

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Electrique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Thèse de Doctorat en Sciences

Présentée par :

M'HAMDI Ben alia
Magister en Electrotechnique E.N.P.

Thème

Amélioration des performances des chaînes d'isolateurs de haute tension

Soutenue publiquement le 14/12/2016 devant la commission d'examen :

| | | |
|--------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Président: | BOUBAKEUR Ahmed | Professeur, ENP |
| Rapporteur : | TEGUAR Madjid | Professeur, ENP |
| Examineurs : | MOULAI Hocine | Professeur, USTHB |
| | NACER Azzedine | Professeur, USTHB |
| | TILMATINE Amar | Professeur, UDL, Sidi Bel Abes |
| Invité : | MEKHALDI Abdelouahab | Professeur, ENP |

Ecole Nationale Polytechnique 10 Avenue Hassen BADI BP182 El-Harrach 16200 Alger Algérie
www.enp.edu.dz Tél : 213 21 52 53 01/03 Fax : 213 21 52 29 73

ENP 2016

ملخص:

يكن هدف هذا العمل في تحسين أداء سلاسل عازل مركب. لأجل ذلك، تم البحث عن التوزيع الأمثل للحقل و التوتر الكهربائيين على طول سلاسل العوازل المركبة في غياب و وجود حلقة الهالة (الحلقة المانعة للهالة). تم أخذ مادة تلبس العوازل وكذلك التلوث في الاعتبار. تم فحص تأثير الطبيعة السعوية لمواد الطلاء وكذلك شكل العوازل المركبة. من أجل تحسين الأبعاد الهندسة لحلقة الهالة، تم إنشاء علاقة رياضية جديدة (دالة موضوعية) للتعبير عن الارتباط الغير خطي بين شدة المجال الكهربائي وأبعاد حلقة الهالة. وقد تم إجراء التحسين الأمثل عن طريق التقليل من دالة الهدف. لهذا تم تطوير تقنية سرب الجسيمات. واعتبرت ثلاثة بدائل تتعلق بحجم السكان: ثابت، انخفاض تدريجي و انخفاض ديناميكي. لأجل استعمال الخيار الأخير، تم اقتراح نموذج رياضي جديد لتحديث حجم السكان عند كل تكرار. وأظهرت النتائج أن الحد الأقصى للحقل الكهربائي في النقطة الثلاثية (الطرف HT- مادة طلاء العازل- الهواء) يمكن أن ينخفض بشكل كبير من خلال تطبيق مواد الطلاء ذات السماحية العالية مع تعديل مناسب لشكل العازل المركب بالقرب من التوتر العالي وكذا تركيب حلقة الهالة ذات الأبعاد المثلى. هذا البديل الأخير يسمح بتوزيعات أكثر تجانساً لكل من الحقل و التوتر الكهربائي على امتداد سلاسل العوازل.

كلمات البحث: عازل، أداء، طلاء، التلوث، الحقل الكهربائي، التوتر، توزيع، المحاكاة، سرب الجسيمات، حلقة الهالة، تحسين، دالة موضوعية.

Abstract :

The objective of this work consists in the improving of the performance of composite insulator strings. For this, optimization of distributions of the field and the electrical potential along these strings in the absence and presence of the guard ring has been performed. The coating and the pollution of the composite insulators have been taken into account. The influences of the capacitive nature of the coating material as well as the form of the insulators have been examined. In order to optimize the geometry of the corona ring, a new mathematical function (objective function) has been established to express the nonlinear relationship between the electric field intensity and the corona ring parameters. The optimization has been achieved by minimizing the objective function of the electric field. For this, the particles swarm technique has been developed. Three variations related to the population size have been considered: fixed, gradually reduced and dynamic. In this last variant, a new mathematical model to update the population size in each iteration has been proposed. The results show that the maximum field at the triple point (HV terminal-insulator coating material-air) could be significantly reduced by application of coating material with a high permittivity, by a suitable modification of the composite insulator profile near the HV terminal HT and by installation of an optimized corona ring. This latter alternative allows more uniform distributions of both electric field and potential along the insulator strings.

Keywords: insulator, performance, coating, pollution, electric field, potential, distribution, simulation, particles swarm, corona ring, optimization, objective function.

Résumé :

L'objectif de ce travail consiste en l'amélioration des performances des chaînes d'isolateurs en composite. Pour cela, une optimisation des distributions du champ et du potentiel électriques le long de ces chaînes en absence et présence de l'anneau de garde a été effectuée. Le revêtement et la pollution des isolateurs en composite ont été pris en compte. Les influences de la nature capacitive du matériau de revêtement et de la forme des isolateurs ont été examinées. En vue d'optimiser la géométrie de l'anneau de garde, une nouvelle fonction mathématique (fonction objectif) a été établie pour exprimer la relation non linéaire entre l'intensité du champ électrique et les paramètres de l'anneau de garde. L'optimisation a été effectuée en minimisant la fonction objectif du champ électrique. Pour cela, la technique d'essaim de particules a été développée. Trois variantes relatives à la taille de la population ont été considérées : fixe, graduellement décroissante et dynamique. Pour cette dernière variante, un nouveau modèle mathématique permettant l'actualisation de la taille de la population à chaque itération a été proposé. Les résultats obtenus révèlent que le champ maximal au niveau du point de jonction (borne HT-matériau de revêtement de l'isolateur-air) pourrait être significativement réduit par une application d'un matériau de revêtement de forte permittivité, une modification adéquate du profil de l'isolateur en composite à proximité de la borne HT et l'installation d'un anneau de garde optimisé. Cette dernière alternative permet en plus d'uniformiser plus les répartitions du champ et de potentiel électriques le long des chaînes d'isolateurs.

Mots Clés : isolateur, performance, revêtement, pollution, champ électrique, potentiel, distribution, simulation, essaim de particules, anneau de garde, optimisation, fonction objectif.

Remerciements

Le présent travail a été effectué sous la direction scientifique de monsieur **Madjid Teguvar**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique. Qu'il me soit permis de lui exprimer mes vifs sentiments de gratitude, pour son apport scientifique remarquable, pour son aide dans la préparation et la rédaction de ce travail, son soutien, ses directives et ses précieux critiques et conseils combien utiles ainsi que pour sa disponibilité et ses qualités humaines exceptionnelles.

Mes remerciements vont également aux membres du laboratoire de Haute Tension de l'ENP.

À monsieur **Abdelouahab Mekhaldi** Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour ses conseils, ses encouragements et ses qualités humaines.

J'adresse mes plus vifs remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'examiner et d'évaluer ce travail:

- **Ahmed Boubakeur**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de thèse ainsi que l'intérêt qu'il a accordé à ce travail.
- **Moulai Hocine**, Professeur à l'Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene (USTHB) d'Alger, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de s'associer à la commission d'examen.
- **Nacer Azzedine**, Professeur à l'Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene (USTHB) d'Alger, pour l'honneur qu'elle me fait en acceptant d'examiner ce travail.
- **Tilmatine Amar**, Professeur à l'Université Djillali Liabes, de Sidi Bel Abes, pour l'intérêt qu'il a manifesté pour ce travail en acceptant de participer au jury.

Sur un plan plus personnel, je voudrais témoigner toute ma reconnaissance à ma chère épouse, pour son soutien moral, sa compréhension, sa patience infinie et ses encouragements. Sans oublier mes enfants.

Enfin, je souhaiterais rendre hommage à mon cher père disparu, à qui ce mémoire est dédié.

Introduction générale

| | |
|-----------------------------|---|
| Introduction générale | 8 |
|-----------------------------|---|

Chapitre I : Isolateurs de Haute Tension

| | |
|--|----|
| I.1 Introduction | 14 |
| I.2. Les Isolateurs | 15 |
| I.2.1 Principaux types d'isolateurs | 15 |
| I.2.2 Différents profils des isolateurs | 17 |
| I.2.3 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs | 18 |
| I.2.4 Choix des isolateurs | 19 |
| I.3 Les isolateurs composites | 20 |
| I.3.1 Structure des isolateurs composites | 21 |
| I.3.2 Les cause de défaillance | 23 |
| I.4 Pollution des isolateurs | 24 |
| I.5 Conclusion | 26 |

Chapitre II : Méthodes numériques de calcul du potentiel et du champ Électriques

| | |
|---|----|
| II.1 Introduction | 29 |
| II.2 Equations de Maxwell | 29 |
| II. 2.1 Mise en équation | 29 |
| II. 2.2 Conditions aux limites | 29 |
| II. 2.3 Conditions aux frontières | 32 |
| II.3 Modèle mathématique | 32 |
| II.4 Méthodes de détermination du champ et du potentiel électriques | 34 |
| II.4.1 Méthode des Eléments Finis (MEF)..... | 36 |
| II.4.1.1 Etapes de la méthode des éléments finis | 37 |
| II.4.1.2 Avantages de la MEF | 37 |
| II.4.1.2 Inconvénients de la MEF | 38 |
| II.4.2 Méthode des éléments finis de frontière (MEFF) | 38 |
| II.6 Conclusion | 39 |

Chapitre III : Evaluation et Control de Champ Electriques

| | |
|--|----|
| III.1 Introduction | 42 |
| III.2 Logiciel de simulation | 43 |
| III.2.1 Description du logiciel | 43 |
| III.2.2 Paramètres du Solveur | 44 |
| III.3 Distributions du potentiel et du champ électriques sur des isolateurs HT | 44 |
| III.3.1 Types d'isolateurs | 44 |
| III.3.2 Analyse du champ électrique cas d'un isolateur composite propre et sec | 46 |
| III. 3.3 Efficacité d'une chaîne d'isolateur | 48 |
| III.3.4 Effet des gouttelettes d'eau discrètes sur le champ électrique | 49 |
| III.3.5 Effet des pylônes sur le champ électrique | 50 |
| III.3.6 Effet de mise en paquet des conducteurs sur le champ électrique | 56 |

| | |
|---|----|
| III.4 Effet de l'installation des anneaux de garde | 58 |
| III.4.1 Anneaux de garde | 58 |
| III.4.2 Effet de l'installation des anneaux de garde sur la distribution du potentiel | 58 |
| III.5 Distribution du champ électrique sur des isolateurs en I, II et V | 63 |
| III.6 Analyse du champ et du potentiel électriques dans des conditions de pollution..... | 66 |
| III.6.1 Analyse sous pollution continue | 66 |
| III.6.2 Formation des bandes sèches sur isolateurs polluées | 70 |
| III.7 Conclusion | 73 |

Chapitre IV: Amélioration de la distribution du champ électrique le long des Isolateurs Composite HT

| | |
|---|----|
| IV.1 Introduction | 75 |
| IV.2.1 Atténuation du champ électrique par Anneaux de garde | 75 |
| IV.2.1.1 Présentation des anneaux de garde | 77 |
| IV.2.1.2 Champ électrique en fonction de la hauteur de l'anneau (H) | 79 |
| IV.2.1.3 Champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau (D) | 81 |
| IV.2.1.4 Champ électrique en fonction de Diamètre du tube (T) | 82 |
| IV.3 Atténuation de champ électrique par augmentation de permittivité du matériau de revêtement | 84 |
| IV.3.1 Matériaux utilisés pour l'atténuation du champ électrique | 84 |
| IV.3.2 Effet de la permittivité du matériau de revêtement | 86 |
| IV.4 Atténuation du champ électrique par modification de la forme géométrie..... | 91 |
| IV.5 Conclusion | 95 |

Chapitre V: Conception optimale D'un Anneau de garde pour un Isolateur Composite Ht84

| | |
|--|-----|
| V.1 Introduction | 97 |
| V.2 Effets de l'anneau de garde | 98 |
| V.2.1 Profil de l'isolateur composite | 99 |
| V.2.2 Initiation de l'effet couronne | 101 |
| V.2.3 Effets des paramètres de l'anneau de garde | 103 |
| V.3 Optimisation des paramètres de l'anneau de garde | 106 |
| V.3.1 Méthodologie d'optimisation | 106 |
| V.3.1.1 Méthodes d'optimisation déterministe | 107 |
| V.3.1.2 Méthodes méta-heuristiques | 108 |
| V.3.2 Optimisation Par Essaims de Particule(OEP) | 109 |
| V.3.2.1 Paramètres de l'algorithme OEP | 109 |
| A. Nombre de particules | 109 |
| B. Fonction objectif | 110 |
| C. Poids inertiel | 110 |
| D. Paramètre d'accélération c_1 & c_2 | 110 |
| E. Notion de voisinage | 110 |
| F. Critères d'arrêt | 111 |
| V.3.3.2 Description algorithmique | 111 |
| V.3.3 OEP à taille dynamique de la population | 114 |
| V.3.4 Formulation du Problème | 116 |
| V.4 Résultats de l'optimisation | 118 |
| V.5 Conclusion | 125 |

Conclusion générale

Conclusion générale 128

Références bibliographiques

Références bibliographiques 132

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Pour des raisons techniques et économiques, le transport de l'énergie électrique nécessite l'utilisation de lignes de haute tension. Cela exige la conception de dispositifs et de systèmes capables de supporter des champs électriques très élevés ; leurs designs doivent être soigneusement étudiés [1]. En fait, des niveaux élevés du champ électrique pourraient être responsables du bruit audible, de la pollution électromagnétique, des décharges partielles et du vieillissement prématuré de l'isolation [2]. Dans le cas des isolateurs composites, les décharges, apparaissant suite à un champ électrique local élevé, peuvent non seulement dégrader les matériaux polymères utilisés dans le revêtement mais également conduire à l'érosion de tels matériaux [2].

Les distributions du potentiel et du champ électriques sur la surface et à l'intérieur des chaînes des isolateurs dépendent de nombreux paramètres, tels que la tension appliquée, la forme et la nature de l'isolateur, la nature du revêtement, la configuration du pylône, l'anneau de garde, l'espacement entre phases, la répartition et la nature des dépôts polluants, les gouttes d'eau (pluie) ou encore le dépôts de glace qui modifient les conditions surfaciques des isolateurs provoquant des activités électriques supplémentaires [3-8].

Au cours des dernières années, plusieurs chercheurs se sont concentrés sur les distributions optimales du champ et du potentiel électriques le long des chaînes d'isolateurs en composite afin de réduire leur dégradation par effet couronne. De telles distributions ont été obtenues lors de l'utilisation des isolateurs polymères en composites à haute permittivité [9, 10], de l'utilisation de revêtement semi-conducteur appliqué sur les surfaces des isolateurs dont l'efficacité a été démontrée dans le cas de pollution sévère (ce type d'isolateurs n'est généralement utilisé que dans des zones de forte pollution atmosphérique vu leurs prix très élevés comparés à ceux des isolateurs standards et aussi vu aux pertes significatives causées par le courant de fuite circulant en permanence dans le revêtement semi-conducteur) [11 ainsi que lors de l'installation d'anneaux de garde classiques [12-15].

Aujourd'hui, les anneaux de garde sont recommandés sur les deux extrémités (coté HT et coté terre) pour les chaînes d'isolateurs montées sur des lignes de haute tension supérieure à 345 kV et seulement du côté de l'électrode sous tension dans la plage de tension comprise entre 230 et 345 kV. Cependant, pour des tensions inférieures à 230 kV, les anneaux de garde sont rarement utilisés et seulement en fonction des exigences strictes d'installation [10].

Malheureusement, il n'y a pas de normes spécifiques pour la conception et la mise en place des anneaux de garde. En effet, chaque fabricant propose ses propres recommandations pour l'utilisation des anneaux de garde [15-17].

Plusieurs études ont été menées pour optimiser les paramètres des anneaux de garde [12-19], dont certaines se concentrent sur la conception basée en particulier sur la géométrie de l'anneau à savoir le diamètre et le rayon du tube ainsi que sur la position (hauteur) du montage de tels anneaux [13, 14]. En règle générale, les techniques d'optimisation traditionnelles telles que le gradient descente, la programmation linéaire et dynamique sont incapables de résoudre les problèmes d'ingénierie complexes, multimodaux, discrets ou discontinus, en particulier avec des fonctions objectifs non linéaires et en présence de multiples contraintes également non linéaires [20].

Pour surmonter les difficultés liées à l'utilisation des méthodes d'optimisation traditionnelles sur les problèmes d'ingénierie à grande échelle avec un grand nombre de variables et de fonctions objectifs non linéaires, les chercheurs ont proposé des algorithmes évolutionnaires inspirés de l'évolution biologique [21-25]. En fait, de nombreux problèmes d'optimisation liés à la conception d'isolation de haute tension ont utilisé les approches méta-heuristiques pour optimiser les différents modèles mathématiques des fonctions objectifs, en présence de diverses contraintes [21, 22]. Un algorithme génétique dynamiquement réglable a été utilisé par Chen et al [21] afin d'optimiser le contour des isolateurs de suspension. Du et al [13] ont appliqué un algorithme d'essaim de poissons artificiel (AFSA) afin d'optimiser les dimensions et l'emplacement des anneaux de garde. En vue d'optimiser la structure de l'anneau de garde des isolateurs composites UHT, Zhang et al [14] ont utilisé un algorithme basé sur l'essaim de particules. Bessedik et al [25] ont appliqué la méthode des machines à vecteurs de support, ou SVM (Support Vector Machines) combinée avec l'essaim de particules pour estimer la tension critique de contournement des isolateurs pollués.

La technique d'optimisation par essaim de particules (OEP) a connu une croissance rapide et a trouvé une large application dans les domaines d'optimisation complexes [22]. Aujourd'hui, elle est parmi les principaux sujets de recherche. Inspirée du comportement social des oiseaux et introduite par Kennedy et Eberhart en 1995 [23, 24], l'OEP est une approche stochastique permettant de résoudre les problèmes d'optimisation continus. Par rapport aux algorithmes génétiques et évolutifs, les avantages de l'OEP consistent dans sa

capacité à échapper aux optima locaux, facile à être mise en œuvre et a moins de paramètres à ajuster. Il a été prouvé que l'OEP est robuste et rapide pour la résolution des problèmes d'optimisation non linéaire [23]. Les OEPs ont été utilisées dans de nombreuses applications telles que l'ingénierie de puissance, la bioinformatique, l'exploration de données, le génie chimique et la vision par ordinateur et reconnaissance de formes [24].

Récemment, la version originale de l'algorithme de l'OEP [25, 26] a subi plusieurs améliorations. En effet, de nombreuses variantes ont été développées pour améliorer la vitesse de convergence et la qualité de la solution trouvée [27-29]. Il est bien connu que, pour une taille de population donnée, le temps de calcul est invariant. Cependant, ce temps de calcul pourrait être amélioré en utilisant le cas d'une dynamique permettant de la faire varier selon les besoins du processus de recherche lors de l'exécution [28, 29]. Bien que cette variante semble être efficace pour une optimisation globale, elle n'a jamais été utilisée dans l'optimisation de l'anneau garde jusqu'à présent.

À ce jour, rares sont les études développées en vue d'optimiser les paramètres des anneaux de garde utilisés pour l'atténuation du champ électrique sur la surface des isolateurs de haute tension et l'amélioration de sa distribution. L'originalité de cette présente recherche réside dans la proposition d'une nouvelle variante de l'EP permettant l'optimisation des paramètres des anneaux de garde. De ce fait, le projet de recherche proposé est une contribution intéressante à la conception et à l'utilisation des anneaux de garde sur les isolateurs des lignes de haute tension. L'expertise qui sera acquise durant ce projet pourrait être utile à l'industrie de transport de l'électricité en l'occurrence la société de Gestion du Réseau de Transport de l'Electricité (GRTE) ; filière SONELGAZ.

L'objectif de ce travail consiste en l'amélioration des performances des chaînes d'isolateurs en verre et en composite de 33 et 230 kV. Pour cela, une étude sur l'optimisation des distributions du champ et du potentiel électriques le long de ces chaînes sans et avec anneau de garde a été effectuée. Les simulations ont été effectuées en utilisant le COMSOL Multiphysique 4.3 basé sur la méthode des éléments finis. En premier lieu, les effets de la nature du matériau isolant (via sa permittivité) et la forme des isolateurs en composite de 33 kV ont été examinés. Nous nous sommes intéressés, en fait, aux valeurs de la permittivité du matériau de revêtement ainsi qu'aux géométries des isolateurs améliorant notamment la distribution du champ électrique. Pour cela, un modèle bidimensionnel axisymétrique de la

chaîne d'isolateurs a été considéré. En second lieu, nous nous sommes penchés sur l'optimisation de la géométrie de l'anneau de garde dans le cas des isolateurs en composite de 230 kV. Pour ce faire, un modèle tridimensionnel d'isolateurs a été développé. L'objectif est de déterminer les distributions optimales du champ et du potentiel électriques. Comme première étape, les effets des paramètres de l'anneau garde à savoir le diamètre, le rayon du tube et la position (hauteur) du montage sont séparément analysés et discutés. Sur la base des résultats obtenus, une nouvelle fonction objectif (fonction mathématique) a été proposée pour exprimer la relation non linéaire entre l'intensité du champ électrique et les paramètres de l'anneau de garde. Le problème d'optimisation a été effectué en minimisant la fonction objectif (autrement dit le champ électrique). Pour cela, la technique d'optimisation par essaim de particules a été développée. Trois variantes relatives à la taille de la population ont été considérées : fixe, graduellement réduite et dynamique. Au cours du processus d'optimisation utilisant la troisième variante, l'algorithme ajuste la taille de la population à chaque itération en fonction de la valeur de la fonction objectif. Pour cela, un nouveau modèle mathématique a été proposé afin d'actualiser la taille de la population à chaque itération. Dans ce modèle, la variation de la taille de la population dépend de la différence entre la valeur moyenne et la meilleure solution de la fonction objectif. Un travail complémentaire a été également développé. Il s'agit de la détermination de la répartition du potentiel le long de deux chaînes d'isolateurs en verre en composite destinées pour les lignes de transmission de 230 kV, en présence et en absence d'un anneau de garde conventionnel.

Notre mémoire s'articule autour de cinq chapitres distincts. Dans le premier chapitre, nous citons les principaux types d'isolateurs utilisés dans les réseaux électriques. Dans le deuxième chapitre, nous présentons les équations de base de l'électromagnétisme appliquées aux diélectriques ainsi que les différentes méthodes numériques utilisées pour l'évaluation de la répartition du champ électrique à la surface des isolateurs en insistant en particulier sur la méthode des éléments finis employée dans ce travail. Le troisième chapitre est consacré à la simulation ayant pour objectif la détermination des distributions du potentiel et du champ électriques le long des chaînes d'isolateurs en verre et en composite dans différentes conditions (sèche, humide, sous pollution uniforme, avec formation de bande sèche,...). Dans le quatrième chapitre, nous proposons quelques pratiques en vue d'améliorer la distribution du champ électrique sur une chaîne d'isolateurs. Finalement, l'optimisation de la géométrie de l'anneau de garde a fait l'objet du cinquième et dernier chapitre. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement au diamètre de l'anneau, au diamètre de son tube ainsi qu'à la

position du montage. L'objectif est d'obtenir les distributions de champ et de potentiel électriques les plus uniformes. Enfin, nous terminons par une conclusion générale représentant une synthèse globale de nos travaux de recherche effectués dans le cadre de cette thèse de Doctorat.

CHAPITRE



ISOLATEURS DE HAUTE TENSION

I.1 Introduction

Le transport de l'énergie électrique nécessite, pour des raisons technico-économiques l'utilisation des tensions élevées (Haute et très haute tension). Les équipements de haute tension, présents dans les réseaux de transport de l'énergie électrique, sont supposés opérer de façon fiable quelles que soient les conditions environnementales. Les isolateurs qui représentent relativement un faible pourcentage du prix des lignes aériennes, sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique ; ils constituent, en effet, un élément essentiel qui régit la fiabilité des systèmes de distribution d'énergie. De ce fait, les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes environnementales [30]. Leur fonction première qui est de s'opposer au passage du courant électrique entre les conducteurs et les parties mise à la terre. Cette fonction est réalisée par l'utilisation de matériaux non conducteurs à profil adapté pour assurer une distance suffisamment longue dans l'air pour empêcher toute décharge disruptive avec les structures mises à la terre [31, 32]. De plus il est nécessaire que le choix du type d'isolateur, les contrôles de réception, la surveillance en exploitation doivent être faits avec un maximum de soin. Outre la fonction électrique, les isolateurs ont également le rôle de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents et les structures de soutien (pylônes) des lignes aériennes. Ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage) [32].

Les isolateurs utilisés dans les lignes aériennes sont exposés à diverses formes et degrés de contraintes. Parmi celles-ci, la pollution atmosphérique est considérée comme étant le principal facteur à l'origine des défauts enregistrés sur les lignes aériennes. La performance diélectrique des isolateurs de haute tension pourrait être dégradée par la présence de la pollution à leurs surfaces. Cette pollution engendre une diminution conséquente de la tension de tenue des isolateurs en abaissant leur impédance superficielle [32, 33]. En effet, portés par le vent et déposés sur la surface isolante des chaînes des isolateurs, et en présence d'humidité, les divers dépôts polluants deviennent plus ou moins conducteurs et des courants de fuite s'établissent à la surface des isolateurs [32, 33]. À partir d'une certaine intensité de ces courants, la couche conductrice s'assèche dans les zones à forte densité de courant. Il en résulte une modification de la répartition du potentiel et du champ électriques conduisant à la formation de petits arcs électriques à la surface isolante et peuvent éventuellement, se développer en provoquant le contournement total des isolateurs [33].

I.2 Isolateurs

Un isolateur est un composant destiné à fixer, maintenir ou soutenir les conducteurs ou les pièces électriques nues afin d'empêcher les fuites de courant et les courts circuits. Il est constitué principalement d'un matériau isolant solide qui présente une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle [31].

Les isolateurs sont caractérisés par :

- **Ligne de fuite** : la distance la plus courte le long de la surface d'un isolateur entre les deux électrodes.
- **Ligne de contournement** : la distance la plus courte dans un gaz entre les électrodes.

I.2.1 Principaux types d'isolateurs

L'utilisation des diélectriques solides est très répandue dans les lignes aériennes et les postes. On les rencontre sous ces différentes formes suivantes :

1. Isolateurs supports ;
2. Isolateurs de traversées ;
3. Isolateurs de lignes aériennes.

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs : les isolateurs rigides et les éléments de chaînes.

- **Isolateur rigide** : Un isolateur rigide (Figures 1.1 et 1.2) est relié au support par une ferrure fixe. Il est principalement soumis à des efforts de flexion et de compression, lorsqu'il est placé en position verticale. Il peut, dans certains cas, être placé horizontalement, voire oblique. L'isolateur rigide est utilisé pour les lignes aériennes dont le niveau de tension ne dépasse pas 60 kV.
- **Isolateurs suspendus ou éléments de chaînes** : Ils sont constitués d'un matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs afin de donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs. La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (chaîne d'alignement), soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage). Il existe deux types principaux d'éléments de chaînes :
 1. **Isolateurs à capot et tige** : Pour des tensions dépassant les 30 kV, les isolateurs de type pin deviennent plus encombrant, lourd et peu rentable. Dans ce cas, les

isolateurs de type suspension sont utilisés. De tels isolateurs sont constitués de disques en céramique ou en verre connectés en série par des liaisons métalliques pour former une chaîne. Le conducteur est suspendu à l'extrémité inférieure de la chaîne, tandis que l'autre d'extrémité de la chaîne est fixée au bras transversal du support (pylône). Le nombre d'isolateurs dans une chaîne dépend de la tension de service, des conditions météorologiques, de la taille de l'isolation, etc. Si un élément de la chaîne est détérioré, uniquement cet élément peut être remplacé au lieu de la chaîne entière. La mise en série de disques rend le fonctionnement de la chaîne plus souple et réduit les contraintes mécaniques. Chaque élément est constitué d'un capot, d'une partie isolante en forme de jupe et d'une tige. La forme de la tête est conçue de sorte que les efforts de traction appliqués à l'isolateur se transforment, autant que possible, en compression des diélectriques sur lesquels apparaissent, toutefois, inévitablement certaines contraintes de cisaillement [32, 33]. On peut trouver plusieurs profils d'isolateurs capot et tige (standard, antibrouillard, ouvert, sphérique).

2. **Isolateurs à long fût** : Le terme "long fût" est en fait utilisé pour une conception spécifique des isolateurs en porcelaine (en composite) qui a été introduite pour la première fois dans les années 1920 comme une alternative aux isolateurs à capot et tige.
 - a. **En céramique** : L'isolateur à long fût (Fig. 1.2) est constitué d'un bâton cylindrique en céramique ou en porcelaine muni d'ailettes, à chaque extrémité duquel est fixée une pièce métallique de liaison. Ils sont utilisés pour les lignes haute tension. Leur avantage est d'être plus léger que les isolateurs à capot et tige avec un inconvénient de fragilité aux chocs mécaniques [32, 33].
 - b. **En matériaux synthétiques** : L'intérêt principal de tels isolateurs (Fig. 1.3) est leur meilleure tenue à la pollution, leur faible encombrement, leur résistance au vandalisme et leur légèreté, en particulier lorsqu'on les compare aux chaînes d'isolateurs pour les lignes de tension électrique élevée [32, 33]. De par leur constitution, ces isolateurs sont appelés composites.



Figure I.1. Isolateur rigide en verre



Figure I.2. Isolateurs à long fût en porcelaine



Figure I.3. Isolateurs à long fût en composite



Figure I.4. Isolateurs à capot et tige

I.2.2 Différents profils des isolateurs à capot et tige

Les caractéristiques des éléments d'isolateurs de type capot et tige sont régies par la norme CEI-60305 [30]. Dans la pratique, on distingue différents types de profils :

- **Profil standard** : La forme et les dimensions sont en accord avec la normalisation internationale CEI-305, à cause de leur planéité, les rainures internes bien espacées et la longueur de la ligne de fuite supérieure à la demande standard (Figure 1.4). Ce type est très utilisé dans les endroits à pollution modérée [32, 33].

- **Profil brouillard** [32, 33]: Plus large que le profil standard, muni de rainures à grande profondeur. l'écartement entre les anneaux permet un bon nettoyage par le vent ou la pluie et facilite le lavage manuel si nécessaire. L'espacement prévient également l'apparition d'arcs entre les anneaux adjacents dans les conditions sévères de pollution. Le profil et les grands espacements des rainures permettent un auto-nettoyage par l'action du vent et de la pluie. Cette conception permet également un lavage manuel facile si c'est nécessaire.
- **Profil ouvert** [32, 33]: L'absence complète des rainures internes réduit l'accumulation des agents polluants sur la surface inférieure, grâce au courant d'air. Ce type de profil est particulièrement efficace en région désertique où le lavage par pluie est très rare.
- **Profil sphérique** [32, 33]: Ce type de profil donne une ligne de fuite équivalente au profil standard, mais l'absence de rainures facilite le nettoyage manuel.

I.2.3 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés dans la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine. Mais, durant ces dernières années, la porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients principaux qui sont : le poids lourd des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages. Ces dernières années, on s'intéresse plus particulièrement à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères.

A. Céramique

Le développement et la fabrication des isolateurs céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs utilisés dans des lieux où les contraintes mécaniques sont très importantes, on utilise de préférence des céramiques à grains très fins. Souvent, on trouve les céramiques dans les postes: isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel et des bornes de traversées des transformateurs de puissance [31- 34].

B. Verre

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et de haute tension sont généralement en verre. Parmi les avantages que présente le verre, le prix est bas et la détection

(observation) des défauts est très facile. On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit [31- 34].

C. Matériaux synthétiques

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un corps en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique [32]. Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. De plus, les isolateurs composites ont un plus petit diamètre que les isolateurs en céramique, de sorte que les isolateurs composites accumulent moins d'impuretés et de glace à leur surface que les isolateurs en céramique [32- 34].

L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécaniques, atmosphériques...).

I.2. 4 Choix des isolateurs

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service [33]. Les isolateurs sont choisis en fonction:

- de la tension de service de la ligne ;
- des efforts mécaniques auxquels ils sont soumis (poids des conducteurs et du givre, action du vent, tension mécanique des conducteurs éventuellement);
- de la pollution du site, les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.
- du prix de revient de la ligne et de son importance dans le cas de choix de la nature (rigides ou suspendus) des chaînes d'isolateurs. En général, pour des petites sections de conducteurs, une ligne sur isolateurs rigides est moins coûteuse qu'une ligne sur isolateurs suspendus ;

Toutefois, même avec un bon choix des isolateurs, l'isolation d'une installation électrique n'est jamais à l'abri d'un incident. La sévérité de la pollution d'un site peut changer, temporairement ou durablement et le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant.

I.3 Isolateurs composites

Depuis leur développement dans les années soixante, les isolateurs composites remplacent de plus en plus les isolateurs en porcelaine dans les réseaux de transport de l'énergie électrique. Ils présentent de nombreux avantages par rapport aux isolateurs traditionnels en céramique et en verre. L'utilisation massive des isolateurs polymériques a entraîné de nombreuses études [34 - 39]. visant à maîtriser et améliorer les performances en service de ce type d'isolateurs.

Les matériaux composites ont connu une utilisation croissante dans les systèmes et composants de haute tension au cours des dernières décennies. Au début de leur utilisation, les industriels et les équipes de recherches attendaient qu'ils présentent une très bonne résistance à la dégradation due aux conditions de service rencontrées (humidité, oxygène, rayon ultra-violet, variation de température). Cependant, l'expérience, l'observation et les recherches menées ont montré que tous les diélectriques polymères font l'objet de dégradation sous contraintes appliquées ou induites durant leur exploitation pouvant mener à un avarie du système [34 - 37].

Ces dernières années, des matériaux isolants composites présentant une excellente résistance aux contraintes environnementales ont été développés. La recherche et le développement relatifs à ce type de matériaux ont été intensifiés [34, 38 - 43].

L'un des points forts pour ce type d'isolateur est sa performance à minimiser les contournements dus à la présence de couche de pollution. Le caractère hydrophobe de la surface de ces isolants inhibe la formation d'une couche de pollution humide, réduisant les courants de fuite et par conséquent le risque d'amorçages de contamination.

La recherche pour améliorer la durée de vie des isolateurs composites a donc été dirigée principalement vers l'amélioration de leur performance sous forte contamination, sur l'hypothèse que les décharges autour des bandes sèches serait l'agent de vieillissement primaire [44 - 46].

Les enquêtes dans le monde entier montrent, cependant, que des isolateurs composites sont souvent appliqués pour des raisons autres que leur performance sous forte contamination. Les importantes considérations à cet égard sont leur faible coût, faible poids, et la résistance au vandalisme [32].

I.3.1 Structure des isolateurs composites

Les fabricants des isolateurs composites utilisent différents matériaux qui, combinés entre eux, concourent, grâce à leurs particularités respectives, à doter l'isolateur de toutes les caractéristiques mécaniques, électriques et fonctionnelles nécessaires.

Un isolateur composite est constitué, en général, d'une partie isolante qui consiste en un noyau interne d'un matériau approprié, d'un revêtement extérieur et des pièces métalliques de liaison, scellées sur le noyau et qui assure la fixation de l'isolateur au pylône et au conducteur ou à un autre isolateur.

Plusieurs types de matériaux diélectriques composites ont été développés par les fabricants, chacun présentant des propriétés particulières. Dans le domaine des isolateurs extérieurs, trois familles sont particulièrement utilisées : les résines époxy, les élastomères éthylène-propylène et les élastomères silicones.

Les élastomères silicones sont les plus utilisés dans les systèmes d'isolation extérieurs des réseaux de transport. Une étude réalisée par le groupe de travail 22.03 de la CIGRE [40] a montré que les isolateurs composites utilisent pour la plupart l'élastomère de silicone comme matériau de revêtement. L'EPDM et les autres matériaux ne sont utilisés que minoritairement. Selon S. Gurbanski et A. E. Vlastos [41], les isolateurs en silicone ont un meilleur comportement que les isolateurs en EPDM. En effet, tous les isolateurs en silicone qui ont été testés ont pu recouvrer leur hydrophobicité, ce qui n'est pas le cas pour des isolateurs en EPDM.

De nombreux travaux ont montré que les surfaces en élastomère de silicone recouvraient plus rapidement leur hydrophobicité que les surfaces en EPDM [42 - 45]. Par rapport à d'autres matériaux, les silicones présentent une très longue durée hydrofuge, également connu sous le nom hydrophobie. Les parties de l'isolation en composés de caoutchouc de silicone repousse l'eau après de nombreuses années ; l'eau adhère donc difficilement à leur surface. Par conséquent, les impuretés qui se trouvent à la surface des isolateurs composites sont dissoutes moins facilement que celles qui s'accumulent à la surface d'isolateurs en céramique. Le courant de fuite est réduit, et donc les amorçages sont eux aussi réduits. Un tel effet peut également être obtenu par traitement de verre et des isolateurs en porcelaine avec un revêtement de silicone, ce qui rend les procédés de nettoyage répétés inutiles [33,34, 46].

Les isolateurs en matériaux synthétiques bénéficient des possibilités de fabrication de la FRP (fibre reinforced plastic) plastique renforcée avec de fibres, et en particulier du fait que les tiges de PRF peuvent être produites sans cesse dans une pièce en longueur allant jusqu'à

20 m, ce qui est impossible avec les matériaux isolants conventionnels tels que la porcelaine et le verre. Les isolateurs composites long fût sont actuellement produits en des longueurs de 0,1 à 1 m pour les systèmes de réseau basse tension et moyenne tension, et en longueurs jusqu'à 10 m et plus pour les systèmes ultra haute tension.

D'autre part, les silicones ont une résistivité électrique élevée et un faible facteur de perte diélectrique. Ils présentent un très faible vieillissement électrique. En plus, les élastomères de silicone sont particulièrement résistants aux rayonnements UV. Même des conditions météorologiques difficiles, que l'on trouve dans les régions côtières ou désertiques, ont peu d'effet sur leurs propriétés [47].

Les Silicones présentent une faible inflammabilité, ils ne s'enflamment qu'à des températures très élevées. Les matériaux isolants en silicone sont extrêmement élastiques [47]. Cependant, les isolateurs composites semblent plus sensibles au vieillissement que les isolateurs en céramique [48]. Les signes du vieillissement de ces isolateurs peuvent être les suivants: un dépôt blanchâtre à leur surface; le durcissement d'une mince couche de leur surface qui peut occasionner des micro-fractures; la formation irréversible de chemins carbonisés et conducteurs à leurs surfaces; et même, la formation irréversible de micro-canaux, conducteurs ou non, dans la partie isolante.

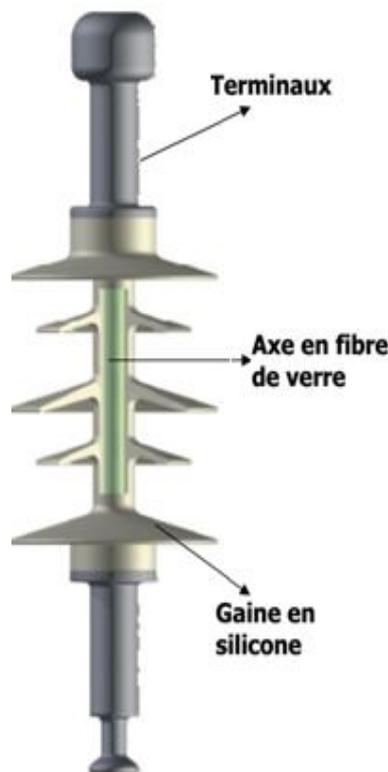


Figure I.5. isolateur composite

Les isolateurs composites se composent des parties principales suivantes (Figure I.5):

1. L'axe (tige) est en résine époxy renforcée avec des fibres de verre: Fournit le cadre mécanique principal de l'isolateur (traction, compression, flexion et torsion) et en même temps il est aussi le principal matériau isolant.
2. Gaine en caoutchouc de silicone: La tige en résine et en fibre de verre est enfermée dans un boîtier en caoutchouc de silicone. La gaine en silicone est la responsable de toutes les caractéristiques électriques, d'isolation et de résistance au cheminement et à l'érosion qui assurent à l'isolateur une vie utile de longue durée.
1. Extrémités métallique de montage: Les terminaux métalliques sont normalement en acier estampé et zingué à chaud, ou en acier inoxydable, en fonte sphéroïdale à cœur noir, en alliage d'aluminium, en alliage de cuivre. Le degré élevé de standardisation des terminaux assure une interchangeabilité aisée avec les isolateurs traditionnels.

I.3.2 Causes de défaillance

Les principales causes qui conduisent à l'échec des isolateurs composites sont:

1. **Manutention** : Si les isolateurs en composite comportent de nombreux avantages, ils ne sont pas indestructibles. De l'usine du fabricant jusqu'à l'installation finale, les isolateurs traversent plusieurs étapes : réception, stockage, transport, manipulation et installation en ligne. Toutes ces étapes exigent un certain degré d'attention et de précaution. Une partie isolante endommagée ou déchirée pourrait compromettre la ligne de fuite ou exposer le noyau interne, et donc diminuer l'isolation ou abrégé la vie de l'isolateur [49].
2. **Défauts de fabrication** : Un nombre important des défauts est dû à la qualité inadéquate lors de l'étape de fabrication d'isolateurs composites. En général, les défauts sont soit de moulage ou de fixation des raccords d'extrémité au noyau par le procédé de matriçage [50].
3. **Effet Couronne** : La distribution de potentiel le long des isolateurs composites est fortement non uniforme en raison de l'absence d'une capacité distribuée ou parasite, contrairement aux isolateurs en porcelaine et en verre présentant une distribution plus au moins uniforme [49]. La contrainte de champ est une fonction de la tension de la ligne et de la longueur de l'isolateur. Les décharges Couronne est une conséquence de la contrainte de tension qui peut nuire à la performance électrique et

mécanique de l'isolateur composite. Dans des conditions sèches, si le champ électrique dépasse le seuil de 1,5 kV / mm, la probabilité d'avoir une décharge couronne est très élevée [51]. Cependant, dans des conditions humides, l'effet couronne est observé à des grandeurs de champ électrique plus bas à 0,3–0,4 kV/mm [6]. L'amplitude du champ électrique de seuil pour la décharge couronne dépend non seulement de l'état de la surface (sec ou humide), mais aussi du type de tension appliquée (AC ou DC). En outre, les défauts de fabrication ou les bords rugueux et pointus sont des régions de stress électrique élevé. Cette contrainte électrique élevée localisée pourrait également provoquer une décharge couronne [52].

