

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'électromécanique.

MÉMOIRE

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

En : **Electrotechnique.**

Spécialité : **Commande électrique.**

Par : - *Aouichat Cherif*

- *Belaifa Abdallah*

Sujet

Contribution à l'étude de performances électriques des parafoudres

ZnO sous différentes formes de tension

Soutenu publiquement, le 02/07/2023 , devant le jury composé de :

<i>M. NACIB Leila</i>	<i>MCB</i>	<i>Univ-BBA</i>	<i>Président</i>
<i>M. REFFAS Abderrahim</i>	<i>MCA</i>	<i>Univ-BBA</i>	<i>Examineur</i>
<i>M. AOUABED Fatiha</i>	<i>MCB</i>	<i>Univ-BBA</i>	<i>Encadrant</i>

Année Universitaire 2022/2023.

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 et surtout tous les étudiants de notre promotion.

*Tous nos enseignants, en particulier notre rapporteur Mme **F.AOUABED.***

À tous ce qui nous ont porté leur soutien moral.

Mr. BELAIFA Abdallah

Mr. AOUICHAT Cherif

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 Mme. **L. NACIB** d'avoir accepté de présider le jury et nous remercions Mr. **A. 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.

*Enfin, nous remercions nos amis, **MOHAMED** et **NABIL** qui ont toujours été là pour nous, Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.*

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre 1 : Concepts de base et généralités.	
1.1 Introduction	3
1.2 La Foudre	3
1.2.1 Le Phénomène foudre.....	3
1.2.2 Les effets de la foudre	4
1.2.3 Paramètres électrique de la foudre	5
1.2.4 La Modélisation de la foudre	7
1.3 Les Surtensions	9
1.3.1 Définitions.....	9
1.3.2 Origine des surtensions	10
1.3.3 Classification des surtensions.....	10
1.4 La Protection contre les surtensions.....	11
1.4.1 Principe de protection.....	11
1.5 Les Dispositifs de protection contre les surtensions	12
1.5.1 Eclateurs	12
1.5.2 Les Parafoudres	13
1.6 Les Types des parafoudres	14
1.6.1 Parafoudre à carbure de Silicium (SiC)	14
1.6.2 Parafoudre à Oxyde de Zinc	16
1.7 Choix des parafoudres à oxyde de zinc en HT.....	18
1.8 Caractéristiques fondamentales des varistances ZnO	18
1.8.1 Caractéristiques électriques.....	18
1.8.2 La Caractéristique courant-tension.....	19
1.8.3 Courant de fuite.....	20
1.9 Conclusion.....	20
Chapitre 2: Etat de l'art	
2.1 Introduction:	22
2.2 Paramètres électriques de parafoudre.....	22
2.2.1 Tension normale du parafoudre.....	22
2.2.2 Courant de décharge.....	22
2.2.3 Courant de suite.....	22
2.2.4 Tension résiduelle d'un parafoudre.....	22
2.2.5 Tension d'amorçage à fréquence industrielle d'un parafoudre	23
2.2.6 Tension d'amorçage au choc d'un parafoudre	23
2.3 Court-circuit dans un parafoudre.....	23
2.4 Pollution des parafoudres	23
2.4.1 Sources et nature de pollution	24
2.4.2 Classification des sites pollués	24
2.4.3 Conséquences de la pollution	25
2.5 Méthodes de résolutions des modèles mathématiques.....	26
2.5.1 Méthodes analytiques	26
2.5.2 Méthodes numériques	26
2.6 Présentation du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS	28
2.7 Conclusion.....	29
Chapitre 3 : résultats et discussions	
3.1 Introduction	31
3.2 Le choix d'un parafoudre de simulation	31
3.2.1 Géométrie de parafoudre utilisé	31

3.2.2	Présentation et dimensionnements du modèle	31
3.2.3	Propriétés matérielles	32
3.2.4	Conditions aux limites.....	33
3.2.5	Maillage du modèle	34
3.3	Résultats et discussions	35
3.3.1	Études de la distribution de tension et champ électrique	35
3.3.2	Études de la répartition de la tension et champ électrique axiale et sur ligne de fuite Sous différentes formes de tension	38
3.3.3	L'effet de Constante diélectrique relative ϵ_r (ZnO) sur le potentiel électrique	45
3.3.4	L'effet de pollution sur la distribution de tension et de champ électriques	47
3.4	Conclusion.....	51
	CONCLUSION GENERALE	52

BIBLIOGRAPHIE

Liste des figures

Figure. 1. Coup de foudre et éclair ascendant.	4
Figure. 2. Ondes typiques dans le canal de la foudre.	5
Figure. 3. Oscillogramme d'un courant de foudre.	6
Figure. 4. Distribution statistique expérimentale en amplitude des coups de foudres positifs et négatifs selon IEEE (loi normale)	6
Figure. 5. Distribution statistique expérimentale en raideur de front des courants de foudre positifs et négatifs suivant IEEE (loi normale)	6
Figure. 6. Onde de courant 8/20.	7
Figure. 7. Onde de tension 1,2/50	7
Figure. 8. Exemple de surtension.	9
Figure. 9. Eclateurs.	12
Figure. 10. Parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs.	15
Figure. 11. Types de parafoudres ZnO utilisé dans les réseaux à haute tension	17
Figure. 12. Caractéristique J (E) d'une varistance ZnO.	20
Figure. 13. Variation de la résistivité d'une varistance ZnO en fonction de la tension avec le champ électrique appliqué.	20
Figure. 14. Un parafoudre avant un essai de court-circuit.	23
Figure. 15. Le même parafoudre après un essai de court-circuit.	23
Figure. 16. Source de pollution	24
Figure. 17. Modèle géométrique de parafoudre.	32
Figure. 18. Définition de la géométrie sous COMSOL MULTIPHYSICS en 2D.	32
Figure. 19. La forme de tension appliquée.	34
Figure. 20. Maillage de parafoudre ZnO.	34
Figure. 21. Distribution de la tension électrique pour tension de choc.	36
Figure. 22. Distribution des lignes équipotentielles pour tension de choc.	36
Figure. 23. Distribution du champ électrique du parafoudre à base d'oxyde de zinc.	37
Figure. 24. Distribution des lignes de champ électrique	37
Figure. 25. Lignes de référence du potentiel et champ électrique.	38
Figure. 26. Distribution du potentiel électrique.	40
Figure. 27. Distribution du champ électrique.	41
Figure. 28. Distribution de potentiel électrique pour différentes formes de tension.	43
Figure. 29. Distribution du champ électrique sous différentes formes de tension	44
Figure. 30. Distribution de la tension électrique pour les différentes valeurs de ϵ_r (choc).	45
Figure. 31. Distribution de la tension électrique pour les différentes valeurs de ϵ_r (AC).	46
Figure. 32. Distribution de la tension électrique pour les différentes valeurs de ϵ_r (DC).	46
Figure. 33. Géométrie de parafoudre pollué.	47
Figure. 34. Distribution de la tension électrique pour tension de choc avec pollution (gouttes).	48
Figure. 35. Distribution des lignes équipotentielles pour tension de choc avec pollution (gouttes).	48
Figure. 36. Potentiel électrique sous tension choc.	49
Figure. 37. Potentiel électrique sous différentes tension AC.	50
Figure. 38. Champ électrique avec ou sans pollution (tension choc).	51

Liste des tableaux

Tableau. 1. Distribution du courant et de la densité de charge pour les modèles ligne de transmission de l'arc en retour	9
Tableau. 2. Caractéristiques des formes des surtensions (A spécifier par le comité de produit concerné)	11
Tableau. 3. Classification de la pollution selon le type d'environnement	25
Tableau. 4. Propriétés du matériau utilisé pour la modélisation de l'isolateur.	33

Liste des abréviations et des symboles

Les abréviations

F.é.m	force électromotrice.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
HT	haute tension.
MT	moyenne tension.
BT	base tension.
THT	très haute tension.
MCOV	maximum continuous operating voltage.
TOV	Temporary over voltage.
M.D.F	méthode des différents finis.
M.E.F	méthode des éléments finis.
CC	courant continu.
CA	courant alternatif.

Les symboles

I	courant électrique.
U	tension électrique.
C	vitesse lumière.
V	vitesse de propagation.
Z	impédance.
ϵ_r	permittivité relative (constante diélectrique relative).
σ	conductivité électrique.
τ	constante de temps.
λ	constante d'atténuation.
α	coefficient de non linéarité.

ملخص:

تلعب مانعات الصواعق عالية الجهد دورا مهما في أنظمة نقل الطاقة. يتمثل الدور الرئيسي لمانعات الصواعق هذه في ضمان حماية الشبكات الكهربائية ضد ظاهرة الصواعق. الهدف من هذا العمل هو دراسة الأداء الكهربائي لمانعات الصواعق (ZnO) في أشكال مختلفة من الجهد من خلال دراسة المواد التي تتكون منها. باستخدام طريقة العناصر المنتهية، تم تنفيذ نموذج مانع الصواعق في برنامج COMSOL MULTIPHYSICS 5.6 ونرى توزيع التوتر الكهربائي والحقل الكهربائي على طول مانع الصواعق هذا في ظل ظروف نظيفة ومع التلوث.

كلمات مفتاحية: مانعات الصواعق، الجهد العالي، COMSOL MULTIPHYSICS، توزيع الجهد الكهربائي، توزيع الحقل الكهربائي، التلوث.

Résumé

Les parafoudres hauts tension jouent un rôle important dans les systèmes de transmission d'énergie. Le rôle principal de ces parafoudres est d'assurer la protection des réseaux électriques contre le phénomène de foudre. L'objectif de ce travail est d'étudier les performances électriques des parafoudres ZnO sous différentes formes de tension par l'étude des matériaux qui le constitue. En utilisant la méthode numérique des éléments finis, le modèle géométrique de parafoudre a été implanté dans le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS 5.6 et nous voyons la distribution du potentiel et du champ électrique le long de ce parafoudre dans des conditions propres et avec pollution.

Mots Clés : Parafoudre, hauts tension, COMSOL MULTIPHYSICS, distribution du potentiel électrique, distribution du champ électrique, pollution.

Abstract

High-voltage surge arresters play an important role in power transmission systems. The main role of these surge arresters is to ensure the protection of electrical networks against the phenomenon of lightning. The objective of this work is to study the electrical performance of ZnO surge arresters in different forms of voltage by studying the materials that constitute it. Using the numerical method of finite elements, the geometric model of lightning arrester has been implemented in the software COMSOL MULTIPHYSICS 5.6 and we see the distribution of the potential and the electric field along this lightning arrester under clean conditions and with pollution.

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

INTRODUCTION GENERALE

La demande croissante en énergie électrique a entraîné une expansion du réseau de transport et le développement de lignes à très haute tension. Pour assurer une qualité de service adéquate, des moyens de protection contre les surtensions ont été installés. Ces surtensions peuvent causer des défaillances du matériel électrique et représenter un danger [1].

Initialement, la protection du réseau électrique était assurée par des éclateurs, puis par des parafoudres combinant des éclateurs et des parafoudres à carbure de silicium (SiC). Cependant, les parafoudres à oxydes de zinc (ZnO) ont rapidement remplacé ces dispositifs. Apparus dans les années 1970, les parafoudres à ZnO sont devenus très populaires en haute tension, puis rapidement en moyenne tension. Aujourd'hui, le marché des parafoudres est dominé par les parafoudres à ZnO, à quelques rares exceptions près [2].

L'étude des performances électriques des parafoudres à base d'oxyde de zinc (ZnO) est essentielle pour la protection contre les surtensions. Elle se concentre sur l'évaluation des performances des parafoudres ZnO dans différentes conditions, y compris celles impliquant la pollution. La pollution, telle que la poussière, l'humidité et les contaminants atmosphériques, peut avoir des effets néfastes sur les performances des parafoudres en réduisant leur réactivité et leur capacité à protéger efficacement contre les surtensions. De plus, elle peut compromettre l'isolation électrique et causer des pannes ou des dommages aux équipements électriques.

L'objectif principal de cette recherche est donc d'évaluer les performances électriques des parafoudres ZnO sous différentes formes de tension, en tenant compte des conditions propres et de la pollution, afin de garantir leur bon fonctionnement et leur capacité à protéger les équipements électriques contre les surtensions.

Ainsi le travail présenté dans ce mémoire est articulé autour de trois chapitres :

Le premier chapitre présente le phénomène de la foudre, ses effets et une analyse des moyens de protection, en mettant l'accent sur les parafoudres à oxyde de zinc (ZnO) et leur fonctionnement.

Le deuxième chapitre aborde les paramètres électriques des parafoudres et la pollution. Différentes méthodes numériques de calcul du champ et du potentiel électrique sont discutées.

Le dernier chapitre se concentre sur la simulation basée sur la méthode des éléments finis, utilisant le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS 5.6, pour déterminer la distribution du potentiel et du champ électrique le long du parafoudre.

La mémoire se conclut par une conclusion générale et des perspectives pour de futures recherches dans ce domaine.

CHAPITRE 1 : Concepts de base et généralités.

1.1 Introduction

La conception 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 diminution du niveau d'isolement qui conduit à une interruption du service. [3]

La tenue diélectrique de ces équipements est souvent menacée par la présence de surtensions transitoires sur les réseaux électriques. Ces surtensions correspondent principalement aux enclenchements ou déclenchement des lignes (surtensions de manœuvre) et aux surtensions atmosphériques (foudre) qui peuvent détruire l'isolation des équipements des réseaux électriques. [3]

Dans ce chapitre nous présentons des généralités sur les parafoudres. En premier lieux, nous aborderons la phénoménologie de la foudre (définition, paramètres électriques, courant de foudre, modélisation ...etc.) ainsi que son interaction avec le réseau électrique (ses effets). Par la suite nous présenterons certains éléments de protection contre ce phénomène comme les parafoudres et les éclateurs. Finalement, nous avons détaillé le parafoudre à base d'oxyde métallique ZnO, sa constitution et son fonctionnement ainsi que son principe de protection qui se base sur une varistance.

1.2 La Foudre

1.2.1 Le Phénomène foudre

La foudre est un phénomène naturel de décharge électrostatique disruptive qui se produit lorsque de l'électricité statique s'accumule entre un nuage et la terre. La différence de potentiel électrique entre les deux points peut aller jusqu'à 100 millions de volts et produit un plasma lors de la décharge, causant une expansion explosive de l'air par dégagement de chaleur.

- 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 progresse ensuite en direction du sol, par bonds successifs (contrairement au traceur positif qui, lui, progresse de façon quasi continue) de quelques dizaine de mètres et avec des temps d'arrêts de 40 à 100 μ s entre bonds [4].

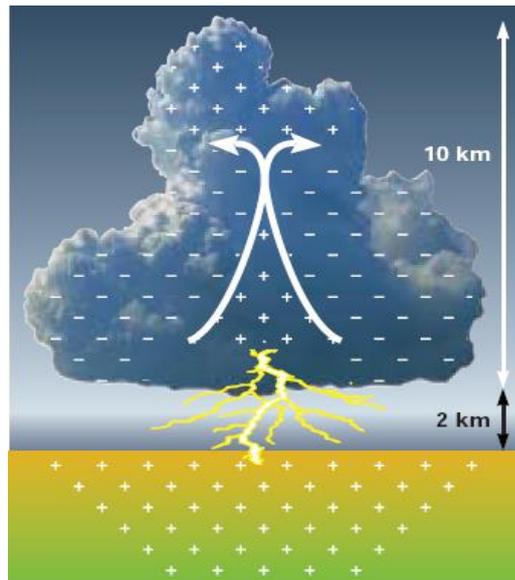


Figure. 1. Coup de foudre et éclair ascendant.

1.2.2 Les effets de la foudre

1.2.2.1 Les effets directs

- ✓ ILS se produisent au point d'impact de la foudre.
- ✓ ILS sont dus à l'écoulement du courant de foudre de très forte intensité dans les éléments plus ou moins conducteur.
- ✓ Le passage du courant de foudre peut avoir pour conséquence : l'électrocution de personnes ou d'animaux, des incendies et la destruction de matériels par fusion ou déformation. Contre ces effets directs, on assure une bonne protection par la mise en place de paratonnerres à tige, à cage ou à fil, selon le type de structure à protéger. [5]

1.2.2.2 Les effets indirects

On appelle foudroiement indirect la résultante d'un foudroiement direct dont l'écoulement n'a pas été maîtrisé. Tout courant de foudre, dont le cheminement ne serait pas bien canalisé, peut emprunter n'importe quel chemin de façon totalement aléatoire pour rejoindre la terre, générant sur son passage d'éventuels arcs électriques (étincelage).

Les surtensions (effets induits) apparaissent entre l'arrivée des lignes extérieures d'alimentation et le système équipotentiel des terres de la structure. Ces surtensions " pénètrent " vers l'intérieur de la structure par propagation (le long des lignes). On utilise des matériels appelés parafoudres et placés sur le réseau électrique pour se protéger.

Montées en potentiel de la terre de l'installation, au moment de la dispersion du courant dans le sol, provoquant des différences de potentiels destructrices entre les masses des équipements et les réseaux auxquels ils sont reliés. [6]

1.2.2.3 Les effets thermiques

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 L'effet électrique

Ils sont principalement dus à des causes :

- ✓ La circulation des très forts courants à travers les conducteurs rencontrés (réseaux, terres, fusibles parasurtenseurs) génèrent des surtensions qui provoquent à leur tour des claquages.
- ✓ L'induction correspondant au champ électrique produit par le courant de foudre qui induit des forces électromotrices dans les boucles qui embrasent son flux. Ces f.é.m. peuvent provoquer des d.d.p importants, en particulier entre deux circuits ou masses métalliques liées à la terre et l'autre pas, ou bien entre deux circuits ou masses métalliques reliées à la terre qui ne sont pas au même potentiel (réseau de terre non équipotentiel). [7]

1.2.2.5 L'effet électromagnétique

Lorsque la foudre traverse des éléments jusqu'à la terre il y a formation d'un courant électromagnétique. Des courants et tensions induits vont alors apparaître dans les conducteurs proches. La foudre peut avoir des conséquences destructrices ou perturbatrices sur des installations électriques ou électroniques jusqu'à plusieurs kilomètres du point d'impact [8].

1.2.3 Paramètres électrique de la foudre

1.2.3.1 Forme du courant d'arc

Ce courant est de nature impulsionnelle ayant une forme qui se caractérise par une valeur de crête, un front de montée jusqu'à la crête (ou temps de montée) et un temps de décroissance [9] (Figure. 2.).

