE ÉLECTRIQUE ENTRE LES SYSTÈMES PLAN-PLAN ET MULTI-POINTES-POINTES

4.1	Introduction.....	4.1
4.2	Banc d'essai et de visualisation.....	4.1
4.3	Matériau isolant.....	4.3
4.4	Systèmes d'électrodes	4.4
4.5	Solution polluante	4.5
4.6	Correction des valeurs de tension de contournement.....	4.6
4.7	Résultats et discussions	4.7
4.7.1	Processus de contournement d'un isolateur plan avec une pollution	4.8
4.7.2	Effet de largeur polluée sur la valeur de tension de contournement	4.12
4.7.3	Effet de la conductivité sur la tension de contournement	4.13
4.7.4	Effet de la configuration du système d'électrodes.....	4.21

4.7.5 Equivalence électrique entre les plan-plan et multi- pointes – pointes	4.21
4.7.6 Etude de la longueur de la ligne de fuite sur la tension de contournement.....	4.24
4.7.7 Etude de la longueur critique	4.27
4.8 Conclusion	4.28

Chapitre 05

REPARTITIONS DU CHAMP ET DU POTENTIELLES ELECTRIQUES EN PRESENCE DE POLLUTION SUR LA SURFACE DE L'ISOLATION

5.1 Introduction	5.1
5.2 Description du logiciel "COMSOL Multyphysics"	5.2
5.4 Simulation de modèle considéré.....	5.4
5.5 Effet de la configuration du système d'électrodes sur la distribution Du Potentielles et du champ électrique.....	5.6
5.5.1 Cas des électrodes plan-plan.....	5.6
5.5.2 Cas des électrodes pointes-pointes.....	5.13
5.6 Conclusion.....	5.17

Chapitre 06

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

6.1. Conclusion.....	6.1
6.2. Recommandations.....	6.3

REFERENCES

Liste des figures

Figure 2.1	Décharge des deux polarités de la tension continue	2.11
Figure 2.2	Conductimètre à sonde mobile	2.15
Figure 2.3	Schéma bloc du circuit utilisé pour la mesure de la conductivité superficielle	2.19
Figure 2.4	Principe de mesure sur site	2.20
Figure 2.5	Avertisseur basé sur le comptage d'impulsions du courant de fuite	2.21
Figure 2.6	Isolateur de profil standard en verre trempée	2.26
Figure 2.7	Représentation schématique du chemin de propagation de l'arc électrique sous tension continue et alternative	2.30
Figure 4.1	Banc de mesure de tension de contournement	4.3
Figure 4.2	Différentes configurations d'électrodes et échantillons	4.4
Figure 4.3	Appareil de mesure de conductivité volumique (Conductimètre)	4.5
Figure. 4.4	Facteurs de correction	4.7
Figure 4.5	Processus de contournement	4.9
Figure 4.6	Différentes phases de développement des décharges électriques	4.10
Figure 4.7	Variation de tension de contournement en fonction de la largeur polluée	4.12
Figure 4.8	Caractérisation de la largeur effective	4.13
Figure 4.9	Distance entre deux électrodes successives	4.15
Figure 4.10	Tension de contournement en fonction de la largeur polluée (Configuration Plan – Plan)	4.15
Figure 4.11	Tension de contournement en fonction de la largeur polluée (Configuration 4 Pointes – 4 Pointes)	4.16
Figure 4.12	Tension de contournement en fonction de la largeur polluée (Configuration 4 pointes – 4 pointes)	4.16
Figure 4.13	Tension de contournement en fonction de la largeur polluée (Configuration 3 pointes – 3 pointes)	4.17
Figure 4.14	Tension de contournement en fonction de la largeur polluée (Configuration 2 pointes – 2 pointes)	4.17
Figure 4.15	Tailles de zones sèches	4.20
Figure 4.16	Caractérisation $V_c = f(L)$ pour différentes configurations d'électrodes	4.21
Figure 4.17	Variation de tension de contournement pour différentes configurations	4.22
Figure 4.18	Nombre d'arcs parallèles en fonction de la largeur polluée	4.23
Figure 4.19	Equivalence électrique entre les systèmes plan - plan et multi-	4.24

	pointes – pointes	
Figure 4.20	Tension de contournement en fonction de la longueur de la ligne de fuite	4.25
Figure 4.21	Configuration des zones sèches pour deux valeurs de ligne de fuite	4.26
Figure 4.22	Longueur critique des décharges parallèles	4.27
Figure 4.23	Longueurs critiques	4.28
Figure 5.1	profil du modèle utilisé	5.5
Figure 5.2	Maillage obtenu	5.6
Figure 5.3	Distribution des lignes équipotentielles d'un isolateur polluée (L= 160 mm)	5.7
Figure 5.4	Distribution du potentiel électrique d'un isolateur selon la ligne de fuite	5.8
Figure 5.5	Distribution du champ électrique d'un isolateur propre selon l'axe verticale	5.8
Figure 5.6	Distribution de champ électrique d'un isolateur propre (L= 240 mm)	5.9
Figure 5.7	Distribution de champ électrique d'un isolateur polluée (L= 240 mm)	5.10
Figure 5.8	Distribution des lignes de champ électrique d'un isolateur polluée (L= 240 mm)	5.10
Figure 5.9	Lignes de champ électrique sur un isolateur (L= 160 mm)	5.10
Figure 5.10	Lignes de référence du potentiel et du champ électrique	5.11
Figure 5.11	Distributions de tension électrique (L= 240 mm)	5.11
Figure 5.12	Distribution du champ électrique (L= 240 mm)	5.12
Figure 5.13	Distribution de champ électrique cas propre	5.14
Figure 5.14	Distribution de tension électrique	5.14
Figure 5.15	Variation du potentiel électrique	5.15
Figure 5.16	Répartition du champ électrique	5.15
Figure 5.17	Répartition du champ électrique (L= 320 mm)	5.16

Liste des tableaux

Tableau 2.1	Composition chimique des dépôts polluants	2.18
Tableau 2.2	Composition massique chimique typique des principaux verres	2.27
Tableau 2.3	Principales caractéristiques physiques des verres	2.29
Tableau 4.1	Caractéristiques du verre	4.4
Tableau 4.2	Caractéristiques du kaolin	4.5
Tableau 4.3	Pourcentage d'évolution de la tension de contournement avec distance entre deux électrodes successives " l_{pp} " de 1 cm à 16	4.20
Tableau 5.1	Caractéristiques électriques des matériaux	5.6

Listes des Acronymes et Symboles

Acronymes

CU	Appareil de Commande manuelle ou automatique du transformateur
BT	Base tension
Cam	Caméscope numérique
CEI	Comité électrotechnique international
CIGRE	Conseil international des grands réseaux électriques
CM	Cellule de mesure
DDSE	Densité de dépôt de sel équivalent
EPRI	Electric Power Research Institute
HT	Haute tension
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NaCl	Chlorure de sodium
PC	Ecran Ordinateur
SE	Système d'Essai
T	Terre
THT	Très haute tension

Symboles

A, N	des constantes de décharge
AC	Tension alternative
B	champ magnétique
D	courant de déplacement
DC	Tension contenue
E	Champ électrique
ϵ_0	Constant électrique du vide
E_{\max}	Champ maximal
E_{moy}	Champ moyen
ϵ_r	Permittivité relative
H	Humidité de l'air environnant

H	Excitation magnétique
I	le courant de décharge
J	densité de courant
K_d	Facteur de correction relatif à la température et à la pression
K_h	Facteur de correction relatif à l'humidité
L_f	Long de la ligne de fuite
l_{pp}	Distance entre-électrodes adjacents sur la ligne de fuite de l'isolation
P	Pression
R_p	Resistance de pollution
U_m	Tension de contournement mesurée
U_c	Tension de contournement
V_{CR}	Voltmètre de crête
X	Longueur d'arc
θ	Température
ρ	densité de charge

Chapitre 01

INTRODUCTION GENERALE

1.1 Contexte général

Parmi les différentes sources d'énergie, l'électricité joue un rôle de plus en plus important grâce à sa facilité d'utilisation et à son mode de production. Les centrales qui produisent l'électricité sont souvent éloignées des grands centres de consommation [1.1]. Les lignes à haute tension développées grâce au courant alternatif ont permis le transport d'électricité sur des distances plus grandes et donc la séparation géographique de la production et de la consommation pour le confort des riverains. Cependant, au-delà de 500 kilomètres de distance, les pertes en ligne deviennent significatives. Par contre, les courants continus ne nécessitent aucune puissance réactive ; ils n'ont de pertes majeures que par simple effet Joule (échauffement des fils lié à leur résistance) [1.2, 1.3]. Ce type de ligne présente encore d'autres avantages : il ne nécessite aucune coordination de fréquence ou de phase des réseaux interconnectés. De plus, à puissance égale, une ligne à courant continu est moins coûteuse à la construction qu'une ligne à courant alternatif [1.4].

Comme le monde est devenu de plus en plus dépendant d'un approvisionnement continu en énergie électrique, un plus d'attention a été accordé ces dernières années à la fiabilité et au coût de chaque composant dans le système d'électricité fourni, comportant les isolateurs des lignes et des sous-stations de puissance [1.5]. L'intégrité des isolateurs aériens est décisive dans le maintien de la fiabilité et le coût-efficacité d'un service moderne de l'électricité fourni. En service, les isolateurs aériens doivent résister à la tension et les stress environnementaux auxquels ils peuvent être soumis.

La performance sous pollution est particulièrement importante dans la conception de la coordination des isolateurs aériens, et elle devient, le facteur de détermination en tension continue. Les premiers isolateurs étaient fabriqués en porcelaine. Il n'en reste que très peu sur le réseau, car ils ont été remplacés par d'autres constitués de verre [1.6, 1.7].

1.2 Problématique

Depuis le début de la transmission électrique aérienne avant plus d'un siècle, il a été noté que la performance des isolateurs aériens est négativement affectée lorsque la surface isolante est polluée par des dépôts atmosphériques tels que le sel marin ou la pollution industrielle [1.5]. Ces dépôts peuvent former une couche conductrice sur la surface des isolateurs lorsqu'elle est mouillée, ayant pour résultat des décharges et dans le plus mauvais cas, le contournement des isolateurs. Ce qui conduit à des incidents tels que des ruptures d'alimentation de zones très étendues. Ces incidents résultent de l'apparition de petits arcs électriques à la surface de l'isolateur. Le nombre de ceux-ci est très important, ils peuvent naître en série ou bien en parallèle ce qui a une grande influence sur la rigidité diélectrique des isolateurs [1.5].

Sous conditions de pollution, le périmètre d'un isolateur joue un très grand rôle sur le contournement de sa surface en tension alternative [1.8]. En effet, le contournement d'un isolateur de faible diamètre survient suite à la formation et la propagation d'une seule décharge électrique sur sa surface. Par contre, du fait de l'étendue du périmètre des gros isolateurs, leur surface contaminée est le siège de la naissance de plusieurs arcs électriques parallèles pouvant se développer simultanément jusqu'à l'ultime phase précédant celle de son contournement, où chacun d'eux a pratiquement les mêmes chances de se transformer en un arc de contournement [1.9, 1.10].

Il a été observé à la fois à partir de l'expérience en service et des essais en laboratoire que la tension de contournement dépend alors fortement du diamètre, quel que soit le profil. Pour une gravité de contamination donnée, on pourrait penser que la tension de contournement diminuerait indéfiniment avec l'augmentation du diamètre de l'isolant, car la résistance globale, qui limite le courant d'arc, diminuerait également de manière similaire et, par conséquent, la longueur de fuite (L_f) requise pour tout profil doit être augmentée. Cependant, une augmentation du diamètre ne réduit pas la tension de contournement de manière correspondante. Cela peut être dû au fait que plus d'un arc peut s'initier sur une seule bande sèche, provoquant une chute de tension d'électrode plus élevée qui compense partiellement la diminution de tension de contournement [1.11- 1.15].

Un grand nombre de recherches ont été réalisés afin de comprendre le phénomène de contournement des isolateurs pollués sur la haute tension. Les résultats montrent que, dans la tension alternative, le contournement se produit par la propagation d'un arc électrique lorsque le diamètre de l'isolant est de petite taille. Alors que les isolateurs de grands diamètres sont le siège de plusieurs arcs électriques en parallèle [1.16-1.18].

1.3 Objectif

Notre travail consiste à étudier le développement de décharges parallèles, sur des surface isolantes avec différents largeurs et uniformément pollué, mis sous tension alternatif, les paramètres d'influence considérées dans ce travail sont : la largeur de la surface polluée, son degré de contamination et la ligne de fuite.

Les essais ont été réalisés sur une surface d'un verre rectangulaire ayant des dimensions variables, différentes formes d'électrodes (pointes-pointes ; pointes-plan ; plan-plan) ont été utilisés. La visualisation des décharges parallèles a été réalisée par une caméra rapide connectée à un PC pour le traitement de l'image en utilisant un logiciel approprié.

Les résultats expérimentaux sont parvenues de cette étude montrent qu'il existe une limitation de largeur, à partir de laquelle deux arcs électriques successifs peuvent se développer indépendamment l'un de l'autre. On a remarqué que cette largeur effective de limitation n'est pas influencée du tout par la variation de la conductivité de la couche polluante, mais il provoque la réduction de la performance de l'isolation.

1.4 Structure de la thèse

Cette thèse traite des sujets en liaison avec la modélisation du phénomène de contournement d'isolateurs propre et couverts d'une couche de pollution, comme suit :

Le chapitre 1 présente le contexte général relatif à la problématique, les objectifs de recherche et offre une brève description de la méthodologie de cette thèse de doctorat.

Le chapitre 2 présente les différentes propriétés diélectriques et leurs domaines d'utilisation. Nous nous intéresserons plus spécifiquement aux matériaux utilisés pour les isolateurs. Nous traiterons ensuite les différents types d'isolateurs ; nous présentons

et discutons les diverses techniques de mesure de la sévérité de pollution, ainsi que les paramètres d'influence de la tension de contournement des isolateurs.

Le chapitre 3 sera dédié aux revues sur les résultats essentiels se rapportant à l'équivalence de performance électrique entre l'intervalle pointes-pointes et celui de la configuration plan-plan conventionnelle.

Dans le chapitre 4, seront présenté le modèle expérimental de schéma de mesure électrique et visualisation du phénomène électrique en laboratoire et discute les résultats expérimentaux sur la performance d'une surface en verre. Toutes les techniques de mesure relatives au contournement d'une surface isolantes recouverte de d'une couche de pollution y seront décrites et la discussion et interprétation des résultats obtenus sur le phénomène de contournement par géométries différentes d'électrodes.

Le chapitre 5 est consacré aux simulations tridimensionnelles d'un isolateur en verre recouvert d'une couche de pollution et propre à l'aide d'un logiciel COMSOL Multiphysics, en particulier, l'influence de plusieurs paramètres sur la distribution du potentiel et du champ électrique a été étudiée.

Le chapitre 6 présente les conclusions générales de ce travail et souligne également plusieurs recommandations pour les recherches futures.

Chapitre 02

DECHARGES ELECTRIQUES ET CONTOURNEMENT

2.1 Introduction

Le rôle des isolateurs est de relier les conducteurs aux supports en assurant leur isolation électrique. En effet, un bon choix de dimensionnement des isolateurs s'avère indispensable pour assurer la fiabilité et la qualité de l'isolement de haute tension[2.1]. La contamination des isolateurs aériens constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie et dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolation des lignes de transport et de l'appareillage électrique associé. En effet, les dépôts polluants recouvrant les surfaces isolantes peuvent, par temps de pluie, engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle et par conséquent la réduction de la tension de tenue des isolateurs pouvant conduire au contournement de ceux-ci, ce qui a pour conséquence grave, la mise hors service de la ligne [2.2].

Afin de dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillance dans un site pollué, il est nécessaire de savoir caractériser quantitativement la sévérité de la pollution de ce site [2.3]. Il existe plusieurs méthodes qui ont un lien direct ou indirect au processus qui mène au contournement. Celles-ci sont basées sur la détermination expérimentale d'un paramètre qui caractérise une ou plusieurs phases du processus du contournement [2.4].

Dans ce chapitre, on va citer les diverses techniques de mesure de la sévérité de pollution, ainsi que les paramètres d'influence de la tension de contournement des isolateurs.

2.2 Contournement sous tension alternative

Le contournement électrique d'un isolateur est l'extension sur sa surface d'une décharge électrique jusqu'à ce qu'elle mette en court-circuit l'isolateur qui a pour conséquence l'interruption de la distribution de l'énergie électrique. il est provoqué

beaucoup plus par le dépôt de la pollution sur la surface de l'isolateur. Pour étudier ce phénomène beaucoup d'essais de tension de tenue au contournement ont été effectués dans des conditions normales ou artificielles de dépôt de pollution, respectivement dans une station de pollution ou dans un laboratoire [2.5].

Pour une tension alternative, au passage par zéro la décharge s'éteint. A la demi-alternance qui suit, la décharge doit obligatoirement réamorcer et ne dispose tout au plus que de 10 ms pour produire le contournement. Pour ces conditions, le contournement est plus difficile en tension alternative qu'en tension continue [2.6].

2.3 Arc de contournement

L'arc de contournement est un phénomène complexe puisqu'il met en jeu différents processus de décharge électriques dans l'air ainsi qu'à la surface du milieu sur lequel il évolue. Il s'agit en fait d'un arc électrique établi entre les électrodes de l'isolateur dont l'une est portée à la haute tension et l'autre est mise à la terre, entraînant ainsi un court-circuit [2.7].

Cet arc de contournement peut se produire sous différentes conditions atmosphériques telles que la pluie, la neige ou le verglas. De plus la présence d'une couche de pollution peut grandement contribuer au contournement des isolateurs.

Enfin ces contournements peuvent se produire sous tension de service, mais aussi lors de chocs de foudre ou de manœuvre qui induisent une surtension sur le réseau électrique [2.7].

Pour éviter des contournements sous pollution, la ligne de fuite d'un isolateur (ou d'une chaîne) peut être très longue par exemple 10,50 mètres en 420 kV. Sans l'existence des ailettes ou des nervures, les isolateurs seraient beaucoup trop longs et entraîneraient une surélévation des ouvrages tout à fait inacceptable. C'est pourquoi les fabricants d'isolateurs ont proposé des profils plus ou moins complexes.

- **La ligne de fuite** est la distance la plus courte le long de la surface de l'isolateur entre deux parties conductrices.
- **Courant de fuite critique** est le courant minimal nécessaire pour provoquer le contournement sous pollution d'un isolateur à tension donnée. Il est indépendant du procédé d'essai ainsi que la forme de l'isolateur [2.8].

2.4 Influence de divers paramètres sur le contournement

Il n'est pas possible de proposer une expression mathématique en fonction de l'ensemble des paramètres descriptifs de l'isolateur, à savoir, ligne de fuite, diamètre, forme des ailettes. Toutefois, une expression de la forme [2.9] :

$$F(x) = A + B(L - x) \quad (2.1)$$

Rend bien compte de ses variations au voisinage de la longueur d'arc critique.

Le terme A tient compte de la concentration des lignes de courant au pied de l'arc.

Il est petit devant $B(L - x)$ sauf pour des isolateurs de très gros diamètres.

Le B dépend essentiellement de trois paramètres, telles que, le diamètre du fût, le diamètre maximal des ailettes et de la forme de celles-ci.

On peut définir un diamètre moyen ϕ_m rendent très bien compte sur le plan physique de l'influence respective de ces différents paramètres.

Dans ce cas, B peut être écrit sous la forme :

$$B = \frac{C}{\phi_m} \quad (2.2)$$

Sous tension alternative, le contournement est décrit par les équations suivantes, l'étude du contournement se ramène donc à l'étude des fonctions $R(x)$:

$$I_c = \left(\frac{700 x_c}{R(x_c)} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.3)$$

$$V_c = 90 (x_c^2 R(x_c))^{1/3} \quad (2.4)$$

Une approximation, satisfaisante dans bien des cas, consistera donc à poser :

$$R(x) = \rho \left(A + \frac{C(L - x)}{\phi_m} \right) \quad (2.5)$$

La résolution de l'équation : $\frac{d(x^2 R(x))}{dx} = 0$, conduit alors à la longueur d'arc critique est voisin de $2/3 L$ ce qui est conforme aux résultats expérimentaux. En remplaçant ces valeurs dans les équations (2.2) et (2.3), la tension de contournement prend la forme suivante :

$$V_c = 48 C^{\frac{1}{3}} \rho^{\frac{1}{3}} \phi_m^{-\frac{1}{3}} \left(L + \frac{A\phi_m}{c} \right) \quad (2.6)$$

Et le courant critique de contournement :

$$I_c = 125 \left(\frac{\phi_m}{\rho c} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.7)$$

Si l'on écarte le cas des isolateurs de gros diamètre, pour lesquels $\frac{A\phi_m}{c}$ n'est pas négligeable devant L , on voit que la tension de contournement est :

- proportionnelle à la puissance 1/3 de la résistivité qui caractérise le site.
- proportionnelle à la longueur de la ligne de fuite.
- inversement proportionnelle à la puissance 1/3 du diamètre.

Cette décroissance est toutefois atténuée par le terme $\frac{A\phi_m}{c}$ pour les gros diamètres.

2.4.1 Nombre de décharges partielles

Nous savons que la tension et le courant de contournement d'un isolateur est affecté par le court-circuit de la ligne de fuite par des arcs partiels ou bien la présence des arcs partiels en séries et en parallèles juste avant le contournement.

D'après l'étude réalisée par Alston [2.10], il a été constaté que dans un modèle avec m nombre de décharges séries, la tension est de la forme suivante :

$$V = xAi^{-n} + mB + iR \quad (2.8)$$

Avec :

x : Représente la somme des longueurs des décharges électriques ;

R : Résistance en série avec la décharge ;

B : Dans un modèle avec un seul arc, ce nombre constant est inférieur à 400V et il peut être négligé lorsque la tension appliquée à l'isolateur dépasse quelques kilovolts.

Cependant, cette limite peut devenir significative par l'existence du nombre m des décharges, la tension et le champ critique vont augmenter. Egalement, s'il y avait plusieurs décharges, il y'aura plusieurs régions avec des champs élevés sur la surface

polluée, cela implique l'élévation de quelques paramètres (R , la tension, le champ critique).

Le cas de m décharges en parallèle portant le même courant, c'est équivalent à diviser la surface d'un isolateur en m bandes en parallèle, chacune de celles-ci à une résistance m_r par centimètre. Le champ critique s'exprime par la substitution r_c^n pour r_c :

$$E_c = \frac{1}{A^{n+1}} \cdot \frac{n}{m^{n+1} \times r_c^{\frac{n}{n+1}}} \quad (2.9)$$

Dans le cas d'un seul arc, la formule suivante a été obtenue :

$$E_c = A^{\frac{1}{(n+1)}} \cdot r_c^{\frac{n}{(n+1)}} \quad (2.10)$$

Ils ont remarqué que l'effet du nombre de décharges parallèles est d'augmenter le nombre constant de proportionnalité entre le champ critique et le $r_c^{\frac{n}{(n+1)}}$ par le facteur $m^{\frac{n}{(n+1)}}$

D'autres chercheurs [2.11-2.16] ont constaté que, pour des isolateurs avec un diamètre trois fois plus large que la longueur de la portée de leurs ailettes, plusieurs arcs partiels se produisent à travers la même bande sèche. Ces arcs parallèles ont différentes longueurs, et un seul arc va se développer jusqu'au contournement, ce qui veut dire que la largeur effective d'un isolateur polluée est plus petite que celle correspondante à sa géométrie.

Erler [2.17] a prouvé expérimentalement que pour un simple arc sur un isolateur cylindrique sans ailettes, la largeur effective d'une couche de pollution est 3 fois la longueur de l'arc électrique.

Pilling et al [2.18] ont observé que la tension de pré-contournement est diminuée considérablement avant que le processus de contournement atteigne son point d'instabilité, et cela a été avéré en fonction du nombre d'ailettes court-circuitées. Cette diminution peut être liée au facteur de forme aussi bien qu'au degré de pollution de l'isolateur.

Afin de comparer la performance sous tension alternative d'un isolateur avec et sans arcs électriques partiels en parallèle et établir une relation entre les arcs partiels et

le facteur de forme d'un isolateur, deux types de tests ont été réalisés par Boudissa et al [2.19] sur des isolateurs en porcelaine sous pollution uniforme de la surface totale de l'isolateur recouvert d'une bande de pollution étroite le long de leur ligne de fuite.

La caractéristique de la tension de contournement en fonction du courant résultant $V_c = f(I)$ a été établie pour différents profils d'isolateurs.

Cette caractéristique a pour but de lier le courant de contournement résultant au nombre d'arcs électriques se développant sur une surface large uniformément polluée bien que dans la phase de décision, un seul arc entraîne le contournement totale de l'isolateur considéré.

Pour cette raison, ils ont proposé l'utilisation d'une largeur effective pour tenir compte de la bande étroite utilisée précédemment. Par conséquent, il est souhaitable de déterminer le nombre possibles d'arcs parallèles N_p sur des surfaces isolantes afin de mieux estimer les caractéristiques de contournement.

Plusieurs études sous tension alternative ont été réalisés auparavant par un certain nombre de chercheurs, afin d'estimer le nombre d'arcs parallèles simultanées N_p par l'utilisation de la géométrie d'un isolateur.

A ce titre on cite, Erler [2.20] qui a proposé la formule suivante :

$$W_{eff} = 1,5 \cdot L_c \quad (2.11)$$

Ou :

W_{eff} : largeur effective d'un isolateur.

L_c : longueur de fuite d'un isolateur.

Le terme largeur effective ne constitue pas une largeur équivalente de l'isolateur, mais tout simplement une grandeur qui permet de quantifier le nombre d'arcs parallèles sur la surface de l'isolateur.

Sur la base des résultats expérimentaux obtenus par Khatib [2.21] sur un isolateur cylindrique sans ailettes, il a été constaté que pour un ratio de $\frac{W_{eff}}{L_c} \leq 1,5$; plusieurs arcs partiels peuvent naître simultanément sur la surface de l'isolateur. Cependant, pour la même longueur de fuite L_c , la largeur réelle la plus longue d'un isolateur W_r , sera la largeur effective la plus grande.

Le chercheur [2.21] a supposé que chaque arc nécessite une largeur partielle W_{eff}

le nombre des arcs parallèles N_p est donc relié au rapport Q défini comme :

$$Q = \frac{W_r/L_c}{W_{eff}/L_c} = \frac{W_r}{W_{eff}} \quad (2.12)$$

$$N_p = \begin{pmatrix} trunc(Q) & Q: entier \\ trunc(Q) & Q: reel \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

La fonction *trunc* donne la partie entière du nombre réel. Dans le cas d'un isolateur avec ailettes, lorsque plusieurs arcs N_s brûlent en série, selon Erler [2.20] :

La largeur effective devient :

$$W_{eff} = 1,5 \cdot \frac{L_c}{N_s} \quad (2.14)$$

Ces résultats ont été aussi confirmés par Boudissa et al [2.22]. Sur des isolateurs réels [2.23]. Combinant l'équation (2.13) et (2.14), et par l'utilisation de la largeur :

$$W_r = \pi d \quad (2.15)$$

$$Q = \frac{\pi d}{W_{eff}} = \frac{\pi d}{1,5 L_c} N_s \quad (2.16)$$

Supposant qu'un isolateur sans ailettes peut être représenté par un isolateur cylindrique équivalent sans ailettes, ayant un diamètre moyen d , qui est calculé à partir du facteur de forme f , comme il est défini dans l'équation suivante :

$$f = \int_0^{L_c} \frac{dx}{\pi d(x)} \quad (2.17)$$

Et la longueur de fuite L_c :

$$d_0 = \frac{L_c}{\pi d} \quad (2.18)$$

En remplaçant dans l'équation (2.18) on trouve :

$$Q = \frac{\pi d_0}{1,5 L_c} N_s = \frac{N_s}{1,5 f} = 0,66 \frac{N_s}{f} \quad (2.19)$$

Dans ce cas, le nombre des arcs parallèles N_p est donc :

$$N_p = \begin{pmatrix} \text{trunc} \left(0,66 \frac{N_s}{f} \right) \\ \text{trunc} \left(0,66 \frac{N_s}{f} \right) + 1 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Le nombre d'arcs N_s en série le long de la ligne de fuite correspondant au nombre de bandes sèches, dépend fortement de la géométrie de l'isolateur en particulier son diamètre.

D'après Erler [2.20] la largeur effective d'un isolateur en alternatif est égale à 1,5 fois la longueur de fuite divisée par le nombre de zones sèches formées en série le long de la ligne de fuite de l'isolation. Celui-ci distingue les isolateurs minces des gros isolateurs par le rapport entre le diamètre de leur tronc d_t et la longueur de la portée de leurs ailettes p_a comme suit :

$$\frac{d_t}{p_a} \leq 3 \quad \text{Isolateurs minces}$$

$$\frac{d_t}{p_a} > 3 \quad \text{Isolateurs gros}$$

Comme il a été montré par Erler [2.20], les bandes sèches se développent sur le tronc entre les ailettes successives pour les isolateurs minces. Donc, pour un isolateur avec Z ailettes, un nombre de $(Z + 1)$ de bandes sèches peuvent se former en série le long de la ligne de fuite de l'isolation.

L'équation (2.20) devient :

$$N_p = \begin{pmatrix} \text{trunc} \left(0,66 \frac{Z+1}{f} \right) \\ \text{trunc} \left(0,66 \frac{Z+1}{f} \right) + 1 \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Cependant, dans le cas des gros isolateurs, le nombre de bandes sèches est plutôt irrégulier et non prévisible puisque le déclenchement des arcs partiels sur toutes les sections du noyau d'un isolateur n'est pas toujours possible, par conséquent le nombre d'arcs partiels en série pour ces isolateurs est habituellement moins que $Z + 1$.

Bien qu'il est possible d'estimer le nombre d'arcs parallèles sur un isolateur juste avec les dimensions géométriques, il est impossible d'évaluer ce nombre si tous ces arcs continueraient à brûler jusqu'à l'instant juste avant le contournement.

2.4.2 Influence de la polarité

Dans le cas d'une tension continue, les modèles classiques de contournement ne font pas la différence entre les polarités. Pour cette raison un certain nombre de recherches n'a pas été expliqué [2.24]. Selon des études, les tensions critiques en polarité négative sont environ égales à $2/3$ des tensions critiques en polarité positive.

Wilkins et Al Baghdadi [2.25] ont constaté que dans le cas où les valeurs des résistances sont grandes, les tensions négatives donnent des courants critiques légèrement inférieurs à ceux des tensions positives. Ceci peut être expliqué par leur théorie de l'élongation par ionisation. Dans le cas d'une tension négative, le gradient de tension à la tête de la décharge est plus important du fait de la charge d'espace qui favorise l'ionisation.

Il en résulte un courant critique inférieur à celui d'une tension positive appliquée. Afin d'expliquer la faiblesse des valeurs trouvées en polarité négative, d'autres chercheurs José Pissalto [2.26], Rahal [2.27], Pyrène et Huraux et al [2.28] et Peyregne [2.29] ont constaté qu'en polarité positive, la pulvérisation de gouttelettes d'eau dans la colonne de la décharge peut avoir lieu et modifie à la fois les gradients de tensions dans celle-ci et l'atmosphère dans laquelle se propage la décharge. Contrairement au cas d'une polarité négative, la pulvérisation n'ayant pas lieu, cela veut dire que la décharge brûle donc dans l'air sec. Sternberg et Barret [2.30] ont aussi prouvé l'existence d'une pulvérisation intense du liquide à la racine de la décharge.

Ce phénomène n'existe qu'en polarité positive, quand l'électrode haute tension joue le rôle de l'anode. Les auteurs ont trouvé qu'il y a des gouttes d'eau avec un diamètre variable, d'une fraction à une dizaine de microns.

En outre, la mesure de la résolution temporelle de l'interferogramme de la décharge de contournement pour les deux polarités a été faite par Ishii et al [2.31] Ils ont vu que dans le cas d'une polarité positive, un écoulement turbulent de l'air par convection naturelle est observé en avant de la décharge (Figure 2.1a). Du reste, l'air de cette région dans le cas d'une polarité négative, subit une convection naturelle avec un régime laminaire (Figure 2.1b). Les mêmes

remarques ont été rapportées par l'étude de Farokhi et al [2.32] sur des isolateurs recouverts de givre.

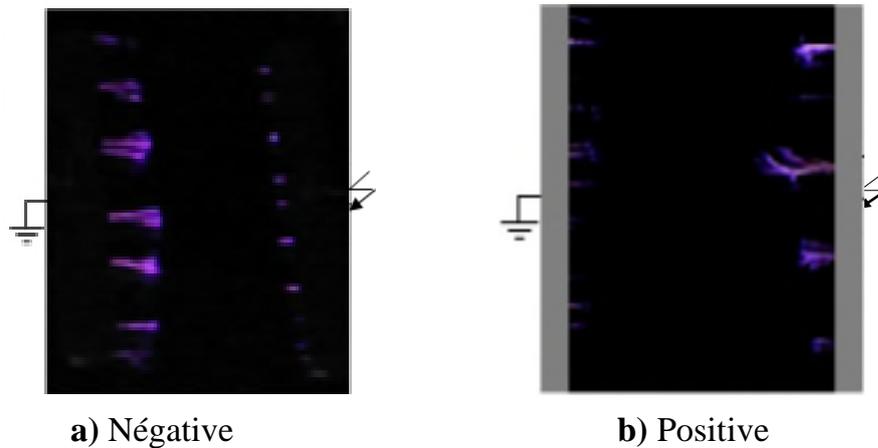


Figure 2.1 Décharge des deux polarités de la tension continue

D'autres études [2.33] ont été réalisées sur l'effet d'une décharge électrique sur la rigidité diélectrique de l'air et également sur l'apparition d'une décharge secondaire entre la décharge initiale et l'électrode plane soumise à une tension continue (Figure 2.1). Ils ont constaté que la différence de tension entre les deux polarités réside au niveau de la décharge elle-même.

Les résultats obtenus lors de leur étude ont permis de tirer les conclusions intéressantes suivantes :

- La tension nécessaire au contournement entre une électrode cylindrique et une électrode plane est très grande que celle de l'intervalle décharge-plan métallique et une stabilisateur avant la constriction de la décharge.
- Dans le cas d'un intervalle décharge - plan la tension en polarité négative est plus petite qu'en polarité positive.
- Le temps de retard entre l'établissement de la décharge initiale et la décharge secondaire est de l'ordre de dizaines de millisecondes.

Le profil de l'isolateur est l'un des paramètres qui influent sur la polarité de la tension appliquée, Reny et al [2.34] ont étudié ce paramètre et ils ont trouvé que dans le cas d'un isolateur simple et lisse, l'arc négatif est plus stable que celui de l'arc positif, puisque le deuxième peut se déplacer hors de la surface de l'isolateur ou bien s'éteindre facilement. Cependant, dans le cas où l'objet est symétrique, il n'y a pas de différence entre les deux polarités.

2.4.3 Influence des paramètres de la source

D'après les résultats de mesures réalisés par Rizk [2.32], nous ne pouvons pas expliquer l'erreur sur la tension critique due aux paramètres de la source par la chute de tension maximale aux électrodes. Il a été trouvé que ce paramètre peut être défini par le rapport adimensionnel de deux charges, l'une de celles-ci correspondant à la capacité de sortie de la source et la deuxième c'est l'isolateur test avec la sévérité de pollution.

Selon lui, nous pouvons aussi déterminer le taux d'ondulation requis en termes d'un des rapports adimensionnels de la charge et s'il est adopté, il peut constituer le critère de dimensionnement de la capacité d'entrée de la source contrôlée.

D'autres analyses ont été faites par Pissalto [2.33] à travers lesquelles il a constaté que le développement d'une décharge électrique est très influencé par les paramètres de la source.

2.4.4 Chute de potentiel

Selon Wilkins [2.26], la somme des chutes de tension à la cathode et à l'anode entre deux électrodes mouillées, pour le cas d'une décharge électrique sur une surface isolante polluée, est trouvée presque égale à 840V.

Cette étude a été aussi réalisée par Nacke [2.28], il a trouvé le même résultat et il a découvert également que cette valeur de chute de tension est approximativement deux fois la valeur obtenue dans le cas des électrodes en cuivre.

Gopal [2.27] a constaté dans son étude que la somme des chutes de tension au niveau de l'anode et de la cathode, varie entre 800 et 900V. Après cette recherche, d'autres investigations effectuées par d'autres chercheurs ont montré que cette valeur est de l'ordre de 950V. Cependant, dans le cas d'une décharge brulante dans l'air avec une cathode métallique, la valeur de la chute de tension au niveau de la cathode est plus petite que les valeurs mentionnées auparavant, cette constatation a été reportée aussi par Yamashita et al [2.16]

Chen et al [2.17] ont proposé un modèle théorique pour calculer la chute de tension dans le cas des décharges luminescentes sur certaines surfaces

métalliques. Ils se sont basés sur l'équation de poisson et sur le mécanisme d'avalanche électronique de Townsend. Les résultats numériques sont très proches de ceux mesurés expérimentalement.

Selon Rizk [2.20], les chutes de tension aux niveaux des électrodes sont négligeables dans le cas en dehors des conditions où le niveau de potentiel est extrêmement élevé et lorsque plusieurs arcs brûlent en série.

