

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث
العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Électrotechnique

Spécialité : commandes électriques

➤ Par : - GHANEM Abdelghani

➤ - BENZAADI Bilal

Sujet

Contributions à l'étude et à l'optimisation d'un parafoudre synthétique

en présence d'un anneau de corona.

M .Diaf Abdelaziz

Grade

Univ-BBA

Président

M.Reffas Abderrahim

Grade

Univ-BBA

Examineur

M.Aouabed Fatiha

Grade

Univ-BBA

Encadrant

Année Universitaire 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

1438

DédicaceS

Nous dédions ce travail à :

À nos très chers parents pour leur soutien moral, et pour tous les sentiments d'affection et d'amour qui représentent pour nous le pilier de tous nos efforts.

À tous les membres de notre famille sans aucune exception. Et à tous ceux que notre réussite leur tient à cœur.

Tous nos amis en particulier Dafaf Abdel Razzak et Dafaf Abdelaziz et Laraib Oussama.

En particulier notre rapporteur Mme F.AOUABED.

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu puissant pour nous avoir donné la force, le courage et la volonté d'accomplir ce travail.

Nous tenons, avant tout, à exprimer notre profonde gratitude à notre rapporteur Madame Dr. **F. AOUABED**, qui a assumé la direction de ce travail, pour sa disponibilité, pour sa confiance qu'elle nous a témoignée, ainsi que ses conseils précieux et ses encouragements qui nous ont beaucoup aidés à mener à bien la réalisation de ces travaux.

Nous remercions également Mr. **Diaf Abdelaziz** d'avoir accepté de présider le jury et nous remercions Mr. **Abderrahim. REFFAS** d'avoir accepté de faire partie du jury.

Tous les enseignants qui ont participé le long de ces années à notre formation.

Nous adresse nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Sommaire

Introduction Générale.....	1
Chapitre 1:Aspects généraux des parafoudres.....	2
1.1 Introduction.....	3
1.2 La Foudre.....	3
1.2.1Le Phénomène foudre	3
1.2.2Les effets de la foudre.....	4
1.2.2.1 effet direct.....	4
1.2.2.2 effet indirect.....	4
1.2.2.3 effet thermiques.....	5
1.2.2.4 effet électrique.....	5
1.2.2.5 effet électromagnétique.....	5
1.2.3Paramètres électrique de la foudre	6
1.2.4La Modélisation de la foudre	6
1.3 Les Surtensions.....	8
1.3.1Définitions.....	8
1.3.2Classification des surtensions	8
1.3.3Les dispositifs de protection contre les surtensions	9
1.5.1Les Types des parafoudres	10
1.5.1.1Parafoudre à carbure de Silicium (SiC).....	10
1.5.1.2 Parafoudre à oxyde de zinc (Zn O).....	11
1.5.2 principe de fonctionnement de parafoudre ZnO.....	11
1.5.3Choix des parafoudres à oxyde de zinc en HT.....	12
1.5.4Caractéristiques des parafoudres à oxyde de zinc	12
1.5.5Application des parafoudres.....	13
1.5.6Les Avantages des parafoudres.....	14
1.6 Conclusion.....	14
Chapitre II.....	16
Impact de l'anneau de garde sur le champ et la distribution potentielle.....	16
2.1 Introduction.....	17

2.2	Effet de l'installation de l'anneau de garde.....	17
2.2.1	Anneau de grade.....	17
2.2.2	Rôle de l'anneau de garde.....	18
2.3	Effet de l'Anneau Corona sur les Parafoudres.....	18
2.4	Optimisation des paramètres de l'anneau de garde.....	19
2.5	Le champ électrique.....	20
2.6	Potentiel électrique.....	20
2.7	Méthodes de détermination du champ et du potentiel électrique.....	20
2.7.2	La méthode des différences finies.....	21
2.7.3	La méthode des éléments finis (MEF).....	21
2.7.3.1	Etapas de la méthode des éléments finis.....	21
2.7.3.2	Avantages de la méthode des éléments finis.....	22
2.8	Conclusion.....	22
Chapitre 3:Résultats et Discussions.....		23
3.1	Introduction.....	24
3.2	Géométrie de parafoudre utilisé.....	24
3.3	Propriétés matérielles.....	25
3.4	Conditions aux limites.....	26
3.5	Maillage Modèle.....	27
3.6	Résultats et discussion.....	28
3.6.1	Le mieux des paramètres de l'anneau de garde sur le champ électrique.....	30
3.6.2	Études de la distribution de tension et champ électrique sur le parafoudre avec et sans corona.....	32
3.6.2.1	champ électrique.....	33
3.6.2.2	Tension électrique.....	34
3.7	conclusion.....	37
conclusion générale.....		38

Liste des figures

Chapitre 1 :Aspects généraux des parafoudres

Figure 1. 1. Onde de courant 8/20	6
Figure 1. 2. Onde de tension 1,2/50	6
Figure 1 .3. Exemple de surtension	8
Figure 1 .4. Eclateurs	9
Figure 1. 5. Constitution d' un parafoudre au carbure de silicium a éclateur [14]	10
Figure 1 .6. Types de parafoudres ZnO utilisé dans les réseaux a haute tension.....	11

Chapitre 2 : L'effet des anneaux de garde sur la distribution du champ et tension électrique

Figure. 2.1. Exemples de géométries d'anneaux de garde.....	18
--	----

Chapitre 3:Résultats et Discussions

Figure3.1 Modèle géométrique de parafoudre.....	24
Figure3.2. les matériaux de parafoudre.....	25
Figure. 3. 3. Paramètres structurels de l'anneau de garde.....	26
Figure.3.4. Maillage de parafoudre ZnO.....	28
Fig.3.5. Graphiques des effets principaux des paramètres de l'anneau corona H, D et T sur la valeur maximale du champ E.....	30
Fig.3.6. Courbes de contour de la variation du champ E par rapport aux paramètres de l'anneau corona.....	31
Figure.3.7. Lignes de référence du potentiel et champ électrique.....	33
Figure.3.8. Champ électrique sans et avec corona.....	34
Figure.3.9. Distribution de la tension électrique avec anneau.....	35
Figure.3.10. Distribution des lignes équipotentielles avec anneau.....	35
Figure. 3.11. Tension électrique sans et ave corona.....	36

Liste des Symboles

HT	haute tension.
TOV	Temporaire Over Voltage
MEF	méthode des éléments finis
DPS	dispositifs de protection contre les surtensions
I_0	Représente la valeur crête du courant
A	Est l'inverse du temps de descente
ϵ_r	permittivité relative (constante diélectrique relative).
Σ	Conductivité électrique.
I_0	l'amplitude du courant à la base du canal
r_1	la constante de temps du front.
r_2	la constante de décroissement.
η	le facteur de correction de l'amplitude.
n	constante entière entre 2 et 10.
Uc	tension de régime permanent
Ur	tension assignée.
Ind	courant nominal de décharge

Liste des tableaux

Table 3.1. Propriétés du matériau utilisé pour la modélisation de isolateur.....	26
Table 3.2. Paramètres de l'anneau Corona et leurs niveaux	27
Tableau 3.3. Résultats informatiques.....	30
Table 3.4:Analyse ANOVA de la contribution des paramètres en pourcentage à la variation totale de le champ E maximum pour les paramètres de l'anneau corona.....	30

ملخص:

تعمل مانعات الصواعق ذات الجهد العالي على حماية الشبكات الكهربائية من البرق. تهدف هذه الدراسة إلى تحسين مانع اصطناعي باستخدام حلقات الإكليل، من خلال تحليل مانعات أكسيد الزنك (ZnO) وتأثير حلقات الإكليل على المجال الكهربائي. باستخدام طريقة العناصر المحدودة، تم تنفيذ نموذج هندسي لمانع الصواعق في COMSOL MULTIPHYSICS 6.2 لدراسة توزيع الجهد والمجال الكهربائي مع وبدون الإكليل. أظهرت النتائج أن تحسين الهالة يعمل على توحيد المجال الكهربائي ويقلل من تفريغ الهالة، وبالتالي تحسين أداء مانعات الصواعق.

الكلمات المفتاحية: مانعات الصواعق الجهد العالي COMSOL MULTIPHYSICS توزيع الجهد الكهربائي، توزيع الحقل الكهربائي، حلقات كورونا.

Résumé :

Les parafoudres hauts tension protègent les réseaux électriques contre la foudre. Cette étude vise à optimiser un parafoudre synthétique en utilisant des anneaux de corona, en analysant les parafoudres à oxyde de zinc (ZnO) et l'impact des anneaux de corona sur le champ électrique. Grâce à la méthode des éléments finis, un modèle géométrique de parafoudre a été implanté dans COMSOL MULTIPHYSICS 6.2 pour étudier la distribution du potentiel et du champ électrique avec et sans corona. Les résultats montrent que l'optimisation corona uniformise le champ électrique et réduit la décharge corona, améliorant ainsi les performances des parafoudres.

Mots Clés : Parafoudre, hauts tension, COMSOL MULTIPHYSICS, distribution du potentiel électrique, distribution du champ électrique, anneaux de corona.

Abstract:

High-voltage surge arresters protect electrical networks against lightning. This study aims to optimize a synthetic arrester using corona rings, by analyzing zinc oxide (ZnO) arresters and the impact of corona rings on the electric field. Using the finite element method, a geometric model of a lightning arrester was implemented in COMSOL MULTIPHYSICS 6.2 to study the distribution of potential and electric field with and without corona. The results show that corona optimization uniformises the electric field and reduces corona discharge, thereby improving the performance of surge arresters.

Key Words: surge arrester, High-voltage, COMSOL MULTIPHYSICS, the distribution of the electric potential, the distribution of the electric field, corona ring.

Introduction Générale

La croissance constante de la consommation d'énergie électrique a conduit à l'expansion du réseau de transport et au développement des lignes à très haute tension. Parallèlement, il est essentiel de garantir une qualité de service adéquate, ce qui a conduit à l'installation de dispositifs de protection contre les surtensions. En effet, ces dernières entraînent de nombreuses pannes du matériel électrique et peuvent représenter un danger pour les personnes [1].

Les parafoudres ou parasurtenseurs sont des appareils qui servent à protéger les équipements électriques et électroniques des surtensions. Ces dispositifs ont été développés dans le but de détourner l'énergie des surtensions dangereuses et de les dévier vers la terre, évitant ainsi tout dommage aux appareils sensibles[2].

Le réseau électrique a été d'abord protégé par les éclateurs ; puis par des parafoudres associant des éclateurs et des parafoudres à carbure de silicium (SiC). Sa fonction principale est de prévenir les surtensions à tous les niveaux de tension dans un système d'alimentation [3].

Mais maintenant les parafoudres à oxydes de zinc (ZnO) ont remplacé avantageusement les éléments antérieurs. En effet, les varistances à oxyde de zinc, qui constituent les composants essentiels du parafoudre, offrent des caractéristiques bénéfiques en termes de non linéarité, d'absorption d'énergie et de temps de réponse. Néanmoins, la capacité d'absorption de l'énergie de ces céramiques diffère en fonction de leur apparence complexe, de leur densité de courant et de leur uniformité.

Les anneaux corona améliorent l'efficacité des parafoudres en éliminant les décharges corona et en uniformisant le champ électrique. Leur optimisation et leur positionnement, avec des méthodes analytiques et numériques, maximisent la performance et la durabilité des parafoudres.

Cette étude se divise en trois chapitres distincts. Le premier aborde les aspects généraux du parafoudre, le phénomène de la foudre, ses conséquences, ainsi que l'analyse des moyens de protection, en mettant l'accent sur les parafoudres à oxyde de zinc (ZnO) et leur fonctionnement. Le deuxième chapitre examine l'impact de l'anneau de garde sur la répartition du champ et du potentiel électrique. Enfin, le dernier chapitre présente des simulations de conception d'anneaux corona pour les parafoudres en silicone, réalisées dans des conditions propres à l'aide de Simulink de COMSOL multi-physique. La conclusion générale de l'étude propose des perspectives de recherche future dans ce domaine.

Chapitre 1

Aspects généraux des parafoudres

1.1 Introduction

Les systèmes de protection des réseaux électriques à courant alternatif contre les surtensions se divisent généralement en deux catégories : les éclateurs et les parafoudres. L'éclateur demeure utilisé dans les réseaux de distribution et de transport d'électricité. Il se compose généralement de deux électrodes, l'une connectée à l'élément à protéger et l'autre à la terre. La distance entre ces deux électrodes est ajustable et détermine la tension de décharge initiale[4].