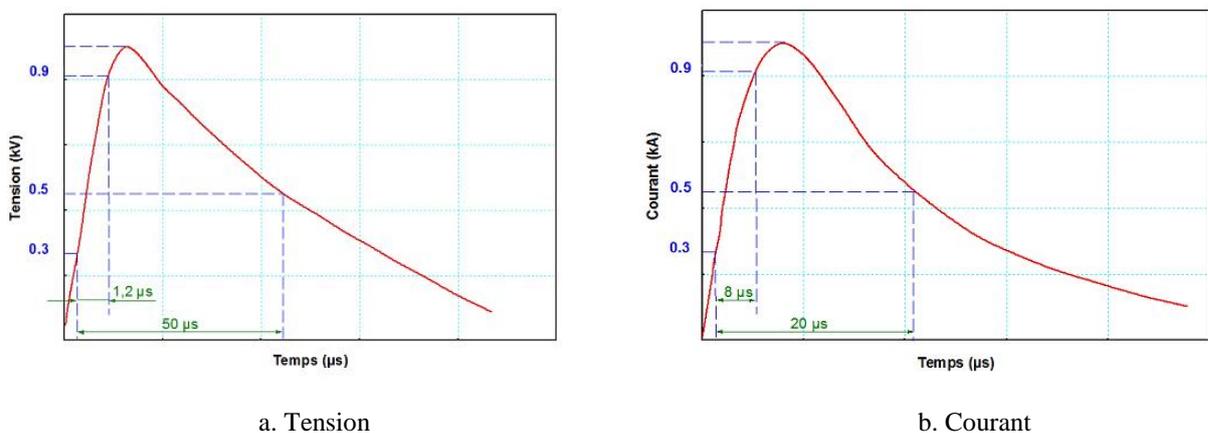


Figure. 2. Ondes typiques dans le canal de la foudre. [9]

1.2.3.2 Forme réelle du courant de foudre

Le phénomène physique de la foudre correspond à une suite de décharges d'une quantité d'électricité sur un court intervalle de temps. Il est généralement représenté par une source de courant impulsionnel. La forme d'onde réelle est très variable, elle consiste en un front de montée jusqu'à l'amplitude maximale (de quelque microsecondes à 20 microsecondes) suivi d'une queue de décroissance de quelques dizaines de microsecondes (Figure. 3.). [9]

1.2.3.3 Amplitude des coups de foudre

Beaucoup de fonctions de répartitions des amplitudes des courants des premiers arcs en retour des coups de foudre négatifs peuvent exister. La distribution statistique expérimentale, selon l'IEEE, des coups de foudre en amplitude répond à une loi normale donnée dans la (figure. 4.) et celle en raideur de front est donnée sur la (figure. 5.). [9]

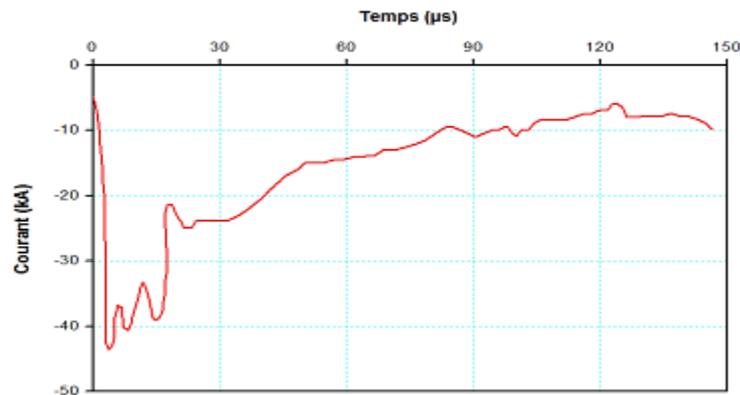


Figure. 3. Oscillogramme d'un courant de foudre [9]

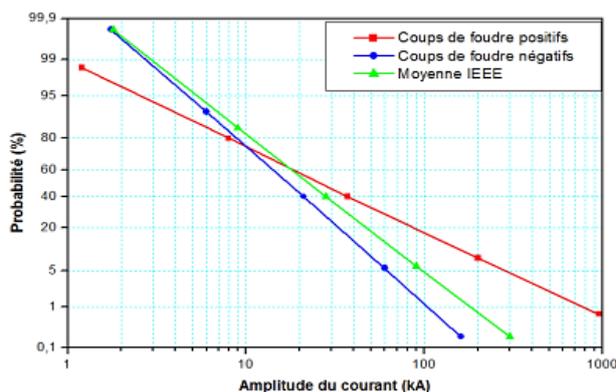


Figure. 4. Distribution statistique expérimentale en amplitude des coups de foudres positifs et négatifs selon IEEE (loi normale) [9]

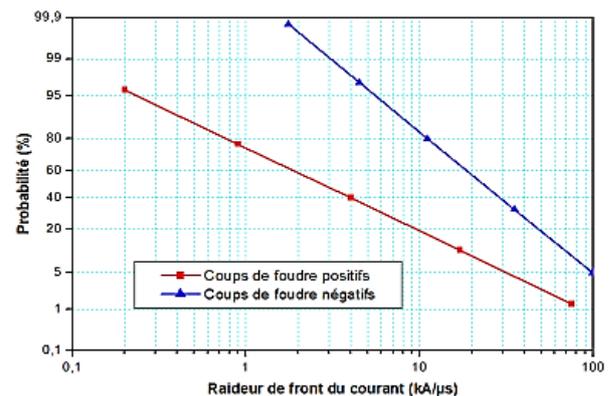


Figure. 5. Distribution statistique expérimentale en raideur de front des courants de foudre positifs et négatifs suivant IEEE (loi normale) [9]

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 [5] :

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

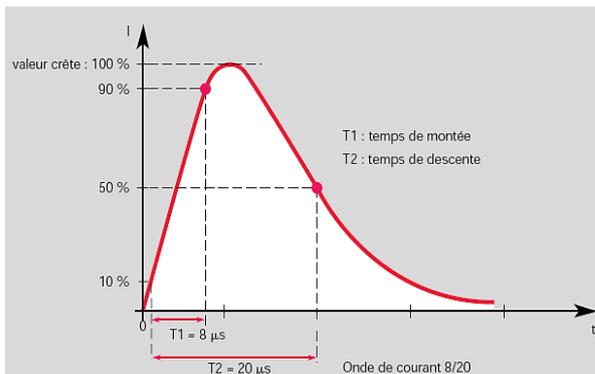


Figure. 6. Onde de courant 8/20 [5]

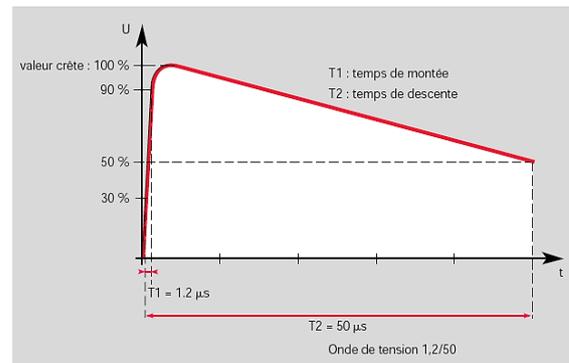


Figure. 7. Onde de tension 1,2/50 [5]

Un modèle, par définition, est une construction mathématique qui, avec l'ajout de certaines interprétations, décrit des phénomènes observés. Un modèle est nécessaire lorsque tout ou quelques principes de base régissant le phénomène ne sont pas complètement compris. Ainsi, un modèle peut contenir des hypothèses qui doivent encore être prouvées et des variables dont les valeurs sont sélectionnées a priori pour correspondre aux observations expérimentales. Cependant, quel que soit le mode de construction, un modèle devrait pouvoir expliquer au moins certaines des observations expérimentales concernant le processus physique sous considération et devrait être capable de faire des prédictions pour que sa validité puisse être testée par d'autres investigations expérimentales. [10]

1.2.4.1 Courant à la base du canal

Le courant à la base du canal $i(0, t)$ doit être spécifié afin de déterminer le courant en fonction de la hauteur et du temps le long du canal de retour $i(z, t)$. Deux formes analytiques sont généralement rencontrées dans la littérature, pour représenter le courant à la base du canal, en premier la fonction bi-exponentielle [10] :

$$i(0, t) = I_0 (\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)) \quad (1)$$

Où :

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

Plus récemment F. HEIDLER [10] a proposé une nouvelle expression analytique :

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2)$$

Où :

$$\eta = \exp\left(-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^n \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}}\right) \quad (3)$$

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.

1.2.4.2 Courant d'arc en retour

La représentation mathématique du courant d'arc en retour a fait l'objet de plusieurs modèles dont les plus connus sont [10] :

- Le modèle électro-thermodynamique.
- Le modèle transmission line (LCR).
- Le modèle électromagnétique.
- Les modèles d'ingénieurs :
 - Modèles de propagation actuels.
 - Modèles de la génération actuelle.
 - Modèles de dissipation actuels.

Le modèle d'ingénieur du courant d'arc en retour est définie par une équation reliant le courant du canal à n'importe quelle hauteur z' et à n'importe quel instant t au courant à la base du canal ($z'=0$). Comme il peut aussi être définie à partir de la densité de charge (z', t) le long du canal en utilisant les équations de continuités [10].

Le tableau (1) montre la distribution du courant ainsi que la densité de charge à n'importe quelle hauteur z' et à n'importe quel instant t pour trois modèles de lignes de transmissions. Dans ce tableau H représente la hauteur totale du canal, λ étant la constante d'atténuation (supposée égale à 2000 m [10]), c est la vitesse de la lumière, v est la vitesse de propagation vers le haut de l'arc en retour, $(t - z'/v)$ est la fonction de Heaviside :

$$\begin{cases} u(t - z'/v) = 1 \text{ si } t > z'/v \\ u(t - z'/v) = 0 \text{ si } t < z'/v \end{cases} \quad (4)$$

et $Q(z', t)$ est défini comme suit :

$$Q(z', t) = \int_{z'/v}^t I(0, \tau - z'/v) d\tau \quad (5)$$

Tableau. 1. Distribution du courant et de la densité de charge pour les modèles ligne de transmission de l'arc en retour. [10]

Modèles	$I(z', t), \rho_L(z', t)$
TL	$I(z', t) = I(0, t - z'/v) \cdot u(t - z'/v)$ $\rho_L(z', t) = \frac{I(0, t - z'/v)}{v}$
MTLL	$I(z', t) = (l - z'/H) I(0, t - z'/v) \cdot u(t - z'/v)$ $\rho_L(z', t) = (l - z'/H) \left[\frac{I(0, t - z'/v)}{v} \right] + \frac{Q(z', t)}{H}$
MTLE	$I(z', t) = e^{-\frac{z'}{\lambda}} I(0, t - z'/v) \cdot u(t - z'/v)$ $\rho_L(z', t) = e^{-\frac{z'}{\lambda}} \left[\frac{I(0, t - z'/v)}{v} \right] + \frac{e^{-\frac{z'}{\lambda}}}{\lambda} Q(z', t)$

1.3 Les Surtensions

1.3.1 Définitions

Durant la durée d'exploitation, le matériel électrique est soumis à des contraintes plus ou moins sévères. Ces contraintes diffèrent selon qu'elles sont dues à l'application continue de la tension de service ou qu'elles sont dues à des phénomènes transitoires qui sont les surtensions.

Une surtension est toute tension entre un conducteur de phase et la terre, ou entre conducteurs de phase, dont la valeur de crête dépasse la valeur de crête correspondant à la tension la plus élevée pour le matériel, définie par la norme CEI 71-1.

Elles peuvent apparaître entre phases ou entre circuits différents, et sont dites de mode différentiel ($U_m\sqrt{2}$), ou bien entre les conducteurs actifs et la masse ou la terre et sont dites de mode commun ($U_m\sqrt{2/\sqrt{3}}$). La (figure. 8.) montre un exemple de surtension. [11]

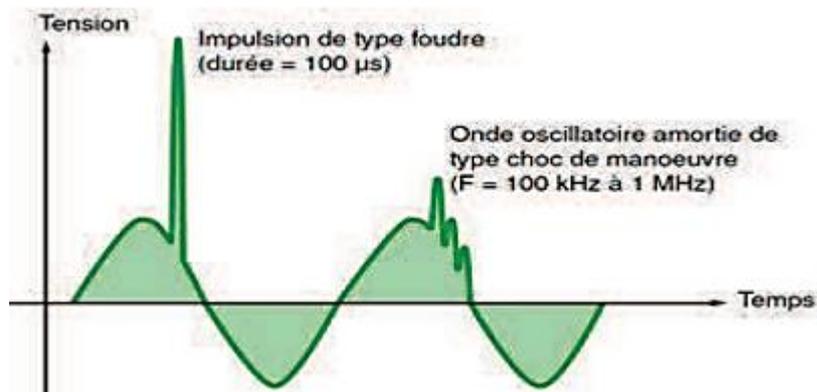


Figure. 8. Exemple de surtension. [11]

1.3.2 Origine des surtensions

En général les surtensions peuvent être d'origine externe (Générées par des sources qui sont externes aux systèmes) ou d'origine interne (Générées par le système lui-même). L'amplitude et la durée des surtensions externes restent essentiellement indépendantes de la conception et de la configuration des systèmes (Paramètres des systèmes). On compte deux types de ces surtensions.

Les surtensions d'origine externe sont principalement causées par la foudre. Les surtensions d'origine interne sont causées par un élément du réseau considéré et ne dépendent que des caractéristiques et de l'architecture du réseau lui-même. [11]

1.3.3 Classification des surtensions

La norme CEI 71-1 donne la classification des surtensions selon leur durée et leur forme. Selon la durée, on distingue les surtensions temporaires et les surtensions transitoires :

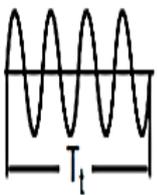
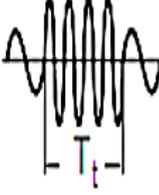
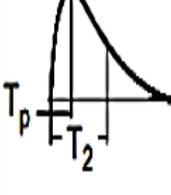
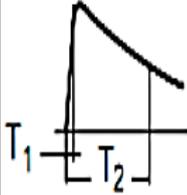
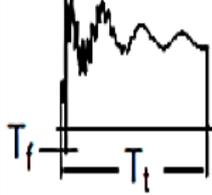
- ✓ **Surtension temporaire** : On désigne ainsi tout phénomène à caractère semi-permanent. Elles persistent pour plusieurs cycles de tension.
- ✓ **Surtensions transitoires** : On définit par phénomènes transitoires dans les systèmes électriques à haute tension, l'évolution de surtension entre deux états de fonctionnement permanents consécutifs, dans un intervalle de temps relativement court à l'échelle des temps considérée.

On distingue deux catégories :

- Les phénomènes transitoires lents
- Les phénomènes transitoires rapides [12]

Le tableau suivant représente les principales formes des différentes surtensions :

Tableau. 2. Caractéristiques des formes des surtensions (A spécifier par le comité de produit concerné)

Classe de surtension	Basse fréquence		Transitoire		
	Permanente	Temporaire	A front lent	A front rapide	A front très rapide
Forme					
Gamme de formes (fréquence, front de montée, durée)	$f=50$ ou 60Hz $3600 \geq T_1 \geq 0.03\text{s}$	$10 < f < 500\text{Hz}$ $T_1 \geq 3600\text{s}$	$5000 \geq T_p \geq 20\mu\text{s}$ $20\text{ms} \geq T_2$	$20 > T_1 > 0.1\mu\text{s}$ $300\mu\text{s} \geq T_2$	$100 > T_f > 3\text{ns}$ $0.3 > f_1 > 62\text{Hz}$ $30 > f_2 > 300\text{kHz}$ $3\text{ms} \geq T_1$
Forme normalisée	$f=50$ ou 60Hz $T_1 = (*)$	$48 < f < 62\text{Hz}$ $T_1 = 60\text{s}$	$T_p = 250\mu\text{s}$ $T_2 = 2500\mu\text{s}$	$T_1 = 1.2\mu\text{s}$ $T_2 = 50\mu\text{s}$	(*)
Essai tenue normalisée	(*)	Essai à fréquence industrielle de courte durée	Essai de choc de manœuvre	Essai de choc de foudre	(*)

1.4 La Protection contre les surtensions

1.4.1 Principe de protection

La protection des installations et des personnes contre les surtensions est d'autant meilleure qu'un écoulement des surtensions vers la terre est assuré [1]. On distingue trois niveaux de protections contre les surtensions :

1.4.1.1 1^{er} niveau de protection

L'objectif est l'éviter l'impact direct les ouvrages en captant la foudre et en l'orientant vers des lieux d'écoulement privilégiés, au moyen de :

- Paratonnerres, dont le principe est basé sur la distance d'amorçage ; une tige placée en haut de la structure à protéger capte la foudre et l'écoule à travers le réseau de terre.
- Cage de Faraday.
- Câble de garde.

1.4.1.2 2^{ème} niveau de protection

Son but d'assurer que le niveau d'isolement au choc des éléments du poste n'est pas dépassé. Il est réalisé en HT au moyen d'éléments assurant de l'onde de foudre à la terre tels que :

- Eclateurs.
- Parafoudres HT.

1.4.1.3 3^{ème} niveau de protection

Utilisé en BT comme protection complémentaire des équipements sensibles (informatique, appareils de télécommunications...). Il est réalisé au moyen de :

- Filtres série.
- Limiteurs de surtensions.
- Parafoudres BT.

1.5 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 :

1.5.1 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 [13].

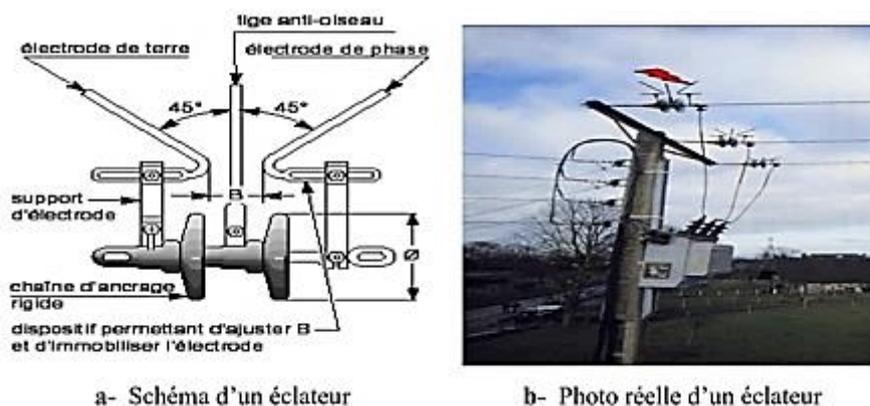


Figure. 9. Eclateurs. [13]

1.5.1.1 Avantage et inconvénients

Le principal avantage de l'éclateur est son faible prix. Il est aussi très robuste et très facilement réglable de sorte que ses caractéristiques peuvent être ajustées suivant sa fonction. [1].

Malheureusement, ces avantages ne vont pas sans de nombreux inconvénients :

- Les caractéristiques d'amorçage de l'éclateur sont très variables en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité, pression) qui modifient l'ionisation du milieu diélectrique (l'air) entre les électrodes.
- L'élément d'amorçage dépend de la valeur de la surtension.
- L'amorçage de l'éclateur provoque un court-circuit phase terre à fréquence industrielle en raison du maintien de l'arc, celui-ci dure jusqu'à son élimination par les appareils de coupure (ce court-circuit s'appelle courant de suite). Cela rend nécessaire l'installation de disjoncteurs shunt ou de dispositifs de réenclenchement rapide sur les disjoncteurs situés en amont. De ce fait, les éclateurs sont inadaptés à la protection d'une installation contre les surtensions de manœuvres.
- Le fonctionnement de l'éclateur conduit à une onde de tension coupée à front raide susceptible de provoquer des avaries au matériel bobiné situé à proximité. [1].

1.5.2 Les Parafoudres

Pour pallier les inconvénients des éclateurs, différents modèles de parafoudres ont été conçus dans le but d'assurer une meilleure protection des installations et une bonne continuité de service. Le nom parafoudre vient de fait que, historiquement, le foudroiement était la première cause de surtension contre laquelle on désirait se protéger. Le parafoudre est un dispositif destiné à limiter les surtensions transitoires et à dériver les ondes de courant vers la terre, afin de limiter l'amplitude de cette surtension à une valeur non dangereuse pour l'installation électrique et l'appareillage électrique. En cas de surtension supérieure au seuil U_c , le parafoudre devient conducteur et évacue rapidement l'énergie à la terre. Les parafoudres à résistances variables avec un ou plusieurs éclateurs sont les plus répandus dans les installations HT et MT en exploitation depuis quelques années. La tendance actuelle est vers les parafoudres à oxyde de zinc qui possèdent des performances meilleures. [1]

Le parafoudre c'est une moyenne de protection principale contre les surtensions atmosphériques et de manœuvre.

La tâche du parafoudre consiste à dériver les courants de décharge vers la terre pour éviter qu'ils n'endommagent des équipements coûteux. Le positionnement du parafoudre est également primordial. Les points de réflexion du réseau sont un facteur important car les courants de décharge peuvent être réfléchis et donc devenir très destructeurs.

La raideur de l'onde constitue un autre facteur critique. Les ondes à front raide sont réfléchies plus facilement et comme le parafoudre n'est efficace que si elles apparaissent dans le voisinage immédiat, elles limitent donc la longueur de ligne protégée. [14]

1.5.2.1 Le rôle des parafoudres

Le rôle du parafoudre est donc de limiter les surtensions, en évacuant cette énergie destructrice vers la terre. En cas de remontée de potentiel de terre, l'énergie est évacuée vers le réseau. Le parafoudre se comporte comme un interrupteur capable de se fermer uniquement pendant la surtension. Par exemple, entre les pôles actifs et la terre sur la courte période de surtension, l'impédance devient très faible et se traduit par un fort courant de décharge selon la simple loi d'Ohm : surtension $U = I \times Z$ impédance. C'est pour cette raison que les parafoudres ont des capacités d'écoulement souvent exprimées en kA. Les parafoudres sont alors installés en tête d'installation entre les pôles actifs du circuit de puissance et la terre. Lorsque la tension est normale, le parafoudre ne laisse passer aucun courant. [15]

1.5.2.2 Principaux critères de dimensionnement d'un parafoudre

Les principaux critères de dimensionnement d'un parafoudre sont [16] :

- Sa tension maximale permanente MCOV (Maximum Continuous Operating Voltage) doit être supérieure à la tension maximale d'exploitation du réseau.
- Sa tension nominale est fixée à $1.25 \times \text{MCOV}$
- Son niveau de protection.
- Sa capacité énergétique à supporter des surtensions temporaires, donnée par une courbe amplitude-durée.
- L'utilisation d'un parafoudre n'est efficace que sous certaines conditions d'implantation, et en particulier selon les distances qui les séparent du matériel à protéger et de sa terre, d'où l'importance de la notion de distance de protection du parafoudre.

1.6 Les Types des parafoudres

1.6.1 Parafoudre à carbure de Silicium (Sic)

Ce parafoudre est constitué d'une ou plusieurs varistances (résistances non linéaires), en carbure de silicium (Sic), associées en série avec un ou plusieurs éclateurs, l'ensemble est placé dans une enveloppe isolante étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote) [1].

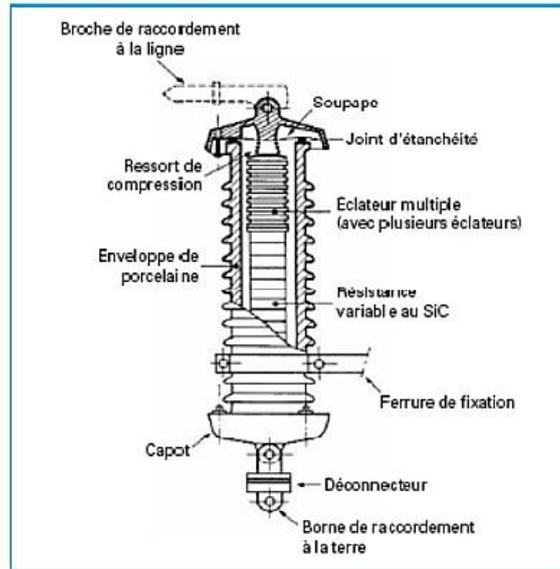


Figure. 10. Parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs [1].

