

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT : GENIE  
ELECTRIQUE N° D'ORDRE: RE-



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE  
SPECIALITE : RESEAUX ELECTRIQUES

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME DE MASTER

Présenté par

HIMER Aymen

HADJAB Mohammed Amin

**Intitulé**

*Etude du comportement d'un isolateur réel pour améliorer ses propriétés diélectrique et thermiques*

Soutenu le: 20 / 06 / 2023 devant le jury composé de :

|                      |                                     |             |
|----------------------|-------------------------------------|-------------|
| Pr. Salim CHAKROUN   | Université Mohamed Boudiaf - M'SILA | Président   |
| Dr. Khaled BELHOUCHE | Université Mohamed Boudiaf - M'SILA | Encadreur   |
| Dr. Hilal RAHALI     | Université Mohamed Boudiaf - M'SILA | Examinateur |

**Année universitaire : 2022 / 2023**



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## REMERCIEMENTS

*En tout premièrement, Nous tenons à remercier  
«Allah » le tout puissant pour la santé, la volonté  
et la patience, qu'il nous mené lors toutes les  
longues années d'études.*

*Nous tenons aussi à exprimer nos vifs remerciements à  
notre encadreur « Dr. Khaled Belhouchet » pour sa  
proposition de ce sujet de mémoire,*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants,  
Nous tenons remercier le jury qui a accepté le  
jugement de notre mémoire.*

*En dernier, nous exprimons nos remerciements et  
reconnaisances à tous nos collègues et amis pour le  
soutien moral durant notre cursus.*

## Dédicaces

*Nous dédions ce travail surtout,  
A nos très chers parents et nos grandes  
familles.*

*A nos chers frères et chères sœurs.*

*A tous nos amis.*

*A tous ceux qui nous aiment et que nous  
aimons.*

*Mohammed Amin  
&  
Ayman*

## Résumé

Les isolateurs haute tension sont des éléments clés dans le fonctionnement des réseaux électrique. Ils ont un rôle important. Ils permettent de relier les conducteurs aux leurs supports pour assurer l'isolation électrique. Ils peuvent être exposés, durant l'année, à plusieurs facteurs électriques, physiques et d'environnement y compris la pollution. Cela, peut menacer et réduire la performance électrique des matériaux diélectriques. Dans ce travail, une étude sur un isolateur capot et tige (1512L) est proposée pour étudier la répartition du champ et du potentiel électrique tout au long de l'isolateur sous différentes conditions. Dans un premier lieu, On va réaliser trois scénarios en appliquant différents niveau de tension. Les études de simulation sont faites via le logiciel Comsol pour évaluer la distribution du champ et du potentiel électriques le long de l'isolateur. Pour faire l'analyse ; un modèle statistique pour traiter la relation entre l'isolateur et les paramètres de la couche polluée (La position et la conductivité de la couche de pollution ) est proposé. C'est paramètres sont variés à chaque fois dans cette recherche. La technique statistique de la variance (ANOVA) est utilisée pour évaluer l'impact de chaque paramètre. L'étude proposée dans ce mémoire donne un outil de travail efficace et utile pour examiner et améliorer les propriétés diélectrique et thermiques des isolateurs étudiés.

**Mots clés :** Isolateur, Pollution, Champ électrique, Simulations, Comsol , ANOVA.

## **Abstract**

High voltage insulators are key elements in the operation of electrical power networks. Their role is to connect the conductors to the supports by ensuring their electrical insulation. They can be exposed, during the year, to several electrical, physical and environmental factors including pollution. This can threaten and reduce the electrical performance of dielectric materials. In this work, a study on a cap and rod insulator (1512L) is proposed to study the repartition of electric field and potential along the insulator under different conditions. First, we will perform three scenarios by applying different voltage levels. Simulation studies are done using Comsol software to evaluate the potential and electrical field distribution along the insulator. To do the analysis; a statistical model to deal with the relationship between the pollution and the insulator layer parameters (conductivity of the pollution layer and its position) is proposed. These parameters are varied each time in this search. The statistical technique of variance (ANOVA) is used to assess the impact of each parameter. The study proposed in this thesis provides an effective and useful working tool to examine and enhance the thermal and dielectric properties of the studied insulators.

***Keyword:*** Insulator, Pollution, Electric Field, Simulations, Comsol, ANOVA.

## ملخص

تعتبر عوازل الجهد العالي من العناصر الأساسية في تشغيل شبكات الطاقة الكهربائية. يتمثل دورهم الأساسي في توصيل الموصلات بالدعامات من خلال ضمان عزلها الكهربائي. يمكن أن تتعرض العوازل، خلال العام، للعديد من العوامل الكهربائية، الفيزيائية والبيئية بما في ذلك التلوث. هذا المشكل يمكن أن يهدد ويقلل من الأداء الكهربائي للمواد العازلة. في هذا العمل، تم اقتراح دراسة على غطاء وقضيب عازل (1512L) لدراسة توزيع الجهد والمجال الكهربائي على طول العازل تحت ظروف مختلفة. أولاً، سنقوم بتنفيذ ثلاثة سيناريوهات وذلك بتطبيق مستويات جهد مختلفة. يتم إجراء دراسات المحاكاة باستخدام برنامج Comsol لتقييم المجال الكهربائي والتوزيع المحتمل على طول العازل. للقيام بمختلف التحليل، تم اقتراح نموذج إحصائي للتعامل مع العلاقة بين العازل ومعلمات طبقة التلوث (الموضع والناقلية لطبقة التلوث). تتنوع هذه المعاملات في كل مرة في هذا البحث. يتم استخدام تقنية التباين الإحصائية (ANOVA) لتقييم تأثير كل عامل على حدى. توفر الدراسة المقترحة في هذه الرسالة أداة عمل فعالة ومفيدة لمعاينة وتحسين الخصائص العازلة والحرارية للعوازل المدروسة.

**الكلمات المفتاحية :** عازل ، تلوث ، مجال كهربائي ، محاكاة ، ANOVA.



# Sommaire

|                        |     |
|------------------------|-----|
| Remerciement.....      | ii  |
| Dédicaces .....        | iii |
| Résumé .....           | iv  |
| Abstract .....         | v   |
| ملخص.....              | vi  |
| Sommaire .....         | vii |
| Liste de figures ..... | x   |
| Liste de Tableaux..... | xii |

## Chapitre I

### INTRODUCTION GENERALE

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| Introduction Générale.....      | 14 |
| I.1. Contexte Général.....      | 14 |
| I.2. Problématique.....         | 16 |
| I.3. Objectifs .....            | 17 |
| I.4. Structure du mémoire ..... | 18 |

## Chapitre II

### REVUE DE LA LITTÉRATURE

|  |    |
|--|----|
| II .1. Introduction.....               | 20 |
| II.2. Définitions.....                 | 20 |
| II.2.1 L'Isolateur.....                | 20 |
| II.1.2. Types des isolateurs.....      | 21 |
| II.2. Le Contournement .....           | 24 |
| II.3. Pollution des isolateurs.....    | 25 |
| II.3.1. Introduction .....             | 25 |
| II.3.2. L'origine de la pollution..... | 26 |

|  |    |
|--|----|
| II.3.3. Répartition transversale non-uniforme.....                         | 27 |
| II.3.4. Répartition Longitudinale non-uniforme périodique.....             | 27 |
| II.3.5 L'origine de la pollution.....                                      | 27 |
| II.3.6. Sources de pollution.....  | 28 |
| II.3.7. Niveau et types de pollution.....                                  | 29 |
| II.4. Contournement électrique.....  | 30 |
| II .4.1. Chronologie et mécanisme de contournement des isolateurs.....     | 31 |
| II.5 Méthodes utilisées pour lutter contre la pollution.....               | 34 |
| II.5.1. Allonger la ligne de fuite de l'isolateur.....                     | 34 |
| II.5.2. Utiliser des types d'isolateurs plats.....                         | 34 |
| II.5.3. Création d'une couches hydrophobes (Graissage des isolateurs)..... | 35 |
| II.5.4. Application du Revêtement à base de silicone.....                  | 35 |
| II.5.5. Faire un Nettoyages sous ou hors tension.....                      | 35 |
| II.6. Cnclusion.....   | 36 |

### Chapitre III

#### MODELISATION ET SIMULATION BIDIMENSIONNELLE D'UN ISOLATEUR PROPRE

|  |    |
|--|----|
| III. 1. Introduction.....                      | 38 |
| III.2. Isolateur étudié.....                   | 39 |
| III.3. Modélisation d'un isolateur Propre..... | 40 |
| III.4. Logiciel COMSOL Multiphysics.....       | 41 |
| III.4.1. Les modèles.....                      | 41 |
| II.4.2. Organigramme de modélisation.....      | 42 |
| II.4.3. Processus de simulation.....           | 43 |
| III.4.4. Le Maillage.....                      | 43 |
| III.5. Simulations et interprétation.....      | 44 |
| III.5.1. propriétés des matériaux.....         | 44 |
| III.5.2. Conditions aux limites.....           | 45 |
| III.5.3. Résultats et interprétations.....     | 45 |
| III.5. Conclusion.....                         | 50 |

Chapitre IV

ANALYSE DU CHAMPE ELECTRIQUEE D'UN ISOLATEUR POLLUE ET METHODOLOGIE DES SURFACES DE REPONSE

|  |    |
|--|----|
| IV. 1. Introduction.....   | 52 |
| IV.2. Évaluation de la distribution de tension appliquée sous conditions de pollution..... | 52 |
| IV.2.1. Cas d'une Pollution non-uniforme .....   | 52 |
| IV.2.2. Cas d'une Pollution uniforme.....  | 56 |
| IV.4. Méthodologie Des Surfaces De Réponse (M.S.R) .....                                   | 61 |
| IV.4.1. Analyse de Taguchi .....   | 61 |
| IV.4.1.1. Plan de Taguchi.....   | 62 |
| IV.4.2. Méthode de l'ANOVA .....   | 63 |
| IV.5. Conclusion.....  | 68 |

Chapitre V

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| Conclusions Générales.....        | 69 |
| Références Bibliographiques ..... | 71 |

---

# Liste des figures

---

## Chapitre II : Revue de littérature

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure II. 1.</b> Schéma d'un Isolateur .....  | 21 |
| <b>Figure II. 2 .</b> Type d'isolateur Rigide.....  | 22 |
| <b>Figure II. 3.</b> Type d'isolateur support .....   | 23 |
| <b>Figure II. 4.</b> Type l'isolateur traversée .....   | 23 |
| <b>Figure II. 5.</b> Types d'isolateur utilisé par SONEGAS.....                                     | 24 |
| <b>Figure II. 6.</b> Phénomène de couronnement.....   | 25 |
| <b>Figure II. 7.</b> Un entretien illustrant des isolateurs sous pollution .....                    | 26 |
| <b>Figure II. 8.</b> Les étapes essentielles du contournement sur une surface polluée .....         | 32 |
| <b>Figure II. 9.</b> Le contournement sur une surface isolateur.....                                | 33 |
| <b>Figure II. 10.</b> Processus de déroulement du contournement sur la surface de l'isolateur ..... | 34 |

---

## Chapitre III : Modélisation et simulation bidimensionnelle d'un isolateur Propre

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure III. 1.</b> Dégradation d'un isolateur.....  | 39 |
| <b>Figure III. 2.</b> Schéma présentant le modèle de l'isolateur 1512L.....                    | 39 |
| <b>Figure III. 3.</b> L'interface utilisateur typique du logiciel.....                         | 41 |
| <b>Figure III. 4.</b> Organigramme de Modélisation par COMSOL Multiphysiques .....             | 42 |
| <b>Figure III. 5.</b> Maillage .....   | 44 |
| <b>Figure III. 6.</b> Isolateur sans Pollution développé par Comsol .....                      | 45 |
| <b>Figure III. 7.</b> Potentiel électrique de l'isolateur Propre.....                          | 46 |
| <b>Figure III. 8 .</b> Evolution de Champ électrique le long de la ligne de fuite .....        | 46 |
| <b>Figure III. 9.</b> Densité de courant le long de l'isolateur .....                          | 46 |
| <b>Figure III. 10.</b> Trois ailettes sans Pollution développé par Comsol.....                 | 47 |
| <b>Figure III. 11.</b> Le Potentiel électrique de Trois ailettes sans Pollution.....           | 48 |
| <b>Figure III. 12.</b> Evolution Champ électrique des trois niveaux de tension appliquée ..... | 48 |
| <b>Figure III. 13.</b> Le courant électrique des trois niveaux de tension appliquée.....       | 49 |

---

Chapitre IV : Analyse du Champ Electrique d'un isolateur pollué et Méthodologie des Surfaces de Réponse

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure. IV. 1.</b> Distribution équipotentielle en cas de Pollution non-uniforme .....                                      | 53 |
| <b>Figure.IV. 2.</b> Evolution du Champ électrique en fonction de la ligne de fuite de cas étudiés                             | 54 |
| <b>Figure. IV. 3.</b> Densité de courant de tous les cas étudiés .....   | 55 |
| <b>Figure. IV. 4.</b> Distribution de champ électrique pour plusieurs valeurs de conductivité .....                            | 56 |
| <b>Figure. IV. 5.</b> Evolution de Champ électrique le long de l'isolateur .....   | 57 |
| <b>Figure . IV. 6.</b> Densité de courant le long de l'isolateur.....  | 58 |
| <b>Figure .IV. 7.</b> Chauffage par effet Joule en fonction de la longueur axiale.....   | 60 |
| <b>Figure.IV. 8.</b> Les effets principaux des paramètres $V$ et $P$ et $\sigma$ sur la valeur maximale du champ $E$ .....     | 64 |
| <b>Figure.IV. 9.</b> Tracés de contour de la variation du champ $E$ par rapport aux paramètres de $V, P, \sigma$ .....         | 65 |
| <b>Figure.IV. 10.</b> Tracés de normalité avec des intervalles de confiance à 95% du champ $E$ maximal. ....                   | 66 |
| <b>Figure.IV. 11.</b> Optimisation de la réponse pour les paramètres de l'isolateur (les valeurs optimales sont en rouge)..... | 67 |

---

# Liste des Tableaux

---

## Chapitre II : Revue de littérature

---

**Tableau II. 1.** Contaminants et leurs sources.....28

**Tableau II. 2.** Classification de la pollution selon le type d'environnement.....29

---

## Chapitre III : Modélisation et simulation bidimensionnelle d'un isolateur Propre

---

**Tableau III. 1.** Grandeurs de l'isolateur 1512 .....40

**Tableau III. 2.** Données nécessaires pour isolateur Capot et tige en verre .....44

---

## Chapitre IV : Analyse du Champ Electrique d'un isolateur pollué et Méthodologie des Surfaces de Réponse

---

**Tableau IV. 1.** Paramètres de L'isolateur Pollué. ....62

**Tableau IV. 2.** Résultats informatiques. ....63

**Tableau IV. 3.** Analyse ANOVA de la contribution des paramètres en pourcentage sur la variation totale du champ E maximum pour les paramètres de l'isolateur.....64

# Chapitre I

## INTRODUCTION GENERALE

# **Introduction Générale**

## **I.1. Contexte Général**

Aujourd'hui, l'électricité est menée d'un rôle primordial dans l'évolution et le progrès industriel et le développement économique des pays. Par conséquent, il est nécessaire de toujours assurer un meilleur équilibre entre la production énergétique et de l'augmentation de la demande. C'est pourquoi une intéressante partie de son importance est associée au réseau, essentiellement aux lignes à haute tension [1]. Les isolateurs haute tension sont des dispositifs nécessaires dans la fabrication et la conception des lignes électriques aériennes. Leur rôle est essentiellement d'assurer et de garantir l'isolement électrique entre les parties qui constituent la ligne aérienne en évitant par conséquence les risques d'amorçage probable. Pour cette raison, la sélection et le choix du bon type d'isolateur utilisé, le contrôle continu de la réception et la surveillance durant l'utilisation et l'exploitation doivent être réalisés avec un considérable soin, pour assurer et garantir une meilleure performance de la ligne électrique. Sous conditions normales de fonctionnement, les isolateurs haute tension sont rapidement recouverts de différents types de polluants. Lorsqu'ils sont à l'état sec, les contaminants ne provoquent pas de défaillance et de dégradation de la rigidité électrique des isolants. Par contre et lorsque des dépôts solides qui s'accumulent à la surface de l'isolant sont humidifiés, cela permet une dissolution des sels et à la formation par conséquence d'une couche électrolytique qui caractérise le phénomène d'encrassement. Des courants de fuite se produisent, provoquant un réchauffement de la couche polluée par un effet de Joule et provoquant ainsi son dessèchement partiel, et si le champ électrique à ce niveau dépasse une certaine limite, une partie de tension appliquée importante est transférée aux niveaux de bornes de cette bande sèche apparue, la génération d'un arc. Les résultats de l'apparition de contournement vont causer la dégradation de la surface isolante et cela conduit à une rupture complète de



l'isolation [3]. La pollution des surfaces isolantes est un problème primordial dans la défaillance des performances d'isolation des structures à haute tension (sous-stations et lignes). Les agents pollués sont transportés et portés à l'aide du vent et déposés sur les surfaces isolantes des isolateurs. Divers dépôts polluants seront plus ou moins conducteurs, et cela en présence de l'humidité. Il en résulte par conséquent une diminution de la tension de tenue de l'isolant. L'arc prend son naissance à la surface de l'isolateur et peut se propager et se développer, provoquant un contournement complet de l'isolateur [4]. De nos jours, l'étude et la discussion du comportement des éléments isolants constituant les lignes aériennes du réseau électrique prennent cadre considérable parmi les sujets d'intérêt dans divers pays. De bien choisir les meilleurs matériaux qui constituent les isolateurs est l'objectif principal qui vient derrière cet intérêt croissant à ce sujet. L'étude du phénomène de contournement des isolateurs, dépend de plusieurs étapes et les performances de l'isolateur qui doit satisfaire lorsqu'il est sous une pollution atmosphérique et l'impact des différents paramètres géométriques tel que ; la longueur de l'isolateur, et le diamètre de ce dernier ; sur la tension du phénomène de contournement. La génération d'une décharge électrique se réalisera lorsque le champ électrique et la tension appliquée au niveau des bornes de l'isolateur dépasse un certain seuil. Par la suite, l'évolution de cette décharge aura lieu lorsqu'on a une réunion de conditions bien déterminées. Il est bien connu que les lignes de réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique sont toujours exposées à différentes contraintes, on peut citer la pollution des isolateurs. La pollution de ces derniers est considérée comme un facteur de premier intérêt si on parle de la fiabilité et la qualité du transport d'énergie électrique. Par conséquent et au moment de brouillard ou de la pluie, les polluants qui sont déposés se fixent sur les surfaces des isolateurs. Cela peut diminuer sa résistivité superficielle considérablement et l'apparition du phénomène de contournement peut aura lieu dans ce cas-là [2] Lorsque des couches polluantes s'humidifient, le courant de fuite sera circuler facilement sur les surfaces isolantes des isolateurs et cela peut être la cause direct des échauffements locaux au niveau des surfaces et par conséquent la couche polluée s'assèche. Résultant à ceux qui sont cité, la distribution du potentiel électrique peut être modifiée significativement provoquant par la suite l'apparition des arcs partiels.

L'apparition de ces arcs peut évoluer en donnant un contournement total de l'isolateur. Le contournement à ce niveau va causer une dégradation de la surface de l'isolateur en diminuant sa performance et réduisant sa durée de vie [2]. Les performances des isolateurs à haute tension est le principal facteur déterminant la fiabilité des systèmes électriques. L'isolateur doit non seulement supporter la tension de fonctionnement normale, mais aussi empêcher l'amorçage de se produire. La dégradation des performances est principalement affectée par la dépositions des agents polluants atmosphériques sur la surface. Les conditions environnementales dans lesquelles un isolateur doit fonctionner, ainsi que la forme de l'isolateur lui-même, son lieu d'utilisation, les conditions climatiques, la nature des particules polluantes et leur attraction électrostatique dans le champ électrique, peuvent conduire au dépôt d'une couche à la surface d'un isolateur en service. La pollution est généralement inégale. C'est pourquoi de nombreux travaux ont été proposés pour évaluer le comportement l'isolateur pollué de manière discontinue et non uniforme. Une plaque isolante de géométrie simple remplace l'isolateur ordinaire dans plusieurs études; ceci offre un avantage d'éviter les difficultés liées à la complexité de la forme de l'isolateur, ainsi que les paramètres affectant la tenue diélectrique de l'isolant qu'il doit être considéré lors du dimensionnement des isolateurs présenté. Les techniques développées pour la surveillance et le diagnostic des isolateurs pollués présentent un sujet très riche en raison que les phénomènes d'accumulation de pollution et des phases précédant le contournement sont complexes [5].