La généralité des équipements des réseaux électriques est basée sur plusieurs facteurs en tenant compte les conditions environnementales telles que, la pollution, la pression atmosphérique, la température, et notamment, les décharges électriques de la foudre. Cette dernière pourrait influencer sur la tenue diélectrique des équipements électriques et par conséquent entraîner une dépression du niveau d'isolement qui conduit à une interruption du service[5].

Ce chapitre traite des parafoudres et commence par une exploration générale du phénomène de la foudre. Nous commencerons par définir la foudre, examiner ses paramètres électriques, notamment le courant de foudre, et discuter de sa modélisation et de son interaction avec le réseau électrique, y compris ses effets. Ensuite, nous nous pencherons sur les moyens de protection contre ce phénomène, en mettant l'accent sur les parafoudres. Enfin, nous approfondirons le parafoudre à base d'oxyde métallique ZnO, en détaillant sa composition, son mode de fonctionnement et son principe de protection reposant sur une varistance.

1.2 La Foudre

1.2.1 Le Phénomène foudre

L'apparition de la foudre est un phénomène extraordinaire qui a suscité l'intérêt de l'homme dès le premier contact. À partir du XX^{ème} siècle, la foudre est devenue une discipline scientifique. De plus, l'évolution des réseaux d'énergie électrique, avec l'apparition des dispositifs électroniques de contrôle et de contrôle, suscite un réel intérêt pour la recherche sur le phénomène de foudre en raison des dangers qu'il présente pour ces éléments, et en particulier pour assurer une protection efficace contre les effets néfastes de ce phénomène sur les systèmes électriques, électroniques ou de télécommunication.

- ✓ En se dissipant, ce plasma crée à la fois un éclair de lumière (la foudre) et un son (le tonnerre).

- ✓ La formation ou l'arrivée d'un nuage orageux provoque la création d'un champ électrique entre le nuage et le sol.
- ✓ L'éclair entre le nuage et le sol est constitué par des traceurs descendants, mais également par des traceurs ascendants.
- ✓ Le traceur descendant négatif (cas le plus général), prend naissance au sein des masses négatives du nuage.

Ce traceur avance vers le sol par une série de bonds successifs, se distinguant ainsi du traceur positif qui avance presque de manière continue, sur quelques dizaines de mètres avec des pauses de 40 à 100 μ s entre chaque bond[6].

1.2.2 Les effets de la foudre

Les effets de la foudre sur l'environnement sont nombreux. Nous pouvons retenir :

- effet direct: impact sur une structure, une personne ou une ligne de réseau.
- effet indirect: impact à proximité conduisant à des remontées de terre et à des surtensions sur les lignes par induction.

1.2.2.1 effet direct

- ILS se produisent au point d'impact de la foudre.
- Ils résultent de l'écoulement d'un courant de foudre très intense dans les éléments plus ou moins conducteurs.
- Le courant de foudre peut entraîner des conséquences telles que l'électrocution de personnes ou d'animaux, des incendies et la destruction de matériel par fusion ou déformation. Une protection efficace contre ces effets directs est assurée par l'installation de paratonnerres à tige, à cage ou à fil, en fonction du type de structure à protéger [7].

1.2.2.2 effet indirect

La résultante d'un foudroiement direct dont le débit n'a pas été contrôlé est connue sous le nom de foudroiement indirect. Tout courant de foudre qui ne serait pas bien guidé peut suivre n'importe quel chemin de manière totalement aléatoire pour atteindre la terre, créant ainsi des arcs électriques (étincelage) sur son passage.

Entre l'arrivée des lignes d'alimentation extérieures et le système équipotentiel des terres de la structure, on observe des surtensions (effets induits). Ces surtensions se propagent à l'intérieur

de la structure en se propageant (le long des lignes). Les parafoudres sont utilisés pour se protéger et sont installés sur le réseau électrique.

La terre de l'installation présente un potentiel élevé lors de la dispersion du courant dans le sol, ce qui entraîne des variations de potentiels destructeurs entre les masses des équipements et les réseaux auxquels ils sont connectés[8].

1.2.2.3 effet thermique

Ils correspondent à la dissipation de l'énergie sous forme de chaleur, ils se traduisent par :

- ✓ L'éclatement de matériaux : tels que pierre ou bois des arbres...
- ✓ Écrasement des câbles à cause de la pression produite par la vaporisation de l'eau dans les sols humides.
- ✓ Fusion des métaux

1.2.2.4 effet électrique

Peut-être principalement attribué à divers facteurs :

- ✓ Les fortes circulations de courant à travers les conducteurs, tels que les réseaux, les terres et les fusibles par a sur tenseurs, engendrent des surtensions, entraînant ainsi des phénomènes de claquage.
- ✓ L'induction résultant du champ électrique engendré par le courant de foudre induit des forces électromotrices dans les boucles qui interceptent son flux. Ces forces peuvent occasionner des différences de potentiel significatives, notamment entre deux circuits ou entre des masses métalliques reliées à la terre et d'autres non, ou encore entre deux circuits ou masses métalliques reliées à la terre mais à des potentiels différents (réseau de terre non équipotentiel)[9].

1.2.2.5 effet électromagnétique

Lorsqu'un éclair traverse les éléments jusqu'au sol, cela engendre la création d'un courant électromagnétique. Ce courant induit des tensions et des courants dans les conducteurs avoisinants. Les effets de la foudre peuvent être dévastateurs ou perturbateurs pour les installations électriques ou électroniques situées à plusieurs kilomètres du point d'impact[7].

1.2.3 Paramètres électrique de la foudre

La plupart des dégâts causés par la foudre sont causés par plusieurs décharges partielles qui se déplacent par le même canal ionisé de l'arc en retour. Les principales caractéristiques de la foudre sont généralement les suivantes [10] :

- Intensité du courant.
- Durée de l'ascension.
- La période de diminution.
- Stimulateur de l'énergie.
- L'énergie particulière.
- L'ensemble de la charge
- La longueur de l'éclair.
- La quantité d'arcs en retour.
- L'onde sonore de choc (tonnerre).

1.2.4 La Modélisation de la foudre

Des études plus approfondies des surtensions transitoires générées par un coup de foudre direct ont montré que les surtensions peuvent être modélisées dans 90% des cas par deux ondes typiques [7] :

- l'onde de courant 8/20
- l'onde de tension 1,2/50

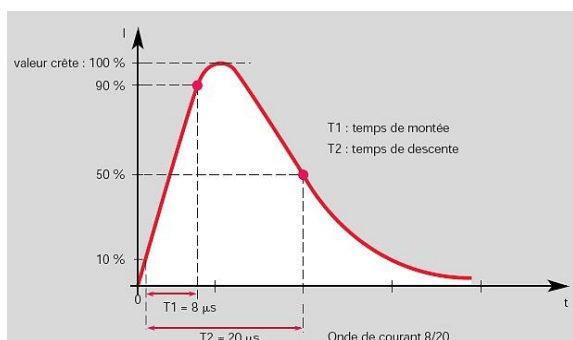


Figure 1. 1. Onde de courant 8/20 [7]

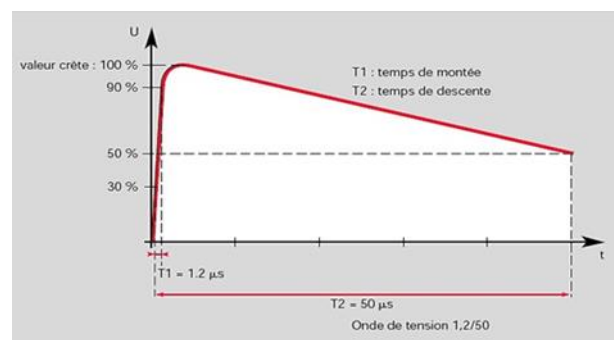


Figure 1. 2. Onde de tension 1,2/50 [7]

Un modèle est une structure mathématique qui, après avoir ajouté certaines interprétations, permet de décrire les phénomènes observés. Lorsque quelques principes fondamentaux régissant le phénomène ne sont pas complètement compris, un modèle est nécessaire. Par conséquent, un

modèle peut inclure des hypothèses qui doivent encore être vérifiées et des variables dont les valeurs sont choisies par a priori afin de refléter les résultats expérimentaux authentiques. Cependant, quel que soit le mode de construction, un modèle de vrai pouvoir devrait être capable d'expliquer raumoin certaines des observations expérimentales concernant le processus physique sous considération et de faire des prédictions afin que sa validité puisse être testée par d'autres investigations expérimentales[11].

a) Courant à la base du canal

Il est nécessaire de spécifier le courant à la base du canal (0, t) afin de déterminer le courant en fonction de la hauteur et du temps du canal de retour $i(z, t)$ On retrouve dans la littérature deux formes analytiques, pour la représentation du courant à la base du canal, la première étant la fonction bi-exponentielle[11]:

$$i(0, t) = I_0(\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)) \quad (1.1)$$

Ou:

- I_0 : Représente la valeur crête du courant.
- α : inverse du temps de montée de l'impulsion du courant de foudre.
- β : Est l'inverse du temps de descente.

Plus récemment F. HEIDLER [11] a proposé une nouvelle expression analytique :

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n\right)}{1 + \left(\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n\right)} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.2)$$

Où:

$$\eta = \exp\left(-\left(\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^n\right) \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}}\right) \quad (1.3)$$

Avec:

- I_0 : est l'amplitude du courant à la base du canal .
- τ_1 : est la constante de temps du front .
- τ_2 : est la constante de décroissement .
- η : est le facteur de correction de l'amplitude .
- n : est une constante entière entre 2 et 10.

b) Courant d'arc en retour

Plusieurs modèles ont été proposés pour représenter mathématiquement le courant d'arc dont les plus célèbres sont [11] :

- Le modèle électronique-thermodynamique.
- La transmission line modèle.
- Le modèle électronique magnétique.
- Le modèle d'ingénieurs.
- Modèles de diffusion contemporains.
- Les modèles de la génération actuelle.
- Actuels modèles de dissipation.

1.3 Les Surtensions

1.3.1 Définitions

Une surtension se réfère à toute tension variable dans le temps qui excède la tension maximale admissible en régime permanent. Elle peut également être définie comme une impulsion ou une onde de tension qui s'ajoute à la tension nominale du système électrique. Un exemple illustratif de surtension est présenté dans la figure I.3.

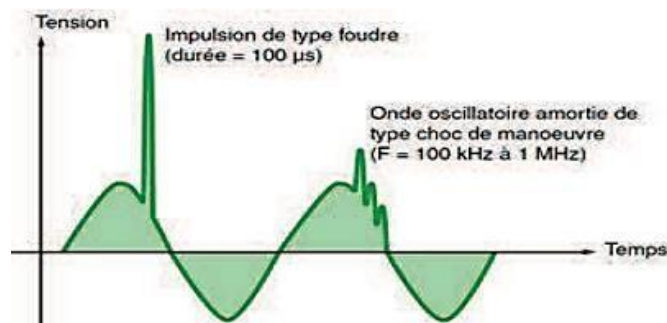


Figure 1.3. Exemple de surtension [13]

1.3.2 Classification des surtensions

La surtension peut être catégorisée en fonction de sa durée (ou de sa gamme de fréquence) ou de la nature du phénomène. On distingue ainsi les surtensions temporaires et les surtensions transitoires :

- **La surtension temporaire** : fait référence à toute situation semi-permanente qui

perdre sur plusieurs cycles de tension.

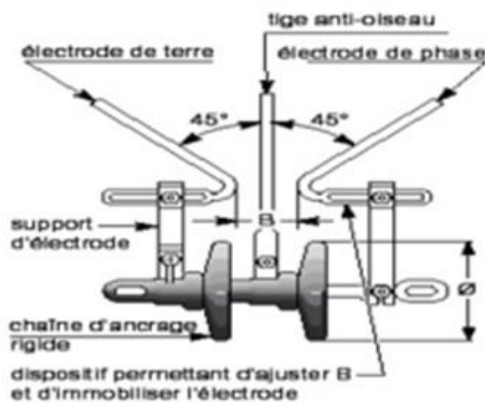
- **Surtensions transitoires** : Ce sont des phénomènes qui se produisent dans les systèmes électriques à haute tension. Elles représentent l'évolution de la surtension entre deux états de fonctionnement permanents consécutifs, sur un intervalle de temps relativement court par rapport à l'échelle temporelle considérée.