1.6.1.1 Principe de fonctionnement

En fonctionnement normal, les éclateurs ne sont conducteurs. Lorsqu'une surtension supérieure au niveau d'amorçage, les éclateurs s'amorcent et provoquent l'écoulement du courant de décharge à travers des résistances dont la valeur est d'autant plus faible que la tension élevée (caractéristique non linéaire), ce qui permet de limiter la surtension. Après le passage du courant de décharge, le parafoudre reste conducteur, mais la tension à ses bornes diminue et la non-linéarité des résistances entraîne une décroissance plus rapide du courant qui peut alors être facilement interrompu par les éclateurs à son premier passage par zéro. Ainsi, la saturation est écrêtée sans provoquer ni de défaut artificiel, ni d'onde coupée, puisque la présence des résistances en série avec les éclateurs évite l'effondrement de la tension après l'amorçage [1].

1.6.1.2 Avantage [17]

- Elimination du défaut sans l'intervention des protections.
- La présence des résistances en série avec les éclateurs empêche l'apparition d'un front raide (onde coupée) lors de l'amorçage des éclateurs.
- Les contraintes atmosphériques sont éliminées car l'ensemble est placé dans une enveloppe de porcelaine étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote).
- Moins de dispersion de la tension d'amorçage, surtout pour les surtensions à front raide.
- De par sa construction, un parafoudre à SiC peut limiter les surtensions de manœuvre (particulièrement en THT), ce qui se traduit par une diminution du niveau de protection par rapport à celui obtenu avec des éclateurs.

1.6.1.3 Inconvénients [17]

- Les céramiques à Sic supportent très mal un écoulement prolongé de courant. De ce fait, un parafoudre ne doit jamais fonctionner lorsqu'il est soumis à une tension temporaire ; l'énergie qu'il aurait à dissiper provoquerait sa destruction.
- Pour le fonctionnement correct des parafoudres, il faut que la tension appliquée soit uniformément répartie entre les éclateurs. On fait face à ce problème par des systèmes de répartition de tension résistifs ou capacitifs, ce qui fait augmenter le prix de l'appareil et le rend plus complexe et moins fiables.

1.6.2 Parafoudre à Oxyde de Zinc

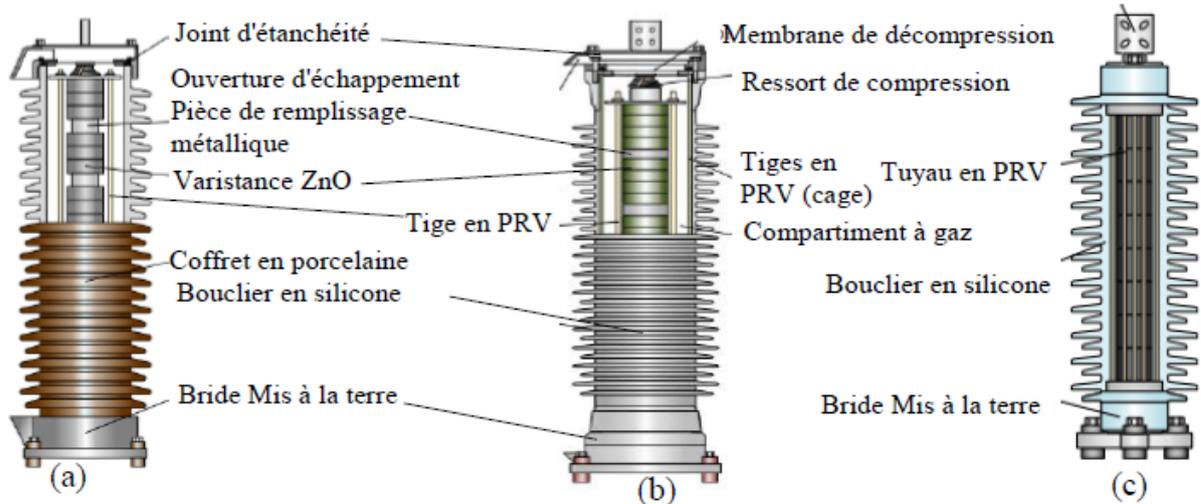
Les parafoudres à oxyde de zinc (ZnO) sont utilisés à tous les niveaux de tension des systèmes à courant continu (CC) et alternatif (CA). Différentes conceptions de parafoudres sont utilisées en fonction du niveau du réseau, du type de tension et du domaine d'application. [18]

La structure de base d'un parafoudre ZnO se compose essentiellement, d'une partie active et d'une enveloppe isolante. La figure(11) montre trois conceptions différentes. Dans les années 1970, les fabricants de parafoudres ont commencé à les parafoudres développés à partir de ces varistances présentent deux avantages essentiel :

- Un coefficient non-linéaire très important parafoudres sans éclateurs dont la partie active reste sous tensions permanent.
- Ils ont une grande capacité d'absorption d'énergie et peuvent être utilisés pour Tous les réseaux, de l'électronique à la très haute transmission d'énergie tension (225 ou 400KV). [9]

1.6.2.1 Constitution

L'oxyde de zinc (ZnO) est simplement fabriqué à partir d'un empilement de résistances non linéaires à l'oxyde de zinc. Parfois, mais uniquement pour les très hautes tensions, il comporte quelques condensateurs supplémentaires placés en parallèle sur les variateurs au sommet des paratonnerres et destinés à améliorer la répartition de la tension le long de l'axe des condensateurs. Tous sont placés dans une enveloppe hermétique et isolante généralement en porcelaine ou en matière synthétique. [2]



(a) : conception en porcelaine,

(b) : conception de tube (au milieu),

(c) : conception de cage.

Figure. 11. Types de parafoudres ZnO utilisés dans les réseaux à haute tension [19]

1.6.2.2 Principe de fonctionnement des parafoudres ZnO

Le parafoudre à oxyde de zinc est constitué uniquement d'une résistance variable fortement non linéaire. La résistance passe de $1,5 \text{ M}\Omega$ à la tension de service (ce qui correspond à un courant de fuite inférieur à 10 mA) à 15Ω pendant la décharge. Après le passage de courant de décharge, la tension aux bornes du parafoudre devient égale à la tension du réseau. Le courant qui traverse le parafoudre est très faible et se stabilise autour de la valeur du courant de fuite à la terre. Le fort non linéarité de parafoudre ZnO fait qu'une forte variation de courant provoque une faible variation de tension. [7]

1.6.2.3 Avantages

- En général, la surface des varistances est d'environ la moitié de celle des SiC pour fournir la même protection [11].
- La plus grande énergie de liaison d'excitons des semi-conducteurs 60 meV (émission légère stimulée exciton que jusqu'à 550K).
- Grâce à leur architecture, il est possible de les utiliser dans des différents milieux : SF₆, air, isolants solides...
- Possibilité de les utiliser dans des conditions de forte pollution grâce à un lavage sous tension.

1.6.2.4 Inconvénients

Malheureusement, ce n'est pas parfait et cela présente quelques inconvénients :

- Les défauts présents dans le ZnO dépendent de la méthode de croissance et des conditions d'élaboration de ce matériau. On pourra énumérer les défauts suivants [20] :
 - Défauts ponctuels (interstitiels, lacunes, atomes étrangers).

- Défauts linéaires (dislocations et sous joint de grains).
- Défauts plans (macles, joints de grains).
- Dans la zone des faibles courants, la caractéristique $V(I)$ des varistances présente un coefficient de température négatif. Une augmentation de température provoque une augmentation de la puissance consommée. Une élévation excessive de la température ambiante pourrait même, dans certaines conditions, conduire à la défaillance thermique du parafoudre [17].
- Les risques d'emballlement thermique [21] peuvent intervenir lors d'une dégradation de la caractéristique électrique du fait de l'absorption de courants de très forte intensité.

1.7 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 mécaniques.

Les données relatives au réseau sont :

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

Le choix du parafoudre consiste en un compromis entre les niveaux de protection des équipements et la capacité énergétique du parafoudre.

Le niveau de protection doit être le plus bas possible pour la tenue des équipements. Cela implique un dimensionnement en tension le plus faible possible, donc une plus grande difficulté à tenir les surtensions temporaires. [14]

1.8 Caractéristiques fondamentales des varistances ZnO

1.8.1 Caractéristiques électriques

L'effet varistance est défini comme étant la propriété de tout corps dont la varistance électrique évalue d'une façon non linéaire avec la tension appliquée à ses bornes [22].

Ce comportement peut être représenté graphiquement par les caractéristiques courantes tensions et résistance-tension illustrés par les figures (12) et (13).

1.8.2 La Caractéristique courant-tension

La relation courant-tension $I(V)$ constitue la caractéristique la plus importante de la varistance, elle traduit en effet la qualité de la varistance essentiellement, du point de vue non linéaire et courant de fuite.

Les figures (12) et (13) illustrent, respectivement une caractéristique $J(E)$ typique et la variation de la résistivité avec le champ électrique appliqué. Le fonctionnement de la varistance passe par trois phases représentées par les zones 1, 2 et 3.

La Zone 1 : représente la phase isolante, elle correspond aux valeurs du champ électrique (tension) inférieures au champ de seuil (tension). Dans cette zone la varistance impose une très grande résistivité au passage du courant de l'ordre de $\rho = 10^{10} - 10^{12} \Omega.cm$ [14]. Et seul un courant de faible valeur, dit courant de fuite traverse la varistance. La conduction dans cette zone est linéaire et dépendante de la température. Plus la température de la varistance augmente plus sa résistivité diminue et par conséquent le courant de fuite diminue.

La Zone 2 : Quand le champ appliqué dépasse le champ de seuil (premier coude), la varistance entre en conduction non linéaire. De ce fait la tension résultante à ses bornes, appelée tension résiduelle reste constante. Dans cette zone le courant qui traverse la varistance suit une loi exponentielle décrit par une fonction non linéaire de la tension comme :

$$I = K.V^\alpha \quad (6)$$

I : Courant traversant la varistance.

V : Tension appliquée.

K : Constante propre au matériau de la varistance.

α : Coefficient de non linéarité ; $30 < \alpha < 100$. [14]

Cette zone représente la phase de fonctionnement où la varistance conduit la surtension vers la terre.

La Zone 3 : Pour les valeurs élevées du champ (respectivement du courant) la conduction redevient encore linéaire mais avec une très faible résistivité ($\rho = 0,1 - 10 \Omega.cm$). Par rapport aux courants de foudre, la varistance fonctionne le deuxième coude de la caractéristique.

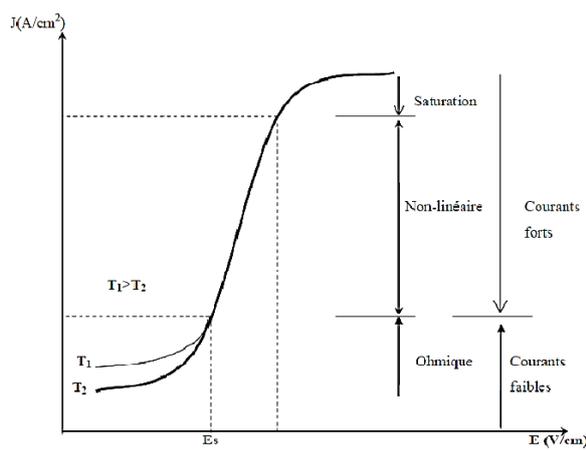


Figure. 12. Caractéristique $J(E)$ d'une varistance ZnO.

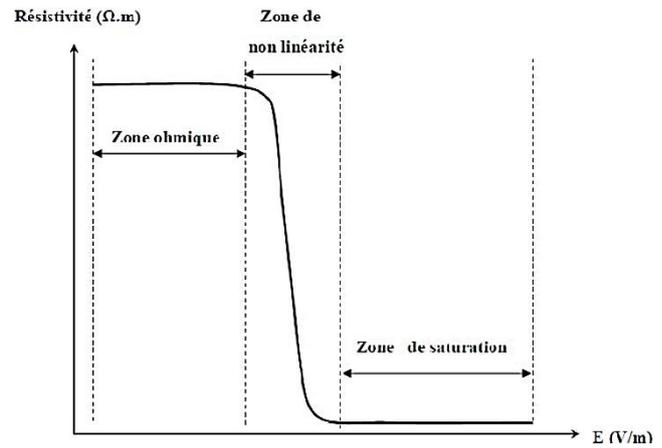


Figure. 13. Variation de la résistivité d'une varistance ZnO en fonction de la tension avec le champ électrique appliqué.

1.8.3 Courant de fuite

En régime normal, et sous la tension de service la varistance laisse un faible courant. Ce courant de l'ordre du micromètre (10^{-6} A/cm²), représente le flux d'électrons qui arrivent à travers les barrières de potentiel par effet thermoïonique. Il est par conséquent tributaire de la température de la varistance. D'autre part, l'état degré de la varistance se manifeste essentiellement par une augmentation du courant de fuite et une diminution de la tension de seuil [23].

Le courant de fuite possède deux composantes : une résistive, représentant la conduction linéaire et les pertes, et l'autre capacitive représentant l'effet de la fréquence. Plus ces composantes sont élevées, plus le courant de fuite devient important.

1.9 Conclusion

La foudre est un phénomène perturbateur important pour le fonctionnement de toutes les installations électriques, pour assurer la protection contre ce phénomène on utilise le parafoudre ZnO. Ce dernier offre les meilleures caractéristiques électriques grâce à la technologie des varistances à base d'oxyde de zinc.

Dans ce chapitre on a donné des informations d'ordre général sur les parafoudres à base d'oxyde métallique et sur les tendances mondiales à les utiliser comme moyen de protection contre toute forme de surtension pouvant affecter les réseaux de transport afin de veiller au bon fonctionnement des systèmes et d'offrir au client la garantie sur la continuité de service.

CHAPITRE 2 : Etat de l'art.

2.1 Introduction:

L'étude de l'état des parafoudres ZnO à un moment ultérieur et dans un environnement physique spécifique est importante pour évaluer leur performance et leur durabilité dans des conditions réelles. Cette étude permet de comprendre comment les parafoudres ZnO réagissent aux surtensions au fil du temps et dans des environnements réels, ce qui peut avoir un impact sur leur efficacité et leur fiabilité. [14]

L'évaluation de l'état des parafoudres ZnO peut inclure des tests de vieillissement accéléré pour simuler les conditions de fonctionnement à long terme. Cela peut permettre de déterminer comment les parafoudres résistent à l'usure et aux effets du temps, tels que la dégradation des matériaux ou la diminution des performances.

De plus, l'étude de l'environnement physique dans lequel les parafoudres ZnO sont installés est également cruciale. Des facteurs tels que la température, l'humidité, la pollution atmosphérique et les vibrations peuvent affecter les performances des parafoudres. En comprenant comment ces facteurs environnementaux influencent les parafoudres ZnO, il est possible de concevoir des dispositifs plus résistants et de garantir une protection efficace contre les surtensions.

Ce chapitre aborde les paramètres électriques des parafoudres ainsi que les aspects généraux du phénomène de pollution de la partie isolante. Il examine également les différentes méthodes numériques utilisées pour mener des études dans ce domaine, en se basant notamment sur le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS 5.6.

2.2 Paramètres électriques de parafoudre

2.2.1 Tension normale du parafoudre

La tension normale d'un parafoudre est la valeur spécifiée maximum de la tension efficace à fréquence industrielle et elle ne présente aucun risque d'amorçage [14].

2.2.2 Courant de décharge

Le courant de décharge est le courant écoulé par le parafoudre après un amorçage et provenant d'une onde de surtension propagée par une ligne.

2.2.3 Courant de suite

Le courant de suite d'un parafoudre est le courant débité par le réseau et écoulé par le parafoudre après le passage du courant de décharge.

2.2.4 Tension résiduelle d'un parafoudre

La tension résiduelle d'un parafoudre est la tension qui apparaît entre les bornes d'un parafoudre pendant le passage du courant de décharge.

2.2.5 Tension d'amorçage à fréquence industrielle d'un parafoudre

La tension d'amorçage à fréquence industrielle d'un parafoudre est la valeur efficace de la plus basse tension à fréquence industrielle qui, appliquée entre bornes d'un parafoudre, provoque l'amorçage du parafoudre.

2.2.6 Tension d'amorçage au choc d'un parafoudre

La tension d'amorçage au choc d'un parafoudre est la valeur la plus élevée de la tension le qui est atteinte avant le passage du courant de décharge quand une onde de forme et de polarité données est appliquée entre les bornes d'un parafoudre [14].

2.3 Court-circuit dans un parafoudre

Puisque le risque d'échec n'est pas négligeable, des conditions spécifiques sont placées sur les parafoudres d'assurer cela que les échecs possibles ne donneront pas des dommages consécutifs sur d'autre équipement, ou, mener au risque inacceptable pour les personnes. Des essais, où les pièces internes sont délibérément court-circuitées, sont également exigés, donc, dans les normes. De point de vue de conception, le but est à s'assurer que l'enveloppe d'un parafoudre n'est pas dispersée après une surcharge possible [14].

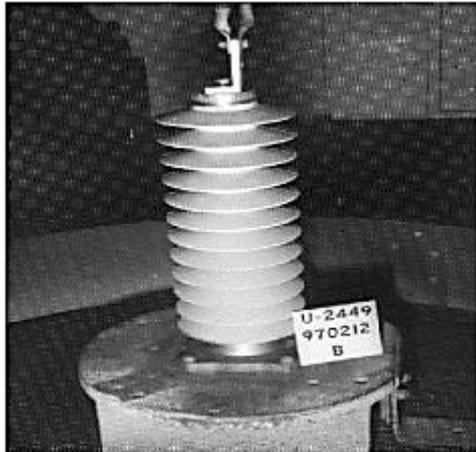


Figure. 14. Un parafoudre avant un essai de court-circuit.



Figure. 15. Le même parafoudre après un essai de court-circuit.

2.4 Pollution des parafoudres

La pollution constitue un problème majeur dans la dégradation de l'isolement des ouvrages électriques [24]. Portés par le vent et déposés sur la surface isolante des parafoudres, et en présence d'humidité, les divers dépôts polluants deviennent plus ou moins conducteurs et par la suite, le courant de fuite extérieure devient relativement important. Ces couches de pollution peuvent

engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle des surfaces isolantes et par suite la diminution de la tension de contournement des parafoudres.

2.4.1 Sources et nature de pollution

Par pollution, on entend les particules solides qui se trouvent dans l'atmosphère et qui se déposent sur la surface du parafoudre. Cette pollution constitue l'origine du problème. A ce titre, des efforts considérables ont été menés afin de la classifier quantitativement et qualitativement. La nature de la pollution dépend de la situation géographique et climatique. Les divers types de pollution atmosphérique les plus fréquemment observés peuvent être selon leurs origines. D'après la norme CEI 815, nous citons les principales sources de pollution comme (la figure. 16) [24].

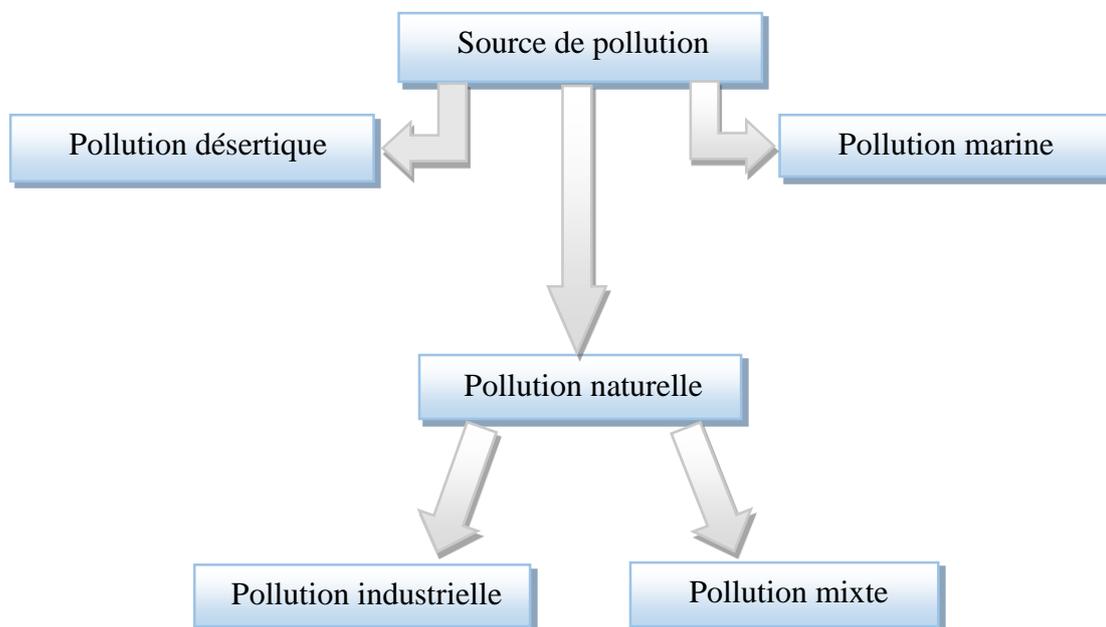


Figure. 16. Source de pollution

2.4.2 Classification des sites pollués

La composition de cette pollution est variable suivant les sources de contamination et les conditions auxquelles sont soumis les parafoudres. On peut classer les degrés de la pollution suivant quatre niveaux selon la CEI815 (Tableau. 3.) qui sont : Faible, Moyen, Fort, Très fort.