## **I.2. Problématique**

En général, la gravité et la répartition des couches de pollution La surface d'un isolant dépend principalement des conditions environnementales dans lesquelles l'isolateur doit fonctionner, Avec la conception et la forme de l'isolant lui-même. En fait, plusieurs facteurs détermineront la sévérité (légère, modérée et sévère) et la répartition (uniforme, inégale ou discontinue) de la contamination sur la surface d'un isolateur. Le comportement imprévisible des paramètres environnementaux est l'un des problèmes fondamentaux dans la conception de l'isolation extérieure pour les conditions polluées. Cela est dû au large éventail de conditions possibles, telles que

celles rencontrées dans les zones côtières, industrielles, agricoles et désertiques, et des combinaisons de ces conditions peuvent également se produire. De plus, la demande d'énergie électrique dans une zone s'accroît. La bonne compréhension du phénomène de contournement des isolateurs soumis aux conditions polluées est difficile. Donc il est nécessaire qu'une mise au point de modèles plus performants doit être proposée passant par une étude et une analyse approfondies des différents processus physiques qui provoquent un contournement : manière de l'évolution de l'arc de contournement, distribution du dépôt des agents polluants sur la surface isolante, étapes et processus à travers lesquels la couche de pollution s'humidifie et la création des bandes sèches. Par conséquent, l'étude de la création et l'élongation des décharges sur les surfaces isolantes polluées de façon non-uniforme et discontinue en présence de plusieurs bandes sèches reste insuffisamment documenté, comparée aux multiples travaux consacrés au cas d'une répartition uniforme. D'un autre côté, Les changements sur la tenue diélectrique des matériaux constituant les isolateurs, causés principalement par la dégradation thermique et l'évolution du temps de vieillissement, sont caractérisés par des techniques physico-chimiques de la matière de construction des différents matériaux solides, la production du claquage diélectrique s'effectue dès qu'une tension appliquée à un isolateur dépasse une valeur critique précise en provoquant une fusion et une perte complète du matériau. La structure du matériau peut être modifiée d'une manière irréversible par un phénomène destructif qui est la rupture diélectrique des solides. Un matériau diélectrique peut supporter un champ électrique maximal. Si ce champ dépasse une certaine limite, le matériau devient brusquement conducteur parce qu'il ne peut plus contenir ses charges électriques sur ses électrodes. Le vieillissement du matériau diélectrique également pose un problème dans le domaine d'isolation. Ce dernier dépend de plusieurs facteurs tel que la température, l'intensité du champ électrique et la contamination ou bien le non pureté du diélectrique. Les phénomènes de claquage et de décharges peuvent être de différents types, tant dans leur déroulement que dans leur nature et leurs formes.

### **I.3. Objectifs**

Dans ce mémoire, les effets de la pollution sur le comportement des isolateurs nous

sont étudiés. L'objectif visé de cette étude est de simuler la répartition du champ et du potentiel électrique le long de l'isolateur de type; (capot et tige 1512L), sous différentes conditions : polluées et propres. Le mémoire propose une étude de trois scénarios, dans les quels, des différents niveaux de tension sont appliqués.

Dans un premier lieu, un seul isolateur pollué est pris en appliquant une tension minimale. Ensuite, 3 ailettes attachées (polluées) sont étudiées en appliquant une tension moyenne. En dernier on prend une chaîne d'isolateurs pollués en appliquant une tension élevée. Le logiciel Comsol multiphysics qui est basé sur la méthode des éléments finis, est utilisé pour faire les différentes simulations. Pour faire l'analyse ; On utilise un modèle statistique pour traiter la relation entre l'isolateur et les paramètres de la couche de pollution (La position et la conductivité de la couche de pollution).C'est paramètres sont variés à chaque fois dans cette recherche. La technique statistique de la variance (ANOVA) est utilisée pour évaluer l'impact de chaque paramètre. La relation entre l'amorçage de surface, le champ électrique maximal et l'intensité de claquage et les paramètres choisis est modélisée par la méthodologie de surface de réponse (MSR).

#### **I.4. Structure du mémoire**

Le présent mémoire est organisé en 5 chapitres qui se présentent comme suit :

**Le chapitre 1** est une introduction du travail. Il explique la problématique, les objectifs et la méthodologie de cette étude.

**Le chapitre 2** présente les concepts et les notions de base liés aux isolateurs haute tension, pollution et phénomène de contournement.

**Le chapitre 3** est consacré à l'étude de la répartition du champ et du potentiel électrique le long de l'isolateur propre.

**Le chapitre 4** présente l'étude de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'isolateur avec pollution et l'analyse effectuée du champ électrique et les résultats obtenus par l'analyse ANOVA.

**Le chapitre 5** présente des conclusions générales.

# Chapitre II

## REVUE DE LITTÉRATURE

### II.1. Introduction

Les isolateurs jouent un rôle majeur dans le système de transport et de distribution d'énergie électrique. Le processus de décharge de surface et le problème de pollution sur l'isolateur contribuent à générer une dégradation de ce dernier entraînant la réduction des performances à long terme des isolateurs. L'impact du vieillissement thermique sur les caractéristiques des matériaux diélectriques utilisés dans les différentes isolations dans l'appareillage à haute et moyenne tension est également un problème posé. Des travaux de modélisation sont réalisés dans le but de caractériser les propriétés diélectriques, des matériaux solides fréquemment utilisés en énergie électrique soumis à un vieillissement thermique accéléré. Ils montrent que le vieillissement thermique affecte considérablement les propriétés diélectriques des matériaux solides employés en isolation des équipements à haute tension. Les isolateurs à haute tension couverts d'une couche de pollution atmosphérique -en associant avec de la rosée de matin, au brouillard ou à la pluie-, qui peut devenir conductrice, de cette raison, elle sera le cadre de passage d'un courant de fuite vers la bornes. Lorsqu'il des conditions favorables se présentent, il y aura une apparition des décharges partielles le long de la surface de l'isolateur et qui s'allongent et mènent au contournement complet de l'isolateur. Dans cette partie, on va présenter les concepts et les notions de base liés aux isolateurs haute tension, propriétés diélectrique et thermiques, pollution et phénomène de contournement.

### II.2. Définitions

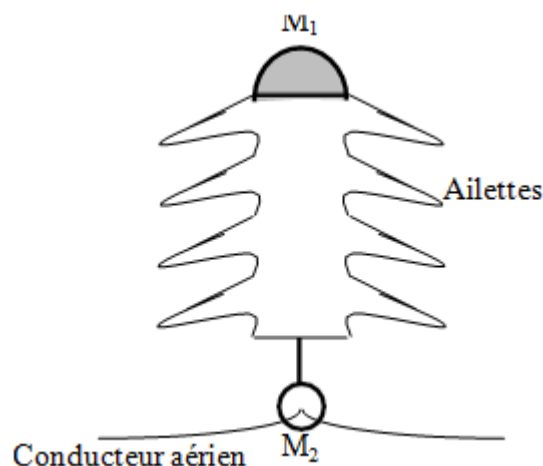
#### II.2.1 L'Isolateur

L'isolateur est un composant isolant solide que possède une immense résistance le courant se passe et la conductibilité est considérée nulle. Son utilisation est pour l'isolement des conducteurs qui sont sous tension afin d'éviter les pertes de courant, les charges d'électrocution et court-circulation.

L'isolateur présenté dans la figure II.1 est composé d'un isolant auquel deux pièces métalliques  $M_1$  et  $M_2$  sont fixés. L'isolant peut être composé du verre, de céramique ou composite. La pièce  $M_1$  se fixe au pylône et la pièce  $M_2$  porte le conducteur.

L'isolateur possède deux rôles essentiels :

- ⇒ Un rôle mécanique : qui porte le conducteur
- ⇒ Un rôle électrique : qui isole le conducteur par rapport au pylône.



**Figure II. 1.** Schéma d'un Isolateur

Les isolateurs ont un rôle mécanique permet de relier les conducteurs aux leurs supports pour garantir leur isolation électrique. Pour cette raison, le bon choix de dimensionnement et des matériaux constituant les isolateurs est nécessaire pour assurer un performance de qualité et garantie la fiabilité l'isolement de haute tension.

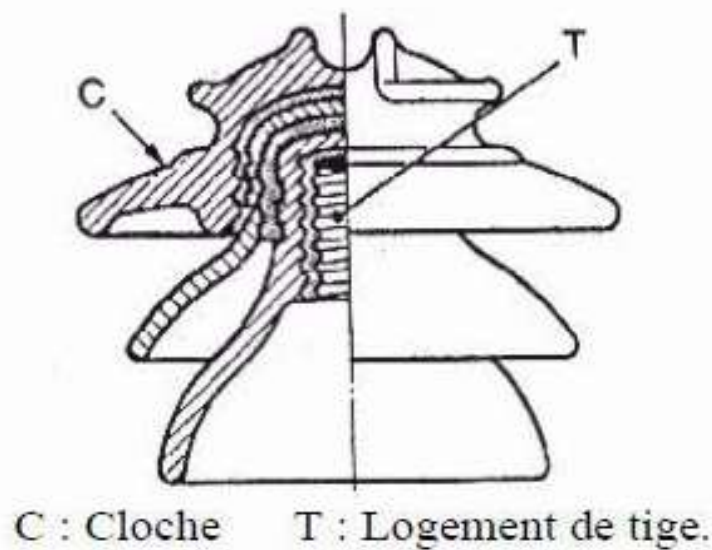
### II.1.2. Types des isolateurs

Le type d'isolateurs se diffère selon la façon d'utilisation et les conditions dans

lesquelles les isolateurs se fonctionnent.

### *II.1.2.1 Isolateurs rigides*

Cet isolateur permet d'avoir une liaison qui est rigide entre supports et câbles. Il se compose d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés entre eux. Ils sont montés verticalement sur la tour, incliné ou Horizontal (figure II.2). Ils sont fixés à la tour au moyen de ferrures de différentes formes. Ils sont utilisés pour les lignes étriques aériennes qui ne doivent pas dépasser un niveau de tension de 60kV [6].



**Figure II. 2 .** Type d'isolateur Rigide.

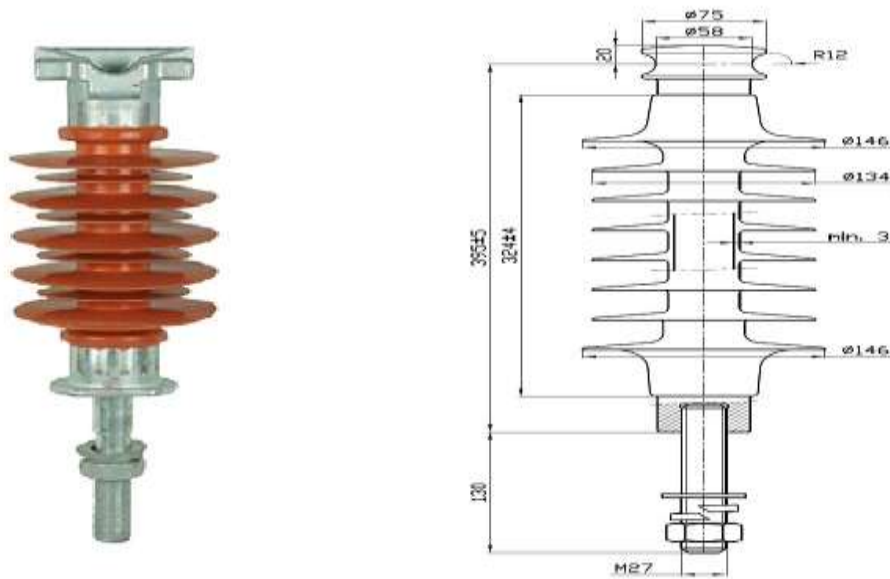
### *II.1.2.2 Eléments de chaîne ou Isolateurs suspendus*

son constitution est de de pièces métalliques et matériau isolant pour crée une connexion entre 2 isolateurs et offre une flexibilité à la chaîne d'isolateurs [6,7]. La chaîne d'isolateurs est suspendue verticalement à la tour (chaîne d'alignement) ou horizontale (chaîne d'ancrage).

### *II.1.2.3 Isolateur support*

Ce type est utilisé essentiellement comme supports de matériels et d'appareils portés à une ligne haute tension comme les transformateurs montés en cascade, les disjoncteurs, les transformateurs de mesure, etc.. [7], dans les postes de transformations,

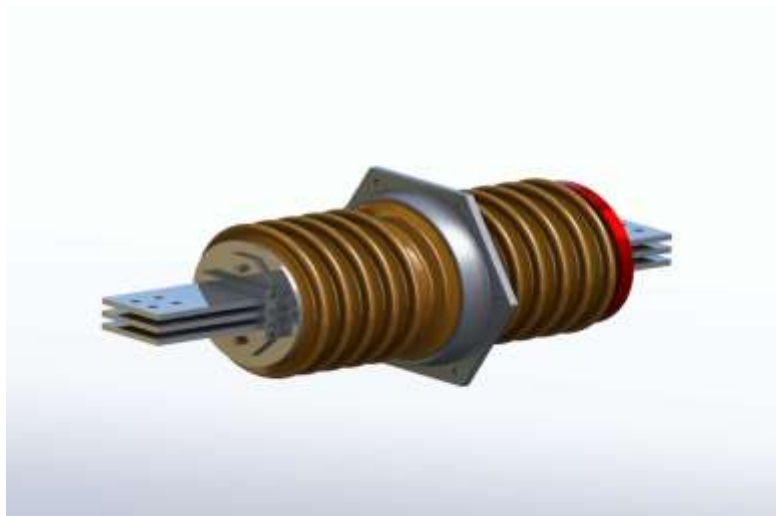




**Figure II. 3.** Type d'isolateur support

#### *II.1.2.4 Isolateur de traversée*

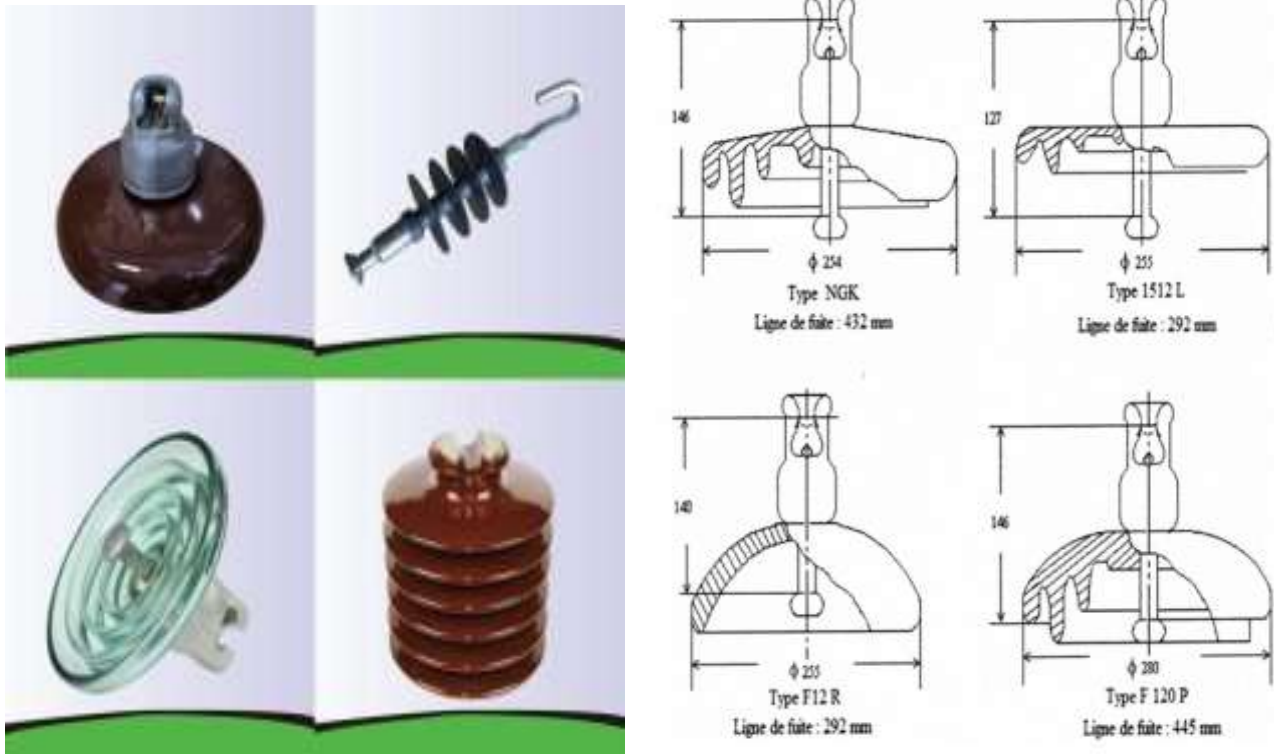
Ces isolateurs sont choisis pour traverser à un conducteur à haute tension une paroi mise à la terre. Cela dans le cas d'une ligne haute tension qui pénètre dans un poste maçonné ou bien de la conductrice haute tension qui alimente un transformateur. Ce type d'isolateurs a généralement une utilisation extérieure/intérieure. La partie intérieure est composée d'un simple cylindre et la partie qui est à l'extérieur réservée aux intempéries est munie de cloches pour accroître la résistance de la ligne de fuite.



**Figure II. 4.** Type l'isolateur traversée

### II.1.2.5 Isolateur utilisé par SONEGAZ

SONELGAZ utilise plusieurs types d'isolateurs pour assurer l'isolement des lignes haute tension aériennes (Fig. II.5), dont les plus répandus sont ceux de type « capot et tige » à ligne de fuite renforcée, en verre, de couleur verte [7].

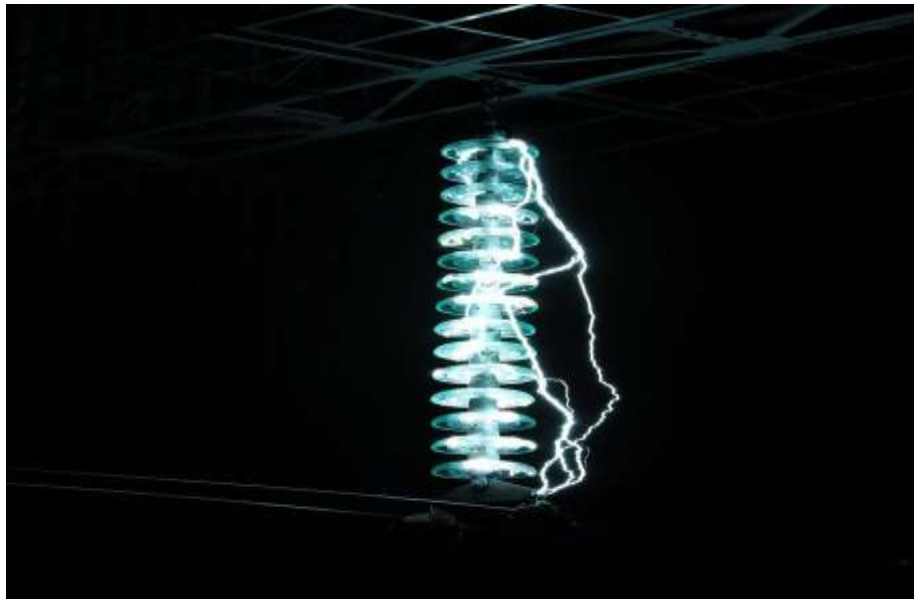


**Figure II. 5.** Types d'isolateur utilisé par SONEGAZ

## II.2. Le Contournement

Une décharge couronne s'apparut sur la surface d'un isolateur lorsqu'une décharge s'établit entre ses deux extrémités en contournant la surface de l'isolateur. Le contournement peut causer le déclenchement du disjoncteur parce qu'il établit un court-circuit entre le conducteur et le pylône Figure II.6.

