



République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**



Université Echahid HAMMA Lakhdar – El Oued

Faculté de science et technologie

Département de génie électrique

Mémoire du fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Génie électrique

Spécialité : Réseaux électrique

THEME

***L'effet de l'anneau de garde sur la tension et la
distribution du champ électrique sur les
chaines d'isolateurs***

Présenté par :

 HABITA Mohammed Ramzi
 SOLTANI Zouher
 BEN ALI Albachir

Devant le jury composé de :

- ❖ Dr. MIDA Dris
- ❖ Dr. KHECHKHOUCHE Ali
- ❖ Dr. Guia Talal

Année universitaire : 2022/2023

Remerciement

Au terme de cette étude, je remercie avant, Dieu tout puissant de m'avoir guidé de suivre le chemin de la science et m'avoir permis la réalisation de ce présent travail. Tout d'abord, qui m'a inspiré les bons pas et les justes réflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti.

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au laboratoire de Haute Tension de l'université Hamma Lakhdar– El Oued , sous la direction du Monsieur Guia Talal Docteur à l'université Hamma Lakhdar de EL Oued. Nous tenons à vous exprimer nos gratitude de nos avoir gracieusement fait bénéficier, tout le long de ce travail, de ses précieuses compétences et connaissances, de sa longue expérience dans ce domaine et d'avoir été disponible.

Nous leur suis redevable pour l'aide et les conseils qu'ils m'ont prodigués et les qualités pédagogiques et scientifiques dont ils ont fait preuve à nous égard tout le long de ce travail. Un grand merci pour leur patience .

Monsieur ... nous a honorés en présidant ce Jury, qu'il trouve ici l'expression de notre profond respect.

Monsieur ...a accepté de faire partie de ce jury, Nous lui témoigne toute notre gratitude. Vos critiques et vos remarques nos seront d'une grande utilité.

Nous remercions l'ensemble des Enseignants du département des Sciences Technologique de l'Université de El Oued qui ont contribué à notre formation.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce projet

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A l'homme de courage et de force, à celui qui a toujours été présent, qui m'a appris les vraies valeurs de la vie à celui qui m'a soutenu en toutes circonstances, mon père Yacine.

A la femme la plus courageuse, sensible, à celle qui a su me donner amour et joie de vivre, à celle qui a toujours montrée affection et compréhension à mon égard, ma mère Soumia

A mes très chères frères Abdallah thani, Tadj eddin, Nadjib et ma sœur MAISSA Qui m'ont fourni du courage, du soutien, et tous leurs efforts et moyens pour que je termine mes études.

A mes collègues Zouher et Bachir que je remercie pour leur ponctualité, ainsi que leur volonté tout au long de la réalisation de ce travail.

La plus chère à mon cœur : Iness.

A mes amis les plus fidèles : Mounir, Abdelghani, Salah, Haithem, Faissel et Youssra.

A Toute la famille Habita et Slimani

Que dieu vous protège, je vous souhaite une longue vie pleine d'amour, de bonheur et surtout de santé.

Ramzi Habita

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A l'homme de courage et de force, à celui qui a toujours été présent, qui m'a appris les vraies valeurs de la vie à celui qui m'a soutenu en toutes circonstances, mon père Laiche.

A la femme la plus courageuse, sensible, à celle qui a su me donner amour et joie de vivre, à celle qui a toujours montrée affection et compréhension à mon égard, ma mère que Allah la bénisse KHADIDJA.

A mes très chères frères Haithem, Belkacem et mes sœurs Imane, Raounak et Ritadje Qui m'ont fourni du courage, du soutien, et tous leurs efforts et moyens pour que je termine mes études.

A mes collègues Ramzi et Bachir que je remercie pour leur ponctualité, ainsi que leur volonté tout au long de la réalisation de ce travail.

A mes amis les plus fidèles : Mounir, Abdelghani, Faissel et Isra.

A Toute la famille Soltani et Ayachi Amor.

Que dieu vous protège, je vous souhaite une longue vie pleine d'amour, de bonheur et surtout de santé.

Zouher Soltani

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A l'homme de courage et de force, à celui qui a toujours été présent, qui m'a appris les vraies valeurs de la vie à celui qui m'a soutenu en toutes circonstances, mon père Ali.

A la femme la plus courageuse, sensible, à celle qui a su me donner amour et joie de vivre, à celle qui a toujours montrée affection et compréhension à mon égard, ma mère Hadjer.

A mes très chères frères Bilel, AbdelRahman, AbdelNour et ma sœur Baraa Qui m'ont fourni du courage, du soutien, et tous leurs efforts et moyens pour que je termine mes études.

A mes collègues Zouher et Ramzi que je remercie pour leur ponctualité, ainsi que leur volonté tout au long de la réalisation de ce travail.

A mes amis les plus fidèles : Abdelghani, Mounir, Faissel et Haithem

A Toute la famille Ben Ali et Berroman.

Que dieu vous protège, je vous souhaite une longue vie pleine d'amour, de bonheur et surtout de santé.

AlBachir Ben Ali

الملخص

هدف هذا العمل هو تحسين أداء سلاسل العوازل المركبة. ولتحقيق ذلك، تم إجراء بحث شامل لتحديد التوزيع الأمثل للحقل الكهربائي والجهد على طول سلاسل العوازل المركبة، مع مراعاة وجود أو عدم وجود حلقة الهالة. تم اعتبار عوامل مثل مادة تلبيس العوازل ومستوى التلوث. تم دراسة تأثير طبيعة مواد الطلاء وشكل العوازل المركبة لتحسين الأبعاد الهندسية لحلقة الهالة. تم تطوير علاقة رياضية جديدة (دالة موضوعية) للتعبير عن الارتباط غير الخطي بين شدة الحقل الكهربائي وأبعاد حلقة الهالة. تم تحقيق التحسين الأمثل عن طريق تقليل الدالة الموضوعية. ولهذا الغرض، تم تطوير تقنية سرب الجسيمات. ولإستخدام البديل الأخير، تم اقتراح نموذج رياضي جديد لتحديث حجم السكان في كل تكرار. أظهرت النتائج أن الحد الأقصى للحقل الكهربائي عند النقطة الثلاثية (نقطة التوصيل بالجهد العالي - مادة تلبيس العازل - الهواء) يمكن أن ينخفض بشكل كبير عن طريق استخدام مواد طلاء ذات سماحية عالية مع تعديل مناسب لشكل العازل المركب بالقرب من التوتر العالي، وتركيب حلقة الهالة ذات الأبعاد المثلى. يسمح هذا البديل الأخير بتوزيع أكثر تجانساً لكل من الحقل الكهربائي والجهد على طول سلاسل العوازل المركبة.

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

Abstract

The objective of this work is to enhance the performance of composite insulator strings. To achieve this, extensive research was conducted to determine the optimal distribution of electric field and voltage along the length of the composite insulator strings, considering the presence or absence of the corona ring. Factors such as insulator coating material and contamination were taken into account. The influence of coating materials and the shape of the composite insulators were examined to improve the geometric dimensions of the corona ring. A new mathematical relationship (objective function) was developed to express the nonlinear correlation between the intensity of the electric field and the dimensions of the corona ring. Optimal improvements were achieved by minimizing the objective function. For this purpose, a particle swarm optimization technique was developed. Three population size alternatives were considered: constant, gradual reduction, and dynamic reduction. To utilize the dynamic reduction option, a new mathematical model was proposed to update the population size at each iteration. The results demonstrated that the maximum electric field at the triple point (HT electrode-insulator coating-air) can be significantly reduced by applying high-permittivity coating materials and appropriately modifying the shape of the composite insulator near high voltages, as well as installing the corona ring with optimal dimensions. This latter alternative allows for more homogeneous distributions of both the electric field and voltage along the composite 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 est d'améliorer les performances des chaînes d'isolateurs composites. Pour cela, une recherche approfondie a été menée afin de déterminer la distribution optimale du champ électrique et de la tension le long des chaînes d'isolateurs composites, en tenant compte de la présence ou de l'absence de la bague de couronne. Des facteurs tels que le matériau de revêtement de l'isolateur et la contamination ont été pris en compte. L'influence des matériaux de revêtement et de la forme des isolateurs composites a été examinée pour améliorer les dimensions géométriques de la bague de couronne. Une nouvelle relation mathématique (fonction objective) a été développée pour exprimer la corrélation non linéaire entre l'intensité du champ électrique et les dimensions de la bague de couronne. Des améliorations optimales ont été obtenues en minimisant la fonction objective. À cette fin, une technique d'optimisation par essaim de particules a été développée. Trois alternatives de taille de population ont été envisagées : constante, réduction graduelle et réduction dynamique. Pour utiliser l'option de réduction dynamique, un nouveau modèle mathématique a été proposé pour mettre à jour la taille de la population à chaque itération. Les résultats ont montré que le champ électrique maximal au point triple (électrode HT-revêtement isolant-air) peut être considérablement réduit en appliquant des matériaux de revêtement à haute permittivité et en modifiant de manière appropriée la forme de l'isolateur composite près des hautes tensions, ainsi qu'en installant la bague de couronne avec des dimensions optimales. Cette dernière alternative permet des distributions plus homogènes à la fois du champ électrique et de la tension le long des chaînes d'isolateurs composites.

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

Introduction générale

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Fondements de l'électrostatique

Et méthodes de caractérisation

I.1 Introduction	5
I.2. Le champ électrique.....	5
I.3 Potentiel électrique	6
I.4 Méthodes de détermination du champ et du potentiel électrique.....	6
I.5 Effet de l'installation des anneaux de garde	7
I.5.1 Anneaux de garde	7
I.5.2 Effet des anneaux de garde sur la distribution de la tension	9
I.6 Conclusion.....	15

Chapitre II : Appréciation et régulation du champ électrique

II.1 Introduction	17
II.2 Logiciel de simulation	17
II. 2.1 Description de logiciel.....	17
II. 2.2 Paramètre du solveur	18
II.3 Distributions du potentiel et du champ électrique sur des isolateurs HT.....	19
II.3.1 Types d'isolateur.....	19
II.3.2 Efficacité d'une chaîne d'isolateur	22
II.3.3 Effet des pylônes sur le champ et potentiel électriques	23
II.4 Distributions du champ électrique sur des isolateurs I, II et V.....	28
II.5 Conclusion	32

Chapitre III : Distribution améliorée Du champ électrique le long Des isolateurs composites avec des anneaux de garde

III.1 Introduction	34
III.2 Atténuation du champ électrique causée par l'anneau de garde	34
III.2.1 Champ électrique en fonction de la hauteur de l'anneau	36
III.2.2 Champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau	38
III.2.3 Champ électrique en fonction du Diamètre du tube	42
III.3 Valeur de champ électrique recommandées	46
III.4 Atténuation du champ électrique par modification de la permittivité du matériau de revêtement	50

III.4.1 Matériaux utilisés pour l'atténuation du champ électrique	50
III.5 Conclusion	54

Conclusion générale

Conclusion générale	55
---------------------------	----

Références bibliographiques

Références bibliographiques	57
-----------------------------------	----

La figure	Définition	N° Page
Figure I.1	Exemples de géométries des anneaux de garde	8
Figure I.2	Echo gramme du potentiel électrique de la chaîne d'isolateurs de 230 kV sans et avec anneau de garde	11
Figure I.3	Différence de potentiel aux bornes de chaque isolateur en verre de la chaîne de 230 kV sans et avec anneau de garde	11
Figure I.4	Potentiel électrique le long de la ligne médiane de la chaîne d'isolateurs de 230 kV avec et sans anneau de garde	12
Figure I.5	Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs de 230 kV avec et sans anneau de garde	12
Figure I.6	Potentiel le long de la ligne de fuite du premier isolateur avec et sans anneau de garde	13
Figure I.7	Distribution du potentiel le long de l'axe des chaînes d'isolateurs de 230 kV propres en verre et en composite	14
Figure II.1	Isolateur HT	20
Figure II.2	230kV Composite Suspension/Tension Isolateur	20
Figure II.3	Structure typique du pylône de 230 kV	24
Figure II.4	Répartition du potentiel sur une chaîne d'isolateurs de suspension pour un bras transversal de longueur de 200 cm	25
Figure II.5	Efficacité de la chaîne d'isolateurs en fonction du nombre d'unités et de la longueur du bras transversal	26
Figure II.6	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	27
Figure II.7	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	27

Figure II.8	Amplitude maximale du champ électrique sur des chaînes d'isolateurs en I et II simple et double conducteurs sans anneau de garde	28
Figure II.9	Amplitude maximale du champ électrique sur des chaînes d'isolateurs en I, II et V et double conducteurs sans anneau de garde	29
Figure I.10	Répartition du champ électrique et lignes équipotentielles autour	30
Figure I.11	Distribution de potentiel électrique pour les simulations avec et sans anneau de corona	31
Figure III.1	Modèle 3D de l'isolateur avec deux anneaux de garde	35
Figure II.2	Champ électrique le long de l'axe principal de l'isolateur composite de 220 kV	37
Figure III.3	Intensité maximale du champ électrique en fonction de la hauteur de l'anneau de garde	38
Figure. III.4	Champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau de garde pour $R = 150$ mm, avec le modèle 3D	39
Figure. III.5	Champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau de garde pour $R = 200$ mm, avec le modèle 3D	40
Figure. III.6	Champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau de garde pour $R = 300$ mm, avec le modèle 3D	41
Figure III.7	Intensité maximale du champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau de garde	42
Figure III.8	Champ électrique en fonction du rayon du tube de l'anneau de garde $H=5$ mm, avec le modèle 3D	43
Figure III.9	Champ électrique en fonction du rayon du tube de l'anneau de garde $H=20$ mm, avec le modèle 3D	44
Figure III.10	Champ électrique en fonction du rayon du tube de l'anneau de garde $H=30$ mm, avec le modèle 3D	45
Figure III.11	Intensité de champ électrique maximale en fonction du rayon du tube de l'anneau de garde	46
Figure III.12	Distribution de champ électrique sans anneau corona	47

Figure II 12	Variation du champ E sur la longueur de l'isolateur avec et sans anneau de garde	48
Figure. III 13	(a): Distribution du champ électrique, (b): Contours équipotentiels autour de l'isolateur composite dans le cas d'un anneau Corona, (c) : Contours équipotentiels autour de l'isolateur composite dans le cas de deux anneaux Corona	49
Figure. III.14	Modèle 3D de l'isolateur 33kV	52
Figure III.15	Lignes équipotentielle autour de l'isolateur composite de 33kV pour différentes valeurs de la permittivité : a) 3,5 ; b) 20 ; c) 50 ; d) 100	54
Figure III.16	Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur en composite de 33 KV	55
Figure II.17	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	56
Figure III.18	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	56
Figure III.19	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	57

Tableau	Définition	N° Page
Tableau I.1	Détail des anneaux garde pour différentes tensions	8
Tableau I.2	Distribution du potentiel entre isolateurs	10
Tableau II.1	Paramètres techniques de l'isolateur composite	21
Tableau II.2	Propriétés des matériaux	21
Tableau III.1	Paramètres techniques de l'isolateur composite	36
Tableau III.2	Anneau de garde recommandé	36
Tableau III.3	Paramètres techniques de l'isolateur en composite	53

Introduction Générale

Introduction générale :

Ces dernières années, l'électricité est devenue l'une des nécessités les plus importantes de la vie humaine, et les lignes de transmission à ultra-haute tension sont largement utilisées pour transporter l'énergie électrique des centrales électriques aux utilisateurs finaux. Les isolateurs sont l'un des dispositifs clés des systèmes de transmission de puissance. Ils jouent un rôle important dans le maintien de la fiabilité du réseau. Ils sont utilisés pour supporter, isoler et contenir des conducteurs haute tension. Les isolateurs doivent résister non seulement à des tensions et à des surtensions régulières telles que la foudre, mais également à diverses contraintes environnementales telles que la pluie, la neige et la pollution. Les isolateurs sont constitués de matériaux diélectriques tels que le verre, la céramique et les composites. Idéalement, un isolant est une substance qui ne transfère pas de charge et n'a aucun effet sur le champ électrique [1]. Par conséquent, des matériaux diélectriques à haute résistance électrique et constante diélectrique sont utilisés comme isolants. Tout a commencé avec de simples isolants en verre et en porcelaine et s'est rapidement développé depuis le début du siècle. Ces types d'isolateurs peuvent être considérés comme des isolateurs classiques et peuvent être classés dans la même catégorie que les isolateurs en céramique. Basé sur la recherche et l'expérience de service [2], ils sont fiables et rentables pour les grandes installations extérieures. Bien que les isolateurs en porcelaine et en verre aient de bonnes performances au fil des ans, leurs principaux inconvénients sont dus à leur taille volumineuse qui les rendent difficiles à installer dans des régions éloignées, vulnérables au vandalisme et surtout à leurs mauvaises performances dans un environnement pollué. Des isolateurs extérieurs en polymère de style moderne ont été introduits pour remplacer les isolateurs en céramique. La raison du remplacement n'était pas la défaillance des isolateurs en céramique, mais les avantages des isolateurs en polymère par rapport aux isolateurs en céramique. Au cours des dernières décennies, les isolants polymères ont été introduits et largement utilisés en raison de leurs bonnes propriétés antisalissure. Les isolateurs en matériaux polymères sont souvent appelés isolateurs composites ou isolateurs non céramiques. Ils sont surtout préférés en raison de leurs excellentes propriétés isolantes. Le facteur le plus important pour déterminer la taille physique des isolateurs extérieurs est leur performance dans des conditions polluées. En fonction de la gravité de la pollution et des conditions humides sur le site, les isolateurs extérieurs doivent avoir une longueur de fuite de surface suffisante pour garantir que les bandes sèches et les arcs de surface sont minimisés. Le contournement de la pollution est l'un des principaux problèmes qui mettent en danger la fiabilité du système d'alimentation électrique. La présence de contamination à la surface de l'isolateur, combinée à des environnements très humides tels que le brouillard, la rosée ou la pluie, est la principale cause de

contournements de pollution sur de nombreux isolateurs [3]. Avec des tensions de plus en plus élevées, le problème du contournement de la pollution de l'isolant augmente et les pénalités augmentent fortement en raison des dommages à l'équipement. Par conséquent, une attention accrue doit être portée à l'amélioration des performances de pollution des isolateurs.