1.3.3 Les dispositifs de protection contre les surtensions

Pour assurer la sécurité des personnes, la protection du matériel ainsi assurer la continuité de service. Il existe plusieurs composants chargés de limiter et/ou de supprimer les surtensions définies précédemment. Parmi les dispositifs utilisés dans la protection des réseaux électriques contre les surtensions on cite :

1.4 Eclateurs

L'éclateur est le plus simple, le plus ancien, le plus robuste et le moins cher des moyens de protection. Il est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger, l'autre à la terre. L'intervalle d'air entre les deux électrodes constitue un point faible dans l'installation du réseau, évitant ainsi qu'un amorçage n'ait lieu en un point du réseau où il pourrait avoir des conséquences graves. La distance entre ces deux électrodes est réglable et détermine la tension d'amorçage [14].



a- Schéma d'un éclateur



b- Photo réelle d'un éclateur

Figure 1.4. Eclateurs

1.5 Les Parafoudres

Le parafoudre est un composant semi-conducteur doté d'une résistance non linéaire, généralement constitué d'oxyde de zinc (ZnO), avec des caractéristiques bien contrôlées. Il est

installé en tant que liaison entre les phases et la terre[15].

Les parafoudres jouent un rôle crucial dans la protection des équipements de haute et moyenne tension contre les dommages causés par des surtensions inacceptables. Ces surtensions peuvent résulter de décharges de foudre ou de manœuvres de couplage dans l'installation électrique. En réduisant l'amplitude de ces surtensions grâce à un écoulement de courant vers la terre, les parafoudres assurent une protection efficace. L'utilisation de parafoudres devient essentielle dès lors que l'on cherche à améliorer l'isolement des équipements ou à garantir une meilleure qualité de service. Bien que leur coût soit plus élevé que celui des éclateurs, les parafoudres offrent une protection plus fiable. Leur capacité élevée d'absorption d'énergie et leur robustesse mécanique en font des solutions idéales pour protéger les transformateurs, les câbles, les moteurs et autres équipements et installations de haute et moyenne tension [16]. Sur le marché actuel, une variété de parafoudres est disponible, chacun offrant des fonctionnalités spécifiques.

1.5.1 Les Types des parafoudres

1.5.1.1 Parafoudre à carbure de Silicium (Sic)

Ce dispositif de protection contre les surtensions est composé d'une ou plusieurs varistances, des résistances non linéaires en carbure de silicium (Sic), qui sont associées en série avec un ou plusieurs éclateurs (Figure1.5). Cette configuration est ensuite enfermée dans une enveloppe isolante hermétique remplie d'un gaz sec, tel que de l'air ou de l'azote[17].

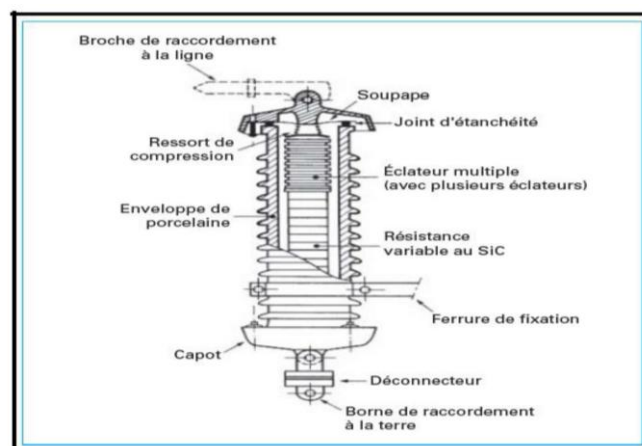


Figure 1.5 .Constitution d'un parafoudre au carbure de silicium a éclateur[17]

1.5.1.2 Parafoudre à oxyde de zinc (Zn O)

Les parafoudres à base de Zn O sont constitués principalement de varistances, qui sont des composants électroniques à caractéristiques non linéaires. Ces varistances sont conçues à partir d'oxyde de zinc, d'où le nom "Zn O".

Leur fonctionnement repose sur la propriété des varistances Zn O à avoir une résistance qui varie fortement en fonction de la tension appliquée. À tension nominale du réseau protégé, le parafoudre ZnO reste conducteur, mais lorsque la tension dépasse un certain seuil (la tension de service), la résistance de la varistance diminue considérablement, permettant au parafoudre de dévier l'excès de tension et protéger ainsi les équipements connectés.

La caractéristique non linéaire des varistances Zn O est telle que leur résistance passe de 1,5 méga watts (MW) à 15 watts (W) entre la tension de service et la tension au courant nominal de décharge. Cette variation permet au parafoudre de réagir rapidement et efficacement aux variations de tension dans le réseau[18].

Comparativement aux anciens parafoudres utilisant des résistances variables et des éclateurs, les parafoudres à base de ZnO offrent des performances de limitation accrues et une fiabilité améliorée. Ils ne nécessitent pas d'éclateurs, ce qui simplifie leur conception et réduit les risques de défaillance. De plus, leur caractéristique non linéaire les rend efficaces pour protéger les équipements électroniques sensibles contre la surtension.

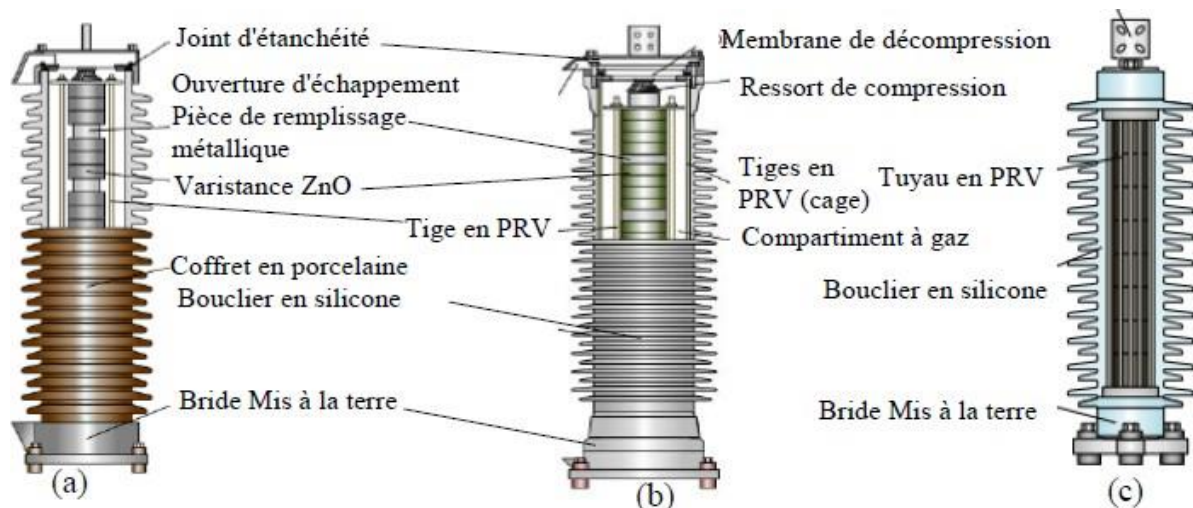


Figure 1.6 .Types de parafoudres ZnO utilisé dans les réseaux a haute tension[19]

1.5.2 Principe de fonctionnement de parafoudre ZnO

Sous la tension de service permanent, l'impédance d'un parafoudre ZnO est très élevée et la varistance est parcourue par un courant très faible (inférieur à 1 mA). Lorsqu'une surtension apparaît (surtension de manœuvre ou de foudre), la résistance diminue rapidement, la varistance

écrête la surtension de manière à constituer un chemin préférentiel pour écouler l'énergie correspondant vers la terre. Par suite, la caractéristique de l'appareil est fortement non-linéaire. La non-linéarité est telle que lorsque le courant traversant la varistance passe de 0.1 mA à 1 kA pour les surtensions de manœuvre et 20 kA pour les surtensions de foudre, la tension à ses bornes n'est multipliée que par deux environ, ce qui fait de cet élément un dispositif de protection presque idéal [4].

1.5.3 Choix des parafoudres à oxyde de zinc en HT

La méthode générale de choix d'un parafoudre à oxyde de zinc en HT consiste à déterminer ses paramètres caractéristiques à partir des données du réseau, à l'endroit où il sera installé.

Les paramètres caractérisant le parafoudre sont :

- U_c tension de régime permanent
- U_r tension assignée;
- I_{nd} courant nominal de décharge
- Classe de décharge et capacité énergétique
- Caractéristiques mécanique

Les données relatives au réseau sont :

- U_m , tension la plus élevée pour le matériel.
- TOV (Temporaire Over Voltage), surtensions temporaires (apparaissant lors d'un défaut à la terre ou un délestage sur le réseau de distribution publique)

Sélectionner le bon parafoudre requiert de trouver un équilibre délicat entre la protection des équipements et la capacité énergétique du dispositif. Il est préférable d'opter pour un niveau de protection minimal afin de garantir la préservation des équipements. Cela se traduit par un dimensionnement en tension minimal, bien que cela puisse rendre plus complexe la gestion des surtensions temporaires[20].

1.5.4 Caractéristiques des parafoudres à oxyde de zinc

Un parafoudre à ZnO est caractérisé par :

- Sa tension maximale de service permanent.

- Sa tension assignée qui peut être liée, par analogie avec les parafoudres au carbure de Silicium, à la tenue aux surtensions temporaires.
- Le niveau de protection, défini arbitrairement comme la tension résiduelle du parafoudre soumis à un choix de courant donné (5,10 ou 20 kA selon la classe), onde 8/20ms [10].
- Courant nominale de décharge.
- Tenue aux courants de choc. (Elle traduit le besoin de tenue à des ondes longues Entraînant une dissipation d'énergie importante et non la nécessité d'écouler de tels Courants en exploitation).

1.5.5 Application des parafoudres

Les parafoudres sont utilisés dans de nombreuses applications pour protéger les équipements électriques et électroniques sensibles contre les surtensions. Voici quelques exemples d'applications courantes des parafoudres :

- **Applications résidentielles** : Les parafoudres sont utilisés dans les installations électriques résidentielles pour protéger les équipements tels que les téléviseurs, les ordinateurs, les réfrigérateurs, les systèmes de climatisation, les appareils électroniques domestiques, etc.
- **Applications industrielles** : Dans les environnements industriels, les parafoudres sont utilisés pour protéger les équipements de production, les machines, les systèmes de contrôle, les automates programmables, les variateurs de vitesse, les panneaux de commande, etc.
- **Télécommunications** : Les parafoudres sont essentiels pour protéger les équipements de télécommunications, tels que les antennes, les équipements de commutation, les équipements de transmission de données, les réseaux de téléphonie, etc.
- **Informatique et centres de données** : Les parafoudres sont largement utilisés dans les systèmes informatiques, les serveurs, les équipements de stockage, les réseaux informatiques, les centres de données, etc. Ils protègent les données, les systèmes critiques et les infrastructures informatiques.
- **Énergies renouvelables** : Les parafoudres sont intégrés dans les installations solaires photovoltaïques et les éoliennes pour protéger les onduleurs, les panneaux solaires, les générateurs, etc., contre les surtensions induites par la foudre ou les variations du réseau.
- **Installations médicales** : Les parafoudres sont utilisés dans les équipements médicaux sensibles tels que les scanners, les appareils d'imagerie médicale, les systèmes de monitoring, les équipements de diagnostic, etc., pour assurer la sécurité des patients et la fiabilité des résultats.

- **Transports** : Les parafoudres sont présents dans les systèmes de signalisation ferroviaire, les systèmes de contrôle des aéroports, les systèmes de communication des véhicules, les infrastructures de transport en général, pour prévenir les dommages causés par les surtensions. Ces exemples ne sont qu'une petite partie des nombreuses applications des parafoudres.

En général, partout où Des équipements électriques et électroniques sensibles sont utilisés, la protection contre les surtensions est essentielle pour éviter les pannes, les dommages et les perturbations des systèmes.

1.5.6 Les Avantages des parafoudres

Leurs avantages incluent l'absence de courant de suite, ce qui prévient les risques de court-circuit et empêche le réseau de se mettre hors tension après l'amorçage. Par rapport aux éclateurs, le parafoudre offre plusieurs bénéfices :

- Une dispersion moindre de la tension d'amorçage.
- L'extinction spontanée de l'arc électrique ; le parafoudre limite l'amplitude et la durée des courants de suite sans nécessiter l'intervention des disjoncteurs du réseau.
- Une tension résiduelle aux bornes du parafoudre, appelée tension résiduelle, persiste après l'amorçage, ce qui empêche la transmission d'une onde de tension coupée.
- Une résistance (jusqu'à un certain point) aux agressions extérieures.