2.4.5 Temps de contournement

Ce temps caractérise la durée entre l'instant d'amorçage de la décharge et l'instant où son pied atteint l'électrode terre. Sous tension alternative, le temps de contournement est précédé d'un temps t_0 plus grand qu'une demi-période pendant lequel la décharge s'éteint et se rallume une autre fois avant le court-circuit de la surface de l'isolateur. On appelle t_0 le temps de retard, il correspond aussi à la durée pendant laquelle le milieu isolant traversé par la décharge électrique perd ses propriétés isolantes.

Plusieurs études ont été réalisées sur le calcul du temps de contournement d'un isolateur sous conditions de pollution. Rahal et al [2.31] ont représenté graphiquement le temps de contournement en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs des résistivités.

Ils ont trouvé que pour les faibles résistivités, les courbes de temps diminuent en fonction de l'augmentation de la tension. Cependant, pour les grandes résistivités ils ont obtenu une discontinuité qui implique une réduction brusque du temps de contournement.

Swift [2.19] a proposé une relation empirique qui relie le temps et le champ électrique, sans prendre en considération l'effet de la résistance de pollution et la longueur de pollution. Il a constaté la dépendance du temps au contournement avec la nature de mouillage de l'isolateur.

Peyrène [2.32] et Pollentes [2.33] ont constaté que pour une résistivité constante, les temps de contournement moyen sont d'autant plus élevés que l'on se rapproche de la valeur de la tension critique de contournement. Ils ont aussi montré que les temps de contournement sous polarité négative sont plus grands que ceux obtenus sous polarité positive, avec une même résistivité et à niveau

de surtension égale.

Afin d'étudier la dépendance du temps sur la tension appliquée, Ghoch et Chatterjee [2.35] ont augmenté la tension appliquée au-dessus de la valeur critique de la tension de contournement, et la variation de la valeur du temps est déterminé expérimentalement. Dans une autre référence [2.26], ils ont proposé un modèle sous tension alternative sur la base du réseau de Neurone au lieu d'une approche empirique, ce modèle est applicable juste pour les arcs statiques. Ils ont trouvé que le temps de contournement décroît avec l'augmentation de la tension appliquée et dépend de la nature chimique du polluant. Pour chaque électrolyte, il y a une valeur particulière de la tension appliquée pour laquelle un contournement se produit au bout de 1ms et que toute augmentation de la tension n'a pas d'effet remarquable.

2.4.6 Constitution chimique de la pollution

Parmi les principaux facteurs affectant le contournement des isolateurs est la contamination des surfaces de ceux-ci. Il a été constaté que la pollution est plus grande dans les zones de l'industrie chimique des industries métalliques, sur le rivage de la mer et au niveau des régions côtières proches.

La nature des dépôts sur les surfaces de l'isolateur est largement variée en fonction de la source de la pollution, le niveau de contamination, la forme de l'isolant et les conditions météorologiques. Le processus de contournement des surfaces contaminées est donc assez complexe. A partir des résultats obtenus, il est clair que la résistance de surface des régions polluées dépend de ces facteurs.

La technique expérimentale utilisée pour simuler la pollution naturelle dans les laboratoires est un travail très fastidieux. Sur site les isolateurs pollués sont contaminés après un temps assez grand et intermittente, tandis que les échantillons de laboratoire sont exposés à une pluie d'une solution salée dans une chambre à brouillard à une humidité de 80%.

Une étude sur une isolation solide polluée et mise sous mise à une haute tension a été réalisé par [2.37], il a fait une comparaison entre les deux types de pollutions, à savoir, pollution naturelle étudiée sur site et une pollution artificielle au niveau du laboratoire. En se basant sur la mesure du courant de fuite. Dans

son étude la solution polluante est constituée de l'eau et des quantités de NaCl et de CaO. Il a constaté un bon accord entre les résultats du laboratoire et ceux réalisés sur site.

D'autres chercheurs ont trouvé que la détérioration de l'isolation est liée au type de contamination. Une méthode d'essai de couches a été utilisée sur un isolateur solide. Rizk et al [2.14] ont utilisé le procédé du brouillard salin. L'effet de la DDSE sur la tension de contournement d'un isolateur contaminé mis sous tension continue a été effectué. Ils ont utilisé une solution polluante constituée de NaCl et de l'eau, ils ont proposé une expression analytique entre la tension de contournement et la DDSE de l'isolateur contaminé par l'utilisation de la technique d'analyse dimensionnelle.

Les résultats obtenus à partir de l'expression analytique sont comparés avec les résultats expérimentaux et un bon accord a été établi.

2.5 Mesure du degré de sévérité de pollution d'un site

Afin de dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillance dans un site pollué, il est nécessaire de savoir caractériser quantitativement la sévérité de la pollution de ce site. Il existe plusieurs méthodes qui ont un lien direct ou indirect au processus qui mène au contournement. Celles-ci sont basées sur la détermination expérimentale d'un paramètre qui caractérise une ou plusieurs phases du processus du contournement [2.38].

2.5.1 Méthodes de mesures indirectes

Afin de mesurer les facteurs indirects qui entrent dans l'évolution des paramètres directs tels que la quantité de sel, la résistance superficielle, le courant de fuite et la tension de contournement, on présente trois paramètres indirects largement utilisés dans la littérature, à savoir, la nature physico-chimique de la pollution, les facteurs météorologiques et l'indice de pollution [2.38].

2.5.1.1 Analyse physico-chimique de la pollution

Les recherches effectuées dans ce sens [2.38-2.40] montrent que la pollution déposée sur les isolateurs est pratiquement la même que celle qui se trouve à la surface du sol adjacent (Tableau 2.1). Les gaz dans

l'atmosphère jouent également un rôle aussi important dans la formation et la constitution du dépôt de pollution. En effet, il a été constaté que l'intensité instantanée de la pollution est le résultat de la combinaison de dépôts solides, de brouillard et de gaz contenus dans l'air.

Isolateur	Eléments (%)									
	Ca	Mg	Na	K	Si	Mn	Fe	Cu	Al	Zn
Haut	25,7	0,84	1,29	0,23	0,7	0,2	1,86	0,03	2,76	5,31
Bas	24	0,95	1,09	0,21	0,61	0,02	1,71	0,02	1,9	2
Sol	23,2	0,75	2,2	0,11	0,61	0,01	0,45	0,01	0,8	0,15

Tableau 2.1 Composition chimique des dépôts polluants

2.5.1.2 Facteurs météorologiques

Le dépôt des agents polluants est influencé par la vitesse et la direction des vents, la température et la pression, la variation de ces derniers facteurs est liée au changement du taux d'humidité [2.39].

$$H_r(\%) = 100 \cdot \frac{P}{P_{sat}(T)} \quad (2.22)$$

Ou :

P : Pression de vapeur d'eau dans l'air (mbar) ;

P_{sat} : Pression de vapeur saturante à une température donné (mbar) ;

T : Température (°C) ;

La pression de vapeur varie avec la température absolue selon l'équation d'Antoine :

$$\log_{10} P_{sat} = 8,43 - \frac{1827,18}{T} - \frac{71208,27}{T^2} \quad (2.23)$$

Si la température augmente suffisamment, le point d'ébullition est atteint, la pression de vapeur devient égale à la pression atmosphérique.

L'influence de la pluviométrie est très importante, elle affecte la quantité de pollution accumulée à la surface de l'isolateur. Dans certaines conditions de pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une

extrémité à l'autre de la chaîne ou de la colonne isolante. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut entraîner le contournement de l'isolation, sachant que les deux principaux types de rupture diélectrique auxquels sont soumis les isolateurs c'est le contournement sous pluie et sous pollution.

2.5.1.3 Indice de pollution

La première méthode exploitée pour savoir la sévérité de pollution est la technique de mesure de la conductivité volumique de la pollution atmosphérique piégée dans une jauge directionnelle placée à une hauteur semblable à celle des isolateurs [2.40].

Elle comporte quatre collecteurs orientés dans les quatre directions; nord, sud, est et ouest. Chaque collecteur contient des fentes d'où peuvent entrer à la fois la pluie et les agents de pollution.

Le contenu des fentes est vidé mensuellement puis on mesure la conductivité de la pollution dans une quantité d'eau déminéralisée.

A partir de cette mesure, on calcule l'indice de pollution en normalisant la conductivité à un volume d'eau de 500 ml et une période d'exposition de 30 jours, ainsi l'expression de l'indice de pollution IP en ($\mu\text{S}/\text{cm}$) sera :

$$IP = \sigma_{\text{moy}} \frac{30V_s}{500N_j} \quad (2.24)$$

V_s : Volume d'eau initial (ml) ;

N_j : Nombre de jours d'exposition ;

$$\sigma_{\text{moy}}(\mu\text{S}/\text{cm}) = \frac{1}{4}(\sigma_{\text{Nord}} + \sigma_{\text{Sud}} + \sigma_{\text{Est}} + \sigma_{\text{Ouest}}) \quad (2.25)$$

2.5.2 Méthodes de mesures directes

2.5.2.1 Méthode de la densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)

C'est une méthode permettant de comparer le pouvoir conductimétrique d'une solution à une référence qui est une solution de chlorure de sodium. Elle consiste à calculer la concentration d'une solution

de NaCl qui aurait la même conductivité que la solution étudiée. La quantité de sel équivalent trouvée dans la solution est ramenée à l'unité de surface lavée.

Cette méthode, largement utilisée dans le monde permet de quantifier la sévérité de la pollution déposée sur un isolateur [2.45]. Elle consiste à exposer plusieurs isolateurs de différentes formes, constitués des chaînes de suspension et de supports ou colonnes.

La mesure de la DDSE dans le cas de la porcelaine et du verre a été normalisée par la commission électrotechnique internationale (CEI) document 60507 [2.41] :

$$\sigma_{20} = \sigma_{\theta}(1 - b(\theta - 20)) \quad (2.26)$$

θ : Température de la solution (°C) ;

σ_{θ} : Conductivité volumique mesurée à une température θ °C (S/cm) ;

σ_{20} : Conductivité volumique mesurée à une température 20 °C (S/cm) ;

b : Constante égale à 0,01998.

La salinité Sa est donnée par :

$$Sa = (5,7 \cdot \sigma_{20})^{1,03} \quad (2.27)$$

Et par suite, la DDSE en (mg/cm²) est obtenue selon :

$$DDSE = Sa \cdot \frac{V}{A} \quad (2.28)$$

Avec :

Sa : Salinité (kg / m³) ;

V : Volume du dissolvant (eau distillée) en cm³ ;

A: Surface d'isolateur pour le rassemblement des polluants en cm².

Pour une meilleure mesure de la DDSE, il est nécessaire de vérifier quelques paramètres, à savoir, les sources de pollution pour choisir un site, le temps d'exposition, la fréquence de mesure selon le cycle de nettoyage naturel et la vitesse d'accumulation du dépôt polluant.

La DDSE est influencée également par le type de la tension appliquée,

parce que l'accumulation et la distribution de la pollution est plus importante dans le cas d'une tension continue que celles de tension alternative [2.46]. Cependant, la DDSE mesurée dans le cas où l'isolateur est exposé hors tension est plus faible que celle mesurée avec les deux tensions. Sans oublier l'effet des matières insolubles, ce paramètre peut être introduit par la notion de dépôt de densité de matières non solubles DDNS. Il a été trouvé que la tension tenue au contournement diminue avec l'accroissement de la DDNS.

2.5.2.2 Méthode de mesure de la conductivité électrique de la pollution

La méthode est basée sur la mesure de la conductivité d'un dépôt polluant à l'aide d'un conductimètre à sonde mobile (Figure 2.2).

Il existe plusieurs types de sondes qui se distinguent par l'humidification de la pollution et la géométrie des électrodes, des sondes à électrodes linéaires et planes.

Dans le cas de la sonde à électrodes linéaires, l'humidification du dépôt polluant est réalisée à l'aide de l'eau distillée [2.43].



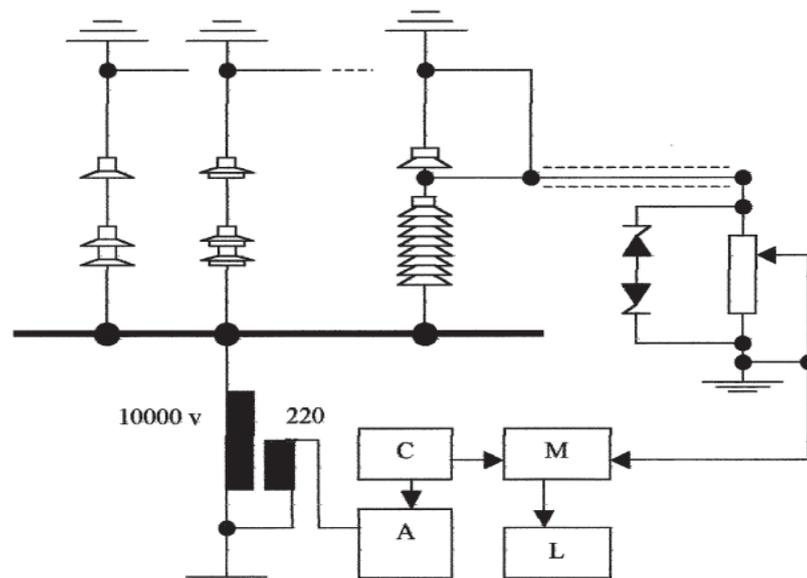
Figure 2.2 Conductimètre à sonde mobile

2.5.2.3 Méthode de la conductance superficielle

Ce paramètre est le rapport du courant de fuite circulant à la surface de l'isolateur sur la tension appliquée. Elle caractérise l'état global de la

surface isolante avant la formation des bandes sèches. La conductance superficielle résulte de l'effet de l'humidité sur les sels existant dans la couche de pollution qui recouvre l'isolateur.

Cette méthode a l'avantage de mesurer les conditions réelles de pollution sur le site mais la difficulté réside dans le choix des isolateurs et de la tension de mesure afin d'éviter la formation de bandes sèches pendant la mesure de conductance.



A : Contrôle des manœuvres C : Contrôle des séquences
L : Système d'acquisition des données M : Mémoire analogique

Figure 2.3 Schéma bloc du circuit utilisé pour la mesure de la conductivité superficielle

2.5.2.4 Méthode du courant de fuite

Que ce soit dans les conditions naturelles de pollution ou lors des essais sous pollution artificielle, lors de l'application d'une tension à un isolateur, on enregistre le passage d'un courant de fuite. Dans le cas d'une tension alternative, ce courant s'annule à chaque passage par zéro de la tension. D'une alternance à l'autre, son amplitude et le nombre d'impulsions varient considérablement, dans ce cas on peut caractériser l'état d'isolement de la surface d'un isolateur.

Il y a deux méthodes de mesure :

La première est de compter le nombre d'impulsions, la fréquence et l'amplitude de celles-ci qui augmentent avec le rapprochement du contournement.

Concernant la deuxième technique de la crête maximale du courant de fuite, elle permet de mesurer la plus forte crête du courant de fuite enregistrée pendant une période donnée sur un échantillon ou un isolateur réel soumis à sa tension de service en permanence.

2.5.3 Mesure de la pollution en temps réel (Monitoring Sur site)

Les techniques citées auparavant sont effectuées en temps non réel, elles sont exploitées dans plusieurs cas, à savoir, l'élaboration d'une carte de la pollution ou bien d'un calendrier de la pollution pour la programmation des opérations de lavage, également, ils sont utilisés pour le dimensionnement et le redimensionnement de l'isolement au niveau d'une ligne électrique. Des perturbations dangereuses peuvent être provoquées en raison de l'accroissement du niveau de pollution suite à des facteurs climatiques exceptionnels. Dans ce cas une mesure permanente de la pollution doit être effectuée, au moyen de l'une des méthodes citées auparavant (DDSE), conductance superficielle et courant de fuite) constitué d'un transformateur de courant (capteur), d'un bloc logique de traitement émetteur- récepteur et d'un câble coaxial de transmission (Figure 2.4).

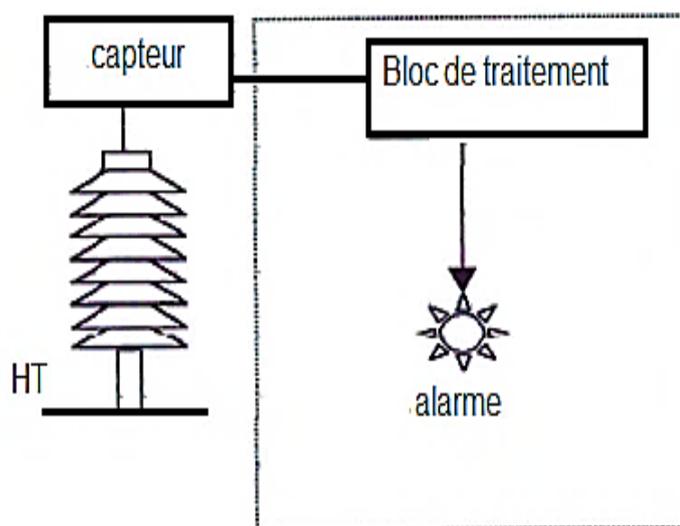


Figure 2.4 Principe de mesure sur site [2.47]

2.5.3.1 Avertisseur basé sur le comptage d'impulsions du courant de fuite

Le circuit de mesure est constitué d'un transformateur de courant (capteur), d'un bloc logique de traitement émetteur- récepteur et d'un câble coaxial de transmission [2.48].

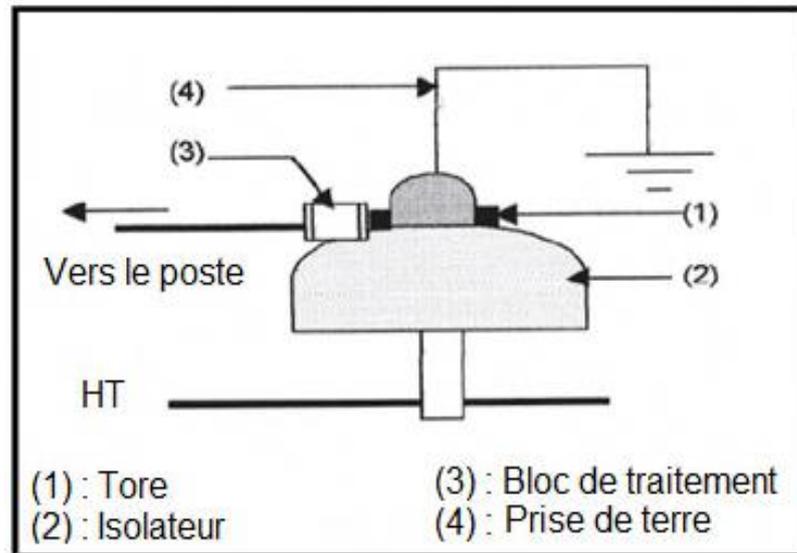


Figure 2.5 Avertisseur basé sur le comptage d'impulsions du courant de fuite

L'appareil commence à compter le nombre d'impulsions dès que l'amplitude du courant de fuite mesurée dépasse une certaine valeur. Si ce nombre dépasse une valeur critique, la situation est jugée "sévère" et l'appareil émet un signal d'alarme au poste de surveillance.

2.5.3.2 Avertisseur basé sur la mesure du courant de fuite

Le capteur est un diviseur résistif et le bloc de traitement est un ensemble de circuits numériques à processeurs. Comme pour le cas précédent, si le courant dépasse une valeur critique, un signal d'alarme est donné. Plus récemment, un avertisseur, le CPI (Current Pulse Integrator) a été expérimenté et a donné d'excellents résultats [2.49]. Il est essentiellement constitué de deux parties ; un shunt résistif et un bloc de mesure et d'acquisition contenant un intégrateur électronique et un circuit de mémorisation. Les deux parties sont connectées par un câble coaxial ou téléphonique éventuellement relié à des PC via des modems.

2.5.3.3 Avertisseur basé sur la mesure de la DDSE

Cette mesure a été effectuée par l'équipe de recherche du professeur Matsuo de l'université de Nagasaki (Japon) [2.49]. Le principe de cette méthode est de mesurer le courant qui circule sur la surface de l'isolation sous tension réduite. Les électrodes utilisées dans cette étude sont en aluminium. L'image de l'impédance de fuite de l'isolateur (Z_f) a été donnée par le courant circulé.

Afin de convertir cette image, ils ont utilisé l'unité de traitement en DDSE. Pour un isolateur de type cylindrique à ailettes à long fût on utilise l'expression :

$$DDSE = 0,2512 \times \exp(Z_f) \quad (2.29)$$

Pour les isolateurs standards de type capot et tige on utilise :

$$DDSE = 0,312 \times \exp\left(\frac{0,294}{Z_f}\right) \quad (2.30)$$

2.5.4 Techniques d'essais sous pollution artificielle

Les méthodes qui ont été proposées sont relativement normalisées. La première approche consiste à rechercher une méthode qui simule le mieux possible les conditions naturelles de pollution. Plusieurs méthodes devront être retenues selon que l'on recherche à simuler la pollution marine, la pollution industrielle ou tout autre type de pollution. La deuxième approche consiste à rechercher une méthode de laboratoire susceptible de fournir des résultats reproductibles afin de faciliter la comparaison des performances des différents types d'isolateurs. Les différentes méthodes d'essais peuvent être classées en trois grandes catégories : les méthodes du "brouillard propre", "de la pollution liquide" et "du brouillard salin".

2.5.4.1 Méthode de la couche solide ou du brouillard propre

Après avoir soigneusement nettoyé l'isolateur à essayer, puis enduit d'un mélange d'eau, de sel NaCl) et d'un absorbant inerte à base de Tonoko ou de Kaolin.

Ce mélange est appliqué sur les isolateurs par pulvérisation, par trempage ou au pinceau. Les isolateurs sont alors séchés. L'essai consiste à humidifier le dépôt au moyen d'un brouillard propre pendant 15 à 20 minutes pour obtenir la conductivité maximale.

La tension peut être appliquée avant ou après humidification de la couche polluante. L'essai est sanctionné par le contournement ou la tenue de l'isolation au bout d'un temps donné. Diverses procédures peuvent être employées, à savoir, la détermination du degré de pollution tenu en répétant l'essai un certain nombre de fois, pour la tension nominale de l'isolation. Ainsi on recherche le degré de pollution maximal qui ne provoque pas de contournement. Egalement, on détermine de la tension qui provoque 50% de contournements pour un degré de pollution donné au moyen d'une méthode "up and down".

2.5.4.2 Méthode de la pollution liquide [2.49]

Cette méthode connue également sous l'appellation de "méthode de la méthylcellulose" s'apparente à la méthode du brouillard propre dans la mesure où un mélange liquide est appliqué sur l'isolateur avant l'essai. Dans ce cas, la pollution n'est pas séchée avant l'essai.

Elle est constituée d'eau, de craie et de méthylcellulose ou de kaolin. Comme pour le brouillard propre la conductivité du mélange est ajustée par addition de chlorure de sodium.

Après quelques minutes d'égouttage, la tension d'essai est appliquée à l'isolateur. Il est important de signaler que la couche polluante n'est pas humidifiée en cours d'essai. Ainsi après quelques minutes d'essai, les courants de fuite assèchent la couche et la probabilité de contournement décroît rapidement.

2.5.4.3 Méthode du brouillard salin

Après un nettoyage préalable, l'isolateur est soumis à un brouillard d'eau salée alors qu'une tension constante lui est appliquée. Le brouillard est produit par deux rangées de pulvérisateurs disposés de part et d'autre de

l'isolateur. Chaque pulvérisateur est constitué de deux ajutages; l'un délivrant la solution salée, l'autre disposé perpendiculairement au précédent fournit un courant d'air comprimé qui atomise la solution en fines gouttelettes. Les ajutages doivent être constitués de matériaux résistant à la corrosion [2.49].

Généralement la tension appliquée à l'isolateur est la tension maximale de service. On recherche alors la "salinité tenue" c'est-à-dire la plus forte salinité, qui pour trois essais sur quatre, ne conduit pas au contournement. On peut également rechercher la tension de contournement pour une salinité donnée, partant d'une valeur de tension approximativement égale à 90% de la tension de contournement, on accroît, toutes les 5 min la tension de 2 à 2.5% jusqu'à obtenir le contournement.

2.6 Isolateur en verre

Le verre est un matériau inorganique consistant en dioxyde de silicium thermoplastique (SiO_2), qui est disponible dans la nature sous la forme de quartz.

Différents types d'oxydes métalliques peuvent être utilisés pour la production de différents types de verres, mais pour une utilisation en génie électrique seulement les verres non alcalins conviennent et ayant une teneur d'alcalins inférieure à 0,8%.

Le verre est un alliage dur, fragile et transparent à la lumière visible. C'est un matériau amorphe qui présente un désordre structural important. Au sens chimique et physique, le verre n'est pas un solide, mais plutôt un liquide solidifié [2.50].

2.6.1 Différents types du verre [2.50]

Selon les multiples applications, on distingue différentes caractéristiques des verres utilisés en électrotechnique, à savoir, les caractéristiques mécaniques, chimiques ou électriques.

2.6.1.1 Fibre de verre

Destinées au renforcement mécanique de pièces en résine directement au contact d'éléments conducteurs comme par exemple dans les isolateurs

en matériaux composite de ligne ou de poste.

2.6.1.2 Les verres moulés

Il existe deux familles principales qui se différencient par la résistance mécanique du verre. Certaines pièces ne nécessitant pas de grande résistance mécanique sont moulées et recuites. La limite mécanique du matériau, lorsqu'il est recuit, a amené les fabricants d'isolateurs en verre à développer et adapter le procédé de la trempe (plus commun dans le domaine du verre plat) à des objets de formes plus complexes tels que les isolateurs en verre des lignes aériennes.

2.6.1.3 Verre recuit

Le verre recuit est utilisé pour la fabrication d'isolateurs rigides, mais présente cependant des inconvénients. Parmi ces inconvénients, nous citons le fait qu'il ne résiste pas aux variations brusques de température et qu'il ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles et c'est pour cette raison qu'il n'est pas utilisé pour la fabrication des isolateurs de suspension.

2.6.1.4 Verre trempé

Lors du processus de trempe thermique, les propriétés physiques du verre changent, grâce à leur traitement thermique (T environ 700 °C).

Les isolateurs en verre trempé possèdent une grande résistance, tant aux contraintes mécaniques propres aux isolateurs suspendus, qu'aux chocs qui peuvent se produire durant le transport, la manipulation ou l'installation.

Ils sont aussi très résistants aux brusques variations de température. De plus, ils peuvent offrir un niveau de protection et de sécurité.

Grâce à son homogénéité, le verre possède une rigidité diélectrique très élevée, ce qui rend les isolateurs pratiquement impossible à perforer. Ils possèdent aussi une haute capacitance électrique, ce qui permet d'obtenir une distribution homogène de potentiel sur les chaînes.



Figure 2.6 Isolateur de profil standard en verre trempée

2.6.2 Propriétés du verre [2.53]

➤ Propriétés mécaniques

Le verre tire sa dureté et sa résistance de sa base de silicate, mais également sa fragilité connue et indésirable. C'est une propriété à laquelle il faut dédier toute l'attention qui lui est due, quel que soit le type d'application. La résistance à la compression du verre est très élevée et dépasse de loin celle des autres matériaux de construction. Il est également important de noter que la résistance diminue en fonction de la durée d'application de la charge.

➤ Propriétés thermiques [2.53]

Lorsqu'on le compare à d'autres matériaux, le verre présente une faible dilatation thermique qui, dépend de sa composition. La capacité du verre à transférer la chaleur est certes faible, mais elle est élevée par rapport aux matériaux d'isolation courants, car l'exceptionnelle isolation thermique offerte par les verres isolants en particulier s'appuie sur l'effet des traitements isolants.

➤ Propriétés chimiques [2.53]

Le tableau 2.2 donne un exemple de compositions chimiques

typiques utilisées soit dans le domaine du verre moulé, soit dans le domaine des fibres de renforcement mécanique. On note que dans le cas du verre moulé, la composition du verre est toujours de type silico- sodocalcique. Les verres utilisés pour les pièces trempées sont forcément des verres à fort coefficient de dilatation. Compte tenu de l'épaisseur et des charges mécaniques appliquées dans le cas d'isolateurs de ligne aérienne, la trempe chimique n'est pas envisageable, et il faut procéder à une trempe thermique systématique.

Oxydes utilisés dans la composition chimique	Verre sodocalcique de type électrique (%)	Fibre de verre de type E (%)	Fibre de verre de type E-CR (%)
SiO ₂	75	55	61
Al ₂ O ₃	3	14	13
B ₂ O ₃	-	6	-
CaO	7	22	22
MgO	-	1,5	3
Na ₂ O	12	0,3	0,1
K ₂ O	2	0,5	0,3
Fe ₂ O ₃		0,3	0,3
TiO ₂	-	0,4	0,3
BaO	1	-	
Total	100	100	100

Tableau 2.2 Composition massique chimique typique des principaux verres

➤ Propriétés physiques

Les verres utilisés pour les pièces moulées destinées aux applications à usage d'isolateur de ligne électrique aérienne ont des caractéristiques physiques conformes à celles des verres sodocalcique habituels. La norme CEI 60672 [2.41] permet d'en retrouver les principales caractéristiques physiques. On note cependant que les caractéristiques mécaniques du verre trempé ne peuvent être facilement établies car celles-ci doivent être mesurées sur des

échantillons recuits, de taille bien précise qui ne peuvent pas être prélevés sur des isolateurs trempés.

Les caractéristiques des verres destinés aux applications de fibres de renforcement peuvent varier d'une manière plus large que dans le cas des verres moulés selon les applications visées mais aussi selon les fabricants.

Propriété	Symbole	Unité	G110	G120
Résistance à la flexion	R _f	MPa	Min. 30	Min.150
Module d'élasticité	E	GPa	Min. 70	Min. 70
Coefficient expansion linéaire	α (20 à 400°)	10 ⁻⁶ K ⁻¹	8,5 à 10	8,5 à 10
Température de transition vitreuse	T _g	°C	500 à 560	500 à 560
Rigidité diélectrique	E _d	kV/mm	Min. 25	Min.25
Permittivité relative 1MHz, 20 °C	ϵ_r		6,5 à 7,6	7,3 à 7,6
Facteur de dissipation à 20°C	$\tan \delta$ (1MHz)		Max. 10.10 ⁻³	Max. 60.10 ⁻³
Résistivité à 20°C	ρ_{20}	$\Omega \cdot \text{cm}$	Min. 10 ¹²	Min. 10 ¹²
Résistivité à 200°C	ρ_{200}	$\Omega \cdot \text{cm}$	Min. 10 ⁷	Min. 10 ⁷
Température pour 100 M Ω .cm	T _{k100}	°C	Min. 170	Min. 180
Température pour 1 M Ω .cm	T _{k1}	°C	Min. 280	Min. 280

Tableau 2.3 Principales caractéristiques physiques des verres

2.6.3 Inconvénients du verre isolant

L'humidité peut facilement condenser la surface du verre et aussi le dépôt de la poussière d'air sur sa surface qui peut faciliter le passage du courant de fuite. Dans le cas des isolateurs en verre ou en porcelaine, le mécanisme de décharge est différent de celui des isolateurs en polymère, le mouillage de la pollution accumulée sur la surface des isolateurs en verre ou en porcelaine conduit à l'apparition d'un film d'eau continu, donc l'arc peut se développer directement. Le séchage de la partie restante et l'élongation de l'arc causent le contournement de l'isolateur [2.54].

2.6.4 Nature des matériaux

Plusieurs types de matériaux diélectriques composites ont été développés par les fabricants, chacun présentant des propriétés particulières. Dans le domaine des isolateurs extérieurs, trois familles sont particulièrement utilisées : les résines époxy, les élastomères éthylène-propylène et les élastomères silicones. Une étude réalisée [2.55] a montré que les isolateurs composites utilisent pour la plupart l'élastomère de silicone comme matériau de revêtement. L'EPDM et les autres matériaux ne sont utilisés que minoritairement.

Les polymères chimiquement sont faiblement liés ensemble, et ils ont tendance à se décomposer lorsqu'ils sont soumis à une chaleur de quelques centaines de degrés centigrades. L'avantage principal des polymères est leur faible valeur de l'énergie surfacique. Cela force les matériaux polymères à inhiber la formation d'un film d'eau continu et provoque la formation de gouttelettes d'eau isolées et discrètes. Les polymères, tels que la silicone et EPDM ont la possibilité de limiter le courant mieux que la porcelaine. Par conséquent, ils ont une meilleure performance de contournement par rapport à la porcelaine [2.56].

Selon S. Gubanski et A. E Vlastos [2.57] les isolateurs en silicone ont un meilleur comportement que les isolateurs en EPDM. En effet, tous les isolateurs en silicone qu'ils ont testée ont pu recouvrir leur hydrophobicité, ce qui ne fût pas le cas des isolateurs en EPDM.

De nombreux travaux [2.58] ont montré que les surfaces en élastomère de silicone recouvraient leur hydrophobicité après une période de 6 à 8 heures, tandis que les isolateurs en EPDM recouvraient leur hydrophobicité qu'après une période de 12 à 15 heures. L'EPDM est exploité beaucoup plus dans l'isolation intérieure qu'extérieure.

2.6.5 Choix du profil d'isolateur

Dans le guide de tension alternative, des principes généraux sont donnés pour choisir le profil des isolateurs selon [2.59] :

- la tension de service de la ligne ;
- les efforts mécaniques auxquels ils sont soumis (poids des conducteurs

et du givre, action du vent, tension mécanique des conducteurs éventuellement).

- leur nature (rigide ou suspendus) en fonction du prix de revient de la ligne et de son importance.
- le type de pollution du site.

Les mêmes principes s'appliquent dans le cas d'une tension continue, mais dans ce cas les choix des isolateurs disponibles sont limités en tant que des profils spéciaux des isolateurs sont exigés.

Les isolateurs de haute tension continue ont généralement des ailettes et des sous-nervures un peu plus grandes, donc l'espacement est usuel pour les isolateurs sous la tension suscitée. C'est parce que sous l'excitation de ce type de tension, les arcs formés au-dessus de la zone sèche sont plus probables pour quitter la surface et se propager dans l'air, par rapport au cas de haute tension alternative, où les arcs tendent à se développer le long de la surface de l'isolateur, comme il est montré sur la figure 2.7.

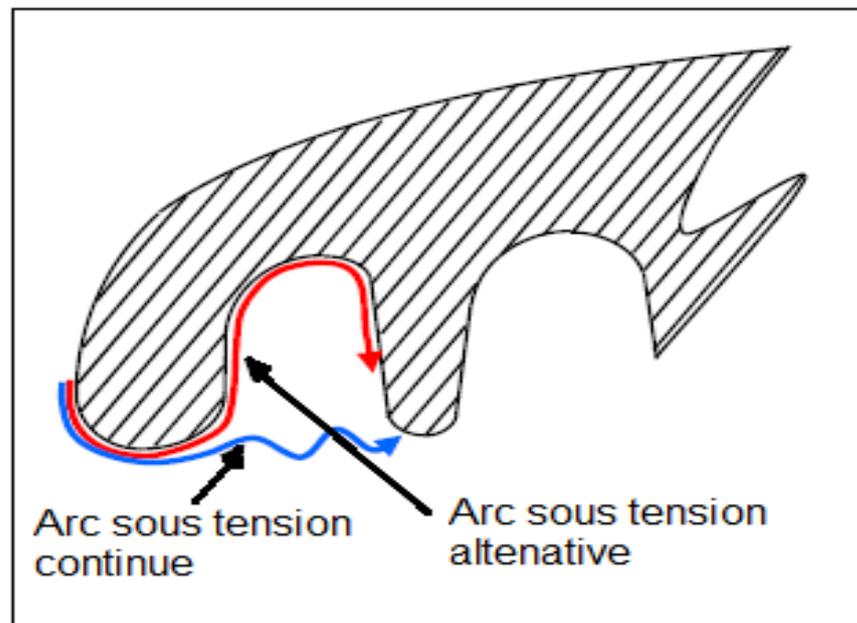


Figure 2.7 Propagation de l'arc électrique sous tension continue et alternative

2.6.6 Effet du diamètre

Les études expérimentales et les modèles théoriques prouvent que pour la même sévérité de pollution, la tension de contournement est réduite avec l'augmentation du diamètre de l'isolateur. C'est essentiellement en raison de la diminution de la résistance de la couche de pollution par l'augmentation du diamètre

de l'isolateur. Cet effet est annulé par la probabilité croissante du développement de plusieurs arcs électriques au-dessus de la bande sèche.

Le diamètre et la ligne de fuite d'un isolateur peuvent avoir des variations, selon le degré de la sévérité de pollution du site et le type de tension utilisée. Puisque la forme de l'isolateur va avoir une influence sur la quantité de poussière déposée sur sa surface. En effet, les isolateurs de grand diamètre accumulent moins de pollution que ceux ayant un diamètre plus petit.

Comme il a été montré par les chercheurs, l'effet du diamètre est négligeable dans le cas d'un diamètre moyen moins de 300 mm. Par contre, cet effet est saturé pour les isolateurs à diamètre moyen supérieur à 500mm.