CHAPITRE

I

*F*ondements de l'électrostatique et méthodes de caractérisation

I.1 Introduction :

Ce passage traite des concepts de champ électrique et de potentiel électrique, ainsi que des méthodes pour leur détermination. Le champ électrique est défini comme la force électrique par unité de charge et est un vecteur car il dépend de la direction. Le champ électrique s'étend radialement vers l'extérieur à partir d'une charge positive et radialement vers l'intérieur vers une charge ponctuelle négative. Les champs électriques à haute tension induisent la polarisation et les pertes électriques dans les isolants composites, et les champs plus élevés induisent des mécanismes supplémentaires dans les isolants tels que la décharge de cavité et l'accumulation de charge d'espace pendant la conduction et la polarisation. Le potentiel électrique, d'autre part, est défini comme le travail nécessaire pour déplacer une charge unitaire positive de l'infini à un point donné dans un champ électrique. Les méthodes de détermination du champ électrique et du potentiel électrique comprennent les méthodes analytiques, expérimentales et numériques, comme la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis et la méthode des charges virtuelles. Toutefois, l'absence de méthodes analytiques en raison de la géométrie complexe, des conditions limites et des calculs mathématiques complexes du système physique rend difficile la détermination du champ électrique. Les techniques expérimentales utilisant des sondes électrostatiques, des dipôles sphériques et des capteurs électro-optiques sont couramment utilisées pour mesurer le champ électrique autour des isolants haute tension. Par ailleurs, des méthodes numériques ont été utilisées avec succès dans les domaines électrotechniques et à haute tension pour étudier le champ électrique et la distribution potentielle autour d'isolants propres et enduits.

I.2 Le champ électrique :

Le champ électrique est défini comme la force électrique par unité de charge, et c'est un vecteur car il dépend de la direction. Supposons que la direction du champ soit la direction de la force qu'il exerce sur la charge de test positive. Le champ électrique s'étend radialement vers l'extérieur à partir de la charge positive et radialement vers la charge ponctuelle négative. Les champs électriques à haute tension induisent une polarisation et des pertes électriques dans les isolants composites. Des champs plus élevés induisent des mécanismes supplémentaires dans les isolants, tels que la décharge de la cavité et l'accumulation de charges d'espace pendant la conduction et la polarisation. La polarisation se produit lorsque les électrons et les molécules de polymère ont tendance à se réorganiser sous l'influence d'un champ électrique. La conduction se produit là où l'isolant devient conducteur lorsque le polymère atteint

la rupture diélectrique. A la longue, l'accumulation de charges d'espace persiste à l'intérieur de l'isolant et à sa surface, ce qui crée une dégradation localisée dans les zones de forts champs électriques, provoquant la corrosion de "l'isolant".

I.3 Potentiel électrique :

Le potentiel électrique (ou plus simplement *potentiel*) en un point d'un champ électrique correspond au travail à fournir pour transporter une charge positive unitaire depuis l'infini jusqu'à ce point (le potentiel électrique à l'infini étant par définition égal à 0).

C'est pourquoi on utilise habituellement pour illustrer la notion de potentiel électrique l'analogie avec le cours d'eau d'une rivière ; le potentiel de chaque point correspond à son altitude, alors que la différence d'altitude (dénivellation) correspond à la différence de potentiel.

La différence de potentiel (ou tension en l'absence de phénomènes d'induction d'origine extérieure) est une valeur algébrique (elle peut être positive, négative ou nulle) ; elle est souvent notée U . [36]

I.4 Méthodes de détermination du champ et du potentiel électrique :

Pour déterminer la distribution du champ électrique, plusieurs méthodes sont utilisées, telles que la méthode des différences finies (MDF), la méthode des éléments finis (MFF), la méthode des frontières des éléments finis (MFFF), la méthode des charges virtuelles (MCF), etc. Cependant, la complexité de la détermination du champ électrique réside dans le manque de méthodes analytiques en raison de la géométrie complexe, des conditions aux limites et des calculs mathématiques complexes du système physique. Il existe des méthodes analytiques, expérimentales et numériques pour déterminer le champ électrique. [4, 5, 6]

La méthode analytique donne la distribution exacte du champ électrique en résolvant un modèle mathématique de géométrie physique simple. Par exemple, une charge ponctuelle ou le champ électrique autour d'un fil conducteur peut être facilement résolu à l'aide de formule Gauss simple. L'évaluation de la distribution du champ électrique à l'aide de techniques analytiques devient très difficile en raison des difficultés posées par les géométries complexes et les conditions aux limites. [7 - 5]

Pour mesurer le potentiel ou le champ électrique sur un isolateur de haute tension, diverses configurations expérimentales sont utilisées, telles que des sondes électrostatiques, des dipôles sphériques et des capteurs électro-optiques. Parmi celles-ci, la sonde électrostatique est l'une des techniques les plus

couramment utilisées en laboratoire. Elle permet de mesurer facilement et à moindre coût le champ électrique autour d'une chaîne d'isolateurs. Cette méthode indirecte repose sur la mesure de la distribution du potentiel pour déduire le champ électrique [6]. On cite également l'utilisation de dipôles sphériques, une méthode de longue date pour déterminer la distribution des champs électriques autour des isolateurs [7]. Cette méthode est généralement utilisée pour les isolateurs en verre ou en céramique avec des composants métalliques intermédiaires le long de la chaîne d'isolateurs. Cependant, avec la demande de mesures plus précises, des outils utilisant des capteurs optiques sont développés pour mesurer les distributions de potentiel et de champ avec une grande précision [6, 8].

Une alternative intéressante aux mesures expérimentales est l'utilisation de méthodes numériques (MFF, MFFF, etc.), dont l'application dans le domaine de l'électrotechnique et des hautes tensions n'est plus à démontrer. Ces méthodes ont été utilisées avec succès pour étudier les distributions de champ électrique et de potentiel autour d'isolants propres et recouverts d'une couche de contamination. Cependant, la détermination du champ électrique et de la distribution de potentiel dans et autour des équipements haute tension est un problème très compliqué en raison de la géométrie complexe de l'équipement et de la forme irrégulière du diélectrique [4, 7 - 5].

Les méthodes numériques les plus connues et les plus utilisées en HT, notamment pour la détermination des distributions de champ et de potentiel, comprennent la méthode des différences finies (MDF), la méthode des éléments finis (FEM), la méthode de simulation de charge (MSC) et la méthode des éléments finis aux frontières (MEFF) [9].

Notez qu'un grand nombre de codes informatiques disponibles pour l'analyse du champ électrique des systèmes d'isolation haute tension sont essentiellement basés sur deux méthodes numériques, la méthode des éléments finis (FEM) et la méthode des éléments finis aux frontières (MEFF) [9].

I.5 Effet de l'installation des anneaux de garde :

I.5.1 Anneaux de garde :

L'anneau de garde est l'élément le plus important pour contrôler le champ électrique à la surface de l'isolant. L'anneau de garde est modélisé comme un tore métallique (aluminium) dont l'axe coïncide avec celui de la chaîne isolante. Les anneaux de garde sont généralement fixés à l'extrémité haute tension de la chaîne d'isolateurs pour contrôler le champ électrique. L'anneau de garde répartit le champ électrique

de manière à ce que la valeur maximale du champ devienne inférieure à la limite de l'effet corona dans l'air. Il est recommandé d'installer des anneaux de protection pour les lignes de transmission avec des tensions de réseau de 230kV et plus [10]. Selon la recommandation, pour une tension de 230 kV, un seul anneau de protection doit être installé du côté haute tension, et pour les systèmes à très haute tension (tensions supérieures à 230 kV), deux anneaux de protection doivent être installés de part et d'autre, comme indiqué dans le tableau I.1.

Tableau I.1 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



Figure I.1. Exemples de géométries des anneaux de garde

I.5.2 Effet des Anneaux de garde sur la distribution de la tension :

Des simulations ont été réalisées à l'aide d'anneaux de protection circulaires de différents diamètres (400, 600 et 750 mm) à différentes positions verticales (0, 80 et 160 mm). Déterminez le potentiel et la distribution du champ électrique le long de la ligne médiane et de la ligne de fuite.

La figure I.2 montre les résultats de simulation pour tous les isolateurs en verre formant une chaîne d'isolateurs de 230 kV (diagramme d'écho) avec et sans anneaux de garde. Par ailleurs, la figure III.16 illustre la différence de potentiel aux bornes de chaque élément de la chaîne en l'absence et en présence d'anneaux de garde. En raison de la capacité parasite entre les lignes, les pylônes et les pièces métalliques, les chapeaux et les pôles, la tension de la ligne ne sera pas partagée de manière égale entre tous les isolateurs formant la ligne [10,11].

Les isolateurs proches des bornes haute tension supportent la plus grande différence de potentiel sans anneau de garde. En fait, environ 13 % de la tension de ligne est développée aux bornes de l'isolant côté extrémité sous tension, le reste de chaque unité ayant une différence de potentiel décroissante progressivement vers l'extrémité connectée à la masse (tour). A noter que la mise en place des anneaux de garde améliore la répartition du potentiel (tableau I.2) et tend vers des conditions idéales où la tension sera répartie de manière égale (linéaire) entre tous les disques formant la chaîne d'isolateurs (figure I .2). En effet, à la borne de l'isolant côté ligne haute tension, le potentiel est abaissé (élevé) d'environ 2,3 %. Alors que la borne isolante côté sol (tour) a une légère augmentation d'environ 0,63 %. En termes d'efficacité, il varie de 67,74% sans l'anneau à environ 83,33% avec l'anneau de 500 mm de diamètre à une hauteur d'installation de 200 mm.

La figure I.3 montre également une comparaison de la distribution de potentiel le long de l'axe principal de la chaîne d'isolateurs et le long du fil de fuite avec et sans anneaux de garde. Les figures III.4 et III.5. Il est clair que le potentiel chute de l'extrémité inférieure (connectée à la ligne à haute tension) à l'extrémité supérieure (connectée à la tour). Le potentiel est constant au niveau des parties métalliques (bouchon et tige) [10,11,12]. Le tableau I.2 répertorie les valeurs de potentiel le long de la chaîne des isolateurs sans et avec anneaux de garde (diamètre 400 mm, installés aux positions verticales 80 mm et 200 mm).

La répartition 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 illustrée à la Figure I.6. Sans l'anneau de garde, le potentiel

sur le manchon isolant est plus faible, c'est-à-dire que la différence de potentiel entre le jonc et le manchon isolant est très importante, impliquant des champs électriques très forts.

Tableau I.2 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

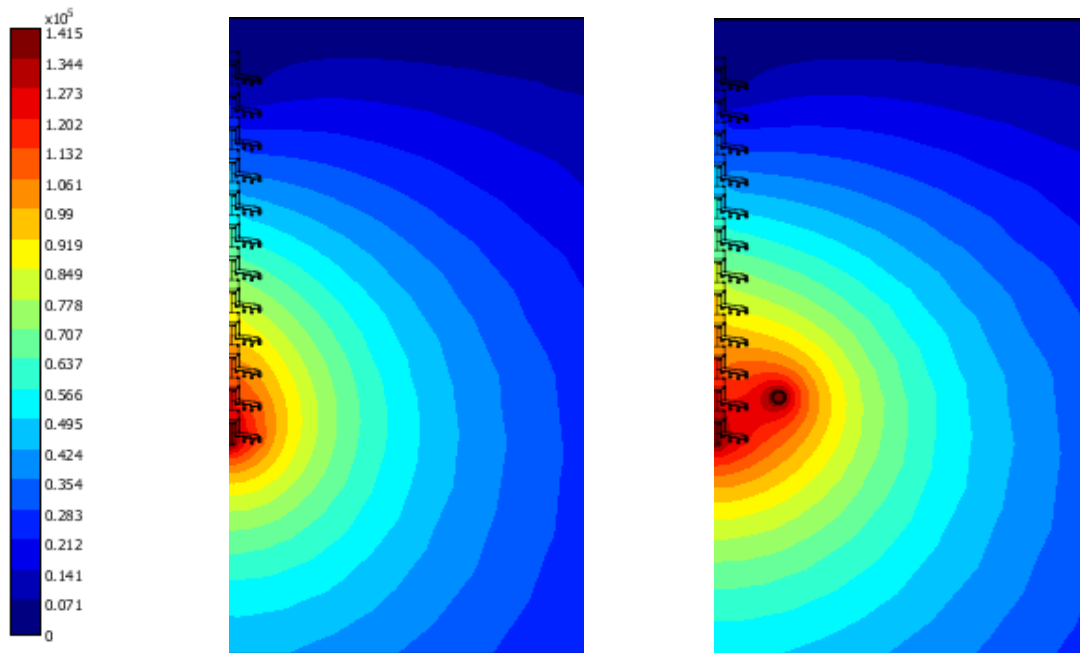


Figure I.2. Echo gramme du potentiel électrique de la chaîne d'isolateurs de 230 kV sans et avec anneau de garde

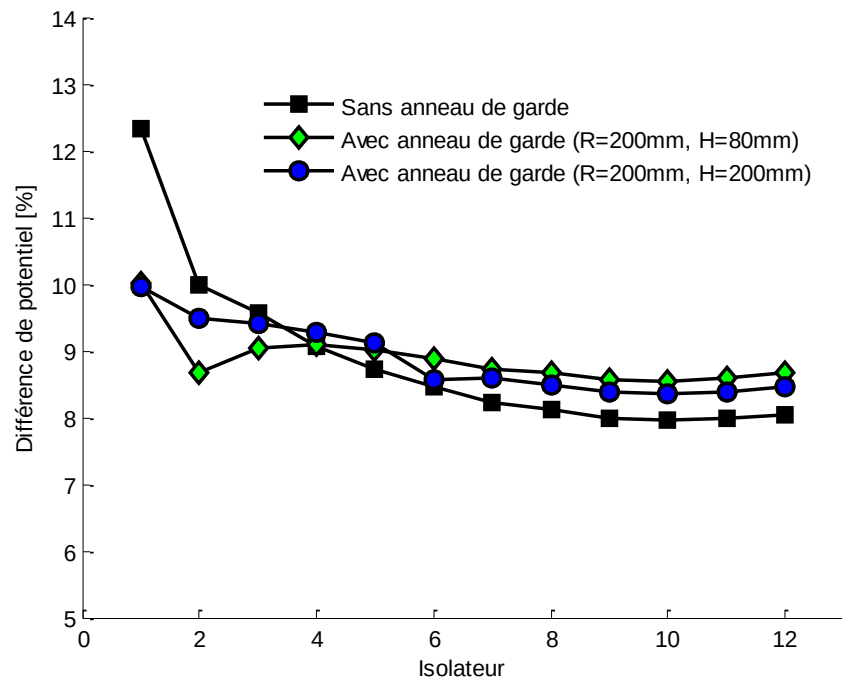


Figure I.3. Différence de potentiel aux bornes de chaque isolateur en verre de la chaîne de 230 kV sans et avec anneau de garde

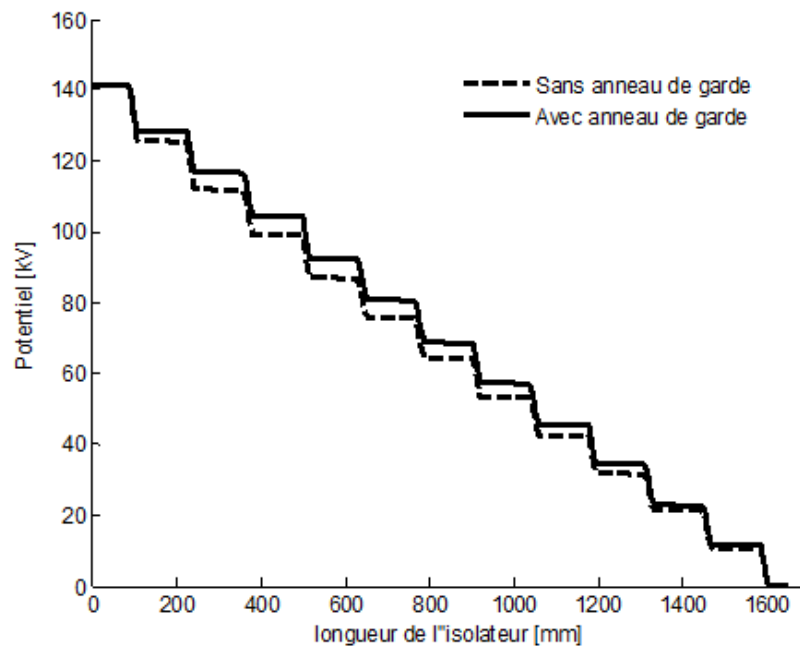


Figure I.4. Potentiel électrique le long de la ligne médiane de la chaîne d'isolateurs de 230 kV avec et sans anneau de garde

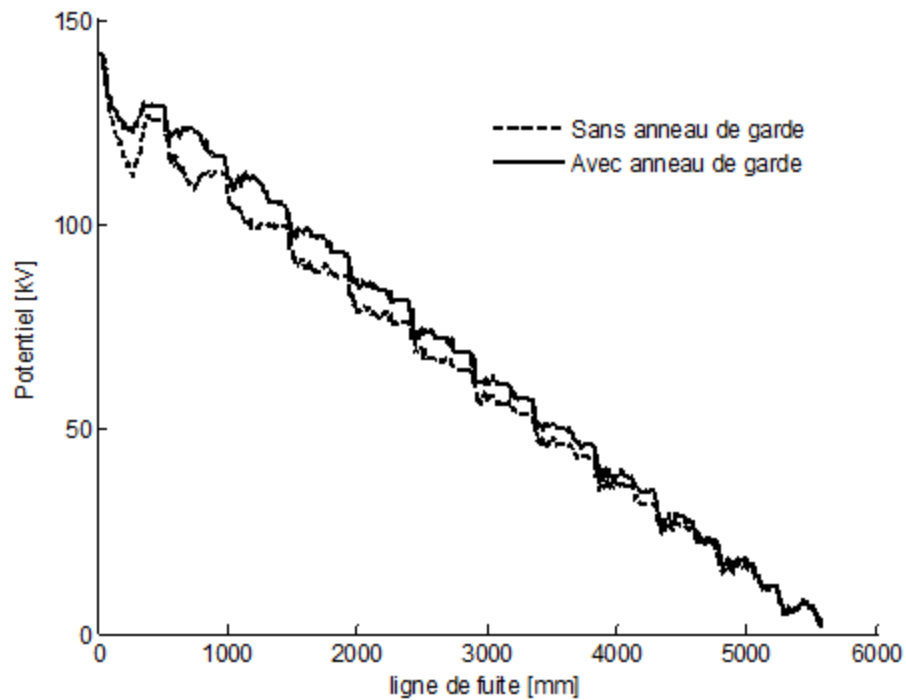


Figure I.5. Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs de 230 kV avec et sans anneau de garde