1.6 Conclusion

Afin de prévenir la foudre, il est essentiel d'utiliser un parafoudre ZnO pour protéger toutes les installations électriques contre ce phénomène perturbateur. Il présente les caractéristiques électriques les plus élevées grâce à la technologie des varistances à base d'oxyde de zinc.

Les informations générales sur les parafoudres à base d'oxyde métallique et les tendances mondiales à leur utilisation comme moyen de protection contre toute surtension pouvant affecté les réseaux de transport ont été fournis dans ce chapitre. L'objectif est de garantir le bon fonctionnement des systèmes et de garantir la continuité de service au client.

Chapitre II

Impact de l'anneau de garde sur le champ et la distribution potentielle

2.1 Introduction

L'effet de l'anneau Corona est un phénomène important à considérer dans la conception et l'utilisation des parafoudres, également connus sous le nom de dispositifs de protection contre les surtensions (DPS). Les parafoudres sont utilisés pour protéger les équipements électriques et électroniques des surtensions transitoires causées par des éclairs ou des perturbations électriques.

Aujourd'hui, les anneaux de garde sont recommandés sur les deux extrémités (coté HT et côté terre) pour les chaînes d'isolateurs montées sur des lignes de haute tension supérieure à 345 kV et seulement du côté de l'électrode sous tension dans la plage de tension comprise entre 230 et 345 kV. Cependant, pour des tensions inférieures à 230 kV, les anneaux de garde sont rarement utilisés et seulement en fonction des exigences strictes d'installation [21].

Malheureusement, il n'y a pas de normes spécifiques pour la conception et la mise en place des anneaux de garde. En effet, chaque fabricant propose ses propres recommandations pour l'utilisation des anneaux de garde [22]. Dans ce chapitre, nous abordons l'effet de l'anneau Corona sur les parafoudres, un aspect crucial dans la conception et l'optimisation des dispositifs de protection contre les surtensions. Les parafoudres, ou dispositifs de protection contre les surtensions (DPS), jouent un rôle essentiel dans la protection des équipements électriques et électroniques contre les surtensions transitoires causées par les éclairs ou d'autres perturbations électriques.

2.2 Effet de l'installation de l'anneau de garde

2.2.1 Anneau de garde

Un anneau de garde est, par définition, un appareil métallique, généralement de forme circulaire (figure 2.2), qui est installé afin de modifier électrostatiquement la répartition du potentiel le long du parafoudre [12]. Les parafoudres de tensions de réseau d'environ 145 kV et plus, ainsi que ceux qui ont une longueur supérieure à 1,5 à 2 mètres, nécessitent généralement des anneaux de nivellement, avec un ou plusieurs anneaux métalliques suspendus au sommet du parafoudre [27, 28-29]. Des anneaux supplémentaires sont employés lorsque les tensions système sont extrêmement élevées afin d'éviter l'effet corona externe de la bride métallique supérieure et de la borne de ligne. Les anneaux de garde sont fixés aux extrémités métalliques des parafoudres. Ils ont le même potentiel que ces dernières.



Figure. 2. 1. Exemples de géométries d'anneaux de garde [31]

2.2.2 Rôle de l'anneau de garde

L'anneau corona joue un rôle essentiel dans l'optimisation des performances des parafoudres en réduisant les pertes de puissance corona, en améliorant la distribution du champ électrique, en augmentant la capacité de dissipation de chaleur et en protégeant contre les décharges partielles. Ces avantages contribuent à une protection plus efficace contre les surtensions transitoires et à une durée de vie prolongée des parafoudres.

2.3 Effet de l'Anneau Corona sur les Parafoudres

Les anneaux de garde, également appelés anneaux de protection ou anneaux de répartition, jouent un rôle crucial dans diverses applications techniques, notamment en haute tension, en mécanique, et dans la protection contre les surtensions. Voici une vue d'ensemble de leurs fonctionnalités principales [30 ; 31-32].

2.3.1 Réduction de l'effet Corona

L'effet Corona se produit lorsque l'intensité du champ électrique autour d'un conducteur dépasse un certain seuil, ionisant ainsi l'air et créant une décharge lumineuse. Cela peut entraîner des pertes d'énergie, du bruit électrique et une dégradation du matériel. L'anneau Corona réduit cet effet en lissant les irrégularités dans le champ électrique, diminuant ainsi la probabilité de décharges Corona.

2.3.2 Uniformisation du Champ Électrique

Les parafoudres sont conçus pour supporter des tensions très élevées, et une répartition uniforme du champ électrique est cruciale pour leur bon fonctionnement. L'anneau Corona aide à redistribuer le champ électrique de manière homogène, ce qui réduit les points de concentration où des arcs électriques pourraient se former. Cela prolonge la durée de vie des parafoudres et améliore leur fiabilité.

2.3.3 Amélioration de la Performance des Parafoudres

En minimisant les effets indésirables du Corona, l'anneau Corona améliore la performance globale des parafoudres. Cela inclut une meilleure réponse aux surtensions, une réduction des interférences électromagnétiques (EMI) et une diminution des pertes d'énergie.

2.3.4 Protection de l'Isolation

Les parafoudres utilisent des matériaux isolants pour empêcher les courants de fuite et les décharges internes. L'anneau Corona protège ces matériaux en évitant les décharges locales qui pourraient endommager l'isolation, assurant ainsi une meilleure protection contre les surtensions.

2.4 Optimisation des paramètres de l'anneau de garde

Les anneaux de garde, comme nous l'avons vu plus haut, ont pour fonction principale de diminuer le champ électrique près des parties métalliques situées aux extrémités des extrémités. Il est crucial de séparer les potentiels et de rendre la répartition du potentiel homogène tout au long de ces derniers. La valeur ajoutée Ainsi, les anneaux de protection sont appropriés en fonction de la configuration du champ électrique et des composants métalliques situés à proximité. Deux options sont donc disponibles pour les manufacturiers et les chercheurs pour mesurer et positionner correctement les anneaux de garde : les tests expérimentaux et la simulation numérique.

La simulation numérique est généralement privilégiée par rapport aux tests expérimentaux, car elle nécessite peu d'infrastructure, ce qui réduit les coûts d'étude, et permet de tester de nombreuses configurations d'anneaux de garde en utilisant des méthodes d'optimisation spécifiques. En règle générale, les tests expérimentaux sont employés afin de confirmer les configurations finales des anneaux de garde obtenues à partir des résultats numériques.

L'optimisation des paramètres de l'anneau de garde est essentielle pour garantir son efficacité dans la réduction des effets Corona et la protection des équipements.

Différentes études ont été menées sur la disposition des anneaux corona et une optimisation concentrée sur la répartition du champ E à travers les parafoudres. Les recherches menées dans les publications [12, 33-34] mettaient en évidence l'utilisation d'anneaux corona pour les parafoudres en tant que facteur influençant la répartition du champ électrique dans un MOSA. Cette recherche a examiné l'impact de divers paramètres d'anneaux de granulométrie (diamètre, hauteur, position) sur le champ électrique et la répartition du potentiel dans le parafoudre.

L'optimisation des anneaux de garde a fait l'objet de nombreuses recherches [31-35]. Les parafoudres en composite ont été principalement étudiés, car ils sont plus vulnérables aux dégradations causées par les activités électriques liées à une distribution du potentiel inégale [31].

L'optimisation a été effectuée par modélisation numérique, soit par la méthode des éléments finis (MEF) [31,35], soit par la méthode des éléments finis de frontière (MEFF). Ces deux approches conviennent parfaitement au calcul du champ électrique et à la problématique d'optimisation.

2.5 Le champ électrique

Le champ électrique est une grandeur physique qui représente la force exercée par un champ électrique sur une charge électrique ponctuelle. Il est défini comme la force par unité de charge. Le champ électrique est un champ vectoriel, ce qui signifie qu'il a une grandeur et une direction. La grandeur du champ électrique est mesurée en volts par mètre (V/m). 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.

Le champ électrique le long d'un parafoudre (ou parafoudre à oxyde métallique, MOSA) est une distribution critique qui influence la performance et la fiabilité de l'appareil. La répartition optimale du champ électrique est essentielle pour éviter les concentrations de stress électrique qui peuvent conduire à des décharges partielles, des pertes d'énergie et la dégradation prématurée du parafoudre[24].

2.6 Potentiel électrique

Le potentiel électrique est une mesure clé de l'énergie potentielle par unité de charge en un point donné d'un champ électrique. Dans le contexte des parafoudres, la répartition et l'optimisation du potentiel électrique sont essentielles pour prévenir les surtensions et les dégradations, assurant ainsi une protection efficace des systèmes électriques. Les techniques de simulation et les méthodes analytiques sont utilisées pour calculer et optimiser cette répartition, contribuant à la conception de dispositifs plus fiables et efficaces[25].

2.7 Méthodes de détermination du champ et du potentiel électrique

La détermination du champ et du potentiel électrique est essentielle pour l'analyse et la conception de dispositifs électromagnétiques tels que les parafoudres (MOSAs). Plusieurs méthodes analytiques et numériques sont utilisées pour calculer ces grandeurs. Voici un aperçu des principales méthodes:

2.7.1 Méthodes numériques

L'utilisation des méthodes numériques de discrétisation consiste à ramener la résolution de

l'équation aux dérivées partielles dans un domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équations algébriques dont la solution conduit à la distribution des champs à l'intérieur du domaine d'étude. Nous allons voir dans ce qui suit les méthodes numériques les plus utilisées :

- Méthode des différences finies,
- Méthode des éléments finis.

2.7.2 La méthode des différences finies

La méthode des différences finies est basée sur la transformation de l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences, ou chaque dérivée est approchée par une différence de valeurs de l'inconnue à déterminer en un certain nombre de points du domaine de résolution.

2.7.3 La méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis a pris un essor considérable avec le développement des moyens informatiques. Dès les années 1960, elle est devenue, par sa souplesse d'emploi et sa très grande généralité, une méthode numérique indispensable pour la résolution des problèmes aux dérivées partielles [23].

La résolution exacte d'un système différentiel modélisant une problématique physique n'est pas toujours accessible. Lorsqu'il s'agit de modèles à géométries complexes, le recours à des méthodes numériques de calcul et plus précisément, la méthode des éléments finis (MEF) est donc recommandée. La méthode des éléments finis est utilisée pour la résolution des équations aux dérivées partielles dans les domaines des sciences de l'ingénieur. Elle consiste à utiliser une approximation simple de l'inconnue pour transformer les équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. Toutefois, elle ne s'applique pas directement aux dérivées partielles mais à une formulation intégrale qui est équivalente aux problèmes à résoudre. L'évolution technologique connue en informatique a mis à notre disposition de nombreux logiciels d'éléments finis dédiés à plusieurs secteurs de recherche (COMSOL Multiphasiques, Flux 2D, Maxwell, etc.)[26].

2.7.3.1 Etapes de la méthode des éléments finis

Les étapes de résolution de la méthode des éléments finis utilisées dans le COMSOL Multiphysics peuvent être résumées comme suit :

- Introduction de la géométrie du modèle.
- Identification des domaines.
- Introduction des conditions aux limites.
- Résolution.
- Visualisations des résultats.

2.7.3.2 Avantages de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis présente beaucoup d'avantages, dont :

- Elle peut facilement gérer une géométrie très complexe (le cœur et la puissance de la FEM).
- Elle peut gérer une grande variété de problèmes d'ingénierie (Mécanique du solide, dynamique, problèmes de transfert chaleur, mécanique des fluides, problèmes éclectiques, problèmes magnétiques et électromagnétiques).

2.7.3.3 Inconvénients de la méthode des éléments finis

Comme toutes méthodes, cette dernière a ses désavantages :

- La (MEF) est grande consommatrice de taille mémoire et de temps de calcul.
- Une solution générale sous forme fermée, qui permettrait d'examiner la réponse du système aux changements de divers paramètres, n'est pas produite.
- La (MEF) n'obtient que des solutions "approximatives".

