

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Électrotechnique

Thèse de doctorat présenté par :

Rabie SALHI

Master en Électrotechnique

Pour l'obtention du titre de

Docteur Troisième Cycle (D/LMD) en Électrotechnique

Thème

*Comportements électriques des isolateurs
de haute tension pollués sous
tension alternative*

Soutenue publiquement, le Mardi 02 Juillet 2024 devant le jury composé de :

Président :	MAHMOUDI Mohand-Oulhadj	Prof., ENP
Rapporteurs :	MEKHALDI Abdelouahab	Prof., ENP
	TEGUAR Madjid	Prof., ENP
Examineurs :	MOULAI Hocine	Prof., USTHB
	ABDI Sif-Eddine	MC-A, Univ de Médéa

ENP 2024

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Électrotechnique

Thèse de doctorat présenté par :

Rabie SALHI

Master en Électrotechnique

Pour l'obtention du titre de

Docteur Troisième Cycle (D/LMD) en Électrotechnique

Thème

*Comportements électriques des isolateurs
de haute tension pollués sous
tension alternative*

Soutenue publiquement, le Mardi 02 Juillet 2024 devant le jury composé de :

Président :	MAHMOUDI Mohand-Oulhadj	Prof., ENP
Rapporteurs :	MEKHALDI Abdelouahab	Prof., ENP
	TEGUAR Madjid	Prof., ENP
Examineurs :	MOULAI Hocine	Prof., USTHB
	ABDI Sif-Eddine	MC-A, Univ de Médéa

ENP 2024

ملخص: في هذه الأطروحة، قمنا أولاً بدراسة السلوك الكهربائي للعوازل ذات الجهد العالي. في البداية، تمت الدراسة في المختبر على عازل الزجاج من النوع L1512 تحت جهد متناوب بتردد 50 هرتز. كان اهتمامنا في تحليل الخصائص الكهربائية مثل إشارات التيار الكهربائي المتسرب والشحنة والجهد المطبق لسطح عازل نظيف وملوث. وفقاً للمعيار IEC 60815، تم تطبيق توزيعين للشحنات وهما التوزيع المنتظم والغير منتظم. بعد ذلك، تم إجراء محاكاة تحت بيئة COMSOL لنفس العازل وتمت مقارنة النتائج مع تلك التي تم الحصول عليها من التجربة. وكتتمة ذات فاعلية بالنسبة للتجربة، سمحت لنا هذه المحاكاة بالحصول على توزيعات للحقل والشحنة والجهد الكهربائي، وخطوط كثافة التيار، والنقاط الحرجة التي تظهر بها حقول كهربائية مرتفعة، بالإضافة إلى المناطق التي قد تظهر فيها التفريغات الجزئية. في المرحلة الثانية، كان اهتمامنا يتمحور حول تحسين حلقات الهالة، مع تقليل وزنها الإجمالي، بهدف تقليل شدة الحقل الكهربائي على طول سطح سلاسل العوازل الزجاجية والمركبة المخصصة لخطوط الجهد العالي 400 كيلو فولت. في هذا الصدد، قمنا بتطبيق عملية تحسين استناداً إلى طريقة COBYLA. تهدف هذه العملية إلى تحسين أبعاد حلقة الهالة، وهي أقطار الأنبوب والحلقة، وكذلك ارتفاعها. ثم إجراء إعادة تحسين لشكل الحلقة، تليها عملية دمج عدة حلقات الهالة في المناطق التي تتعرض لأكثر قدر من التشوهات في شكل الحلقة.

كلمات البحث: سلوك كهربائي، عازل، إشارة التيار المتسرب، شحنة، حقل كهربائي، محاكاة، حلقة الهالة، تحسين، COBYLA.

Abstract: In this thesis, we first conducted a study on the electrical behavior of HV insulators. Initially, our study was carried out in the laboratory on the 1512L glass cap and pin insulator under 50 Hz alternating voltage. We have interested to analyze the electrical characteristics of the leakage current, the charge and the applied voltage waveforms, under clean and polluted surface insulator. According to IEC 60815 standard, uniform and non-uniform pollution have been applied. For the same insulator, simulations have been carried out under COMSOL environment. The simulated results have been confronted to experimental ones. As a valid complement, these simulations allowed obtaining the distributions of the electric field, the charge and the potential, the current density streamlines, the critical points with high electric field, as well as the areas where partial discharges are likely to appear. Secondly, we are interested in optimizing the corona rings, while reducing their total weight, in order to reduce the intensity of the electric field along the surface of glass and composite insulator strings intended to 400 kV transmission lines. In this regard, we applied an optimization process based on the COBYLA method to optimize the dimensions of the corona ring, namely the radii of the tube and the ring, as well as its height. A re-optimization of the ring shape was also carried out, followed by the integration of multiple corona rings in areas experiencing high deformations of the ring shape.

Key words: electrical behavior, insulator, leakage current, charge, electric field, simulation, corona ring, optimization, COBYLA.

Résumé : Dans cette thèse, nous avons mené, dans un premier temps, une étude sur le comportement électrique des isolateurs HT. Initialement, notre étude a été réalisée au laboratoire sur l'isolateur à capot et tige en verre de type 1512L sous tension alternative 50 Hz. Nous nous sommes intéressés à analyser les caractéristiques du courant de fuite, de la charge et de la tension appliquée pour une surface d'isolateur propre et polluée. Conformément à la norme IEC 60815, deux répartitions de la pollution ont été appliqués à savoir uniforme et non-uniforme. Pour le même isolateur, des simulations ont été réalisées sous environnement COMSOL. Les résultats simulés ont été confrontés à ceux expérimentaux. Comme complément valable à l'expérimentation, ces simulations nous ont permis d'obtenir les répartitions du champ, de la charge et du potentiel électriques, les lignes de densité de courant, les points critiques présentant un champ électrique élevé, ainsi que les zones où des décharges partielles sont susceptibles d'apparaître. Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à l'optimisation des anneaux de garde, tout en réduisant leur poids total, afin de diminuer l'intensité du champ électrique le long de la surface des chaînes d'isolateurs en verre et en composite destinées à la ligne 400 kV. À cet égard, nous avons appliqué un processus d'optimisation basé sur la méthode COBYLA en vue d'optimiser les dimensions de l'anneau de garde, à savoir les rayons du tube et de l'anneau, ainsi que sa hauteur. Une ré-optimisation de la forme de l'anneau a également été effectuée, suivie par l'intégration d'anneaux de garde multiples dans les zones subissant à fortes déformations de la forme de l'anneau.

Mots clés : comportement électrique, isolateur, courant de fuite, charge, champ électrique, simulation, anneau de garde, optimisation, COBYLA.

Remerciements

Je suis reconnaissant envers le Tout-Puissant, Allah, de m'avoir accordé la force de persévérer jusqu'au bout. Un grand MERCI à ma mère, à mon père ainsi qu'à mes frères et sœurs qui n'ont cessé de m'encourager et de me soutenir. Leur dévouement mérite toute ma reconnaissance et tout l'amour que j'ai pour eux.

En arrivant à la fin de cette thèse, je ressens une profonde gratitude envers les personnes qui m'ont apporté un soutien précieux tout au long de ce parcours.

*Je pense immédiatement à mes directeurs de thèse, Messieurs le Professeur **Abdelouahab MEKHALDI**, directeur de l'École Nationale Polytechnique, et le Professeur **Madjid TEGUAR**, directeur du Laboratoire de Recherche en Électrotechnique de l'École Nationale Polytechnique, pour avoir accepté de diriger et de suivre ce travail avec disponibilité, patience et bienveillance, pour leur incroyable encadrement tout au long de cette recherche. Je leur exprime mes gratitudes pour leurs compétences scientifiques, leurs conseils précieux, ainsi que pour leurs qualités humaines exceptionnelles, leur compréhension et la confiance constante qu'ils m'ont accordée.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Monsieur **Mohand-Oulhadj MAHMOUDI**, Professeur à l'École Nationale Polytechnique, d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.*

*Je souhaite également remercier Monsieur **Hocine MOULAI**, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, ainsi que Monsieur **Sif-Eddine ABDI**, Maître de conférences -A- à l'Université de Médéa, pour avoir accepté d'évaluer et d'examiner mon travail de thèse et pour leur participation au jury.*

*Je tiens également à exprimer mes gratitudes envers le Docteur **Omar KHERIF**, Advanced High Voltage Engineering Research Centre, School of Engineering, Cardiff University, UK, pour ses orientations, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de ce travail.*

Je tiens aussi à remercier tous les enseignants ayant contribué à ma formation et ce depuis le tronc commun jusqu'à la dernière année de graduation.

Dédicaces

Je souhaite dédier humblement ce travail

À mes parents bien-aimés, pour leur soutien indéfectible et leur patience tout au long de mes années de formation ;

À mes frères et sœurs, qui ont toujours été présents pour moi ;

À tous ceux qui m'aiment, à tous ceux que j'aime, et à ceux qui me souhaitent sincèrement le bonheur ;

À tous les étudiants en formation doctorale avec qui j'ai partagé cette expérience ;

Rabie

Table des matières

Liste des Figures.....	
Liste des Tableaux.....	
Introduction Générale.....	14

Chapitre I : État de l'art

I.1. Introduction	19
I.2. Contexte.....	19
I.3. Principaux travaux antérieurs.....	20
I.3.1. Études du comportement électrique sur des isolateurs réels	21
I.3.2. Études du comportement électrique sur des modèles simples d'isolateurs.....	26
I.3.3. Simulation d'isolateurs haute tension.....	29
I.3.4. Amélioration de la distribution du champ électrique le long de la surface de l'isolateur : étude de cas basée sur des modèles numériques.	34
I.3.5. Optimisation de l'anneau de garde pour l'atténuation de la distribution du champ électrique	37
I.4. Conclusion.....	42

Chapitre II : Étude expérimentale du comportement de l'isolateur 1512L

II.1. Introduction	44
II.2. Dispositif expérimental	44
II.2.1. Dispositif d'essais et de mesure.....	44
II.2.2. Caractéristiques de la pollution	45
II.2.3. Mesure de la tension de contournement	47
II.2.4. Mesure du courant de fuite	47
II.2.5. Mesure de la charge électrique	48
II.3. Résultats et interprétations	48
II.3.1. Tension de contournement	48
II.3.2. Courant de fuite et charge électrique pour une pollution uniforme.....	49
II.3.2.1 Courant de fuite	49
II.3.2.2 Impédance électrique équivalente	51
II.3.2.3 Charge électrique.....	51
II.3.3. Courant de fuite et charge électrique pour une pollution non-uniforme	53
II.3.3.1 Courant de fuite	53
II.3.3.2 Charge électrique.....	55
II.4. Conclusion.....	56

Chapitre III : Étude par simulation du comportement de l'isolateur 1512L

III.1. Introduction	59
---------------------------	----

III.2.	Simulation numérique	59
III.2.1.	Méthodologie de simulation :	60
III.2.1.1	Choix du modèle spatial en 2D axisymétrique :	60
III.2.1.2	Ajout du module de physique AC/DC :	60
III.2.1.3	Sélection de l'étude temporelle :	61
III.2.1.4	Conception du modèle d'isolateur sur la plateforme désignée de COMSOL :	61
III.2.1.5	Initialisation des conditions aux limites :	62
III.2.1.6	Définition des propriétés des matériaux de l'isolateur :	63
III.2.1.7	Application du maillage adéquat pour le modèle :	63
III.2.1.8	Exécution de la simulation :	64
III.2.2.	Détermination du courant de fuite	64
III.2.3.	Quantification de la charge électrique à l'aide de la simulation	66
III.3.	Résultats de simulation dans le cas de pollution uniforme.....	68
III.3.1.	Courant de fuite	68
III.3.2.	Distribution du potentiel électrique le long de la ligne de fuite.....	70
III.3.3.	Champ électrique.....	70
III.3.3.1	Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite.....	70
III.3.3.2	Distribution du champ électrique sur l'ensemble du système d'isolation (isolateur et air)	72
III.3.4.	Distribution de la densité volumique de la charge électrique dans le verre (diélectrique)	73
III.3.5.	Distribution de la densité surfacique de la charge le long de la surface du verre (diélectrique).....	73
III.3.6.	Charge électrique globale	74
III.4.	Résultats de simulation dans le cas de pollution non-uniforme	76
III.4.1.	Courant de fuite	76
III.4.1.1	Lignes de densité de courant	78
III.4.2.	Distribution du potentiel électrique le long de la ligne de fuite.....	79
III.4.3.	Champ électrique.....	80
III.4.3.1	Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite.....	80
III.4.3.2	Distribution du champ électrique sur l'ensemble du système d'isolation (isolateur et air)	81
III.4.4.	Distribution de la densité volumique de la charge électrique dans le verre (diélectrique)	82
III.4.5.	Distribution de la densité surfacique de la charge le long de la surface du verre (diélectrique).....	83
III.4.6.	Charge électrique globale	84
III.5.	Conclusion.....	86

Chapitre IV : Optimisation de l'anneau de garde pour les isolateurs de la ligne 400 kV

IV.1. Introduction	89
IV.2. Isolateur haute tension.....	89
IV.2.1. Isolateur capot et tige en verre.....	90
IV.2.2. Isolateur composite.....	91
IV.3. Modèles numériques des chaînes d'isolateurs adoptés de la ligne 400 kV.....	92
IV.3.1. Etude et analyse du courant de fuite	94
IV.3.2. Etude et analyse de la distribution du potentiel électrique	97
IV.3.3. Etude et analyse de la distribution du champ électrique.....	98
IV.4. Optimisation de l'anneau de garde.....	99
IV.4.1. Identification du problème.....	100
IV.4.2. Méthodes d'optimisation.....	101
IV.4.2.1 Méthode d'optimisation sous contraintes par approximation linéaire COBYLA (Constrained Optimization by Linear Approximations) :	102
IV.4.2.2 Méthode de recherche par coordonnées CS (Coordinate Search) :	103
IV.4.2.3 Méthode de Nelder-Mead NM (Nelder-Mead) :	104
IV.4.3. Stratégie d'optimisation	104
IV.5. Optimisation de l'anneau de garde pour l'isolateur composite de la ligne 400 kV [95].....	106
IV.5.1. Optimisation de la hauteur et du rayon de l'anneau de garde et du rayon du tube	106
IV.5.2. Ré-optimisation de la forme de l'anneau de garde.....	109
IV.5.3. Optimisation par l'intégration d'anneaux de garde multiples remplaçant la forme ré- optimisée de l'anneau de garde.....	111
IV.5.4. Étude et analyse de l'influence d'une couche de pollution uniforme en présence de l'anneau de garde optimisé, de sa forme ré-optimisée et des anneaux de garde multiples	114
IV.6. Optimisation de l'anneau de garde pour la chaîne d'isolateurs en verre de type 1512L de la ligne 400 kV [96]	115
IV.6.1. Optimisation de la hauteur et du rayon de l'anneau de garde et du rayon du tube	116
IV.6.2. Ré-optimisation de la forme de l'anneau de garde.....	119
IV.6.3. Optimisation par l'intégration d'anneaux de garde multiples remplaçant la forme ré- optimisée de l'anneau de garde.....	120
IV.6.4. Étude et analyse de l'influence d'une couche de pollution uniforme en présence de l'anneau de garde optimisé, de sa forme ré-optimisée et des anneaux de garde multiples.....	122
IV.6.5. Étude et analyse de l'influence d'une couche uniforme de revêtement en silicone (RTV) en présence de l'anneau de garde optimisé, de sa forme ré-optimisée et des anneaux de garde multiples	123
IV.7. Conclusion.....	124
Conclusion générale.....	127
Bibliographie.....	131

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I. 1	Isolateurs en verre testés [48].	21
Figure I. 2	Variation des valeurs de P.D% de l'isolateur de type D en fonction de l'humidité [48].	22
Figure I. 3	Chaîne d'isolateurs (1) propre, (2) humide, (3) polluée [49].	23
Figure I. 4	Processus de contournement, (a) Initiation des arcs, (b) Évolution des arcs, (c) Contournement total [49].	23
Figure I. 5	Configuration de mesure de la charge [16].	24
Figure I. 6	Résultats expérimentaux de la distribution de charge avec différents niveaux de contamination (propre, léger, moyen et élevé) [16].	24
Figure I. 7	Revêtement de RTV appliqué à la surface de l'isolateur en verre capot et tige [51].	25
Figure I. 8	Observation de la détérioration à proximité de la partie haute tension après cinq ans de vieillissement accéléré. [54].	26
Figure I. 9	Profil du modèle plan utilisé en laboratoire [55].	27
Figure I. 10	Formes d'ondes du courant de fuite enregistrées pour différentes largeurs (d) de la pollution appliquée au milieu du modèle plan sous une tension de 30 kV [8].	28
Figure I. 11	Processus de contournement (a) formation de petits arcs à 70 kV, (b) augmentation du nombre d'arcs à 76 kV, (c) allongement des longueurs d'arc à 88 kV, (d) contournement total à 94 kV [55].	28
Figure I. 12	Répartitions de la pollution le long de l'isolateur capot et tige en verre [5].	29
Figure I. 13	Distribution du potentiel sur l'isolateur pour les différentes répartitions de la pollution [5].	30
Figure I. 14	Distribution du champ électrique sur l'isolateur pour tous les profils de pollution [5].	30
Figure I. 15	Modèle de simulation d'isolateur (a) Profil de l'isolateur de type U160AD (D = 420 mm, H = 146 mm et d = 20 mm) (b) Coupe transversale de la couche de pollution (c) Résultats de la distribution de tension et de lignes de courant sur la couche de pollution [32].	31
Figure I. 16	Graphiques en courbes de (a) Résistance résiduelle de la couche de pollution en fonction de la longueur de l'arc pour différents modèles avec un rayon d'arc $r_a = 0,07$ cm (b) Tension de contournement en fonction de l'ESDD [32].	32
Figure I. 17	Effets des gouttelettes d'eau sur la distribution du champ électrique. (a) sans gouttelettes d'eau (b) avec gouttelettes d'eau [56].	33
Figure I. 18	Schéma de l'isolateur adopté pour l'étude de simulation de la charge électrique [16].	33
Figure I. 19	Comparaison de la distribution de charge entre la simulation et les résultats expérimentaux pour des niveaux de pollution (a) propre, (b) léger, (c) moyen et (d) élevé [16].	34
Figure I. 20	Détails du modèle de simulation de l'isolateur en verre [57].	35
Figure I. 21	Répartition du champ électrique (avec dix individus) (a) Optimisation d'une seule unité d'isolateur (b) Chaînes construites à partir du modèle optimisé (c) Optimisation de quatre unités à la fois [57].	35
Figure I. 22	Modèles 2D axisymétriques d'isolateurs composites dotés de FGM, montrant (a) deux couches près des extrémités métalliques et (b) une couche le long de la totalité de la longueur de l'isolateur [30].	36
Figure I. 23	Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur composite de 230 kV [30].	37
Figure I. 24	Modèle 3D d'un isolateur propre avec anneau de garde [31].	39
Figure I. 25	Distribution du champ électrique autour de l'isolateur 400 kV [47].	39
Figure I. 26	Distribution du champ électrique le long du profil avec la conception optimisée et la conception d'origine de l'anneau de garde [64].	40
Figure I. 27	Détails de l'isolateur composite avec double anneau de garde installé [60].	40
Figure I. 28	Distribution du champ électrique le long la ligne de fuite des géométries d'origine avec et sans la présence de l'anneau de garde et avec la géométrie optimisée de l'isolateur 420 kV [60].	41

Figure I. 29 Intensité du champ électrique aux trois zones critiques en fonction du diamètre du tube de l'anneau (RTD) (CRD = 305 mm et CRP = 20 mm). [64].....	41
---	----

Chapitre II

Figure II. 1 Isolateur réel 1512 L.....	45
Figure II. 2 Schéma du dispositif expérimental.....	45
Figure II. 3 Oscilloscope INSTEK GDS-3504.....	45
Figure II. 4 Méthode de pulvérisation.	46
Figure II. 5 Courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour le cas de pollution uniforme. ..	50
Figure II. 6 Formes d'ondes du courant de fuite pour différentes conductivités de pollution : (a) 20 $\mu\text{S/cm}$, (b) 150 $\mu\text{S/cm}$, (c) 340 $\mu\text{S/cm}$	50
Figure II. 7 Amplitude de la charge électrique en fonction des conductivités de pollution pour différentes valeurs de la tension appliquée.....	52
Figure II. 8 Formes d'ondes de la charge électrique pour différentes conductivités de pollution : (a) 20 $\mu\text{S/cm}$, (b) 150 $\mu\text{S/cm}$, (c) 340 $\mu\text{S/cm}$	52
Figure II. 9 Courant de fuite en fonction de la largeur de la couche de pollution pour différentes valeurs de la tension appliquée.	53
Figure II. 10 Formes d'ondes du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche de pollution : (a) surface propre, (b) 5 cm, (c) 10 cm, (d) 15 cm et (e) 20 cm.....	54
Figure II. 11 Amplitude de la charge électrique en fonction de différentes largeurs de la couche de pollution pour différentes valeurs de la tension appliquée.	55
Figure II. 12 Formes d'ondes de la charge électrique pour différentes largeurs de la couche de pollution : (a) surface propre, (b) 5 cm, (c) 10 cm, (d) 15 cm et (e) 20 cm.	56

Chapitre III

Figure III. 1 Isolateur capot et tige de type 1512L.....	62
Figure III. 2 Maillage triangulaire extrêmement fin appliqué à l'isolateur.	63
Figure III. 3 Organigramme récapitulatif de la simulation.....	64
Figure III. 4 Densité de courant et la surface associée sur laquelle l'intégration doit être réalisée, illustrées sur la tige.	65
Figure III. 5 Distribution dans l'ensemble du système d'isolation sous tension de 30 kV, comprenant : (a) le champ électrique, (b) le flux de déplacement électrique.....	66
Figure III. 6 Conception représentative de la ligne le long de la surface du verre de l'isolateur capot et tige.....	67
Figure III. 7 Comparaison de la caractéristique courant de fuite-tension appliquée obtenue expérimentalement et par simulation pour une pollution uniforme.....	68
Figure III. 8 Erreur relative moyenne entre les courant de fuite simulés et expérimentaux pour différentes classes de sévérité de la pollution uniforme.	69
Figure III. 9 Formes d'ondes du courant de fuite pour différentes conductivités de pollution : (a) 20 $\mu\text{S/cm}$, (b) 150 $\mu\text{S/cm}$, (c) 340 $\mu\text{S/cm}$	70
Figure III. 10 Distribution du potentiel le long de la ligne de fuite dans le cas de la pollution uniforme.	71
Figure III. 11 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite dans le cas de la pollution uniforme.	71
Figure III. 12 Distributions du champ électrique et des lignes équipotentielles pour différentes conductivités de pollution : (a) 20 $\mu\text{S/cm}$, (b) 150 $\mu\text{S/cm}$, (c) 340 $\mu\text{S/cm}$	72
Figure III. 13 Distribution de la densité volumique de charge pour différentes conductivités de pollution : (a) 20 $\mu\text{S/cm}$, (b) 150 $\mu\text{S/cm}$, (c) 340 $\mu\text{S/cm}$	73

Figure III. 14 Distribution de la densité surfacique de charge le long de la surface de verre pour le cas de pollution uniforme.	74
Figure III. 15 Formes d'ondes de la charge électrique pour différentes conductivités de la pollution : (a) 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, (b) 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$, (c) 340 $\mu\text{S}/\text{cm}$	75
Figure III. 16 Comparaison de la caractéristique charge-conductivité pour différentes tension appliquée obtenue expérimentalement et par simulation pour une pollution uniforme.	75
Figure III. 17 Erreur relative moyenne en fonction de différentes classes de sévérité de la pollution. .	76
Figure III. 18 Comparaison de la caractéristique courant de fuite-tension appliquée obtenue expérimentalement et par simulation pour une pollution non-uniforme.	77
Figure III. 19 Erreur relative moyenne en fonction de différentes largeurs de la couche de pollution. .	77
Figure III. 20 Formes d'ondes du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche de pollution : (a) surface propre, (b) 5 cm, (c) 10 cm, (d) 15 cm et (e) 20 cm.	78
Figure III. 21 Lignes de la densité de courant pour différentes largeurs de la couche de la pollution : (a) surface propre, (b) 5 cm, (c) 10 cm, (d) 15 cm, (e) 20 cm et (f) 25 cm.	79
Figure III. 22 Distribution du potentiel le long de la ligne de fuite dans le cas de la pollution non uniforme.	80
Figure III. 23 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite dans le cas de la pollution non uniforme.	81
Figure III. 24 Activité d'arcs électriques sous une tension de 30 kV pour une largeur de couche de pollution de 15 cm (a) Expérimentale, (b) Simulation.	81
Figure III. 25 Distributions du champ électrique et des lignes équipotentielles pour différentes largeurs de la couche de pollution : (a) surface propre, (b) 5 cm, (c) 10 cm, (d) 15 cm, (e) 20 cm et (f) 25 cm. .	82
Figure III. 26 Distributions de la densité volumique de charge pour différentes largeurs de la couche de pollution : (a) surface propre, (b) 5 cm, (c) 10 cm, (d) 15 cm, (e) 20 cm et (f) 25 cm.	83
Figure III. 27 Distribution de la densité surfacique de charge le long de la surface de verre pour le cas de pollution non uniforme.	84
Figure III. 28 Formes d'ondes de la charge électrique pour différentes largeurs de la couche de pollution : (a) surface propre, (b) 5 cm, (c) 10 cm, (d) 15 cm et (e) 20 cm.	85
Figure III. 29 Comparaison de la caractéristique charge-largeur de la pollution pour différentes tension appliquée obtenue expérimentalement et par simulation pour une pollution non-uniforme.	86
Figure III. 30 Erreur relative moyenne en fonction de différentes largeurs de la couche de pollution. .	86

Chapitre IV

Figure IV. 1 Evolution de la longueur du réseau de transport électrique entre 2005 et 2017 en Algérie [68].	90
Figure IV. 2 Isolateur capot et tige en verre de type 1512L.	91
Figure IV. 3 Isolateur composite.	92
Figure IV. 4 Chaînes d'isolateurs (a) en matériaux composites (b) avec des unités de capot et tige en verre.	93
Figure IV. 5 Lignes de densité de courant (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre [87].	94
Figure IV. 6 Signaux de courant de fuite avec et sans anneau de garde (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.	95
Figure IV. 7 Séparation de la surface côté HT en deux surfaces S1 et S2 pour (a) l'isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.	95
Figure IV. 8 Signaux du courant de fuite à travers l'air et à travers le matériau (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.	96
Figure IV. 9 Signaux de courant de fuite sous condition de pollution pour différentes conductivités (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.	97
Figure IV. 10 Distribution du potentiel électrique le long de l'axe central (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.	97

Figure IV. 11 Distribution du potentiel électrique le long de la ligne de fuite (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.	98
Figure IV. 12 Distribution du champ électrique le long de l'axe central (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.	98
Figure IV. 13 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.	99
Figure IV. 14 Champ électrique dans le système d'isolation (chaîne d'isolateur et air) (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre [87].	99
Figure IV. 15 Position de l'anneau de garde sur le système de coordonnées (a) isolateur composite [95] (b) chaîne d'isolateurs en verre [96].	102
Figure IV. 16 Forme polynomiale fermée avec huit points remplaçant l'anneau de garde dans la zone désignée [95].	105
Figure IV. 17 Convergence des trois méthodes d'optimisation utilisées.	107
Figure IV. 18 Distribution du champ électrique pour l'isolateur composite en présence de l'anneau de garde optimisé (a) Représentation 2D (b) Représentation 3D.	108
Figure IV. 19 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite avec et sans l'anneau de garde optimisé.	109
Figure IV. 20 Variation du champ électrique maximal le long de la ligne de fuite en fonction du rayon de l'anneau de garde.	109
Figure IV. 21 Distribution du champ électrique pour l'isolateur composite en présence de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde (a) représentation 2D (b) représentation 3D.	110
Figure IV. 22 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite en présence de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde et de l'anneau de garde optimisé.	111
Figure IV. 23 Ré-optimisation de la forme de l'anneau de garde (a) les déplacements des points P_i , (b) la nouvelle forme ré-optimisée, (c) les anneaux de garde multiples [95].	112
Figure IV. 24 Distribution du champ électrique pour l'isolateur composite en présence des anneaux de garde multiples optimisés (a) représentation 2D (b) représentation 3D.	113
Figure IV. 25 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite en présence des anneaux de garde multiples optimisés et de l'anneau de garde optimisé.	113
Figure IV. 26 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite en présence de l'anneau de garde optimisé, de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde et des anneaux de garde multiples optimisés sous condition de pollution.	115
Figure IV. 27 Convergence des trois méthodes d'optimisation utilisées.	116
Figure IV. 28 Distribution du champ électrique pour la chaîne d'isolateurs en verre en présence de l'anneau de garde optimisé (a) Représentation 2D (b) Représentation 3D.	117
Figure IV. 29 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite avec et sans l'anneau de garde optimisé pour la chaîne d'isolateurs en verre.	118
Figure IV. 30 Variation du champ électrique maximal le long de la ligne de fuite pour différents rayons de l'anneau de garde pour la chaîne d'isolateurs en verre.	118
Figure IV. 31 Distribution du champ électrique pour la chaîne d'isolateurs en verre en présence de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde (a) représentation 2D (b) représentation 3D.	119
Figure IV. 32 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite en présence de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde et de l'anneau de garde optimisé pour la chaîne d'isolateurs en verre.	120
Figure IV. 33 Optimisation de la forme de l'anneau de garde (a) les déplacements des points P_i , (b) la nouvelle forme ré-optimisée, (c) les anneaux de garde multiples [96].	121
Figure IV. 34 Distribution du champ électrique pour la chaîne d'isolateurs en verre en présence des anneaux de garde multiples optimisés (a) représentation 2D (b) représentation 3D.	121
Figure IV. 35 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour la chaîne d'isolateurs en verre en présence des anneaux de garde multiples optimisés et de l'anneau de garde optimisé.	122

Figure IV. 36 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour la chaîne d'isolateurs en verre en présence de l'anneau de garde optimisé, de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde et des anneaux de garde multiples optimisés sous condition de pollution.....	123
Figure IV. 37 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour la chaîne d'isolateurs en verre en présence de l'anneau de garde optimisé, de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde et des anneaux de garde multiples optimisés avec une couche de revêtement en silicone (RTV).	124

Liste des tableaux

Tableau II.1. Concentration massique de NaCl et la conductivité correspondante de la pollution uniforme.....	46
Tableau II.2. Tensions de contournement et d'initiation des décharges électriques en fonction de la conductivité de la pollution uniforme.....	49
Tableau II.3. Tensions de contournement et d'initiation des décharges électriques en fonction de la largeur de la couche de pollution discontinue.....	49
Tableau II.4. Impédance mesuré du système d'isolation (isolateur, air et pollution) pour chaque conductivité de la pollution uniforme.....	51
Tableau III.1. Propriétés des matériaux constituant l'isolateur 1512L.....	63
Tableau IV.1. Les dimensions de l'isolateur composite.....	92
Tableau IV.2. Paramètres de l'anneau de garde optimisés pour les différentes méthodes d'optimisation.....	107
Tableau IV.3. Positions optimisées des points P_i	111
Tableau IV.4. Positions optimisées du centre des tubes des anneaux de garde multiples.....	112
Tableau IV.5. Paramètres de l'anneau de garde optimisés pour les différentes méthodes d'optimisation.....	117
Tableau IV.6. Positions optimisées des points P_i	120



Introduction générale

Face aux demandes croissantes en énergie électrique, il est nécessaire de mettre en place des systèmes de production et de transmission fiables pour répondre à cette exigence. Le système de transmission permet d'acheminer une quantité importante d'énergie sur de longues distances. Il comprend principalement des pylônes supportant des lignes de transmission aériennes suspendues par des chaînes d'isolateurs. Ainsi, les isolateurs jouent un rôle clé dans la fiabilité des systèmes de transmission d'énergie électrique. Ils doivent être conçus de manière à garantir à la fois une isolation électrique efficace et un support mécanique solide entre les pylônes et les lignes électriques.

Pour pallier le manque de stockage de l'énergie électrique et réduire les pertes en ligne [1], l'augmentation du niveau de tension est une alternative proposée, tenant compte de l'aspect techno-économique [2]. L'augmentation en question exige une amélioration incontournable des isolateurs, qui constituent des composants essentiels des lignes aériennes, HVAC et HVDC [3, 4].

En exploitation, ces isolateurs sont soumis à différentes contraintes. La pollution des isolateurs demeure la contrainte environnementale la plus néfaste pour les lignes de transport. En fait, les isolateurs sont exposés, en service, à divers types de pollution (poussière, sable, ...). Lorsqu'ils sont secs, les polluants ne provoquent pas une dégradation considérable de la résistivité superficielle des isolateurs. Cependant, une fois humidifiés (en présence du brouillard salin, de l'humidité, de la brume, etc.), ces contaminants forment une couche électrolytique conductrice à la surface des isolateurs, permettant au courant de fuite de la traverser [1]. L'effet joule correspondant crée des assèchements locaux. Une partie importante de la tension appliquée se trouvent reportée sur ces bandes sèches engendrant, si les champs électriques qui en résultent sont suffisants, la formation des décharges partielles [5]. L'allongement de ces décharges peut entraîner la formation d'arcs électriques et même le contournement total [6], entraînant une réduction des performances des isolateurs [7]. Cette situation accroît les pertes électriques et peut signaler le début de la dégradation de l'isolation, notamment dans le cas des isolateurs composites, pouvant éventuellement conduire à une détérioration du matériau qui les constitue. Une défaillance de l'isolateur peut entraîner des dysfonctionnements dans les systèmes électriques, voire provoquer une coupure généralisée de l'alimentation électrique et l'arrêt de fonctionnement d'usines et d'autres structures socio-économiques cruciales [4].

Afin de mieux comprendre le comportement électrique des isolateurs, il est impératif de mener des essais en laboratoire ou sur site, que ce soit dans des conditions de pollution réelles ou artificielles. Pour cela, des méthodes d'analyse et de surveillance de l'état de surface des isolateurs, telles que l'utilisation des capteurs de pollution atmosphérique et des détecteurs optiques, ou des techniques basées sur des mesures de conductance surfacique et de courant de fuite, ont été développées pour prédire la sévérité de la pollution sur les isolateurs HT [8]. De nouvelles technologies basées sur des images aériennes prises par des drones sont également

rentables sur les sites difficilement ou non accessibles ou dans des conditions météorologiques extrêmes [9].

L'étude et le diagnostic des courants de fuite des isolateurs ont récemment fait l'objet de recherches [3, 10]. Diverses techniques ont été développées pour analyser les formes d'ondes du courant de fuite afin de contribuer à l'explication des activités de décharges électriques et les étapes du processus de contournement [3, 8]. Certains auteurs ont utilisé des méthodes de mesure du courant de fuite à l'aide du champ électromagnétique [11].

Les mesures en ligne du courant de fuite ont un grand avantage dans la prévention des défaillances des isolateurs. Par conséquent, certains chercheurs [3] ont développé un dispositif sans fil en temps réel pour surveiller les isolateurs HVAC. De même, des instruments de mesure ont été installés sur les lignes HVDC où des isolateurs en verre et en composite, ensembles en forme de V, ont été installés sur la ligne pour étudier le courant de fuite [12].

Pour apporter de compléments valables aux mesures aidant à la prise de décisions et à la prédiction de phénomènes affectant la rigidité diélectrique de l'isolateur, d'autres chercheurs ont utilisé des logiciels numériques appropriés pour déterminer et étudier les formes d'ondes de courant de fuite sur des isolateurs sous pollution. A titre d'exemple, un circuit équivalent d'un isolateur en verre a été présenté dans [13] en utilisant le logiciel ATPDraw. Les résultats simulés étaient très proches de ceux obtenus expérimentalement. D'autres auteurs ont établi un modèle dynamique amélioré pour analyser le courant de fuite sur des isolateurs pollués [14].

Les techniques d'analyse de la distribution de charge électrique sur la surface des isolateurs ont été développées puisqu'elles suscitent un intérêt considérable [15]. De telles techniques permettent d'étudier la charge de surface, ayant un impact important sur le champ électrique [16]. Lorsque la quantité de charges accumulées dans les endroits les plus contaminés augmente, elle peut créer une forte intensité de champ électrique à cet endroit [17]. Si cette intensité de champ électrique dépasse le champ disruptif, cela peut entraîner le claquage dans l'air entourant l'isolateur [18]. L'étude de la distribution de charge sur les isolateurs a été menée par des approches expérimentales et de simulation, tant pour les isolateurs intacts [15] que pour les isolateurs fracturés [19].

Le diagnostic de vieillissement thermique des isolateurs polymériques a été étudié dans [17] en utilisant les caractéristiques extraites de l'accumulation de charges d'espace, mesurée en laboratoire à l'aide du système Pulsed Electro Acoustic. Pour surveiller l'état de surface des isolateurs sous tensions alternatives, une grille en acier a été placée autour de l'isolateur en verre afin de capturer l'accumulation de charges à une distance de 2 cm du bord de l'isolateur [20]. Les observations ont révélé que les charges électriques influent sur le comportement des gouttelettes d'eau en induisant une activité de mouvement considérable de ces dernières sous l'impact du champ électrique [21].

La recherche sur l'isolateur réel étant difficile, certains auteurs préfèrent l'utilisation de modèles de géométrie simple permettant de bien observer les phénomènes de décharges

électriques [22, 23]. Un des modèles largement utilisés consiste en une plaque isolante plane dont la distance inter-électrodes est égale à la ligne de fuite de l'isolateur.

L'analyse basée sur la simulation concernant l'étude de la charge électrique est l'un des outils les plus puissants pour comprendre et clarifier certaines caractéristiques expérimentales des isolateurs [24]. Les résultats de simulation [15, 25] ont démontré une bonne corrélation avec les tests en laboratoire. De plus, la modélisation permet d'illustrer l'impact de la quantité de charge sur le champ électrique et les changements de potentiel [26]. Cependant, la distribution des charges sur les surfaces d'isolateurs, en particulier sous tension alternative, demeure encore mal comprise [27].

En fait, les techniques de simulation permettent d'étudier les performances électriques des isolateurs. Elles ont été utilisées pour minimiser l'intensité du champ électrique, c'est-à-dire pour optimiser la performance des isolateurs [28]. En effet, l'optimisation de la forme du revêtement extérieur de l'isolateur composite à proximité des parties métalliques [29], en utilisant un matériau de gradation de champ électrique appelé Field Grading Materials (FGM), a permis efficacement d'atténuer et contrôler le champ électrique le long de l'isolateur [30]. De plus, l'optimisation de la conception des anneaux de garde a également été prise en compte [31]. En outre, la simulation a été utilisée pour évaluer la résistance résiduelle de la couche de pollution de surface des isolateurs [32].

Par ailleurs, l'effet de la pollution sur les activités de décharge partielle des isolateurs capot et tige en verre a été examiné par des études de simulation et d'expérimentation, suggérant que l'activité de décharge partielle est intensifiée dans les zones où le champ électrique est élevé [5]. De même, des simulations ont été réalisées pour déterminer la tension de surface le long d'une chaîne d'isolateurs [33]. La validation a été accomplie en confrontant les résultats simulés à ceux obtenus expérimentalement.

Dans notre présente étude, nous nous sommes intéressés aux performances des isolateurs sous pollutions uniforme et non-uniforme. Comme premier travail de recherche, nous avons étudié et analysé le comportement de l'isolateur de type capot-tige 1512L sous pollution artificielle (solution saline constituée d'un mélange eau distillée-NaCl). Plusieurs conductivités (20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 340 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et niveaux de tension ont été considérés. Nous nous sommes particulièrement intéressés à relever les signaux de courant de fuite et de la charge électrique. Par la suite, des simulations, sous environnement COMSOL, ont été effectuées et confrontées à l'expérimentation. Ces simulations nous ont permis, entre autres, d'obtenir les répartitions du champ et du potentiel électrique, les lignes de densité de courant, les points critiques présentant un champ électrique élevé, ainsi que les zones susceptibles d'être sièges aux décharges partielles. Le deuxième travail de recherche de notre étude porte sur l'évaluation des performances électriques des chaînes d'isolateurs en composite et en verre de 400 kV. L'objectif principal est de réduire l'intensité du champ électrique le long de la surface de chaque chaîne d'isolateurs. Pour cela, une optimisation basée sur la méthode COBYLA a été

développée. Elle vise à optimiser les dimensions (rayon du tube et celui de l'anneau) ainsi que la hauteur de l'anneau de garde ou complètement sa forme, sa structure ou en optimisant son poids afin de minimiser le champ électrique le long de la surface de la chaîne.

Notre thèse est structurée en quatre chapitres distincts. Dans le premier chapitre, nous présentons l'état de l'art en citant le contexte de la thématique ainsi que les principaux travaux de recherche entrepris dans ce domaine.

Le deuxième chapitre présente les résultats du comportement électrique de l'isolateur en verre de type 1512 L utilisé dans cette étude. La première partie décrit les dispositifs d'essai et de mesure mis en place pour mener à bien l'étude expérimentale. Cela comprend les outils de mesure de la tension de contournement, du courant de fuite, de la charge électrique, ainsi que la méthode d'application de la pollution en laboratoire. La deuxième partie expose les résultats de l'impact de la pollution artificielle, basée sur différentes concentrations de NaCl et la tension appliquée, sur le courant de fuite et la charge électrique de l'isolateur.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude par simulation de l'impact de la pollution et de la tension appliquée sur le comportement électrique de l'isolateur 1512 L en verre. Après avoir détaillé les procédures de simulation employées, les résultats obtenus seront confrontés aux ceux obtenus expérimentalement. La simulation permet ensuite de visualiser des caractéristiques électriques relatives aux distributions du potentiel et du champ électrique, ainsi que les zones à risque d'apparition de décharges partielles. Des simulations de l'accumulation de charge sur l'isolateur sont également réalisées, permettant de déterminer la quantité, la polarité et la distribution des charges. Cette analyse par simulation offre une compréhension approfondie du comportement de l'isolateur en conditions polluées et sous différentes tensions.

L'objectif principal du quatrième chapitre est de réduire l'intensité du champ électrique le long de la surface de la chaîne d'isolateurs, qu'ils soient en composite ou en verre. Tout d'abord, nous détaillons les étapes que nous avons entreprises pour évaluer les performances électriques d'une chaîne d'isolateurs de ligne 400 kV, en mettant particulièrement l'accent sur le champ électrique et le potentiel. Ensuite, nous analysons le comportement du champ électrique de la chaîne d'isolateurs, en comparant les configurations avec et sans anneau de garde. Nous introduisons ensuite un processus d'optimisation basé sur les méthodes CS, NM et COBYLA visant à optimiser les dimensions (rayon du tube et de l'anneau) ainsi que la hauteur de l'anneau de garde, voire à modifier complètement sa forme, sa structure ou son poids, afin de minimiser le champ électrique le long de la surface de la chaîne.

Enfin, nous présentons une synthèse complète de nos travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette thèse de doctorat, résumée dans une conclusion générale.



Chapitre I

État de l'art

I.1. Introduction

Les chaînes d'isolateurs sont des composants essentiels des systèmes de transmission et de distribution de l'énergie électrique. En exploitation, les isolateurs sont exposés à des différentes contraintes électriques parfois très sévères. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs demeure un sujet d'actualité du fait qu'elle est à l'origine de sérieux problèmes liés aux phénomènes de décharges électriques et de contournement.

En effet, de nombreuses recherches expérimentales et de simulations sont menées pour étudier et analyser les performances des isolateurs sous pollution dans le but de prévenir les conséquences des défauts directement ou indirectement liés aux conditions climatiques, et d'introduire des améliorations dans le système d'isolation [3, 8, 22, 28].

Néanmoins, la complexité géométrique des isolateurs réels et leurs relations avec les paramètres électriques ont poussé les chercheurs à développer des modèles plus simples, mieux adaptés aux essais en laboratoire [22], et à élaborer des modèles mathématiques plus faciles à étudier [23].

Avec le développement rapide des systèmes informatiques, certains chercheurs se sont intéressés à la simulation étant donné ses nombreux avantages, tels que la réduction des coûts et l'amélioration de la prise de décision, la réalisation d'éventuels tests des différents profils d'isolateurs avant les mettre en pratique, l'optimisation des chaînes d'isolateurs avec et sans anneaux de garde,

Nous présentant les principaux travaux menés sur le comportement électrique des isolateurs réels et des modèles d'isolateurs. Nous présentons également les modèles mathématiques et ceux de la simulation rapportés dans la littérature sur les isolateurs.

I.2. Contexte

En raison de leur exposition à la pollution, les isolateurs peuvent être à l'origine de nombreux défauts sur les lignes à haute tension, compromettant ainsi la fiabilité et la sécurité des réseaux électriques [34]. Les isolateurs situés près de la mer peuvent être soumis à des embruns transportés par le vent. Au fil du temps, ces embruns peuvent déposer une fine couche de sel sur la surface des isolateurs, pouvant s'accumuler et recouvrir entièrement l'isolateur. Lorsqu'ils sont situés à proximité d'usines ou de centrales thermiques, les isolateurs peuvent accumuler des poussières faiblement conductrices. En conditions de brouillard, de pluie, etc., ces poussières se dissolvent et forment une couche conductrice [35]. De manière similaire, dans les régions désertiques, il est courant que les isolateurs soient recouverts de sable. Au fil du temps, cette accumulation de sable devient une couche de pollution [34].

Les contaminants qui s'accumulent sur les isolateurs créent un chemin conducteur pour la circulation d'un faible courant électrique. Le courant de fuite circulant sur la surface des isolateurs peut engendrer des décharges partielles et des arcs électriques [36]. Ces phénomènes peuvent provoquer des ruptures diélectriques et accélérer le vieillissement prématuré de certains

types d'isolateurs, notamment les isolateurs composites [37]. De plus, ces défauts peuvent également entraîner des contournements sur les lignes électriques, provoquant ainsi des interruptions de courant [38].

Étudier et analyser les isolateurs revêt une importance cruciale pour comprendre leur comportement électrique, prévenir les pannes, les incidents électriques et les pertes d'énergie dans les lignes, voire améliorer le système d'isolation. Cependant, la complexité géométrique des isolateurs et le grand nombre de facteurs affectant leurs caractéristiques électriques rendent cette étude difficile [35]. Afin de faciliter la tâche des recherches, diverses approches ont été proposées, comprenant l'utilisation de modèles simplifiés (modèles plans) [8, 22, 23, 24, 35], l'application de modèles mathématiques pour l'étude des contournements [14, 23, 36, 39], ainsi que l'élaboration de modèles basés sur l'analyse dynamique des paramètres de l'arc électrique et sur des circuits électriques équivalents [14]. D'autres recherches se concentrent sur l'étude des caractéristiques spécifiques, comme le courant de fuite [13, 38], le champ électrique [5, 40] ou la charge électrique [24, 27]. La simulation des modèles numériques d'isolateurs a été utilisée avec succès pour approfondir la compréhension de certaines caractéristiques électriques [32], voire pour introduire des améliorations significatives de leurs performances [28, 29, 31].

I.3. Principaux travaux antérieurs

Une ligne de transmission comprend plusieurs types de composants dont le plus important consiste en l'isolateur. En raison de la pollution et des conditions météorologiques instables dans l'environnement extérieur, les isolateurs peuvent être endommagés de temps en temps [41]. Les dommages ou les défaillances des isolateurs peuvent résulter de défauts physiques tels que des défauts de montage, ou d'une combinaison de plusieurs éléments endommagés et/ou de leur mauvais comportement électrique, comme le contournement [42]. Une fois qu'un arc électrique se produit dans une ligne de transmission électrique, il peut entraîner une coupure de courant. À long terme, cela peut provoquer des pannes régionales majeures et même causer des accidents catastrophiques, comme décrit par [42].

Souvent, les chercheurs interviennent sur site pour fournir des informations précieuses sur les facteurs influençant les performances des isolateurs, ainsi que des conseils sur les caractéristiques d'adaptation des isolateurs des lignes de transmission. Jusqu'à présent, de nombreux chercheurs ont élaboré divers modèles aussi bien statiques que dynamiques de contournement sous pollution, pour prédire les caractéristiques de l'arc électrique sur des isolateurs pollués [43, 44]. Il est donc crucial de comprendre les mécanismes du contournement des isolateurs en se basant sur directives de tels chercheurs [45, 46]. Pour cela, la collecte de données expérimentales pour identifier les facteurs affectant les performances des isolateurs pollués est un élément clé pour comprendre la défaillance des isolateurs pollués. De plus, une exploration approfondie des paramètres expérimentaux en relation avec les performances des isolateurs pollués est essentielle pour obtenir un aperçu des problèmes rencontrés par les isolateurs HT.

L'intégration des techniques de simulation s'est développée ces dernières années dans le domaine. Il est important d'éclairer certaines caractéristiques électriques en détail et de concevoir des éléments de modèles pour s'adapter à certaines conditions, tout en améliorant ce qui est nécessaire en respectant les contraintes de modélisation, ce qui permet d'obtenir des isolateurs plus performants.

Certaines caractéristiques électriques nécessitent une analyse approfondie pour comprendre le comportement des isolateurs opérant dans des conditions spécifiques. Grâce à des simulations, les chercheurs tenteront à explorer certaines caractéristiques décrivant le comportement électrique des isolateurs, telles que le champ électrique [5], et à concevoir des éléments de modèles qui s'ajustent aux conditions particulières auxquelles les isolateurs seront soumis [29].

De plus, un avantage très important réside dans la possibilité d'optimiser les isolateurs tout en respectant des contraintes précises [47]. La simulation permet de tester différentes configurations et paramètres afin de garantir que les isolateurs fonctionnent de manière optimale [28]. Cette approche conduit à la conception d'isolateurs plus performants, capables de répondre aux exigences spécifiques du contexte dans lequel ils seront utilisés.

I.3.1. Études du comportement électrique sur des isolateurs réels

Des chercheurs [48] ont réalisé des tests sur des isolateurs en verre de différents profils (Figure I.1). Pour diagnostiquer l'état des isolateurs, les chercheurs ont utilisé le paramètre "différence de phase" (P.D en %), correspondant à l'écart d'angle entre le signal de la tension appliquée (θ_v) et celui du courant de fuite (θ_i). L'indice P.D% est calculé comme suit : $P.D\% = \cos(\theta_v - \theta_i) \times 100\%$.



D.

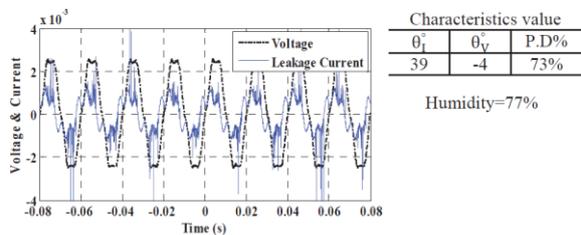
Figure I. 1 Isolateurs en verre testés [48].

Les résultats des signaux de courant de fuite et de la tension appliquée, ainsi que les variations de P.D% enregistrés sur de l'isolateur de type D pour différentes valeurs d'humidité, sont présentés sur la figure I.2. Cette figure montre que l'indice P.D% augmente avec l'humidité.

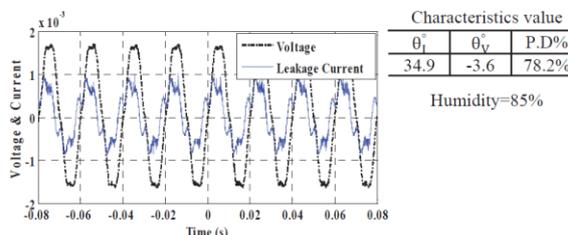
L'analyse des résultats expérimentaux de cette étude et le calcul de la différence de phase entre la tension appliquée et les signaux de courant de fuite ont révélé une forte corrélation avec l'état de surface des isolateurs. Dans des conditions propres, la valeur de P.D% est toujours inférieure à 30%. Lorsque les isolateurs sont soumis à des conditions de pollution extrêmes, le

P.D% devient supérieur à 30 %. Finalement, lorsque les isolateurs se trouvent dans des conditions de pollution critiques, le P.D% dépasse 85 %, augmentant ainsi la probabilité d'occurrence d'un contournement.

Signaux des courants de fuite et des tensions appliquées



Signaux des courants de fuite et des tensions appliquées



Signaux des courants de fuite et des tensions appliquées

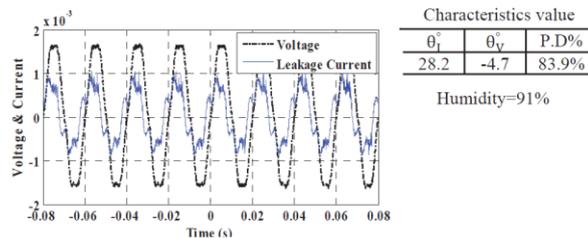


Figure I. 2 Variation des valeurs de P.D% de l'isolateur de type D en fonction de l'humidité [48].

Le phénomène de contournement des isolateurs sous pollution est extrêmement complexe en raison de l'interférence de plusieurs facteurs liés aux formes complexes des isolateurs, à la sévérité variable de la pollution, à la distribution non-homogène de la pollution à la surface de l'isolateur, à l'effet de l'humidité, etc. [49].

Une étude menée sur une chaîne d'isolateurs de type 175 CTV en verre, dont l'état de surface est propre et sec, humide (avec de l'eau distillée) et pollué (avec de l'eau distillée et du sable) (Figure I.3) [49]. Il a été constaté que dans les cas pollué et humide, la chaîne d'isolateurs devient moins rigide par rapport aux deux autres cas et que le contournement se fait selon les trois phases suivantes (Figure I.4) :

- Initiation d'arcs : L'initiation d'un grand nombre d'arcs partiels caractérisés par une faible intensité. De plus, les décharges disparaissent et réapparaissent rapidement le long de la bande propre de manière continue, comme indiqué sur la figure I.4(a).
- Evolution des arcs : L'intensification et la multiplication des arcs le long de la bande propre. De faibles décharges situées du côté de l'électrode de terre ont également été observées, probablement en raison du champ élevé (tension appliquée élevée) à l'interface entre l'électrode et la surface en verre, comme illustré sur la figure I.4(b).
- Contournement : L'augmentation de la tension appliquée peut induire au contournement suite à un saut final d'un arc partiel. Ce dernier se forme entre les deux électrodes et se développe jusqu'à engendrer le contournement total, comme montré sur la figure I.4(c).



Figure I. 3 Chaîne d'isolateurs (1) propre, (2) humide, (3) polluée [49].