La propagation de ce dernier entraîne généralement une interruption momentanée du flux d'énergie dans le réseau [8].



**Figure II. 6.** Phénomène de couronnement

## II.3. Pollution des isolateurs

### II.3.1. Introduction

Les lignes électriques aériennes sont soumises à diverse restriction telle que conception, construction, maintenance et l'exploitation qui conforme aux normes, exigences et directives de sécurité ainsi qu'aux réglementations sur les arcs. Parmi eux, la pollution des isolateurs est parmi les principaux facteurs affectant la fiabilité et la qualité de la transmission d'énergie, qui doit être pris en considération lors de la sélection de la taille d'isolation des lignes et des équipements de transmission. En effet, les dépôts de contamination recouvrant la surface de l'isolant entraînent une réduction importante de la résistivité de surface par temps de pluie et réduisent ainsi la tension de tenue de l'isolant, ce qui peut provoquer un contournement de l'isolateur.

Cela peut avoir de graves conséquences pour la ligne hors service. La connaissance du degré de contamination est donc un préalable et une condition nécessaire pour évaluer le niveau d'isolation d'une structure installée sur site afin de bien dimensionner l'isolation [9].



**Figure II. 7.** Un entretien illustrant des isolateurs sous pollution

### II.3.2. L'origine de la pollution

La pollution a plusieurs sources d'où elle vient. Son origine peut être anthropogénique ou naturelle. De cet effet, une couche de sel vient de se déposer sur les isolateurs à partir des embruns portés par le vent qui s'installent et cela dans le cas des lignes aériennes et des postes installés au bord de mer. En cas d'humidification de cette couche par le brouillard, elle pourra être conductrice. De l'autre part, les isolateurs installés près des usines polluantes, comme les usines chimiques ou métallurgiques, peuvent être recouverts de fines particules solides qui sont faiblement conductrices et hygroscopiques. Dans le cas où les isolateurs soumis aux conditions de forte humidité, comme la pluie et le brouillard, les sels contenus dans ces particules ont une dissolution provoquant une formation d'un électrolyte. Ce sont les deux concepts qui constituent les deux cas typiques de pollution des surfaces isolantes des. Il ne faut pas croire que les régions se trouvant loin de la mer ou des zones industrielles sont exemptées de la pollution.

### II.3.3. Répartition transversale non-uniforme

La non uniformité de la répartition de pollution se caractérise par des bandes de contamination de variantes largeurs ou la conductivité de surface varie d'une bande à une autre le long de l'isolateur en restant constant sur le même secteur, le long trajectoire de vol.

### II.3.4. Répartition Longitudinale non-uniforme périodique

Cette répartition est la plus courante. Elle se caractérise par des changements périodiques de conductivité de la couche de contamination le long de l'isolateur, mais elle conserve la symétrie circulaire. Ces principales spécifications sont citées comme suit:

- La surface basse d'un isolateur est plus conductrice que la surface prédominant
- Le degré de concentration de la pollution accroit de la zone extérieure à la zone intérieure centrale.
- La contamination entre les veines est plus importante. Ce type de regroupement implique l'accumulation graduelle de la contamination plutôt que

L'accumulation aléatoire dans des conditions atmosphériques ne peut pas être expliquée Des exceptions

### II.3.5 L'origine de la pollution

Les origines de pollution peuvent être des origines naturelles. Dans ce cas Lignes aériennes et colonnes installées en bord de mer, dépôt de pulvérisation transporté par le vent saupoudrer une couche de sel sur l'isolant. Lorsque cette couche est mouillée de brouillard, Elle devient chef d'orchestre. De plus, à proximité d'usines polluantes, comme les usines métallique ou chimique, l'isolant est recouvert de minuscules particules solides, peu conducteur mais hygroscopique. Dans des conditions d'humidité sévères, la dissolution du sel contenu dans ces particules peut provoquer génération d'électrolytes [10].

**Tableau II. 1.** Certains contaminants et leurs sources

| Contamination naturelle anthropogénique   | Source probable de pollution          |
|---|---------------------------------------|
| H +   | Atmosphère                            |
| NO, NO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , NO <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> | Atmosphère, combustion, Fertilisation |
| SO, NO <sub>3</sub> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , CL <sup>-</sup>  | brouillard, Mer, précipitation        |
| Na <sup>+</sup> , Mg <sup>++</sup> , Ca <sup>++</sup> , K <sup>+</sup>  | Mer                                   |

### II.3.6. Sources de pollution

On peut classer la nature de pollution en trois catégories ; naturelle, industrielle et la pollution mixte [11]. Ce classement est proposé vu la diversité des origines de la pollution.

#### II.3.6.1. Pollution naturelle

Ce type de pollution est bien connu. Il peut être de source marine, source désertique ou bien d'autres. Cela provient des dépôts de poussières transporter et véhiculés par le vent.

#### II.3.6.2. Pollution marine

Les isolateurs installés près de la mer sont exposés aux embruns véhiculés par le vent. Ils se déposent progressivement une couche de sel recouvre toute la surface de l'isolateur même les parties les mieux protégées. Cette couche à plus ou moins longue échéance. La couche de sel devient conductrice lorsqu'elle s'humidifie par un brouillard, une condensation ou par les embruns eux même. Ici, un contournement total de l'isolateur s'effectue lorsque un courant de fuite apparaît à travers la couche superficielle et lorsque des arcs électriques prendre naissance dans certaines conditions.

#### II.3.6.3. Pollution désertique

Dans le désert, il est connu que les tempêtes de sables sont fréquentes. Ces dernières, peuvent déposer sur les surfaces des isolateurs progressivement une couche de pollution qui contient de sels. En cas d'humidification, la couche de pollution devient beaucoup plus conductrice. Par conséquent, Un courant de fuite s'établit brusquement et peut être accompagné d'arcs partiels, dont son développement sur la surface de l'isolateur peut conduire à un contournement total de l'isolateur.

#### ***II.3.6.4. Pollution industrielle***

Les lignes qui se trouvent près des zones industrielles (les fumées des usines, raffineries, cimenteries, minerais ..... etc.) posent un problème de d'une pollution industrielle même celles présentant pour, près des grandes villes (les gaz d'échappement des véhicules) ou près des terrains agricoles (les engrais utilisés en agriculture).

#### ***II.3.6.5. Pollution mixte***

L'exploitation des ouvrages électriques est face à un véritable problème qui est la pollution mixte. Elle réunit plusieurs types de pollutions citées précédemment. La formation de la couche électrolytique suite à une humidification de particules solides accumulées sur la surface des isolateurs, provoque une diminution remarquable de la rigidité diélectrique.

### **II.3.7. Niveau et types de pollution**

L'identification des contaminants est une priorité sélective isolateur de cordon d'alimentation la norme CEI 815 donne quatre classes la pollution et sa classification dans le tableau [12] :

**Tableau II. 2.** Classification de la pollution selon le type d'environnement

| Niveaux de pollution | Des exemples d'environnements typiques   |
|----------------------|--|
| I<br>Faible          | - Des Zones qui ne contient pas d'industries et avec une densité d'habitations faible et équipées d'installation de chauffage.<br>- Des Zones menées d'une faible densité d'industries ou d'habitations mais elles sont soumises fréquemment aux vents |

|                         |  |
|-------------------------|--|
|                         | <p>et / ou pluies.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Régions d'agricoles</li> <li>- Régions considérées montagneuses</li> </ul>   |
| <p>II<br/>Moyen</p>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Des Zones contiennent des industries ne produisant pas de fumées avec une densité moyenne d'habitations équipées d'installations de chauffage.</li> <li>- Des Zones à forte densité d'habitations et/ ou d'industries mais soumises fréquemment aux vents et / ou pluies.</li> <li>- Des Zones trop proches de la cote et exposées aux vents de mer.</li> </ul>   |
| <p>III<br/>Fort</p>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Des Zones qui ont une forte densité d'industries avaient de grandes villes avec forte densité d'installations de chauffage polluantes.</li> <li>- Des Zones qui se situent à côté de la mer, et exposées à des vents relativement forts.</li> </ul>   |
| <p>IV<br/>Très fort</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Des Zones qui sont soumises à des poussières conductrices et à des fumées industrielles produisant des dépôts conducteurs épais.</li> <li>- Des Zones généralement peu étendues, très proches de la mer et exposées aux vents très fort et polluant venant de la mer.</li> <li>- Des Zones désertiques qui se caractérisent par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant du sable et du sel et soumises à une condensation régulière.</li> </ul> |

#### II.4. Contournement électrique

L'amorçage électrique de l'isolateur est la propagation de la décharge sur la surface électrique de l'isolateur jusqu'à ou un court-circuite aux bornes ; haute tension et la masse apparaît et la conséquence sera grave cela peut interrompre la distribution d'énergie électrique. Le contournement des isolateurs contaminés sont des phénomènes de claquage diélectrique dus au dépôt de contaminants à la surface de l'isolant. Pour étudier ce phénomène, de nombreux tests de tension de tenue le by-pass est réalisé



dans des conditions de dépôt normales ou artificiellement polluées, respectivement dans la station de contamination ou le laboratoire. Comité électrotechnique International a développé une série de normes internationales essai de pollution artificielle des isolateurs.

#### **II .4.1. Chronologie et mécanisme de contournement des isolateurs**

Le phénomène de contournement des isolateurs soumis aux pollutions peut être divisé en 4 étapes différentes, chacune d'elles a une signification, c'est-à-dire le comportement ou contourner la chaîne d'isolement à la tension d'alimentation du réseau :

##### ***II .4.1.1. Dépôt de la pollution***

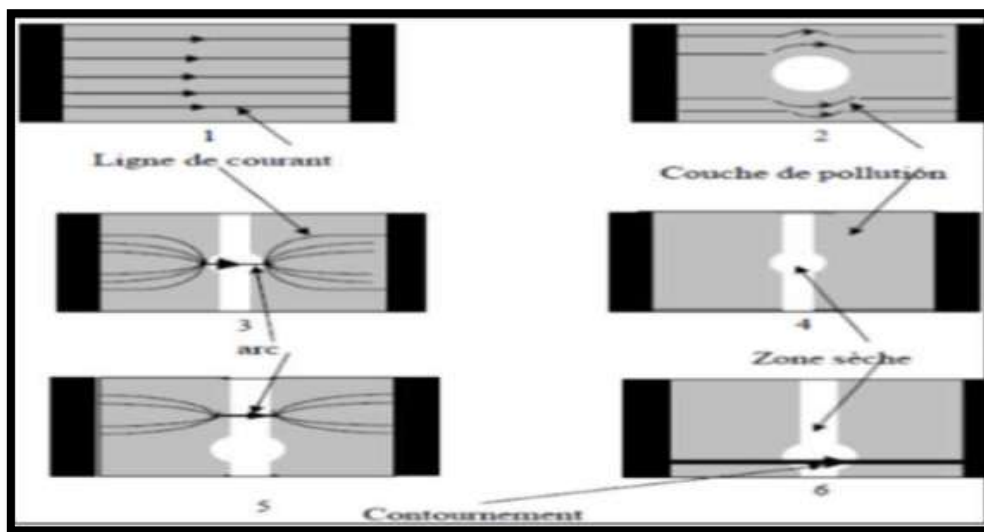
La source des gisements minéraux peut être naturelle (comme le sel, sable...), industrielle (comme : fumée, engrais...) ou encore une fois une réunion des deux. Les petites particules sont emportées à l'aide du vent (présence d'isolant altère zone de vent laminaire) et concentré entre les côtes ou derrière le capot. L'accumulation de sédiments est continue et n'est affectée que par le vent et la pluie. En place le nettoyage vertical est plus efficace en haut de l'isolateur qu'en bas, donc Il y a de gros dépôts sur la surface inférieure des nageoires. Généralement, le montant du dépôt est se stabilise à une valeur moyenne dans le temps, généralement de 5-6 mois à 2 année.

##### ***II .4.1.2. Humidification de la pollution***

Le Brouillard, condensation et bruine se mouillant, il n'est pas nécessaire de nettoyer les surfaces d'isolateurs contaminées. Ces conditions correspondent aux conditions dire des conditions critiques. La dissolution des sels dans les sédiments forme un électrolyte conducteur sur la surface des isolateurs. Une fois que le film conducteur continu perd du courant La forme de l'isolateur. Le courant de fuite augmente jusqu'à un maximum pendant le cycle d'humidification, mais moins s'il y a un séchage ou un lavage. L'amplitude de courant de fuite dépend particulièrement du temps, la nature et la quantité des sels solubles et des autres produits insolubles. La surface de l'isolateur absorbe une quantité d'eau pour former un produit insoluble et l'humidification des sédiments.

- **Développement des zones sèches et apparition des arcs:**

Les densités de courant de fuite à proximité des raccords isolants sont beaucoup plus importantes. Par effet Joule, la température augmente, l'eau s'évapore et la conductivité des sédiments diminue. Du fait de l'existence de "bande sèche", l'amplitude du courant est fortement réduite. Ces bandes sèches plus résistives modifient la distribution de potentiel à travers l'isolateur. La majeure partie du potentiel est appliquée aux bornes. Si leur largeur est insuffisante pour supporter le potentiel correspondant, amorçage aux bornes de la bande sec s'effectue.

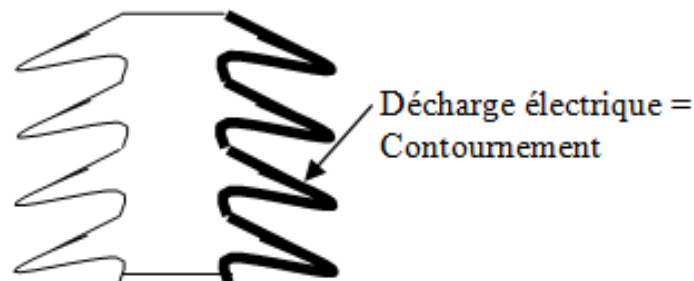


**Figure II. 8.** Les étapes essentielles du contournement sur une surface polluée [14]

### II.4.1.3 CONTOURNEMENT

La pollution des lignes électriques aériennes est un sujet très important car la pollution des isolateurs est un problème sérieux pour l'exploitation des réseaux de haute tension. Lorsque l'air transporte des grains de poussière et qu'ils interagissent avec l'isolateur, une couche étrangère se dépose sur sa surface. En présence de conditions favorables, cette couche s'humidifie, et là, la tension de tenue peut se réduire considérablement, causant des incidents néfastes. Le contournement se produit lorsque la décharge électrique contourne la surface de l'isolateur, ce qui peut causer l'interruption momentanée de l'écoulement de l'énergie dans le réseau. Dans les zones urbaines avec des industries avancées telles que la production pharmaceutique ou automobile, les interruptions ne sont pas acceptables car elles peuvent entraîner d'énormes pertes

financières et de contrôle du processus. Si on prend l'exemple des États-Unis, une interruption de 0,25 s dans une usine à papier peut causer des pertes de 100 000 dollars [17].



**Figure II. 9.** Le contournement sur une surface isolateur

### 🚧 Comment se déroule le contournement ?

Première phase : dépôt de pollution. Des particules de pollution s'installent sur la l'isolateur.

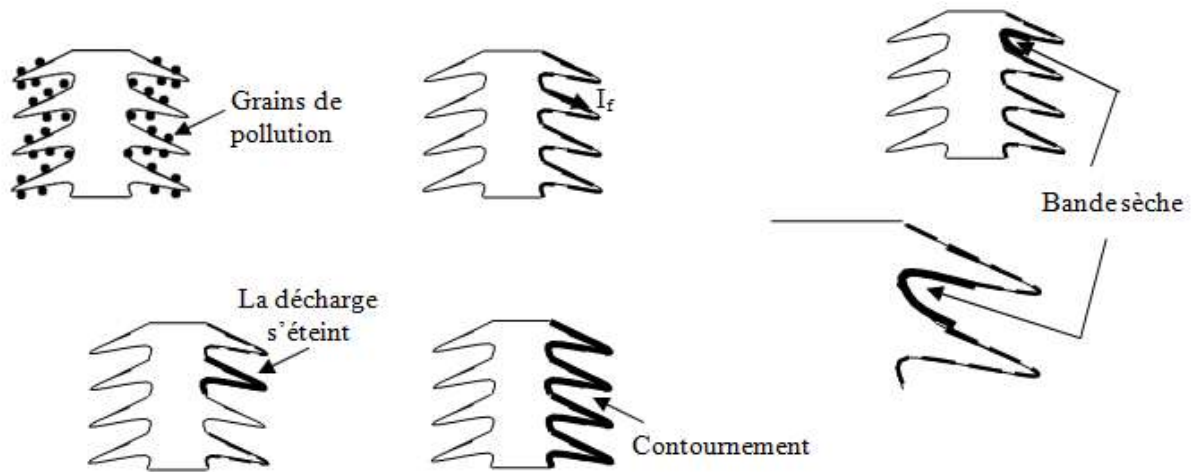
Deuxième phase : un électrolyte conducteur se formera. La résistance de surface reste augmentée pourtant le dépôt de la pollution, à sec. Lorsque la couche de pollution s'humidifie (humidité, rosée du matin, brouillard, pluie...), elle se transforme en électrolyte conducteur et génère un courant de fuite superficiel circulant sur la surface de l'isolateur.

Troisième phase : une bande sèche apparait. Dans les zones étroites de l'isolateur où il y a une densité de courant un peu élevé, il y aura une évaporation d'une partie de l'électrolyte en formant une bande sèche.

Quatrième phase : apparition de contournement. La résistance de la bande sèche est considérée beaucoup plus grande que celle du reste de l'électrolyte, maintenant toute la tension aux bornes de l'isolateur est appliquée aux extrémités de cette région. Il se génère alors un claquage au niveau de la bande sèche :

Soit la décharge s'éteint = il n'y a pas de contournement ;

Soit la décharge se développe sur la surface, c'est-à-dire un contournement de l'isolateur [18].



**Figure II. 10.** Processus de déroulement du contournement sur la surface de l'isolateur

## II.5 .Méthodes utilisées pour lutter contre la pollution

Dans cette section, on présente quelques moyens de prévention de la pollution afin de d'éviter au maximum tous accidents lors de l'exploitation de la ligne. Ces méthodes de contrôle sont basées essentiellement sur des lois de sévérité de la pollution. Cependant, les dimensions initialement correctes peuvent s'avérer insuffisantes face à de nouvelles sources de pollution (travaux routiers, construction de nouvelles usines) [15].

Les techniques proposées pour lutter contre la pollution sont cité ci-dessous :

### II.5.1. Allonger la ligne de fuite de l'isolateur

L'application de cette méthode nous permet de bien adapter les dimensions de l'isolateur au changement des conditions de pollution.

On utilise deux méthodes :

- Changer le type d'isolateur (pour allonger sa longueur): elle est considérée comme une opération un peu coûteuse et difficile à réaliser sur le chantier.
- Prolonger de lignes de fuite en matériaux synthétiques, en collant à la surface des isolateurs déjà existants [16].

### II.5.2. Utiliser des types d'isolateurs plats

L'utilisation de ce type d'isolateurs entraîne une réduction des lignes de fuite isolant. De plus, ce dernier est dépourvu de nervures, à la propriété d'être moins polluant que

les isolateurs traditionnels, et possède une très bonne capacité d'auto-nettoyage. Ils sont principalement utilisés le désert [17].

### **II.5.3. Création d'une couches hydrophobes (Graissage des isolateurs)**

Le lubrifiant a des propriétés hydrophobes, il protège temporairement l'isolateur. La durée de vie de la lubrification dépend de l'état de l'environnement (tel que la pollution et les autres conditions climatiques) et de la qualité intrinsèque du produit. La méthode de graissage est largement utilisée, mais les opérations de nettoyage ensuite de graissage sont fastidieuses, longues et coûteuses. Il demande également un service d'interruption [17,18].

### **II.5.4. Application du Revêtement à base de silicone**

Cette technique est basée sur à l'application d'un caoutchouc de silicone vulcanisant à une température ambiante à la surface de l'isolateur par pulvérisation ou au pinceau. Pareil pour la lubrification, l'application de ce revêtement améliore et protège leur comportement en cas de contamination grâce à leurs propriétés hydrophobes. D'une autre part, sa durée de vie est généralement nettement meilleure que celle des lubrifiants [24,25].