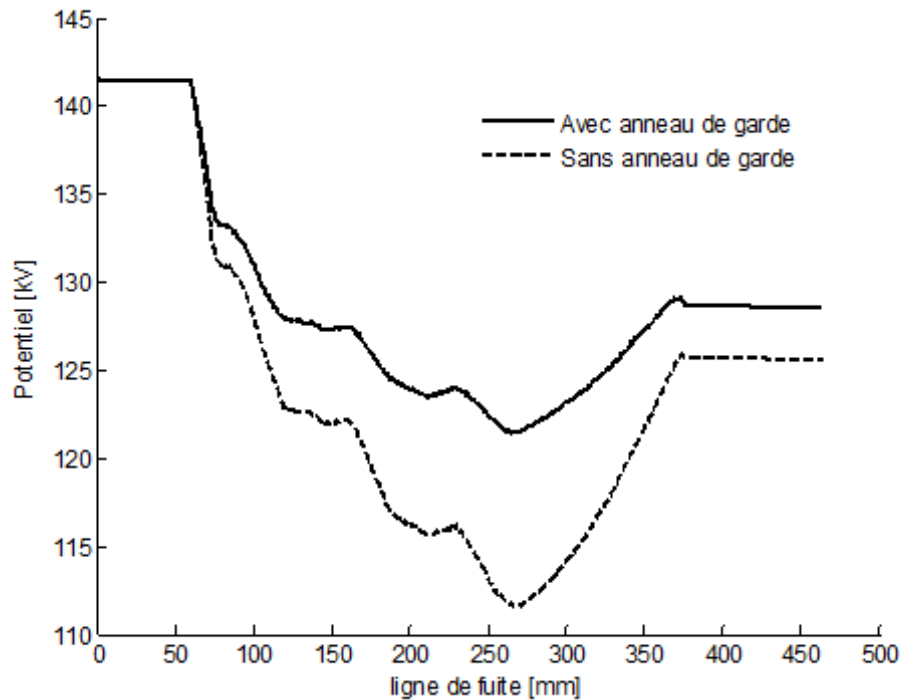


Figure I.6. Potentiel le long de la ligne de fuite du premier isolateur avec et sans anneau de garde

Une comparaison de la distribution de potentiel le long de l'axe principal entre l'isolateur composite et la chaîne d'isolateurs chapeau-tige de 230 kV est illustrée à la Fig. I.7. Dans le cas des chaînes d'isolateurs en verre, la distribution de potentiel est relativement plus linéaire du fait de la présence de pièces métalliques intermédiaires (chapeau et tige). Cependant, dans le cas des isolateurs composites, la distribution de potentiel est très inhomogène et des effets corona se produisent. Lorsqu'une personne s'éloigne de la borne HT, le potentiel (tension de ligne) à la borne HT chute rapidement. Notez que seulement 25 % de la longueur de l'isolant composite supporte 111,4 kV ou 83,89 % du potentiel total appliqué. Les 75% restants de la longueur de l'isolant portent le reste du potentiel. Dans cette partie, des décharges superficielles de tels isolants peuvent se produire ; d'où la nécessité d'installer un anneau de garde.

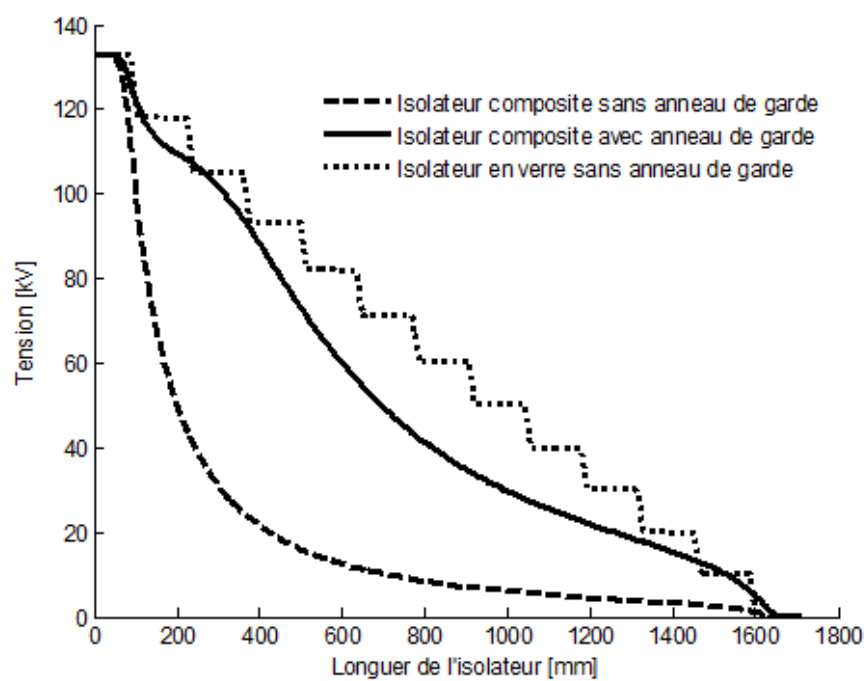


Figure I.7. Distribution du potentiel le long de l'axe des chaînes d'isolateurs de 230 kV propres en verre et en composite

I.6 Conclusion :

En résumé, le champ électrique est défini comme la force électrique par unité de charge et est un vecteur car il dépend de la direction. Le champ électrique s'étend radialement vers l'extérieur à partir d'une charge positive et radialement vers l'intérieur vers une charge ponctuelle négative. Les champs électriques à haute tension induisent une polarisation et des pertes électriques dans les isolants composites. À mesure que les champs électriques deviennent plus élevés, des mécanismes supplémentaires se produisent dans les isolants, comme la décharge de cavité et l'accumulation de charge d'espace pendant la conduction et la polarisation. L'accumulation de charges d'espace persiste à l'intérieur de l'isolant et à sa surface, créant une dégradation localisée dans les zones de champs électriques élevés, provoquant la corrosion "isolant". Le potentiel électrique à un point dans un champ électrique correspond au travail nécessaire pour déplacer une charge positive unitaire de l'infini à ce point. La différence de potentiel, ou de tension, est souvent notée comme U . Pour déterminer la distribution du champ électrique, diverses méthodes telles que des méthodes numériques, des méthodes analytiques et des méthodes expérimentales sont utilisées, telles que la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis, et la méthode de charge virtuelle. La complexité de la détermination de la distribution du champ électrique réside dans l'absence de méthodes analytiques en raison de la géométrie complexe, des conditions limites et des calculs mathématiques complexes du système physique. Pour mesurer le potentiel ou le champ électrique d'un isolant haute tension, diverses configurations expérimentales sont utilisées, telles que des sondes électrostatiques, des dipôles sphériques et des capteurs électro-optiques. Des méthodes numériques ont été utilisées avec succès pour étudier les distributions de champs et de potentiels électriques autour d'isolants propres et contaminés.

CHAPITRE

II

Appréciation

et régulation du champ électrique

II.1. Introduction :

La mesure du champ électrique le long des isolateurs de haute tension est une tâche difficile, et elle devient de plus en plus complexe dans des conditions de pollution. Bien que des montages expérimentaux tels que la sonde électrostatique [13] puissent être utilisés, ils sont sujets à des erreurs périodiques. Même en utilisant des systèmes plus avancés de détection de champ, il est nécessaire d'effectuer des essais fréquents pour obtenir des mesures acceptables [14]. En réalité, il est très difficile de mesurer expérimentalement avec précision les distributions du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur. De plus, les expériences en laboratoire, souvent complexes et coûteuses, sont difficiles à réaliser. Par conséquent, l'utilisation de méthodes numériques constitue une alternative intéressante [15, 10].

De nombreux chercheurs utilisent des techniques de simulation numérique avec des logiciels disponibles, car cela s'avère plus pratique et rentable. En effet, le développement rapide des outils informatiques a conduit à la création de logiciels avancés capables de gérer des modèles complexes sans compromettre le temps de traitement ni la précision des résultats [15, 10, 16].

Dans ce chapitre, nous utilisons la simulation par ordinateur basée sur la méthode des éléments finis pour déterminer les distributions du potentiel et du champ électrique le long de l'axe et de la ligne de fuite des chaînes d'isolateurs. Trois types de chaînes d'isolateurs sont considérés, dont deux en verre trempé de type capot et tige. La première chaîne est composée d'isolateurs standards 1512 L, tandis que la deuxième chaîne est composée d'isolateurs aérodynamiques (160 KN: F160 D / 146 DC) destinés à l'isolation des lignes aériennes de 230 kV et 400 kV respectivement. Nous prenons également en compte un isolateur en polymère prévu pour l'isolation des lignes aériennes de 230 kV. Nous développons des modèles d'isolateurs et les simulons dans différentes conditions de surface : propre et sèche. 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 la formation de bandes sèches.

II.2. Logiciel de simulation

II.2.1 Description du logiciel

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation multiphysique utilisé pour modéliser et résoudre des problèmes de physique et d'ingénierie impliquant des phénomènes couplés, tels que la mécanique des

fluides, la thermique, l'électromagnétisme, l'acoustique et la chimie. Il permet aux ingénieurs et aux chercheurs de modéliser des systèmes complexes en utilisant des équations mathématiques et de résoudre ces modèles de manière efficace et précise.

Le logiciel COMSOL Multiphysics est basé sur une méthode de résolution numérique appelée méthode des éléments finis, qui permet de discrétiser un domaine de calcul en petits éléments pour résoudre les équations mathématiques qui décrivent les phénomènes physiques. Il dispose également d'un environnement de développement intégré (IDE) convivial qui permet aux utilisateurs de créer, configurer et résoudre des modèles complexes en utilisant une interface graphique intuitive.

Le logiciel est utilisé dans une variété d'applications, telles que la conception de circuits électroniques, la modélisation de la dynamique des fluides, la conception de capteurs, la simulation de la propagation des ondes sonores et la conception de matériaux avancés. Il est également utilisé dans de nombreux domaines d'ingénierie, tels que l'aérospatiale, la mécanique, la biotechnologie, l'énergie et l'environnement.

COMSOL Multiphysics dispose également d'une grande bibliothèque de matériaux et de modèles pré-définis, ainsi que d'outils de post-traitement pour visualiser et analyser les résultats des simulations. Les utilisateurs peuvent également créer et partager des modèles personnalisés à l'aide du langage de programmation COMSOL Script et des API pour MATLAB et Python.

En somme, COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation avancé qui permet aux ingénieurs et aux chercheurs de modéliser et de résoudre des problèmes complexes impliquant des phénomènes couplés en utilisant des méthodes numériques avancées.

II.2.2 Paramètres du Solveur

Les modèles d'isolateurs sont simulés dans le module AC/DC de COMSOL Multiphysics à l'aide d'un solveur de courant quasi-statique qui permet à l'utilisateur de spécifier la conductivité électrique ainsi que la permittivité de tous les matériaux constitutifs de ces isolants. En quasi-statique, le courant et le champ électromagnétique changent lentement [4, 16], ce qui est le cas pour de nombreuses applications, notamment les isolateurs haute tension fonctionnant à des fréquences industrielles de 50-60 Hz. La variable dépendante unique V est une fonction inconnue sur le domaine de calcul. Le logiciel (COMSOL

Multiphysics) détermine la fonction inconnue en résolvant l'équation aux dérivées partielles suivante [10, 4, 16] :

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

II.3 Distributions du potentiel et du champ électrique sur des isolateurs HT

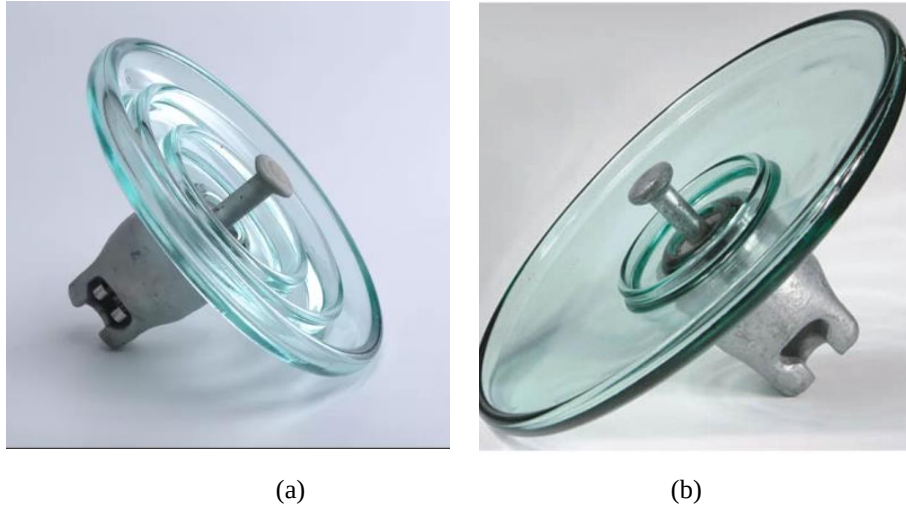
II.3.1 Types d'isolateurs

Les chaînes d'isolateurs considérées dans cette partie de l'étude sont largement utilisées par la Société nationale d'électricité et de gaz (SONELGAZ) pour l'isolation des lignes aériennes à haute tension. La première chaîne se compose de 12 isolateurs en verre trempé de type cap-rod 1512L, qui sont utilisés pour l'isolation des lignes aériennes 230kV. La deuxième chaîne est constituée de 25 isolateurs aérodynamiques DC de 160 KN : F160 D/146 pour l'isolation des lignes aériennes 400 kV (Figure II.1).

Les isolateurs sont de type cap rod. Ils sont constitués d'un bloc isolant en verre trempé (spécification CEI 60672.3) avec un couvercle étanche en fonte malléable en partie supérieure et une tige d'acier cannelée en partie inférieure dont la tête conique est également scellée dans du verre. L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et dimensionnée pour traverser le couvercle de l'élément suivant, où elle est goupillée. Dans ce document, la configuration des chaînes d'isolateurs est I, II, V (garder le même nombre d'isolateurs pour comparaison).

Les caractéristiques géométriques des isolateurs en verre 1512L sont que le diamètre nominal ou diamètre ($\emptyset$) de la jupe en verre est de 255 mm, la hauteur (h) est de 140 mm et la ligne de fuite (L) est de 292 mm [17]. Considérant que l'isolant aérodynamique en verre 160 KN : F160 D / 146 DC est le diamètre de la jupe en verre $\emptyset = 420$ mm, hauteur h = 146 mm, ligne de vol L = 375 mm.

Pour la simulation, les valeurs de constante diélectrique pour chaque matériau constituant l'isolant sont de 6 pour le verre, 5 pour le ciment, et 1 pour l'air entourant les chaînes d'isolant [10].

**Figure II.1.** Isolateur HT

(a) standard 1512 L, (b) aérodynamique 160 KN: F160 D /146 DC

Les isolateurs polymères considérés dans ce travail sont des isolateurs 230 kV. L'isolateur a trente-trois grandes jupes, chacune de 146 mm de diamètre, et trente-deux jupes courtes, chacune de 104 mm de diamètre, espacées de 45 mm sur la longueur de l'unité d'isolateur. L'épaisseur de la gaine est d'environ 5,5 mm. La ligne 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 en caoutchouc de silicone avec une permittivité relative $\epsilon_r = 4,3$. L'âme est en fibres de verre renforcées époxy pour une meilleure résistance mécanique avec une permittivité relative $\epsilon_r = 7,1$. Les pattes (extrémités) sont en alliage forgé. Les dimensions sont indiquées sur la figure II. 2 et donné dans le tableau II.1.

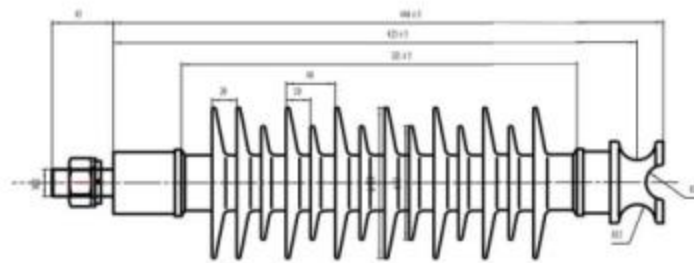
**Figure II.2.** 230kV Composite Suspension/Tension Isolateur

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

Tension nominale KV	Longueur d'isolateur H mm	Nombre de jupes N/n	Diamètre de jupes D/d mm	Ligne de fuite L mm
230	1696	33/32	146/104	5510

Pour les calculs mathématiques, au moyen de la méthode des éléments finis, les propriétés matérielles de chaque composant le modèle doivent être spécifiées. La conductivité des deux matériaux diélectriques (c'est-à-dire le noyau en fibre de verre et la coque isolante recouverte de silicone) est si faible que $\sigma = 1,0 \times 10^{-10}$ S/m a été utilisé dans la simulation. De plus, la région de l'air autour de l'isolant s'est vu attribuer une très faible conductivité, $\sigma = 1,0 \times 10^{-14}$ S/m. Bien que la permittivité relative de la couche polluée ait été estimée à 80, l'eau était considérée comme l'espèce dominante lorsque la couche polluée était complètement mouillée et saturée d'humidité.

Le tableau II.2 résume les propriétés des matériaux utilisés pour les simulations.

Tableau II.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	$1,0 \times 10^{-10}$
Acier	-	$1,0 \times 10^6$

L'électrode supérieure est mise à la terre et l'électrode inférieure est connectée à une alimentation en courant alternatif haute tension. L'entrefer est suffisamment grand pour minimiser l'effet sur la distribution de potentiel à proximité des électrodes et le long du contour de l'isolant.

La limite extérieure de la région de l'air autour de l'isolant se voit attribuer une limite qui ne tient pas compte des sources électromagnétiques actuelles ou externes, elle représente donc le système physique

ouvert dans le contexte d'un espace isolé. Pour les simulations 2D, l'axe de symétrie de l'isolateur est l'axe de symétrie planaire.

II.3.2 Efficacité d'une chaîne d'isolateurs

Distribution de potentiel non homogène le long d'une chaîne d'isolateurs suspendus. La tension maximale se produit sur l'isolant le plus proche du conducteur de ligne et diminue progressivement à l'approche de la tour. Ce phénomène provoque l'apparition de décharges corona à la surface de l'isolant. Cela nécessite d'équilibrer le potentiel des différentes unités de la chaîne et d'améliorer l'efficacité de la chaîne [11].