Tableau. 3. Classification de la pollution selon le type d'environnement [24]

Niveaux de pollution	Exemples d'environnements typiques
Faible	<ul style="list-style-type: none"> - Zones sans industries et avec faible densité d'habitations équipées d'installations de chauffage. - Zones avec faible densité d'industries u d'habitations mais soumises fréquemment aux vents et/ou pluies. - Régions agricoles. - Régions- montagneuses.
Moyen	<ul style="list-style-type: none"> - Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ou avec une densité moyenne d'habitations équipées d'installations de chauffage. - Zones à forte densité d'habitations et/ou d'industries mais soumises fréquemment aux vents et/ou à des chutes de pluies. - Zones. Exposées au vent de mer, mais pas trop proches de la côte
Fort	<ul style="list-style-type: none"> - Zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes villes avec forte densité d'installation de chauffage polluantes. - Zones situées près de la mer, ou en tout cas exposées à des vents relativement forts venant de la mer.
Très fort	<ul style="list-style-type: none"> - Zones généralement peu étendues, soumises à des poussières conductrices et à des fumées industrielles- produisant des dépôts conducteurs particulièrement épais. - Zones généralement peu étendues, très proches de la côte et exposées aux embruns eu aux vents très forts et polluants venant de la mer - Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant du sable et du sel et soumise à une condensation régulier.

2.4.3 Conséquences de la pollution

Lorsque le parafoudre est propre ou recouvert d'une couche de pollution sèche, un très faible courant capacitif circule à sa surface. Ceci est dû aux très faibles valeurs des conductivités volumiques de l'air, de l'isolant solide et de la couche de pollution. On obtient ainsi une répartition électrostatique du potentiel électrique. Par contre, lorsque la couche de pollution est humidifiée,

elle devient le siège d'un courant de conduction de valeur relativement importante et la répartition du potentiel électrique diffère de la répartition électrostatique. La rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite. Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis le parafoudre [24].

2.5 Méthodes de résolutions des modèles mathématiques

La présentation du comportement d'un dispositif microsysteme est faite de manière générale par un système d'équations différentielles aux dérivées partielles. La solution de ce système d'équations demande en général des méthodes de résolution présentant des avantages et des inconvénients. Ces derniers peuvent être classés en deux catégories les méthodes analytiques et les méthodes numériques [14].

2.5.1 Méthodes analytiques

Les solutions analytiques, basées essentiellement sur la méthode de séparation de variables, méthode des séries exponentielles, la méthode intégrale et les méthodes de transformation demeurent limitées pour les géométries complexes et le comportement non linéaire du phénomène mis en jeu. Vu la complexité des équations aux dérivées partielles, la solution analytique est souvent difficile à trouver. On cherche donc des méthodes permettant d'approcher le comportement du système.

2.5.2 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.

2.5.2.1 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.

2.5.2.2 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 [14].

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.). [25]

2.5.2.2.1 Etapes de la méthode des éléments finis

C'est la méthode la plus utilisée vue sa généralisation et sa capacité de résoudre les problèmes les plus complexes, le système d'équations algébriques est obtenu en appliquant la méthode des résidus pondérés, ou la méthode variationnelle, la résolution du système permet d'obtenir la solution du problème original. La méthode des éléments finis peut être résumée dans les étapes suivantes [26] :

- discrétisation du domaine ;
- formulation intégrale des équations différentielles partielles ;
- choix des fonctions d'interpolation ;
- formation des matrices et vecteurs élémentaires ;
- Assemblage ;
- résolution du système algébrique globale.

Actuellement, il existe différents logiciels qui utilisent cette méthode comme le FEMLAB, Maxwell, Flux2D et FEMM. Dans la suite de ce travail, nous avons utilisé le logiciel COMSOL MULTIPHYSICS version 5.6.

2.5.2.2.2 Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis est la plus utilisée car :

- Elle peut traiter des problèmes géométriques complexes.
- Elle couvre de nombreux domaines de la physique.
- Les moyens informatiques actuels (puissance des calculateurs, outils de visualisation) la rendent facile de mise en œuvre.
- De nombreux logiciels généraux ou dédiés sont disponibles sur le marché.
- Le temps de calcul est relativement avantageux.

L'avantage majeur de la méthode des éléments finis, par rapport aux autres méthodes provient du fait que dans cette méthode, chaque élément peut avoir des caractéristiques électriques et géométriques particulières et indépendantes des autres éléments. Ainsi il est possible de résoudre de manière relativement efficace des cas de géométrie complexe présentant des propriétés différentes, Cependant l'inconvénient majeur de cette méthode est la difficulté à modéliser des systèmes à domaine ouvert. [27]

2.6 Présentation du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS

Le logiciel COMSOL, anciennement appelé FEMLAB, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques (Électromagnétiques, électrostatiques, thermiques...etc.) [14].

En effet, cet outil de simulation numérique permet de traiter de nombreux problèmes couplés grâce à sa banque intégrée d'équations physiques très variées (électrothermique, thermo fluidique,... etc.) décrits par les équations aux dérivées partielles [14]. Cette approche autorise une simulation numérique au plus près des systèmes réels.

Le logiciel COMSOL MULTIPHYSIQUES possède un environnement de programmation (COMSOL Script) dans lequel il est possible de modifier le maillage et les équations du problème. Ce logiciel possède de nombreux systèmes de résolution dits «solveurs», pouvant être linéaires ou non, paramétriques ou encore dépendants du temps [14]. En effet, les différentes étapes proposées par cet outil sont :

- La Construction de la géométrie : la première étape est d'extruder une géométrie 2D vers une géométrie 3D.

- Le Maillage de la géométrie : Le maillage des domaines est automatique. Il est possible de le raffiner globalement ou de manière localisée.
- Définition de la physique : définition des constantes et des expressions.
- Définition des propriétés des matériaux : une bibliothèque de matériaux est à disposition dans COMSOL MULTIPHYSICS.
- Les conditions aux limites : on impose des conditions sur certaines frontières.
- Exploitation des résultats post-traitement : Lorsque le programme est convergé vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de post processing, qui permet d'analyser les résultats.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes propriétés électriques du parafoudre ZnO ainsi que les contraintes externes qui peuvent influencer son fonctionnement. Nous aborderons maintenant les aspects importants liés aux contraintes de pollution sur les parafoudres en composites.

La pollution peut provenir de différentes sources, qu'elles soient naturelles, industrielles ou mixtes. Peu importe l'origine de la pollution, il est essentiel de quantifier son impact en utilisant des logiciels de simulation numérique basés sur la méthode des éléments finis.

En utilisant cette approche, nous pourrions évaluer et analyser les effets de la pollution sur les performances du parafoudre. Les simulations permettront de déterminer la distribution du champ électrique, du potentiel et d'autres paramètres importants. Cela nous aidera à comprendre comment la pollution peut affecter la fiabilité et l'efficacité du parafoudre en composite.

CHAPITRE 3 :

Résultats et Discussions

3.1 Introduction

Le calcul du champ et du potentiel électrique dans un système de haute tension est complexe en raison de plusieurs facteurs. La géométrie complexe, les équations aux dérivées partielles, les conditions aux limites, les formes irrégulières des diélectriques et la présence d'une couche conductrice rendent les calculs difficiles. Des méthodes numériques et des techniques avancées de modélisation et de simulation sont nécessaires pour obtenir des résultats précis.

Dans la première partie de ce chapitre, nous étudierons la variation du potentiel et du champ électrique le long du parafoudre en fonction de différentes formes de tension. Dans la deuxième partie, nous analyserons l'influence de la couche de pollution, constituée de gouttes d'eau, ainsi que de la constante diélectrique relative ϵ_r du matériau ZnO, sur la répartition du potentiel et du champ électrique le long du parafoudre.

3.2 Le choix d'un parafoudre de simulation

Dans ce travail, nous avons choisi d'étudier un parafoudre de 110 kV afin d'observer clairement les phénomènes électriques qui se produisent dans le réseau haut tension. En choisissant un parafoudre de 110 kV, nous serons en mesure d'analyser en détail la distribution du potentiel et du champ électrique le long de celui-ci, ainsi que les effets de différentes formes de tension et de la présence de la couche de pollution. Cette étude nous permettra de mieux comprendre le comportement du parafoudre dans des conditions réelles et d'optimiser sa conception et son fonctionnement. [28]

3.2.1 Géométrie de parafoudre utilisé

Dans ce travail, la taille totale de parafoudre est de 73.5 cm environ, il comprend 15 grandes ailette de protection de diamètre de 5 cm, ainsi qu'un nombre 14 de petites ailette de protection de diamètre de 3.5 cm, le diamètre de la fibre en verre est environ 1.5 cm, la longueur de varistance est environ 5.2 cm et sa largeur est environ 8 cm, la longueur d'entrefer est environ 0.53 cm et sa largeur est environ 8 cm et le diamètre de silicone est 0.5 cm.

3.2.2 Présentation et dimensionnements du modèle

Le processus du modèle (2D) a été simulé sous auto CAD. La définition de la géométrie du modèle s'est effectuée dans COMSOL MULTIPHYSICS grâce à son module d'import (les figures (17, 18)).

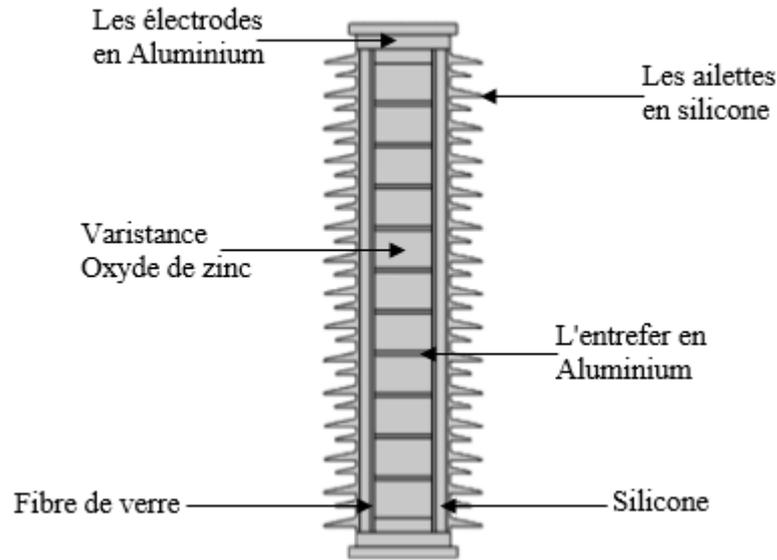


Figure. 17. Modèle géométrique de parafoudre.

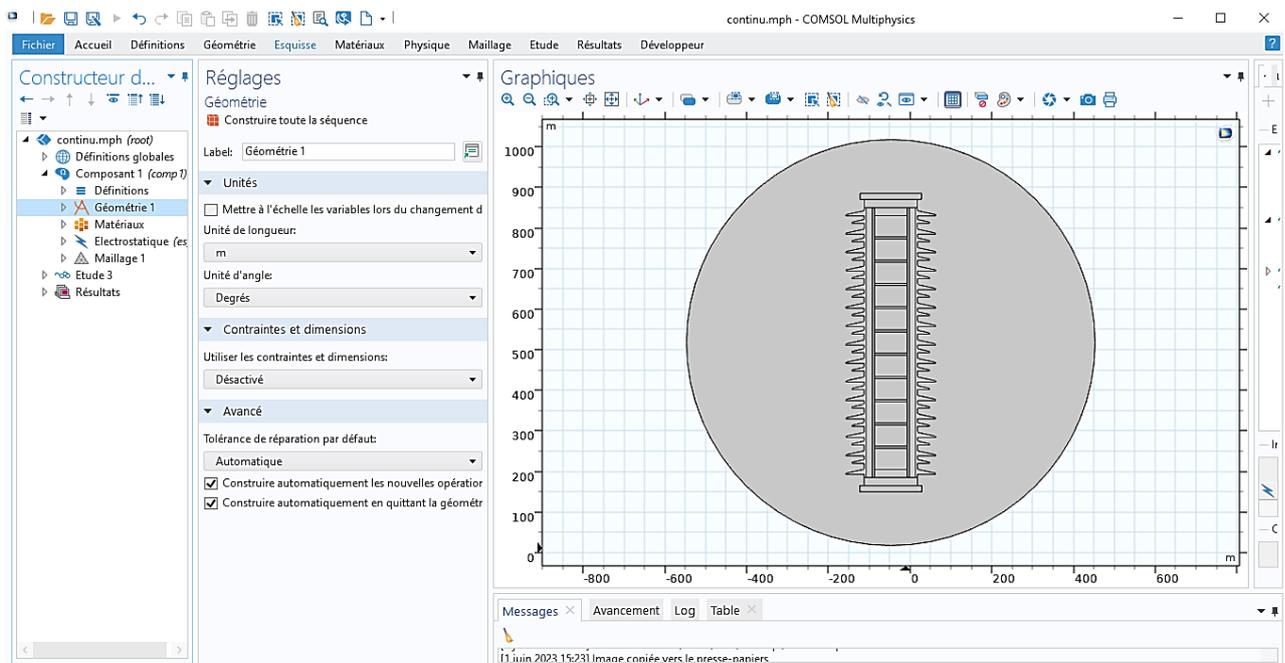


Figure. 18. Définition de la géométrie sous COMSOL MULTIPHYSICS en 2D.

3.2.3 Propriétés matérielles

Chaque région du modèle a été spécifiée avec les propriétés du matériau appropriées décrites dans la figure. Les deux matériaux diélectriques ont été assignés, à savoir la silicone pour la gaine de parafoudre, ainsi que les fibres de verre pour le noyau (FRP) avec une faible conductivité $\sigma = 1,0 \times 10^{-14}$ S/m. La permittivité relative des gouttes d'eau a été estimée à 81. La conductivité de la goutte d'eau a été fixée à $5.5 \mu\text{S/m}$, une valeur adoptée à partir des mesures de laboratoire rapportées dans. 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. 4).

Tableau. 4. Propriétés du matériau utilisé.

Domaine	Permittivité relative ϵ_r	Conductivité σ (S).
ZNO	100	PV^{q-1}
Silicone (Les ailettes)	11.7	10^{-12}
Air	1	10^{-15}
Electrodes en Aluminium	1	$3.774 \cdot 10^7$
Silicone	1	10^{-14}
Fibre de verre	4.2	10^{-14}

V : tension [V] ; P et q sont des constants.

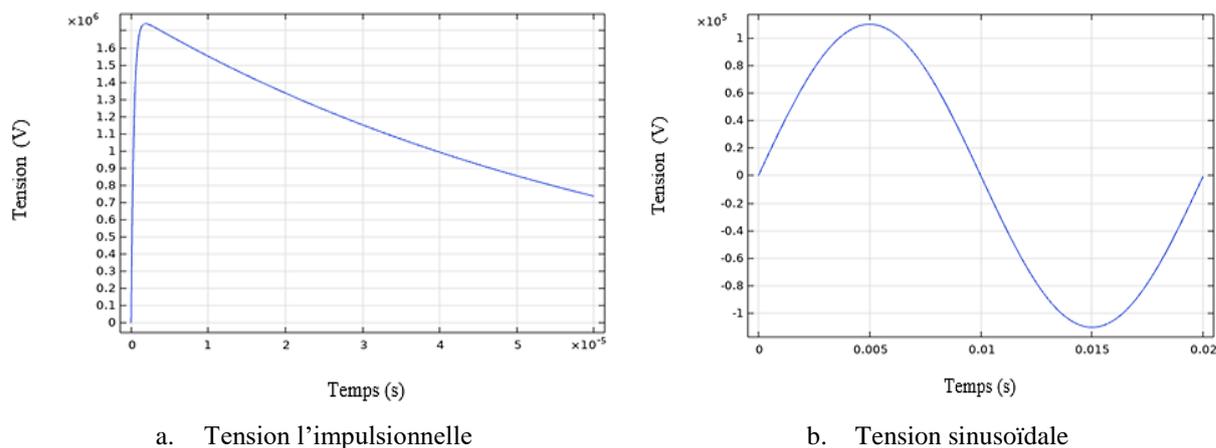
3.2.4 Conditions aux limites

Pour toutes les simulations, la tension appliquée aux bornes du parafoudre correspond à la tension de service entre phase et terre en considérant l'isolant soumis à de très fortes pollutions. L'une des électrodes du parafoudre 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 du parafoudre 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 du parafoudre. La tension appliquée est donc égale à 110 kV, correspondant à la tension de service du système étudié.

Les études sur la répartition de la tension et du champ électrique le long d'un parafoudre dépendent du type de tension appliquée. Voici quelques formes de tension couramment étudiées : L'équation est :

- $V = 1800 \cdot (e^{-0.01486 \cdot 10^6 \cdot t} - e^{-2.80145 \cdot 10^6 \cdot t})$ kV Pour la tension l'impulsionnelle ;
- $V = 110 \cdot \sin(314 \cdot t)$ kV Pour la tension sinusoïdale ;
- $V=110$ kV Pour la tension continue.

La figure (19) illustre l'allure des tensions appliquées.



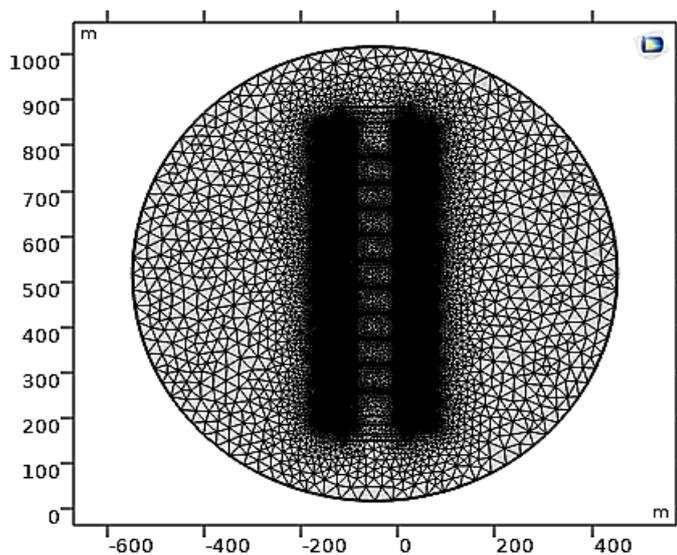
a. Tension l'impulsionnelle

b. Tension sinusoïdale

Figure. 19. La forme de tension appliquée.

3.2.5 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. 20.) 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. 20.** Maillage de parafoudre ZnO.

Le but de ce travail est l'étude la distribution de la tension et du champ électrique à la surface du parafoudre en utilisant la méthode des éléments finies. Les équations de bases utilisées pour

calculer le potentiel (champ électrique) sont les équations de MAXWELL [26]. Pour le modèle électrostatique et en prenant en considération la charge d'espace on utilise l'équation de Poisson :

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (7)$$

Si la charge d'espace est négligée l'équation de Poisson prend la forme de l'équation de Laplace

$$\nabla^2 V = 0 \quad (8)$$

Dans le domaine électrostatique, la conductivité électrique $\sigma=0$ pour les zones isolantes et $\sigma=\infty$ pour les zones conductrices, donc la distribution du potentiel électrique dans le domaine électrostatique est obtenue par la résolution de l'équation de Laplace qui peut être réécrite comme:

$$\nabla \varepsilon \nabla V = 0 \quad (9)$$

$$-\nabla \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V) - \nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (10)$$

3.3 Résultats et discussions

3.3.1 Études de la distribution de tension et champ électrique

On lance la simulation. Les figures (21 et 22) représentent les résultats de simulation pour la tension électrique et les lignes équipotentielles pour un parafoudre. D'après les résultats de simulation, il semble que la répartition de la tension électrique autour du parafoudre ne soit pas uniforme. Cela signifie que la tension varie à différents points de l'appareil. La zone proche de l'électrode HT (haute tension) est la plus contraignante, ce qui indique qu'elle est soumise à une tension plus élevée par rapport aux autres parties du parafoudre. Cela peut être dû à la proximité de la source de surtension ou à la configuration spécifique du dispositif. D'autre part, la tension près de l'électrode terre est presque nulle. Cela est attendu puisque l'électrode de terre est conçue pour décharger le courant de surtension à la terre, fournissant ainsi un chemin de moindre résistance. En conséquence, la tension est dissipée et réduite à des valeurs négligeables près de l'électrode de terre.

Les figures (23 et 24) représentent les résultats de simulation pour champ électrique et Les lignes de champ. Le champ électrique est très concentré au niveau d'entrefer, car ce dernière a une conductivité plus grande que de varistance ZnO (figure 23). Les lignes de champ électrique généré par la configuration utilisée est très intense au niveau des électrodes (figure 24), et que la zone proche de l'électrode HT est la plus élevée alors que celle près de l'électrode terre la tension est presque nulle.