2.8 Conclusion

L'ajout d'un anneau de garde composite améliore la répartition du champ électrique, réduisant les risques de décharges corona et les dommages aux parafoudres. Il est essentiel de déterminer son emplacement optimal, bien qu'il n'existe pas de normes spécifiques pour sa conception. Les anneaux de garde jouent un rôle crucial sur les structures à haute tension, mais leur impact sur l'accumulation de glace et la tension critique de contournement nécessite des recherches approfondies. Des études sont nécessaires pour définir les paramètres optimaux en fonction des spécifications des parafoudres. Leur utilisation est cruciale pour les lignes de 60 kV et plus, mais des normes claires sont nécessaires.

Chapitre 3

Résultats et Discussions

3.1 Introduction

Cette étude vise à comprendre comment les variations de conception des parafoudres affectent leur performance et leur capacité à protéger les appareils contre les surtensions dues à la foudre. Pour ce faire, elle s'appuie sur des calculs complexes du champ et du potentiel électrique, prenant en compte la géométrie, les équations aux dérivées partielles, les conditions aux limites, les formes irrégulières des diélectriques et les couches conductrices. Des méthodes numériques avancées sont utilisées pour obtenir des résultats précis. Les mesures et analyses permettront de déterminer les paramètres optimaux du diamètre et de la hauteur de la couronne des parafoudres pour une protection efficace.

Ce chapitre se concentre sur la simulation de l'anneau corona afin d'analyser son impact sur le champ E et la répartition de la tension autour du parafoudre. Le but de cette étude consiste à évaluer le champ E 2D et la répartition de la tension autour des cordes et des surfaces des anneaux corona, dans le but de trouver des conceptions d'anneau corona réalisables principalement en utilisant des simulations de champ. Les parafoudres non céramiques de 220 kV ont été simulés en utilisant le programme COMSOL Multiphysics pour simuler la configuration de l'anneau corona. Lors de la construction de l'anneau corona, on étudie la modification du rayon de l'anneau (R), du rayon du tube de l'anneau corona (r) et de l'emplacement vertical de l'anneau corona le long de parafoudre (H).

3.2 Géométrie de parafoudre utilisé

La figure 3.1 montre la structure de simulation, composée d'un parafoudre. Il comprend 20 grandes ailette de protection de diamètre de 5 cm, ainsi qu'un nombre 19 de petites ailette de protection de diamètre de 3.5 cm, la longueur de varistance est environ 2.6 cm et sa largeur est environ 8 cm.

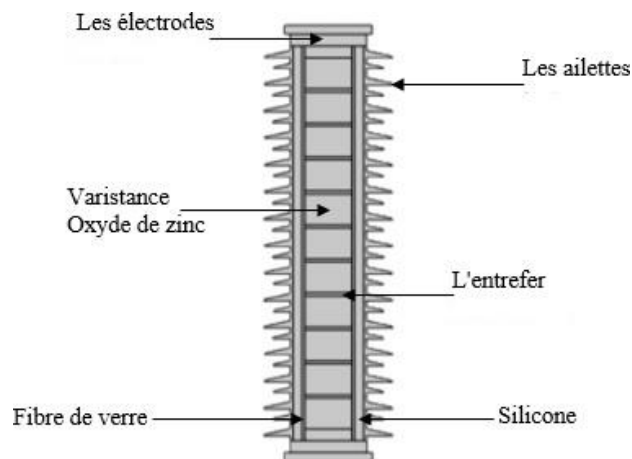


Figure 3.1. Modèle géométrique de parafoudre.

3.3 Propriétés matérielles

Chaque région du modèle (figure 3.2) a été spécifiée avec les propriétés du matériau appropriées décrites dans la figure. Les matériaux diélectriques ont été assignés, à savoir la silicone pour la gaine de parafoudre, avec une faible conductivité $\sigma = 1,0 \times 10^{-14}$ S/m. La région de l'air entourant le parafoudre a été spécifiée avec une très faible conductivité, $\sigma = 1,0 \times 10^{-15}$ S/m. Les propriétés des matériaux utilisés pour la simulation de parafoudre dans cette étude sont résumées dans (tableau.3.1).

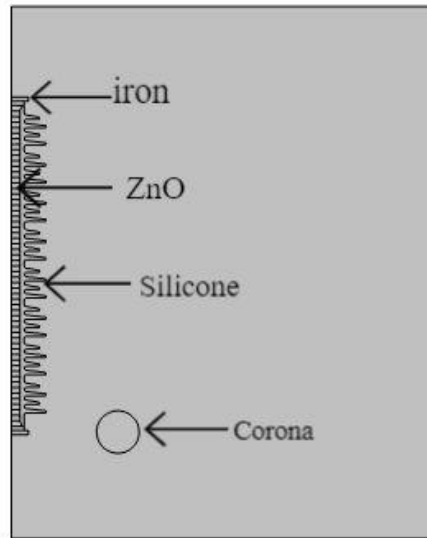


Figure 3.2. les matériaux de parafoudre.

Tableau. 3.1. Propriétés du matériau utilisé pour la modélisation de l'isolateur.

Domaine	Permittivité relative ϵ_r	Conductivité σ (S).
ZNO	100	10^{-14}
Silicone	4.3	10^{-14}
Air	1	10^{-15}
iron	100	1×10^7

3.4 Conditions aux limites

Pour toutes les simulations, la tension appliquée aux bornes de parafoudre correspond à la tension de service entre phase et terre. L'une des électrodes est soumise à la valeur efficace de la tension simple du réseau tandis que l'autre électrode et les bords extérieurs de la région d'air entourant l'isolateur sont affectés au potentiel zéro (0). L'espace d'air est suffisamment grand pour minimiser l'effet sur la distribution du potentiel à proximité des électrodes et le long du profil de parafoudre. La tension appliquée pour le modèle de parafoudre est égale 220 kV. Le modèle 2D de parafoudre étudié a été conçu par COMSOL MULTIPHYSICS. La méthode des éléments finis

2D a été utilisée via le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS ®6 pour calculer le champ E et la distribution potentielle. Le champ électrique le long de l'axe central le parafoudre particulièrement proche du les raccords d'extrémité sous tension dans l'unité supérieure du le parafoudre doivent être minimisés, à cet effet trois paramètres structurels d'un seul anneau de garde sont pris en compte (Figure 3.3) :

- ✓ La position de l'anneau de garde de l'électrode HV (H).
- ✓ Le rayon de l'anneau de garde (R).
- ✓ L'épaisseur du tube de l'anneau de calibrage (r).

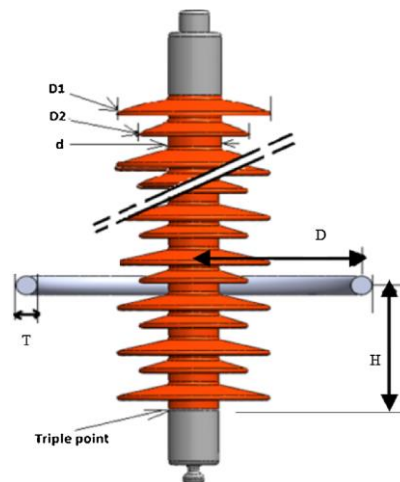


Figure. 3. 3. Paramètres structurels de l'anneau de garde

Les anneaux de calibrage ont des dimensions différentes d'un fabricant à l'autre. Ainsi, nous optons pour trois valeurs différentes pour chaque paramètre (H, D, T). Le tableau 3.2 présente les paramètres des anneaux de classement à étudier.

Table 3.2. Paramètres de l'anneau Corona et leurs niveaux.

Paramètres	Code	Les niveaux		
Projection depuis l'extrémité (cm)	H	0	80	150
Rayon de l'anneau (cm)	D	50	70	90
Épaisseur du tube annulaire (cm)	T	5	8	10

Les équations de bases utilisées pour calculer le potentiel et champ électrique sont soient les équations de Maxwell[38]

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

Le potentiel électrique crée par le champ électrique s'écrit :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V \quad (3.2)$$

En appliquant la divergence à la loi de Maxwell-Ampère :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \times \vec{H} = \nabla \cdot [\vec{J} + \partial \vec{D} / \partial t] \quad (3.3)$$

Où J et $\frac{\partial D}{\partial t}$ représentent respectivement la densité de courant de conduction ($J = \sigma E$) et la densité de courant de déplacement ($D = \epsilon_r \epsilon_0 E$). Avec la loi de Gauss, $\nabla \cdot D = \rho$ et l'équation de continuité, le logiciel résout l'équation (3.3) en utilisant le domaine des pas de temps pour obtenir le potentiel électrique et les distributions de champs.

$$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (3.4)$$

Où ρ est la densité de charge, ϵ est la permittivité du matériau diélectrique ($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$), ϵ_0 la permittivité du vide (8.854×10^{-12} F/m) et ϵ_r est la permittivité relative du matériau diélectrique. L'équation de Poisson peut être obtenue en substituant l'équation. (3.2) dans l'équation. (3.4).

$$\nabla = \text{div}(\overrightarrow{\text{grad}} v) = \overrightarrow{\nabla}^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (3.5)$$

L'équation de Laplace peut être obtenue en faisant la charge d'espace $\rho = 0$,

$$\overrightarrow{\nabla}^2 V = 0 \quad (3.6)$$

Dans le domaine électrostatique, la conductivité électrique $\sigma = 0$ pour les zones isolantes et $\sigma = \infty$ pour des zones conductrices, donc la distribution du potentiel électrique dans le domaine électrostatique est obtenue de la résolution de l'équation de Laplace, où la charge électrique dans l'espace est nulle.

$$\text{div}(\sigma (-\overrightarrow{\text{grad}} v)) = 0 \quad (3.7)$$

$$-\text{div} \epsilon \overrightarrow{\text{grad}} \nabla - \text{div} \sigma \overrightarrow{\text{grad}} v = 0 \quad (3.8)$$

3.5 Maillage du modèle

Après avoir terminé l'étape initiale avec la structure du modèle, ainsi que la spécification des propriétés matérielles et des conditions aux limites, le problème de domaine entier est discrétisé en éléments finis de type tétraèdre pendant le processus de maillage. Pour améliorer la précision des résultats de simulation calculés, un raffinement du maillage (figure. 3.4.) est effectuée dans la région d'intérêt pour augmenter le nombre d'éléments de maillage le long de la surface de parafoudre et ainsi améliorer la précision de la solution. Le choix du nombre d'éléments est important et doit être équilibré, car moins d'éléments de maillage peut réduire la précision des résultats de simulation, tandis qu'un grand nombre d'éléments augmente la taille du problème et entraîne un temps de traitement plus long. Ainsi, il est important de trouver un optimum d'éléments qui facilitera un temps de calcul plus rapide sans compromettre la précision du résultat.

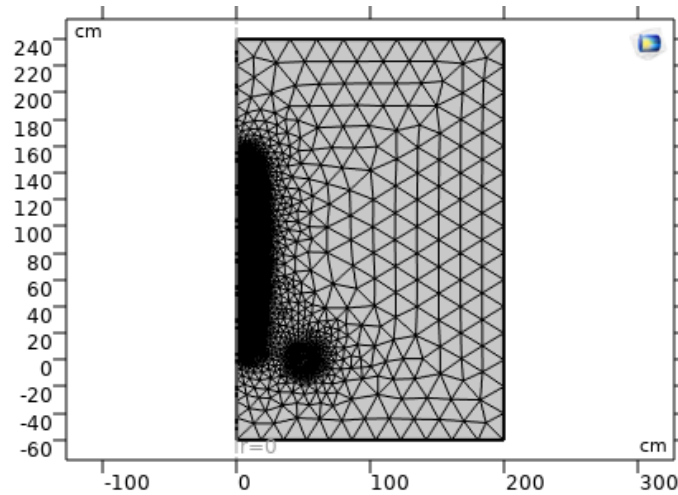


Figure.3.4. Maillage de parafoudre ZnO.