Les différentes manières de procéder sont les suivantes :

- Valeur de capacité shunt réduite. Ceci peut être réalisé en augmentant les entretoises (bras) de la tour, c'est-à-dire en augmentant la distance entre l'isolateur et la tour.
- Classement des capacités. Ce processus consiste à utiliser des plateaux d'isolation avec différentes valeurs de capacité et à les installer dans l'ordre décroissant des valeurs de capacité en commençant par l'unité proche de la ligne (plus grande capacité) et en se déplaçant vers l'unité proche de la tour (capacité inférieure).
- Anneau de garde (blindage électrostatique). Cette méthode utilise un anneau métallique qui entoure l'unité inférieure (disque) de la chaîne d'isolateurs et se connecte directement à la ligne.

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

$$\eta = \frac{U}{n * U_1} \quad (II.1)$$

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

L'efficacité de la chaîne est un facteur important car elle détermine la distribution potentielle le long de la chaîne. Par conséquent, 100% d'efficacité de la chaîne est idéale et le potentiel à la fin de chaque disque

sera le même. S'il est impossible d'atteindre 100% d'efficacité de la chaîne, des efforts doivent être faits pour l'améliorer [11].

III.3.3 Effet des pylônes sur le champ et potentiel électriques

Puisqu'une chaîne d'isolateurs de suspension est constituée de nombreux disques de verre (ou de porcelaine) connectés en série par des chaînes métalliques, chaque disque forme un condensateur appelé capacité mutuelle. De plus, il existe également une capacité entre la connexion métallique de chaque disque et la structure métallique de la tour, appelée capacité shunt. La valeur de capacité dépend de la forme de l'isolant et de la géométrie de la tour. En raison des courants capacitifs entre les pôles et les parties métalliques de la chaîne (chapeaux et tiges), la tension aux bornes de chaque isolateur dans une chaîne d'isolateurs n'est pas égale, l'unité la plus proche du conducteur de ligne recevant la plus grande valeur. Étant donné que les pylônes ne sont pas identiques, la géométrie des différents pylônes détermine la répartition du champ électrique ; par conséquent, une modélisation précise de la structure du pylône est nécessaire [18]. Les dimensions de base d'un pylône en forme de chat, largement utilisé en Algérie par la GRTE (Gestion du Réseau de Transport de l'Electricité, département SNELGAZ) pour les lignes de transport de 230 kV, sont présentées. La figure II.5. a. L'effet du pylône sur la distribution de tension est étudié à l'aide de la configuration simplifiée du pylône représentée sur la figure. II.5.b.

En considérant des longueurs de bras de 200 et 300 cm, l'influence de la longueur du bras transversal (ou console) de la tour sur la distribution de potentiel a été examinée. Dans le cas des isolateurs à capuchon et à tige de verre, l'effet du nombre d'éléments sur la distribution de potentiel a également été examiné. Pour cette étude, le nombre d'éléments isolants a été augmenté de 10 à 14.

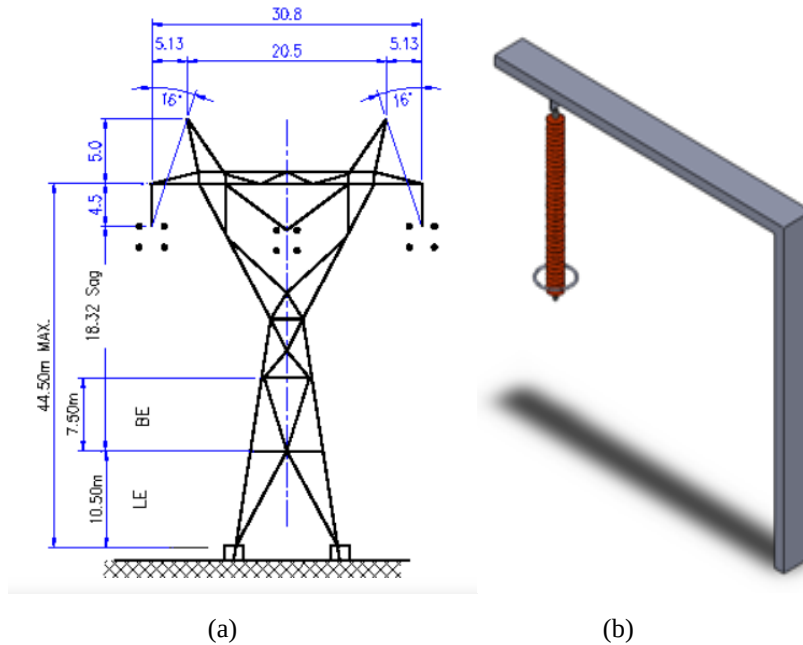


Figure II.3. Structure typique du pylône de 230 kV

(a) pylône réel, (b) configuration simplifiée

Pour une traverse (console) de longueur égale à 200 cm et un nombre variable d'unités d'isolateurs (10, 12 et 14), la distribution de potentiel le long de la chaîne d'isolateurs suspendus est représentée sur la Figure II.6. De toute évidence, le plus grand potentiel est porté par l'unité la plus proche du conducteur sous tension. À l'approche de la borne de terre, le potentiel porté par les cellules de la chaîne chute. Cependant, pour les quelques unités les plus proches de l'extrémité terrestre, la tendance sous-jacente est à la hausse. Comme le montre la Figure II.6, le potentiel sur l'élément le plus proche du conducteur de ligne passe de 16,32 kV à 14,38 kV puis à 12,93 kV lorsque la longueur de la traverse du pylône est de 200 cm. Augmenter le nombre de cellules de 10 à 12 puis à 14 réduit le potentiel d'application d'environ 1,46 % et 1,1 % (c'est-à-dire en augmentant directement le nombre de cellules de 10 à 14 d'environ 2,55 %). En augmentant la longueur de la traverse de 200 cm à 300 cm, le potentiel sur l'unité la plus proche du conducteur de ligne est réduit d'environ 1,25 % pour les unités égales à 12 et 1, et de 86 % pour les unités égales à 1. 14. Remarque En augmentant la longueur du bras transversal de 200 cm à 300 cm, le potentiel supporté par l'unité la plus proche de la tour est augmenté de 0,67 % pour un nombre d'unités égal à 12 et de 1,35 % pour un nombre d'unités égal à 14 nombre d'unités.

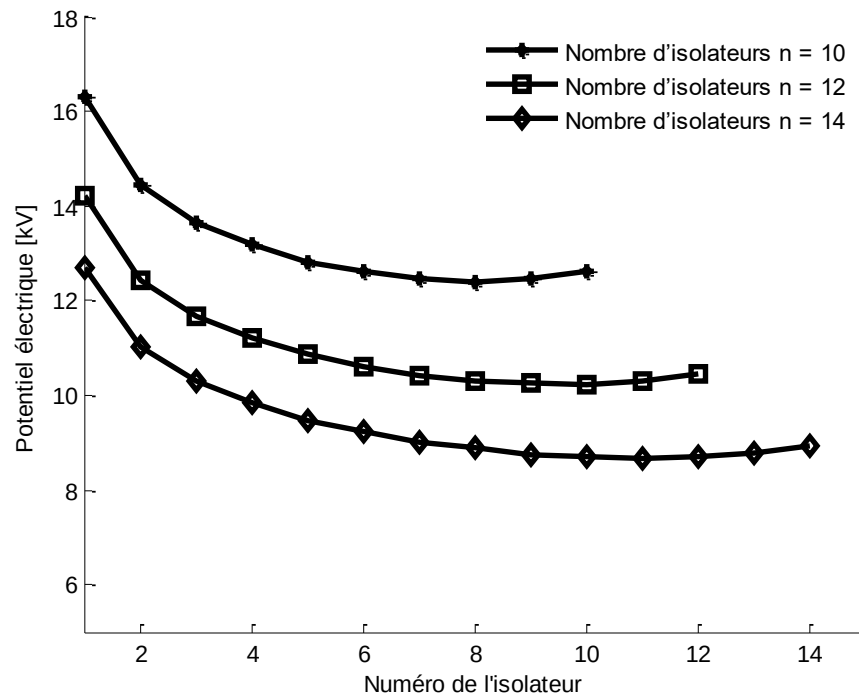


Figure II.4. Répartition du potentiel sur une chaîne d'isolateurs de suspension pour un bras transversal de longueur de 200 cm

La Figure II.5 montre l'efficacité d'une chaîne d'isolateurs compte tenu de l'effet du nombre d'éléments et de la longueur de la traverse. Il est à noter que l'efficacité de la chaîne diminue avec le nombre d'éléments de chaîne et que sa valeur augmente avec la longueur de la traverse du pylône ; cela est dû à la diminution de la valeur des condensateurs shunt.

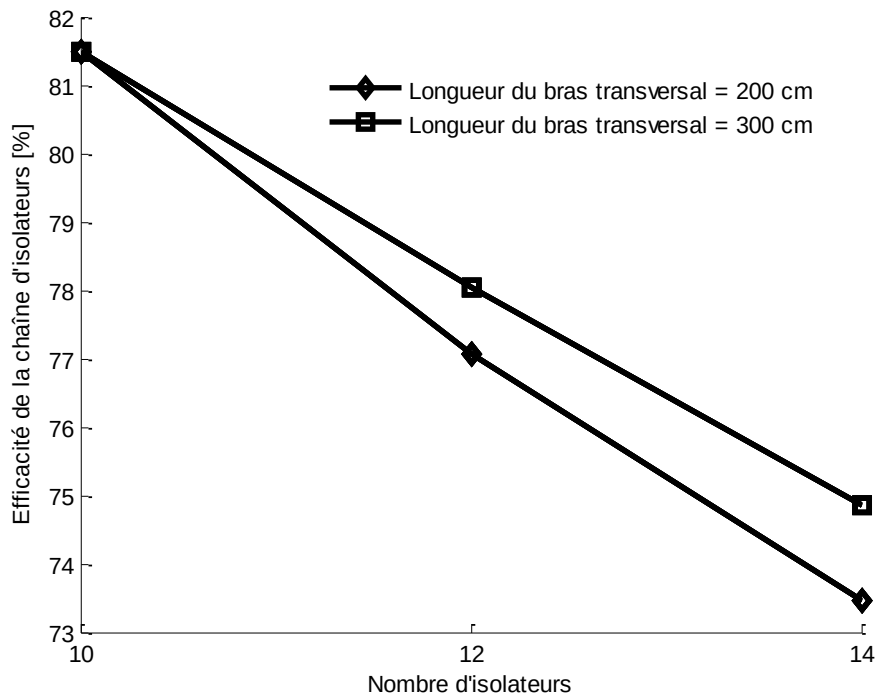


Figure II.5. Efficacité de la chaîne d'isolateurs en fonction du nombre d'unités et de la longueur du bras transversal

Pour les isolateurs composites avec des longueurs de bras de 200 et 300 cm, l'effet de la longueur de la traverse (ou console) du pylône sur le potentiel et la distribution du champ électrique est également examiné. La Figure II.6 montre les diagrammes d'écho de potentiel pour un isolateur composite de 230 kV sans et avec anneau de garde, avec une longueur de traverse égale à 200 cm.

La figure II.7 montre la distribution de potentiel d'un isolateur composite en porte-à-faux de 230 kV pour deux longueurs de bras transversal considérées sans et avec anneaux de garde. A noter que la distribution de potentiel est plus linéaire pour des longueurs de traverse égales à 300 cm que pour des longueurs égales à 200 cm.

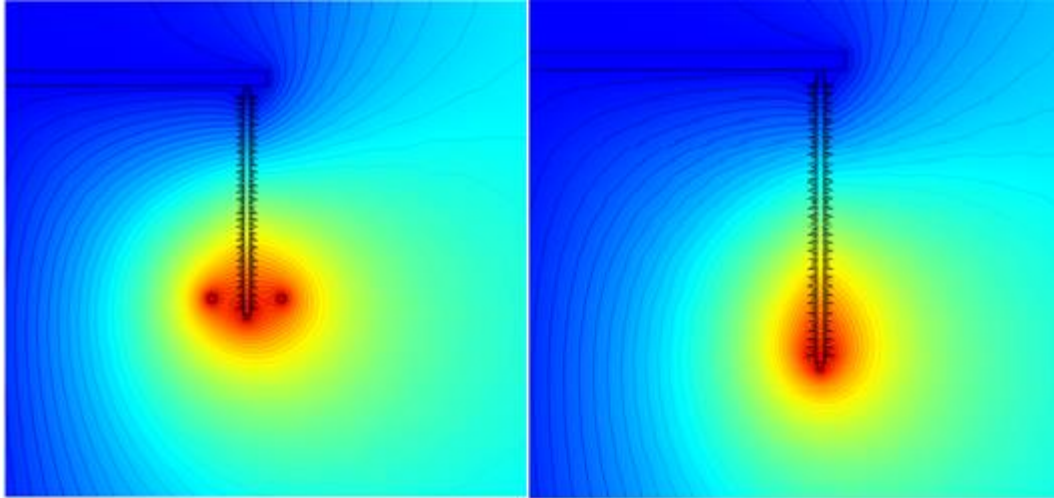


Figure II.6. Distribution du potentiel électrique pour un isolateur en composite de 230 kV en considérant l'effet du bras transversal du pylône avec et sans l'anneau de garde

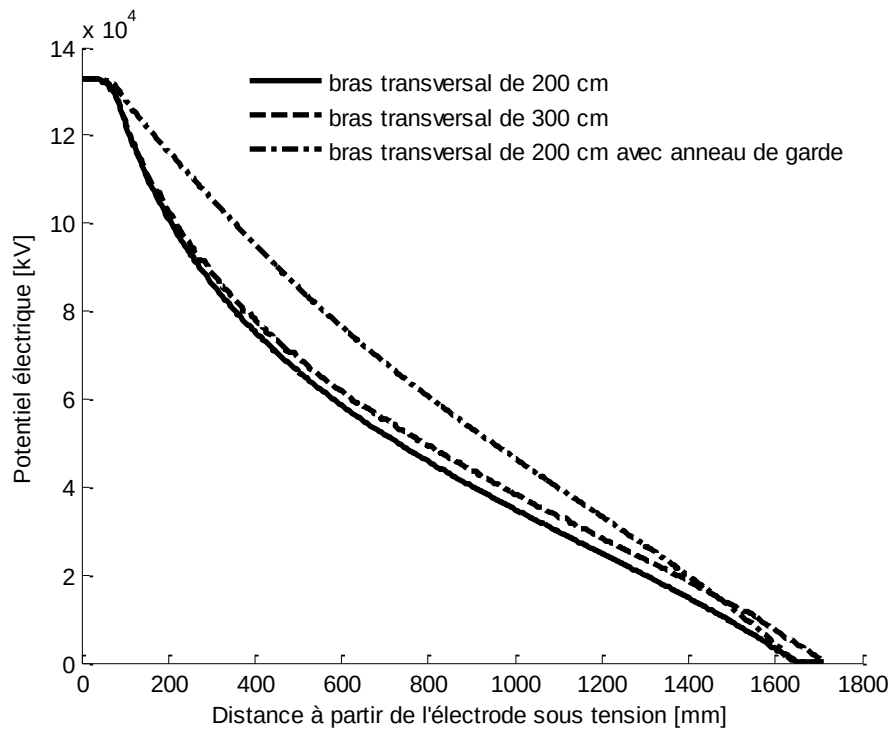


Figure II.7. Distribution du potentiel électrique pour un isolateur en composite de 230 kV en considérant l'effet du bras transversal du pylône avec et sans l'anneau de garde

II.4 Distributions du champ électrique sur des isolateurs I, II et V

La figure II.8 montre la valeur maximale de l'amplitude du champ électrique supportée par les isolateurs formant chaîne installés dans le conducteur simple I et les conducteurs doubles I et II. Comme mentionné précédemment (dans le cas des isolateurs composites), l'amplitude maximale du champ électrique dans le cas d'un seul conducteur dépasse celle du mode groupé. En effet, la valeur maximale enregistrée sur le premier isolateur dans le cas d'une chaîne en I à un seul conducteur est de 1141 kV/m, alors que dans le cas d'une chaîne en I à deux conducteurs la tension sur le premier isolateur est de 1045 kV/m. Outre les avantages mécaniques apportés par la mise en parallèle de deux chaînes d'isolateurs (cas en II), cette configuration permet de réduire significativement le champ électrique supporté par les isolateurs côté 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.

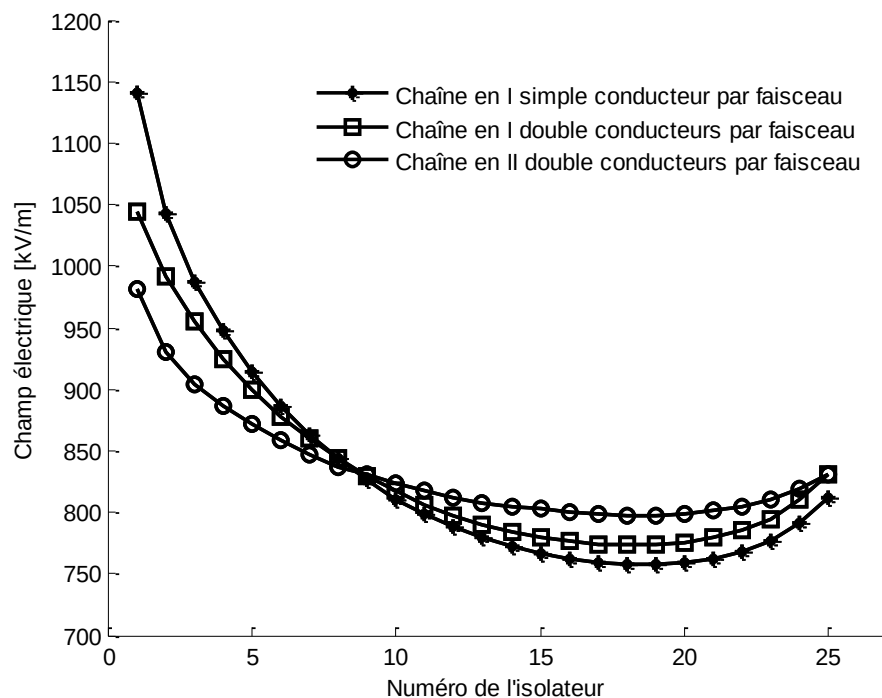


Figure II.8. Amplitude maximale du champ électrique sur des chaînes d'isolateurs en I et II simple et double conducteurs sans anneau de garde

La figure II.9 montre une comparaison de la valeur maximale de l'amplitude du champ électrique supporté par l'isolateur pour les chaînes installées en I, II et V (conducteurs groupés et sans anneaux de garde). Il est clair que la valeur maximale de l'amplitude du champ électrique supportée par chacun des dix premiers isolants des chaînes en V est beaucoup plus grande que celle supportée par le même nombre de deux autres chaînes en II et I. Le champ électrique maximal supporté par le premier isolateur côté ligne à haute tension de la chaîne d'amplitude de type II est inférieur de 83,3 kV/m à celui supporté par le même isolateur de la chaîne de type V, soit une diminution de 7,82 %. Cela peut être attribué au fait que la forme diagonale de la chaîne d'isolateurs en forme de V entraîne une réduction de la distance d'isolation effective.