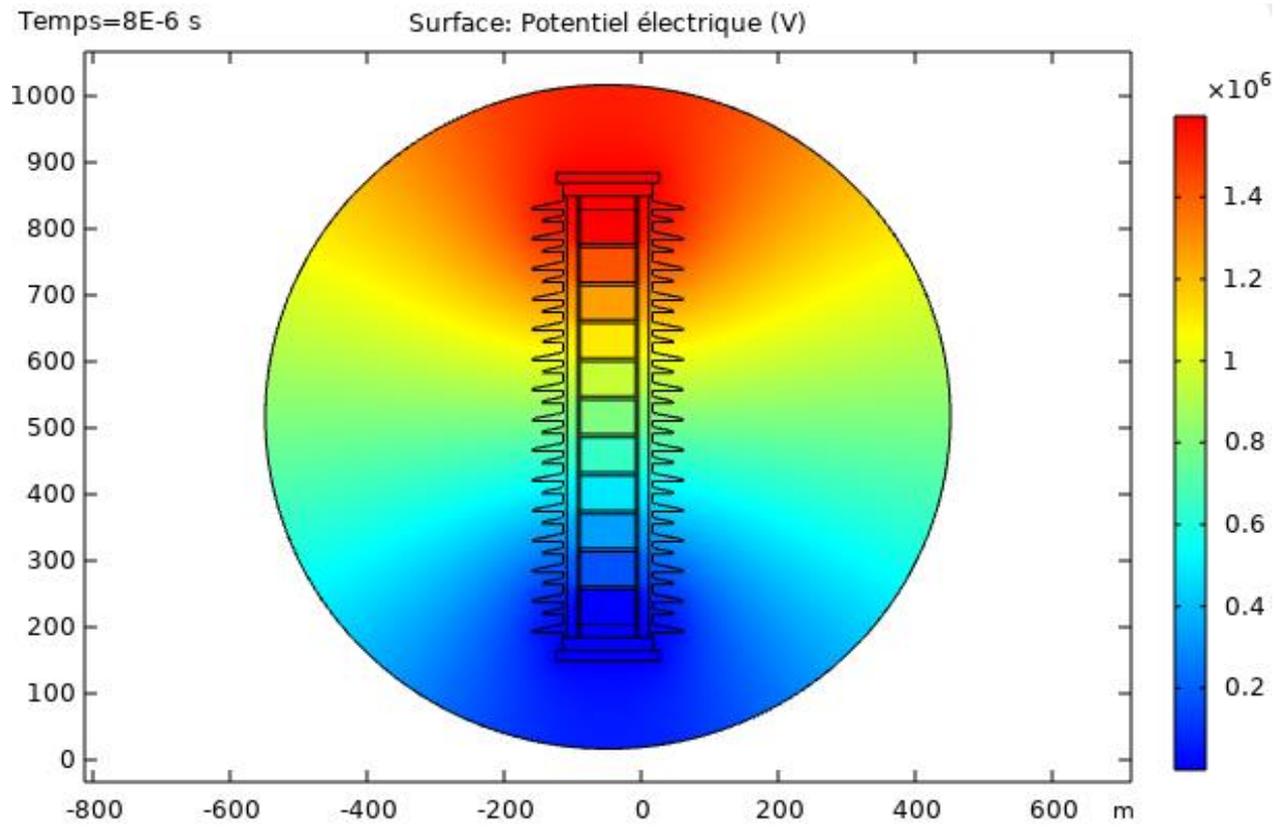


Figure. 21. Distribution de la tension électrique pour tension de choc.

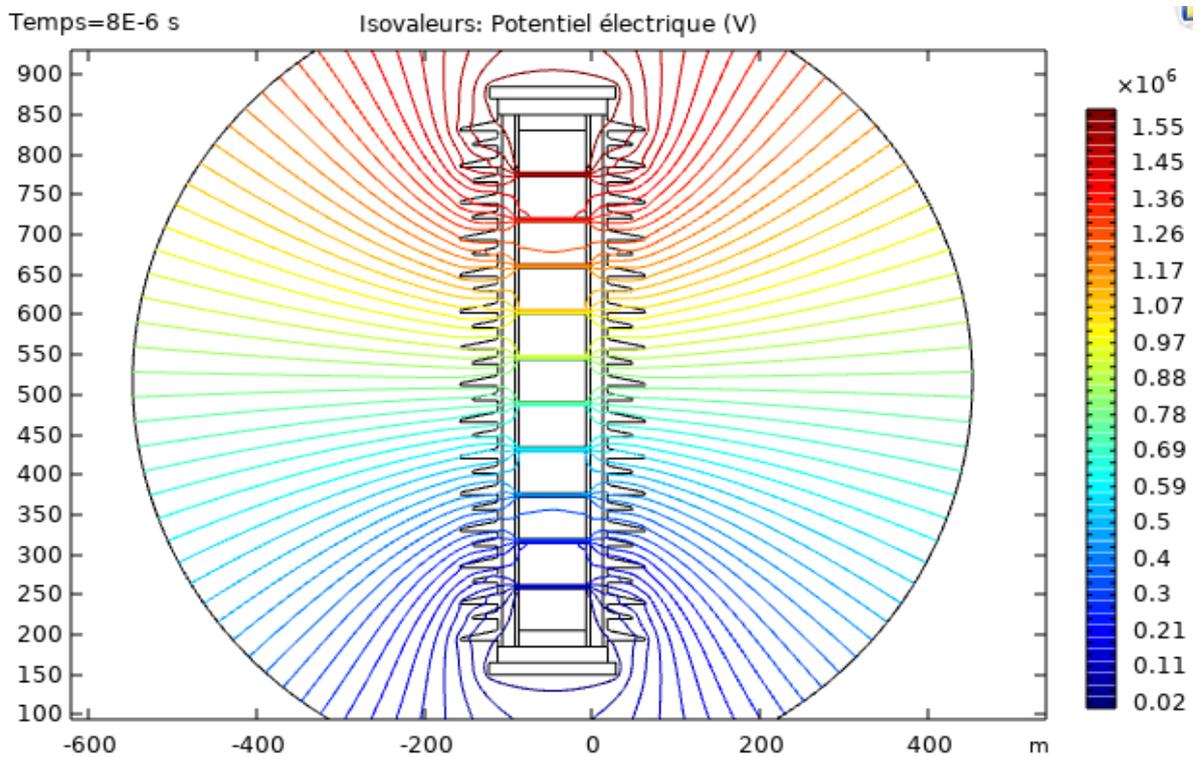


Figure. 22. Distribution des lignes équipotielles pour tension de choc.

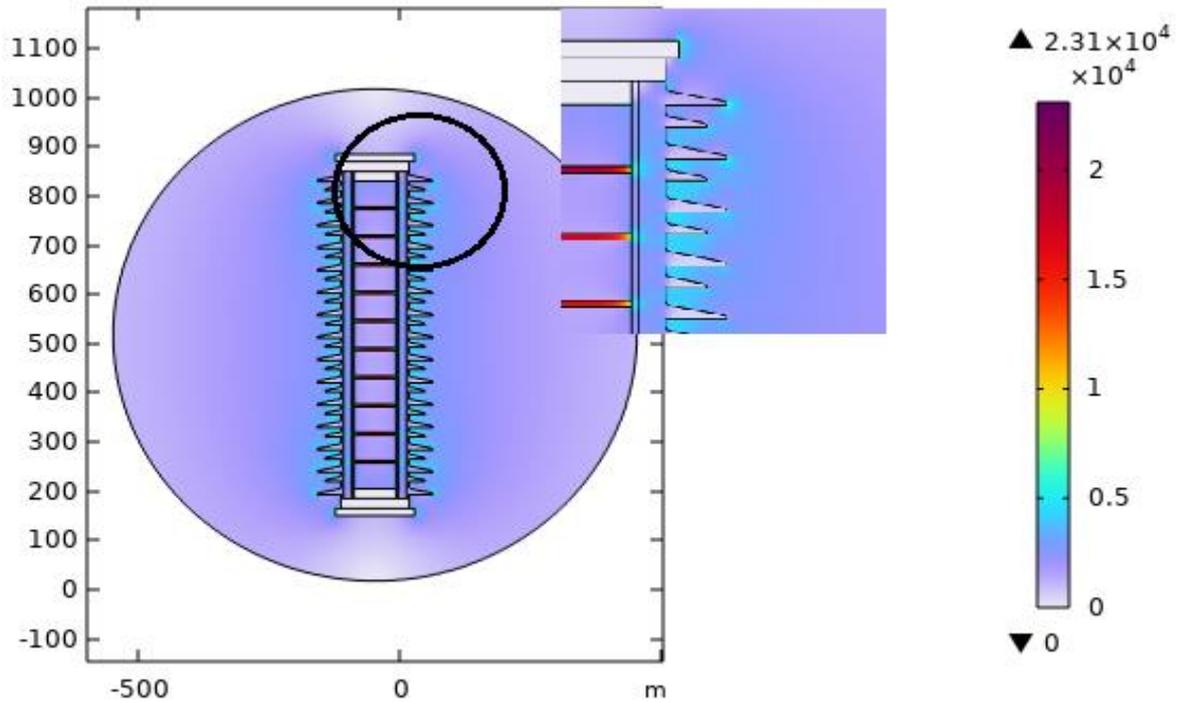


Figure. 23. Distribution du champ électrique du parafoudre à base d'oxyde de zinc.

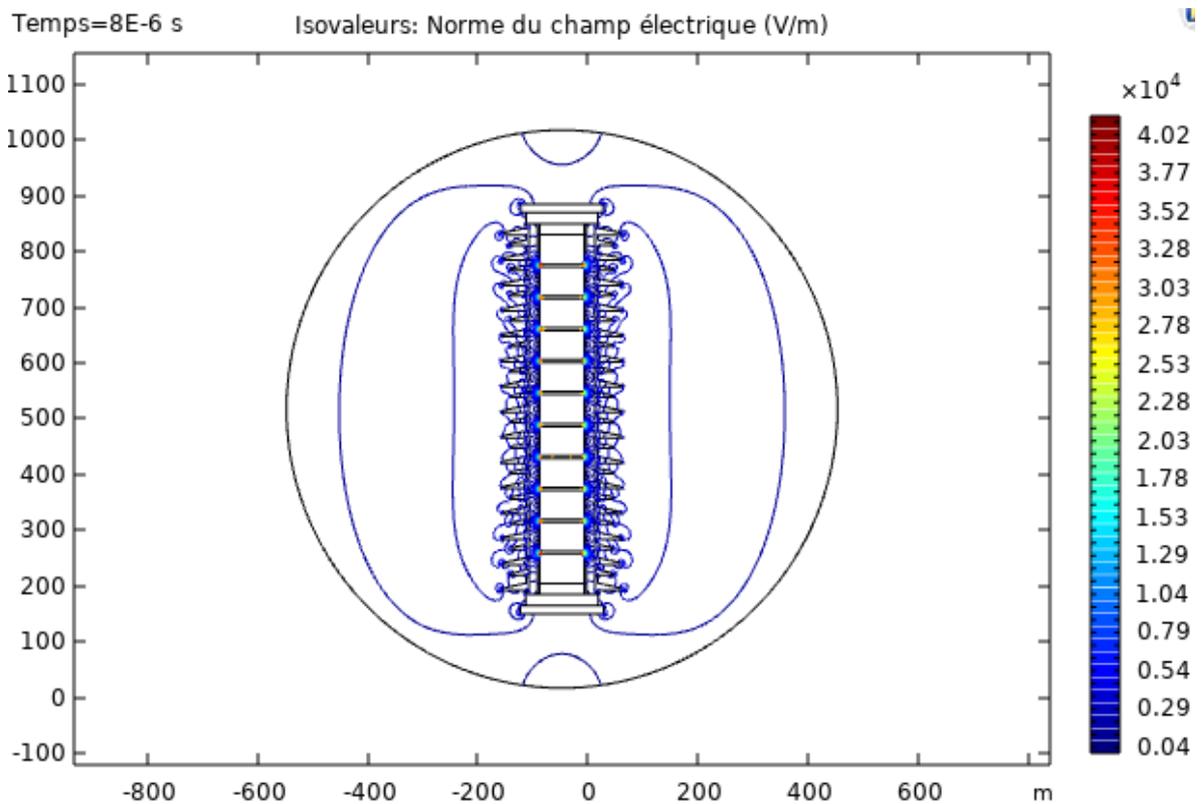


Figure. 24. Distribution des lignes de champ électrique

3.3.2 Études de la répartition de la tension et champ électrique axiale et sur ligne de fuite Sous différentes formes de tension

Les distributions du potentiel et du champ électrique ont été calculées le long d'un axe 0 et le long d'un axe de référence (35 mm) et la ligne de fuite donnée (figure. 25).

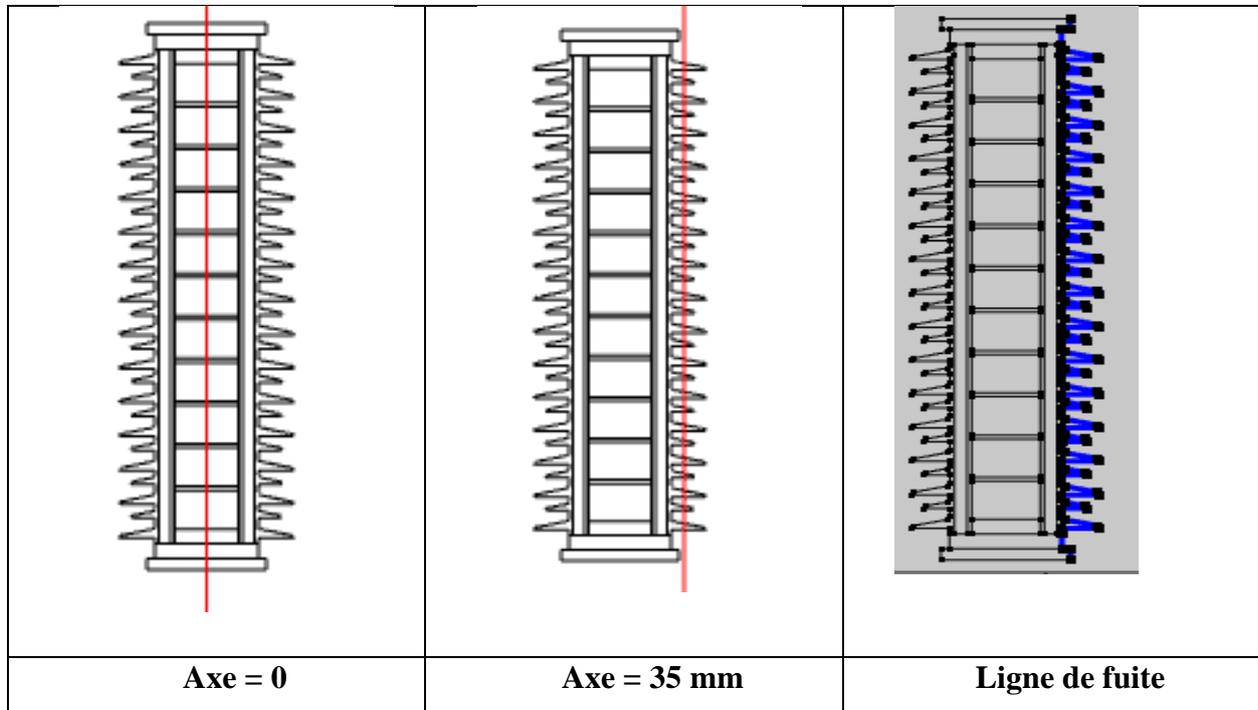


Figure. 25. Lignes de référence du potentiel et champ électrique.

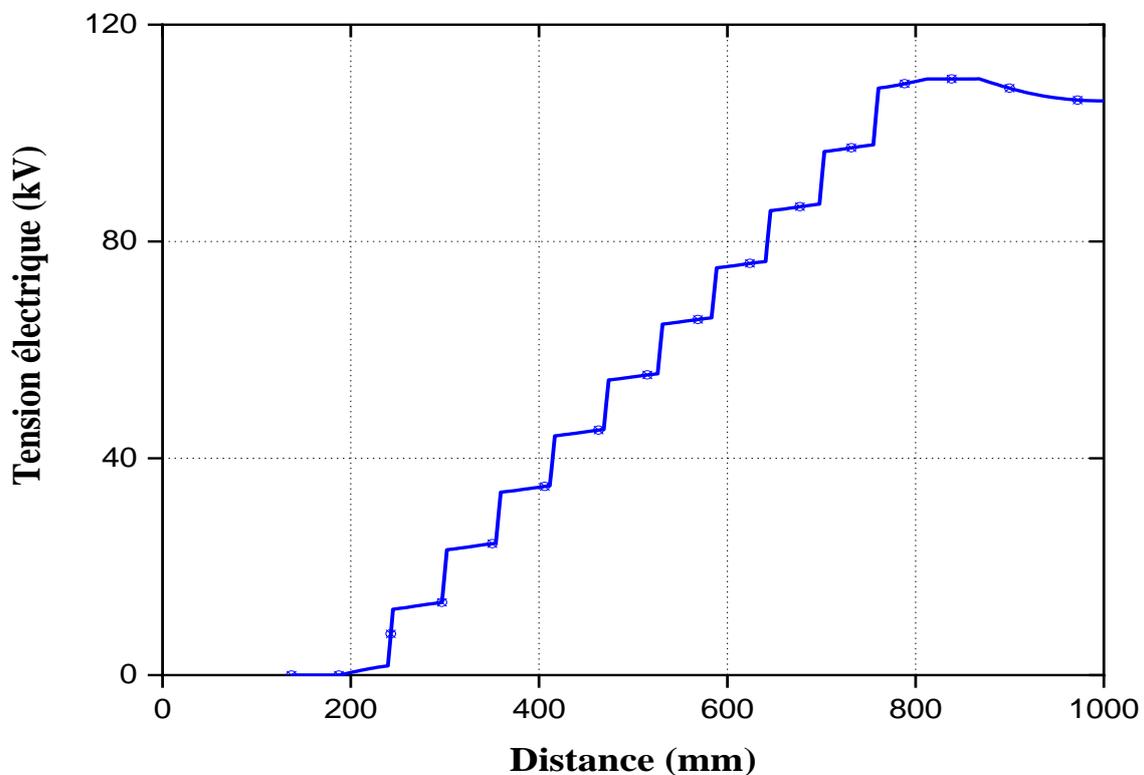
La figure (26) représente la répartition de la tension électrique sur les varistances (ZnO) différentes formes de tension ; on remarque, comme il était attendu que les valeurs maximales des potentiels sont près de l'électrode haute tension et commence à décroître jusqu'à son annulation quand on se rapproche de l'électrode de masse.

Pour la tension continue (DC) (figure 26.a) : Lorsque vous appliquez une tension continue à un parafoudre, la répartition de la tension électrique est relativement uniforme sur toute sa longueur. Quant à tension alternative (AC) (figure 26.b) : La répartition de la tension électrique dépend de plusieurs facteurs, notamment la fréquence de la tension et la longueur du parafoudre. En général, la tension augmente à mesure que vous vous rapprochez du point d'entrée de la tension sur le parafoudre. Et aussi pour Impulsions de tension transitoire (figure 26.c) : Les parafoudres sont conçus pour protéger les équipements contre les surtensions transitoires, telles que les surtensions induites par la foudre, la répartition de la tension électrique peut varier considérablement en fonction de la forme d'onde de l'impulsion et des caractéristiques du parafoudre. Des études sont menées pour analyser la réponse du parafoudre aux impulsions de tension et évaluer son efficacité en termes de réduction de la tension électrique.

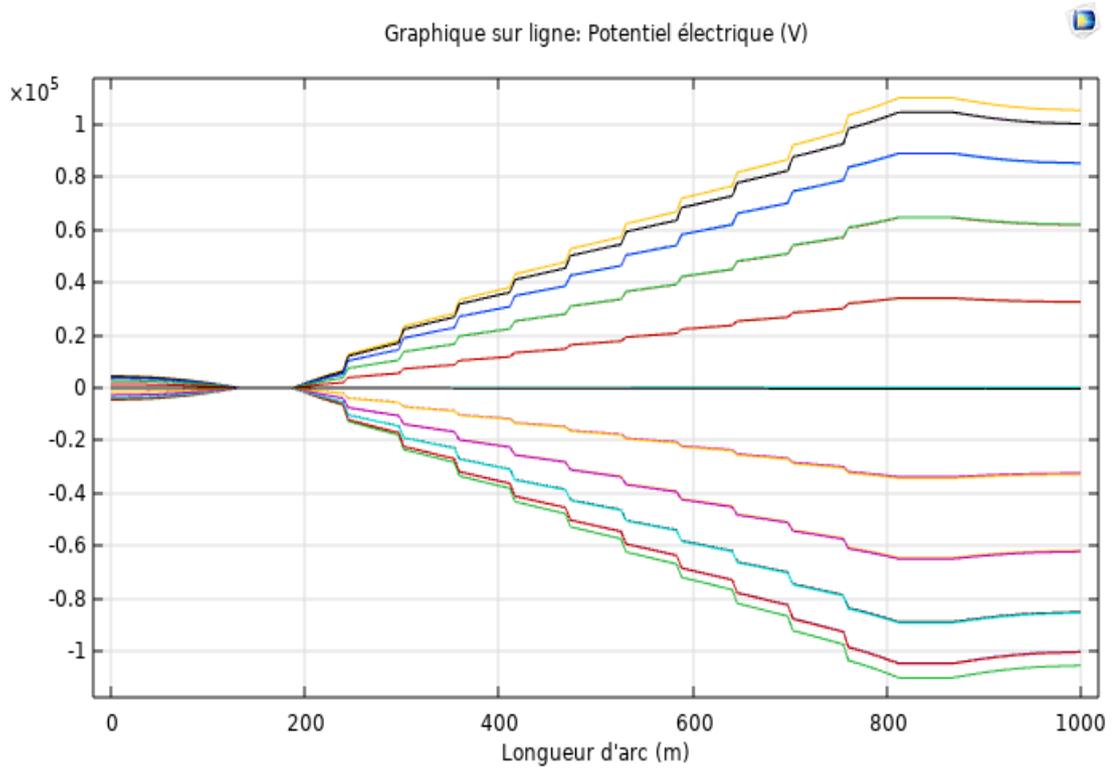
Les figures (27) montrent la répartition du champ le long du parafoudre pour les tensions Choc et AC pour l'axe de référence choisis (axe = 0). Il ressort des figures précédentes que la norme de champ électrique dans le cas de choc est différente de celle de la tension AC. Le champ électrique est plus élevé dans le cas d'une tension de choc appliquée et très concentré au niveau d'entrefer.