3.6 Résultats et discussion

Nous avons choisi de faire appel à la conception de Taguchi dans cette étude, qui offre la possibilité d'utiliser la modélisation des surfaces de réponse, qui est généralement perçue dans le domaine de la conception expérimentale comme une méthode statistique pour modéliser et optimiser des problèmes où différentes variables ont un impact sur une réponse en particulier. Dans le cadre de RSM, la première étape consiste à établir une estimation adéquate de la relation fonctionnelle réelle entre la variable de réponse y et un groupe de variables uniques. Ainsi, la relation mathématique entre la réponse Y et les différents facteurs est la suivante [39]:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i X_i + \sum_{i=1}^3 a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^3 a_{ij} X_i X_j \quad (3.9)$$

Où, Y correspond à la réponse désirée. a_0 reste constant. Les coefficients des termes linéaire, quadratique et produit croisé sont respectivement a_i , a_{ii} et a_{ij} . X_i désigne les éléments codés associés aux paramètres en question. Par la suite, on utilise l'analyse de variance afin de synthétiser le test de signification des coefficients du modèle. On évalue la qualité de l'adaptation du modèle quadratique en utilisant les coefficients. Il est nécessaire de formuler une fonction objective afin de résoudre les problèmes de conception en utilisant les techniques d'optimisation. On obtient la conception optimale en diminuant le champ électrique grâce à cette fonction. Les amplitudes du champ électrique et les paramètres de l'anneau de garde sont liés mathématiquement par la fonction objective. Son représentation est la suivante :

$$E = 1,072 + 0,00835 H + 0,0115 D + 0,0472 T + 0,000019 H*H - 0,000010 D*D - 0,00061 T*T - 0,000105 H*D + 0,000181 H*T - 0,000440 D*T$$

Les paramètres à étudier et leurs niveaux sont indiqués dans le tableau 3.3

Tableau 3.3. Résultats informatiques.

H (cm)	D (cm)	T (cm)	champ électrique (V/m)
0	50	5	1.7790E6
0	50	8	1.8089E6
0	50	10	1.8059E6
0	70	5	1.8876E6
0	70	8	1.9900E6
0	70	10	1.9412E6
0	90	5	2.0070E6
0	90	8	1.9834E6
0	90	10	1.9989E6
80	50	5	2.1130E6
80	50	8	2.1794E6
80	50	10	2.2475E6
80	70	5	2.1626E6
80	70	8	2.2528E6
80	70	10	2.2911E6
80	90	5	2.2127E6
80	90	8	2.2307E6
80	90	10	2.3456E6
150	50	5	2.7795E6
150	50	8	2.9936E6
150	50	10	3.0529E6
150	70	5	2.6081E6
150	70	8	2.6665E6
150	70	10	2.7534E6
150	90	5	2.4632E6
150	90	8	2.5098E6
150	90	10	2.5250E6

Table 3.4 : Analyse ANOVA de la contribution des paramètres en pourcentage à la variation totale de le champ E maximum pour les paramètres de l'anneau corona.

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Régression	9	3,26436	0,362707	80,81	0,000
H	1	0,15666	0,156662	34,90	0,000
D	1	0,00579	0,005792	1,29	0,272
T	1	0,00183	0,001830	0,41	0,532
H*H	1	0,07102	0,071019	15,82	0,001
D*D	1	0,00009	0,000092	0,02	0,888
T*T	1	0,00008	0,000080	0,02	0,895
H*D	1	0,29917	0,299173	66,66	0,000
H*T	1	0,01405	0,014052	3,13	0,095
D*T	1	0,00589	0,005888	1,31	0,268
Error	17	0,07630	0,004488		
Total	26	3,34067			

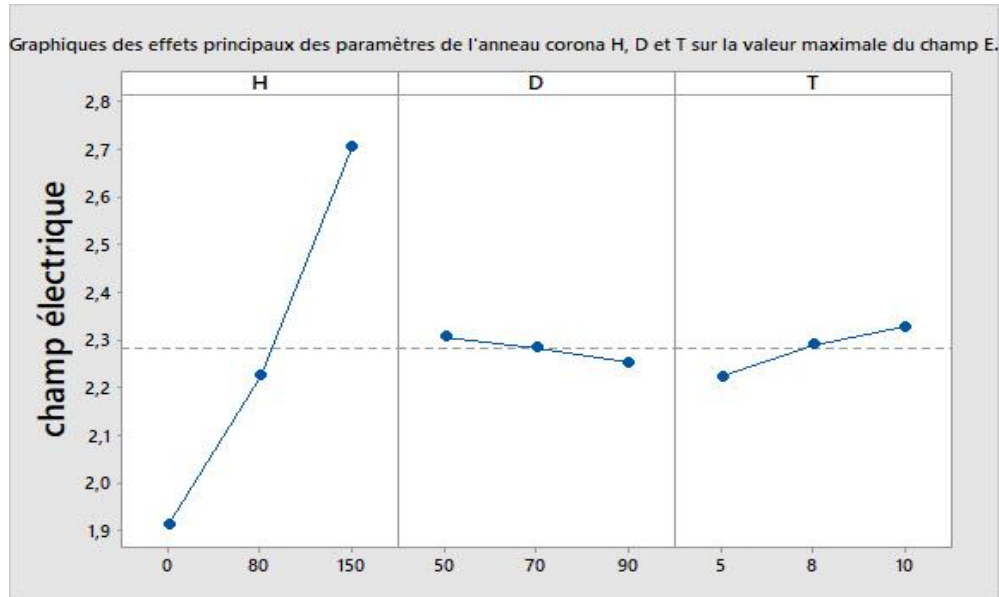


Figure.3.5 Graphiques des effets principaux des paramètres de l'anneau corona H, D et T sur la valeur maximale du champ E.

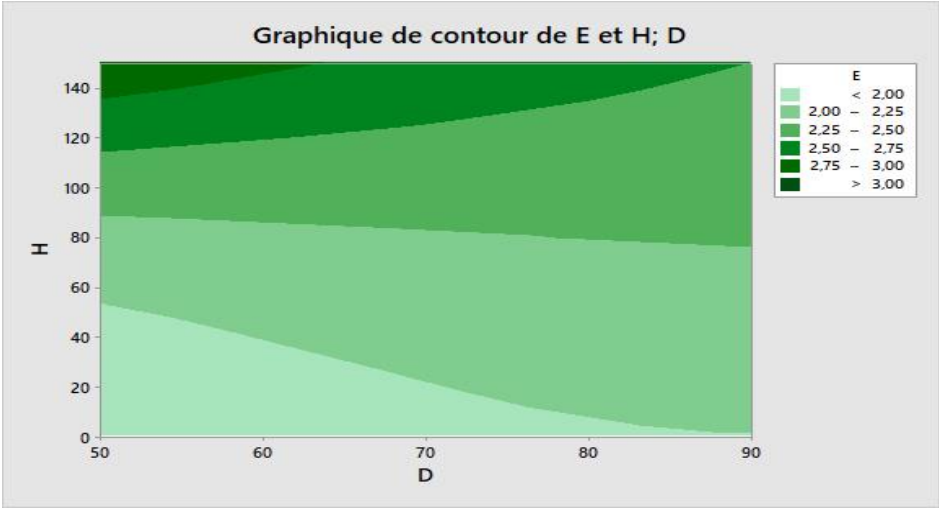
Les principaux diagrammes d'effet pour les paramètres de l'anneau corona et la valeur maximale du champ E sont présentés. Nous notons que l'augmentation de l'épaisseur du tube annulaire augmente l'intensité du champ E. De plus, l'augmentation du rayon de l'anneau a un effet décroissant sur le champ E. Quant à la projection depuis la pointe, elle a un effet croissant sur le champ maximum E.

3.6.1. Le mieux des paramètres de l'anneau de garde sur le champ électrique

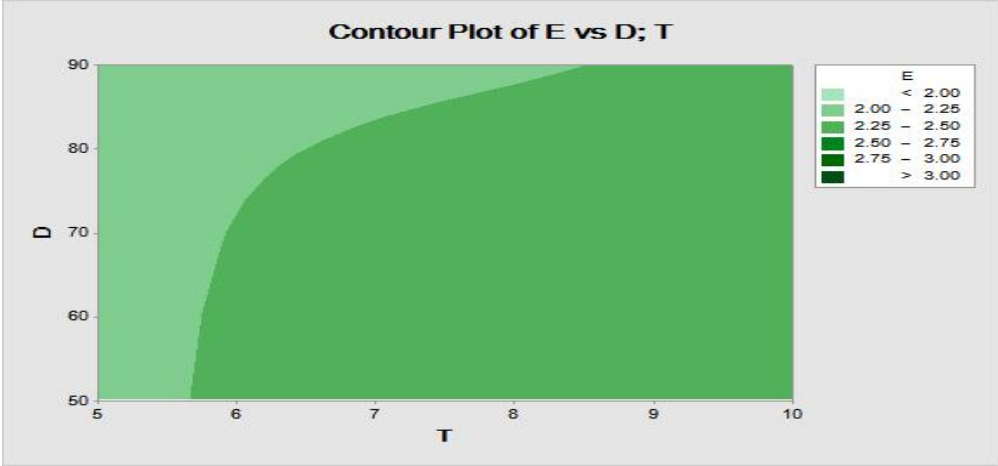
On se sert de l'optimiseur de surface de réponse afin de trouver la combinaison optimale de paramètres de protection qui réduisent ensemble la valeur maximale du champ E en dessous du seuil recommandé (4,2 kV / cm). La figure 3.5 illustre les contours des paramètres de l'anneau de garde en fonction de la variation maximale du champ E.

On utilise les courbes de niveau afin d'analyser la possible relation entre trois variables. Les contours représentent la relation tridimensionnelle en deux dimensions, avec des prédicteurs tracés sur les échelles x et y, et les valeurs de réponse représentées par les contours. Les points ayant la même réponse sont reliés pour créer des courbes de niveau de réponses constantes.

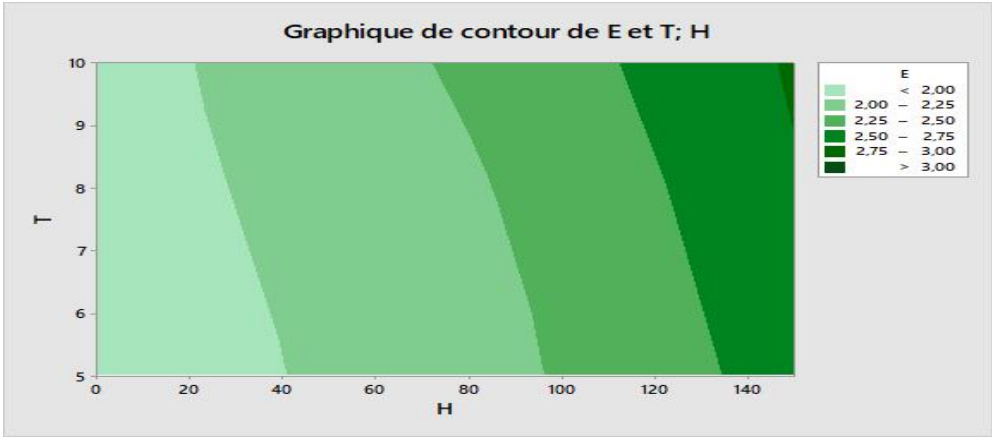
Les courbes a, b et c semblent être des courbes de contour représentant la variation du champ électrique E par rapport aux paramètres de l'anneau corona, comme illustré dans la figure 3.6. Voici une explication de ces courbes :



-a-



-b-



-c-

Figure.3.6. Courbes de contour de la variation du champ E par rapport aux paramètres de l'anneau corona

➤ **Courbe a**

La courbe a montré comment le champ électrique E évolue en fonction du diamètre de l'anneau corona. Une augmentation du diamètre peut conduire à une plus grande dispersion du champ électrique, modifiant ainsi l'intensité et la répartition du champ observé. La différence de hauteur affecte la distance entre la boucle et les points de mesure, ce qui peut affecter la concentration et la distribution du champ électrique.

➤ **.Courbe b**

- Pour des valeurs de D croissantes, E peut montrer une tendance à augmenter jusqu'à un point optimal avant de commencer à diminuer en raison de l'effet de dispersion.
- Le diamètre T joue un rôle crucial dans la distribution du champ. Un T plus grand pourrait réduire la densité de charge par unité de surface, diminuant ainsi E .

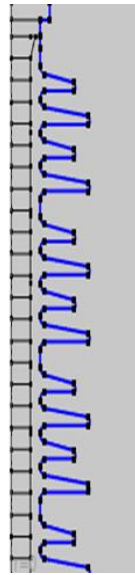
➤ **Courbe c**

La courbe c pourrait être prise à une hauteur différente de celle de la courbe a, ce qui expliquerait les différences observées dans le comportement du champ électrique. Le rayon de courbure pour la courbe c pourrait illustrer des aspects uniques de la distribution du champ. Potentiellement différent de la courbe a en raison des variations des paramètres de mesure.