4. **Vandalisme** : Les isolateurs composites sont moins sujets à des dommages liés au vandalisme contrairement aux isolateurs en porcelaine et en verre. Les isolateurs composites sont capables de résister à de graves lésions par projectiles sans aucune défaillance électrique ou mécanique immédiate. Cependant, si les projectiles déchirent la gaine de revêtement et exposent la tige en fibre de verre à l'environnement, une défaillance peut se produire en raison de la formation progressive d'un chemin conducteur le long de la tige (tracking). Des inspections régulières devraient être effectuées dans les régions qui sont sujettes au vandalisme.
5. **Contournement (Flashover)**: Un contournement peut être causé par des surtensions dues aux commutations des réseaux électriques de haute tension ou des coups de foudre. Le contournement peut également se produire à la tension nominale du système sur les surfaces des isolateurs, en raison de la bande sèche engendrée par les courants de fuite circulant dans couche de pollution. Cependant, le mécanisme de contournement sur les surfaces des isolateurs composites est différent de celui sur les isolateurs en céramique [53]. Il est connu que les isolants composites sont de nature hydrophobe. La nature hydrophobe se dégrade en raison de la contrainte électrique élevée et une pollution élevée. Les isolateurs âgés perdent leurs hydrophobies et deviennent facilement mouillable. En conséquence, le courant de fuite des isolateurs augmente et leur tension de tenue diminue sensiblement, conduisant à des contournements [54]. Les contournements peuvent endommager ou perforer les surfaces des isolateurs.

I.4 Pollution des isolateurs

Les isolateurs destinés à être installés à l'extérieur, doivent supporter des différences de températures comprises entre -25°C et +55°C et être insensible aux effets de la condensation,

de la pluie, des changements brusques de température et du rayonnement solaire. Pour définir l'isolement des lignes de transport et de distribution, on distingue six niveaux d'isolement, définies par leur ligne de fuite spécifique, couvrant les quatre zones de pollution normalisées comme défini dans l'article 3 de la CEI 815 et les deux niveaux correspondant aux zones de pollution exceptionnelle et aux zones sahariennes, à savoir : Niveau de pollution faible, moyen, fort, très fort, exceptionnel et saharienne [46].

La pollution des isolateurs constitue un problème majeur dans la dégradation de l'isolement des ouvrages (postes et lignes) de haute tension [46]. Portés par le vent et déposés sur la surface isolante des chaînes des isolateurs, et en présence d'humidité, les divers dépôts polluants deviennent plus ou moins conducteurs. Ce qui engendre une diminution conséquente de la tension de tenue des isolateurs. Des arcs électriques prennent naissance à la surface isolante et peuvent éventuellement, se développer en provoquant le contournement total des isolateurs.

La tension de contournement d'un isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité des dépôts polluants, c'est à dire du degré de pollution, ainsi que de la répartition de cette couche sur les surfaces des isolateurs [52].

Le dimensionnement de l'isolation externe vis-à-vis de la pollution pose un certain nombre de problèmes spécifiques. L'un des plus fondamentaux est la détermination du degré de pollution du site où l'isolation doit être installée [46]. La mesure de ce degré de pollution est indispensable pour assurer un service sans défaillance. Pour cela, on procède à un choix judicieux des isolateurs et la mise en place, si nécessaire, de solutions complémentaires fiables et économiquement justifiables [34, 46].

Selon les normes, il est possible d'identifier la pollution selon sa nature. Ainsi, la pollution est classée en trois catégories : naturelle (marine, agricole et désertique), industrielle (proximité des industries) et mixte (naturelle et industrielle) [34, 46].

Les couches de pollution se déposent progressivement sur les surfaces des isolateurs des lignes de haute tension, du fait qu'ils forment des obstacles à l'écoulement d'air, transportant de diverses substances organiques ou minérales (poussières, sel marin, fumée, engrais,...). La couche de pollution se concentre en général, dans les parties protégées contre les facteurs de nettoyage naturel (vent violent, pluie abondante,...) [34, 46].

Lorsque l'isolateur est propre ou recouvert d'une couche de pollution sèche, la résistivité à la surface est très grande et le courant capacitif circulant à la surface est très faible. Par contre, et quelle que soit sa nature, le dépôt de pollution accumulé à la surface de l'isolateur provoque, en présence de l'humidité, la formation d'une couche électrolytique augmentant

ainsi la conductivité superficielle. Cette couche devient, par la suite, le siège d'un courant de conduction de valeur relativement importante. Ce qui peut conduire à la formation et au développement d'arcs électriques le long de la surface de l'isolateur [34, 46].

Selon les conditions aux quelles est soumis l'isolateur, trois cas peuvent se présenter :

- Arc non localisé : Dans ce cas l'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçe à un autre endroit et ainsi de suite.
- Arc fixe : Contrairement au cas précédant, l'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (source continue), soit en se réamorçant au même endroit (source alternative). Cet arc peut entraîner par effet thermique, une dégradation du support isolant.
- Court-circuit (Contournement) : Dans ce cas, l'arc électrique atteint l'électrode opposée. Ainsi, la formation d'un pont conducteur sur la surface isolante polluée favorise le passage d'un fort courant, ce cas engendre la rupture totale de l'isolation [34, 46].

I.5 Conclusion

L'amélioration des connaissances sur la performance des isolateurs est nécessaire si l'on veut augmenter la fiabilité du transport et de la distribution de l'énergie électrique. Une ligne aérienne est constituée d'un agencement judicieux de pylônes, de fils conducteurs qui servent à transporter l'énergie électrique et d'isolateurs. Outre leur fonction première qui est de s'opposer au passage du courant, les isolateurs ont également le rôle de maintenir mécaniquement les conducteurs dans des conditions prédéterminées. De nos jours, les isolateurs et les chaînes d'isolateurs sont en verre, en porcelaine et en matériaux composites. Les deux premiers types sont considérés comme des isolants classiques.

L'utilisation d'isolateurs polymères sur des lignes de distribution et de transmission est bénéfique en raison de leurs nombreux avantages relatifs aux performances dans les environnements contaminés, aux coûts de fabrication et de manutention réduits, au poids léger, à la manipulation facile, à l'entretien réduit, à la résistance au vandalisme, à l'encombrement réduit, etc. En raison de ces propriétés, de tels isolateurs gagnent en popularité dans le monde entier et remplacent de plus en plus les isolateurs classiques en céramique et en verre. Les isolateurs en polymère sont utilisés sur des lignes de transmission

par les compagnies de transport d'énergie pour diminuer essentiellement le nombre de pannes causées par la pollution.

CHAPITRE II

METHODES NUMERIQUES DE CALCUL DU POTENTIEL ET DU CHAMP ELECTRIQUES

II.1 Introduction

Le calcul du champ et du potentiel électriques en tout point d'un système de haute tension, est une tâche compliquée, non pas à cause de la complexité des équations aux dérivées partielles qui le décrivent, mais plutôt, en raison de la géométrie complexe du système physique, des conditions aux limites, des formes irrégulières des diélectriques, et dans certains cas, de la présence d'une couche conductrice [55 - 58].

Pour remédier à ce problème, les scientifiques ont développé des méthodes de calcul qui peuvent être classées en deux catégories: les méthodes analogiques et les méthodes numériques. Les méthodes analogiques ne sont plus employées, car elles sont peu commodes et inadéquates pour les problèmes à trois dimensions [55]. Par contre, vu les progrès de l'informatique, les méthodes numériques sont de plus en plus utilisées pour la détermination de façon précise la distribution du champ et du potentiel électriques. Les méthodes numériques sont essentiellement de type différences finies, éléments finis, charges équivalentes et éléments finis de frontières. Ces méthodes sont basées sur la résolution de l'équation aux dérivées partielles de Laplace en imposant les conditions aux frontières adaptées à chaque problème [55 - 60].

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux équations de base de l'électromagnétisme appliquées aux diélectriques. Celles-ci débouchent sur l'équation aux dérivées partielles classiques connues sous le nom de l'équation de Laplace. Nous évoquons, par la suite, les méthodes numériques les plus utilisées dans les techniques de la haute tension, en citant leurs avantages et leurs inconvénients.

II.2 Equations de Maxwell

II.2.1 Mise en équations

La réalisation la plus remarquable de James Clerk Maxwell était d'unifier en un seul ensemble d'équations l'électricité, le magnétisme et l'induction. Les équations de Maxwell sont formées par quatre équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques caractérisés par le champ magnétique \vec{H} et l'induction magnétique \vec{B} aux phénomènes électriques caractérisés par le champ électrique \vec{E} et le déplacement électrique \vec{D} . Les équations qui gouvernent la répartition du potentiel, dans un milieu donné dérivent des équations de Maxwell. Ces équations sont [58]:

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho_v \quad (\text{II.2})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.3})$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{II.4})$$

ρ_v est la densité volumique de charges et \vec{j} le vecteur densité de courant.

Aux quatre équations de Maxwell précédentes, s'ajoutent les relations constitutives qui lient \vec{D} à \vec{E} , \vec{j} à \vec{E} et \vec{B} à \vec{H} :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.6})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.7})$$

où ϵ , μ , et σ représentent respectivement la permittivité électrique, la susceptibilité magnétique, et la conductivité électrique du milieu.

Dans le cas d'application d'une différence de potentiel alternative et en tenant des relations constitutives, on peut écrire les équations (II. 1) et (II.3) comme suit :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (\text{II.8})$$

$$\text{div} (\epsilon\vec{E}) = \rho_v \quad (\text{II.9})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega\vec{E} \quad (\text{II.10})$$

ω étant la pulsation de la source et j l'unité imaginaire.

Dans les équipements HT considérés, le champ magnétique est faible ; le second membre de l'équation (II.8) peut être négligé, ce qui donne :

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = 0 \quad (\text{II.11})$$

Les équations (II.9) et (II. 11) gouvernant les grandeurs électriques peuvent être

découplées de celles qui gèrent les grandeurs magnétiques [58]. L'équation (II.9) n'est rien d'autre que la forme locale du théorème de Gauss qui traduit la conservation de la charge, tandis que l'équation (II. 11) permet de considérer que le champ \vec{E} dérive d'un potentiel ϕ avec :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad} \phi \quad (\text{II.12})$$

En remplaçant le champ dans l'équation (II.9) par son expression de la relation (II. 12), on obtient l'équation:

$$\text{div} (-\varepsilon \overrightarrow{grad} \phi) = \rho_v \quad (\text{II.13})$$

L'expression (II.13) est appelée équation de Poisson. Elle décrit la distribution du potentiel dans un milieu de permittivité absolue ε et une densité de charge volumique ρ_v . Cependant, dans la plupart des équipements de haute tension, les charges d'espace ne sont pas présentes et donc la densité volumique de charge ρ_v est nulle. Dans ces conditions, on aura l'équation dite de Laplace :

$$\text{div} (\overrightarrow{grad} \phi) = 0 \quad (\text{II.14})$$

Il est de même, pour les milieux conducteurs tels que les électrodes, l'équation (II.14) régie la répartition du potentiel.

II. 2.2 Conditions aux limites

Les équations de Maxwell permettent de déterminer la manière dont les composantes du champ électromagnétique se conservent (ou non) à l'interface de deux milieux présentant des propriétés diélectriques différentes. Il est alors d'usage de décomposer le champ électromagnétique en deux composantes particulières : l'une tangente, et l'autre normale à la surface de séparation.

Dans le cas où plusieurs milieux coexistent, ce qui est généralement le cas dans les problèmes HT, on aura à résoudre des équations dans des régions de propriétés physiques différentes (isolant solide, air) présentant une ou plusieurs interfaces communes. En plus des interfaces isolant-isolant, on a aussi des interfaces conducteur-isolant.

Ce procédé a permis de dégager des résultats importants à propos des conditions aux limites à la surface de séparation des deux milieux. Ces résultats concernent les composantes tangentielles et normales, à la surface de séparation du champ électromagnétique [61].

Les conditions d'interface à l'interface entre les différents milieux sont:

$$\begin{aligned}D_{n1} - D_{n2} &= \rho_s \\ E_{t1} - E_{t2} &= 0\end{aligned}$$

Ces relations expriment la discontinuité de la composante normale de l'induction électrique \vec{D} et la conservation de la composante tangentielle du champ électrique \vec{E} à la surface de séparation des deux milieux.

En absence de charges à la surface de séparation des deux milieux, la condition relative à la composante normale de l'induction électrique devient:

$$D_{n1} - D_{n2} = 0$$

II. 2.3 Conditions aux frontières

Les principaux types de condition de frontière existent en éléments finis : Dirichlet et Neumann. La condition de type Dirichlet correspond à spécifier les valeurs que la solution doit vérifier sur les frontières du domaine, ici le potentiel électrique. Cette condition est la plus simple des conditions limites. La condition de type Neumann, qui se veut l'imposition les valeurs des dérivées (gradient) que la solution doit vérifier sur les frontières du domaine, correspond ici au champ électrique [62].

II.3 Modèle mathématique

La distribution du champ électrique peut être obtenue par approximations des équations de Maxwell. Ces approximations prennent différentes formes selon les propriétés matérielles de l'équipement [56 - 58].

Le potentiel en un point joue un rôle important dans l'obtention de toute information concernant le champ électrique en ce point. L'intensité du champ électrique peut être déduite

de la relation champ-potentiel suivante [56 - 58]:

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{II.15})$$

La densité de flux électrique peut être trouvée en utilisant l'intensité du champ électrique par la relation.

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.16})$$

Le flux D à travers une surface fermée est relié à la quantité de charges intérieures par la relation de Gauss:

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{II.17})$$

L'objectif est d'évaluer le potentiel qui bien sûr peut être trouvé en termes de configuration de charge. Toutefois, ce n'est pas un travail simple vu la répartition exacte des charges en un point n'est pas facilement disponibles [56 - 58].

En combinant des équations (II.15) et (II.17) et en introduisant la permittivité ϵ (relation constitutive $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$), on obtient l'équation:

$$\text{div } \epsilon \overrightarrow{\text{grad}} V = -\rho \quad (\text{II.18})$$

Cette expression est dite équation de Poisson. Cependant, dans la plupart des équipements de haute tension, les charges d'espace ne sont pas présents ou négligeable ($\rho_v = 0$) et donc l'équation à résoudre pour les milieux diélectriques est [56 - 58]:

$$\text{div} \left(\epsilon \overrightarrow{\text{grad}} V \right) = 0 \quad (\text{II.19})$$

L'équation (5) est connue comme l'équation de Laplace.

Pour les milieux conducteurs en régime stationnaire, il vient, puisque $\text{div } \vec{J} = 0$ et $\vec{J} = \sigma \vec{E}$:

$$\text{div} \left(\sigma \overrightarrow{\text{grad}} V \right) = 0 \quad (\text{II.20})$$

L'équation de Laplace en coordonnées cartésiennes est :

$$\operatorname{div} \overrightarrow{\operatorname{grad}} V = \frac{\partial^2 V}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 V}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 V}{\partial^2 z} \quad (\text{II.21})$$

Le logiciel de calcul détermine le potentiel électrique pour obtenir la distribution de champ en résolvant l'équation aux dérivées partielles suivante [57, 58] :

$$-\operatorname{div} \varepsilon \overrightarrow{\operatorname{grad}} V - \operatorname{div} \sigma \overrightarrow{\operatorname{grad}} V = 0 \quad (\text{II.22})$$

II.4 Méthodes de détermination du champ et du potentiel électriques

Pour déterminer la distribution de champ électrique, plusieurs méthodes sont employées à telles que la Méthode des Différences Finies (M.D.F), la Méthode des Eléments Finis (M.F.F), la Méthode des Eléments Finis de Frontière (M.F.F.F), la Méthode des Charges Fictives (M.C.F), etc. Cependant, la complexité dans la détermination du champ électrique réside dans le manque de méthodes d'analyse en raison de la géométrie complexe du système physique, les conditions aux limites et des calculs mathématiques complexes. Les grandes catégories dans lesquelles la détermination du champ électrique sont analytiques, expérimentaux et les méthodes numériques [58, 62, 63].

L'approche analytique donne la répartition exacte de champ électrique en résolvant les modèles mathématiques de géométries physiques simples. Par exemple, le champ électrique autour d'une charge ponctuelle ou d'un conducteur linéique peut être facilement résolu en utilisant des formules de Gauss simples. En raison de difficultés provenant des géométries complexes et des conditions aux limites, l'évaluation de la distribution du champ électrique devient très problématique en utilisant des techniques d'analyse [60 - 62].

Les configurations expérimentales typiques pour la mesure du potentiel ou du champ électrique le long d'un isolateur de haute tension comprennent des sondes électrostatiques, des dipôles sphériques et des capteurs électro-optiques [63].

La sonde électrostatique est une des techniques les plus populaires utilisées dans le laboratoire pour mesurer le champ électrique autour d'une chaîne d'isolateurs. La configuration et les procédures expérimentales impliquées sont simples et rentables. Le système utilise un procédé indirect dans lequel le champ électrique est obtenu à partir de la

mesure de la distribution du potentiel [63]. On cite aussi l'utilisation de dipôles sphériques qui est une approche de longue date pour déterminer la distribution de champ électrique autour d'un isolant [60]. Cette méthode est généralement utilisée pour les isolateurs en verre ou en céramique qui ont des pièces métalliques intermédiaires le long de la chaîne d'isolateurs. Cependant, avec l'exigence de mesure plus précise, des outils utilisant des capteurs optiques sont mis au point donnant des mesures de la distribution de potentiel et de champ à une grande précision [63, 64].

Une alternative intéressante aux mesures expérimentales se trouve dans l'utilisation des méthodes numériques (la M.F.F, la M.F.F.F, ...) dont l'application aux domaines de l'électrotechnique et des hautes tensions n'est plus à démontrer. Ces méthodes ont été utilisées avec succès dans l'étude de la distribution du champ et du potentiel électriques autour des isolateurs propres et recouverts de couche de pollution. Cependant, la détermination de la distribution du champ et du potentiel électriques à l'intérieur et autour des équipements de haute tension est un problème de très grande complexité vue les formes géométriques complexes des équipements et des formes irrégulières des diélectriques [58, 60 - 62].

Les approches numériques ont toujours été une technique utile pour résoudre de nombreux problèmes en haute tension. Ces approches deviennent plus importantes lorsque les mesures pratiques sont difficiles ou impossibles à mettre en œuvre, très risquées et coûteuses avec l'installation des équipements de laboratoire sophistiqués [65, 66]. Les calculs numériques par le biais des expressions analytiques (équations de Maxwell) [67 - 69] ou des représentations de circuits [70] peuvent être de bonnes alternatives, mais ces derniers sont assez complexes et non applicables pour les divers problèmes pratiques. Pour ces raisons, les techniques numériques de modélisation et de simulation sont les plus préférées pour certains chercheurs [56, 57, 60 - 62, 64].

Les méthodes numériques les plus connues et les plus utilisées en HT et spécialement pour la détermination de la distribution du champ et du potentiel consistent en la Méthode des Différences Finies (M.D.F), la Méthode des Éléments Finis (M.E.F), la Méthode de Simulation de Charges (M.S.C) et la Méthode des Éléments Finis de Frontière (M.E.F.F) [61].

Notant qu'un nombre important de codes de calcul pouvant être utilisés pour effectuer l'analyse du champ électrique sur les systèmes d'isolation en HT, se basent essentiellement sur deux méthodes numériques, à savoir, la Méthode des éléments finis (M.E.F) et la Méthode des Éléments Finis de Frontière (M.E.F.F) [61].

II.4.1 Méthode des Eléments Finis (MEF)

La Méthode des Eléments Finis (M.E.F) est un outil numérique très puissant pour la résolution numérique des équations aux dérivées partielles représentant analytiquement le comportement de certains systèmes physiques sur un domaine spatial fini. Elle a connu son plus fort développement d'abord en mécanique [61, 62]. Elle a été adaptée plus tard à l'électromagnétisme pour la résolution des équations de Maxwell qui régissent les phénomènes électromagnétiques [58, 61, 62].

La M.E.F est une méthode générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique: problèmes stationnaires ou non stationnaires, linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine géométrique quelconque. En plus, elle s'adapte bien aux milieux hétérogènes [62].

La Méthode des Eléments Finis utilise une approximation par parties de la fonction inconnue, pour résoudre une équation différentielle. Cependant, la complexité des géométries des systèmes considérés, rend cela très difficile, voire impossible, pour trouver une approximation de la solution dans l'ensemble du domaine étudié. Pour contourner cette difficulté, le domaine est subdivisé en sous-domaines (éléments finis), sur lesquels on effectue localement une interpolation pour approcher la fonction inconnue [62]. Le domaine considéré est limité par une frontière où la valeur du potentiel est supposée connue.

La méthode consiste à découper le domaine spatial en petits éléments, également appelés mailles. Le maillage est une étape très importante, puisque le choix de la forme de l'élément de maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus. Il est donc nécessaire de trouver la forme et le degré d'approximation de celui-ci, qui soient les plus adaptés à la géométrie du domaine d'étude. Il existe un grand nombre de formes géométriques pour les éléments de maillage tels que les triangles, les rectangles, les quadrilatères arbitraires pour les problèmes à deux dimensions et les tétraèdres, les hexaèdres, les cubes, les prismes pour les problèmes à trois dimensions [62]. Une fois le maillage effectué, de rechercher une formulation simplifiée du problème sur chaque élément issu de la subdivision, c'est-à-dire à transformer par interpolation le système d'équations aux dérivées partielles quelconque en un système d'équations algébriques linéaires à l'aide d'un calcul variationnel ou des méthodes de minimisation de l'erreur comme la méthode des résidus pondérés [62, 71]. Le choix des polynômes comme fonction d'interpolation est du au fait qu'ils sont faciles à intégrer et ou à différencier. Le degré du polynôme dépend du nombre de nœuds assignés à chaque élément [71], de la nature et du nombre d'inconnues à chaque nœud, et surtout du degré de dérivabilité

des variables apparaissant dans la forme variationnelle associée aux équations aux dérivées partielles du problème avec conditions aux limites [62].

Les équations algébriques permettent de donner une approximation du potentiel sur chaque élément de la subdivision en fonction des valeurs aux nœuds de l'élément :

$$V = \sum_{i=1}^n \lambda_i V_i \quad (\text{II.23})$$

n est le nombre de nœuds d'interpolations; λ_i les fonctions d'interpolation et V_i les valeurs nodales.

Le principe de base consiste à trouver la distribution des valeurs nodales λ_i qui vérifient les équations aux dérivées partielles et qui remplissent les conditions aux limites. Ceci peut être effectué soit par une méthode variationnelle qui minimise une fonction équivalente au problème différentiel posé, ou en utilisant une méthode de projection comme la projection de Galerkin qui traite directement l'équation aux dérivées partielles [62].

II.4.1.1 Etapes de la Méthode des Eléments Finis

La Méthode des Eléments Finis peut être résumée par les étapes suivantes [62]:

- Définir les nœuds et les éléments (Créer le maillage).
- Etablir, pour chaque élément, la matrice de rigidité élémentaire $[ke]$ reliant les degrés de libertés (déplacements) nodaux $\{ue\}$ et les forces $\{fe\}$ appliquées aux nœuds :

$$[ke] \{ue\} = \{fe\}$$

- Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds

$$[K] \{U\} = \{F\}$$

- Modifier le système global en tenant compte des conditions aux limites.
- Résoudre le système $[K] \{U\} = \{F\}$ et obtenir les déplacements $\{U\}$ aux nœuds.
- Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées.

II.4.1.2 Avantages de la M.E.F

La puissance de la Méthode des Eléments Finis réside essentiellement dans les points suivants [62]:

1. La flexibilité est l'un des plus importants avantages de la M.E.F. Les éléments peuvent avoir plusieurs formes variées et peuvent donc s'adapter facilement à n'importe quelles formes géométriques complexes, et aussi tenir compte des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux.
2. Les matrices formant le système final d'équations sont symétriques. Ce qui simplifie grandement la résolution de celui-ci.
3. La programmation de la méthode est assez simple surtout lorsqu'il s'agit de tenir compte de l'introduction des conditions aux limites
4. La M.E.F a fait ses preuves dans beaucoup de domaines en ingénierie [62]. De plus, avec son développement important, il existe de très bons logiciels commerciaux qui sont basés sur cette méthode et qui la rendent très accessible. Par conséquent, elle est applicable à beaucoup de problèmes sans que nous connaissions nécessairement la M.E.F en détail [62].

II.4.1.2 Inconvénients de la M.E.F

Outre les avantages, la M.E.F présente aussi certains inconvénients tels que [62]:

1. La méthode ouvre la porte à la résolution de problèmes complexes qui peuvent échapper à la maîtrise de l'utilisateur et elle peut être la source d'erreurs diverse et parfois graves.
2. La modification d'une partie de la géométrie entraîne un nouveau maillage et, donc, une remise à zéro dans les calculs.
3. Un mauvais choix du maillage proposé automatiquement par les logiciels, limite la précision des résultats. L'utilisateur doit donc porter une attention particulière lors de cette étape.
4. Le traitement d'une problématique par la M.E.F implique une connaissance parfaite du domaine géométrique et des conditions aux limites. Ce qui complique la mise en œuvre de ce traitement lorsque ce n'est pas le cas.

II.4.2 Méthode des Eléments Finis de Frontière (M.E.F.F)

L'utilisation des équations intégrales de frontière dans la résolution des problèmes afin de déterminer la distribution de champ électrique, est assez ancienne. Cette méthode s'est avérée très efficace dans la résolution des problèmes de champ magnétique et dans la détermination de la distribution du champ électrique, autour des isolateurs pollués [61, 72]. Contrairement à

la M.E.F, la discrétisation de la M.E.F.F est appliquée seulement aux limites de la géométrie du système à étudier, au lieu de l'ensemble de l'espace considéré [61, 73]. Le principe de cette méthode est la reformulation des équations aux dérivées partielles qui décrivent le problème sous forme d'équations intégrales qui ne font intervenir que des inconnues sur la frontière du domaine [61, 72, 73]. Pour cette raison, le temps de calcul et de traitement de la M.E.F.F n'est pas grandement affecté par la taille physique du système [61, 72, 73]. Cependant, la présence de matrices peuplées et équations intégrales pour les problèmes non linéaires ou non homogènes pourrait réduire le calcul des performances [74]. La solution de ces équations est obtenue par la méthode des éléments de frontière qui est basée sur l'application de la technique des éléments finis sur le contour du domaine étudié [75].

L'utilisation de la méthode des éléments de frontière à un certain nombre d'avantages. La discrétisation du milieu infini ne cause plus de problème, puisque tout est ramené sur la frontière du milieu étudié [61, 72, 73]. Par rapport aux autres méthodes numériques comme la M.E.F, ceci représente un gain considérable en nombre de variables à calculer. En plus, lorsqu'une modification au niveau de la géométrie intervient, il n'est pas nécessaire de reconsidérer tout le maillage comme pour la M.E.F. Il suffit seulement de modifier les paramètres de la portion de la frontière considérée [61, 72, 73]. Cependant, il y a des problèmes qui ne peuvent pas être résolus de manière adéquate par la méthode des éléments de frontière ; les problèmes qui ne sont pas symétriques, par exemple [61, 72, 73]. En fait, les problèmes non linéaires ne peuvent pas être mis sous la forme appropriée puisque le domaine qui n'est pas maillé doit être homogène. L'extension de la M.E.F.F aux problèmes non linéaires est difficile. Dans ces conditions, on doit discrétiser la totalité du domaine où se produit le non linéarité matérielle ou géométrique, perdant ainsi l'avantage de la M.E.F.F d'une discrétisation de la frontière uniquement [61, 72, 73].

II.6 Conclusion

Le développement des réseaux électriques de haute tension fait apparaître des problèmes liés aux champs électriques élevés qui peuvent interrompre l'approvisionnement en énergie électrique. Par conséquent, une conception de dispositifs et de systèmes capables de supporter des champs électriques élevés est d'une grande importance. Ainsi, la détermination de la distribution du champ et du potentiel électriques de tout système de haute tension, devient nécessaire. Les équations gouvernant la répartition de ces derniers, dans un milieu donné, dérivent des équations de Maxwell.

Etant donné la difficulté des méthodes analytiques dans la détermination directe du champ et du potentiel électriques à l'intérieur et sur les surfaces des isolants possédant des formes irrégulières et complexes, le recours aux méthodes numériques s'avère indispensable. Ces méthodes sont essentiellement de type différences finies, éléments finis, charges équivalentes et éléments finis de frontières. La méthode des éléments finis semble présenter des avantages importants par rapport aux autres méthodes. En effet, elle est un outil numérique très puissant dans la résolution des problèmes à domaine spatial fini. Elle s'adapte facilement aux différentes géométries et tient compte aussi des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux.

CHAPITRE

III

ÉVALUATION
DU CHAMP ÉLECTRIQUE

III.1 Introduction

Le mesure du champ électrique le long des isolateurs de haute tension est difficile, et devient de plus en plus complexe dans des conditions de pollution. Les montages expérimentaux tels que la sonde électrostatique [76] peuvent être utilisés. Cependant, de tels montages sont sujets à des erreurs périodiques. Même si cela pourrait être amélioré en utilisant des systèmes plus perfectionnés de détection de champ, la fréquence de répétition des essais doivent être importante pour obtenir des mesures plus ou moins acceptables [77]. En fait, il est très difficile de mesurer expérimentalement de façon précise les distributions du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur. En outre, les expériences de laboratoire, souvent difficiles à réaliser, sont coûteuses et complexes. De ce fait, l'utilisation des méthodes numériques constitue une alternative intéressante [55, 57].

De nombreux chercheurs emploient des techniques de simulation numérique via des logiciels disponibles. Cette voie semble être plus pratique et rentable. En fait, la croissance rapide de l'outil informatique a conduit à l'élaboration de logiciels avancés qui peuvent gérer des modèles complexes sans compromettre ni le temps de traitement, ni la précision des résultats [55, 57, 59].

Dans ce chapitre, la simulation par ordinateur sur la base de la méthode des éléments finis est utilisée pour déterminer les distributions du potentiel et du champ électriques le long de l'axe et le long de la ligne de fuite des chaînes d'isolateurs. Trois types de chaînes d'isolateurs sont considérées, deux en verre trempé de type capot et tige. La première chaîne est formée d'isolateurs standards 1512 L. Tandis que la seconde chaîne est formée d'isolateurs aérodynamiques (160 KN: F160 D / 146 DC) destiné à l'isolation des lignes aériennes de 230 kV et 400 kV respectivement. Un isolateur en polymère prévu pour l'isolation des lignes aériennes de 230 kV est également pris en compte. Les modèles des isolateurs sont développés et simulés dans différentes conditions des surfaces : propres et sèches, humides et sous pollution homogène et uniforme. Les résultats de calcul relatifs aux distributions du champ et du potentiel électriques pour les différentes conditions de pollution sont examinés et comparés entre eux. Il convient de souligner que, dans des conditions normales, les courants de fuite circulant dans les couches de pollution humide déposées à la surface des isolateurs conduisent à l'échauffement de la couche de pollution contribuant ainsi à la formation de bandes sèches sur la surface de l'isolateur. D'autre part, Il est bien connu que la densité de courant est la somme du courant de déplacement et de conduction et que cette dernière augmente avec le champ électrique. Les résultats des simulations permettent

d'identifier les régions de champ élevé qui sont vulnérables à des formations de bandes sèches.

III.2 Logiciel de simulation

III.2.1 Description du logiciel

Dans ce travail, la modélisation et la simulation de champ électrique ont été effectuées en utilisant une analyse par éléments finis via le logiciel COMSOL Multiphysics 4.3. Il offre une analyse du champ électrique non linéaire dans le module d'électro-quasi-statiques, qui n'est guère disponible dans les autres logiciels commerciaux.

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis dont le principe est décrit précédemment au chapitre III. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques (la physique des particules, la physique de la matière condensée et la physique appliquée) et applications en ingénierie, et particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques [59]. Il contient la plupart des équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algèbro-différentielles (EAD) sont également possibles. COMSOL Multiphysics est un outil très employé dans des divers secteurs de recherche à savoir électrique, mécanique, fluide, chimique et polyvalent, car il facilite amplement les étapes de modélisation et de simulation, à savoir la définition de la géométrie, les propriétés physiques des matériaux présents et les conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats [59]. Par ailleurs, le logiciel ne demande pas de connaissances approfondies dans les mathématiques ou les analyses numériques. En effet, toutes les équations nécessaires à la résolution sont déjà prédéfinies. Il suffit alors de préciser dans quel domaine (électromagnétisme, transfert de chaleur, acoustique,...) et dans quel régime (stationnaire, temporel, ...), le modèle doit être construit. Les différentes étapes du processus de modélisation et de simulation sont [59]:

- Le choix du ou des modules. Dans notre cas, c'est le module AC/DC qui permet de simuler les champs électriques dans des applications statiques et à basses fréquences.
- La définition de la géométrie qui peut être effectuée directement sur COMSOL ou importée à partir d'un autre logiciel de conception (de dessin).
- La définition des propriétés électriques des matériaux présents. Cela consiste à définir les permittivités relatives et les conductivités volumiques pour chaque partie de

l'isolateur. De plus, il faut définir les conditions aux limites qui se traduisent par le potentiel imposé sur chaque électrode (conditions de Dirichlet).

- Le maillage ou la discrétisation spatiale de la géométrie. Plus le maillage sera fin, plus le calcul sera précis, mais plus en temps de calcul. Il est en particulier important de mailler finement les zones critiques (proches de la surface de l'isolateur) où une plus grande précision est exigée.
- La résolution du problème à l'aide d'un des différents solveurs.
- La dernière étape consiste en la visualisation des résultats.

III.2.2 Paramètres du Solveur

Les modèles des isolateurs sont simulés dans un module AC/DC du COMSOL Multiphysics en utilisant un résolveur de courant électrique quasi-statique, ce qui permet à l'utilisateur de spécifier la conductivité, ainsi que les permittivités diélectrique de l'ensemble des matériaux composant ces isolateurs. En quasi-statique, les courants et les champs électromagnétiques varient lentement [58, 59], ce qui est le cas de nombreuses applications, y compris celles des isolateurs en haute tension fonctionnant à des fréquences industrielles de 50-60 Hz.

Un seul variable dépendante V est la fonction inconnue sur le domaine de calcul. Le logiciel (COMSOL Multiphysics) détermine la fonction inconnue en résolvant l'équation aux dérivées partielles suivante [57, 58, 59] :

$$-\text{div } \varepsilon \overrightarrow{\text{grad}} V - \text{div } \sigma \overrightarrow{\text{grad}} V = 0 \quad (\text{III.1})$$

III.3 Distributions du potentiel et du champ électriques sur des isolateurs HT

III.3.1 Types d'isolateurs

Les chaînes d'isolateurs considérées dans cette partie d'étude, sont, largement utilisées par la Société Nationale de l'électricité et du gaz (SONELGAZ) pour l'isolation des lignes aériennes HT. La première chaîne est formée de douze isolateurs 1512L en verre trempé de type capot et tige utilisée pour l'isolation des lignes aériennes de 230 kV. La seconde chaîne est formée de vingt-cinq isolateurs 160 KN: F160 D / 146 DC aérodynamiques pour l'isolation des lignes aériennes de 400 kV (Figure III.1).

Les isolateurs sont de type capot et tige. Ils sont constitués d'un bloc isolant en verre trempé

(Spécification IEC 60672,3), portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à la partie inférieure une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre. L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille. Dans le présent document, les configurations des chaînes d'isolateurs sont en I, II et V (la comparaison est faite en gardant le même nombre d'isolateurs)

Les caractéristiques géométriques de l'isolateur en verre 1512L sont le diamètre nominal ou diamètre de la jupe en verre (\emptyset), qui est de 255 mm, la hauteur (h), qui est de 140 mm et la ligne de fuite (L), qui est de 292 mm [78]. Tandis que celles de l'isolateur aérodynamique en verre 160 KN: F160 D / 146 DC sont le diamètre du la jupe en verre $\emptyset = 420$ mm, la hauteur $h = 146$ mm et la ligne de fuite $L = 375$ mm.

Pour la simulation, la valeur de la constante diélectrique prise pour chaque matériau entrant dans la constitution des isolateurs est 6 pour le verre, 5 pour le ciment et 1 pour l'air entourant la chaîne d'isolateurs [57].

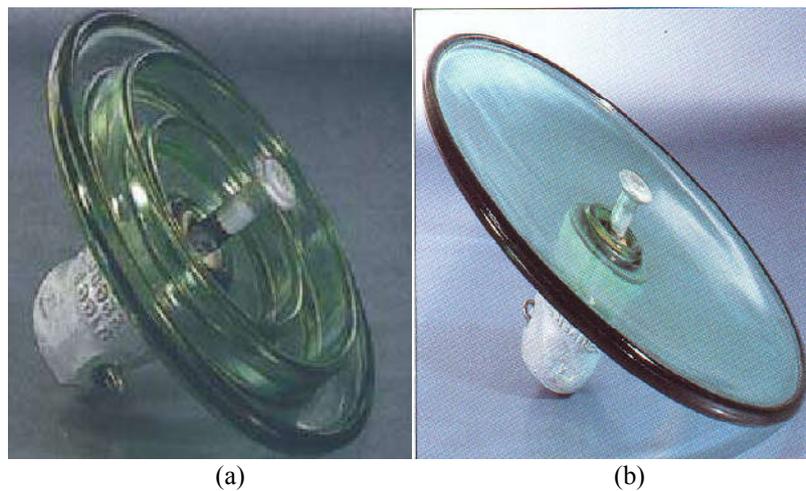


Figure III.1. Isolateur HT
(a) standard 1512 L, (b) aérodynamique 160 KN: F160 D /146 DC

Les isolateurs polymères pris en compte dans ce travail sont ceux de 230 kV. L'isolateur comporte trente trois larges jupes d'un diamètre de 146 mm chacune et trente deux petites jupes d'un diamètre de 104 mm chacune, espacées d'une distance de 45 mm le long de l'unité d'isolateur. L'épaisseur de la gaine est d'environ 5,5 mm. La distance de fuite le long de la surface de l'isolateur est d'environ 5510 mm. La longueur totale de l'isolateur est de 1696 mm. Le boîtier isolant est réalisé en caoutchouc de silicone ayant une permittivité relative $\epsilon_r = 4,3$. Tandis que le noyau est réalisé en fibre de verre renforcée avec une résine époxy pour une meilleure résistance mécanique, avec permittivité relative $\epsilon_r = 7,1$. Les cosses

(extrémités) sont fabriquées d'un alliage forgé. Les dimensions présentées sur la figure III. 2 et données dans le Tableau III.1.

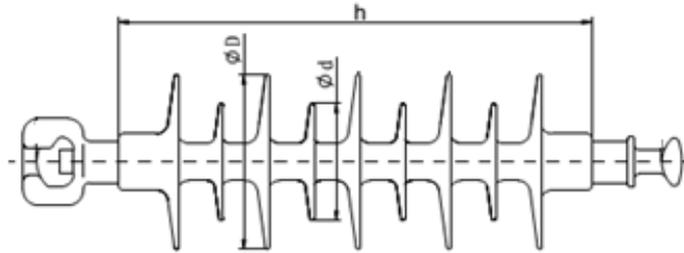


Figure III.2. 230kV Composite Suspension/Tension Isolateur

Tableau III.1. Paramètres techniques de l'isolateur composite.

| Tension nominale | Longueur de isolateur | Nombre de jupes | Diamètre des jupes | Ligne de fuite |
|------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| kV | h mm | N/n | D/d mm | L mm |
| 230 | 1696 | 33/3 2 | 146/104 | 5510 |

Pour le calcul mathématique, par la méthode des éléments finis, les propriétés des matériaux de chaque composant formant le modèle doivent être spécifiées. La conductivité des deux matériaux diélectriques à savoir le noyau en fibre de verre et le boîtier isolant de revêtement en silicone est très faible et est prise pour les simulation égale à $\sigma = 1,0 \times 10^{-10}$ S/m. De même, la zone d'air entourant l'isolateur a été spécifiée avec une très faible conductivité, $\sigma = 1,0 \times 10^{-14}$ S/m. Tandis que la permittivité relative de la couche de pollution a été estimée à 80, compte tenu de l'eau en tant que substance dominante lorsque la couche de pollution est complètement mouillée et saturée d'humidité.

Les propriétés des matériaux utilisés pour la simulation sont résumées dans le tableau III.2.

Tableau III.2. Propriétés des matériaux

| Matériau | Permittivité relative ϵ_r | Conductivité σ (S/m) |
|---------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Air | 1,0 | $1,0 \times 10^{-14}$ |
| Silicone | 3,5 | $1,0 \times 10^{-10}$ |
| Fibres de verre | 7 | $1,0 \times 10^{-10}$ |
| Couche de pollution | 80 | - |
| Acier | - | $1,0 \times 10^6$ |

L'électrode supérieure est reliée à la masse, tandis que la borne inférieure est reliée à la

source d'alimentation de haute tension alternative. L'espace d'air est pris suffisamment grand pour minimiser l'effet sur la répartition du potentiel à proximité des électrodes et le long du profil de l'isolateur.

Les frontières extérieures de la zone d'air entourant l'isolateur sont affectées à une limite ne prenant pas en compte ni courant, ni sources électromagnétiques externes, ce qui représente par conséquent le système physique qui est ouvert dans un fond de l'espace isolé. Pour les simulations en 2D, l'axe de symétrie de l'isolateur est l'axe axial symétrique sur le plan.

III.3.2 Analyse du champ électrique cas d'un isolateur composite propre et sec

La variation de ce champ électrique, le long d'un isolateur composite de 230 kV, est représentée sur la figure III.3. Il est clair que l'amplitude de champ électrique est élevée du côté de l'extrémité sous tension. Le long de l'axe central, l'intensité du champ électrique augmente d'abord rapidement pour atteindre la valeur maximale, obtenue au point de l'axe situé à la même hauteur que le point triple et diminue rapidement par la suite.

L'intensité de champ électrique est plus élevée du côté de l'extrémité sous tension, en particulier en l'absence de l'anneau de garde. Cette situation de vulnérabilité pourrait être responsable des dommages de l'isolateur et par la suite d'une rupture subséquente. En outre, en l'absence de l'anneau de garde, l'amplitude du champ électrique est nul du côté de la terre.