### **II.5.5. Faire un Nettoyages sous ou hors tension**

Faire un nettoyage manuel ou un nettoyage hors tension des isolateurs peut être effectué régulièrement, en particulier dans les sous-stations. Ces méthodes étant désactivées, elles sont susceptibles de provoquer une interruption de service parfois longue. Un lavage fort peut éviter ces coupures. En principe, ce type de nettoyage maintient les isolateurs propres. Ce lavage est réalisé en utilisant des appareils mobiles ou fixes. Il est effectué en suivant des règles strictes qui concernent la qualité de l'eau utilisée dans le lavage, la manière de lavage et même les distances de sécurité qui doivent respecter afin d'éviter tout risque de contournement lors du processus de lavage. Le nettoyage des isolateurs avec des abrasifs broyés sous pression est un Technologie utilisée par certains pays. Cette technique permet de nettoyer l'isolant recouvert de contaminants très adhérents comme le ciment et peut être utilisée pour dégraisser l'isolateur [18,19, 20].

## II.6. Conclusion

Dans ce présent chapitre une brève étude bibliographique sur les isolateurs à haute tension a été présentée. On a discuté leur rôle et leurs divers types, ainsi que la pollution qui est considérée comme l'une des problèmes auxquelles sont soumis les isolateurs des réseaux de transport électrique. On a présenté également, les principaux critères qui régissent le phénomène de contournement.

# Chapitre III

Modélisation et simulation  
bidimensionnelle d'un isolateur  
Propre

# Modélisation et simulation bidimensionnelle d'un isolateur propre

### III. 1. Introduction

L'une des principales menaces pour les isolateurs de capot et tige est le Champ électrique élevé à leurs surfaces, en particulier à Électrode haute tension et borne de terre. Cela peut provoquer un choc Courant important lorsqu'il est mouillé. L'existence des conditions favorables, lorsqu'elles sont exposées à l'environnement, la pollution est grave, le champ élevé favorise la transmission d'une décharge à la surface d'un isolateur. De plus, l'activité de décharge continue de provoquer une dégradation du matériau (figure III.1) sur toute la surface suivi et érosion, ce qui réduira la tension de claquage et propriétés isolantes. Compte tenu de ces conséquences néfastes, le contrôle efficace du stress sur le terrain pour atténuer les effets de cette décharge nocive sur l'isolateur est nécessaire. Les effets électriques peuvent être représentés en termes de deux grandeurs de champ et de potentiel électrostatique. Pour déterminer la répartition du potentiel et du champ électrique d'un isolateur, nous utiliserons le logiciel Comsol Multiphysics qui est basé sur la méthode FEM. Il nécessaire d'offrir un environnement simulé, dont la possibilité d'ajouter des différents phénomènes physiques au modèle de recherche est inclus. COMSOL Multiphysics a été développé dans cet esprit. L'optimisation du champ électrique et du potentiel est recherchée pour améliorer les performances de l'isolateur pendant le fonctionnement en régime permanent et en surtension. Dans ce chapitre, des simulations sont faites pour évaluer et étudier la répartition du champ électrique et de potentiel autour de l'isolateur étudié et cela dans des conditions spécifiques et les résultats de cette partie seront comparés avec ceux donnés à partir d'un isolateur pollué.

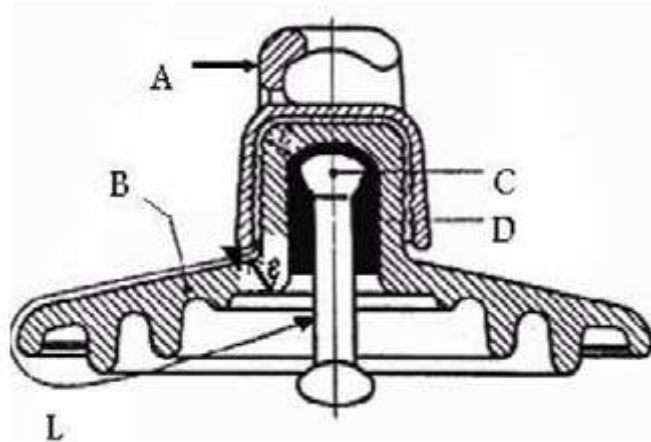




**Figure III. 1.** Dégradation d'un isolateur

### III.2. Isolateur étudié

Dans ce travail, les simulations numériques sont réalisées sur le modèle isolateur 1512L en verre trempé. Ce modèle a été sélectionné pour étudier la répartition de potentiel et du champ électrique. La structure de l'isolateur est illustrée dans la figure III.2. L'isolateur est composé d'un bloc isolant qui porte sur sa partie supérieure un capot formé en fonte malléable et au niveau intérieur une tige en acier, avec cannelures et dans la tête conique est également scellée dans le verre. L'extrémité qui se trouve au niveau inférieur de la tige est menée d'une forme arrondie et a des dimensions voulues pour permet la pénétration dans le capot de l'élément qui se suit et y être maintenue par une goupille. L'ensemble consiste à former un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique [21-25].



**Figure III. 2.** Schéma présentant le modèle de l'isolateur 1512L

**A** : capot.

**B** : verre trempé ou céramique (le diélectrique).

**C** : la tige.

**D** : le ciment.

**L** : distance la plus courte dans l'air entre la tige et le capot.

$\varepsilon$  : longueur du canal de perforation,  $\varepsilon < L/2$ .

Les dimensions de l'isolateur 1512L utilisé de cette étude, sont représentées dans le tableau III.1.

**Tableau III. 1.** Grandeurs de l'isolateur 1512

| La Grandeur                                     | La Valeur en (mm) |
|---|-------------------|
| Longueur de l'isolateur                         | 292               |
| Distance de contournement considérée dans l'air | 230               |
| Capot   | 244               |
| Tige  | 125               |

### III.3. Modélisation d'un isolateur Propre

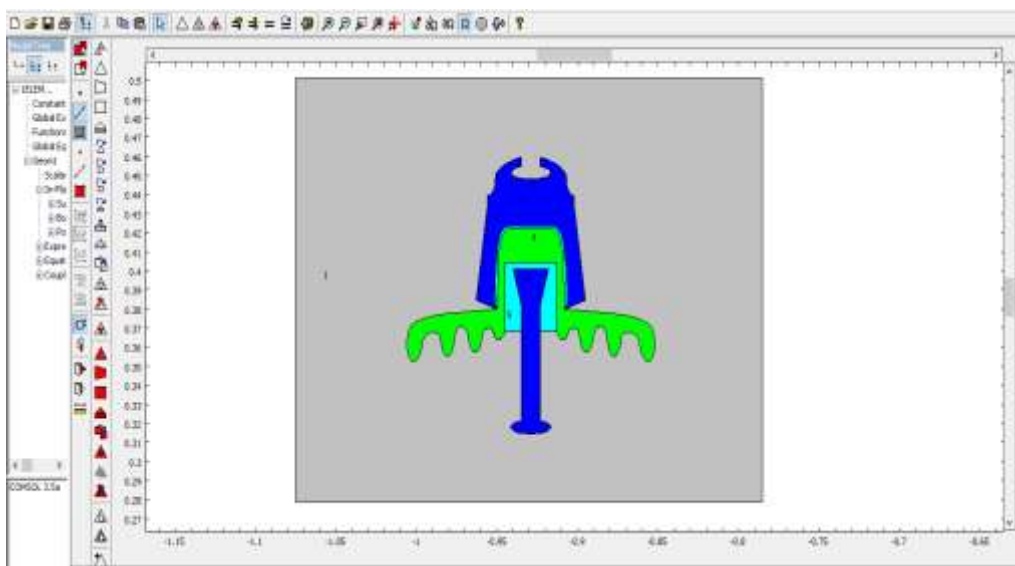
La modélisation et les calculs sur le terrain de cette étude ont effectués en utilisant d'un logiciel basé sur la méthode des éléments finis, Comsol Multiphysics version 3.5a. La simulation est effectuée en trois étapes consécutives à savoir, pré- traitement, résolution et étapes de post traitement. Composantes du problème physique telles que la structure, propriétés des matériaux et des limites, ainsi que les critères de maillage sont présentés en tant qu'entrées dans la phase de pré-traitement. Le modèle mathématique, normalement exprimé sous forme des équations différentielles qui décrivent le problème physique, est exécuté dans l'étape de résolution. Enfin, dans l'étape de post traitement, le package permet aux utilisateurs de générer un graphique de la variables ou paramètres de post-traitement. Le modèle de l'isolateur Capot et tige a été créé en utilisant le COMSOL. Étant donné que la structure de l'isolateur est de forme cylindrique, la modélisation peut être simplifiée en un modèle bidimensionnel (2D). Cette simplification peut économiser une mémoire et un temps de traitement considérables sans affecter la précision de résultats de la simulation [26].

### III.4. Logiciel COMSOL Multiphysics

Le logiciel COMSOL a été créé par l'entreprise "Comsol" en 1986, spécialisée dans le développement de logiciels de support technique, de formation spécialisée et de conseil. Le logiciel est utilisé par de nombreuses grandes entreprises dans le monde entier pour modéliser et simuler tout système basé sur la physique. Il facilite grandement les étapes de modélisation et de simulation, telles que la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux et des conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats. Pour cette étude, le logiciel COMSOL Multiphysics a été choisi pour modéliser la couche conductrice recouvrant l'isolateur.

#### III.4.1. Les modèles

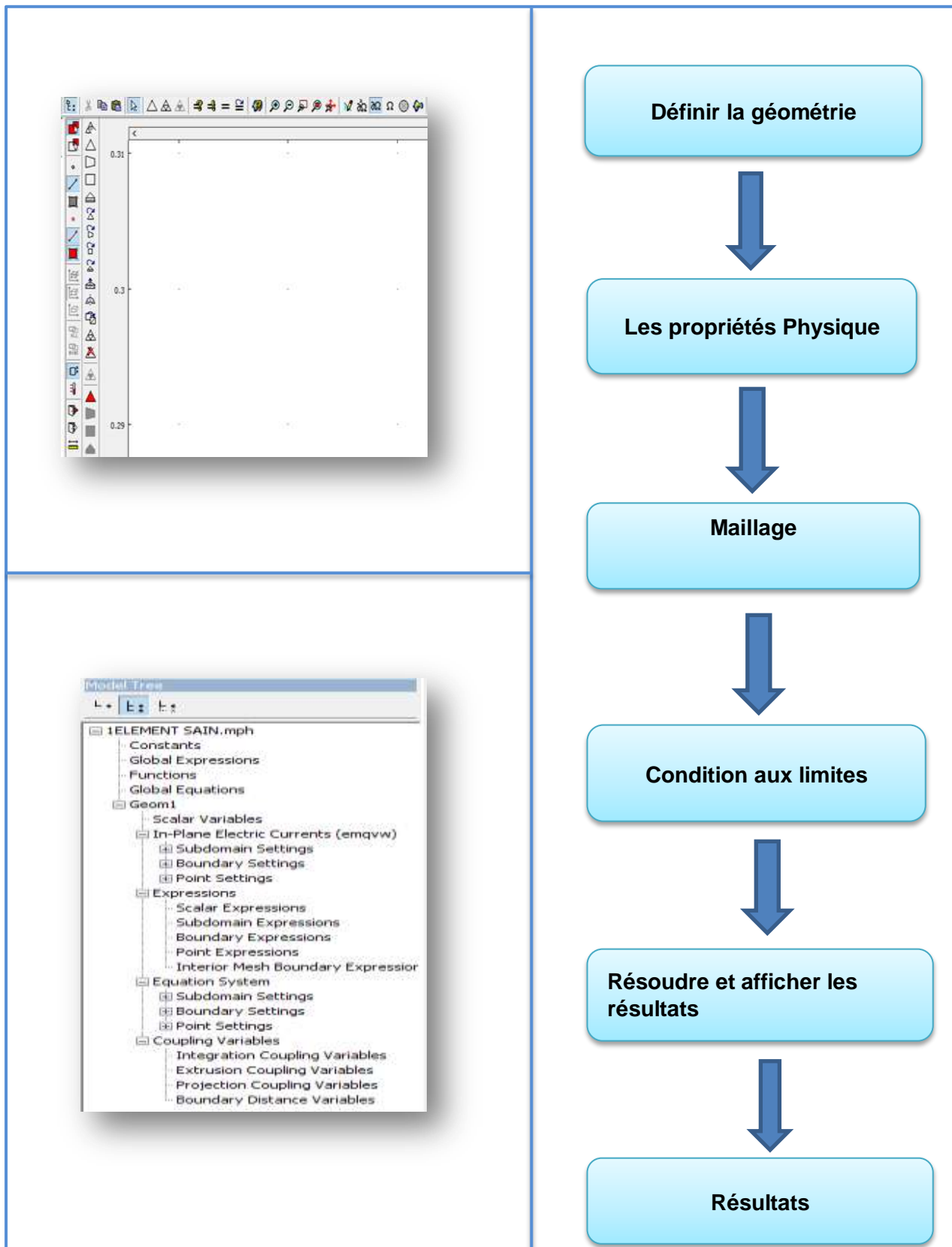
Il existe une variété de modules spécifiques à l'application pour le logiciel COMSOL Multiphysics tels que : AC/DC Module, Acoustics Module, CAD Import Module, Chemical Engineering Module, Structural Mechanics module et Earth Science Module. Le modèle AC/DC simule les dispositifs et les composants électriques dépendant de la Magnétostatique, l'électrostatique, électromagnétique quasi-statique application. Les simulations sont basées sur les équations de Maxwell et sur les lois des matériaux. La figure III.3 montre une interface utilisateur typique du logiciel.



**Figure III. 3.** L'interface utilisateur typique du logiciel

### II.4.2. Organigramme de modélisation

Pour l'utilisation de COMSOL Multiphysics il faut suivre les étapes suivantes :



**Figure III. 4.** Organigramme de Modélisation par COMSOL Multiphysiques

### II.4.3. Processus de simulation

La conception d'un modèle dans Comsol suit les étapes suivantes [21]:

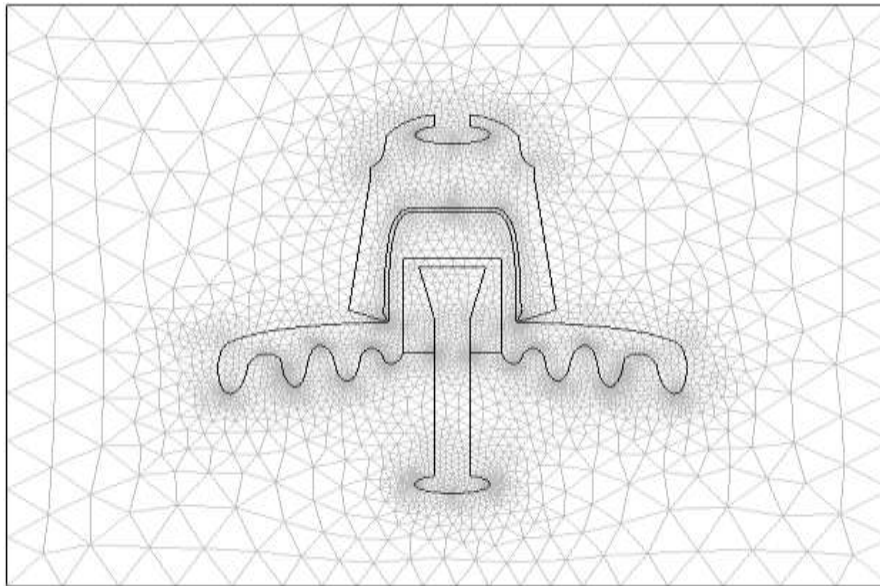
- Utiliser un physique définie précédemment.
- Implémenter et résolution d'un modèle Multi physique.
- Définir de propriétés physiques dépendent de la solution désirée.
- Faire une analyse temporelle.

La construction d'un modèle suit notamment les étapes mentionnée ci-dessous:

- Définir de la structure et de la géométrie.
- Définir de la physique et des conditions aux limites.
- Faire un Maillage.
- Faire Résoudre le problème.
- Arriver au Post-traitement et l'analyse des résultats obtenus.

### III.4.4. Le Maillage

La grille est une représentation discrète de l'espace géométrique, découpée en volumes élémentaires appelés grilles et définis par des nœuds. Ces derniers servent de points de connexion entre les mailles, et le maillage est généré automatiquement par le logiciel. L'algorithme utilise des éléments géométriques comme point de départ pour créer des nœuds supplémentaires jusqu'à ce que certains critères prédéfinis soient atteints, tels que le nombre de mailles ou la taille maximale des points. Vous pouvez sélectionner des maillages triangulaires dans ce travail par logiciel en utilisant des dimensions prédéfinies (extra grossier, grossier, normal, fin, extra fin, etc.) ou en agissant sur les paramètres de génération de maillage. Le choix du nombre de grilles est important Définition de la structure d'étude 2D (mesureur, dimension, matériau) Visualisation des conditions aux limites de la grille Les résultats de résolution doivent être équilibrés, car moins d'éléments de grille dégradent la précision des résultats de simulation Trop d'éléments consommation mémoire et temps de traitement. Les nombres optimisés offrent des temps de calcul plus rapides sans compromettre la précision des résultats [21, 22].



**Figure III. 5.** Maillage

### III.5. Simulations et interprétation:

#### III.5.1. propriétés des matériaux

Capot et tige en verre Il existe cinq domaines, chacun est caractérisé par le constant diélectrique relatif et la conductivité. On tire ces valeurs à l'aide de la bibliothèque des matériaux s'il existe, sinon on cherche dans les revues bibliographiques .Les caractéristiques électriques des domaines sont illustrées dans le **tableau III .2.**

**Tableau III. 2.** Données nécessaires pour isolateur Capot et tige en verre

| Domaine          | Constante diélectrique relative $\epsilon_r$ | Conductivité $\sigma(S)$ |
|------------------|--|--------------------------|
| Verre trempé     | 4,2  | 0                        |
| Fonte malléable  | 1000   | $5,9.10^7$               |
| Ciment alumineux | 15,00  | $1.10^{-4}$              |
| Acier            | 1000   | $5,9.10^7$               |
| Air              | 1.00   | 0                        |

### III.5.2. Conditions aux limites

Pour le cas étudié, nous avons pris les cas de figure suivants comme conditions aux limites :

Scénario 01: on prend un seul isolateur Propre (une ailette) en appliquant une tension 10KV.

Scénario 02: on prend 3 ailettes attachées Propre (petite chaîne) en appliquant une tension 30 kV.

### III.5.3. Résultats et interprétations

#### III.5.3.1. Distribution du potentiel électrique (une seule ailette)

Un isolateur Capot et tige avec une seule ailette 10 kV a été modélisés et simulé avec succès en Comsol. Les résultats de simulation ont été décrits et interprétés par la suite.



**Figure III. 6.** Isolateur sans Pollution développé par Comsol

Dans la figure III.7, les résultats de simulation pour les lignes équipotentielles d'un isolateur propre sont représentés. A partir de ces résultats, on peut constater que la distribution de la tension ne parait pas uniforme et meme la zone près de l'électrode HT est la plus concentrée alors que celle proche de l'électrode terre, la tension est pratiquement nulle.