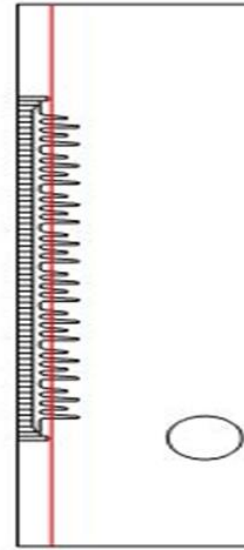
3.6.2. Études de la distribution de tension et champ électrique sur le parafoudre avec et sans corona

On a calculé les répartitions du potentiel et du champ électrique le long d'un axe de référence spécifique, comme illustré dans la figure (3.7).

L'axe vertical en rouge est parallèle à l'axe du parafoudre en silicone pour le cas axial, tandis que l'axe en bleu est utilisé pour la ligne de fuite.

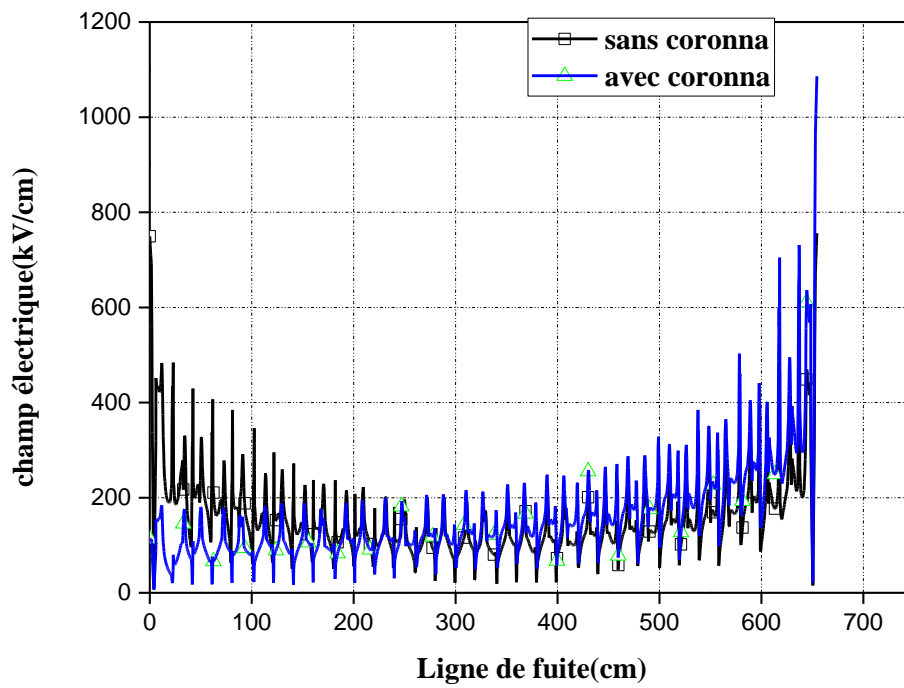


a. Cas ligne de fuit



b. Cas ligne axial

3.6.2.1 Champ électrique



a. Ligne de fuite

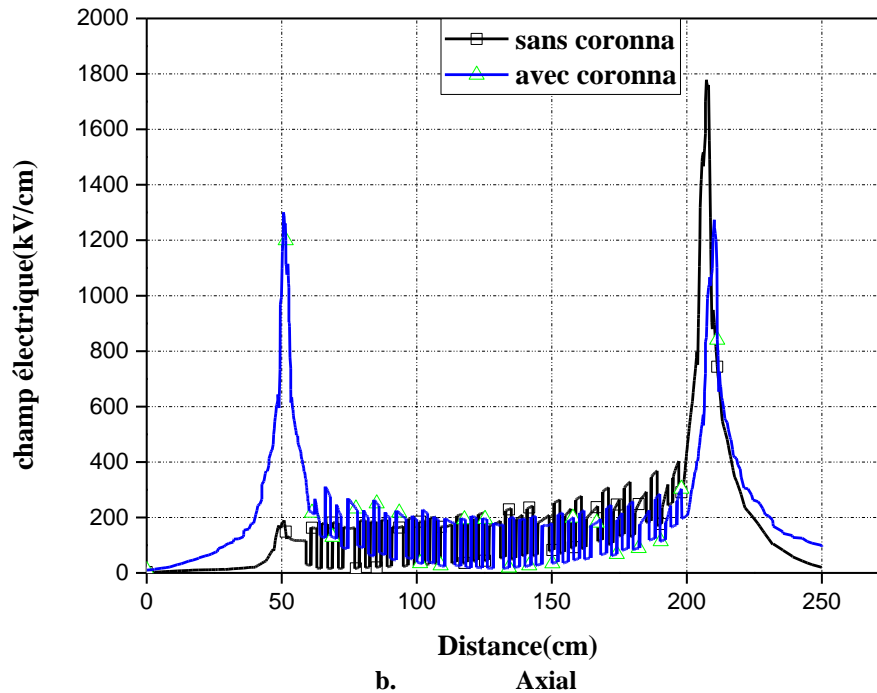


Figure.3.8. Champ électrique sans et avec corona

La répartition du champ électrique le long de la surface du parafoudre est illustrée dans la figure (3.8.a et b) pour les deux cas, où un anneau corona à l'extrémité est sous tension.

La courbe sans corona montre une augmentation plus régulière et linéaire du champ électrique par rapport à la ligne de fuite. Ceci est attendu en l'absence d'effet de corona où le champ électrique suit une distribution uniforme.

La courbe avec corona révèle une croissance plus complexe du champ électrique. On observe des variations et des points d'inflexion indiquant une augmentation non linéaire du champ électrique, Nous concluons que L'effet de corona affecte le champ électrique en créant des points de décharge partielle qui modifient la répartition du champ le long de la ligne de fuite. Cela se traduit par une courbe moins lisse et plus variable comparée à celle sans corona

Nous remarquons la valeur d'un champ électrique maximal sur le parafoudre sans l'anneau corona, comme observé sur la figure 3.8.a, est de 12,02 kV/cm et 8 kV/cm pour les cas axial et ligne de fuite respectivement. Cette valeur est très élevée par rapport à la valeur à laquelle l'anneau corona existe à proximité du conducteur comme le montre la figure 3.8.b où cette valeur est de 2,63 kV/cm et 1.70 kV/cm pour les due cas respectivement. C'est environ 10,55% de sa valeur sans utiliser l'anneau corona.

3.6.2.2 Tension électrique

Les résultats de simulation pour la tension électrique et les lignes équipotentielles d'un parafoudre avec et sans anneau sont illustrés dans les figures (3.9 et 3.10). En comparaison avec

les cas sans anneau, il est observé une amélioration significative de la répartition du potentiel le long du parafoudre par rapport aux cas sans anneau. Cette amélioration est clairement visible dans la figure 3.9.

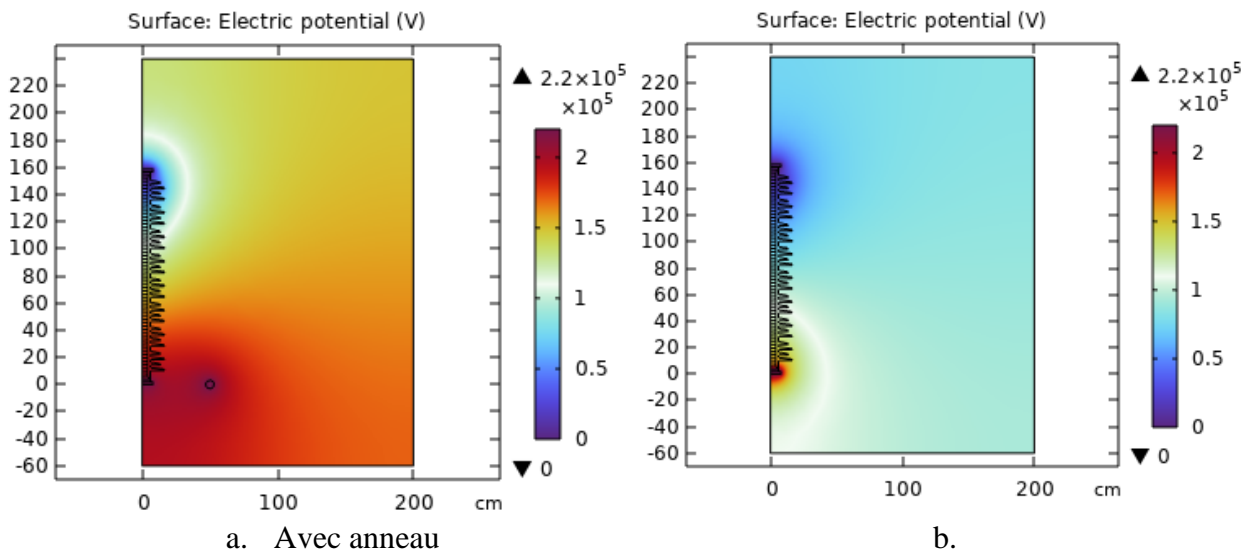


Figure.3.9. Distribution de la tension électrique avec anneau

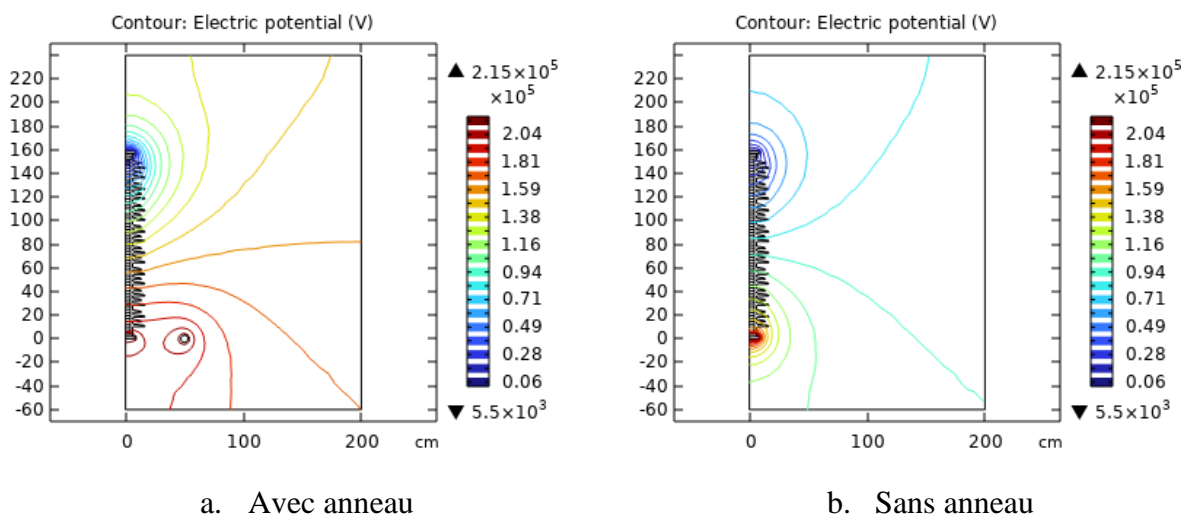
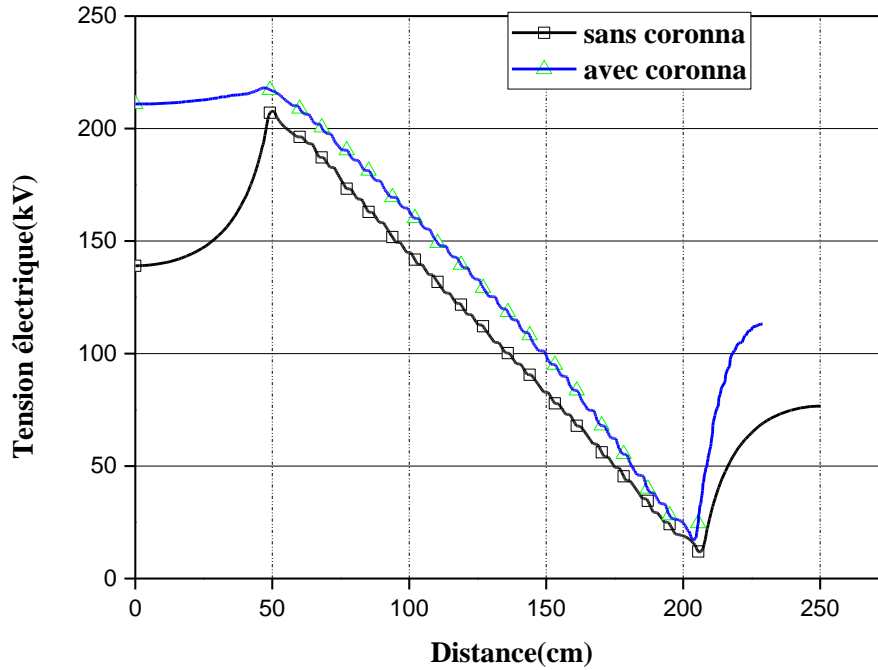
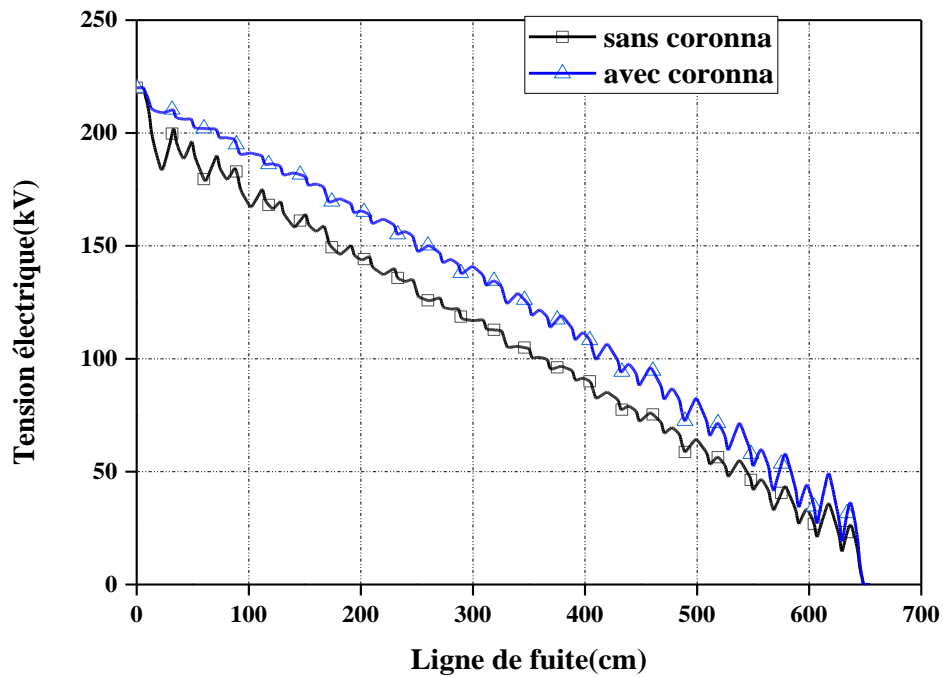