L'explication physique pour cela pourrait être comme suit :

- Pour les isolateurs de petit diamètre, l'ailette est "grande" par rapport au diamètre de l'isolateur, et elle est donc le facteur dominant qui détermine le dépôt de la pollution. Cela pourrait aussi être l'explication de la grande dispersion des résultats des diamètres inférieurs à 220 mm. Comme l'effet de l'ailette est important, le diamètre fait peu de différence sur le dépôt de la pollution.

- Pour les isolateurs à grands diamètres, la projection de l'ailette est faible par rapport au diamètre, par conséquent, elle ne joue qu'un rôle mineur dans la détermination de l'écoulement d'air autour des isolateurs. En outre, au-dessus d'un certain diamètre (environ 500 mm), il semble que le diamètre cesse d'avoir une influence significative [2.59].

2.6.7 Choix du matériau verre

L'intérêt porté à ce matériau est justifié par la couverture de plus de 50 % des lignes de moyenne et haute tension du réseau électrique algérien par des isolateurs en verre.

L'isolateur en verre dispose d'un nombre d'avantages par rapport à un isolateur en porcelaine classique. Il a une très grande rigidité diélectrique par rapport à la porcelaine et sa résistivité est également très élevée. Comme il est transparent, les impuretés et les bulles d'air peuvent être facilement détectés à l'intérieur de son corps. De plus, le verre a une très longue durée de vie à cause de ses propriétés mécaniques et électriques qui ne sont pas affectées par le

vieillessement. Enfin, le verre est moins cher que la porcelaine et les isolateurs composites [2.42].

Parmi les inconvénients des isolateurs composites nous citons, la difficulté de localiser les défauts, dans le cas d'anomalie, l'obligation du remplacement de toute la chaîne d'isolateurs et le non possibilité d'intervention sous tension.

2.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un résumé d'une étude bibliographique sur le phénomène de contournement en précisant leur rôle et leurs différents types, nous avons présenté une synthèse des principales méthodes sur site ou bien au laboratoire intervenant dans le dimensionnement de l'isolement superficiel des lignes ont été examinées. Cependant, l'inconvénient des essais sur site est que plusieurs années sont nécessaires pour comparer les performances des isolateurs essayés. Afin d'obtenir des résultats rapidement, facilement et à moindre coût, il est préférable de reproduire en laboratoire les conditions de pollution naturelle. Toutes les méthodes considèrent le dépôt de pollution qui recouvre la surface des isolateurs comme étant uniforme. Cette simplification est remise en cause par la pollution qui n'est pas distribuée de manière uniforme mais dépend du profil des isolateurs.

Le choix du verre pour notre étude est motivé par le fait qu'il est l'un des matériaux de construction les plus résistants que l'on peut imaginer [2.59].

Le choix du profil des isolateurs pour des lignes aériennes sous haute tension continue est plus critique que dans le cas d'une haute tension alternative. Il y a des différences fondamentales entre les deux types de tensions, au niveau de dépôt de pollution et le processus de contournement qui peuvent affecter la conception d'isolation, les isolateurs sous tension continue tendent à accumuler plus de pollution que les isolateurs sous tension alternative

REVUE DE LITTERATURE

3.1 Introduction

L'étude du champ électrique est importante dans l'engineering haute tension. En effet, plus la tension est élevée, plus le champ électrique augmente. Les distances d'isolation nécessaires sont alors importantes et le matériel est encombrant, donc cher. Il faut utiliser au mieux les systèmes d'isolation afin de réduire la taille des appareils, mais sans pour autant en diminuer la qualité [3.1].

Ainsi, un champ trop élevé signifie une durée de vie courte et un manque de fiabilité. Suivant des conditions atmosphériques données, la disruption de l'air dépend largement de la forme des électrodes et du genre de la tension appliquée.

Dans la pratique, la majorité des configurations rencontrées peut être caractérisée, à partir d'une certaine distance inter électrodes, par des géométries à champs non uniforme pointe - pointe ou pointe – plan et plan-plan [3.2].

Dans ce qui suit nous allons passer en revue les résultats essentiels se rapportant à l'équivalence de performance électrique entre l'intervalle d'air pointes-pointes et celui de la configuration plan-plan conventionnelle [3.3].

3.2 Performance diélectrique d'une isolation polluée sous tension continue

Le travail de bouchelga et al [3.4], consiste à étudier le développement des décharges électriques parallèles sur une surface à bande de pollution uniforme et de largeur variable, délimitée par des configurations d'électrodes à géométrie distincte et mise sous tension continue à polarité variable [3.5].

Cette étude a permis de montrer l'impact de divers paramètres sur la caractérisation de la largeur effective d'une seule décharge électrique. Ils ont établi deux expressions empiriques liant la largeur effective de la décharge électrique au nombre de zones sèches en série et la longueur critique de l'arc dans le cas des deux polarités de la tension continue, ainsi ils ont pu mettre en évidence l'importance d'utilisation des isolateurs d'un diamètre inférieur à 12 cm sous polarité positive de la

tension continue sur leur performance diélectrique. Cependant, dans le cas d'une polarité négative de la tension continue, il est préférable d'utiliser des isolateurs en verre d'un diamètre inférieur à 20 cm, mais avec une grande ligne de fuite afin qu'ils puissent supporter le poids du câble afin de garder une performance diélectrique plus élevée.

Les résultats expérimentaux ont mené aux points essentiels suivants :

- L'existence d'une largeur effective limite d'une décharge électrique dont sa valeur est de l'ordre de 12 cm en polarité positive et 20 cm en polarité négative.

- L'exploitation des deux techniques de mesure des dimensions des zones sèches et de la tension de contournement de l'isolation contaminée ont conduit aux valeurs de la largeur effective suscitée.

- La conductivité électrique de la pollution n'influe pas sur la taille de la largeur effective d'une décharge électrique, quelle que soit la polarité de la tension continue appliquée.

- La décharge positive est plus rapide que la négative puisque la première se propage dans un champ divergeant et la deuxième dans un champ convergeant, ce qui explique la différence de développement en longueur et en largeur entre ces deux décharges.

- Quant aux décharges parallèles leur nombre et leur taille est très influencée par la largeur de l'isolation et la puissance de la source de haute tension.

- Une équivalence électrique entre les systèmes multi-pointes-pointes et plan-plan a été obtenue pour les deux polarités positive et négative. Cette équivalence électrique trouve sa justification dans le fait que le nombre de pointes ajoutées au système à deux électrodes de base, n'influe pas sur le nombre de décharges électriques parallèles évoluant indépendamment jusqu'à l'ultime phase de contournement de l'isolation polluée mais plutôt sur la distance séparant deux pointes adjacentes, de telle sorte que les points d'initiation des deux décharges parallèles soient toujours espacés d'une distance égale à la largeur effective.

- l'écart maximal de tension de contournement entre les arrangements multi-pointe-pointes et plan-plan est de l'ordre de 10%.

3.3 Equivalence électrique entre les deux systèmes d'électrodes plan-plan et pointes-pointes protégé par barrière

Il a été prouvé par plusieurs chercheurs que l'introduction d'une barrière dans l'intervalle d'air à champ électrique non uniforme peut élever sa performance électrique de trois fois celle obtenue sans celle-ci [3.6]. Cette amélioration est expliquée tout simplement par l'empêchement de tout passage de courant ou amorçage par décharge électrique de l'intervalle d'air compris entre ses parties sous tension et à la terre par un allongement de la distance d'isolement du système au moyen du chemin de glissement de celles-ci sur les grandes faces opposées de la barrière et/ou par uniformisation du champ électrique régnant entre la barrière et l'électrode plane à la terre

D'après les essais effectués par F.Volochtchenko [3.7] avec un condensateur cylindrique et un système pointe-plan, la variation de la distribution du champ est liée aux charges d'espace et aux charges superficielles sur la barrière.

A l'aide d'une sonde diélectrique, il a pu vérifier que le champ électrique entre la barrière et le plan (système pointe-plan) devient uniforme et que le champ sur la barrière diminue lorsque la largeur de cette dernière augmente. Pour des intervalles d'air de 8 à 12 cm, ce chercheur n'a obtenu une bonne amélioration de la tenue diélectrique de l'air que pour les systèmes d'électrodes à champ non uniforme. Entre deux électrodes planes ou cylindriques, la barrière provoque une très faible amélioration, si non une diminution de la tension disruptive, car l'ionisation autour de la barrière est facile dans ces cas [3.8]. Pour l'arrangement pointe - barrière - plan, l'auteur affirme que la rupture a lieu en différentes étapes : il y a d'abord la rupture de l'intervalle pointe-plan, ensuite celle de l'intervalle arrière-plan qui apparaît en même temps que la rupture totale.

M. Awad [3.9] a étudié le comportement des barrières polluées dans des intervalles d'air pointe-pointe et pointe-plan de longueur inférieure à 12 cm. Les tensions utilisées étaient à fréquence industrielle 50 Hz et pour un choc de manœuvre d'impulsion (230/3000) μ S. Les couches polluantes furent caractérisées par leurs conductivités superficielles. Quand la surface polluée est en face de la pointe HT, la tension disruptive diminue lorsque la conductivité superficielle augmente et tend vers une valeur constante pour une conductivité supérieure ou égale à 3 μ S. La diminution

de la tension est attribuée à l'uniformité de la distribution de charges sur la barrière quand la conductivité superficielle augmente et à l'élévation de la capacité de l'intervalle barrière-plan. Selon la largeur de la barrière, les décharges préliminaires partant de la pointe peuvent soit se prolonger par des décharges superficielles facilitant la rupture à partir des bords de la barrière, soit facilement contourner la barrière quand sa largeur est relativement petite par rapport au diamètre de l'électrode plate (système pointe-plan). Quand la surface polluée est en face de l'électrode mise à la terre, les décharges préliminaires partant de la pointe HT rencontrent une surface isolante à grande résistivité superficielle, se prolongent généralement en décharges glissantes et la tension disruptive n'est pas diminuée [3.10].

A. Boubakeur [3.11] a travaillé sur les intervalles d'air pointe - plan de 40 à 200 cm, en tension de choc de foudre et de manœuvre positive et en tension alternative à fréquence industrielle. Il a montré que la barrière isolante joue un rôle d'obstacle géométrique provoquant l'augmentation de la tension disruptive, quand la barrière est proche de la pointe aux environs de 20 % de la distance pointe-plan. Cette augmentation est due à l'allongement du canal de décharge disruptive.

Il a également travaillé sur l'influence des couches semi-conductrices appliquées sur la barrière isolante, où il a remarqué leur effet négatif sur la tension disruptive ; ceci à partir des conductivités superficielles supérieures à $0,4 \mu\text{S}$ et pour des distances pointe - barrière comprises entre 20 et 100 % de l'intervalle complet.

Dans le cas d'une barrière conductrice [3.12], il a constaté que lorsque la barrière est en contact avec la pointe, la tension disruptive augmente. Par contre lorsqu'elle est située au voisinage de la zone médiane de l'intervalle pointe - plan elle décroît. Dans le cas où la barrière est suffisamment proche du plan, la tension disruptive de l'arrangement "pointe-barrière-plan" reste voisine de celle de l'arrangement "pointe - plan" sans barrière.

Le travail de V.Topalis [3.13] se rapporte au comportement de petits et moyens intervalles d'air de pointe-pointe et pointe-plan avec une barrière isolante, sous la tension de foudre. La barrière est une feuille de papier, utilisée pour l'isolation de l'enroulement de transformateur, avec différentes épaisseurs. Sa position par rapport à l'électrode haute tension est variée de 0 à 50 %. La forme de l'extrémité de la pointe et

son diamètre ont été variés.

La conclusion résultant de sa recherche expérimentale montre une augmentation de la tension de claquage avec la distance inter électrode. Cependant, lorsque l'épaisseur de la barrière augmente, la position de la barrière correspondant à la tension maximale disruptive de l'espace d'air pointe - pointe ou pointe - plan est décalée du centre vers l'électrode HT. Cette conclusion est conforme à celle obtenue par J. Pilling [3.14].

Les études expérimentales effectuées par M. Lebedev et al [3.15], se rapportent à l'influence de la polarisation préliminaire des barrières minces d'éthylène sur la tension de contournement de l'intervalle d'air de la configuration pointe-plan sous tension alternative. Celle-ci joue un rôle considérable sur la défaillance de l'isolation. Il a été montré que la polarisation non homogène d'un intervalle d'air avec barrière est due au fort changement de la permittivité et/ou conductivité de la surface de la barrière diélectrique.

Les travaux de recherche effectués par H. Madi et Co [3.16], concerne l'étude de l'effet du mode de distribution et de la sévérité du degré pollution d'une barrière isolante sur la tension disruptive d'un intervalle d'air d'un système pointe-barrière-plan mis sous tension alternative. Les essais ont été réalisés sur des barrières propres en verre puis contaminées selon des modes de distribution de pollution uniforme et non uniforme.

Il en ressort une diminution de la rigidité du système avec l'élévation du degré de pollution de la barrière ($\sigma_s = 3$ à $50 \mu\text{S}$) pour enfin se rapprocher pratiquement de celle du système, acquise avec une barrière métallique aspergée de gouttes d'eau, quels que soient la distance inter électrode et le diamètre du plan (D_p) à la terre. Ceci permet de conclure qu'une barrière isolante en verre fortement et uniformément polluée se comporte pratiquement comme une barrière conductrice humidifiée et ou pulvérisée [3.18].

Les essais ont été effectués sur des écrans propres et secs puis pollués. Lors de cette investigation, l'influence des paramètres importants tels que la position, la largeur, le nombre d'écrans, le mode de répartition et le degré de pollution des écrans sur la performance du système a été mise en évidence.

Dans l'étude expérimentale effectuée par S. Louknane [3.19], celle-ci s'est

intéressée à l'effet de l'isolement de la barrière par rapport à la paroi de base du dispositif contenant celle-ci sur la tension disruptive de l'intervalle d'air d'un système pointe - plan mis sous tension alternative. Celle-ci a mené aux résultats essentiels suivants :

- En absence d'un écran isolant horizontal, la tension disruptive de l'espace d'air d'un système à écran isolant vertical croît avec la hauteur de son isolement par rapport à la terre jusqu'à une valeur limite, au-delà de laquelle, elle demeure constante quelle que soit la taille de la barrière. Cette limite est fonction de la largeur de l'écran considéré ;

- l'insertion d'une barrière isolante horizontale en contact simultanément avec la terre et le bord de l'écran isolant vertical permet la réduction de la taille du dispositif contenant le système à champ non uniforme tout en gardant la même tension de tenue de celui - ci, que celle obtenue lorsque la hauteur d'isolement de l'écran est supérieure à la valeur limite suscitée.

Le but visé à travers les investigations réalisées par S. Slimani [3.20], se rapportent à l'évolution de la tenue électrique des systèmes pointe - pointe et pointe-plan en fonction du nombre d'écrans y insérés, leur isolement et leur état de surface sous tension continue. Les résultats issus de cette analyse montrent qu'en atmosphère propre et sèche, l'isolement à deux écrans des systèmes pointe - pointe et pointe - plan est respectivement de 50 % et 19 % plus élevé qu'avec un seul.

Au - delà de cette valeur, aucune amélioration supplémentaire de leur tenue n'est décelée. Pour une conductivité faible de la solution polluante, recouvrant uniformément les deux écrans du système pointe-pointe, la valeur de sa tenue minimale se trouve réduite de plus de 50 % par rapport à celle acquise sous atmosphère propre, comme si ces écrans isolants pollués étaient devenus des barrières conductrices. L'isolement des deux barrières par un écran isolant solide, mis en contact entre elles et une paroi du système conductrice et mise à la terre, conduit économiquement à une réduction énorme de la taille du dispositif d'insertion et techniquement, sa tension de tenue électrique optimale reste la même que celle obtenue lors de leur isolement au moyen d'une couche d'air de cette même taille.

Le degré de contamination a aussi une influence sur la performance électrique en continu du système , ce chercheur a analysé l'effet du degré de contamination de la

barrière sur la tension continue positive d'amorçage du système pointe-pointe à un écran en faisant varier la conductivité électrique de la couche de pollution recouvrant uniformément la surface des barrières utilisées.

L'auteur [3.22] a prouvé que la tension disruptive du système avec une seule barrière uniformément polluée, diminue très rapidement en fonction de la conductivité électrique de la solution polluante, pour enfin atteindre une valeur minimale de l'ordre de 71kV pour une conductivité électrique comprise entre 15 et 20 mS/cm. A partir de cette limite, la valeur de la tension demeure constante indépendamment du degré de pollution plus élevé de la barrière.

L'objectif recherché à travers l'expérimentation menée par N. Yahiaoui et al [3.23] consiste en la quantification de la performance électrique d'un intervalle d'air pointe-pointe variable sous la protection d'une barrière en verre très fortement polluée et contrainte sous tension alternative.

Pour des intervalles d'air de longueur supérieure ou égale à 4 cm et inférieure à 16 cm, la protection du système pointe-pointe par une barrière isolante de taille comprise entre 10 et 40 cm et mise sous conditions de pollution très sévères s'avère très défavorable, car la tension disruptive d'un tel système est réduite à celle d'une pointe - plan, du fait du comportement électrique de la barrière isolante très fortement contaminée équivalent à celui d'une barrière métallique.

La disruption de l'espace d'air pointe-pointe avec une barrière uniformément et très fortement polluée et mise en contact avec la pointe sous tension alternative est régie pratiquement par une seule décharge, émanant de la pointe mise à la terre et évoluant dans l'air jusqu'au centre de la barrière fortement contaminée sans glissement sur les faces de celle-ci. La liaison de la décharge à l'autre pointe est assurée pratiquement par les lignes de courant connectant la tête de la décharge à l'autre pointe.

Belhoul [3.25] a étudié l'influence d'une barrière polluée sur la tension alternative disruptive dans un système pointe-pointe en fonction de la distance inter électrode et du degré de contamination.

En superposant les courbes de tension alternative disruptive du système pointe – barrière polluée–pointe à deux conductivités électriques différentes avec celle de la tension disruptive du système pointe–plan. Par conséquent, l'auteur confirme

l'existence d'une équivalence de performance électrique en alternative entre ces deux systèmes.

Belhoul [3.26] a aussi étudié la tension disruptive alternative du système pointe-barrière polluée -pointe en fonction du degré de pollution recouvrant totalement la barrière. IL en ressort que la performance en alternative du système à barrière uniformément polluée, diminue très rapidement en fonction de la conductivité électrique superficielle de celle-ci jusqu'à atteindre une valeur limite, à partir de laquelle sa valeur demeure constante et devient indépendante de la largeur de la barrière quel que soit le degré de sévérité de pollution supérieur ou égal à $5 \mu\text{S}$.

Même le mode de distribution de la pollution et la conductivité ont un effet sur la performance électrique. Bouatia [3.27] a étudié la tension alternative disruptive de l'intervalle d'air d'un système pointe-pointe en fonction de ces facteurs.

Il en résulte que la performance électrique en alternative d'un tel système croît avec la taille de l'intervalle d'air inter-barrières. Son minimum est atteint pour une valeur égale à 50 mS/cm de la conductivité volumique de la solution polluante, recouvrant uniformément toute la surface des deux barrières.

De plus il a constaté cette visualisation une seule décharge électrique évolue dans l'air compris entre les bords des deux barrières fortement contaminées.

3.4 Influence de la forme des électrodes sur le contournement des isolateurs

Dj.Ziani et al [3.28] ont étudié l'influence de la distance inter électrodes ainsi que la forme des électrodes sur la décharge électrique et analysé les caractéristiques électriques des décharges. Les systèmes d'électrodes utilisés sont les systèmes, pointe - plan, pointe -barre, plate-plate, sphère - sphère et barre – barre.

Cette étude a été menée en analysant les effets spécifiques des paramètres expérimentaux tels effet de la distance et de la forme des électrodes des modèles. Il devient ainsi évident qu'en présence de la surface du diélectrique, les facteurs qui peuvent influencer le développement des streamers notamment le champ appliqué, le taux net d'ionisation, les molécules et atomes impliqués ne sont pas les mêmes que ceux dans l'air. L'analyse de ses facteurs peut être effectuée en comparant les tensions de claquages en présence du diélectrique et en air. On a trouvé des résultats que la tension d'initiation, la tension de claquage est presque similaire en présence du

diélectrique "plexi glasse" avec ceux trouvé en présence uniquement de l'air dans le premier "cas de référence" et le deuxième et le troisième cas des modèles expérimentales. Cela est dû à l'influence de la forme des électrodes non uniformes sur les résultats effectuées.

Pour le quatrième et cinquième cas on a trouvé des résultats qui montrent que la tension d'initiation, et la tension de claquage en présence du diélectrique "plexi glass" est nettement supérieures avec ceux trouvé en présence uniquement l'air. Cela s'explique que la forme des électrodes est uniforme en plus la présence du diélectrique avait aussi un effet sur les résultats, on peut dire que la forme des électrodes a influencé les résultats des deux premiers modèles expérimentales.

Ils ont vu aussi des décharges glissantes "surfaiques" se propagent sur la surface du diélectrique en forme des multiples canaux, cette décharge arborescence complexe et diversifiés, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible définir une proportion de l'arc qui se propage dans l'air et sur le diélectrique en plexi glass. Enfin Le contournement est précédé d'une phase de pré-claquage durant laquelle différents phénomènes peuvent prendre naissance. Cette phase de pré-claquage est elle-même constituée de deux phases : une phase de génération et une phase de propagation.

3.5 Conclusion

A partir des travaux qui ont été effectués dans le but de trouver une équivalence de performance électrique des deux systèmes plan-plan et pointes-pointes les chercheurs ont abouti à ce qui suit :

La caractérisation de la largeur effective des décharges électriques parallèles évoluant indépendamment, sur une surface isolante uniformément polluée, mise sous contrainte de tension continue à polarité variable ont mené aux conclusions essentielles suivantes :

Une équivalence électrique entre les systèmes multi-pointes-pointes et plan-plan a été obtenue pour les deux polarités positive et négative.

La protection de l'intervalle d'air d'un système pointe-pointe avec une seule barrière sous conditions de pollution très sévères et sous tension alternative est très défavorable et par conséquent l'ajout d'une deuxième barrière de protection à ce système est impératif [3.31].

Chapitre 04

ÉQUIVALENCE ÉLECTRIQUE ENTRE LES SYSTÈMES PLAN-PLAN ET MULTI PONTES-POINTES

4.1 Introduction

Dans ce chapitre et pour les besoins de nos investigations, plusieurs séries de tests ont été effectuées au laboratoire de Génie Electrique, à l'université A. MIRA Bejaia. Ils concernent la mesure de la tension de contournement et la visualisation du développement de la décharge électrique sur une surface isolante recouverte de solution polluante variable.

Nous allons dans un premier temps décrire l'équipement de test et de mesure, la cellule de tests et les électrodes sur les quelles sera déposé. Nous expliquerons ensuite la stratégie d'essais appliquée. Puis, nous détaillerons avec des Tableaux et des Figures l'influence de la distance inter électrodes ainsi que la sévérité du degré de sa contamination, et la géométrie des divers systèmes d'électrodes (plan-plan, pointes-plan et multi pointes-pointes) déposées sur une surface isolante. Une liaison entre ces résultats et le rôle joué par le nombre de décharges électriques parallèles et indépendantes évoluant sur sa surface jusqu'au contournement du matériau et leur conséquence sur sa performance électrique.

Nous exposerons par la suite des photos obtenue par la défragmentation des séquencés vidéo pendant les mesures de la décharges puis l'analyse des caractéristiques électriques des décharges se développant prochainement.

4.2 Banc d'essai et de visualisation

Pour réussir l'étude de tension de contournement et du développement des arcs électriques sur une surface isolante polluée en tenant compte des différentes contraintes telles que les limitations de la source (courant, tension), les conditions

atmosphériques (pression, température, humidité), et les normes imposées.

Le banc d'essai AC, utilisé dans cette étude (Figure 4.1), consiste en un transformateur haute tension (HVT) ayant une tension secondaire maximale de 135 kV [4.1]. Une unité de contrôle (CU) pour le contrôle automatique ou manuel de la rampe de vitesse.

Un voltmètre de crête numérique (V_{CR}) connecté au bras basse tension d'un diviseur capacitif (C_1, C_2) a été utilisé pour mesurer la tension de contournement. Une résistance de protection (R_1) d'environ 106 k Ω a été connectée en série avec l'objet à tester (T_0).

Un système de caméra vidéo (VCS) a ensuite été utilisé pour visualiser et enregistrer le développement des décharges électriques le long de la surface polluée depuis le début jusqu'au contournement.

Le banc de test AC se compose de :

- un circuit d'alimentation (transformateur HT 0,08 A, 135 kV ; 8 kVA) ;
- un dispositif de mesure de la tension de contournement et du courant de fuite ;
- une cellule de test contenant le modèle expérimental souhaité ;
- Un système audio-visuel ;
- Un transformateur de test dont le primaire est relié à l'autotransformateur intégré dans CU et qui permet d'ajuster la tension à la valeur désirée. Cette tension varie de 0 à 135 kV.

La tension d'essai est mesurée à l'aide d'un diviseur de tension capacitif, composé d'un condensateur haute tension en série avec le condensateur basse tension, de la résistance du câble coaxial et des résistances d'entrée des appareils de mesure, ce qui permet de réduire de 1/404 la tension réelle tension appliquée en tension alternative.

Le voltmètre (V_{CR}) est utilisé pour afficher la tension. Il a les caractéristiques alternatives suivantes [4.2] :

- Haute tension maximale mesurable en AC $U_{moy} = 700$ kV ;
- Tension de mesure maximale sans diviseur $\hat{U} = 1000$ V ;
- Erreur $\pm 1\%$ de la valeur mesurée ; Plage de mesure 20 V $\geq U_{crete} \geq 1000$ V
- Fréquence de tension de mesure 20 Hz $\geq f \geq 1000$ Hz ;

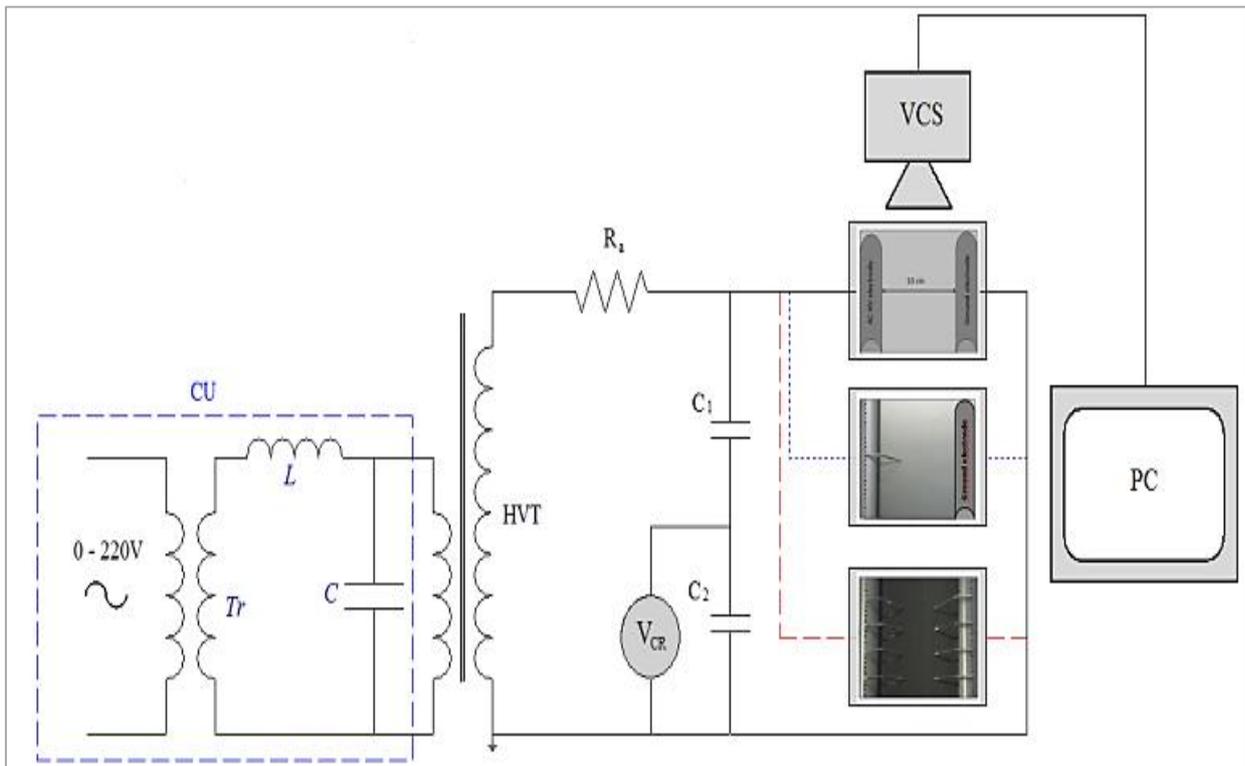


Figure 4.1 Banc de mesure de tension de contournement

4.3 Matériau isolant

Afin de pouvoir réaliser nos essais ; nous avons utilisé un modèle expérimental, composé d'une surface isolante sur laquelle repose un système d'électrodes de géométrie différentes (Figure 4.2).

Le matériau isolant choisi dans le cadre de cette étude est une plaque en verre rectangulaire de dimensions $20 \text{ cm} \times 32 \text{ cm} \times 0,6 \text{ cm}$. La largeur de la bande de pollution appliquée sur celui-ci varie entre 4 et 32 cm (Figure 4.2).

Le choix d'une plaque isolante est justifié par la bonne visualisation des arcs le long de la surface de la plaque, la facilité d'application de la pollution et du nettoyage de celle-ci.

La composition d'un isolant en verre dépend des propriétés recherchées. Il est fabriqué en fondant dans des creusets chauffés au rouge vif à une température 900°C ; un mélange de sable, de chaux et de carbonate de sodium.

Le liquide, peu fluide, est coulé dans des moules en acier ayant en creux la forme des isolateurs. Chimiquement, le verre est un mélange de silicate alcalin et de calcium ou de plomb [4.3].

Tableau 4.1 Caractéristiques du verre [4.3]

Caractéristiques	Valeur
Résistance diélectrique	50 à 100 kV/mm et 0,5 jusqu'à 1 kV/mm à 400°C
Permittivité relative	5 à 8
Résistivité à 20°C	10^{10} à 10^{16} $\Omega \cdot \text{cm}$

4.4 Systèmes d'électrodes

Le modèle expérimental utilisé dans cette étude est illustré à la figure 4.2, composé de trois arrangements de systèmes d'électrodes différents. Le premier est un système d'électrodes plan-plan (Figure 4.2 (a)). Le second est un système pointe-plan (Figure 4.2 (b)) et le dernier est un système multi pointes-pointes (Figure 4.2 (c)). Dans tous ces systèmes de test, les électrodes sont constituées en fer.

La pointe d'électrodes est cylindrique, d'un diamètre d'environ 7,5 mm et d'une longueur de 25 cm, terminée par une pointe conique ayant un angle de 60° et un rayon de courbure égal à 0,4 mm. L'électrode est fixée sur l'un des trous le long du tube en polychlorure de vinyle (PVC) de 40 cm de long et 4 cm de diamètre, comme illustré à la figure (4.2). Les électrodes planes ont la forme d'un demi-cylindre de 4 cm de diamètre et sont de longueurs différentes. La distance inter-électrodes (L_f) est maintenue constante pendant tous les essais et est égale à 10 cm. Dans le cas du système multi électrodes pointes-pointes la distance séparant deux pointes adjacentes (l_{pp}) varie en fonction du nombre de pointes déposées de part et d'autre de la surface.



(a) Plan-Plan

(b) Pointe-Plan

(c) Pointes-Pointes

Figure 4.2 Différentes configurations d'électrodes et échantillons

4.5 Solution polluante

La solution utilisée comprend de l'eau distillée et une quantité du chlorure de sodium (NaCl). La conductivité électrique désirée est obtenue en ajoutant une quantité bien déterminée de sel à la solution considérée. Sa valeur est mesurée à l'aide d'un conductimètre à sonde mobile (figure 4.3). Les valeurs utilisées dans cette étude s'étalent entre 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 10 mS/cm . Le choix de cet intervalle de la conductivité volumique a été fait de telle sorte que le courant maximal délivré par la source AC ne puisse pas être dépassé. Cette décision a été prise à la suite de plusieurs essais préliminaires. L'application du dépôt sur la surface isolante est réalisée à l'aide d'une ponce, La solution doit être toujours agitée avant son application sur l'isolation.

Le choix de la méthode de la pollution artificielle présentant plusieurs avantages tels que le gain de temps, la maîtrise de la technique de pollution [4.4].

Les principaux caractéristiques do kaolin [4.4] sont décrits dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 Caractéristiques du kaolin

Matière inerte	Composition en poids %				Granulométrie (μm) (Distribution cumulée)			Conductivité Volumique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	H ₂ O	16%	50%	84%	
Kaolin	40-50	30-40	0,3-2	7-14	0,1-0,2	0,4-1	2-10	15 - 200



Figure 4.3 Appareil de mesure de conductivité volumique (Conductimètre)

4.6 Correction des valeurs de tension de contournement

Pour chaque paramètre d'influence, une série de 25 essais a été réalisée et la valeur retenue est la moyenne arithmétique du nombre de mesures effectuées dans les mêmes conditions. La dispersion affectant la mesure de la tension de contournement du verre peut être due surtout à la technique d'application du dépôt polluant sur celui-ci.

Du fait de la bonne répétitivité de la méthode employée dans cette étude, l'écart maximal entre chaque valeur des 25 tests et la moyenne du nombre de déterminations ne dépasse pas 5 cm. Avant chaque nouvel essai, l'échantillon est nettoyé et rincé avec de l'eau distillée puis séché à l'aide de papier absorbant [4.5]. En effet nous avons remarqué une différence entre les résultats d'une même série de 25 essais, ce qui exige, de tout ramener aux conditions normales de la température, de la pression et de l'humidité ($\theta_0 = 20^\circ\text{C}$, $P_0 = 100 \text{ kPa}$, $H_0 = 11 \text{ g/m}^3$) [4.5].

L'équation de correction est de la forme :

$$U_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \quad (4.1)$$

$$U = \frac{K_h}{K_d} U_m \quad (4.2)$$

$$K_d = \frac{P}{100} \cdot \frac{(273 + 20)}{(273 + \theta)} = \frac{2,93P}{(273 + \theta)} \quad (4.3)$$

Avec :

U_m : tension de contournement mesurée à la température θ , à la pression P et à l'humidité H .

U : tension de contournement ramenée aux conditions normales de température θ_0 , de pression P_0 et d'humidité H_0 .

K_d : facteur de correction relatif à la température θ et à la pression P ;

Avec :

P en kPa, et θ en $^\circ\text{C}$,

K_h : facteur de correction relatif à l'humidité.

Pour déterminer le facteur de correction relatif K_h ; une transformation de l'humidité relative H_r (%) vers l'humidité absolue H (g/m^3), est nécessaire, car le facteur K_h est donné en fonction de cette dernière. L'abaque de la figure (4.4), donne la transformation de l'humidité relative en humidité absolue, en fonction de la température. Pour déduire ce facteur, la valeur de l'humidité absolue lue sur l'abaque de la figure 4.4a est reportée sur l'abaque de la figure 4.4b [4.6].

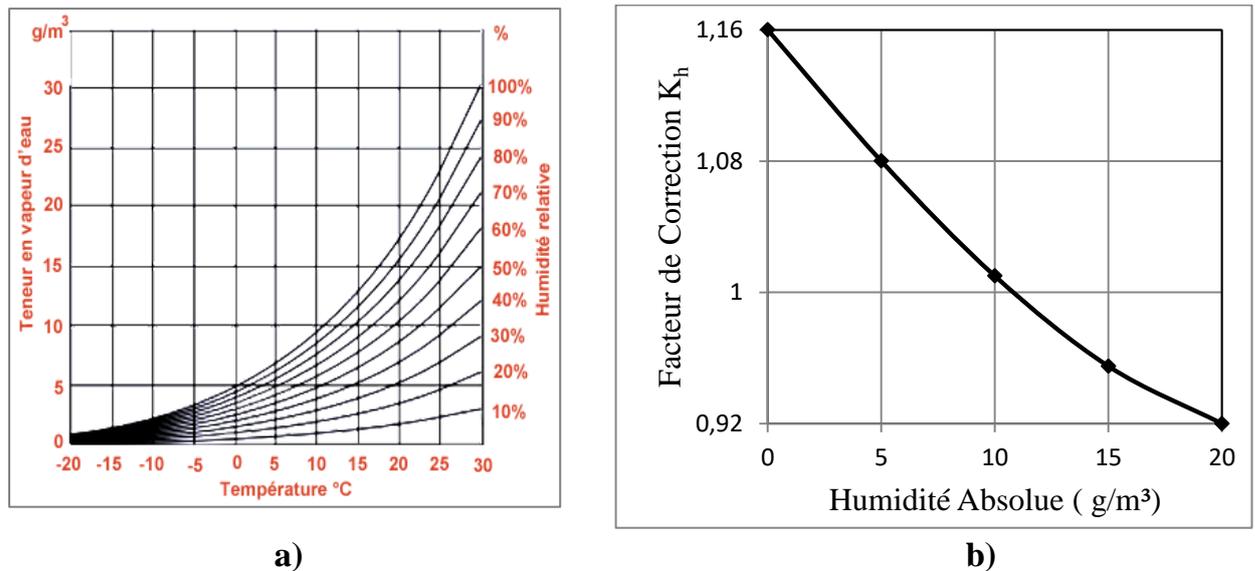


Figure. 4.4 Facteurs de correction

4.7 Résultats et discussions

Dans cette partie, nous avons caractérisé le nombre de décharges évoluant en parallèle sur une surface isolant propre puis uniformément polluée et de largeur variable, délimitée par une configuration d'électrodes à géométrie distincte. On a observé à la fois à partir de l'expérience en service et des essais en laboratoire que la tension de contournement dépend alors fortement du diamètre, quel que soit le profil. Pour une conductivité donnée, on pourrait penser que la tension de contournement diminuerait indéfiniment avec l'augmentation du diamètre de l'isolant, car la résistance globale, qui limite le courant d'arc, diminuerait également de manière similaire et, par conséquent, la ligne de fuite (L_f) requise pour tout profil doit être augmentée.