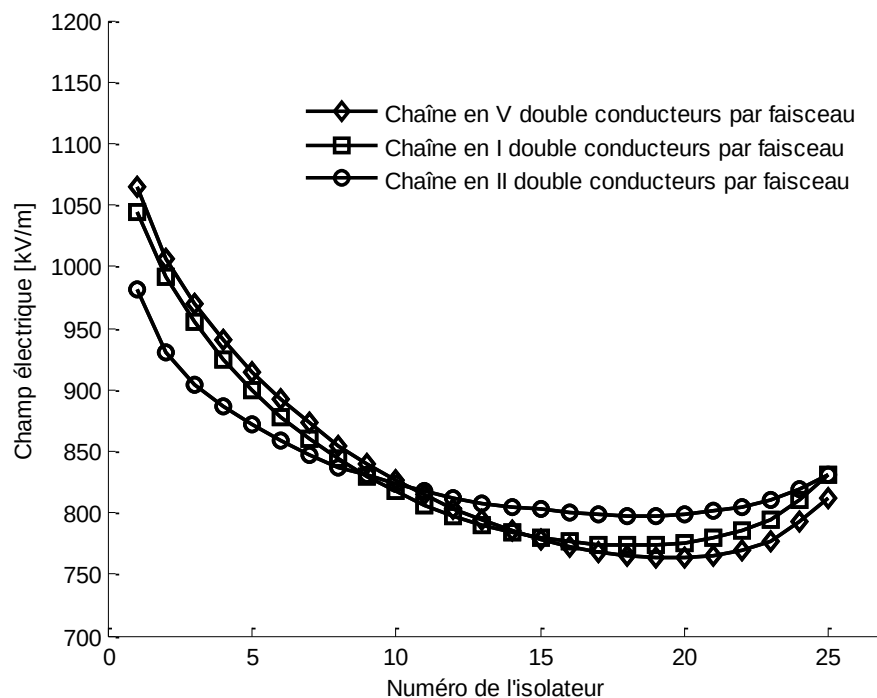


Figure II.9. Amplitude maximale du champ électrique sur des chaînes d'isolateurs en I, II et V et double conducteurs sans anneau de garde

Il est clair, comme le montre la Figure II.10, que les lignes équipotentielles ne sont pas égales entre tous les isolateurs composant la chaîne. Les isolateurs proches des lignes à haute tension connaissent la plus grande différence de potentiel et des décharges de surface sont susceptibles de se produire sur ce composant.

Dans la Figure II.11, la distribution de potentiel est représentée pour une chaîne d'isolateurs en forme de I avec un conducteur par phase, sans et avec anneaux de garde. Sans l'anneau de garde de support, l'isolant près de l'électrode HT était de 17,32 kV, soit 7,5% du potentiel appliqué, alors qu'avec l'anneau de garde installé, il n'était que de 13,48 kV, représentant 5,84% du même potentiel appliqué.

Évidemment, l'installation du dispositif de retenue augmente l'efficacité de la chaîne. Dans ces conditions, le rendement de la chaîne est de 68,4 %, contre 53,7 % sans l'anneau de garde.

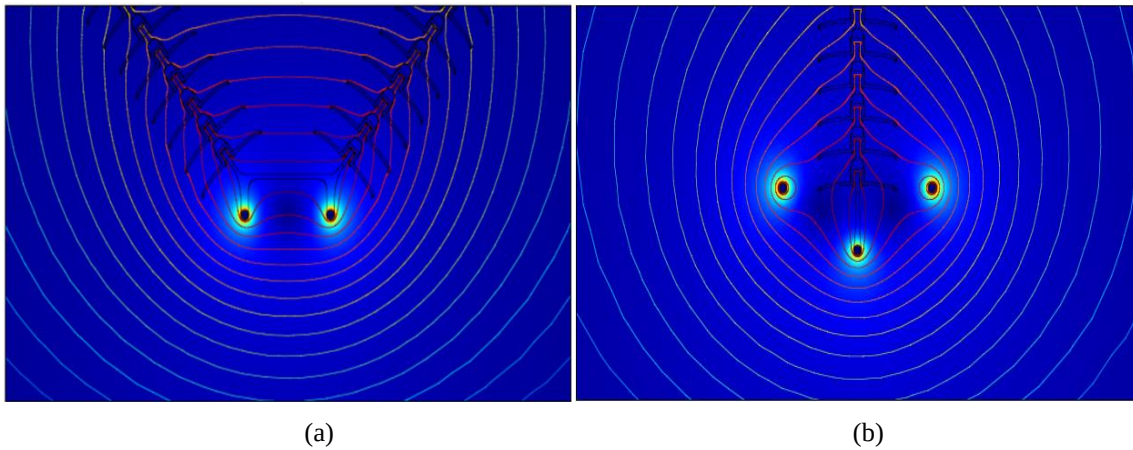


Figure II.10. Répartition du champ électrique et lignes équipotentiellles autour

- a) des chaînes en V sans anneau de garde
- b) une chaîne en I avec anneau de garde

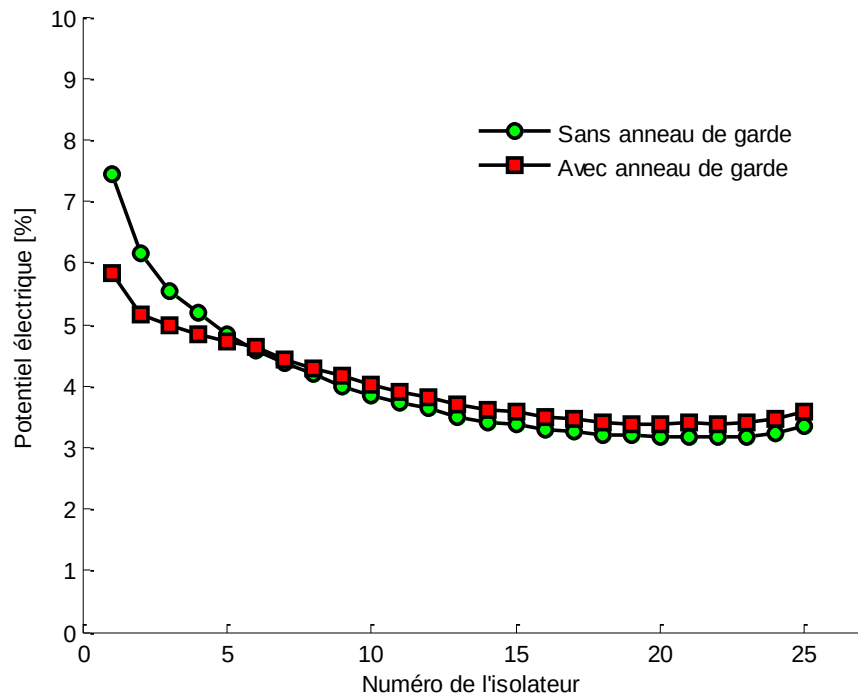


Figure II.11. Distribution de potentiel électrique pour les simulations avec et sans anneau de corona

II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous étudions la distribution du potentiel et du champ électrique le long des chaînes d'isolants composites et d'isolants en verre. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Mutliphysics 5.6 basé sur la méthode des éléments finis. Cette recherche nous amène à conclure :

1. La distribution de potentiel le long de la chaîne d'isolateurs est non linéaire, en particulier dans le cas des isolateurs composites. En effet, les isolants en verre reliés ensemble dans une chaîne recevront des différences de potentiel très similaires. De plus, les parties proches des conducteurs sont les plus sensibles aux contraintes électriques, c'est-à-dire aux différences de potentiel et aux champs électriques. Les parties métalliques de l'isolateur (dans ce cas le capuchon et la tige) sont équipotentielles, où la valeur du potentiel est toujours fixe et le champ magnétique est nul.
2. Dans ce cas, l'intensité du champ électrique autour et à l'intérieur des chaînes d'isolateurs est influencée par certains dispositifs et configurations : anneaux de garde, longueur des bras transversaux des pylônes, montage en V des chaînes d'isolateurs....
3. L'état de surface affecte la distribution du champ électrique. La valeur maximale de ce champ est obtenue lorsque la chaîne est entachée. En particulier, une très forte différence de potentiel est appliquée aux bornes de la bande sèche.
4. L'utilisation de l'anneau de protection peut empêcher la barre sèche près de l'électrode haute tension de l'isolateur de prendre feu dans certaines conditions de pollution.

*C*HAPIRE

III

Distribution améliorée

Du champ électrique le long
Des isolateurs composites avec les
anneaux des gardes

III.1 Introduction :

Dans le cas des isolateurs non céramiques, le problème des champs électriques fortement concentrés à proximité des deux bornes haute tension (lignes) et de la terre (tours) est bien connu [19, 20]. Les décharges de surface se produisent lorsque la valeur du champ électrique local est supérieure au champ critique (seuil) auquel commence l'effet corona. En effet, des solutions doivent être recherchées pour améliorer la répartition et atténuer la forte concentration du champ électrique aux deux extrémités (notamment à proximité du champ électrique 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 [20, 21].

Dans ce chapitre on a noté que L'emplacement optimal de l'anneau de garde doit être déterminé pour minimiser le champ électrique sur la chaîne d'isolateurs, bien qu'il n'existe actuellement aucune norme régissant sa conception et son emplacement sur les structures à haute tension.

Les résultats des études ont montré que la hauteur d'installation de l'anneau de garde joue un rôle crucial dans la réduction du champ électrique. Lorsqu'il est correctement positionné, l'anneau de garde permet de diminuer l'intensité du champ électrique près de la borne sous tension, réduisant ainsi les risques de dégradation de l'isolant. De même, le diamètre de l'anneau de garde a également un impact sur le champ électrique, mais son effet est moins prononcé que la hauteur d'installation.

Trois schémas d'atténuation du champ électrique à la surface d'isolateurs en suspension polymère sont analysés par simulation. Dans la première option, l'anneau de garde est installé du côté ligne de l'isolateur 230 kV. Les paramètres d'influence sont la position et la taille de l'anneau. Pour la deuxième option, l'effet de la valeur de constante diélectrique du matériau de revêtement isolant de 33 kV sur le champ électrique a été examiné. Le paramètre d'influence pour la troisième option est la forme des isolateurs 33 kV à proximité des bornes sous tension.

III.2 Atténuation du champ électrique causée par l'anneau de garde

L'ajout d'un anneau de protection améliore non seulement la répartition du champ électrique, mais réduit également le champ électrique. Il prolonge également la durée de vie de l'isolant. Bien qu'il soit généralement admis que l'anneau de garde peut être placé à côté du HT de la chaîne d'isolateurs [35],

L'emplacement le plus approprié doit être trouvé pour placer l'anneau de garde afin de minimiser le champ électrique sur la chaîne d'isolateurs. Cependant, il n'existe actuellement aucune norme régissant la conception et l'emplacement des anneaux de garde sur les structures à haute tension.

A noter que selon la littérature, pour éviter les décharges corona sur des isolateurs polymères secs et propres, la limite du champ électrique est de l'ordre de 350 à 1000 kV/m [22, 23, 24]. Selon l'Electric Power Research Institute (EPRI), la limite maximale de champ électrique utilisée est de 450 kV/m [22, 25] ; cette dernière a été choisie, dans cette étude, comme limite maximale.

Dans le présent travail, l'effet des anneaux de garde sur les isolants composites est étudié en évaluant la réduction du champ électrique, en fonction des propriétés et des dimensions des anneaux de garde. L'apparence et les paramètres techniques des échantillons d'isolants composites en suspension utilisés dans cette étude sont présentés à la Figure III.1 et au Tableau 1. Notez que h est la longueur de l'isolateur (distance entre les pièces métalliques), L est la ligne de fuite, $D1$ et $N1$ sont le diamètre et le nombre de grandes jupes, $D2$ et $N2$ sont le diamètre et le nombre de petites jupes, et d est l'isolant Le diamètre du tronc.

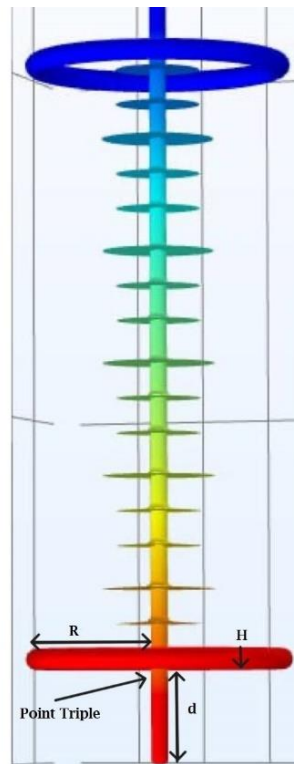


Figure. III.1. Modèle 3D de l'isolateur avec deux anneaux de garde

Le point triple sur la figure III.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 III.1. Paramètres techniques de l'isolateur composite

Matériaux	D1/D2 [mm]	L [mm]	d [mm]	N1/N2
Polymère	146 / 104	1150	150	12/05

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 (H) et de la position (d) 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).

Il est recommandé, pour les isolateurs montés sur des lignes de 230 kV et plus, l'utilisation des anneaux de garde [24,25, 26]. Le tableau III.2 illustre l'utilisation typique de l'anneau de garde sur les isolateurs de suspension.

Tableau III.2. Anneau de garde recommandé [25]

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 Champ électrique en fonction de la hauteur de l'anneau

La figure III.2 montre la répartition 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 de l'extrémité sous tension à l'extrémité mise à la terre le long de l'axe central du noyau isolant composite. Le champ électrique

augmente d'abord rapidement pour atteindre un maximum, qui est obtenu au point d'axe situé à la même hauteur que le point triple [23], surtout en l'absence d'anneaux de garde, ce qui rend cette zone vulnérable aux dommages et à la dégradation ultérieure. L'intensité décroît rapidement pour atteindre son minimum près de l'électrode de masse. Une fois l'anneau de garde installé, l'intensité du champ électrique autour de la borne sous tension diminue généralement, tandis que l'intensité du champ électrique près de l'électrode de masse est légèrement supérieure à celle sans l'anneau de garde installé.

La figure III.3 montre la variation de la valeur maximale calculée du champ électrique le long d'un isolateur composite en mm pour différentes hauteurs d'installation de l'anneau de garde et pour un rayon de tube $H = 30$ mm pour l'anneau de garde et $R = 250$ mm pour l'anneau. Lorsque la hauteur d'installation de l'anneau de protection augmente de 0 mm à 500 mm, la valeur de l'intensité du champ électrique diminue d'abord jusqu'à la valeur minimale puis augmente (Figure III.3). La valeur minimale ($E_{\min} = 185$ kV/m) correspond à une diminution de 30,71 % du champ électrique par rapport au champ électrique maximal ($E_{\max} = 275$ kV/m). Il est obtenu pour une hauteur de montage $H = 250$. De plus, pour d'autres valeurs de R et r (à étudier au chapitre 3), la réduction du champ électrique peut atteindre 43 %.

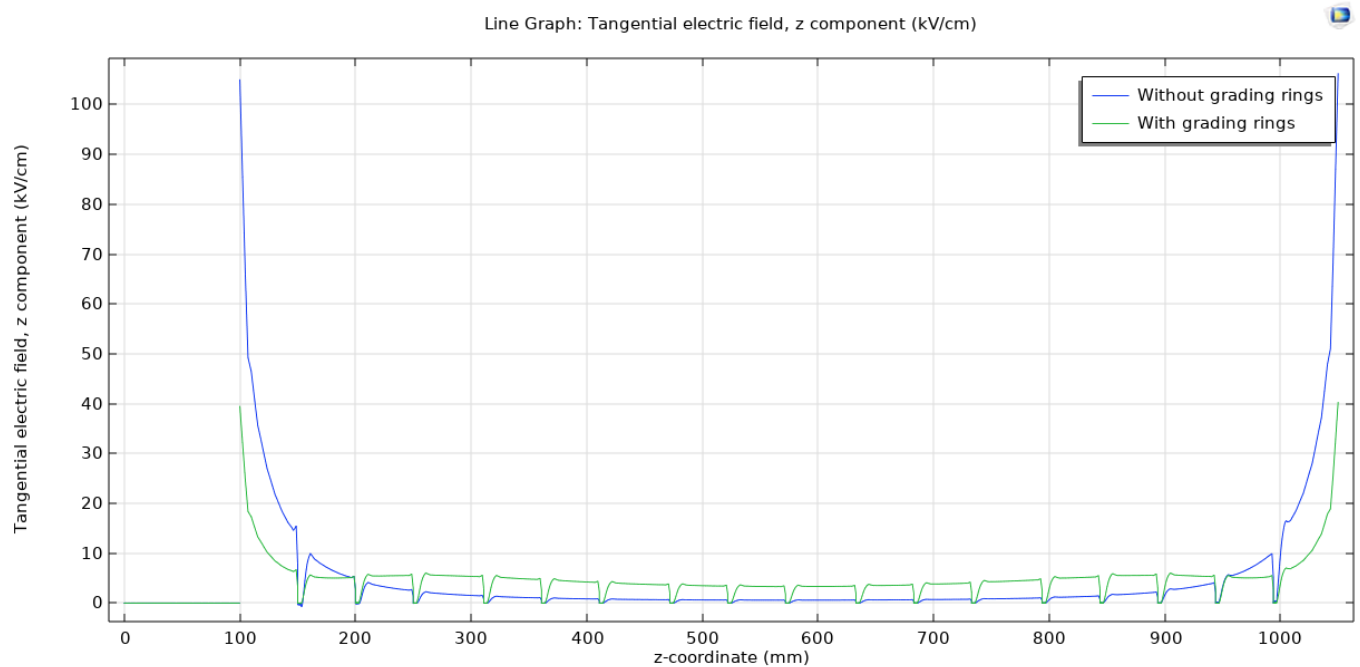


Figure III.2. Champ électrique le long de l'axe principal de l'isolateur composite de 220 kV

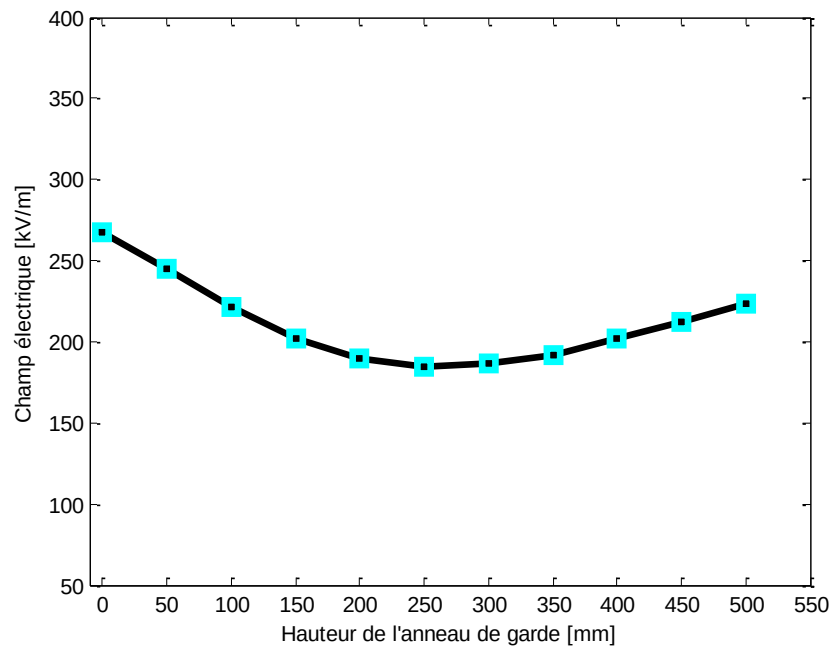


Figure III.3 Intensité maximale du champ électrique en fonction de la hauteur de l'anneau de garde

IV.2.2 Champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau

La Figure III.4 illustre l'effet du rayon de l'anneau de garde (R) sur l'intensité du champ électrique le long de l'axe d'un isolateur composite. De plus, la Figure III.5 montre la variation de la valeur maximale du champ électrique avec le rayon (R) de l'anneau de garde. Les résultats des calculs montrent que l'augmentation du rayon de l'anneau de garde augmentera légèrement la valeur maximale du champ électrique. Par exemple, lorsque le rayon de l'anneau passe de 150 à 300 mm (pour une hauteur $d = 150$ mm et un rayon de tube $H = 30$ mm), le champ électrique passe de 208,6 kV/m à 249,5 kV/m, soit une augmentation d'environ 16,4 %. A noter que l'augmentation du rayon de l'anneau au-delà de 400 mm n'a pratiquement aucun effet sur la valeur maximale du champ électrique. En conclusion, on peut dire que la valeur maximale du champ électrique est peu sensible au rayon de l'anneau.