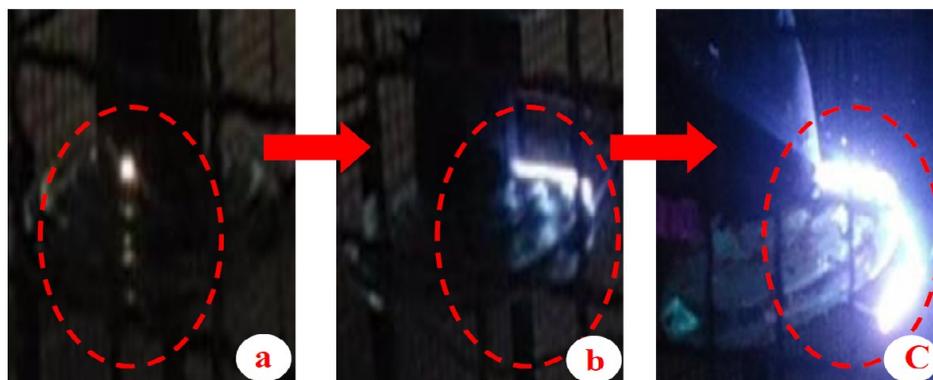


Figure I. 4 Processus de contournement, (a) Initiation des arcs, (b) Évolution des arcs, (c) Contournement total [49].

La fiabilité de l'approvisionnement en énergie électrique pourrait être perturbée par l'accumulation de la charge d'espace à l'intérieur ou à la surface de l'isolateur. Selon certains chercheurs, le processus d'accumulation de la charge d'espace engendre la déformation du champ électrique local [15, 16]. Une technique de mesure de la répartition de charge à la surface des isolateurs en verre a été mise en œuvre [16]. Un maillage en acier inoxydable de forme radiale, avec une taille de trou de 1,25 cm x 1,25 cm, entourait chaque isolateur, les données de charge sont transmises de ce maillage vers le capteur de charge à travers le câble rouge, ce capteur est ensuite relié à l'électrode de mise à la terre par le câble noir comme illustré sur la figure I.5.

Des chaînes d'isolateurs constituées de quatre unités d'isolateurs en verre de type capot et tige ont été sélectionnées pour cette étude, examinées dans des conditions propres et polluées. Nommées de I1 à I4 dans lequel le capot de l'isolateur I1 est mis à la terre et la tige de l'isolateur I4 est reliée à la borne HT.

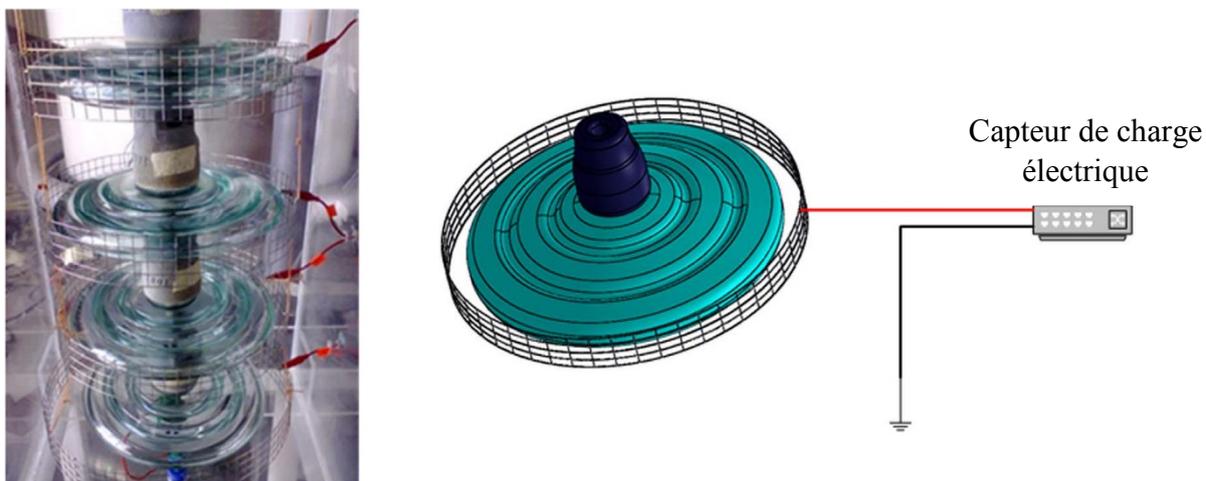


Figure I. 5 Configuration de mesure de la charge [16].

Les résultats de la distribution de la charge à la surface de chaque unité d'isolateur, dans le cas de surfaces propres et soumises à différents niveaux de pollution, sont présentés dans la figure I.6. Selon cette figure, la distribution des charges diffère considérablement entre la chaîne d'isolateurs propre et celles polluées. Dans les deux cas, propre et polluée, l'isolateur I4 montre la charge négative la plus faible, tandis que dans le cas des chaînes polluées, l'isolateur I1 montre la charge négative la plus élevée, un phénomène qui n'est pas observé dans le cas d'une chaîne propre.

Les résultats précédents peuvent s'expliquer en considérant que l'injection d'électrons se produit à l'interface électrode HT/diélectrique [50]. Dans le cas de la chaîne d'isolateurs propre, le processus d'injection se déroule progressivement, entraînant une migration lente des électrons de la surface d'une unité d'isolateur vers la suivante à travers l'atmosphère. Par conséquent, les surfaces des isolateurs I2 et I3 sont chargées négativement de manière plus importante que l'isolateur I1.

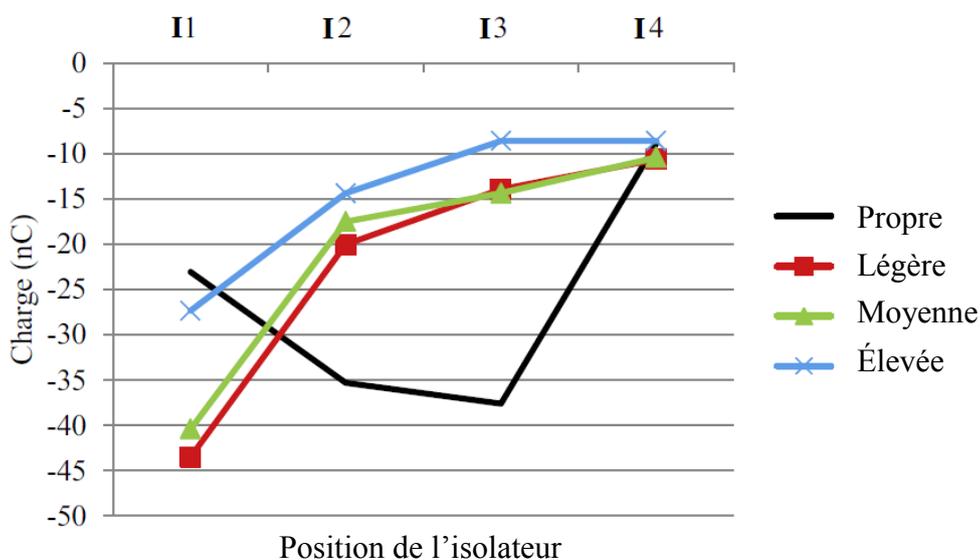


Figure I. 6 Résultats expérimentaux de la distribution de charge avec différents niveaux de contamination (propre, léger, moyen et élevé) [16].

Pour la chaîne d'isolateurs polluée, la continuité de la couche de pollution sur leur surface forme des voies conductrices, ce qui facilite l'injection d'électrons d'une unité d'isolateur à une autre et favorise la migration des charges. C'est pourquoi la charge négative diminue progressivement de l'isolateur I1 à I4. Ainsi, pour une position donnée des isolateurs, la charge négative augmente avec l'augmentation des niveaux de sévérités de pollution (de légers à sévères).

Une méthode efficace pour conférer des propriétés hydrophobes à l'isolateur en verre consiste à appliquer un revêtement de polymère vulcanisable à température ambiante (RTV). Les isolateurs en verre trempé revêtus de RTV sont spécifiquement conçus pour être utilisés dans des environnements pollués. Des résultats obtenus sur le terrain soulignent l'efficacité des isolateurs pré-revêtus de RTV pour résoudre les problèmes de contournement extrêmement sévères [51]. Ces isolateurs en verre trempé pré-revêtus de RTV ont été développés pour assurer une application uniforme du polymère RTV hydrophobe, fortement adhésive au diélectrique (Figure I.7), améliorant ainsi considérablement la durée de vie et l'efficacité du revêtement par rapport aux méthodes d'application de revêtements sur site [51].



Figure I. 7 Revêtement de RTV appliqué à la surface de l'isolateur en verre capot et tige [51].

Les isolateurs composites, généralement constitués de matériaux isolants en polymère de silicone, remplacent de plus en plus les isolateurs classiques (en porcelaine ou en verre) dans les systèmes électriques [52]. Parmi leurs nombreux avantages, la silicone présente des propriétés hydrophobes qui empêchent le développement de courants de fuite, prévenant ainsi toute défaillance de l'isolation.

Une considération majeure pour les services publics utilisant des isolateurs composites sur les lignes aériennes et les postes concerne le vieillissement des matériaux polymères utilisés pour le revêtement extérieur des isolateurs. Ces préoccupations ont incité à la fois l'Electric Power Research Institute (EPRI) et Swedish National Testing and Research Institute (STRI) à initier des programmes de recherche approfondis et indépendants pour étudier le vieillissement des isolateurs composites dans des environnements relativement propres [53]. Les résultats ont souligné un seuil du champ électrique au-delà duquel le vieillissement commence à avoir lieu. Ce seuil pourrait être utilisé comme mesure préventive. Les essais de vieillissement accéléré

ont été réalisés sur une période de cinq ans, car on estime que cela équivaut à environ 40 à 50 ans de service [54].

Dans le cadre de cette recherche collaborative, les conclusions de ces programmes ont été résumées et combinées afin d'établir des limites pratiques du champ électrique pour la conception des anneaux de garde des isolateurs composites, dans le but de prévenir le vieillissement et la dégradation éventuelle des matériaux, comme illustré sur la figure I.8. Il a été avancé que ces dommages sont dus à l'effet couronne induit par la présence de gouttelettes d'eau sur la surface des chaînes d'isolateurs, ainsi qu'à l'utilisation d'anneaux de garde mal positionnés aux extrémités de ces chaînes.

Le but de cette étude est de mettre en évidence l'importance de l'effet de couronne induit par l'eau en tant qu'agent de vieillissement des isolateurs composites, en se basant sur des essais de vieillissement accéléré et des essais de vieillissement naturel à long terme, ainsi que sur les résultats d'inspections en service. Les implications de cette étude sur la nécessité et les exigences de conception des anneaux de garde sont abordées. En conséquence, le champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur ne doit pas dépasser 4,2 kV/cm sur plus de 10 mm le long de la surface de l'isolateur à partir des extrémités métalliques de l'isolateur. À l'interface entre l'air, l'extrémité métallique et le matériau composite, le champ électrique ne doit pas dépasser 3,5 kV/cm [54].

Les niveaux du champ électrique en surface des raccords d'extrémité métalliques et les anneaux de garde doivent être contrôlés toute activité de décharge due à l'effet de couronne. À cet égard, un champ électrique de surface de 21 kV/cm est couramment utilisé comme référence à des fins de conception [53].



Figure I. 8 Observation de la détérioration à proximité de la partie haute tension après cinq ans de vieillissement accéléré. [54].

I.3.2. Études du comportement électrique sur des modèles simples d'isolateurs

Diverses recherches ont eu recours à des modèles simples de laboratoire pour examiner l'impact de plusieurs paramètres électro-géométriques sur le comportement électrique des isolateurs [22, 23, 39]. Ces modèles, en raison de leur simplicité, se composent généralement d'une plaque isolante plane (Figure I.9), dont la distance entre les électrodes équivaut à la

longueur de la ligne de fuite de l'isolateur réel. Cette simplicité facilite les observations et les mesures nécessaires pour analyser les caractéristiques des phénomènes de décharges électriques [34].



Figure I. 9 Profil du modèle plan utilisé en laboratoire [55].

Certains chercheurs ont opté pour l'utilisation de ces modèles de laboratoire en raison de leur configuration pratique. Ils offrent une opportunité idéale pour explorer les interactions entre les paramètres électriques de l'isolateur et leurs propres propriétés, comme par exemple l'impact de la variation des différentes valeurs de permittivité et de l'épaisseur de l'isolant étudié sur le courant, la charge et le champ électrique [35].

L'impact de la pollution discontinue sur le courant de fuite a été examiné [8]. La largeur et la position de la pollution ont été variées. Nous présentons, sur la figure I.10, les résultats lorsque la pollution est appliquée au milieu du modèle expérimental plan muni de deux électrodes rectangulaire (Figure I.9). La figure I.10 montre une augmentation graduelle de l'amplitude du courant de fuite en fonction de l'élargissement de la couche de pollution. Elle met en évidence un nombre significatif d'impulsions dans les demi-cycles positifs et négatifs des signaux du courant de fuite. Cela suggère que les impulsions de courant les plus élevées enregistrées lors des essais indiquent la présence d'arcs sur la surface de l'isolateur. En fait, les caractéristiques des signaux de courant peuvent être traitées en appliquant des techniques de traitement du signal pour analyser quantitativement l'influence de la pollution sur le comportement électrique de l'isolateur.

L'utilisation du modèle plan expérimental est justifiée ainsi par la facilité de visualisation des processus, depuis la formation des petits arcs jusqu'au contournement total, comme illustré sur la figure. I.11. Le cas présenté dans cette figure correspond à une configuration de pollution uniforme utilisant une quantité de sable humidifié exprimée en NSDD de $0,01 \text{ g/cm}^2$, provenant du désert algérien [55]. Au début, le processus de contournement est initié par de nombreux petits arcs sur les côtés des deux électrodes à 70 kV. Le courant de fuite et les décharges électriques provoquent une évaporation progressive de la

couche polluée (Figure 11a et 11b). Cette évaporation donne naissance à d'autres zones sèches où de nouveaux arcs apparaissent, comme le montre l'augmentation du nombre d'arcs sur la figure 11b à 82 kV. Avec l'augmentation de la tension appliquée, certains arcs commencent à disparaître de sorte qu'un seul arc dominant persiste (Figures 11c). La longueur de cet arc augmente jusqu'à atteindre la longueur d'arc critique qui est d'environ 10 cm à 94 kV. Enfin, le contournement total se produit à 96 kV.

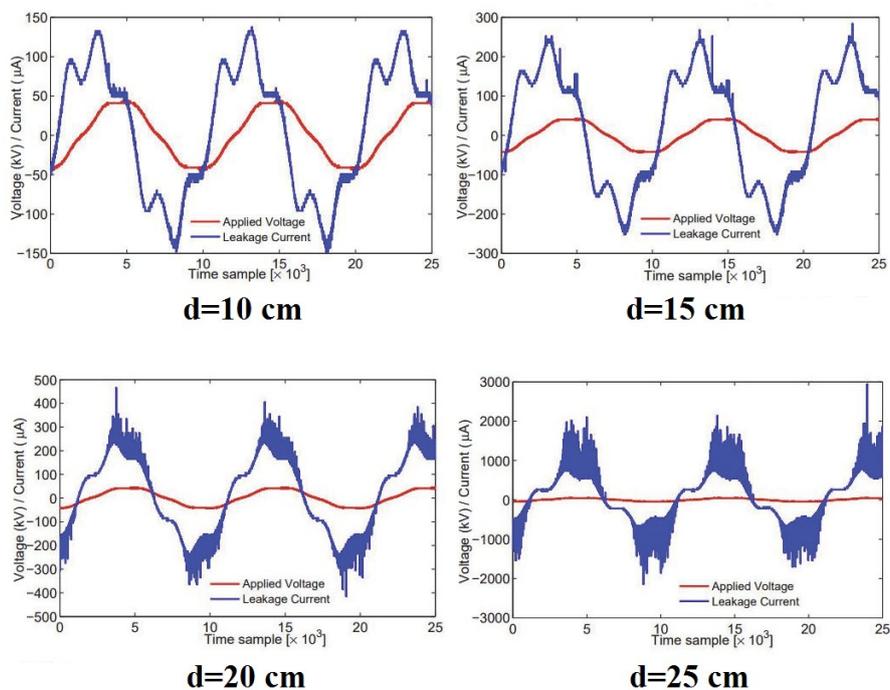


Figure I. 10 Formes d'ondes du courant de fuite enregistrées pour différentes largeurs (d) de la pollution appliquée au milieu du modèle plan sous une tension de 30 kV [8].

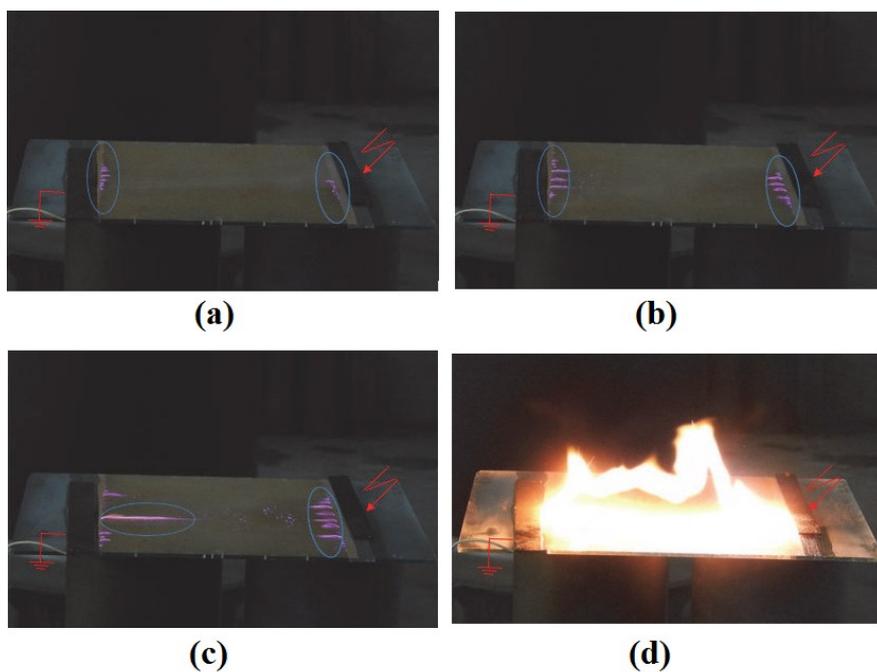


Figure I. 11 Processus de contournement (a) formation de petits arcs à 70 kV, (b) augmentation du nombre d'arcs à 76 kV, (c) allongement des longueurs d'arc à 88 kV, (d) contournement total à 94 kV [55].

I.3.3. Simulation d'isolateurs haute tension

La simulation est devenue un outil essentiel, récemment adopté par certains chercheurs [5, 16, 32, 56], pour mener des investigations et analyser les différentes caractéristiques du champ électrique, du potentiel électrique, de la charge électrique, etc.

Une étude réalisée par simulation a été effectuée [5] sur un isolateur capot et tige en verre. Différentes répartitions de la pollution ont été considérées, comme illustré sur la figure I.12. Le cas de l'isolateur propre a été également considéré et pris comme référence. La simulation a été faite en 2D en utilisant le logiciel COMSOL, basé sur la méthode des éléments finis (FEM). Une tension alternative de 11 kV a été appliquée à la tige de l'isolateur, tandis que le capot de l'isolateur est relié à la terre. La couche de pollution, établie selon la méthode de la couche solide, est supposée uniforme sur la surface de l'isolateur afin de reproduire les différentes répartitions de la pollution. Trois épaisseurs ont été adoptées à savoir 0,1, 0,15 et 0,2 cm pour représenter respectivement les niveaux de sévérité de la pollution faible, modérée et élevée. La conductivité de la couche de pollution pour chaque répartition de la pollution a été mesurée au laboratoire. La valeur ainsi trouvée (10^{-3} S/m) a été introduite dans le logiciel. La valeur de la permittivité diélectrique relative est de 81.

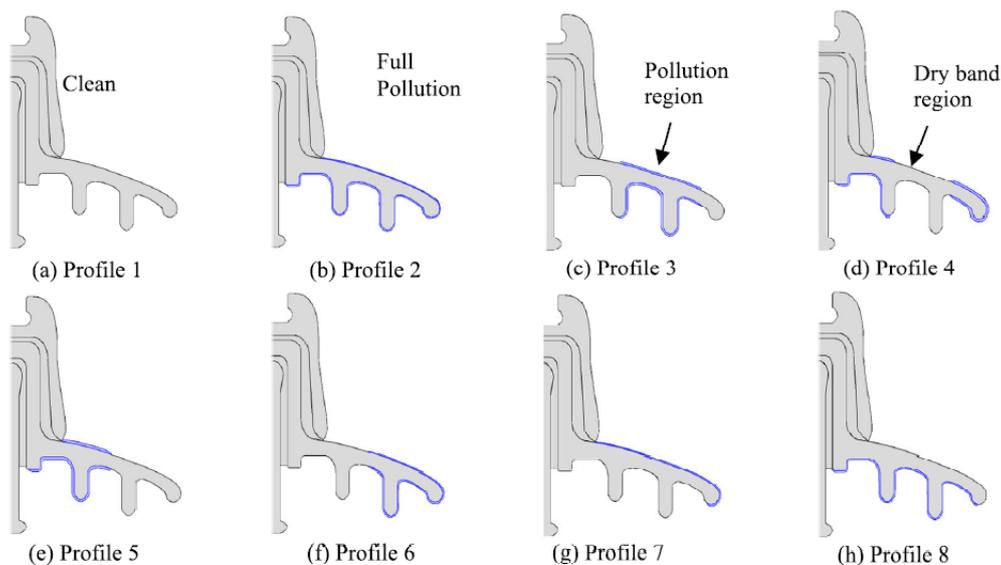


Figure I. 12 Répartitions de la pollution le long de l'isolateur capot et tige en verre [5].

Les résultats de cette étude sur le potentiel et le champ électriques sont illustrés sur les figures I.13 et I.14 respectivement. La figure I.13 présente la distribution du potentiel électrique sur l'isolateur en verre pour les différentes répartitions de la pollution adoptées. Lorsque l'isolateur propre, le potentiel électrique décroît progressivement du côté HT au côté terre. La concentration la plus élevée de la densité des lignes équipotentielles a été observée à l'intérieur et autour de l'électrode HT de l'isolateur. La distribution du potentiel sur un isolateur propre est non-linéaire en raison de l'effet capacitif de la surface propre. En revanche, lorsque l'isolateur est pollué, la distribution du potentiel dépend de la sévérité de la pollution et des dimensions de la bande sèche.

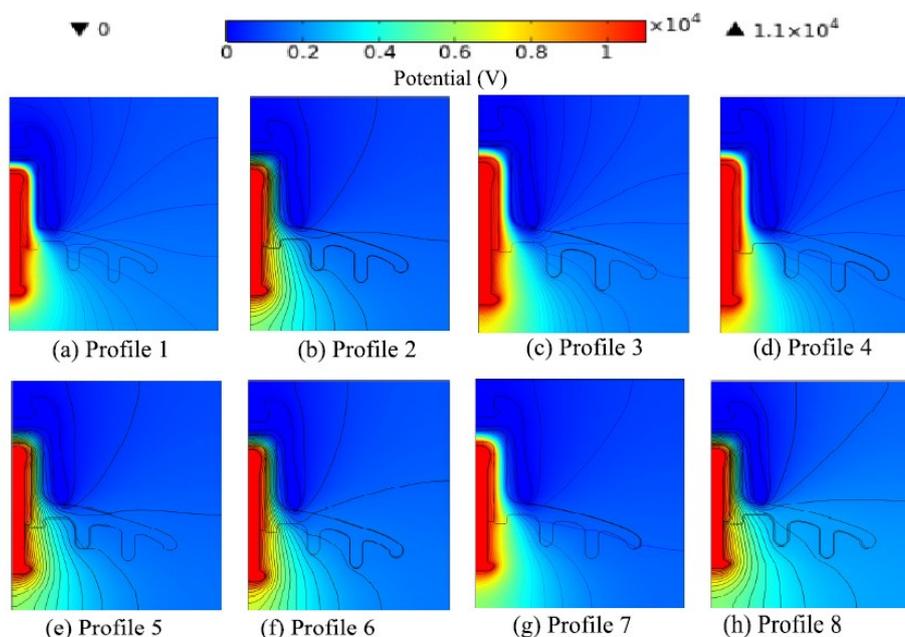


Figure I. 13 Distribution du potentiel sur l'isolateur pour les différentes répartitions de la pollution [5].

En ce qui concerne la distribution du champ électrique (Figure I.14), les valeurs maximales de l'intensité du champ électrique ont été observées à l'intérieur du matériau isolant (verre), entre la tige et le capot, ainsi que dans la région voisine de l'électrode haute tension (HV) de l'isolateur, puis autour de la borne mise à la terre en raison de l'accumulation de charge.

Le champ électrique minimum a été enregistré à l'extrémité de la zone du capot, où les charges électriques sont presque inexistantes dans cette région. La distribution plus large des lignes équipotentielles dans les isolateurs fortement pollués indique que les isolateurs ont une intensité de champ électrique plus faible. On peut conclure que la présence de la pollution peut diminuer le potentiel électrique à travers la surface de l'isolateur pollué.

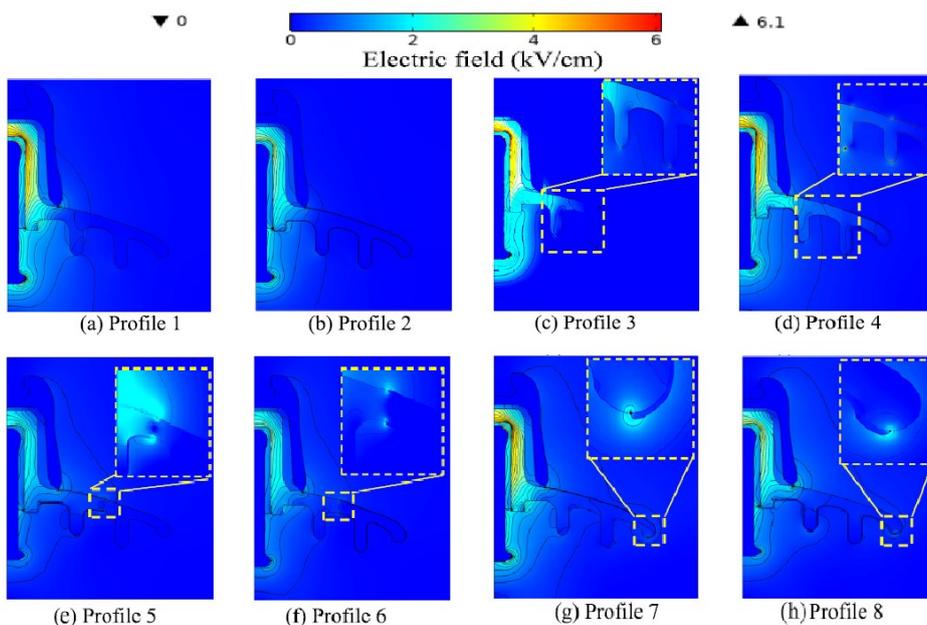


Figure I. 14 Distribution du champ électrique sur l'isolateur pour tous les profils de pollution [5].

La formation de charge est liée à l'existence d'une variation de conductivité à la surface de l'isolateur. La variation de cette conductivité conduit à l'occurrence de la polarisation interfaciale et encourage l'accumulation de charge deux côtés des zones sèches, entraînant ainsi la présence d'une valeur élevée de champ électrique, comme illustré sur la zone zoomée de la figure I.14.

Une étude a été élaborée dans le but de prédire la tension de contournement en courant continu d'un isolateur pollué de type capot-tige en verre (Figure I.15(a)) [32]. Etant donné que la densité de courant la plus élevée se concentre autour de la racine de l'arc pendant la propagation, la variation de la résistance résiduelle de la couche de pollution par rapport à la position de l'arc est non-linéaire ; la figure I.15(b) présente une coupe transversale de cette couche de pollution. Ainsi, un modèle en 3D de l'isolateur a été élaboré en utilisant COMSOL Multiphysics pour évaluer la résistance résiduelle. Ce modèle prend en considération la géométrie réelle de l'isolateur ainsi que la restriction du courant à la racine de l'arc pour un rayon d'arc spécifique.

Les résultats de la simulation (Figure I.15(c)) illustrent la distribution de la tension et les lignes de courant le long de la couche de pollution. Les flèches indiquent les directions du champ électrique, qui sont les mêmes que celles de la densité du courant ($J=\sigma.E$). Le courant de fuite est distribué de manière non-uniforme dans toutes les directions autour de la racine de l'arc, suivant des lignes de courant de longueurs différentes. Cela révèle que les lignes de courant de fuite sont réparties sur les surfaces inférieure et supérieure de l'isolateur pour toutes les positions de l'arc, donc les deux côtés de la surface servent de chemin conducteur. Dans une étape de post-traitement, la résistance résiduelle entre la racine de l'arc et la terre peut être dérivée et évaluée. L'ensemble de l'opération est répété pour chaque position de l'arc et rayon d'arc.

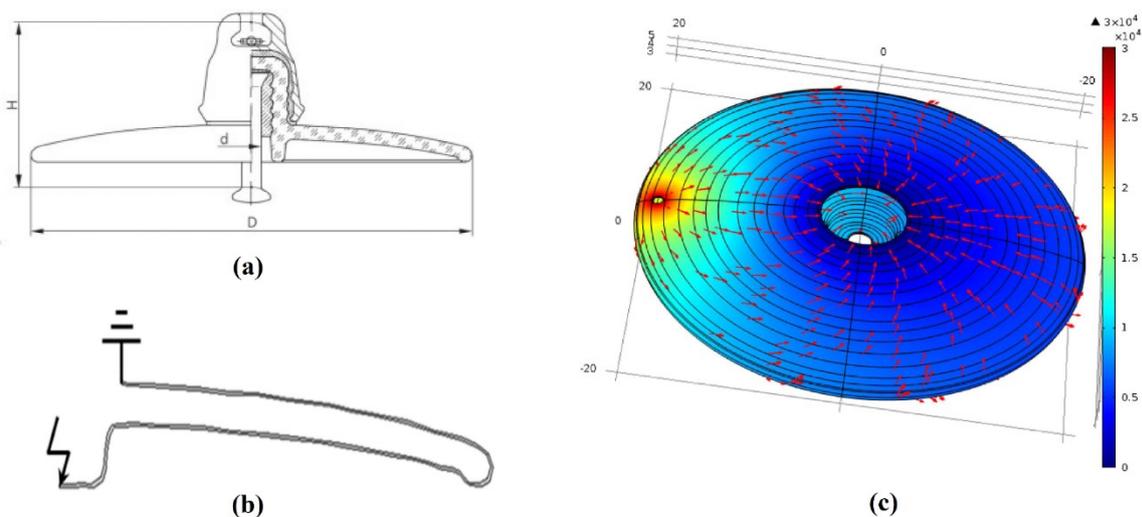


Figure I. 15 Modèle de simulation d'isolateur (a) Profil de l'isolateur de type U160AD ($D = 420$ mm, $H = 146$ mm et $d = 20$ mm) (b) Coupe transversale de la couche de pollution (c) Résultats de la distribution de tension et de lignes de courant sur la couche de pollution [32].

Un nouveau modèle mathématique, calculant la résistance résiduelle de cet isolateur pollué, a été développé pour tous les rayons d'arc possibles, sachant que la résistance résiduelle augmente lorsque le rayon de l'arc diminue. La figure I.16(a) présente la résistance résiduelle de la couche de pollution en fonction de la longueur de l'arc pour différents modèles avec un rayon d'arc $r_a = 0,07$ cm. Les résultats de la simulation en 3D et du modèle mathématique concordent de manière satisfaisante, surtout lorsque la longueur de l'arc est supérieure à 50% de la ligne totale de fuite.

Pour évaluer la tension de contournement en fonction de l'ESDD, une approche basée sur la méthode de Recherche de Point Selle a été proposée [32]. Cette approche et ce modèle ont été validés à l'aide des résultats expérimentaux d'études antérieures, comme le montre la figure I.16(b).

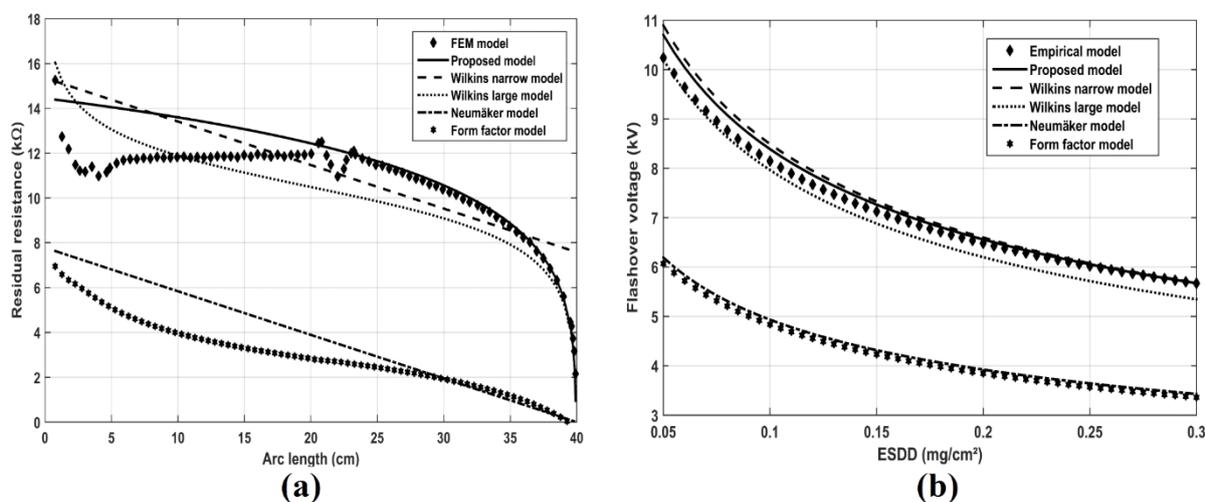


Figure I. 16 Graphiques en courbes de (a) Résistance résiduelle de la couche de pollution en fonction de la longueur de l'arc pour différents modèles avec un rayon d'arc $r_a = 0,07$ cm (b) Tension de contournement en fonction de l'ESDD [32].

La surface des isolateurs composites est hydrophobe, favorisant la formation de gouttelettes d'eau plutôt que la création d'un film continu sur ces surfaces en cas de présence d'une couche d'eau. Ces gouttelettes d'eau accroissent le champ électrique, pouvant entraîner des décharges électriques. Les simulations fournissent des informations précieuses sur le champ électrique entourant ces gouttelettes. Par exemple, une étude a révélé que dans la région du jonc, l'intensité maximale du champ électrique se situe au point de jonction des interfaces air/gouttelette d'eau/matériau composite (encadré en rouge dans la figure I.17(b)) [56]. D'autre part, dans la région des jupes, l'intensité maximale du champ électrique à la surface des gouttelettes d'eau se trouve sur le dessus de la gouttelette (indiqué en rouge sur la figure I.17(b)). La présence de gouttelettes d'eau peut influencer la distribution du champ électrique sur l'isolateur (Figures I.17(a) et I.17(b)). Le champ électrique est plus intense là où les gouttelettes sont présentes, indiquant une augmentation locale de son intensité.

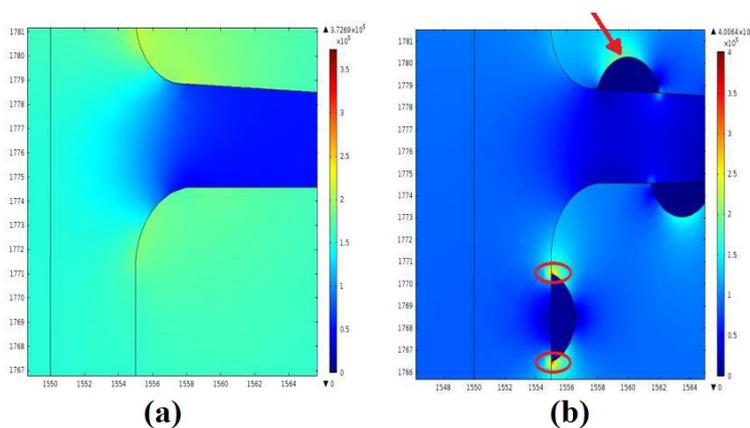


Figure I. 17 Effets des gouttelettes d'eau sur la distribution du champ électrique. (a) sans gouttelettes d'eau (b) avec gouttelettes d'eau [56].

La charge électrique peut être déduite de la simulation. Des chercheurs ont réalisé une simulation de l'isolateur en verre en 2D axisymétrique (Figure I.18) en utilisant le logiciel QuickField™, dans le but de les confronter à l'expérimentation [16]. Ils ont opté pour le type de problème "électrostatique" pour évaluer la distribution de la charge à la surface de chaque isolateur. Il est important de noter que la mesure de la charge à l'aide de ce logiciel est effectuée en définissant le contour le long de la ligne de fuite de chaque isolateur en verre. La valeur de la charge est ensuite extraite à partir de la fenêtre de calcul.

La figure I.19 présente les résultats de la distribution de charge obtenus à la fois par simulation et expérimentation pour des niveaux de pollution faible, léger, moyen et élevé. Ce qui ressort de manière intéressante de la figure I.20 est l'instabilité de la distribution de charge sur l'isolateur 1, où l'amplitude de la charge diminue lorsque l'isolateur est propre et augmente en présence de la pollution, et ce en passant de l'isolateur 4 à celui 1. Les résultats de comparaison, issus à la fois des travaux expérimentaux et de la simulation, pour la distribution de charge à la surface de chaque isolateur en verre soumis à différents niveaux de contamination, sont présentés sur la même figure. Il est évident de cette figure que l'amplitude de la distribution de charge issue de l'expérience est assez similaire aux résultats de la simulation.

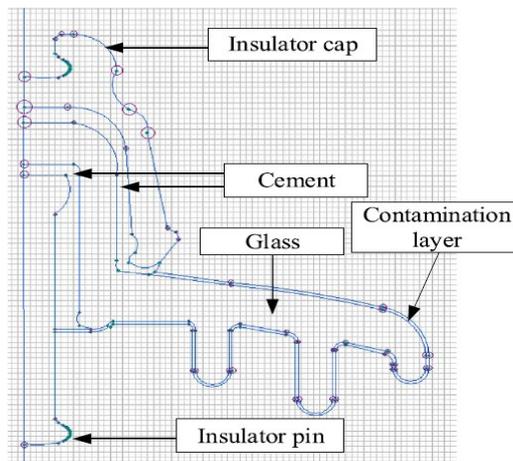


Figure I. 18 Schéma de l'isolateur adopté pour l'étude de simulation de la charge électrique [16].

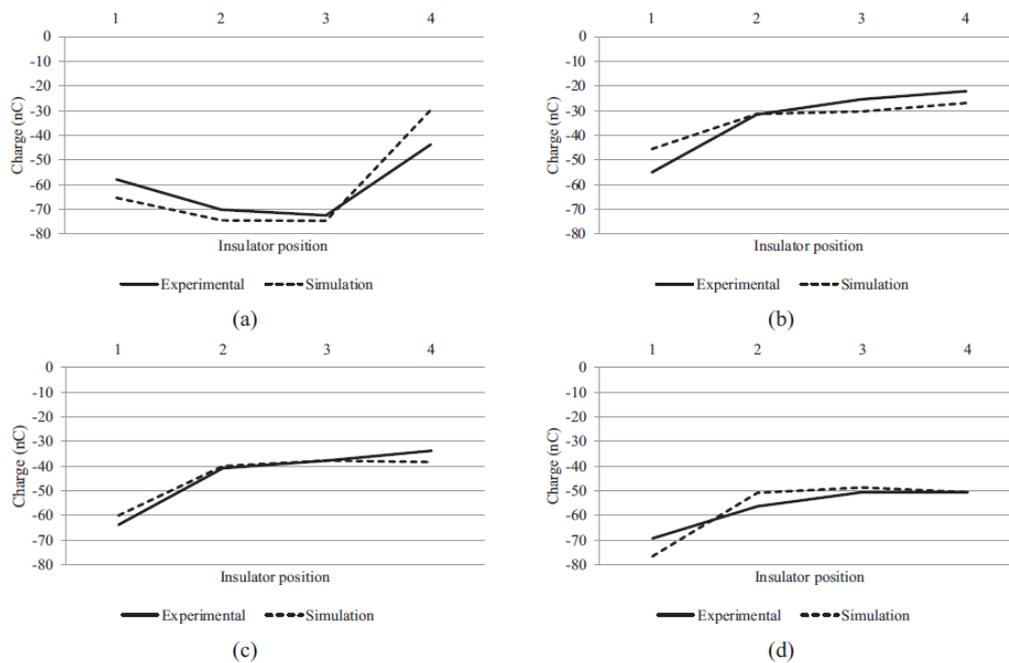


Figure I. 19 Comparaison de la distribution de charge entre la simulation et les résultats expérimentaux pour des niveaux de pollution (a) propre, (b) léger, (c) moyen et (d) élevé [16].

I.3.4. Amélioration de la distribution du champ électrique le long de la surface de l'isolateur : étude de cas basée sur des modèles numériques.

Réduire la valeur du champ électrique maximale le long de la surface de l'isolateur est un aspect crucial pour tous les types d'isolateurs (en verre, composites, etc.). Dans cette optique, des chercheurs ont entrepris une étude visant à améliorer les performances de l'isolateur à capot et tige en verre de type U400B en cherchant à : (i) optimiser la distribution et l'amplitude du champ électrique afin de réduire le risque de contournement dû à la pollution de surface, et (ii) réduire la ligne de fuite, entraînant ainsi une diminution de la surface et, par conséquent, du poids de l'isolateur [57].

Dans cette étude, l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) couplé à la méthode des éléments finis (FEM) en utilisant le logiciel FEMM est mis en œuvre pour améliorer les performances de l'isolateur. Le logiciel FEMM est utilisé pour calculer la distribution du champ électrique autour de l'isolateur. En adoptant une géométrie axisymétrique en 2D, la forme de l'isolateur est reproduite en optimisant les différentes longueurs de segments (L , L_1, \dots, L_5) et différents rayons (R_1, \dots, R_{13}), comme illustré sur la figure I.20, tout en minimisant la fonction objectif correspondant au maximum du champ électrique le long de la ligne de fuite.

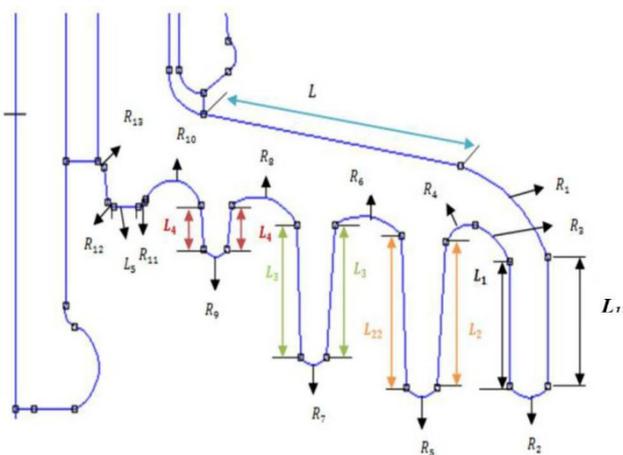


Figure I. 20 Détails du modèle de simulation de l'isolateur en verre [57].

Il a été constaté que les divers paramètres d'optimisation utilisés indiquent qu'un modèle avec une population de dix individus est suffisant pour atteindre l'optimisation souhaitée. La distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite, pour une population de dix individus (Figure I.21(a)), démontre que la fonction objectif de minimiser le champ électrique est atteinte, entraînant ainsi la réduction de la longueur de la ligne de fuite. En revanche, la construction d'une chaîne d'isolateurs en utilisant une unité à capot et tige optimisée conduit à des performances optimisées pour la chaîne ainsi formée (Figure I.21(b)). L'optimisation d'une chaîne complète conduit pratiquement aux mêmes performances que celles d'une chaîne obtenue en assemblant des unités d'isolateurs optimisées (Figure I.21(c)).

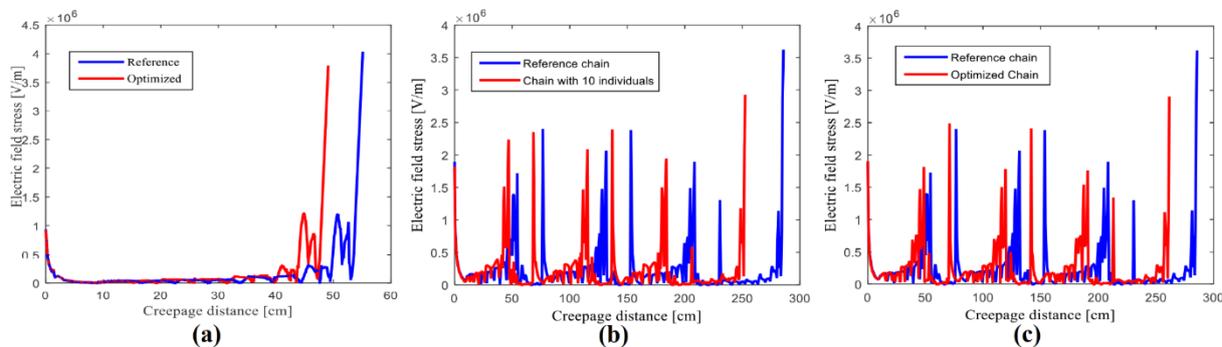


Figure I. 21 Répartition du champ électrique (avec dix individus) (a) Optimisation d'une seule unité d'isolateur (b) Chaînes construites à partir du modèle optimisé (c) Optimisation de quatre unités à la fois [57].

Afin de prévenir le vieillissement prématuré des isolateurs composites et d'augmenter leur durée de vie, tout en réduisant les interruptions du réseau pour accroître le niveau de fiabilité et diminuer le risque, l'implémentation d'une couche de matériaux de gradation de champ électrique à résistivité non linéaire (Field Grading Materials FGM) est l'une des solutions alternatives adoptées par différents chercheurs [30]-[58], surtout près des deux extrémités métalliques de l'isolateur composite caractérisées par des valeurs importantes du champ électrique.

Une investigation récente a été réalisée pour déterminer les propriétés électriques des matériaux FGM non-linéaires à l'aide de la simulation [30]. L'objectif était d'atteindre un

contrôle efficace du champ électrique le long de la surface de l'isolateur en implantant des micro-varistances non-linéaires à base d'oxyde de zinc (ZnO) sur un isolateur composite de la ligne 230 kV. Cette démarche a été réalisée grâce à la méthode des éléments finis (FEM) sous le logiciel COMSOL. Les propriétés électriques appropriées des FGM non-linéaires pour un contrôle efficace des contraintes le long de la surface de l'isolateur polymère sont examinées, et une nouvelle formule mathématique a été avancée dans pour exprimer la conductivité en fonction du champ des FGM ($\sigma = f(E)$). Cette formule vise à intégrer l'effet de saturation dans les régions de champ électrique élevé.

Deux couches de matériaux FGM ont été ajoutées près des deux raccords d'extrémité sur la tige en PRF, d'une longueur de 150 mm et d'une épaisseur de 2 mm (Figure I.22(a)). Ces couches de FGM sont implantées sous le revêtement de silicone pour les protéger contre divers impacts environnementaux. De plus, un autre modèle de FGM, couvrant la totalité de la longueur de l'isolateur (Figure I.22(b)), est également proposé et discuté pour différentes conditions de tension.

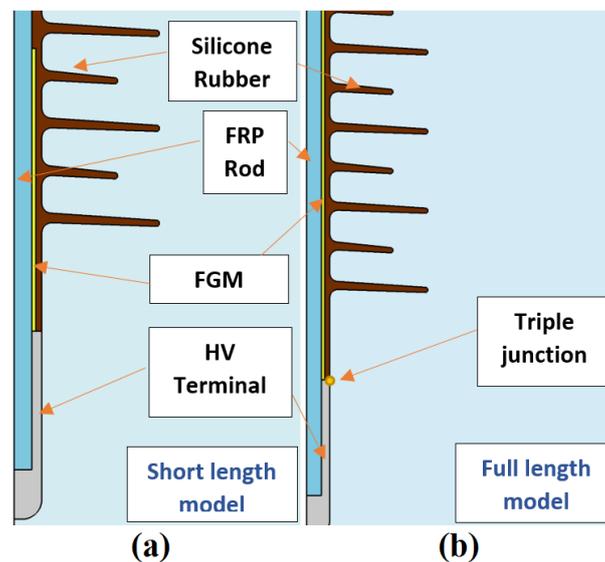


Figure I. 22 Modèles 2D axisymétriques d'isolateurs composites dotés de FGM, montrant (a) deux couches près des extrémités métalliques et (b) une couche le long de la totalité de la longueur de l'isolateur [30].

Suite aux résultats relatif à la distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur 230 kV illustré à la figure I.23, la distribution du champ électrique dans l'isolateur composite est fortement non-uniforme et présente une forme en U, car l'effet des éléments attachés (pylône et câbles) est négligé. De plus, la non-uniformité augmente avec la tension et conduit à des valeurs de champ importantes près des points de jonctions triples. Grâce aux FGM, ces valeurs de champ peuvent être atténuées de manière efficace près de ces zones critiques.

Les améliorations du champ électrique sont obtenues en transformant les zones critiques en état de conduction et en formant un champ opposé dû à la formation de la charge d'espace. Par conséquent, le champ électrique s'ajuste dans les zones critiques à une valeur proche du

seuil de commutation du champ via l'accumulation de la charge d'espace. Les modèles à deux couches et à une couche le long de la totalité de l'isolateur (illustrés à la figure I.22) offrent des performances similaires dans des conditions de fonctionnement normales (Figure I.23), car les régions actives sont limitées aux zones critiques uniquement.

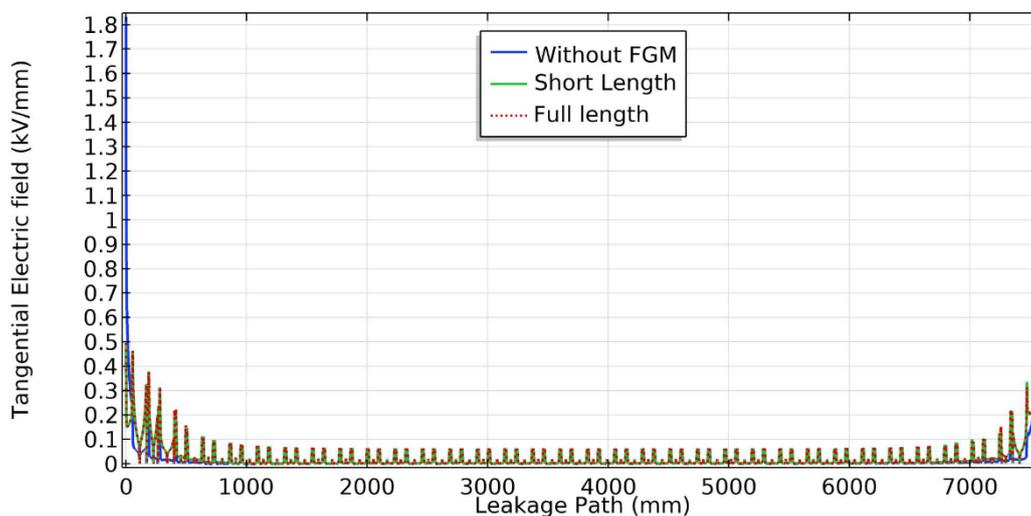


Figure I. 23 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur composite de 230 kV [30].

Dans l'objectif d'améliorer le champ électrique maximal le long de la surface de l'isolateur composite, une étude a été entreprise [58]. Ils ont constatés que l'optimisation des couches de micro-varistances conduit à une diminution du champ électrique maximal et à une amélioration de l'uniformité de la distribution du champ sur la surface de l'isolateur. De plus, la réduction de l'intensité maximale du champ contribue à minimiser le dépôt de contamination autour des électrodes.

I.3.5. Optimisation de l'anneau de garde pour l'atténuation de la distribution du champ électrique

L'effet couronne est une forme de décharge électrique qui se produit lorsque le champ électrique dans l'air atteint une intensité suffisante pour ioniser les molécules environnantes. Cela peut entraîner divers problèmes, tels que des dommages aux isolateurs (notamment les isolateurs composites), des interférences radioélectriques, la formation d'ozone, etc. [59].

La distribution du champ électrique à la surface de l'isolateur dépend non seulement du niveau de la tension appliquée, mais également du profil de l'isolateur, des conditions environnementales et des paramètres de l'anneau de garde [47]. Les anneaux de garde sont utilisés dans les chaînes d'isolateurs HT afin d'atténuer la distribution du champ électrique autour de l'isolateur et ainsi prévenir l'effet de couronne [31]. L'efficacité d'un anneau de garde dépend de divers éléments de sa conception, notamment son diamètre, son épaisseur et son emplacement.

Des approches consistent à utiliser la simulation à l'aide d'outils informatiques pour simuler la distribution du champ électrique autour de l'isolateur. Cette simulation permet

d'identifier les zones où le champ électrique est excessif, facilitant ainsi l'application de l'optimisation de la conception de l'anneau de garde afin d'atténuer le champ électrique dans ces zones. Généralement, différents algorithmes d'optimisation peuvent être employés pour améliorer la conception de l'anneau de garde. Citons, par exemple, l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) [31, 60], l'algorithme d'optimisation du Loup Gris (GWO) [61], l'optimisation par la méthode des surfaces de réponses (RSM) [62], ainsi que l'algorithme multi-objectif de fourmi-lion (MOALO) [47], démontrant sa performance en termes de temps de calcul et de qualité de solution. Certains chercheurs ont choisi d'utiliser une méthode algorithmique impliquant essentiellement l'exploration de toutes les solutions possibles, également appelée recherche exhaustive ou recherche par force brute [63].

Différents algorithmes sont recommandés pour optimiser la conception d'un anneau de garde. Par exemple, l'algorithme PSO présente de meilleurs résultats en termes de conception géométrique optimale de l'isolateur et de l'anneau de garde pour minimiser l'intensité du champ électrique, comparativement aux algorithmes de recherche par coordonnées (CS), l'algorithme Fmincon (FMC), l'algorithme Fminsearchband (FMSB), et l'algorithme génétique (GA) [60]. De même, l'algorithme de l'optimisation du Loup Gris (GWO) est recommandé par rapport à l'algorithme compétitif impérialiste (ICA) [61]. En effet, l'application du GWO entraîne une minimisation du champ électrique le long de la surface d'une chaîne d'isolateurs de 132 kV, avec une convergence plus rapide que l'ICA. Ceci s'explique par le fait que le GWO atteint les solutions plus rapidement que l'ICA [61].

Ces algorithmes d'optimisation sont utilisés pour déterminer les valeurs optimales des paramètres de l'anneau de garde, tels que la position verticale (H) et horizontale (R) de l'anneau de garde, ainsi que le rayon (r) du tube de l'anneau de garde (Figure I.24), tout en respectant des contraintes telles que les valeurs minimales et maximales de ces paramètres [31, 47, 60]. L'objectif final est de :

Minimiser la fonction objectif ($F = \max(EF)$), qui représente le maximum du champ électrique le long de la surface de l'isolateur étudié.