Figure.3.10. Distribution des lignes équipotielles avec anneau



a. Cas axial



b. Cas ligne de fuite

Figure. 3.11...Tension électrique sans et avec corona

La répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite et de la ligne axiale du parafoudre est illustrée dans la Figure (3.11 (a.b)). Il est observé, comme prévu, que les potentiels maximaux sont proches de l'électrode haute tension et commencent à diminuer jusqu'à être annulés lorsque l'on se rapproche de l'électrode de masse.

La courbe sans corona montre une augmentation linéaire de la tension électrique en fonction de la distance. Cela signifie que la tension augmente de manière proportionnelle à la distance.

La courbe avec corona diffère significativement. On observe que la tension électrique augmente plus lentement par rapport à la distance initialement, puis accélère. Cela indique que l'effet de corona impacte la distribution de la tension électrique le long de la distance mesurée, et nous concluons que l'effet couronne inclut l'ionisation de l'air autour de la conductrice haute tension, ce qui modifie la distribution de tension. Cela pourrait expliquer pourquoi la courbe avec couronne commence plus bas que la courbe sans couronne mais finit par atteindre une tension plus élevée à mesure que la distance augmente.

3.7 Conclusion

Les études de la distribution de la tension et du champ électrique dans les parafoudres avec et sans anneaux de garde sont essentielles pour la conception et l'optimisation de ces dispositifs de protection contre les surtensions.

En analysant divers paramètres comme la hauteur, le diamètre et l'épaisseur de ces anneaux, on a pu observer et étudier leurs effets à travers des graphiques et des courbes de contour. Il a été démontré par ces analyses que l'amélioration de la géométrie et des dimensions des anneaux de garde peut avoir un impact significatif sur les performances des parafoudres. Plus précisément, une mise en place appropriée des anneaux de protection permet de diminuer les décharges corona et d'harmoniser le champ électrique, ce qui favorise une meilleure protection des équipements électriques contre les surtensions et une amélioration de la longévité des parafoudres.

CONCLUSION GENERALE

La foudre est un phénomène perturbateur important du fonctionnement de toutes les installations électriques, à plusieurs titres (l'origine de perturbation momentanées dans la continuité de service, la dégradation de la qualité des alimentations, destructions de matériel, un danger pour les personnes). Les parafoudres, notamment les parafoudres à base de ZnO (oxyde de zinc), ont été couramment utilisés comme dispositifs de protection pour lutter contre les effets néfastes de la foudre. Ces parafoudres ont été très appréciés et font l'objet de nombreuses recherches en raison de leurs caractéristiques avantageuses.

Notre mémoire avait pour but de Contribution Contributions à l'étude et à l'optimisation d'un parafoudre synthétique en présence d'un anneau de corona. Ce travail nous avons analysé l'impact de l'ajout de bagues de protection composite sur la répartition du champ électrique dans les systèmes de protection contre la foudre. Nous avons conclu que l'ajout de ces bagues améliore considérablement la répartition du champ électrique, ce qui réduit les risques de décharges de couronne et les dommages potentiels aux équipements de protection. Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- ✓ La simulation intègre la géométrie du parafoudre et la disposition des anneaux de garde. Ces éléments sont cruciaux pour la répartition des champs électriques et des potentiels.
- ✓ La méthode des éléments finis (MEF) dans COMSOL modélise les champs électriques et potentiels dans le parafoudre en définissant la géométrie, les domaines, les conditions aux limites, en résolvant les équations et en visualisant les résultats.
- ✓ La simulation montre que la répartition optimale du champ électrique est essentielle pour éviter les concentrations de stress électrique, qui peuvent causer des décharges partielles et une dégradation prématurée du parafoudre. L'optimisation de la présence et de la position des anneaux de garde réduit ces effets indésirables.
- ✓ L'optimisation du potentiel électrique et des paramètres des anneaux de garde assure une protection maximale des systèmes électriques contre les surtensions et les dégradations dues à la foudre.
- ✓ Les résultats de ces études montrent que les anneaux de garde jouent un rôle crucial dans l'amélioration des performances électriques et de la fiabilité des parafoudres.

Bibliographies

- [1] Abderrahim Fakker, "contribution à l'étude du comportement thermique des varistances à base d'oxyde de zinc simulation et mesures, application aux parafoudres moyenne et haute tension", Thèse Doctorat, Toulouse 1994.
- [2] BEDJOUTI Ramzi, REGUIG Messaoud, "Contribution à l'étude de la coordination des isolements des postes de transformation haute tension basée sur l'emploi de parafoudres ZnO", thèse Master Académique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2020.
- [3] FEDERIC MACIELA, "Parafoudres à moyenne tension HTA et à haute tension HTB", Technique de l'Ingénieur D4755v2. (16/09/2020).
- [4] F. MACIELA, "Parafoudres à moyenne tension HT et à haute tension HTB," Technique de l'ingénieur, vol. 2, pp. D4755-1-D4755-11, 2009.
- [5] S. BEDOUI "Contribution à l'étude de la coordination des isolements des postes de transformation haute tension basée sur l'emploi de parafoudres ZnO", thèse de doctorat, Université FERHAT Abbas Sétif, 2018.
- [6] <https://france-paratonnerres.com/le-phenomene-foudre/>
- [7] http://projet.solaire.drome.free.fr/PDF/guide_technique_parafoudres_ZD234d_99.pdf
- [8] SCHNEIDER ELECTRIC, "La protection des récepteurs contre les surtensions d'origine atmosphérique".
- [9] SCHNEIDER ELECTRIC," Guide de conception des réseaux électriques industriels ".
- [10] Lassoued Issa et slimani Sofiane," Etude de la foudre ", Mémoire de fin d'étude, juin 2006.
- [11] S. KAOUICHE, "Modélisation de l'Impact Direct de la Foudre sur un Pylône THT : Analyse des Courants de Contournement ", Mémoire de Master, Université Jijel, 2018.
- [12] Algorithm, " IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, " (ICPADM) 2021.
- [13] Aguet, Michel, and Jean-Jacques Morf." *Traité d'électricité : Energie électrique*". Presses Polytechniques Romandes, 1981.
- [14] Lounis SOULI," Etudes des protections contre les Surtensions de foudre ", Mémoire de Fin d'Etudes TIZI OUZOU 2017.
- [15] M. GERIN, "La foudre et les installations électriques HT ", Cahier Technique N°168, Juillet 1993.
- [16] S.Khamri,L.Bessghir,"protection des transformateur MT/BT contre les surtension de foudre", Mémoire de Master , UMMTO,2014.
- [17] F.MACIELA, "Parafoudres a moyenne tension HTA et a haute tension HTB", Technique de L'ingénieur D4755, 2008.
- [18] M. MECHATI, "Modélisation du parafoudre a varistance ZnO pour l'étude de l'amélioration de ses propriétés électriques", Mémoire Magister, Annaba2010.
- [19] F. Maciela "Parafoudres", Technique de l'ingénieur, [D4755], 1998.
- [20] M. NACER, T. GHOUAL "Le comportement électrique d'un parafoudre ZnO suite à un régime transitoire", Mémoire de Master, Université LARBI TEBESSI – TEBESSA, 2017.

- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] M'ZIOU NASSIMA " Modélisation de la Décharge de Foudre en Vue d'une Application en Compatibilité Electromagnétique ". Thèse de doctorat, juillet 2009 .
- [24] [24] KADDOURI, Walid, Chaimaa DRISS, and Samir ZELMAT, "Effet des particules sur le champ électrique d'un convoyeur à ondes mobiles", Diss. 2022.
- [25] T. Doshi, R. S. Gorur and J. Hunt, "Electric Field Computation of Composite Line Insulators upto 1200 kV AC", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 18, No. 3, pp. 861- 867, 2011.
- [26] K. BERGER, B. ANDERSON, AND H. KRONINGER, "Parameters of lightning flashes ", *Electra*. No. 41, 23-37, 1975.
- [27] Haddad and D.F. Warne, "Advances in High Voltage Engineering", *IET Power and Energy Series 40*, The Institution of Engineering and Technology, (2007).
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] M. Khodsuz and M. Mirzaie, "Analysis of grading ring design paramètres and heat sink Numbers effect on voltage distribution and leakage curent in métal oxide surgé arrester," *Iran. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 152–158, 2014.
- [31] Alti N, Bayadi A, Belhouchet K, " Grading ring paramètres optimisation for 220 kV métal-oxide arrester using 3D-FEM méthode and bat algorithm," *IET Sci Meas Technol*. 2021 ;
- [32] B. Vahidi, R. Shariati, N. J. S. Moghani, and K. Raahemifar, "Effects of Grading Rings and Spacers on Potential Distribution of ZnO Arrester," in *WSEAS Proceeding of International Conference on Power Systems and Electromagnetic Compatibility*, Izmir, Turkey, 2004, pp.4–6.
- [33] Chen, L., et al "Design and Optimization of Grading Rings for High Voltage Surge Arresters," (2017).
- [34] M. R. Aghaebrahimi; R. Shariatinasab; M. Ghayedi All Authors" Optimal design of grading ring of surge arresters due to electric field distribution" 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference 2012
- [35] Matiullah Ahsan a, Md Nor et All "Parameters design optimization of grading ring based on electric field analysis through response surface methodology" e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy 8 2024.
- [36] M.Farzaneh, L.C. Phan, "Vibration of high voltage conductors induced by corona from water drops or hanging metal points", *IEEE*, Vol. PAS-103, No. 9, 1984.
- [37] L'effet de couronne [archive].
- [38] F. AOUABED, "Contribution à l'étude et à l'évaluation des performances électriques des isolations en silicone polluées sous tension alternative", Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2018

- [39] Hocine Terrab*, Adel Kara “Parameters design optimization of 230 kV corona ring based onelectric field analysis and response surface methodology” EPSR-5187; Electric Power Systems Research xxx (2017).