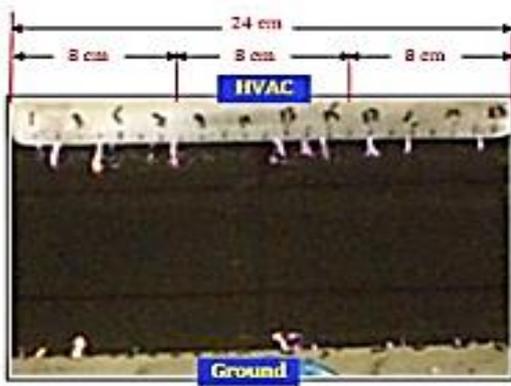
Cependant, une augmentation du diamètre ne réduit pas la tension de contournement de manière correspondante. Cela peut être dû au fait que plus d'un arc peut s'initier sur une seule bande sèche, provoquant une chute de tension d'électrode plus élevée qui compense partiellement la diminution de la tension de contournement.

4.7.1 Contournement d'un isolateur plan avec une pollution uniforme

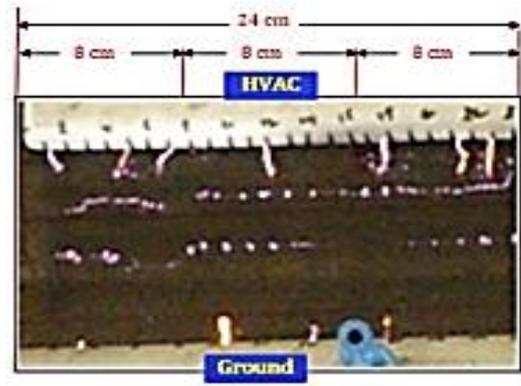
La figure 4.5 montre les différentes étapes de contournement d'un isolateur plan avec une pollution uniforme et une conductivité de surface égale à $\sigma_{vl} = 10 \text{ mS/cm}$. Le processus de contournement de la pollution peut être décrit essentiellement comme suit :

- (i) Premièrement, de nombreux arcs parallèles se produisent simultanément aux électrodes haute tension et de masse, sur la zone polluée de l'isolant (Figure 4.5(a)).
- (ii) Dans la deuxième phase, après un certain délai, les multiples arcs partiels parallèles émanant des électrodes s'allongent les uns vers les autres et deviennent plus longs (Figure 4.5(b)). Dans ce cas, chacun d'eux peut être transformé en arc ;
- (iii) Ensuite, ces décharges progressent de telle manière que leur nombre diminue avec leur allongement. Les petits arcs s'éteignent pour alimenter certaines décharges qui peuvent être considérées comme des arcs principaux. Ces dernières deviennent plus épaisses et gagnent plus d'énergie chaque fois que le champ électrique augmente (Figure 4.5(c)) ;
- (iv) A ce stade, les décharges principales progressent à nouveau et occupent des longueurs croissantes. (Figure 4.5(d)),
- (v) Enfin, dès qu'ils atteignent leur longueur critique, leur nombre se réduit à une seule décharge et un contournement complet de la zone polluée de l'isolant (Figure 4.5(e)).

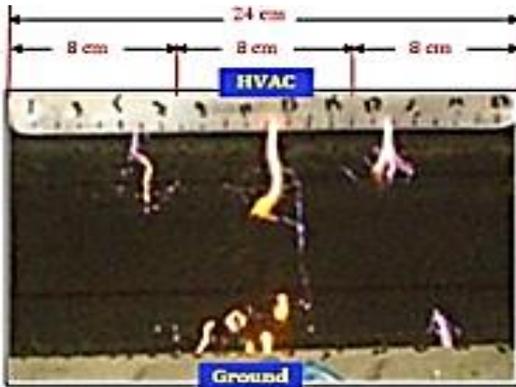
Nous constatons également qu'à partir d'un certain niveau de tension, toute augmentation de celle est accompagnée par un bruit qui croit de manière conséquente jusqu'au contournement de l'isolateur. Ce bruit est généralement attribué à l'effet de couronne qui est une phase initiale du contournement. Nous avons aussi constaté une évaporation progressive de la couche de pollution, qui augmente proportionnellement avec la conductivité. Cette évaporation peut être expliquée par l'augmentation de la densité de courant à la surface du plan proportionnellement à la conductivité générant un dégagement de chaleur important par effet joule.



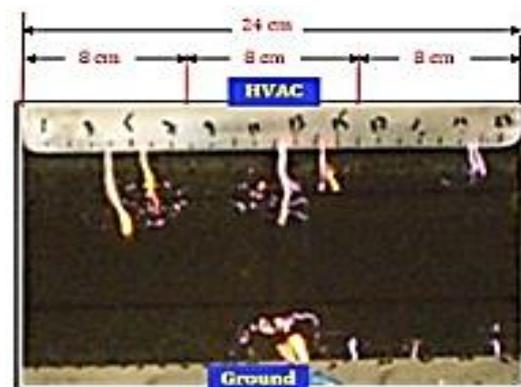
(a) Naissance d'arcs parallèles partiels



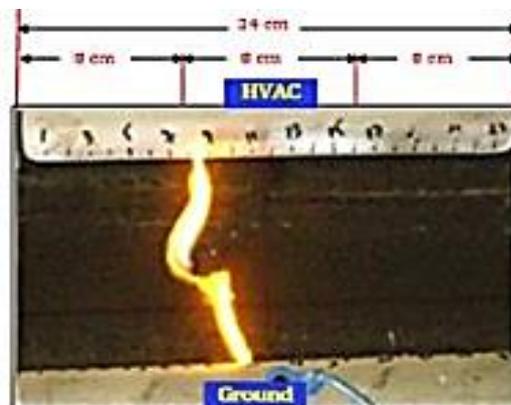
(b) Allongement des arcs



(c) Alimentation des quelques décharges



(d) Progression des décharges principales



(e) Contournement final de surface

Figure 4.5 Processus de contournement ($L=240$ mm)

Enfin un des phénomènes remarquables sur la surface du modèle est l'apparition de décharges parallèles ainsi que d'arcs à cause de l'assèchement de certaines zones du plan, ces décharges sont dues à l'augmentation du champ électrique qui atteint la valeur critique dans les contours secs et court-circuite les micro-capacités formés par ces zones sèches.

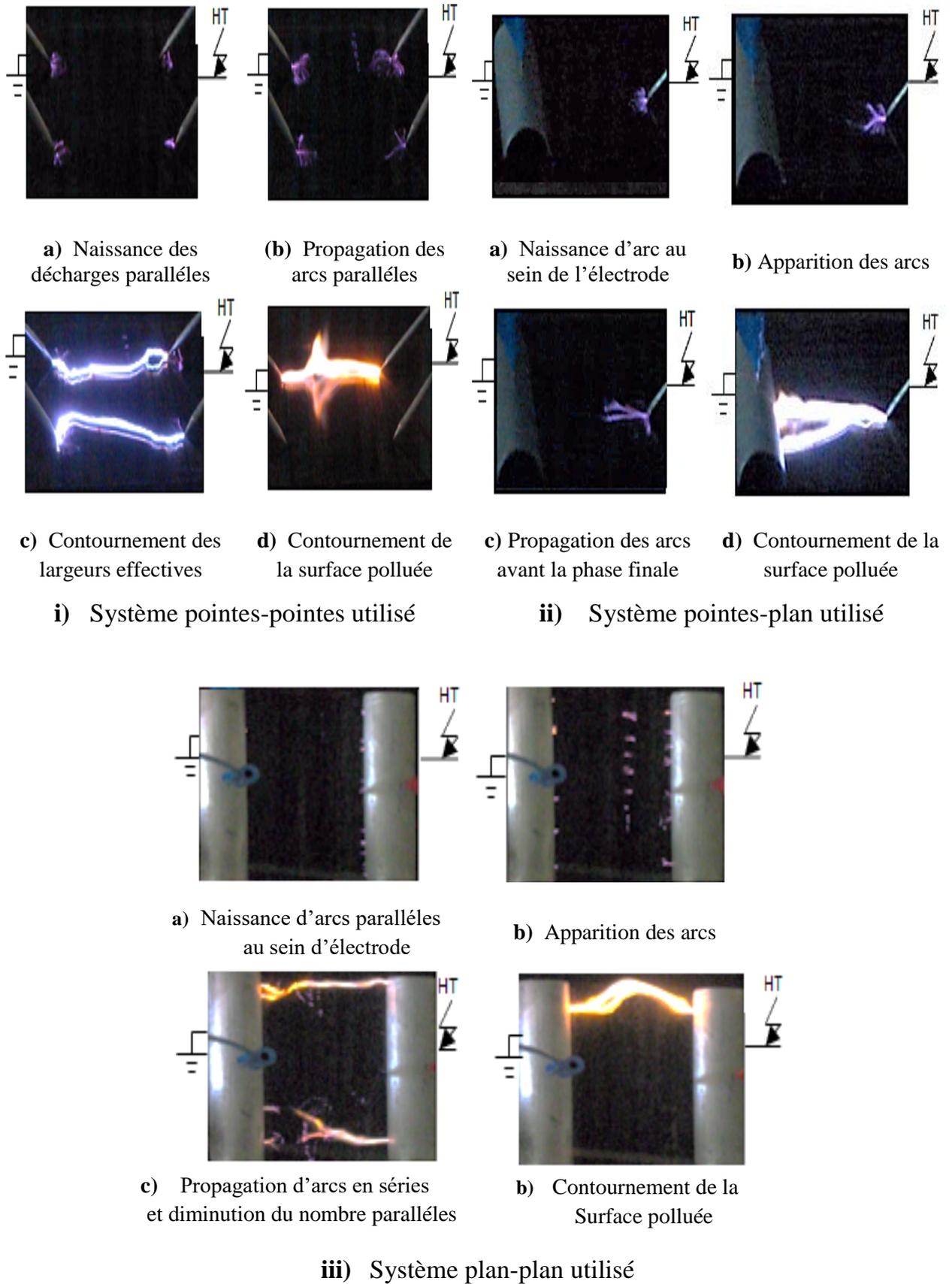


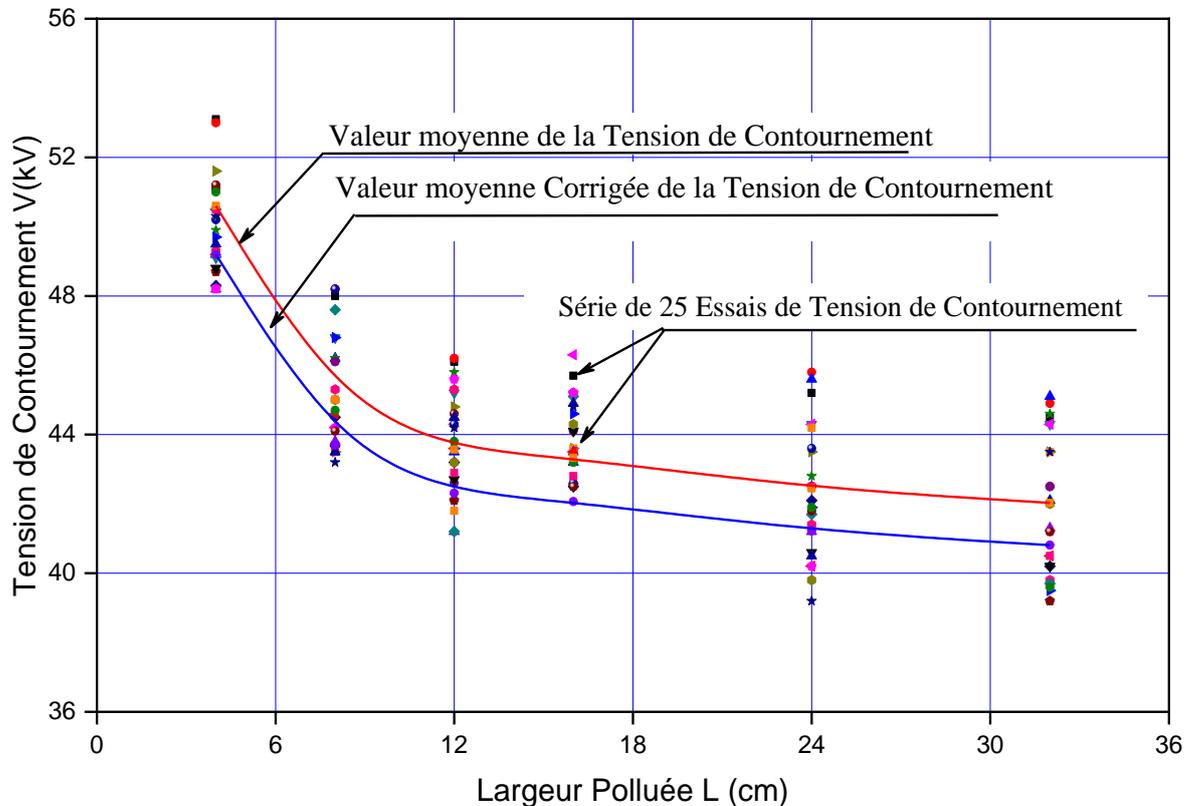
Figure 4.6 Différentes phases de développement des décharges électriques

4.7.2 Effet de largeur polluée sur la valeur de tension de contournement

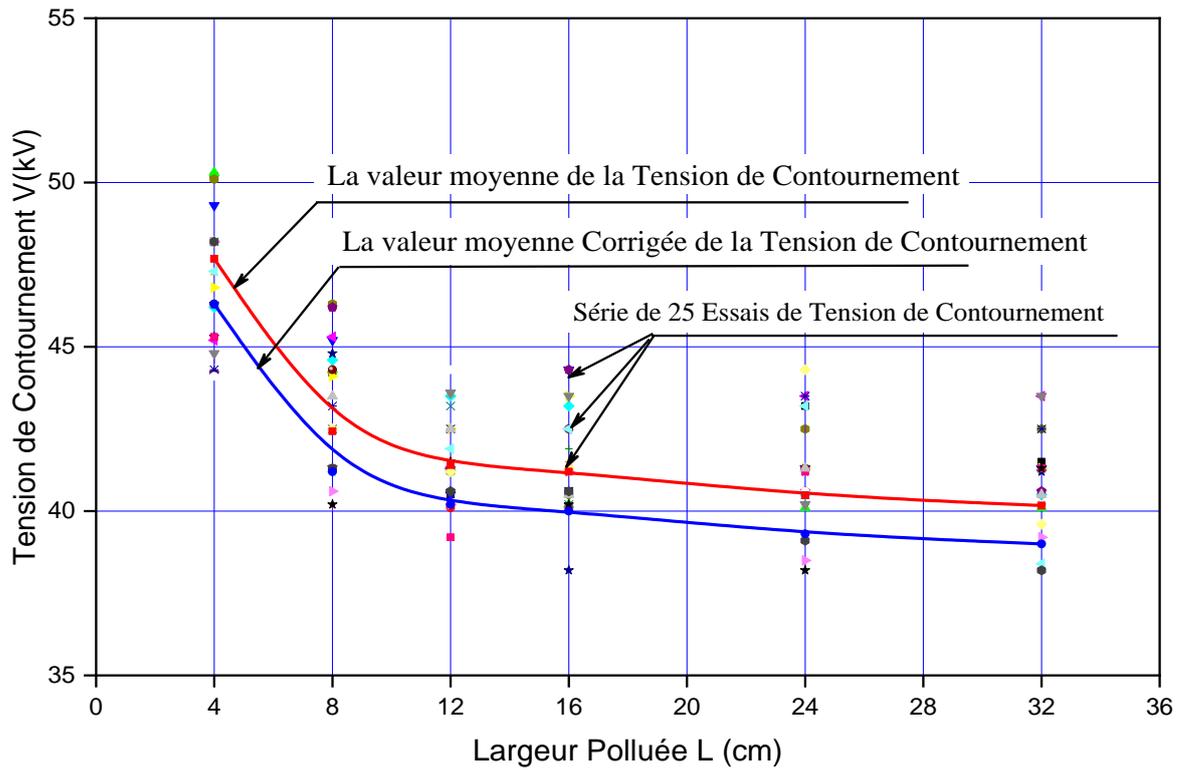
La figure 4.7 illustre la relation entre la tension de contournement et la largeur polluée L pour une conductivité égale à 0,017, 1 et 10 mS/cm respectivement en utilisant un système d'électrodes pointes-pointes.

Comme mentionné précédemment, pour chaque degré de sévérité de la pollution, 25 essais ont été réalisés. La tension de contournement choisie est la valeur moyenne calculée pour chaque série d'essais (Figure 4.7 (a, b et c), graphique rouge). Lors des essais en laboratoire, la dispersion maximale (écarts) affectant la mesure de la tension de contournement entre chaque valeur des 25 essais et la valeur moyenne est dans une marge de 5 %.

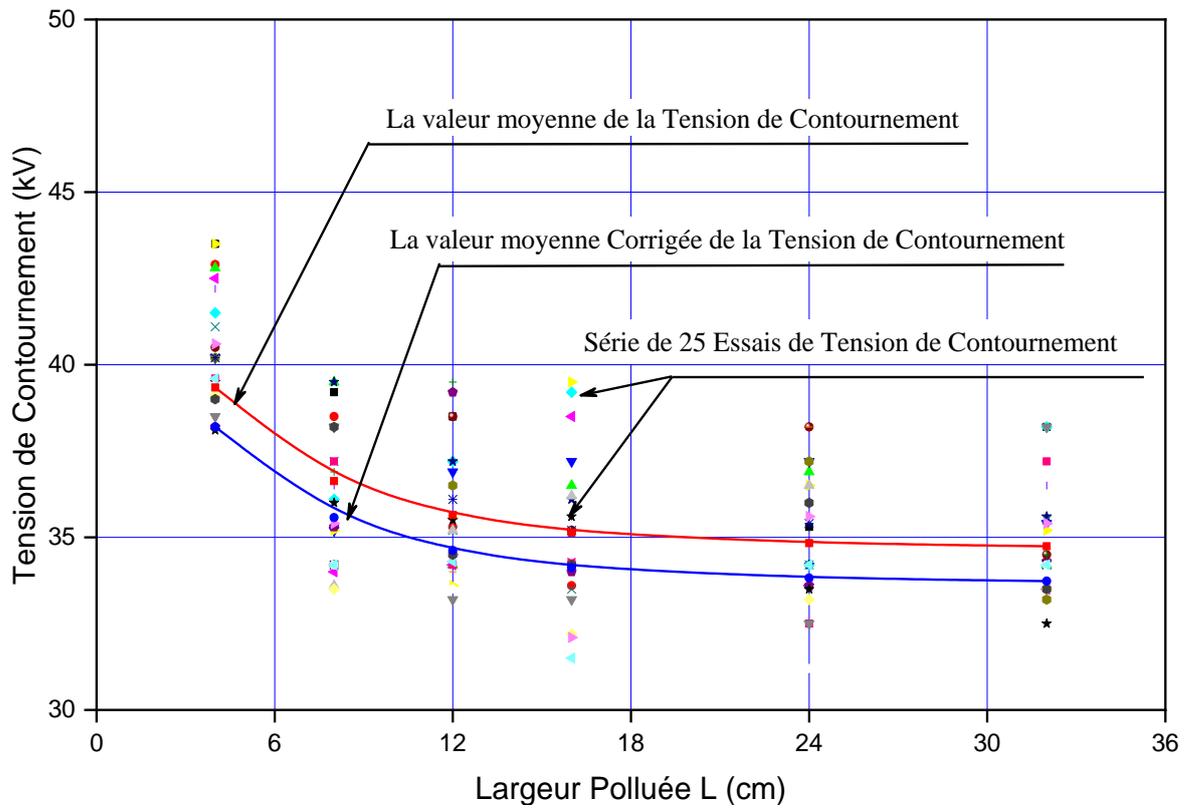
De plus, pour chaque valeur moyenne calculée, en appliquant des facteurs de correction, une tension de contournement mesurée dans des conditions d'essai données (température T , pression P , humidité H) est convertie en valeur équivalente dans les conditions atmosphériques de référence standard ($T_0 = 20^\circ\text{C}$, $P_0 = 101,3\text{kPa}$, $H_0 = 11\text{g/m}^3$) [4.8-4.10]. comme recommandé par les normes internationales existantes (Figure 4.7 (a, b et c), graphe bleu).



a) $\sigma_v = 0,017$ mS/cm



b) $\sigma_v = 1 \text{ mS/cm}$



c) $\sigma_v = 10 \text{ mS/cm}$

Figure 4.7 Variation de tension de contournement en fonction de la largeur polluée

Nous pouvons constater que la tension de contournement diminue en fonction de la largeur de la bande polluante pour les valeurs inférieures à une certaine limite égale dans ce cas à 8 cm, et reste pratiquement constante au-delà de cette limite. Cette dernière, caractérisant une largeur effective, correspond également à la distance minimale (L_{eff}) séparant deux arcs électriques critiques parallèles en phase de développement indépendante. Au-delà de cette largeur effective ce paramètre n'a aucune influence sur la valeur de la tension de contournement comme il est montré sur la figure 4.8. Les décharges électriques parallèles peuvent se développer de façon indépendante à partir des deux électrodes et dans ce cas, chacune d'entre elles peut se transformer en arc.

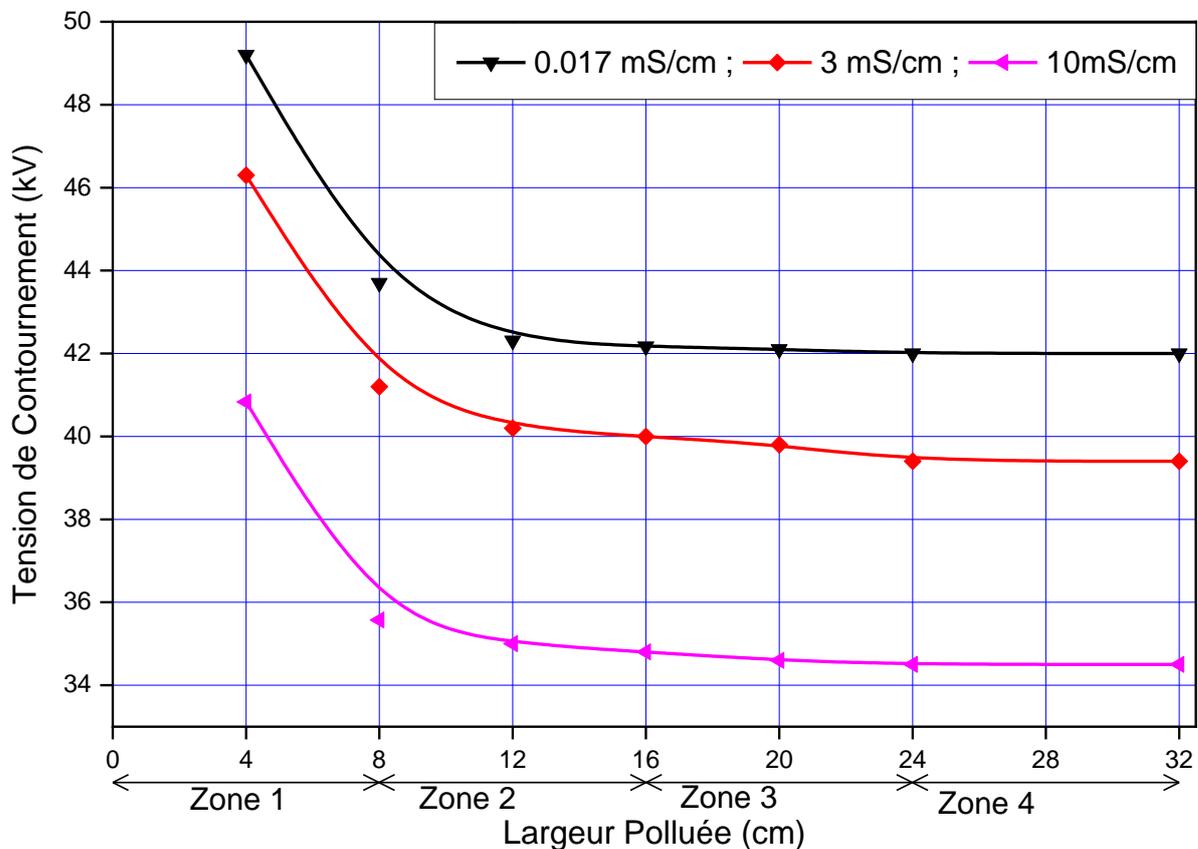


Figure 4.8 Caractérisation de la largeur effective

4.7.3 Conductivité volumique de la solution polluante

Comme mentionné précédemment, les travaux portent sur le comportement des décharges parallèles développées sur le modèle plan pollué pendant le processus de contournement et sur la largeur critique de décharge juste avant le

contournement de l'isolateur. Une couche uniformément déposée avec différentes conductivités et largeurs recouvre l'isolant. On même temps, obtenir une équivalence entre les configurations multi pointes-pointes et plan-plan. Pour comprendre clairement le mécanisme de contournement depuis le début de phénomène de décharge jusqu'à l'arc électrique final, il est nécessaire de considérer à la fois les paramètres importants à savoir la bande passante et le nombre de décharges parallèles.

Pour cela, nous avons choisi deux valeurs de conductivité de la solution de pollution. Le premier est pris égal à $\sigma_{v1} = 17 \mu\text{S/cm}$ et le second est égal à $\sigma_{v2} = 10 \text{ mS/cm}$. La longueur de la ligne de fuite est maintenue constante et vaut $L_f = 10 \text{ cm}$ pour les 3 configurations étudiées. La figure 4.9 montre un schéma de la procédure expérimentale suivie dans cette étude. En effet, la distance séparant deux électrodes successives est variée manuellement en déplaçant chacune des électrodes d'une position à une autre selon la distance souhaitée.

La construction de l'équation empirique liant la taille de l'arc critique et le nombre de zones sèches en série court-circuitées par cet arc à sa largeur efficace est basée sur celle établie en tension alternative par Erler [4.11] et les deux précédentes méthodes. Celle-ci peut être formulée comme suit :

$$L_{eff} = \frac{3}{n} L_c \quad (4.4)$$

Avec :

L_{eff} : distance entre deux arcs parallèles consécutifs (cm) ;

L_c : longueur critique de l'arc (cm) ;

n : nombre de zones sèches connectées en série ;

L'équation empirique trouvée par Erler [4.11] a pour relation :

$$L_{eff} = \frac{3}{n} L_c = \frac{3 L_f}{2n} \quad (4.5)$$

Où :

$$L_c = \frac{L_f}{2} \quad (4.6)$$

L_f : ligne de fuite de l'isolant (cm) ;

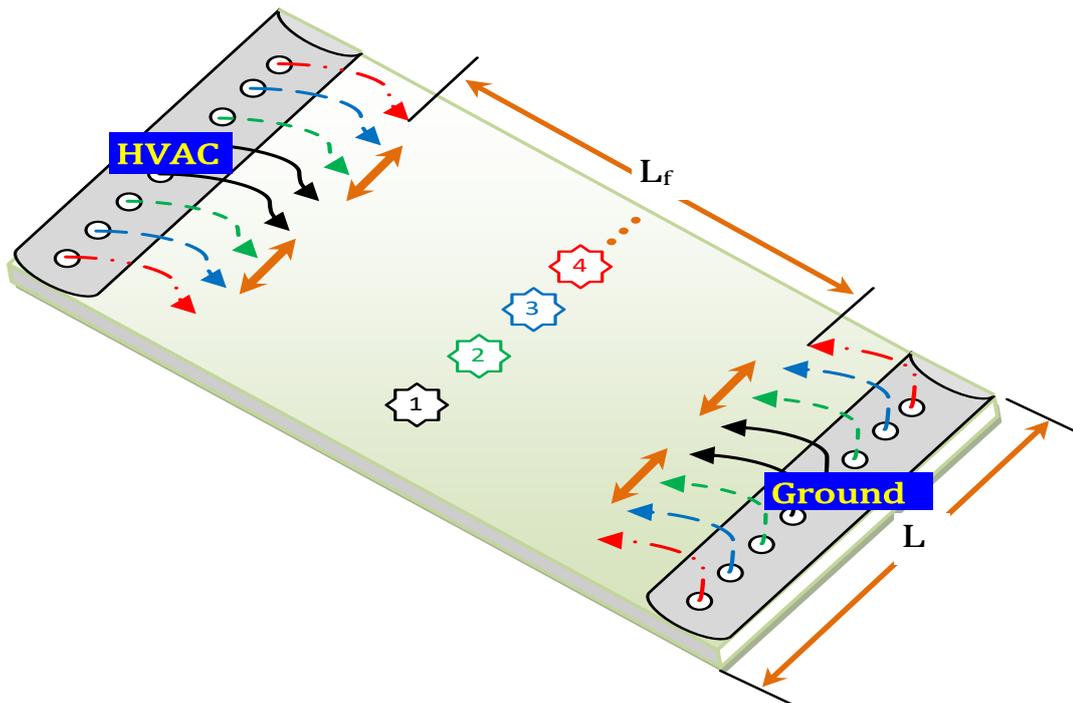


Figure 4.9 Distance entre deux électrodes successives

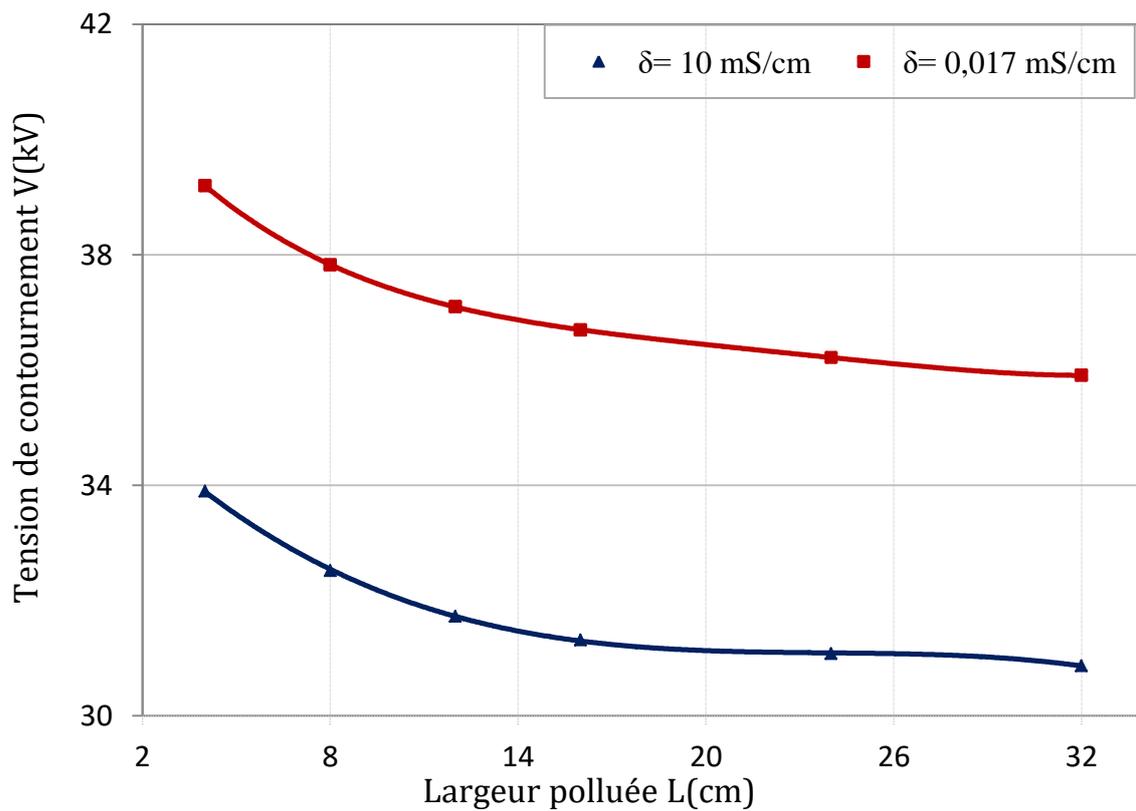


Figure 4.10 Tension de contournement en fonction de la largeur polluée (Configuration Plan-Plan)

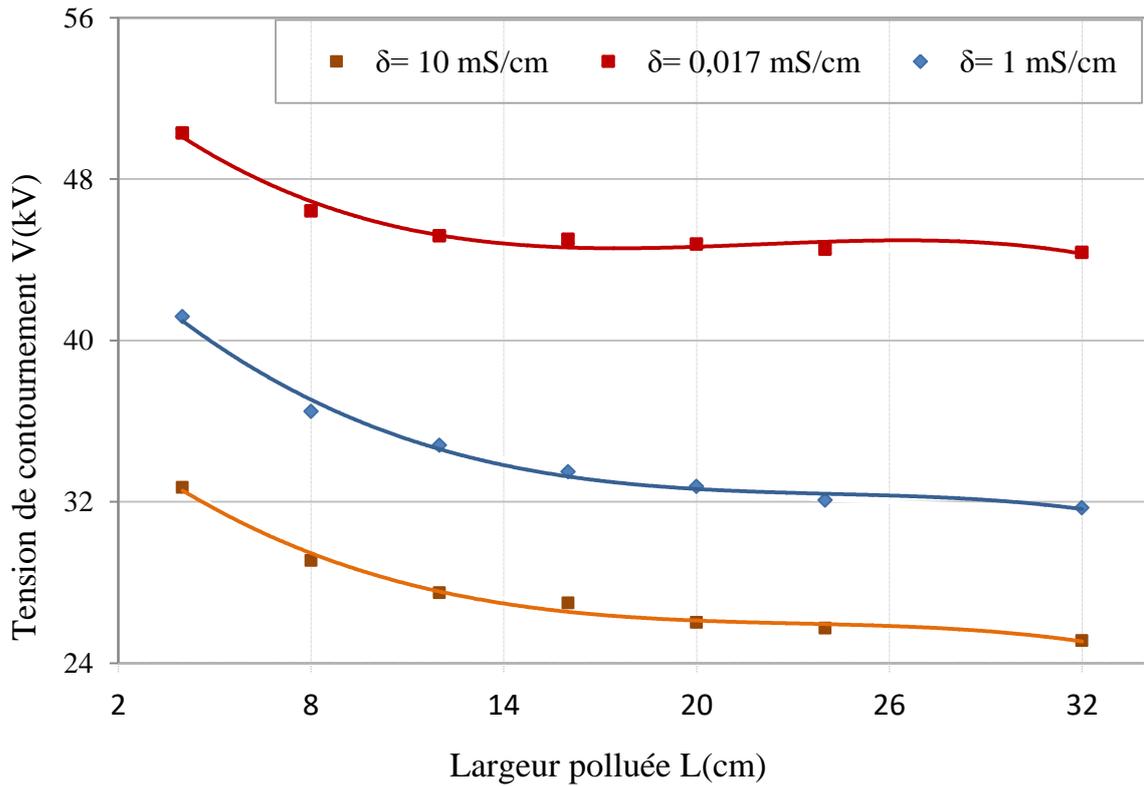


Figure 4.11 Tension de contournement en fonction de la largeur polluée (Configuration 4points-4pointes)