Les résultats des valeurs de la position et du rayon du tube varient d'une étude à l'autre, en fonction de la géométrie de l'isolateur étudiée, de la tension appliquée, des contraintes choisies, et d'autres critères. Cependant, ils convergent vers un objectif commun qui est de minimiser la fonction objectif pour obtenir le champ électrique de surface le plus bas possible, inférieur aux champs critiques. Par exemple, dans une étude utilisant la méthode MOALO pour un isolateur de la ligne 400 kV, les chercheurs ont obtenu les résultats suivants : un champ électrique minimal de 1,84891 kV/cm pour les paramètres $H=223,634$ mm, $R=130$ mm, $r=60$ mm [47]. La distribution du champ électrique autour de l'isolateur en présence de l'anneau de garde optimisé est illustrée sur la figure I.25.

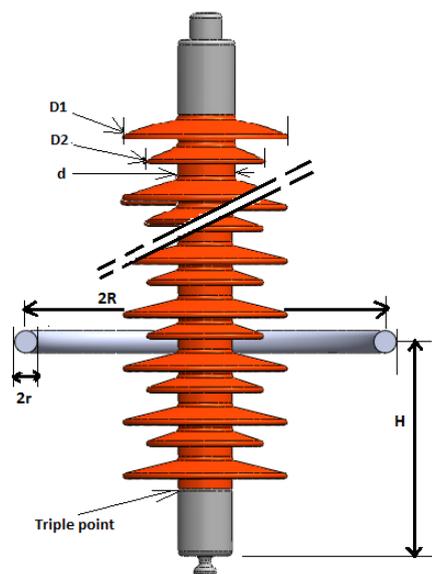


Figure I. 24 Modèle 3D d'un isolateur propre avec anneau de garde [31].

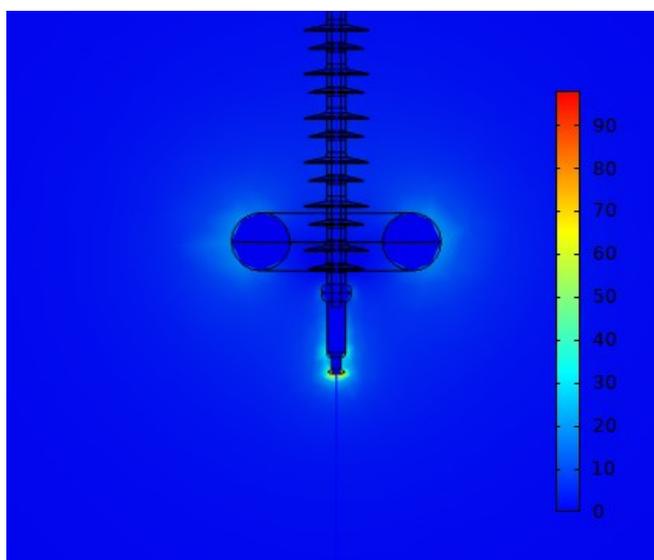


Figure I. 25 Distribution du champ électrique autour de l'isolateur 400 kV [47].

Les résultats sont prometteurs lorsque les chercheurs appliquent l'optimisation à l'anneau de garde d'origine d'un isolateur composite de 230 kV [64]. La distribution du champ électrique le long d'un profil d'une ligne horizontale passant par le point triple de l'air-métal-matériau polymère et l'axe de l'isolateur, avec l'anneau de garde d'origine et celui résultant de l'optimisation, est présentée sur la figure I.26. Le choix de ce profil s'explique par le fait qu'il contient les zones représentant les emplacements où l'intensité du champ électrique est plus élevée que les valeurs critiques, pouvant générer une activité de décharge due à l'effet de couronne. Comme ils l'ont constaté, le processus d'optimisation a conduit à une réduction de 50,5 % de l'intensité maximale du champ électrique par rapport à l'isolateur avec l'anneau de garde d'origine (82,4 % sans anneau de garde). Ces résultats soulignent l'importance de l'optimisation de la conception des anneaux de garde pour améliorer les performances des isolateurs électriques.

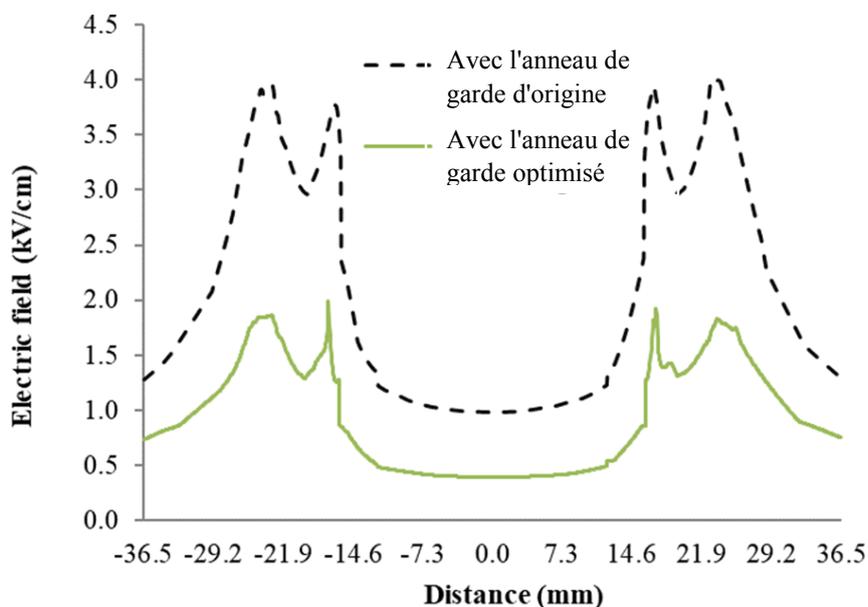


Figure I. 26 Distribution du champ électrique le long du profil avec la conception optimisée et la conception d'origine de l'anneau de garde [64].

L'optimisation ne s'est pas limitée uniquement aux paramètres de l'anneau de garde, mais peut également être réalisée sur les paramètres de l'isolateur, comme examiné dans [60]. La principale contribution de cette étude réside dans l'intégration des variables géométriques et physiques majeures de l'isolateur, R_{sh1} , R_{sh2} et D (Figure I.27), ainsi que de son ou de ses anneaux de garde (selon la tension appliquée), dans le processus d'optimisation. Le but est d'optimiser non seulement l'anneau de garde pour atténuer le champ électrique, mais aussi en réduisant considérablement la ligne de fuite par l'optimisation des dimensions géométriques de l'isolateur lui-même [60].

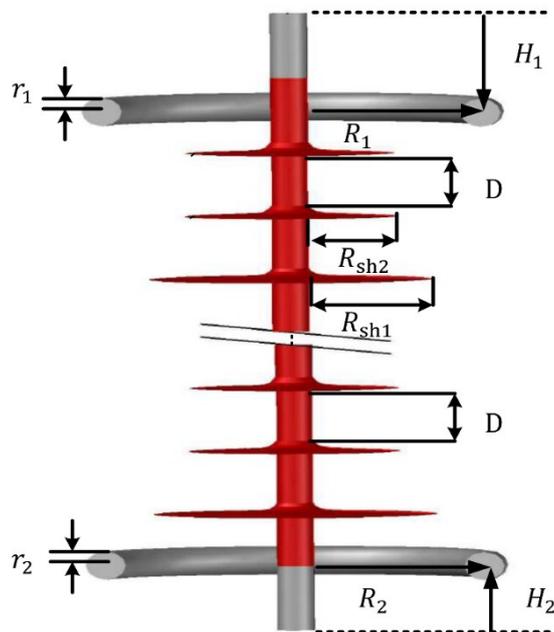


Figure I. 27 Détails de l'isolateur composite avec double anneau de garde installé [60].

La figure I.28 présente une comparaison de l'intensité du champ électrique entre les géométries d'origine de l'isolateur composite 420 kV avec et sans la présence de l'anneau de garde, ainsi qu'avec la géométrie optimisée (de l'isolateur et de l'anneau) [60]. La géométrie optimale offre une intensité du champ électrique et une ligne de fuite considérablement réduites, comme clairement illustré sur cette figure.

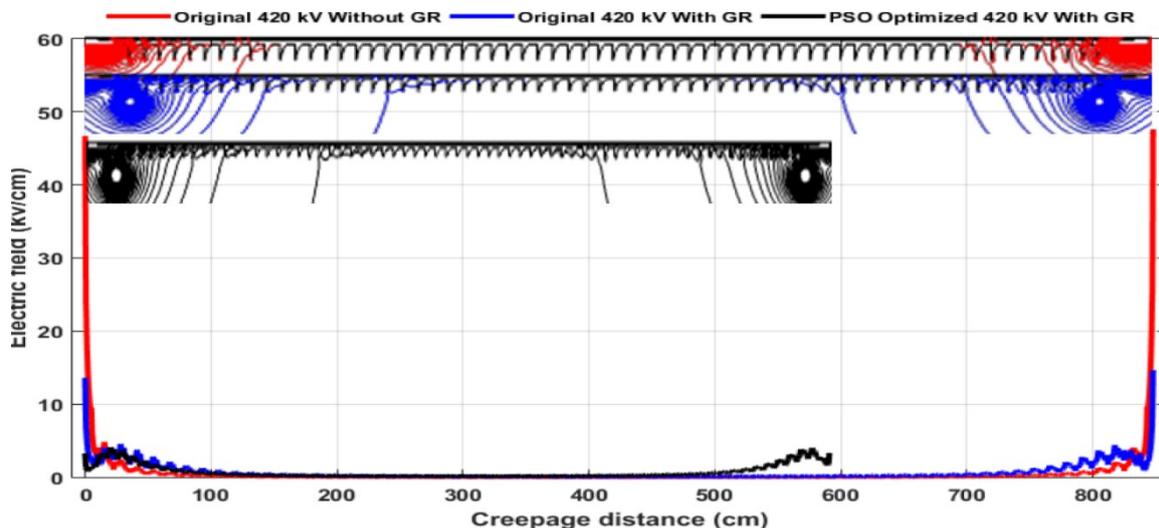


Figure I. 28 Distribution du champ électrique le long la ligne de fuite des géométries d'origine avec et sans la présence de l'anneau de garde et avec la géométrie optimisée de l'isolateur 420 kV [60].

La figure I.29 montre l'intensité du champ électrique aux trois zones critiques (le point triple de l'air-métal-matériau polymère, la partie métallique et l'anneau de garde) en fonction du diamètre du tube de l'anneau (RTD) [64]. La position verticale et horizontale de l'anneau de garde ont été fixées à leurs valeurs respectives de H=305 mm et R=20 mm. Les chercheurs ont observé que l'intensité du champ électrique diminue dans les trois zones lorsque le diamètre du tube de l'anneau est augmenté.

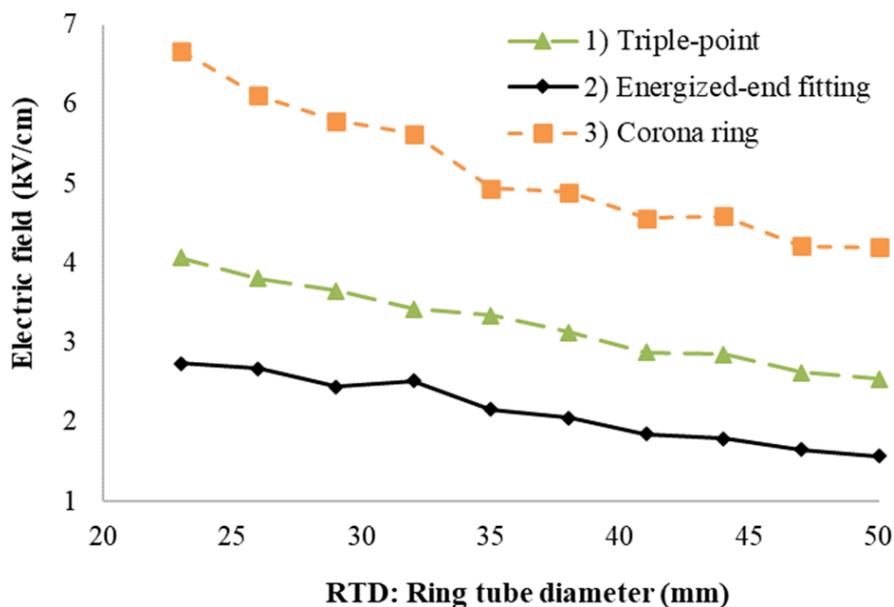


Figure I. 29 Intensité du champ électrique aux trois zones critiques en fonction du diamètre du tube de l'anneau (RTD) (CRD = 305 mm et CRP = 20 mm). [64].

En général, augmenter le rayon du tube de l'anneau de garde tout en maintenant la position horizontale et verticale fixe peut conduire à une distribution plus uniforme du champ électrique et à une réduction de l'intensité du champ électrique [47, 64]. Cependant, des limitations pratiques doivent être prises en compte, car un plus grand rayon de tube d'anneau peut entraîner des besoins en matériaux accrus, entraînant des coûts plus élevés et des contraintes mécaniques importantes [64, 65].

L'optimisation via simulation est une approche puissante pour améliorer les performances des systèmes complexes. Cependant, elle peut être coûteuse en termes de temps de calcul et de gestion de la mémoire. C'est pourquoi certains chercheurs accordent une attention particulière à ces aspects lors de la conception de leurs simulations. Par exemple, pour simplifier la procédure de calcul, certains chercheurs ont proposé une approche basée sur un facteur de réduction nommé « Reduction Factor » [66]. Leur étude se concentre sur la prédiction en 3D pour différentes dimensions (incluant le pylône, les conducteurs, etc.) et emplacements des isolateurs, en utilisant un modèle axisymétrique 2D équivalent (contenant uniquement l'isolateur). Ils ont défini un facteur de réduction entre les deux modèles (3D et 2D) et ont validé son efficacité pour une ligne de transmission de 400 kV. Leurs résultats montrent que le pourcentage de variation du champ électrique maximum le long de la surface de l'isolateur, lors de l'application du facteur de réduction, est bien aligné, avec une erreur maximale de 6%. En résumé, selon cette recherche, le modèle axisymétrique 2D peut être utilisé pour les simulations, mais pour obtenir précisément les résultats des modèles 3D en tenant compte de l'ensemble de la structure des lignes de transmission, le facteur de réduction doit être pris en compte.

I.4. Conclusion

Ce chapitre présente une exploration approfondie pour mieux comprendre le comportement électrique des isolateurs, qu'ils soient en verre ou composites, en vue d'améliorer leur performance. Les recherches ont couvert divers aspects, allant de l'analyse du courant électrique, du potentiel, de la charge électrique à la distribution du champ. L'accent particulier mis sur l'optimisation des anneaux de garde, comme souligné dans plusieurs études, se révèle être un élément clé pour améliorer la distribution du champ électrique et, par conséquent, renforcer les propriétés diélectriques des isolateurs. Les travaux examinés ont mis en lumière l'efficacité de différentes méthodes, telles que l'utilisation d'algorithmes d'optimisation, pour concevoir des anneaux de garde optimisés. De plus, des approches novatrices, comme l'intégration de matériaux de gradation de champ électrique, ont été présentées comme des solutions alternatives pour prolonger la durée de vie des isolateurs composites. En considérant l'ensemble de ces contributions, cette synthèse bibliographique fournit une base solide pour la suite de notre étude, visant à apporter des améliorations significatives dans la conception et la performance des isolateurs électriques.



Chapitre II

Étude expérimentale du comportement de l'isolateur 1512L

II.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale et l'analyse du comportement électrique de l'isolateur capot et tige en verre trempé de type 1512L pollué sous tension alternative 50 Hz. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux caractéristiques du courant, de la charge et de la tension appliquée. Les expérimentations ont été menées conformément à la norme CEI 60815, impliquant l'utilisation d'une pollution artificielle, à savoir un mélange d'eau distillée avec du NaCl. Deux répartitions de la pollution à savoir uniforme et non-uniforme (discontinue) ont été adoptées. Plusieurs conductivités de la pollution uniforme et différentes largeurs de la pollution discontinue ont été considérées. Pour chaque configuration, divers niveaux de tension ont été appliqués.

Nous présentons, dans ce chapitre, le dispositif d'essais ainsi que les techniques de procédures expérimentales adoptées pour la mesure du courant de fuite et de la charge électrique.

II.2. Dispositif expérimental

Cette section présente une description du dispositif expérimental, comprenant les différents équipements d'essais et dispositifs de mesure utilisés pour mener à bien notre étude. Les essais ont été réalisés au laboratoire de haute tension de l'École Nationale Polytechnique (ENP) dans le but d'étudier les performances électriques de l'isolateur en verre (1512L), largement utilisé par la société SONELGAZ dans les lignes de transmission en Algérie.

Le banc d'essai nous a permis d'évaluer la tension de contournement, de mesurer le courant de fuite, et de quantifier la charge électrique de l'isolateur en analysant spécifiquement ses comportements électriques sous un état de surface de pollution uniforme et non-uniforme.

II.2.1. Dispositif d'essais et de mesure

Pour l'ensemble des essais, nous avons utilisé l'isolateur en verre de type 1512L (Figure II.1). Cet isolateur a été soumis à une tension alternative de fréquence 50 Hz, délivrée par un transformateur d'essais de 300 kV, 50 kVA, 50 Hz, alimenté par un transformateur de réglage de 0 à 380 V, 50 kVA, 50 Hz, permettant d'ajuster la tension à la valeur souhaitée. Un filtre est installé entre les deux transformateurs pour filtrer la tension d'entrée (Figure II.2). L'isolateur a été suspendu à une hauteur élevée du sol et placé loin de tous les autres dispositifs afin d'éviter toute sorte d'interférence indésirable.

Les mesures sont transmises via des câbles coaxiaux à un oscilloscope numérique INSTEK GDS-3504 pour la visualisation et l'enregistrement (Figure II.3). Cet oscilloscope est caractérisé par une bande passante de 500 MHz. Un ordinateur a été utilisé pour enregistrer les formes d'onde de la tension appliquée, du courant de fuite, et de la charge électrique.



Figure II. 1 Isolateur réel 1512 L.

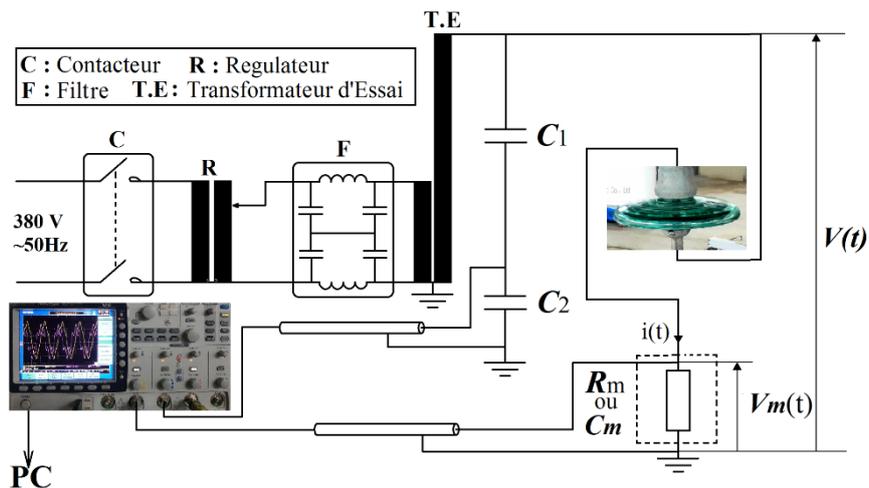


Figure II. 2 Schéma du dispositif expérimental.

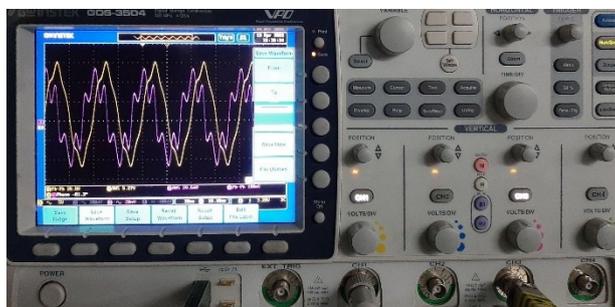


Figure II. 3 Oscilloscope INSTEK GDS-3504.

II.2.2. Caractéristiques de la pollution

Diverses particules solides ou liquides en suspension dans l'air, telles que la poussière, le sable, le brouillard salin, l'humidité, la brume, et les débris végétaux, etc., se déposent progressivement sur la surface de l'isolateur, formant ainsi une couche de pollution. Ces particules sont transportées par divers processus, incluant les forces gravitationnelles, les attractions électrostatiques, l'évaporation, etc. [34].

Afin de reproduire les conditions de pollution pour réaliser des essais en laboratoire, nous avons utilisé une solution polluante composée d'eau distillée avec différentes concentrations massiques de chlorure de sodium (NaCl), visant à obtenir des conductivités

représentant différents niveaux de sévérité de pollution du site (SPS), allant de très léger, léger à moyen, en conformité avec la norme CEI 60815 [67]. Les solutions polluantes correspondantes ont été préparées au laboratoire de haute tension de l'ENP, et leurs valeurs de conductivité sont présentées dans le tableau II.1 en fonction des quantités de NaCl utilisées dans 1 L d'eau distillée.

Les essais expérimentaux ont été réalisés pour étudier les conditions de surface, qu'elles soient propres ou polluées (uniformes et non uniformes). Afin d'assurer la propreté de l'isolateur, la plupart des impuretés ont été soigneusement éliminées de sa surface. Pour ce faire, la surface de l'isolateur a été minutieusement lavée avec de l'eau et séchée avec du papier. Ensuite, elle a été nettoyée à l'aide de coton imprégné d'alcool pur (99,8%) et laissée à sécher naturellement.

Tableau II.1. Concentration massique de NaCl et la conductivité correspondante de la pollution uniforme.

	très léger	léger	moyen
Masse de NaCl [mg]	0	100	250
Conductivité [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	20	150	340

Pour appliquer la pollution artificielle sur la surface de l'isolateur, la solution polluante préparée a été pulvérisée à l'aide d'un pulvérisateur. Afin de maintenir la même reproductibilité de la solution polluante sur la surface de l'isolateur, nous avons choisi 6 côtés espacés de 60 degrés, formant un cercle. Cette solution a été pulvérisée trois fois de chaque côté. La distance entre la buse de pulvérisation et la surface de l'isolateur a été maintenue à 40 cm conformément à la norme CEI 60507 [69]. Cette procédure a été appliquée à la fois sur la surface inférieure et supérieure de l'isolateur (Figure II.4).

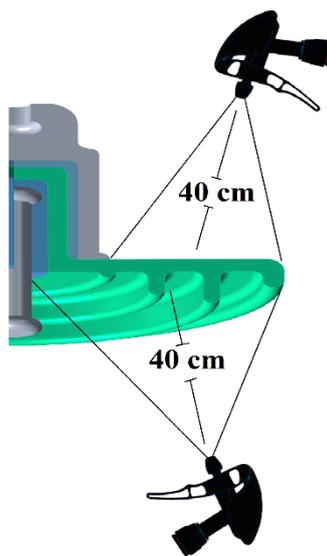


Figure II. 4 Méthode de pulvérisation.

Comme mentionné précédemment, deux répartitions de la pollution à savoir uniforme et non-uniforme ont été considérées. Pour la répartition uniforme, la solution polluante a été uniformément pulvérisée sur toute la surface de l'isolateur (parties supérieure et inférieure). En ce qui concerne la répartition de pollution non-uniforme (discontinue), nous avons adopté plusieurs largeurs de couche de pollution : 5, 10, 15, 20 et 25 cm. De telles couches polluantes ont été appliquées à partir de la borne HT (soit à partir de la tige). Nous avons considéré, pour cette répartition de la pollution discontinue, une valeur extrême de la conductivité de 1050 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour une masse de NaCl de 750 mg, représentant une sévérité de pollution très élevée.

II.2.3. Mesure de la tension de contournement

La station d'essais est munie d'un système de protection intégré permettant de couper l'alimentation en tension lors des contournements. La valeur correspondante est affichée sur l'écran du PC. La mesure se fait à l'aide d'un diviseur capacitif ayant un rapport de 1:1000 ($C_1=500$ pF et $C_2 = 0,5$ μF).

Lors de la mesure de la tension de contournement, le capot de l'isolateur doit être directement relié à la terre. Ceci est réalisé en retirant aussi bien l'impédance de mesure (R_m et C_m) du circuit d'essais que l'oscilloscope de la figure II.2.

La tension de contournement permet d'analyser le comportement diélectrique de l'isolateur en fonction de la conductivité de la pollution uniforme et la largeur de la couche de pollution discontinue. Elle permet également de fixer les paliers pour la mesure du courant de fuite et de la charge électrique.

II.2.4. Mesure du courant de fuite

La forme d'onde du courant de fuite est mesurée en enregistrant la tension (V_m) aux bornes d'une résistance pure de mesure (R_m) insérée en série avec l'isolateur et la mise à la terre. La tension V_m est acheminée vers l'oscilloscope par le biais d'un câble coaxial afin d'être visualisée. Par ailleurs, le diviseur de tension capacitive permet de visualiser le signal de la tension appliquée sur l'oscilloscope (Figure II.2). Les valeurs des résistances de mesure pour les cas non-uniforme et uniforme sont respectivement de 1 k Ω et 100 Ω . Ce choix a été fait pour obtenir une image complète du signal de courant de fuite, représentative du signal lui-même ainsi que des impulsions qui l'accompagnent.

Dans le cas non-uniforme, une résistance de 1 k Ω a été choisie pour obtenir une meilleure résolution du signal de courant de fuite. En revanche, pour le cas uniforme, l'impédance de l'isolateur diminue en raison de la conductivité de la couche de pollution, entraînant ainsi une augmentation du courant de fuite et donc de l'amplitude de la tension V_m . Toutefois, il est essentiel de prendre en compte une limite pour la valeur de la tension visualisée à l'oscilloscope afin de prévenir tout risque d'endommagement de l'oscilloscope. C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé une résistance de 100 Ω pour le cas uniforme, car elle permet de maintenir la tension V_m à des valeurs appropriées.

Afin d'éviter les interférences électromagnétiques indésirables qui pourraient perturber les mesures, chaque résistance a été placée à l'intérieur d'un boîtier métallique relié à la terre, formant ainsi une cage de Faraday.

Cette méthode de mesure permet d'afficher l'image du courant de fuite $i(t)$ à travers le signal de tension $V_m(t)$ sur l'oscilloscope. Étant donné que la résistance interne de l'oscilloscope est de l'ordre de $R_o = 1M\Omega$, elle est beaucoup plus importante que la résistance de mesure R_m ($R_o \gg R_m$). Ainsi, les valeurs instantanées de $V_m(t)$ et de $i(t)$ sont liées par la relation suivante :

$$i(t) = \frac{V_m(t)}{R_m R_o / (R_m + R_o)} \approx \frac{V_m(t)}{R_m} \quad (\text{II.1})$$

II.2.5. Mesure de la charge électrique

De la même manière que la mesure du courant de fuite, la mesure de la charge électrique s'effectue en remplaçant la résistance de mesure par une capacité de mesure $C_m = 0,5 \mu\text{F}$. La mesure de la tension V_m aux bornes de cette capacité est ramenée à l'oscilloscope pour visualisation par le biais d'un câble coaxial (Figure II.2). Puisque la valeur de la capacité de l'isolateur C_i est approximativement aux alentours du picofarad, on a donc :

$$\frac{1}{C_i} \gg \frac{1}{C_m} \text{ Ce qui implique que } V \gg V_m \quad (\text{II.2})$$

Cela signifie que les valeurs de tension enregistrées pendant les essais sont dans la plage de mesure acceptable de l'oscilloscope. De plus, la consommation de l'oscilloscope est négligeable (représentant qu'une erreur d'environ 1% [35]). Ainsi, la quantité de charge électrique instantanée accumulée sur l'isolateur, $Q(t)$, est égale à la quantité de charge reçue par la capacité de mesure :

$$Q(t) = C_m V_m = C_i (V - V_m) = C_i V \quad (\text{II.3})$$

II.3. Résultats et interprétations

II.3.1. Tension de contournement

Étant donné que l'oscilloscope n'est pas protégé contre les court-circuits, les niveaux de tension sélectionnés pour l'enregistrement du courant de fuite et de la charge électrique pour une configuration donnée de la pollution sont bien inférieurs à la tension de contournement correspondante. Pour cette raison, les tensions de contournement et d'initiation des décharges électriques ont été prélevées pour les pollutions uniforme et non-uniforme et les valeurs sont présentées respectivement dans les tableaux II.2 et II.3.

L'augmentation de la conductivité ou de la largeur de la pollution entraîne une diminution de la tension de contournement et celle de l'initiation des décharges électriques. Ceci est expliqué par la diminution de la résistance diélectrique du système d'isolation.

Ces observations soulignent l'impact significatif de la pollution sur la performance électrique du système d'isolation, mettant en évidence la nécessité de prendre en compte ces facteurs lors de la conception et de l'évaluation des isolateurs électriques.

Tableau II.2. Tensions de contournement et d'initiation des décharges électriques en fonction de la conductivité de la pollution uniforme.

Conductivités ($\mu\text{S/cm}$)	20	150	340
Tension de contournement (kV)	71,5	69	61
Tension d'initiation des décharges électriques (kV)	36	32	29

Tableau II.3. Tensions de contournement et d'initiation des décharges électriques en fonction de la largeur de la couche de pollution discontinue.

Largeur de la couche de pollution (cm)	0	5	10	15	20	25
Tension de contournement (kV)	72	70	65	55	35	25
Tension d'initiation des décharges électriques (kV)	48	26	22	18	17	14

Étant donné que le contournement peut endommager le circuit de mesure, les paliers de tension à appliquer afin d'enregistrer les signaux du courant et de la charge doivent être inférieurs à la tension de contournement. Pour ce faire, une tension maximale de 30 kV a été choisie pour toutes les configurations de la pollution, à l'exception de celle non-uniforme de 25 cm, où la tension a été réduite à 15 kV en raison du contournement survenu à 25 kV.

II.3.2. Courant de fuite et charge électrique pour une pollution uniforme

Dans cette section, nous examinons les évolutions du courant de fuite et de la charge électrique en fonction de la conductivité de la pollution. Pour cela, nous avons considérés trois conductivités différentes à savoir de 20, 150 et 340 ($\mu\text{S/cm}$). Les sévérités de pollution correspondantes sont à savoir très légère, légère et moyenne respectivement. Ceci est en accord avec les spécifications de la norme CEI 60815 [67]. Les paliers de tension que nous avons appliqués durant les ces essais sont : de 5, 10, 15, 20, 25 et 30 kV.

II.3.2.1 Courant de fuite

L'évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour pollution uniforme est présentée sur la figure II.5. La couche uniforme de pollution forme un film continu reliant les électrodes de l'isolateur, créant ainsi un chemin à travers lequel le courant circule. Par conséquent, l'augmentation de la conductivité entraîne une augmentation du courant de fuite. Par ailleurs, pour une conductivité donnée, le courant augmente quasi-linéairement avec la tension appliquée. Ce qui permet de déduire l'impédance équivalente de l'isolateur pour chaque conductivité.

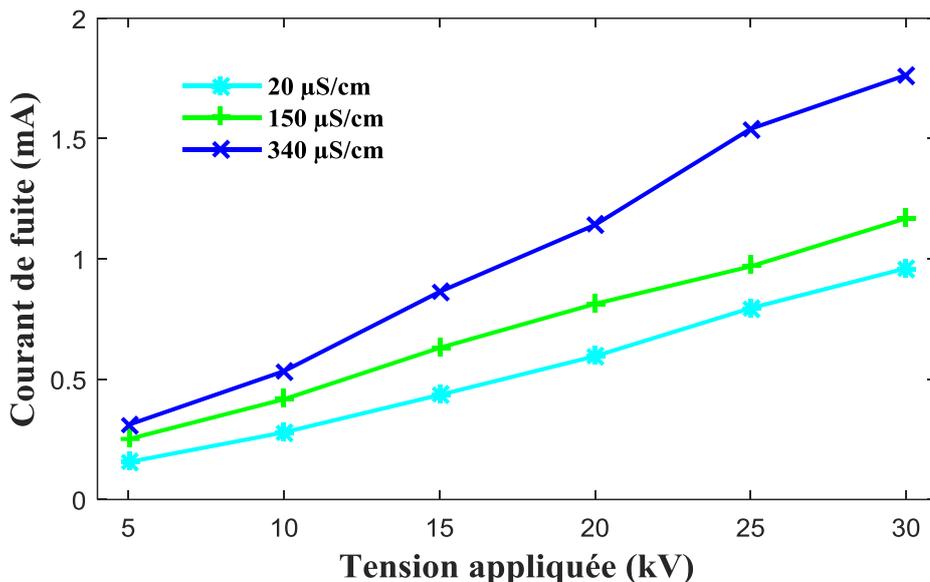


Figure II. 5 Courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour le cas de pollution uniforme.

La présentation simultanée des signaux du courant de fuite et ceux de la tension appliqué pour différentes conductivités de la pollution est montrée sur la figure II.6. Cette figure confirme encore une fois que les valeurs maximales de ces signaux augmentent avec la conductivité de la pollution. Cependant, leurs formes sont pratiquement insensibles à la variation de cette conductivité.

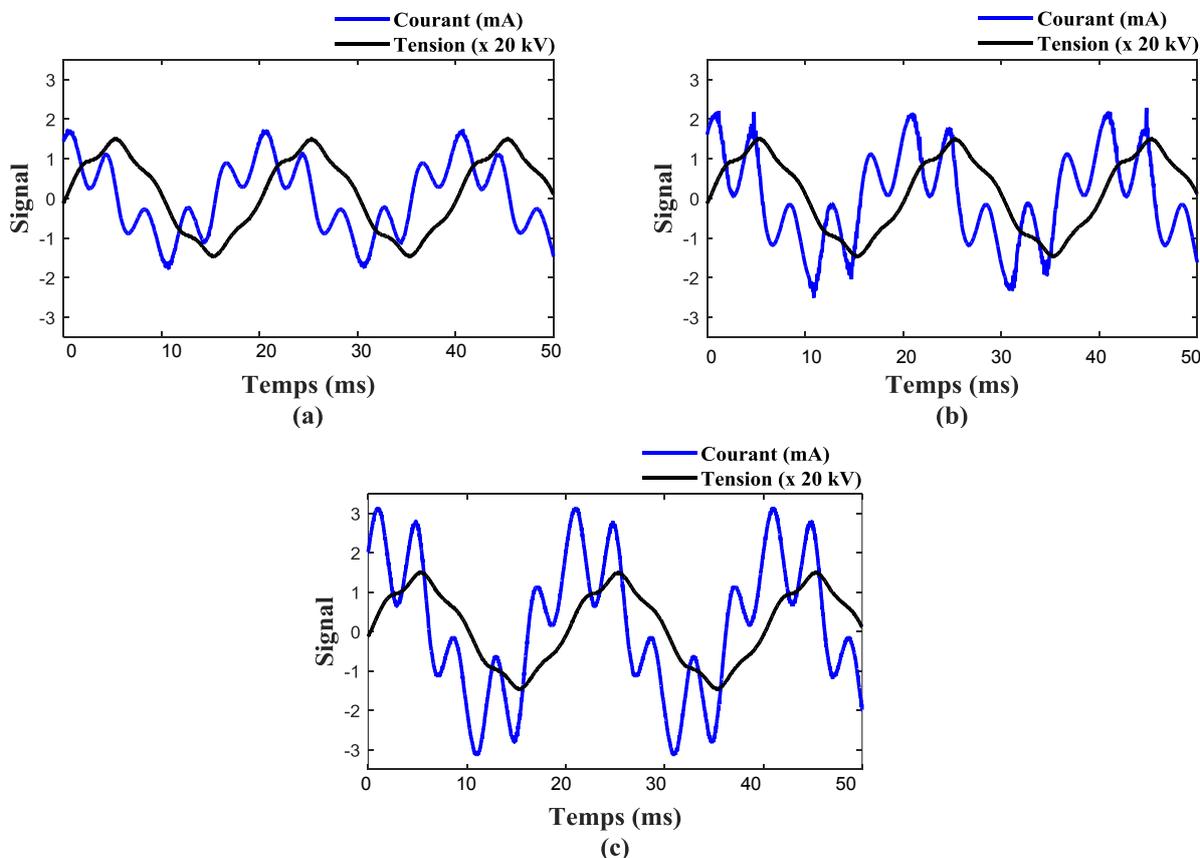


Figure II. 6 Formes d'ondes du courant de fuite pour différentes conductivités de pollution : (a) 20 μS/cm, (b) 150 μS/cm, (c) 340 μS/cm.

Pour les trois classes de sévérité de pollution (légère, très légère et moyenne) les formes d'ondes du courant de fuite sont très déformées, avec un angle de déphasage tension appliqué-courant de fuite-courant proche de 90° , indiquant que le comportement capacitif du système d'isolation prédomine. En analysant cette variation de près, nous constatons que ce le déphasage diminue graduellement à mesure que la conductivité augmente. A titre d'exemple, nous avons enregistré $83,43^\circ$ pour $20 \mu\text{S/cm}$, $79,92^\circ$ pour $150 \mu\text{S/cm}$ et finalement $76,23^\circ$ pour $340 \mu\text{S/cm}$

II.3.2.2 Impédance électrique équivalente

La pente de chaque caractéristique courant-tension de la figure II.5, pour chaque conductivité de la pollution uniforme, représente l'admittance équivalente du système isolant. L'impédance correspondante est l'inverse de cette admittance. Ainsi, les caractéristiques courant-tension permettent la détermination de l'impédance équivalente du système isolant pour chaque configuration de la pollution uniforme. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau II.4. D'après ce tableau, nous remarquons que l'impédance du système d'isolation (isolateur, air et pollution uniforme) diminue en augmentant la valeur de la conductivité de la pollution.

Tableau II.4. Impédance mesuré du système d'isolation (isolateur, air et pollution) pour chaque conductivité de la pollution uniforme.

Conductivités ($\mu\text{S/cm}$)	20	150	340
Impédance ($\text{M}\Omega$)	31,05	27,24	17,20

II.3.2.3 Charge électrique

La variation de l'amplitude de la charge en fonction de conductivité électrique de la pollution sous différentes tensions appliquées est représentée sur la figure II.7. De même que le courant de fuite, cette figure montre que la charge électrique augmente aussi bien avec la conductivité de la pollution uniforme, qu'avec la tension appliquée.

Les signaux de la charge électrique enregistrés sous une tension appliquée de 30 kV pour les trois conductivités de pollution uniforme sont présentés sur la figure II.8. Comme le montre la figure, la valeur maximale de la charge augmente avec l'augmentation de la valeur de conductivité. De plus, signaux de la charge et ceux de la tension appliquée sont presque en phase, suggérant que le comportement prédominant observé est capacitif.

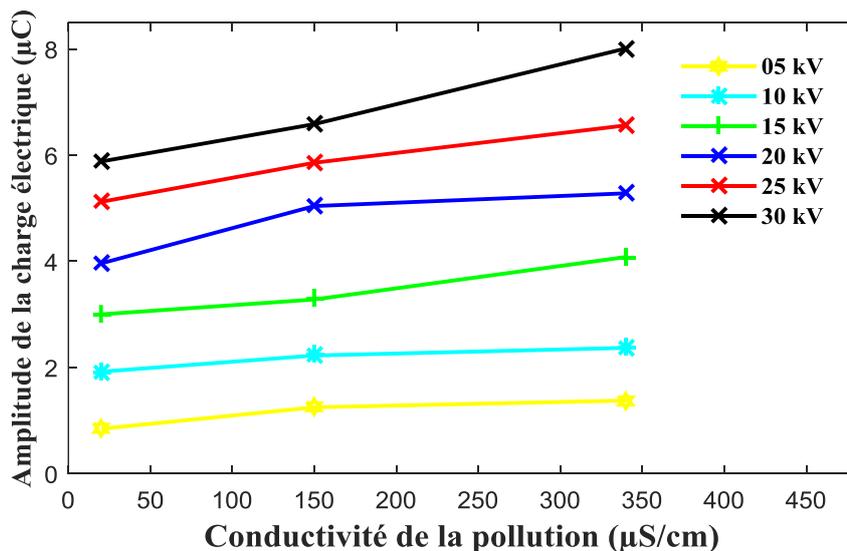


Figure II. 7 Amplitude de la charge électrique en fonction des conductivités de pollution pour différentes valeurs de la tension appliquée.

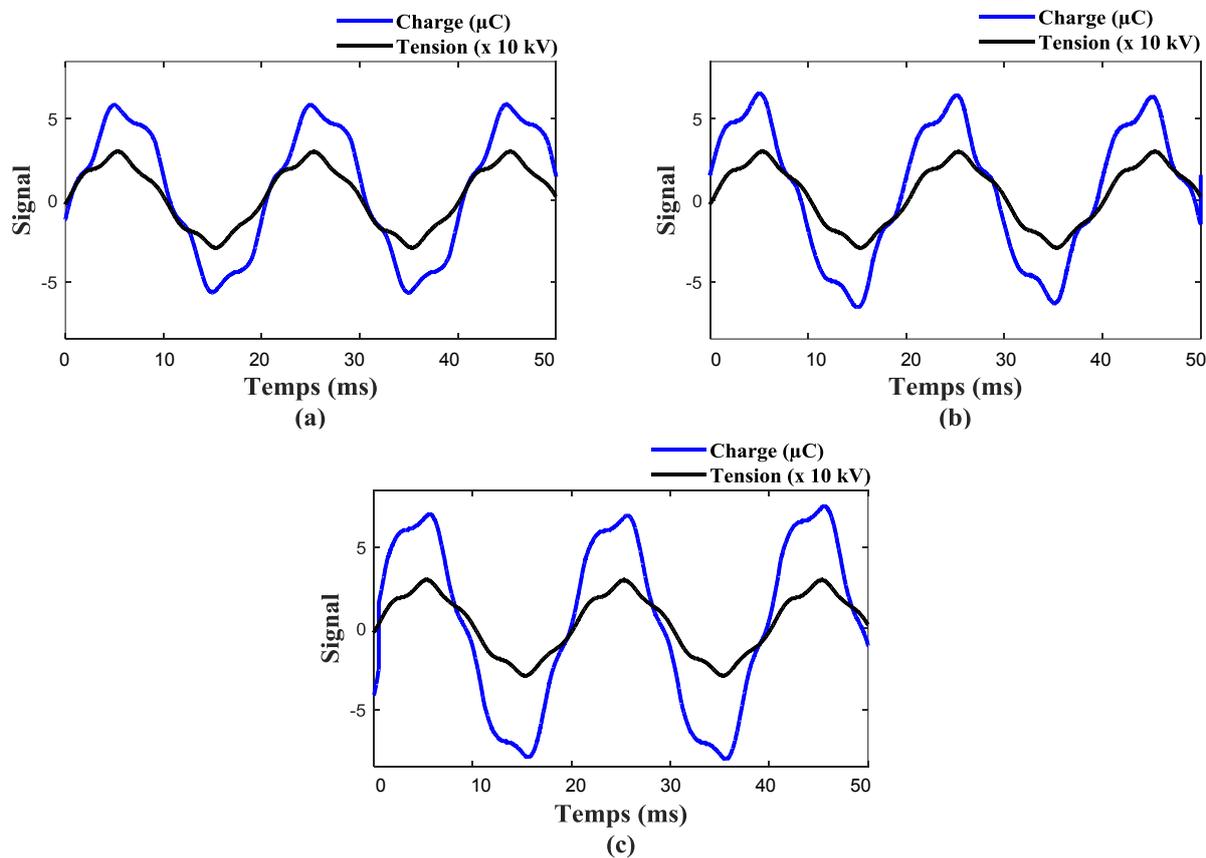


Figure II. 8 Formes d'ondes de la charge électrique pour différentes conductivités de pollution : (a) 20 µS/cm, (b) 150 µS/cm, (c) 340 µS/cm.

II.3.3. Courant de fuite et charge électrique pour une pollution non-uniforme

Dans cette section, nous analysons l'impact de la pollution discontinue sur le courant de fuite et la charge électrique. Pour cela, différentes largeurs de couche polluante de 5, 10, 15, 20 et 25 cm, ont été appliquées placées sur la surface de l'isolateur à partir de la tige (borne HT). Les tensions appliquées pour ces essais sont 5, 10, 15, 20, 25 et 30 kV.

II.3.3.1 Courant de fuite

La variation du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche de pollution, pour différents niveaux de tension appliquée, est montrée sur la figure II.9. Cette figure illustre la relation entre le courant de fuite et la variation de la largeur de la couche de pollution à la surface de l'isolateur.

Nous observons que, pour une largeur de pollution donnée, le courant de fuite augmente avec l'augmentation de la tension appliquée. En revanche, pour un niveau de tension appliquée donné, le courant de fuite n'augmente que lorsque la largeur de la pollution passe de 0 (cas de l'isolateur propre) à une largeur de pollution de 5 cm. Au-delà de cette valeur, le courant de fuite reste presque stable, indiquant que l'élargissement de la largeur de la pollution a pratiquement peu d'effet sur la variation de le du courant de fuite.

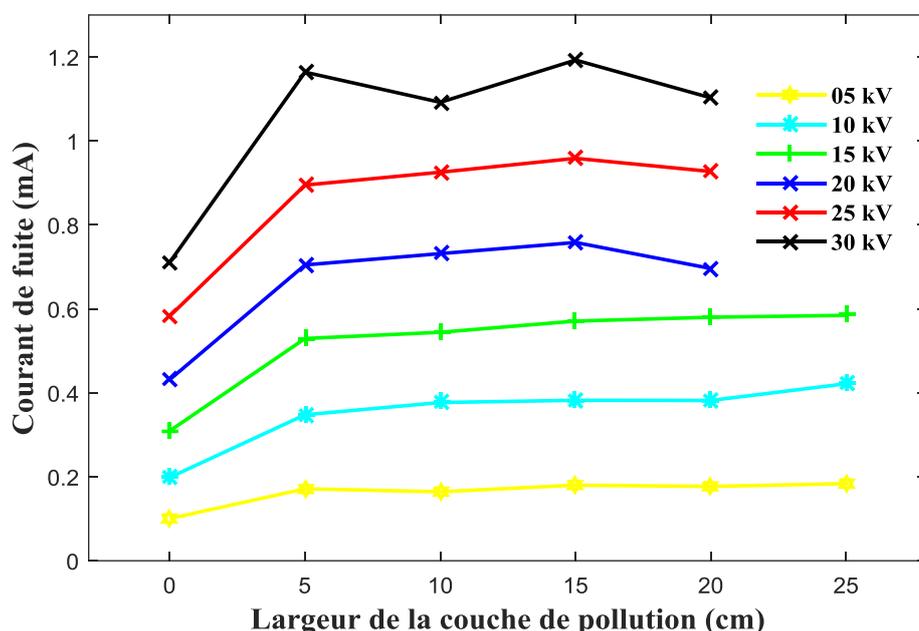


Figure II. 9 Courant de fuite en fonction de la largeur de la couche de pollution pour différentes valeurs de la tension appliquée.

Les formes d'ondes du courant de fuite de l'isolateur pour la surface propre et les largeurs de couche de pollution de 5, 10, 15 et 20 cm sous une tension appliquée de 30 kV sont présentées sur la figure II.10.

Les formes d'ondes présentent des distorsions et un décalage proche de 90° entre le courant de fuite et la tension appliquée en raison du comportement capacitif de l'isolateur dû à l'effet de la bande sèche. Il est à souligner que des activités d'arcs électriques dans la bande sèche commencent à se produire à des tensions relativement élevées. Cependant, la forme et l'amplitude du signal du courant de fuite restent relativement les mêmes pour toutes les largeurs de la pollution discontinue adoptées. Ainsi, la largeur de la pollution non-uniforme n'affecte pratiquement pas les signaux du courant de fuite en termes de forme et amplitude, bien entendu, dans les limites des largeurs adoptées.

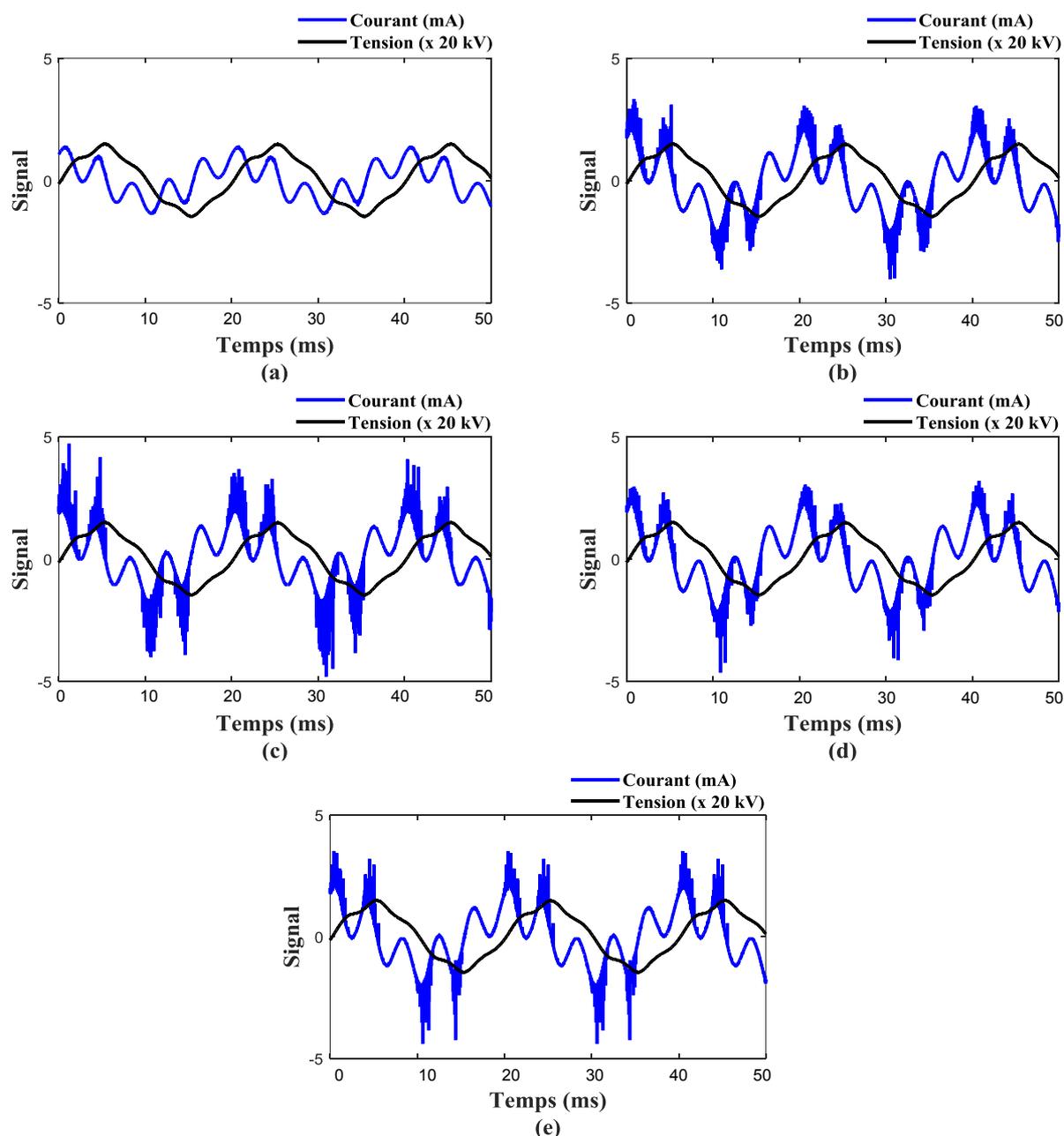


Figure II. 10 Formes d'ondes du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche de pollution : (a) surface propre, (b) 5 cm, (c) 10 cm, (d) 15 cm et (e) 20 cm.

II.3.3.2 Charge électrique

La figure II.11 illustre la variation de l'amplitude de la charge en fonction de la largeur de la couche de pollution pour différentes tensions appliquées. À partir de cette figure, les résultats montrent une augmentation des amplitudes de la charge à mesure que la largeur de la couche de pollution discontinue augmente. Cette augmentation s'accroît pour des tensions appliquées supérieures ou égales à 15 kV.

La figure II.12 présente les formes d'ondes (signaux) de la charge électrique sous une tension appliquée de 30 kV pour isolateur propre et sous pollution discontinue dont la largeur de la pollution varie de 5 à 20 cm. Les signaux de la charge et ceux de la tension sont presque en phase, en raison de la présence de la bande sèche, indiquant un comportement capacitif dominant de l'isolateur même en présence de la pollution discontinue.

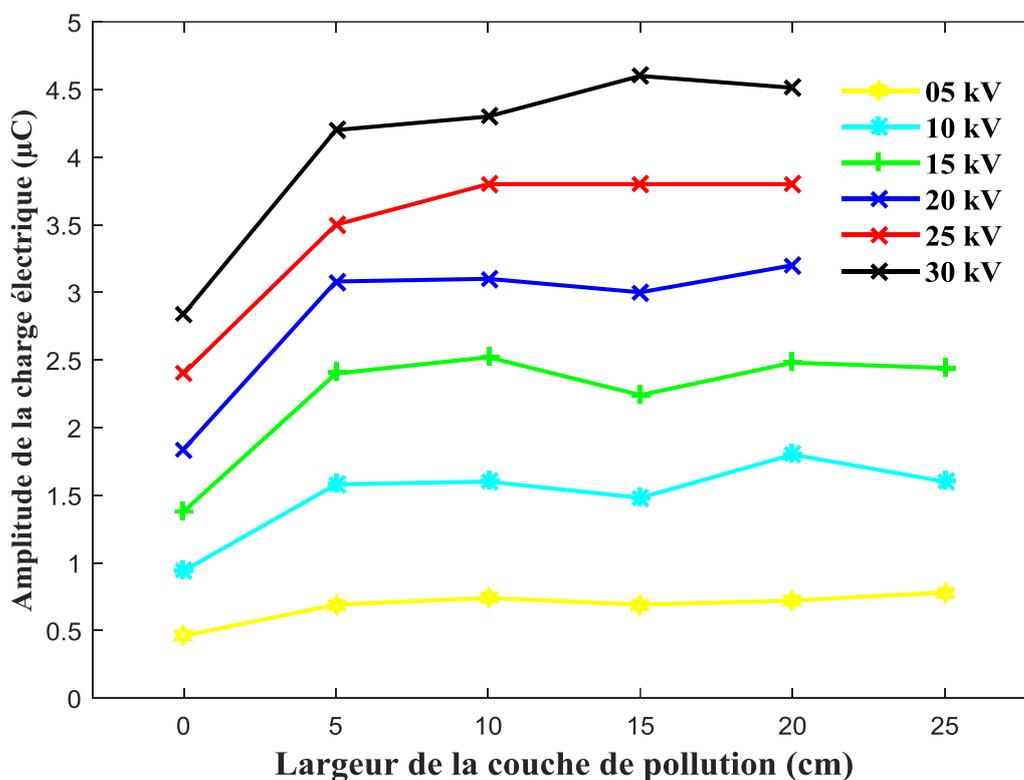


Figure II. 11 Amplitude de la charge électrique en fonction de différentes largeurs de la couche de pollution pour différentes valeurs de la tension appliquée.