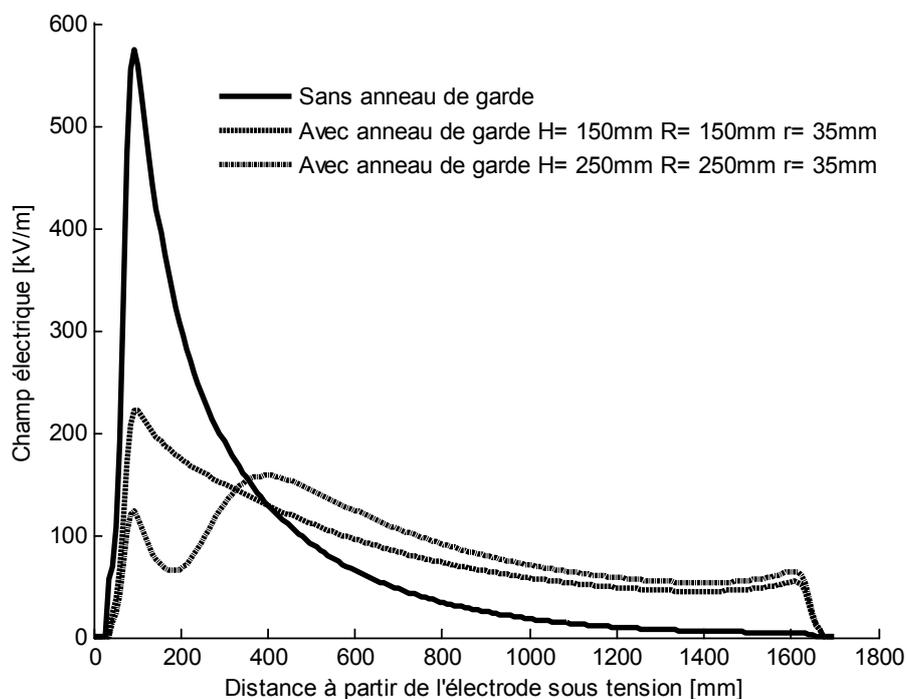


Figure III.3. Champ électrique le long de l'axe central de isolateur composite de 230 kV.

La Figure III.4 présente la distribution du champ électrique le long de l'axe de la chaîne d'isolateurs formée de douze unités en verre 1512 L. Le champ électrique présente douze pics (même nombre que les unités formant la chaîne) de valeurs excessives. Il est évident à partir de cette figure que les jonctions triples (métal-ciment, ciment-verre) sont des zones critiques où la contrainte du champ électrique est maximale ; des dommages et des pannes conséquentes pourraient se produire, en particulier pour le disque de l'isolateur adjacent à l'extrémité sous tension. Le champ électrique est nul dans les parties métalliques (capot et tige), tandis qu'il est maximal dans les zones où la ligne traverse le ciment et le verre.

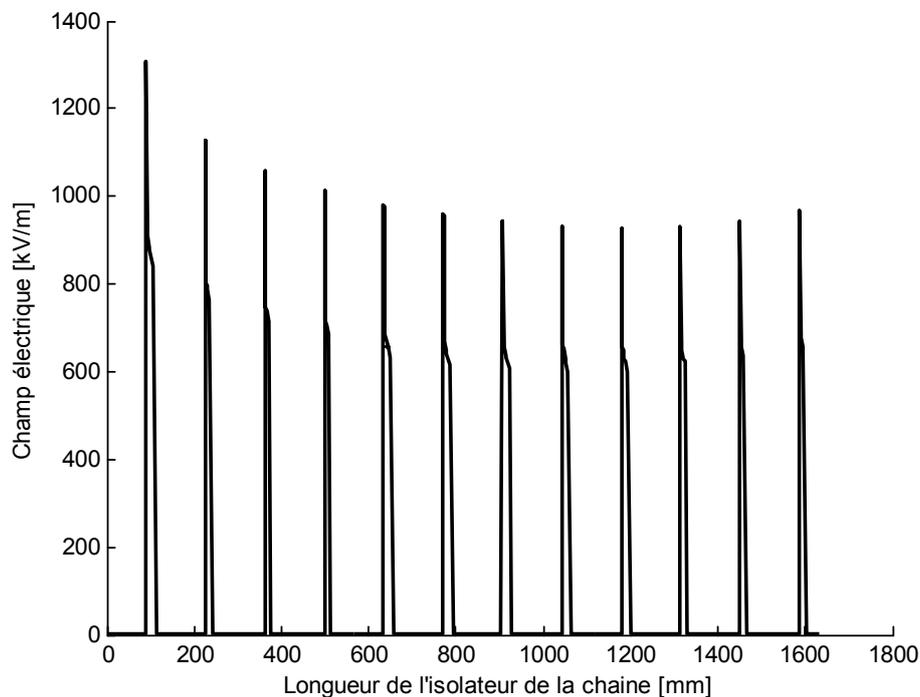


Figure III.4. Champ électrique le long de l'axe central de la chaîne isolateurs en verre de 230 kV.

III.3.3 Efficacité d'une chaîne d'isolateurs

La distribution du potentiel le long d'une chaîne d'isolateurs de suspension n'est pas uniforme. La tension maximale apparaît sur l'isolateur le plus proche du conducteur de la ligne et diminue progressivement à mesure de se rapprocher du pylône. Ce phénomène peut entraîner des décharges de type couronne sur la surface des isolateurs. Ce qui nécessite d'égaliser le potentiel à travers les différentes unités de la chaîne et d'améliorer l'efficacité de la chaîne [79].

Les différents procédés pour ce faire sont les suivants :

- Réduction de la valeur des capacités shunts. Cela peut être fait en augmentant la console (bras) transversale du pylône, c'est-à-dire, augmenter la distance entre l'isolateur et le pylône.
- Classement des Capacité. Ce procédé signifie l'utilisation des disques d'isolateurs de différentes valeurs de capacité et les installation de tels disques suivant la valeur de capacité par ordre décroissant en partant de l'unité près de la ligne (plus grande capacité) en direction de l'unité près de pylône (plus faible capacité).
- Anneau de garde (blindage statique). Cette méthode utilise un anneau en métal entourant l'unité (disque) inférieure de la chaîne d'isolateurs et connecté directement à la ligne.

La répartition inégale de potentiel est indésirable et est généralement exprimée en termes d'efficacité de la chaîne.

$$\eta = \frac{U}{n * U_1} \quad (\text{III.2})$$

Où U est la tension phase-neutre supportée par la chaîne d'isolateurs, U₁ la tension supportée par l'unité la plus proche du conducteur de la ligne et n le nombre d'unités d'isolateurs formant la chaîne.

L'efficacité de la chaîne est un facteur important, car il détermine la distribution de potentiel le long de la chaîne. Ainsi l'efficacité de 100% de la chaîne est un cas idéal pour lequel le potentiel aux bornes de chaque disque sera le même. Bien qu'il soit impossible d'atteindre 100% d'efficacité de la chaîne, les efforts doivent être faits pour l'améliorer [79].

III.3.4 Effet des gouttelettes d'eau discrètes sur le champ électrique

Le caractère hydrophobe des surfaces des isolateurs composites, permet la formation de gouttelettes d'eau discrètes sur leurs surfaces sous des conditions humides (pluie, brouillard, etc.). Les gouttes d'eau jouent un rôle important dans le contournement des isolateurs. Une gouttelette d'eau accroît non seulement la contrainte électrique due à sa permittivité élevée, mais subit également une déformation en présence d'un champ électrique. L'allongement de la goutte d'eau par des forces électrostatiques entraîne une augmentation immédiate du champ électrique à la pointe de la goutte, provoquant l'effet couronne. Il se comporte également

comme un bon conducteur en présence de contamination causée par la pollution [80, 81]. Par conséquent, il est très essentiel d'analyser l'effet de ces gouttelettes sur la surface des isolateurs composites.

Afin d'examiner la distribution du champ électrique en présence de gouttelettes d'eau sur la surface d'isolateur composite, trois gouttelettes d'eau sont déposées sur la face supérieure de la première jupe du côté de l'électrode sous tension. La forme des gouttelettes est hémisphérique, le rayon de chacune est de 2 mm et distantes entre elles de 5 mm.

La répartition du champ électrique le long d'une partie de l'isolateur composite de 230 kV dans des conditions humides est montrée sur la figure III.5. Nous remarquons des pics aux points de contacts avec le diélectrique (à l'interface diélectrique – eau – air) ; le pic le plus important est de 819 kV/m. Sachant que le champ électrique minimum requis pour déclencher la propagation des décharges de type couronne dans l'air varie de 450 à 1100 kV/m [81- 84]. Habituellement, les décharges se produisent entre les gouttelettes d'eau conduisant à la dégradation de la surface en réduisant le caractère hydrophobe du matériau polymère de revêtement de l'isolateur.

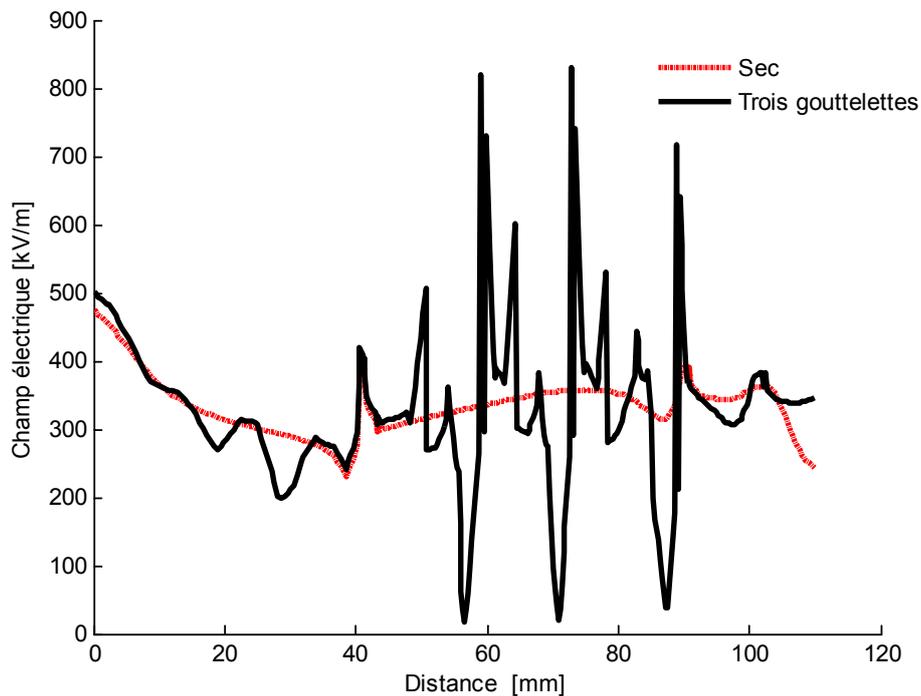


Figure III.5. Répartition du champ électrique sur la surface du jupe adjacent à l'électrode sous tension en état sec et en présence de trois gouttes d'eau

III.3.5 Effet des pylônes sur le champ et potentiel électriques

Vu qu'une chaîne d'isolateurs de suspension se compose d'un certain nombre de disques de

verre (ou porcelaine) connectés en série par des liens métalliques, chaque disque forme un condensateur connu comme capacité mutuelle. En plus, la capacité existe aussi entre le raccord métallique de chaque disque et la structure métallique du pylône connu comme capacité shunt. Les valeurs des capacités dépendent des formes des isolateurs et des géométries des pylônes. À cause du courant capacitif entre les points du pylône et les parties métalliques de la chaîne (capots et tiges), les tensions aux bornes de chaque isolateur dans la chaîne d'isolateurs ne sont pas égales, et l'unité la plus proche du conducteur de ligne est soumise à la valeur maximale. Etant donné que, les pylônes ne sont pas tous identiques, la géométrie des différents pylônes détermine la répartition du champ électrique; par conséquent, il est nécessaire de modéliser avec précision la structure du pylône [83]. Les dimensions de base du pylône du type chat, très utilisé en Algérie par la GRTE (Gestion du Réseau de Transport de l'Electricité, filiale de SNELGAZ) pour les lignes de transmission de 230 kV, sont présentées sur la figure. III.6.a. L'effet du pylône sur la distribution de la tension est étudié, en utilisant la configuration simplifiée du pylône représentée sur la figure. III.6.b.

L'effet de la longueur du bras (ou console) transversal du pylône sur la distribution du potentiel est examiné on considérant des longueurs de bras de 200 et 300 cm. Dans le cas des isolateurs capot et tige en verre, l'influence du nombre d'unités sur la distribution du potentiel est aussi examinée. Pour cette étude, le nombre d'unités d'isolateurs passe de 10 à 14 unités.

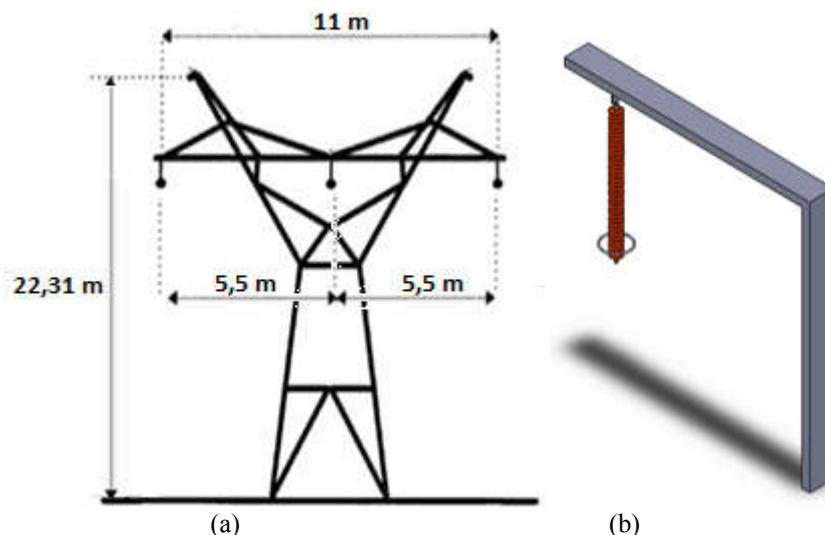


Figure III.6. Structure typique du pylône de 230 kV
(a) pylône réel, (b) configuration simplifiée

La distribution du potentiel le long d'une chaîne d'isolateurs de suspension pour une longueur du bras (console) transversal égale à 200 cm et un nombre variable d'unités

d'isolateur (10, 12 et 14), est présentée sur la figure III.7. Il est évident que le potentiel maximal est supporté par l'unité la plus proche du conducteur de ligne sous tension. Au fur et au mesure de se rapprocher de l'extrémité mise à la terre, les potentiels supportés par les unités de la chaîne baissent. Toutefois, pour les quelques unités plus proches de l'extrémité terre, la tendance du potentiel est à la hausse. Comme nous pouvons le voir sur la figure III.7, lorsque la longueur du bras transversal du pylône était de 200 cm, le potentiel électrique sur l'unité la plus proche du conducteur de ligne est passé de 16,32 kV à 14,38 kV puis à 12,93 kV en augmentant le nombre d'unités de 10 à 12 puis à 14, soit une réduction d'environ 1,46% et 1,1% du potentiel appliqué (soit une réduction d'environ 2,55% en augmentant directement le nombre d'unités de 10 à 14). En augmentant la longueur du bras transversal de 200 à 300 cm, le potentiel au-dessus de l'unité la plus proche du conducteur de ligne est réduit d'environ 1,25% pour un nombre d'unités égal à 12 et 1,86% pour un nombre d'unités égal à 14. Notant qu'en augmentant la longueur du bras transversal de 200 cm à 300 cm, le potentiel supporté par l'unité la plus proche du pylône augmente de 0,67% dans le cas d'un nombre d'unités égal à 12 et de 1,35% dans le cas d'un nombre d'unités égal à 14.

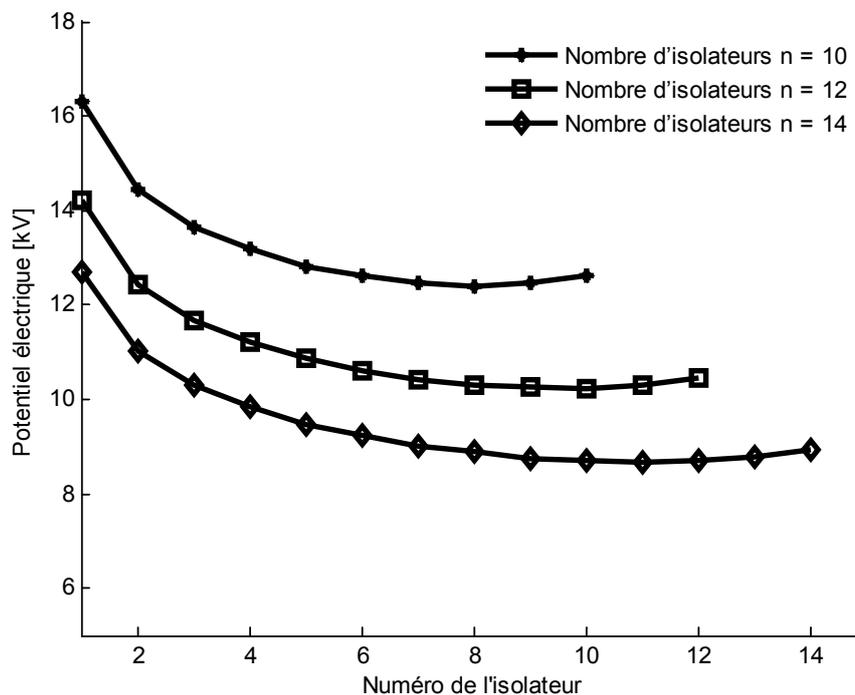


Figure III.7. Répartition du potentiel sur une chaîne d'isolateurs de suspension pour un bras transversal de longueur de 200 cm

La figure III.8 montre l'efficacité de la chaîne d'isolateurs en considérant les effets du nombre d'unités et la longueur du bras transversal. Il convient de noter que l'efficacité de la

chaîne a diminué en augmentant le nombre d'unités dans la chaîne, et ses valeurs sont augmentées en augmentant la longueur du bras transversal du pylône ; ceci est dû à la réduction des valeurs des capacités shunts.

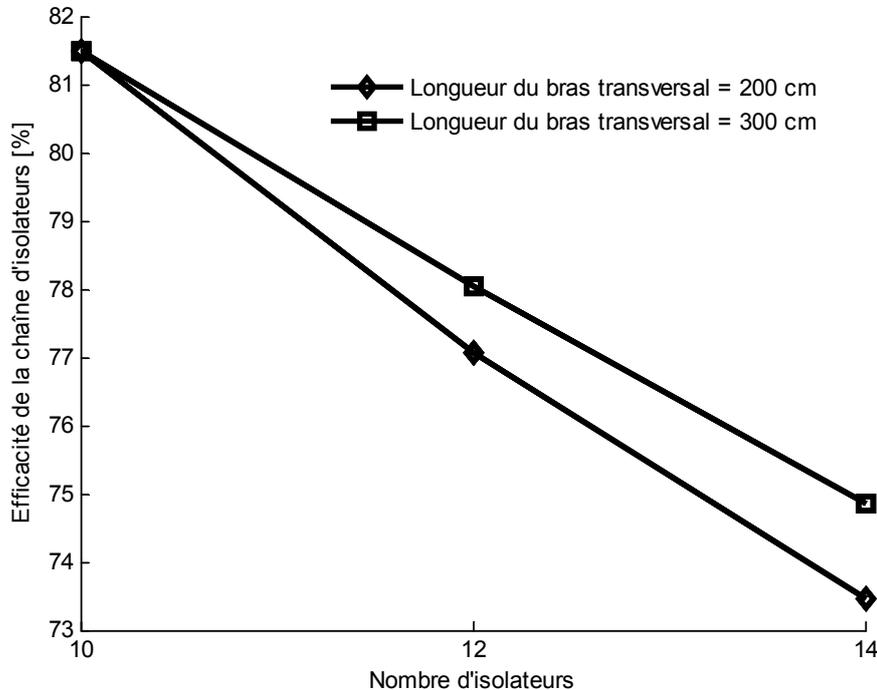


Figure III.8. Efficacité de la chaîne d'isolateurs en fonction du nombre d'unités et de la longueur du bras transversal

L'effet de la longueur du bras (ou console) transversal du pylône sur la distribution de potentiel et de champ électrique est également examiné pour le cas des isolateurs composites on considérant des longueurs de bras de 200 et 300 cm. L'écho-gramme du potentiel électrique de l'isolateur composite de 230 kV sans et avec anneau de garde pour une longueur du bras transversal égale à 200 cm est représenté sur la figure III.9.

La distribution du potentiel le long de l'isolateur composite de 230 kV de suspension pour les deux longueurs du bras transversal considérés sans et avec anneau de garde, est présentée sur la figure III.10. Notant que la répartition du potentiel est plus linéaire dans le cas d'une longueur de bras transversal égale à 300 cm comparée à celle où la longueur est égale à 200 cm.

Egalement, la distribution du champ électrique le long de l'axe de l'isolateur en composite, pour les deux longueurs du bras transversal considérés, est illustrée sur la figure III.11. Une réduction d'environ 3,8% (10,73 kV/m) du champ électrique est observée au point de même niveau que celui du point triple dans le cas d'une longueur du bras transversal égal à 300 cm

comparée à celle où la longueur est égale à 200 cm.

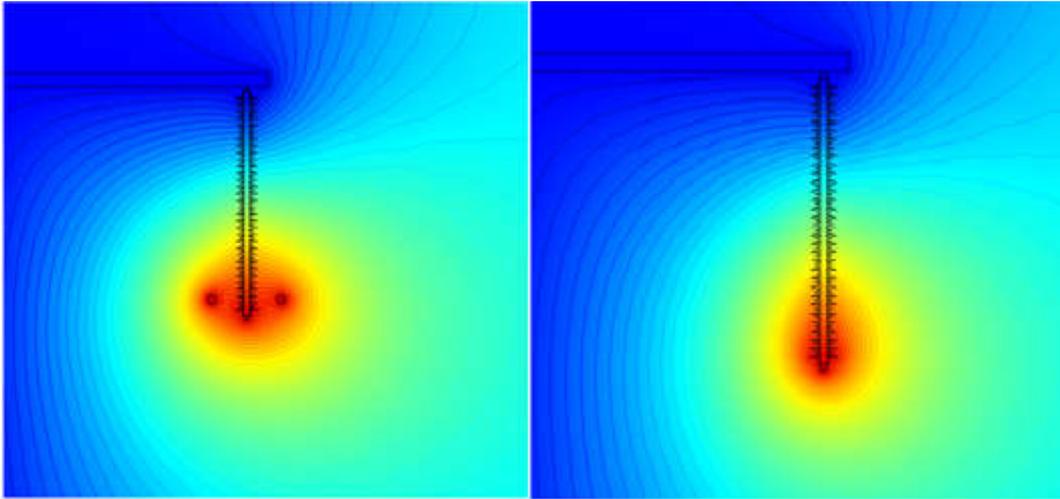


Figure III.9. Distribution du potentiel électrique pour un isolateur en composite de 230 kV en considérant l'effet du bras transversal du pylône avec et sans l'anneau de garde

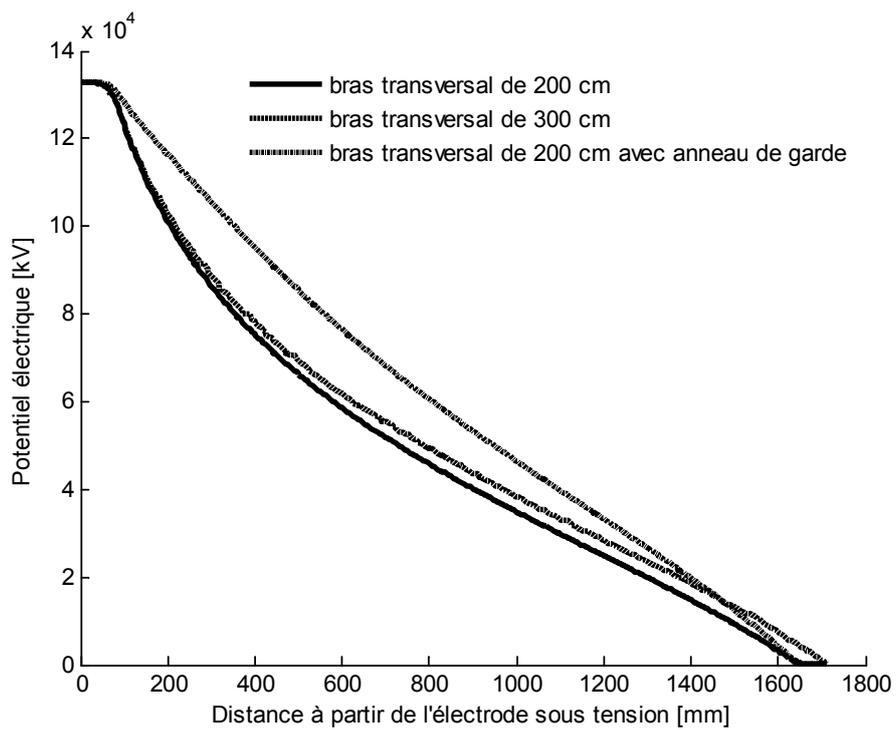


Figure III.10. Distribution du potentiel électrique pour un isolateur en composite de 230 kV en considérant l'effet du bras transversal du pylône avec et sans l'anneau de garde

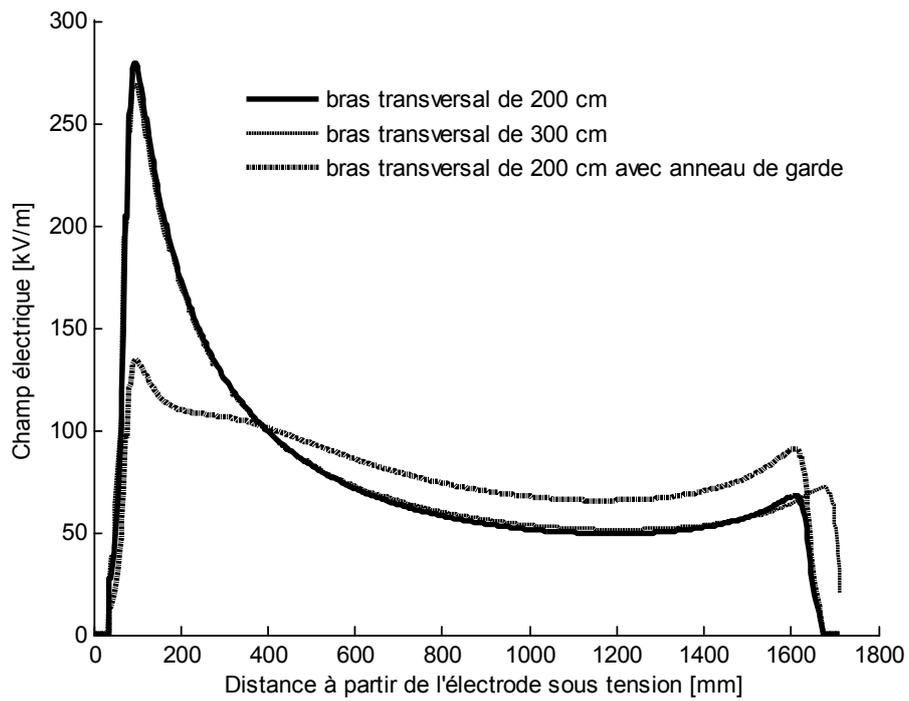


Figure III.11. Distribution du champ électrique pour un isolateur en composite de 230 kV en considérant l'effet du bras transversal du pylône avec et sans l'anneau de garde

Tableau III.4 : Amplitude et argument de la tension de phase

| Phase | Tension du système: 230 kV | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| | A ($V_{ph} \angle -120^\circ$) | B ($V_{ph} \angle 0^\circ$) | C ($V_{ph} \angle +120^\circ$) |
| Tension maximale de phase [kV] | -94 | 188 | -94 |

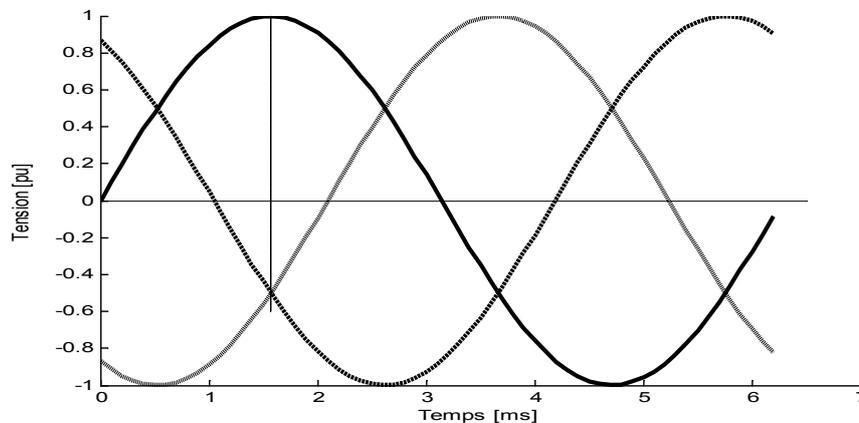


Figure III.12. Séquence de phase

La séquence de phase et le vecteur de la tension sont représentés sur la figure III. 12. La première phase est supposée être à la pointe du vecteur de tension et au même temps, la deuxième et la troisième phase sont à la moitié négative du vecteur de tension. Cette combinaison représente le cas le plus défavorable pour l'isolateur de la première phase. L'amplitude de la tension sur chaque phase est indiquée dans le tableau III.4.

La figure III.13 montre la répartition du champ électrique sur les trois isolateurs de phase pour le cas d'une configuration standard. Les résultats indiquent que le champ électrique est maximal dans la première phase, au point de même niveau que le " Point Triple ". Par ailleurs, un autre pic a été observé au niveau de l'emplacement de l'anneau de garde.

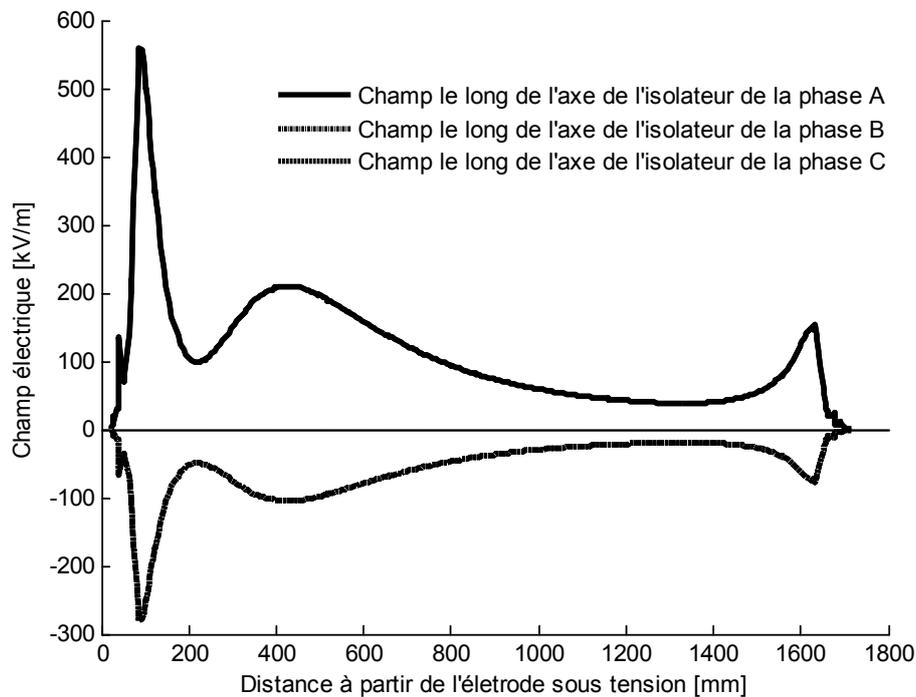


Figure III.13. Répartition du champ électrique long des trois isolateurs

III.3.6 Effet de mise en paquet des conducteurs sur le champ électrique

Les systèmes de transmission de haute et très haute tension emploient, en général, la technique de conducteurs groupés, qui consiste à avoir plus d'un conducteur par phase. Cette technique améliore non seulement la capacité de transport de la ligne de transmission mais contribue également à la réduction des champs électriques élevés autour des conducteurs. Le travail présenté, dans cette section, est une contribution à l'étude de l'effet des conducteurs groupés sur le champ électrique le long de l'isolateur composite. Pour la simulation le

nombre de conducteurs par phase est pris égal à 1, 2 et 3 respectivement. Le diamètre de chaque conducteur du faisceau est pris constant égal à 2 cm.

La figure III.14 représente la variation de l'amplitude du champ électrique le long de l'axe de l'isolateur composite. Comme nous pouvons le voir sur cette figure, le long du quart de la longueur de l'isolateur du côté de l'électrode sous tension, le champ électrique dans le cas du conducteur unique dépasse celui en mode groupé. L'amplitude maximale du champ électrique le long de l'axe de l'isolateur composite, observé au point de même niveau que celui du point triple diminue d'environ 18,5% (soit 44,66 kV/m), ce qui est une valeur considérable. Notant que, la valeur maximale de l'amplitude du champ électrique le long de l'isolateur composite diminue sensiblement avec l'augmentation du nombre de conducteurs dans un faisceau. Cependant, il y a une limitation pratique sur le nombre de conducteurs qui peuvent être utilisés par paquet pour différentes tensions nominales [15].

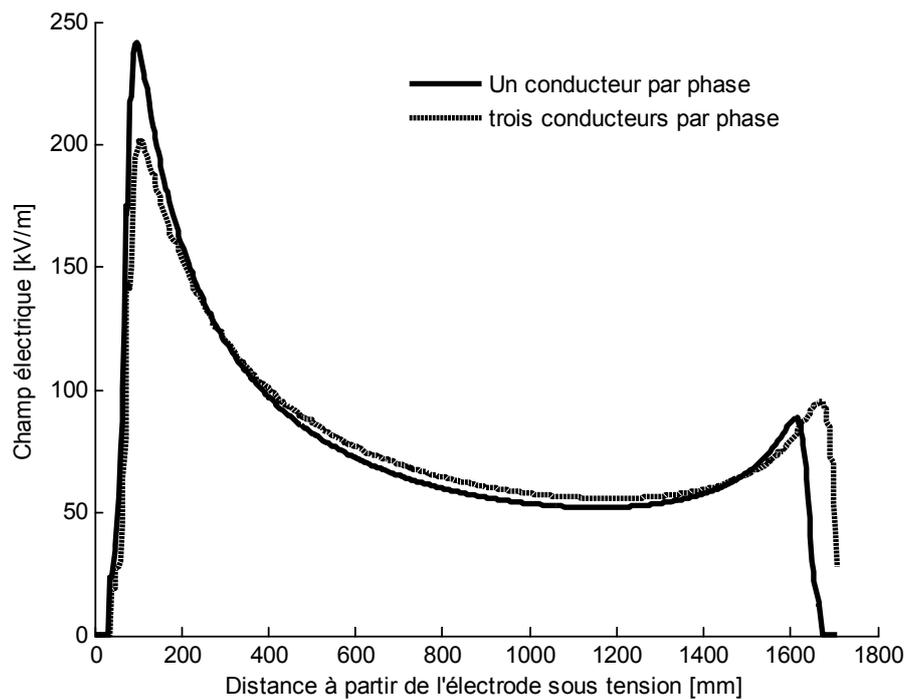


Figure III.14. Effet de l'utilisation de conducteurs groupés sur l'amplitude du champ électrique
En absence de l'anneau de garde

III.4 Effet de l'installation des anneaux de garde

III.4.1 Anneaux de garde

L'anneau de garde est l'élément le plus important permettant de contrôler le champ électrique sur la surface des isolateurs. Un anneau de garde est modélisé sous la forme d'un tore en métal (aluminium) dont l'axe coïncide avec celui de la chaîne d'isolateurs. Les anneaux de garde sont généralement fixés à l'extrémité haute tension des chaînes d'isolateurs pour contrôler le champ électrique. L'anneau de garde distribue le champ électrique de telle sorte que la valeur maximale de ce champ devient inférieure à la limite de création de l'effet de couronne dans l'air. Les anneaux de garde sont recommandés pour être installés dans des lignes de transmission dont la tension de réseau est de 230 kV ou plus [57]. Selon les recommandations, un seul anneau de garde doit être installé du côté de haute tension, pour une tension de 230 kV et deux installés des deux côtés pour les systèmes à très haute tension (tensions supérieures à 230 kV), comme indiqué dans le tableau III.5 [15].

Tableau III.5. Détail des anneaux garde pour différentes tensions

| Tension nominale [kV] | Diamètre de l'anneau de garde [mm] | |
|--------------------------|------------------------------------|------------|
| | Côté haute tension | Côté terre |
| 138 | No | No |
| 230 | 200 | No |
| 345 | 380 | 200 |
| 500 | 380 | 380 |
| 765 | 380 | 380 |
| 1000 | 760 | 760 |
| 1200 | 760 | 760 |

III.4.2 Effet des Anneaux de garde sur la distribution de la tension

Les simulations ont été réalisées avec un anneau de garde circulaire de différents diamètres (400, 600 et 750 mm) à diverses positions verticales (0, 80 et 160 mm). Les distributions du potentiel et du champ électrique ont été déterminées suivant la ligne médiane et la ligne de fuite.

La figure III.15 montre les résultats de simulation pour l'ensemble des isolateurs en verre formant la chaîne des isolateurs de 230 kV (écho-gramme) avec et sans anneau de garde. Par ailleurs, la figure III.16 illustre la différence de potentiel aux bornes de chaque unité de la chaîne en absence et en présence de l'anneau de garde. La tension de ligne n'est pas partagée de manière équitable aux bornes de tous les isolateurs formant la chaîne en raison des

capacités parasites entre la ligne, le pylône et les parties métalliques capots et tiges [57, 79]. En l'absence de l'anneau de garde, l'isolateur à proximité de la borne HT supporte la plus grande différence de potentiel. En fait, environ 13% de la tension de la ligne est développée aux bornes de l'isolateur du côté de l'extrémité sous tension et la différence de potentiel aux bornes de chacune des unités restantes baisse progressivement en allant vers l'extrémité raccordée à la masse (pylône). Notant que la mise en place d'un anneau de garde améliore la distribution du potentiel (Tableau III.6) et tend à se rapprocher des conditions idéales où la tension serait distribuée de façon égale (linéaire) entre tous les disques formant la chaîne d'isolateurs (Figure III.15). En effet, le potentiel est réduit (amélioré) d'environ 2,3% aux bornes de l'isolateur du côté de la ligne HT. Tandis qu'une légère augmentation d'environ 0,63% est constatée aux bornes de l'isolateur de côté masse (pylône). En termes d'efficacités, elle passe de 67,74 % en absence d'anneau à environ 83,33% en présence d'un anneau de 500 mm de diamètre, installé à une hauteur de 200 mm.

Une comparaison de la distribution du potentiel électrique le long de l'axe principal et le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs, avec et sans anneau de garde est également présenté sur les figures III. 17 et III. 18. Il est clair que le potentiel diminue en passant de la borne inférieure (connectée à la ligne de haute tension) vers la borne supérieure (reliée au pylône). Le potentiel est constant au niveau des pièces métalliques (capots et tiges) [57, 79, 80]. Les valeurs du potentiel électrique le long de la chaîne d'isolateurs sans et avec anneau de garde (de 400 mm de diamètre, installé à des positions verticales de 80 mm et 200 mm) sont présentées dans le tableau III.6.

La distribution du potentiel le long de la ligne de fuite du premier isolateur à proximité de la borne haute tension avec et sans anneau de garde est présentée sur la figure III.19. Le potentiel sur le capot de l'isolateur est plus faible en absence de l'anneau de garde en d'autre termes la différence de potentiel entre la tige et le capot de l'isolateur est très grande, impliquant un champ électrique très intense.