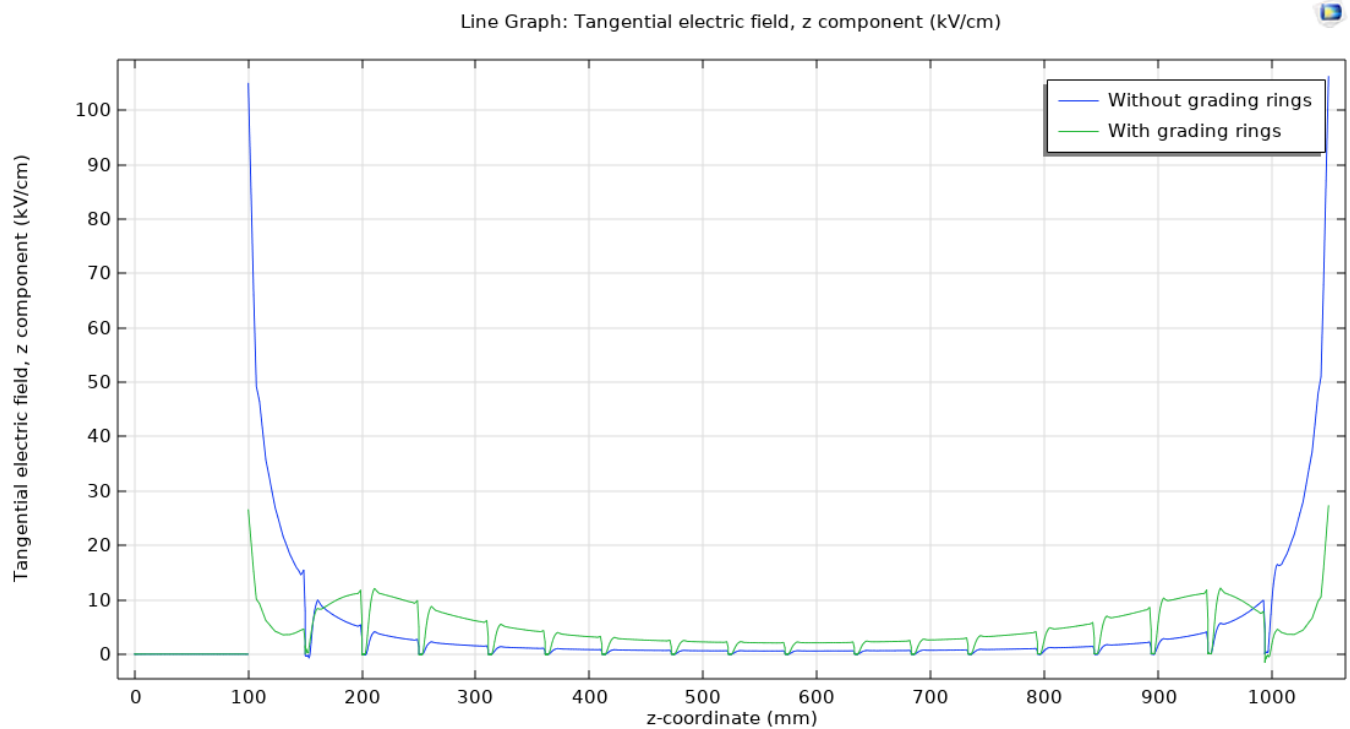
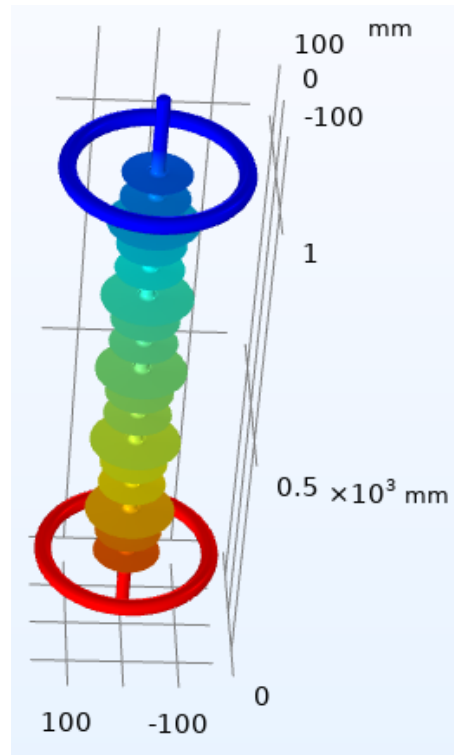


Figure. III.4 . Champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau de garde pour $R = 150$ mm, avec le modèle 3D

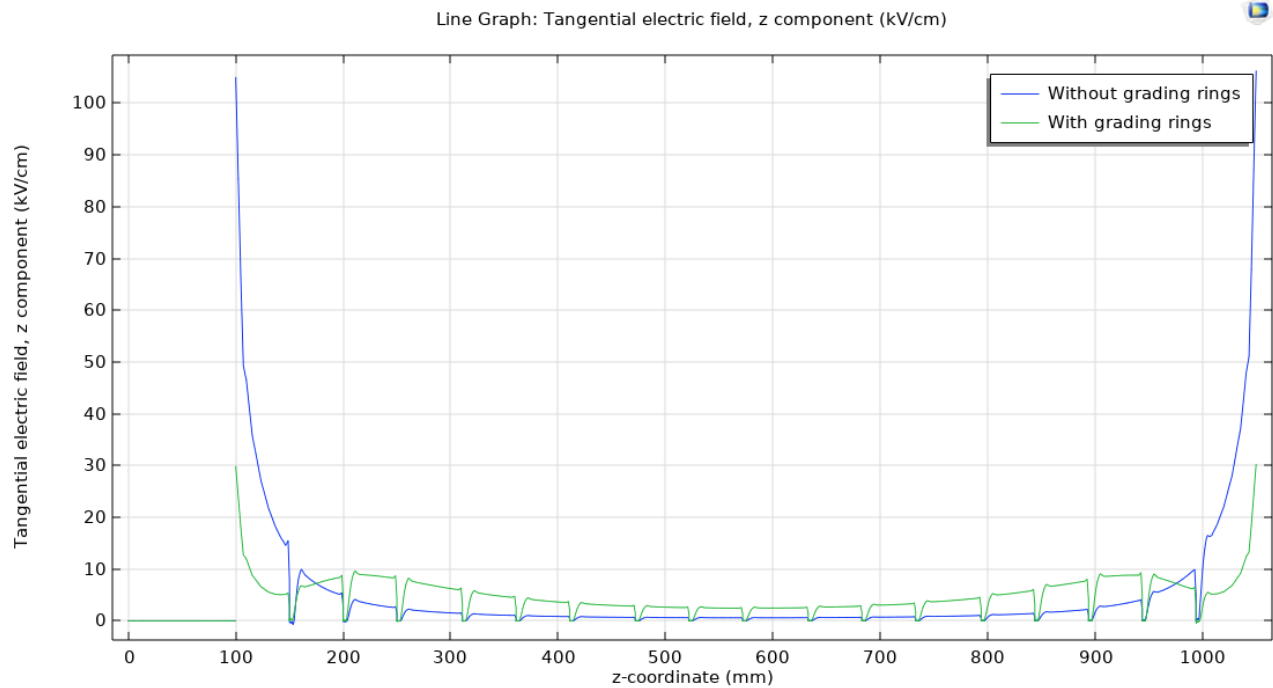
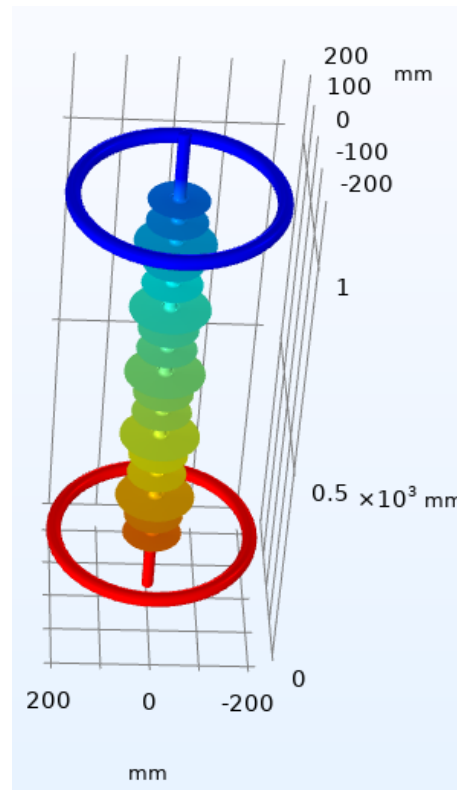


Figure. III.5 . Champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau de garde pour $R = 200$ mm, avec le modèle 3D

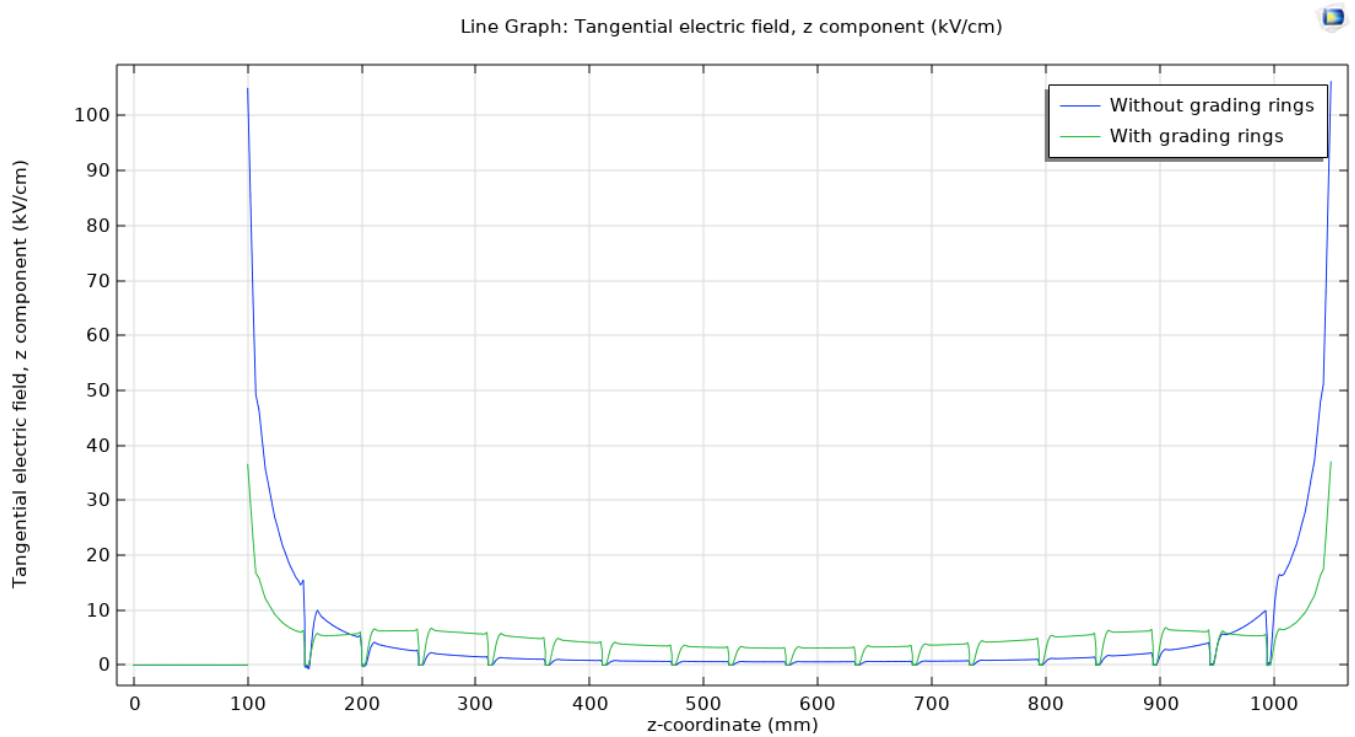
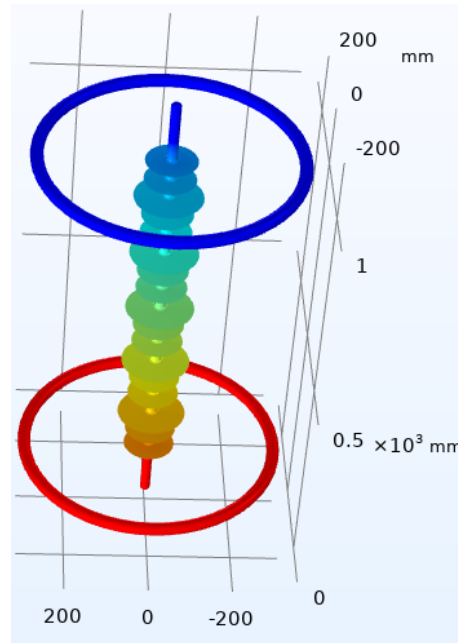


Figure. III.6 . Champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau de garde pour $R = 300$ mm , avec le modèle 3D

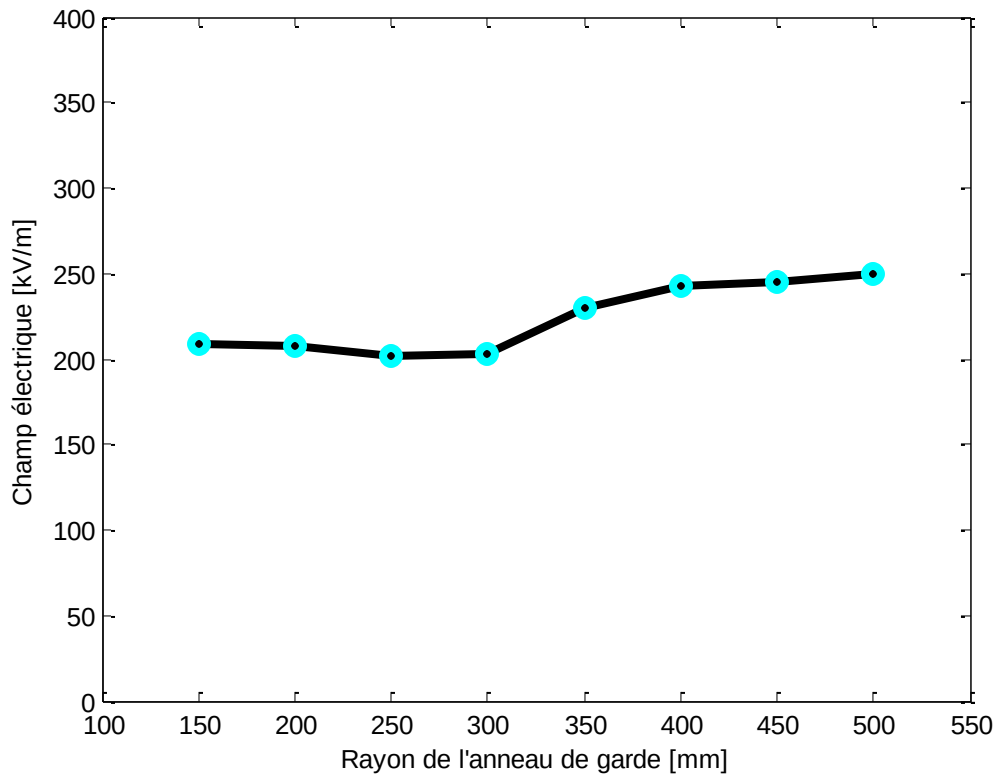


Figure III.7. Intensité maximale du champ électrique en fonction du diamètre de l'anneau de garde

III.2.3 Champ électrique en fonction du Diamètre du tube

Le rayon (H) de l'anneau de garde est également un paramètre de conception important, notamment pour contrôler la variation du champ électrique maximal à la surface de l'isolant. D'après les figures III.8 , III.9, III.10 et III.11 il est évident que l'augmentation du diamètre de l'anneau de garde améliore la répartition du champ électrique à la surface de l'isolant. Pour une hauteur de couronne de 150 mm, la valeur maximale du champ électrique passe de 277,2 kV/m à 166,5 kV/m (c'est-à-dire diminue de près de 40 %) lorsque le rayon de l'anneau passe de 5 mm à 30 mm. Il est important de noter que le rayon du tube de l'anneau de protection ne peut pas être augmenté de manière excessive en raison de contraintes structurelles (géométrie, poids, ...etc).