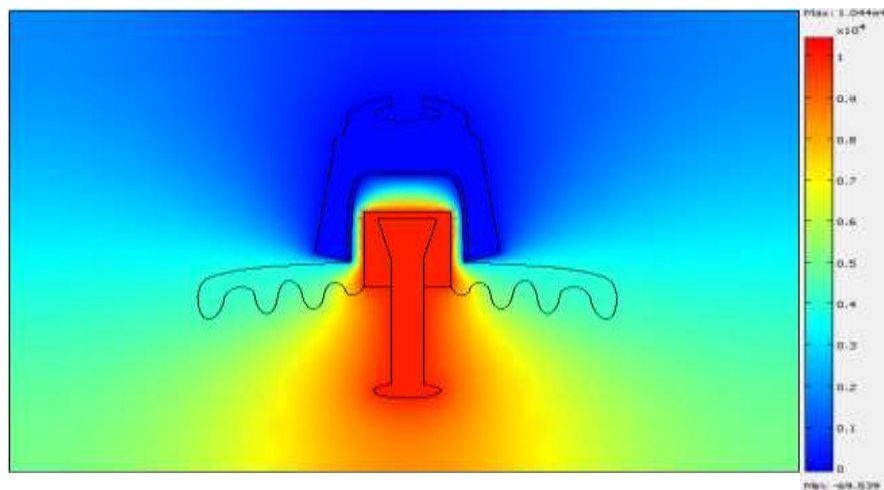


Figure III. 7. Potentiel électrique de l'isolateur Propre

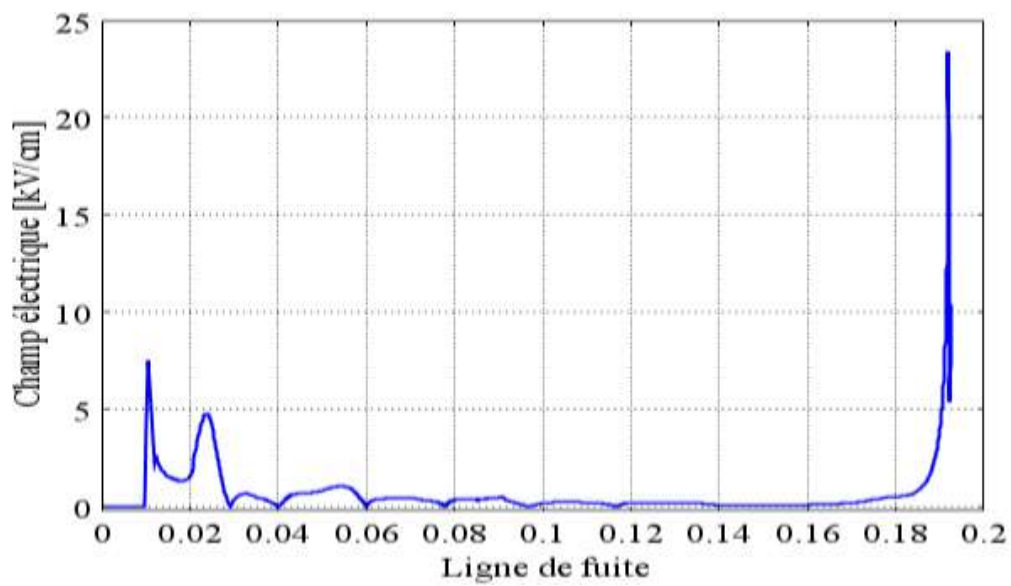


Figure III. 8 . Evolution de Champ électrique le long de la ligne de fuite

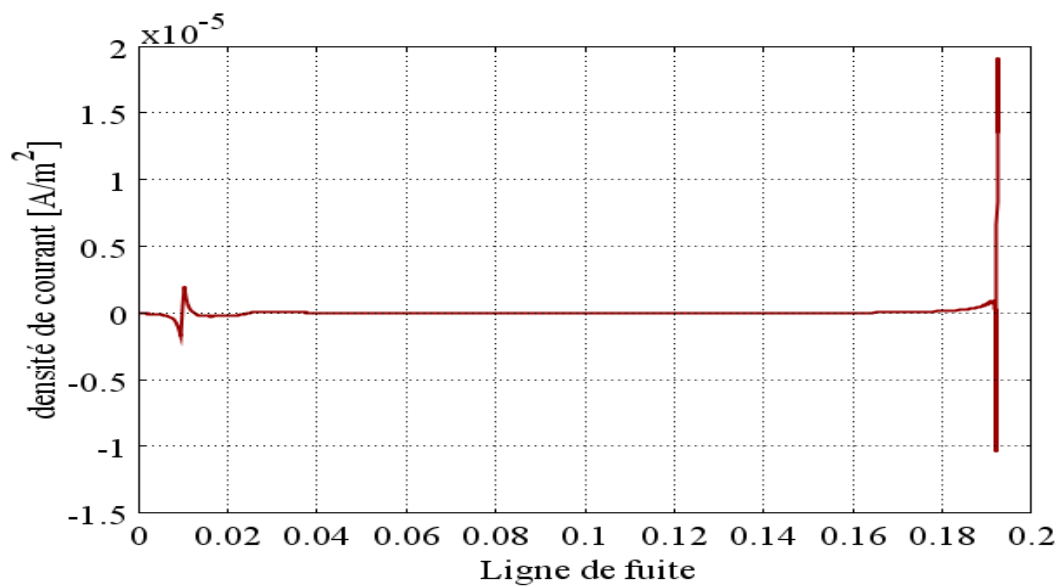


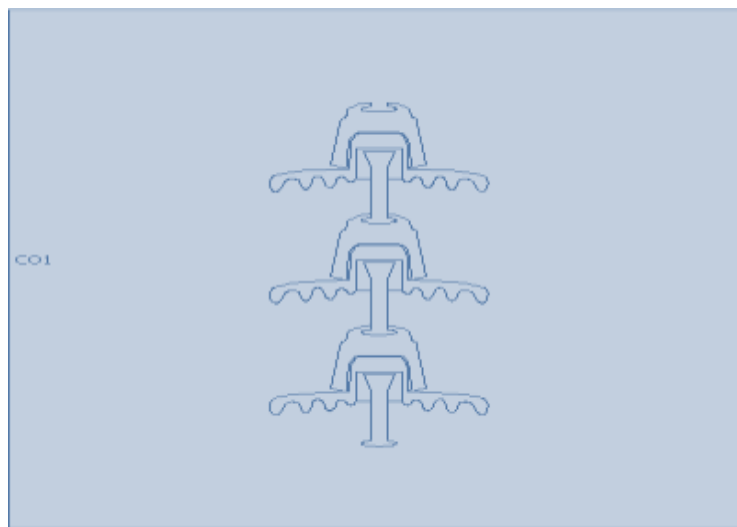
Figure III. 9. Densité de courant le long de l'isolateur



D'après les figures III.8 et 9, On peut remarquer que le champ électrique devient plus fort et condensé près de l'électrode HT (tige), tandis qu'il s'affaiblit près de l'électrode de masse (capot). De plus, les lignes de champ électrique divergent de l'électrode HT à l'électrode de masse. La variation de la densité de courant de fuite le long de l'isolateur dans les conditions propres peut générer une tension de contournement. En raison de la géométrie, le champ électrique et la densité de courant longitudinal à la surface d'un isolateur sont toujours inhomogènes. La densité de courant, qui varie avec la forme de l'isolateur, est plus grande dans la zone du cylindre avec la plus petite zone, la zone en forme de tige. Un champ électrique amélioré combiné à une densité de courant élevée entraîne une dissipation de puissance accrue.

### III.5.3.2. Distribution du potentiel électrique (Trois ailette)

Un isolateur Capot et tige avec trois ailettes (30 kV) a été modélisés et simulé avec succès en Comsol. Les résultats de simulation ont été décrits et interprétés par la suite.



**Figure III. 10.** Trois ailettes sans Pollution développé par Comsol

La figure III.11 illustre la variation du potentiel le long de l'isolateur capot et tige. On peut remarquer que Le potentiel électrique est important pour le coté haute tension (HT) puis il diminue lorsqu' on s'éloigne vers le coté terre. Dans le cas de notre modèle (trois ailettes), 30 kV est la valeur maximale de la tension appliquée. La tension est apparue augmentée à côté de la tige, coté HT, puis elle se décroît linéairement lorsqu'elle s'éloigne vers le Capot 'mise à la terre ', ensuite, le potentiel s'est annulé.

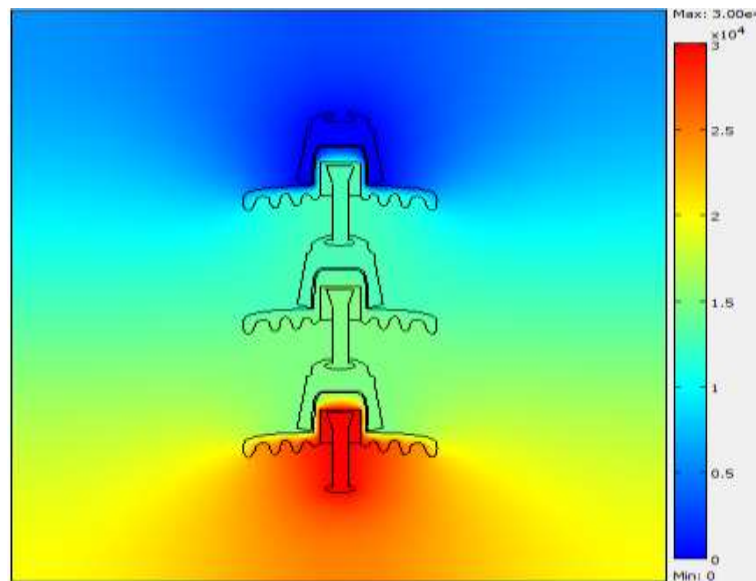


Figure III. 11. Le Potentiel électrique de Trois ailettes sans Pollution

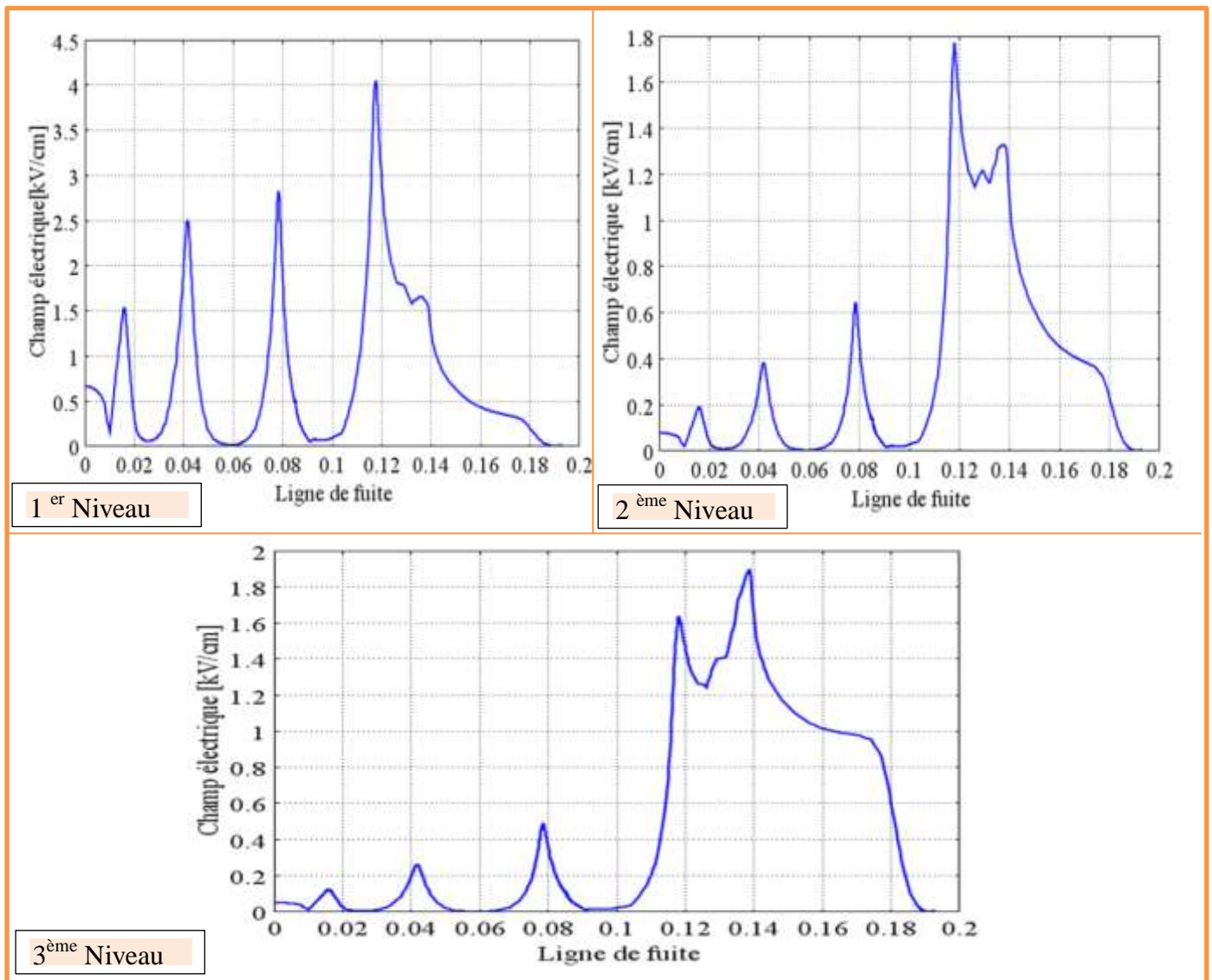


Figure III. 12. Evolution Champ électrique des trois niveaux de tension appliquée

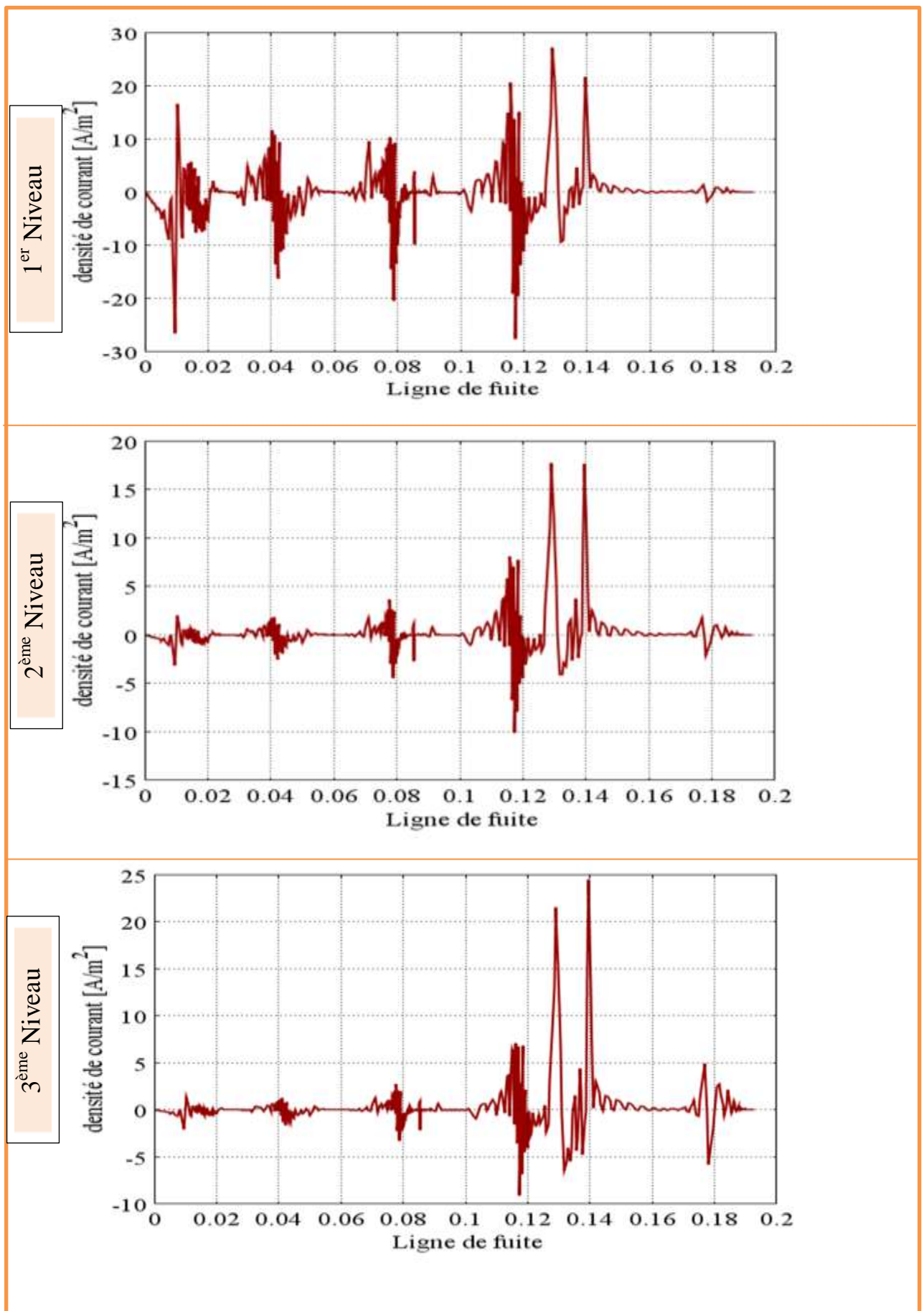


Figure III. 13. Le courant électrique des trois niveaux de tension appliquée

D'après la figure III.12.13, On peut remarquer que le champ électrique devient plus faible à l'électrode de masse en 3<sup>ème</sup> niveau (capot), tandis qu'il est plus élevé près de l'électrode HT en 1<sup>er</sup> niveau (Tige). De plus, les lignes de champ électrique divergent de l'électrode HT à l'électrode de masse. Le changement de la densité de courant lié au changement de champ électrique Ou on remarque que le courant est faible dans niveau de terre (capot) et commence à monter progressivement Dans niveau HT (tige).

### III.5. Conclusion

Un isolateur Capot et tige 15 12L proposé et a été modélisé et Simulé. Dans ce chapitre, L'objectif fondamental était l'évaluation de la répartition et du champ du potentiel électrique le long de l'isolateur propre (sans pollution). D'après les résultats obtenus, on constate que le champ électrique est plus fort et condensé près de l'électrode HT, puis il se décroît lorsqu'on s'éloigne vers le coté terre.

# Chapitre IV

**Analyse du Champ Electrique  
d'un isolateur pollué et  
Méthodologie des Surfaces de  
Réponse**

# Analyse du Champ Electrique d'un isolateur pollué et Méthodologie des Surfaces de Réponse

### IV. 1. Introduction

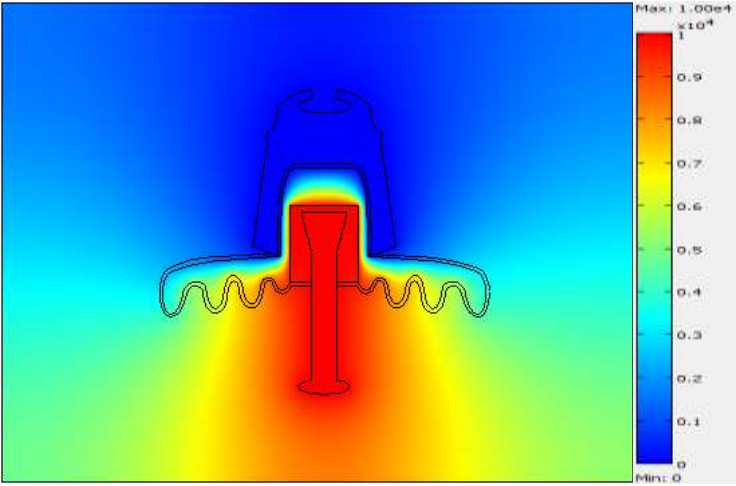
L'expérience a montré que la capacité d'isolation des isolateurs de ligne aérienne est fortement réduite par la présence de couches conductrices étrangères recouvrant la quasi-totalité de la surface de l'isolateur. Nous présentons dans ce chapitre les résultats de simulations de la distribution de champ et du potentiel électrique le long de l'isolateur proposé dans des conditions polluées. Des différentes conductivités ( $10 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,  $30 \mu\text{S}/\text{cm}$ ,  $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) de couche de pollution et trois distributions de la pollution (répartition continue et discontinue en pulvérisant la surface supérieure puis, la surface inférieure de l'isolateur et la surface complète) ont été appliquées. C'est paramètres sera variés à chaque fois dans cette recherche. La technique statistique de la variance (ANOVA) est utilisée pour évaluer l'impact de chaque paramètre. La relation entre l'amorçage de surface, le champ électrique maximal et l'intensité de claquage et les paramètres choisis sont modélisée par la technique de méthodologie de surface de réponse (RMS).