Tableau III.6 Distribution du potentiel entre isolateurs

| Numéro du Disque | Différence de potentiel aux bornes de chaque isolateur [%] | | |
|------------------|--|--|--|
| | Sans anneau de garde | Avec anneau de garde (R =200 mm H= 80mm) | Avec anneau de garde (R =250 mm H=200mm) |
| 1 | 16,36 | 13,22 | 13,30 |
| 2 | 13,28 | 12,62 | 11,53 |
| 3 | 12,70 | 12,49 | 12,01 |
| 4 | 12,50 | 12,30 | 12,09 |
| 5 | 11,59 | 12,12 | 11,97 |
| 6 | 11,23 | 11,38 | 11,79 |
| 7 | 10,92 | 11,42 | 11,58 |
| 8 | 10,80 | 11,29 | 11,52 |
| 9 | 10,63 | 11,11 | 11,38 |
| 10 | 10,58 | 11,10 | 11,36 |
| 11 | 10,60 | 11,14 | 11,41 |
| 12 | 10,67 | 11,23 | 11,50 |

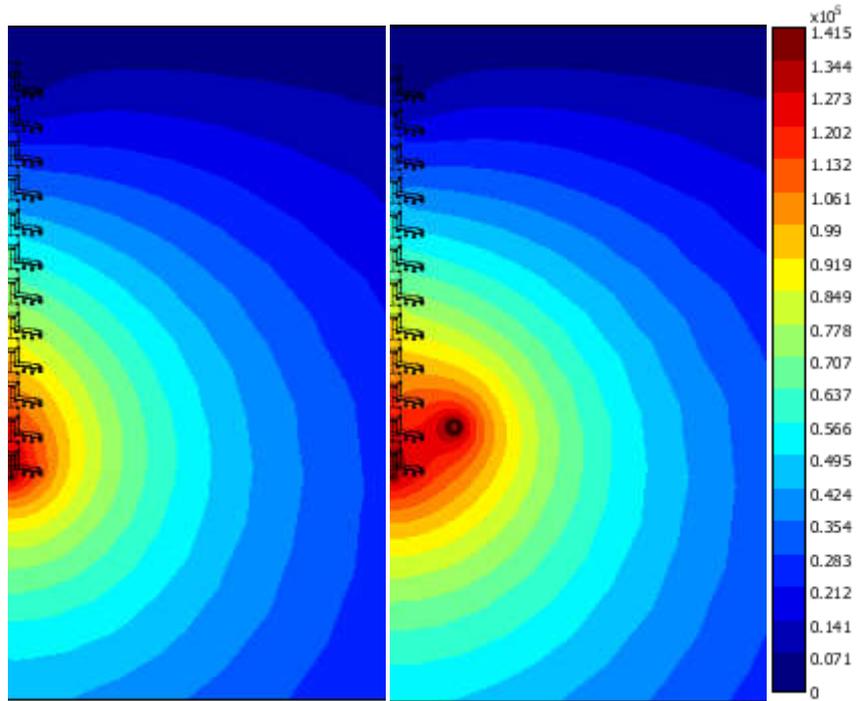


Figure III.15. Echo gramme du potentiel électrique de la chaîne d'isolateurs de 230 kV sans et avec anneau de garde

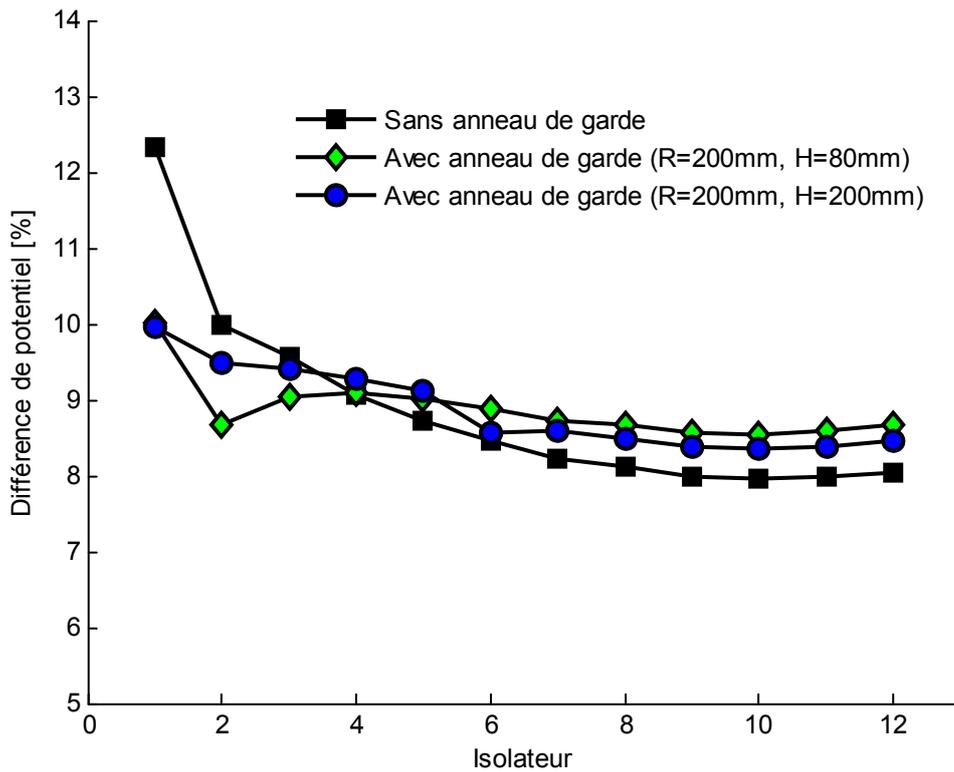


Figure III.16. Différence de potentiel aux bornes de chaque isolateur en verre de la chaîne de 230 kV sans et avec anneau de garde

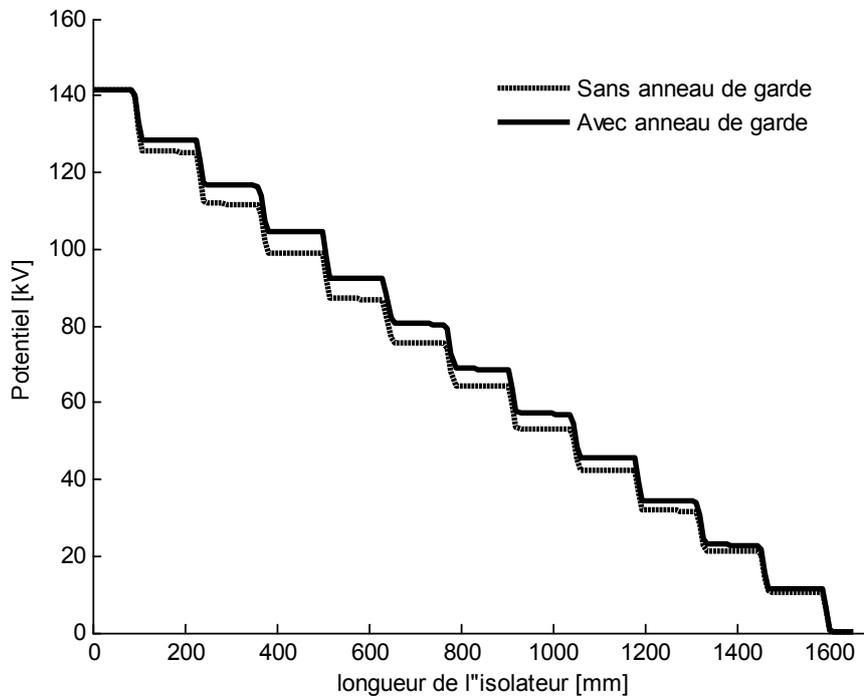


Figure III.17. Potentiel électrique le long de la ligne médiane de la chaîne d'isolateurs de 230 kV avec et sans anneau de garde

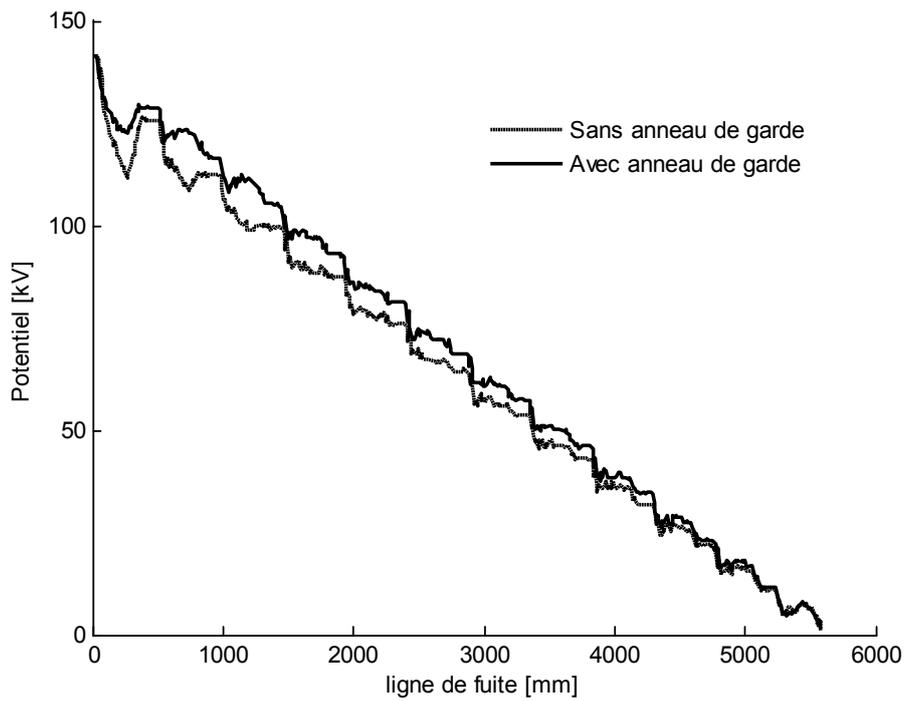


Figure III.18. Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs de 230 kV avec et sans anneau de garde

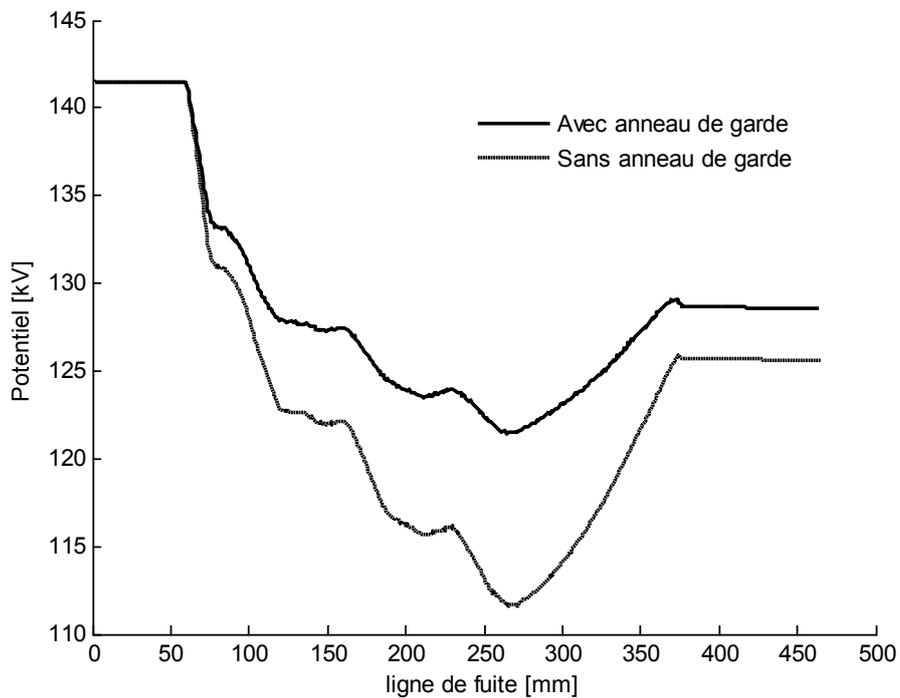


Figure III.19. Potentiel le long de la ligne de fuite du premier isolateur avec et sans anneau de garde

Une comparaison de la distribution du potentiel électrique le long de l'axe principal de l'isolateur composite et de la chaîne isolateurs capot et tige de 230 kV est présentée sur la

figure III.20. Dans le cas de la chaîne d'isolateurs en verre, la distribution du potentiel est relativement plus linéaire en raison de la présence de pièces métalliques intermédiaires (capots et tiges). Cependant, dans le cas de l'isolateur en composite, la distribution du potentiel est fortement non uniforme et peut engendrer l'effet de couronne. Le potentiel à la borne HT, portée à la tension de la ligne, chute rapidement à fur et à mesure qu'on s'éloigne de la borne HT. Notant que, seulement 25% de la longueur de l'isolateur en composite supporte 111,4 kV soit 83,89% de la totalité du potentiel appliqué. Tandis que les 75% restante de la longueur de l'isolateur supporte le reste du potentiel. Sur cette partie, les décharges de surface sur ce type d'isolateur pourraient prendre naissance ; d'où la nécessité d'installer un anneau de garde.

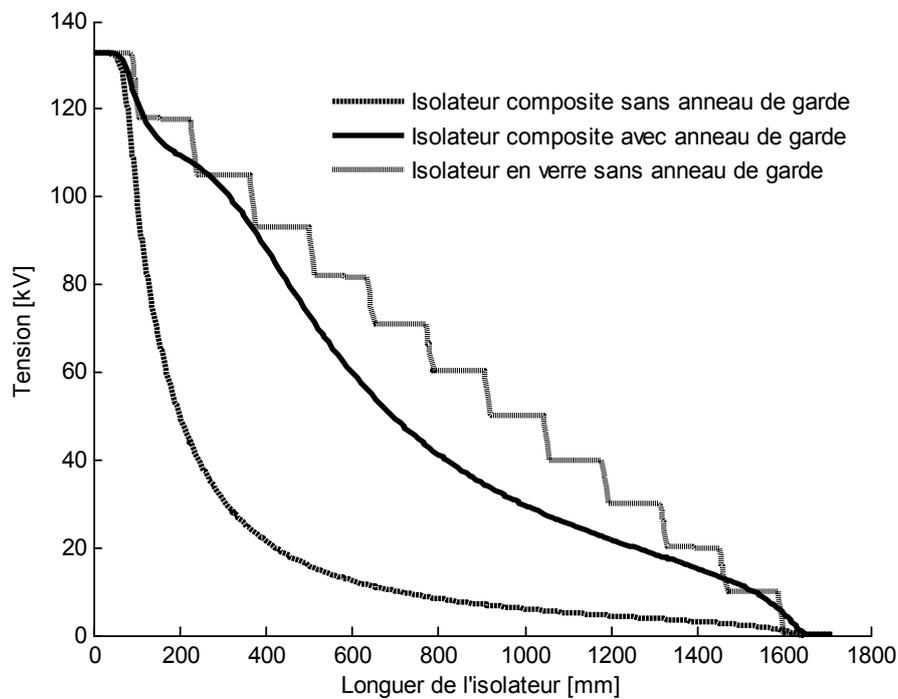


Figure III.20. Distribution du potentiel le long de l'axe des chaînes d'isolateurs de 230 kV propres en verre et en composite

III.5 Distributions du champ électrique sur des isolateurs I, II et V

Récemment, la Société Nationale de l'Electricité et du Gaz (SONELGAZ) a introduit un niveau de tension supérieur (400 kV, tension alternative) dans son système électrique pour répondre à la demande croissante de la plus haute qualité de service et de sécurité d'approvisionnement. Les isolateurs de type capot et tige en verre trempé (160 KN: F160 D / 146 DC) sont les plus couramment utilisés. Les chaînes d'isolateurs sont montées en V, II et

rarement en I. La configuration en V est l'une des principales structures utilisées dans les systèmes de transmission de puissance de 400 kV. Dans cette partie du chapitre 3, les distributions du champ électrique à l'intérieur et autour des chaînes d'isolateurs en I, II et V sont étudiées.

Les valeurs maximales de l'amplitude du champ électrique supportées par les isolateurs de formant des chaînes montées en I simple conducteur et en I et II double conducteurs, sont illustrées sur la figure III.21. Comme il a été précédemment décrit (cas des isolateurs composite), la valeur maximale de l'amplitude du champ électrique dans le cas d'un conducteur unique dépasse celle en mode groupé. En effet, la valeur maximale enregistrée sur le premier isolateur dans le cas d'une chaîne en I simple conducteur est de 1141 kV/m, et celle sur le premier isolateur dans le cas d'une chaîne en I double conducteurs est de 1045 kV/m. En plus des avantages mécaniques que présente la mise en parallèle de deux chaînes d'isolateurs (cas en II), cette configuration permet une réduction considérable du champ électrique supporté par les isolateurs du côté de la ligne sous tension. La valeur maximale de l'amplitude du champ supportée par le premier isolateur est uniquement 981,85 kV/m, soit une réduction de 63,15 kV/m par rapport au cas d'une chaîne en I. Notant aussi qu'à partir du dixième isolateur, le maximum de l'amplitude du champ électrique devient supérieur à celui enregistré sur une chaîne en I.

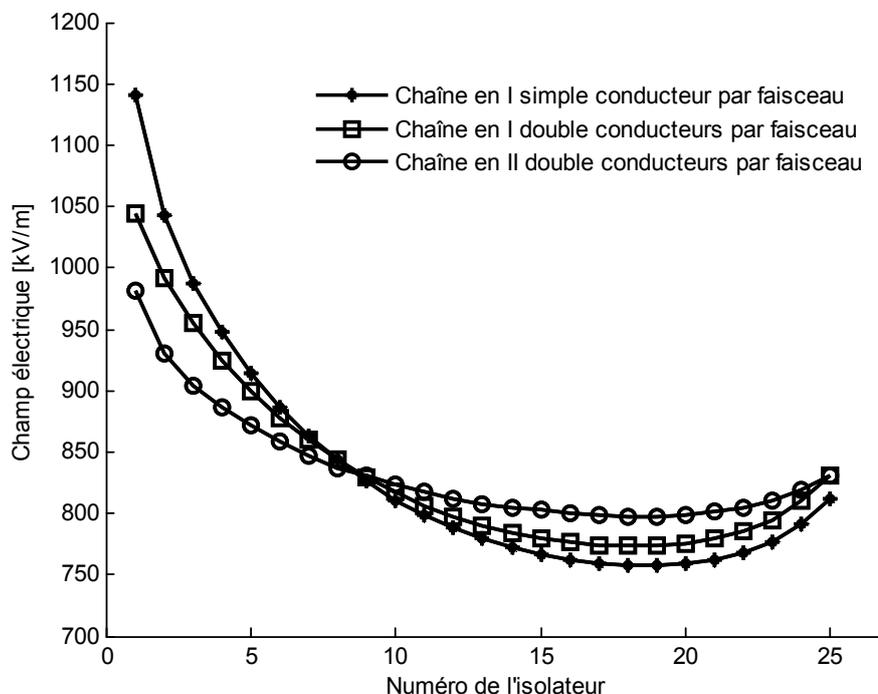


Figure III.21. Amplitude maximale du champ électrique sur des chaînes d'isolateurs en I et II simple et double conducteurs sans anneau de garde

Une comparaison des valeurs maximales de l'amplitude du champ électrique supportées par les isolateurs des chaînes montées en I, II et V (conducteurs groupés et sans anneau de garde) est illustré sur la figure III.22. Il est clair que la valeur maximale de l'amplitude du champ électrique supportée par chacun des dix premiers isolateurs de la chaîne en V est beaucoup plus grande que celles supportées par le même nombre d'isolateurs deux autres chaînes en II et en I. L'amplitude maximale du champ électrique supportée par le premier isolateur du côté de la ligne HT dans le cas d'une chaîne en II est inférieure de 83,3 kV/m par rapport à celle supportée par le même isolateur dans le cas d'une chaîne en V, soit une réduction de 7,82%. Cela peut être attribué au fait que la forme diagonale de la chaîne d'isolateurs en V engendre une diminution de la distance d'isolation efficace.

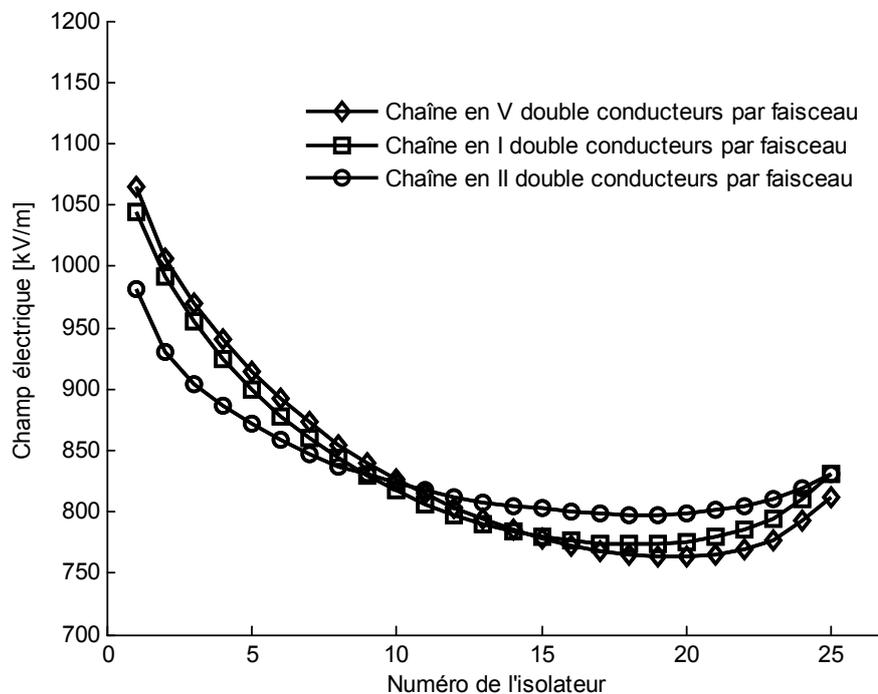


Figure III.22. Amplitude maximale du champ électrique sur des chaînes d'isolateurs en I, II et V et double conducteurs sans anneau de garde

Il est évident que les lignes équipotentielles ne sont pas également partagées entre tous les isolateurs formant la chaîne, comme illustré sur la figure III.23. L'isolateur à proximité de la ligne HT supporte la plus grande différence de potentiel et les décharges de surface probables pourraient avoir lieu sur cet élément.

Sur la figure III.9, la distribution du potentiel est présentée en absence et en présence de l'anneau de garde pour une chaîne d'isolateur en I ayant un conducteur par phase. L'isolateur près de l'électrode HT en absence de l'anneau de garde supporte 17,32 kV soit 7,5% du

potentiel appliqué et uniquement 13,48 kV dans le cas où l'anneau de garde est installé représentant 5,84% du même potentiel appliqué.

Il est clair que, l'installation de l'anneau de garde améliore l'efficacité de la chaîne. Dans ces conditions, l'efficacité de la chaîne est de 68,4% contre 53,7% obtenue en l'absence de l'anneau de garde.

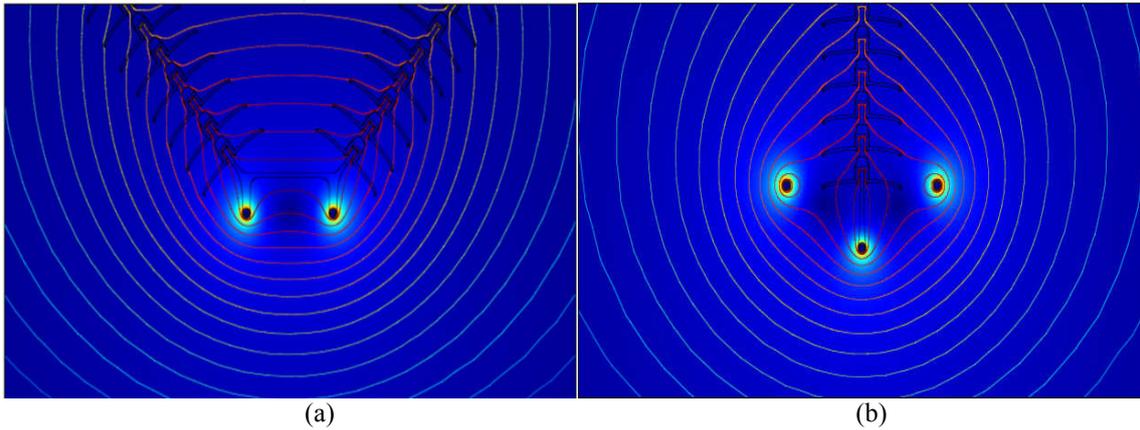


Figure III.23. Répartition du champ électrique et lignes équipotentielles autour
 a) des chaînes en V sans anneau de garde
 b) une chaîne en I avec anneau de garde

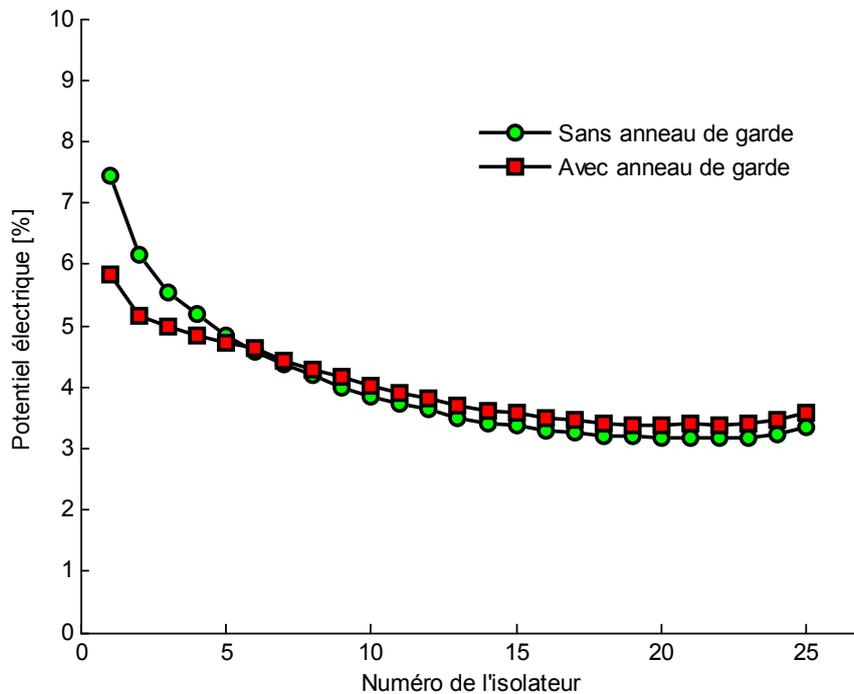


Figure III.24. Distribution de potentiel électrique pour les simulations avec et sans anneau de corona

III.6 Analyse du champ et du potentiel électriques dans des conditions de pollution

III.6.1 Analyse du champ et du potentiel électriques sous pollution continue

Sous certaines conditions de pollution, l'intensité du champ électrique en un point quelconque le long de la surface de l'isolateur est considérée comme responsable de l'apparition de l'effet de couronne et de la formation des arcs électriques autour des bandes sèches [85]. La distribution non uniforme du champ électrique le long de la surface de l'isolateur peut affecter les caractéristiques de contournement et endommager l'isolateur en polymère dans un long terme en raison de décharges de type couronne. Il a été étudié dans la littérature que l'effet de couronne et les arcs électriques autour des bandes sèches sont étroitement liés au vieillissement, l'érosion et la dégradation de la surface de l'isolateur [86].

La détermination de la répartition du champ électrique est d'une grande importance, notamment pour les isolateurs sous pollution. En fait, en exploitation et en particulier dans les régions industrielles et côtières, les isolateurs de haute tension sont souvent recouverts d'une couche de pollution. Dans des conditions de forte humidité, les électrolytes de la couche de contamination sont dissous et la conductivité de surface augmente. L'écoulement du courant de fuite de la surface conduit à la formation de bandes sèches dans les régions à densité de courant de fuite élevée. En conséquence, des arcs électriques partiels apparaissent et éventuellement peuvent évoluer jusqu'au contournement total de l'isolateur de haute tension. Les études ont montré que la mise hors service du réseau électrique de transmission ou d'une partie de ce dernier est provoquée plus fréquemment par le contournement se produisant sur des isolateurs pollués [87- 89].

Dans la pratique, la répartition et la quantité des contaminants déposée sur la surface de l'isolateur est non uniforme et dépend de la nature de l'environnement et de la formes des isolateurs en grande partie. Afin de réduire la complexité de la modélisation, la couche de pollution est supposée être uniforme sur toute la surface de l'isolateur. En conséquence, la pollution sur la surface de l'isolateur est simulée par l'ajout d'une couche de polluant mince sur la surface du modèle de l'isolateur.

La figure III.25 illustre la distribution du potentiel le long de la ligne de fuite de l'isolateur en composite dans des conditions propre et polluée, en présence et en absence de l'anneau de garde. En fait, la pollution tend à améliorer la distribution du potentiel à la surface de

l'isolateur, en particulier à proximité des extrémités des premières jupes du côté de l'électrode sous tension. En effet, le potentiel à l'extrémité de la première jupe est égal à 94,12 kV ; autrement dit, une différence de potentiel de 38,88 kV entre l'extrémité de la jupe et l'électrode sous tension. En absence de la pollution, le potentiel à l'extrémité de la première jupe est égal à 65,56 kV. En d'autres termes, une différence de potentiel de 67,44 kV. Une réduction similaire est observée autour de la deuxième et de la troisième jupe.

L'amélioration de la distribution du potentiel, en présence de la pollution, contribue à la réduction du champ électrique sur ces mêmes jupes (zone), comme illustré sur la figure III.26. Notant également que la mise en place d'un anneau de garde entraîne une meilleure uniformisation de la distribution du potentiel le long de la ligne de fuite qui se traduit principalement par une uniformisation (minimisation) de la distribution du champ électrique comme montré sur la figure III.27.

La distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en composite dans des conditions propre et polluée est illustré sur la figure III. 26. A l'exception du point triple où l'intensité du champ électrique est très élevée notamment lorsque l'isolateur est polluée, le champ électrique du côté de l'électrode sous tension est pratiquement plus faible dans le cas où l'isolateur est recouvert d'une couche de pollution. Par ailleurs, la pollution n'a pratiquement aucune incidence sur la distribution du champ électrique du côté l'électrode mise à la terre.

La distribution de l'amplitude du champ électrique le long le long de l'axe de l'isolateur en composite dans des conditions propre et polluée est illustré sur la figure III. 27. Contrairement au champ électrique le long de la ligne de fuite, la pollution tend à réduire le champ électrique au point triple ; en fait, une réduction d'environ 10,4% est obtenue.

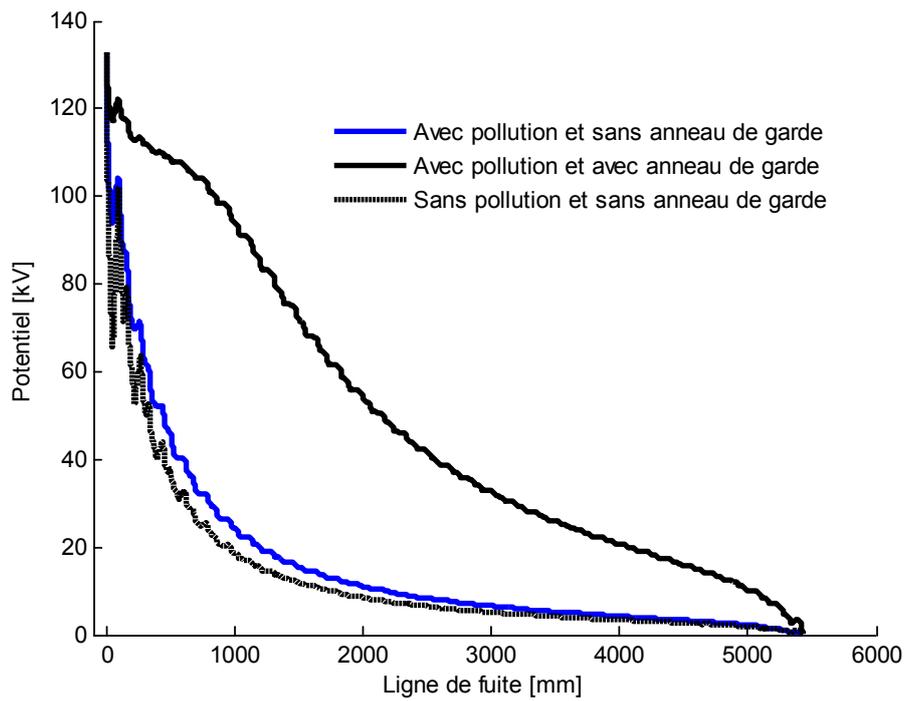


Figure III.25. Distribution du potentiel le long de la ligne de fuite de l'isolateur en composite de 230 kV dans des conditions propres et de pollution avec et sans anneau de garde

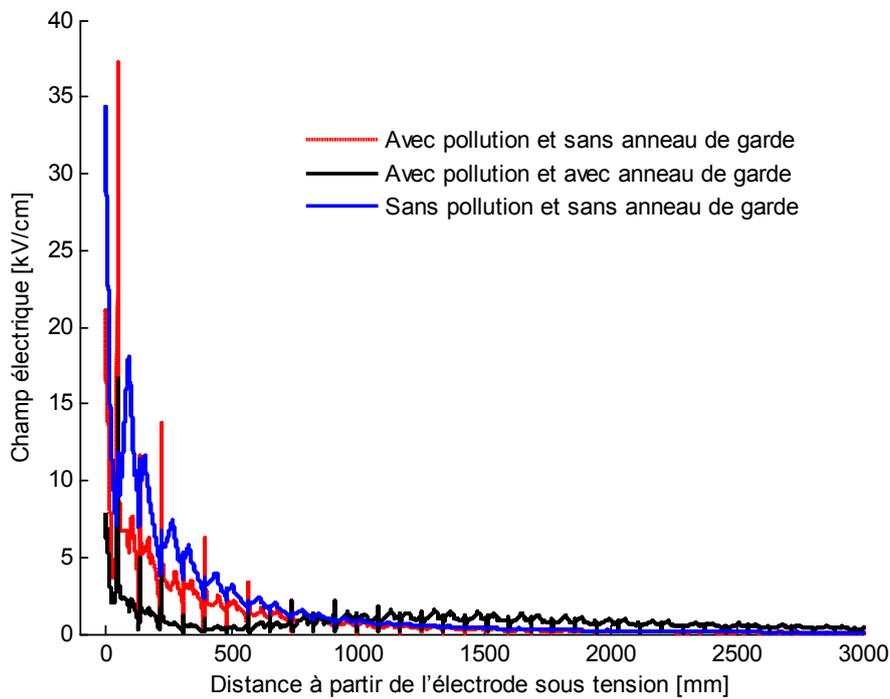


Figure III.26. Distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en composite de 230 kV dans des conditions propres et de pollution avec et sans anneau de garde

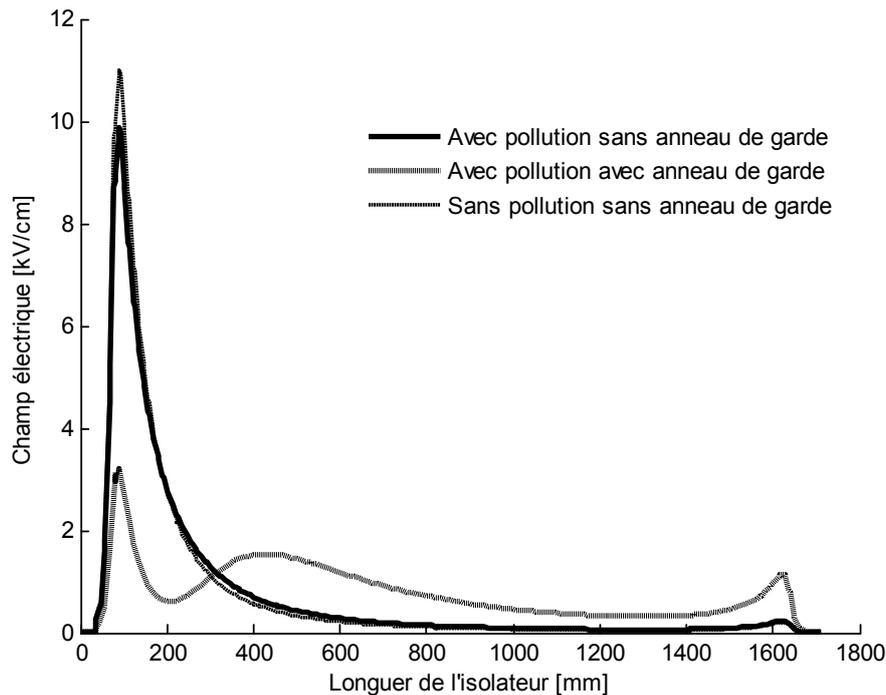


Figure III.27. Distribution de l'amplitude du champ électrique le long de l'axe de l'isolateur en composite de 230 kV dans des conditions propres et de pollution avec et sans anneau de garde

III.6.2 Formation des bandes sèches sur isolateurs pollués

Le vieillissement des matériaux isolants sous champ électrique est initié dans la grande majorité des cas, par les décharges partielles se formant à la surface des isolateurs. Ce vieillissement se traduit par une érosion de la surface, farinage, fissuration, perte d'hydrophobicité, augmentation du courant de fuite, etc. [90, 91]. Les circonstances conduisant à l'apparition des décharges surfaciques commencent par la formation d'une couche de pollution, habituellement non conductrice, sur la surface de l'isolateur. Divers facteurs climatiques tels que la rosée, le brouillard, la condensation font que cette couche s'humidifie et devient conductrice. Etant donné que la répartition des impuretés sur l'isolateur est non-uniforme, la densité de courant sur la zone sérieusement contaminée est plus grande que celle sur les autres zones de la surface de l'isolateur. En raison de la chaleur produite par la circulation de courant de fuite, la couche de pollution est asséchée en ces endroits où la densité de courant est la plus importante, souvent au voisinage des électrodes. La formation de zones (bandes) sèches a une grande incidence sur la répartition du potentiel électrique sur la surface de l'isolateur ; la plus grande partie du potentiel étant désormais supportée par la bande sèche. A ce stade, toute augmentation soudaine de la tension appliquée conduit à l'apparition en surface des décharges électriques. Ces décharges électriques peuvent

s'éteindre ou bien évoluer vers un contournement total de la surface.

Pour la simulation, une bande sèche du côté de l'électrode HT supposée avoir une distribution circulaire est étudiée. La figure III. 28 montre les contours équipotentiels et les contours du champ électrique de l'isolateur en caoutchouc de silicone de 230 kV dont la surface est couverte d'une couche légère de pollution uniformément répartie, avec la formation d'une bande sèche du côté de l'électrode HT. A partir de cette figure, nous observons que le potentiel de la ligne ((haute tension) est décalé vers le bord de la bande sèche située vers l'extrémité de la ligne et de même, le potentiel de masse est transféré de l'extrémité du raccord de la masse à l'autre bord de la bande sèche. Ainsi, une très forte différence de potentiel est appliquée à travers la bande sèche.

Le champ électrique le long de la surface de l'isolateur en présence d'une bande sèche du côté de l'électrode HT, sans et avec l'anneau de garde, est présenté sur la figure III.29. A partir des caractéristiques ainsi obtenues, nous remarquons que les lignes du champ électrique sont concentrées autour de la bande sèche et la valeur maximale du champ électrique est observée dans cette même bande. En absence de l'anneau de garde, le champ électrique atteint la valeur de 61,10 kV/cm. Cette dernière est largement supérieure à la valeur seuil d'ionisation de l'air entourant l'isolateur, ce qui conduit à la formation d'arcs partiels autour de la bande sèche. Ces arcs partiels causent l'augmentation de la température de surface, et par conséquent la dégradation de la surface due à la contrainte thermique et enfin le contournement de l'isolateur composite. Cependant, dans le cas où un anneau de garde est installé, le champ électrique est réduit tout le long de l'isolateur et en particulier autour de l'électrode sous tension et autour de la bande sèche. En présence d'un anneau de garde dont les paramètres sont : un rayon de l'anneau $R = 250$ mm, une position de montage au dessus de la ligne $H = 250$ mm et un rayon de tube de l'anneau $r = 40$ mm, le champ est réduit à une valeur de 16,33 kV/cm ; cette dernière est largement au dessus de la tension seuil de l'effet de couronne. Notant que la réduction du champ électrique, autour de la bande sèche, engendrée par l'anneau de garde est significative et est de 73,26%. En plus, d'après les résultats, nous pouvons conclure que l'utilisation des anneaux de garde serait en mesure d'éviter, sous certaines conditions de pollution, l'amorçage des bandes sèches à proximité de l'électrode haute tension de l'isolateur.

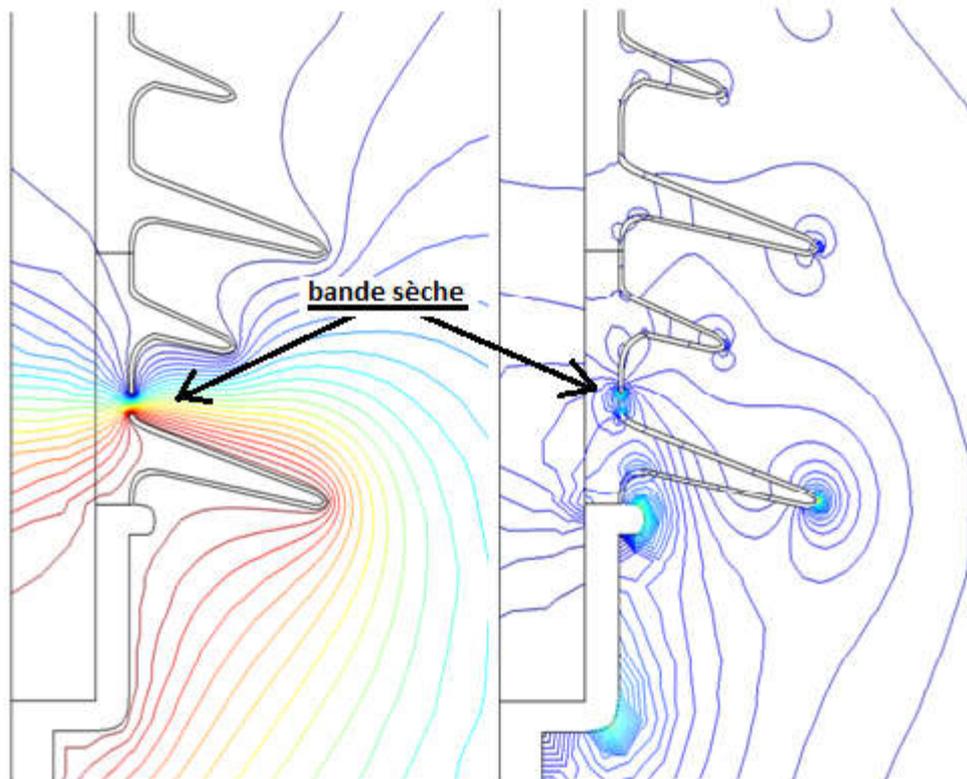


Figure III.28. Distribution de potentiel et de champ électriques autour de l'isolateur composite de 230 kV dans des conditions de pollution avec formation d'une bande sèche

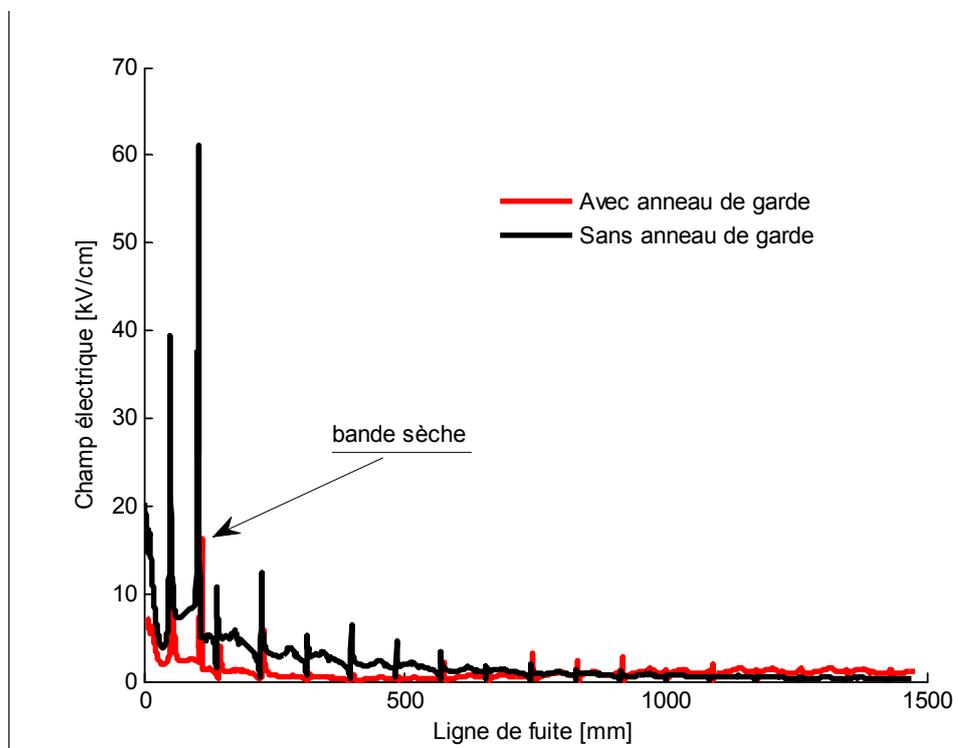


Figure III.29. Répartition du champ électrique le long de la surface de l'isolateur composite de 230 kV en présence d'une bande sèche, avec et sans anneau de garde

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé l'étude de la distribution du potentiel et du champ électriques le long des chaînes d'isolateurs en composite et en verre. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Mutliphysics 4.3, basé sur la méthode des éléments finis. Cette étude nous a permis de conclure que :

1. La répartition du potentiel le long de chaînes d'isolateurs est non linéaire en particulier dans le cas des isolateurs composite. En effet, les isolateurs en verre, dans une chaîne, recevront une différence de potentiel très similaire. Par ailleurs, les parties à proximité du conducteur sont les plus exposées aux contraintes électriques, à savoir, la différence de potentiel et le champ électrique. Les parties métalliques de l'isolateur, en l'occurrence, le capot et la tige, sont des équipotentielles où la valeur du potentiel est toujours fixe et le champ est nul.
2. L'intensité du champ électrique autour et à l'intérieur des chaînes d'isolateurs est influencée par certains équipements et configuration en l'occurrence : les anneaux de garde, longueurs du bras transversal du pylône, montage en V des chaînes d'isolateurs,
3. L'état de surface influe sur la répartition du champ électrique. La valeur maximale du champ est obtenue dans le cas où la chaîne est polluée. En particulier, une très forte différence de potentiel est appliquée à travers la bande sèche.
4. L'utilisation des anneaux de garde pourrait éviter, sous certaines conditions de pollution, l'amorçage des bandes sèches à proximité de l'électrode haute tension de l'isolateur.
5. Les gouttes d'eau jouent un rôle important dans le contournement des isolateurs. Dans ces conditions, des pics du champ électrique très élevés sont observés à l'interface à trois points diélectrique – eau – air.