Donc on peut conclure que la distribution du potentielle et du champ électrique le long de parafoudre a peut influencée par le changement de tension appliquée.

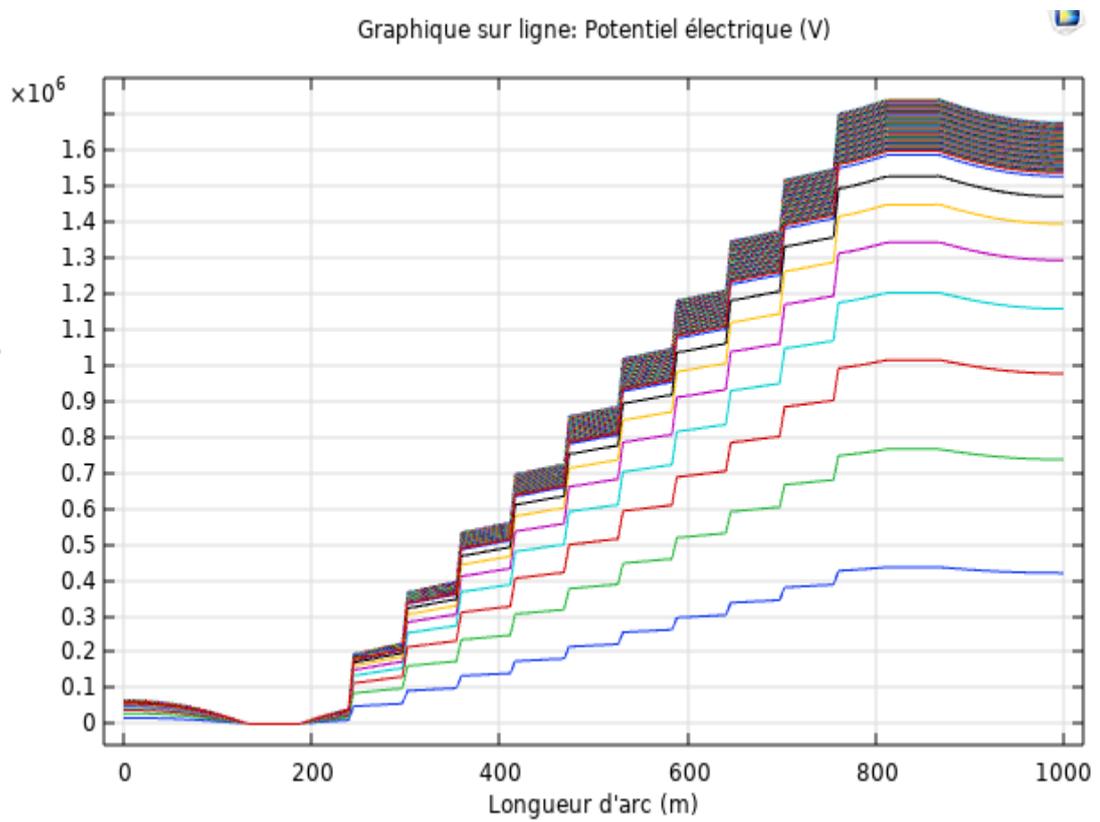
Ces études sur la répartition de la tension et du champ électrique sont essentielles pour concevoir et évaluer l'efficacité des parafoudres dans la protection des équipements contre les surtensions. Elles permettent de déterminer la répartition spatiale des contraintes électriques sur le parafoudre et d'optimiser sa conception pour une performance optimale.



a- Tension continue

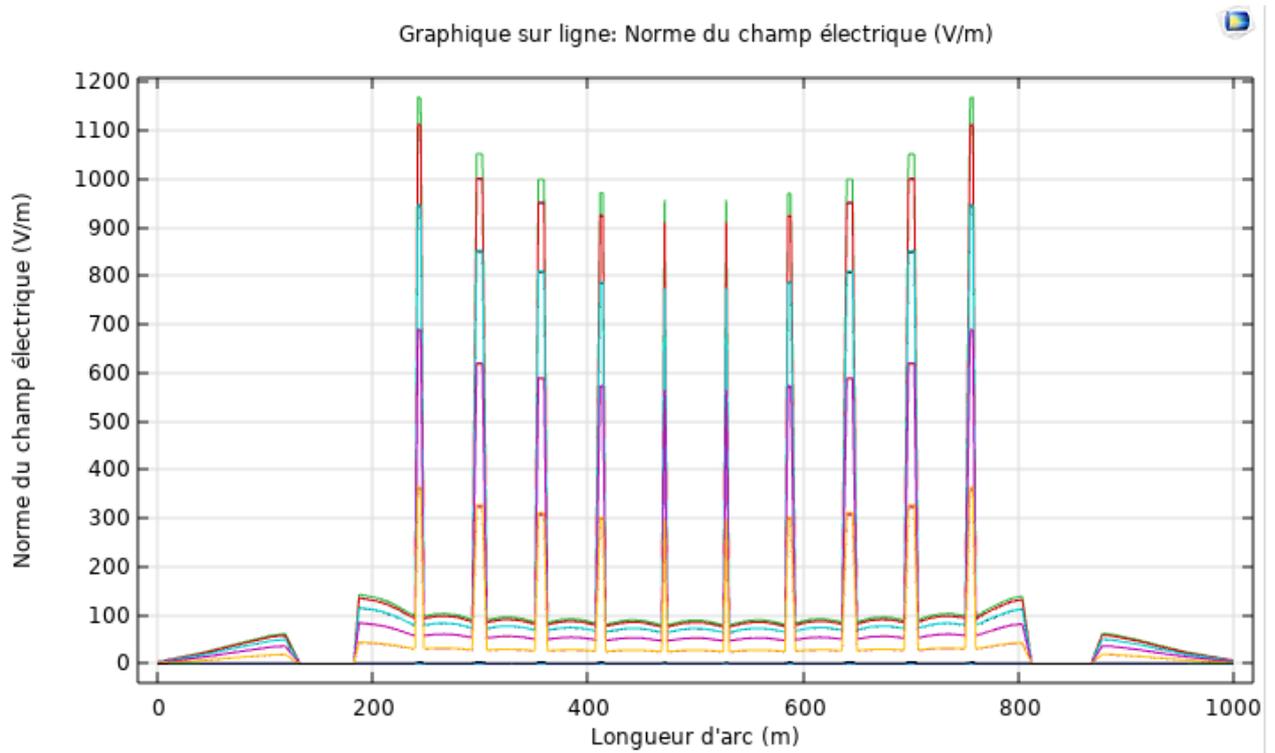


b- Tension dans le cas AC.

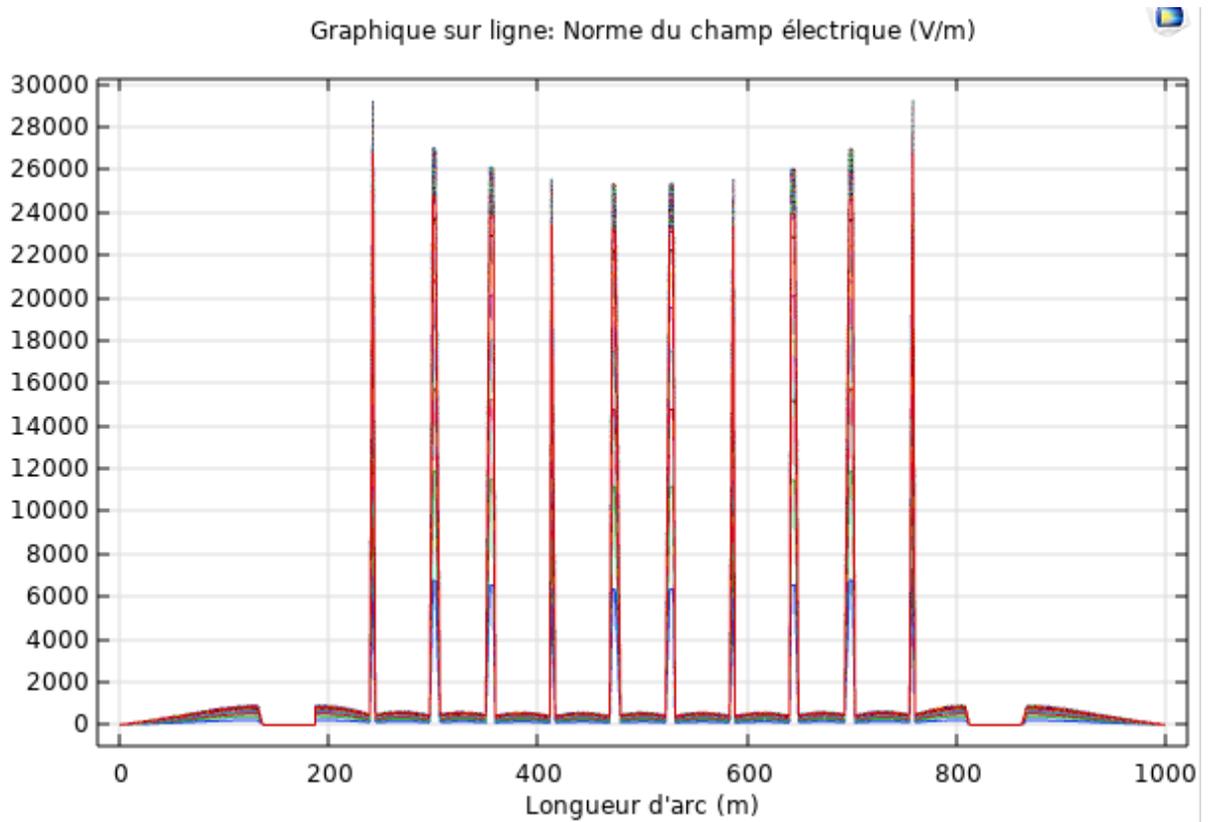


c- Tension dans le cas Choc.

Figure. 26. Distribution du potentiel électrique.



a- Champ dans le cas AC.

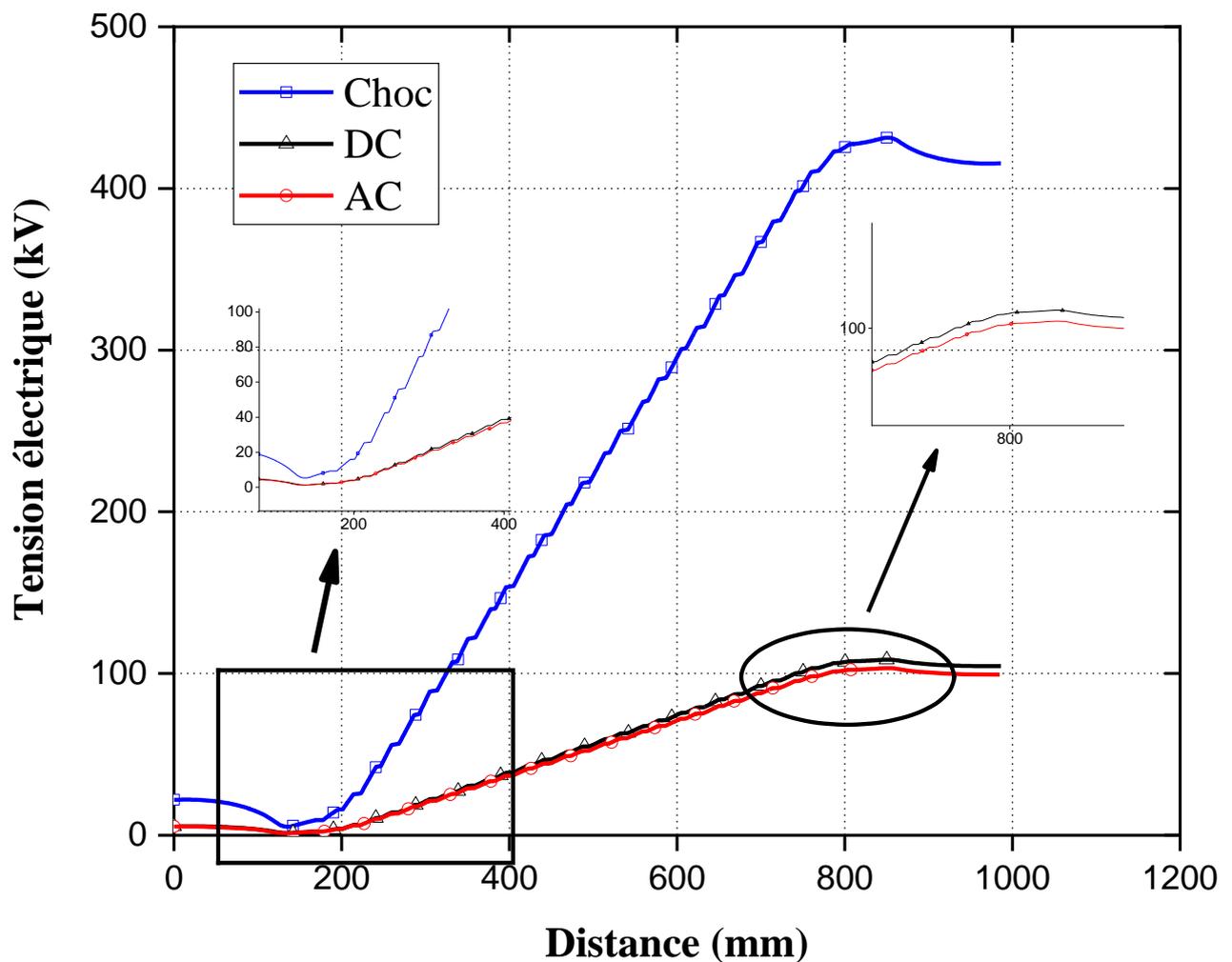


b- Champ dans le cas Choc.

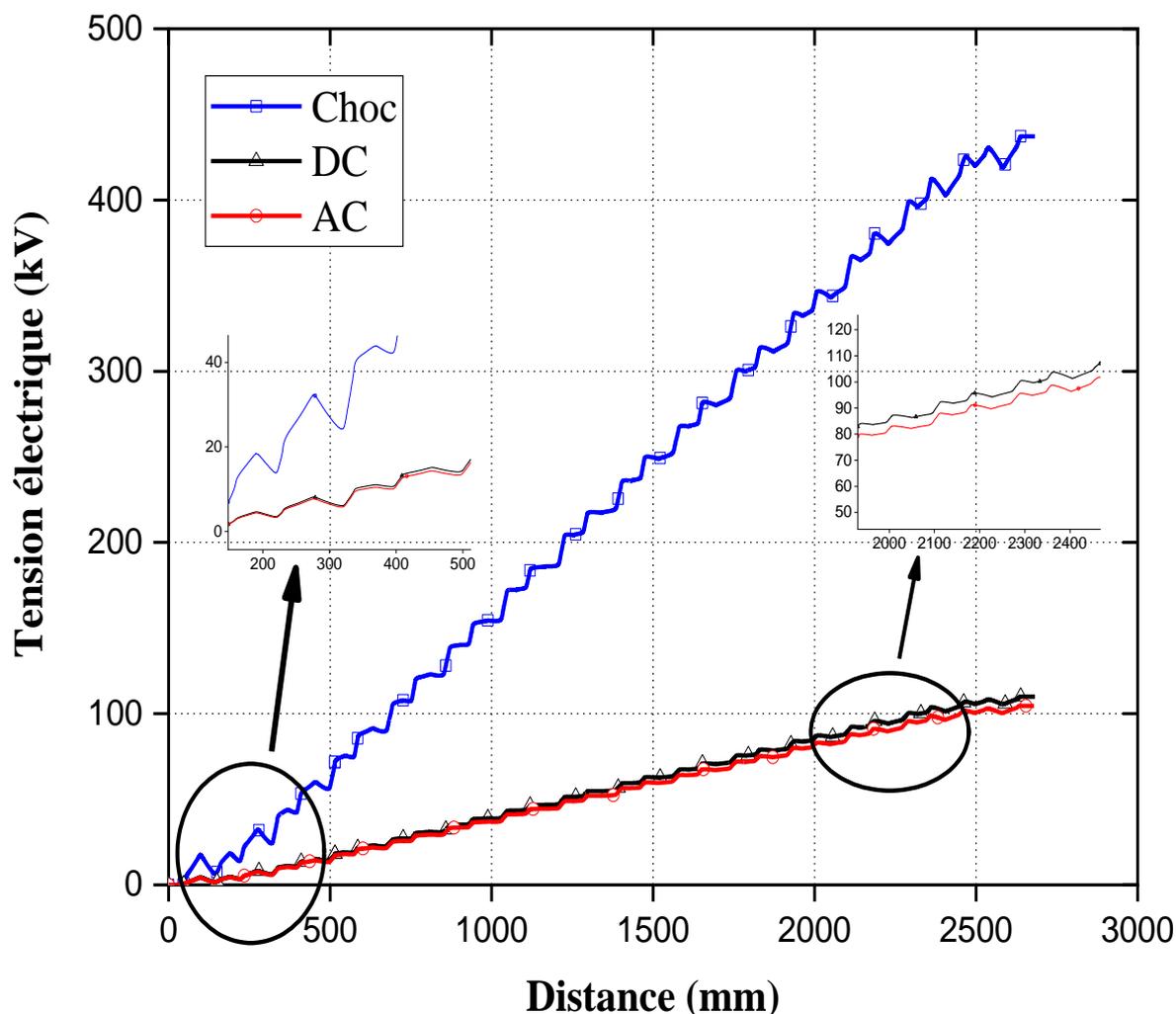
Figure. 27. Distribution du champ électrique.

La figure (28) représente la répartition de la tension du parafoudre en fonction de longueur du parafoudre pour les deux axes de référence choisis (ligne de fuite et l'axe 1). On remarque dans les deux cas, il est attendu que les valeurs minimales de tension soient près de l'électrode de masse et qu'elles augmentent jusqu'à la valeur maximale à mesure que l'on se rapproche de l'électrode de haute tension. Cela est dû à la dissipation de la tension excédentaire vers la terre par le biais de l'électrode de masse et à la concentration de la tension près de l'électrode de haute tension.

On observe que les répartitions de la tension dans les deux tensions (AC et DC) sont presque les mêmes, mais la répartition de la tension dans du parafoudre sous tension choc représente une différence remarquable est très élevé par rapport les deux tensions (AC et DC).



a. L'axe de référence 1



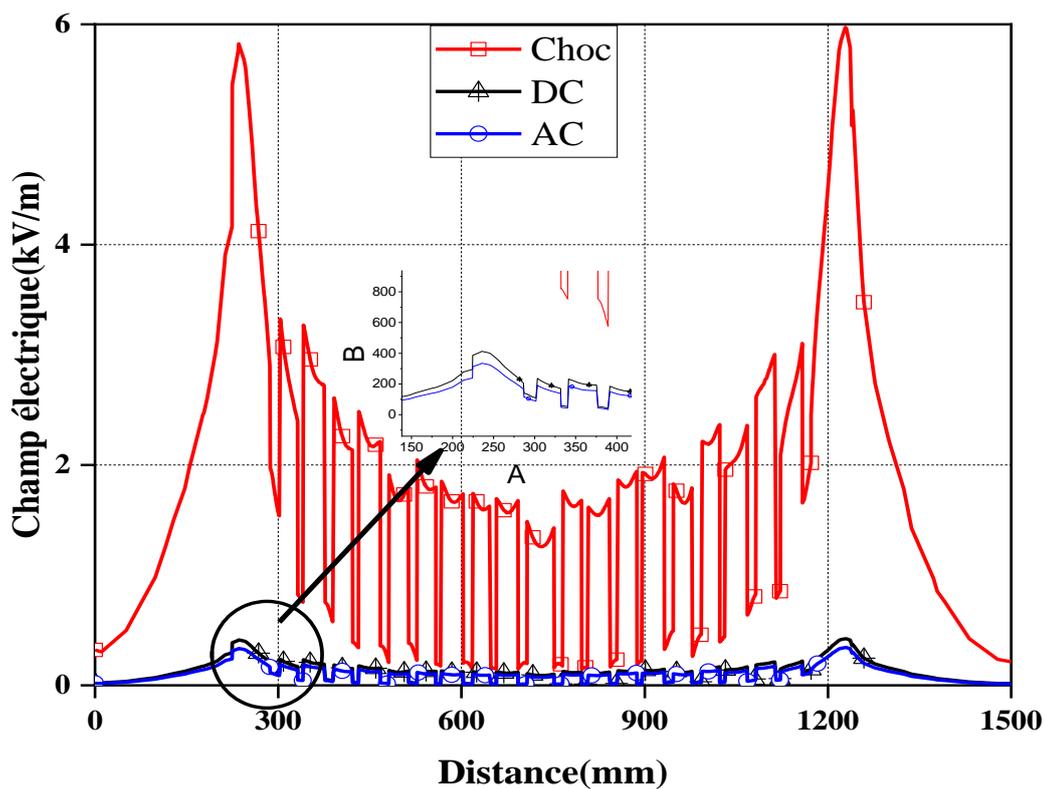
b. Ligne de fuite

Figure. 28. Distribution de potentiel électrique pour différentes formes de tension.