### IV.2. Évaluation de la distribution de tension appliquée sous conditions de pollution

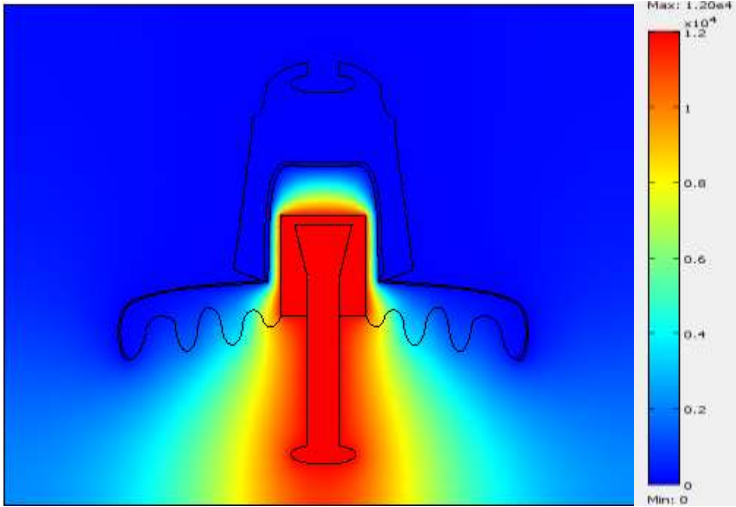
Dans cette section, la tension et la distribution du champ électrique en appliquant une couche de pollution sur la surface d'un isolateur sera étudiée. L'objectif est de voir l'effet de différentes conductivités et propriétés de contamination sur la distribution de tension. Pour cela, nous présenterons ci-dessous plusieurs scénarios de comparaison tout en comparant les résultats obtenus avec le cas traité dans le chapitre précédent.

#### IV.2.1. Cas d'une Pollution non-uniforme

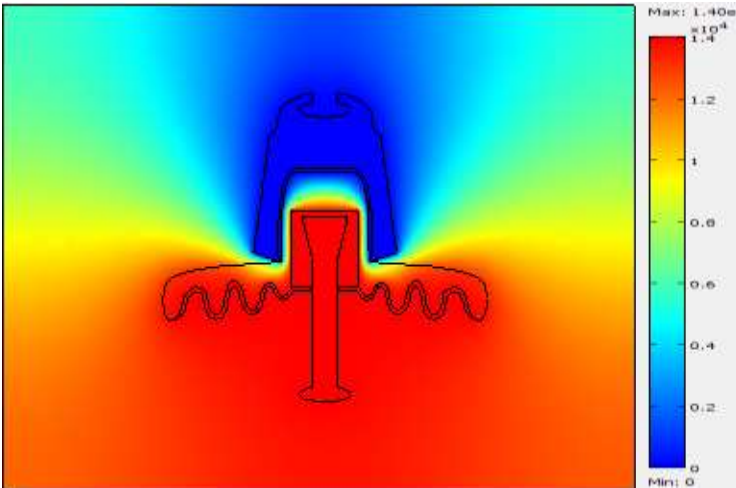
Dans cette étude, on a appliqué une couche de pollution non-uniforme à la surface de l'isolateur. Les résultats de simulations sont illustrés dans les figures IV.1---IV.3.



Pollution Complete (V=10kv)

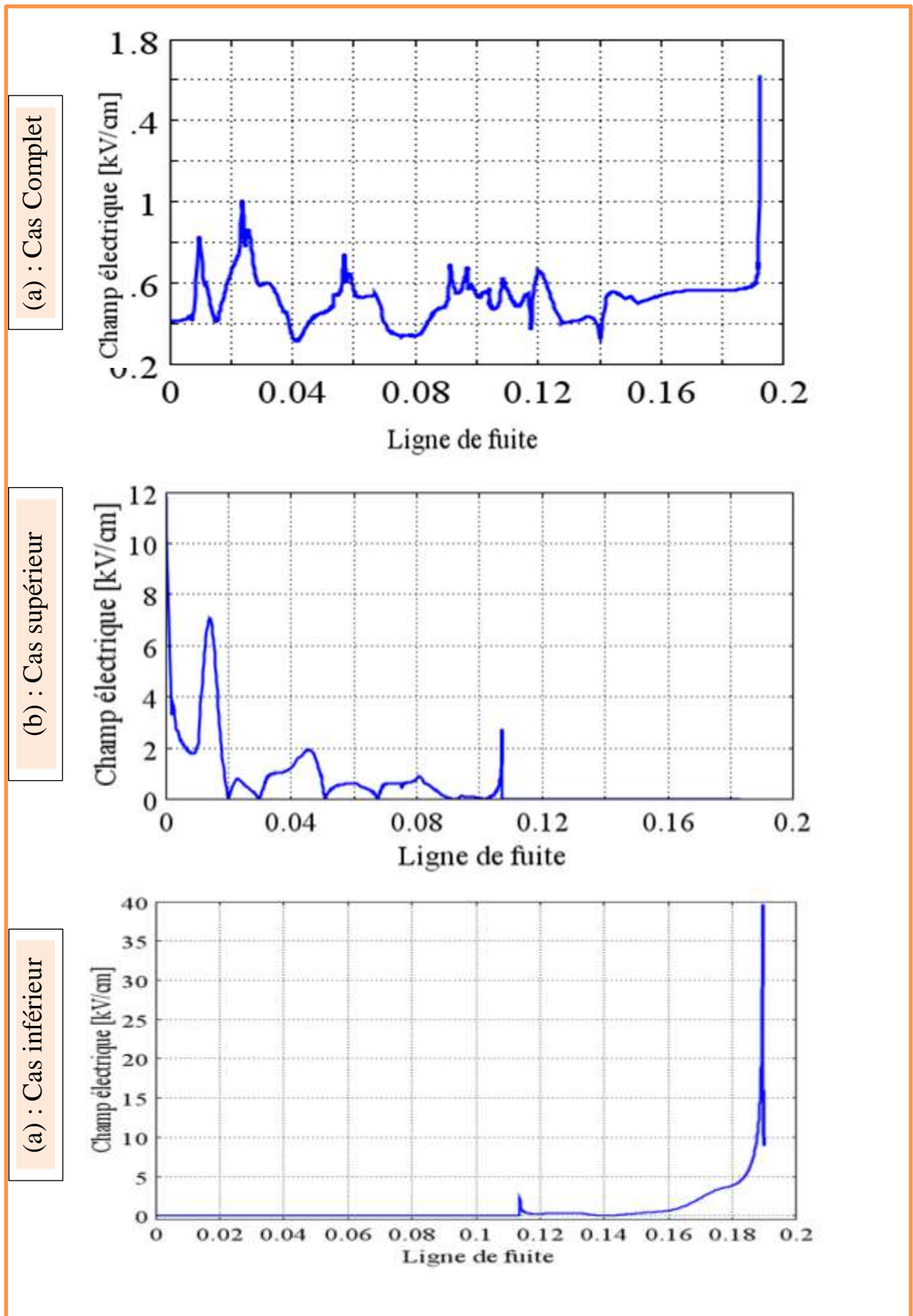


Pollution supérieure (V=12kv)



Pollution inferieure (V=14kv)

Figure. IV. 1. Distribution équipotentielle en cas de Pollution non-uniforme



**Figure.IV. 2.** Evolution du Champ électrique en fonction de la ligne de fuite de cas étudiés



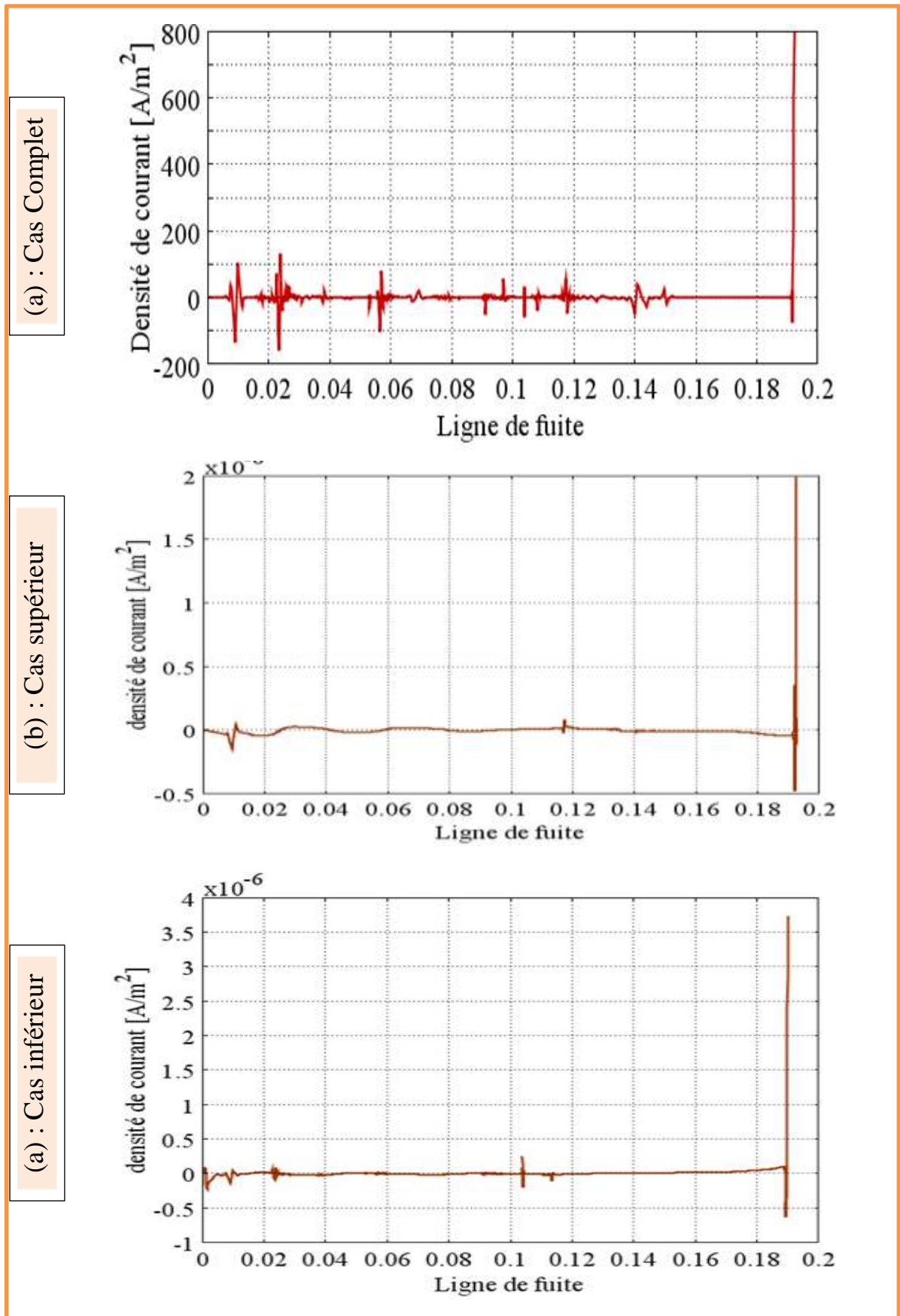
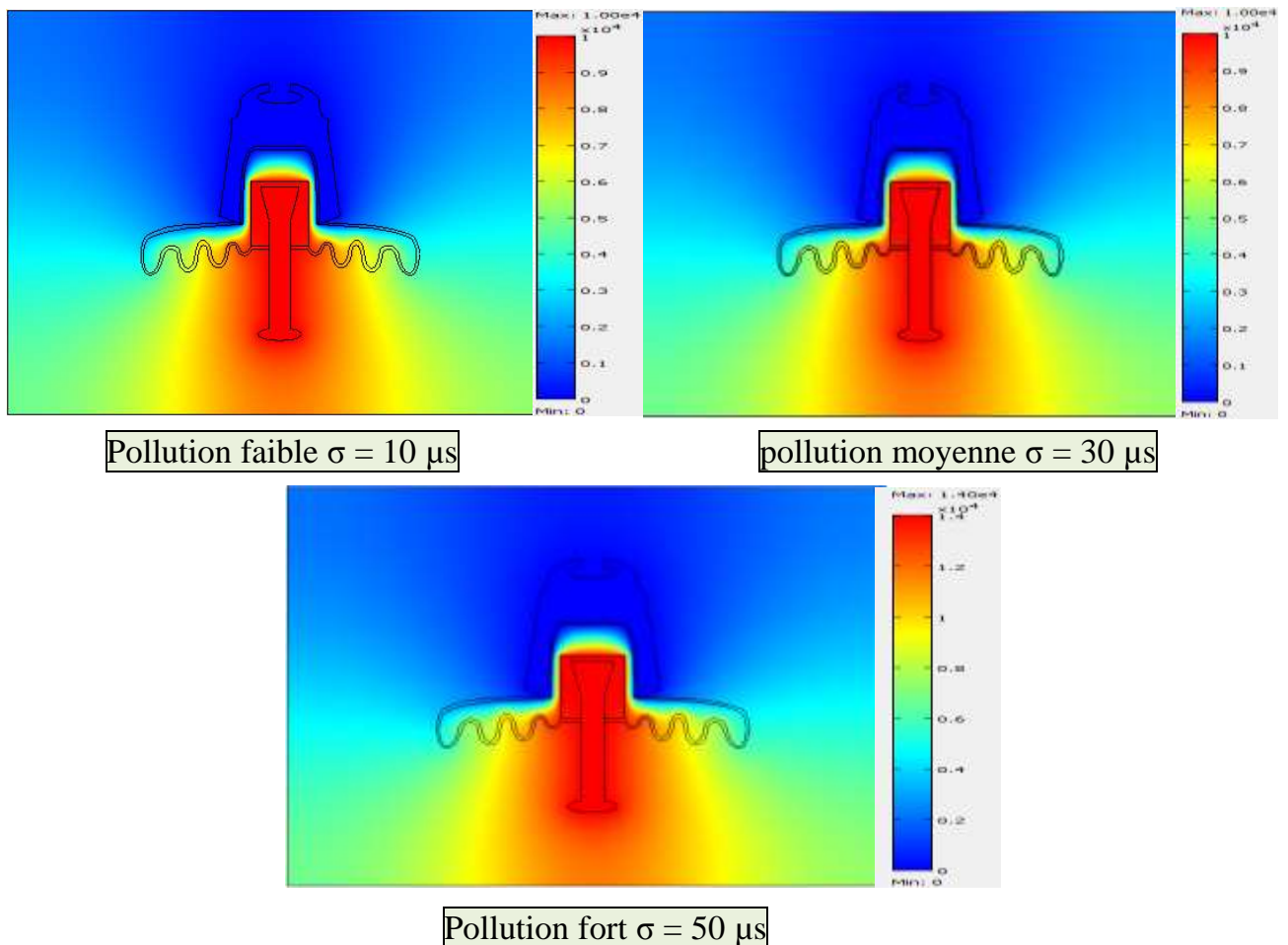


Figure. IV. 3. Densité de courant de tous les cas étudiés

On remarque que, comme prévu, les potentiels ont un maximum à proximité de l'électrode haute tension et commencent à diminuer jusqu'à l'annulation près de côté terre. La répartition axiale de champ électrique et du potentiel dans le cas d'une couche polluée est comme prévu, le genre de pollution affecte fortement la répartition de potentiel et la rend non- uniforme, ce qui signifie que les isolateurs ne sont pas soumis aux mêmes contraintes que les isolateurs qui favorisent l'apparition d'amorçages et dans des conditions polluées. La Variation de la densité de courant de fuite le long d'une couche de contamination non uniforme sur un isolateur en verre, entraînant une tension d'amorçage.

#### IV.2.2. Cas d'une Pollution uniforme

Cette fois ci, on applique une couche uniforme de pollution avec une conductivité de ( $10\mu\text{S}$ ,  $30\mu\text{S}$  et  $50\mu\text{S}$ ) à la surface de l'isolateur. Les résultats obtenus sont illustrés dans les Figures: IV.4---IV.6.



**Figure. IV. 4.** Distribution de champ électrique pour plusieurs valeurs de conductivité

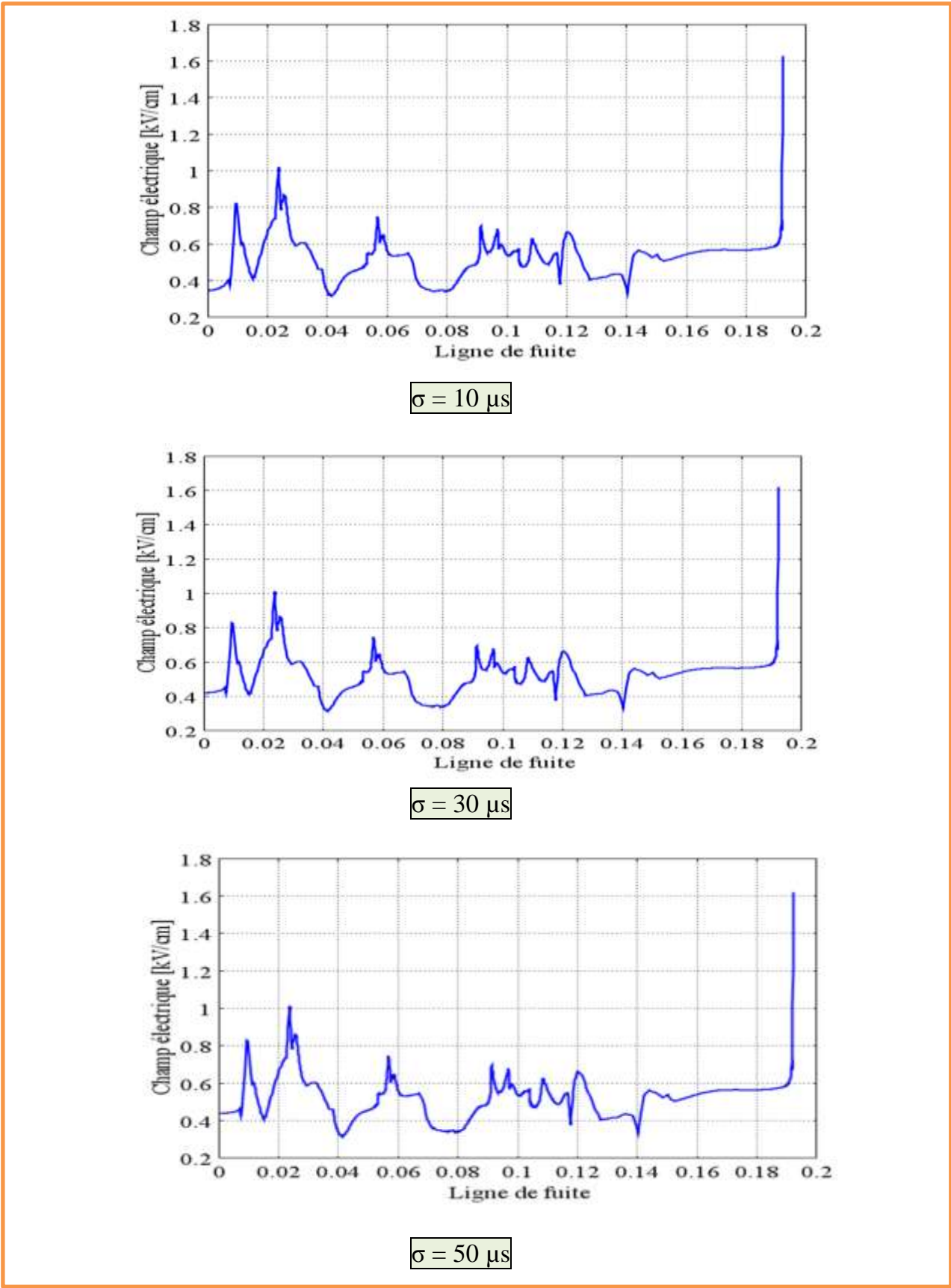


Figure. IV. 5. Evolution de Champ électrique le long de l'isolateur  
[ $\sigma= 10,30$  et  $50\mu s$ ]