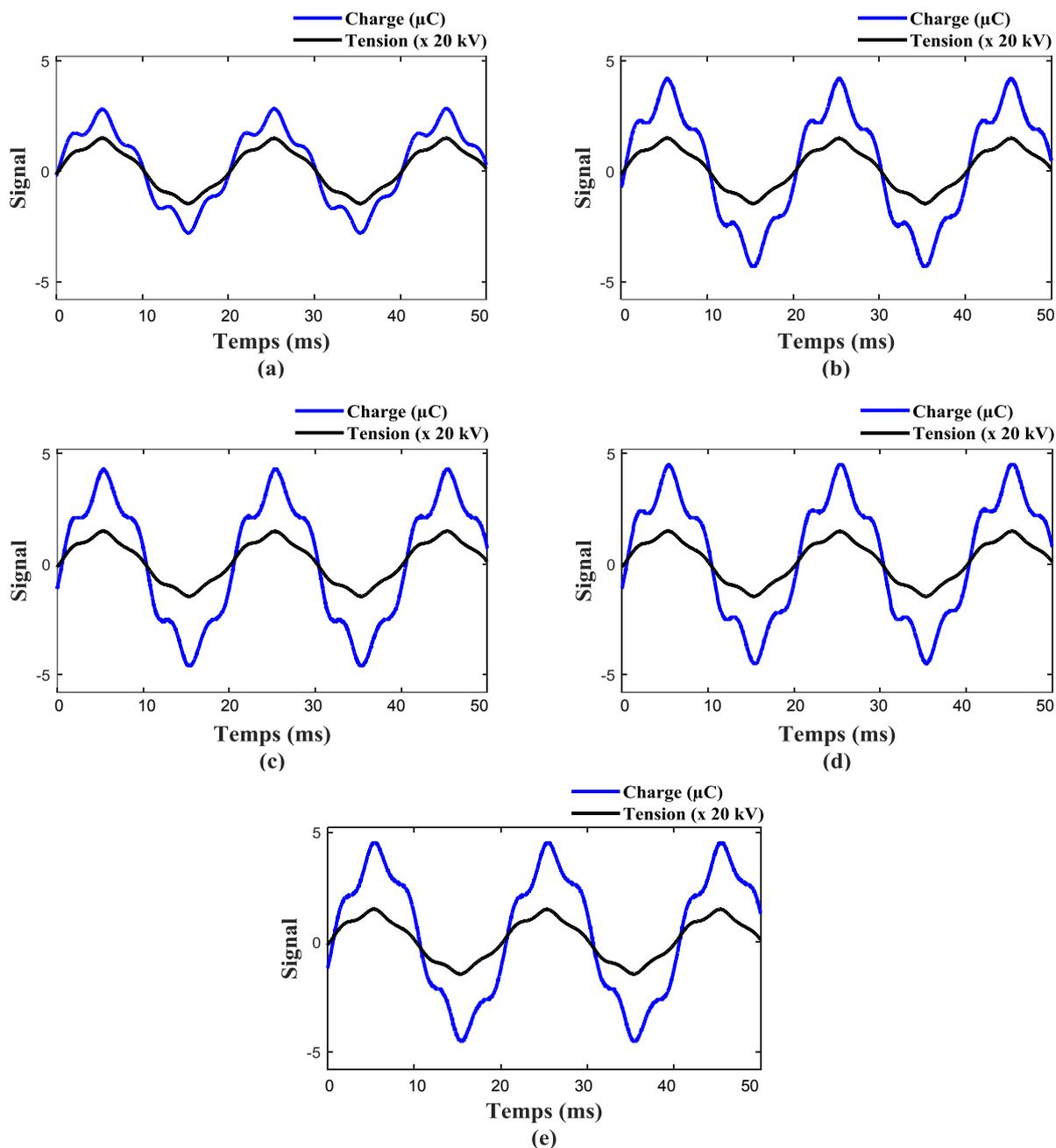


Figure II. 12 Formes d'ondes de la charge électrique pour différentes largeurs de la couche de pollution : (a) surface propre, (b) 5 cm, (c) 10 cm, (d) 15 cm et (e) 20 cm.

II.4. Conclusion

Afin d'analyser expérimentalement son comportement, l'isolateur capot et tige de type 1512L en verre trempé a été testé sous pollution uniforme et non-uniforme (discontinue). Pour cela, trois conductivités pour la pollution uniforme (20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 340 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et cinq largeurs de la pollution discontinue (5 cm à 25 cm par pas de 5 cm ayant la même conductivité de 1050 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et plusieurs niveaux de tension appliquée (allant jusqu'à 30 kV) ont été considérés. Il a été constaté que :

- Le courant de fuite augmente avec la conductivité de la pollution uniforme et reste pratiquement stable (invariant) avec la variation de la largeur de la couche de pollution discontinue.
- La charge électrique augmente avec la conductivité de la pollution uniforme, tandis qu'elle augmente lentement avec l'élargissement de la couche de pollution discontinue.
- Pour les deux répartitions de la pollution, le signaux du courant de fuite présente des distorsions et est en avance sur la tension d'alimentation de presque 90° . Au moment où le signal de la charge électrique est pratiquement en phase avec celui de la tension appliquée. Ceci indique que le comportement de l'isolateur est fortement capacitif.



Chapitre III

Étude par simulation du comportement de l'isolateur 1512L

III.1. Introduction

Ce chapitre porte sur étude numérique du comportement électrique de l'isolateur 1512L. En fait, les mêmes travaux de recherche développés précédemment ont été repris en utilisant le COMSOL Multiphysics. En effet, nous nous sommes intéressés à l'évolution du courant, de la charge électrique et de la tension appliquée, sous tension alternative, dans les mêmes conditions de pollution (uniforme et non-uniforme).

Nous détaillons, dans ce chapitre, les méthodes numériques utilisées pour mener ces simulations sous environnement COMSOL Multiphysics. Nous décrivons également en détail les différentes étapes de la simulation, depuis la conception du modèle jusqu'à l'exécution et l'analyse des résultats. La méthodologie adoptée pour mener à bien ces simulations est détaillée, avec l'inclusion de diagrammes représentatifs et de rappels des équations mathématiques de base. Nous comparons ensuite les caractéristiques simulées à celles obtenues expérimentalement.

La simulation a été effectuée en vue d'apporter un complément valable à l'expérimentation, permettant ainsi de présenter des caractéristiques complémentaires à celle expérimentales. Parmi celles-ci, nous présentons les distributions du champ et du potentiel électriques à la surface de l'isolateur ainsi que les lignes de la densité du courant. Des représentations en 3D sont également fournies afin de visualiser de manière optimale l'impact de la pollution sur le système d'isolation. De plus, nous examinons l'initiation des arcs électriques dans notre simulation. La distribution de la charge électrique volumique, celle surfacique, ainsi que celle le long de la ligne de fuite sont également présentées et interprétées.

III.2. Simulation numérique

La simulation numérique consiste à reproduire un phénomène physique réel sur un ordinateur ou une station de travail. Elle permet d'économiser les ressources en évitant la nécessité de réaliser des expériences réelles coûteuses en termes de matériaux, de main-d'œuvre et de temps. Ainsi, la simulation permet d'éviter les risques pour la sécurité liés aux expériences réelles, notamment des tests de haute tension ou de courants élevés. Sa flexibilité réside dans la possibilité de contrôler et d'ajuster des paramètres précis d'un système à simuler pour observer leur impact sur les résultats, permettant ainsi des analyses approfondies et une meilleure compréhension du système.

De plus, la simulation permet d'explorer rapidement différentes conditions et scénarios, accélérant le processus de conception et/ou d'optimisation. Elle offre la possibilité d'étudier des scénarios difficiles et complexes, notamment dans des conditions extrêmes ou des comportements non-linéaires.

Toutes les simulations, présentées dans ce chapitre, ont été réalisées à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. Ce logiciel repose sur la méthode des éléments finis (FEM : Finite Element Method) et permet d'appliquer différentes combinaisons de phénomènes physiques sur

un même système. Il dispose également de la fonction LiveLink, permettant une interaction avec d'autres logiciels tels que MATLAB, SOLIDWORKS, etc. Les résultats peuvent être représentés en 2D, 3D ou en 2D axisymétrique.

III.2.1. Méthodologie de simulation :

La complexité géométrique du système d'isolation, comprenant l'isolateur et l'air environnant, ainsi que la forme irrégulière des diélectriques qui le composent, nécessite de prendre des précautions rigoureuses concernant la conception, les paramètres physiques utilisés dans la simulation, le maillage du modèle et les conditions aux limites appliquées. Le respect de ces exigences nous permet de visualiser avec précision et fiabilité l'invisible, notamment le champ électrique, le potentiel et la distribution de charge électrique, en tout point de l'espace étudié.

Pour créer un nouveau modèle de simulation sur COMSOL, nous avons choisi les principales étapes suivantes pour mener à bien la simulation :

III.2.1.1 Choix du modèle spatial en 2D axisymétrique :

Cette approche de modélisation, utilisée dans la simulation numérique, vise à simplifier un problème de 3D en le représentant en 2D. Dans ce cas, le modèle doit être symétrique autour d'un axe bien défini. Le modèle 2D axisymétrique est donc une réduction du modèle 3D, tout en conservant les principales caractéristiques du système grâce à la symétrie autour d'un axe. Cette approche permet de réduire la complexité du problème et les temps de calcul, tout en fournissant des résultats équivalents à ceux obtenus avec un modèle 3D complet.

De plus, travailler en 2D axisymétrique facilite la modélisation de l'isolateur, qui peut être considéré comme un modèle parfait pivotant sur son axe, simplifiant ainsi davantage la simulation.

III.2.1.2 Ajout du module de physique AC/DC :

Cette étape est essentielle car le module AC/DC est efficace pour étudier presque tous les aspects électriques tels que les champs électrique et magnétique, le potentiel, le courant, la charge électrique, etc.

Toute la partie de la simulation sur laquelle nous avons basé notre étude est fondée sur les équations de Maxwell, qui unifient l'électricité, le magnétisme et l'induction. Les équations de Maxwell sont un ensemble d'équations aux dérivées partielles qui relient les propriétés magnétiques, représentées par le champ et l'induction magnétiques \vec{H} et \vec{B} , aux propriétés électriques, représentées par le champ et l'induction électriques \vec{E} et \vec{D} . Ces équations représentent l'une des découvertes les plus importantes de la physique. Elles regroupent quatre équations distinctes [77] :

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{III.1})$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{III.2})$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{III.3})$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{III.4})$$

ρ est la densité volumique de charges et \vec{J} le vecteur de la densité de courant. Ces équations sont complétées par des relations constitutives appropriées, permettant d'exprimer \vec{D} et \vec{J} en fonction de \vec{E} , et \vec{B} en fonction de \vec{H} . Ces relations dépendent de la nature du matériau :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (\text{III.5})$$

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (\text{III.6})$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (\text{III.7})$$

Tel que : ϵ_0 , ϵ_r , σ , μ_0 et μ_r représentent respectivement la permittivité du vide, la permittivité relative d'un matériau, la conductivité électrique, la perméabilité du vide et la perméabilité relative d'un matériau.

Le module de physique AC/DC courants électriques a été sélectionné, car il prend en compte tous les effets électriques nécessaires pour notre étude, tout en excluant la partie magnétisme qui n'est pas considérée dans notre cas.

III.2.1.3 Sélection de l'étude temporelle :

Cette phase est cruciale dans la simulation, car elle nous permet de suivre et d'analyser le comportement du système au fil du temps. Nous avons opté pour une plage optimale afin de garantir une qualité de signal acceptable, en fixant une durée de 50 ms. Grâce à cette configuration, nous sommes en mesure d'observer minutieusement les variations des signaux de courant et de charge électrique dans notre modèle. Cette approche nous permet d'obtenir des résultats précis et fiables pour notre étude.

III.2.1.4 Conception du modèle d'isolateur sur la plateforme désignée de COMSOL :

La modélisation de l'isolateur 1512L a été réalisée directement sur la plateforme dédiée en utilisant les outils intégrés disponibles sur COMSOL pour reproduire efficacement sa géométrie. L'isolateur en verre est principalement constitué de trois matériaux distincts : un corps principal diélectrique en verre trempé, un raccord capot et une tige métallique, ainsi qu'un ciment qui permet de fixer les pièces métalliques avec le verre (Figure III.1). Les dimensions

spécifiques de ce type d'isolateur sont également les suivantes : un diamètre maximal de $D_v = 254$ mm, une hauteur de $H_v = 146$ mm et une ligne de fuite de $L_{fv} = 292$ mm (Figure III.1). L'air environnant a été représenté sous la forme d'un cercle avec un rayon de 2 mètres, l'isolateur étant positionné au centre.

En ce qui concerne l'épaisseur de la couche de pollution non-uniforme peut varier entre 1 et 2 mm [5]. Dans notre étude, nous avons choisi une épaisseur de 1 mm. Pour le cas uniforme, nous avons déterminé l'épaisseur (e_p) de la pollution uniforme en divisant le volume de la solution de pollution (V_p) par la surface de l'isolateur recouverte par la pollution (S_p) [72]. La surface (S_p) de l'isolateur a été déterminée à l'aide de la propriété "mesure de la surface géométrique" de COMSOL, et nous avons obtenu $S_p = 0,147$ m². Le volume de la pollution restant sur la surface de l'isolateur est d'environ 15 ml ou $1,5 \times 10^{-5}$ m³, mesuré en collectant le volume de ruissellement de la surface pendant la pulvérisation dans un récipient, puis en le soustrayant du volume pulvérisé.

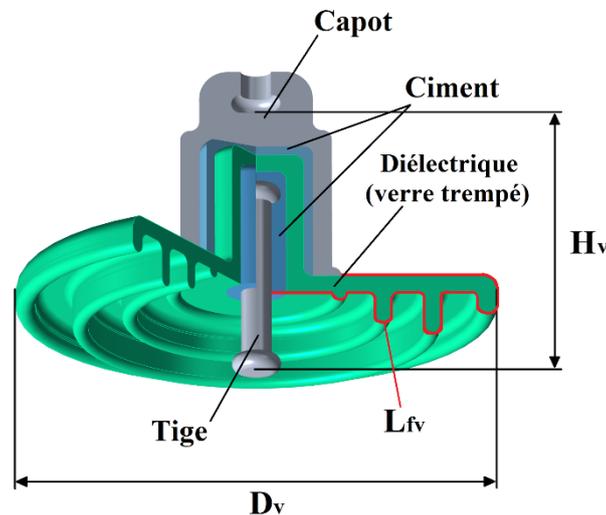


Figure III. 1 Isolateur capot et tige de type 1512L.

L'effet de l'ajout de NaCl sur le volume de la solution polluante a été négligé en raison de la petite quantité de masse de NaCl, qui est très faible par rapport au volume total (avec un maximum de 0,25 g/L). Ainsi,

$$e_p = \frac{V_p}{S_p} = \frac{1,5 \times 10^{-5}}{0,147} = 1,02 \times 10^{-4} \cong 10^{-4} \text{ m} \quad (\text{III.8})$$

III.2.1.5 Initialisation des conditions aux limites :

Cette étape est cruciale dans la simulation car elle consiste à définir les conditions spécifiques appliquées aux limites du modèle. Ces conditions décrivent le comportement du système aux frontières et sont cruciales pour obtenir des résultats représentatifs du système réel.

Dans ce contexte, la conservation du courant est automatiquement appliquée dans tous les domaines. Cela est réalisé en ajoutant l'équation de continuité pour le potentiel électrique et

en définissant la conductivité électrique et la permittivité relative dans l'interface requise. De plus, une isolation électrique est appliquée par défaut à la surface extérieure du système d'isolation, ce qui signifie qu'aucun courant électrique ne circule à travers cette limite ($\vec{n} \cdot \vec{J} = 0$). De plus, la valeur initiale du potentiel V est maintenue à 0. Pour obtenir les signaux de courant et de charge électrique, nous appliquons un signal de tension réelle provenant du laboratoire, avec une fréquence de 50 Hz, sur la tige. Le capot est mis à la terre.

III.2.1.6 Définition des propriétés des matériaux de l'isolateur :

Pour chaque matériau représenté en tant que domaine, nous avons défini ses propriétés, notamment la permittivité et la conductivité électrique (Tableau III.1).

Lorsque des décharges électriques se produisent, des arcs locaux peuvent se former dans l'air, survenant lorsque le champ électrique local dépasse le champ disruptif de l'air ($E_d = 3 \text{ kV}_{\text{max}}/\text{mm}$) [78]. Dans notre simulation, ce phénomène est représenté par un changement de la conductivité de l'air, passant d'un niveau très faible à des niveaux relativement élevés. Lorsque des arcs locaux commencent à apparaître, la conductivité initiale estimée de l'air devient $\sigma_{\text{air}} = 5 \times 10^{-2} \text{ S/m}$ [79].

Tableau III.1. Propriétés des matériaux constituant l'isolateur 1512L.

	Verre trempé	Capot et tige	Ciment	Air
Permittivité relative ϵ_r	6	1	15	1.0005
Conductivité électrique σ (S/m)	10^{-14}	10^4	10^{-6}	10^{-18}

III.2.1.7 Application du maillage adéquat pour le modèle :

Pour représenter le domaine d'étude de manière numérique, il est essentiel d'appliquer une discrétisation du modèle géométrique en petits éléments, connue sous le nom « maillage ». Pour obtenir des résultats précis et fiables, le choix d'un maillage approprié est crucial. Dans notre étude, nous avons opté pour un maillage triangulaire libre extrêmement fin pour garantir une haute résolution (Figure III.2).

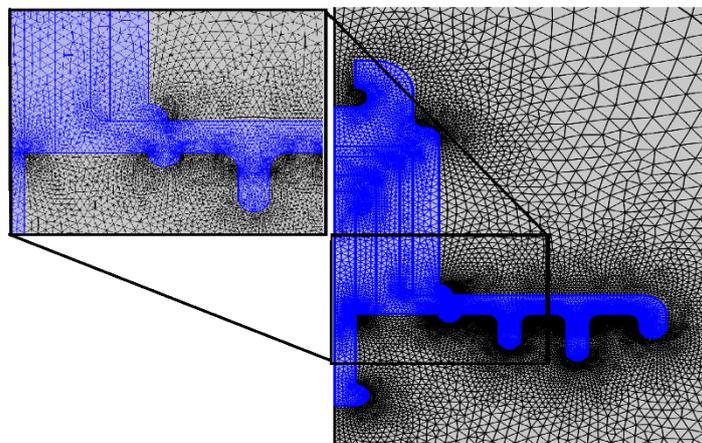


Figure III. 2 Maillage triangulaire extrêmement fin appliqué à l'isolateur.

III.2.1.8 Exécution de la simulation :

Nous lançons la simulation afin d'obtenir les résultats et de présenter les données souhaitées, telles que la distribution des champs électriques, le potentiel électrique, etc. La figure III.3 présente l'organigramme récapitulatif de la simulation.

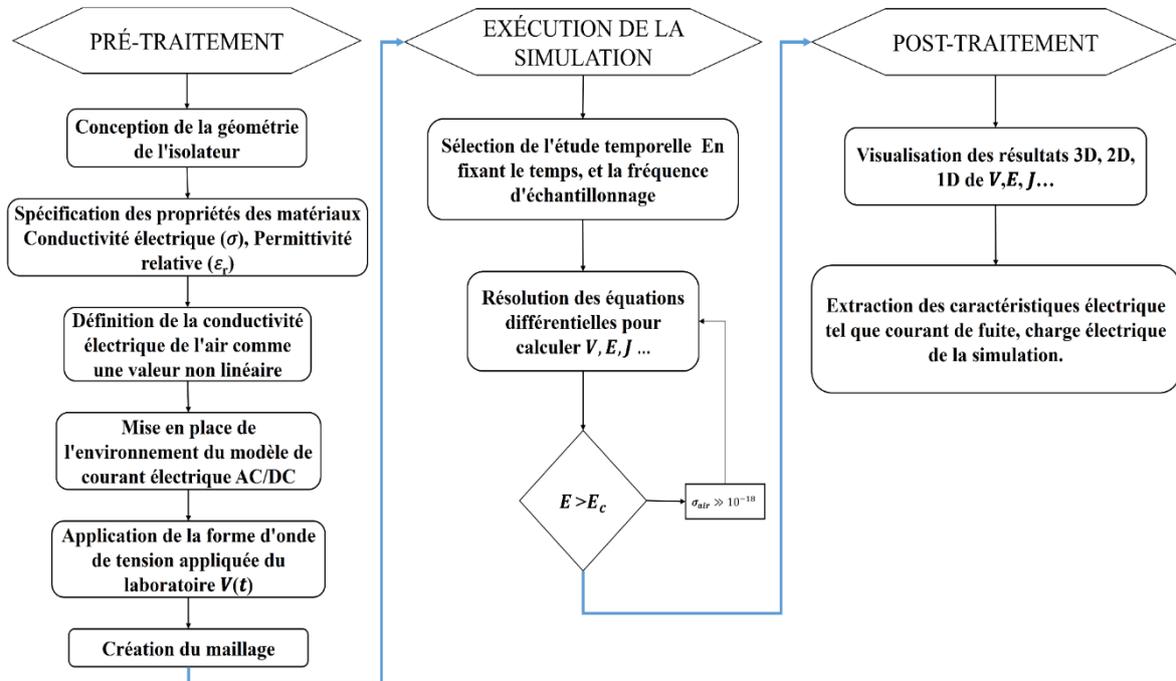


Figure III. 3 Organigramme récapitulatif de la simulation.

III.2.2. Détermination du courant de fuite

La présence de pollution à la surface des isolateurs, comprenant des particules polluantes solides et humides telles que la poussière, le sable, le brouillard salin, l'humidité, les brumes, etc. [1], peut renforcer le champ électrique. Ces contaminants forment une couche conductrice à la surface de l'isolateur, permettant au courant de fuite de s'écouler. Cette situation peut conduire à la formation d'arcs électriques et même entraîner des phénomènes de claquage [6], réduisant ainsi les performances de l'isolateur [7]. Cela peut éventuellement provoquer des coupures de courant, suscitant ainsi un intérêt croissant pour l'étude des courants de fuite sur les isolateurs des lignes de transmission haute tension [10, 80]. Par conséquent, cette section explique la mesure du courant de fuite à travers la simulation.

La densité du courant total $\vec{J}(t)$ à un instant t , en fonction du champ électrique $\vec{E}(t)$ à un instant t , est généralement décrite par l'équation du courant, prenant en compte la conductivité électrique et la permittivité du matériau (air, verre, les parties métalliques et le ciment). Cette équation est exprimée comme suit :

$$\vec{J}(t) = \vec{E}(t) + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial \vec{E}(t)}{\partial t} \quad (III.9)$$

La densité du courant qui nous intéresse est principalement celle qui se produit à la surface de la partie métallique sous tension (la tige ou le capot, dans notre cas). Il est essentiel de souligner, dans la simulation, que la tension doit être appliquée sur l'ensemble du volume de la partie métallique pour obtenir une distribution uniforme du potentiel, assurant ainsi une densité de courant perpendiculaire à la surface (S) externe de cette partie (Figure III.4). À partir de cela, le signal du courant de fuite sera mesuré en effectuant l'intégrale de cette densité le long de la surface (S), comme suit :

$$\mathbf{I}(\mathbf{t}) = \iint_S \vec{\mathbf{J}}(\mathbf{t}) \cdot d\vec{\mathbf{S}} \quad (\text{III.10})$$

Des chercheurs [39] ont souligné que, dans le cas d'une solution de NaCl, le courant électrique ne traverse pas toute l'épaisseur de la solution. En revanche, il existe une épaisseur effective qui contribue à la conduction électrique, représentant une partie de l'épaisseur totale. Pour tenir compte de cet effet dans notre simulation, nous avons déterminé la valeur de cette épaisseur en mesurant le courant de fuite tout en considérant l'épaisseur de la pollution (e_p) et en évaluant le rapport entre les valeurs simulées et expérimentales du courant électrique. En nous basant sur les considérations adoptées dans [39] et après avoir réalisé plusieurs tests, nous avons conclu que le rapport estimé pour cette épaisseur effective était d'environ un pour cent. Cette valeur a été prise en compte tout au long de notre travail.

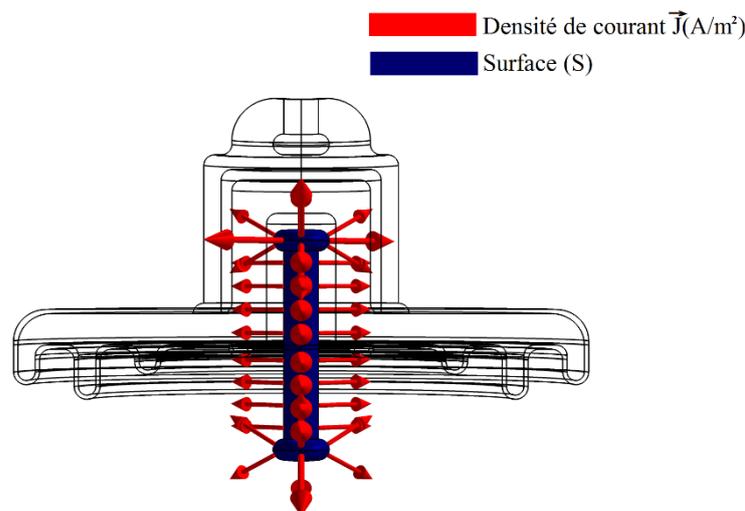


Figure III. 4 Densité de courant et la surface associée sur laquelle l'intégration doit être réalisée, illustrées sur la tige.

La détermination des courants de fuite offre la possibilité d'évaluer la fiabilité de la simulation en comparant les résultats obtenus avec ceux obtenus en laboratoire. Si le système étudié est en bonne corrélation avec la réalité, cela encourage à pousser plus loin les investigations par simulation. En effet, la simulation permet de visualiser des caractéristiques invisibles à l'œil nu et qui n'ont pas pu être démontrées en laboratoire, telles que le champ électrique, la distribution du potentiel, les charges électriques, etc. De plus, elle permet d'appliquer des optimisations visant à réduire les coûts, le temps et les matériaux nécessaires.

III.2.3. Quantification de la charge électrique à l'aide de la simulation

Comprendre le comportement de la charge accumulée à la surface de l'isolateur est crucial, car cette accumulation affecte généralement la distribution du champ électrique à cette surface ainsi que dans l'air environnant [16]. Le champ électrique ainsi créé engendre un certain potentiel électrique à la surface de l'isolateur. Ainsi, analyser la charge électrique permet de visualiser l'impact sur la corrosion. Certains auteurs [82] ont élaboré un modèle de surveillance des isolateurs basé sur la charge afin de classifier la sévérité de la corrosion. De plus, cela permet de déterminer l'interaction de l'isolateur avec les particules polluantes [18] ou les gouttelettes d'eau [21], etc.

Il y a une insuffisance d'informations concernant le comportement de la charge électrique à la surface des isolateurs, notamment en présence de tensions alternatives [27]. Dans cette partie, nous décrivons une méthodologie de calcul de l'évolution temporelle de la charge en utilisant le modèle d'isolateur 1512L, dans le but de quantifier la charge totale. L'approche repose sur des concepts fondamentaux. La densité de charge ρ dans un volume donné est influencée par la répartition des charges et leur interaction avec le champ électrique local, représenté par le déplacement électrique. La densité de charge sur une surface fermée est équivalente au flux sortant du déplacement électrique (Eq. III.11).

Dans le cas du modèle de l'isolateur étudié, les niveaux d'intensité du champ électrique sont généralement élevés dans la zone délimitée par les deux parties métalliques (capot et tige) particulièrement au niveau du diélectrique [81], comme illustré sur la figure III.5(a). Cependant, le vecteur de déplacement électrique est lié au vecteur du champ électrique par la permittivité électrique. Néanmoins, la permittivité du diélectrique (le verre) est plus élevée que celle de l'air, ce qui conduit à une intensité élevée du déplacement électrique au sein de ce diélectrique, comme indiqué sur la figure III.5(b). Cela signifie que la densité de charge la plus élevée est confinée dans le volume du diélectrique. Les simulations ont été effectuées sous une tension appliquée de 30 kV.

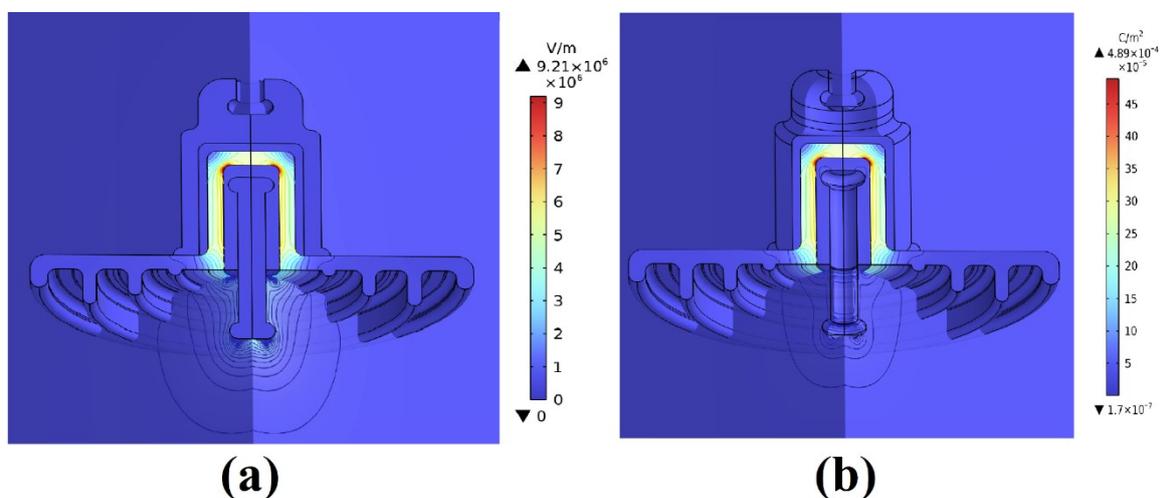


Figure III. 5 Distribution dans l'ensemble du système d'isolation sous tension de 30 kV, comprenant : (a) le champ électrique, (b) le flux de déplacement électrique.

Pour évaluer la charge totale en fonction du temps, on utilise l'intégrale du déplacement électrique le long de la surface externe du diélectrique (S_d), comme indiqué par la formule suivante :

$$Q(t) = \iint_S \vec{D}(t) \cdot d\vec{S}_d \quad (\text{III.11})$$

La simulation offre la possibilité d'obtenir des détails précis sur la distribution de la charge électrique, que ce soit à la surface ou à l'intérieur des matériaux (conducteurs et diélectriques). Dans notre étude, nous utilisons la simulation de la charge électrique de l'isolateur en verre afin de caractériser la quantité de charges, leur emplacement et leur polarité, tout en quantifiant la charge globale qui évolue dans le temps. Pour ce faire, nous suivons les étapes ci-dessous [84] :

- Nous visualisons, tout d'abord, la distribution du déplacement électrique (\vec{D}) afin de révéler la zone où l'intensité élevée de \vec{D} est présente.
- Nous examinons, ensuite, la distribution de la densité volumique de la charge électrique dans la zone du verre, correspondant à l'intensité élevée du déplacement électrique \vec{D} , afin d'indiquer les zones où les charges sont accumulées.
- Nous traçons, par la suite, la distribution de la densité surfacique de la charge le long de la surface du verre (la surface indiquée sur la figure III.6) pour dévoiler les quantités, les emplacements et les polarités des charges.
- Nous procédons, enfin, à l'intégration de \vec{D} sur la surface fermée du verre pour quantifier l'accumulation de la charge globale.

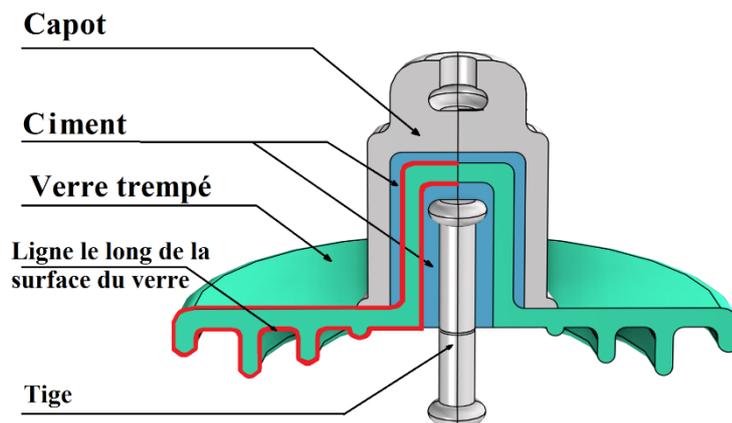


Figure III. 6 Conception représentative de la ligne le long de la surface du verre de l'isolateur capot et tige.

Les résultats des densités de charges volumique et surfacique, obtenus à partir de la simulation, sont présentés ci-après. La surface en verre est divisée en deux zones : la première correspond à celle où le verre est collé aux électrodes par le ciment (diélectrique-électrode), et la deuxième s'étend le long de la ligne de fuite, en contact direct avec l'air ou recouverte de

pollution (diélectrique-air et/ou pollution). Tous les résultats sont exposés sous une tension appliquée de 30 kV. La mesure du signal de charge électrique est une technique essentielle permettant de quantifier la charge totale. Tout comme la détermination du courant de fuite, elle offre un moyen robuste permettant de caractériser les propriétés électriques d'un système, tout en évaluant la fiabilité de la simulation par la comparaison des signaux de charge obtenus par cette méthode avec ceux obtenus en laboratoire. De plus, cette approche permet de quantifier la charge avec une précision accrue sur l'ensemble du système d'isolation. Cette précision s'étend aussi bien à divers points dans l'espace qu'au niveau même de l'isolateur. Ainsi, elle nous permet d'identifier les emplacements où la charge s'accumule davantage.

III.3. Résultats de simulation dans le cas de pollution uniforme

En vue d'analyser les évolutions du courant de fuite et de la charge électrique, nous avons considéré les mêmes conductivités (20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 340 $\mu\text{S}/\text{cm}$) de la pollution uniforme et les mêmes paliers de tension (5, 10, 15, 20, 25 et 30 kV) adoptés dans la partie expérimentales. Ceci nous permettra d'effectuer une étude comparative entre les deux approches expérimentale et numérique (simulation).

III.3.1. Courant de fuite

Les résultats des essais expérimentaux et de simulation relatifs à l'évolution de du courant de fuite en fonction de la tension appliquée sont présentés sur la figure III.7. L'augmentation du courant de fuite résulte à la fois de l'augmentation de la conductivité ainsi que de l'augmentation de la tension appliquée.

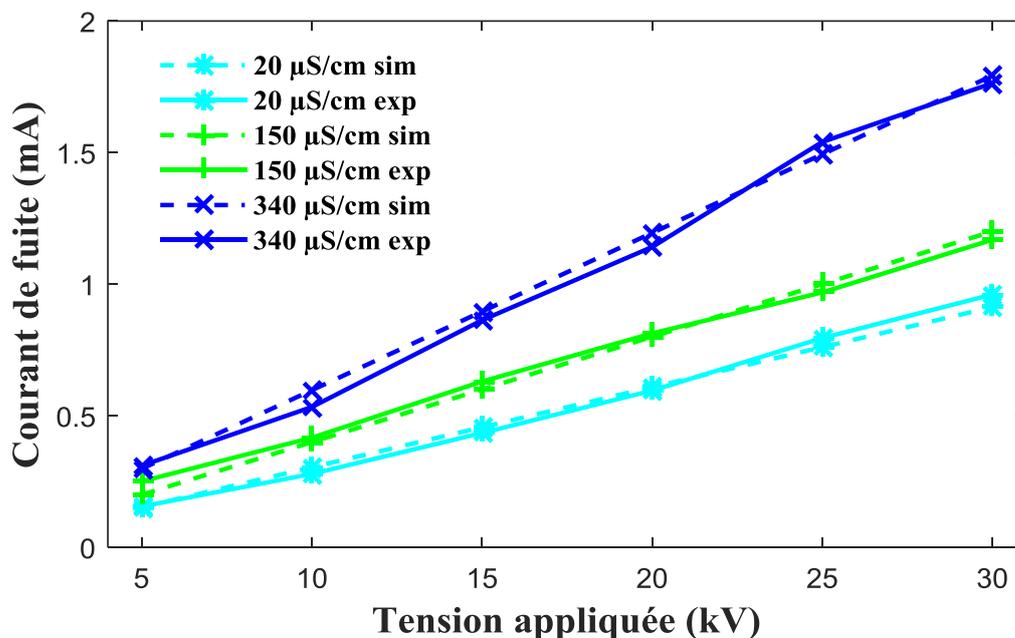


Figure III. 7 Comparaison de la caractéristique courant de fuite-tension appliquée obtenue expérimentalement et par simulation pour une pollution uniforme.

En comparant les deux résultats du courant de fuite obtenus en utilisant l'erreur relative moyenne, comme illustré sur la figure III.8, nous observons que les amplitudes simulées du courant de fuite sont pratiquement similaires à celles observées expérimentalement, avec une erreur relative moyenne d'environ 4,63%, 6,11% et 4,82% pour les classes de sévérité de pollution légère, très légère et moyenne, respectivement. Ces résultats mettent en évidence une concordance significative entre les résultats expérimentaux et les simulations.

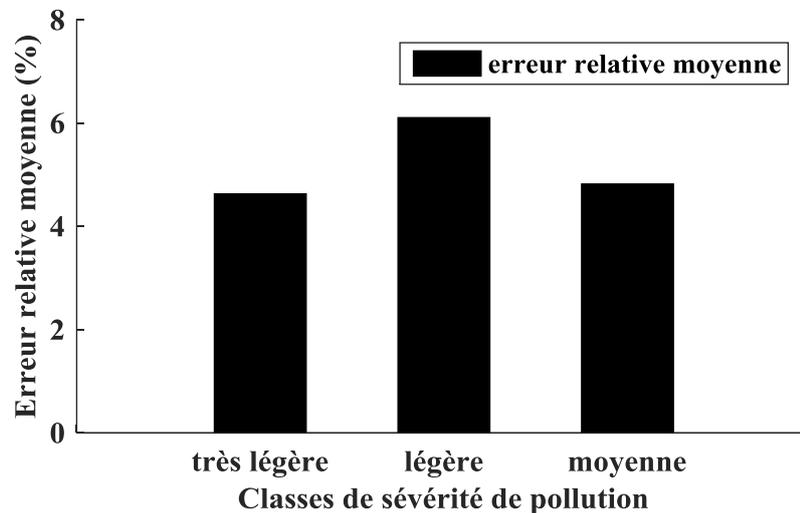


Figure III. 8 Erreur relative moyenne entre les courant de fuite simulés et expérimentaux pour différentes classes de sévérité de la pollution uniforme.

La présentation simultanée des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée pour différentes conductivités de pollution uniforme est montrée sur la figure III.9. Les valeurs maximales de ces signaux augmentent avec la conductivité de la pollution. Alors que leurs formes sont peu influencées à la variation de cette conductivité. Ce qui confirme les résultats précédents ainsi que obtenus expérimentalement. Nous remarquons, par ailleurs, que les formes d'ondes du courant de fuite sont très déformées en avance sur la tension d'alimentation avec un angle proche de 90° , indiquant le comportement capacitif de l'isolateur.

Ceci constitue une base solide qui renforce les observations expérimentales que nous avons avancées dans le chapitre précédent. La bonne concordance entre les résultats simulés et ceux expérimentaux valide les modèles numériques élaborés. Ces derniers peuvent constituer une base solide pour contribuer à l'interprétation et à la prédiction du comportement de l'isolateur en fournissant de caractéristiques complémentaires à l'expérimentation telles que la densité du courant, les distributions du champ et du potentiel, etc.

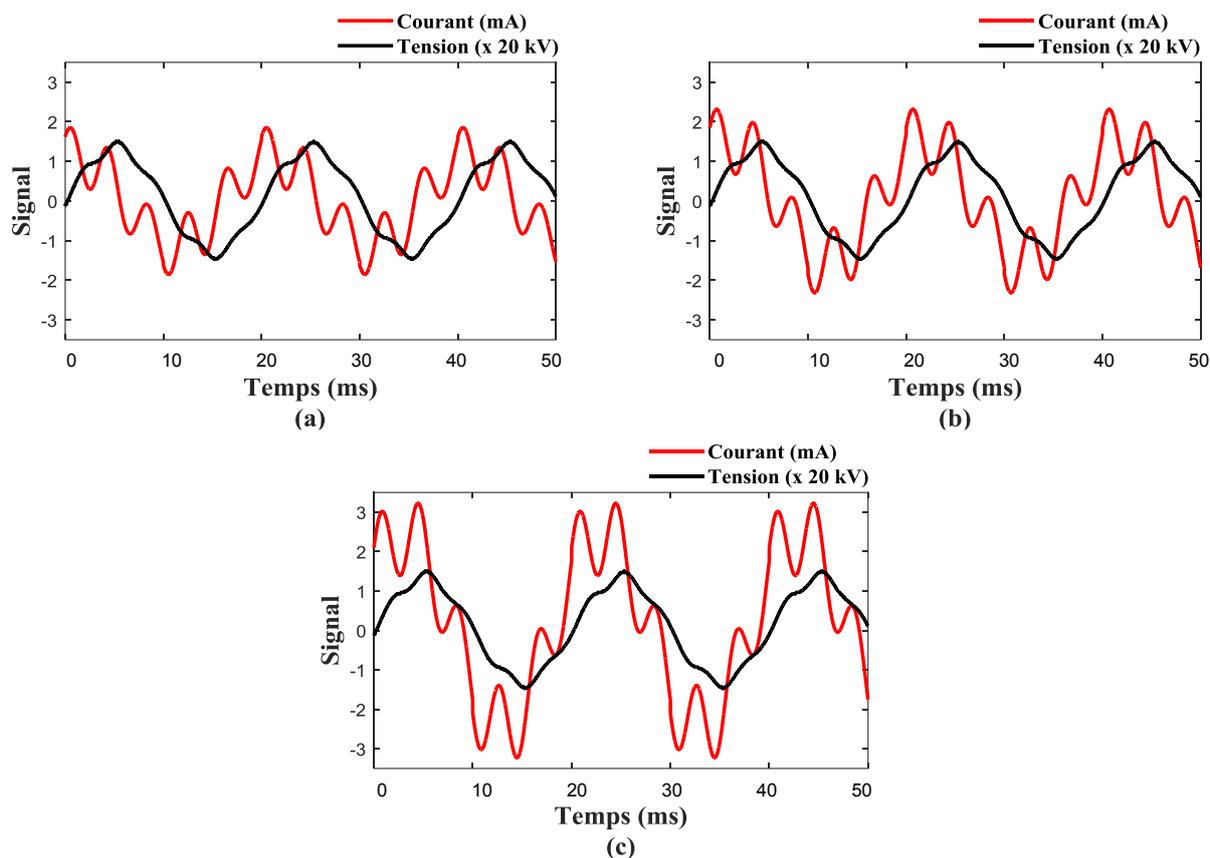


Figure III. 9 Formes d'ondes du courant de fuite pour différentes conductivités de pollution : (a) $20 \mu\text{S/cm}$, (b) $150 \mu\text{S/cm}$, (c) $340 \mu\text{S/cm}$.

III.3.2. Distribution du potentiel électrique le long de la ligne de fuite

La distribution du potentiel le long de la ligne de fuite dans le cas de la pollution uniforme est présentée sur la figure III.10. Cette figure montre que la distribution du potentiel électrique est influencée par la conductivité de la pollution uniforme. Le potentiel électrique le plus élevé est observé près de l'électrode haute tension, et il diminue de manière progressive le long de la ligne de fuite en direction vers l'électrode mise à la terre. Cette diminution est non-linéaire. Ainsi, le potentiel n'est pas uniformément réparti. Cependant, l'augmentation de la conductivité améliore la répartition du potentiel. De telles observations soulignent l'impact significatif de la conductivité de la pollution sur la répartition du potentiel électrique.

III.3.3. Champ électrique

Cette section est consacrée à la présentation des résultats de la simulation du champ électrique le long du système d'isolation (isolateur et air). Pour cela, nous exposons les résultats du champ électrique obtenus lors de l'application d'une tension de 30 kV dans le cas de la pollution uniforme.

III.3.3.1 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite

La distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite est présentée sur la figure III.11. À mesure que la conductivité électrique de la couche de pollution augmente, le champ électrique croît également. Pour les trois conductivités de pollution considérées, la valeur

maximale du champ électrique est observée à 3 cm (à partir de l'électrode HV) sur la couche de pollution, avec une intensité maximale de $21,1 \text{ kV}_{\text{max}}/\text{cm}$, $24,5 \text{ kV}_{\text{max}}/\text{cm}$ et $25,8 \text{ kV}_{\text{max}}/\text{cm}$ respectivement pour les pollutions très légère ($20 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$), légère ($150 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$) et moyenne ($340 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$).

Étant donné que ces valeurs restent inférieures au champ critique de la rupture de l'air (de $30 \text{ kV}_{\text{max}}/\text{cm}$), aucune décharge électrique ne se produira à la surface de l'isolateur. En revanche, l'intensité du champ électrique est significativement réduite à l'extrémité des nervures du matériau isolant (verre) où seule une petite quantité de charge s'accumule, comme indiqué dans [5]. Ces résultats démontrent la stabilité du système d'isolation dans des conditions de pollution uniforme et mettent en évidence les zones critiques où des ajustements peuvent être nécessaires pour optimiser la conception et la performance de l'isolateur.

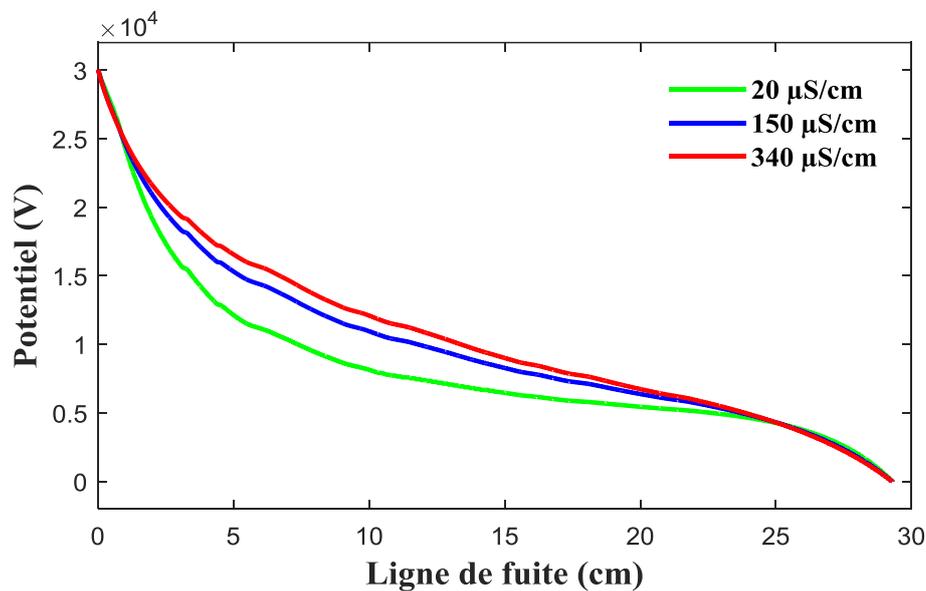


Figure III. 10 Distribution du potentiel le long de la ligne de fuite dans le cas de la pollution uniforme.

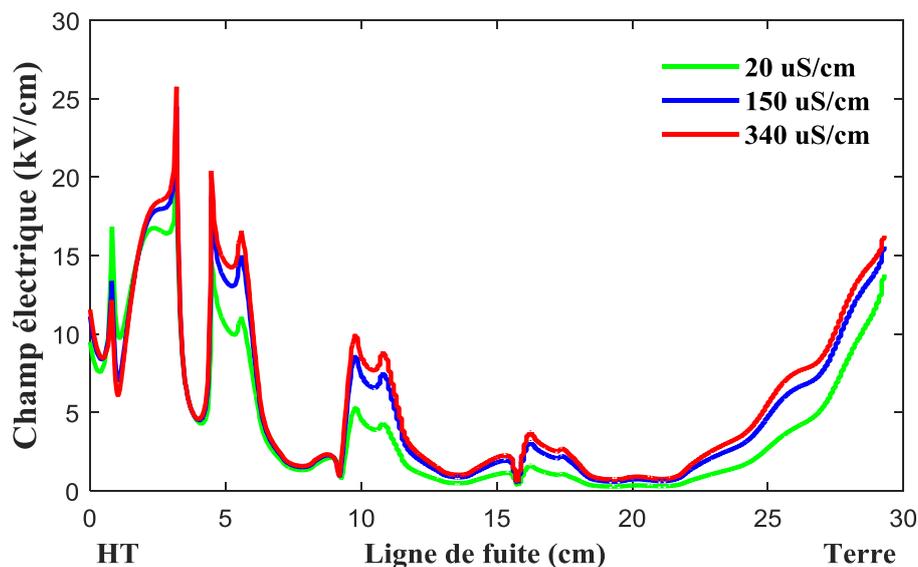


Figure III. 11 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite dans le cas de la pollution uniforme.

III.3.3.2 Distribution du champ électrique sur l'ensemble du système d'isolation (isolateur et air)

Des détails supplémentaires sur la distribution du champ électrique sont présentés sur la figure III.12, incluant les résultats 3D de la simulation du champ électrique et les distributions des lignes équipotentielles pour les différentes conductivités considérées. Nous remarquons que la distribution du champ électrique ainsi que celle des lignes équipotentielles ne présentent pas de variations remarquables lorsque la conductivité de la pollution augmente.

L'intensité maximale du champ électrique se trouve autour de l'électrode haute tension (la tige de l'isolateur). Parallèlement, une intensité significative du champ électrique est observée sur la couche de pollution près de l'électrode haute tension. Les lignes équipotentielles s'étendent progressivement de l'électrode haute tension vers l'électrode de terre, avec certains faisceaux de lignes suivant le chemin à travers la couche de pollution.

Ces résultats en trois dimensions offrent une perspective plus complète de la distribution du champ électrique, permettant une analyse approfondie des interactions complexes entre l'isolateur, l'air et la couche de pollution. Ils renforcent la compréhension de la manière dont la conductivité de la pollution influe sur la répartition du champ électrique à travers le système d'isolation, contribuant ainsi dans l'évaluation de la performance électrique dans des conditions de pollution uniforme.

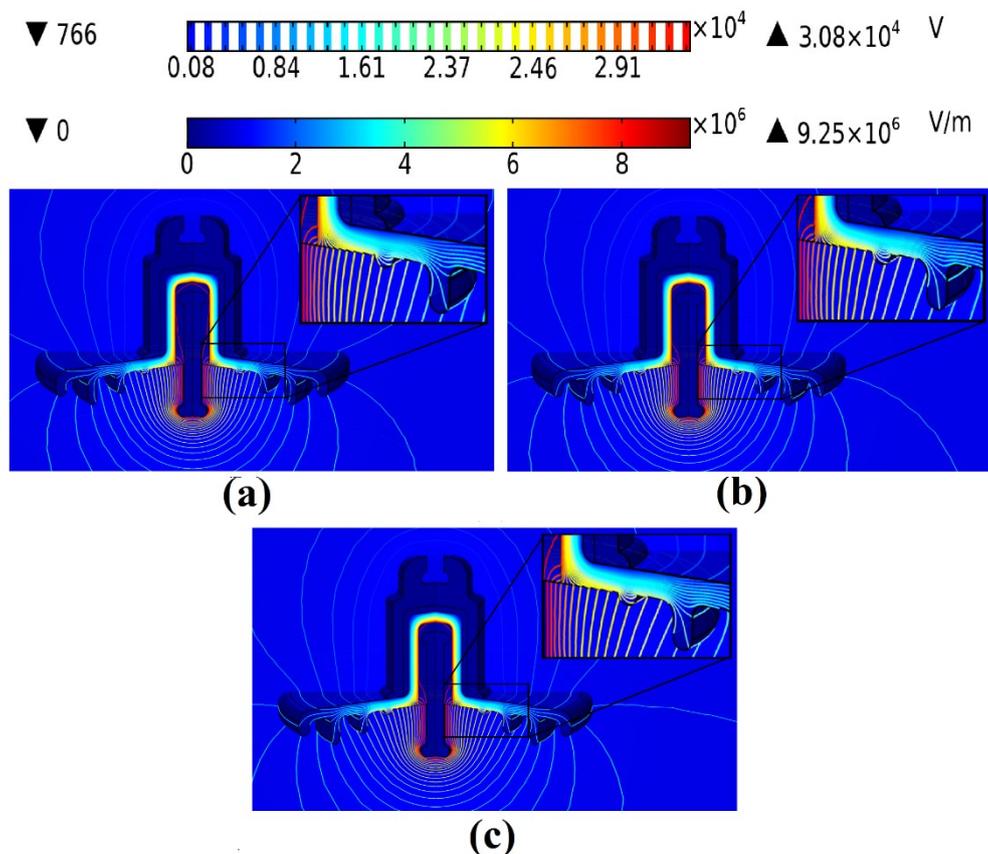


Figure III. 12 Distributions du champ électrique et des lignes équipotentielles pour différentes conductivités de pollution : (a) 20 $\mu\text{S/cm}$, (b) 150 $\mu\text{S/cm}$, (c) 340 $\mu\text{S/cm}$.

III.3.4. Distribution de la densité volumique de la charge électrique dans le verre (diélectrique)

La figure III.13 présente la distribution volumique de la densité de la charge électrique dans le matériau en verre. Cette figure illustre cartographie de la densité de charge pour les surfaces supérieure et inférieure dans le cas de pollution uniforme. Comme nous pouvons constater, les charges positives s'accumulent sur la zone de surface entourant l'extrémité haute tension. L'intensité de la charge volumique augmente légèrement avec l'augmentation de la conductivité de la pollution. Pour la région appartenant à la deuxième zone, une intensité élevée de densité de charge est observée près de la première nervure. Ceci s'expliquerait par le fait que cette région présente le niveau le plus élevé de température, comme mentionné dans [81]-[83].