CHAPITRE

IV

AMELIORATION DE LA DISTRIBUTION DU
CHAMP ELECTRIQUE LE LONG DES
ISOLATEURS COMPOSITES

IV.1 Introduction

Dans le cas des isolateurs non-céramiques, le problème de la forte concentration du champ électrique au voisinage des deux extrémités haute tension (ligne) et la terre (pylône) est bien connu [92 - 96]. Lorsque le champ électrique local atteint des valeurs supérieures à celle du champ critique (seuil) de l'apparition de l'effet couronne, les décharges de surface prennent naissance. En effet, il est primordial de chercher des solutions pour améliorer la distribution et d'atténuer la forte concentration du champ électrique aux deux extrémités (spécialement près de celle sous tension).

En fait, il existe plusieurs facteurs affectant la distribution du champ électrique sur la surface de l'isolateur, tels que la forme et les dimensions de l'anneau de garde, en plus de l'état de surface de l'isolateur et son type [95, 96].

Dans ce chapitre, trois alternatives permettant l'atténuation du champ électrique à la surface des isolateurs de suspension en polymère sont analysées au moyen de simulation. Dans la première alternative, un anneau de garde est installé du côté de la ligne sur un isolateur de 230 kV. Les paramètres d'influence sont la position et les dimensions de l'anneau. Pour la deuxième alternative, l'effet de la valeur de la permittivité du matériau de revêtement de l'isolateur de 33 kV sur le champ électrique est examiné. Le paramètre d'influence pour la troisième option consiste en la forme de l'isolateur de 33 kV à proximité de la borne sous tension.

IV.2 Atténuation du champ électrique par Anneaux de garde

L'installation des anneaux de garde est adoptée non seulement pour améliorer les distributions de champ électrique, mais aussi de réduire le champ électrique. Elle permet en également de prolonger la durée de vie des isolateurs. Bien qu'il soit communément admis que l'anneau de garde peut être placé à côté HT de la chaîne d'isolateurs [6], il est essentiel de rechercher la position la plus appropriée pour placer l'anneau de garde minimisant le champ électrique sur les chaînes d'isolateurs. Cependant, il n'y a pas de normes régissant la conception et l'emplacement des anneaux de garde sur les structures de haute tension.

Notons que, selon la littérature, la limite du champ électrique en vue d'éviter les décharges de couronne sur les isolateurs en polymère secs et propres, sont dans la gamme de 350 à 1000 kV/m [13, 15, 97]. Selon l'institut de recherche en énergie électrique " Electric Power

Research Institute (EPRI) ", la limite maximale du champ électrique adoptée est de 450 kV/m [9, 13] ; cette dernière a été choisie, dans cette étude, comme limite maximale.

Dans le présent travail, l'impact de l'anneau de garde sur l'isolateur composite est étudié en évaluant la réduction du champ électrique en fonction des caractéristiques et des dimensions de l'anneau de garde. Le profil et les paramètres techniques de l'échantillon de l'isolateur composite de suspension, utilisé dans cette étude, sont présentés sur la figure IV.1 et dans le tableau 1. Notons que h est la longueur (distance entre les parties métalliques) de l'isolateur, L est la ligne de fuite, $D1$ and $N1$ sont le diamètre et le nombre des grandes jupes respectivement, $D2$ et $N2$ représentent le diamètre et le nombre de petits jupes tandis que d est le diamètre du tronc de l'isolateur.

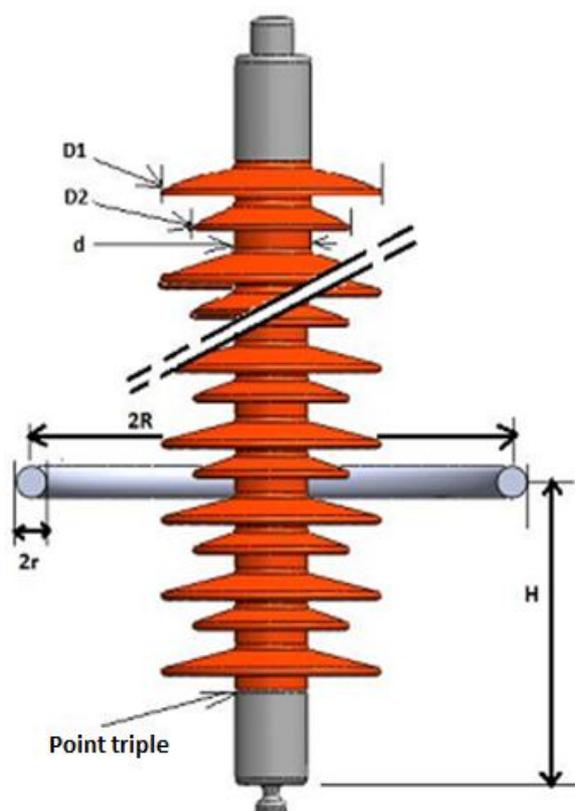


Figure IV.1. Modèle 3D de l'isolateur avec l'anneau de garde

Le point triple sur la figure IV.1 représente la zone de jonction triple formée du polymère de revêtement, de l'air, et de l'extrémité métallique ou l'électrode HT.

Tableau IV.1. Paramètres techniques de l'isolateur composite

| Matériaux | D1/D2 [mm] | h [mm] | L [mm] | d [mm] | N1/N2 |
|-----------|------------|--------|--------|--------|---------|
| Polymère | 146 / 104 | 1696 | 5510 | 28 | 33 / 32 |

Pour réduire le champ électrique à la surface de l'isolateur composite particulièrement à proximité de la borne HT, les principales grandeurs de l'anneau de garde installé ont été optimisées. Il s'agit du rayon de la bague de garde (R), du rayon du tube de bague de garde (r) et de la position (H) de l'anneau de garde par rapport à l'électrode HT. En effet, l'influence de chaque paramètre sur la valeur maximale du champ électrique a été séparément examinée (en changeant seulement un paramètre et en gardant les deux autres constants).

IV.2.1.1 Présentation des anneaux de garde

L'anneau de garde, également appelé un anneau anti-corona, se présente sous la forme d'un tore métallique ouvert ou fermé (Figure IV.2), généralement en alliage d'aluminium, pour des questions de mise en forme, de légèreté et de résistance à la corrosion. Les anneaux de garde sont fixés aux extrémités métalliques de certains équipements de haute tension tels que les isolateurs de poste, les isolateurs de traversée ou de ligne et des parafoudres (Figure IV.3) et sont donc soumis au même potentiel que ces dernières. D'autre part, l'influence de la géométrie du tube constituant l'anneau de garde sur la répartition du champ électrique a fait l'objet de nombreuses études [9, 14, 20]. Ainsi, ces études ont montré que pour la même position, le même diamètre et le même rayon de l'anneau, l'utilisation d'un anneau de garde de section circulaire permet d'obtenir des meilleurs résultats en termes de réduction du champ électrique et d'uniformisation de la distribution du potentiel. Il ressort des travaux rapportés dans la littérature [13, 15, 93, 95 - 97] que le montage d'un ou plusieurs anneaux de garde sur des équipements de haute tension tels que les chaînes d'isolateurs, permet :

1. une meilleure distribution du champ électrique à l'intérieur et autour du l'isolateur afin d'éviter toute décharge électrique partielle à l'intérieur des diélectriques ou à la surface de l'isolateur, spécifiquement au voisinage de l'électrode de haute tension ;
2. une réduction de la valeur maximale du champ électrique au-dessous du seuil de l'effet couronne, empêchant les décharges couronnes ;
3. une protection de l'électrode métallique de l'isolateur contre tout arc électrique en gardant l'arc à distance de l'isolateur et en fixant la racine de l'arc sur l'anneau de garde pour prévenir toute détérioration.



Figure IV.2. Exemples de géométries des anneaux de garde



Figure IV.3. Exemples d'utilisation des anneaux de garde
(a) un parafoudre
(b) une chaîne d'isolateurs de ligne.

Il est recommandé, pour les isolateurs montés sur des lignes de 230 kV et plus, l'utilisation des anneaux de garde [9, 97, 98]. Le tableau IV.2 illustre l'utilisation typique de l'anneau de garde sur les isolateurs de suspension.

Tableau IV.2. Anneau de garde recommandé [9]

| Tension de service [kV] | Diamètre de l'anneau [mm] | |
|----------------------------|---------------------------|------------|
| | Côté HT | Côté terre |
| 161 | Non | Non |
| 230 | 203 | Non |
| 345 | 305 | Non |
| 400 | 305 | 203 |
| 500 | 381 | 203 |

IV.2.1.2 Champ électrique en fonction de la hauteur de l'anneau

La figure IV.4 illustre la distribution du champ électrique le long de l'axe de l'isolateur pour différentes positions de l'anneau de garde. L'intensité du champ électrique est déterminée le long de l'axe central du noyau de l'isolateur composite à partir de l'extrémité sous tension jusqu'à celle mise à la terre. Le champ électrique augmente tout d'abord rapidement pour atteindre la valeur maximale, obtenue au point de l'axe situé à la même hauteur du point triple [15], en particulier en l'absence de l'anneau de garde, ce qui en fait de cette zone vulnérable pour les dommages et la dégradation subséquente. Cette intensité diminue rapidement pour atteindre son minimum au voisinage de l'électrode mise à la masse. Avec l'installation de l'anneau de garde, l'ampleur du champ électrique est, de façon générale, réduit autour de l'extrémité sous tension, tandis qu'à proximité de l'électrode de terre, le champ est légèrement plus élevé par rapport à celui sans anneau de garde.

La figure IV.5 montre la variation de la valeur maximale du champ électrique calculé le long de l'isolateur composite pour différentes hauteurs de montage de l'anneau de garde et pour un rayon de tube de l'anneau de garde $r = 30$ mm et un rayon de l'anneau $R = 250$ mm. Lorsque la hauteur de montage de l'anneau de garde augmente de 0 mm à 500 mm, la valeur de l'intensité du champ électrique diminue tout d'abord pour atteindre un minimum avant d'augmenter à nouveau (Figure IV.5). La valeur minimale ($E_{\min} = 185$ kV/m) correspond à 30,71% de réduction du champ électrique par rapport au champ maximum ($E_{\max} = 275$ kV/m). Elle est obtenue pour la hauteur du montage $H = 250$. En outre, pour d'autres valeurs de R et r (qui seront étudiés au chapitre V), la réduction du champ électrique peut atteindre 43%.

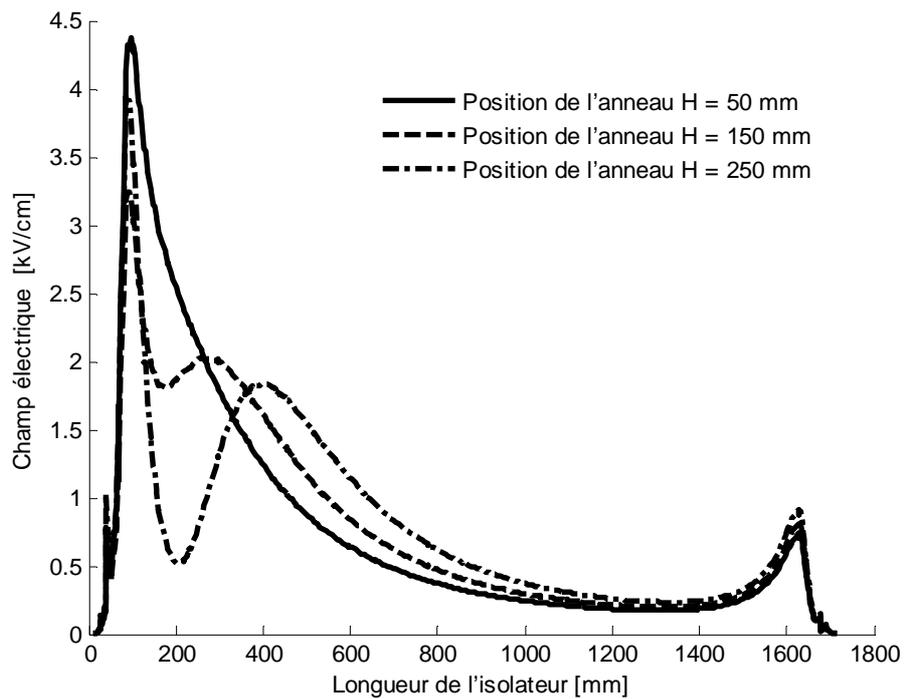


Figure IV.4. Champ électrique le long de l'axe principal de l'isolateur composite de 220 kV

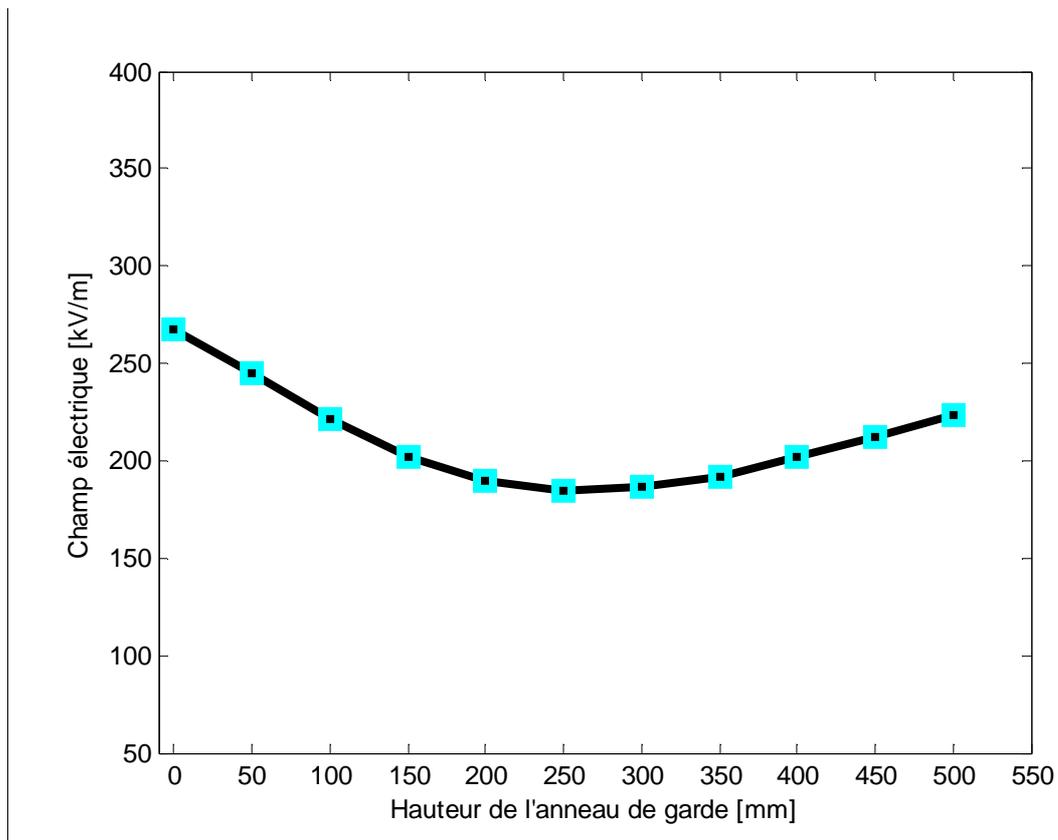


Figure IV.5. Intensité maximale du champ électrique en fonction de la hauteur de l'anneau de garde

IV.2.1.3 Champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau

La figure IV.6 illustre l'effet du rayon de l'anneau de garde (R) sur l'intensité du champ électrique le long de l'axe de l'isolateur composite. Par ailleurs, la figure IV.7 montre la variation de la valeur maximale du champ électrique en fonction du rayon de l'anneau de garde (R). Les résultats de calcul montrent que, l'augmentation du rayon de l'anneau de garde engendre une légère augmentation de la valeur maximale du champ électrique. Par exemple, le champ électrique augmente de 208,6 kV/m à 249,5 kV/m, quant le rayon de l'anneau augment de 150 à 500 mm (pour une hauteur $H = 100$ mm et un rayon de tube $r = 40$ mm), soit une augmentation d'environ de 16,4%. Notons que l'augmentation du rayon de l'anneau au-delà de 450 mm n'a pratiquement aucun effet sur la valeur maximale du champ électrique. Pour conclure, nous pouvons dire que la valeur maximale du champ électrique est peu sensible au rayon de l'anneau.

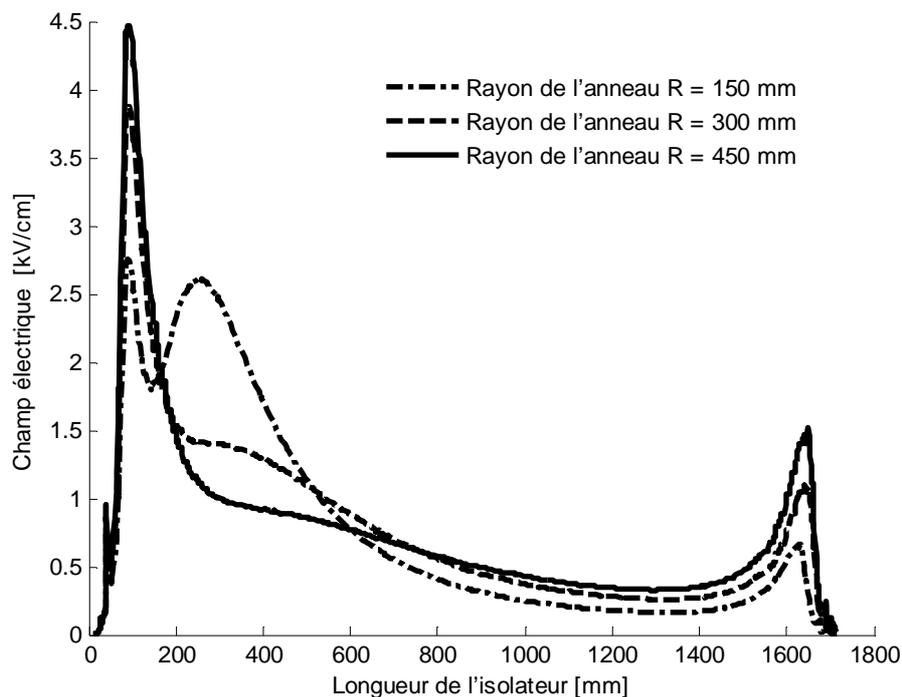


Figure IV.6. Champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau de garde

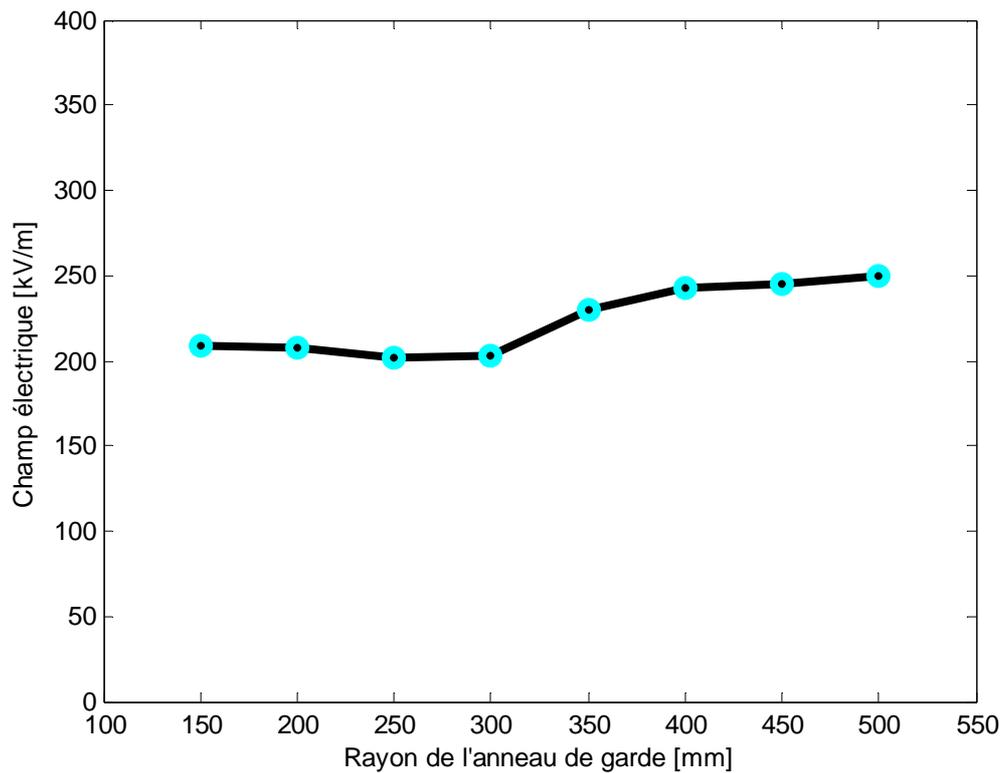


Figure IV.7. Intensité maximale du champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau de garde

IV.2.1.4 Champ électrique en fonction du Diamètre du tube

Le rayon (r) du tube de l'anneau de garde est également un paramètre important de la conception en particulier dans le contrôle de variation du champ électrique maximale sur la surface de l'isolateur et. Il est évident des figures IV.8 et IV.9, que l'augmentation du diamètre du tube de l'anneau de garde améliore la distribution du champ électrique sur la surface de l'isolateur. Pour une hauteur d'anneau de couronne de 200 mm, la valeur maximale du champ électrique passe de 277,2 kV/m à 166,5 kV/m (soit une réduction de près de 40%), lorsque le rayon du tube de l'anneau augmente de 5 mm à 40 mm. Il est important de noter qu'on ne peut pas augmenter excessivement le rayon du tube de l'anneau de garde compte tenu des contraintes de construction (géométrie, poids,...).

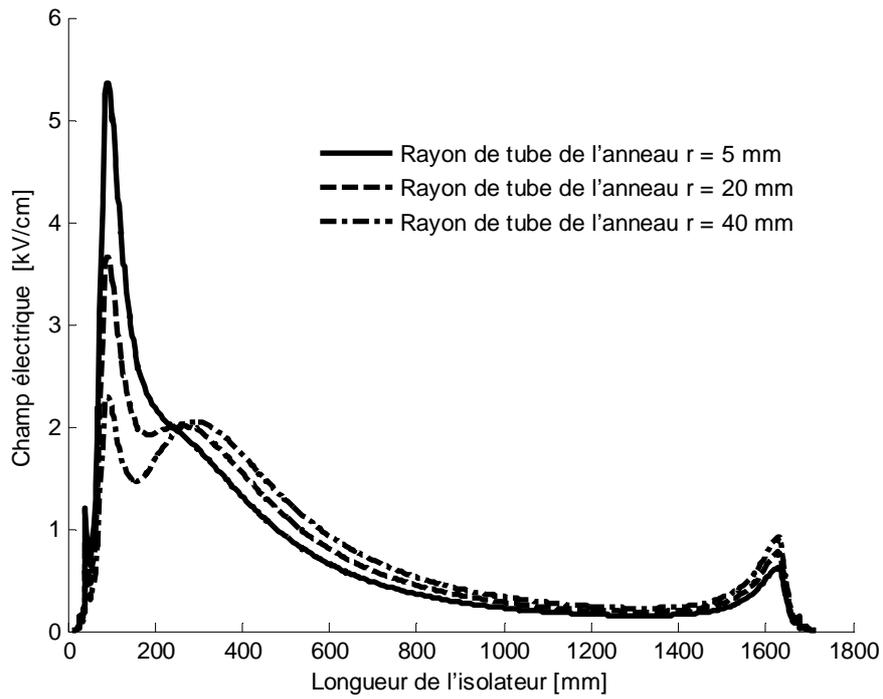


Figure IV.8. Champ électrique en fonction du rayon du tube de l'anneau de garde

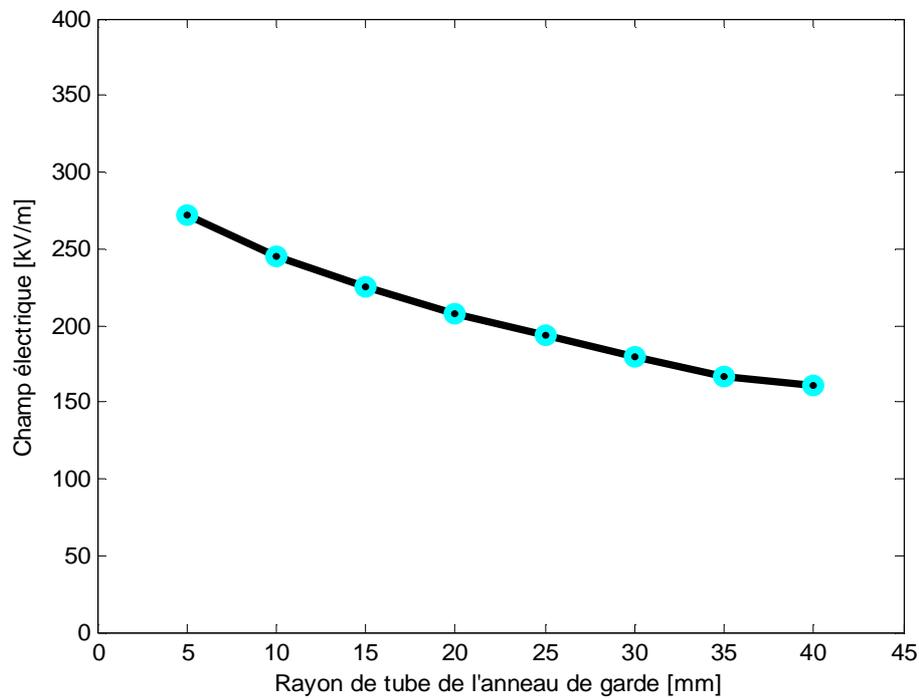


Figure IV.9. Intensité de champ électrique maximale en fonction du rayon du tube de l'anneau de garde

IV.3 Atténuation du champ électrique par modification de la permittivité du matériau de revêtement

En raison des questions soulevées au sujet de la distribution du champ électrique le long d'un isolateur en composite, une amélioration ou même une conception de nouveaux isolateurs dans laquelle une meilleure distribution du champ électrique le long de la surface n'ayant pas besoin de l'utilisation des accessoires supplémentaires tels que les anneaux de garde, serait une alternative intéressante et nécessaire [99 - 101].

L'inconvénient principal de l'anneau de garde est qu'il réduit le niveau d'isolation de base de l'isolateur. En plus, un anneau de garde doit être correctement choisie et positionné pour obtenir la réduction maximale désirée du champ électrique. Un choix ou une position incorrecte peuvent réduire l'efficacité de ce dispositif de calibrage [15, 97].

Afin d'améliorer la répartition du champ électrique sur la surface de l'isolateur et ainsi réduire les contraintes auxquelles l'isolateur est soumis, deux techniques d'atténuation du champ électrique ont été présentés et étudiées dans la section suivante. Il s'agit de l'utilisation pour le revêtement de l'isolateur de matériaux polymères composites de différentes permittivités, ainsi que les modifications géométriques de l'isolateur spécialement du côté de l'extrémité sous tension.

IV.3.1 Matériaux utilisés pour l'atténuation du champ électrique

L'utilisation de produits (polymères) à haute permittivité, sur la base de matériaux ferroélectriques, a été considérée comme une bonne option pour contrôler le champ électrique dans les isolants électrique [99]. Ying Shen et al. [99] ont montré que l'augmentation de la permittivité relative d'un composé de caoutchouc de silicone peut réduire l'intensité du champ électrique sur la surface de l'isolateur. Le dopage de caoutchouc de silicone en quantité contrôlée de matériaux ferroélectriques, présentant une très forte permittivité sans compromettre le moulage et les propriétés mécaniques du matériau composite, peut donner de bons résultats dans la réduction de l'intensité du champ électrique. L'un des matériaux utilisés à cet effet est le titanate de baryum (BaTiO_3) [99]. Le BaTiO_3 est un matériau ferroélectrique bien connu qui peut avoir une valeur de permittivité relative d'environ 6000 pour des particules d'environ 1 micron de taille [100]. Le dopage de BaTiO_3 avec différents éléments est utilisé pour modifier les propriétés diélectriques et produire un composant de haute permittivité [100, 101].

Il a été observé que l'utilisation de revêtement de silicone avec une épaisseur de couche optimisée et une valeur de permittivité élevée réduit le champ de plus de 50% par rapport aux valeurs obtenues à partir des systèmes classiques non revêtues [100].

L'oxyde de zinc est un autre type de matériau composite qui a été proposé pour le contrôle du champ électrique dans des isolateurs [102]. Les micro-agglomérats ayant des propriétés de varistance à base de ZnO, sont actuellement utilisés dans des composés polymères des extrémités de câbles à moyenne tension. Le matériau de varistance ZnO se caractérise par une forte dépendance de la conductivité électrique à l'intensité du champ électrique appliquée. Ce matériau se comporte comme un isolant pour la basse tension ou à un faible champ électrique, mais commence à conduire à une certaine valeur élevée de la tension appliquée. Les varistances ZnO sont largement utilisées pour stabiliser la tension et atténuer les surtensions dans les circuits électroniques et les systèmes de puissance (parafoudres). Notant que jusqu'à présent l'utilisation de matériaux composites tels que le ZnO dans des isolateurs est très limitée et nécessite plus de travaux et de recherche. En outre, le carbure de silicium (SiC) peut aussi être utilisé pour le contrôle du champ électrique dans des isolateurs [6].

Ces deux matériaux peuvent être utilisés pour obtenir des composés qui permettent de concevoir un isolateur qui ne nécessite pas d'anneau de garde, pour atténuer le champ électrique. En outre, leur mise en œuvre permet d'améliorer les performances des isolateurs non céramiques dans des conditions polluées [6, 10, 99].

Dans ce travail, un modèle d'un isolateur standard de suspension en polymère type 33 kV est utilisé (Figures IV.10). L'objectif est d'étudier l'effet de la permittivité sur la distribution du champ et du potentiel électriques à la surface de tel isolateur composite. Ce dernier est simulé dans des conditions propres et sèches, sans tenir compte des autres attachements tels que le pylône, les conducteurs et autres accessoires. La valeur de la permittivité relative est modifiée de 3,5 jusqu'à atteindre 100.

Les paramètres techniques de l'isolateur sont donnés dans le tableau IV.3, dans lequel D1 est le diamètre de la grande jupe, D2 est le diamètre de la petite jupe, h est la distance entre les parties métalliques, L est la distance de fuite, d est le diamètre de la tige, N1 et N2 sont les nombres de grandes et de petites jupes respectivement.



Figure. IV.10. Modèle 3D de l'isolateur 33kV

Tableau IV.3. Paramètres techniques de l'isolateur en composite

| Matériel | $D1/D2(\text{mm})$ | $h(\text{mm})$ | $L(\text{mm})$ | $d(\text{mm})$ | $N1/N2$ |
|----------|--------------------|----------------|----------------|----------------|---------|
| Polymère | 121/ 81 | 318 | 880 | 25 | 4 / 3 |

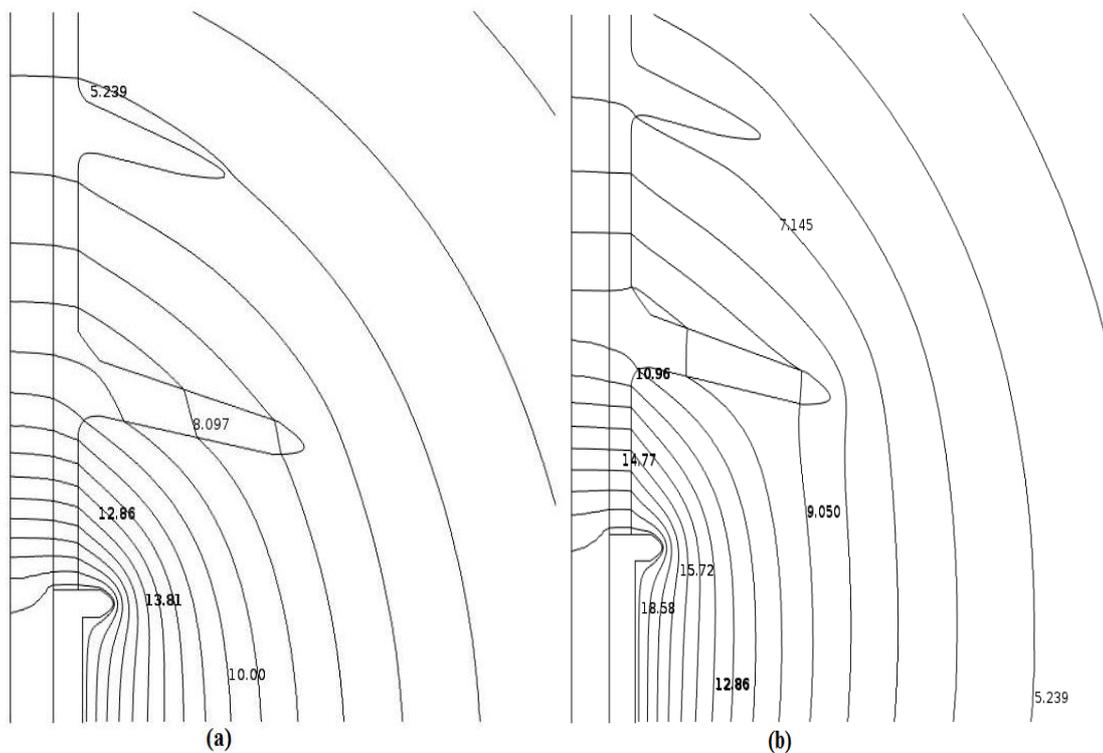
Notant qu'un intérêt particulier est réservé au point dit point triple, que n'est autre que le point de jonction des trois milieux constitué de l'extrémité métallique ou l'électrode HT, du matériau de revêtement de l'isolateur et de l'air (milieu environnant). Le champ électrique en ce point est généralement le plus élevé [10, 14, 15, 17 - 19, 97].

IV.3.2 Effet de la permittivité du matériau de revêtement

La figure IV.11 illustre la distribution des lignes équipotentielles autour de l'isolateur composite à proximité de la borne de haute tension pour différentes valeurs de la permittivité relative (3,5, 20, 50 et 100). Lors de l'augmentation de la valeur de la permittivité du matériau utilisé pour le revêtement de l'isolateur, nous observons une légère amélioration de la distribution des lignes équipotentielles, pour les faibles valeurs de permittivité relative entre 3 et 20 (valeurs actuellement réalisées dans des matériaux non dopé), tandis que pour des

valeurs de la permittivité relative plus élevées, supérieures à 20, les lignes équipotentiels sont nettement mieux réparties autour de l'isolateur.

Notant que les lignes équipotentiels se séparent progressivement pour des valeurs croissantes de la permittivité rendant le champ électrique plus uniforme. Nous constatons en fait sur la figure IV.11.a que les lignes équipotentiels se concentrent autour de la partie métallique sous tension et sur la première jupe de l'isolateur, tandis que sur la figure IV.11.d, les lignes équipotentiels sont mieux réparties en réduisant nettement la concentration du champ électrique.



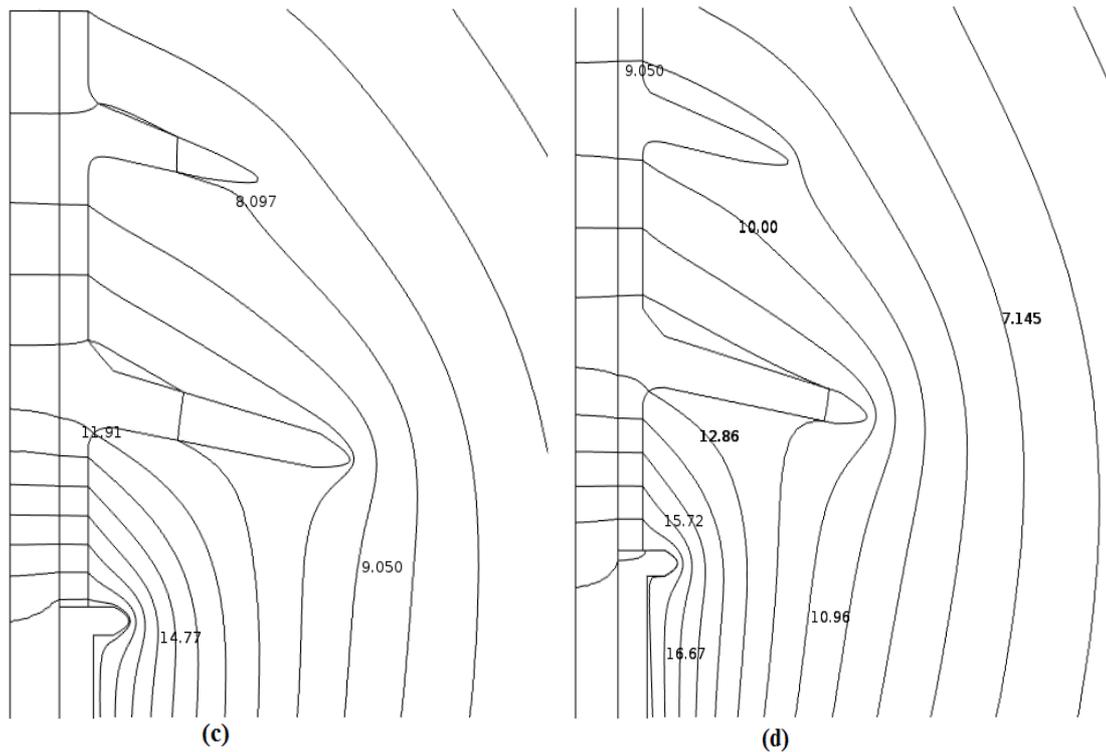


Figure IV.11 Lignes équipotentielles autour de l'isolateur composite de 33kV pour différentes valeurs de la permittivité
a) 3,5 ; b) 20 ; c) 50 ; d) 100

La répartition du potentiel le long de la ligne de fuite de l'isolateur polymère de 33kV, pour différentes valeurs de la permittivité de la matière de revêtement, est présentée sur la figure IV.12. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la permittivité améliore la distribution du potentiel le long de la ligne de fuite en la rendant plus uniforme. Une telle uniformisation se traduit principalement par une diminution importante de l'intensité du champ électrique au voisinage de l'électrode HT (figures IV.13).

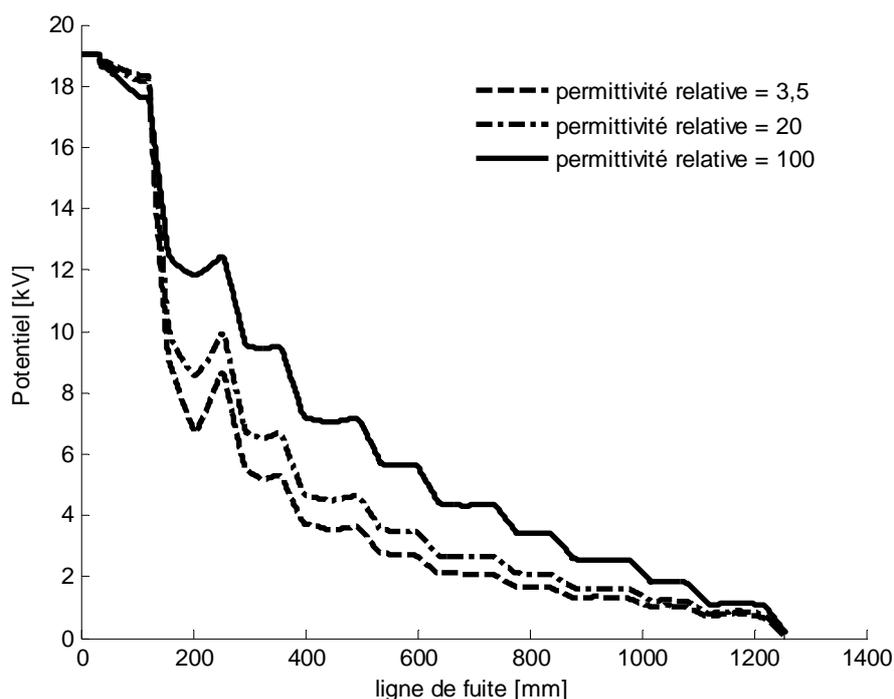


Figure IV.12. Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en composite de 33 kV

La distribution du champ électrique tangentiel le long de la ligne de fuite de l'isolateur, pour différentes valeurs de la permittivité de matériau de revêtement, est illustrée sur la figure IV.13. Par ailleurs, la figure IV.14 représente l'écho-gramme du champ électrique pour les valeurs de la permittivité relative égales à 3,5 et 100. La valeur du champ électrique tangentiel est plus élevée à proximité de la borne HT, en particulier pour des valeurs de la permittivité entre 3,5 et 20. Le champ électrique diminue par la suite le long de la ligne de fuite de l'isolateur. Une telle diminution s'accroît avec l'augmentation de la permittivité.