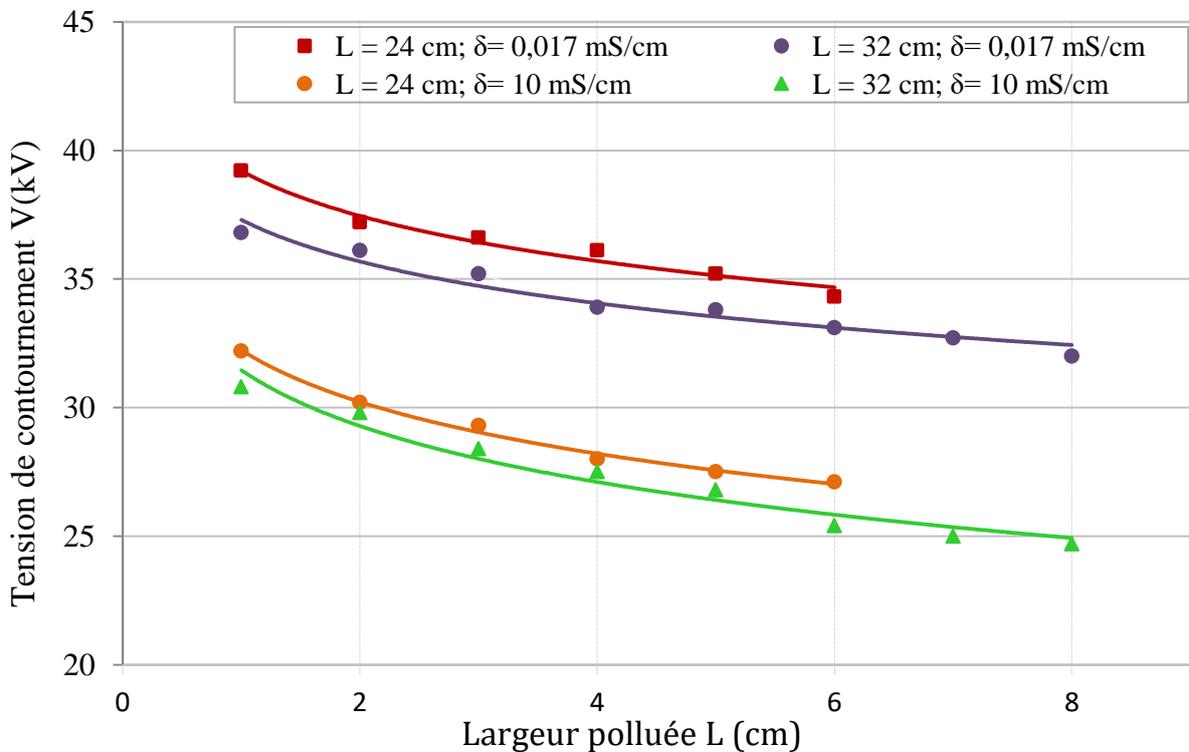


Figure 4.12 Tension de contournement en fonction de la largeur polluée (Configuration 4Points-4Points)

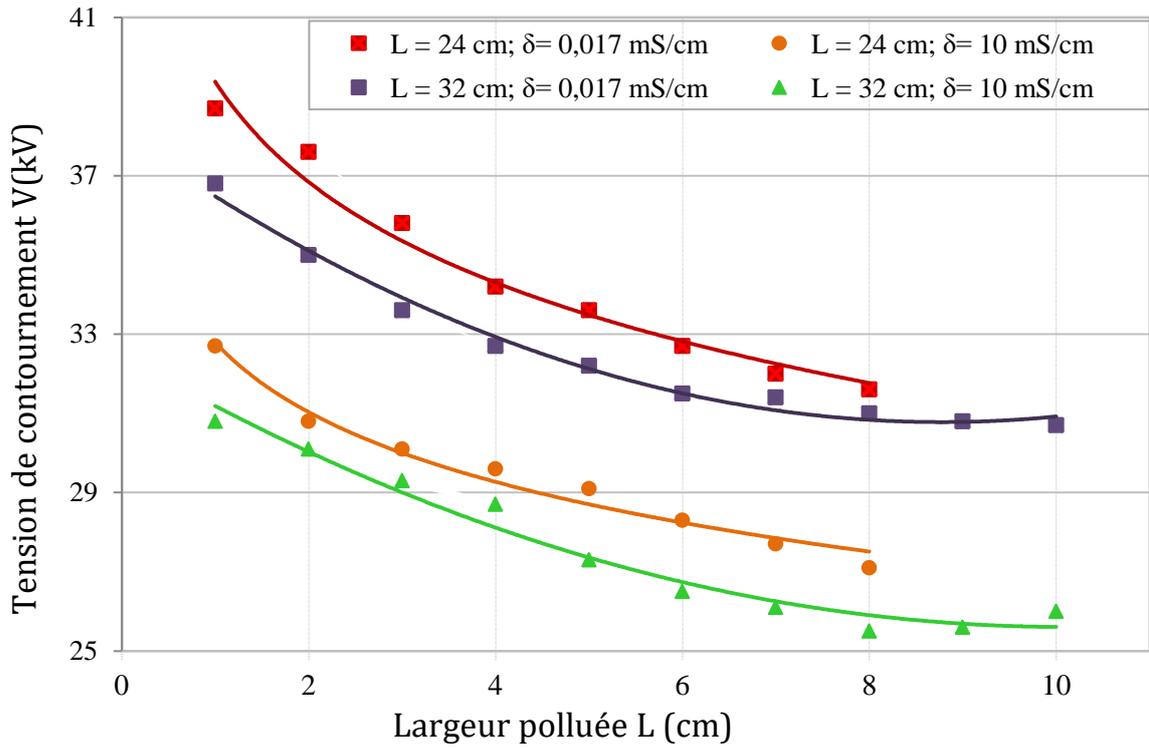


Figure 4.13 Tension de contournement en fonction de la largeur polluée
(Configuration 3points-3pointes)

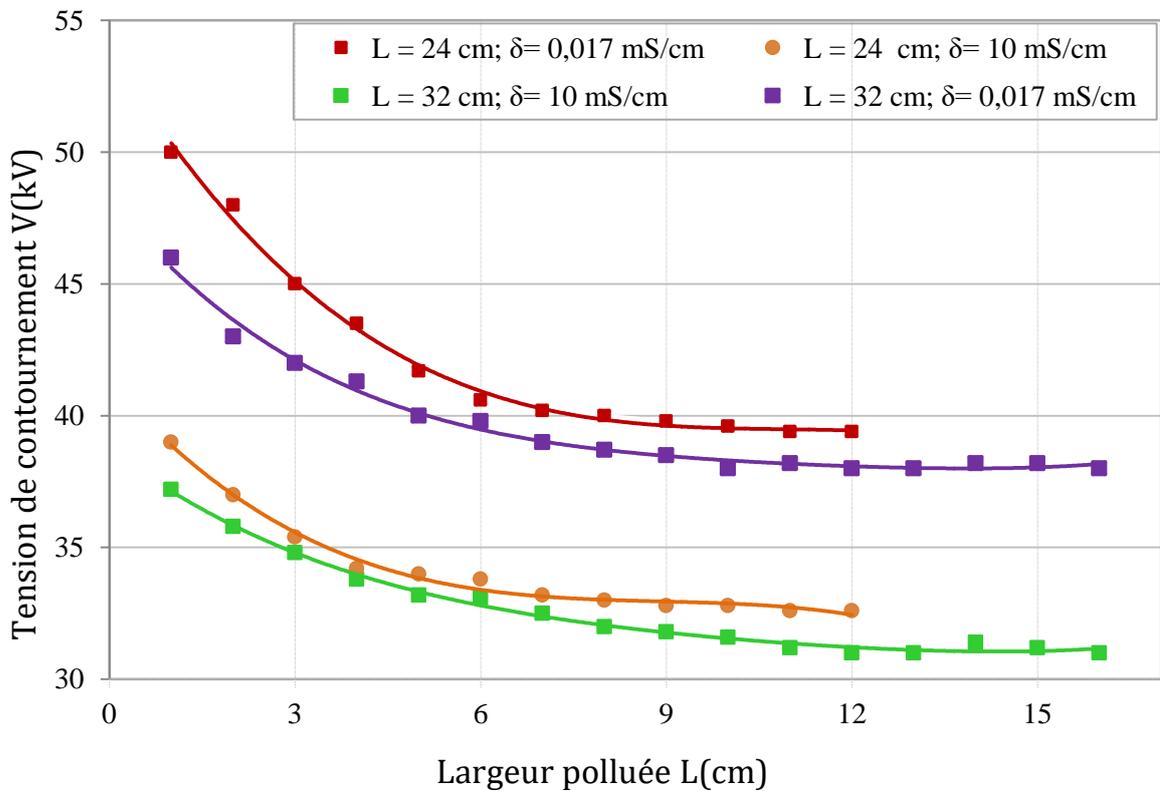


Figure 4.14 Tension de contournement en fonction de la largeur polluée
(Configuration 2pointes-2pointes)

Comme on peut le voir, la forme générale des quatre courbes est similaire. Dans l'intervalle allant de la faible largeur de bande jusqu'à la largeur de bande maximale autorisée (6 cm pour l'échantillon "A" et 8 cm pour l'échantillon "B"), la tension de contournement mesurée chute rapidement. Cette tendance est également observée lorsque le nombre des électrodes dans la cellule de test est réduit à trois (Figure 4.7) à la différence que dans la plage de largeur de bande de 8 cm à 10 cm, il y a une indication d'une région relativement plate pour le cas de l'échantillon "B" qui n'est pas très clair. L'aplatissement qui, en fait, s'est produit sur l'échantillon "B" n'existe pas du tout sur l'échantillon "A". Cela est dû à la limitation de ses dimensions.

Une image similaire est obtenue avec un système d'électrodes constitué de seulement deux électrodes. Les résultats mesurés sont tracés sur la figure 4.7(c). Comme on peut le voir sur la figure, il y a une tendance à diminuer la tension de contournement avec la bande polluée de 1 cm jusqu'à une limite de 8 cm.

Cependant, l'augmentation de la largeur polluée au-delà de cette limite jusqu'à 16 cm n'entraîne pas de changement de tension de contournement significatif et la forme des courbes montre une région relativement plate dans cette plage. En (4.7) peut être utilisé pour déterminer le pourcentage de variation de la tension d'amorçage mesurée lorsque la distance entre deux électrodes successives varie de 1 cm à 16 cm.

$$\delta V_V \% = \frac{V_i - V_{i+1}}{V_i} \cdot 100, \quad i = 1, k \quad (4.7)$$

V_i est la $i^{\text{ème}}$ tension de contournement moyenne mesurée.

Les résultats calculés sont résumés dans le tableau 4.3. Comme on peut le voir, la variation en pourcentage de la tension de contournement est significative dans la plage de l_{pp} entre 1 cm et 8 cm. Cependant, ce changement est très faible voire nul et peut alors être ignoré lorsque l_{pp} dépasse 8 cm. Les résultats de ces calculs ont confirmé les conclusions précédentes concernant l'évolution observée de la tension de contournement.

A titre d'exemple, les vues obtenues des tailles de bandes sèches prises à la

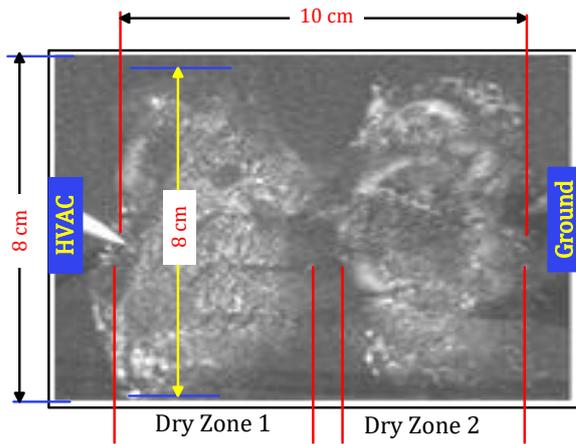
fin de l'un des tests pour deux échantillons sont présentées dans la figure 4.14. Ces échantillons étaient (Figure 4.14 (a)) 20 cm x 8 cm dans lequel un seul système d'électrode est utilisé, (Figure 4.13(b)) 20 cm x 16 cm où à nouveau un seul système d'électrode est utilisé et (Figure 4.14(c)) 20 cm x 16 cm où un système 2 pointes-2 pointes est utilisé. Comme on peut le voir sur l'image, un bon accord a été obtenu entre les tailles de bande sèche et la distance minimale entre deux arcs critiques parallèles consécutifs dans la phase de développement Indépendante.

	$I_{pp}(cm)$	--	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Nombre d'électrodes	σ_v mS/cm	L cm																
4 / 4	0,017	24	-	5,38	1,64	1,39	2,56	2,62										
		32	--	1,90	2,49	3,69	0,29	2,07	1,21	2,14								
	10	24	--	6,21	2,98	4,44	1,79	1,45										
		32	-	3,90	4,05	3,17	2,55	5,22	1,57	1,20								
3 / 3	0,017	24	--	2,84	4,79	4,47	1,75	2,68	2,14	1,25								
		32	--	4,89	4,00	2,68	1,53	2,17	0,32	1,27	0,65	0,32						
	10	24	--	5,81	2,27	1,66	1,69	2,75	2,12	2,17								
		32	--	2,27	2,66	2,05	4,88	2,93	1,51	2,30	0,39	1,57						
2 / 2	0,017	24	--	4,00	6,25	3,33	4,14	2,64	0,99	0,50	0,50	0,50	0,51	0,00				
		32	--	6,52	2,33	1,67	3,15	0,50	2,01	0,77	0,52	1,30	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0
	10	24	--	5,13	4,32	3,39	0,58	0,59	1,78	0,60	0,61	0,00	0,61	0,00				
		32	--	3,76	2,79	2,87	1,78	0,30	1,81	1,54	0,62	0,63	1,27	0,64	0,0	0,0	0,0	0,0

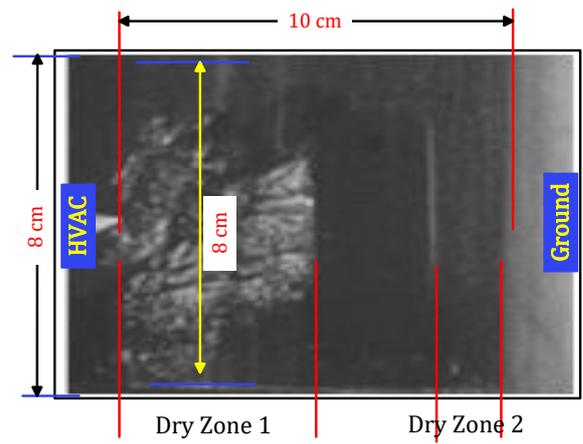
Tableau 4.3 Pourcentage d'évolution de la tension de contournement avec distance entre deux électrodes successives " I_{pp} " de 1 cm à 16 cm.

De cette première investigation, on peut conclure qu'une largeur de bande polluée égale à 8 cm est appelée "largeur efficace" au-delà de laquelle aucun effet notable sur la valeur de la tension d'amorçage n'a été trouvé.

On même temps, cette quantité correspond à la distance minimale entre deux amorçages parallèles multiples consécutifs qui se produisent dans la phase de développement indépendant.

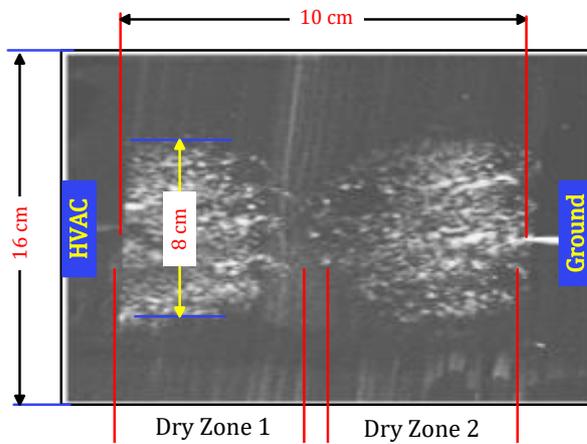


Configuration Pointe-Point

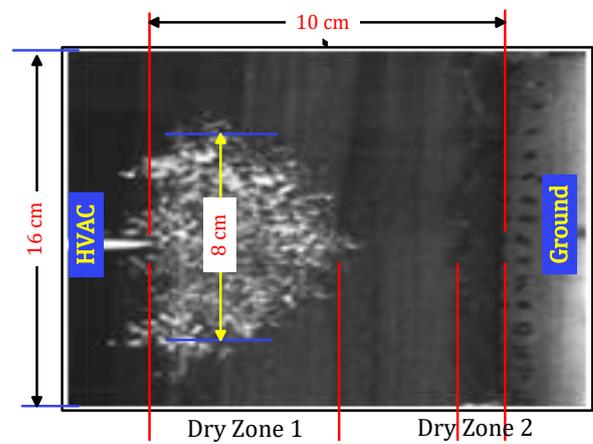


Configuration Pointe-Plan

a) cas d'isolateur plan de 20 x 8 cm avec un seul système d'électrodes

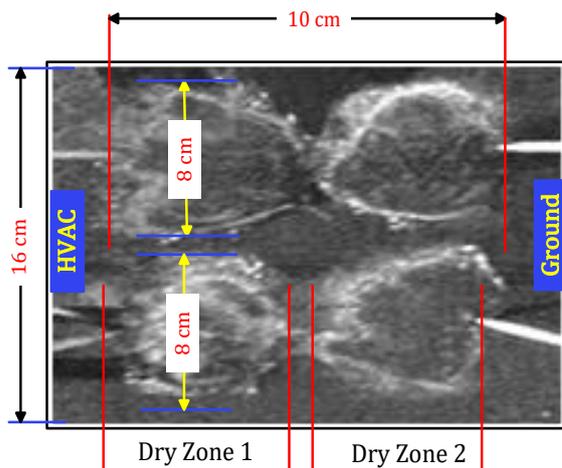


Configuration Pointe-Point

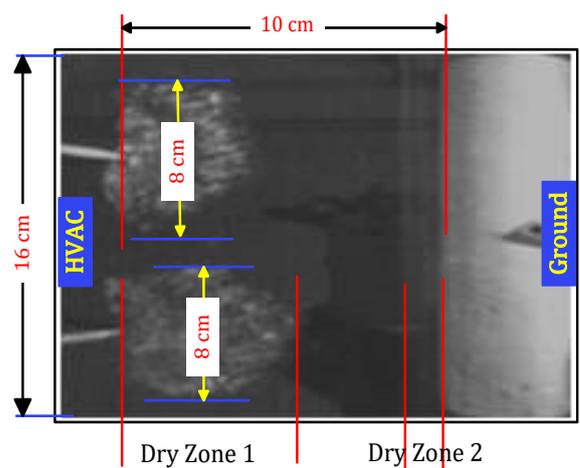


Configuration Pointe-Plan

b) cas d'isolateur plan de 20 x 16 cm avec un seul système d'électrodes



Configuration 2Points-2Points



Configuration 2Points-Plan

c) cas de Isolateur plan 20 x 16 cm avec système à deux électrodes

Figure 4.15 Tailles de zones sèches.

4.7.4 Effet de la forme du système d'électrodes

La variation de la tension de contournement avec la largeur polluée L pour l'isolant plan en verre est clairement visible sur la figure (4.16) qui présente deux familles de trois courbes représentant l'échantillon pour les trois configurations. La conductivité était égale à $0,017 \text{ mS/cm}$ et 10 mS/cm respectivement.

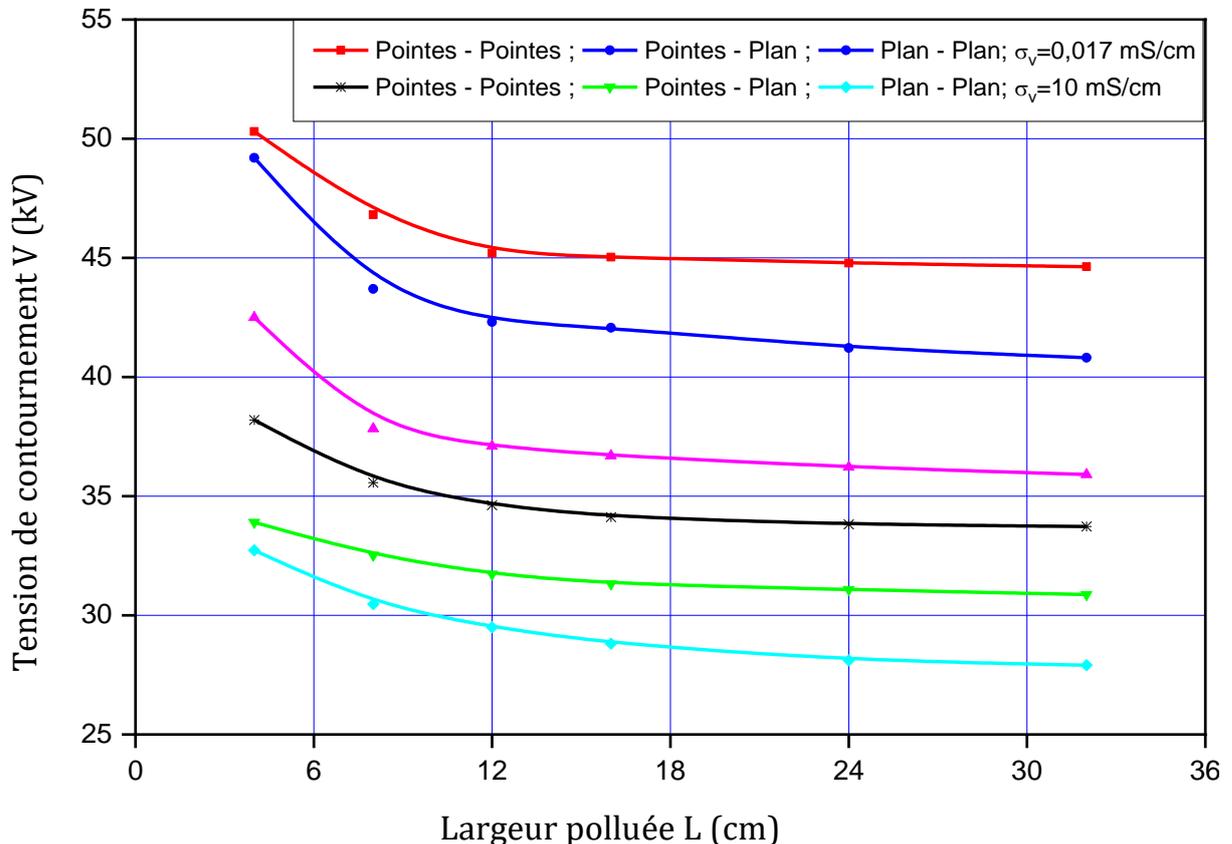
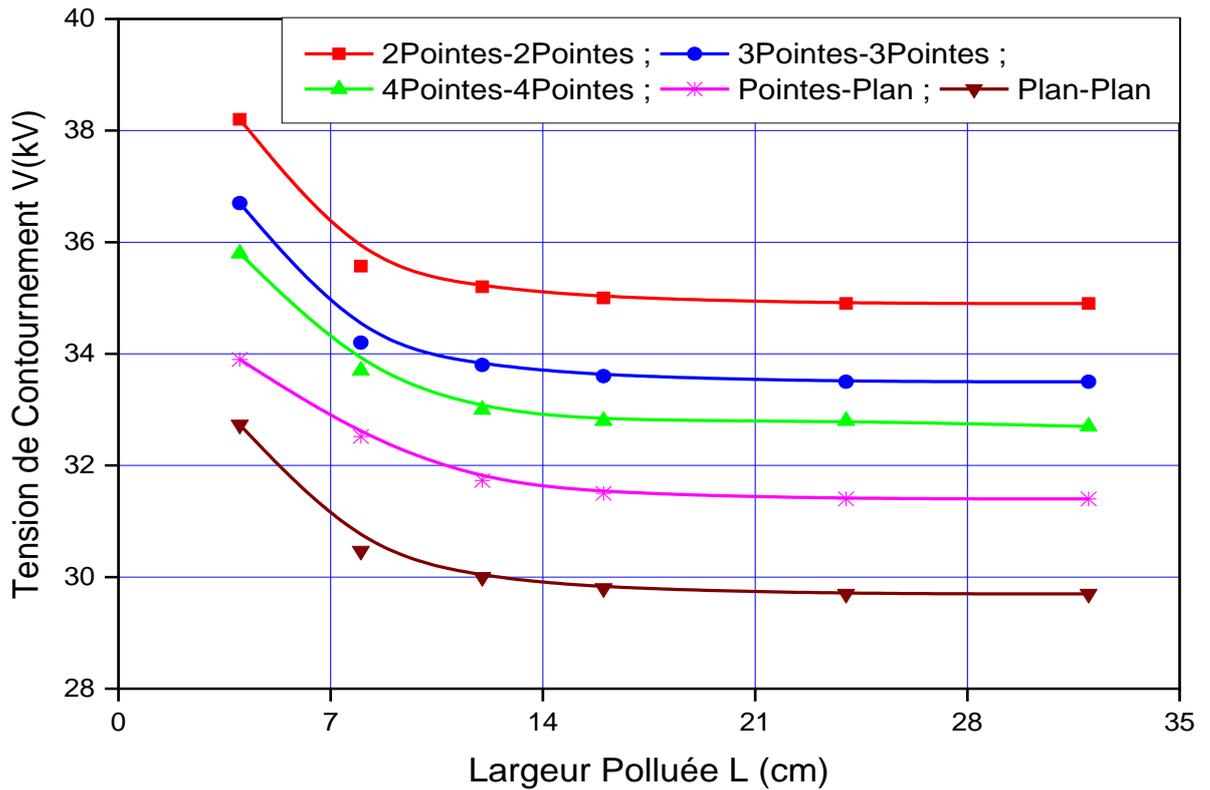


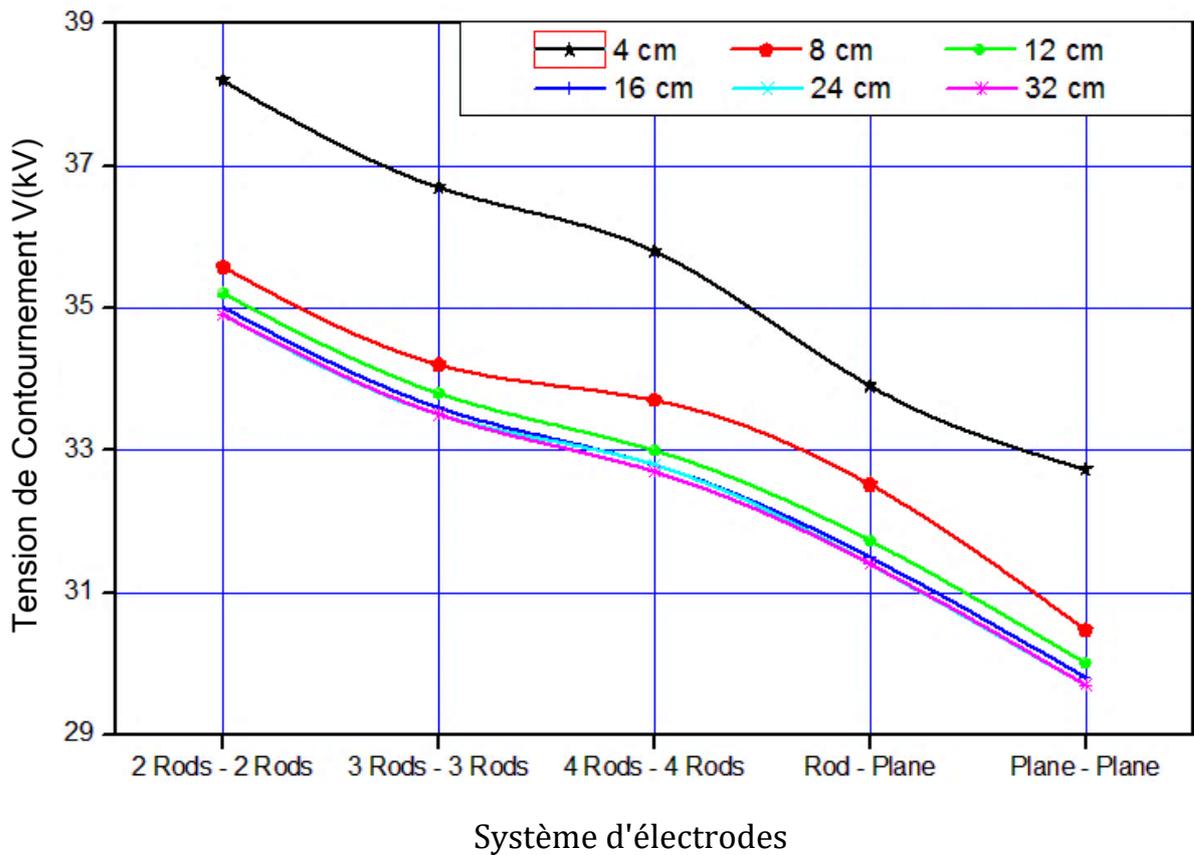
Figure 4.16 Caractérisation de la tension de contournement pour différentes configurations d'électrodes

4.7.5 Equivalence électrique entre les systèmes plan-plan et pointes-pointes

La figure (4.17) montre la tension de contournement pour différents systèmes d'électrodes. Ce paramètre est tracé en fonction de la largeur de la couche de pollution. Comme on peut le voir sur la figure 4.17, la tension de contournement chute rapidement avec la bande polluée jusqu'à une largeur d'environ 8 cm. Au-delà de cette valeur, une tendance à l'aplatissement de la tension de contournement avec l'augmentation de la bande passante polluée peut être observée. En comparant les différentes parcelles, on peut dire qu'elles présentent une tendance similaire (Figure 4.17(a)).



a) Largeur de bande polluée



b) Configuration du système d'électrodes

Figure 4.17 Variation de tension de contournement pour différentes configurations

Les résultats des tests indiquent que le changement de configuration du système d'électrodes n'a pas d'effet significatif sur la largeur effective de la décharge électrique. Ils indiquent également que l'augmentation du nombre des pointes (Figure 4.17(b)) aura tendance à réduire l'écart de tension de contournement entre les deux configurations de système d'électrodes.

Ces résultats (Figure 4.18) montrent que le nombre de pointes ajoutés au système, avec deux électrodes élémentaires par exemple, n'influence pas le nombre de décharges électriques parallèles évoluant indépendamment jusqu'à la phase ultime de contournement de l'isolant. Il influence cependant la distance séparant les deux pointes adjacentes de sorte que les pointes d'amorçage des deux décharges parallèles sont espacées d'une distance égale à la largeur effective. En effet, la largeur de 8 cm produit un seul arc, tandis que la largeur de 16 cm produit 02 arcs et la largeur de 32 cm produit 04 arcs comme le montre la figure (4.18). Ces observations nous amènent à dire qu'il existe une équivalence électrique entre les systèmes multi pointes-pointes et plan-plan et que la longueur de 8 cm est une limite au-dessus de laquelle un arc se produit.

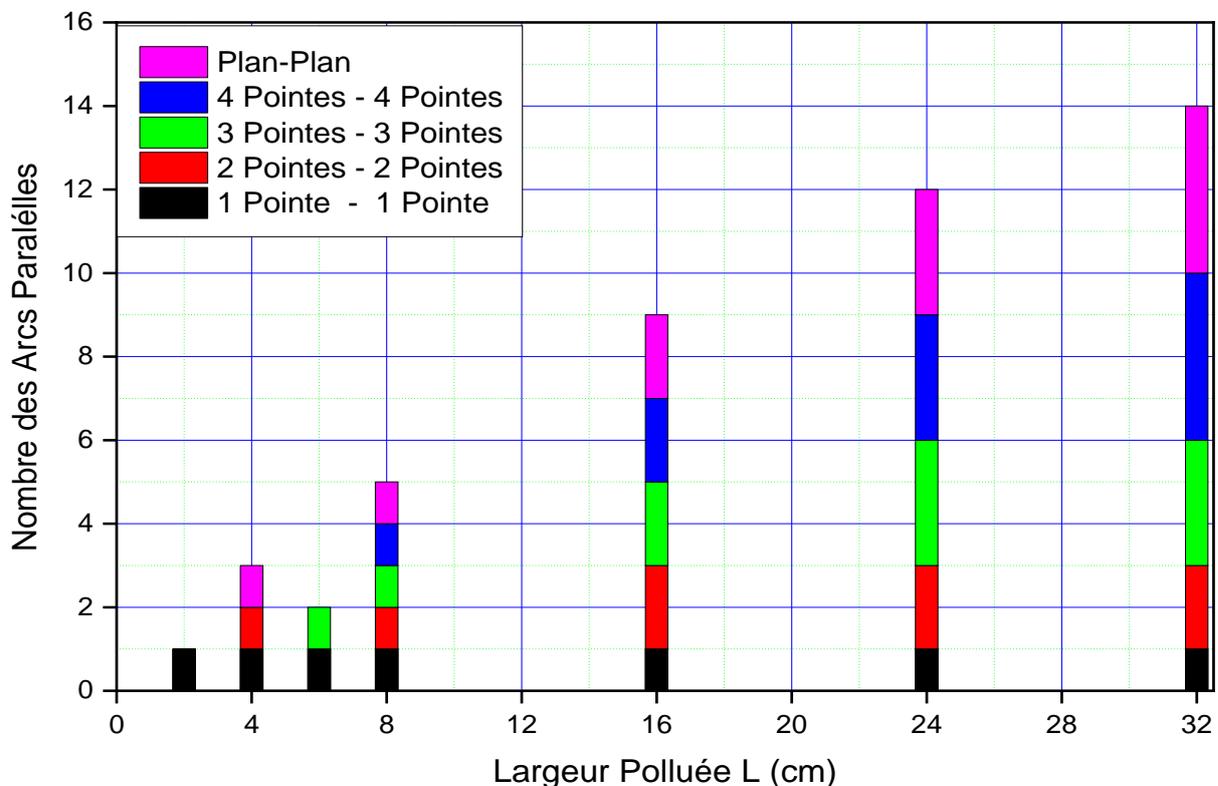
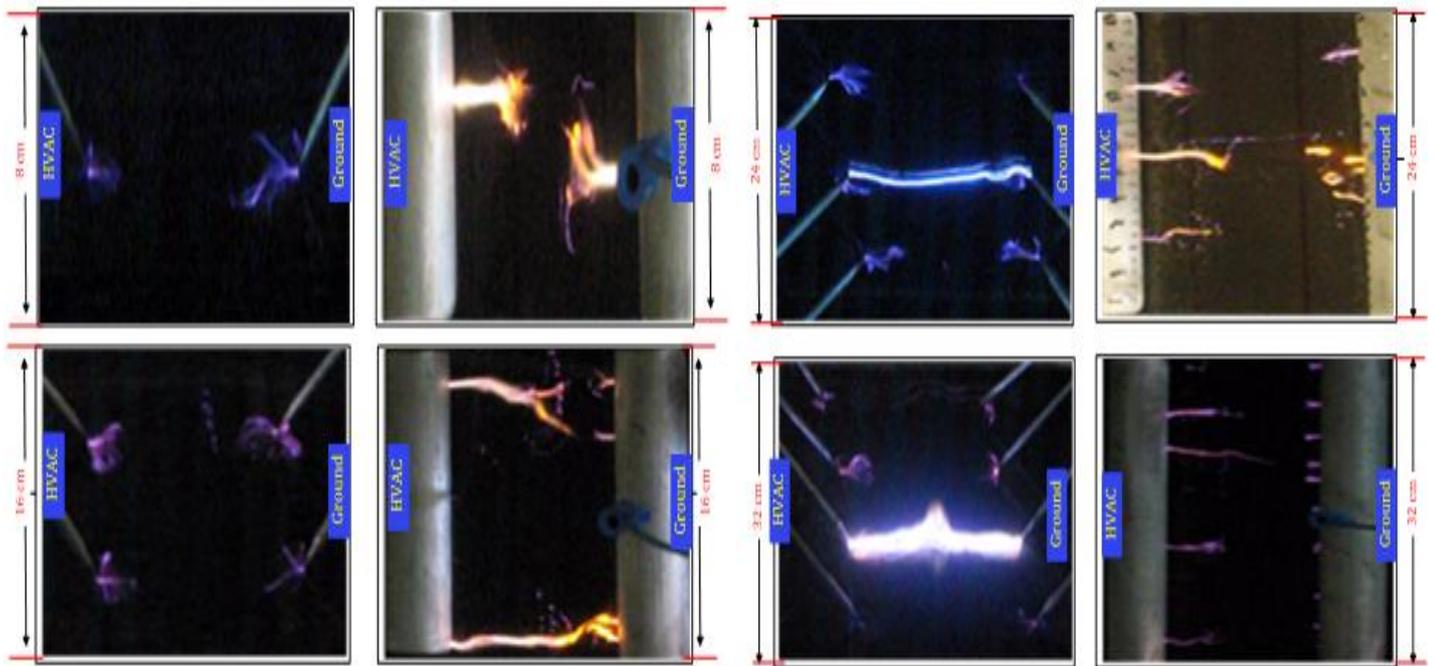


Figure 4.18 Nombre d'arcs parallèles en fonction de la largeur polluée



a) $L = 8 \text{ cm}$ (b) $L = 16 \text{ cm}$ (c) $L = 24 \text{ cm}$ (d) $L = 32 \text{ cm}$

Figure 4.19 Equivalence électrique entre les systèmes plan-plan et multi pointes-pointes

4.7.6 Effet de la longueur de la ligne de fuite sur la tension de contournement

La tension de contournement est un paramètre essentiel pour l'isolateur car il permet d'identifier le système formé par les électrodes (pointes-pointes, plan-plan,...) et donc de définir la rigidité diélectrique du système ainsi formé par les électrodes [4.13].

Cette étude a pour intérêt de voir l'importance de variation de la ligne de fuite sur la tension de contournement de l'isolant en verre. Dans le cas d'une surface isolante propre et polluée, nous avons constaté que plus la longueur de fuite est élevée, plus la tension de contournement de l'isolation est importante indépendamment de la configuration des électrodes étudié, ce qui est logique puisque le contournement d'une grande surface nécessite une durée plus élevée que celui d'une petite surface [4.14].

Pour cette étude, deux valeurs de conductivités ont été considérées : $\sigma_{v1} = 0,017 \text{ mS/cm}$, $\sigma_{v2} = 3 \text{ mS/cm}$, avec deux longueurs de fuite $L_{f1} = 10 \text{ cm}$ puis $L_{f2} = 5 \text{ cm}$, puis nous relevons la tension de contournement pour

chaque largeur.