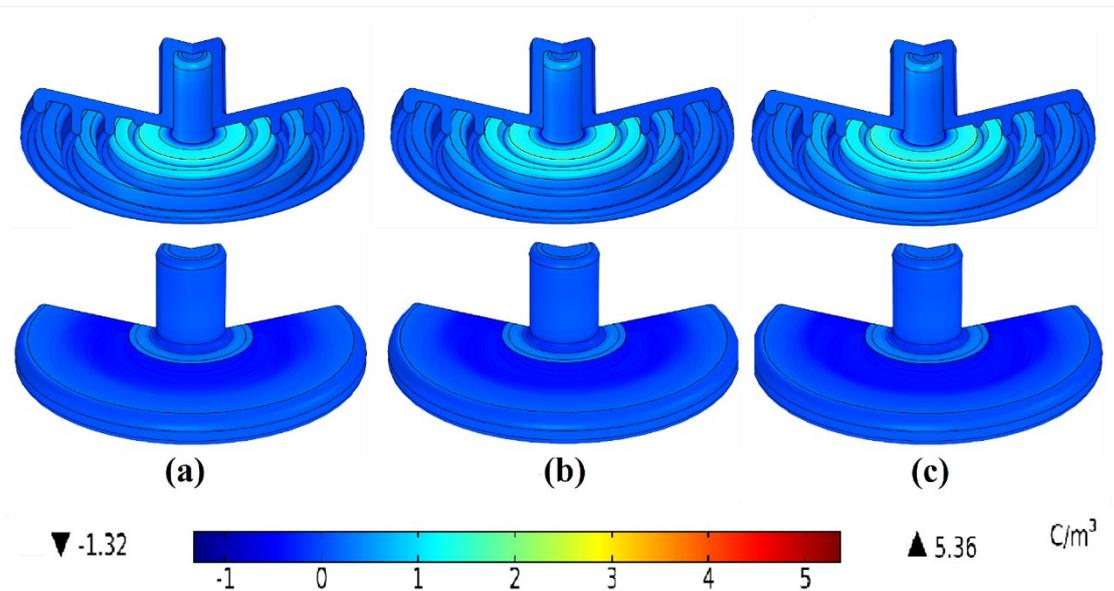


Figure III. 13 Distribution de la densité volumique de charge pour différentes conductivités de pollution : (a) 20 $\mu\text{S/cm}$, (b) 150 $\mu\text{S/cm}$, (c) 340 $\mu\text{S/cm}$.

III.3.5. Distribution de la densité surfacique de la charge le long de la surface du verre (diélectrique)

La figure III.14 présente la densité surfacique de charge le long de la surface du verre pour différentes conductivités électriques de la pollution uniforme. Il est clair que cette distribution de la densité surfacique de charge est non uniforme le long de la surface de l'isolateur.

Dans la première zone, nous observons que les densités de charge sont stables car elles ne sont pas affectées par la variation de la conductivité de la pollution, tandis que dans la deuxième zone, elles sont clairement influencées par les conductivités électriques de la pollution. Les résultats suggèrent qu'une augmentation de la conductivité électrique entraîne une augmentation des charges surfaciques dans la deuxième zone. Le long de la ligne de fuite, nous observons des charges positives s'accumuler sur une distance d'environ 17 cm à partir de l'extrémité HT, tandis que des charges négatives s'accumulent sur le reste de la longueur. Un

pic exceptionnel de la charge positive se développe sur la zone où la plus petite distance est atteinte à travers le matériau en verre entre la région de l'accumulation des charges positives et l'électrode mise à la terre (capot).

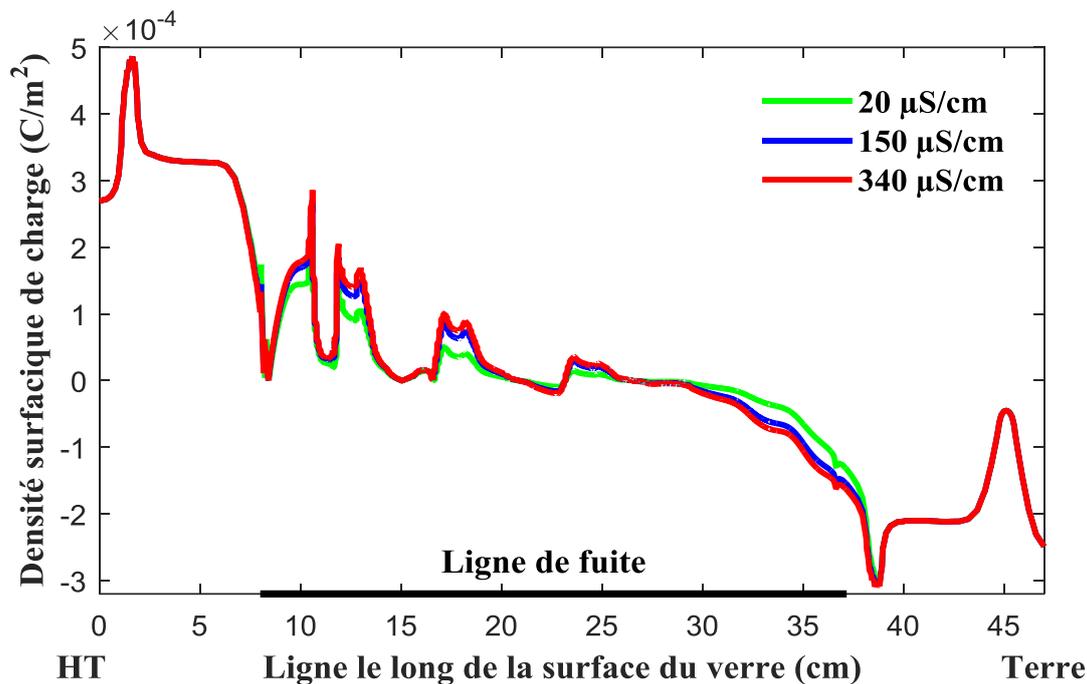


Figure III. 14 Distribution de la densité surfacique de charge le long de la surface de verre pour le cas de pollution uniforme.

III.3.6. Charge électrique globale

Les signaux de la charge électrique, obtenus par simulation pour une tension appliquée de 30 kV et pour les trois conductivités de la pollution uniforme, sont présentés sur la figure III.15. D'après cette la figure, nous observons que la valeur maximale de la charge augmente avec l'augmentation de la valeur de la conductivité. Nous constatons aussi que, le déphasage entre les signaux de la charge et celle de la tension appliquée est quasiment nul. Dans de telles conditions, le comportement prédominant de l'isolateur est le capacitif.

La variation de l'amplitude de la charge en fonction de la conductivité de la pollution à la fois pour les résultats expérimentaux et ceux de la simulation pour différentes tensions appliquées est représentée sur la figure III.16. Similaire au courant de fuite, cette figure montre que la charge électrique augmente aussi bien avec la tension appliquée qu'avec la conductivité de la pollution.

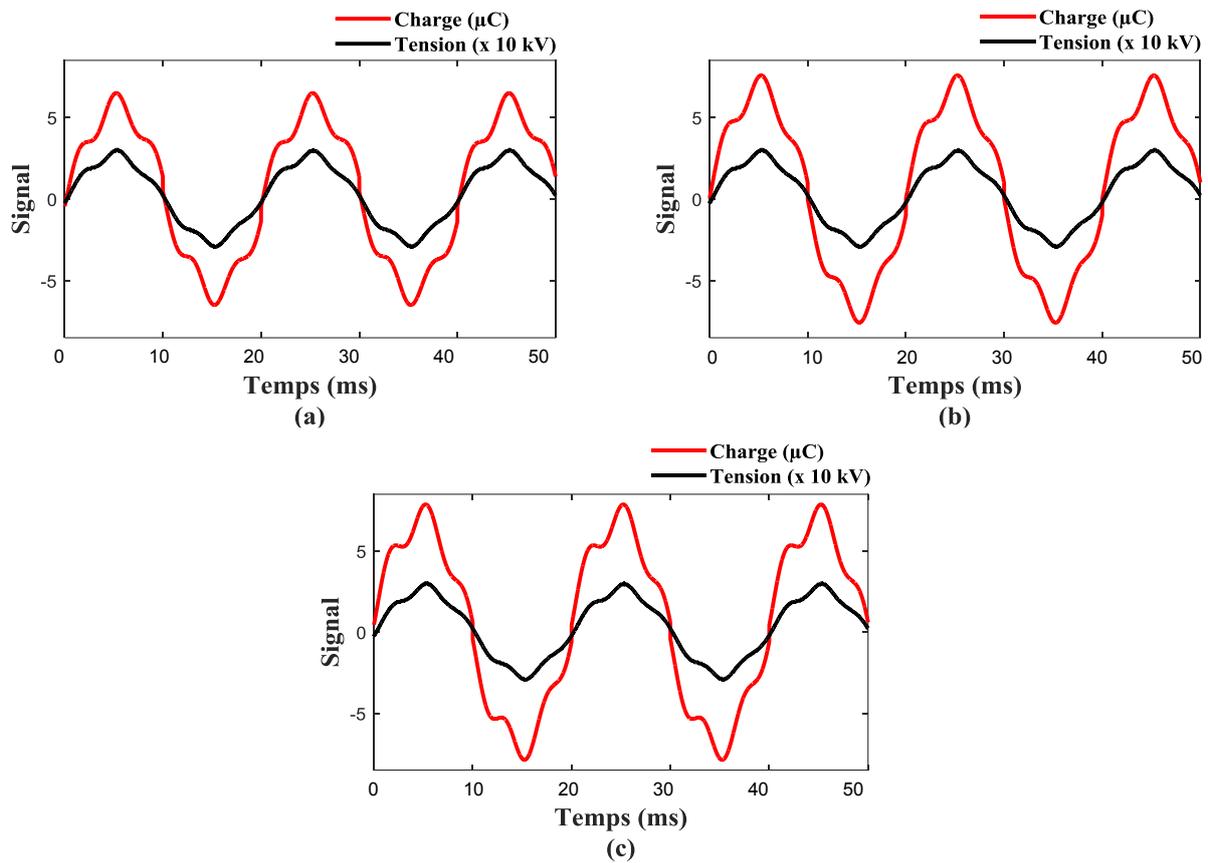


Figure III. 15 Formes d'ondes de la charge électrique pour différentes conductivités de la pollution : (a) 20 µS/cm, (b) 150 µS/cm, (c) 340 µS/cm.

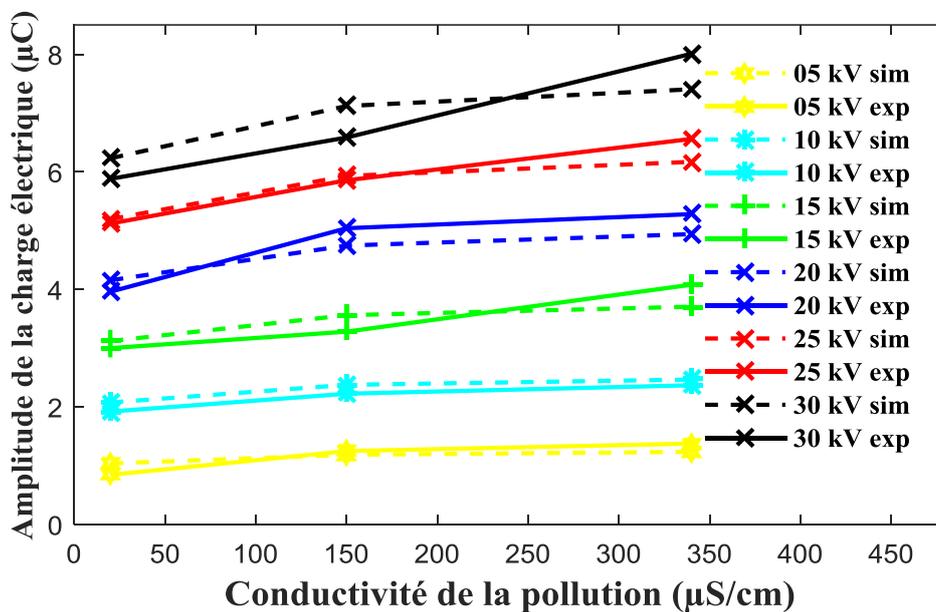


Figure III. 16 Comparaison de la caractéristique charge-conductivité pour différentes tension appliquée obtenue expérimentalement et par simulation pour une pollution uniforme.

En comparant les résultats de simulation et de l'expérimentation pour les niveaux de sévérité de pollution très légère, légère et moyenne, les erreurs relatives moyennes entre eux sont d'environ 7,90%, 5,94% et 7,25%, respectivement (Figure III.17). Ces résultats démontrent

une similarité remarquable entre les amplitudes de la charge simulées et expérimentales obtenues le long de cette étude.

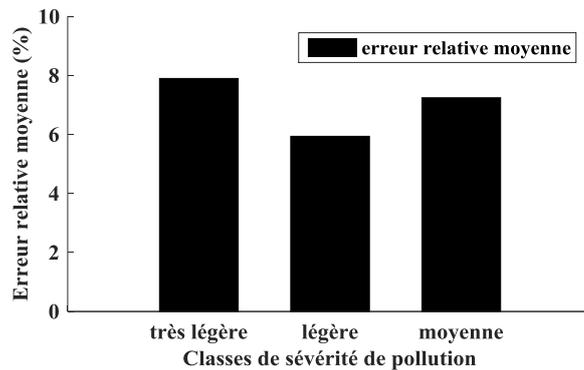


Figure III. 17 Erreur relative moyenne en fonction de différentes classes de sévérité de la pollution.

III.4. Résultats de simulation dans le cas de pollution non-uniforme

Dans cette section, nous examinons l'effet de la couche de pollution discontinue sur le courant de fuite et la charge électrique. De ce fait, différentes largeurs de couche polluante de 5, 10, 15, 20 et 25 cm, ont été adoptées. Ces dernières sont placées sur la surface de l'isolateur du côté de la tige mise sous haute tension. Les tensions appliquées pour ces essais sont 5, 10, 15, 20, 25 et 30 kV.

III.4.1. Courant de fuite

L'évolution du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche de pollution, pour différents niveaux de tension appliquée, est présentée sur la figure III.18. Cette figure illustre à la fois les résultats du courant de fuite simulés et expérimentaux. Cette figure montre une concordance quasi-parfaite entre les deux résultats (simulés et expérimentaux).

Nous observons que, pour une largeur de pollution donnée, le courant de fuite, aussi bien expérimentale que simulée, augmente avec la tension appliquée. En outre, pour un niveau de tension appliquée donné, le courant de fuite augmente lorsque la largeur de la pollution passe de 0 (cas de l'isolateur propre) à 5 cm. A partir de cette valeur, le courant de fuite reste quasiment stable (pratiquement invariante). Ainsi, l'élargissement de la largeur de la pollution au-delà de 5 cm a pratiquement peu d'effet sur la variation du courant de fuite.

La figure III.19 présente l'erreur relative moyenne entre les courants de fuites expérimentales et simulés. Les erreurs enregistrées pour les largeurs de pollution de 0 (isolateur propre), 5, 10, 15, 20 et 25 cm sont respectivement 6,36%, 4,60%, 4,27%, 2,37%, 3,98% et 5,41%. Ces résultats soulignent la fiabilité de la simulation dans la représentation du courant de fuite dans des conditions de pollution non-uniforme.

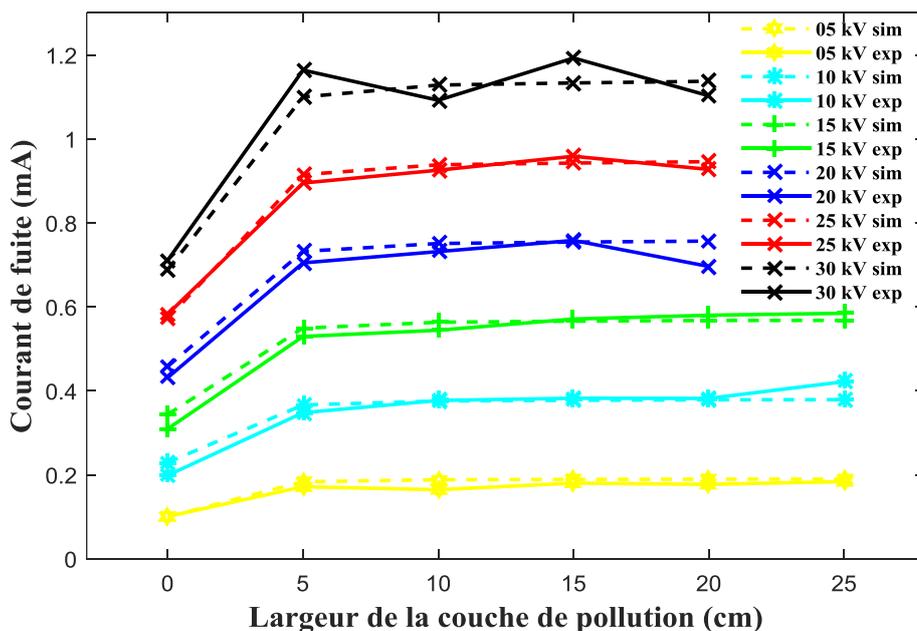


Figure III. 18 Comparaison de la caractéristique courant de fuite-tension appliquée obtenue expérimentalement et par simulation pour une pollution non-uniforme.

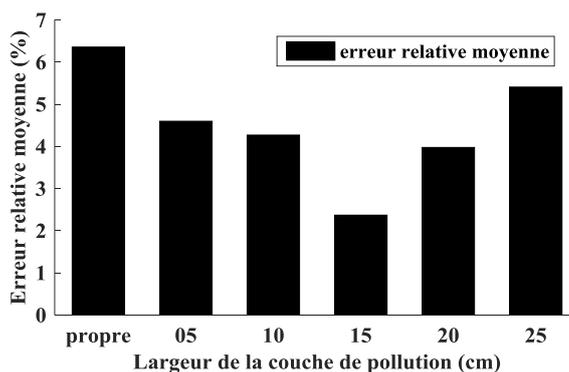


Figure III. 19 Erreur relative moyenne en fonction de différentes largeurs de la couche de pollution.

Les signaux du courant de fuite simulés et enregistrés sous une tension appliquée de 30 kV, pour les largeurs de pollution de 0 (isolateur propre), 5, 10, 15, 20 et 25 cm, sont présentées sur la figure III.20.

Ces signaux des distorsions et un déphasage capacitif de presque de 90° entre le courant et la tension. Le comportement capacitif de l'isolateur est dû à l'effet de la bande sèche. Il est à souligner que des activités d'arcs électriques dans les bandes sèches commencent à se produire à des tensions relativement élevées (30 kV). Cette observation a été déjà évoquée en présentant les résultats expérimentaux.

En fait, le courant de fuite est directement lié à la densité de courant. Ainsi, il est crucial de comprendre la variation de la densité de courant en fonction de la largeur de la couche de pollution pour une compréhension approfondie du comportement électrique de l'isolateur.

Pour une explication plus approfondie du comportement du courant de fuite, nous présentons également les lignes de densité de courant. Elles revêtent une importance particulière, car elles établissent un lien entre la permittivité relative, la conductivité électrique et le champ électrique, offrant ainsi une compréhension du cheminement du courant électrique à travers un matériau.

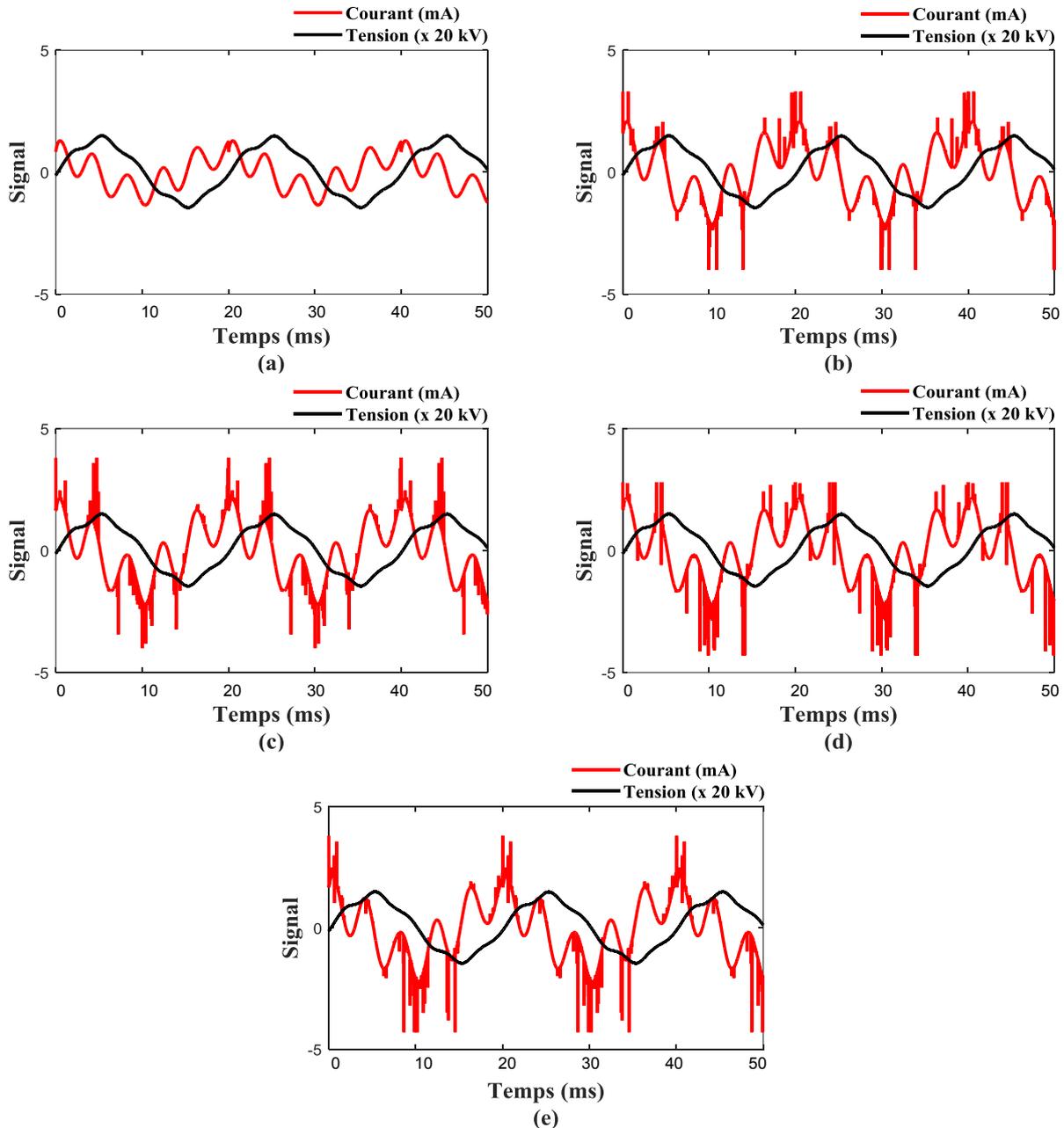


Figure III. 20 Formes d'ondes du courant de fuite pour différentes largeurs de la couche de pollution : (a) surface propre, (b) 5 cm, (c) 10 cm, (d) 15 cm et (e) 20 cm.

III.4.1.1 Lignes de densité de courant

Lorsque le courant circule à travers un isolateur, la densité de courant peut varier à différents endroits en raison de la géométrie de l'isolateur, de la répartition des charges, etc. Les lignes de densité de courant offrent une représentation visuelle, facilitant ainsi la compréhension

du flux de courant traversant le système isolant. Nous présentons sur la figure III.21 les lignes de densité de courant de fuite en fonction de la largeur de la couche de pollution discontinue.

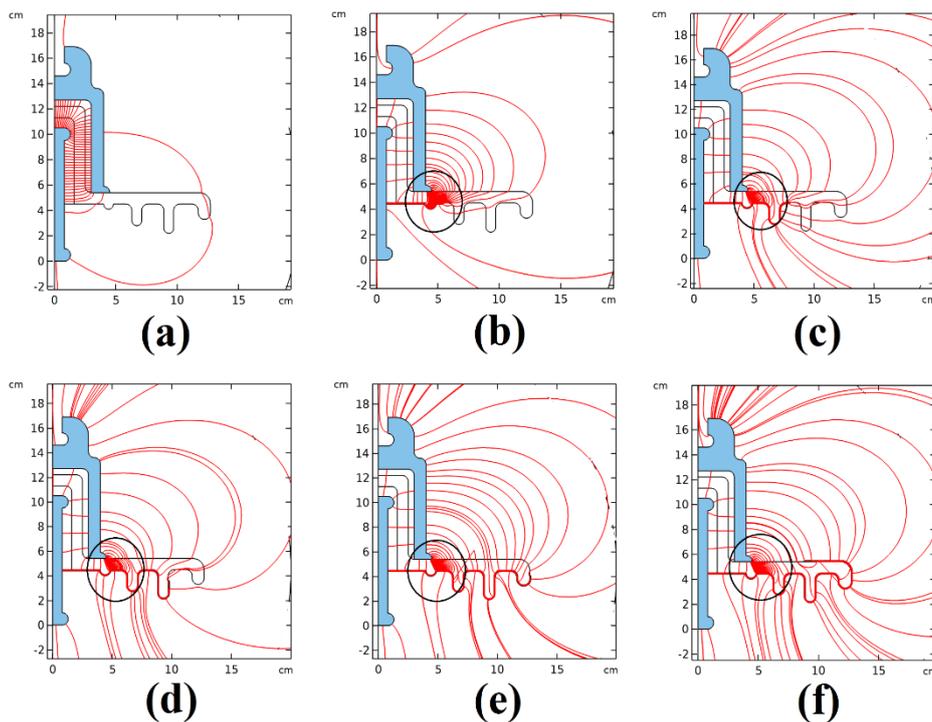


Figure III. 21 Lignes de la densité de courant pour différentes largeurs de la couche de la pollution : (a) surface propre, (b) 5 cm, (c) 10 cm, (d) 15 cm, (e) 20 cm et (f) 25 cm.

Pour la surface de l'isolateur propre, les lignes de densité de courant sont concentrées dans la zone radiale délimitée par le capot et la tige, constituée de ciment et de verre (représentées par les lignes en rouge sur la figure III.21(a)). En revanche, pour toutes les largeurs de la couche de pollution, une forte concentration des lignes de densité de courant est observée à travers le verre près de l'extrémité du capot (représentées par les lignes encerclées sur les figures III.21(b) à (f)). En effet, dans des conditions de pollution, l'épaisseur du verre a un impact plus dominant sur la densité de courant que l'air environnant. Cette constatation est évidente en raison de la permittivité relative élevée du verre par rapport à celle de l'air. D'autre part, le champ critique de la rupture de l'air ($30 \text{ kV}_{\text{max}}/\text{cm}$) est plus faible que celui du verre, ce qui peut entraîner l'apparition d'arcs électriques dans la bande sèche.

III.4.2. Distribution du potentiel électrique le long de la ligne de fuite

La distribution du potentiel électrique le long de la ligne de fuite pour la surface propre et les différentes largeurs de la couche de pollution (variant de 5 cm à 25 cm) est présentée sur la figure III.22. Cette distribution de potentiel n'est pas uniforme. Le potentiel reste constant le long des couches de pollution en raison de la forte valeur de la conductivité de la pollution utilisée. Ensuite, le potentiel diminue rapidement au bout de la couche de pollution, puis il se stabilise relativement dans la zone sèche. Ensuite, il décroît rapidement près de la terre (capot). Cette baisse rapide crée une différence de potentiel dans la zone sèche. Nous remarquons que cette différence de potentiel est significativement élevée du côté HT (tige) en cas de surface

propre, et du côté terre (capot) en présence d'une couche de pollution discontinue. Cette constatation est responsable de l'augmentation du champ électrique dans ces deux régions (explication fournie dans la section suivante).

Cette analyse de la distribution du potentiel électrique offre un aperçu clair de ces variations en fonction de la largeur de la couche de pollution, soulignant l'importance des gradients de potentiel dans la détermination du comportement électrique de l'isolateur dans des conditions de pollution non-uniforme

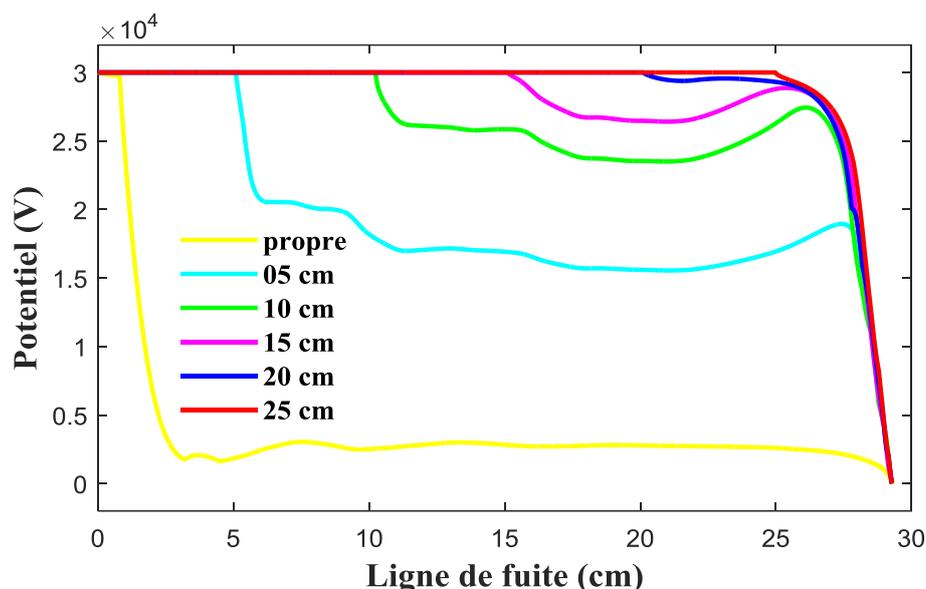


Figure III. 22 Distribution du potentiel le long de la ligne de fuite dans le cas de la pollution non uniforme.

III.4.3. Champ électrique

Cette section est consacrée à la présentation des résultats de la simulation du champ électrique le long du système d'isolation (isolateur et air). Nous exposons les résultats du champ électrique obtenus lors de l'application d'une tension de 30 kV dans le cas de la pollution non-uniforme.

III.4.3.1 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite

La distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite est illustrée sur la figure III.23. Nous observons que l'état de surface sous pollution non-uniforme n'affecte que l'allure de la distribution du champ électrique, et non pas son intensité maximale. En effet, pour toutes les largeurs de la couche de la pollution non-uniforme, l'intensité maximale a été observée avec une valeur centrée autour de 46,9 kV/cm, localisés au niveau de la bande sèche. Plus précisément, cette intensité maximale a été observée dans la zone triple formée par le capot de l'isolateur, l'air et le diélectrique (le verre). Le fait que ce champ électrique soit supérieur à la valeur critique de la rupture de l'air ($30 \text{ kV}_{\text{max}}/\text{cm}$), il provoque des arcs électriques dans cette zone triple, comme illustré sur la figure III.24(a). Cette constatation est confirmée par la forte densité de courant obtenue en utilisant la simulation, présentée sur la figure III.24(b).

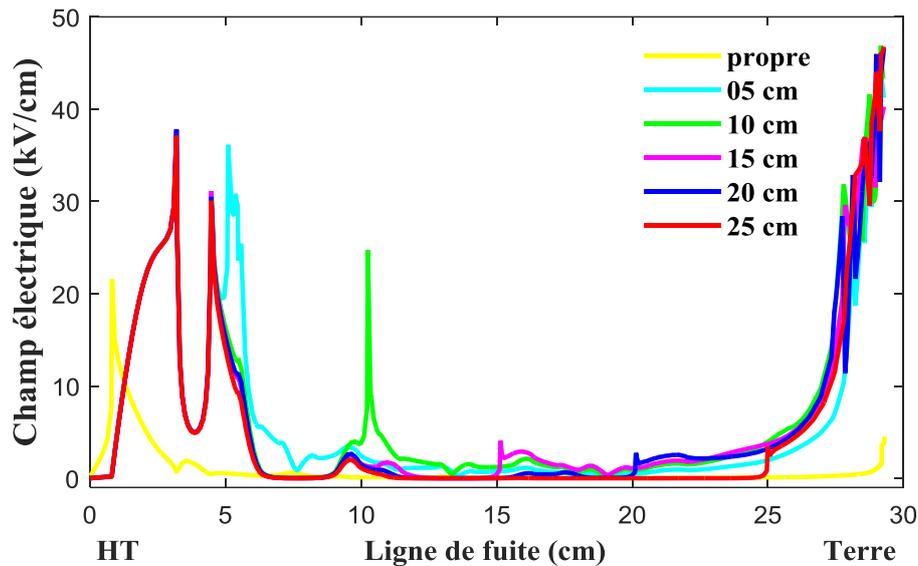


Figure III. 23 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite dans le cas de la pollution non uniforme.

Cette analyse met en évidence la façon dont la pollution non-uniforme affecte l'allure de la distribution du champ électrique sans altérer son intensité maximale, conduisant ainsi à des phénomènes d'arcs électriques dans des zones spécifiques du système d'isolation.

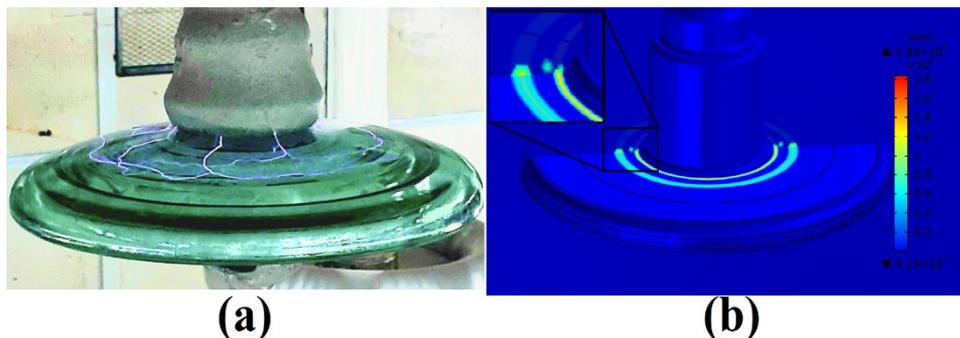


Figure III. 24 Activité d'arcs électriques sous une tension de 30 kV pour une largeur de couche de pollution de 15 cm (a) Expérimentale, (b) Simulation.

III.4.3.2 Distribution du champ électrique sur l'ensemble du système d'isolation (isolateur et air)

L'impact de la pollution non-uniforme sur la distribution du champ électrique est étudié à l'aide d'une représentation tridimensionnelle afin d'obtenir plus de détails. Ainsi, la largeur de la couche de pollution a été variée de 5 cm à 25 cm. Elle a été appliquée du côté de l'électrode haute tension (la tige de l'isolateur). Les résultats de cette analyse sont présentés sur la figure III.25, où la surface de l'isolateur propre est prise comme référence.

Pour la surface propre de l'isolateur, la plus grande intensité du champ électrique est observée autour de l'électrode HT (la tige) et surtout au niveau de la zone triple constituée par l'électrode, l'air et le diélectrique, près du côté haute tension. Cependant, pour toutes les largeurs de la couche de pollution, une intensité importante du champ électrique est observée le long de

la couche de pollution à 5 cm de l'électrode haute tension. Les lignes équipotentielles sont concentrées du côté haute tension et le long des couches de pollution, ils s'étendent progressivement vers l'électrode de terre (capot).

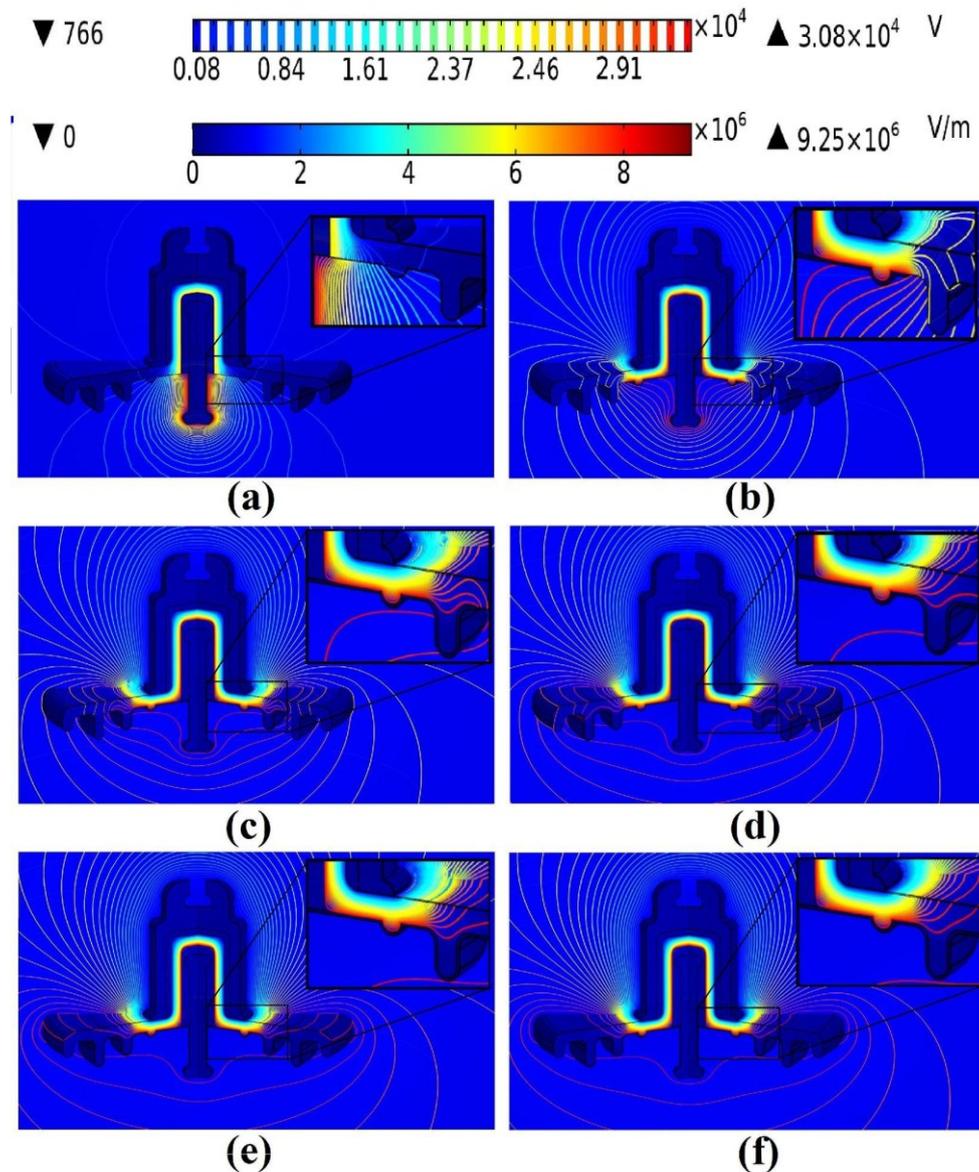


Figure III. 25 Distributions du champ électrique et des lignes équipotentielles pour différentes largeurs de la couche de pollution : (a) surface propre, (b) 5 cm, (c) 10 cm, (d) 15 cm, (e) 20 cm et (f) 25 cm.

III.4.4. Distribution de la densité volumique de la charge électrique dans le verre (diélectrique)

La figure III.26 présente la distribution volumique de la charge électrique dans le matériau en verre. Cette figure illustre représentation de cette charge sur les surfaces supérieure et inférieure dans le cas d'une pollution non-uniforme. Comme nous pouvons constater, des charges positives s'accablent à la fois sur la surface inférieure de la première zone et dans la deuxième zone, particulièrement autour de l'extrémité métallique à haute tension (tige). Ce phénomène est observé pour toutes les configurations de la pollution non-uniforme, à

l'exception de la surface propre où les charges demeurent confinées à la première zone. Les charges négatives, quant à elles, s'accumulent près de l'extrémité métallique mise à la terre (capot).

En effet, nous avons observé en laboratoire que la première apparition d'arcs locaux se produit autour de la zone sèche où il y a accumulation de charge négative. Ce constat est observé pour toutes les largeurs de couches de pollution et des tensions relativement élevées.

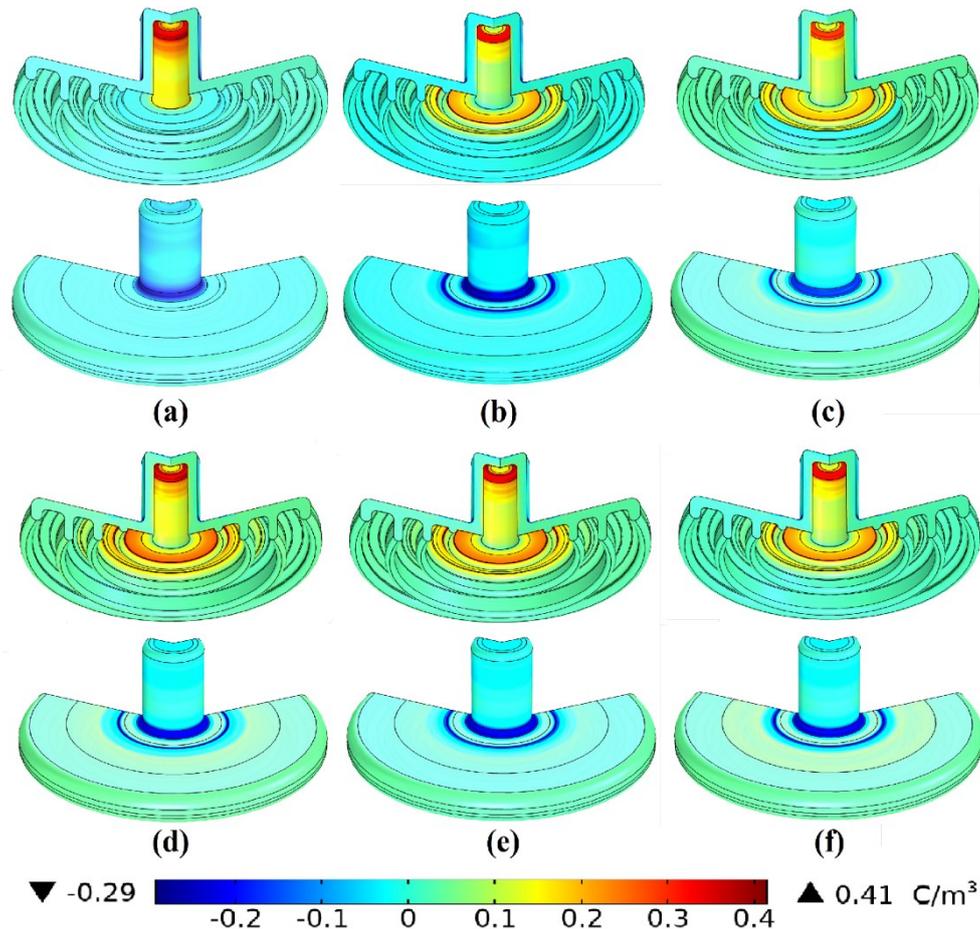


Figure III. 26 Distributions de la densité volumique de charge pour différentes largeurs de la couche de pollution : (a) surface propre, (b) 5 cm, (c) 10 cm, (d) 15 cm, (e) 20 cm et (f) 25 cm.

III.4.5. Distribution de la densité surfacique de la charge le long de la surface du verre (diélectrique)

La figure III.27 montre la densité surfacique de charge le long de la surface du verre pour différentes largeurs de la couche de pollution. La distribution de la densité surfacique de charge le long de la surface est non-uniforme. Elle demeure stable (invariante) dans la première zone, tandis que l'on observe un changement insignifiant dans la deuxième zone, sauf pour la surface propre où elle présente une distribution différente par rapport aux autres, près des extrémités haute tension (HT) et mise à la terre.

Cependant, elle atteint des valeurs élevées dans les premiers 5 cm à partir de la borne HT, en raison du fait que les charges sont fortement influencées à la fois par la distance entre

les deux électrodes HT et mise à la terre et par les paramètres électriques du matériau. De plus, la conductivité électrique et la permittivité relative du verre sont plus élevées que celles de l'air. L'influence de ces deux paramètres, qui influent sur la distribution de charge, sont également discutés dans [24].

Les charges positives s'accroissent à 5 cm pour une largeur de pollution de 5 cm et à 10 cm ailleurs (donc, pour les largeurs de pollution comprises entre 10 et 25 cm), et ce à partir de l'extrémité haute tension. En ce qui concerne les charges négatives, elles sont confinées à environ 2 cm à partir de l'extrémité mise à la terre, donc au niveau de la bande sèche de l'isolateur, où une quantité importante de charges est présente. En effet, nous observons l'apparition de décharges électriques dans cette zone aussi bien pour les résultats expérimentaux et que pour ceux de simulation.

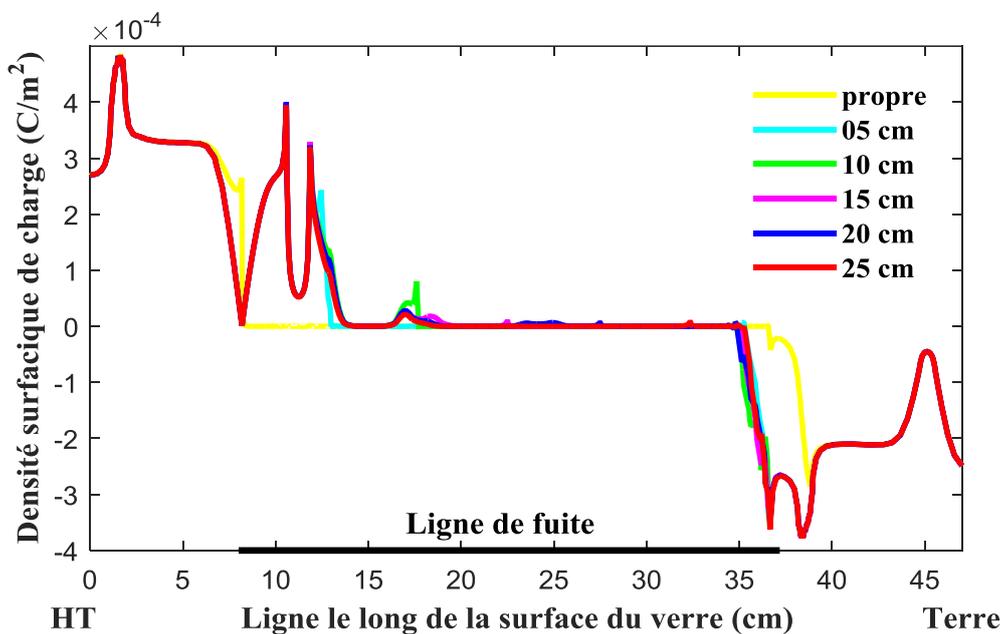


Figure III. 27 Distribution de la densité surfacique de charge le long de la surface de verre pour le cas de pollution non uniforme.

III.4.6. Charge électrique globale

La figure III.28 illustre les résultats de simulation des signaux temporels de la charge électrique et ceux de la tension appliquée, sous une tension de 30 k, et ce pour la surface propre et différentes largeurs de la couche de pollution (5, 10, 15 et 20 cm). Les formes d'onde de charge et de tension sont presque en phase, en raison de la présence de la bande sèche, indiquant un comportement capacitif dominant de l'isolateur pour toutes les largeurs de pollution considérées.

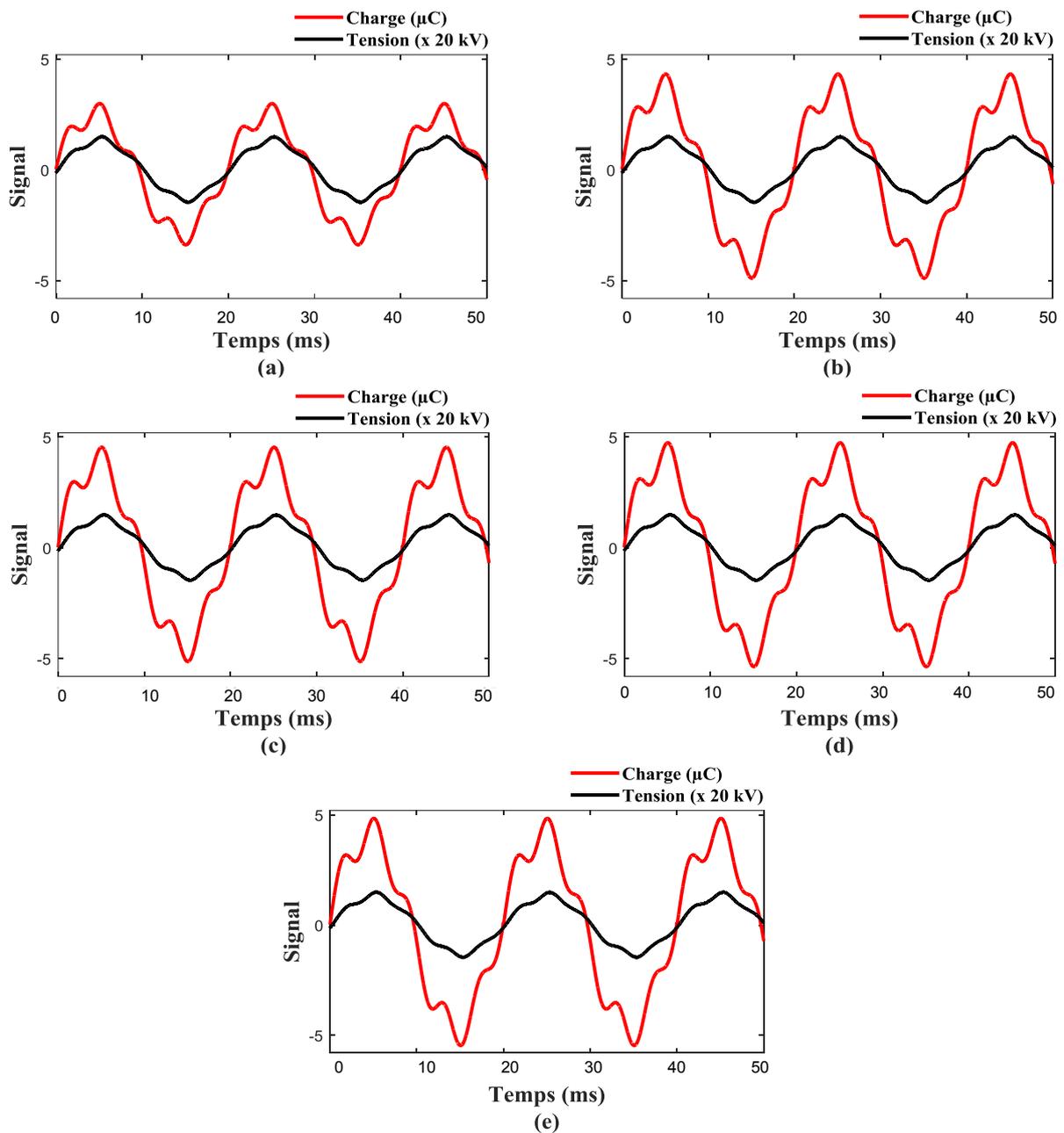


Figure III. 28 Formes d'ondes de la charge électrique pour différentes largeurs de la couche de pollution : (a) surface propre, (b) 5 cm, (c) 10 cm, (d) 15 cm et (e) 20 cm.

La figure III.29 montre les résultats relatifs à la variation de l'amplitude de la charge en fonction de la largeur de la couche de pollution discontinue, pour différentes tensions appliquées. À partir de cette figure, les résultats dévoilent une augmentation des amplitudes de la charge à mesure que la largeur de la couche de pollution discontinue augmente. Cette augmentation est remarquable pour des tensions appliquées supérieures ou égales à 15 kV.

Il est évident que les amplitudes de la charge obtenues par simulation s'alignent étroitement avec celles obtenues expérimentalement, avec des erreurs relatives moyennes de 8,11%, 6,87%, 6,41%, 4,75%, 3,57% et 5,01% pour une surface propre de l'isolateur et de la largeur de la pollution de 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm et 25 cm, respectivement (Figure III.30).

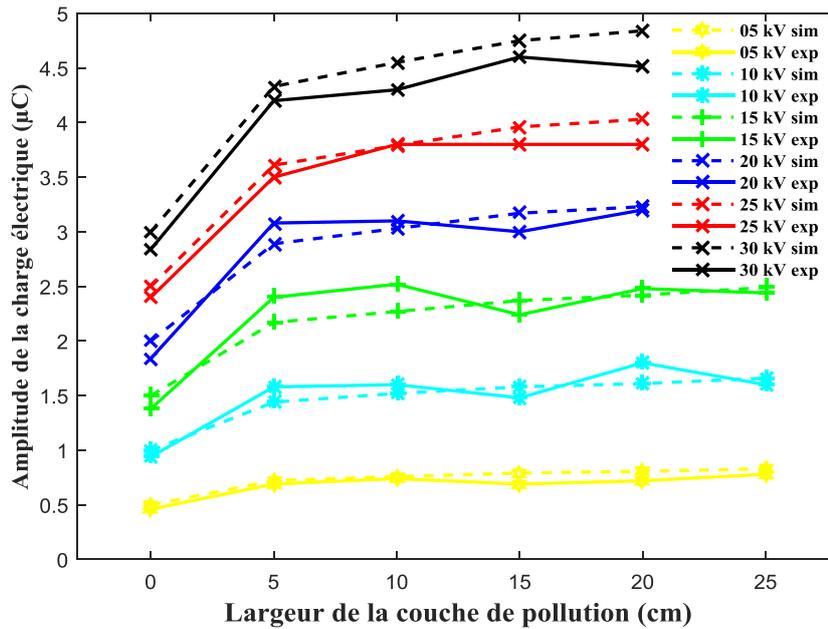


Figure III. 29 Comparaison de la caractéristique charge-largeur de la pollution pour différentes tension appliquée obtenue expérimentalement et par simulation pour une pollution non-uniforme.

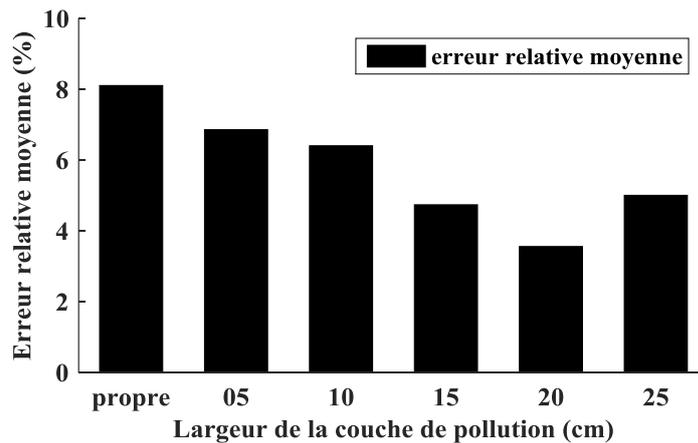


Figure III. 30 Erreur relative moyenne en fonction de différentes largeurs de la couche de pollution.