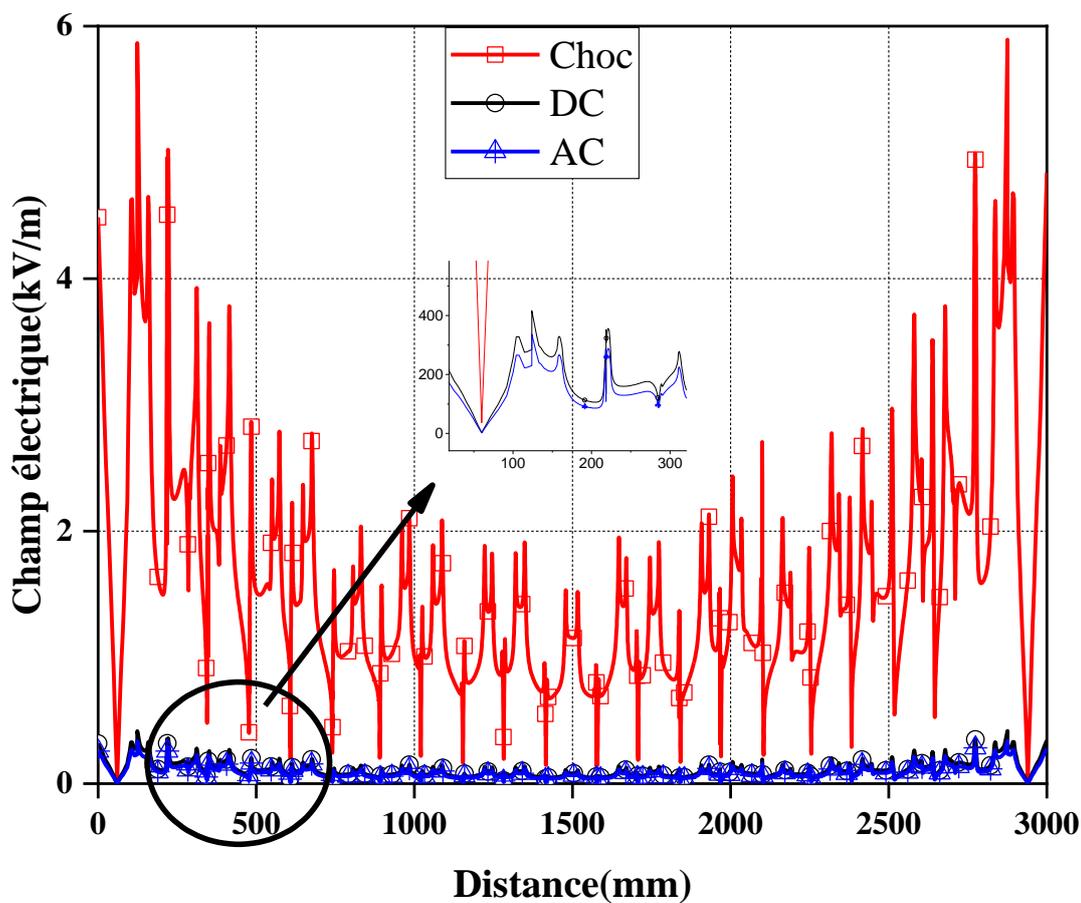
La répartition du champ électrique le long du parafoudre peut varier en fonction de la tension appliquée, ainsi que des axes de référence choisis.

Figures (29.a) et (29.b) montrent la variation du champ électrique des trois tensions appliquées (Choc, AC et DC) en fonction de la longueur du parafoudre pour les axes de référence.

On constate que le champ électrique pour un axe à distance est intense près de l'électrode active, il diminue au fur et à mesure qu'on se dirige dans l'intervalle [300 :1200] pour la ligne axiale et [500: 2500] pour la ligne de fuite et augmente rapidement vers l'électrode de terre. D'autre part, le champ électrique est maximal pour la tension choc par rapport aux tensions AC et DC. On remarque aussi la répartition du champ électrique peut être similaire à celle observée sous une tension alternative, avec des valeurs maximales près de l'électrode de haute tension.



a. L'axe de référence 1



b. Ligne de fuite

Figure. 29. Distribution du champ électrique sous différentes formes de tension

3.3.3 L'effet de Constante diélectrique relative ϵ_r (ZnO) sur le potentiel électrique

La constante diélectrique relative, notée ϵ_r , est une propriété des matériaux qui mesure leur capacité à stocker de l'énergie électrique sous forme de champ électrique. Elle représente le rapport entre la capacité de stockage d'énergie d'un matériau par rapport à celle du vide.

Dans le cas spécifique du ZnO (oxyde de zinc), qui est souvent utilisé comme matériau de varistance dans les parafoudres, son constant diélectrique relatif, $\epsilon_r(\text{ZnO})$, peut avoir un effet sur le potentiel électrique.

Les figures (30, 31 et 32) représentent la distribution de tension électrique selon l'axe du parafoudre en fonction de Constante diélectrique relative ϵ_r (ZnO) sous les différentes formes de tensions. On note dans les trois cas que les deux graphs de tension sont identiques, et il y a une variation remarquable car l'existence d'une petite augmentation de tension au niveau des varistances.

Lorsqu'un champ électrique est appliqué à un matériau avec un constant diélectrique relatif non nul, il crée un potentiel électrique à travers le matériau. Le constant diélectrique relatif influe sur la capacité du matériau à résister ou à permettre la propagation du champ électrique. Plus le constant diélectrique relatif est élevé, plus le matériau est capable de stocker de l'énergie électrique et de maintenir un potentiel électrique plus élevé.

Ainsi, si le constant diélectrique relatif du ZnO (ϵ_r (ZnO)) est élevé, cela peut avoir pour effet d'augmenter le potentiel électrique dans la région où le ZnO est utilisé, par exemple au niveau des électrodes dans un parafoudre. Cela signifie que le champ électrique généré dans cette région peut être plus intense, ce qui peut influencer la répartition du potentiel électrique dans le dispositif.

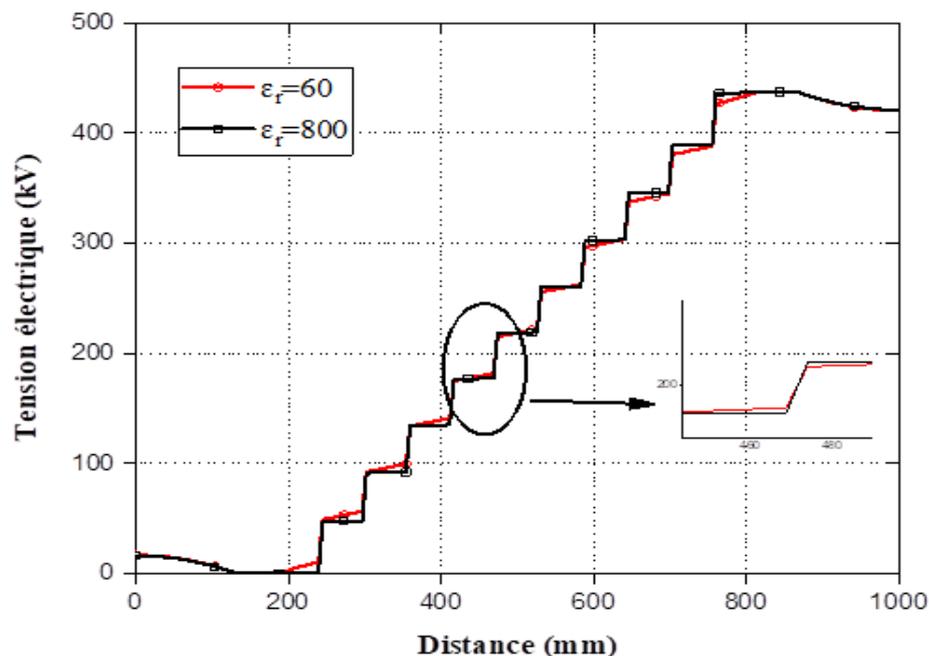


Figure. 30. Distribution de la tension électrique pour les différentes valeurs de ϵ_r (choc).

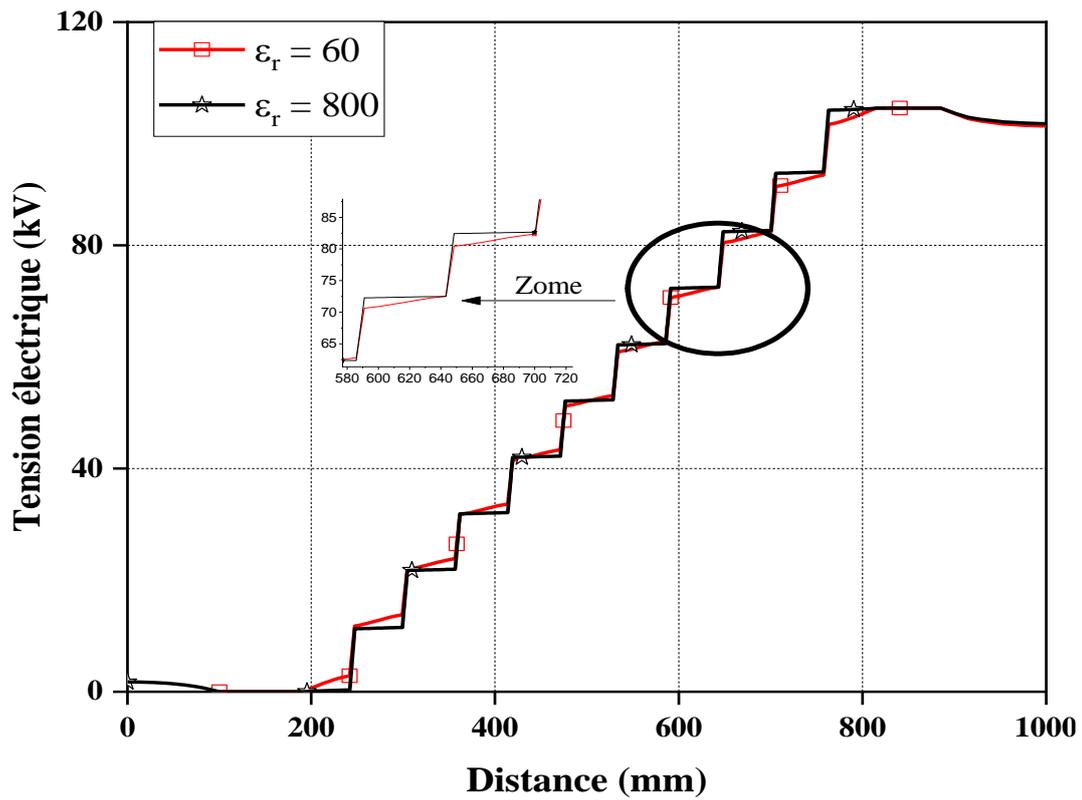


Figure. 31. Distribution de la tension électrique pour les différentes valeurs de ϵ_r (AC).

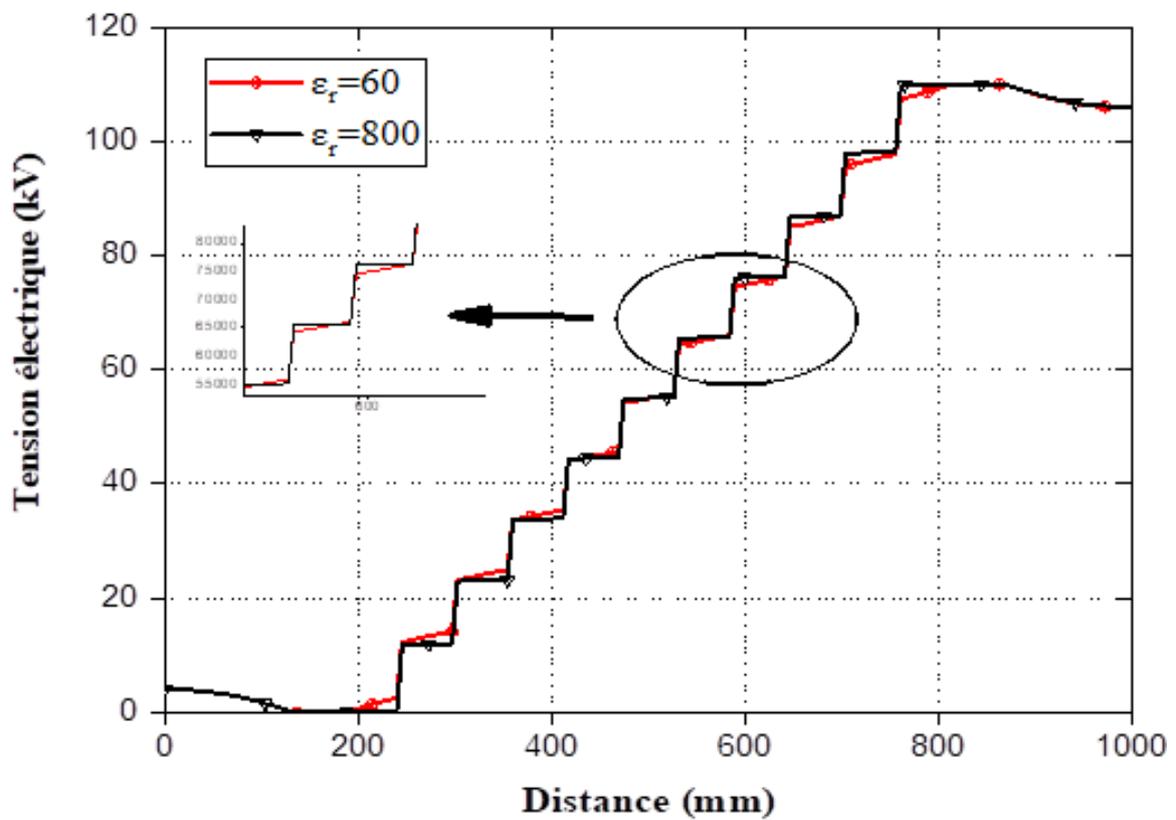


Figure. 32. Distribution de la tension électrique pour les différentes valeurs de ϵ_r (DC).

3.3.4 L'effet de pollution sur la distribution de tension et de champ électriques

L'objectif de cette simulation est de voir l'effet des gouttes d'eau sur la distribution du champ et le potentiel électrique sur long de la ligne de fuite avec la présence des gouttes d'eau sur sa surface. La permittivité relative des gouttes d'eau a été estimée à 81 et la conductivité de la goutte d'eau a été fixée à $5.5 \mu\text{S/m}$.

3.3.4.1 Géométrie de parafoudre pollué

L'étude de la répartition de tension dans des conditions polluées le long du parafoudre est importante pour évaluer la performance du parafoudre dans des environnements soumis à la pollution. La pollution peut entraîner des effets indésirables tels que des fuites de courant, des pertes d'isolation et une diminution de la capacité du parafoudre à protéger contre les surtensions.

Dans le but de l'identification l'effet de la pollution, des tests de simulation ont été effectués sur un parafoudre avec une couche de pollution non uniforme. La couche de pollution appliquée sur les ailettes supérieure et inférieure du parafoudre a les caractéristiques suivantes : une conductivité de $5,5 \text{ e-}6 \text{ S/m}$ et une permittivité de 81. La figure (33) montre la couche de pollution à la surface du parafoudre étudié.

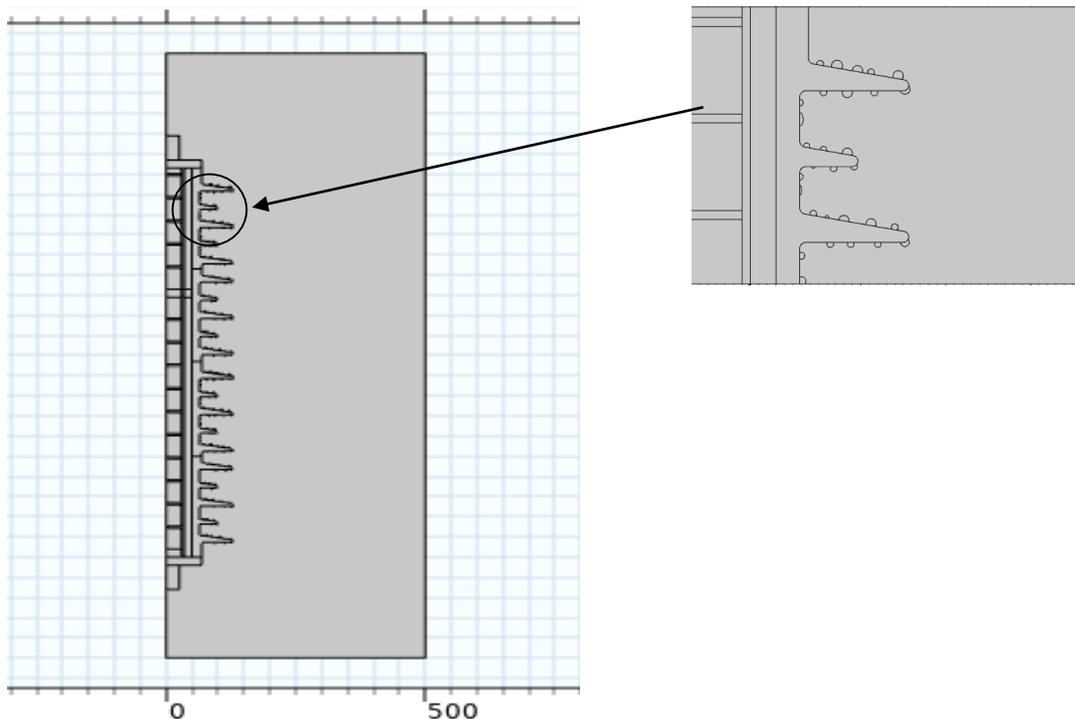


Figure. 33. Géométrie de parafoudre pollué.

3.3.4.2 Études de la distribution de tension et champ électrique (conditions polluées)

Les figures (34 et 35) représentent les résultats de simulation pour la tension électrique et les lignes équipotentielles pour un parafoudre avec gouttes d'eau. Nous remarquons qu'un

changement important en comparaison avec les cas sans pollution, où il y a une distorsion dans la configuration de lignes équipotentielles provoquée par les gouttes. De plus on remarque que les valeurs maximales des potentiels sont près de l'électrode haute tension et commence à décroître jusqu'à son annulation quand on se rapproche de l'électrode de masse.

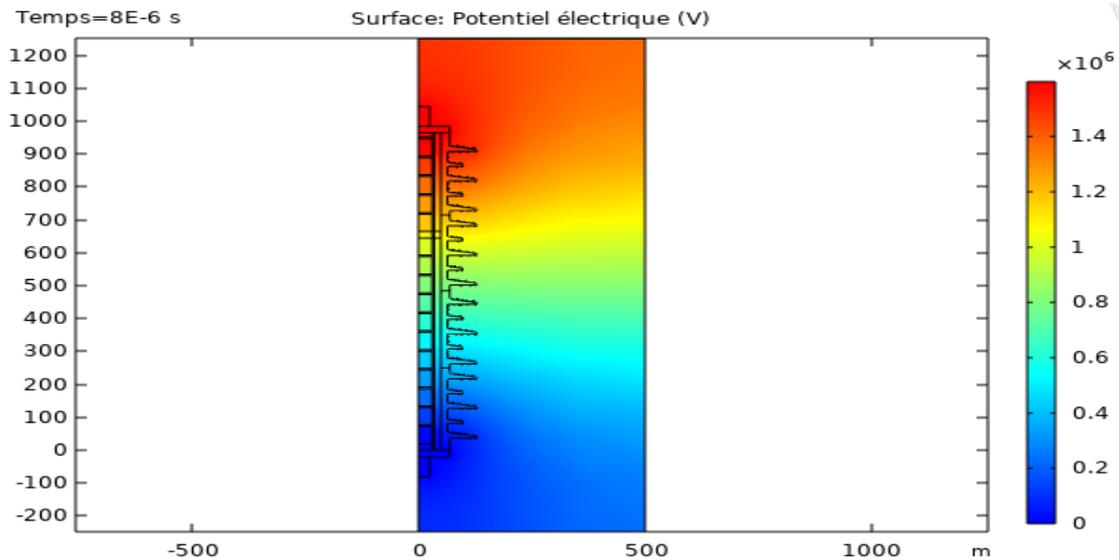


Figure. 34. Distribution de la tension électrique pour tension de choc avec pollution (gouttes).