D'autre part, l'augmentation de la permittivité atténue non seulement le champ électrique, mais aussi déplace le champ maximal loin du point triple. Nous constatons sur les figures IV.13 et IV.14, l'apparition des pics excessifs autour des premières jupes à proximité de la borne HT et la diminution de la valeur de champ au niveau du point triple lors de l'utilisation de revêtement à grande permittivité.

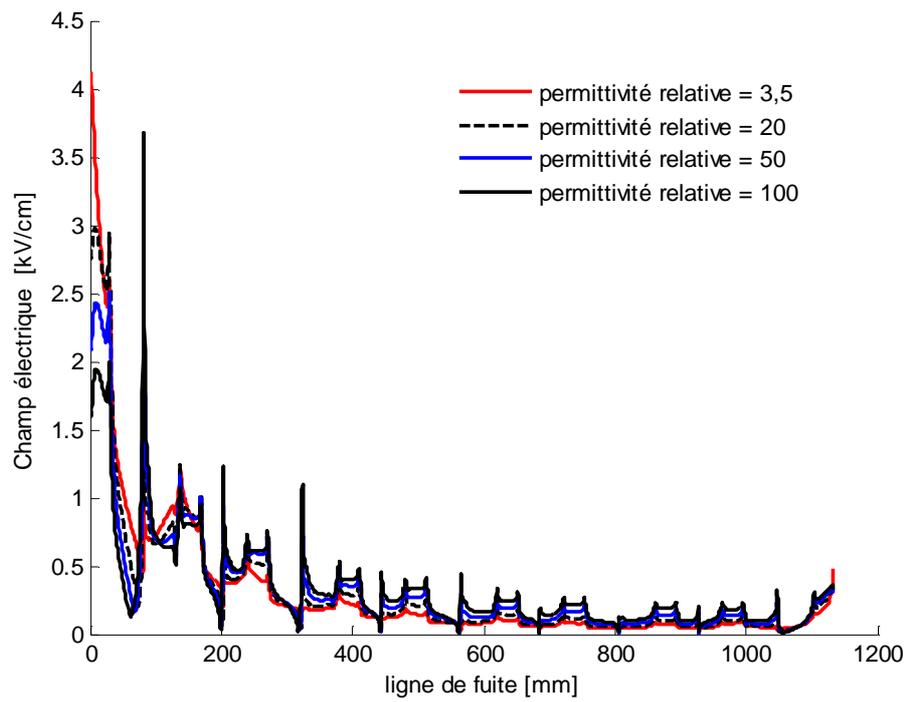


Figure IV.13. Champ électrique tangentiel le long de la ligne de fuite de l'isolateur en composite de 33 kV pour différentes permittivités du matériau de revêtement

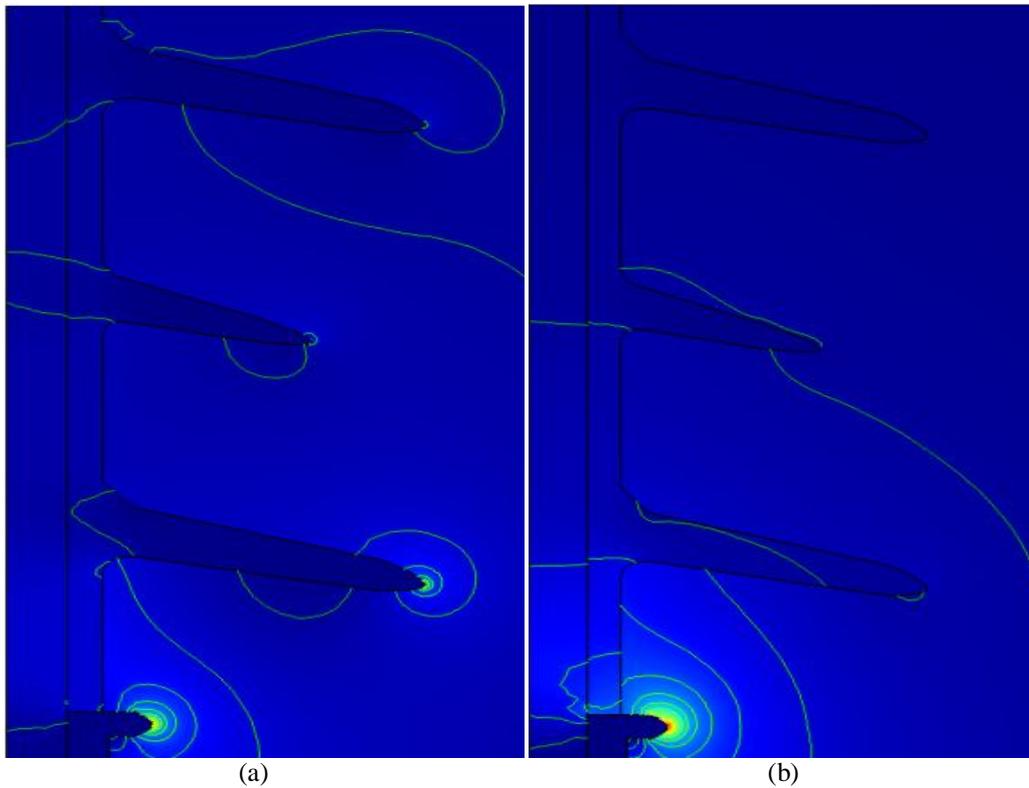


Figure IV.14. Echo-gramme du champ électrique le cas d'un isolateur en composite de 33 kV pour la valeur de la permittivité du matériau de revêtement :
(a) 100; (b) 3,5

La figure IV.15 montre la variation du champ électrique au niveau du point triple en fonction de la permittivité de la matière (silicone) de revêtement de l'isolateur. Une analyse des résultats de la figure VI.15 indique que le champ électrique diminue à des niveaux appréciables avec la croissance de la permittivité de la matière (silicone) de revêtement au niveau du point triple.

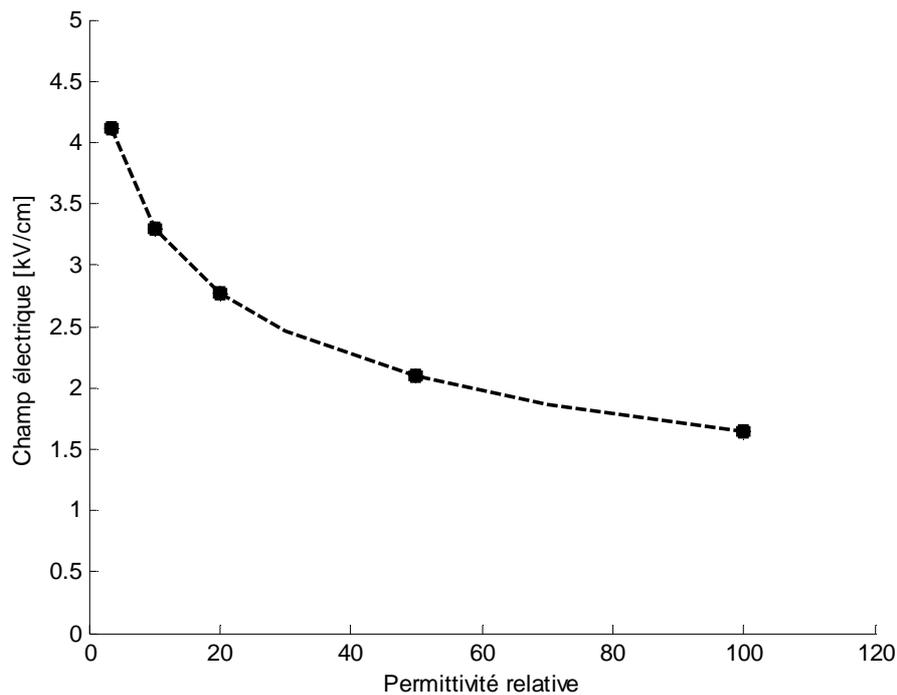


Figure IV.15. Amplitude du champ électrique au niveau du point triple en fonction de la permittivité du matériau de revêtement dans le cas d'un isolateur en composite de 33 kV

IV.4 Atténuation du champ électrique par modification de la forme géométrique

L'interface entre les parties métalliques et le polymère organique de revêtement est une zone très sensible dans la conception de l'isolateur en composite, du fait que le champ électrique est maximal à proximité de la zone de jonction triple (point d'union entre le métal, du polymère et l'air) [10, 13, 14, 17 - 19, 97]. En effet, la probabilité de déclenchement des décharges partielles en ce point est importante, ce qui favoriserait l'érosion du matériau isolant (polymère).

Comme mentionné précédemment, les modifications géométriques de l'isolateur du côté de l'extrémité sous tension pourraient réduire l'intensité du champ électrique à la surface de

l'isolateur. Deux modifications sont envisageables au niveau des parties situées à proximité de la borne HT [10]. La première consiste en un déplacement ou une élimination de la première jupe adjacente à l'extrémité sous tension. La deuxième consiste en la modification de la forme du matériau en polymère au niveau du point triple du côté de l'extrémité sous tension.

Le principe de la modification de la géométrie de la première jupe est basé essentiellement sur le phénomène de réfraction diélectrique. Lorsque le déplacement électrique \vec{D} rencontre la surface d'un isolant de permittivité différente (passage d'un milieu à un autre) et qui n'est pas perpendiculaire, le vecteur déplacement change de direction. Le rapport des tangentes des angles générés par les champs électriques avec la normale est égal à celui de leurs permittivités respectives. Ceci est également connu par la loi de réfraction du flux électrique à la limite [10].

La figure IV.16.b illustre la modification que nous avons proposée sur le profil du matériau isolant (polymère) consistant en l'élimination de la jupe proche de la borne HT et la figure IV.16.c, IV.16.d et IV.16.e montrent la modification sur la forme de l'isolateur par changement de l'inclinaison, par l'ajout d'une jupe collée à l'extrémité métallique sous tension et par recouvrement d'une partie de l'électrode sous tension respectivement. Pour cela, nous considérons une permittivité relative constante égale à 3,5 pour l'ensemble des modèles étudiés.

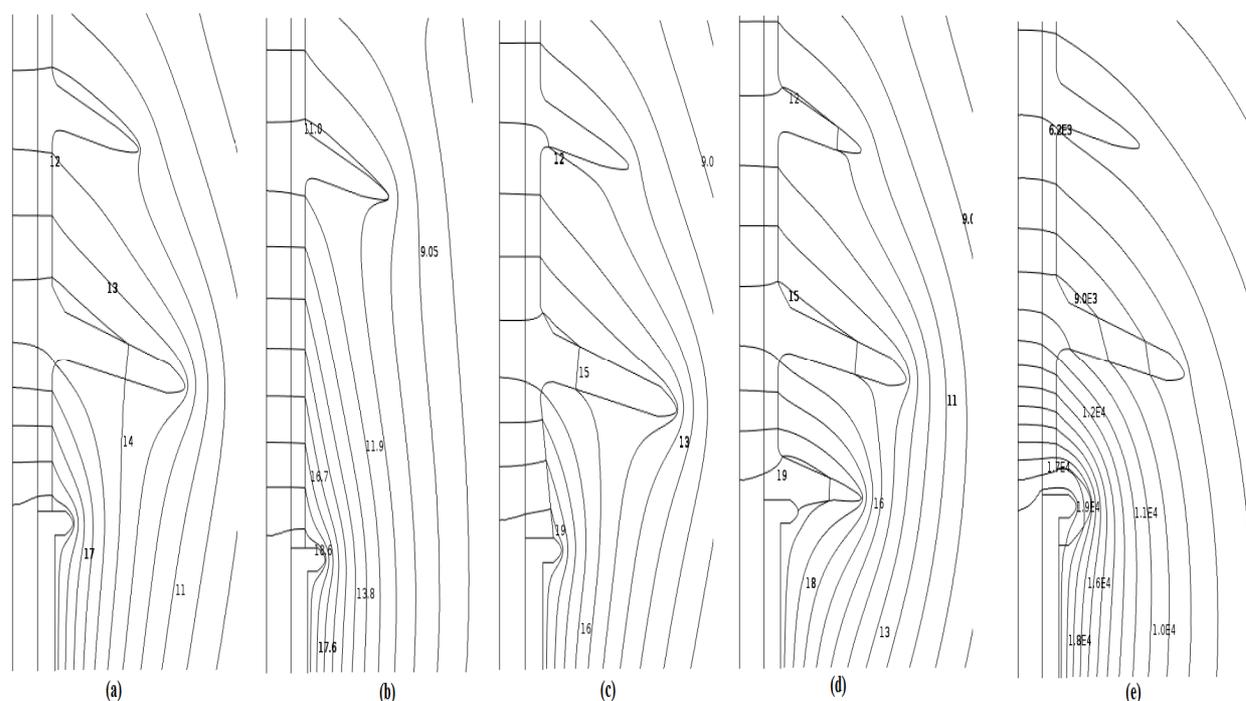


Figure IV.16. Distribution des lignes équipotentielles dans le cas d'un isolateur en composite de 33 kV : a) conception originale, b) sans la première jupe, c), d) et e) avec une modification de la forme géométrique de l'isolateur à proximité de l'électrode sous tension.

La figure IV.16 illustre l'effet de la suppression de la première jupe et la modification du profil du matériau isolant (polymère) à proximité de la borne HT sur la distribution (espacement) des lignes équipotentielles. L'objectif de telles opérations est d'optimiser la géométrie de l'isolateur afin de réduire le champ électrique.

Comme nous constatons sur la figure IV.16, l'espacement des lignes équipotentielles diffère d'un modèle à un autre, en particulier pour les cas IV.16.b, IV.16.c et IV.16.d par rapport à la géométrie initiale ou standard illustrée par le modèle IV.16.a. En effet, l'application du principe de réfraction diélectrique permet (pour certaines géométries) l'atténuation du champ électrique au voisinage des parties métalliques sous tension.

Le champ électrique tangentiel au niveau du point triple est donné pour l'ensemble des modèles étudiés dans le Tableau IV.4. Le champ est faible dans le cas des modèles 16.b et 16.e et important pour les modèles (standard IV.16.a et IV.16.d).

Tableau IV.4. Valeurs du champ électrique au niveau du point triple

| Forme de l'isolateur | Champ électrique [kV/cm] |
|----------------------|--------------------------|
| Modèle IV.16.a | 4,12 |
| Modèle IV.16.b | 3,90 |
| Modèle IV.16.c | 5,47 |
| Modèle IV.16.d | 8,41 |
| Modèle IV.16.e | 1,56 |

Comme pour l'augmentation de la permittivité, certaines modifications sur le profil (géométrie) de la gaine de revêtement au voisinage de l'extrémité sous tension, non seulement atténuent le champ électrique, mais aussi le déplacent loin du point triple. En effet, le champ électrique tangentiel est plus intense au voisinage de la première jupe de côté HT comme montré sur la figure IV.17 (modèle IV.16.e).

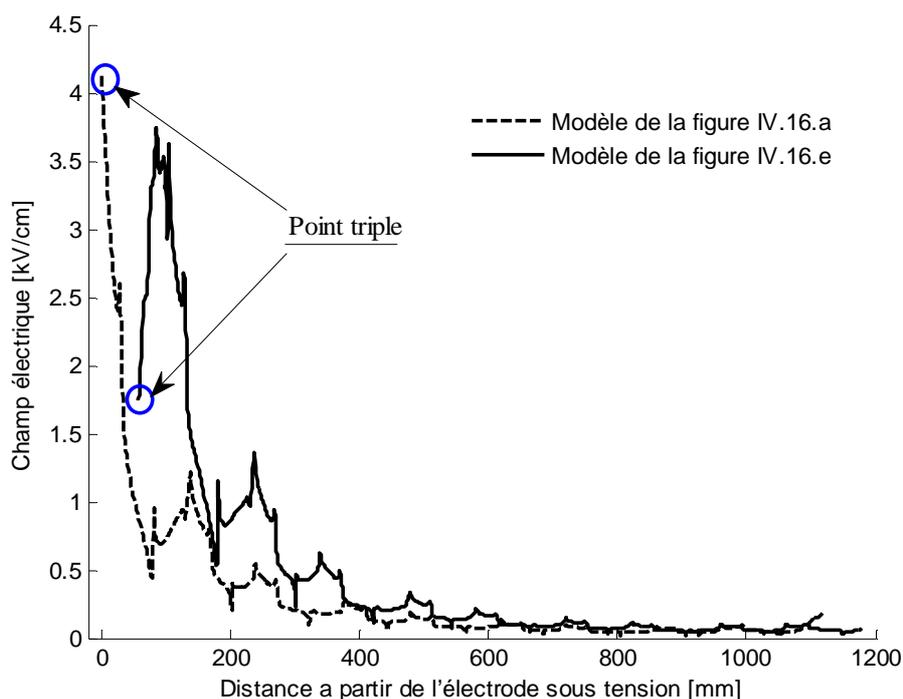


Figure IV.17. Champ électrique tangentiel à la surface d'un isolateur en composite 33 kV pour les deux modèles (IV.16.a) forme initiale et (IV.16.e)

La figure IV.17 présente l'évolution du champ électrique tangentiel le long de la ligne de fuite de l'isolateur pour les deux modèles IV.16.a et IV.16.e. Comme dans le cas de l'augmentation de la permittivité, certaines modifications sur le profil (géométrie) de la gaine de revêtement au voisinage de l'extrémité sous tension (modèles IV.16.e), non seulement atténuent le champ électrique au niveau du point triple, mais aussi le déplacent. En effet, le champ électrique tangentiel est réduit au niveau du point triple pour le modèle 6.e et est maximal à l'extrémité de la première jupe (déplacement du point relatif à la valeur maximale du champ électrique). En comparaison, la conception du modèle de la figure 6.e permet une réduction minimale de 5,33% seulement du champ électrique tangentiel au niveau de point triple de l'isolateur par rapport à celui de la conception initiale de la figure IV.16.a ; le champ électrique tangentiel au point triple de la forme initiale (Figure IV.16.a) est de 4,12 kV/cm, contre 3,9 kV/cm lors du recouvrement de la partie supérieure de l'électrode sous tension (Figure IV.16.e). Cependant, avec l'élimination de la jupe proche de la borne HT (Figure IV.16.b), le champ électrique tangentiel maximal au même point triple vaut 1,56 kV/cm soit une réduction est de 62,13% par rapport à celui de la conception initiale.

IV.5 Conclusion

Dans le but d'atténuer le champ électrique à la surface des isolateurs de suspension en polymère, trois alternatives ont été présentées (1) installation d'un anneau de garde du côté de la ligne sur un isolateur de 230 kV, les paramètres d'influence consistent en la position et les dimensions de l'anneau, (2) revêtement d'un isolateur de 33 kV, le paramètre d'influence est la permittivité, (3) modification de l'isolateur de 33 kV à proximité de la borne sous tension.

Les résultats montrent que l'utilisation d'un anneau de garde conduit à une réduction maximale du champ électrique notamment lorsque le rayon, le rayon du tube et la position du montage sont choisis convenablement ; pour des valeurs de 225 mm, 40 mm et 250 m respectivement, le champ est réduit d'environ 80% pour un isolateur en composite de 230 kV. Une modification du profil (géométrie) de la gaine de revêtement de l'isolateur, en particulier du côté de l'extrémité sous tension, permet une atténuation du champ électrique et déplace le champ maximal loin du point triple. De même, de très fortes valeurs de permittivités diélectriques du matériau de revêtement produiront aussi une réduction significative et acceptable du champ électrique.

Etant donné que la plupart des fabricants ne recommande pas l'utilisation des anneaux de garde pour des tensions nominales inférieures à 230 kV, le phénomène de réfraction du champ électrique associé à une augmentation appropriée de la valeur de la permittivité est une alternative intéressante pour la réduction du champ électrique au voisinage des bornes sous tension.

CHAPITRE V

CONCEPTION OPTIMALE D'UN ANNEAU DE GARDE POUR UN ISOLATEUR COMPOSITE HT

V.1 Introduction

L'un des principaux facteurs qui contribuent au développement des décharges sur des surfaces isolantes consiste en la distribution de champ électrique sur de telles surfaces. Le champ électrique est généralement non uniforme le long de la surface des isolateurs. Des champs électriques élevés déclenchent des activités de type couronne et de décharges qui contribuent considérablement à la dégradation prématurée grâce à la formation progressive d'un chemin conducteur. Dans des conditions extrêmes, les arcs électriques intenses pourraient provoquer une défaillance de l'isolation suite à une détérioration sévère [103, 104].

Compte tenu des problèmes mentionnés ci-dessus, le contrôle du champ électrique est fortement souhaitable afin d'atténuer l'effet des décharges électriques sur des isolateurs de lignes, en particulier les isolateurs en composites. Différentes techniques et matériaux isolants sont développés pour réduire l'intensité du champ électrique sur la surface de l'isolateur. Nous citons, entre autres, l'utilisation d'isolateurs polymères en composite à haute permittivité [6, 9, 10], l'utilisation des isolateurs recouverts d'un revêtement semi-conducteur [11] et l'installation des anneaux de garde [12 - 15].

L'anneau de garde est le dispositif le plus couramment utilisé pour les isolateurs de haute tension afin de contrôler un stress excessif près des extrémités de l'isolateur, en particulier du côté de la borne de la haute tension [105, 106]. La présence de l'anneau de garde redistribue les lignes du champ électrique sur des zones plus larges, ce qui réduit l'intensité élevée du champ électrique aux deux extrémités de l'isolateur.

Cependant, il n'y a pas de normes spécifiques pour la conception et la mise en place les anneaux de garde. Ces anneaux sont montées, en général, sur les deux extrémités des chaînes d'isolateurs pour des lignes dont la tension est supérieure à 345 kV, seulement du côté de l'électrode sous tension pour des lignes de tension comprise entre 230 kV et 345 kV et rarement pour des lignes de tensions inférieures à 230 kV [10].

L'objectif de ce travail consiste en l'optimisation de la géométrie de l'anneau de garde, monté sur des chaînes d'isolateurs en composite de 230 kV, dans le but d'obtenir les distributions du champ et du potentiel électriques les plus uniformes. Dans un premier temps, nous avons analysé l'influence des paramètres géométriques principaux de l'anneau de garde sur la distribution du champ électrique le long de la chaîne d'isolateurs en composite, à savoir le rayon R de l'anneau, le rayon du tube de l'anneau et enfin sa position H par rapport à l'électrode HT. Il est important de mentionner que l'anneau de garde est tubulaire de forme

circulaire. Pour chacune des variations des trois paramètres étudiés R , r et H de l'anneau de garde, la valeur maximale du champ électrique (au niveau du point triple) est déterminée. Au fait, les résultats obtenus nous ont permis de proposer une nouvelle fonction objective non linéaire reliant l'intensité du champ électrique aux paramètres de l'anneau de garde. Trois variantes de la technique d'optimisation par essaim de particules ont été utilisées pour minimiser la fonction objectif.

V.2 Effets de l'anneau de garde

Tel que décrit précédemment, les anneaux de garde, utilisés adéquatement, sont en mesure de réduire le champ électrique près des parties métalliques situées aux extrémités des isolateurs. Ceci contribue à la réduction des activités électriques nuisibles apparaissant dans les systèmes de transport fonctionnant de 230 kV ou plus et de prolonger la durée de vie des isolateurs. De tels anneaux contribuent également à l'uniformisation de la distribution du potentiel le long des isolateurs. D'après le groupe de travail 22.03 de CIGRE [107], l'installation des anneaux de garde pourrait éviter, sous certaines conditions de pollution, le contournement des bandes sèches à proximité des électrodes de haute tension des isolateurs.

L'optimisation des anneaux de garde a fait l'objet de nombreuses recherches [13 - 15, 16 - 18]. La plus grande portion des études réalisées s'est effectuée sur les isolateurs en composite, puisque ces derniers sont plus sensibles aux dégradations engendrées par l'activité des décharges électriques, très liée à la distribution non uniforme du potentiel [14 - 17].

A l'heure actuelle, il n'y a pas de normes établissant les limites du champ électrique sur les surfaces des isolants. Cependant, il existe quelques recommandations relatives à la du champ électriques. The Electric Power Research Institute (EPRI) recommande une limite maximale de la valeur du champ électrique de 450 kV/m sur les jupes en polymère [6, 108]. Cependant, même avec l'installation d'anneaux conventionnels de garde, il existe un risque pour que le champ électrique dépasse la limite maximale (seuil) recommandée. En réalité, il existe plusieurs facteurs qui influencent la distribution du champ électrique sur la surface de l'isolateur tels que la nature de l'isolant, la forme et les dimensions de l'anneau de garde, ainsi que l'état de la surface de l'isolateur en question [15, 17].

Comme indiqué précédemment, il n'y a pas de normes régissant la conception et la mise en place des anneaux de garde sur les structures de haute tension. Par conséquent, leurs dimensions varient d'un fabricant à un autre. Bien qu'il soit communément admis que l'anneau

de garde peut être placé du côté HT de la chaîne d'isolateurs [9], il est crucial de chercher en plus des dimensions (le rayon et l'épaisseur), la position la plus appropriée de son emplacement afin de minimiser au maximum le champ électrique sur les chaînes d'isolateurs.

En se basant sur la littérature, l'optimisation des anneaux de garde se limite généralement à l'étude paramétrique [18 - 23] où la géométrie de l'anneau de garde est paramétrée par un nombre réduit de variables. L'étude paramétrique consiste donc à étudier l'influence de chacun des paramètres géométrique de l'anneau de garde sur la distribution du champ électrique le long de la surface de l'isolateur afin de déterminer la meilleure configuration de paramètres (meilleure géométrie) conduisant à la distribution la plus uniforme du champ électrique.

Les principaux paramètres permettant de caractériser l'anneau de garde sont le diamètre de l'anneau, le diamètre du tube formant l'anneau et la position ou la hauteur de fixation de l'anneau par rapport à l'électrode HT, comme illustré sur la figure V.1 présentant un isolateur en composite équipé d'un anneau de garde. Toutes les études [15, 16 - 18] confirment que ces trois paramètres ont le plus d'influence sur la distribution du champ électrique et sur celle du potentiel le long de l'isolateur.

V.2.1 Profil de l'isolateur composite

Le profil et les paramètres techniques de l'isolateur en composite, objet de notre étude, sont représentés sur la figure V.1 et dans le tableau V.1 ; h étant la longueur (distance entre les parties métalliques) de l'isolateur, L correspond à la ligne de fuite, $D1$ et $N1$ sont le diamètre et le nombre des grandes jupes respectivement, $D2$ et $N2$ représentent le diamètre et le nombre des petites jupes, d est le diamètre du tronc de l'isolateur, tandis que R , r et H représentent le rayon, le rayon du tube et la position (hauteur) de l'anneau de garde respectivement. Le point triple sur la figure V.1 représente la zone de jonction triple formée du polymère de revêtement, de l'air, et de l'extrémité métallique ou l'électrode HT.

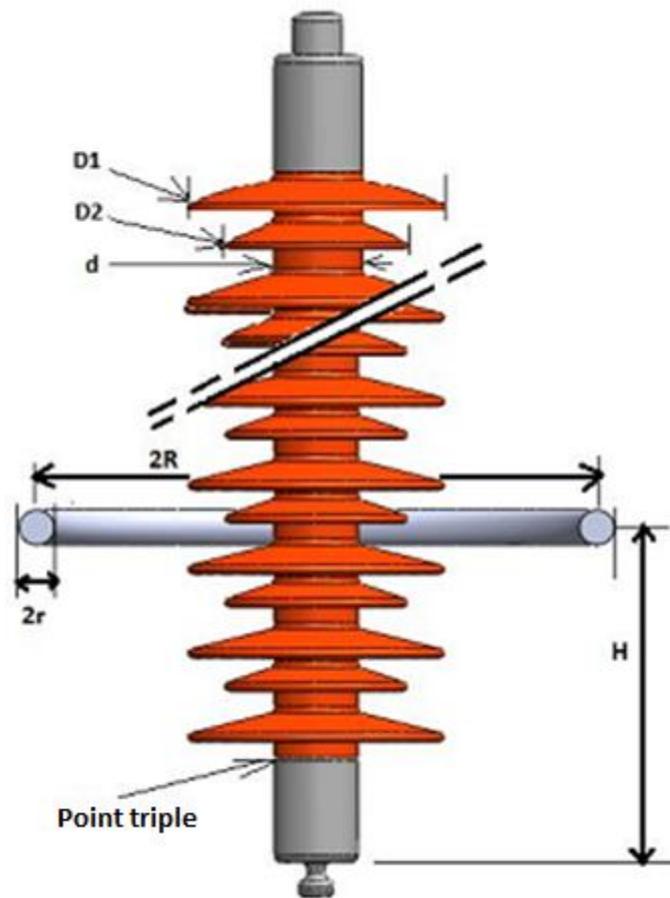


Figure V.1. Isolateur propre en composite de 230 kV avec anneau de garde

Tableau V.1. Paramètres techniques de l'isolateur composite

| Matériaux | D1/D2 [mm] | h [mm] | L [mm] | d [mm] | N1/N2 |
|-----------|------------|--------|--------|--------|---------|
| Polymère | 146 / 104 | 1696 | 5510 | 28 | 33 / 32 |

Selon les équations de Maxwell, tous les problèmes de champ électromagnétiques peuvent être exprimés en termes d'équations aux dérivées partielles. L'analyse numérique a été réalisée en utilisant la méthode des éléments Finies (M.E.F) en 3D en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysique 4.3. Ce logiciel calcule le champ électrique en résolvant l'équation de Poisson. Le modèle de l'ensemble isolateur en polymère et l'anneau de garde est généré par le modulateur 3D. Le domaine de calcul est maillé, la densité des mailles est plus élevée dans les régions critiques (interfaces entre les différents milieux tels que l'air, le métal, le revêtement en silicone et le corps en résine renforcée avec fibres de verre) où une plus grande précision est requise. Le modèle est simulé dans des conditions propres. Le (RMS) de la tension appliquée est de $230/\sqrt{3}$ kV. Le pylône, les conducteurs et les autres accessoires ne sont pas modélisés étant donné leurs effets très minimes [12, 16]. Les anneaux de garde de

différentes dimensions sont utilisés dans diverses positions en fonction du niveau de la tension appliquée. Différents organisations (IEEE_PES, ...) et fabricants recommandent le montage des anneaux de garde à proximité de la borne HT pour les isolateurs dont la tension est au-dessus de 230 kV et sur les deux extrémités pour les tensions supérieures ou égales à 500 kV. Ces recommandations, différentes d'une organisation/fabricant à un(e) autre, ne précisent pas les dimensions ou l'emplacement de l'anneau [35, 108]. Le Tableau IV.2 donne des détails sur l'utilisation des anneaux de garde pour des tensions supérieures ou égales à 230 kV [35, 109]. Selon ce tableau, un seul anneau de garde est installé à proximité de la borne HT. Par ailleurs et en se basant sur des travaux récents [10, 12 - 15], nous avons préféré que notre anneau de garde ne soit reliée à aucune borne aussi bien de haute tension que de terre.

V.2.2 Initiation de l'effet couronne

Les simulations ont été réalisées afin d'étudier les effets de l'anneau de garde sur le champ électrique. En effet, la valeur maximale du champ électrique le long de l'axe central du noyau de l'isolateur en composite dans des conditions propres et sèches est déterminée pour diverses tensions appliquées et ce en absence et en présence de l'anneau de garde. L'anneau de garde adopté pour cette partie et celui recommandé et caractérisé par $R = 101$ mm, $r = 31$ mm et $H = 150$ mm [15, 108].

La figure V.2 illustre la valeur maximale du champ électrique en fonction de la tension de la ligne sans et avec l'anneau de garde pour les isolateurs en composite de 230 kV et dans des conditions sèches et propres [108]. Sur la figure V.2, la valeur du champ électrique de 450 kV/m qui pourrait engendrer des décharges de couronne [6, 14, 15] est représentée par une ligne horizontale. A noter que pour toutes les analyses, le champ électrique maximal est calculé sur la base de la tension de phase ; la tension de la ligne est utilisée dans la présentation, car elle est la plus révélatrice.

Selon la figure V.2, la valeur maximale du champ électrique augmente linéairement avec la tension. Il est clair qu'en l'absence de l'anneau de garde, la valeur maximale du champ électrique est supérieure à celle de seuil de l'apparition de l'effet couronne (de 450 kV/m). Cependant, et en présence de l'anneau de garde, la valeur maximale du champ électrique pour les isolateurs de 230 kV est bien en dessous de celle de seuil (de 450 kV/m), d'où l'utilité d'un tel anneau de garde.

Dans la pratique, les chaînes d'isolateurs en composites sont utilisées sous différentes conditions climatiques et atmosphériques. Dans des conditions d'humidité, vu la permittivité

élevée de l'eau, la valeur du champ électrique maximale mesurée est supérieure d'environ 50% à celle obtenues dans des conditions sèches [15] et peut donc dépasser la valeur de seuil d'apparition de l'effet de couronne ; l'optimisation de l'anneau de garde s'avère indispensable dans des conditions d'humidité ou même de pollution. En outre, la mise en œuvre des anneaux de garde adéquatement conçus peuvent aider les isolateurs à supporter des tensions plus élevées.

Le Tableau V.2 présente les tensions d'initiation de l'effet couronne sur les surfaces des anneaux de garde recommandés (dont les paramètres sont cités dans le Tableau IV.2), lorsqu'ils sont montés sur un isolateur en composite de tension alternative de 230 kV. En simulation, la tension appliquée est augmentée progressivement et la valeur maximale du champ électrique est calculée. La tension d'apparition de l'effet couronne correspond à la valeur de la tension appliquée pour laquelle le champ électrique maximal sur l'anneau atteint la valeur de seuil (de 450 kV/m) d'apparition de l'effet couronne. Ces résultats montrent bien que les tensions minimales d'initiation de l'effet couronne sont inférieures à celle de service (55% à 71% de la tension de service en fonction des paramètres de l'anneau de garde utilisé). En effet, la tension minimale d'initiation de l'effet couronne de 122 kV est obtenue pour un anneau de garde de 203/62; cette tension correspond à 55% de la tension de service (230 kV). Par conséquent, un anneau de garde optimisé serait nécessaire pour réduire l'activité des décharges de couronne sur l'ensemble des pièces formant l'isolateur en composite de 230 kV.

Tableau V.2. Tension de l'initiation de l'effet couronne sur la surface de l'anneau de garde recommandé

| | | | |
|--|-----|-----|-----|
| Diamètre de l'anneau de garde [mm] | 203 | 305 | 381 |
| Diamètre du tube de l'anneau de garde [mm] | 62 | 87 | 104 |
| Tensions d'initiation de l'effet couronne [kV] | 122 | 139 | 156 |
| Pourcentage de la tension du système [%] | 55 | 63 | 71 |

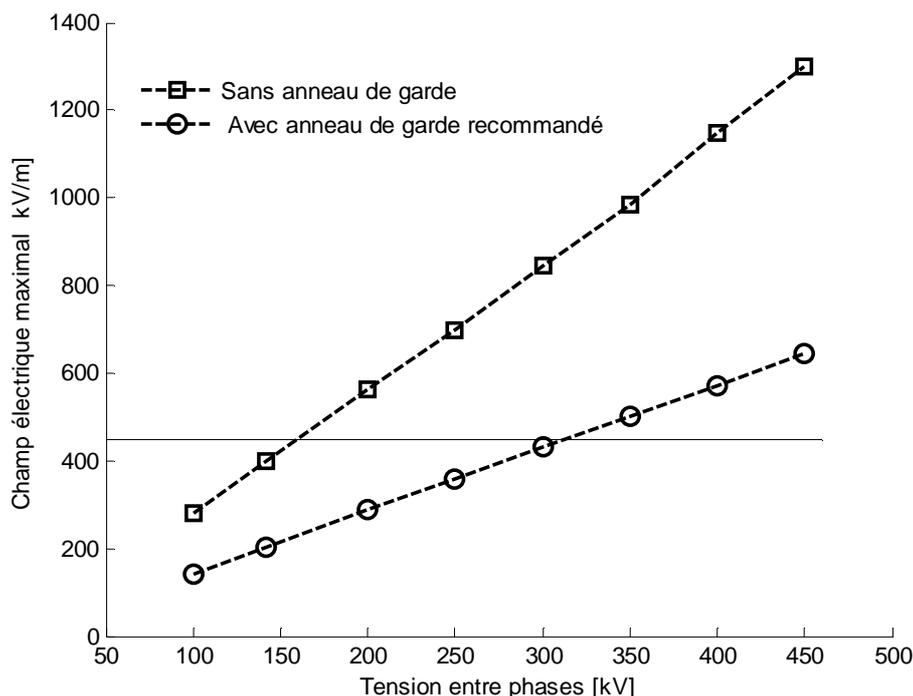


Figure V.2. Champ électrique maximal en fonction de la tension de la ligne pour un isolateur en composite de 230 kV

V.2.3 Effets des paramètres de l'anneau de garde

Les effets du rayon (R) de l'anneau de garde, de son rayon du tube (r) et de sa position (H) par rapport à l'électrode de haute tension sur le champ électrique maximal à la surface des isolateurs générés à proximité de l'électrode de haute tension, ont été examinés. L'influence de chaque paramètre sur la valeur maximale du champ électrique a été examinée en changeant une seule variable et en maintenant les deux autres fixes. Les effets de la position du montage (H), le diamètre (R) et le diamètre (r) du tube de l'anneau sont présentés sur les figures V.3, V.4 et V.5, respectivement. Notant que H , R et r sont variés avec des pas de 50 mm, 50 mm et 5 mm respectivement.

En présence de l'anneau de garde, l'intensité maximale du champ électrique diminue particulièrement du côté de l'électrode sous tension de l'isolateur en composite. En outre, lorsque la hauteur du montage de l'anneau de garde est augmentée de 0 à 500 mm, la valeur de l'intensité du champ électrique maximal diminue, atteint un minimum avant d'augmenter à nouveau (Figure V.3). La valeur du champ électrique maximal est réduite de 43% (soit une diminution de 282 kV/m à 161 kV/m) par rapport à sa valeur maximale.

La figure V.4 montre que l'augmentation du rayon de l'anneau de garde engendre une légère augmentation (environ 17%) de la valeur maximale du champ électrique. En effet, dans

le cas où la position de l'anneau est $H = 200$ mm et son rayon du tube est $r = 40$ mm, le champ électrique maximal augmente de 189,7 kV/m à 230 kV/m, quand le rayon de l'anneau augmente de 150 mm à 500 mm. Notons que l'augmentation du rayon de l'anneau au-delà de 450 mm n'a pratiquement pas d'effet sur la valeur maximale du champ électrique.

Le rayon du tube de l'anneau de garde (r) est également un paramètre important dans le contrôle de la valeur maximale du champ électrique en particulier à proximité de l'électrode HT, pour éviter l'effet couronne. Il est évident que l'augmentation du diamètre du tube a une influence notable sur la réduction de l'intensité maximale du champ électrique à la surface de l'isolateur. Pour une hauteur de l'anneau de garde de 250 mm (correspondant à la plus basse valeur maximale du champ électrique), plus de 40% (soit de 272 kV/m à 161 kV/m) de réduction de la valeur maximale du champ électrique est obtenue lorsque le rayon du tube de l'anneau de garde augmente de 5 à 40 mm, contre 20% pour une hauteur de 0 mm (Figure V.5). Cependant, le choix du diamètre du tube de l'anneau de garde est soumis à certaines restrictions; avec un diamètre de tube faible, l'amplitude du champ électrique sur la surface de l'anneau pourrait être supérieure à celle de l'ionisation de l'air, conduisant à l'apparition des décharges de type couronne à la surface de cet anneau [18]. Ainsi, dans notre cas, le rayon du tube de l'anneau de garde inférieur à 5 mm ne convient pas. D'autre part, l'augmentation excessive du rayon du tube de l'anneau de plus de 40 mm rend l'anneau plus volumineux et non raisonnablement économique [19].

Les résultats de simulation obtenus et présentés sur les figures V.3, V.4 et V.5 montrent que, le rayon de l'anneau de garde (R) est le paramètre le moins influant sur la valeur maximale du champ électrique le long de l'isolateur en composite après la position (H) et le rayon du tube (r).