III.5. Conclusion

Ce chapitre présente une simulation d'apporter un complément valable à l'expérimentation sur l'isolateur à capot et tige dans des conditions de pollution uniforme et non-uniforme. Nous avons conservé les mêmes répartitions (uniforme et discontinue) de la pollution avec les mêmes conductivités (20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 340 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et largeurs (5, 10, 15, 20, 25 cm de conductivité de 1050 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et les mêmes niveaux de tension (jusqu'à 30 kV) considérés dans le chapitre précédent. Nous avons retenu les principaux points suivants :

- Une excellente concordance entre les valeurs expérimentales et simulées du courant de fuite et de la charge électrique.
- L'enregistrement d'un champ électrique maximal de 25,8 $\text{kV}_{\text{max}}/\text{cm}$ au niveau de la pollution uniforme à une distance de 3 cm de l'électrode HT, une valeur de 46,9

kV_{\max}/cm au niveau de la zone triple constituée (capot de l'isolateur-air-verre) lors de l'application d'une pollution non-uniforme. Cette dernière valeur est supérieure au champ critique d'ionisation de l'air ($30 kV_{\max}/\text{cm}$) engendrant, ainsi, l'apparition d'arcs électriques.

- La densité de charge de surface reste pratiquement invariante au niveau de l'interface verre-électrode (capot ou tige).
- La conductivité ainsi que la largeur de la pollution affectent plutôt la charge s'accumulant au niveau de des interfaces verre/air et verre-pollution discontinue.
- Sous pollution uniforme, les charges positives s'accumulent sur une distance d'environ 17 cm à partir de la tige, et celles négatives sur le reste de cette longueur de fuite.
- Sous pollution non-uniforme, les charges positives s'accumulent à 5 cm pour une largeur de pollution de 5 cm et à 10 cm ailleurs (pour les autres largeurs), par rapport à la tige. Au moment où les charges négatives sont confinées à environ 2 cm (au niveau de la bande sèche de l'isolateur) à partir du capot.
- L'apparition de décharges électriques dans la zone de la charge négative est certaine du fait que le champ électrique enregistré est de $46,9 kV_{\max}/\text{cm}$.



Chapitre IV

Optimisation de l'anneau de garde pour les isolateurs de la ligne 400 kV

IV.1. Introduction

Face à la demande croissante en électricité, celle-ci est principalement transportée sur de longues distances via le réseau de transmission électrique. Ce réseau est conçu pour acheminer l'électricité depuis les centrales de production vers les centres de distribution et les consommateurs, principalement composé de lignes de transmission aériennes. L'importance d'installer ces lignes en abondance s'explique en partie par l'absence de solutions de stockage d'énergie globalement efficaces pour cette énergie et par la nécessité de réduire les pertes lors du transport sur les lignes électriques [1].

L'augmentation du niveau de tension apparaît comme l'une des solutions proposées, compte tenu de son aspect technico-économique [2]. Cette augmentation de tension nécessite des améliorations visant à garantir un transport efficace et fiable de l'électricité, notamment au niveau des lignes à haute tension, des transformateurs, des postes électriques et d'autres équipements nécessaires, parmi lesquels figurent les isolateurs. Ces derniers sont des composants essentiels présents dans les lignes aériennes, les systèmes de haute tension à courant alternatif (HVAC) [3] et à courant continu (HVDC) [4]. De ce fait, de nombreuses études ont été menées dans le but d'améliorer l'efficacité de ces composants, comme en témoignent diverses recherches, notamment celles mentionnées dans [6] et [51].

Cette section présente une série d'étapes que nous avons entreprises pour évaluer les performances électriques d'une chaîne d'isolateurs de ligne 400 kV. Tout d'abord, nous avons effectué une étude de telles performances. Ensuite, nous avons analysé le comportement électrique de la chaîne d'isolateurs. Enfin, nous avons conclu cette section en introduisant un processus d'optimisation visant à améliorer la conception de l'anneau de garde de la chaîne.

L'objectif principal de cette optimisation est de réduire l'intensité du champ électrique le long de la surface de la chaîne d'isolateurs. Cette réduction du champ électrique devrait se traduire par une amélioration significative des performances électriques de la chaîne d'isolateurs dans son ensemble.

IV.2. Isolateur haute tension

Les réseaux de transport de l'électricité dans le monde, et particulièrement en Algérie, continuent de s'élargir en raison de la croissance de la demande en énergie électrique. À la fin de l'année 2022, la longueur totale du réseau national de transport de l'électricité, tous niveaux de tensions confondus (60 à 400 kV), avait atteint 33 775 km [73]. L'évolution de la longueur du réseau de transport électrique pendant la période 2005-2017 est présentée sur la figure IV.1.

Pour la période de 2021-2030, il est prévu de réaliser une longueur globale de réseau de transport de l'électricité de l'ordre de 20 296 km, auxquels s'ajoutent 12 744 km de projets en cours. Ainsi, à l'horizon 2030, la longueur totale du réseau de transport d'électricité atteindra les 64 204 km, répartis comme suit : 15 628 km en 400 kV, 25 516 km en 220 kV et 22 442 km en 60 kV, avec une puissance totale de 98 540 MVA [71].

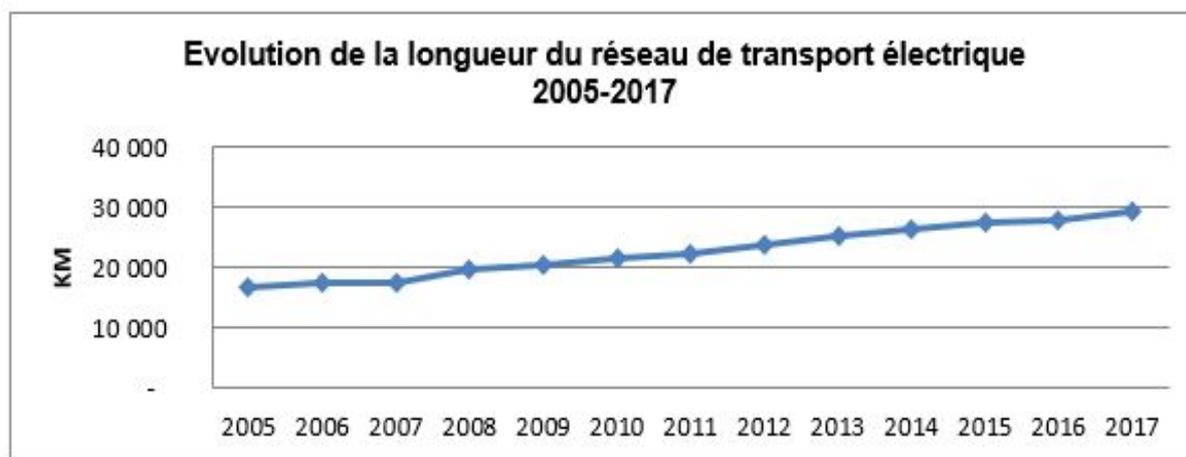


Figure IV. 1 Evolution de la longueur du réseau de transport électrique entre 2005 et 2017 en Algérie [68].

Les isolateurs, en particulier, jouent un rôle crucial dans les systèmes de transport de l'énergie électrique [74]. L'isolateur possède une double fonction électrique et mécanique. Sur le plan électrique, il assure une isolation électrique, empêchant le courant électrique de passer du conducteur aux structures de support mises à la terre. Cette isolation électrique est cruciale pour éviter les courts-circuits et les fuites de courant, pouvant entraîner des dysfonctionnements du système ou des risques pour la sécurité des personnes et des équipements. Sur le plan mécanique, l'isolateur permet de supporter les conducteurs HT et de résister, ainsi, aux contraintes mécaniques. En fait, les isolateurs sont soumis à différentes contraintes mécaniques telles que le poids des conducteurs, les forces du vent, les variations de température, le givrage, etc. Ils doivent être suffisamment résistants pour supporter ces contraintes sans se rompre ou se déformer.

Effectivement, les types d'isolateurs les plus fréquemment utilisés sont les isolateurs en céramique, en verre et les isolateurs composites. Chacun de ces isolateurs présente des avantages distincts et est sélectionné en fonction des besoins spécifiques de chaque site d'implantation. Notre étude repose sur deux types d'isolateurs : ceux en verre et ceux en composite utilisés dans la ligne 400 kV.

IV.2.1. Isolateur capot et tige en verre

L'isolateur capot et tige en verre de type 1512L (Figure IV.2) est largement utilisé par la Société Algérienne de l'Électricité et du Gaz (SONELGAZ) [75]. Cet isolateur fait l'objet de nombreux travaux de recherche [35, 40, 75]. Il possède des dimensions spécifiques, avec un diamètre (D_v) de 254 mm, une hauteur (H_v) de 146 mm et une ligne de fuite (L_{fv}) de 292 mm [81].

Les avantages des isolateurs en verre incluent d'excellentes caractéristiques thermodynamiques, une grande résistance à la pollution et aux arcs électriques, une longue durée de vie, un faible poids, une facilité d'entretien et un court cycle de production [70]. Des unités d'isolateurs en verre sont assemblées en série à l'aide de liaisons métalliques pour former

une chaîne. Le conducteur est suspendu à l'extrémité inférieure de la chaîne, tandis que l'autre extrémité est fixée au support (pylône). Le nombre d'isolateurs dans la chaîne est déterminé par divers facteurs tels que la tension appliquée, les conditions environnementales, la taille et le type de l'isolateur, etc. Plusieurs profils d'isolateurs capot et tige (standard, antibrouillard, à ailettes, ouvert, sphérique...) peuvent être utilisés.

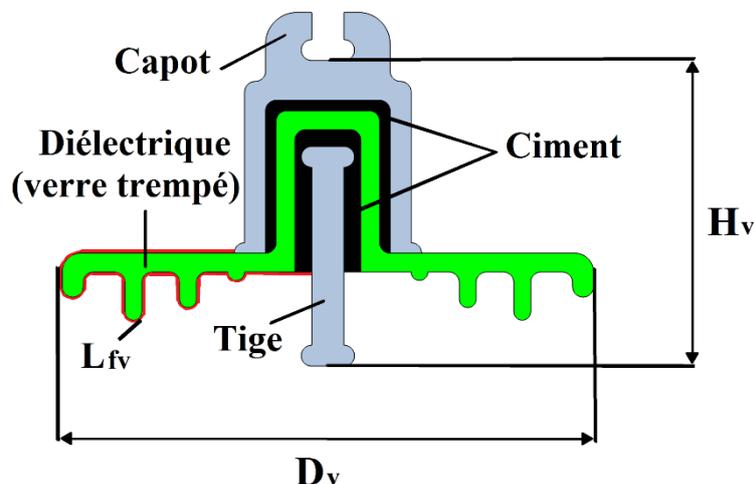


Figure IV. 2 Isolateur capot et tige en verre de type 1512L

IV.2.2. Isolateur composite

Les isolateurs composites sont de plus en plus utilisés dans les systèmes électriques [52]. Ils ont gagné en popularité dans les réseaux électriques en raison de leurs nombreux avantages, tels que leur poids plus léger facilitant leur installation et réduisant la charge sur les structures de support. Ils offrent également une flexibilité de conception et de fabrication dans une variété de formes pour s'adapter aux besoins spécifiques de chaque application. Ils sont reconnus pour leur résistance mécanique élevée, et leur surface hydrophobe les rend moins susceptibles d'absorber l'eau, améliorant ainsi leurs performances dans des environnements humides. En plus, ils nécessitent également moins d'entretien [64]. En raison de leurs performances, des chercheurs [76] ont proposé de les intégrer dans le réseau national, notamment dans une ligne 400 kV (la ligne ORAN-BLIDA). D'autres chercheurs [47] ont opté pour améliorer leurs performances électriques.

Un isolateur composite (Figure IV.3) est généralement constitué de deux parties métalliques aux extrémités : l'une est reliée à la haute tension et l'autre est mise à la terre. Ces deux parties sont assemblées par un noyau renforcé en fibre de verre isolante pour assurer une résistance mécanique solide. Le noyau est entièrement recouvert d'un revêtement extérieur en matériau composite (silicone). Le tableau IV.1 présente les détails de l'isolateur composite adopté dans cette étude.

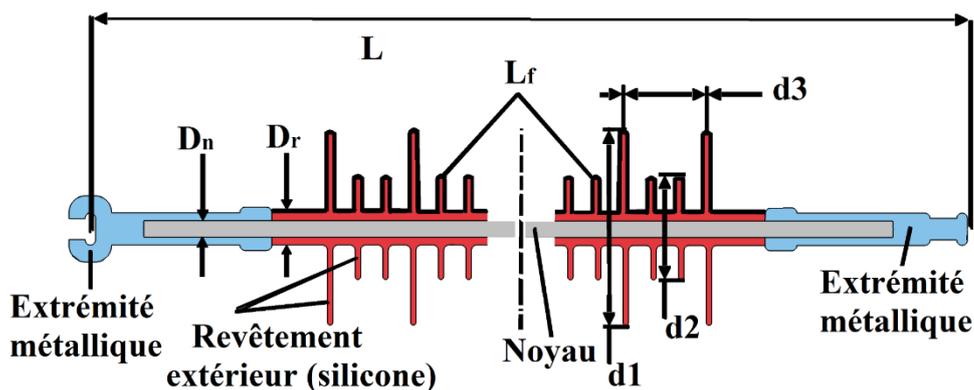


Figure IV. 3 Isolateur composite.

Tableau IV.1. Les dimensions de l'isolateur composite.

Diamètre des jupes	d1/d2	181/95 mm
Distance entre jupes	d3	78 mm
Nombre de jupes		36/70
Longueur de l'isolateur	L	3200 mm
Ligne de fuite	Lf	12100 mm
Diamètre du noyau	Dn	18 mm
Diamètre du revêtement	Dr	30 mm

IV.3. Modèles numériques des chaînes d'isolateurs adoptés de la ligne 400 kV

Pour l'ensemble des travaux effectués dans cette section, les deux chaînes d'isolateurs, à savoir celle avec capot et tige en verre (la chaîne d'isolateurs en verre) et celle en composite, sont adoptées. Leurs conceptions ont été réalisées en utilisant la plateforme du logiciel COMSOL. Profitant de la symétrie des isolateurs, toutes les études ont été menées en 2D-axismétrique. Les détails et les paramètres des deux isolateurs ont été précédemment cités. Les deux modèles d'isolateurs sont conçus pour être adaptés à la ligne de 400 kV, et ils ont une longueur de ligne de fuite identique de 12 100 mm.

Le modèle d'isolateur à capot et tige (la chaîne d'isolateurs en verre) comprenant 27 unités, conformément à la longueur de fuite minimale nominale selon la norme IEC/TS 60815-2 [85]. Le modèle composite a une longueur totale L_c de 3 200 mm (Figure IV.4(a)), tandis que celui en verre a une longueur totale L_v de 3 950 mm (Figure IV.4(b)).

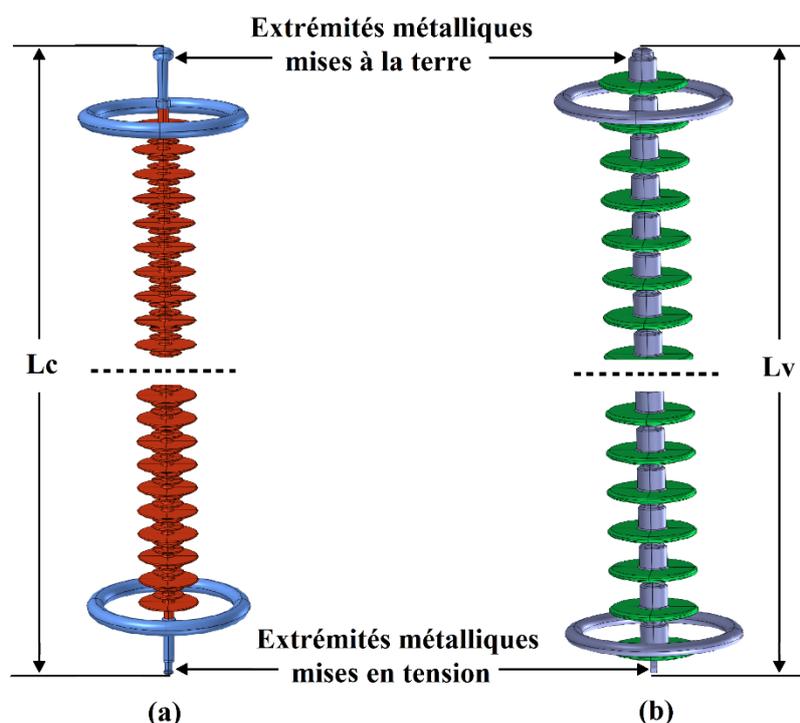


Figure IV. 4 Chaînes d'isolateurs (a) en matériaux composites (b) avec des unités de capot et tige en verre.

Afin d'obtenir les caractéristiques électriques souhaitées des isolateurs sous l'application d'une tension électrique, telle que le champ électrique, nous avons choisi le module de physique relatif au courant électrique parmi les catégories disponibles dans AC/DC. L'extrémité inférieure de l'isolateur est alimentée avec une tension de $400/\sqrt{3}$ kV (phase-terre), tandis que l'extrémité supérieure est mise à la terre (Figure IV.4). Un maillage triangulaire très fin est utilisé pour la chaîne d'isolateurs, tandis qu'un maillage normal est utilisé pour l'air environnant. Ce dernier est représenté par une région circulaire avec un rayon de 5 200 mm pour la chaîne en composite et un rayon de 6 000 mm pour la chaîne d'isolateurs en verre. Ce choix est fondé sur la nécessité d'assurer une distance minimale entre les parties sous tension et la frontière externe de l'air, à laquelle une isolation électrique est appliquée ($\vec{n} \cdot \vec{j} = 0$), cette distance devant être au moins égale à la longueur totale de l'isolateur, c'est-à-dire la longueur totale entre les parties sous tension.

L'anneau de garde est un élément essentiel pour améliorer les performances électriques de l'isolateur. Son installation est fortement recommandée aux deux extrémités métalliques, celles mises à la terre et celles sous tension, notamment pour des tensions supérieures à 345 kV [86]. Dans cette partie de simulation, l'anneau de garde est positionné à une distance de 220 mm de l'axe vertical de l'isolateur, avec un tube ayant un rayon de 25 mm. Ces valeurs sont maintenues constantes pour les deux modèles d'isolateurs.

Nous avons conduit une étude et une analyse basées sur la simulation, mettant en lumière les caractéristiques électriques, notamment le courant de fuite, le champ électrique et le potentiel électrique, et ce pour les deux modèles d'isolateurs mentionnés ci-dessus, avec et sans anneau de garde. L'objectif de cette étude est de mieux comprendre et d'acquiescer davantage de

détails sur le comportement électrique des isolateurs, en vue d'introduire par la suite des améliorations visant à renforcer leurs performances.

IV.3.1. Etude et analyse du courant de fuite

Cette partie présente les résultats de simulation des signaux de courant de fuite issus des deux modèles d'isolateurs. Ces signaux sont directement obtenus en calculant l'intégrale de la densité de courant sur la surface de l'extrémité métallique à laquelle un signal de tension est appliqué. Les lignes de densité de courant pour les isolateurs en composite et en verre sont présentées sur la figure IV.5. Nous pouvons observer que les lignes de densité de courant suivent des chemins très complexes ; la plupart d'entre elles circulant à travers l'air entre l'extrémité haute tension et celle mise à la terre, à partir de la surface de l'anneau de garde. Certaines parties de ces lignes traversent les ailettes du revêtement en silicone de l'isolateur composite (Figure IV.5(a)), tandis que pour la chaîne d'isolateurs en verre, elles se dirigent surtout vers les parties métalliques intermédiaires des unités de la chaîne et traversent le matériau en verre (Figure IV.5(b)).

Comme nous pouvons le constater, le trajet complexe suivi par la densité de courant rend son étude difficile. Dans ce qui suit, nous présentons et analysons les signaux de courant de fuite pour les deux modèles d'isolateurs. Il est à noter que la tension appliquée dans la simulation est une tension externe provenant du laboratoire, reflétant ainsi les conditions réelles.

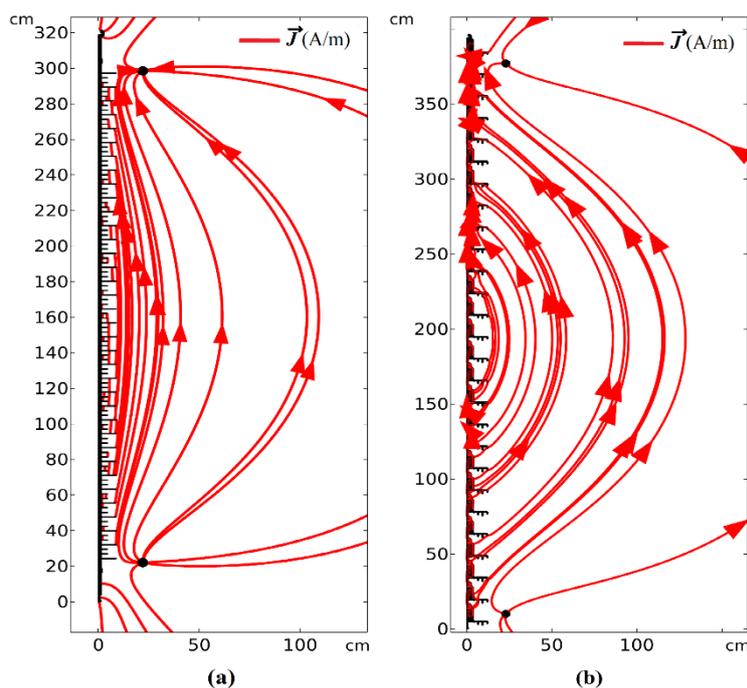


Figure IV. 5 Lignes de densité de courant (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre [87].

La figure IV.6 présente les signaux de courant de fuite pour les isolateurs en composite et en verre, avec et sans la présence d'un anneau de garde. Ces signaux de courant de fuite révèlent une distorsion et un comportement capacitif, entraînant un déphasage d'environ 90° entre le courant de fuite et la tension appliquée, que ce soit pour les isolateurs en composite ou

en verre, avec ou sans la présence de l'anneau de garde. Nous avons également observé qu'avec la présence de l'anneau de garde, l'amplitude du courant de fuite augmente de 270 % pour l'isolateur en composite et de 79,5 % pour la chaîne d'isolateurs en verre.

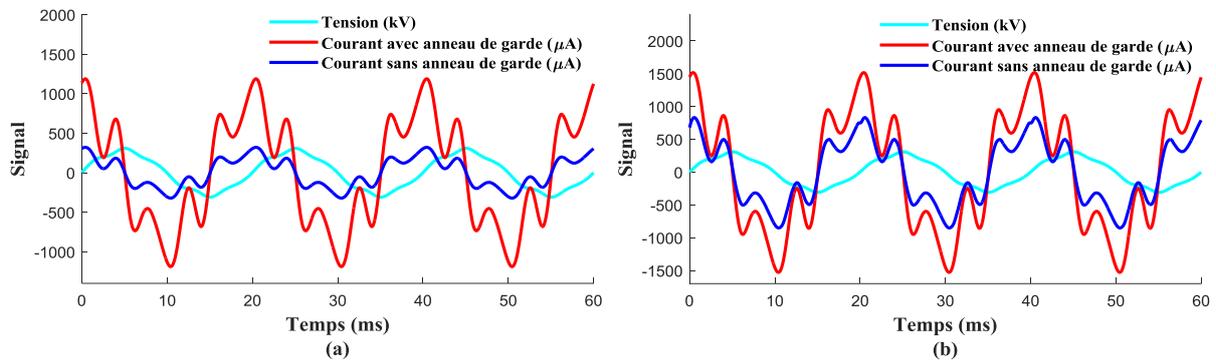


Figure IV. 6 Signaux de courant de fuite avec et sans anneau de garde (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.

Afin d'approfondir notre compréhension du courant de fuite, nous exploitons la flexibilité offerte par la simulation pour déterminer les signaux de courant de fuite de manière distincte. Par exemple, en considérant le côté HT (extrémité métallique et anneau de garde), l'intégrale de la densité de courant le long de leur surface nous donne le signal du courant de fuite que nous avons déjà calculé. À présent, si nous effectuons cette intégrale sur des surfaces spécifiques, telles que la surface en contact avec l'air (S1) et celle en contact avec le matériau (S2), nous obtenons respectivement les signaux de courant à travers l'air et à travers le matériau, respectivement. Cette séparation des surfaces est bien illustrée sur la figure IV.7(a) pour l'isolateur composite et sur la figure IV.7(b) pour la chaîne d'isolateurs en verre. Le signal de courant de fuite total est la somme des deux signaux obtenus séparément.

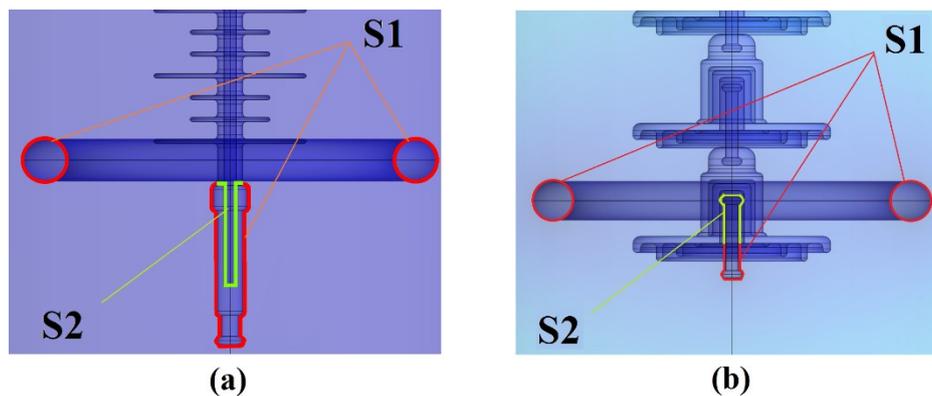


Figure IV. 7 Séparation de la surface côté HT en deux surfaces S1 et S2 pour (a) l'isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.

La figure IV.8 présente les signaux du courant de fuite obtenus séparément à travers l'air et le matériau pour les isolateurs en composite et en verre. Nous observons que les deux signaux possèdent la même forme et le même déphasage, ce qui valide le comportement capacitif des isolateurs. L'amplitude du courant de fuite est plus élevée du côté de l'air pour les deux isolateurs. Dans le cas de la chaîne d'isolateurs en verre, le courant traversant le matériau

représente 38% du courant de fuite total, tandis que pour l'isolateur en composite, il ne représente que 0,8%. Même lorsque la surface de l'isolateur est propre, il peut toujours y avoir une petite quantité de courant traversant l'air et le matériau de l'isolateur malgré son caractère isolant. Ceci est en réalité dû aux propriétés intrinsèques du matériau de l'isolateur et à sa résistivité finie.

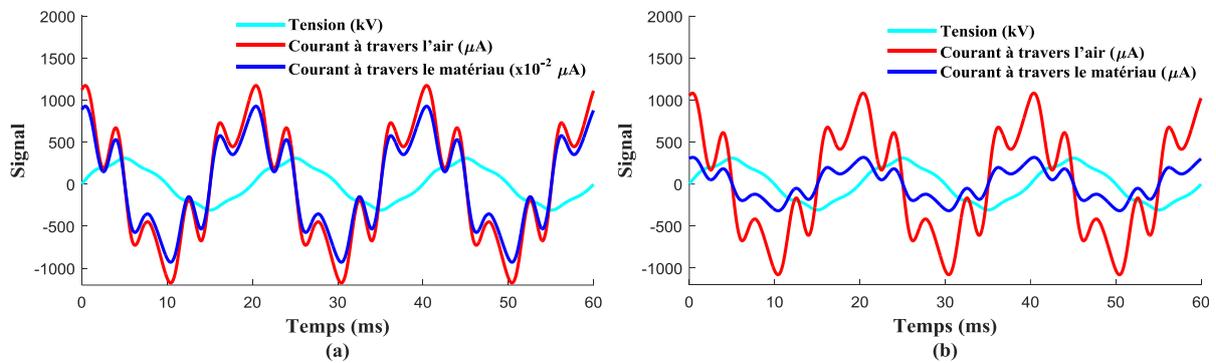


Figure IV. 8 Signaux du courant de fuite à travers l'air et à travers le matériau (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.

L'accumulation progressive de particules polluantes à la surface de l'isolateur peut entraîner la formation d'une couche conductrice qui permet au courant de fuite de s'écouler à travers elle. Cela peut provoquer des décharges partielles et même un contournement complet de l'isolateur. Dans le but d'évaluer l'impact de la pollution uniforme sur le signal du courant de fuite, nous avons mené une simulation en appliquant une couche de pollution d'épaisseur de 1 mm. Pour l'isolateur composite, la couche polluante est supposée saturée d'eau. La valeur de la permittivité relative choisie est de 80, et celle de la conductivité $\sigma = 6 \times 10^{-7}$ S/m. [30]. Pour la chaîne d'isolateurs en verre, nous avons considéré une permittivité relative de 7,1 et une conductivité de $\sigma = 6 \times 10^{-7}$ S/m [88]. En vue d'analyser l'impact de la conductivité de la pollution sur les signaux du courant de fuite, nous avons considéré deux valeurs de cette conductivité à savoir σ et $\sigma' = 1000 \times \sigma = 6 \times 10^{-4}$ S/m. Les résultats ainsi obtenus sont tracés à la figure IV.9(a) pour l'isolateur composite, et à la figure IV.9(b)) pour la chaîne d'isolateurs en verre.

L'amplitude du signal de courant augmente avec la charge électrique qui s'accumule au niveau de la couche de pollution. En multipliant la conductivité par 1000, nous augmentons le flux de la charge électrique qui peut s'écouler à travers la couche de pollution. Cela se traduit par une augmentation de l'amplitude du signal de courant, comme le montre la figure IV.9. L'amplitude du courant de fuite augmente de 178,39% pour l'isolateur composite (Figure IV.9(a)), et de 528,07% pour la chaîne d'isolateurs en verre (Figure IV.9(b)).

Dans le cas de la faible valeur de la conductivité (6×10^{-7} (S/m)), les formes d'ondes du courant de fuite sont fortement déformées, avec un angle de déphasage tension-courant de $88,2^\circ$ pour l'isolateur composite et $86,4^\circ$ pour la chaîne d'isolateurs en verre, ce qui indique que le comportement capacitif des deux systèmes d'isolation est prédominant. En revanche, pour la

forte conductivité (6×10^{-4} S/m) de la couche de pollution, nous enregistrons une diminution du déphasage courant-tension pour atteindre une valeur de $17,1^\circ$ pour l'isolateur composite et $10,8^\circ$ pour la chaîne d'isolateurs en verre. Dans ces conditions, les isolateurs montrent un comportement capacitif, mais avec une forte composante résistive.

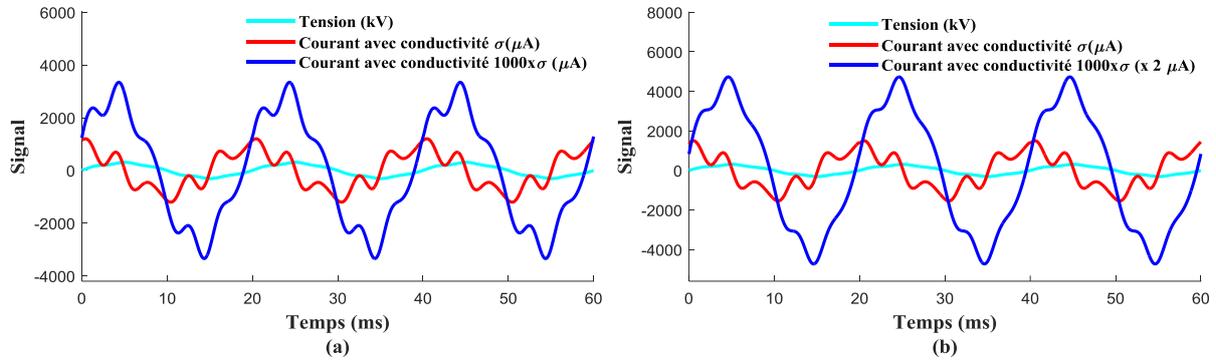


Figure IV. 9 Signaux de courant de fuite sous condition de pollution pour différentes conductivités (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.

IV.3.2. Etude et analyse de la distribution du potentiel électrique

La tension de la surface d'un isolateur revêt une importance particulière pour la compréhension de la formation et de la propagation des décharges électriques sur les surfaces isolantes [33]. Afin de fournir davantage de détails sur la distribution du potentiel le long de l'isolateur, la distribution du potentiel électrique le long de la ligne de fuite est illustrée sur la figure IV.10. Par ailleurs, la figure IV.11 représente le potentiel électrique le long de l'axe central pour les deux isolateurs, avec et sans anneau de garde.

Les distributions de potentiel le long de la ligne de fuite et de l'axe central de l'isolateur sans anneau de garde sont non uniformes. Cependant, l'ajout d'un anneau de garde a un impact significatif sur la redistribution du potentiel, conduisant à des distributions plus uniformes. Ce phénomène est observé à la fois pour les modèles d'isolateurs composites et en verre (Figure IV.10 et IV.11). La distribution du potentiel est plus régulière pour les isolateurs composites que pour les isolateurs en verre, en raison de la présence des pièces métalliques (capots et tiges) entre les unités de la chaîne d'isolateurs en verre. De telles pièces sont portées à des potentiels flottants créant, ainsi, des fluctuations dans la distribution.

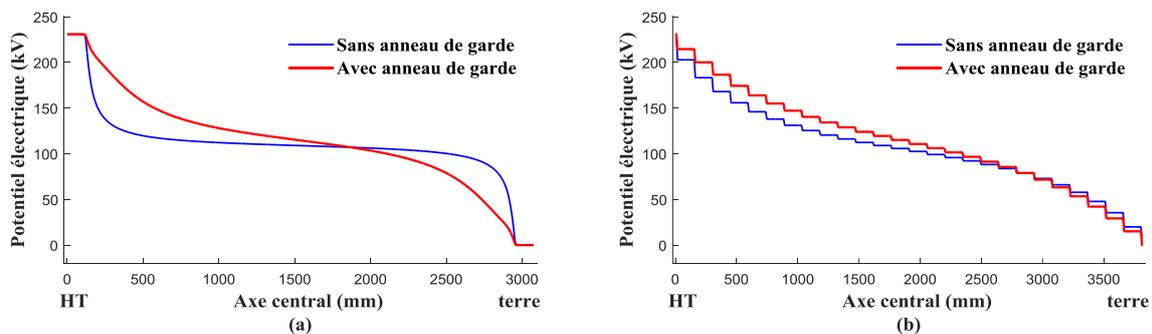


Figure IV. 10 Distribution du potentiel électrique le long de l'axe central (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.

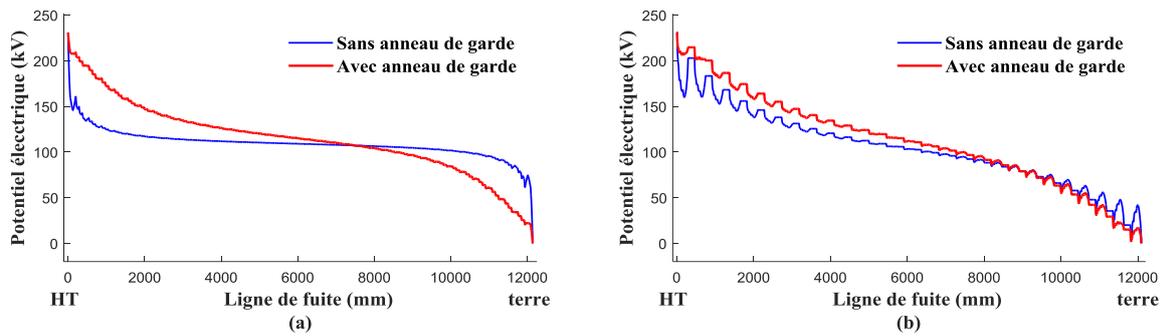


Figure IV. 11 Distribution du potentiel électrique le long de la ligne de fuite (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.

IV.3.3. Etude et analyse de la distribution du champ électrique

La distribution du champ électrique le long de l'axe central et de la ligne de fuite pour une tension appliquée de $400/\sqrt{3}$ kV est présentée respectivement sur les figures IV.12 et IV.13 pour les deux isolateurs. D'après ces figures, nous observons que les intensités du champ électrique les plus élevées se trouvent autour des extrémités métalliques (capots et tiges), où le champ électrique diminue de l'extrémité HT pour atteindre sa valeur minimale presque au centre des isolateurs, avant d'augmenter à nouveau pour atteindre une valeur élevée à l'extrémité de mise à la terre pour les deux isolateurs, que ce soit le long de la ligne de fuite ou le long de l'axe central des isolateurs.

Nous remarquons également que les intensités du champ électrique sont plus élevées à la surface qu'au long de l'axe central. Il est crucial de minimiser l'intensité du champ pour éviter la dégradation prématurée du matériau composite, en particulier à la surface, exposée aux conditions climatiques externes. En effet, l'ajout de l'anneau de garde a entraîné une redistribution du champ électrique à la fois à la surface et le long de l'axe central, avec des réductions significatives d'intensité de l'ordre de 23,44% et 41,91% le long de l'axe central, et de l'ordre de 69,93% et 45,86% le long de la ligne de fuite, et cela pour l'isolateur composite et en verre respectivement. Les réductions d'intensité du champ sont plus importantes le long de la ligne de fuite que le long de l'axe central.

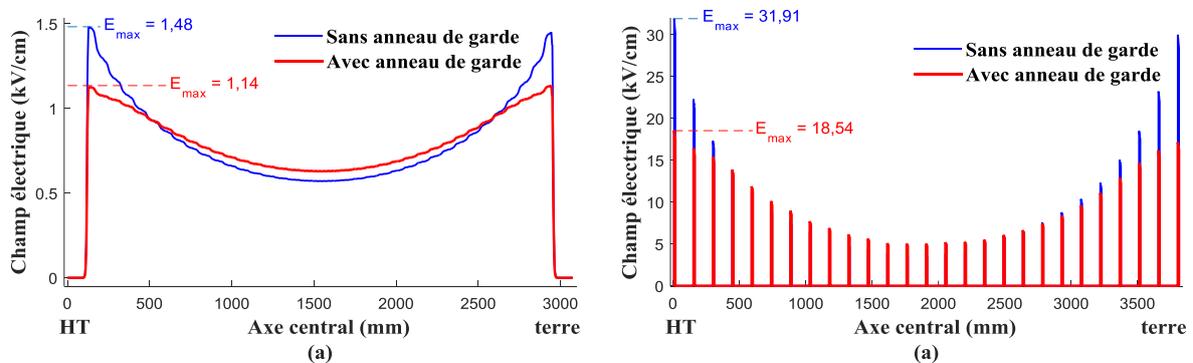


Figure IV. 12 Distribution du champ électrique le long de l'axe central (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.

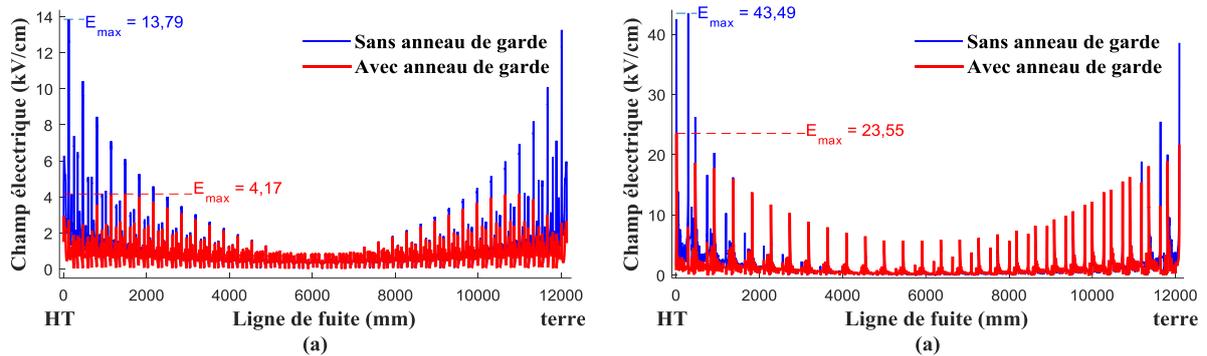


Figure IV. 13 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre.

La représentation en 3D de la distribution du champ électrique dans le système d'isolation (chaîne d'isolateur et air) pour les deux isolateurs en composite et en verre, est illustrée sur la figure IV.14. Nous observons que l'intensité maximale du champ électrique est présente dans l'air à proximité de la surface externe des extrémités métalliques et des anneaux de garde pour les deux isolateurs, ainsi qu'à proximité des pièces métalliques dans le cas de l'isolateur en verre. Cette intensité diminue à partir des extrémités sous tension progressivement en s'approchant du centre de l'isolateur, puis elle augmente graduellement jusqu'aux extrémités mises à la terre.

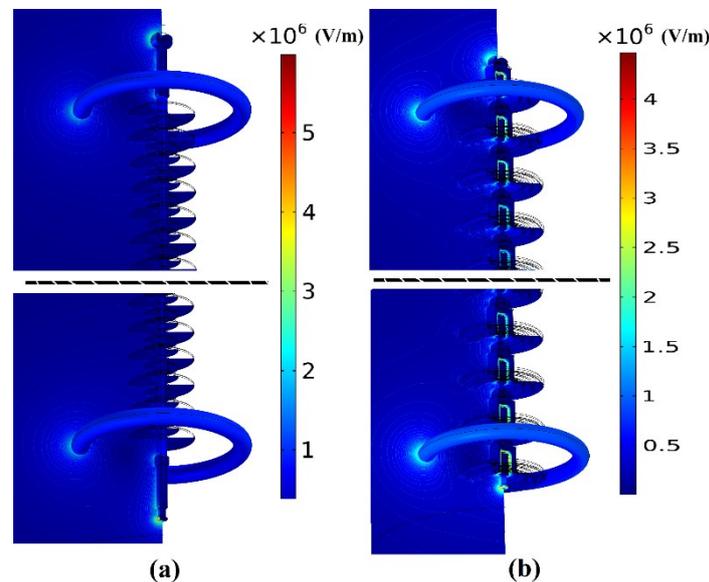


Figure IV. 14 Champ électrique dans le système d'isolation (chaîne d'isolateur et air) (a) isolateur composite (b) chaîne d'isolateurs en verre [87].

IV.4. Optimisation de l'anneau de garde

La présence des anneaux de garde pour les isolateurs est d'une importance primordiale pour redistribuer et atténuer la valeur maximale du champ électrique sur leur surface. Nous pouvons appliquer des optimisations sur les anneaux de garde afin de maintenir le champ

électrique le long de la surface des isolateurs HT aussi bas que possible, ce qui permet de prévenir certains problèmes, en particulier l'apparition des décharges partielles.

Dans cette section, nous discutons des trois méthodes : COBYLA, CS et NM, utilisées pour l'optimisation de la conception de l'anneau de garde en vue d'améliorer les performances électriques (minimisation du champ électrique de surface) des isolateurs de la ligne 400 kV. Nous décrivons également la stratégie suivie pour réaliser cette optimisation.

IV.4.1. Identification du problème

La question qui se pose à ce stade est la suivante : est-il envisageable d'aller encore plus loin dans l'amélioration du comportement électrique de la chaîne d'isolateurs ? En d'autres termes, peut-on pousser davantage l'atténuation du champ électrique le long de la surface de ces isolateurs ?

Cette interrogation soulève la possibilité d'explorer des avancées technologiques ou des innovations de conception qui pourraient permettre de réduire encore davantage l'intensité du champ électrique, allant au-delà des résultats déjà envisagés avec l'ajout d'anneaux de garde. L'utilisation de simulations et de techniques d'optimisation permet d'explorer ces avancées technologiques de conception pour réduire davantage l'intensité du champ électrique le long de la surface de la chaîne d'isolateurs. Cela contribue non seulement à l'amélioration globale de l'infrastructure de l'isolateur et de leur comportement électrique, mais offre également des avantages en termes de temps, de coûts et de sécurité.

Après la découverte des isolateurs composites, les premiers exemplaires utilisés dans des applications réelles peuvent avoir montré des signes de défaillance, tels que des fissures, des ruptures ou une mauvaise isolation électrique ou thermique. En raison de ces défaillances constatées, les exploitants, qu'il s'agisse d'entreprises ou d'autres entités, peuvent être réticents, voire effrayés, à l'idée d'acheter ces isolateurs [89]. Pour surmonter ces défis, il est essentiel de poursuivre la recherche et le développement continus des matériaux les constituant. À cet effet, une recherche intensive a été menée par l'Electric Power Research Institute (EPRI) afin de limiter la valeur de l'intensité du champ électrique (valeur efficace rms) à 4,2 kV/cm à la surface des isolateurs composites [90]. Dépasser cette valeur peut en effet entraîner un vieillissement prématuré du matériau composite.

La valeur de 21 kV/cm est recommandée à ne pas dépasser pour éviter l'apparition de décharges sur les parties métalliques [53]. Cela exige également une intensité de champ inférieure à 21 kV/cm à la surface, non seulement pour les isolateurs composites mais aussi pour les isolateurs en verre. De nouvelles techniques sont introduites, consistant en l'application de couches de polymères sur la surface des isolateurs en verre, afin d'augmenter leur hydrophobicité [51], cela exige également de les protéger contre la dégradation et l'érosion des polymères.

Étant donné que l'anneau de garde a un impact significatif sur l'atténuation du champ électrique à la surface de l'isolateur, la conception géométrique de l'anneau de garde ne dispose pas de normes universellement reconnues [64]. En plus, dans l'absence des limitations des valeurs du champ électrique à la surface de l'isolateur, nous adoptons la restriction établie par l'Electric Power Research Institute (EPRI) à savoir limiter la valeur efficace (rms) du champ électrique à la surface de l'isolateur à 4,2 kV/cm.

IV.4.2. Méthodes d'optimisation

Dans cette partie, nous présentons les méthodes d'optimisation appliquées dans notre étude sur l'anneau de garde visant à atténuer au maximum que possible l'intensité du champ électrique à la surface de l'isolateur. Diverses méthodes d'optimisation ont été employées pour optimiser les dimensions de l'anneau de garde, comprenant l'algorithme multi-objectif de fourmi-lion (MOALO) [47], l'optimisation par essais particuliers (PSO) [47], et l'algorithme d'optimisation du loup gris (GWO) [61].

Ces dernières années, plusieurs méthodes d'optimisation ont été utilisées pour résoudre des problèmes d'ingénierie. Nous citons, entre autres, la méthode d'optimisation sous contraintes par approximation linéaire (COBYLA) [91], la méthode de recherche par coordonnées (CS) et la méthode de nelder-mead (NM) [92].

La méthode COBYLA a été récemment introduite pour optimiser la conception et la masse des pales de turbines éoliennes [91]. Une étude d'optimisation, incluant l'algorithme CS, parmi d'autres techniques [93], a été menée sur un système de pompe à chaleur géothermique pour atteindre un équilibre optimal entre coût, performance et capacité du système. La technique NM a également été employée pour optimiser la conception de schémas de couches de fibres pour des réservoirs sous pression en composites [94]. De plus, les chercheurs de [92] ont démontré l'efficacité de CS et NM dans l'optimisation des hyper-paramètres en apprentissage profond.

Nous présentons, dans ce qui suit, un aperçu des méthodes d'optimisation utilisées dans cette étude. En général, l'algorithme d'optimisation dans notre cas est conçu pour déterminer la combinaison optimale des paramètres R , H et r de l'anneau de garde. Dans le système de coordonnées utilisé, R représente la position horizontale variant le long de l'axe horizontal (ox), H représente la position verticale variant le long de l'axe vertical (oy), et r est le rayon du tube de l'anneau (comme illustré sur la figure IV.15.a pour l'isolateur composite et la figure IV.15.b pour la chaîne d'isolateurs en verre). L'objectif est d'atteindre un champ électrique aussi bas que possible tout en respectant les contraintes spécifiées. Notre but est de déterminer une solution optimale minimisant la fonction objectif $f(x)$, (représentant le champ électrique maximal le long de la ligne de fuite de l'isolateur), tout en prenant en compte les contraintes $g_i(x)$ appliquées aux positions et au rayon. Ici, x est un vecteur de m décisions, tel que :

$$f(x) = \max(\text{Electric} - \text{field}) \quad (\text{IV.1})$$

Soumis à :

$$g_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, n. \quad (\text{IV.2})$$

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_m] \quad (\text{IV.3})$$

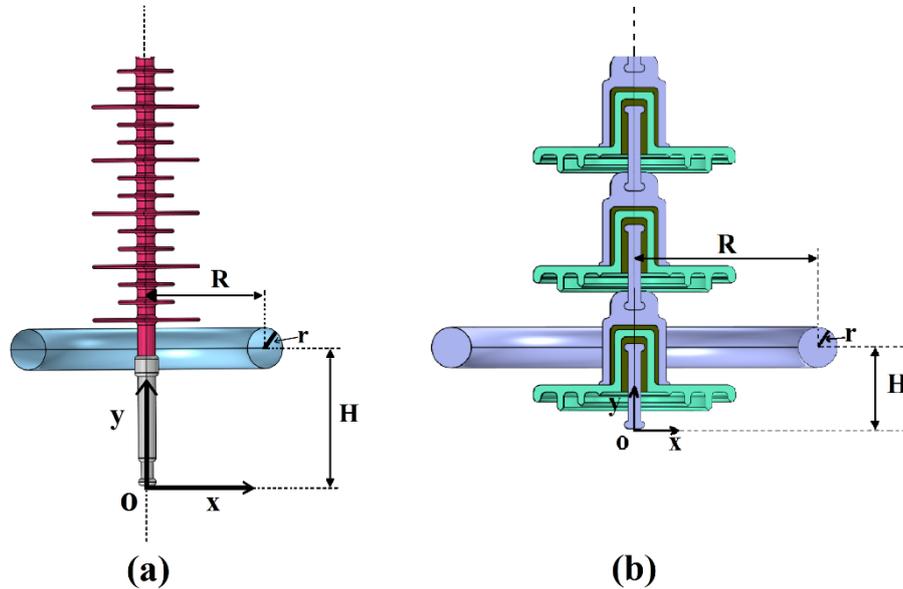


Figure IV. 15 Position de l'anneau de garde sur le système de coordonnées (a) isolateur composite [95] (b) chaîne d'isolateurs en verre [96].

Les méthodes COBYLA, CS et NM sont largement reconnues dans le domaine de l'optimisation de la conception géométrique [91, 93, 94]. C'est pourquoi, nous les avons adoptées pour être utilisées dans notre étude afin de déterminer leur efficacité dans l'obtention de la solution optimale pour l'anneau de garde. Ci-dessous, une brève explication de chacune de ces méthodes :

IV.4.2.1 Méthode d'optimisation sous contraintes par approximation linéaire COBYLA (Constrained Optimization by Linear Approximations) :

L'optimisation sous contraintes par approximation linéaire (COBYLA) est un algorithme d'optimisation sans dérivation utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation avec des contraintes sur les fonctions objectifs. L'algorithme vise à minimiser la fonction objectif tout en respectant les contraintes imposées. En ajustant de manière itérative les mises à jour des solutions pour générer une nouvelle solution à partir de la solution actuelle, il progresse vers la solution optimale. Une description complète de l'algorithme peut être trouvée dans [97], et une brève description est donnée ci-après :

- **Étape 1 : Initialisation**

Définir le nombre maximum d'itérations

Définir la fonction objectif (IV.1) et les contraintes (IV.2)

(Les étapes suivantes sont répétées jusqu'à convergence ou jusqu'à atteindre le nombre maximum d'itérations)

- **Étape 2 : Construction de l'approximation**

Construire un modèle linéaire $c_i^k(x)$ des fonctions de contraintes (IV.2) pour résoudre le sous-problème suivant :

$$\min_{x \in R^n} f^k(x) \quad (\text{IV.4})$$

soumis à :

$$c_i^k(x) \leq 0 \quad (\text{IV.5})$$

$$\|x^k - x\| \leq \Delta^k \quad (\text{IV.6})$$

Générer un ensemble de points à l'intérieur de la région de confiance Δ dans (IV.6). Créer un chemin linéaire de x^k vers la solution en partant de zéro jusqu'à Δ^k , .

- **Étape 3 : Mettre à jour la région de confiance**

Mettre à jour le chemin de la région de confiance en ajustant les ensembles actifs des contraintes linéaires (IV.5) en fonction de l'accord entre les approximations et les évaluations.

- **Étape 4 : Vérification de la convergence**

Terminer l'algorithme si l'amélioration de la fonction objectif est atteinte et que les contraintes sont satisfaites, ou lorsque le nombre maximum d'itérations est atteint.

IV.4.2.2 Méthode de recherche par coordonnées CS (Coordinate Search) :

La recherche par coordonnées est un algorithme d'optimisation itératif conçu pour explorer la région faisable de l'espace des paramètres d'un problème afin de trouver la solution optimale. L'algorithme CS est détaillé dans [92], et une description concise de cet algorithme est fournie ci-dessous :

- **Étape 1 : Initialisation**

Définir un point x_0 de la solution initiale dans l'espace des paramètres et un nombre maximum d'itérations.

Calculer la valeur de la fonction objectif au point x_0 de solution initiale, $f(x_0)$.

(Les étapes suivantes sont répétées jusqu'à la convergence ou jusqu'à atteindre le nombre maximum d'itérations)

- **Étape 2 : Mise à jour des coordonnées**

Mettre à jour la valeur de la coordonnée en recherchant le long de la direction de la coordonnée. Évaluer la fonction objectif au point de la solution mis à jour.

- **Étape 3 : Mise à jour de la taille du pas**

Mettre à jour la taille du pas en fonction de l'amélioration de la fonction objectif, en utilisant par exemple le contrôle de la taille du pas adaptatif ou la réduction de la taille du pas fixe.

- **Étape 4 : Critères d'arrêt**

Arrêter le calcul lorsqu'un nombre maximum d'itérations est atteint ou lorsqu'un niveau de convergence souhaité est atteint.

IV.4.2.3 Méthode de Nelder-Mead NM (Nelder-Mead) :

La méthode de Nelder-Mead est un algorithme d'optimisation sans dérivation qui ajuste de manière itérative un simplexe pour converger vers l'optimum. Elle utilise des opérations de réflexion, d'expansion, de contraction et de réduction pour explorer l'espace de recherche. L'algorithme est résumé ci-après, et de plus amples détails peuvent être trouvés dans [98] :

- **Étape 1 : Initialisation**

Sélectionner un simplexe initial Y formé par un ensemble de points.

$$Y = [y^0, y^1, \dots, y^n] \quad (\text{IV.7})$$

Définir un nombre maximum d'itérations.

- **Étape 2 : Tri**

Évaluer la fonction objectif à chaque point du simplexe (IV.7) et classer les points du meilleur au pire en fonction des valeurs de la fonction.