L'effet de la longueur de la ligne de fuite polluée l_f sur la tension de contournement de l'isolant est représenté en figure 4.20 avec des électrodes plan-plan.

Ces résultats montrent que la différence de tension est presque négligeable pour une petite distance inter électrode pour les deux valeurs de la conductivité. Par contre une augmentation de cette distance implique l'accroissement de la tension et l'élévation du nombre de zones sèches.

Il est intéressant de noter dans la figure (4.20) que pour la ligne de fuite ($L_{f1} = 5\text{cm}$), la formation de deux zones sèches, l'une au niveau de l'électrode haute tension et l'autre au voisinage de l'électrode terre. Cependant, pour ($L_{f2} = 10\text{ cm}$) il a été constaté la présence de trois zones sèches, la première au niveau de l'électrode haute tension, la seconde au sein de l'électrode terre et la troisième au milieu de la surface inter électrodes. D'après Erler [4.11], plus le nombre de zones sèches augmente plus la valeur de la tension de contournement est grande.

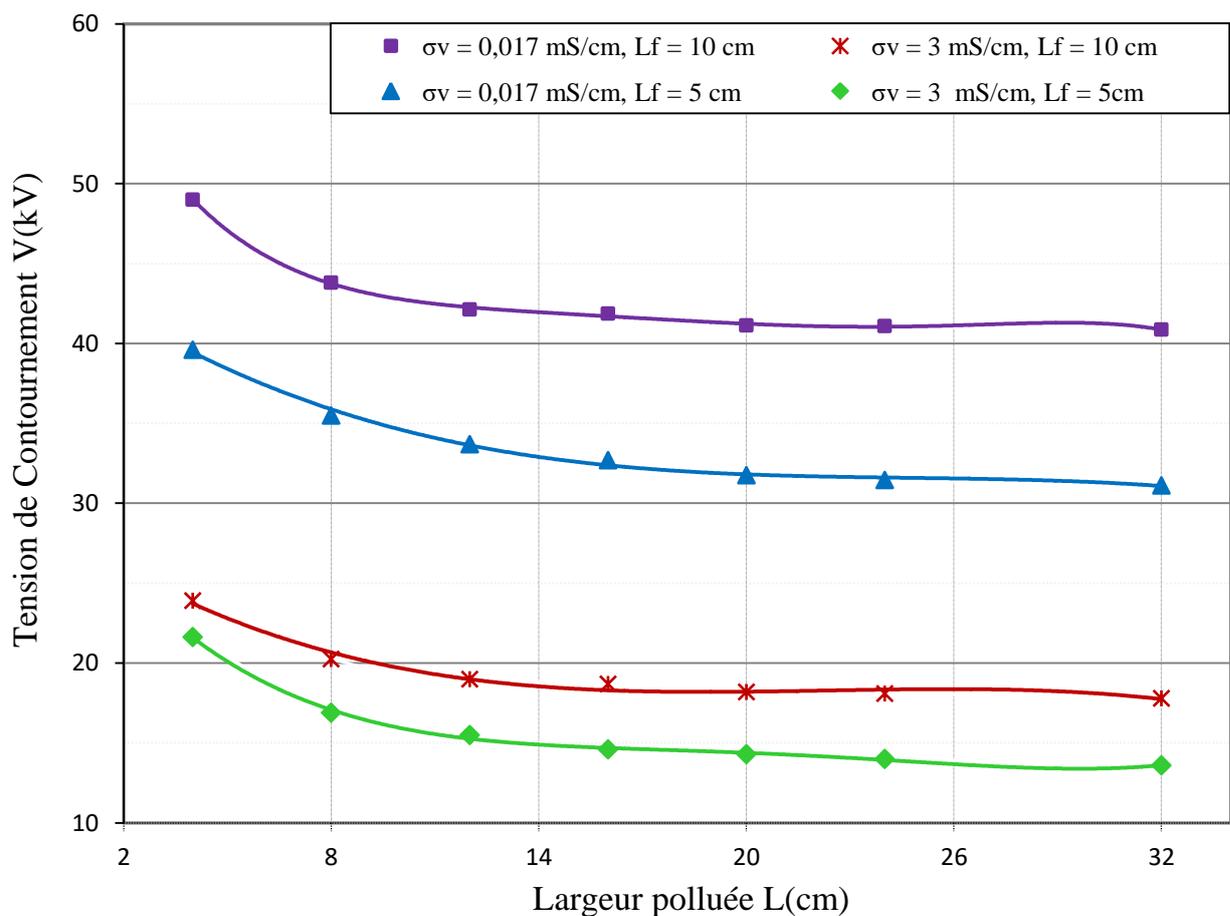
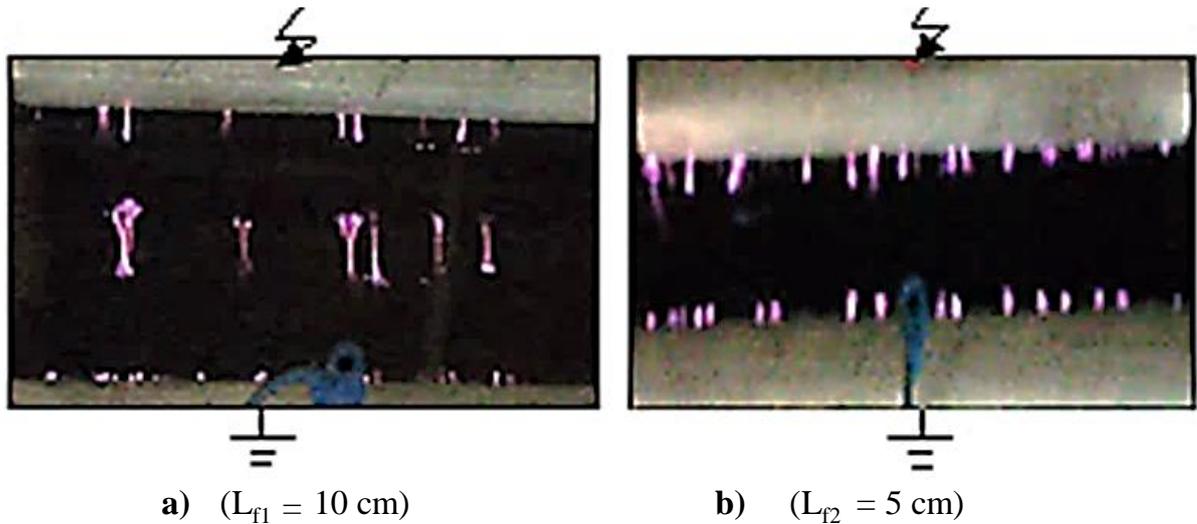


Figure 4.20 Tension de contournement en fonction de la longueur de la ligne de fuite**Figure 4.21** Configuration des zones sèches pour deux valeurs de ligne de fuite

4.7.7 Identification du système d'électrodes formé par le modèle plan

Afin d'identifier le système d'électrodes, nous avons procédé à des essais de contournement pour les distances inter-électrodes $L_{f1}=10 \text{ cm}$ qui correspond à la distance de contournement à sec et $L_{f2} = 5 \text{ cm}$ qui correspond à la distance de fuite sous des conditions de pollution.

Le système d'électrode pointes-pointes est celui qui semble s'approcher le plus du modèle plan étudié. L'expression de la tension de contournement est [4.16] :

$$V_c = 3,16 \cdot L_f + 14 \quad (4.8)$$

L_f : distance inter-électrodes.

Tableau 4.4 Valeur de tension de contournement pour le cas propre

Essai		Moyenne
Tension (kV)	$L_{f1} = 5 \text{ cm}$	35,5
	$L_{f2} = 10 \text{ cm}$	49

Nous trouvons d'après la formule (4.8) que la tension de contournement est de 29,9 kV pour L_{f1} et de 45,6 kV pour L_{f2} . Ces valeurs sont relativement proches des résultats obtenus expérimentalement.

4.7.8 Etude de la longueur critique

Cette partie est consacrée à l'étude du comportement des décharges parallèles sur la surface isolante uniformément polluée.

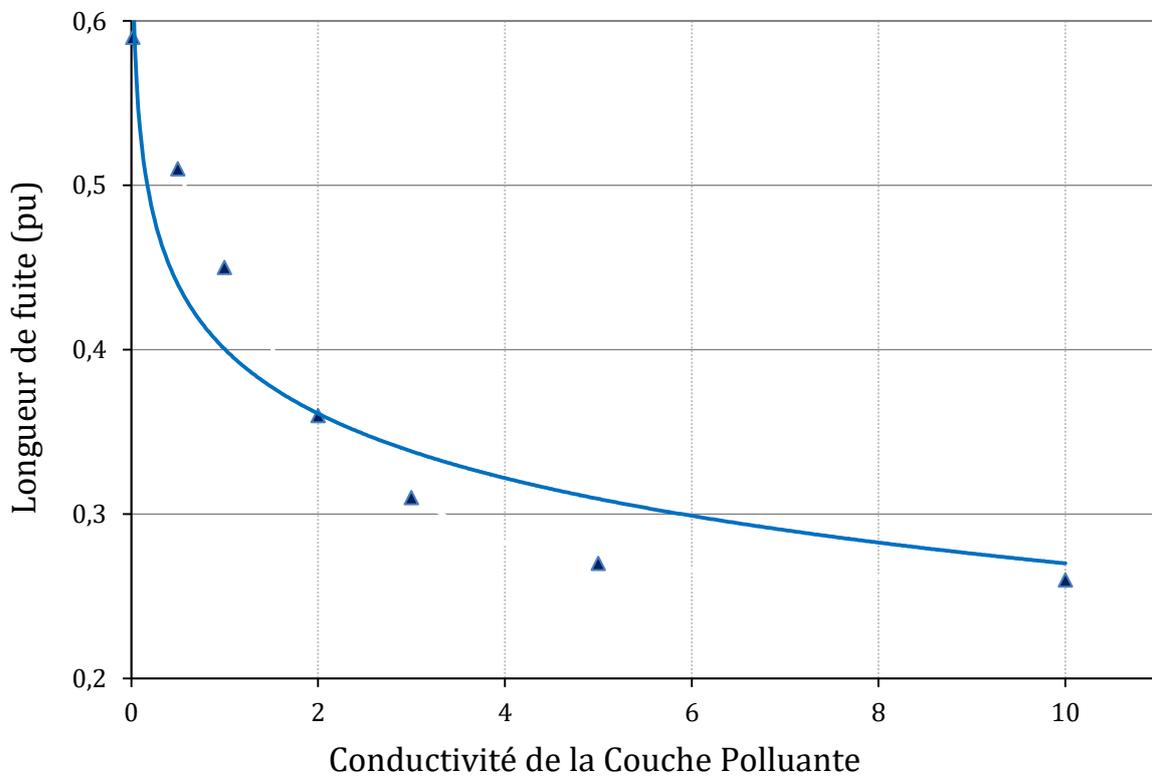


Figure 4.22 Longueur critique des décharges parallèles

Nous nous intéressons à la longueur critique de l'arc juste avant le contournement, c'est la longueur limite de l'arc partiel au-delà de laquelle l'arc conduira au contournement total. Les longueurs critiques des arcs parallèles pour chaque conductivité sont montrées dans la figure 4.22. Nous remarquons que la longueur critique maximale de la décharge parallèle est de 56 % de la longueur de fuite totale et pour la plus faible conductivité 17 $\mu\text{S}/\text{cm}$ est de 47 %. Pour les grandes conductivités, la longueur critique de la décharge parallèle est de 25% pour 10 mS/cm.

Ceci nous amène à dire que la longueur critique de la décharge diminue de manière non-linéaire avec l'augmentation de la conductivité qui est due à la diminution de l'effet résistif de la largeur. Cette diminution est causée par l'apparition d'arcs sur toute la surface polluée qui favorise pour faibles tensions la création d'un canal ionisé le long duquel progressera la décharge finale.

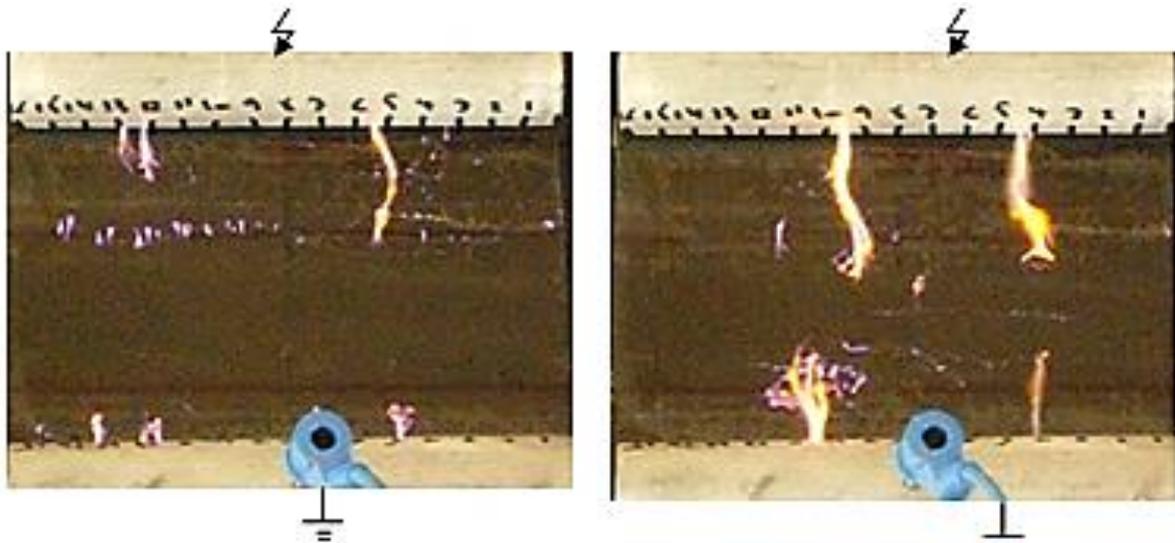


Figure 4.23 Longueurs critiques

La réduction de la longueur critique de décharge s'explique par l'augmentation des bandes sèches sur la surface polluée formée par les décharges. Ces lacunes entraînent une augmentation de la résistance de l'isolant diélectrique et, par conséquent, une diminution de la longueur de décharge critique avant le contournement à mesure que la conductivité augmente. Pour la conductivité la plus élevée (10 mS/cm), la diminution de la longueur critique de décharge est causée par des arcs électriques apparaissant sur la surface polluée.

Ces arcs commencent à apparaître et participent à la formation d'un canal ionisé par lequel la décharge parallèle s'allonge jusqu'à sa longueur critique et provoque le contournement total comme le montre la figure 4.23.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les éléments constitutifs du dispositif expérimental permettant de faire une étude sur le contournement de l'isolation qui a été également présentée, les techniques expérimentales utilisées pour étudier les caractéristiques des arcs électriques ainsi que leur développement sur une surface isolante propre et uniformément polluée et quantifier les effets de la pollution sur l'isolant en verre, le degré de sa contamination et les configurations du système d'électrodes (plan-plan et multi pointes-pointes) sur le développement des décharges parallèles et indépendantes jusqu'au contournement complet de l'isolateur lorsqu'une

tension alternative est appliquée.

Des tests approfondis ont été réalisés pour caractériser la largeur effective de décharges électriques parallèles partielles évoluant indépendamment sur une surface isolante. Des essais ont été effectués dans des conditions de pollution artificielle basées sur la méthode de la couche solide de la CEI 60507 [3.40] en tenant compte l'influence de plusieurs paramètres tels que la largeur polluée, la longueur de la ligne de fuite, la conductivité et les configurations du système d'électrodes, on peut conclure que la périphérie de l'isolant joue un rôle important au développement des décharges sur sa surface et affecte la tension de contournement et le nombre d'arcs parallèles.

Ces résultats ont montré qu'un seul arc électrique se propage jusqu'au contournement pour un petit isolant lorsqu'il est uniformément pollué. Cependant, plusieurs arcs partiels parallèles ont été observés pour les grands isolateurs. Ces arcs se développent pour alimenter un seul arc et peuvent se développer jusqu'à un contournement complet.

Des tests en laboratoire ont révélé qu'une largeur efficace est nécessaire pour qu'une décharge partielle se produise. Cette valeur est approximativement égale à 8 cm. Cette limite correspond aux performances électriques minimales de l'isolant. Par conséquent, on peut conclure que les isolateurs de petit diamètre présentent des valeurs de tension de contournement plus élevées que ceux de grand diamètre. On même temps, l'analyse des séquences des vidéo enregistrée pendant les tests a montré l'équivalence entre la configuration plan-plan et le système d'électrodes multi-pointes-pointes. Enfin, le nombre d'arcs parallèles dépend étroitement de la largeur effective.

Chapitre 05

DISTRIBUTIONS DU POTENTIELLES ET DU CHAMP ELECTRIQUE LE LONG DE L'ISOLATEUR SOUS CONDITION DE POLLUTION

5.1 Introduction

La contrainte électrique dans les circuits électriques est résistée principalement par les isolateurs, ces derniers sont constitués d'un matériau isolant solide, caractérisé par une grande impédance au passage du courant électrique. Son rôle est de séparer deux corps conducteurs, soumis à deux potentiels différents [5.1]. La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension de transport d'énergie électrique. Comme il était très difficile de mesurer expérimentalement de façon précise la distribution du potentiel et surtout du champ électrique le long d'un isolateur, l'utilisation d'une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel s'est avérée être une des meilleures solutions.

Plusieurs méthodes numériques sont alors proposées pour la résolution des problèmes posés. Ces méthodes sont adaptées aux différentes formes complexes et irrégulières des isolants afin de les identifier. Elles sont essentiellement de type différences finies, éléments finis, charges équivalentes et éléments finis de frontières.

La méthode des différences finies (M.D.F) est de fournir une approximation des dérivées partielles qui régissent les problèmes par des "différences" entre les valeurs nodales qui sont séparées par une distance finie [5.3].

La Méthode des Charges équivalentes (M.C.E) consiste à chercher une distribution de charges discrètes, à valeurs complexes inconnues, dont le type et la position sont choisis [5.4].

Quelle soit directe ou indirecte, la méthode des éléments de frontières consiste à résoudre le problème aux frontières des différents milieux. Pour la méthode directe,

on travaille directement avec le potentiel et le champ, alors que pour celle indirecte, on travaille avec les charges. Après détermination de celles-ci, on calcule les valeurs du potentiel et du champ électrique [5.4].

Le COMSOL Multiphysics est un logiciel qui permet de visualiser la distribution des lignes du champ électrique, il nécessite la précision de la géométrie du modèle. Cependant, lorsque le modèle à étudier est compliqué (3D), on a recourt à utiliser les interfaces de liaison avec d'autres logiciels conçus spécialement pour le dessin. Pour mieux représenter les isolateurs, la simulation 3D est faite en tenant compte de : la géométrie de son design, l'introduction des propriétés des matériaux le constituant et les conditions aux limites (masse et potentiel) ainsi que le maillage, en terme de ce chapitre nous avons présenté les résultats obtenus [5.4].

Dans ce chapitre, nous allons présenter un outil de calcul basé sur la méthode des éléments finis (logiciel COMSOL) pour décrire la répartition du potentiel et du champ électrique au voisinage de la décharge et ainsi sur le long de la surface avec différents largeur propre et pollué et différents configurations des électrodes [5.4].

5.2 Description du logiciel "COMSOL Multyphysics"

Ce programme est basé sur le modèle mathématique à l'aide des équations de Maxwell suivant : [5.6]

$$\nabla \cdot J = Q_j \quad (5.1)$$

$$J = \sigma E + J_e \quad (5.2)$$

$$E = -\nabla V \quad (5.3)$$

Plusieurs modèles spécifiques à l'application sont disponibles pour COMSOL Multiphysique :

- ✓ AC/DC Module.
- ✓ Acoustiques Module.
- ✓ CAD Import Module.
- ✓ Chemical Engineering Module.
- ✓ Structural Mechanics module.
- ✓ Earth Science Module.

Parmi ces modèles ; le modèle AC/DC Module simule les composants électriques et les dispositifs qui dépendent de l'électrostatique, Magnétostatique et électromagnétique quasi-statique application, en particulier associée à d'autres physiques.

Les étapes essentielles de conception d'un modèle en utilisant COMSOL Multiphysics sont [5.6] :

- ✓ Utilisation d'un physique prédéfinie.
- ✓ Implémentation et résolution d'un modèle Multi-physique.
- ✓ Définition de propriétés physiques dépendent de la solution recherché.
- ✓ Analyse temporelle.

Les étapes de construction d'un modèle comprennent notamment :

- ✓ Définition de la géométrie.
- ✓ Définition de la physique et des conditions aux limites.
- ✓ Maillage.
- ✓ Résolution.
- ✓ Post-traitement et analyse des résultats.

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. C'est lui qui permettra de définir le ou les modèles physiques qui seront utilisés. C'est aussi ici que la dimension de l'espace est choisie (2D, 2D axisymétrique, 3D, ...). Pour chacun des modèles, il est précisé quelles sont les variables, et quel est le suffixe ce propre à modèle. En effet, COMSOL crée automatiquement des variables pour chaque modèle. Ces variables sont toujours suffixées par le nom du modèle auquel elles sont rattachées. Par exemple est la composante en x du champ électrique dans le modèle "électrostatique".

- ✓ Lorsque le ou les modèles ont été choisis, l'écran général de COMSOL apparaît.
- ✓ D'une manière générale, lors de la création d'un projet, il faut parcourir le menu en allant de gauche à droite. Nous allons donc d'abord construire la géométrie du problème.
 - ✓ On définit ensuite le comportement des domaines en leur associant de propriétés.
 - ✓ Ensuite, on impose des conditions sur certaines frontières, et éventuellement sur certains points. Cette opération est à refaire pour chaque modèle utilisé.

- ✓ Une fois la physique du problème posée, il faut effectuer le maillage de la géométrie. Il est possible de faire un raffinement local du maillage.
- ✓ Il ne reste ensuite plus qu'à simuler le projet.
- ✓ Toutes les inconnues sont alors déterminées. Il est possible de les afficher dans la fenêtre de post-processeur.

5.3 Simulation de modèle considéré

Pour effectuer ces simulations ; nous allons commencer par le choix du modèle, lancez donc le module électrostatique (es) dans le navigateur de modèle, nous limiter à une étude à 3D.

La modélisation est une étape importante dans toute simulation numérique. En particulier, elle permet, en définissant et en étudiant les caractéristiques géométriques et physiques du problème étudié, de proposer un modèle simplifié qui soit le plus proche de la réalité (Figure 5.1).

Un modèle plan composé d'une surface isolante sur laquelle est disposé un système à deux électrodes a été utilisé. La plaque isolante est une surface rectangulaire en verre de dimensions 20 cm x 32 cm x 0,6 cm. La largeur de la bande polluée est variée entre 0,001 cm x 10 cm x (4 à 32 cm).

Le logiciel COMSOL permet de visualiser la propriété standard, optiques, électriques, et mécanique du matériau, dans cette étude on va définir les propriétés électriques la constante diélectrique et la conductivité qui définissent le sous-domaine.

Les propriétés des matériaux sont résumées dans le tableau suivant :

Matériaux	ϵ_r	σ en (S)
Electrodes	1	10^{20}
Le verre	4,6	10^{-14}
Air	1,0	1,0

Tableau 5.1 Caractéristiques électriques des matériaux

Pour le cas étudié, nous avons pris comme conditions aux limites pour l'électrode HT un potentiel constant de valeur 35 kV et celui de l'électrode masse un potentiel nul ou encore prendre la condition prédéfinie dans le logiciel "terre". Le champ électrique est supposé nul (isolation électrique) suffisamment loin de l'isolateur.

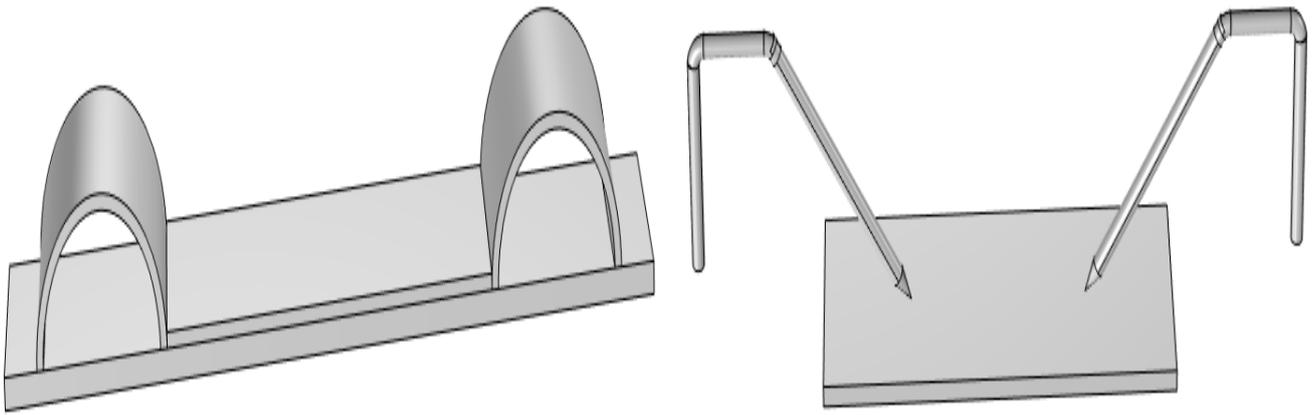


Figure 5.1 profil du modèle utilisé

La condition adéquate d'interface aux interfaces entre différents éléments du modèle est comme suite :

$$n_2 \cdot (D_1 - D_2) = \rho_s \quad (5.4)$$

Pour notre étude la charge d'espace ρ_s est nulle. Donc, l'équation (5.4) devient :

$$(D_1 - D_2) = 0 \quad (5.5)$$

Le maillage correspond à la discrétisation spatiale de la géométrie en volumes élémentaires (appelés mailles) définis par des points (appelés nœuds). Ces nœuds constituent les connexions entre les mailles.

Sur la figure (Figure 5.2) on présente le maillage obtenu dans lequel la densité des éléments finis est importante pour les régions critiques (proches de la surface de l'isolateur) où une plus grande précision est exigée, car les propriétés électriques des matériaux sont très variables.

Le choix du nombre d'éléments est important et doit être équilibré, car moins d'éléments de maillage peut réduire la précision des résultats de simulation, tandis qu'un grand nombre d'éléments augmente la taille du problème et entraîne un temps de traitement plus long.

Il est important de trouver un optimum d'éléments qui permet d'assurer un temps de calcul plus rapide sans compromettre la précision du résultat.

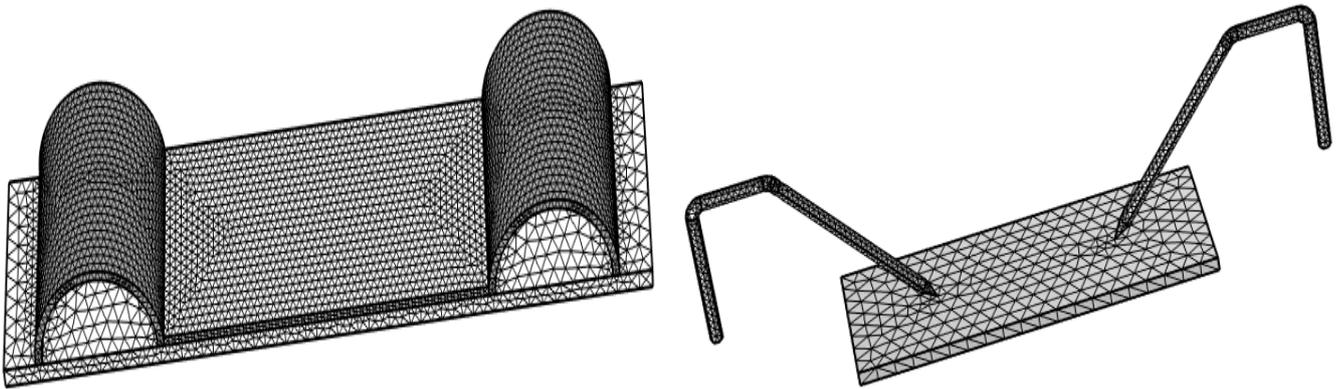


Figure 5.2 Maillage obtenu

5.4 Effet de la configuration du système d'électrodes sur la distribution du potentiel et du champ électrique

La détermination de la répartition du potentiel et du champ électrique est très importante. En effet elle permet d'une part de vérifier son uniformité et de l'autre part de localiser les points critiques sur la surface des isolateurs.

Cette répartition est étroitement liée aux conditions climatiques dans lesquelles l'isolateur se trouve et est très influencé par la couche de pollution humidifiée. Pour élucider cet effet, une valeur de la conductivité de la couche de pollution ($\sigma_v = 10 \text{ mS/cm}$) a été utilisée. Le cas sans pollution a été aussi introduit pour but de comparaison.

5.4.1 Cas des électrodes plan-plan

Une fois que tous les paramètres de ce modèle de calcul sont donnés et les conditions aux limites spécifiées on lance l'exécution du logiciel pour résoudre les équations différentielles régissant le phénomène.

Pour une 1^{ère} étape, la simulation a été effectuée en absence de pollution entre les électrodes. Ceci a été fait afin d'avoir des valeurs de référence de distribution de potentiel et du champ électrique, ensuite, une valeur de conductivité de la couche de pollution ($\sigma_v = 10 \text{ mS/cm}$) est utilisée.

Les résultats de cette investigation sont montrés dans la figure suivante, où on présente la distribution du potentiel obtenue pour les différentes largeurs.

On peut voir que les valeurs maximales des potentiels sont près de l'électrode haute tension et commence à décroître jusqu'à son annulation quand on se rapproche

de l'électrode de masse et le potentiel électrique est uniformément distribué sur le long de la plaque.

Une déformation entre le cas pollué et propre due à l'effet des caractéristiques électrique de la couche de pollution, l'augmentation de la conductivité de la pollution rend toujours le potentiel électrique plus faible que dans le cas d'une surface propre.

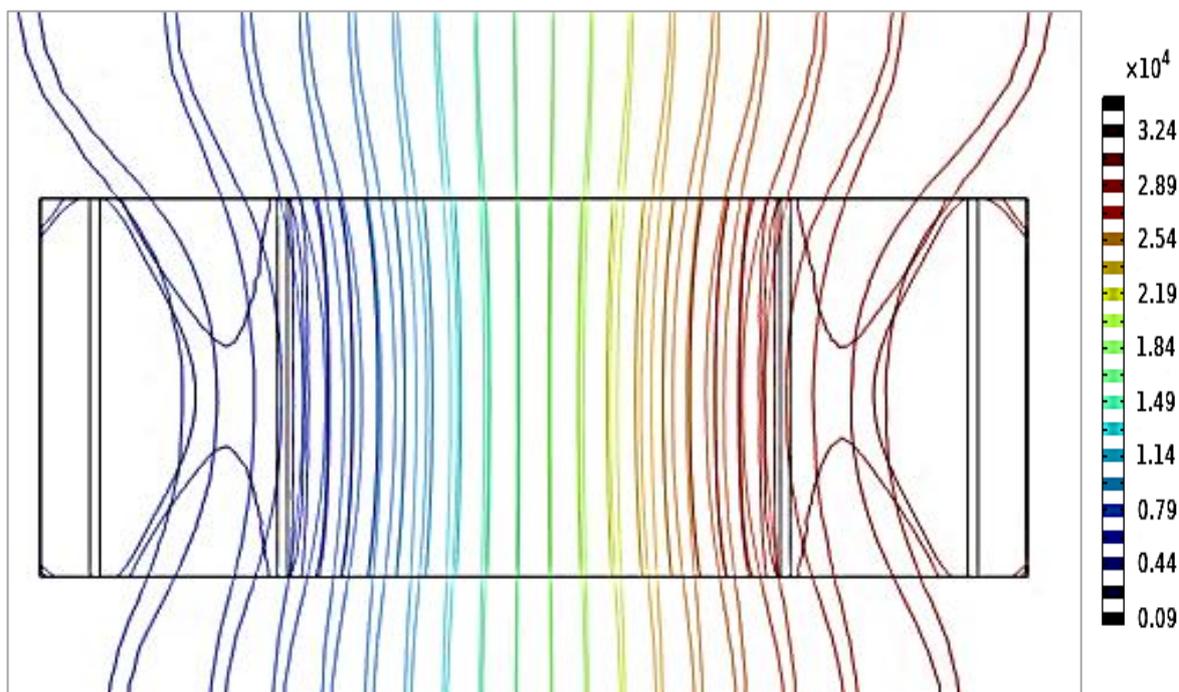


Figure 5.3 Distribution des lignes équipotentielles d'un isolateur pollué (L= 160 mm)

La distribution du potentiel électrique entre l'électrode de haute tension et la surface polluée est assez remarquable ; la chute de tension entre les deux électrodes est remarquable, car la présence d'un diélectrique en électrolyte entre les bornes prolonge l'électrode de masse.

Comme principaux résultats, nous pouvons dire que la conductivité de la couche polluante n'a pratiquement pas d'effet sur les répartitions du potentiel et du champ électriques ; aucune différence n'a été observée comparant le potentiel obtenu pour deux cas : propre et pollué. La réduction du volume critique indique que pour une tension donnée, la probabilité de générer des électrons serait plus faible. En d'autres termes, la tension requise pour amorcer une couronne de streamers en présence d'une surface diélectrique serait plus grande que celle dans le cas de l'air.

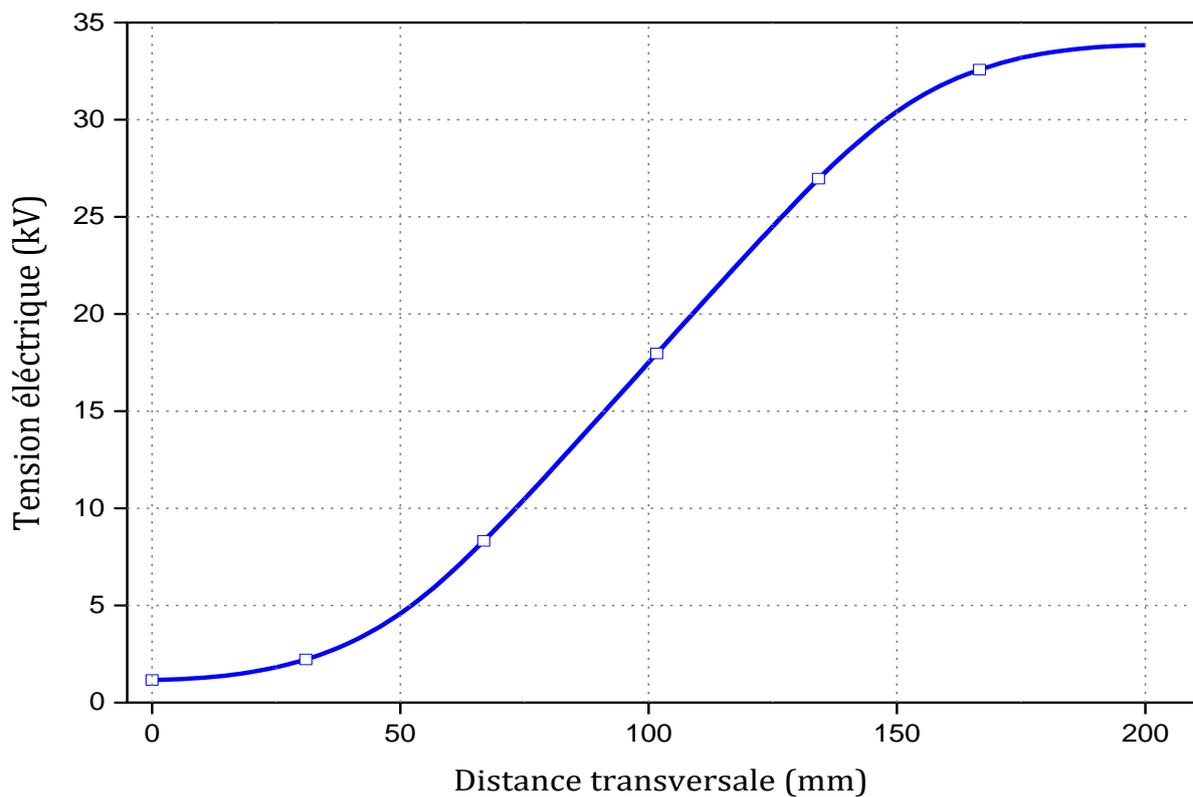


Figure 5.4 Distribution du potentiel électrique d'un isolateur selon la ligne de fuite

La figure (5.6) montre la variation de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur.

- Les lignes de champ électrique divergent de l'électrode active (orientées de l'électrode HV vers les extrémités de l'isolateur et convergent vers l'électrode de masse), le système devient moins rigide et la conductivité de la surface augmente.
- Le champ électrique n'est pas affecté par les conditions de la surface (polluée ou propre) de l'isolateur.
- influence légère sur l'intensité du champ électrique, la forme demeure la même.