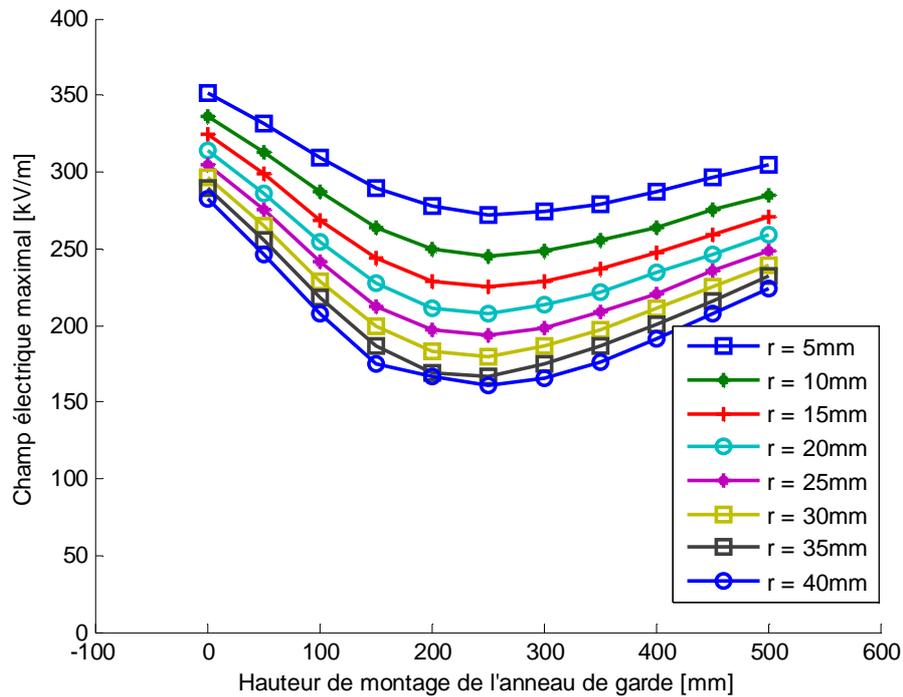


Figure V.3. Champ électrique maximal en fonction de la hauteur du montage de l'anneau de garde, pour différents rayons du tube de l'anneau garde et un rayon de l'anneau $R = 200$ mm

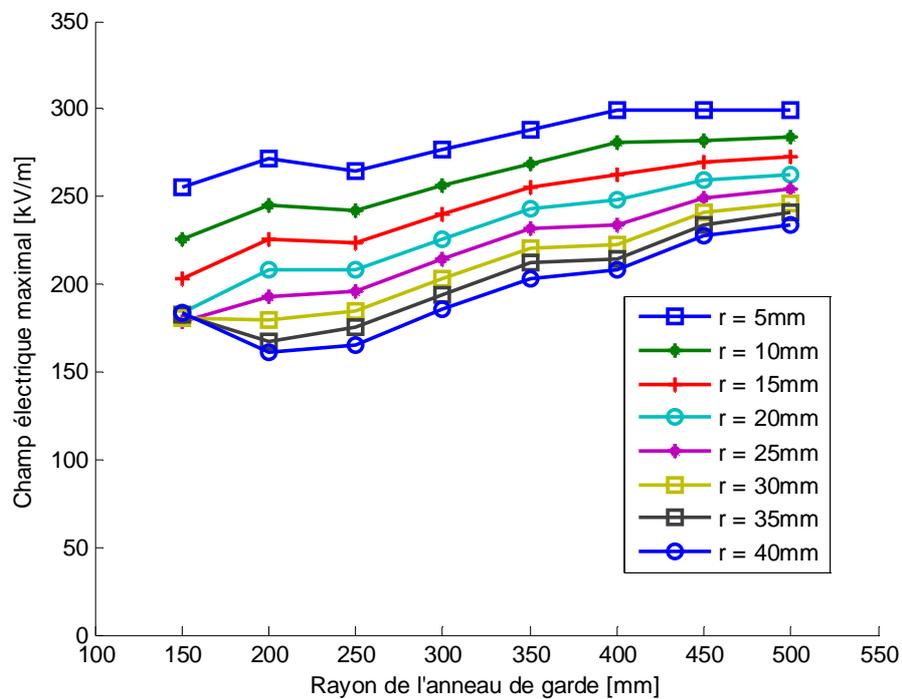


Figure V.4. Champ électrique maximal en fonction du rayon de l'anneau garde, pour différents rayons du tube de l'anneau garde et une hauteur de l'anneau $H = 250$ mm

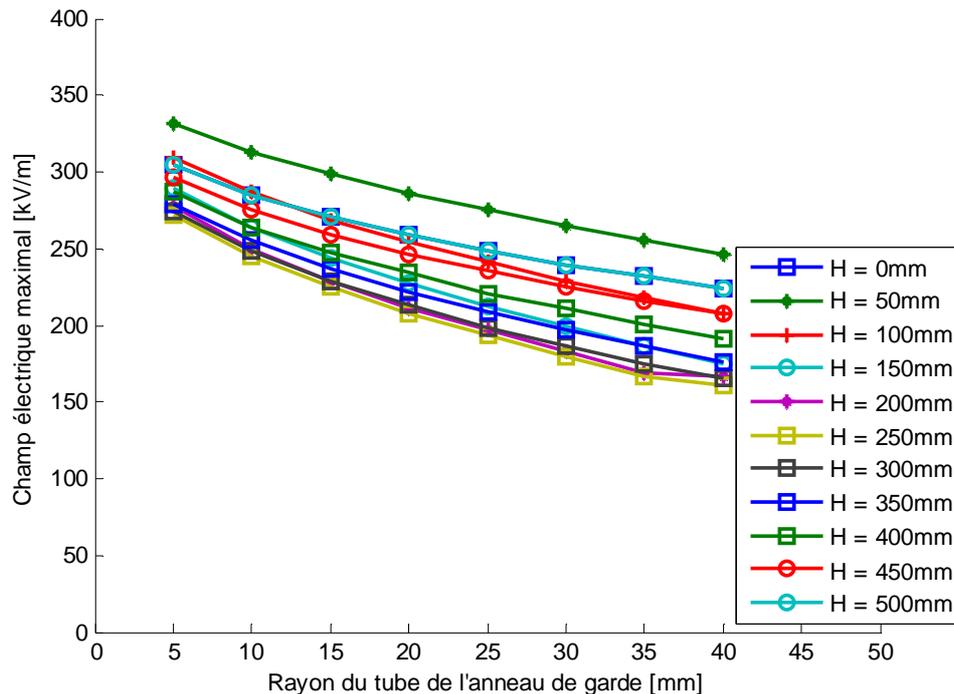


Figure V.5. Champ électrique maximal en fonction du rayon du tube de l'anneau garde, pour différentes hauteurs de l'anneau garde et un rayon de l'anneau $R = 300$ mm

V.3 Optimisation des paramètres de l'anneau de garde

V.3.1 Méthodologie d'optimisation

Les problèmes d'optimisation présentent plusieurs difficultés dépendant du besoin de l'utilisateur (solution fiable et précise), des diversités et des non linéarités des problèmes traités, du temps de calcul important,...

Un problème d'optimisation est défini par un ensemble de données du problème traité, des contraintes que doit satisfaire une solution afin d'être admissible, d'un ensemble des solutions possibles du problème traité, d'un sous-ensemble représentant les solutions réalisables (admissibles), d'une fonction objectif (fonction coût ou fonction fitness) qui associe à chaque solution une valeur numérique (nombre réel ou entier) représentant la qualité de cette solution [18].

La résolution et l'optimisation de différents problèmes rencontrés dans la vie quotidienne ont poussé de nombreux chercheurs à proposer des méthodes de résolution de plus en plus performantes en termes de temps de calcul nécessaire et de la qualité de la solution proposée [14, 20]. Ces méthodes différentes par leurs principes, stratégies et performances, sont regroupées en trois principales classes: la classe de méthodes déterministes ou exactes très

gourmandes en termes de temps de calcul et de l'espace mémoire nécessaire, la classe de méthodes approchées donnant des solutions de bonne qualité (semi optimale) avec un coût de recherche (temps de calcul et espace mémoire) raisonnable ainsi que les méthodes dites hybrides [20].

Dans le but de contourner les difficultés liées à l'utilisation de méthodes d'optimisation traditionnelles sur les problèmes d'ingénierie, les chercheurs ont proposé des méthodes d'optimisation globales connues souvent par le nom méta-heuristiques inspirées de la théorie d'évolution chez les sociétés d'animaux et d'insectes telles que les algorithmes génétiques (AG), ou alors inspirées de la théorie d'éthologie de ces sociétés dans laquelle on cite les algorithmes d'optimisation par essais particuliers PSO, les colonies de Fourmies (ACO). Ces algorithmes sont basés sur l'exploration aléatoire probabiliste de l'espace de recherche, cette exploration aléatoire guidée parfois par des fonctions probabiliste permet d'éviter les optima locaux lors de l'exploration, contrairement aux méthodes déterministes qui se bloquent en général dans un optimum local. Les méta-heuristiques sont souvent employées en optimisation combinatoire. On les rencontre également dans les problèmes continus ou mixtes (problèmes à variables discrètes et continues) [20].

V.3.1.1 Méthodes d'optimisation déterministes

De nombreuses méthodes d'optimisation conventionnelles (déterministes) ont été proposées dans la littérature. Ces méthodes peuvent être classées en deux grandes catégories : optimisation linéaire et optimisation non-linéaire [20]. La première catégorie s'occupe de la résolution de problèmes parfaitement représentés par un système d'équations linéaires tandis que la seconde s'occupe principalement des problèmes d'optimisation dont les données, i.e., les fonctions et ensembles définissant ces problèmes, sont non linéaires, mais sont aussi différentiables autant de fois que nécessaire. Les méthodes déterministes sont basées sur le calcul de la dérivée du problème, ou sur des approximations de cette dernière. Elles nécessitent donc quelques informations sur le vecteur gradient [20].

Ces méthodes d'optimisation conventionnelles (déterministes) ont la propriété de converger vers la solution mathématique exacte « réelle » tout en respectant certaines conditions liées au bon fonctionnement du processus envisagé ; celles-ci sont appelées contraintes d'égalités et/ou d'inégalités [20].

Les méthodes déterministes convergent rapidement vers un optimum. Cependant, elles ne sont pas robustes à l'initialisation c'est-à-dire que leurs convergences dépendent de la valeur

initiale, ce qui n'assure pas que l'optimum déterminé est un optimum global, souvent elles convergent vers l'optimum local le plus proche du point de départ [20].

V.3.1.2 Méthodes méta-heuristiques

Les techniques d'optimisation dites traditionnelles ont la réputation d'être efficaces lorsque la solution initiale est proche de l'optimum recherché. Cette particularité présente un important inconvénient dans le cas d'une fonction objectif possédant plusieurs optima ; elles peuvent en effet, convergées vers un optimum local [109]. Pour surmonter ces difficultés, les chercheurs ont proposé des méthodes (algorithmes) d'optimisation globale connues souvent par le nom méta-heuristiques [20, 23 - 25]. Contrairement à la plupart des méthodes déterministes, les méta-heuristiques (méthodes stochastiques) ne nécessitent ni point de départ, ni la connaissance de la dérivée de la fonction objectif pour atteindre la solution optimale. Ces méthodes (algorithmes) se basent sur des mécanismes de transitions probabilistes et aléatoires pour l'exploration de l'espace de recherche et la convergence vers l'optimum global. Leur nature aléatoire implique que pour des différentes exécutions successives, ces méthodes conduisent pour une même initialisation du problème d'optimisation à des résultats différents. En comparaison avec les méthodes déterministes exploitant la dérivée de la fonction objectif, les méta-heuristiques ont l'inconvénient d'exiger un nombre important d'évaluations de la fonction objectif [110].

Une heuristique est un algorithme qui a pour but de trouver une solution réalisable, sans garantir l'optimalité, contrairement aux méthodes exactes qui garantissent des solutions exactes [20]. La plupart des méta-heuristiques ont été conçues, à l'origine, pour la résolution des problèmes de nature discrète. Cependant elles peuvent être adaptées à des problèmes continus [20].

Elles sont utilisées généralement pour la résolution des problèmes d'optimisation difficiles, leur efficacité n'est pas toujours garantie, elle dépend, de la nature de problème envisagé et les paramètres de l'algorithme. En plus leur inconvénient majeur réside dans le nombre important d'évaluations nécessaires. Ces méthodes sont largement appliquées aux différents domaines notamment dans le domaine de la haute tension [25].

V.3.2 Optimisation Par Essaims de Particules (OEP)

Le sociologue Wilson en 1975 [111], démontra que le partage d'informations entre les individus d'un même groupe était, dans certains cas, beaucoup plus avantageux pour la survie de l'espèce que la compétition entre les individus. La coopération est ainsi un mécanisme évolutif au même titre que la sélection, le croisement et la mutation.

Des scientifiques se sont intéressés à développer des modèles interprétant le mouvement des vols d'oiseaux et des bancs de poissons. Parmi ses chercheurs, Reynolds [112] était attiré par l'aspect esthétique du déplacement des oiseaux en groupe et Heppner et Grenander [113] étaient intéressés à comprendre les règles permettant à un grand nombre d'oiseaux de voler en harmonie. D'un autre part, Wilson [111] a suggéré que ces types de modèles pourraient très bien s'appliquer à la recherche des points caractéristiques dans un espace de recherche. En se basant sur les travaux de Heppner, Reynolds et Wilson, Kennedy et Eberhart [25] cherchaient à simuler la capacité des oiseaux à voler de façon synchronisée et leur aptitude à changer brusquement de direction tout en restant en une formation optimale. Le modèle qu'ils ont proposé a ensuite été étendu en un algorithme simple et efficace d'optimisation qui a été appliqué dans divers domaines d'engineering (en génie civil, génie électrique, génie mécanique et génie chimique) [14, 20, 23].

V.3.2.1 Paramètres de l'algorithme OEP

A. Nombre de particules

Le nombre optimum de particules utilisées lors de l'optimisation est variable selon les types de problèmes à optimiser. Conformément aux expériences de certains auteurs [20], il est conseillé d'utiliser de 10 à 100 particules en fonction du problème à résoudre et de l'efficacité de la méthode ou le temps de convergence. Notant que l'algorithme OEP est sensible au nombre initial des particules. En effet, le temps d'exécution de l'algorithme est fonction du nombre d'évaluations de la fonction fitness qui n'est autre que le nombre de particules multiplié par le nombre des itérations. Donc, pour réduire le nombre total nécessaires d'évaluations, il faut réduire la taille de l'essaim. Mais un essaim trop petit risque de ne pas converger du tout vers la solution [20].

B. Fonction objectif

Un algorithme d'optimisation nécessite généralement la définition d'une fonction rendant compte de la pertinence des solutions potentielles, à partir de la grandeur à optimiser ; c'est la fonction d'adaptation ou fonction d'évaluation ou encore fonction fitness. L'algorithme convergera vers un optimum de cette fonction, quelle que soit sa définition. Cette fonction doit donc exprimer le plus fidèlement possible le désir de l'utilisateur sous forme mathématique [14, 20 - 22].

C. Poids inertiel

Introduit par Shi et Eberhart [114], le poids inertiel $w(k)$ est un paramètre utilisé pour équilibrer la force de la vitesse précédente de la particule. De nombreux tests ont été effectués pour trouver la valeur optimale de $w(k)$ [115]. L'une des meilleures techniques consiste en diminuant la valeur de $w(k)$ de 0,9 à 0,4 suivant une fonction linéaire sur le nombre maximal d'itérations à effectuer [20, 115]. Au début d'une optimisation, les particules feront de grands déplacements. Ceci permettra d'explorer une large zone de l'espace. Puis, à mesure que le nombre d'itérations augmente, l'algorithme pourrait converger. Dans ces conditions, il serait préférable de faire progresser les particules de plus en plus lentement de façon à raffiner la recherche et de ne pas rater l'optimum [20, 115].

D. Paramètre d'accélération c_1 & c_2

Ces deux paramètres ont un grand effet sur la direction que va prendre la particule à chaque itération. En fait, c_1 influe sur l'accélération de la particule vers sa meilleure performance Best déjà trouvée (comportement cognitif de particule). Par ailleurs, c_2 tend à influencer la particule pour accélérer vers le Global Best (aptitude sociale de particule). Les deux variables $c_1 * r_1(k)$ et $c_2 * r_2(k)$ seront d'une valeur aléatoire comprise entre 0 et 2 pour chaque mise à jour de chaque vitesse et cela pour chaque particule (agent). $r_1(k)$ et $r_2(k)$ sont deux nombres aléatoires tirés uniformément de l'intervalle [0,1] à chaque itération k et pour chaque dimension [20].

E. Notion de voisinage

Le voisinage constitue la structure du réseau social. Il est le sous-ensemble de particules communiquant entre-elles. Ce réseau de rapports entre toutes les particules est connu comme

la sociométrie ou la topologie de l'essaim. Il existe deux principaux types de voisinage [20, 24, 25]:

- Les voisinages géographiques : les voisins sont considérés comme les particules les plus proches. Cependant, à chaque itération, les nouveaux voisins doivent être recalculés à partir d'une distance prédéfinie dans l'espace de recherche. C'est donc un voisinage dynamique.
- Les voisinages sociaux : les voisins sont définis à l'initialisation et ne sont pas modifiés ensuite. C'est le voisinage le plus utilisé, pour plusieurs raisons à savoir il est plus simple à programmer et moins coûteux en temps de calcul. En plus, du fait qu'en cas de convergence, un voisinage social tend à devenir un voisinage géographique.

F. Critères d'arrêt :

On distingue deux grandes catégories de critères d'arrêt [20, 24, 25]:

- un critère *statique* est généralement basé sur nombre d'itérations ou d'évaluations de la fonction objectif;
- un critère *dynamique* fait référence à la qualité de la solution ou à la fin de convergence (nombre d'itérations consécutives sans améliorer la meilleure solution connue).

V.3.3.2 Description de l'algorithmique

De même que pour les paradigmes évolutionnaires, l'intelligence en essaim de particules utilise "une population" de solutions candidate pour développer une solution optimale au problème. Le degré d'optimalité est mesuré par une fonction fitness (fonction objectif) définie par l'utilisateur [20, 24, 25].

Cet algorithme a vu le jour sous forme d'une simulation simplifiée du comportement social d'un groupe d'individus, tel que le déplacement des oiseaux à l'intérieur d'une volée. La méthode d'optimisation par essaim particulaire met en jeu un groupe d'individus (agents) pour la résolution d'un problème donné. Ce groupe est appelé essaim et est composé d'un ensemble de membres, appelés particules. Les particules de l'essaim représentent des solutions potentielles au problème traité. L'essaim de particules survole l'espace de recherche, en quête de l'optimum global [20, 24, 25].

Lors de l'initialisation de l'OEP, l'ensemble des particules de groupe « essaim » est réparti au hasard dans l'espace de recherche et chaque particule possède une vitesse aléatoire. Ces données initiales (positions et vitesses) permettent de calculer les fitness des particules (P_{besti}) et de déterminer la meilleure position trouvée par l'essaim G_{best} et qui deviennent le point de départ de la recherche [20, 24, 25].

Ensuite, à chaque pas (itération), toute particule est capable [20, 24, 25]:

- d'évaluer la qualité de sa position et de garder en mémoire sa meilleure position (performance) qu'elle a atteinte jusqu'ici et sa fitness (la valeur en cette position de la fonction à optimiser) ;
- d'interroger un certain nombre de ses congénères (ses informatrices) et d'obtenir de chacune d'entre elles sa propre meilleure performance (et la qualité afférente) ;
- de choisir la meilleure des meilleures performances dont elle a connaissance, de modifier sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et de se déplacer en conséquence.

En tenant compte de son emplacement (X_i), de sa vitesse de déplacement (V_i), de la position où elle a obtenu sa meilleure qualité (P_{besti}) ainsi que la position de la meilleure qualité obtenue par l'ensemble des particules (G_{best}), chaque particule modifie sa position et met à jour sa vitesse de déplacement à chaque itération (k) de l'algorithme. Un tel déplacement est illustré sur la figure V.6 [20, 24, 25].

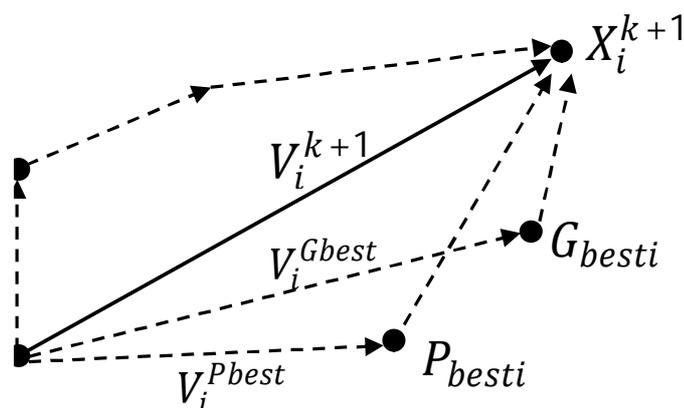


Figure V.6. Schéma de principe du déplacement d'une particule

Le but de l'algorithme OEP est d'optimiser une fonction continue dans un espace donné. Dans la majorité des cas, l'algorithme d'optimisation recherche le maximum ou le

minimum global de l'espace de recherche. Les étapes de l'algorithme OEP sont décrites comme suit [20, 24, 25]:

Chaque particule P_i de l'essaim est définie par son vecteur position X_{id} et son vecteur de vitesse de déplacement V_{id} dans un espace de recherche de dimension d . Cette particule garde en mémoire la meilleure position P_{bestid} par laquelle elle est déjà passée et la meilleure position G_{best} atteinte par toutes les particules de l'essaim.

La particule P_i va se déplacer entre les itérations k et $k+1$, en fonction de sa vitesse et des deux meilleures positions qu'elle connaît (la sienne et celle de l'essaim) suivant les deux équations suivantes [25]:

$$V_i(k+1) = w(k)V_i(k) + c_1r_1(k)(P_{bestid}(k) - P_i(k)) + c_2r_2(k)(G_{best}(k) - P_i(k)) \quad (V.1)$$

$$P_i(k+1) = P_i(k) + V_i(k+1) \quad (V.2)$$

Avec :

$X_{id}(k), X_{id}(k+1)$: la position de la particule P_i à l'itération k et $k+1$, respectivement ;

$V_{id}(k), V_{id}(k+1)$: la vitesse de la particule P_i à l'itération k et $k+1$, respectivement ;

$P_{bestid}(k+1)$: la meilleure position obtenue par la particule P_i à l'itération $k+1$;

$G_{bestid}(k+1)$: la meilleure position obtenue par l'essaim à l'itération $k+1$;

c_1, c_2 : deux constantes qui représentent les coefficients d'accélération, elles peuvent être variables dans certains cas ;

r_1, r_2 : nombres aléatoires tirés de l'intervalle $[0,1]$;

$w(k)$ est le poids inertiel, prend la valeur initial 0,9 puis diminue après chaque itération jusqu'à la valeur de 0,4.

Dans ces conditions, le pseudo-code de l'algorithme d'optimisation par EP peut être donné comme suit :

Algorithme 1 : Optimisation par essaim de particules

Début

Initialiser les paramètres et la taille M de l'essaim;

Initialiser les vitesses et les positions des particules dans l'espace de recherche;

Pour chaque particule, $P_{bestid} = X_{id}$;

Calculer $f(X_{id})$ de chaque particule et déterminer G_{bestd} la meilleure des P_{bestid} ;

Tant que (la condition d'arrêt n'est pas vérifiée) **faire**

Pour $i =$ de 1 à M **faire**

Calculer la nouvelle vitesse **Vid** à l'aide de l'équation (V.1) ;

Trouver la nouvelle position **Xid** à l'aide de l'équation (V.2) ;

Calculer $f(X_{id})$ de chaque particule;

Si $f(X_{id})$ est meilleur que $f(P_{bestid})$;

Alors $P_{bestid} = X_{id}$;

Si $f(G_{bestid})$ est meilleur que $f(G_{bestd})$

Alors $G_{bestd} = P_{bestid}$;

Fin pour

Fin tant que Afficher la meilleure solution trouvée G_{bestd} ;

Fin

V3.3 OEP à taille dynamique de la population

Dans le paragraphe précédent, la version originale de l'algorithme d'optimisation par essaim de particule (OEP) est décrite ; la taille de population étant fixe. Cependant, de nombreuses améliorations ont été apportées à l'algorithme original tel que l'introduction du concept de la taille dynamique de la population [28, 29, 116, 117].

Une telle stratégie a été utilisée dans notre étude. Dans le but de réduire la taille de population, deux techniques ont été employées. La première approche consiste en la réduction progressive (par étape) de la taille de la population [28, 115]. En fait, la taille de population de l'essaim est réduite de moitié après chaque nombre prédéfini d'itérations. Alors que la seconde approche permet un changement dynamique de la taille de population au cours de l'exécution du processus de recherche [28, 29]. La taille de la population de l'essaim diminue en général avec le nombre d'itérations. Cependant, quelques augmentations pourraient avoir lieu lorsque la valeur de la fonction objectif pour la meilleure particule est supérieure à celle moyenne de la fonction objectif de la population durant la courante itération [35]. Pour la

mise à jour de la taille de la population, nous proposons un nouveau modèle mathématique consistant en l'équation (V.3), dans laquelle la taille est actualisée sur la base de la valeur moyenne et la meilleure solution de la fonction objectif :

$$Psize(i + 1) = round\left(\left(\frac{E_{avr}(i) - E_{gbest}(i)}{E_{avr}(1) - E_{gbest}(1)}\right) * Psize_{max}\right) + Psize_{min} \quad (V.3)$$

Où $E_{avr}(i)$ est la valeur moyenne de la fonction objectif à l'itération observée i , $E_{gbest}(i)$ est la valeur de la fonction objectif de la meilleure particule de l'ensemble de l'essaim de l'itération observée i , $Psize_{max}$ et $Psize_{min}$ sont respectivement la taille maximale et celle minimale (prédéfinies) de la population.

A partir de l'équation (V.3), il est clair que la taille de population pour l'itération suivante est fonction de la différence entre la valeur moyenne de la fonction objectif de la population à la courante itération et la valeur de la fonction objectif pour la meilleure particule. En effet, la taille de population augmente lorsque cette différence est grande et diminue autrement.

Le pseudo-code de l'algorithme de l'OEP modifié est le suivant:

Algorithme 2 : Algorithme modifié de l'optimisation par essaim de particules.

Début

Initialiser les variables ;

Initialiser des tailles maximale et minimale de la population;

Initialiser les positions et les vitesses des particules ;

Évaluer la population initiale ;

Pour chaque particule $P_{bestid} = X_{id}$;

Trouver la meilleure particule dans la population initiale G_{bestd}

Initialiser les itérations ;

Tandis que iter < Maxiter ;

 iter = iter + 1 ;

Pour j = 1: taille de la population ;

 Mettre à jour de la vitesse des particules selon (V.1) ;

 Mettre à jour des positions des particules selon (V.2) ;

Fin pour

Pour $j = 1$: taille de la population ;

Évaluer la nouvelle population selon (V.5) ;

Mettre à jour la meilleure position locale pour chaque particule ;

Fin pour

Garder la meilleure solution ;

Classer la solution ;

Ajuster la taille de la population selon (V.3) ;

Fin tant que

Fin

V.3.4 Formulation du Problème

Le but de l'optimisation de la structure de l'anneau de garde est de réduire l'ampleur du champ électrique et par la suite les décharges de type couronne sur la surface des chaînes d'isolateurs en composite en particulier près des parties métalliques situées à l'extrémité HT de la chaîne d'isolateurs. Afin de prévenir ou de réduire les activités de décharges, il est nécessaire de maintenir l'intensité du champ électrique inférieure à la valeur de seuil d'apparition de l'effet couronne de 450 kV/m [6, 14, 15]. En pratique, l'intensité du champ électrique doit être réglée pour être inférieure à cette valeur de seuil, afin d'éviter non seulement l'activité couronne et la dégradation des matériaux, mais aussi de concevoir des anneaux de garde plus compact et moins volumineux. La conception optimale est obtenue suite à l'optimisation de la fonction reliant les amplitudes du champ électrique et les paramètres de l'anneau de garde en tenant compte des restrictions physiques (limites supérieure et inférieure) de chaque paramètre. Cette fonction nous permet de trouver les paramètres de l'anneau de garde minimisant le champ électrique. En effet, le problème d'optimisation peut être formulé comme suit:

$$f(x_1, x_2, x_3) = E(H, R, r) \quad (\text{V.4})$$

Avec :

$$\underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i$$

Où les x_i correspondent à H, R ou r pour $i = 1, 2$ et 3 respectivement, \underline{x}_i et \overline{x}_i sont les limites inférieure et supérieure des paramètres de l'anneau de garde.

En s'appuyant sur les résultats de simulation, un polynôme d'ordre supérieur (une nouvelle fonction objectif) est proposé afin de relier les paramètres de l'anneau de garde au champ calculé conformément à l'équation (V.5).

L'évaluation de la performance de l'interpolation est réalisée en se basant sur des valeurs optimales de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de détermination (R^2).

$$E(H, R, r) = \sum_{i,j,k} a_{ijk} H^i R^j r^k \quad (V.5)$$

Où a_{ijk} sont les coefficients du polynôme.

Il est important de noter qu'après un certain nombre d'essais, l'ordre 7 du polynôme de la fonction objectif est le plus approprié pour bonne interpolation, car il donne une faible valeur de l'erreur moyenne quadratique (RMSE = 2,2553) et un coefficient de détermination proche de l'unité ($R^2 = 0,9963$).

En outre, pour éviter une conception de l'anneau de garde de taille excessive et donc impossible à l'installer, la fonction objectif à optimiser doit être soumise à différentes contraintes traduisant la plage de variation des paramètres de l'anneau. Bien qu'il n'y ait pas de normes régissant la conception et la mise en place des anneaux de garde sur les structures de haute tension, les plages de variation des paramètres de conception de l'anneau sont choisies, dans notre étude, en fonction des résultats de la simulation et de la faisabilité géométrique, comme suit:

$$0 \text{ mm} \leq H \leq 500 \text{ mm}$$

$$150 \text{ mm} \leq R \leq 500 \text{ mm}$$

$$5 \text{ mm} \leq r \leq 40 \text{ mm}$$

Le choix des limites relatives à la hauteur (position du montage) de l'anneau de garde est déduit de la figure V.3. Comme mentionné, lorsque la position verticale (hauteur) de l'anneau de garde passe de 0 mm à 500 mm, la valeur maximale du champ électrique sur l'axe central de l'isolateur en composite diminue, atteint une valeur minimale pour une hauteur de l'anneau autour de 250 mm avant d'augmenter à nouveau. En effet, le choix de l'intervalle de 0 à 500

mm pour la hauteur est largement suffisant pour la recherche d'une valeur minimale de la valeur maximale du champ électrique. En outre, si la position verticale augmente au-delà de 500 mm la distance d'arc sec est considérablement réduite; ce n'est pas souhaitable.

La limite inférieure pour le rayon de l'anneau doit être supérieure au rayon de l'ailette (jupe) la plus large formant l'isolateur ajouté au rayon de tube de l'anneau, pour éviter tout contact de l'anneau et la plus large ailette (jupe). Cette limite inférieure a été choisie, dans notre étude, égale à 150 mm. La figure V.4 montre que pour un rayon de plus de 450 mm, aucun changement n'a été pratiquement enregistré sur la valeur maximale du champ électrique ; c'est pourquoi nous avons choisi 500 mm comme limite supérieure pour le rayon de l'anneau. D'après la figure V.5 se rapportant à l'effet de rayon du tube de l'anneau de garde, un faible rayon conduit à un champ électrique élevé; un rayon du tube inférieur à 5 mm ne conviendrait donc pas. L'augmentation du rayon du tube au-delà de 40 mm rend l'anneau plus volumineux. En effet, les limites du rayon de tube de l'anneau de garde sont choisies entre 5 mm et 40 mm.

V.4 Résultats de l'optimisation

La mise en place d'anneaux de garde conçus de manière appropriée peut être utilisée non seulement pour réduire la grandeur du champ électrique, mais aussi pour rendre le champ électrique plus uniforme et pour déplacer la position de la valeur maximale du champ électrique loin du point triple [15]. Étant donné que les paramètres de l'anneau de garde affectent le champ électrique sur la surface de l'isolateur, ces paramètres sont choisis comme des variables de décision dans la fonction objectif.

Après plusieurs tentatives d'ajustement des paramètres, le processus d'optimisation avec l'algorithme de l'OEP est effectué avec les paramètres suivants: $C_1 = 1$, $C_2 = 3$ et $w = 1$, la taille maximale de l'essaim = 25, la taille minimale de l'essaim = 5 et le nombre d'itérations $iter = 70$.

Nous montrerons que plus le nombre de particules de l'essaim est grand et/ou plus le nombre d'itérations est grand, plus la convergence de la solution est plus lente. De même, moins est le nombre particules de l'essaim et/ou moins est le nombre d'itérations, moins est la fiabilité pour parvenir à des solutions de haute qualité.

Tout d'abord, toutes les positions des particules et leurs vitesses sont aléatoirement initialisées. Ensuite, toutes les particules se déplacent dans l'espace de solution et mettent à jour leur taille et leurs positions jusqu'à trouver la solution optimale. La variation de la taille de la population au

cours du processus d'optimisation en utilisant les trois approches fixe, réduction progressive et réduction dynamique de la taille de la population est représentée sur la figure V.7. En général, pour les deux dernières approches, la taille de la population de l'essaim diminue avec le nombre d'itérations jusqu'à atteindre la valeur minimale. Cependant, dans l'approche dynamique, la taille de la population peut être augmentée entre une itération et la suivante en fonction de l'évolution du processus d'optimisation (la mise à jour de la taille de la population est basée sur la valeur moyenne et la meilleure solution de la fonction objectif pour chaque itération).

Les caractéristiques de convergence obtenues après optimisation sont présentées sur la figure V.8 (a et b). A partir d'une valeur aléatoire (selon les valeurs initiales des paramètres de l'anneau de garde R , r et H), la fonction objectif atteint sa valeur la plus faible après les premières trentième itérations (Figure V.8.b) sans pour autant changer par la suite.

Dans le Tableau V.3, nous présentons les paramètres optimisés de l'anneau de garde. A partir de ce tableau, ces paramètres sont presque identiques pour les trois techniques. Cependant, une diminution du temps de calcul d'environ 18% est obtenue en utilisant l'algorithme de la taille dynamique de la population par rapport à celui de l'algorithme de la taille fixe et 4,3% relativement à celui trouvé dans le cas où la taille de population est réduite progressivement.

Les valeurs du champ électrique aux points critiques obtenues après optimisation sont données dans le tableau V.4. Comme indiqué sur la figure V.8.a, et les tableaux V.3 et V.4, la valeur optimale du champ électrique (154,7679 kV / m) est atteinte pour un anneau de garde de rayon R , de rayon du tube r et une position (hauteur) H égaux respectivement à 224,53 mm, 40 mm et 258,4 mm. De telles valeurs de paramètres optimisés présentent respectivement une augmentation d'environ 122%, 29% et 72% par rapport à ceux de l'anneau de garde recommandé. Avec cette configuration optimisée, les valeurs du champ électrique à la surface des jupes de l'isolateur et les parties métalliques, figurant dans tableau V.4, sont inférieures à la valeur de seuil de l'effet couronne [6, 14, 15, 35].

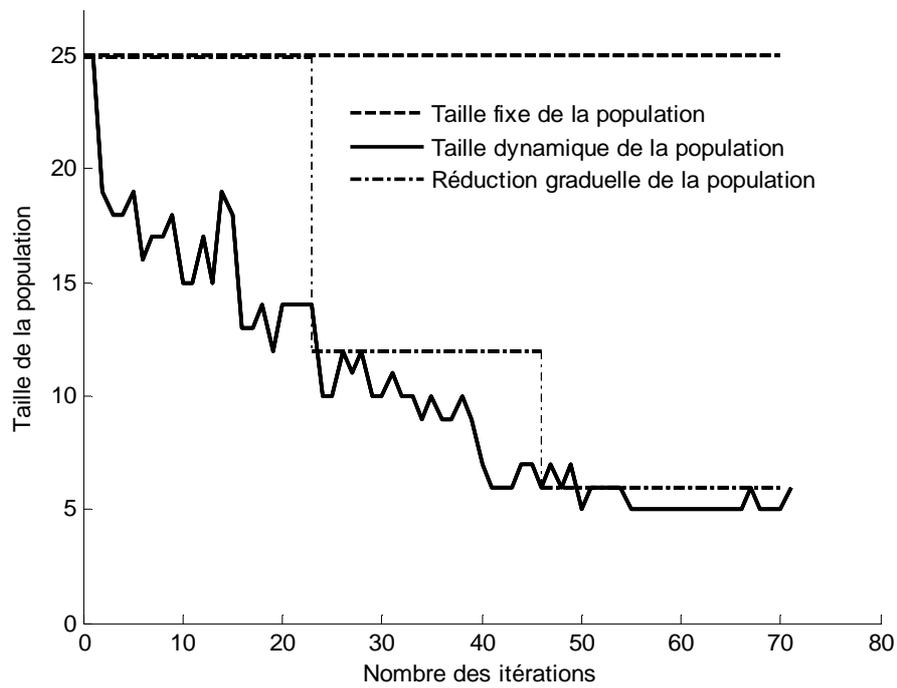
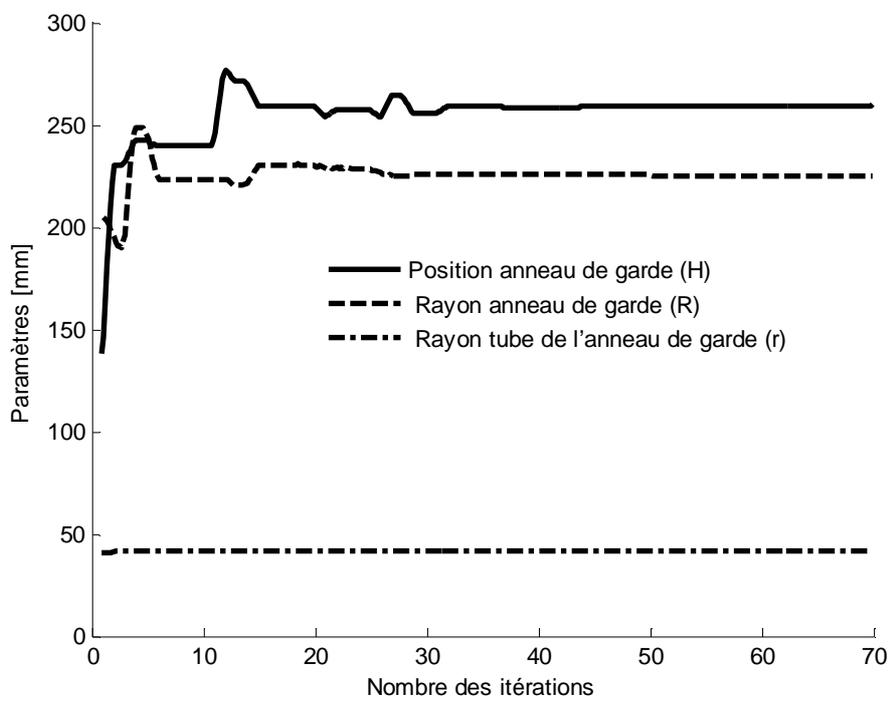
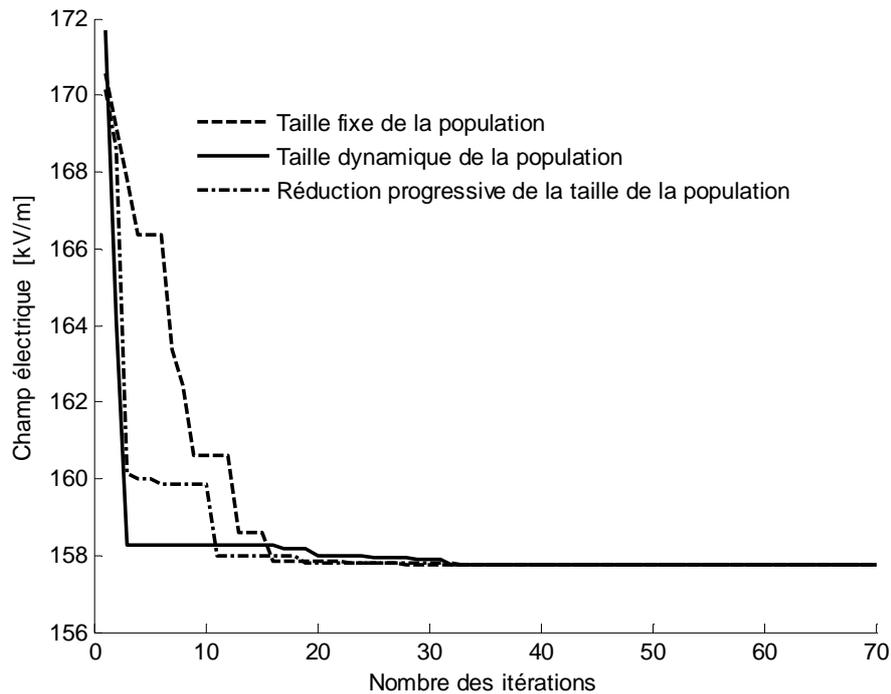


Figure V.7. Taille de la population au cours du processus d'optimisation pour les trois variantes adoptées (Taille fixe, taille dynamique, et réduction graduelle de la taille de la population)



(a)



(b)

Figure V.8. Caractéristiques de convergence au cours du processus d'optimisation
 a : paramètres de l'anneau de garde;
 b : fonction objectif (champ électrique).

Tableau V.3. Paramètres de l'anneau optimal de garde

| Variable | taille de la population Fixe | Réduction progressive taille de la population | Réduction dynamique taille de la population |
|---|------------------------------|---|---|
| Rayon de l'anneau de garde [mm] | 224,1013 | 224,0293 | 224,5293 |
| Rayon du tube de l'anneau de garde [mm] | 40 | 40 | 40 |
| Position (hauteur) du montage [mm] | 258,105 | 258,3125 | 258,3925 |
| Temps de calcul [s] | 217 | 186 | 178 |

Tableau V.4. Résultats d'optimisation

| Position | Champ électrique [kV / m] | |
|---------------------|---------------------------|------------------------|
| | Sans l'anneau de garde | avec l'anneau de garde |
| bride | 398 | 154,7679 |
| Jupe de l'isolateur | 220 | 25,6 |
| Anneau de garde | rayon intérieur | - |
| | Rayon extérieur | - |

Outre les deux courbes de la figure V.2 acquises en absence et en présence de l'anneau de garde recommandé, nous avons également tracé, sur la figure V.9, le caractéristique champ électrique – tension entre phases obtenue lors de l'utilisation de l'anneau de garde optimisé. La nouvelle figure V.9 montre que, pour une tension de ligne donnée, la valeur maximale du champ électrique est plus faible dans le cas de l'utilisation de l'anneau de garde optimisé; les valeurs du champ électrique ont été réduites de 28% par rapport aux celles trouvées lors de l'utilisation de l'anneau de garde recommandé. Il est important de noter que d'après le tableau IV.2, l'anneau de garde recommandé est caractérisé par $R = 101$ mm, $r = 31$ mm et $H = 150$ mm. A partir du tableau V.3, les paramètres de l'anneau de garde optimisés sont $R = 224,5293$ m, $r = 40$ mm et $H = 258,3253$ mm. Bien que la différence (environ 12 cm pour R, 11 cm pour H et 0,9 cm pour r) entre les dimensions des deux anneaux de garde est importante, elle conduit seulement à 28% de diminution du champ électrique sur l'isolateur en composite de 230 kV dans des conditions propres et sèches. En effet, afin de minimiser le champ électrique, il faut non seulement installer l'anneau de garde mais aussi trouver son emplacement optimal.