- **Étape 3 : Transformation**

Calculer le nouveau simplexe à partir de l'actuel en remplaçant le pire sommet par un meilleur point. Si le nouveau point est meilleur que le deuxième pire point mais moins bon que le meilleur point, remplacer le pire point par le nouveau.

Effectuer des opérations de réflexion, d'expansion, de contraction ou de réduction en fonction de la performance du nouveau point par rapport aux autres points du simplexe.

Répéter l'étape de transformation jusqu'à la convergence ou jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint.

- **Étape 4 : Arrêt**

Arrêter l'algorithme si une amélioration de la fonction objectif est obtenue et que les contraintes sont satisfaites, ou si le nombre maximum d'itérations est atteint.

Par définition, un simplexe est un ensemble de $n + 1$ points qui forme un objet géométrique le plus simple dans un espace n -dimensionnel, par exemple, un triangle dans un espace à deux dimensions. La réflexion consiste à remplacer le point le plus éloigné du centre de gravité des autres points par son symétrique par rapport au centre de gravité. L'expansion est de déplacer le point réfléchi vers le centre de gravité. La contraction est de déplacer le point réfléchi vers le centre de gravité, mais à un taux plus faible. La réduction est de remplacer le point le plus éloigné du centre de gravité par le centre de gravité.

IV.4.3. Stratégie d'optimisation

Nous exposons, dans cette section, la stratégie globale d'optimisation mise en œuvre dans cette étude. Notre approche systématique consiste à utiliser les algorithmes d'optimisation sélectionnés pour obtenir la meilleure solution.

Tout d'abord, les algorithmes d'optimisation mentionnés précédemment sont utilisés pour déterminer la méthode efficace permettant de minimiser au maximum le champ électrique à la surface de l'isolateur en optimisant les paramètres de l'anneau de garde, à savoir le rayon de l'anneau de garde (R), la hauteur de l'anneau de garde (H), et le rayon du tube de l'anneau

(r). Ces paramètres sont ajustés selon le repère illustré sur la figure IV.15. Il est important de tenir en compte que l'augmentation du rayon de tube (r) peut conduire à une répartition plus uniforme du champ électrique et à une réduction de son intensité à la surface de l'isolateur, en maintenant les valeurs optimales de (R) et (H) [47]. Néanmoins, l'augmentation du rayon du tube de l'anneau entraîne également une augmentation du poids de l'isolateur, ce qui pourrait potentiellement entraîner des coûts supplémentaires et des contraintes mécaniques relativement élevées [64]-[65].

Afin de pallier la limitation liée au poids, nous explorons la technique d'optimisation suivante, basée sur la ré-optimisation de la forme de l'anneau de garde. Pour ce faire, nous utilisons une technique de ré-optimisation de forme qui implique la modification de la forme externe de l'anneau de garde. Cette technique consiste à définir huit points libres (P_i ; $i = 1, 2, \dots, 8$) pour créer une courbe polynomiale fermée. Chaque point (P_i) est repositionné indépendamment en utilisant la méthode d'optimisation appropriée dans sa zone désignée (Z_i), délimitée dans une zone globale de 200 x 200 mm, comme illustré sur la figure IV.16. Cela permet ensuite d'obtenir une nouvelle géométrie d'anneau de garde.

Malgré l'élargissement inévitable de l'anneau de garde résultant après la ré-optimisation de sa forme (en raison de la grande zone dans laquelle l'anneau est confiné), cette approche offrira un avantage distinct pour identifier les zones critiques de la surface de l'anneau où des déformations importantes se produisent. Ces régions critiques sont directement liées à l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite.

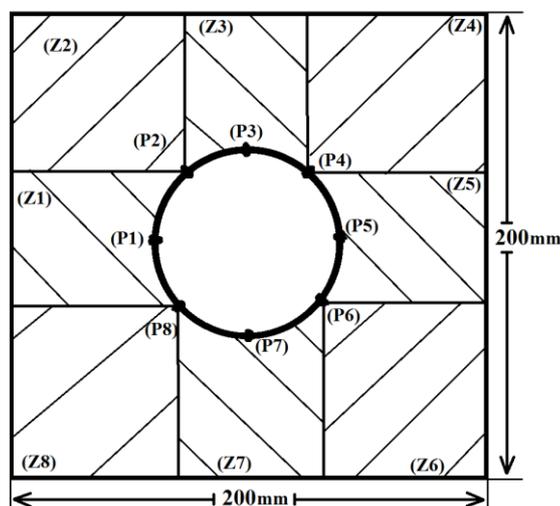


Figure IV. 16 Forme polynomiale fermée avec huit points remplaçant l'anneau de garde dans la zone désignée [95].

Finalement, nous adoptons une approche alternative visant à réduire plus efficacement le poids tout en minimisant au maximum le champ électrique. Cette approche consiste à remplacer la nouvelle forme par des anneaux de garde multiples, chacun avec un rayon de tube plus petit, positionnés dans les zones critiques. Ensuite, nous optimisons les positions de ces

anneaux de garde multiples en utilisant la méthode d'optimisation appropriée pour ajuster la position de chaque anneau dans un espace de 20 x 20 mm.

L'évaluation de l'impact de l'optimisation sur les structures optimisées en termes de poids est inévitable pour évaluer l'efficacité de cette étude en matière de réduction de poids. Une analyse comparative des poids de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde et des structures d'anneaux de garde multiples par rapport à l'anneau de garde standard est effectuée. Les poids sont exprimés en grammes (g). Ils sont obtenus en multipliant les volumes par la densité de l'alliage d'aluminium. Dans ce calcul, une épaisseur de paroi de 2 mm est prise en compte pour le tube de l'anneau de garde, une valeur courante pour les anneaux de garde fabriqués en alliage d'aluminium (AA) 6063A [99], réputé pour sa densité de 2,69 g/cm³. Les volumes sont déterminés directement à l'aide des outils de mesure géométrique disponibles dans l'environnement COMSOL.

Pour rendre les résultats de la partie suivante plus faciles à comprendre, nous avons appliqué l'optimisation de l'anneau de garde à un seul côté, à savoir le côté HT. D'autre part, pour des raisons de simplification, la représentation de la distribution du champ électrique à la surface de l'isolateur est effectuée le long de la moitié de la ligne de fuite de l'isolateur à partir du côté HT.

IV.5. Optimisation de l'anneau de garde pour l'isolateur composite de la ligne 400 kV [95]

La détérioration du matériau composite de l'isolateur réduit généralement sa durée de vie, principalement en raison des décharges partielles qui apparaissent à sa surface, provoquées par le champ électrique relativement élevé. Dans cette section, des efforts visant à minimiser le champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur composite de la ligne 400 kV sont entrepris.

IV.5.1. Optimisation de la hauteur et du rayon de l'anneau de garde et du rayon du tube

Nous avons appliqué les trois méthodes d'optimisation susmentionnées, à savoir COBYLA, CS et NM, pour optimiser la position de l'anneau de garde, c'est-à-dire la position horizontale (R) et verticale (H), ainsi que le rayon du tube (r). Les valeurs initiales consistent en R = 200 mm, H = 200 mm et r = 15 mm, où R varie le long de l'axe horizontal (ox) dans la plage de 150 à 500 mm, H varie le long de l'axe vertical (oy) dans la plage de 150 à 500 mm, et r varie entre 10 et 30 mm. Cette démarche nous a permis d'obtenir une configuration optimale, réduisant efficacement l'intensité maximale du champ électrique le long de la ligne de fuite. La figure IV.17 illustre la convergence des solutions obtenues par les trois méthodes suscitées. Les solutions ainsi trouvées sont relativement proches, suggérant qu'elles convergent vers des points similaires. Cependant, nous remarquons que la méthode COBYLA présente une convergence rapide par rapport aux autres méthodes.

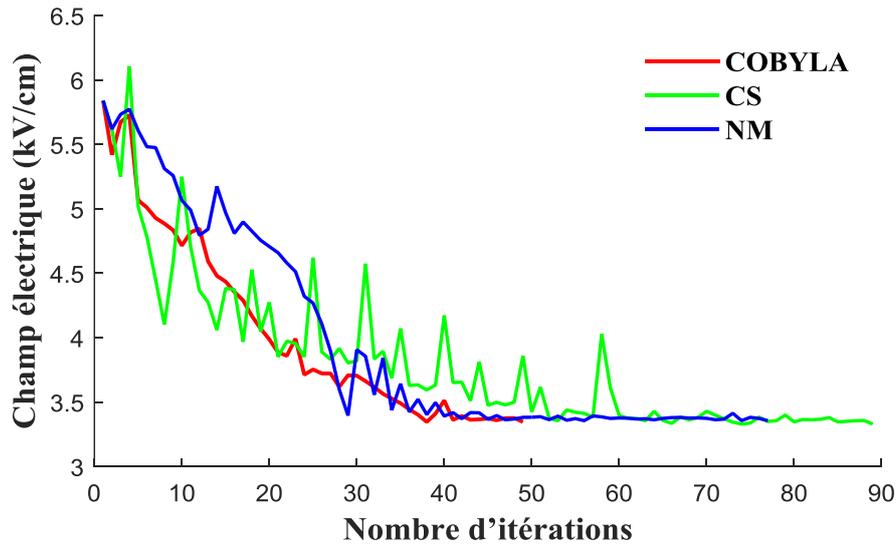


Figure IV. 17 Convergence des trois méthodes d'optimisation utilisées.

Le tableau IV.2 présente les valeurs maximales du champ électrique le long de la ligne de fuite obtenues à l'aide des trois méthodes d'optimisation, à savoir COBYLA, CS et NM. Ces méthodes donnent respectivement des valeurs approximatives de 3,35, 3,33 et 3,37 kV/cm. Il est à noter que le rayon du tube optimisé, r , converge vers une valeur stable de 30 mm. De plus, le positionnement de l'anneau de garde (R et H) démontre une configuration équilibrée autour de points très proches. Les résultats du champ électrique maximal restent constamment inférieurs au niveau de seuil recommandé [90] de 4,2 kV/cm, ce qui satisfait pleinement les critères essentiels en ingénierie et atténue efficacement le risque de décharges électriques. La méthode COBYLA se distingue par sa convergence rapide, ne nécessitant que 49 itérations pour atteindre la solution optimale par rapport aux autres méthodes.

Tableau IV.2. Paramètres de l'anneau de garde optimisés pour les différentes méthodes d'optimisation.

	r (mm)	R (mm)	H (mm)	Champ électrique (V/m)	Nombre d'itérations
COBYLA	30	274,5	259,6	334630	49
CS	30	281,0	249,9	332980	89
NM	30	271,2	263,5	335630	77

La distribution du champ électrique pour l'isolateur composite en présence de l'anneau de garde optimisé est illustrée sur la figure IV.18, présentant des représentations de l'intensité du champ électrique en 2D et en 3D. Les visualisations révèlent des intensités du champ électrique plus élevées dans l'air entourant les composants métalliques, notamment l'anneau de garde et l'extrémité sous tension (Figure IV.18(a)), ainsi que sur leurs surfaces (Figure IV.18(b)). Nous observons que sur la surface de l'anneau de garde, la courbure externe, en

particulier le long de la direction horizontale (coordonnée ox), présente le niveau d'intensité du champ électrique le plus élevé.

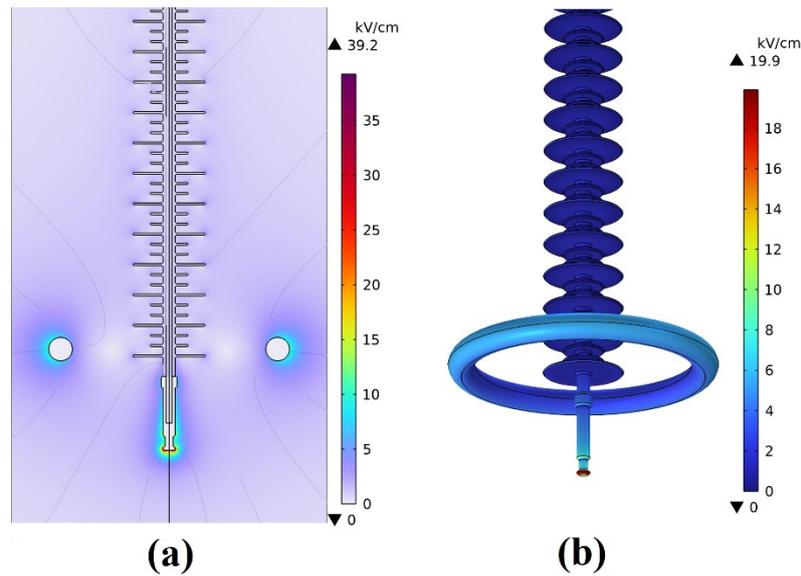


Figure IV. 18 Distribution du champ électrique pour l'isolateur composite en présence de l'anneau de garde optimisé (a) Représentation 2D (b) Représentation 3D.

La figure IV.19 illustre la distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur composite, à la fois avec et sans la présence de l'anneau de garde optimisé. Comme le montre la figure, la distribution du champ électrique à la surface de l'isolateur sans anneau de garde est très non-uniforme, présentant une intensité élevée près de l'extrémité sous tension. Cependant, avec la présence de l'anneau de garde optimisé, le champ électrique subit un ajustement systématique et est redistribué le long de la ligne de fuite. Cela résulte en une distribution plus uniforme, accompagnée d'une réduction du champ électrique maximal. Sans un anneau de garde, le champ électrique maximal atteint 13,79 kV/cm ; en ajoutant un anneau de garde, il est réduit de 75,71 % pour atteindre une valeur de 3,35 kV/cm. Bien que cette dernière soit inférieure à seuil de 4,2 kVcm, nous avons cherché comme même à améliorer davantage les performances de l'isolateur. Pour ce faire, nous avons mené des recherches supplémentaires axées sur l'augmentation de la taille de l'anneau de garde optimisé, tout en maintenant la même position optimisée ($R = 274,5$ mm, et $H = 259,6$ mm). Le rayon du tube a été varié de 10 à 100 mm. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure IV.20, montrant que le champ électrique le long de la ligne de fuite diminue à mesure que le rayon du tube (r) augmente. L'agrandissement du tube de l'anneau de garde nécessite une considération minutieuse de son volume associé, car il affecte directement le poids et le coût du matériau. Ces aspects doivent être maîtrisés pour garantir la faisabilité globale et la praticabilité de l'anneau de garde. Ainsi, les parties suivantes sont dédiées à la prise en compte de ces considérations et à l'amélioration de la conception de l'anneau de garde.

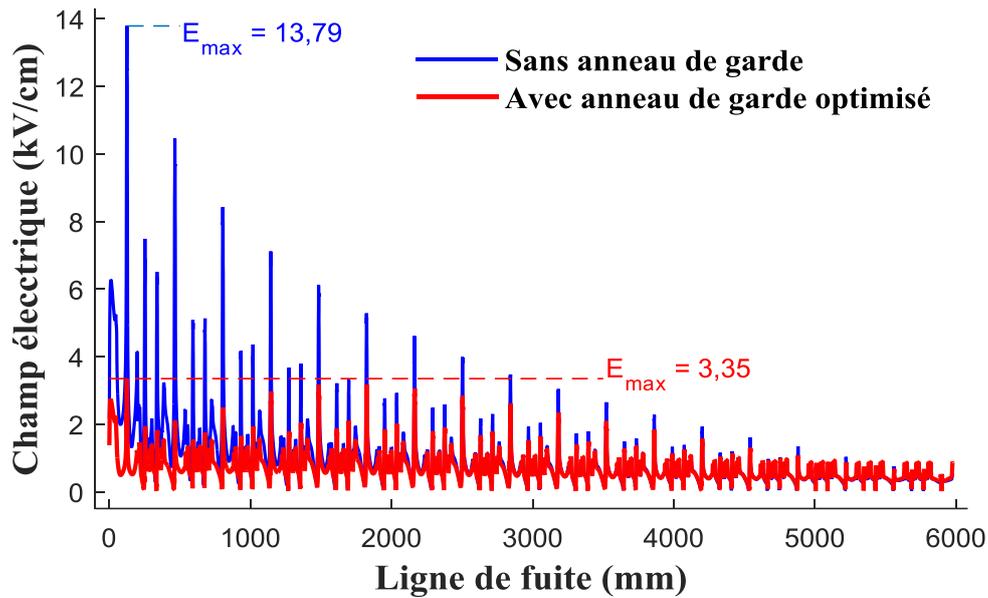


Figure IV. 19 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite avec et sans l'anneau de garde optimisé.

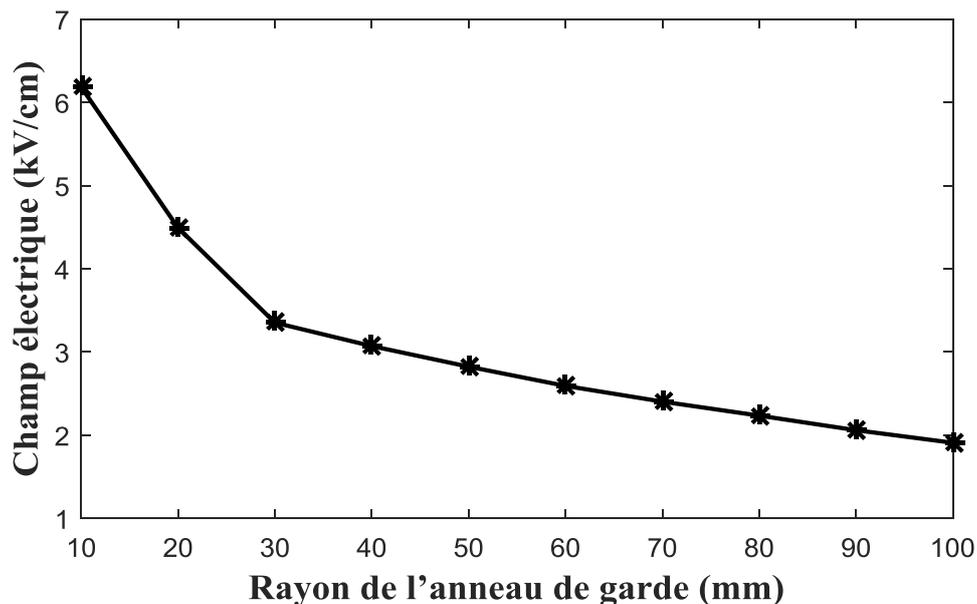


Figure IV. 20 Variation du champ électrique maximal le long de la ligne de fuite en fonction du rayon de l'anneau de garde.

IV.5.2. Ré-optimisation de la forme de l'anneau de garde

Afin d'éviter l'utilisation des trois méthodes d'optimisation et compte tenu du nombre considérable de points à optimiser, nous avons opté pour la méthode COBYLA. Cette dernière nécessite moins d'itérations par rapport aux autres méthodes, tout en fournissant des résultats favorables en termes de réduction du champ électrique le long de la surface de l'isolateur.

Nous avons appliqué simultanément la méthode COBYLA aux huit points ($P_i ; i = 1, 2, \dots, 8$) qui forment la courbe polynomiale fermée remplaçant le tube de l'anneau de garde. Les

résultats en 2D et en 3D de la ré-optimisation de la forme sont présentés sur la figure IV.21. À partir de cette figure, la simulation génère une nouvelle forme dans laquelle un arc circulaire allongé est formé dans la direction positive entre les axes horizontal et vertical. Deux points s'étendent également séparément dans des directions opposées le long des axes horizontal et vertical, respectivement. Dans ce scénario, une intensité de champ électrique plus élevée est observée dans l'air entourant les composants métalliques, y compris la forme ré-optimisée de l'anneau et l'extrémité sous tension (Figure IV.21(a)), ainsi que sur leurs surfaces, comme le montre la figure IV.21(b).

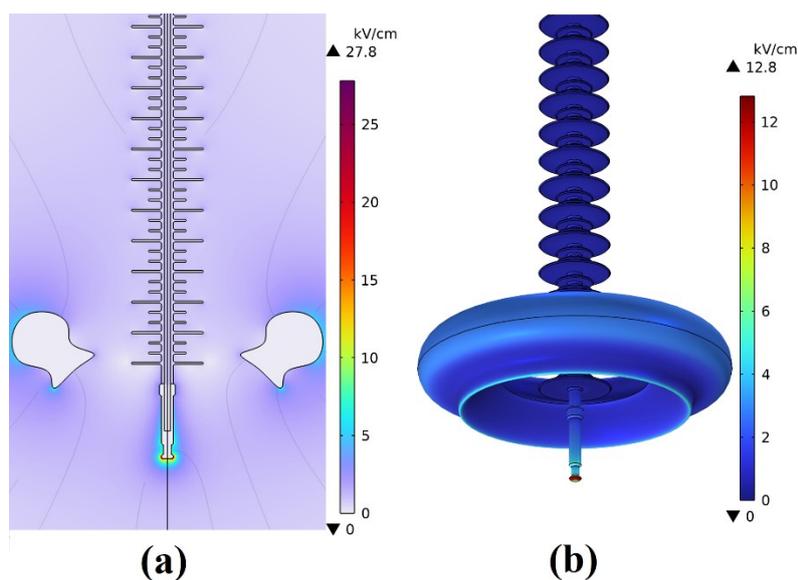


Figure IV. 21 Distribution du champ électrique pour l'isolateur composite en présence de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde (a) représentation 2D (b) représentation 3D.

La distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite en présence à la fois de l'anneau de garde optimisé et de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde est illustrée à la figure IV.22. Nous remarquons que la distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite en présence de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde présente une réduction significative du champ électrique par rapport à celui obtenu lors de l'utilisation de l'anneau de garde optimisé. Cette nouvelle forme conduit à une répartition plus uniforme du champ électrique sur la surface de l'isolateur, accompagnée d'une diminution de l'intensité maximale du champ électrique. Cette dernière est réduite de 50,45%, atteignant une valeur de 1,66 kV/cm en présence de la forme ré-optimisée, contre 3,35 kV/cm obtenue avec l'anneau de garde optimisé.

Bien que la ré-optimisation de la forme de l'anneau de garde réduise efficacement le champ électrique maximal, il est important de souligner que les points optimisés subissent une extension significative. Les nouvelles positions de ces points, désignées sous le nom de P_i , sont présentées dans le tableau IV.3. Cette extension entraîne inévitablement une augmentation du volume de la nouvelle forme. En conséquence, le poids mesuré de l'anneau de garde optimisé est de 1680 g, tandis que pour la forme ré-optimisée, il atteint 4660 g, représentant une

augmentation de poids de 177,38%. Cependant, l'efficacité de cette approche de la ré-optimisation ne se limite pas à la réduction de l'intensité du champ électrique. Elle réside également dans l'identification des zones critiques où le tube de l'anneau de garde subit une forte déformation, étroitement liée au champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur. Par conséquent, la partie suivante explique comment bénéficier de cet avantage pour réduire simultanément le champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur et le poids de l'anneau de garde.

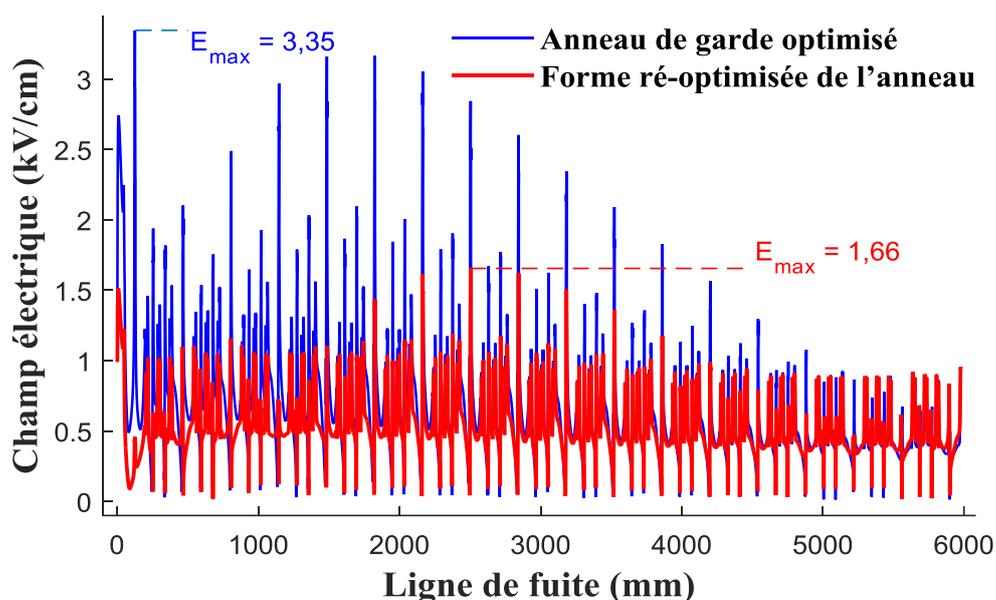


Figure IV. 22 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite en présence de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde et de l'anneau de garde optimisé.

Tableau IV.3. Positions optimisées des points P_i

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P7
x (mm)	185	244,5	250	365	370	295	290	229
y (mm)	265	295,5	335	360	245	210	185	230

IV.5.3. Optimisation par l'intégration d'anneaux de garde multiples remplaçant la forme ré-optimisée de l'anneau de garde

Afin de minimiser à la fois le champ électrique le long de la ligne de fuite et le poids de l'anneau de garde, une approche est adoptée en se basant sur les résultats obtenus à partir de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde. Nous avons constaté que certains points spécifiques (P1, P3, P4, P5 et P7) subissent des déplacements significatifs, comme le montre la figure IV.23(a). Ces points jouent un rôle crucial dans la remise en forme de l'anneau de garde et dans la réalisation de la nouvelle forme ré-optimisée, comme le montre la figure IV.23(b). Cela, à son tour, a grandement contribué à la minimisation du champ électrique à la surface de l'isolateur. En conséquence, nous allons mettre en place des anneaux de garde multiples, ayant

de petits rayons de tube, à la place de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde, et nous optimisons également leurs positions. Ces anneaux de garde multiples, chacun ayant un rayon de tube de 5 mm, ont leurs centres positionnés précisément aux coordonnées des points susmentionnés (P1, P3, P4, P5 et P7), comme illustré sur la figure IV.23(c).

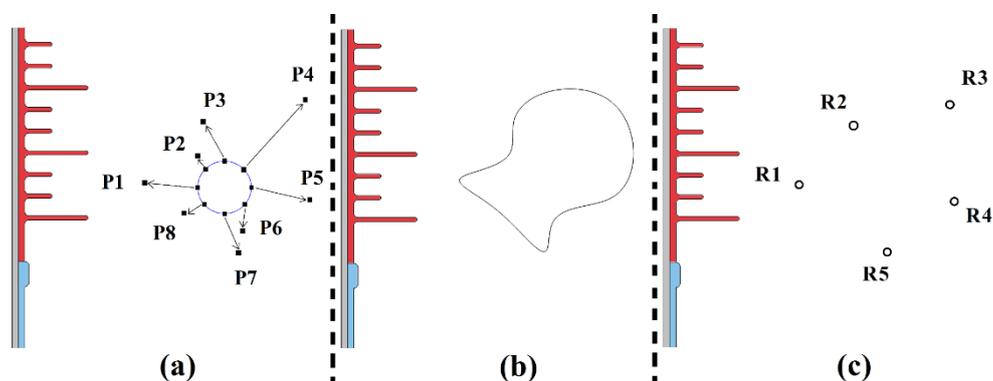


Figure IV. 23 Ré-optimisation de la forme de l'anneau de garde (a) les déplacements des points P_i , (b) la nouvelle forme ré-optimisée, (c) les anneaux de garde multiples [95].

Lors de l'intégration des anneaux de garde multiples, le champ électrique maximal le long de la ligne de fuite atteint une valeur de 2,10 kV/cm, marquant une réduction significative de 37,31 % par rapport à celui trouvé en employant l'anneau de garde optimisé. Pour améliorer davantage ce résultat, un processus d'optimisation est entrepris afin de repositionner les cinq anneaux de garde multiples. L'objectif de ce processus est de déplacer le centre de chaque anneau de garde à l'intérieur d'une région carrée définie par un côté de 20 mm (afin d'éviter un espacement excessif entre les anneaux de garde multiples). Ce processus a permis à réduire davantage le champ électrique en surface, atteignant ainsi une valeur de 1,89 kV/cm. Les nouvelles coordonnées des centres des anneaux de garde multiples sont présentées dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4. Positions optimisées du centre des tubes des anneaux de garde multiples

	R1	R2	R3	R4	R5
x (mm)	188,3	251,5	375,1	376,6	296
y (mm)	267,3	337,4	363,7	249,7	187,3

L'intensité du champ électrique la plus élevée est observée dans l'air entourant les composants métalliques, encerclant tous les anneaux de garde multiples et l'extrémité sous tension (Figure IV.24(a)), ainsi que sur leurs surfaces, comme illustré sur la figure IV.24(b).

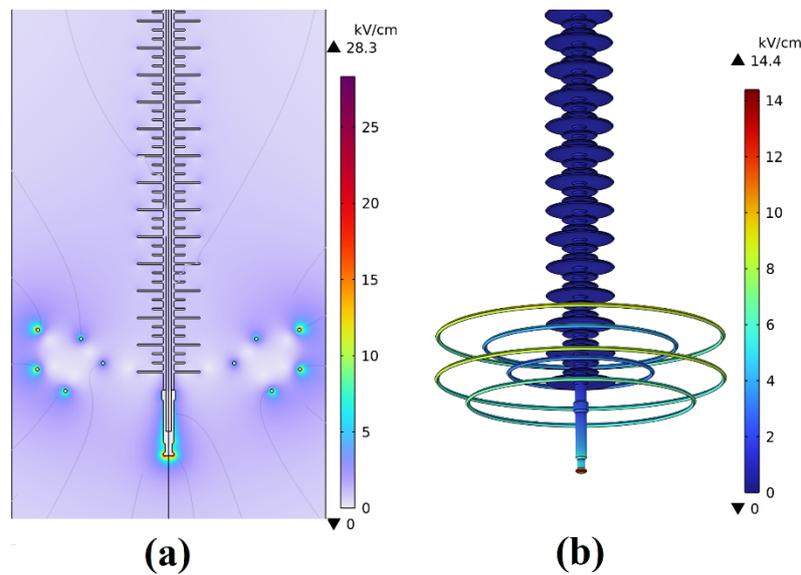


Figure IV. 24 Distribution du champ électrique pour l'isolateur composite en présence des anneaux de garde multiples optimisés (a) représentation 2D (b) représentation 3D.

La figure IV.25 présente la distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour l'anneau de garde optimisé et la configuration avec les anneaux de garde multiples. Comme le montre clairement cette figure, la distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour les positions optimisées des anneaux de garde multiples présente une réduction considérable du champ électrique maximal par rapport à celui obtenu en utilisant l'anneau de garde optimisé. Il est à noter que la distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour les anneaux de garde multiples semble plus uniforme. De plus, nous observons une réduction notable du champ électrique maximal par rapport à l'anneau de garde optimisé, avec un taux de réduction de 43,58 %, atteignant une valeur maximale de 1,89 kV/cm.

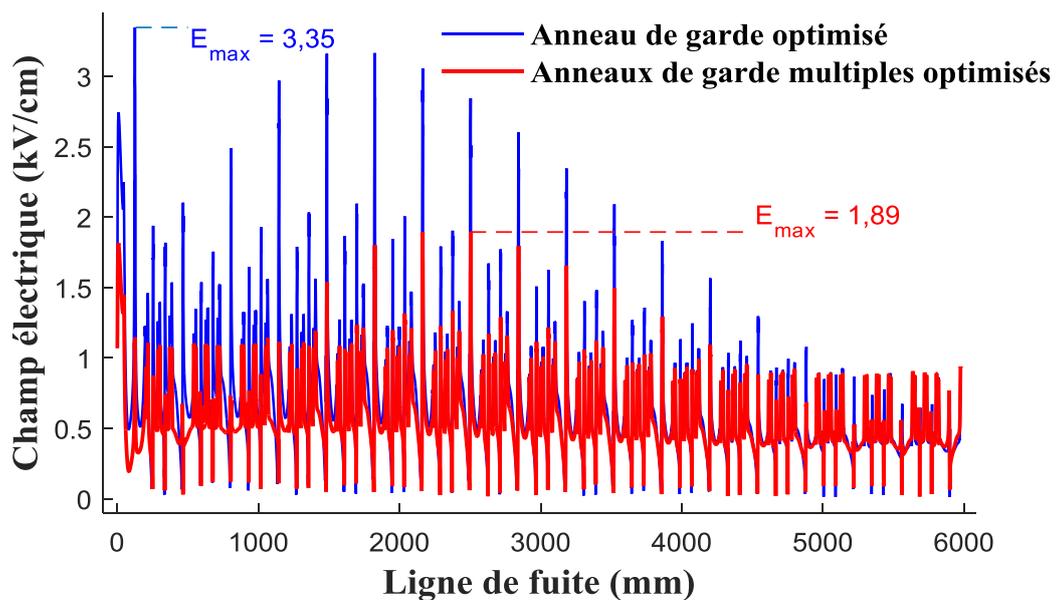


Figure IV. 25 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite en présence des anneaux de garde multiples optimisés et de l'anneau de garde optimisé.

Tout comme sur la surface de l'isolateur, le champ électrique doit être maintenu à des niveaux acceptables sur les surfaces des extrémités métalliques de l'ensemble du système d'isolation. L'intensité maximale du champ électrique est observée à la surface de l'anneau de garde (R3), atteignant une valeur de 9,65 kV/cm. Cette valeur demeure largement inférieure du seuil recommandé de 21 kV/cm des décharges électriques. Cette valeur est souvent utilisée comme référence pour les surfaces des anneaux de garde et des raccords d'extrémité métalliques [53]. Cela permet pratiquement de prévenir les décharges partielles et de minimiser les interférences électromagnétiques indésirables dues à l'effet couronne.

Cette approche vise à remplacer les zones les plus déformées de la forme ré-optimisée par des anneaux de garde multiples, contribuant ainsi à réduire non seulement le champ électrique le long de la ligne de fuite, mais également le poids total de l'intégralité de l'anneau de garde. En effet, le poids mesuré de l'ensemble des anneaux de garde multiples atteint désormais seulement 1250 kg, représentant une réduction globale de 25,59% du poids de l'anneau de garde.

IV.5.4. Étude et analyse de l'influence d'une couche de pollution uniforme en présence de l'anneau de garde optimisé, de sa forme ré-optimisée et des anneaux de garde multiples optimisés

D'un point de vue général, le champ électrique en surface de l'isolateur, doit être minimisé non seulement dans des conditions de surface propre, mais également en présence de pollution. Par exemple, en cas de présence d'une couche de pollution uniforme, des régions caractérisées par des champs électriques localement intenses génèrent une dissipation significative de puissance, entraînant l'évaporation de l'eau et la formation de bandes sèches. Cela crée des conditions favorables à l'apparition d'arcs électriques, susceptibles de provoquer le vieillissement prématuré et l'érosion des matériaux d'isolation constituant les isolateurs eux-mêmes [100].

Pour cette raison, nous avons mené une étude en considérant une couche de pollution uniforme supposée saturée d'eau, d'une épaisseur de 1 mm, avec une permittivité relative de 80 et une conductivité électrique de $\sigma = 6 \times 10^{-7}$ (S/m) [30]. La figure IV.26 présente les résultats du champ électrique le long de la surface de l'isolateur pollué pour l'anneau de garde optimisé, la forme ré-optimisée de l'anneau de garde, et les anneaux de garde multiples. La figure illustre une réduction remarquable du champ électrique maximal de 56,4% pour la forme ré-optimisée et de 48,29% pour les anneaux de garde multiples, par rapport à celui obtenu lors de l'utilisation de l'anneau de garde optimisé. Cela démontre l'efficacité des améliorations que nous avons apportées à l'anneau de garde dans cette étude, tant dans des conditions de surface propre que pour le cas pollué.

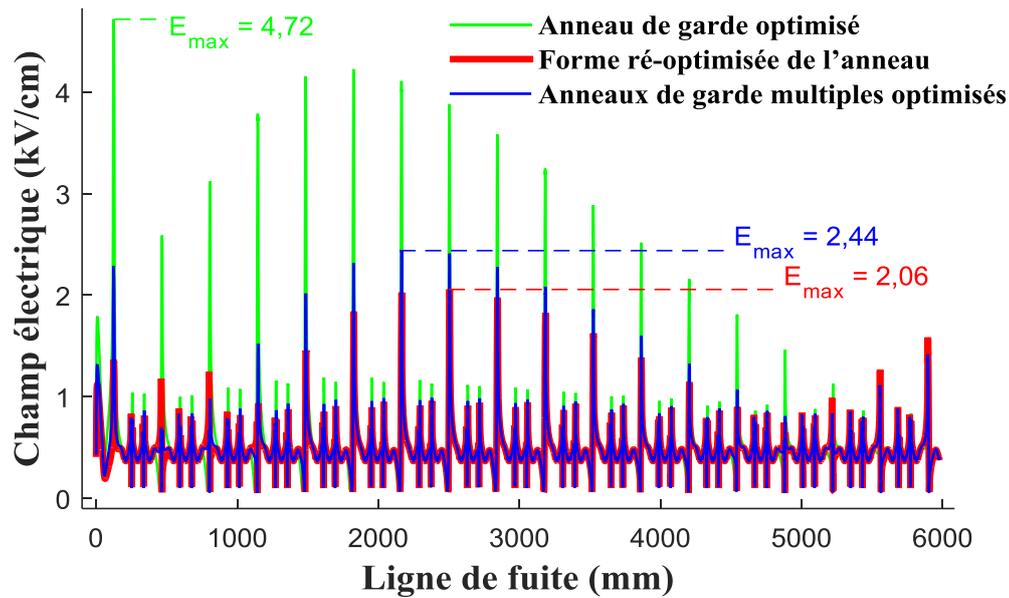


Figure IV. 26 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite en présence de l'anneau de garde optimisé, de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde et des anneaux de garde multiples optimisés sous condition de pollution.

IV.6. Optimisation de l'anneau de garde pour la chaîne d'isolateurs en verre de type 1512L de la ligne 400 kV [96]

L'accumulation de polluants, quelle que soit leur nature, résulte généralement du transport par le vent et de leur dépôt sur la surface des isolateurs. Lorsqu'ils sont humidifiés, que ce soit par la pluie, la rosée, le brouillard, etc., ces polluants peuvent former un film conducteur continu à la surface des isolateurs, permettant ainsi à un courant de fuite de se dissiper à travers ce film. En raison de l'effet Joule, ce courant peut créer des zones sèches à la surface, où des intensités de champ électrique élevées peuvent être localisées.

L'application de couches de revêtement en silicone (RTV) sur la surface des isolateurs confère à celle-ci un caractère hydrophobe. Cela empêche la formation d'un film conducteur en repoussant l'eau et transformant simultanément l'eau en gouttelettes, prévenant ainsi l'humidification des polluants solides. Ce processus peut contribuer à limiter les courants de fuite et à prévenir la formation d'arcs électriques. Cependant, ces couches sont sensibles aux intensités de champ relativement élevées. Par conséquent, la réduction de l'intensité du champ électrique est d'une importance décisive, que la couche soit présente ou non, pour garantir le bon fonctionnement de la ligne haute tension.

Cette section est consacrée à l'atténuation du champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs en verre de la ligne 400 kV, en appliquant une optimisation à la conception de l'anneau de garde.

IV.6.1. Optimisation de la hauteur et du rayon de l'anneau de garde et du rayon du tube

Nous avons également appliqué les trois méthodes COBYLA, CS et NM, pour optimiser les dimensions de l'anneau de garde le long de la chaîne des isolateurs en verre, installée au niveau de la ligne 400 kV. Ces dimensions concernent la position horizontale (R) et verticale (H), ainsi que le rayon du tube (r). Les valeurs initiales considérées lors des optimisations sont $R = 200$ mm, $H = 100$ mm et $r = 15$ mm. R varie le long de l'axe horizontal (ox) dans la plage de 200 à 500 mm. H varie le long de l'axe vertical (oy) dans la plage de 100 à 500 mm. Finalement, r varie entre 10 et 30 mm.

La figure IV.27 illustre la convergence des méthodes utilisées vers les solutions donnant une configuration optimale de l'anneau de garde, et réduisant ainsi l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite. En fait, les trois méthodes convergent pratiquement vers la même valeur du champ électrique.

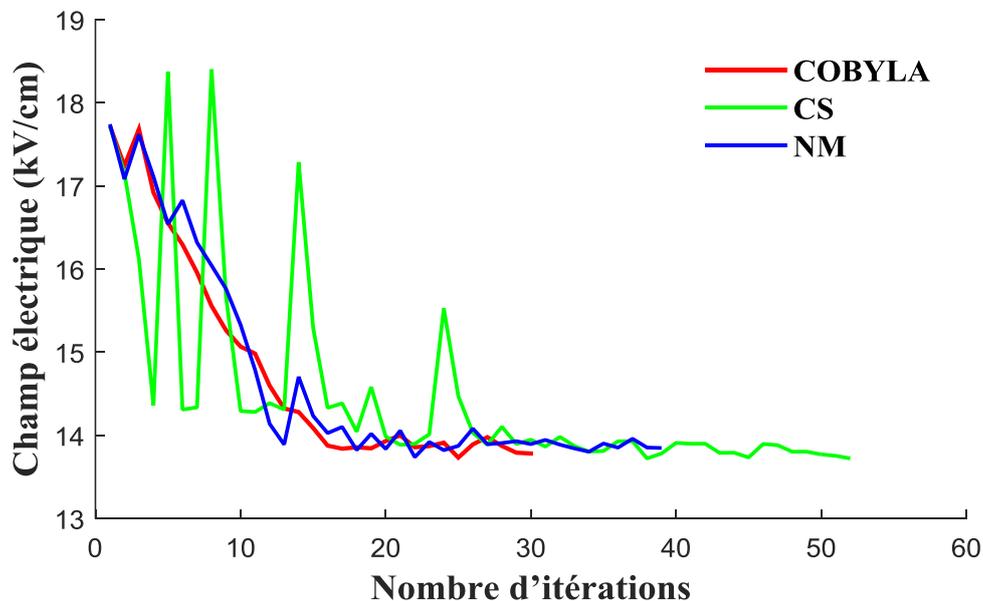


Figure IV. 27 Convergence des trois méthodes d'optimisation utilisées.

Le tableau IV.5 présente les paramètres optimaux de l'anneau de garde. Les valeurs obtenues du champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs en verre sont 13,78, 13,72 et 13,85 kV/cm, en utilisant les méthodes COBYLA, CS, et NM respectivement. Ces valeurs sont strictement inférieures au champ disruptif de 21 kV/cm [53], prévenant ainsi l'apparition de décharges électriques aux alentours des parties métalliques, voire même de contournement. La méthode COBYLA présente une convergence rapide par rapport aux autres méthodes, ne nécessitant que 30 itérations pour atteindre la solution optimale. Des constatations analogues ont faites lors de l'optimisation de l'anneau de garde de l'isolateur composite.

Tableau IV.5. Paramètres de l'anneau de garde optimisés pour les différentes méthodes d'optimisation.

	r (mm)	R(mm)	H(mm)	Champ électrique (V/m)	Nombre d'itérations
COBYLA	30	499,1	141,9	1378200	30
CS	30	498,4	154,5	1372300	52
NM	30	497	123,4	1384800	39

La figure IV.28 présente la distribution de l'intensité du champ électrique pour la chaîne d'isolateurs en verre en présence de l'anneau de garde optimisé. Nous observons que sur la surface de l'anneau de garde, la courbure externe, en particulier le long de la direction horizontale (coordonnée ox), présente le niveau d'intensité du champ électrique le plus élevé. Aussi, des intensités du champ électrique élevées sont observées aux alentours de l'anneau de garde et de l'extrémité sous tension (Figure IV.28(a)), ainsi que sur leurs surfaces (Figure IV.28(b)).

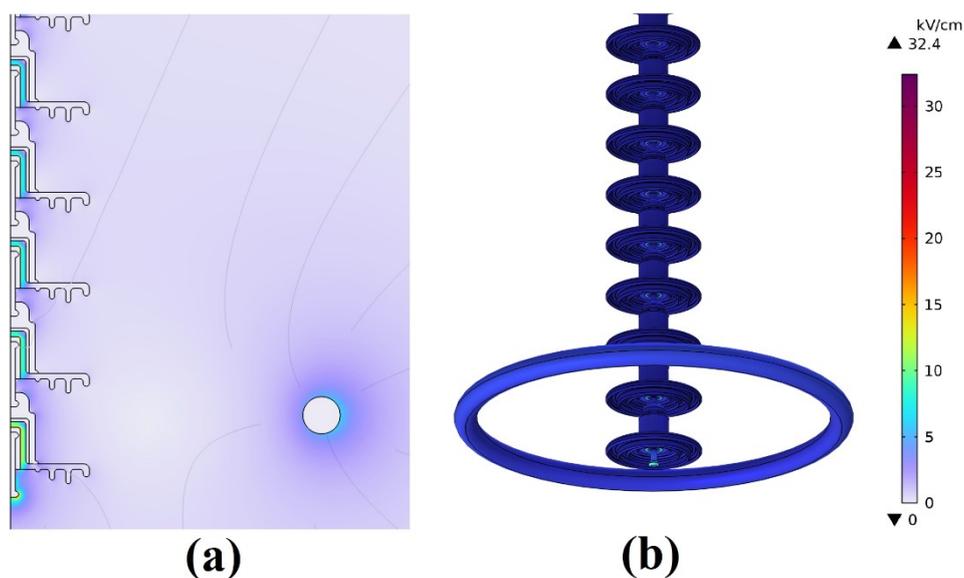


Figure IV. 28 Distribution du champ électrique pour la chaîne d'isolateurs en verre en présence de l'anneau de garde optimisé (a) Représentation 2D (b) Représentation 3D.

La distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs en verre, avec et sans la présence de l'anneau de garde optimisé est illustrée sur la figure IV.29. Nous remarquons qu'avec la présence de l'anneau de garde optimisé, la distribution du champ électrique à la surface de l'isolateur devient de plus en plus uniforme par rapport à celle en l'absence de l'anneau de garde. Par ailleurs, les intensités élevées près de l'extrémité haute tension, et des capots et tiges des isolateurs sont atténuées. Une réduction du champ électrique maximal a été constatée. En fait, sans anneau de garde nous avons enregistré une valeur de

43,49 kV/cm. Cette dernière a été réduite à 13,89 kV/cm, soit une diminution de 68,06%, en présence de l'anneau de garde optimisé.

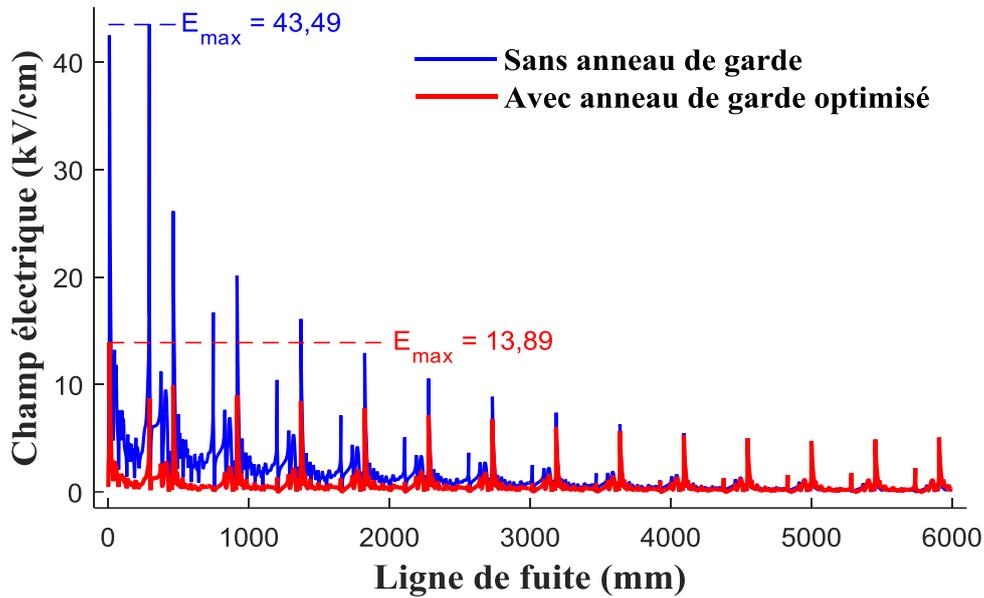


Figure IV. 29 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite avec et sans l'anneau de garde optimisé pour la chaîne d'isolateurs en verre.

Afin de réduire encore davantage le champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs en verre, une approche différente a été adoptée. Cette fois-ci, en élargissant le rayon du tube de l'anneau de garde optimisé de 10 à 100 mm, tout en maintenant leur position optimisée ($R = 499,1$ mm, $H = 141,9$ mm). Les résultats obtenus sont présentés sur la figure IV.30. Cette figure illustre que le champ électrique le long de la ligne de fuite diminue à mesure que le rayon du tube augmente.

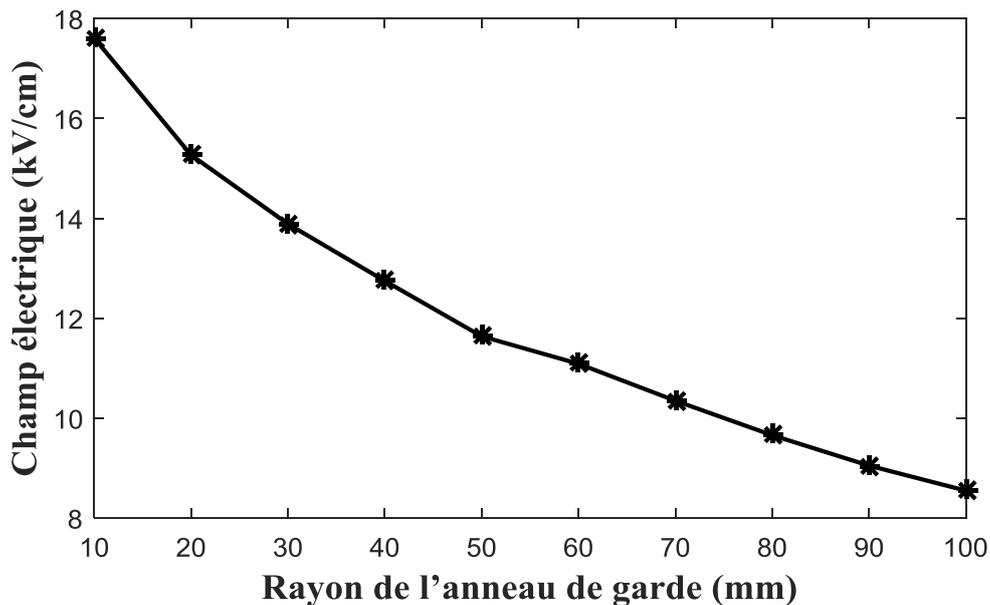


Figure IV. 30 Variation du champ électrique maximal le long de la ligne de fuite pour différents rayons de l'anneau de garde pour la chaîne d'isolateurs en verre.

L'augmentation significative du rayon de l'anneau entraîne également une augmentation de son poids, et donc de son coût. Ainsi, les sections suivantes seront consacrées à la minimisation du champ électrique à la surface de l'isolateur tout en réduisant le poids de l'anneau.

IV.6.2. Ré-optimisation de la forme de l'anneau de garde

Nous avons utilisé la méthode COBYLA pour la ré-optimisation de la forme de l'anneau de garde. Notre choix s'est porté sur cette méthode car elle conduit à une solution optimale avec moins d'itérations par rapport aux autres méthodes.

Tout d'abord, nous avons remplacé la forme du tube de l'anneau de garde par une courbe polynomiale fermée constituée de huit points ($P_i ; i = 1, 2, \dots, 8$). Ensuite, nous avons appliqué l'optimisation à ces points simultanément. Les résultats obtenus de la ré-optimisation sont présentés sur la figure IV.31. Nous observons sur la figure V.28(a) présentée en 2D, des intensités de champ électrique élevées dans l'air entourant les capots et tiges des isolateurs ainsi que sur la forme ré-optimisée de l'anneau, de même que sur les surfaces de ces derniers, comme présenté sur la figure IV.31(b).

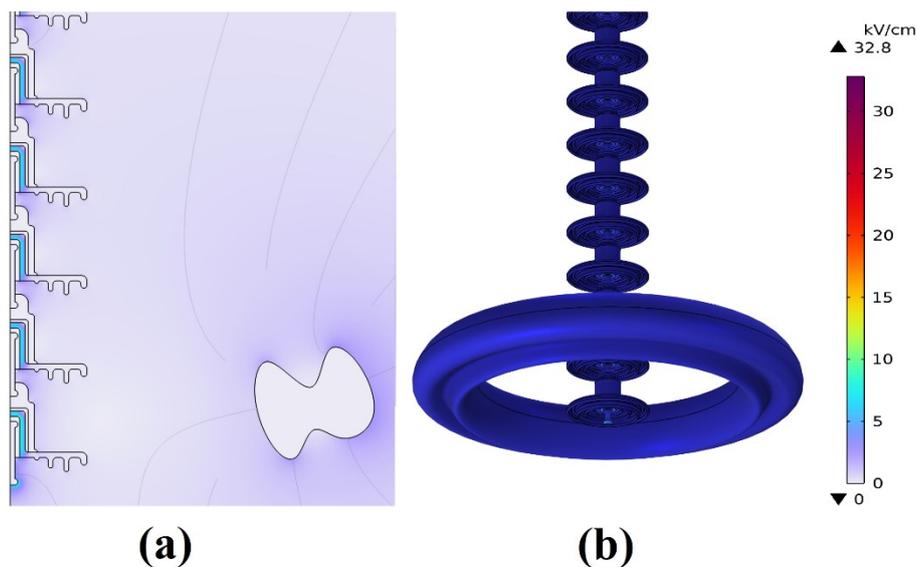


Figure IV. 31 Distribution du champ électrique pour la chaîne d'isolateurs en verre en présence de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde (a) représentation 2D (b) représentation 3D.

La distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite est présentée sur la figure IV.32 en présence de l'anneau de garde optimisé et avec la forme ré-optimisée de l'anneau de garde. Nous observons qu'avec la forme ré-optimisée de l'anneau de garde, la distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite est plus uniforme, ce qui entraîne une diminution de l'intensité maximale du champ électrique. Celle-ci est réduite de 13,89 kV/cm, obtenue avec l'anneau de garde optimisé, à 8,82 kV/cm en présence de la forme ré-optimisée, soit une réduction de 36,45 %.