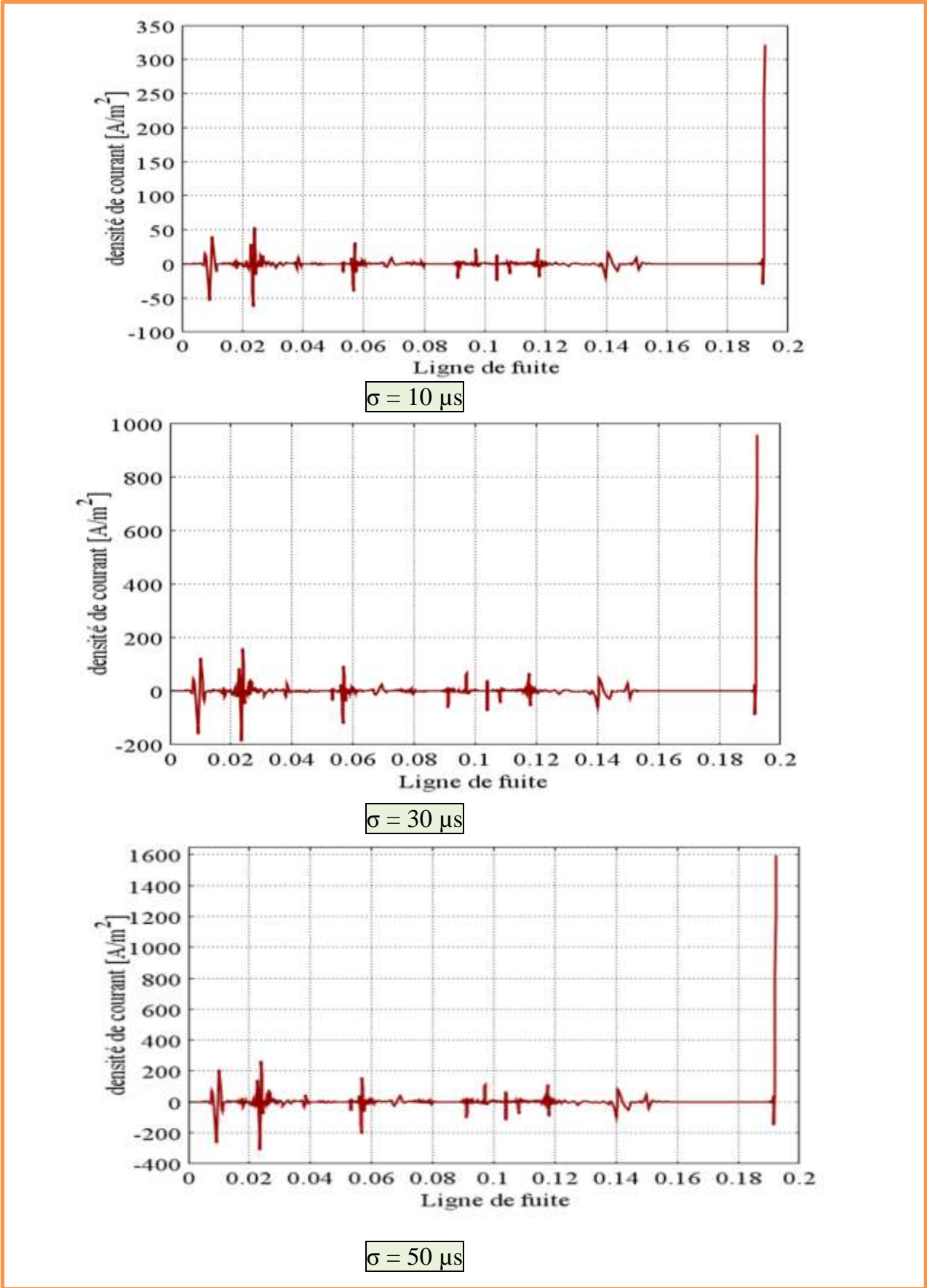


Figure . IV. 6. Densité de courant le long de l'isolateur

D'après les figures IV,5 et 6, nous remarquons la distribution de champ de l'isolateur, lorsqu'une tension est appliquée, la distribution de champ électrique redevient nettement plus uniforme. De plus, les pics de champ électrique observés ont été réduits avec succès lorsque l'application de pollution a été effectuée. Il convient de noter que l'effet du NaCl apparaît comme une redistribution uniforme du champ électrique, et la tension d'amorçage diminue à mesure que la conductivité de la pollution augmente. L'explication qui peut être donnée aux résultats obtenus est que, pour toutes les tensions appliquées, la conductivité la plus élevée semble être que le courant de fuite augmente d'une façon non-linéaire avec la conductivité. Nous notons que la conductivité affecte le courant de fuite, donc le courant augmente à mesure que la conductivité de la pollution augmente. On constate que pour une augmentation de courant de fuite il y aura une augmentation de la tension appliquée pour toutes les conductivités.

### **VI.3. Etude de l'effet de la température**

La température est considérée comme un facteur important pour tous les types de matériaux constitue les isolateurs électriques aériens. Elle change le plus dans les phases de contrôles industriels. Les matériaux utilisés comme isolants solides ne permet pas de dégager une loi générale sur leurs comportements en température à cause leur grande diversité. Dans la section suivante, on a évalué la densité d'énergie électrique pour les cas : propre et pollué et en cas de pollution supérieure et inférieure. Les résultats sont illustrés sur la figure VI.7. Il est notable que plus la surface isolante est polluée (cas de pollution uniforme), plus la valeur calorifique par effet joule est élevée. Cela réchauffera la membrane polluante qui recouvre la surface de l'isolateur. Ce chauffage évaporerait l'humidité dans la couche de pollution. L'intensité du flux de fuite redevient considérable aux extrémités des régions sèches, nous constatons que les annulations actuelles et la résistance de la couche polluée prennent une valeur un peu très élevée. La distribution des potentiels à l'isolateur doit être ajustée par la présence de ces bandes sèches et la plupart des lignes de champ électrique sont concentrées dans ces bandes. De ce fait, la tension doit être appliquée principalement aux bornes de bandes.

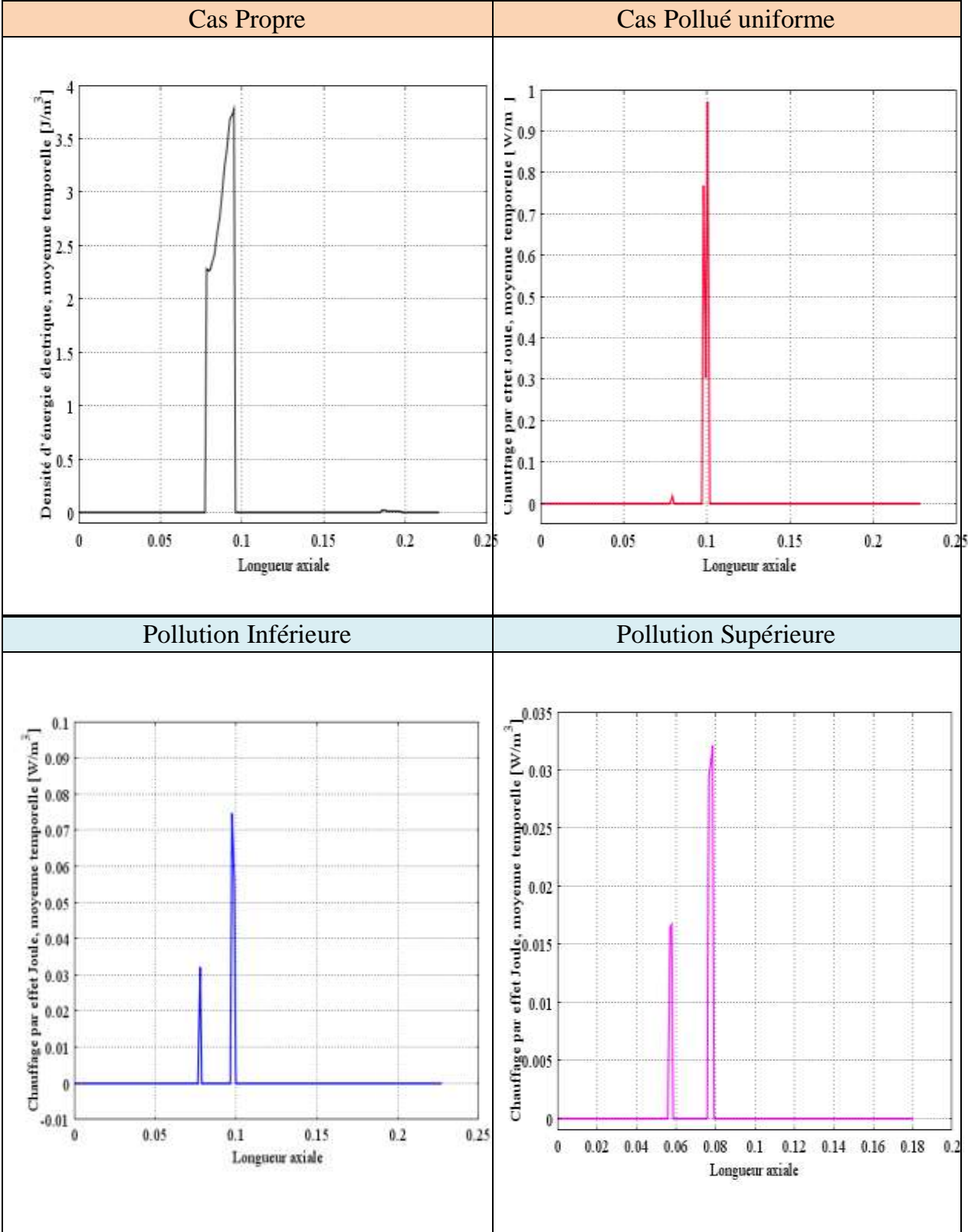


Figure .IV. 7. Chauffage par effet Joule en fonction de la longueur axiale

#### IV.4. Méthodologie Des Surfaces De Réponse (M.S.R)

La surface de réponse est généralement définie comme la représentation géométrique de la réponse d'un processus physique spatio-temporel aléatoire à des variables stimuli. La propriété étudiée, ou réponse Y, est obtenue par le transfert des variables d'entrée du système via une fonction de réponse explicite, également appelée fonction de transfert. Les modèles expérimentaux des surfaces de réponse prennent en compte les variables stimuli, les périodes d'observation et le calcul d'erreur. Les variables d'entrée, notées  $X_i$  ( $i= 1..... n$ ), sont les stimuli représentatifs du phénomène et sont également appelées variables de base. Cette méthode permet une interprétation rapide et précise du système étudié. Pour utiliser cette méthode, il faut définir le système ainsi que la réponse à modéliser et les facteurs susceptibles de modifier cette réponse. Ensuite, le nombre de facteurs pour l'étude ainsi que le nombre de niveaux est défini. Dans ce contexte, la méthodologie de surface de réponse est utilisée pour modéliser la relation entre les facteurs étudiés et la tension appliquée sur l'isolateur.. Dans ce travail, nous avons opté pour la conception de Taguchi, qui permet d'utiliser la modélisation des surfaces de réponse, qui est généralement considérée dans le contexte de la conception expérimentale comme une méthode statistique de modélisation et d'optimisation des problèmes dans lesquels différentes variables affectent une réponse d'intérêt. La première étape de RSM consiste à déterminer une approximation appropriée de la relation fonctionnelle réelle entre la variable de réponse y et un ensemble de variables indépendantes.

##### IV.4.1.Analyse de Taguchi

La méthode de Taguchi utilise spécifiquement des techniques de conception expérimentales. Le plan d'expériences de Taguchi traite conjointement de la moyenne et de la variabilité des valeurs propres mesurées. Ainsi, la méthode de Taguchi enrichit les méthodes de planification expérimentale en apportant des améliorations considérables aux plans factoriels complets et partiels. Il se caractérise par Réduire significativement le nombre de tests tout en conservant une bonne précision .

#### IV.4.1.1. Plan de Taguchi

Comme une première, un tableau orthogonal qui correspond au plan d'expériences. Cette table orthogonale constitue la liste des expériences est défini. ensuite, une analyse statistique suivant les résultats des expériences peut être réalisée. Dans la deuxième série, le tableau orthogonal standard de Taguchi L9 est adopté comme un plan expérimentale, Les niveaux des paramètres ont été choisis dans des intervalles bien déterminer pour s'adapter avec le modèle choisis, Les paramètres à étudier et l'attribution des niveaux respectifs sont indiqués dans le (tableau IV.1), Trois niveaux pour chaque paramètre sont choisis, Trois conductivité (10us/m,30us/m,50us /m), trois Niveau de tension (10kv, 12kv ,14kv) ,et trois positions sont adoptées pour obtenir une pollution non uniforme (de la bande de la pollution dans la côté HT, bande à côté de l'électrode de masse et la dernière au centre du modèle), les positions sont codées par les valeurs(1,-1,0) respectivement à HV ,masse et en position centré.

Pour résoudre les problèmes de conception par les techniques d'optimisation, il faut formuler une fonction objective. La conception optimale est obtenue en réduisant le champ électrique via cette fonction. La fonction objective consiste en une relation mathématique entre les amplitudes du champ électrique et les paramètres de l'isolateur Il est représenté comme suit:

$$E=37,01+ 2,940 V+1043 G - 7,982 P+ 0,005417 V*V - 5833 G*G+ 19,83 P*P - 57,92 V*G - 0,3500 V*P$$

Dans ce travail; nous avons étudié l'influence de pollution sur contraintes de champ électrique maximales autour de l'isolateur capot et tige à une seule ailette. Les plages de variation de tous les paramètres importants sont indiquées dans le tableau IV.1. La Tension (V), Position (P) et la Conductivité (σ).

**Tableau IV. 1.** Paramètres de L'isolateur Pollué.

| Paramètres                | significations | Variation des ranges     |
|---------------------------|----------------|--------------------------|
| Niveau de tension         | V              | 10kv / 12kv / 14kv       |
| Position de pollution     | p              | -1 / 0 / 1               |
| Conductivité de pollution | σ              | 10us/m , 30us/m , 50us/m |



Les paramètres à étudier et leurs niveaux sont indiqués dans le tableau IV.2

**Tableau IV. 2.** Résultats informatiques.

| V  | P  | $\sigma$ | E     |
|----|----|----------|-------|
| 10 | -1 | 0,01     | 28,30 |
| 10 | 0  | 0,03     | 1,61  |
| 10 | 1  | 0,05     | 9,91  |
| 12 | 0  | 0,01     | 1,95  |
| 12 | 1  | 0,03     | 11,90 |
| 12 | -1 | 0,05     | 33,90 |
| 14 | 1  | 0,01     | 13,90 |
| 14 | -1 | 0,03     | 39,65 |
| 14 | 0  | 0,05     | 2,26  |

D'après ce tableau, la valeur minimale du champ électrique est de 1,61 kV/cm. Elle correspond à l'interaction des 3 paramètres V, P et  $\sigma$  avec les valeurs de : 10 kv, 0 et 0,03 mm respectivement. En appliquant cette méthode, on a obtenu une valeur de champ électrique minimale, ce qui lui offre une protection contre les différentes contraintes.

#### IV.4.2. Méthode de l'ANOVA

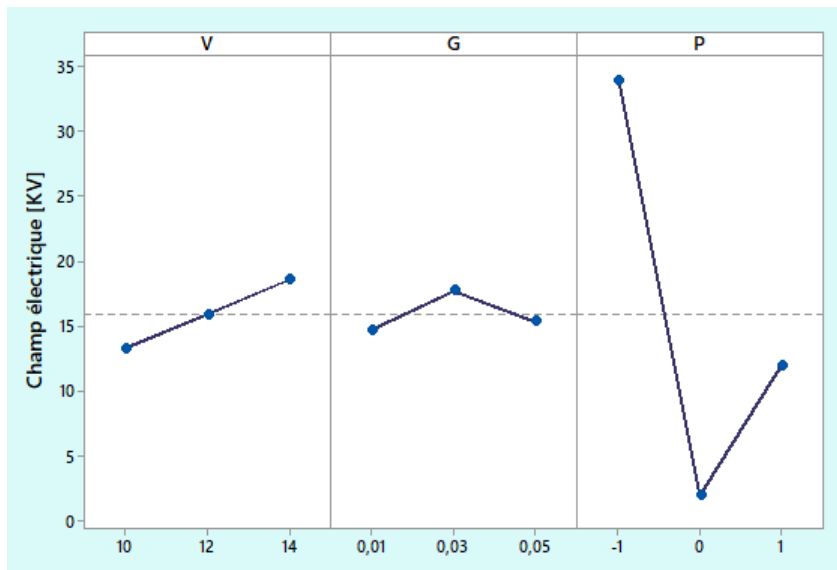
L'analyse de la variance, également connue sous le nom d'ANOVA, est une méthode statistique utilisée pour déterminer si les moyennes de différents groupes proviennent de la même population. Les groupes sont définis par les modalités d'une variable qualitative, tandis que les moyennes sont calculées à partir d'une variable continue. Cette méthode est utilisée lorsque l'on mesure une ou plusieurs variables explicatives catégorielles qui ont une influence sur la loi d'une variable continue à expliquer. L'ANOVA peut être à un facteur, deux facteurs ou multifactorielle. Elle permet d'étudier le comportement d'une variable quantitative en fonction de variables qualitatives et peut être utilisée en combinaison avec d'autres méthodes telles que la MANOVA ou l'ANCOVA. Dans cette étude, les effets des paramètres de l'isolateur ont été évalués à l'aide de cette technique.

IV.2.4.1 Analyse de l'ANOVA

**Tableau IV. 3.** Analyse ANOVA de la contribution des paramètres en pourcentage sur la variation totale du champ E maximum pour les paramètres de l'isolateur.

| Source     | DL | SomCar ajust | CM ajust |
|------------|----|--------------|----------|
| Régression | 8  | 1682,55      | 210,319  |
| V          | 1  | 0,47         | 0,469    |
| G          | 1  | 11,07        | 11,073   |
| P          | 1  | 2,42         | 2,419    |
| V*V        | 1  | 0,00         | 0,001    |
| G*G        | 1  | 8,17         | 8,167    |
| P*P        | 1  | 589,74       | 589,744  |
| V*G        | 1  | 8,05         | 8,050    |
| V*P        | 1  | 0,73         | 0,735    |
| Erreur     | 0  | 0,00         | *        |
| Total      | 8  | 1682,55      |          |

Où, V est la tension; P est la position SomCar ajust est la somme ajustée des carrés; CM est la somme moyenne des carrés.



**Figure.IV. 8.** Les effets principaux des paramètres Vet P et  $\sigma$  sur la valeur maximale du champ E

Les graphiques d'effets principaux et les effets d'interaction des paramètres de L'isolateur peuvent être représentés graphiquement comme indiqué ci-dessus. La figure IV.8 présente l'effet des paramètres de l'isolateur sur la valeur maximale du champ électrique. On voit que la position de la pollution a un effet décroissant sur le champ E maximal. Avant 0 (Pollution complet), la position a un effet croissant sur le

champ électrique maximum. D'un autre côté, la tension a une influence croissante sur le champ E maximal et la conductivité à un effet décroissant.