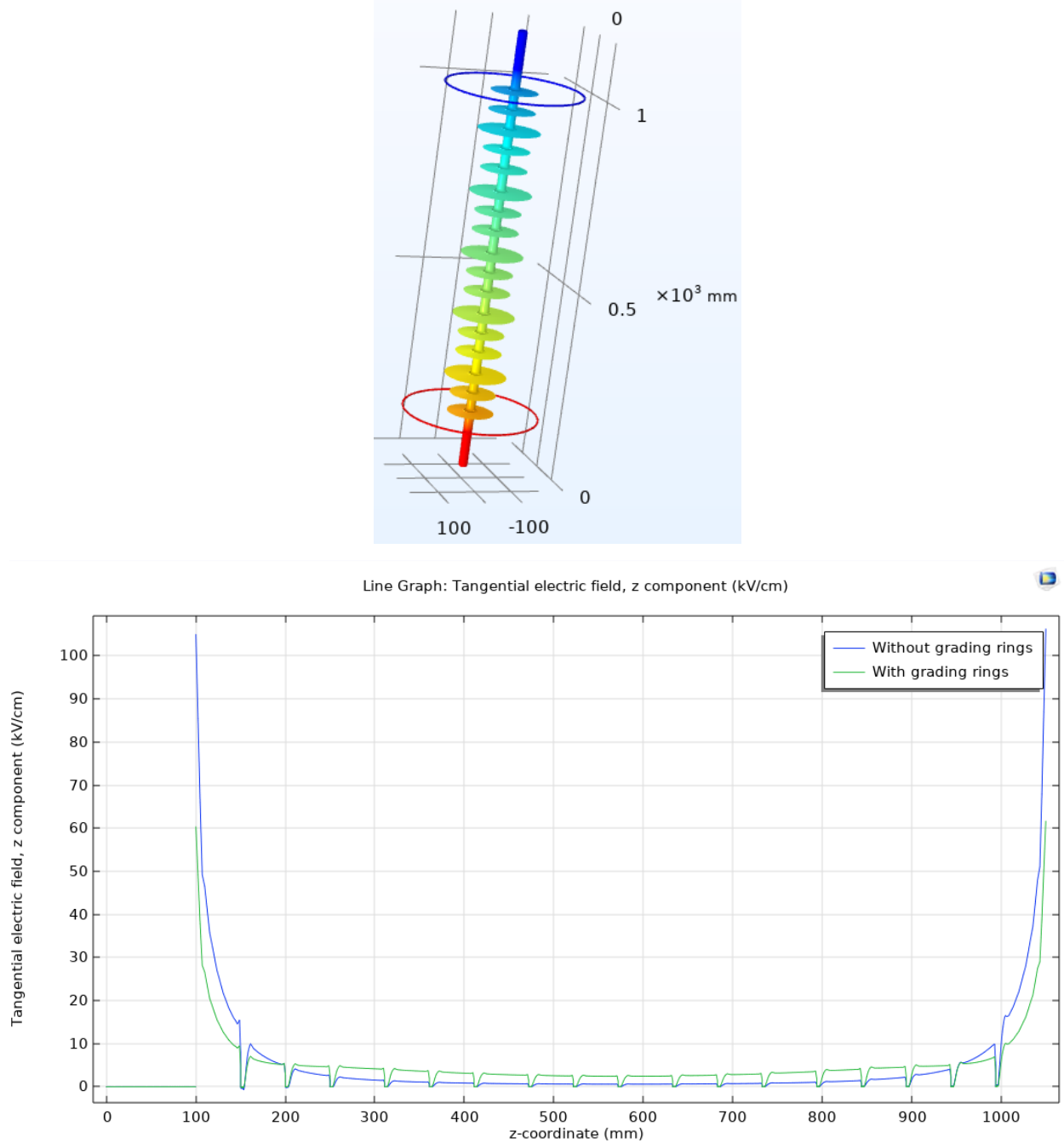


Figure III.8. Champ électrique en fonction du rayon du tube de l'anneau de garde $H=5\text{mm}$, avec le modèle 3D

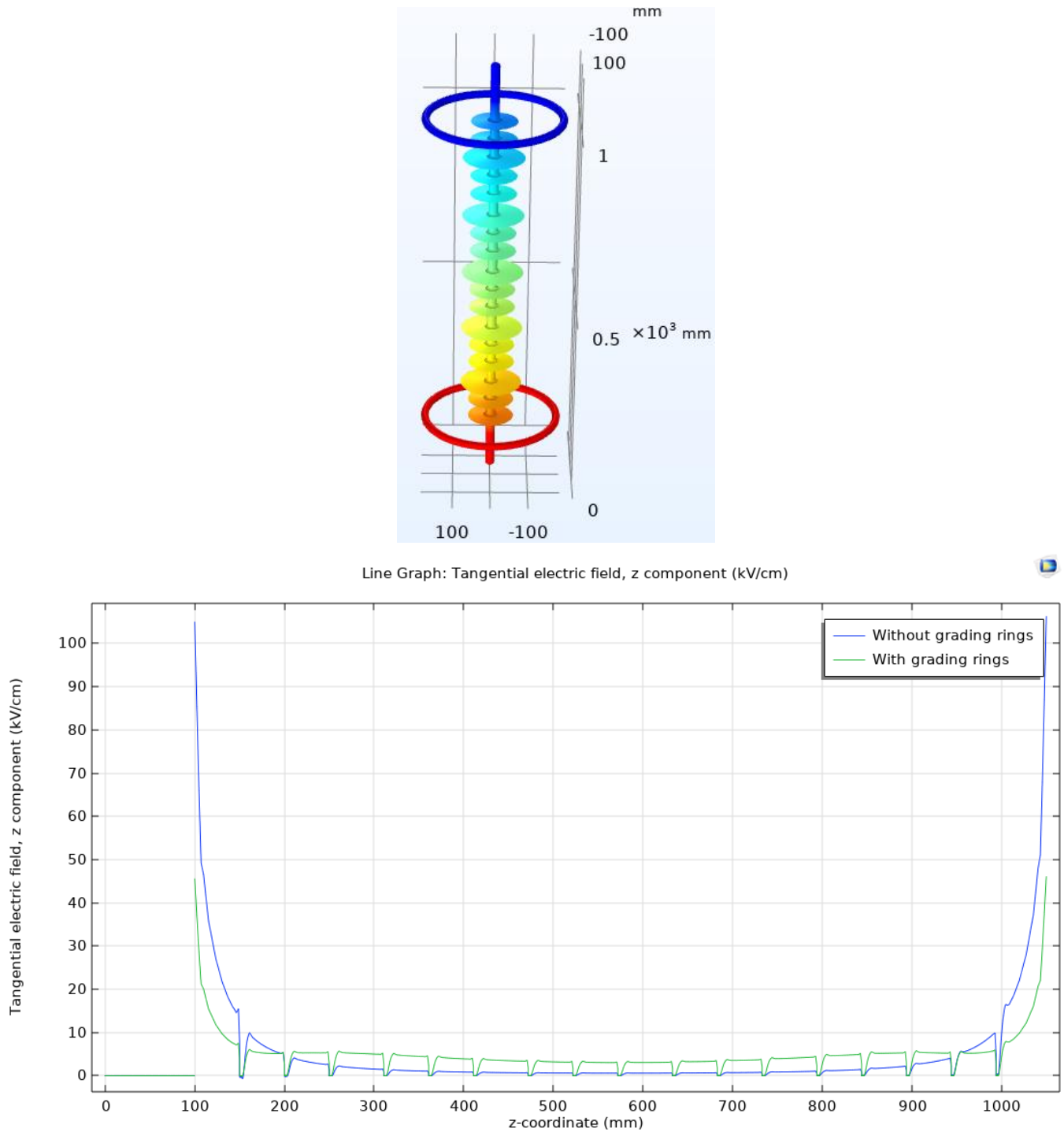


Figure III.9. Champ électrique en fonction du rayon du tube de l'anneau de garde H=20mm, avec le modèle 3D

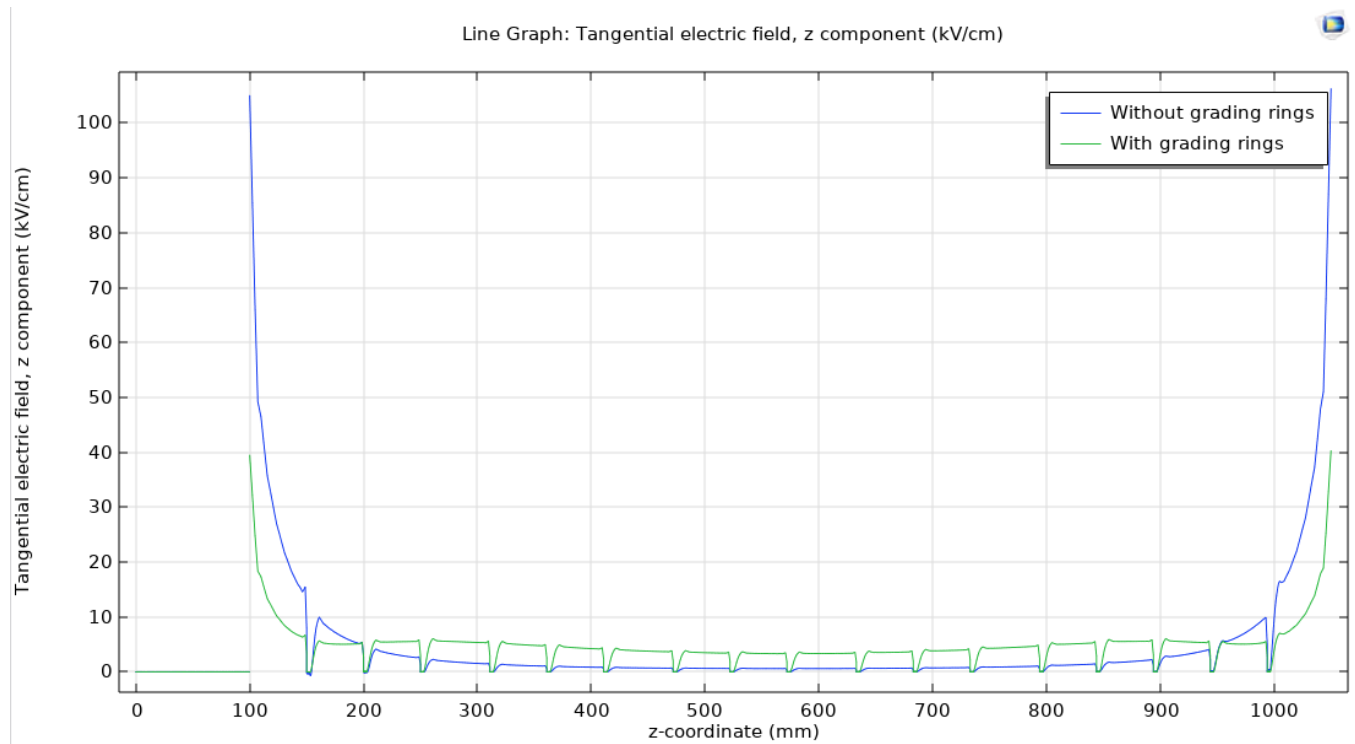
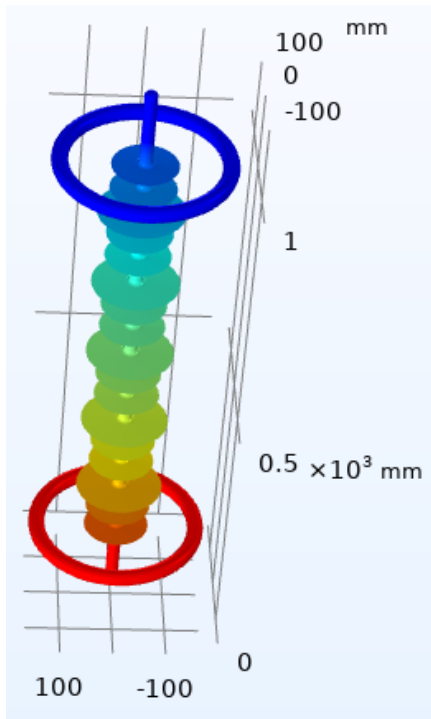


Figure III.10. Champ électrique en fonction du rayon du tube de l'anneau de garde H=30mm, avec le modèle 3D

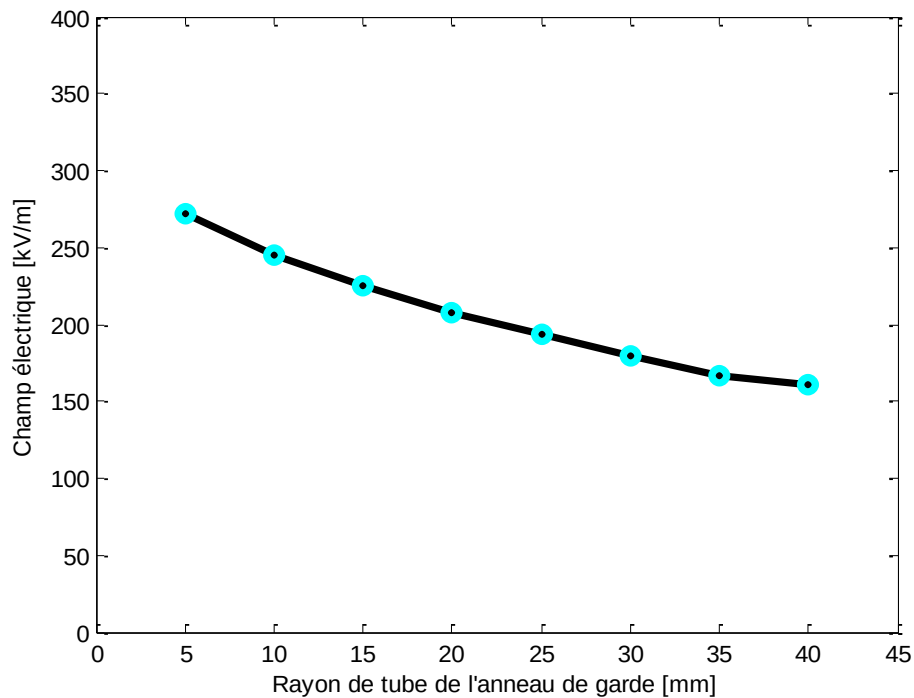


Figure III.11. Intensité de champ électrique maximale en fonction du rayon du tube de l'anneau de garde

III.3 Valeur de champ électrique recommandées

Souvent, une activité de décharge corona apparaît près des raccords d'extrémité, ce qui peut à son tour endommager l'isolation et provoquer la défaillance de l'isolateur. Pour améliorer la fiabilité, il est important de maintenir la valeur maximale du champ électrique en dessous d'un niveau critique. La valeur maximale admissible est différente, car il n'y a pas de norme générale fixée pour limiter le champ électrique à la surface d'un isolateur, l'Electric Power Research Institute (EPRI) a adopté 4,2 kV/cm (rms) pour des conditions sèches et non polluées, cette valeur a été obtenue grâce à des recherches approfondies par (EPRI) dérivées pour déterminer à des fins de conception la limite pratique de la zone d'isolant de champ électrique admissible où l'isolant ne montre aucun signe de vieillissement lorsqu'il est exposé à des champs électriques inférieurs à 4,2 kV/cm.

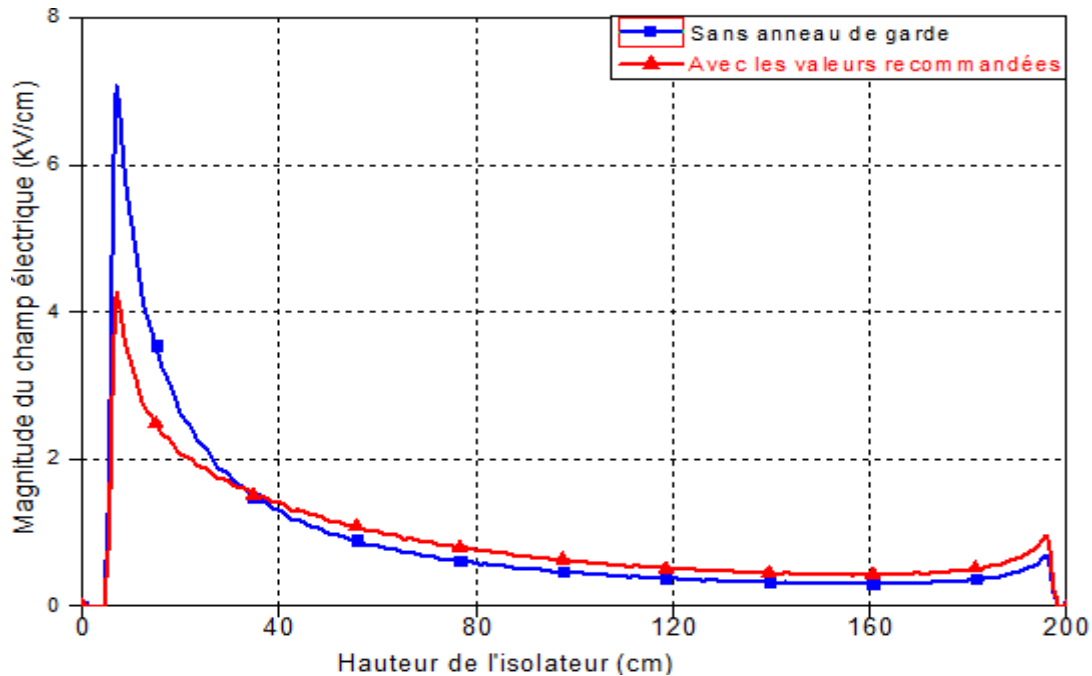


Figure III.12. Distribution de champ électrique sans anneau corona.

D'après la figure III.12, il ressort clairement que le champ électrique du côté haute tension de l'isolateur atteint des valeurs dépassant les valeurs recommandées. Par conséquent, l'anneau de garde sert à améliorer la distribution de potentiel et à réduire le champ E près de l'extrémité. Il est crucial de définir des paramètres d'anneau de garde appropriés pour réduire le champ électrique en dessous du seuil critique.

Afin de minimiser le temps nécessaire pour optimiser la géométrie de l'anneau de garde, une nouvelle approche basée sur une approche de conception d'expériences a été employée, où une conception optimisée nécessite un plus petit nombre d'expériences pour estimer une conception paramétrique avec la même précision qu'une conception non- conception optimisée. Les résultats sont valables pour toute la zone expérimentale couverte par les facteurs contrôlés et leurs paramètres.