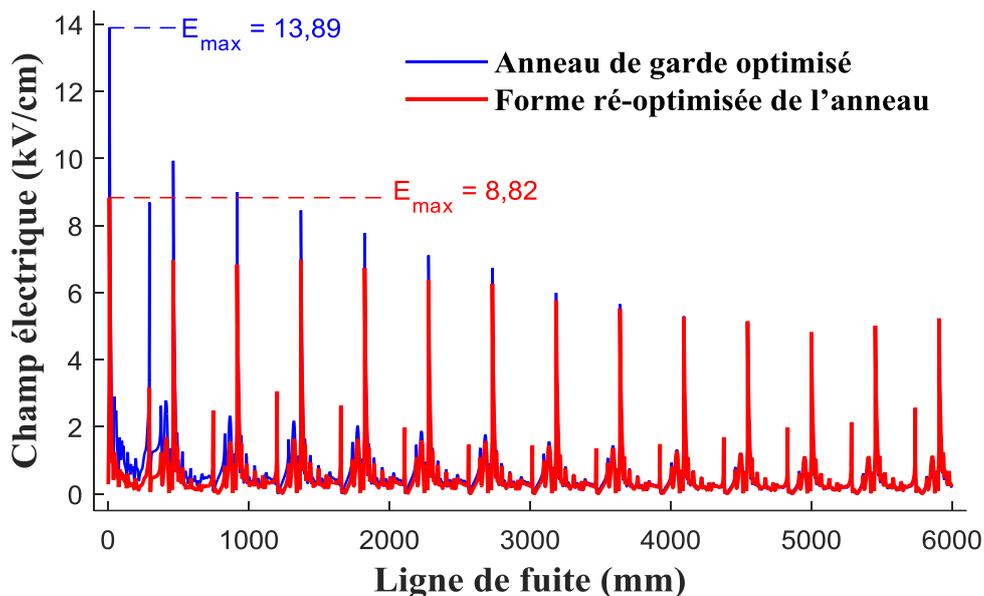


Figure IV. 32 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite en présence de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde et de l'anneau de garde optimisé pour la chaîne d'isolateurs en verre.

La ré-optimisation de la forme de l'anneau de garde permet une atténuation remarquable de la distribution du champ électrique. Cette nouvelle forme résulte de la transition des points (P1 à P8) vers de nouvelles positions dont les coordonnées sont données dans tableau IV.6), possède un volume plus important. Cependant, cette forme a entraîné ainsi une augmentation du poids de l'anneau de l'ordre de 152,29 %, se traduisant par des poids de 3060 g pour l'anneau de garde optimisé et de 7720 g pour celui de la forme ré-optimisée. Les zones déformées de la surface de l'anneau ré-optimisé sont attribuables aux effets du champ électrique en surface de l'isolateur.

Tableau IV.6. Positions optimisées des points P_i

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P7
x (mm)	405	425	499	528	600	544	503	475
y (mm)	139	203	162	223	114	78	91	45

La section suivante est consacrée à exploiter cet avantage afin de minimiser le champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur tout en réduisant le poids de l'anneau de garde.

IV.6.3. Optimisation par l'intégration d'anneaux de garde multiples remplaçant la forme ré-optimisée de l'anneau de garde

Les points (P1, P2, P4, P5 et P8) de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde subissent des transitions significatives (Figure V.33(a)). Ces points contribuent de manière importante à

non seulement dans l'atténuation du champ électrique à la surface de l'isolateur, mais également dans la formation de la nouvelle forme de l'anneau (Figure V.33(b)). Pour cette raison, nous avons remplacé la forme ré-optimisée par plusieurs anneaux de garde, chacun ayant un rayon de tube plus petit de 5 mm. Les centres de ces anneaux sont positionnés aux coordonnées des points susmentionnés (Figure V.33(c)).

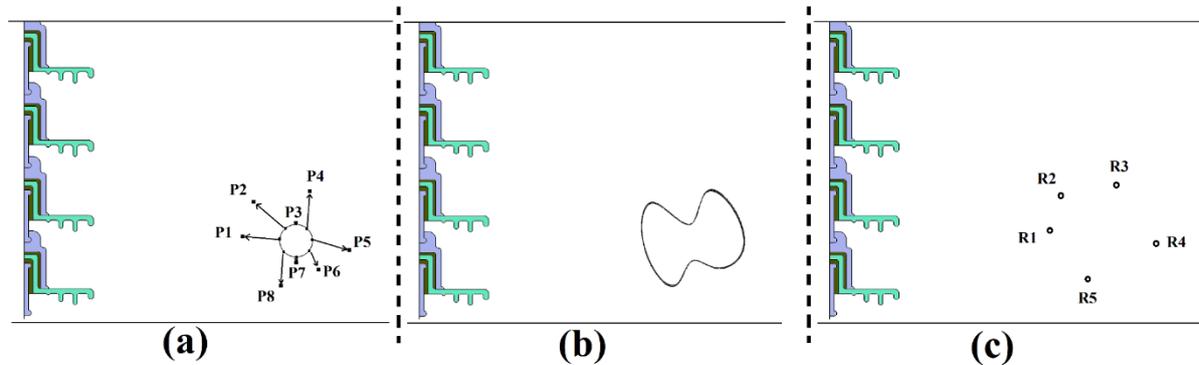


Figure IV. 33 Optimisation de la forme de l'anneau de garde (a) les déplacements des points P_i , (b) la nouvelle forme ré-optimisée, (c) les anneaux de garde multiples [96].

Le résultat de la distribution du champ électrique lors de l'intégration des anneaux de garde multiples est présenté sur la figure IV.31. L'intensité la plus élevée du champ électrique est observée autour de tous les anneaux de garde multiples, et de l'extrémité sous tension (Figure IV.34(a)), ainsi que sur les surfaces de ces derniers (Figure IV.34(b)).

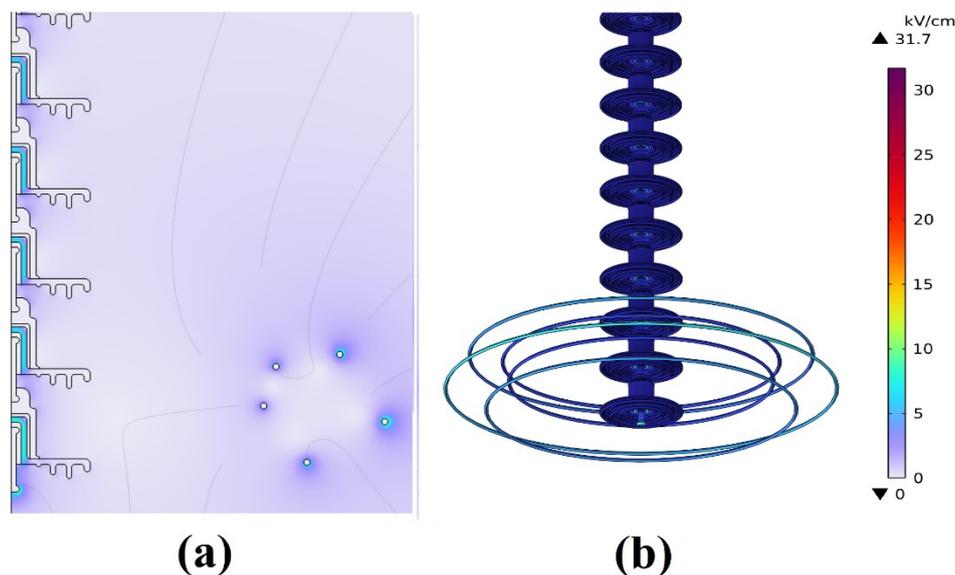


Figure IV. 34 Distribution du champ électrique pour la chaîne d'isolateurs en verre en présence des anneaux de garde multiples optimisés (a) représentation 2D (b) représentation 3D.

Les résultats de la distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite, pour l'anneau de garde optimisé et la configuration avec les anneaux de garde multiples, sont présentés sur la figure IV.35. Nous remarquons que le champ électrique maximal le long de la ligne de fuite est de 10,15 kV/cm pour les anneaux de garde multiples, ce qui représente une

réduction remarquable de 26,95 % par rapport à celui obtenu en employant l'anneau de garde optimisé, qui est de 13,89 kV/cm.

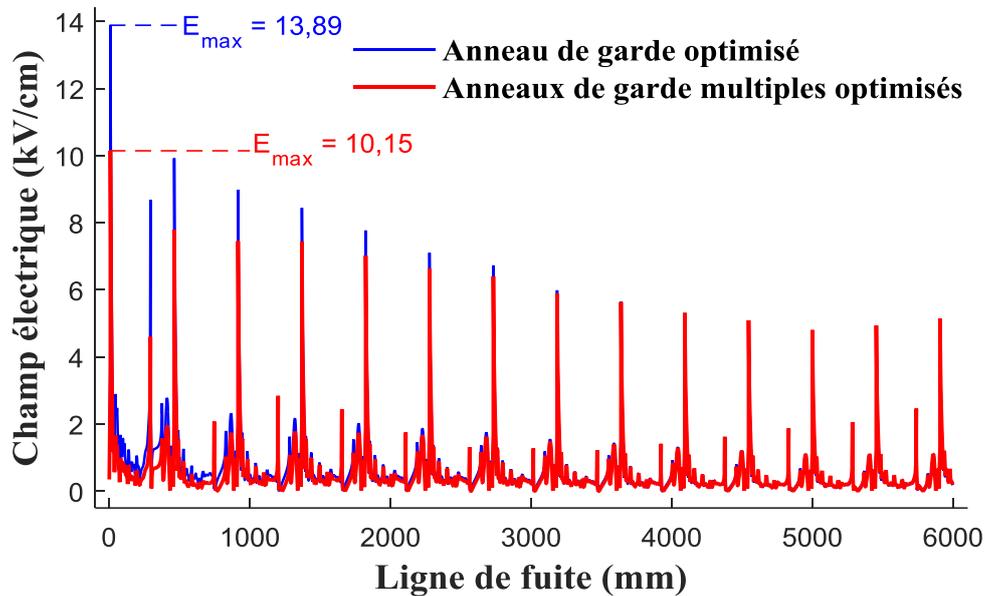


Figure IV. 35 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour la chaîne d'isolateurs en verre en présence des anneaux de garde multiples optimisés et de l'anneau de garde optimisé.

Le champ électrique doit être minimisé non seulement à la surface de l'isolateur, mais également sur l'ensemble du système d'isolation, en particulier sur les parties métalliques (extrémités métalliques et anneaux de garde). Dans notre cas, l'intensité maximale du champ électrique (sur les parties métalliques) est concentrée à la surface de l'anneau de garde (R4), avec une valeur de 7,22 kV/cm. Cette valeur est bien inférieure au seuil recommandé de 21 kV/cm [53] pour éviter l'apparition des décharges partielles sur les surfaces des parties métalliques.

L'approche de l'intégration des anneaux de garde multiples avec des petits rayons de tube pour chacun pour remplacer l'anneau ré-optimisé, contribue à réduire non seulement le champ électrique le long de la ligne de fuite, mais aussi le poids total de l'anneau de garde. A cet effet, le poids estimé de l'ensemble des anneaux de garde multiples est seulement de 2050 g, ce qui représente une réduction du poids de l'anneau de garde d'environ 33,01% (le poids de l'anneau de garde optimisé étant de 3060 g).

IV.6.4. Étude et analyse de l'influence d'une couche de pollution uniforme en présence de l'anneau de garde optimisé, de sa forme ré-optimisée et des anneaux de garde multiples

Dans le cas de l'application de la pollution uniforme sur la surface des isolateurs, les caractéristiques diélectriques de tels isolateurs se trouvent modifiées. Ce qui implique un changement dans la distribution du champ électrique. Les intensités locales élevées du champ électrique en cas de présence d'une couche de pollution uniforme peuvent provoquer la

formation de bandes sèches résultant de l'évaporation de l'eau due à l'effet de Joule, favorisant ainsi l'apparition d'arcs électriques sur ces bandes sèches. Pour prévenir de telles situations, nous avons mené une étude en appliquant les résultats précédemment obtenus pour les anneaux optimisés, tout en prenant en compte une couche de pollution uniforme sur la surface de la chaîne d'isolateurs en verre d'une épaisseur de 1 mm, avec une permittivité relative de 7,1 et une conductivité électrique de $\sigma = 6 \times 10^{-7}$ S/m [88].

La figure IV.36 présente les résultats de la distribution du champ électrique le long de la surface des isolateurs en présence d'une couche de pollution uniforme, en utilisant l'anneau de garde optimisé, la forme ré-optimisée de l'anneau de garde et les anneaux de garde multiples. D'après les résultats obtenus et présentés sur cette figure, une réduction significative du champ électrique maximal a été observée dont le pourcentage égal à 37,78% pour la forme ré-optimisée et 27,69% pour les anneaux de garde multiples, par rapport aux résultats trouvés en employant l'anneau de garde optimisé.

Ainsi, les optimisations appliquées à l'anneau de garde dans cette étude démontrent leur efficacité pour atténuer le champ électrique, que ce soit pour les surfaces propres ou polluées

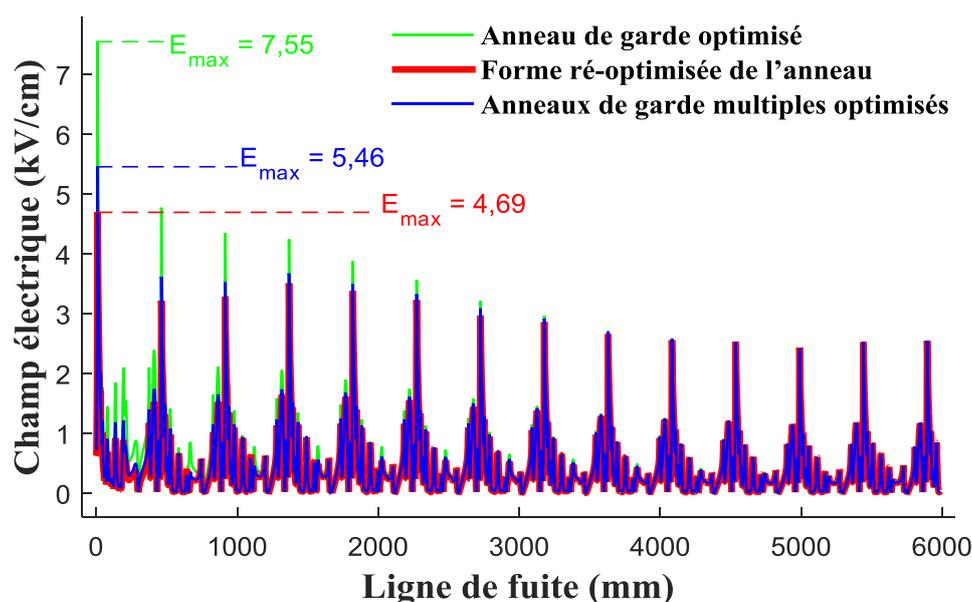


Figure IV. 36 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour la chaîne d'isolateurs en verre en présence de l'anneau de garde optimisé, de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde et des anneaux de garde multiples optimisés sous condition de pollution.

IV.6.5. Étude et analyse de l'influence d'une couche uniforme de revêtement en silicone (RTV) en présence de l'anneau de garde optimisé, de sa forme ré-optimisée et des anneaux de garde multiples

Le revêtement en silicone vulcanisé à température ambiante (RTV), appliqué sur les surfaces des isolateurs en verre, est utilisé pour que leurs surfaces soient fortement hydrophobes tout au long de la durée de vie de tels isolateurs. Ce revêtement empêche ainsi la formation du film d'eau le long de cette surface en le transformant en gouttelettes d'eau, ce qui implique une

réduction du courant de fuite [101]. Néanmoins, le matériau composite en silicone lui-même est affecté par l'intensité de champ relativement élevée, conduisant à son érosion et à un vieillissement prématuré [100].

Pour cette raison, nous avons effectué une étude utilisant une couche en silicone (RTV) revêtant la surface de la chaîne d'isolateurs en verre avec une épaisseur de 1 mm, tout en maintenant des valeurs fixes de la permittivité relative à 2.9 et de la conductivité électrique à 10^{-12} S/m [10]. Les résultats de la distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite sont présentés sur la figure IV.37 pour l'anneau de garde optimisé, la forme ré-optimisée de l'anneau de garde et les anneaux de garde multiples. Les résultats montrent des valeurs de champ électrique maximales réduites, avec une diminution de 35,69% pour la forme ré-optimisée de l'anneau et de 24,77% pour les anneaux de garde multiples, par rapport aux valeurs trouvées en utilisant l'anneau de garde optimisé.

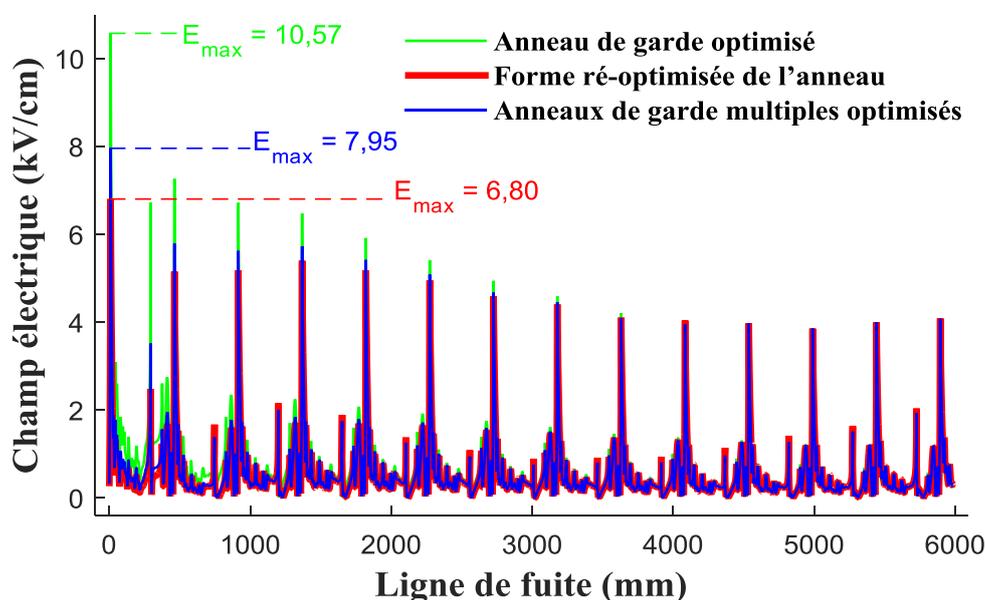


Figure IV. 37 Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite pour la chaîne d'isolateurs en verre en présence de l'anneau de garde optimisé, de la forme ré-optimisée de l'anneau de garde et des anneaux de garde multiples optimisés avec une couche de revêtement en silicone (RTV).

En comparant les résultats illustrés sur les figures IV.35 et IV.36 avec ceux de la figure IV.37, nous constatons que l'ajout d'une couche de revêtement en silicone (RTV) conduit à une atténuation du champ électrique le long de la surface de la chaîne d'isolateurs en verre, que ce soit pour le cas de l'anneau de garde optimisé, la forme ré-optimisée de l'anneau de garde ou les anneaux de garde multiples.

IV.7. Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'application de la méthode COBYLA dans l'optimisation de l'anneau de garde pour l'isolateur composite et la chaîne d'isolateurs en verre de la ligne 400 kV. Le but est de minimiser le champ électrique le long de la ligne de fuite et à travers les surfaces des isolateurs. Il ressort de cette étude les principales conclusions suivantes :

- Les isolateurs propres ou faiblement pollués (conductivité de 6×10^{-7} S/m) montrent un comportement fortement capacitif car le déphasage courant-tension est proche de 90° .
- Les isolateurs fortement pollués (conductivité de 6×10^{-4} S/m) présentent un comportement capacitif avec une forte composante résistive.
- L'augmentation de la conductivité de pollution uniforme de 6×10^{-7} S/m à 6×10^{-4} S/m a engendré une augmentation de l'amplitude du courant de fuite de 178,39% pour l'isolateur composite et de 528,07% pour la chaîne d'isolateurs en verre.
- En raison de la présence des capots et tiges, les isolateurs en verre présentent une distribution du potentiel est plus régulière que celle des isolateurs composites.
- L'installation d'un anneau de garde a permis l'obtention des distributions du champ électrique plus uniformes. En outre, l'insertion de l'anneau de garde a conduit des atténuations importantes de la valeur maximale du champ le long des surfaces d'isolateurs de 69,93% et 45,86% pour l'isolateur composite et en verre respectivement.
- Nous avons appliqué les méthodes COBYLA, CS et NM pour optimiser l'anneau de garde (position et rayon du tube). Nous avons obtenu, dans le cas de l'anneau de garde optimisé, des atténuations de 75,71% et de 68,06% du champ le long des surfaces des isolateurs composite et en verre respectivement. La méthode COBYLA présente une convergence rapide par rapport aux autres méthodes.
- Par rapport aux résultats enregistrés lors de l'insertion de l'anneau de garde optimisé, la ré-optimisation a permis d'obtenir une répartition du champ électrique encore plus uniforme sur la surface de l'isolateur par rapport à l'anneau de garde optimisé, et une atténuation du champ électrique maximale de 50,45% et de 36,45%, pour l'isolateur composite et les isolateurs en verre respectivement. Cependant, la ré-optimisation a induit à une augmentation du volume de 177,38% et de 152,29%, pour les mêmes isolateurs respectivement.
- Pour diminuer le poids, nous avons remplacé la forme ré-optimisée par des anneaux de garde multiples (chacun ayant chacun un petit rayon de tube de 5 mm). Nous avons obtenus respectivement pour l'isolateur composite et les isolateurs en verre une atténuation du champ électrique de 43,58% et 26,95% et une réduction du poids de 25,59% et 33,01%.
- Sous pollution uniforme, une réduction remarquable du champ électrique de 56,4% et de 48,29% obtenus en employant la forme ré-optimisée et les anneaux de garde multiples respectivement le long de l'isolateur composite contre 37,78% et 27,69% évalués pour les isolateurs en verre, et ce relativement au champ électrique estimé lors de l'utilisation de l'anneau de garde optimisé.



Conclusion générale

Notre investigation porte sur l'analyse et l'optimisation des performances électriques des isolateurs HT. Dans un premier travail, nous avons mené une étude du comportement de l'isolateur en verre de type 1512L sous pollution uniforme et non-uniforme (discontinue). Cette dernière est constituée d'un mélange d'eau distillée et de NaCl. Trois conductivités de la pollution uniforme ont été sélectionnées à savoir 20, 150 et 340 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Par ailleurs, cinq largeurs de la pollution discontinue ont été considérées et qui 5, 10, 15, 20, 25 cm avec une conductivité de 1050 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Finalement, différents niveaux de tension allant de 5 à 30 kV ont été appliqués. Nous nous sommes plus particulièrement à relever la tension de contournement, et enregistrer les signaux du courant de fuite, de la charge électrique et de la tension appliquée. Comme principales constatations, le courant de fuite augmente avec la conductivité et croît linéairement avec la tension appliquée. Ce qui nous a permis de déduire l'impédance électrique équivalent de l'isolateur sous pollution uniforme. Cette impédance diminue avec l'augmentation de la conductivité. En revanche, le courant de fuite reste pratiquement stable avec la variation de la largeur de la couche de pollution discontinue. De même, la charge électrique augmente avec la conductivité et croît lentement avec l'élargissement de la largeur de la pollution discontinue. Pour les deux répartitions uniforme et non-uniforme de la pollution, le comportement capacitif de l'isolateur est prédominant du fait que le courant de fuite est en avance de presque 90° sur la tension appliquée ou moment où la charge électrique est en phase avec la tension.

Comme deuxième travail complémentaire aux expériences, des simulations ont été effectuées dans les mêmes conditions, sous environnement COMSOL, et confrontées à l'expérimentation. Ces simulations nous ont permis, entre autres, d'obtenir les répartitions du champ et du potentiel électrique, les lignes de densité de courant, les points critiques présentant un champ électrique élevé, ainsi que les zones susceptibles d'être sièges aux décharges partielles. Une similitude parfaite entre les résultats expérimentaux susmentionnés et ceux simulés correspondants a été obtenue. Comme compléments valables à l'expérimentation, le champ électrique maximal de 25,8 $\text{kV}_{\text{max}}/\text{cm}$ a été observé à une distance de 3 cm de l'électrode haute tension sur la couche de la pollution uniforme. D'autre part, le champ électrique maximal de 46,9 $\text{kV}_{\text{max}}/\text{cm}$ a été observé au niveau de la zone triple constituée par le capot de l'isolateur, l'air et le diélectrique (verre). Comme ce champ électrique (46,9 $\text{kV}_{\text{max}}/\text{cm}$) dépasse le champ critique d'ionisation de l'air (30 $\text{kV}_{\text{max}}/\text{cm}$), des arcs électriques se manifestent dans la bande sèche (la zone triple). De tels arcs ont été observés à la fois lors des essais expérimentales en laboratoire et lors des simulations, se traduisant par une concentration élevée de densité de courant. Par ailleurs, et pour le cas de la pollution uniforme, la simulation a montré que les charges positives s'accumulent sur une distance d'environ 17 cm à partir de l'extrémité HT, et celles négatives sur le reste de cette longueur de fuite. Pour le cas de la pollution non-uniforme, les charges positives s'accumulent à 5 cm pour une largeur de pollution de 5 cm et à 10 cm ailleurs (pour les largeurs de pollution comprises entre 10 et 25 cm), par rapport à l'extrémité HT. Quant aux charges négatives, elles sont confinées à environ 2 cm (au niveau de la bande

sèche de l'isolateur) à partir de l'extrémité mise à la terre. Dans ces conditions, l'apparition de décharges électriques dans la zone de la charge négative a été observée aussi bien lors des expériences que lors des simulations.

Un troisième travail de recherche a porté sur l'évaluation des performances électriques des chaînes d'isolateurs en composite et en verre de 400 kV. L'objectif principal est de réduire l'intensité du champ électrique le long de la surface de chaque chaîne d'isolateurs. Pour cela, une optimisation basée sur l'application des trois méthodes COBYLA, CS et NM pour optimiser d'abord la conception de l'anneau de garde via l'optimisation de son rayon, le rayon de son tube et sa hauteur, ré-optimiser sa forme en huit points puis en anneaux de garde multiples en vue d'optimiser sa structure et son poids. Des distributions du champ et du potentiel électriques ont été présentées et analysées le long de la ligne de fuite et de l'axe central des isolateurs avec et sans anneau de garde, dans des conditions de surface propres et uniformément polluées. Une faible et une forte conductivités respectivement de 6×10^{-7} S/m et 6×10^{-4} S/m ont été considérées. Les résultats trouvés prouvent que dans le cas de surfaces propres et polluées faiblement conductrices (6×10^{-7} S/m), les isolateurs montrent un comportement capacitif. Une forte conductivité de 6×10^{-4} S/m, a conduit à un comportement capacitif avec une forte composante résistive, entraînant une augmentation de l'amplitude du courant de fuite de 178,39% pour l'isolateur composite et de 528,07% pour la chaîne d'isolateurs en verre. La distribution du potentiel est plus régulière pour les isolateurs en verre que pour ceux en composite, en raison de la présence des capots et tiges entre les unités d'isolateurs en verre. L'ajout d'un anneau de garde a conduit à des distributions plus uniformes du champ électrique, contribuant ainsi aux atténuations importantes de la valeur maximale du champ le long des surfaces d'isolateurs de 69,93% et 45,86% pour l'isolateur composite et en verre respectivement. L'optimisation de l'anneau de garde par les méthodes COBYLA, CS et NM a permis des atténuations de 75,71% et de 68,06% du champ le long des surfaces des isolateurs composite et en verre respectivement. La méthode COBYLA présente une convergence rapide par rapport aux autres méthodes. En appliquant cette méthode, les résultats montrent que la ré-optimisation de la forme d'anneau de garde conduit à une répartition plus uniforme du champ électrique sur la surface de l'isolateur par rapport à l'anneau de garde optimisé, accompagnée d'atténuation du champ électrique maximale de 50,45%, pour l'isolateur composite. L'atténuation du champ électrique maximale est de 36,45%, pour la chaîne d'isolateurs en verre. La ré-optimisation entraîne inévitablement une augmentation du volume de la nouvelle forme par rapport à l'anneau de garde optimisé de 177,38% et de 152,29%, pour les isolateurs composite et en verre respectivement. En conséquence, l'approche adoptée, qui met en place des anneaux de garde multiples, chacun ayant un petit rayon de tube de 5 mm pour remplacer l'anneau ré-optimisé dans les zones subissant les déformations les plus importantes, démontre son efficacité pour atténuer le champ électrique le long de la surface des isolateurs, tout en réduisant le poids total de l'anneau de garde. Pour l'isolateur composite, l'atténuation en employant des anneaux de garde multiples est de 43,58%, aussi le poids estimé

de l'ensemble des anneaux de garde multiples représentant une réduction de 25,59% du poids de l'anneau de garde. Dans le même contexte, pour la chaîne d'isolateurs en verre, nous avons enregistré une atténuation de 26,95% par rapport aux valeurs obtenues en employant l'anneau de garde optimisé, avec une réduction du poids d'environ 33,01%, pour la chaîne d'isolateurs en verre.

Les optimisations précédentes ont été testées en considérant une couche de pollution d'une épaisseur de 1 mm pour les deux isolateurs adoptés. Pour l'isolateur composite, les résultats obtenus montrent une réduction remarquable du champ électrique maximal de 56,4% pour la forme ré-optimisée et de 48,29% pour les anneaux de garde multiples, par rapport à celui obtenu lors de l'utilisation de l'anneau de garde optimisé. Pour la chaîne d'isolateurs en verre, nous avons enregistré une réduction significative de 37,78% pour la forme ré-optimisée et 27,69% pour les anneaux de garde multiples, par rapport aux résultats trouvés en employant l'anneau de garde optimisé. Cela confirme l'efficacité des optimisations apportées à l'anneau de garde, que les isolateurs soient propres ou pollués.

La minimisation du champ le long des surfaces des isolateurs HT permet principalement de prévenir les décharges partielles et le vieillissement prématuré du matériau en polymère de ces derniers. Cette approche contribue ainsi à accroître la durée de vie des isolateurs, à améliorer leurs performances et à renforcer la fiabilité des lignes de transmission.



Bibliographie

- [1] A. Bojovschi, T. V. Quoc, H. N. Trung, D. T. Quang, and T. C. Le, "Environmental effects on HV dielectric materials and related sensing technologies," in *Applied Sciences*, vol. 9, no. 5, p. 856, Feb. 2019.
- [2] M. Ntuli, N. Mbuli, L. Motsoeneng, R. Xezile and J. H. C. Pretorius, "Increasing the capacity of transmission lines via current uprating: An updated review of benefits, considerations and developments," 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Brisbane, QLD, Australia, 2016, pp. 1-6.
- [3] R. J. Villalobos, L. A. Moran, F. Huenup'an, F. Vallejos, R. Moncada and C. Pesce G., "A new current transducer for on-line monitoring of leakage current on HV insulator strings," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 78818-78826, 2022.
- [4] J. -M. George and L. F. Ferreira, "HVDC Overhead Line Insulators Selection and Design Update Features," 2018 XXXI INTERNATIONAL SUMMER MEETING ON POWER AND INDUSTRIAL APPLICATIONS (RVP-AI), Acapulco, Mexico, 2018, pp. 126-130.
- [5] Salem AA, Abd-Rahman R, Rahiman W, Al-Gailani SA, Al-Ameri SM, Ishak MT, Sheikh UU. Pollution flashover under different contamination profiles on high voltage insulator: numerical and experiment investigation. *IEEE Access*. 2021;9:37800-37812.
- [6] R. Ramesh and C. P. Sugumaran, "Reduction of flashover in ceramic insulator with nanocomposites," 2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), Rupnagar, India, 2017, pp. 418-422.
- [7] Z. Zhang, X. Liu, X. Jiang, J. Hu and D. W. Gao, "Study on AC flashover performance for different types of porcelain and glass insulators with non- uniform pollution," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1691-1698, July 2013.
- [8] D. Maadjoudj, O. Kherif, A. Mekhaldi and M. Tegar, "Features characterizing the surface state of HV insulator glass model under desert pollution," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 28, no. 6, pp. 1964-1972, December 2021.
- [9] Sadykova D, Pernebayeva D, Bagheri M, James A. IN-YOLO: real-time detection of outdoor high voltage insulators using uav imaging. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020 Jun;35(3):1599-1601.
- [10] Salem AA, Abd-Rahman R, Al-Gailani SA, Kamarudin MS, Ahmad H, Salam Z. The Leakage current components as a diagnostic tool to estimate contamination level on high voltage insulators. *IEEE Access*. 2020;8:92514-92528.
- [11] Abeysekara AHAD, Kumara JRSS, Fernando MARM, Eakanayake MPB, Godaliyadda GMRI, Wijayakulasooriya JV. Remote leakage current detector for identification of insulators discharges. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017 Aug; 24(4):2449-2458.
- [12] Roman M, van Zyl RR, Parus N, Mahatho N. In-Situ monitoring of leakage current on composite and glass insulators of the cahora bassa HVDC transmission line. *SAIEE Africa Research Journal*. 2019 Mar;110(1):4-10.
- [13] Sartika N, Naufalarizqa RMP, Rachmawati, Suwarno. Study on leakage current characteristics and computer simulation of semiconducting glazed insulator under clean and salt fog condition. 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Xi'an, China; 2018. p. 82-85.
- [14] Palangar MF, Mirzaie M, Mahmoudi A. Improved flashover mathematical model of polluted insulators: A dynamic analysis of the electric arc parameters. *Electric Power Systems Research*. 2020;179:106083.
- [15] N.A. Othman, M.A.M. Piah, Z. Adzis, Contamination effects on charge distribution measurement of high voltage glass insulator string, *Measurement*, Volume 105, 2017, Pages 34-40, ISSN 0263-2241.

- [16] Othman, Nordiana & M. Piah, M. Afendi & Adzis, Zuraimy. (2017). Charge distribution measurement of solid insulator materials: A review and new approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 70. 413-426.
- [17] S. Das, J. C. Pandey and N. Gupta, "Space charge diagnostics in aged polymeric insulation," 2013 IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), 2013, pp. 395-398.
- [18] L. Yifan, L. Mingzhe, C. Bin, M. Hongwei and W. Liming, "Research on Influence of Charge Quantity of Particles on Contamination Accumulation Characteristics," 2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2018, pp. 211-214.
- [19] Rosli, H., Othman, N. A. ., M. Piah, M. A. ., M. Jamail, N. A. ., M. Yousof, M. F. ., & Ismail, M. N. . (2020). Broken Insulator Effects on Charge Distribution Measurement along Suspension Insulators. *International Journal of Integrated Engineering*, 12(2), 97–105.
- [20] N. A. Othman, M. A. M. Piah, Z. Adzis and H. Ahmad, "Measurement of surface charge distribution on glass insulator using steel mesh," 2014 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), 2014, pp. 105-108.
- [21] J. -M. Löwe and V. Hinrichsen, "Experimental Investigation of the Influence of Electric Charge on the Behavior of Water Droplets in Electric Fields," 2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), 2019, pp. 1-6.
- [22] A. MEKHALDI, "Étude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz", Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Décembre 1999, Alger, Algérie.
- [23] M. TEGUAR, "Modélisations d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électrogéométriques", Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Avril 2003, Alger, Algérie.
- [24] M. Tegar, D. Namane and A. Mekhaldi, "Influence of the thickness and the nature of HVAC insulator model on the flashover voltage and the leakage current," 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), 2013, pp. 186-189.
- [25] Jamshid Mahmoodi, Mohammad Mirzaie, Amir Abbas Shayegani-Akmal, Surface charge distribution analysis of polymeric insulator under AC and DC voltage based on numerical and experimental tests, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 105, 2019, Pages 283-296, ISSN 0142-0615.
- [26] Mahmoodi, J., Mirzaie, M. & Akmal, A.A.S. Surface charges on silicon rubber (SiR) insulator and their effect on potential and electric field distribution. *Electr Eng* 100, 2695–2705 (2018).
- [27] N.A. Othman, M.A.M. Piah, Z. Adzis, H. Ahmad, N.A. Ahmad, H. Kamarden, A.A. Suleiman, Characterization of charge distribution on the high voltage glass insulator string, *Journal of Electrostatics*, Volume 72, Issue 4, 2014, Pages 315-321, ISSN 0304-3886.
- [28] Doufene D, Bouazabia S, Ladjici AA. Shape optimization of a cap and pin insulator in pollution condition using particle swarm and neural network. 2017 5th International Conference on Electrical Engineering (ICEE-B), Boumerdes; 2017. p. 1-4.
- [29] D. Cruz Dominguez, F. P. Espino-Cortes and P. Gomez, "Optimized design of electric field grading systems in 115 kV non-ceramic insulators," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 1, pp. 63-70, February 2013.
- [30] M. -R. Halloum, B. S. Reddy and G. N. Reddy, "Stress Control for Polymeric Outdoor Insulators Using Nonlinear Resistive Field Grading Materials Operating Under Different Conditions," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 29, no. 3, pp. 1175-1182, June 2022.

- [31] M'hamdi B, Tegar M, Mekhaldi A. Optimal design of corona ring on HV composite insulator using PSO approach with dynamic population size. *Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2016;23(2):1048-1057.
- [32] Abimouloud A, Arif S, Korichi D, Ale-Emran SM. Prediction of DC flashover voltage of cap-and-pin polluted insulator. *IET Sci Meas Technol*. 2019;13:279-286.
- [33] Thomas AJ, C I, Reddy CC. On the measurement of surface voltage of insulators and bushings. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2022 ; 37(1) :464-471.
- [34] D. MAADJOUJ "Comportement des isolateurs de haute tension sous pollution désertique", Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Avril 2020, Alger, Algérie.
- [35] D. NAMANE "Modélisations expérimentale et numérique d'isolateurs HT sous tension alternative 50Hz", Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Avril 2011, Alger, Algérie.
- [36] MEA. SLAMA "Etude expérimentale et modélisation de l'influence de la constitution chimique et de la répartition de la pollution sur le contournement des isolateurs haute tension", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2011. Français.
- [37] M. G. Shaik and V. Karuppaiyan, "Investigation of Surface Degradation of Aged High Temperature Vulcanized (HTV) Silicone Rubber Insulators," *Energies*, vol. 12, no. 19, p. 3769, Oct. 2019.
- [38] A. A. Salem, K.Y. Lau, Z. Abdul-Malek, N. Mohammed, A. M. Al-Shaalan, A. A. Al-Shamma'a and H.M.H. Farh, "Polymeric Insulator Conditions Estimation by Using Leakage Current Characteristics Based on Simulation and Experimental Investigation," *Polymers*, vol. 14, no. 4, p. 737, Feb. 2022.
- [39] M. E. -A. Slama, A. Beroual and H. Hadi, "Influence of the linear non-uniformity of pollution layer on the insulator flashover under impulse voltage - estimation of the effective pollution thickness," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, no. 2, pp. 384-392, April 2011.
- [40] Ghermoul, O., Benguesmia, H., Benyettou, L. "Finite element modeling for electric field and voltage distribution along the cap and pin insulators under pollution", *Diagnostyka*, 24(2), pp. 1-9. 2023.
- [41] Z. Qiu, J. Ruan, D. Huang, X. Li, F. Wang, and W. Yao, "Study on glaze electrical erosion characteristics of porcelain post insulator by using inclined plane and graphite-layer-based method," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*, vol. 22, no. 6, pp. 33853394, Dec. 2015.
- [42] R. Wang, M. Zhang, Y. Jiang, and Y. Yang, "Prediction model of insulator contamination degree based on adaptive mutation particle swarm optimisation and general regression neural network," *J. Eng.*, vol. 2019, no. 16, pp. 14231428, Mar. 2019.
- [43] L. Jin, Z. Tian, J. Ai, Y. Zhang, and K. Gao, "Condition evaluation of the contaminated insulators by visible light images assisted with infrared information," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 67, no. 6, pp. 13491358, Jun. 2018.
- [44] Y. Liao, Q. Wang, L. Yang, Z. Kuang, Y. Hao, and C. Zhang, "Discharge behavior and morphological characteristics of suspended water-drop on shed edge during rain flashover of polluted large-diameter post insulator," *Energies*, vol. 14, no. 6, p. 1652, Mar. 2021.
- [45] M. T. Gençoğlu and M. Cebeci, "The pollution flashover on high voltage insulators," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 11, pp. 19141921, Nov. 2008.
- [46] W. Shaowu, L. Xidong, and H. Lengceng, "Experimental study on the pollution flashover mechanism of polymer insulators," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting*, vol. 4, Jan. 2000, pp. 28302833.

- [47] B. M'Hamdi, Y. Benmahamed, M. Tegar, I. B. M. Taha and S. S. M. Ghoneim, "Multi-Objective Optimization of 400 kV Composite Insulator Corona Ring Design," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 27579-27590, 2022.
- [48] M. F. Palangar and M. Mirzaie, "Diagnosis of porcelain and glass insulators conditions using phase angle index based on experimental tests," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 3, pp. 1460-1466, June 2016.
- [49] Hani, Benguesmia & Badis, Bakri & Khadar, Saad & Fareh, Hamrit & Nassima, M'ziou. (2019). Experimental study of pollution and simulation on insulators using COMSOL® under AC voltage. *Diagnostyka*, vol. 20, no. 3, 2019, pp. 21-29.
- [50] E. Neagu and C. Dias, "Charge injection/extraction at a metal-dielectric interface: Experimental validation," in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 25, no. 1, pp. 15-22, January-February 2009.
- [51] J. . -m. George et al., "Field experience and laboratory investigation of glass insulators having a factory-applied silicone rubber coating," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 6, pp. 2594-2601, December 2014.
- [52] R. A. Ghunem, L. -L. Tay, H. Terrab and A. H. El-Hag, "Analysis of service-aged 200 kV and 400 kV silicone rubber insulation in the Gulf region," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 6, pp. 3539-3546, Dec. 2016.
- [53] A.J. Phillips, J. Kuffel, A. Baker, J. Burnham, A. Carreira, E. Cherney, W. Chisholm, M. Farzaneh, R. Gemignani, A. Gillespie, T. Grisham, R. Hill, T. Saha, B. Vancia, and J. Yu, "Electric Fields on AC Composite Transmission Line Insulators", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 23, Issue 2, April 2008, pp. 823–830.
- [54] A. J. Phillips, A. J. Maxwell, C. S. Engelbrecht and I. Gutman, "Electric-Field Limits for the Design of Grading Rings for Composite Line Insulators," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1110-1118, June 2015.
- [55] D. Maadjoudj, A. Mekhaldi and M. Tegar, "Flashover process and leakage current characteristics of insulator model under desert pollution," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 6, pp. 2296–2304, Dec. 2018.
- [56] M. Bouhaouche, A. Mekhaldi and M. Tegar, "Improvement of electric field distribution by integrating composite insulators in a 400 kV AC double circuit line in Algeria," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 6, pp. 3549-3558, Dec. 2017.
- [57] Doufene, D., Bouazabia, S. and Haddad, A. (2020), Shape and electric performance improvement of an insulator string using particles swarm algorithm. *IET Sci. Meas. Technol.*, 14: 198-205.
- [58] Darmiani, M., Shariatinasab, R., Najafi, H., Ghayedi, M., & Rodrigues, E. M. (2023). Analysis of Electrical Characteristics of Composite Insulators with the Presence of Optimum Layer of ZnO Microvaristors. *International Journal of Energy Research*, vol. 2023.
- [59] S. M. Rowland, J. Robertson, Y. Xiong and R. J. Day, "Electrical and material characterization of field-aged 400 kV silicone rubber composite insulators," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 2, pp. 375-383, April 2010.
- [60] Mohammed Khalil Hussain, Bajel Mohammed Alshadeedi, "Optimal design of high voltage composite insulators with grading rings in different configurations," *Electric Power Systems Research*, Volume 221, 2023, 109493, ISSN 0378-7796.
- [61] K. Aramugam, H. A. Illias, Y. C. Ching, M. S. Ali, and M. Z. H. Makmud, "Optimal Design of Corona Ring for 132 kV Insulator at High Voltage Transmission Lines Based on Optimisation Techniques," *Energies*, vol. 16, no. 2, p. 778, Jan. 2023.

- [62] Hocine Terrab, Adel Kara, Parameters design optimization of 230kV corona ring based on electric field analysis and response surface methodology, *Electric Power Systems Research*, Volume 163, Part B, 2018, Pages 782-788, ISSN 0378-7796.
- [63] E. Aziz, F. Aouabed, H. Abdellah, and A. Dineva, "Case Study: Optimizing Grading Ring Design for High Voltage Polymeric Insulators in Power Transmission Systems for Enhanced Electric Field and Voltage Distribution by Using a Finite Element Method," *Energies*, vol. 16, no. 13, p. 5235, Jul. 2023.
- [64] Jairo A. Diaz-Acevedo, Adolfo Escobar, Luis F. Grisales-Noreña, "Optimization of corona ring for 230 kV polymeric insulator based on finite element method and PSO algorithm," *Electric Power Systems Research*, Volume 201, 2021, 107521, ISSN 0378-7796.
- [65] A. Al-Gheilani, W. Rowe, Y. Li and K. L. Wong, "Stress control methods on a high voltage insulator: a review," *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 95-100, 2017.
- [66] R. Anbarasan and S. Usa, "Electrical field computation of polymeric insulator using reduced dimension modeling," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 2, pp. 739-746, April 2015.
- [67] IEC, TS. "60815-1. Selection and Dimensioning of High-voltage Insulators Intended for Use in Polluted Conditions-Part 1: Definitions, Information and General Principles." International Electrotechnical Commission: Worcester, MA, USA (2008).
- [68] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=electricite-et-gaz#:~:text=La%20longueur%20totale%20du%20r%C3%A9seau,233%20km%20%C3%A0%20fin%202017>
- [69] IEC Standard 60507, Artificial pollution tests on high voltage ceramic and glass insulators to be used on a.c. systems, 2013.
- [70] Othman, Mardianaliza & Amirruddin, Melaty & Abdullah, Farrah & Anida, Noor. (2015). Investigation on the Characteristics of Cap and Pin Glass Insulator due to Effect of Contamination. *Applied Mechanics and Materials*. 793. 95-99.
- [71] <https://www.sonelgaz.dz/fr/835/plan-de-developpement-2021-2030>
- [72] Araya, J., Montaña, J., Schurch, R. "Electric field distribution and leakage currents in glass insulator under different altitudes and pollutions conditions using FEM simulations", *IEEE Latin America Transactions*, 19(8), pp. 1278-1285. Spanish, 2021.
- [73] <https://www.sonelgaz.dz/fr>
- [74] M. M. Werneck, D. M. dos Santos, C. C. de Carvalho, F. V. B. de Nazaré and R. C. da Silva Barros Allil, "Detection and Monitoring of Leakage Currents in Power Transmission Insulators," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 1338-1346, March 2015.
- [75] M'HAMDI Ben alia, "Amélioration des performances des chaînes d'isolateurs de haute tension", Thèse de Doctorat en Sciences en Électrotechnique, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Décembre 2016.
- [76] Mohamed BOUHAUCHE, "Etude et analyse du comportement des isolateurs composites utilisés en Algérie", Thèse de Doctorat (D/LMD) en Électrotechnique, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2018.
- [77] Griffiths, David J. "Introduction to Electrodynamics." 3rd edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999, pp. 330.
- [78] Diesendorf, W. "Insulation coordination in high voltage electric power systems", 1st ed, London, U.K., Butterworth, 1974.
- [79] Fofana, I., Farzaneh, M. "Study of Insulator Flashovers caused by Atmospheric Ice Accumulation", *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 1(1), pp. 10-23, 2004.

- [80] O. E. Gouda, M. M. F. Darwish, K. Mahmoud, M. Lehtonen and T. M. Elkhodragy, "Pollution Severity Monitoring of High Voltage Transmission Line Insulators Using Wireless Device Based on Leakage Current Bursts," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 53713-53723, 2022.
- [81] R. Salhi, A. Mekhaldi, M. Tegar, O. Kherif and M. El Amine Slama, "**Cap-pin glass insulator simulation and leakage current waveform extraction**," 2022 2nd International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE), Constantine, Algeria, 2022, pp. 1-4.
- [82] D. Yang, F. Yin, H. Mei, L. Wang and C. Guo, "In-Situ Monitoring of Electrolytic Corrosion on the Caps of HVDC Insulators," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 20, pp. 8569-8577, Oct. 2018.
- [83] M. Imran Mousa, Z. Abdul-Malek, Z. Imran Mousa, "Aging Detection of Glass Disc Insulator by Using Infrared Camera," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 6, pp. 520-527. 2017.
- [84] R. Salhi, A. Mekhaldi, M. Tegar and O. Kherif, "**Quantitative Analysis of Electric Charge Distribution on Cap-Pin Insulator Using COMSOL Multiphysics**," Fourth International Conference on Technological Advances in Electrical Engineering (ICTAEE'23), Skikda, Algeria, May 2023. PP. 576-579.
- [85] Selection and Dimensioning of High-Voltage Insulators Intended for Use in Polluted Conditions Part 2: Ceramic and Glass Insulators for A.C. Systems, Standard IEC-TS-60815-2, Switzerland, 2008. Accessed: Feb. 12, 2022. [Online]. Available: <http://www.transformermagazine.ir/wp-content/uploads/2015/09/IEC-TS-60815-2-2008.pdf>.
- [86] "IEEE guide for application of composite insulators," in *IEEE Std 987-2001 (Revision of IEEE Std 987-1985)*, pp.1-24, 6 May 2002.
- [87] R. Salhi, O. Kherif, A. Mekhaldi and M. Tegar, "**Electrical Performance of 400-kV Cap-Pin and Composite String Insulators. COMSOL Multiphysics Simulation**," 2023 the 23rd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), 28 August 2023-1 September 2023, pp. 260-264, Glasgow, UK.
- [88] A. A. Salem et al., "Pollution Flashover Characteristics of Coated Insulators under Different Profiles of Coating Damage," *Coatings*, vol. 11, no. 10, p. 1194, Sep. 2021.
- [89] GENÇOĞLU, Muhsin Tunay. The comparison of ceramic and non-ceramic insulators. *Engineering Sciences*, 2007, vol. 2, no 4, p. 274-294.
- [90] A. J. Phillips, A. J. Maxwell, C. S. Engelbrecht and I. Gutman, "Electric Field limits for the design of grading rings for composite line insulators," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1110-1118, June 2015.
- [91] Z. Zhang, C. Zhang, Y. Qiao, Y. Zhou, and S. Wang, "Design and mass optimization of numerical models for composite wind turbine blades," *Journal of Marine Science and Engineering* vol. 11, no. 1, Jan. 2023, Art. no. 75.
- [92] Y. Ozaki, M. Yano and M. Onishi, "Effective hyperparameter optimization using Nelder-Mead method in deep learning," *IPSJ T Comput Vis*, vol. 9, no. 1, Dec 2017, Art. no. 20.
- [93] H. Moon, H. Kim, and Y. Nam, "Study on the optimum design of a ground heat pump system using optimization algorithms," *Energies*, vol. 12, no. 21, Oct. 2019, Art. no. 4033.
- [94] B. Dai, M. Zhou, J. Zhang, Y. Li, and W. Jin, "Optimization design of filament wound composite pressure vessel based on opensees," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 8, April 2023, Art. no. 4894.
- [95] R. Salhi, A. Mekhaldi, M. Tegar and O. Kherif, "**Corona Ring Improvement to Surface Electric Field Stress Mitigation of 400 kV Composite Insulator**," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 31, no. 3, pp. 1509-1516, June 2024.

- [96] R. Salhi, A. Mekhaldi, M. Tegar and O. Kherif, “**Optimizing corona ring design for 400 kV cap-pin string insulator to minimize surface electric field under various surface conditions,**” 2023 The first International Conference on Electrical Engineering and Advanced Technologies (ICEEAT), Batna, Algeria, 2023.
- [97] T. M. Ragonneau, “Model-based derivative-free optimization methods and software,” Thèse de doctorat, Département de Mathématiques Appliquées, Université Polytechnique de Hong Kong, 2022.
- [98] S. Takenaga, Y. Ozaki, and M. Onishi, “Practical initialization of the Nelder–Mead method for computationally expensive optimization problems,” *Optim Lett* vol. 17, pp. 283–297, 2023.
- [99] Luz, E.R., Romão, E.L., Streitenberger, S.C. et al. A multiobjective optimization of the welding process in aluminum alloy (AA) 6063 T4 tubes used in corona rings through normal boundary intersection and multivariate techniques. *Int J Adv Manuf Technol* 117, 1517–1534 (2021).
- [100] Halloum, MR., Reddy, B.S. & Reddy, G.N. Failure analysis of field-aged polymeric outdoor insulators and performance enhancement for electric stress using nonlinear field grading composites. *Electr Eng* (2023).
- [101] M. E. Ibrahim, N. A. Sabiha and M. A. Izzularab, "Nanofilled nonlinear coating material for improving proactive flashover performance of high voltage insulators," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 5, pp. 2156-2163, Oct. 2014.

Travaux effectués dans le cadre de cette thèse de Doctorat D/LMD

Publication internationale

- R. Salhi, A. Mekhaldi, M. Tegar and O. Kherif, "**Corona Ring Improvement to Surface Electric Field Stress Mitigation of 400 kV Composite Insulator,**" in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 31, no. 3, pp. 1509-1516, June 2024, doi: 10.1109/TDEI.2023.3342772.

Communications internationales

- R. Salhi, A. Mekhaldi, M. Tegar and O. Kherif, "**Optimizing Corona Ring Design for 400 kV Cap-Pin String Insulator to Minimize Surface Electric Field under Various Surface Conditions,**" *2023 International Conference on Electrical Engineering and Advanced Technology (ICEEAT)*, 05-07 November 2023, pp. 1-5; Batna, Algeria, doi: 10.1109/ICEEAT60471.2023.10426163.

- R. Salhi, O. Kherif, A. Mekhaldi and M. Tegar, "**Electrical Performance of 400-kV Cap-Pin and Composite String Insulators. COMSOL Multiphysics Simulation,**" 2023 the 23rd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), 28 August 2023-1 September 2023, pp. 260-264, Glasgow, UK, doi: 10.1049/icp.2024.0483.

- R. Salhi, A. Mekhaldi, M. Tegar and O. Kherif, "**Quantitative Analysis of Electric Charge Distribution on Cap-Pin Insulator Using COMSOL Multiphysics,**" Fourth International Conference on Technological Advances in Electrical Engineering (ICTAEE'23), 23-24 May 2023, pp. 576-579. Skikda, Algeria.

- R. Salhi, A. Mekhaldi, M. Tegar, O. Kherif and M. El Amine Slama, "**Cap-pin glass insulator simulation and leakage current waveform extraction,**" 2022 2nd International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE), 29-31 October 2022, pp. 1-4, Constantine, Algeria, doi: 10.1109/ICAEE53772.2022.9961979.