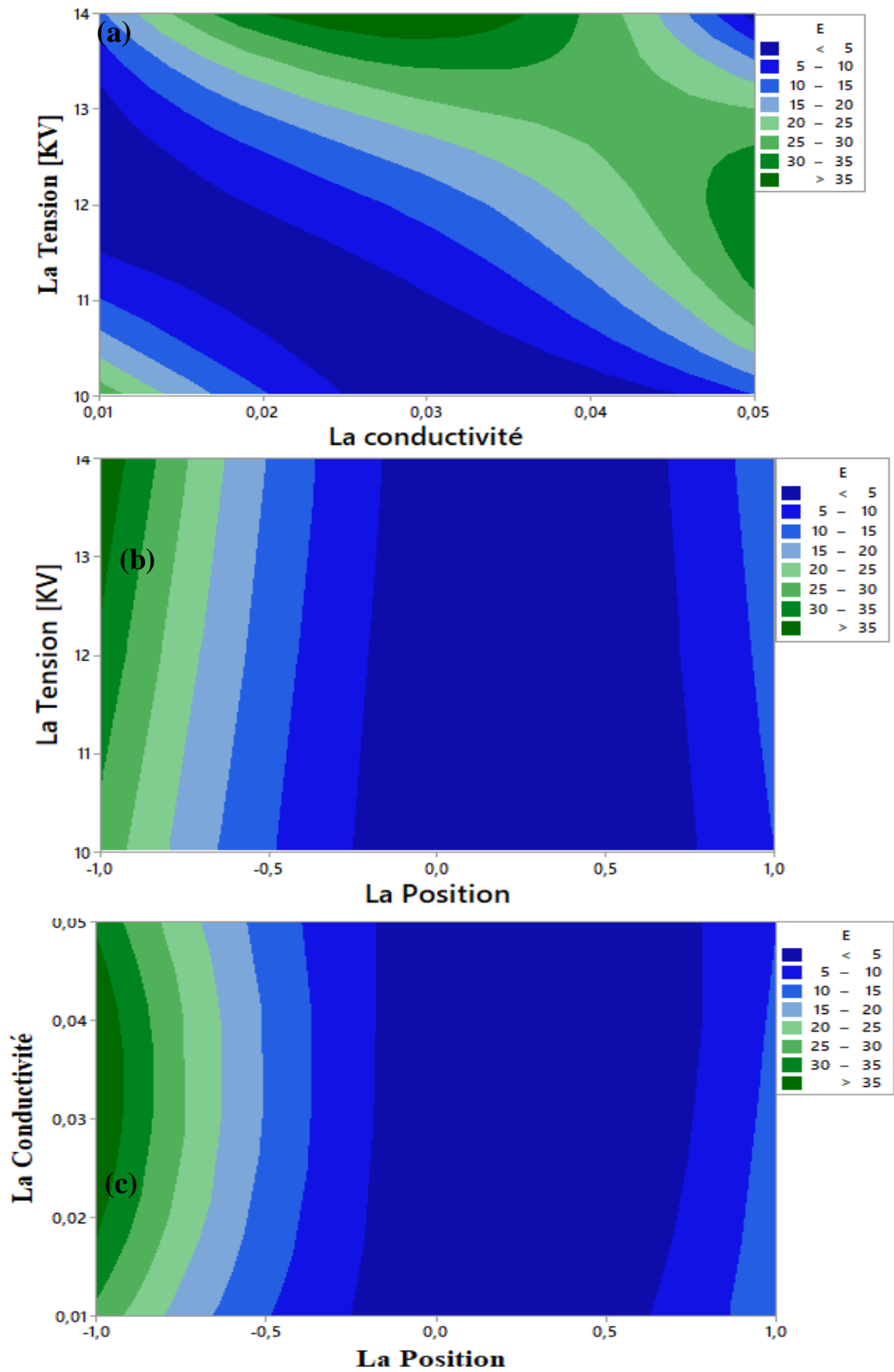
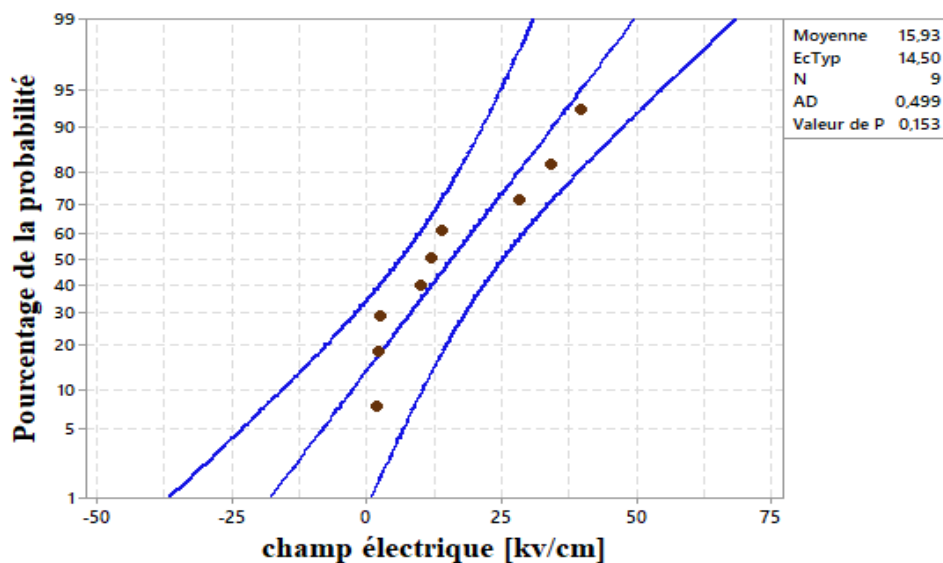


Figure.IV. 9. Tracés de contour de la variation du champ E par rapport aux paramètres de V ,P , $\sigma$

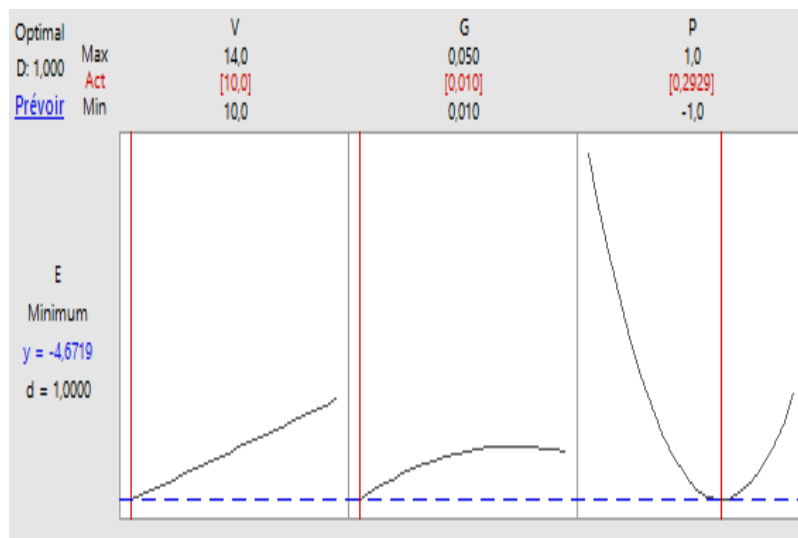
La figure IV.9 montre les tracés de contour des paramètres de pollution sur la variation de champ E maximale. Les courbes de niveau sont utilisées pour explorer la relation potentielle entre trois variables. Les tracés de contour affichent la relation tridimensionnelle en deux dimensions, avec des prédicteurs tracés sur les échelles x et y et les valeurs de réponse représentées par les contours, dont les points qui ont une réponse pareille sont connectés pour produire des courbes de niveau de réponses constantes. La figure IV.9(a) représente l'influence de la tension à partir de la conductivité et maintenue au niveau moyen. La Figure.IV.9 (b)) représente l'impact de la tension à partir de la position tandis que la position de pollution est maintenu au niveau intermédiaire. La figure IV.9(c) montre la surface de réponse estimée en fonction de la conductivité et de la position de pollution tandis que la position depuis l'extrémité est maintenue au niveau moyen. Ces tracés de contour confirment la conclusion notant l'analyse des tracés d'effet d'interaction.



**Figure.IV. 10.** Tracés de normalité avec des intervalles de confiance à 95% du champ E maximal.

Le test d'Anderson – Darling et les diagrammes de probabilité normaux des résidus par rapport à la réponse prévue pour la valeur maximale du champ E sont tracés sur la figure IV.10. Les données suivent de près la droite. Dans notre cas, la valeur P est de 0,153, ce qui est supérieur à l'alpha de 0,05, de ce fait, on peut pas ignorer l'hypothèse nulle. Cela indique que les données suivent une distribution normale, ce qui implique

l'adéquation du modèle proposé. - seuil recommandé par l'EPRI. L'optimiseur de surface de réponse est utilisé pour identifier la meilleure combinaison de paramètres de l'Isolateur qui minimisent conjointement la valeur max du champ électrique sous le seuil recommandé. L'optimisation conjointe doit satisfaire aux exigences de toutes les réponses de l'ensemble. La réussite de l'optimisation est évaluée par la désirabilité composite qui est la moyenne géométrique pondérée de la désirabilité individuelle pour les réponses sur une plage de zéro à un. L'un représente l'idéal. Le Zéro indique qu'au moins une réponse est en dehors des limites acceptables.



**Figure.IV. 11.** Optimisation de la réponse pour les paramètres de l'isolateur (les valeurs optimales sont en rouge)

La figure IV.11 montre les résultats d'optimisation MSR de la valeur maximale du champ E. On peut noter que la Tension 10 kv , la Conductivité 0,01us/m et la Position 0 peuvent être E= 1.61 kV/cm considérés comme des dimensions optimales. Donc le champ E maximal est d'environ 1.61 kV / cm. L'interaction entre la position de pollution et la tension est la plus observée. Cependant, l'interaction entre la position de pollution et la conductivité est faible. Un impact décroissant élevé de la position sur le champ E maximal lorsque la tension est plus élevé; si l'interaction entre ces deux paramètres est analysée.

#### **IV.5.Conclusion**

L'objectif visé d'après ce chapitre était l'étude de la répartition du champ électrique de l'isolateur Capot et tige dans des conditions polluées. Le chapitre décrit l'ensemble des moyens et méthodes permettant d'analyser le champ électrique des isolateurs pour obtenir de meilleures tensions sur les isolateurs par optimisation. Les paramètres de de pollution appliqués sur cet isolateur ont été analysés en utilisant l'ANOVA et la méthodologie de surface de réponse (MSR).

# Chapitre V

## Conclusions Générales

### Conclusions Générales

Cette étude se concentre sur l'étude et analyse de répartition de champ électrique et la distribution de potentiel électrique pour un isolateur capot et tige. Le potentiel et champ électrique et leur distribution ont été obtenus le long de longueur de l'isolateur à l'aide d'un modèle 2D dans des conditions propres et pollués. L'influence de la conductivité, de position et de niveau de tension a été étudiée et discuté en détail en particulier pour les conditions polluées. Dans ce cas, chaque ailette du l'isolateur se comporte comme une surface équipotentielle, et le maximum des intensités du champ électrique se produisent à l'extrémité des ailettes. Donc, la conception de l'ailette prend une grande importance dans cette condition. D'après les résultats obtenus par la simulation de lignes équipotentielles de champ électrique pour un isolateur propre on a constaté que la tension se répartie non uniformément et que la région proche de l'électrode haute tension est la plus concentrée alors que celle proche de côté terre ou la tension est pratiquement nulle. La répartition axiale de champ électrique et de potentiel dans le cas d'une couche polluée confirme que le type de pollution affecte fortement la la répartition de potentiel et la rend non uniforme, ce qui signifie que les isolateurs ne sont pas soumis aux mêmes contraintes que les isolateurs qui favorisent l'apparition d'amorçages dans des conditions polluées. Dans ce mémoire; on a étudié et évalué l'impact de pollution sur contraintes de champ électrique maximales autour de l'isolateur capot et tige à une seule ailette. Les paramètres étudiés ; Tension (V), Position (P) et la Conductivité ( $\sigma$ ) de pollution sont traités par la méthode d'analyse ANOVA pour comprendre le comportement de l'isolateur. L'étude et la connaissance de la distribution du champ ont une grande importance dans le processus de conception des isolateurs afin d'améliorer ses propriétés diélectrique et thermiques.



## **Références Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

---

- [1] M. Soufi, M. Zemirline, "Conception d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz", Mémoire de projet de fin d'études, Génie Electrique, ENP 2004.
- [2] S. Bellid, K. Amaouz ( Effet de la pollution sur la tension de contournement des isolateurs sous tension alternative) Mémoire soutenu publiquement le 28/06/ 2017.
- [3] K. Amriche, S.Benayad, "Modélisation des principales caractéristiques d'un isolateur pollué sous tension continue", Mémoire de projet de fin d'études, Génie Electrique, USTHB 2004.
- [4] A. Mekhaldi, "Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternative 50 Hz", Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Décembre 1999.
- [5] L. Arrabiy, « Visualisation et Traitement de Signal de Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée » Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 1999.
- [6] M. Terkmani, M. Babouamer, « Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension », Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, juin 2005.
- [7] S. Satta, «Contribution à l'étude de l'influence de la pollution discontinue sur le comportement des isolateurs : expérimentation et simulation », thèse de magister en Génie Electrique, Faculté de technologie, Université Ferhat Abbas- Sétif, 2018.
- [8] H. A. Slamet «Contribution à l'étude du modèle développé d'un isolateur pollué » Mémoire de magister, Sétif 2013.
- [9] S. Moatez Bellah, « Prédiction du contournement d'une chaine d'isolateur MT 175 CTV Sonelgaz pollué artificiellement par la logique floue », Mémoire de Master de l'université Mohamed Khider de Biskra, 2014.
- [10] S. Diampeni Kimbakala, « Modélisation dynamique des décharges se propageant sur des surfaces isolantes polluées avec des dépôts discontinus sous différentes forme de tension», Thèse de Doctorat de l'École Centrale de LYON, 2007.
- [11] M. Guenifis, S.Gadoum, « Mesure du degré de sévérité des pollutions en vue du dimensionnement des isolateurs de la région de Tigzirt », Mémoire d'Ingénieur d'état de
-

l'UMMTO, 2009 .

[12] L. Zoubiri, S. Youcef, « Distribution du champ et du potentiel électriques d'un isolateur de ligne 400kv », Mémoire master 2, Université Ibn Khaldoun -Tiaret-, 2015.

[13] S. E. Makhoulfi « Comportement d'un modèle plan d'isolateur pollué sous tension alternative », Mémoire de master, Université de M'sila, 2020.

[14] A. Dilmi. A. Maarouf, « Influence de la pollution sur le comportement d'un modèle plan d'isolateur sous haute tension » Mémoire de master, Université de M'sila, 2017.

[15] F. Aouabed « Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP" », thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas- Sétif), 2018.

[16] N. Benani, « Simulation et optimisation de la distribution du champ électrique le long des isolateurs composites sous différentes conditions de pollution », Master académique, Université Tissemsilt, 2021.

[17] A. Berrim, A.bdAlhak. Megdoud, « Prédiction De La Tension De Contournement Par L'approche D'optimisation Pso », Mémoire Master académique, Université Tissemsilt, 2019.

[18] A. Khelfaoui O. Bouberma, Mémoire Master Académique, « Modélisation Par Methode Des Eléments Finis Des Phénomènes De Conduction Surfactive Sur L'isolateur Pollues », université de Ouargla, 2014.

[19] M. Tegar, « Modélisations d'Isolateurs Pollués Soumis à Divers Paramètres Electrogéométriques », Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Avril 2003.

[20] Z. Sahli, « Etude de la Non Uniformité de la Pollution sur des Caractéristiques de Contournement des Isolateurs Réels Pollués sous Tension Continu », Mémoire de Magister, Génie Electrique, Université de Abderrahmane Mira de Bejaia. Juin 2005.

[21] M. Mokhtari, « Amélioration de la prise en compte des aérosols terrigènes dans les modèles atmosphériques à moyenne échelle », Thèse Doctorat De L'université De Toulouse, 2012.

[22] S. Lotfi, S. Djafri, « Contribution à l'Etude de la Pollution des Isolateurs des Lignes Ariennes de Haute Tension dans la Région de l'Arbaa », Projet de Fin d'Etude, Département d'Electronique et d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene d'Alger, Juin 1982.

[23] I. Bentorcha, R. Tayabi « Contribution à l'étude d'un isolateur réel soumis à différents types de tension (DC/AC) » Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master, université de M'sila ,2021.

[24] A. K. Mujundar, N. Vasudev, K. N .Ravi Channakeshava, « Pollution Test Method of

---

Insulators Under DC Voltage Using Dust Chamber » Ninth International Symposium on High Voltage Engineering, 28 Août –1 September 1995.

[25] B. Hammoume, A.Kerbouche, « Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du centre Algérien », Projet de Fin d'Etude, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2007.

[26] Ch. Bentrhou, « Simulation Numérique D'un Isolateur De Haute Tension A Fréquence Industrielle 50 Hz », Mémoire De Master En Génie Electrique, Université De M'sila 2016.

[27] M. Mesrouk, « Etude D'une Electrode Tri-Couches A Base De Tco/Métal/Tco Pour Une Cellule Solaire Organique », Mémoire De Magister, Université Mouloude Mammeri De Tizi-Ouzou 2013.

[28] NA. Othman et al (2014) Characterization of charge distribution on the high voltage glass insulator string. *J Electrostat* 72:315–321. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2014.05.003>  
Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

[29] COMSOL Multiphysics User's Guide, version 3.5a, [logiciel], Burlington, Ma. : COMSOL, Inc. novembre 2008.

---

تعتبر عوازل الجهد العالي من العناصر الأساسية في تشغيل شبكات الطاقة الكهربائية. يتمثل دورهم الأساسي في توصيل الموصلات بالدعامات من خلال ضمان عزلها الكهربائي. يمكن أن تتعرض العوازل، خلال العام، للعديد من العوامل الكهربائية، الفيزيائية والبيئية بما في ذلك التلوث. هذا المشكل يمكن أن يهدد ويقلل من الأداء الكهربائي للمواد العازلة. في هذا العمل، تم اقتراح دراسة على غطاء وقضيب عازل (1512 لتر) لدراسة توزيع الجهد والمجال الكهربائي على طول العازل تحت ظروف مختلفة. أولاً، سنقوم بتنفيذ ثلاثة سيناريوهات وذلك بتطبيق مستويات جهد مختلفة. يتم إجراء دراسات المحاكاة باستخدام برنامج Comsol لتقييم المجال الكهربائي والتوزيع المحتمل على طول العازل. للقيام بمختلف التحليل، تم اقتراح نموذج إحصائي للتعامل مع العلاقة بين العازل ومطبات طبقة التلوث (الموضع والناقلية لطبقة التلوث). تتنوع هذه المعاملات في كل مرة في هذا البحث. يتم استخدام تقنية التباين الإحصائية (ANOVA) لتقييم تأثير كل عامل على حدى. توفر الدراسة المقترحة في هذه الرسالة أداة عمل فعالة ومفيدة لمعاينة وتحسين الخصائص العازلة والحرارية للعوازل المدروسة.

**الكلمات المفتاحية:** عازل ، تلوث ، مجال كهربائي ، محاكاة ، ANOVA

## Abstract

High voltage insulators are key elements in the operation of electrical power networks. Their role is to connect the conductors to the supports by ensuring their electrical insulation. They can be exposed, during the year, to several electrical, physical and environmental factors including pollution. This can threaten and reduce the electrical performance of dielectric materials. In this work, a study on a cap and rod insulator (1512L) is proposed to study the distribution of potential and electric field along the insulator under different conditions. First, we will perform three scenarios by applying different voltage levels. Simulation studies are done using Comsol software to evaluate the electrical field and potential distribution along the insulator. To do the analysis; a statistical model to deal with the relationship between the insulator and the pollution layer parameters (position and conductivity of the pollution layer) is proposed. These parameters are varied each time in this search. The statistical technique of variance (ANOVA) is used to assess the impact of each parameter. The study proposed in this thesis provides an effective and useful working tool to examine and improve the dielectric and thermal properties of the studied insulators.

**Keywords:** Insulator, Pollution, Electric Field, Simulations, Comsol, ANOVA.

## Résumé

Les isolateurs haute tension sont des éléments clés dans le fonctionnement des réseaux d'énergie électrique. Leur rôle est de relier les conducteurs aux supports en assurant leur isolation électrique. Ils peuvent être exposés, durant l'année, à plusieurs facteurs électriques, physiques et d'environnement y compris la pollution. Cela, peut menacer et réduire la performance électrique des matériaux diélectriques. Dans ce travail, une étude sur un isolateur capot et tige (1512L) est proposée pour étudier la distribution du potentiel et du champ électrique le long de l'isolateur sous différentes conditions. Dans un premier lieu, On va réaliser trois scénarios en appliquant différents niveau de tension. Les études de simulation sont faites via le logiciel Comsol pour évaluer la distribution du champ et du potentiel électriques le long de l'isolateur. Pour faire l'analyse ; un modèle statistique pour traiter la relation entre l'isolateur et les paramètres de la couche de pollution (La position et la conductivité de la couche de pollution) est proposé. C'est paramètres sont variés à chaque fois dans cette recherche. La technique statistique de la variance (ANOVA) est utilisée pour évaluer l'impact de chaque paramètre. L'étude proposée dans ce mémoire donne un outil de travail efficace et utile pour examiner et améliorer les propriétés diélectrique et thermiques des isolateurs étudiés.

**Mots-clés :** Isolateur, Pollution, Champ électrique, Simulations, Comsol , ANOVA.