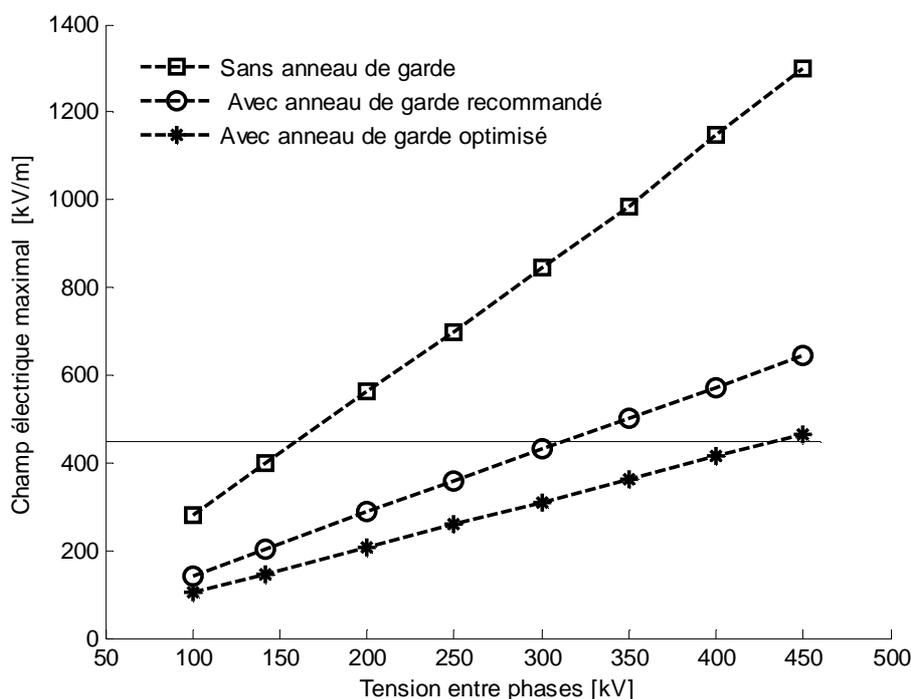


Figure V.9. Valeur maximale du champ électrique en fonction de la tension de la ligne en présence et en absence de l'anneau de garde dans le cas d'un isolateur en composite de 230 kV

Le champ électrique tangentiel le long de la surface de l'isolateur est également un paramètre important qui devrait être minimisé. Pour montrer la variation de ce champ électrique au niveau du point triple, le champ électrique tangentiel, le long de 250 mm de la ligne de fuite de la chaîne

d'isolateurs, sans et avec l'anneau de garde optimisé dont les valeurs des paramètres sont données dans le tableau V.3, est présenté sur la figure V.10. Il est clair que l'installation de l'anneau de garde optimisé améliore la distribution du champ électrique sur la surface de l'isolateur. Son amplitude est réduite, en particulier à l'extrémité haute tension, de près de 82%.

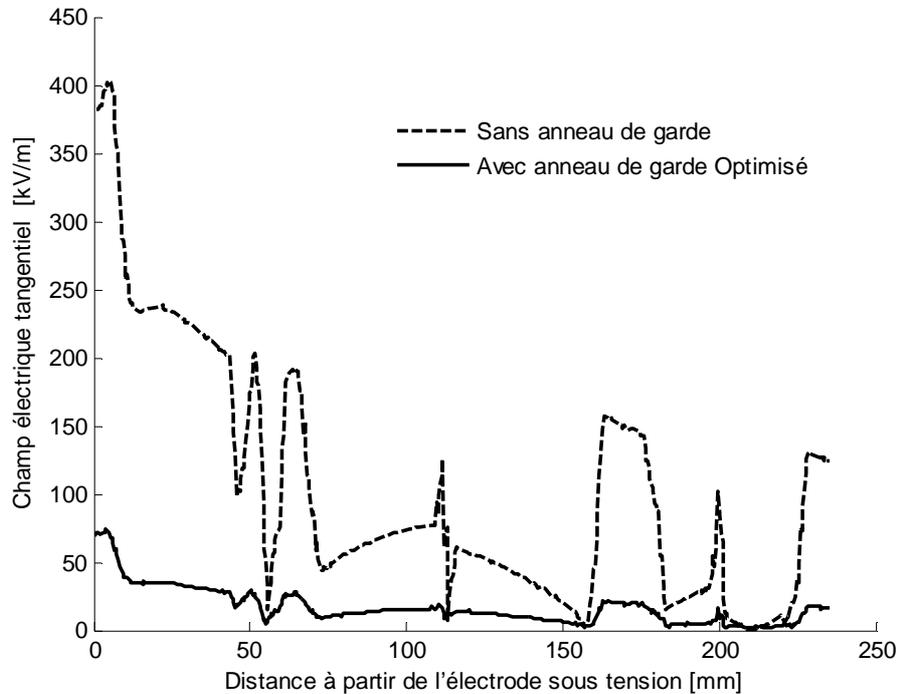


Figure V.10. Champ électrique tangentiel le long de la ligne de fuite de l'isolateur en composite de 230 kV

La figure V.11 illustre la répartition du champ électrique sur la surface de l'isolateur en composite et l'anneau de garde ainsi que le mappage du champ électrique sur la section transversale des jupes à proximité de la borne HT. Les zones d'intensité du champ électrique élevé sont principalement concentrées sur les parties métalliques et les jupes à proximité de la borne HT de l'isolateur. En outre, et selon le tableau V.4, l'ampleur du champ électrique est plus grande sur la face extérieure (rayon extérieur) de l'anneau de garde que sur sa face intérieure (rayon intérieur).

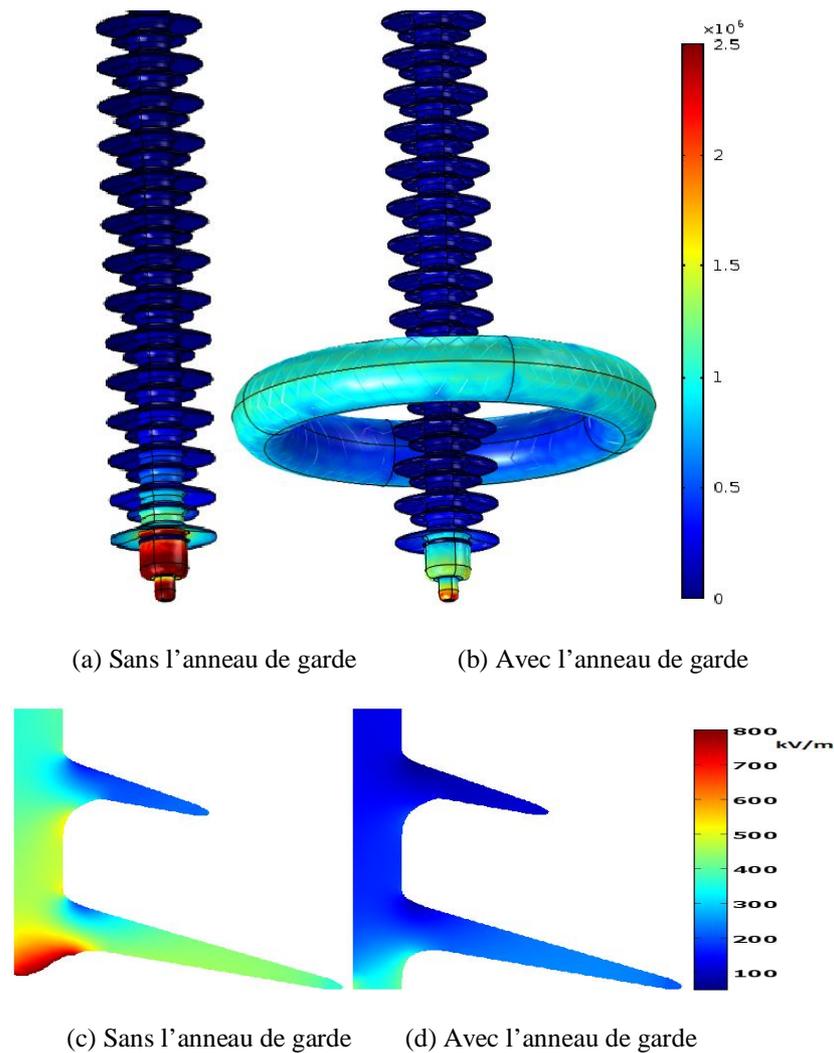


Figure V.11. Distribution du champ électrique dans le cas d'un isolateur en composite de 230 kV
 (a) sur la surface de l'isolateur composite à proximité du conducteur
 (b) sur les surfaces de l'isolateur composite et l'anneau de garde
 (c) et (d) de la cartographie du champ électrique sur la section transversale des jupes à proximité de la borne HT, sans et avec l'anneau de garde optimisé respectivement

La figure V.12 présente la distribution du potentiel électrique le long de la longueur de fuite de l'isolateur en composite. Selon cette figure, l'installation de l'anneau de garde conduit à une distribution de tension plus uniforme. En l'absence de l'anneau de garde, la répartition de la tension est fortement non uniforme sur l'isolateur en composite. Une telle distribution dépend de la longueur de l'isolateur. Par ailleurs, la tension diminue rapidement en s'éloignant de l'extrémité sous tension. Comme illustré sur la figure V.12, la moitié de la tension appliquée est supportée uniquement par 346 mm de la distance d'isolation h (distance entre parties métalliques) en absence de l'anneau de garde. Cette distance est augmentée pour être 666 mm lorsque l'anneau de garde optimisé est installé ; ce qui traduit par une augmentation de 92%

dans la ligne de fuite relativement à celle sans anneau de garde.

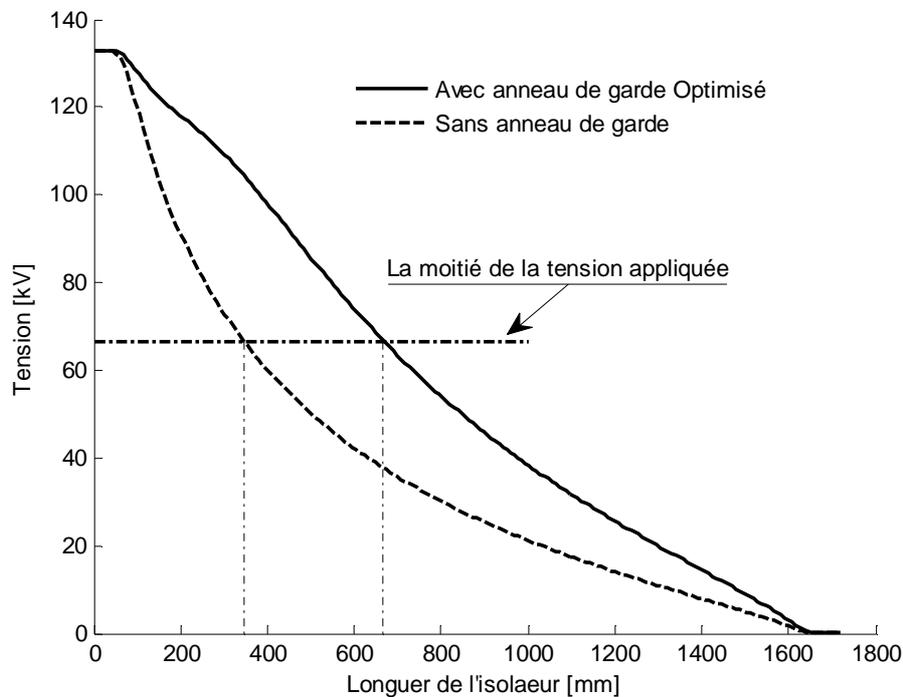


Figure V.12. Potentiel électrique le long de l'isolateur en composite de 230 kV

V. Conclusion

En vue d'améliorer les performances de l'isolateur en composite de ligne de transmission de 230 kV, une étude paramétrique de l'anneau de garde a été conduite. Les simulations numériques ont été réalisées en 3D par le biais d'un logiciel Comsol Multiphysics 4.3 basé sur les éléments finis. Pour cela, une optimisation des distributions du champ et du potentiel électriques a été effectuée. Les effets des paramètres (le diamètre, le rayon du tube et la position (hauteur) de l'anneau de garde ont été examinés cette fois-ci sur un isolateur en composite de 230 kV. L'optimisation de la géométrie de l'anneau de garde en minimisant une fonction objectif que nous avons proposée a été effectuée. Cette fonction relie les paramètres de l'anneau de garde à l'intensité du champ électrique. La technique d'optimisation par essaim de particules a été utilisée. Trois variantes relatives à la taille de la population ont été considérées : fixe, réduite graduellement et dynamique. Lors de la troisième variante, nous avons proposé aussi un nouveau modèle mathématique pour ajuster la taille de la population à

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

- L'optimisation par essaim de particules peut servir de solutions à certains problèmes d'optimisation d'ingénierie les plus complexes. Les résultats obtenus lors de l'optimisation paramétrique de l'anneau de garde sont très satisfaisants.
- Les calculs de champ électrique le long des isolateurs en composite dans des conditions propres et sèches ont montré que le champ électrique est maximal au niveau du point de jonction des trois milieux constitués de l'extrémité métallique HT, du matériau de revêtement de l'isolateur et de l'air (milieu environnant).
- L'anneau de garde est une technique très fréquente permettant l'atténuation du champ électrique sur les isolateurs HT. Un choix approprié du rayon, du rayon du tube et de la position de l'anneau de garde pourrait conduire à réduire le champ en dessous de la valeur seuil d'apparition de l'effet de couronne et uniformiser plus les répartitions du champ et de potentiel électriques.
- D'après les résultats des simulations, l'ajout d'un anneau de garde du côté de l'électrode HT permet une diminution importante de l'intensité du champ électrique le long des premières jupes proches de l'électrode HT. Cette diminution du champ électrique permet d'inhiber la formation des décharges partielles sur la surface de l'isolateur.
- L'étude paramétrique conduite avec un anneau de garde positionné du côté de l'électrode HT d'un isolateur en composite 230 kV a permis de déterminer les valeurs optimales du rayon, du rayon du tube et de la position de l'anneau de garde dont les valeurs respectives de 0,224 m, 0,04 m et 0,258 m permettent d'obtenir une meilleure linéarisation de la distribution du potentiel le long de l'isolateur en composite 230 kV.

C ONCLUSION GÉNÉRALE

Cette thèse représente une contribution à l'étude et l'analyse des distributions du champ et du potentiel électriques sur des isolateurs de haute tension. L'objectif principal est de développer une approche efficace pour le contrôle de l'intensité du champ électrique sur les chaînes d'isolateurs de suspension en verre et en composite de 33 et 230 kV. Ceci permettra d'améliorer les performances de tels isolateurs. L'étude a été menée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysique 4.3 basé sur la méthode des éléments finis. Les simulations numériques ont été réalisées en configuration 2D axisymétrique et 3D. Le modèle bidimensionnel axisymétrique a été utilisé pour l'étude de l'impact de la permittivité du matériau de revêtement et du profil des isolateurs sur la distribution du champ électrique. Le modèle tridimensionnel des isolateurs en composite de 230 kV a été développé pour l'optimisation de la géométrie de l'anneau de garde permettant des distributions optimales du champ et du potentiel électriques. Notre nouvelle fonction objectif à minimiser relie, en fait, l'intensité du champ électrique aux paramètres de l'anneau de garde a été proposée. Pour cela, trois variantes relatives à la taille de la population, fixe, réduite graduellement et dynamique ont été considérées. Un nouveau modèle permettant l'ajustement de la dynamique de taille de la population a été proposé.

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

- La répartition du potentiel le long de chaînes d'isolateurs est non linéaire. Pour un isolateur composite, la moitié de la tension appliquée est supportée par moins de 20% de la distance d'isolation (distance entre parties métalliques). En général, les isolateurs composites sont soumis à des contraintes électriques plus élevées par rapport à ceux en verre.
- Dans le cas des isolateurs composites propres et secs, la valeur maximale du champ électrique, dépendant de la tension de service, a été trouvée au niveau du point de jonction des trois milieux constitués de l'extrémité métallique mise à la haute tension, du matériau de revêtement de l'isolateur et de l'air environnant.
- En absence d'anneaux de garde, les répartitions du champ et du potentiel électriques sont affectées par certains paramètres intrinsèques du système électrique. Le champ électrique maximal diminue avec l'augmentation du nombre de conducteurs en faisceau. L'augmentation de la longueur du bras transversal du pylône uniformise la répartition du potentiel et améliore l'efficacité de la chaîne d'isolateurs en question. L'augmentation du nombre d'isolateurs améliore la distribution du potentiel électrique.

- Les gouttes d'eau sur les surfaces des isolateurs grandement modifient la répartition du champ électrique. En effet, des pics du champ électrique très élevés ont été observés à l'interface diélectrique – eau – air.
- L'état de surface influe sur la répartition du champ électrique. La valeur maximale du champ électrique tangentiel est obtenue dans le cas où la chaîne est polluée, en particulier en présence de bandes sèches où une très forte différence de potentiel est appliquée.
- Le champ électrique pourrait être significativement atténué à la surface des isolateurs composite en appliquant un matériau de revêtement de très fortes valeurs de la permittivité ou en modifiant le profil de l'isolateur à proximité du conducteur afin de trouver la forme adéquate.
- Les techniques d'atténuation du champ électrique à la surface des isolateurs composite de 230 kV, que nous avons entreprises consistent en l'utilisation du matériau de revêtement de très fortes valeurs de la permittivité, la modification du profil de l'isolateur à proximité du conducteur afin de trouver la forme adéquate et l'anneau de garde. Un choix approprié du rayon, du rayon du tube et de la position de l'anneau de garde pourrait conduire à réduire davantage le champ en dessous de la valeur seuil d'apparition de l'effet de couronne et uniformiser plus les répartitions du champ et de potentiel électriques. En outre, l'amorçage des bandes sèches sous certaines conditions de pollution notamment à proximité du conducteur pourrait être évité en installant un anneau de garde adéquat du côté du conducteur. Une telle installation, a permis une diminution importante de l'intensité du champ électrique le long des premières jupes à proximité du conducteur. Cette diminution du champ électrique a permis à son tour d'inhiber la formation des décharges partielles sur la surface de l'isolateur.
- L'obtention de la forme géométrique ainsi que l'emplacement de cet anneau permettant une réduction maximale (minimisation) du champ électrique est d'une importance capitale. Pour cela, l'optimisation par essaim de particules avec une taille dynamique de population a donné des résultats très satisfaisants relativement à celle où la taille est fixe ou réduite graduellement. Les valeurs optimales des paramètres de l'anneau de garde du rayon de l'anneau R , du rayon de tube r de l'anneau et de sa position H sont respectivement 22,4 cm, 0,4 cm et 25,8. Une telle configuration optimisée de l'anneau de garde a permis d'obtenir non seulement une meilleure linéarisation de la distribution du potentiel électrique, mais aussi une amplitude du

champ électrique sur la surface des jupes de l'isolateur ainsi que sur les parties métalliques est nettement inférieure au champ électrique seuil d'apparition de l'effet couronne.

Bibliographie

- [1] A. Cimador and S.Vilet, "La Pollution des Isolateurs", EDF-Epure, No. 27, pp. 43-54, 1990.
- [2] T. Zhao and M.G. Comber, "Calculation of electric field and potential distribution along non ceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 1, pp. 313-318, 2000.
- [3] E. Akbari, M. Mirzaie, M. B. Asadpoor and A. Rahimnejad "Effects of Disc Insulator Type and Corona Ring on Electric Field and Voltage Distribution over 230-kV Insulator String by Numerical Method", Iranian J. Electr. Electron. Eng., Vol. 9, pp. 58–66, 2013.
- [4] X. Jiang, S. Zhao, J. Hu, Z. Zhang and L. Shu, "Study of DC Flashover Performance of Ice-covered Insulators at High Altitude", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 20, No. 2, pp. 391-400, 2013.
- [5] D. Nie, H. Zhang, Z. Chen, X. Shen and Z. Du, "Optimization design of grading ring and electrical field analysis of 800 kV UHVDC Wall bushing", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, Vol. 20, No. 4, pp. 1361-1368, 2013.
- [6] A. Phillips, A. Maxwell, C. Engelbrecht and I. Gutman, "Electric Field Limits for the Design of Grading Rings for Composite Line Insulators", IEEE Trans. Power Delivery Vol. 30, No. 3, pp. 1110-1118, 2015.
- [7] S. Ilhan, A. Ozdemir "Effects of Corona Ring Design upon Impulse Voltage Withstand Level of 380 kV V-Strings", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 18, No. 5, pp. 1638-1646, 2011.
- [8] R. Anbarasan and S. Usa Electrical Field Computation of Polymeric Insulator using Reduced Dimension Modeling", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 22, No. 2, pp. 739-746, 2012.
- [9] R. Abd-Rahman, A. Haddad, N. Harid and H. Griffiths "Stress Control on Polymeric Outdoor Insulators Using Zinc Oxide Microvaristor Composites", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 19, No. 2, pp. 705-713, 2012.
- [10] D. Cruz Domínguez, F. P. Espino-Cortés and P. Gómez. "Optimized Design of Electric Field Grading Systems in 115 kV Non-Ceramic Insulators", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 20, No. 1, pp. 63-70, 2013.
- [11] O. Elsasser, K. Feser et F. Messerer, "Flashover Behavior of Semiconducting Glazed Insulators Under Positive Lightning Impulse Stress at Different Climatic Conditions ", Annual Report on Electrical Insulation an Dielectric Phenomena, vol.1, pp. 203-206, octobre 2000.
- [12] J. He and R. S. Gorur "Charge Simulation Based Electric Field Analysis of Composite Insulators for HVDC Lines", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 21, No. 6, pp. 1638- 1646, Dec. 2014.
- [13] J. Du, Z. Peng, J. Li, S. Zhang, N. Li and C. Fan "Electric Field Calculation and Grading Ring Optimization for 1000 kV AC Post Porcelain Insulator", IEEE Conf. Solid Dielectr., Bologna, Italy, pp. 198-201, 2013.
- [14] S. Zhang, Z. Peng, L. Peng and H. Wang, "Optimization of Corona Ring Structure for UHV Composite Insulator Using Finite Element Method and PSO Algorithm", IEEE Conf. Solid Dielectr., Bologna, Italy, pp. 210-213, 2013.
- [15] T. Doshi, R. S. Gorur and J. Hunt, "Electric Field Computation of Composite Line Insulators up to 1200 kV AC", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 18, No. 3, pp. 861- 867, 2011.
- [16] M.H. Abderrazaq, A.M. Abu Jalagif, "Characterizing of corona rings applied to composite insulators", Electric Power Systems Research, Vol. 95, pp. 121-127, 2013.

-
- [17] L. Shu, S. Wang, X. Jiang, Q. Hu, Y. He and Z. Wu “Influences of grading ring arrangement on AC flashover performance of 220 kV ice-covered composite insulators”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 21, No. 6, pp. 2652–2661, 2014.
- [18] S. Ilhan and A. Ozdemir “380 kV Corona Ring Optimization for ac Voltages”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 18, No. 2, pp. 408- 417, 2011.
- [19] M. Khodsuz and M. Mirzaie, “Analysis of Grading Ring Design Parameters and Heat Sink Numbers Effect on Voltage Distribution and Leakage Current in Metal Oxide Surge Arrester”, *Iranian J. Electr. Electronic Eng.*, Vol. 10, pp. 152–158, 2014.
- [20] X.-S. Yang *Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications*, New Jersey, Wiley, July 2010, p. 173-179.
- [21] W.S. Chen, H.T. Yang and H.Y. Huang, “Contour Optimization of Suspension Insulators Using Dynamically Adjustable Genetic Algorithms“, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 25, No. 3, pp. 1220–1228, 2010.
- [22] M. R. Al Rashidi and M. E. El-Hawary, “a survey of particle swarm optimization applications in electric power systems”, *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, Vol. 13, No. 4, pp. 913– 918, 2009.
- [23] S. A. Bessedik and H. Hadi, “Prediction of flashover voltage of insulators using least squares support vector machine with particle swarm optimization”, *Electric Power Systems Research* Vol. 104, pp 87– 92, 2013.
- [24] K.E. Parsopoulos and M.N. Vrahatis, “Particle Swarm Optimization and Intelligence: Advances and Applications”, New York, Information Science Reference; 2010.
- [25] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization”, *IEEE Int’l. Conf. Neural Network*, Piscataway, New Jersey, USA, pp. 1942–1948, 1995.
- [26] R. Eberhart and J. Kennedy, “A new optimizer using particle swarm theory”, *Sixth Int’l. Sympos. Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, pp. 39–43, 1995.
- [27] D. P. Rini, S. M. Shamsuddin and S. S. Yuhaniz. “Particle Swarm Optimization: Technique, System and Challenges”, *Int’l. J. Computer Applications*, Vol. 14, No. 1, pp. 19- 27, 2011.
- [28] W.F. Leong and G. G. Yen, “PSO-Based Multiobjective Optimization with Dynamic Population Size and Adaptive Local Archives”, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, Vol. 38, No. 5, pp. 1270-1293, 2008.
- [29] P.r Kitak, A. Glotic and I. Ticar “Multiobjective Optimization of Post Insulator Based on Dynamic Population Size”, *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 49, No. 5, pp. 2089-2092, 2013.
- [30] Y.Porcheron, "Lignes aériennes : matériels entrant dans la constitution d'une ligne aérienne", *Techniques de l'ingénieur D4425-1997*.
- [31] D.Dumora, "Matériaux isolants céramiques en électrotechnique", *Techniques de l'ingénieur D275-1975*.
- [32] X.Ducouret, "Lignes aériennes : matériels, isolateurs", *Techniques de l'ingénieur D4423-2006*.
- [33] M. Farzaneh and W.A. Chisholm, “Insulators for Icing and Polluted Environments,” *IEEE Press series on Power Engineering*, IEEE/John Wiley, New York, pp.24-233, 2009.
- [34] M.Teguar, "Modélisations d'Isolateurs Pollués Soumis à Divers Paramètres électrogéométriques", *Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Avril 2003*.
- [35] 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 Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 2, pp. 823–830, Apr. 2008.
- [36] A. J. Phillips, D. J. Childs, and H. M. Schneider, "Aging of nonceramic insulators due to corona from water drops," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 3, pp. 1081–1089, 1999.
- [37] K. Izumi and K. Kadotani, "Applications of polymeric outdoor insulation in Japan," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 6, no. 5, pp. 595–604, 1999.
- [38] E.A. Cherney, "Aging of Composite Insulators," 25th International Power System Conference, Ontario, Canada, 1995.
- [39] S. Gubanski and R. Hartings, "Swedish research on the application of composite insulators in outdoor insulation," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 11, no. 5, pp. 24–31, 1995.
- [40] CIGRE working group 22-03, "Worldwide service experience with HV composite insulators," *Electra*, no. 191, pp. 27–43, Aug. 2000.
- [41] S. M. Gubanski and A. E. Vlastos, "Wettability of naturally aged silicon and EPDM composite insulators," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 5, no. 3, pp. 1527–1535, 1990.
- [42] Y. Zhu, M. Otsubo, C. Honda, and S. Tanaka, "Loss and recovery in hydrophobicity of silicone rubber exposed to corona discharge," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 91, no. 7, pp. 1448–1454, juillet 2006.
- [43] J. Kim and M. K. Chaudhury, "Corona-discharge-induced hydrophobicity loss and recovery of silicones," in 1999 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, vol. 2, pp. 703–706, 1999.
- [44] Y. Liang, L. Ding, K. Yang, C. R. Li, and Y. Tu, "Study on hydrophobicity recovery characteristics and mechanism of HTV silicone rubber after corona deterioration," in Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2007. CEIDP 2007, pp. 308–311, 2007.
- [45] R. S. Gorur, L. J. Johnson, and H. C. Hervig, "Contamination performance of silicone rubber cable terminations," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 6, no. 4, pp. 1366–1373, 1991.
- [46] A. Mekhaldi, "Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternative 50 Hz ", Thèse de doctorat d'Etat, Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, juin 1999.
- [47] Wacker Chemie, "Silicones pour applications haute et moyenne" [Online]. Available: <http://www.yumpu.com/fr/document/view/16039531/silicones-pourapplications-haute-et-moyenne-wacker-chemie>.
- [48] G.G. Karady, H.M. Schneider et F.A.M. Rizk, , "Review of CIGRE and IEEE Research into Pollution Performance of Nonceramic Insulators : Field aging Effects and Laboratory Test Techniques", CIGRE 33-103, Août/Septembre 1994.
- [49] R. S. Gorur, E. A. Cherney and J. T. Burnham, *Outdoor Insulators*, Ravi S. Gorur Inc., phoenix, Arizona, USA, 1999.
- [50] K. Sokolija, M. Kapetanovic, R. Hartings, and M. Hajro, "Considerations on the Design of Composite Suspension Insulators Based on Experience from Natural Ageing Testing and Electric Field Calculations," CIGRÉ Session 2000, vol. 33-204, 2000.
- [51] J. S. T. Looms, *Insulators for High Voltage*, Peter Peregrinus Ltd, London, U. K., 1988.
- [52] A.K.Mujundar, N.Vasudev, K.N.Ravi Channakeshava, "Pollution Test Method of Insulators Under DC Voltage Using Dust Chamber", Ninth international symposium on high voltage engineering, 28 Aout –1 September 1995.
- [53] Karady, G.G.; Shah, M.; Brown, R.L, "Flashover Mechanism of Silicone Rubber Insulators used for Outdoor Insulation-I," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.10, no.4, pp.1965-1971, Oct 1995.

-
- [54] Naito, K.; Izumi, K.; Takasu K.; Matsuoka, R.; "Performance of Composite Insulators under Polluted Conditions", CIGRE Session Paper No.33-301, 1996.
- [55] M. D. R. Beasley, J. H. Pickles, L. Beretta, G. d'Amico, M. Fanelli, G. Giuseppetti, M. Morin, J. P. Grégoire, G. Gallet, « Etude comparative de trois méthodes de calcul automatique du champ électrostatique », RGE, Tome 88, Vol. 1, pp.7-18, Janvier 1979.
- [56] E.P.Nicolopoulou, E.N.Gralista, V.T.Kontargyri, I.F.Gonos, I.A. Stathopoulos, "Electric field and voltage distribution around composite insulators", XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, 2011.
- [57] B.M'hamdi, M.Teguar, A.Mekhaldi, "Potential and Electric Field Distributions on HV Insulators String", 7th International Conference on Electrical Engineering (CEE'12), 8-10 Oct 2012, pp. 158-163, Batna, Algeria.
- [58] Haddad and D.F. Warne, "Advances in High Voltage Engineering", IET Power and Energy Series 40, The Institution of Engineering and Technology, (2007).
- [59] COMSOL Multiphysics 3.5a User's Guide: COMSOL AB., 2008.
- [60] Ravi K. N., Ramamoorthy M., and Naidu M. S., "Voltage distribution of a string insulator under DC voltages," in Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1992, pp. 805-810.
- [61] C. Volât, "Modélisation physique et numérique par la méthode des éléments finis de frontière de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur standard de poste 735 kV recouvert de glace", Thèse de Doctorat en Ingénierie, Département de Génie Electrique, Université du Québec à Chicoutimi, Juin 2002.
- [62] G. Dhatt, G. Touzot, "Une présentation de la méthode des éléments finis" Maloine S. A. Editeur, Paris, 1984.
- [63] Hidaka K., "Electric field and voltage measurement by using electro-optic sensor," in Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, (Conf. Publ. No. 467), 1999, pp. 1-14 vol.12.
- [64] Huang S. J. and Erickson D. C., "The potential use of optical sensors for the measurement of electric field distribution," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, pp. 1579-1585, 1989.
- [65] [75] Daochun H., Jiangjun R., Yong C., Feng H., Shifeng Y., and Shoubao L., "Calculation and measurement of potential and electric field distribution along 1000 kV AC transmission line composite insulator," in Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) 2008, pp. 428-433.
- [66] Schumann U., Barcikowski F., Schreiber M., Kärner H. C., and Seifert J. M., "FEM Calculation and Measurement of the Electrical Field Distribution of HV Composite Insulator Arrangements," in CIGRE Proceedings, Session 33, No. 404, Paris, 2002.
- [67] Abdel-Salam M. and Stanek E. K., "Optimizing Field Stress on High-Voltage Insulators," IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-22, pp. 47-56, 1987.
- [68] Gerdin G., Lakdawala V., and Basappa P., "Computation of ac and dc electric field around a wet polluted insulator," in Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2002, pp. 176-179.
- [69] Chakravorti S. and Mukherjee P. K., "Power frequency and impulse field calculation around a HV insulator with uniform or nonuniform surface pollution," IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 28, pp. 43-53, 1993.
- [70] Dhalaan S. M. A. and Elhirbawy M. A., "Simulation of voltage distribution calculation methods over a string of suspension insulators," in IEEE Proceedings of Conference on Transmission and Distribution, 2003, pp. 909- 914 vol.903.
- [71] R.F. Harrington, "Field Computation by Moment Method", Wiley- IEEE Press, 1993.
-

- [72] T. Misaki, H. Tsuboi, « Computation of 3-Dimensional Eddy Current Problems by Using Boundary Element Method », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. MAG-21, No. 6, pp. 2227-2230, Novembre 1985.
- [73] Yunn-Shiuan L., Shiang-Woei C., and Jeng-Tzong C., "FEM versus BEM," Circuits and Devices Magazine, IEEE, vol. 20, pp. 25-34, 2004.
- [74] Sebestyn I., "Electric-field calculation for HV insulators using domain decomposition method," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 38, pp. 1213- 1216, 2002.
- [75] A. Skopec, J. G. Wankowicz et B. Sikorski, « Electric Field Calculation for an Axiallysymmetric Insulator with Surface Contamination », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No.2, pp. 332-339, Avril 1994.
- [76] Wei H. J., Jayaram S., and Cherney E. A., "A study of electrical stress grading of composite bushings by means of a resistive silicone rubber coating," Journal of Electrostatics, vol. 63, pp. 273-283, 2005.
- [77] Rong Z., Yun Z., Wei-Yuan C., and Bo Zhang, "Measurement of electric field distribution along composite insulators by integrated optical electric field sensor," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, pp. 302-310, 2008.
- [78] M.Teguar, « Modélisation d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro géométriques » thèse de doctorat d'état à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Avril 2003.
- [79] B. M'hamdi, M. Teguar, A. Mekhaldi: Potential and Electric Field Distributions on HV Insulators String Used in the 400 kV Novel Transmission Line in Algeria, IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), Bologna, Italy, 190 – 193, 2013.
- [80] N. L. Allen, A. Ghaffar, "The conditions required for the propagation of a cathode-directed positive streamer in air," *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 28, pp. 331-337, 1995.
- [81] F. A. M. Rizk, "Mechanism of insulator flashover under artificial rain" *Proceeding of IEE*, Vol. 122, No. 4, pp. 449-454, April 1975.
- [82] B.M'hamdi, M.Teguar, "Distributions du potentiel et du champ électriques le long d'une chaîne d'isolateurs de ligne 33 kV", 8ème Conférence Nationale sur la Haute Tension CNHT'2011, 09-11 Mai 2011, Tiaret, Algérie.
- [83] Zhao, T.; Comber, M.G ; , "Calculation of Electric Field and Potential Distribution along Nonceramic Insulators considering the Effects of Conductors and Transmission Towers," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 1, pp. 313-318, Jan. 2000.
- [84] Electric Power Research Institute, "Transmission Line Reference Book: 115- 138 kV Compact Line Design," First edition, Palo Alto, California, 1978
- [85] A. L. Souza, and I. J. Lopes, "Electric field distribution along the surface of high voltage polymer insulators and its changes under service conditions", Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, (pp. 56-59), 2006.
- [86] V. M. Moreno, and R. S. Gorur, "Impact of corona on the long-term performance of non-ceramic insulators", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation; Vol. 10, No. 1, pp. 80-95, 2003.
- [87] R. Boudissa, S. Djafri, A. Haddad, R. Belaicha, R. Bearsch: "Effect of Insulator Shape on Surface Discharges and Flashover under Polluted Conditions", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, No. 3, pp. 429-437, June 2005.
- [88] B. Zegnini, D. Mahi: "Distribution of the electric field in the discharge interval under AC voltage on contaminated electrolytic surfaces simulated HV polluted insulator", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 164-167, 2002.

- [89] V. Kontargyri, L. Plati, I. Gonos, I. Stathopoulos, A. Michaelides: "Measurement and Simulation of the Voltage Distribution on an Insulator String", 15th International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana, Slovenia, T1-272, August 27th-31st, 2007.
- [90] H. Zhang and R. Hackman. "Electrical surface resistance, hydrophobicity and diffusion phenomena in pvc". *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, 6(1), February 1999.
- [91] U. Kaltenborn, J. Kindersberger, and J. Speck. "décomposition of products of epoxy castings during the early aging period". *10th International Symposium on High Voltage Engineering*, August 25-29 1997.
- [92] A. Phillips, "Electric field distribution and their impact on transmission line composite insulators", IEEE Power Eng. Soc. (PES) Transmission and Distribution Conf. and Exposition (T&D), Charlotte, NC, pp. 1-3, 2012.
- [93] R. Ferraro; E. Dohleman, A. Phillips, "Corona Rings: Are They Needed?" *Transmission & Distribution World*, Vol. 62, No. 3, pp. 96, 2010.
- [94] EPRI Article, Corporate Documents, "Addressing the Failure of Polymer Insulators", California, USA, 2007.
- [95] W. Sima, K Wu, Q. Yang and C. Sun." Corona Ring Design of ± 800 kV DC Composite Insulator Based on Computer Analysis", *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena*, pp. 457-460, 2006.
- [96] J. Li, Z. Peng, Y. Feng, X. Fu and T. Xie. "Electric Field Calculation and Grading Ring Optimization of Composite Insulator for 500 kV AC Transmission Lines", *Int'l. Conf. Solid Dielectr.*, Potsdam, Germany, pp. 1-4, 2010.
- [97] Ohio Brass Catalog 24 , <http://www.hubbellpowersystems.com>
- [98] 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 line insulators", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 23, pp. 823-830, 2008.
- [99] Y. Shen, E. A. Cherney and S. H. Jayaram, "Electric stress grading of composite bushings using high dielectric constant silicone compositions" *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Pp. 320-323, Sept. 2004.
- [100] Dong-Hau Kuo, Chien-Chin Chang, Te-Yeu Su, Wun-Ku Wang, Bin-Yuan Lin, "Dielectric Behaviours of multiple-doped BaTiO₃/epoxy composites", *Elsevier, Journal of the European Ceramic Society*, vol. 21, pp. 1171-1177, 2001.
- [101] I.A. Velasco Davalos, C. Gómez -Yañez, J.J. Cruz-Rivera, "Mechanical Doping Applied in Electroceramic Processing", *5to Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y de Sistemas*, ESIME-IPN, Ciudad de México, Nov. 2008.
- [102] Daniel Weida, Thorsten Steinmetz, and Markus Clemens, "Electro-Quasistatic HighVoltage Field Simulations of Insulator Structures Covered with Thin Resistive Pollution or Nonlinear Grading Material", *IEEE 2008, International Power Modulator Conference* pp. 580-583, 2008.
- [103] V. M. Moreno and R. S. Gorur, "Accelerated corona discharge performance of polymer compounds used in high voltage outdoor insulators," in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1999 Annual Report Conference on*, 1999, pp. 731-734 vol.732.
- [104] Montesinos J., Gorur R. S., Mobasher B., and Kingsbury D., "Mechanism of brittle fracture in nonceramic insulators," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, pp. 236-243, 2002.
- [105] Ilhan S. and Ozdemir A., "Corona ring optimization for V-insulator string on the point of RIV and AC flashover performance," in *Proceedings of International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2010, pp. 268-271.

- [106] Wenxia S., Kun W., Qing Y., and Caixin S., "Corona Ring Design of 800kV DC Composite Insulator Based on Computer Analysis," in Proceedings of IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006, pp. 457- 460.
- [107] CIGRE Working Group 22.03, «Use of Stress control Rings on Composite Insulators », ELECTRA N°.143, pp. 68-71, août 1992.
- [108] Ohio Brass Catalog 24 , <http://www.hubbellpowersystems.com>
- [109] Omessaad Hiji. '' Contribution au développement de méthodes d'optimisation stochastiques. Application a la conception des dispositifs électrotechniques '', Thèse présentée à l'Université des Sciences et technologies de Lille 2003.
- [110] Vincent GARDEUX, '' Conception d'heuristiques d'optimisation pour les problèmes de grande dimension. Application à l'analyse e données de puces à ADN'', Thèse de doctorat l'université de paris-est créteil 2011
- [111] E. O. Wilson. Sociobiology: The new synthesis, Ist ed. Cambridge, Mass: Belknap Press of Harvard University Press. pp. 697, 1975.
- [112] Reynolds, C.W. (1987). Flocks, herbs and schools: a distributed behavioral model. Computer Graphics, 21(4), 25-34.
- [113] Heppner, F. and Grenander, U. (1990). A stochastic nonlinear model for coordinated bird flocks. In S. Krasner, Ed., The Ubiquity of Chaos. AAAS Publications, Washington, DC, 233-238.
- [114] Shi, Y, and Eberhart, R.C. (1998). A modified particle swarm optimizer. IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Piscataway, NJ: IEEE Press, 69-73.
- [115] Eberhart R.C. & Shi Y. (2000). Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. International Congress on Evolutionary Computation, San Diego, California, IEEE Service Center, Piscataway, NJ, 84-88.
- [116] S. L. Ho, Y. Shiyou, N. Guangzheng and H. C. Wong, "A particle swarm optimization method with enhanced global search ability for design optimizations of electromagnetic devices", IEEE Trans. Magnetics, vol. 42, No. 4, pp. 1107-1110, 2006.
- [117] J. Brest and M. S. Maucec, "Population size reduction for the differential evolution algorithm", Applied Intelligence, Vol. 29, No. 2, pp. 228-247, 2008.