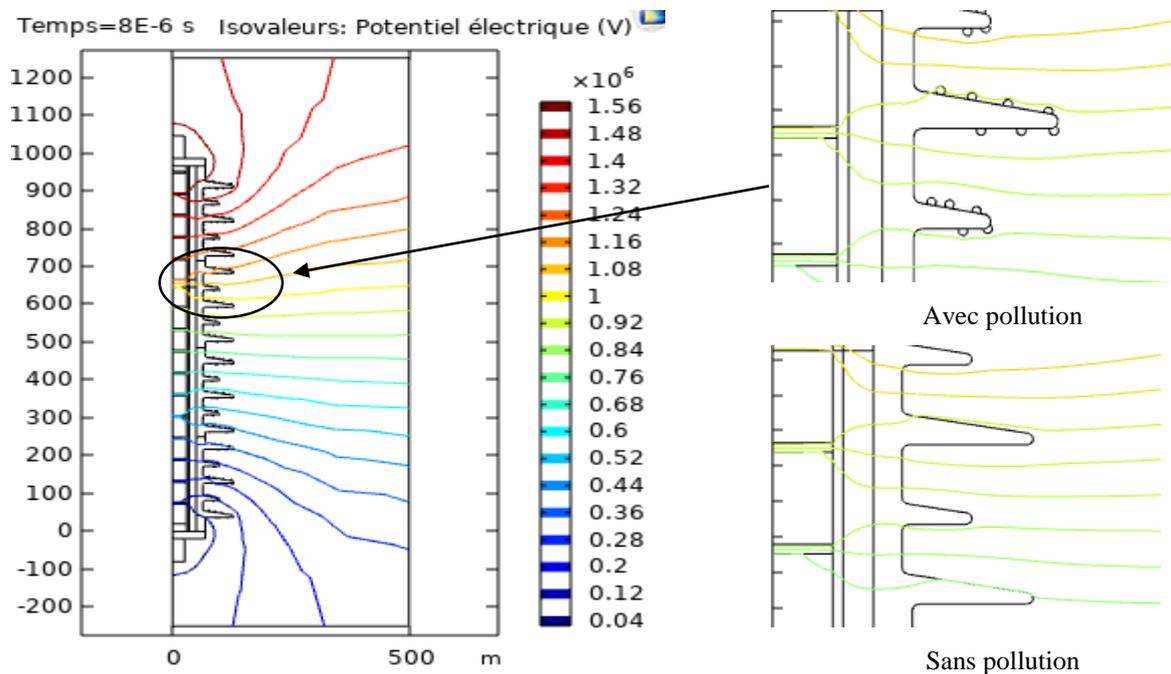


Figure. 35. Distribution des lignes équipotentielles pour tension de choc avec pollution (gouttes).

3.3.4.3 Études de la répartition de tension dans les conditions polluées

Dans cette partie du travail, l'étude de la répartition de la tension et du champ électrique en présence d'une couche de pollution à la surface du parafoudre se fait sous tension de choc et

alternatives. Ces deux types de tensions permettent d'évaluer différents aspects de la performance du parafoudre dans des conditions polluées.

La Figure (36) représente la répartition du potentiel électrique le long de la ligne de fuite du parafoudre pollué et propre pour la tension impulsionnelle. On remarque que le potentiel est maximal au point d'alimentation (1800kV) et minimal dans la masse.

On remarque que le potentiel est plus grand sur la surface polluée que sur la surface propre à cause des caractéristiques électriques de la couche de pollution telle que la conductivité.

La figure (37) illustre la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite du parafoudre pollué et propre pour tension alternative, on remarque, comme il était attendu que les valeurs minimales des potentiels sont près de l'électrode de masse et commence à augmenter jusqu'à la valeur maximale quand on se rapproche de l'électrode haute tension.

On observe que dans cette distribution qu'il y a une petite chute de tension aux niveaux des gouttes d'eau par rapport le cas propre pour les deux cas (tension AC et Choc). Puisque les gouttes d'eau provoquent cette chute de tension car leurs permittivités sont de $\epsilon_r = 81$.

D'après les résultats on remarque le potentiel est toujours plus grand sur la surface polluée que sur les surfaces propres à cause des caractéristiques électriques de la couche de pollution telle que la permittivité.

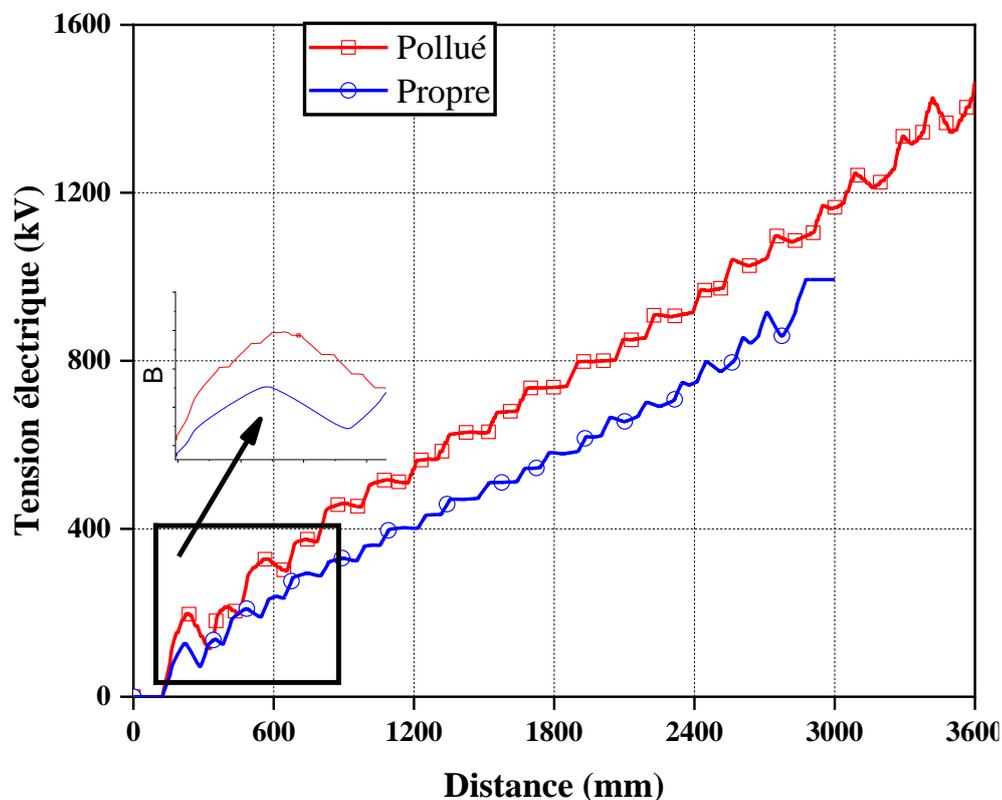


Figure. 36. Potentiel électrique sous tension choc.

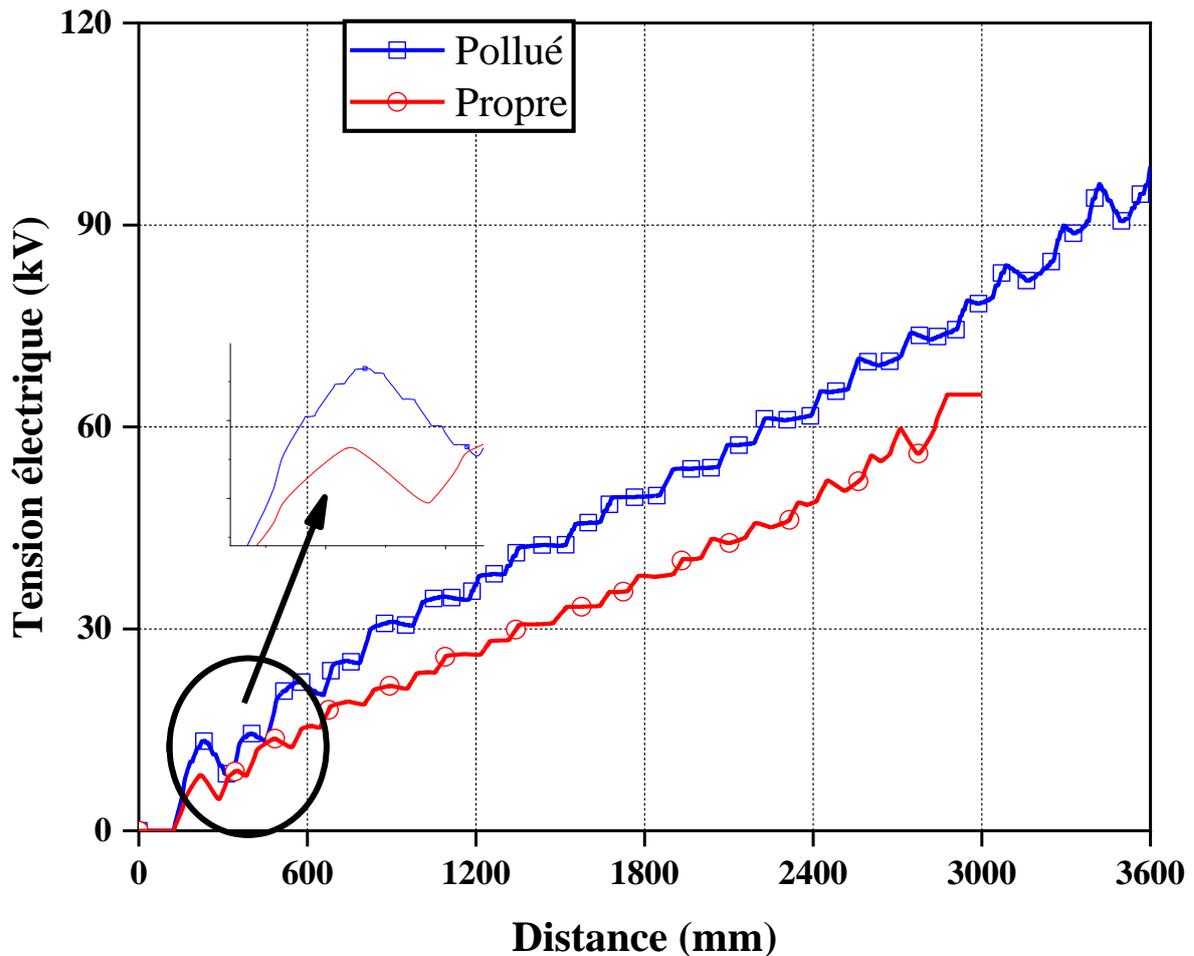


Figure. 37. Potentiel électrique sous différentes tension AC.

3.3.4.4 Études de la distribution du champ électrique dans les conditions polluées

La figure (38) présente la variation de distribution du champ électrique pour différents cas (avec gouttes, sans gouttes). On remarque l'élévation des valeurs du champ en présence de gouttes d'eau par rapport au cas sans celles-ci. En outre, les gouttes de grande taille provoquent une augmentation élevée du champ par rapport à celle des gouttes de petite taille. Par contre les valeurs maximales du champ sont remarquables sur les extrémités des gouttes dans le point triple, à cause de la présence de décharges électriques dans cette zone. Donc nous concluons que les gouttes d'eau, ont un effet évident sur la distribution du champ électrique le long de la surface du parafoudre, sans oublier l'augmentation de l'intensité du champ électrique engendrée par la croissance du nombre de gouttes d'eau sur sa surface.

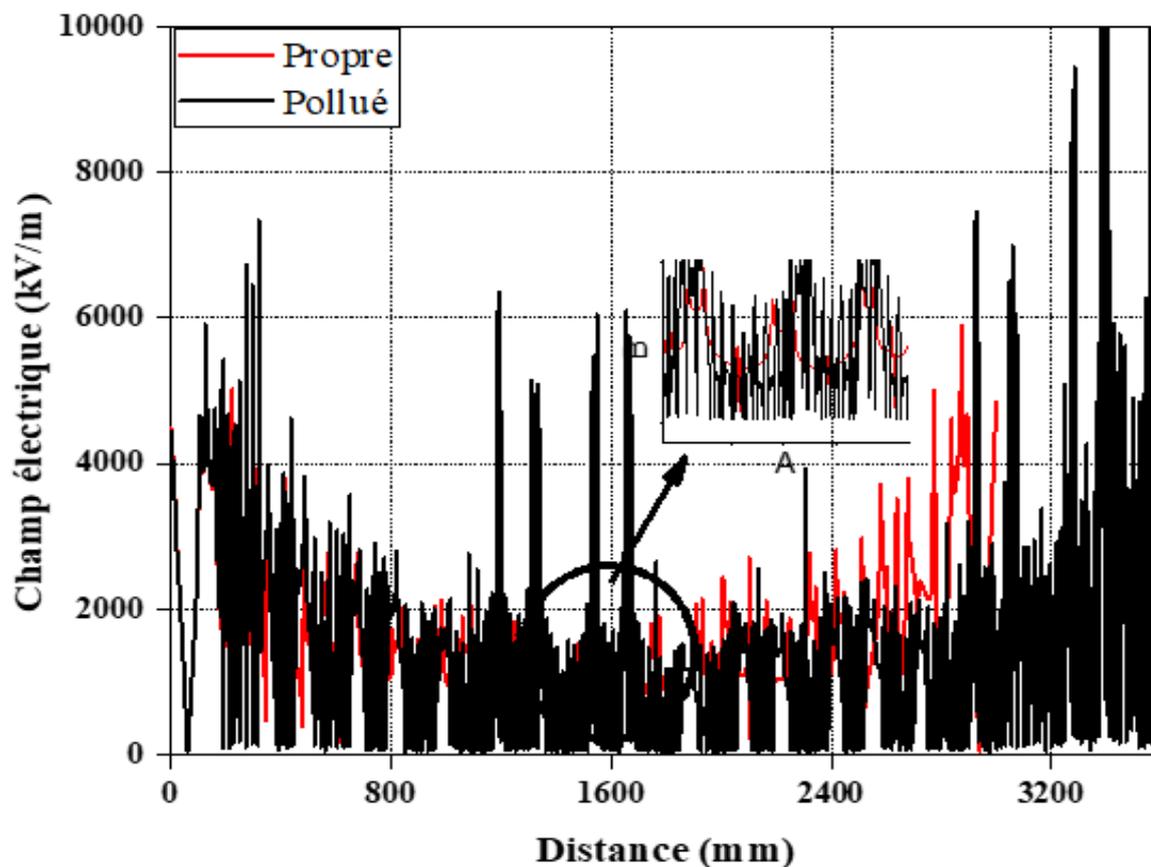


Figure. 38. Champ électrique avec ou sans pollution (tension choc).

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, l'objectif était d'étudier la distribution de la tension et du champ électrique d'un parafoudre ZnO dans des conditions propres (non polluées) sous différentes formes de tension. La méthode des éléments finis (MEF) a été utilisée avec le logiciel COMSOL Multiphasiques 5.6 pour quantifier les distributions de champ électrique et de tension autour des parafoudres.

Les résultats obtenus ont montré que les différentes formes de tension (par exemple, tension de choc ou tension alternative) affectent la distribution du potentiel électrique et du champ électrique le long du parafoudre. Ces distributions sont fortement influencées par les caractéristiques électriques de la couche de pollution et de la constante diélectrique relative ϵ_r du matériau ZnO utilisé dans le parafoudre.

CONCLUSION GENERALE

La foudre peut causer de graves perturbations dans les installations électriques. Elle peut provoquer des interruptions temporaires de service, dégrader la qualité de l'alimentation électrique, endommager du matériel et représenter un danger pour les personnes.

Les parafoudres, notamment les parafoudres à base de ZnO (oxyde de zinc), sont devenus des dispositifs de protection couramment utilisés pour lutter contre les effets néfastes de la foudre. Ces parafoudres ont suscité un intérêt croissant et font l'objet de nombreuses recherches en raison de leurs caractéristiques avantageuses.

Notre mémoire avait pour but de Contribution à l'étude de performances électriques des parafoudres ZnO sous différentes formes de tension. Ce travail nous avons jugé nécessaire de le développer suivant deux parties distinctes :

- Une partie théorique porte sur le parafoudre ZnO de haute tension (définition, constitution et son principe de fonctionnement...), le phénomène de pollution, et méthodes numériques.
- Une partie de simulation permettant la détermination des distributions du potentiel et du champ électriques le long du parafoudre à l'aide d'un logiciel commercial COMSOL Multiphasiques ce dernier est basé sur la méthode des éléments finis (MEF). Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :
 - La concentration du champ électrique est remarquée dans les électrodes HT et masse ;
 - Le type de tension affecte la distribution du champ et du potentiel électrique ;
 - Le champ électrique est plus élevé dans le cas d'une tension de choc appliquée par rapport aux autres tensions (AC, DC) ;
 - Pour une goutte d'eau sur la surface du parafoudre, l'intensification du champ électrique due à la présence des gouttes d'eau, notamment aux points de jonction des différents milieux (goutte d'eau, air et solide diélectrique) a été confirmée. Le champ électrique peut atteindre trois fois la valeur du champ électrique moyen appliqué ;
 - Nous concluons que les caractéristiques électriques de la couche de pollution ainsi que le constant diélectrique relatif du matériau ZnO ont un impact significatif sur la distribution du potentiel électrique et du champ électrique dans le parafoudre.

Comme perspective de ce présent travail, on propose :

- ✓ La simulation électrothermique de parafoudres à oxyde métallique en particulier ZnO ;
- ✓ La réalisation des tests expérimentaux avec des équipements H.T. dans le but de simuler la condition réelle de service des parafoudres
- ✓ Développer un circuit équivalent on utilisant un modèle dynamique.

Bibliographie :

- [1] MOULOUD MECHATI : mémoire de Magister (Modélisation du parafoudre à varistance ZnO pour l'étude de l'amélioration de ses propriétés électriques), 2010.
- [2] FEDERIC MACIELA : Parafoudres à moyenne tension HTA et à haute tension HTB, Technique de l'Ingénieur D4755v2. (16/09/2020).
- [3] S. BEDOUI "Contribution à l'étude de la coordination des isolements des postes de transformation haute tension basée sur l'emploi de parafoudres ZnO," Electrotechnique, Université FERHAT Abbas Sétif thèse de doctorat, 2018.
- [4] <https://france-paratonnerres.com/le-phenomene-foudre/>
- [5] http://projet.solaire.drome.free.fr/PDF/guide_technique_parafoudres_ZD234d_99.pdf
- [6] SCHNEIDER ELECTRIC : La protection des récepteurs contre les surtensions d'origine atmosphérique.
- [7] SCHNEIDER ELECTRIC «Guide de conception des réseaux électriques industriels ».
- [8] <https://observatoire-risques-nouvelle-aquitaine.fr/risques/risques-naturels/foudre/>
- [9] BEDJOUTI RAMZI REGUIG MESSAOUD : Mémoire de MASTER ACADEMIQUE : Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued " Contribution à l'étude de la coordination des isolements des postes de transformation haute tension basée sur l'emploi de parafoudres ZnO : 16/09/2020.
- [10] S. KAUCHE, «Modélisation de l'Impact Direct de la Foudre sur un Pylône THT : Analyse des Courants de Contournement », Mémoire de Master, Université Jijel, 2018.
- [11] MICHEL AGUET ET JEAN- JACQUES MORF : Traité d'électricité.
- [12] CHRISTOPHE PREVE ET ROBERT JEANNOT : Guide de conception des réseaux électriques industriels.
- [13] HAMEL.T, LAKAF. Mémoire de fin d'études : UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI DE OUM EL BOUAGHI : (2017/2018).
- [14] M. NACER, T. GHOUL "Le comportement électrique d'un parafoudre ZnO suite à un régime transitoire," Electrotechnique, Université LARBI TEBESSI – TEBESSA, Memoire de Master, 2017.
- [15] https://www.legrand.be/sites/default/files/downloads/FR/Guides%20techniques/GT_parafoudres.pdf
- [16] F. TIGHILT "contribution à l'étude de la distribution de tension dans les parafoudres ZnO," université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie, mémoire de magister, 2008.
- [17] M. MANUEL SERRANO SERVIN « Etude du Comportement Electrique et Thermique de Parafoudres à ZnO » Soutenue le 7 décembre 1988 devant la Commission d'Examen.
- [18] S. SHIRAKAWA, F. ENDO, H. KITAJIMA, S. KOBAYASHI, K. KURITA, K. GOTO, M. SAKAI "Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector", IEEE Trans. Vol.PD-3, No.3, pp.998-1003, 1988.
- [19] F. Maciela "Parafoudres", Technique de l'ingénieur, [D4755], 1998.
- [20] MR. LACHGUEUR ABDELLAH «Etude des couches minces de ZnO dopées. Simulation des dopages par TRIM (Transport of Ions in Matter)» Soutenue publiquement le 24 Juin 2015 devant le jury composé de
- [21] Document technique DT 67.
- [22] MATSUOKA M, MATSUYAMAT, AND IIDA Y, « Voltage Nonlinearity of Zinc Oxide Ceramics doped with Alkali Earth Metal Oxid », *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.8, pp.1275-1276, 1969.

-
- [23] H.R. PHILIPP, L.M. LEVINSON « Degradation phenomena in zinc oxide varistors: A review », Advances in ceramics V7, Additives and interfaces in electronic ceramics, Am. Ceram. Soc, edited by Man. F. Yan, Arthur. H. Heuer 1983.
- [24] AOUABED Fatiha « Contribution à l'étude et à l'évaluation des performances électriques des isolations en silicone polluées sous tension alternative » Université FERHAT Abbas Sétif thèse de doctorat, 2018.
- [25] J. HERVE « Mathématiques pour l'électricien méthode numérique », vol. D1, pp. 36-2.
- [26] F. AOUABED, « Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP », Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2010.
- [27] E. S. Arsenio, N. O. Morales « Low Frequency Complex Fields in Polluted Insulators» IEEE Trans. Select. Insula. Jaune 1982.
- [28] B.Y ABB «Parafoudres haute tension. Guide de l'acheteur » in ABB, 2011.