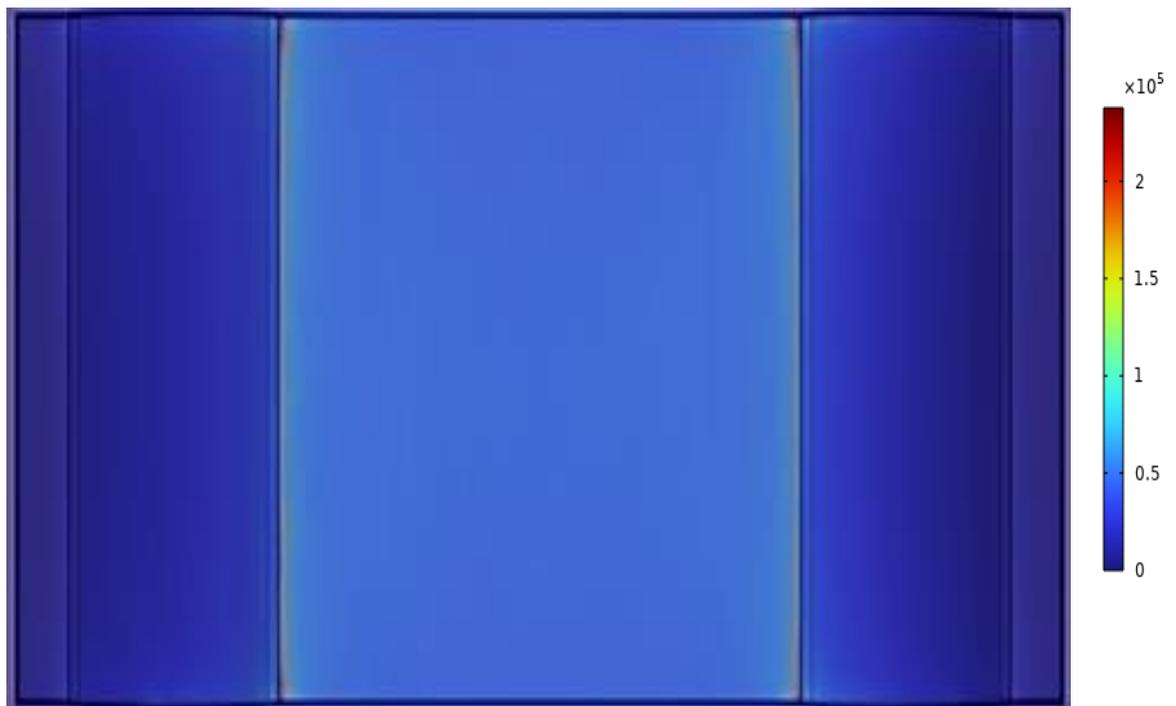


Figure 5.6 Distribution du champ électrique d'un isolateur propre (L= 240mm)

Les figures (5.7, 5.8) montrent la variation de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur pollué.

Les résultats montrent qu'un diélectrique placé parallèlement à l'axe des électrodes peut déformer les lignes de champ en les dirigeant vers sa surface et en accentuant le champ aux alentours de l'électrode HT.

Les lignes de champ maximal longe la surface diélectrique en partant du point ayant le champ le plus élevé sur l'électrode HT.

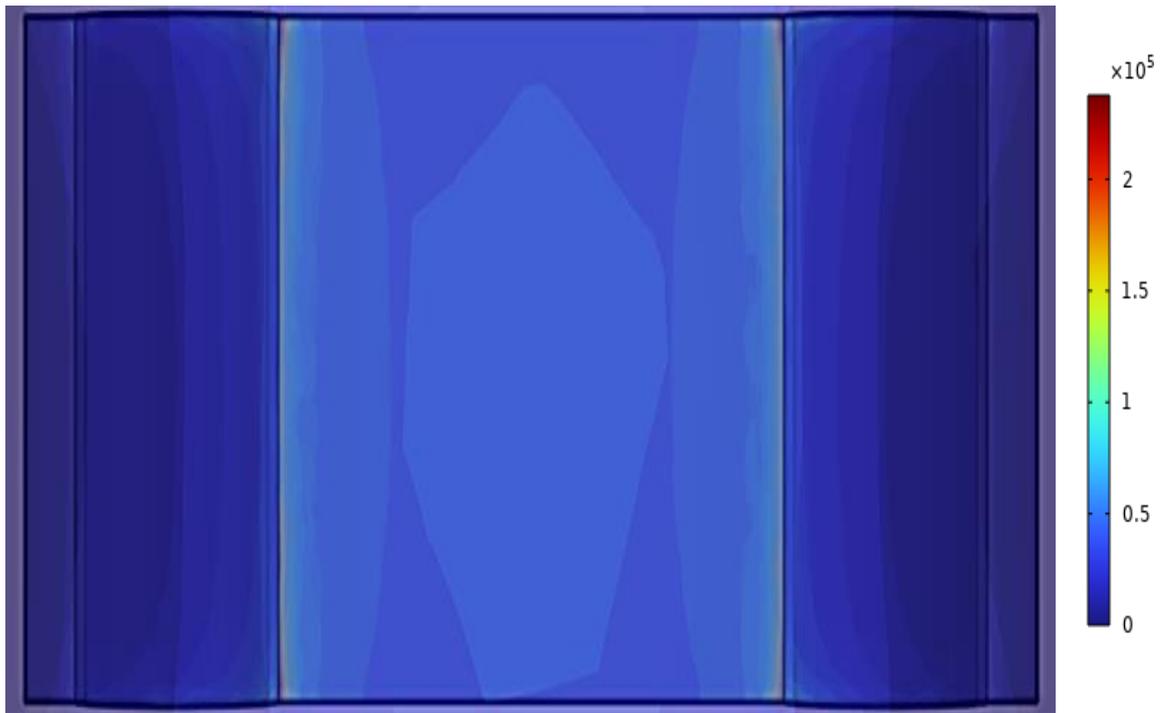


Figure 5.7 Distributions de champ électrique sur un isolateur pollué (L= 240mm)



Figure 5.8 Distribution des lignes de champ d'un isolateur polluée (L= 240mm)

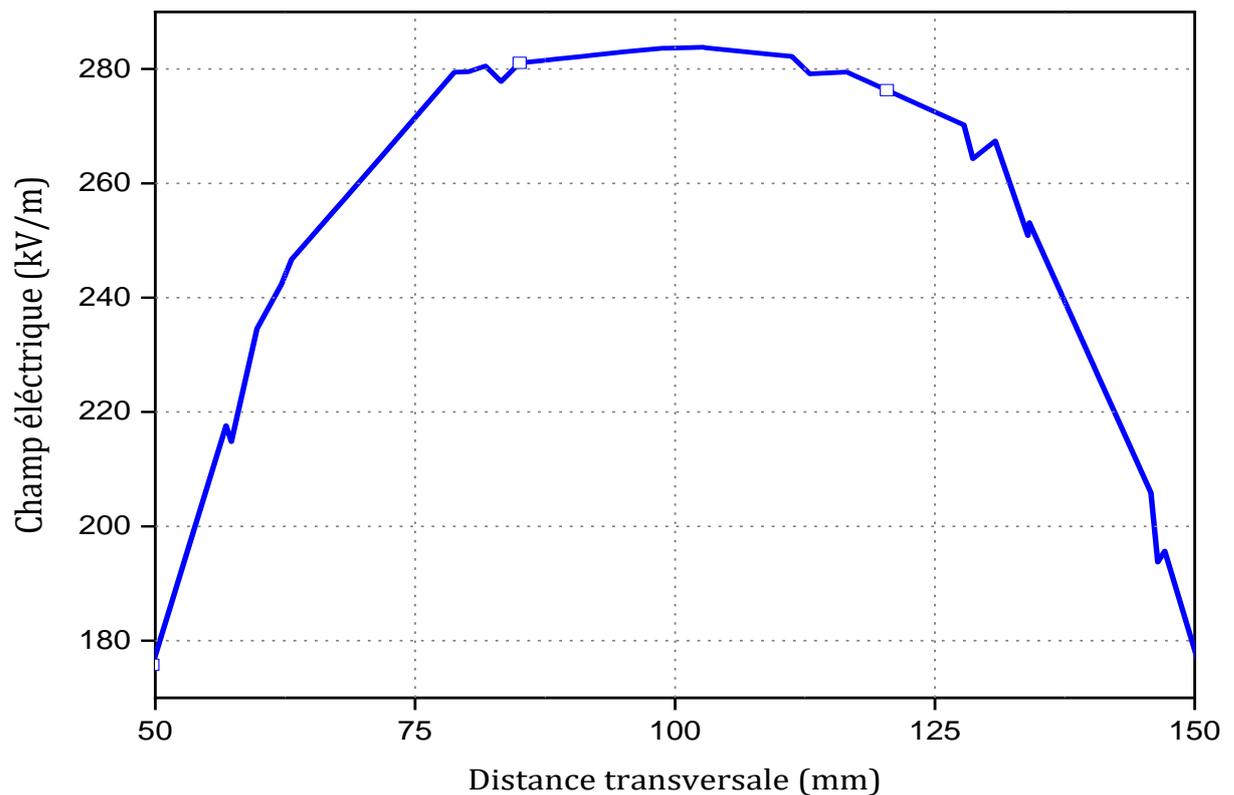


Figure 5.9 Lignes de champ électrique sur un isolateur (L= 160 mm)

➤ **Études de la répartition de la tension et du champ électrique axiale et sur ligne de fuite**

Les distributions du potentiel et du champ électrique ont été présentées le long d'un axe de référence et la ligne de fuite donnée par les figures (5.11) et (5.12). L'axe vertical de distance 30 mm par rapport à l'axe d'isolateur.

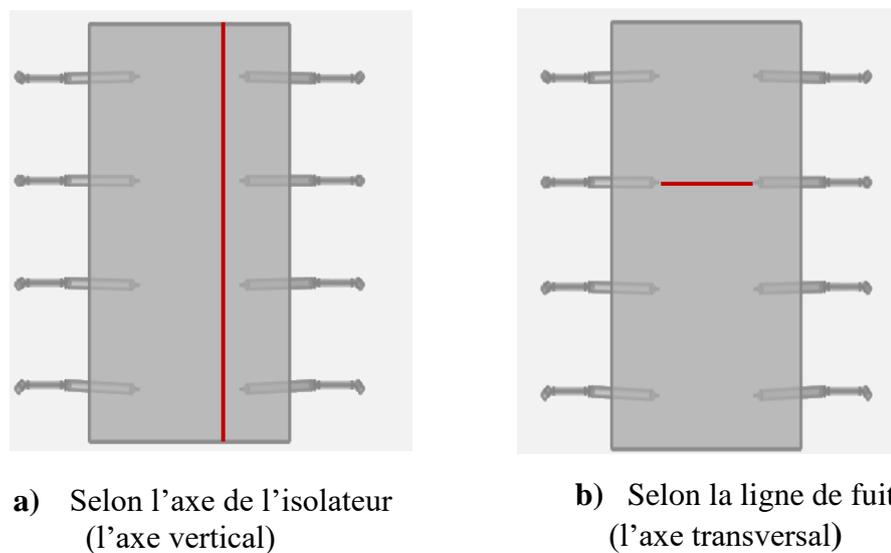


Figure 5.10 Lignes de référence du potentiel et champ électrique

a. Tension électrique

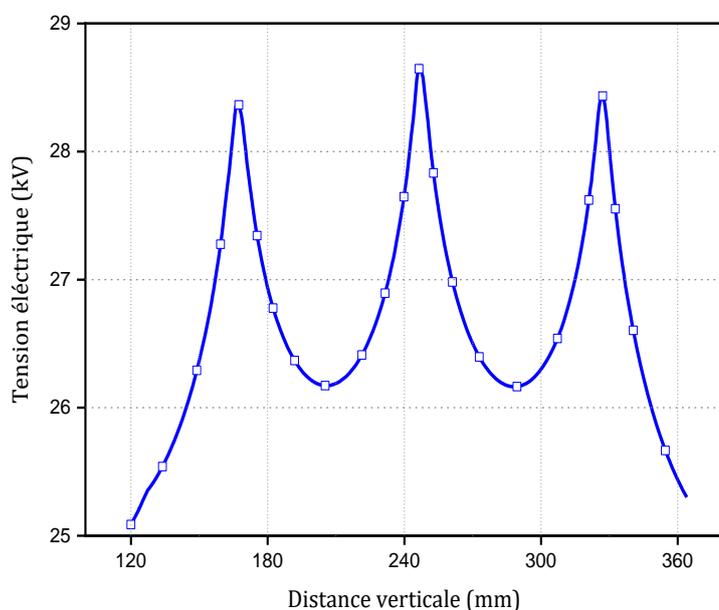
La figure 5.11 montre la répartition du potentiel le long de l'isolateur pour les deux axes de référence choisis.

La répartition du potentiel électrique dépend alors fortement du profil et de l'état de surface de l'isolant, Cependant, une augmentation du diamètre ne réduit pas du potentiel de manière correspondante. Cela peut être dû au fait que plus d'un arc peut s'initier sur une seule bande sèche, provoquant une chute de tension d'électrode plus élevée qui compense partiellement la diminution de la tension de contournement.

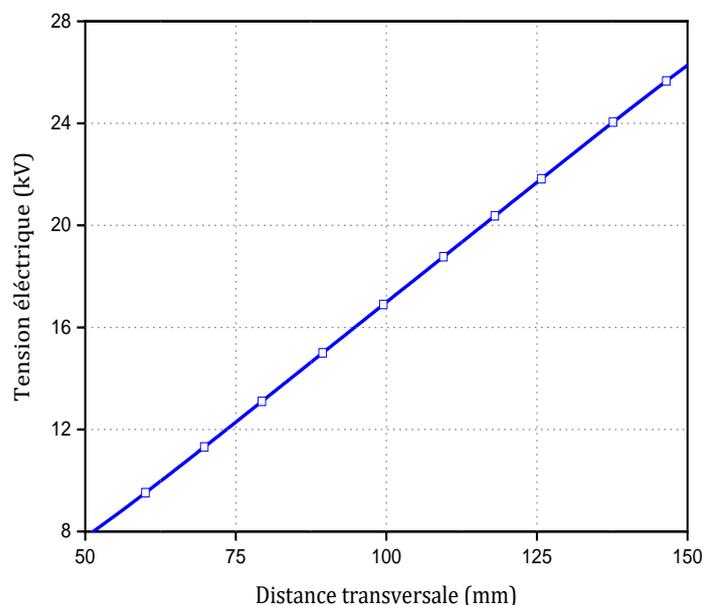
b. Champ électrique

La figure 5.12 montre la distribution des champs électriques le long de l'isolateur pour les deux axes de référence choisis.

La comparaison entre les deux cas montre que le champ électrique est plus grand dans le cas des électrodes pointes. En effet, elle permet d'une part de vérifier son uniformité et de l'autre part de localiser les points critiques sur la surface des isolateurs. Le champ est renforcé dans les sommets des électrodes et son valeur est minimale au milieu.

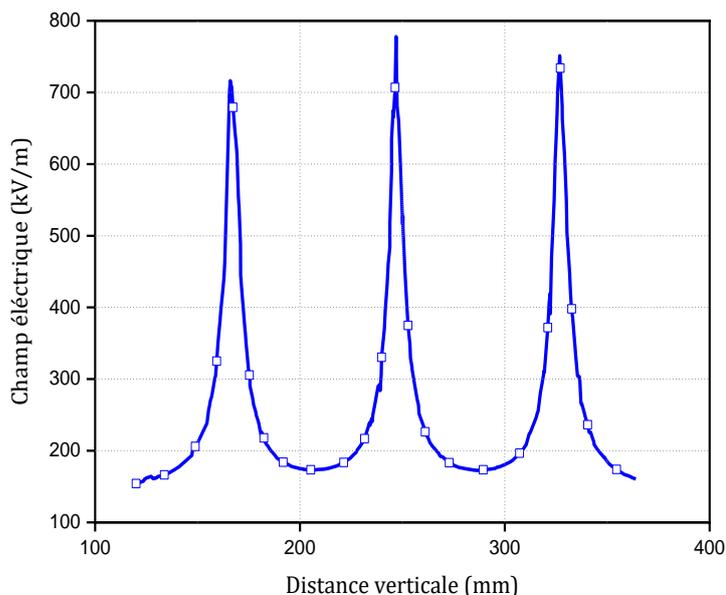


a) Selon l'axe de l'isolateur

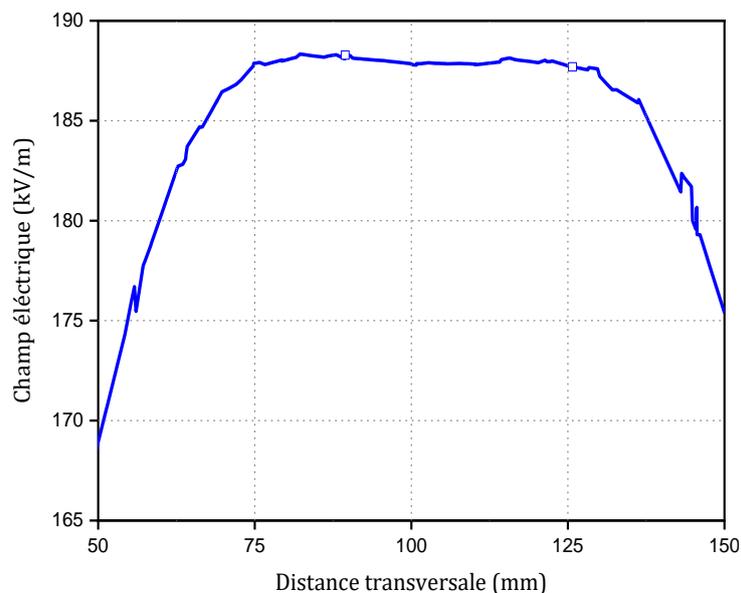


b) Selon la ligne de fuite

Figure 5.11 Distribution du potentiels électriques (L= 240 mm)



a) Selon l'axe de l'isolateur



b) Selon la ligne de fuite

Figure 5.12 Distribution de champ électrique ($L = 240$ mm)

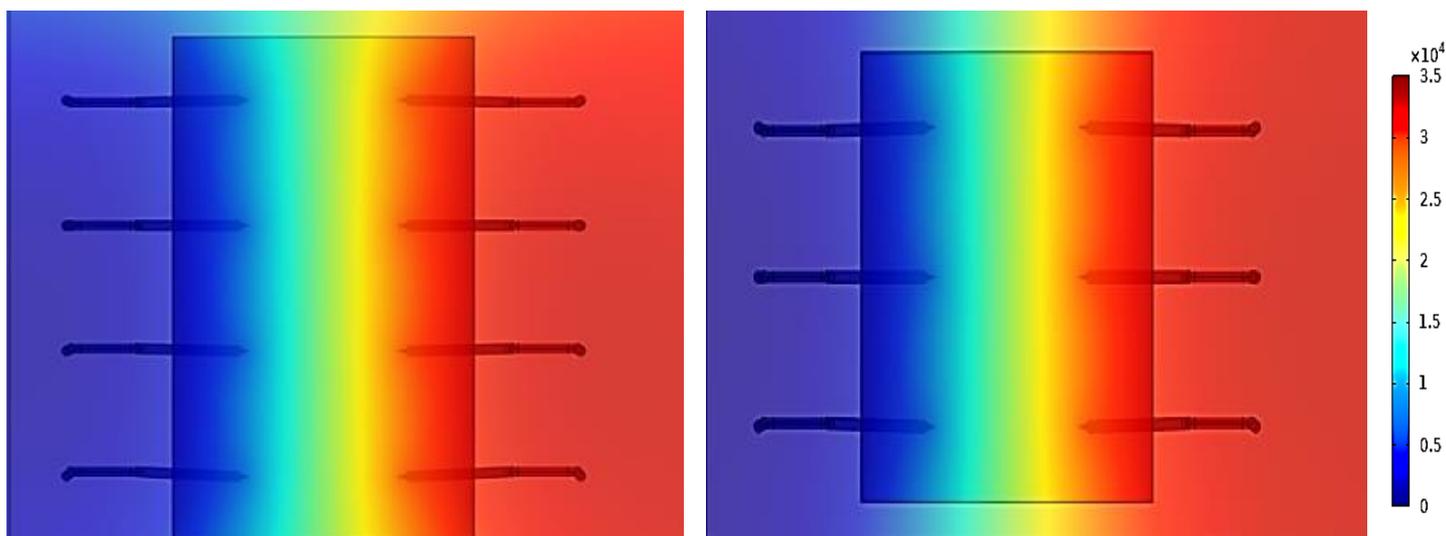
5.4.2 Cas des électrodes pointes-pointes

Dans cette partie, nous avons caractérisé le nombre des points critiques en parallèle et les localisés sur une surface isolant propre puis polluée uniformément et des largeurs variables, délimitée par une configuration d'électrodes à géométrie distincte (1 pointe-1 pointe, 2 pointes-2 pointes, 3 pointes-3 pointes, 4 pointes-4 pointes).

La simulation a été effectuée en absence de pollution entre les électrodes. Ceci a été fait afin d'avoir des valeurs de référence de la distribution du potentiel et le champ électrique, ensuite, une valeur de la conductivité de la couche de pollution ($\sigma_v = 10$ mS/cm), est utilisée. Les bornes des électrodes de haute tension et de masse sont parallèles.

La figure (5.13) représente la répartition de la tension électrique en fonction de longueur d'isolateur en utilisant un système d'électrodes pointes-pointes.

La longueur de la ligne de fuite est maintenue constante et vaut $L_f = 10$ cm pour les 4 configurations étudiées.



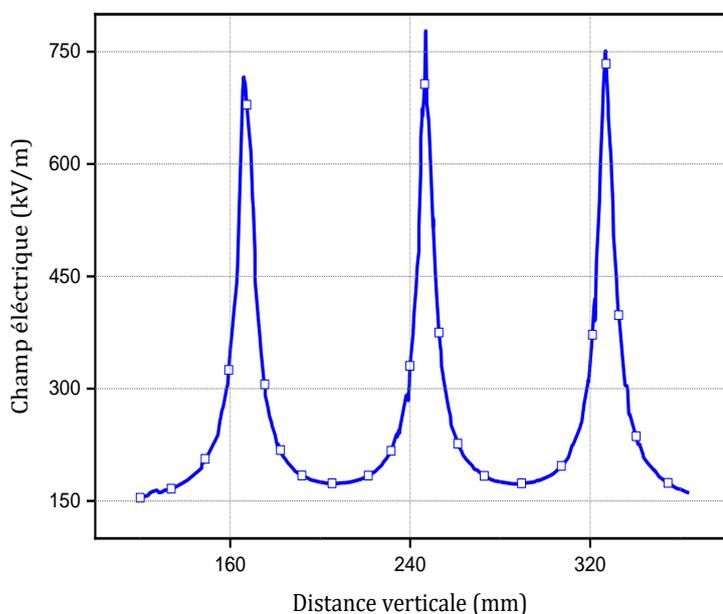
a) Cas 4 pointes-4 pointes

b) Cas 3 pointes-3 pointes

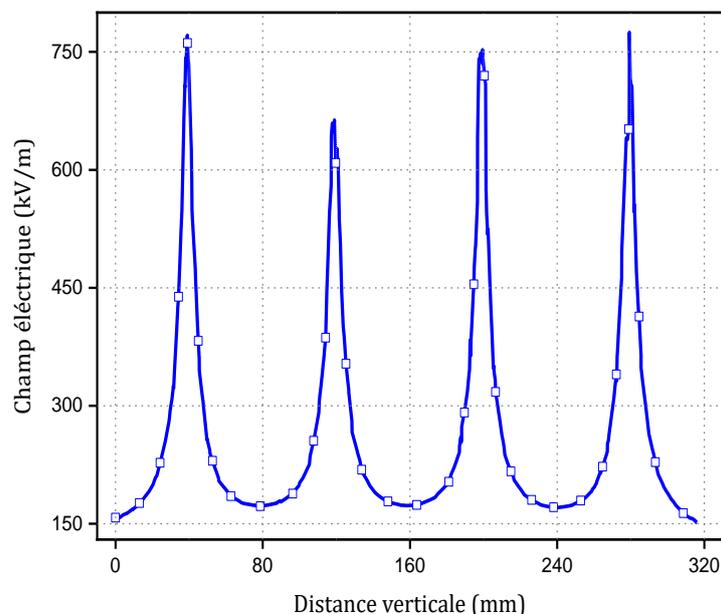
Figure 5.13 Distribution du potentiels électrique cas propre

La figure 5.14 illustre la variation du potentiel électrique le long de la plaque isolante, Comme on peut le voir, la forme générale des courbes est similaire dans l'intervalle allant de la faible largeur jusqu'à la largeur maximale.

On peut dire qu'une largeur de bande polluée égale à 8 cm qui est appelée "largeur efficace" correspond à la distance minimale entre deux points critiques parallèles multiples consécutifs



a) Cas 3 pointes-3 pointes



b) Cas 4 pointes-4 pointes

Figure 5.14 Distribution du champ électrique

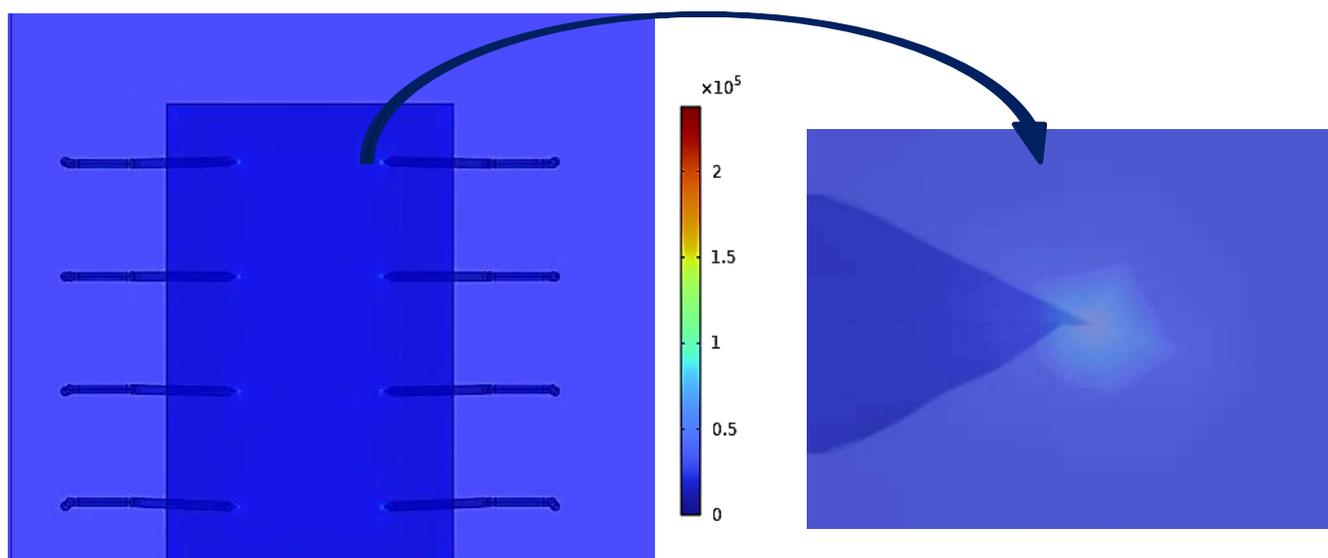
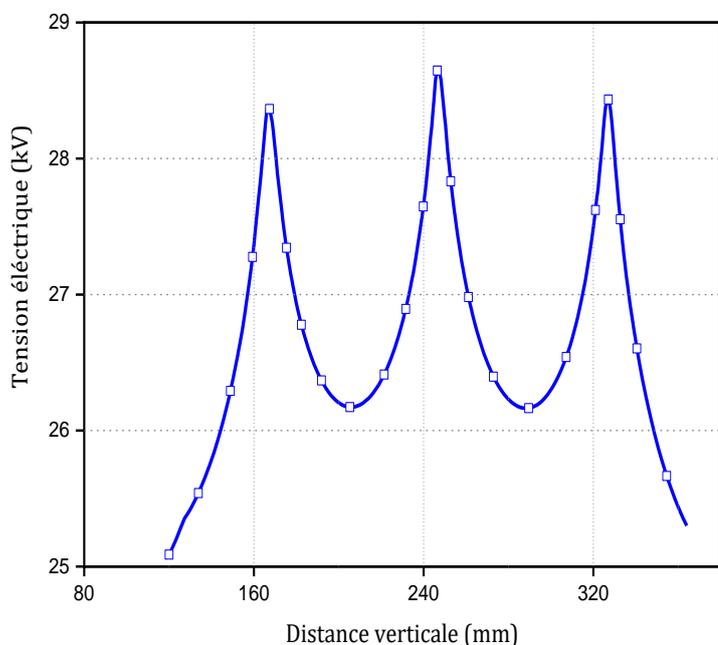


Figure 5.15 Répartition du champ électrique

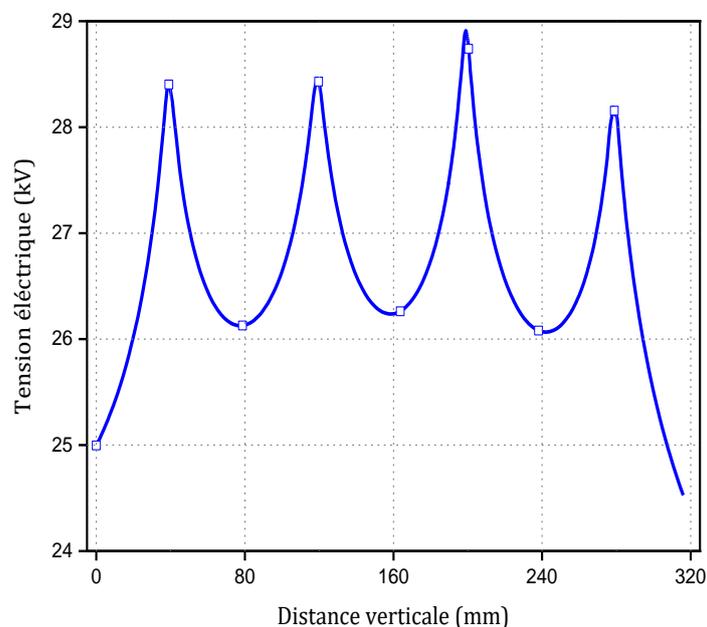
La figure 5.16 présente la répartition du champ électrique en fonction de longueur d'isolateur en utilisant un système d'électrodes pointes-pointes.

La déformation du champ est causée par l'effet de la différence entre les permittivités des matériaux isolants (verre) et l'air.

Le champ est concentré dans les pointes et son valeur est minimale entre eux.



a) Cas 3 pointes-3 points



b) Cas 4 pointes-4 points

Figure 5.16 Variation du potentiel électrique

La figure 5.17 montre le tracé de la répartition du champ électrique pour différents systèmes d'électrodes. Ce paramètre est tracé en fonction de la largeur de la plaque.

Comme on peut le voir sur la figure 5.17, le champ électrique chute rapidement entre deux électrodes successives, la largeur est d'environ 8 cm. En comparant les différentes parcelles, on peut dire qu'elles présentent une tendance similaire. En effet elle permet d'une part de vérifier son uniformité et de l'autre part de localiser les points critiques sur la surface des isolateurs.

Le changement de configuration du système d'électrodes n'a pas d'effet sur la distribution du champ électrique. Ils indiquent également que l'augmentation du nombre des pointes aura tendance à réduire l'écart du potentiel électrique entre les deux configurations de système d'électrodes.

Ces observations nous amènent à dire qu'il existe une équivalence électrique entre les systèmes multi pointes-pointes et plan-plan et que la longueur de 8 cm est une limite entre deux points critiques.

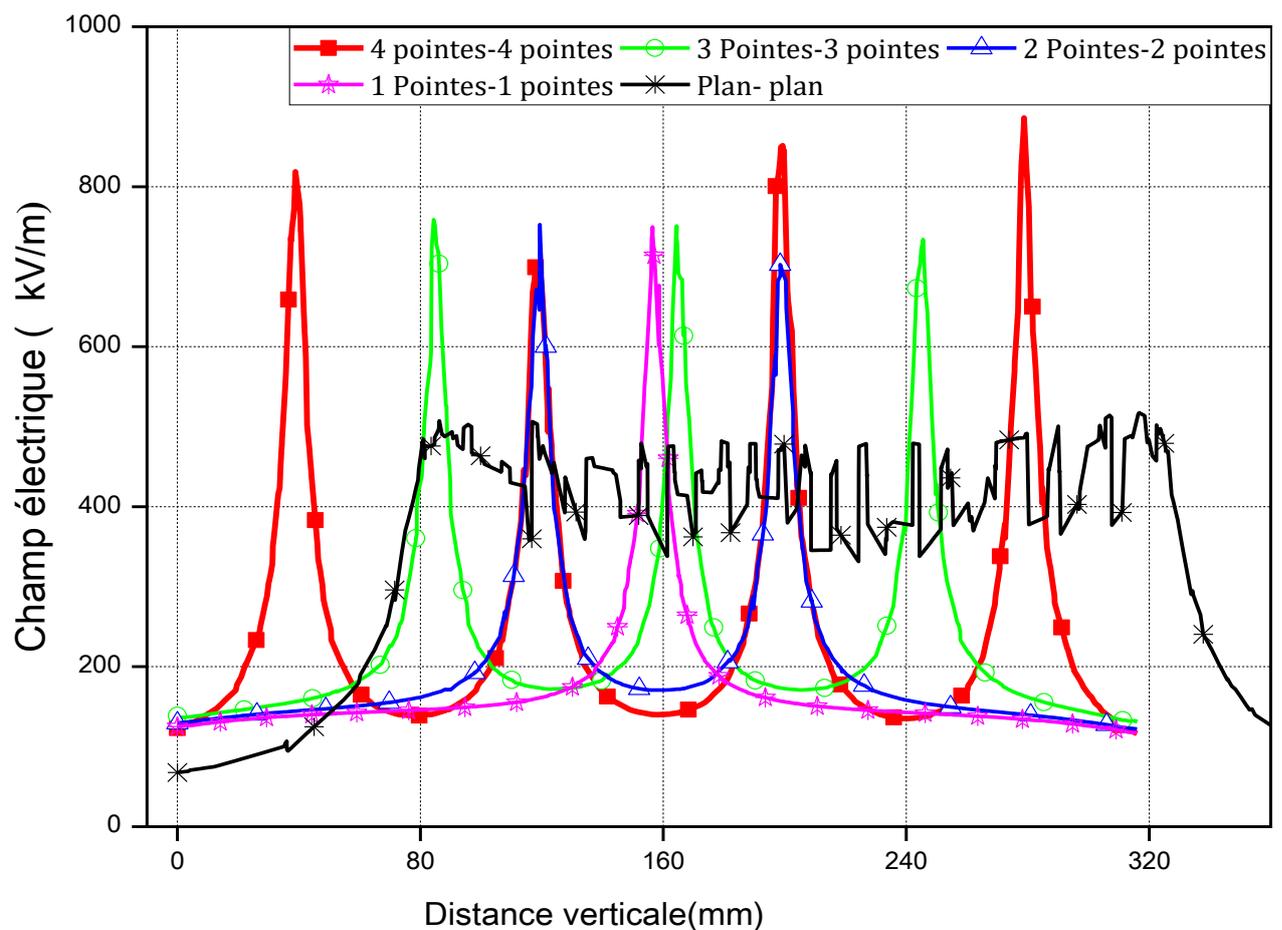


figure 5.17 Répartition du champ électrique (L= 320 mm)

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié l'état de surface d'un isolant plate pour voir la distribution du potentiel et du champ électriques.

Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Mutliphysics basé sur la méthode des éléments finis.

Les résultats de simulation obtenus concernent la distribution du champ électrique ainsi la distribution du potentiel électrique en fonction de la distance de la largeur et la ligne de fuite de la plaque isolante.

Nous avons clôturé notre chapitre par une comparaison entre les deux configurations pointes-pointes et plan-plan.

Comme principaux résultats, nous pouvons dire que :

- Le champ maximal est atteint au niveau de l'électrode masse quelles que soient les dimensions de l'isolateur donc le champ reste relativement élevé au niveau du l'électrode HT.
- L'isolateur est plus rigide dans le cas propre, et devient moins rigide dans le cas polluée.
- La distribution du potentiel et du champ électrique fortement influence par les caractéristiques électriques de la couche de pollution.
- Le champ est relativement intense au niveau de l'électrode HT à l'état pollué.
- La conductivité de la couche polluante n'a pratiquement pas d'effet sur les répartitions du potentiel et du champ électriques. Par contre l'état de surface de l'isolateur influe sur la répartition du champ électrique.
- Dans les régions humides la distribution de tension le long de l'isolateur est non uniforme.
- l'augmentation du nombre des pointes aura tendance à réduire l'écart de tension entre les deux configurations d'électrodes.
- la longueur de 8 cm est une limite entre deux pointes critiques.
- Une équivalence électrique entre les systèmes multi pointes-pointes et plan-plan

Chapitre 06

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

6.1 Conclusion

Dans ce travail, des approfondis ont été réalisés pour caractériser la largeur effective de décharges électriques parallèles partielles évoluant indépendamment sur une grande surface isolante sous tension alternative.

Des essais ont été réalisés dans des conditions de pollution artificielle basées sur la méthode de la couche de pollution appliquée sur une surface de verre, en tenant compte de l'influence de plusieurs paramètres tels que la largeur polluée, la longueur de la ligne de fuite, la conductivité et les configurations du système d'électrodes.