La figure III.13 compare la distribution du champ électrique le long d'un isolant composite pour les trois cas étudiés. Il montre la réduction du champ électrique, l'anneau de garde optimisé et l'anneau de garde recommandé pour les deux cas. En présence d'un anneau de garde optimisé, l'amplitude du champ est réduite et se produit loin de la borne d'excitation. Il peut uniformiser le champ en le réduisant côté haute tension et en l'augmentant légèrement côté terre. La réduction à l'extrémité active est due à la présence des fils de phase et des pinces, qui contribuent à réduire l'inhomogénéité du champ électrique à cette extrémité de l'isolateur.

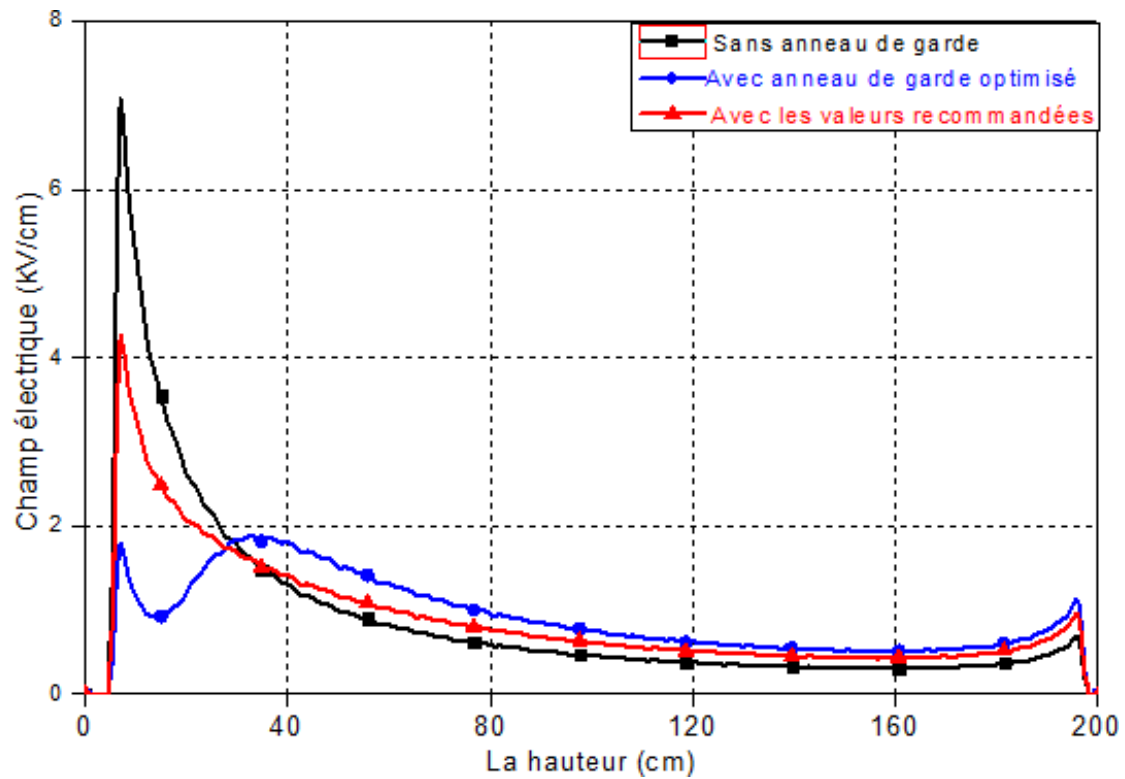
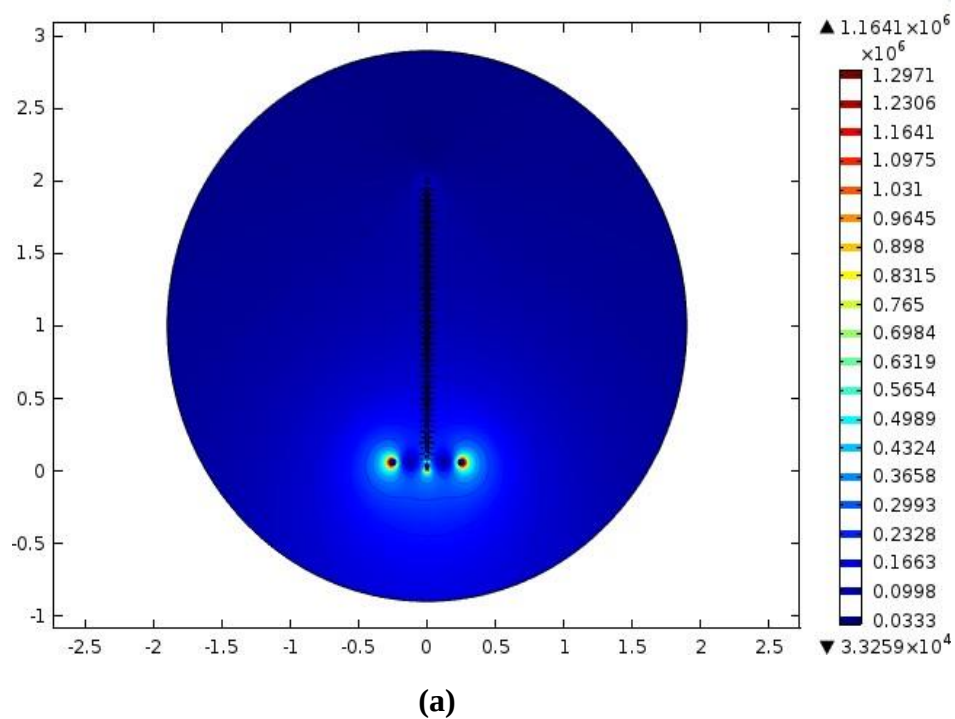


Figure. III. 12. Variation du champ E sur la longueur de l'isolateur
Avec et sans anneau de garde



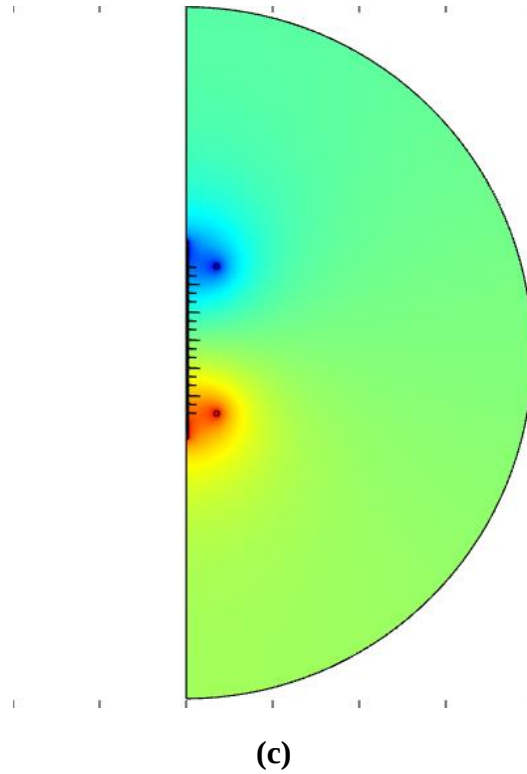
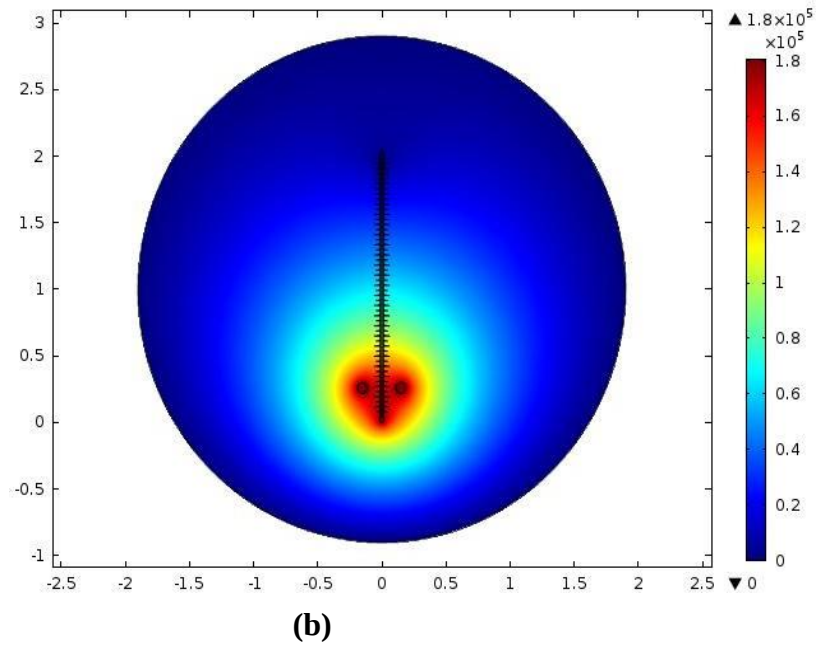


Figure. III. 13. (a): Distribution du champ électrique, (b): Contours équipotentiels autour de l'isolateur composite dans le cas d'un anneau Corona, (c) : Contours équipotentiels autour de l'isolateur composite dans le cas de deux anneaux Corona

A partir de la figure III.13, on peut voir que, en utilisant l'anneau optimisé, le gradient de champ électrique près de l'extrémité haute tension et de l'extrémité de masse de l'isolateur composite diminue considérablement. Ainsi, la distribution du champ E le long de l'ensemble des isolateurs composites est améliorée et l'installation de l'anneau de garde optimisé conduit à une distribution de tension uniforme. De plus, les intensités de champ électrique maximales du côté de l'extrémité sous tension diminueront considérablement. Les résultats obtenus conduisent à des performances à long terme de l'isolateur.

III.4 Atténuation du champ électrique par modification de la permittivité du matériau de revêtement

En raison des préoccupations concernant la répartition du champ électrique le long d'un isolant composite, une conception meilleure ou alternative qui ne nécessiterait pas l'utilisation supplémentaire d'accessoires tels que des anneaux de garde serait une alternative intéressante et une alternative nécessaire [27, 28].

Le principal inconvénient de l'anneau de garde est qu'il diminue le niveau d'isolation primaire de l'isolant. De plus, l'anneau choisi pour protéger la garde doit être positionné de manière appropriée afin d'avoir le plus grand effet sur la réduction du champ électrique. Un choix ou un placement malicieux peut diminuer l'utilité de cette méthode d'étalonnage [23, 24].

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 présentées 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.

III.4.1 Matériaux utilisés pour l'atténuation du champ électrique

L'utilisation de produits (polymères) à haute permittivité, dérivés de substances ferroélectriques, a été considérée comme une option viable pour contrôler le champ électrique dans les isolants électriques [27]. Les collègues de Ying Shen ont démontré que l'augmentation de la permittivité relative d'un composé de caoutchouc de silicone peut diminuer la force du champ

électrique à la surface de l'isolant. Le dopage du caoutchouc de silicone avec des quantités contrôlées de matériaux ferroélectriques, qui ont une permittivité élevée sans affecter négativement le moulage ou les propriétés mécaniques du composite, peut conduire à des résultats bénéfiques en réduisant l'intensité du champ électrique. Un matériau utilisé dans cette entreprise est le titanate de baryum (BaTiO_3) [27]. BaTiO_3 est un matériau ferroélectrique bien connu avec une valeur de permittivité relative d'environ 6000 pour des particules d'environ 1 micron de taille [29]. Le dopage de BaTiO_3 avec différents éléments est utilisé pour modifier les propriétés diélectriques et produire un composant de haute permittivité [28, 29]. 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 [29].

L'oxyde de zinc est un autre type de matériau composite qui a été proposé pour le contrôle du champ électrique dans des isolateurs [30]. Les microagglomérats aux propriétés de varistance à base de ZnO sont actuellement utilisés dans les mélanges polymères pour les extrémités de câbles moyenne tension. Les matériaux de varistance ZnO sont caractérisés par une forte dépendance de la conductivité électrique à la force du champ électrique appliqué. Ces matériaux se comportent comme des isolants à basse tension ou à faible champ électrique, mais commencent à conduire l'électricité à des valeurs plus élevées de tension appliquée. Les varistances ZnO sont largement utilisées pour la stabilisation de la tension et l'atténuation des surtensions dans les circuits électroniques et les systèmes d'alimentation (parafoudres). Notez que l'utilisation de matériaux composites tels que le ZnO dans les isolants a été très limitée jusqu'à présent et que davantage de travaux et de recherches sont nécessaires. De plus, le carbure de silicium (SiC) peut être utilisé pour le contrôle du champ électrique dans les isolateurs [35].

Ces deux matériaux peuvent être utilisés pour obtenir des composés permettant la conception d'isolateurs ne nécessitant pas d'anneaux de garde pour atténuer les champs électriques. De plus, leur mise en œuvre améliore les performances des isolants non céramiques en conditions polluées [27,31,35].

Dans ce travail, un modèle standard d'isolateur à suspension polymère de 33 kV a été utilisé (Figure III.14). Le but est d'étudier l'effet de la constante diélectrique sur le champ

électrique et la distribution de potentiel à la surface de cet isolant composite. Ce dernier est simulé dans des conditions propres et sèches sans tenir compte des autres accessoires tels que les pylônes, les conducteurs et autres accessoires. Modifiez la valeur de permittivité relative de 3,5 jusqu'à ce qu'elle atteigne 100.

Les paramètres techniques des isolateurs sont présentés dans le tableau III.3, où D1 est le diamètre de la grande jupe, D2 est le diamètre de la petite jupe, h est la distance entre les pièces métalliques, L est la distance de fuite, d est le diamètre de la tige, N1 et N2 sont respectivement les grandes jupes et le nombre de petites jupes.



Figure. III.14. Modèle 3D de l'isolateur 33kV

Tableau III.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

Il convient de noter que le point triple présente un intérêt particulier, qui est la jonction des trois milieux de la borne métallique ou de l'électrode HT, du matériau de revêtement isolant et de l'air (environnement ambiant). Le champ électrique est généralement le plus élevé à ce moment [23, 24, 31, 32, 33, 34].

III.5. Conclusion :

En conclusion, l'ajout d'un anneau de garde sur les isolateurs composites présente plusieurs avantages significatifs. Tout d'abord, il améliore la répartition du champ électrique le long de l'isolateur, assurant ainsi une distribution de potentiel plus uniforme. De plus, il réduit le champ électrique global, ce qui contribue à minimiser les risques de décharges corona et de dommages aux isolants.

L'emplacement optimal de l'anneau de garde doit être déterminé pour minimiser le champ électrique sur la chaîne d'isolateurs, bien qu'il n'existe actuellement aucune norme régissant sa conception et son emplacement sur les structures à haute tension.

Les résultats des études ont montré que la hauteur d'installation de l'anneau de garde joue un rôle crucial dans la réduction du champ électrique. Lorsqu'il est correctement positionné, l'anneau de garde permet de diminuer l'intensité du champ électrique près de la borne sous tension, réduisant ainsi les risques de dégradation de l'isolant. De même, le diamètre de l'anneau de garde a également un impact sur le champ électrique, mais son effet est moins prononcé que la hauteur d'installation.

Il est important de noter que la réduction du champ électrique varie en fonction des dimensions et des propriétés de l'anneau de garde. Des études plus approfondies sont nécessaires pour déterminer les paramètres optimaux de conception de l'anneau de garde en fonction des spécifications de l'isolateur et des exigences de tension.

En conclusion, l'utilisation d'un anneau de garde sur les isolateurs composites est fortement recommandée pour les lignes de 230 kV et plus. Il améliore la distribution du champ électrique, réduit les risques de décharges corona et contribue à prolonger la durée de vie de l'isolant. Cependant, des normes et des directives claires sont nécessaires pour régir la conception et l'emplacement des anneaux de garde sur les structures à haute tension afin d'assurer une utilisation optimale et sécurisée de ces dispositifs.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le cadre général de l'étude de l'effet de l'anneau de garde sur la performance des isolateurs de haute tension utilisés dans le réseau de transport d'énergie électrique. Ce travail est divisé en deux parties :

La première partie est une recherche bibliographique qui nous a permis de connaître les principaux types des isolateurs, leurs avantages et inconvénients ainsi que les facteurs provoquant leur dégradation.

La deuxième partie consiste en un travail de simulation sur un isolateur composite 230 kV pour évaluer l'effet des anneaux de garde sur les performances électriques de l'isolateur. Les distributions de potentiel et de champ électrique le long d'un isolant composite sont étudiées à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM).

La relation entre le champ électrique et les paramètres géométriques (position de l'anneau par rapport à la pointe, rayon de l'anneau et épaisseur de l'anneau) a été modélisée et optimisée par la méthodologie de surface de réponse.

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

- ❖ Des études de simulation montrent que l'uniformité de la distribution de potentiel peut être obtenue en ajoutant des anneaux de garde sur les électrodes à haute température des isolants composites.
- ❖ Selon des simulations numériques, l'ajout d'un anneau de garde sur l'électrode haute température peut réduire considérablement l'intensité du champ électrique près de la première ailette de l'électrode haute température.
- ❖ En utilisant la méthode d'optimisation proposée dans ce travail, la position optimale de l'anneau de garde sur l'isolant composite peut être obtenue.

Par conséquent, ces résultats peuvent être utilisés pour améliorer l'utilisation des anneaux de garde dans des conditions normales afin de réduire l'activité de décharge corona dans les sous-stations de transmission.

Bibliographie

- [1] E. Cherney, A. Baker, J. Ku_el, Z. Lodi, and D. S. G. Phillips, A. and Powell. "Evaluation of and replacement strategies for aged high voltage porcelain suspension-type insulators," IEEE Transactions on Power Delivery, 2014.
- [2] R Znaidi. "Research and Assessment of Insulator Performance in Marine and Desert Environment", Insulator News Marketing Report, pp. 12-22, 2000.
- [3] R. Hackam. "Outdoor HV composite polymeric insulators," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 6, pp. 557-585, 1999.
- [4] Haddad and D.F. Warne, "Advances in High Voltage Engineering", IET Power and Energy Series 40, The Institution of Engineering and Technology, (2007).
- [5] G. Dhatt, G. Touzot, "Une présentation de la méthode des éléments finis" Maloine S. A. Editeur, Paris, 1984.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] 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.
- [16] COMSOL Multiphysics 3.5a User's Guide: COMSOL AB., 2008.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Ohio Brass Catalog 24 , <http://www.hubbellpowersystems.com>
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.

- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] https://fr.wikipedia.org/wiki/Potentiel_%C3%A9lectrique