D'après les données recueillies à partir des essais présentés, on peut conclure que la périmètre de l'isolant joue un rôle important en contribuant au développement des décharges sur sa surface et affecte grandement la tension de contournement et le nombre d'arcs parallèles. Par cela dictera les performances de contournement de l'isolateur.

Ces résultats ont montré qu'un seul arc électrique se propage jusqu'au contournement pour un petit isolant lorsqu'il est uniformément contaminé. Cependant, plusieurs arcs partiels parallèles ont été observés pour les gros isolateurs. Ces arcs se développent pour alimenter un seul arc et peuvent se développer jusqu'à un contournement complet. Des tests en laboratoire ont révélé qu'une largeur efficace est nécessaire pour qu'une décharge partielle se produise. Cette valeur est approximativement égale à 8 cm. Cette limite correspond aux performances électriques minimales de l'isolant.

Par conséquent, on peut conclure que les isolateurs de petit diamètre présentent des valeurs de tension de contournement plus élevées que ceux de grand diamètre.

Dans le même temps, l'analyse de la vidéo enregistrée pendant les tests a montré l'équivalence entre la configuration plan-plan et le système d'électrodes multi-pointes-

pointe. Enfin, le nombre d'arcs parallèles dépend étroitement de la largeur effective.

Nous avons également montré que, lorsque la surface de l'isolant est uniformément polluée, deux arcs parallèles indépendants critiques peuvent coexister sur sa largeur et chacun d'entre eux peut se transformer en un arc de contournement. Toutefois, dans le cas d'une distribution de pollution transversale non uniforme sur la même surface de l'isolant, divisé en deux parties inégales et différemment contaminées, la zone fortement polluée qui est souvent court-circuitée parce que, le développement de l'arc électrique précurseur dans cette zone est très en avance par rapport à la zone de conductivité faible. Cette observation peut être quantifiée par la différence dans le temps de démarrage de ces arcs qui augmentent avec la différence de conductivité de surface des deux zones.

La deuxième partie concerne l'étude de l'état de surface d'un isolant plat pour voir la distribution du potentiel et du champ électriques en fonction de la distance de la largeur et la ligne de fuite. Les résultats obtenus montrent que :

- Le champ maximal est atteint au niveau de l'électrode masse quelles que soient les dimensions de l'isolateur donc le champ reste relativement élevé au niveau du l'électrode HT.
- L'isolateur est plus rigide dans le cas propre, et devient moins rigide dans le cas polluée.
- La distribution du potentiel et du champ électrique fortement influence par les caractéristiques électriques de la couche de pollution.
- Le champ est relativement intense au niveau de l'électrode HT à l'état pollué.
- La conductivité de la couche polluante n'a pratiquement pas d'effet sur les répartitions du potentiel et du champ électriques. Par contre l'état de surface de l'isolateur influe sur la répartition du champ électrique.
- Dans les régions humides la distribution de tension le long de l'isolateur est non uniforme.
- l'augmentation du nombre des pointes aura tendance à réduire l'écart de tension entre les deux configurations d'électrodes.
- la longueur de 8 cm est une limite entre deux pointes critiques.
- Une équivalence électrique entre les systèmes multi pointes-pointes et plan-plan.

6.2 Recommandations

En perspective et pour une meilleure caractérisation de la largeur effective d'une décharge électrique et pour une bonne compréhension et approfondissement du phénomène de contournement d'une isolation en verre court-circuitée suite au développement de plusieurs arcs électriques en parallèle sur sa surface, il est souhaitable de mesurer plutôt le courant électrique juste avant le contournement puisque c'est la grandeur la plus fiable de la caractérisation de la performance d'un isolateur vu que celle-ci tient compte de l'échauffement temporaire de la couche de pollution recouvrant l'isolateur. La valeur de celui-ci est proportionnelle au nombre de décharges électriques existant dans la dernière phase de court-circuit de l'isolation et qui est fonction de la largeur effective de la couche de pollution déposée sur l'isolation.

Il sera aussi très intéressant d'étudier l'impact du rayon de courbure des électrodes de base sur le nombre de décharges électriques évoluant sur l'isolation polluée avant le contournement final de celle-ci et les conséquences sur sa performance électrique.

Références Bibliographiques

Chapitre 01

- [1.1] S. Gopal, Y. N. Rao, "Flashover phenomena of polluted insulators", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 131, No. 4, pp. 140-143, April 1984.
- [1.2] J.S.T. Looms, "Insulators for high voltages," IEE Power Engineering Series, vol.7, PeterPeregrinus Ltd., ISBN 9780863411168, 1988.
- [1.3] S. Allali, Y. Nakes, and T. Guia, "Study of high voltage insulator's flashover," these de master, Université Echahid Hamma Lakhdar, El-Oued, 2019.
- [1.4] CEI 815, "Guide pour le choix des isolateurs sous pollution", 1986.
- [1.5] T. Wildi, "Electrotechnique", 3ème Edition de Boeck Université rue des Minimes, Bruxelles, 1999.
- [1.6] M. A. B. El- Koshairy et F. E. M. Rizk, "Comportement des isolateurs des lignes de transport à THT dans des conditions de pollution désertiques", Cigré, pp 33-05, 1978.
- [1.7] K. Naito, "Insulator pollution. Part 1 : General aspect", Séminaire des isolements des lignes et des postes HT, Casablanca, March, 1989.
- [1.8] P. J. Lambeth, "Effect of pollution on high-voltage outdoor insulators," Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 118, no. 9R, pp. 1107–1130, 1971, doi: 10.1049/piee.1971.0245.
- [1.9] P. Claverie, "Predetermination of the Behaviour of Polluted Insulators," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-90, no. 4, pp. 1902–1908, Jul. 1971, doi: 10.1109/TPAS.1971.293185.
- [1.10] L. J. Williams, "Contamination insulators. Dependence of flashover voltage and salt migration", IEEE Trans. On PAS, Vol. 93, n°5, 1974.
- [1.11] P. J. Lambeth, "Effect of pollution on HV outdoor insulators", Proc. IEE, vol. 118, pp. 1107-1130, 1971.
- [1.12] A. M. Rahal and C. Huraux, "Flashover Mechanism of High Voltage Insulators", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. Pas- 98, N. 6, pp. 2223-2231, 1979.
- [1.13] M. Dubois, "Matériaux isolants", IGEE-403 Matériaux de l'électrotechnique, 2006.
- [1.14] X. Ducouret, "Overhead lines: equipments. Insulators", Techniques de

l'ingénieur. Génie Electrique, vol. D9, Iss, D181, pp. D4423-1-D4423-10, Feb 2004.

- [1.15] Hydro-Québec, "Vocabulaire illustré des lignes aériennes de transport et de distribution d'électricité, Fascicule 2 : les conducteurs et les isolateurs", Hydro-Québec, Décembre 1983.
- [1.16] H.M. Schneider, J.F. Hall and G.G.Karady., "Non ceramic Insulators for Transmission Lines", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.4, No.4, April 1989, pp.2214-2221.
- [1.17] X. Liang, S. Wang, J. Fan, and G. Zhicheng, "Development of composite insulators in China," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 6, pp. 586-594, 1999.
- [1.18] T. Kikuchi, S. Nishimura, M. Nagao, K. Izumi, "Survey on the use of non-ceramic composite insulators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 6, pp. 548-556, 1999.

Chapitre 02

- [2.1] J. M. Haussonne, "Les verres pour l'isolement électrique", Techniques de l'ingénieur. Génie Electrique, RI 42255, pp. D2325, Février 2010.
- [2.2] G. L. Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lalot, C. Dubanton, "Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions", collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, éditions EYROLLES, 1984.
- [2.3] M. A. Douar, "Recherche de matériaux isolants pour la conception d'une nouvelle génération de connecteurs électriques Haute Tension Influence de la pollution sur les phénomènes de décharges partielles du contournement et de claquage" Thèse de doctorat, Génie Electrique, Ecole Centrale de Lyon, 2014.
- [2.4] M. Slama, "Contribution à l'étude de l'influence de la non-uniformité de la pollution basée sur la méthode de la D.D.S.E pour le dimensionnement des isolateurs des lignes T.H.T a courant alternatif," Oran, thèse de Magister, juin 2002.
- [2.5] M. Ehsani, H. Borsi, E. Gockenbach, "An investigation of dynamic mechanical and electrical properties of housing materials for outdoor polymeric insulators". Eur Polym J 40(11):2495–2503, 2004.
- [2.6] A. Cavallini, S. Chandrasekar, G. C. Montanari, F. Puletti, "Inferring Ceramic Insulator Pollution by an Innovative Approach Resorting to PD Detection", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, No. 1, February 2007.
- [2.7] S. Hesketh, "General Criterion for the Prediction of Pollution Flashover", Proc. IEE, Vol. 114, n° 4, pp. 531-532, April 1967.

- [2.8] P. Claverie and Y. Porcheron, "How to Choose Insulators for Polluted Areas", IEEE Trans. PAS, Vol. 92, n° 3, pp. 1121-1131, 1973.
- [2.9] H. H. Woodson and A. J. Mac Elroy, "Insulators with Contaminated Surface, Part II, Modeling of Discharge Mechanisms", IEEE, Trans. PASS, Vol. 89, n° 8, pp. 1858-1867, Nov-Dec 1970.
- [2.10] F. A. M. Rizk, "A criterion for AC flashover of contaminated insulators", IEEE Winter Power Meeting, n° 71, CP 135-PWR, 1971.
- [2.11] S. Gopal and Y. N. Rao, "Flashover Phenomena of Polluted Insulators", IEEE Proc., Vol. 131, Pl. C, n° 4, pp. 140-143, July 1984.
- [2.12] S. Anjana and C. S. Lakshminarasmha, "Computed of Flashover Voltages of Polluted Insulators Using Dynamic Arc Model", 6th International Symposium on High Voltage Engineering, paper 30.09, New Orleans, USA, 1989.
- [2.13] D. C. Jolly and S. T. Chu, "Surface electrical Breakdown of Tin Oxide Coated Glass", J. Appl. Phys., Vol. 50, pp. 6196-6199, 1975.
- [2.14] N. Dhahbi-Megrache, A. Beroual and L. Krahenbuhl, "A New Proposal Model for Polluted Insulators Flashover", Journal of Physics D: Appl. Phys. Vol. 30, n° 5, pp. 889-894, March 1997.
- [2.15] F. A. M. Rizk, "Application of Dimensional Analysis to Flashover Characteristics of Polluted Insulators", Proc. IEE, Vol. 117, pp. 2257-2260, 1970.
- [2.16] N. Dhahbi-Megrache and A. Beroual, "Dynamic Model of Discharge Propagation on Polluted Surface under Impulse Voltage", IEE, Proc-Gener. Transm. Distrib., Vol. 147, n° 5, pp. 279-284, September 2000.
- [2.17] H. Matsuo, T. Fujishima, T. Yamashita, "Shape of Contacting Surface between an Electrolytic Solution and Local Discharge on it", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 10, n° 4, pp. 634-640, August 2003.
- [2.18] N. I. Elkalashy, M. Lehtonen, A. H. Darwish, A. M. Izzularab, A. M. I. Taalab, "Modeling and Experimental Verification of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 2, pp. 375 - 383, April 2007.
- [2.19] E. H. A. M. Rahal, "Sur les Mécanismes Physiques du Contournement des Isolateurs Haute Tension", Thèse de Doctorat ès Sciences Physiques, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1979.
- [2.20] H. Matsuo, T. Fujishima, T. Yamashita, "Propagation Velocity and Photoemission Intensity of a Local Discharge on an Electrolytic Surface", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 3, n° 3, pp. 444 - 449, June 1996.

- [2.21] D. A. Swift, "Flashover of polluted Insulators", 6th International Symposium, on HV Engineering, New Orleans, USA, n° 31,1989.
- [2.22] A. Mishra, R. Gorur, and S. Venkataraman, "Evaluation of porcelain and toughened glass suspension insulators removed from service," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, no. 2, pp. 467–475, Apr. 2008, doi: 10.1109/TDEI.2008.4483466.
- [2.23] F. Hampton, "Flashover mechanism of polluted insulation," Electronics and Power, vol. 10, no. 4, 1964, doi: 10.1049/ep.1964.0112.
- [2.24] R. Wilkins, "Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films," Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 116, no. 3, pp. 457–465, 1969, doi: 10.1049/piee.1969.0093.
- [2.25] H. Matsuo, T. Yamashita, and T. Fujishima, "Shape of contacting surface between an electrolytic solution and local discharge on it," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 10, no. 4, pp. 634–640, Aug. 2003, doi: 10.1109/TDEI.2003.1219648.
- [2.26] A. Mekhaldi, D. Namane, S. Bouazabia, and A. Beroual, "Flashover of discontinuous pollution layer on HV insulators," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 6, no. 6, pp. 900–906, 1999, doi: 10.1109/94.822035.
- [2.27] Z. Zhang, X. Jiang, Y. Chao, L. Chen, C. Sun, and J. Hu, "Study on DC pollution flashover performance of various types of long string insulators under low atmospheric pressure conditions," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 2132–2142, Oct. 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2049132.
- [2.28] O. Takenouchi, T. Yamashita, K. K. Ooishi, T. Fujishima, "Propagation Characteristics of Local Discharge on an Electrolytic Surface", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, paper 32-14, Graz, Austria, 1995
- [2.29] A. Beroual, "Electronic gaseous process in the breakdown phenomena of dielectric liquids", J. Appl. Phys. Vol. 73, pp. 4528-4533, 1993.
- [2.30] J. Pilling, E. Kynas and L. Berndt, "Dimensioning Insulators for HV Components, Subject to the Influence of a Covering Extraneous Film", Elektrische, Vol. 44, pp. 486-489, Germany, 1990.
- [2.31] G. Pyrène, A. M. Rahal and C. Huraux, "Flashover of a Liquid Conducting Film, Part. 2: Time to Flashover-Mechanisms", IEEE Trans. On Elect. Insul. Vol. 17, n° 1, pp. 10-19, 1982.
- [2.32] M. Pollentes, "l'Utilisation des Modèles de Laboratoire pour l'Etude de la Tenue au Contournement des Isolateurs Pollués", Thèse de l'Université Paul Sabatier,

Toulouse, France, 1996.

- [2.33] R. Boudissa, A. Bayadi, and R. Baersch, "Effect of pollution distribution class on insulators flashover under AC voltage," *Electric Power Systems Research*, vol. 104, pp. 176–182, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.epsr.2013.06.009.
- [3.34] N. Bouatia, N. Benouaret, and R. Boudissa, "Research of the equivalence of electrical performance between two plane-plane and point-point configurations with two polluted barriers under alternating current," these de master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2016.
- [3.35] M. Khatib, "Influence of Diameter on the Flashover of Polluted Overhead Line Insulators under Alternating Voltage", Ph. D. thesis, Université de Dresden, Germany, 1989.
- [2.34] M.T. Gencoglu, "The comparison of ceramic and non-ceramic insulators", *e-Journal of New World Sciences Academy*, vol.2,no.4,pp.274-294,2007.
- [2.35] W. Taibi, K.Abdeli, "Modèle d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, Juin 2002, Algérie.
- [2.36] CIGRE Working group 33-04, "the measurement of site pollution severity and its application to insulators dimensioning" *Electra*, n° 5, pp. 101-116, 1979.
- [2.37] S. Gorur, "Prediction of flashover voltage of insulators using low voltage surface resistance measurement", *Power Systems Engineering Research Center*, November 2006.
- [2.38] D. Habib, M. Khalifa, "A new monitor for pollution on power line insulators. Part 1: Design, construction and preliminary tests", *IEE Proceedings*, Vol. 133, Pt. C, n° 2, march 1986.
- [2.39] CEI Publication 507 : "Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés aux réseaux à courant alternatif, " Second Edition 1991-04.
- [2.40] IEC 60815-1:2008, "Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions, Part1: definitions, information and general principles," 2008.
- [2.41] CEI 60672 : "Matériaux isolants à base de céramique ou de verre", 1997.
- [2.42] CEI 60305, "Isolateurs pour lignes aériennes de tension nominale supérieure à 1000 V en matière céramique ou en verre pour systèmes à courant alternatif- Caractéristiques des éléments d'isolateurs du type capot et tige", 1995.
- [2.43] CEI 243, "Méthodes d'essai pour la détermination de la rigidité diélectrique des

matériaux isolants solides", 1988.

- [2.44] CEI 60243-1, "Rigidité diélectrique des matériaux isolants. Méthodes d'essai. Partie 1 : essais aux fréquences industrielles," 1998.
- [2.45] CEI 93, "Méthodes pour la mesure de la résistivité transversale et de la résistivité superficielle des matériaux isolants électriques solides", 1982.
- [2.46] CEI 167, "Méthodes d'essai pour la détermination de la résistance d'isolement des isolants solides", 1964.
- [2.47] E. Bartinikas, B. Eichhorn, "Electrical properties of solid insulating materials: molecular structure and electrical behavior", Engineering dielectrics. Vol. II A. ASTM. STP 783, 1983.
- [2.48] M. E.-A. Slama, A. Beroual, and H. Hadi, "Influence of pollution constituents on DC flashover of high voltage insulators," Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.20, no.2, pp.401–408, Apr.2013, doi: 10.1109/TDEI.2013.6508740.
- [2.49] N. Merzougui and H. Merzougui, "Diagnosis of the surface condition of a high voltage insulator using (current flow problem)," these de master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, 2019.
- [2.50] U. Straumann and M. Semmler, "About the mechanism of tonal emission from high voltage lines", 15th Int. Conf. on Gas Discharges and Their Applications, Toulouse, France, Vol. 1, pp. 363-366, 2004.
- [2.51] PJ. Lambeth, HM. Schneider, Beausejour Y, Dumora D, Kawamura T, Marrone G, Stearns R "Final report on the clean fog test for HVAC insulators," IEEE Trans Power Deliv 2(4):1317–1326, 1987
- [2.52] CIGRE working group 22-03, "Worldwide service experience with HV composite insulators," Electra, n° 191, pp. 27–43, August 2000.
- [2.53] CIGRE WG C4.303, "Outdoor Insulation in Polluted Conditions: Guidelines for Selection and Dimensioning - Part 2: The DC Case", CIGRE Technical Brochure 518, 2012
- [2.54] G. G. Karady, "Flashover mechanism of non-ceramic insulators," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 6, N°. 5, pp. 718–723, 1999.
- [2.55] P.R. Bruins, "Epoxy Resin Technology," Interscience Publishers, Copyright 1968 by John Wiley & Sons, Inc., LCCCN: 68-21489, p. 1
- [2.56] E. Cherney, and D. Stonkus, "Non-Ceramic Insulators for Contaminated Environments," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100(1),

pp.131-142, 1981.

- [2.57] J. M. Seifert, W. Petrusch, H. Janssen, "A comparison of the pollution performance of long rod and disc type HVDC insulators", IEEE Trans.on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 1, pp. 125 - 129, February 2007.
- [2.58] K. Kannus, V. Verkkonen, E. Lakervi, "Effects of Ice Coating on the AC Performance of Medium Voltage Insulators", Nordic Symposium on Electrical Insulation, NORD-IS 86, Esbo, Finlande, pp. 1-11, Juin 1986.
- [2.59] NF C 66-233, "Insulators and Fittings for Overhead Lines - Glass Insulators for Voltages Higher Than 1000 Volts - Pin-fixed Three Pieces Insulators", 1981.

Chapitre 03

- [3.1] D. Hinde, B. Eng, "discharges on the surfaces of High voltage composite insulators," Ph.D. Thesis, TU Darmstadt University of Technology Australia 2009.
- [3.2] N. Dhahbi, "Modélisation Dynamique des Décharges sur les Surfaces d'Isolateurs Pollués sous Différentes Formes de Tensions : Elaboration d'un Critère Analytique de Propagation", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Ecole Centrale de Lyon, France, 1998.
- [3.3] R. Boudissa, S. Djafri, A. Haddad R. Belaicha, "Effect of Insulator shape on Surface Discharges and Flashover under Polluted Conditions" IEEE Transactions on dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, n° 3, pp. 429-437, June 2005.
- [3.4] F. Bouchelga and R. Boudissa, "Effect of the development of electrical parallel discharges on performance of polluted insulators under DC voltage," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, no. 4, pp. 2224–2233, Aug. 2015, doi: 10.1109/TDEI.2015.005068.
- [3.5] L. L. Alston and S. Zoledziowski, "Growth of Discharges on Polluted Insulators", IEEE. Trans. PASS, Vol. 110, n° 7, pp. 1260-1266, July 1963.
- [3.6] J. Danis, "A Stochastic Pollution Flashover Model", 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Athens, Paper 46.12, Vol. II, September 1983.
- [3.7] P. Claverie, "Predetermination of the Behaviour of Polluted Insulators", IEEE Trans. PAS, Vol. 92, n° 3, pp. 1121-1131, 1973.
- [3.8] B. F. Hampton, "Flashover Mechanism of Polluted Insulation", Proc. IEE, Vol. 111, n° 5, pp. 985-990, May 1964.
- [3.9] R. Wilkins and A. A. J. Al-Baghdadi, "Arc Propagation along an Electrolytic Surface", Proc. IEE, Vol. 118, pp. 1886-1892, 1971.

- [3.10] G. Peyregne, "Etude en Régime Dynamique du Contournement par Décharges de Surface Isolante Rendue Faiblement Conductrice", Thèse de Docteur Ingénieur, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1981.
- [3.11] T. Yamashita, H. Matsuo, H. Fujiyama, T. Oshige, "Electrode fall of local discharge on an electrolytic surface", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 23, Issue 6, pp. 979- 986, 1988.
- [3.12] R. S. Gorur, J. Montesinos, L. Varadadesikan, S. Simmons and M. Shah, "A laboratory test for tracking and erosion resistance of HV outdoor insulation", IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, n° 6, pp. 767-774, December 1997.
- [3.13] S. Guan Zhanga and Z. Zhang Renyu, "Calculation of DC and AC Flashover Voltage of Polluted Insulators", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 25, n° 4, pp. 723-728, 1990.
- [3.14] N. Dhahbi-Megrache and A. Beroual, "Flashover Dynamic Model of Polluted Insulators under ac Voltage", IEEE Trans, Vol. 7, n° 2, pp. 283-289, April 2000.
- [3.15] C. Tavakoli, M. Farzaneh, I. Fofana and A. Beroual, "Dynamics and Modelling of AC Arc on Surface of Ice", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol 13, n° 6, pp. 1278-1285, December 2006.
- [3.16] S. Farokhi, "Mécanismes de propagation de l'arc électrique à la surface de glace ", Thèse de doctorat en Génie, UQAC, Québec, Canada, Décembre 2010.
- [3.16] I. Ndiaye, "Approche physique du développement de streamers sur une surface de glace", Thèse de Doctorat en Génie, UQAC, Québec, Canada, Octobre 2007.
- [3.17] J. Zhang and M. Farzaneh, "Propagation of AC and DC Arcs on Ice Surfaces", IEEE Trans, on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, n° 2, pp. 269-276, 2000
- [3.18] W. L. Vosloo, R. E. Macey and C. de Turreil. "The Practical Guide to Outdoor High Voltage Insulators". Johannesburg, South Africa," Crown Publications CC, July 2004.
- [3.19] E. Cherney, "Non-Ceramic insulators a simple design that requires careful analysis", Electrical Insulation Magazine, IEEE, N°12, pp. 7-15, 1996.
- [3.20] S. Gubanski, and R. Hartings", Swedish research on the application of composite insulators in outdoor insulation, "Electrical Insulation Magazine, IEEE, N°11, pp.24-31, 1995.
- [3.22] A. Gorur, J. T. Burnham, "Laboratory Wet Tests Artificially Contaminated Nonceramic and Ceramic Insulators", 10th International Symposium on High

Voltage Engineering, Montréal, Québec Canada, August 25-29, 1997.

- [3.24] R. Gorur, E. Cherney, R. Hackam, "The electrical performance of polymeric insulating materials under accelerated aging in a fog chamber," *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 3, N°3, pp. 1157-1164, Jul. 1988.
- [3.25] R. Gorur, D. Shaffner, W. Clark, "Utilities share their field experience," *Transmission & Distribution World Magazine*, pp.17-27, 2005.
- [3.26] G.G. Karady, H.M. Schneider and F.A.M. Rizk., "Review of Cigre and IEEE Research into Pollution Performance of Non ceramic Insulators: Field Aging Effects and Laboratory Test Techniques",*Cigre1994 Session, August/September 1994, paper No.33-103.*
- [3.27] U. Kaltenborn, J. Kindersberger, and J. Speck, "Surface behaviour of epoxy castings during the early ageing period," in *Proceedings of the 1998 IEEE 6th International conference in Solid Dielectrics, 1998. ICSD*, pp.269–272, 1998.
- [3.28] S. Venkataraman and R. S. Gorur, "Prediction of flashover voltage of non-ceramic insulators under contaminated conditions," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 13, N° 4, pp. 862–869, Aug. 2006.
- [3.29] RS. Gorur, HM. Schneider, J. Cartwright, "Surface resistance measurements on non-ceramic insulators", *IEEE Trans Power Deliv* 16(4):801–805, 2001.
- [3.30] E. Nasser, "Some Physical Properties of Electrical Discharges on Contaminated-surfaces," *IEEE Trans. Power Appar.Syst.*, vol. PAS-87, no.4, pp.957–963, Apr. 1968.
- [3.31] R. Sundararajan, "Dynamic arc modeling of pollution flashover of insulators under energized with direct current voltage", Ph.D. Dissertation, Dept of Elec Engg, Arizona State University, USA 1993.
- [3.32] B. Hampton, "Flashover Mechanism of Polluted Insulation", *Proc.IEE, III*, pp. 985-990, 1964.

Chapitre 04

- [4.1] S. Melodia, "Mesure de la sévérité de la pollution dans le poste électrique 220/60 kV de Marsat El Hadjadj à côté d'Oran, Algérie", *Séminaires sur la pollution des isolements des lignes et des postes HT. Casablanca, Maroc, Mars 1989.*
- [4.2] M.A. Slama, H. Hadi, S. Flazi, N. Tchouar, "Etude du dépôt de pollution responsable du contournement des isolateurs des lignes aériennes du réseau électrique THT national", *Sciences & Technologie B – N°25*, pp. 43-50. Juin 2007
- [4.3] IEC 507, "Artificial pollution tests on HV. Insulators to be used on AC system",

1975.

- [4.4] IEC62073, "Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces," (IEC/TS2003), 1st edn
- [4.5] CEI 60-1, "Techniques d'essais à haute tension. Partie 1 : Définitions et prescriptions relatives aux essais", 1989.
- [4.6] R. S. Gorur, H. M. Schneider, J. Cartwright, Y. Beusajour, K. Kondo, "Surface resistance measurements on non-ceramic insulators", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.16, pp. 801 -805, Oct.2001.
- [4.7] R. Gorur, A. El-kishky, H. Chowdhary, M. Mukherjee, "Sudden flashover of non-ceramic insulators in artificial contamination tests", IEEE Transaction on Dielectric and electrical insulation, vol. 4, N°. 6, pp. 79-87, 1997.
- [4.8] P. Claverie, "Predetermination of the Behavior of Polluted Insulators," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-90, N°. 4, pp. 1902–1908, Jul. 1971.
- [4.9] M. Farzaneh and J. F. Drapeau, "AC flashover performance of insulators covered with artificial ice," IEEE Trans. Power Deliv. vol. 10, N°. 2, pp. 1038–1051, Apr. 1995.
- [4.10] F. Bouchelga and R. Boudissa, "Effect of the development of electrical parallel discharges on performance of polluted insulators under DC voltage," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, no. 4, pp. 2224-2233, Aug. 2015,
- [4.11] F. Agheloum, N. Raghdi and A. Rahmani, "Recherche de l'équivalence de performance électrique entre deux configurations Plan – Plan et Pointe– Pointe avec deux barrières polluées sous tension continue, " Université Abderrahmane Mira- Bejaia, 2016, URI: <http://univ-bejaia.dz/dspace/123456789/8763> 2017
- [4.12] CIGRE, Working Group 22.03,"World service experience with HV composite insulators," N°130, May 1990.
- [4.13] M.E.A. Slama, A. Beroual, and H. Hadi, "Experimental and mathematical modeling of the effect of non-soluble and low soluble salts and salts mixture pollution on dc flashover of high voltage insulators", Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 757–760, 2012.
- [4.14] M. Khatib, "Influence of diameter on the flashover of polluted overhead line insulators under alternating voltage", Ph.D. thesis, University of Dresden, Germany, 1989.
- [4.15] D. Birtwhistle, "Surface Discharges on Polymeric Insulator Shed Surfaces", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.4, No.2, April 1997, pp.210-

217.

- [4.16] J. Andersson, RS. Guerrero, SM. Gubanski, "Tracking behaviour in the presence of conductive interfacial defects", in 2009 CEIDP'09 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp 230-233, 2009.
- [4.17] I. J. S. Lopes, S.H. Jayaram, E. A. Cherney, "A Study of Partial Discharges from Water", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 6 N°. 2, pp. 262-267, 2001.
- [4.18] V. Moreno, M. Guru, "Corona-induced degradation of non-ceramic insulator housing materials", in Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 640-643, 2001.
- [4.19] A. Vlastos, "Influence of material and electric stress on the performance of polymeric insulators", Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Brisbane, Australia, pp. 542-545, Jul. 1994.
- [4.20] T. Fujishima, T. Yamashita, H. Matsuo, "Estimation of Equivalent Salt Deposit Density from Measurement of Leakage Impedance of an Insulator under Saltwater Spray", 10th International Symposium on HV Engineering, 1997.
- [4.21] A. Gorur, J. Chang, "AC clean fog tests on non-ceramic insulating materials and a comparison with porcelain", IEEE Trans. Power Deliv., vol. 9, N°. 4, pp. 2000–2008, 1994.
- [4.22] E. C. Salthouse, "Initiation of dry bands on polluted insulation", Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 115, no. 11, pp. 1707–1712, 1968, doi: 10.1049/piee.1968.0298.
- [4.23] P. J. Ghosh and N. Chatterjee, "Polluted Insulators Flashover for AC Voltage", IEEE Trans, Vol. 2, pp 128136, 1995.
- [4.24] R. Wilkins, "Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface pollution films", Proc IEE, Vol. 116, No. 3, pp. 457-465, 1969.
- [4.25] S. Nishimura, "Evaluation of the Flashover Voltage-Time Characteristics of Polluted Surface", Trans. of IEE of Japan, Vol. 97-B, n° 11, pp. 693, 1977.

Chapitre 05

- [5.1] K.J. Bathe, "Finite Element Procedures", New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [5.2] H. Wang, Z. Peng, S. Zhang, "Simulation study on E-field distribution and coronacharacteristics of composite insulator", Proceedings of the annual report

conference Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 422-425, 2013.

- [5.3] Z. Rong, Z. Yun, C. Wei-Yuan, and B. Zhang, "Measurement of electric field distribution along composite insulators by integrated optical electric field sensor", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, pp.302-310, 2008.
- [5.4] B. Marungsri, W. Onchantuek, A. Oonsivilai, T. Kulworawanichpong, "Analysis of Electric Field and Potential Distributions along Surface of Insulators sing Finite Element Method", Academy of Science, Engineering and Technology 53, 2009.
- [5.5] S. Satta, "Contribution à l'étude de l'influence de la pollution discontinue sur le comportement des isolateurs : expérimentation et simulation", Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2010.
- [5.6] A. Rahisham, "Investigations of Zno Microvaristor for Stress Control on Polymeric Outdoor Insulators", thèse de doctorat, cardiff university, august 2012
- [5.7] W. Que, S. Sebo, "Electric Field and Potential Distributions along Dry and Clean Non- Ceramic Insulators of High Voltage Power Lines", IEEE Tranactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 2, pp. 1070 -1078, 2007.
- [5.8] F. A. Jamaludin, M. Z. A. Ab-Kadir, M. Izadi, "Considering the Effects of a RTV Coating to Improve Electrical Insulation against Lightning", international conference on lightning protection, Estoril – Portugal, 25-30 september 2016.
- [5.9] C - A. J. Phillips, A. J. Maxwell, C. S. Engelbrecht I. Gutman, "Electric-Field Limits for the Design of Grading Rings for Composite Line Insulators", IEEE Trans on Power Delivery, Volume 30, Issue: 3. Pages: 1110 – 1118, 2015.
- [5.10] V. Padma, VS. Raghavan, "Analysis of Insulation Degradation in Epoxy Insulators Using Finite Element Method", in 2012 Third International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), pp 498-503, 2012.
- [5.11] F. A. M. Rizk and D. H. Nguyen, "Digital Simulation of Source Insulator Interaction in HVDC Pollution Tests", IEEE, Trans. On Power Delivery, pp. 405-410, 1988.
- [5.12] F. Aouabed, " Contribution à l'étude et à l'évaluation des performances électriques des isolations en silicone polluées sous tension alternative", Thèse de Doctorat en Sciences setif-1- 2018
- [5.13] A. Kara, " Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué", Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2013.

ملخص

الهدف العام من هذا البحث هو إجراء دراسات تجريبية تهدف إلى تحليل تطور التفريغات الكهربائية المتوازية على الأسطح العازلة ذات الأحجام المختلفة والملوثة بشكل موحد. علاوة على ذلك ، يتعلق الأمر بإيجاد التكافؤ بين عدة تمثيلات نقطية - نقطية ومستوية مستوية. أجريت الدراسة تحت الجهد المتناوب (AC).

تم تخصيص الجزء الأول من هذا العمل لدراسة تأثيرات العديد من العوامل على قوة العزل الكهربائي لتكوينات الأنظمة التي تم النظر فيها. هذه العوامل هي طول التسرب للعازل ودرجة التلوث وعرض السطح الملوث. تستخدم أسطح زجاجية مستطيلة للاختبار. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن هناك حد عرض يساوي تقريباً 8 سم يمكن أن تتطور بعدها عدة أقواس متوازية ومتتالية ومستقلة. يمثل هذا الحد الأدنى من الأداء الكهربائي للعزل ولم نلاحظ أي تأثير عليه.

في الجزء الثاني ، تم استخدام طريقة عددية لتحليل تأثير تكوينات النظام على المجال الكهربائي ، وأنشطة التفريغ الكهربائي للعزل. لتقييم توزيع المجال الكهربائي على طول خط التسرب للعازل ولتحديد المناطق الرئيسية للحقل الكهربائية ، تم استعمال برنامج COMSOL.

Multiphysics

الكلمات المفتاحية: الجهد المتناوب ، طول التفريغ الفعال ، الزجاج ، نموذج العازل ، درجة التلوث ، التلوث المنتظم ، المجال الكهربائية ، طريقة الحدود المتناهية.

Résumé

Ce travail présente une étude visant à analyser le développement de décharges parallèles sur des surfaces isolantes de différentes largeurs uniformément polluées. De plus, il s'agit de trouver une équivalence entre plusieurs configurations pointes-pointes et plan-plan. L'étude est réalisée sous tension alternative (AC).

La première partie de ce travail est consacrée à l'étude des effets de nombreux paramètres sur la rigidité diélectrique des configurations des systèmes considérées. Ces paramètres sont la longueur de la ligne de fuite, le degré de pollution et la largeur de la surface polluée. Des surfaces rectangulaires en verre sont utilisées pour les tests. Les résultats obtenus montrent qu'il existe une limite de largeur environ égale à 8 cm au-delà de laquelle plusieurs arcs, parallèles, consécutifs et indépendants peuvent se développer. Cette limite représente la performance électrique minimale de l'isolant et nous n'avons observé aucun effet de la conductivité volumique sur celle-ci.

Dans la deuxième partie, une méthode numérique est développée pour analyser l'influence des configurations du système sur le champ électrique, les activités de décharge électrique de l'isolation. Pour évaluer la distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolant et pour identifier les principales régions du champ critique, le logiciel COMSOL Multiphysics a été exploité.

Mots Clés : Tension alternative, Longueur effective, tension de contournement, verre, modèle d'isolateur, Degré de pollution, Pollution uniforme, COMSOL Multiphysics, champ électrique.

Abstract

This work presents a study aiming to analyze the development of parallel discharges on insulating surfaces of different sizes uniformly polluted. Moreover, it is aimed to find equivalence between multiple point-point and plane-plane configurations. The study is carried out under alternating current (AC) voltage.

The first part of this work is devoted to study the effects of many parameters on the electric strength of the considered air gap system configurations are presented. These parameters are the length of the creepage distance, the pollution degree and the contaminated surface width. Glass rectangular surface are used for the tests. Finally, a video camera system is used to support this investigation by laboratory observations of the full process of flashover mechanism. The obtained results show that there is a width limit approximately equal to 8 cm beyond which several arcs, parallel, consecutive and independent can develop. This limit represents the minimal electrical performance of the insulation and we did not observe any effect of the volume conductivity on it.

In the second part, a numerical method is developed for analyzing the influence of the system configurations on the electric field, the electric discharge activities of the insulation. To evaluate the distribution of the electric field along the insulator's creepage distance and to identify the main regions of the critical field, the COMSOL Multiphysics software has been exploited.

Key Words: Alternative voltage, Effective discharge length, Flashover, Glass laboratory, insulator model, Pollution degree, Uniform pollution, COMSOL Multiphysics, electric field.