

REPUBLICHE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

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

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département d'électromécanique*

## **Mémoire**

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : Electrotechnique.**

**Spécialité : Commande électrique**

Par

- *HADFI Youcef*
- *AGGOUNE Adel*

*Intitulé*

### **Simulation 3D du champ électrique sur d'isolateurs HT sous tension continue**

*Soutenu le : .....*

*Devant le Jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. REFFAS Abderrahim</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. AOUABED Fatiha</i>	<i>MCB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. NACIB Leila</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. KHATIR Abdelfatah</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

*Année Universitaire 2021/2022*

## *Dédicace*

---

---

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mon très cher père et très chère mère*

*A mes frères et mes sœurs*

*A ma grande famille que je chéris de plus en plus*

*A tous mes amis*

*A tous ceux qui m'aiment et que j'aime*

---

# Remerciements

---

---

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon directeur de mémoire AOUABED FATIHA pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie mes frères, pour leurs encouragements.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université d'el Bachir Ibrahim, et les intervenants professionnelles responsables de ma formation, pour avoir assuré la partie théorique de celle-ci.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Enfin, je remercie mes amis, MAREUOAN, ABD ALLAH et ABDENNOUR qui a toujours été là pour moi, Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

BBA, le...../...../2012

---

# SOMMAIR

Introduction générale.....	II
Chapitre 01. Généralité sur l'isolateurs électrique.	
1.1 Introduction.....	P.1
1.2 Quelques définitions concernant les isolateurs.....	P.1
1.2.1 Définition.....	P.1
1.2.2 Ligne de contournement.....	P.1
1.2.3 Tension de contournement.....	P.2
1.2.4 Ligne de fuite.....	P.2
1.2.5 Courant de fuite.....	P.2
1.2.6 Isolant.....	P.2
1.3 Fonctionnement et constitution d'un isolateur.....	P.2
1.4 Principaux types d'isolateurs.....	P.3
1.4.1 Isolateurs de type rigide.....	P.3
1.4.2 Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne .....	P.4
1.5 Choix des isolateurs.....	P.7
1.6 Comportement des isolateurs selon le matériau constituant.....	P.7
1.7 Pollution des isolateurs.....	P.7
1.7.1 Sources et nature de pollution.....	P.8
1.7.2 Classification des sites pollués.....	P.8
1.7.3 Conséquences de la pollution.....	P.8
1.8 Conclusion.....	P.9
Chapitre 02. Méthodes des calculs.	
2.1 introduction.....	P.10
2.2 Equations de maxwell.....	P.11
2.2.1 Equation de base.....	P.11
2.2.2 Conditions aux limites.....	P.12
2.2.3 Conditions d'interfaces.....	P.12
2.3 Les méthodes de calcul de champ électrique.....	P.12
2.3.1 Méthode expérimentales .....	P.12
2.3.2 Méthode numérique.....	P.14
2.3.2.1 Méthodes des charges fictives.....	P.14
2.3.2.2 Méthode des Différences Finies (M.D.F).....	P.15
2.3.2.3 Méthodes des volumes finis (MVF).....	P.16
2.3.2.4 Méthode des Éléments Finis (M.E.F).....	P.16
2.4 Conclusion.....	P.17
Chapitre 03. Répartition du champ et tension électrique sur la surface de l'isolateur.	
3.1 Introduction.....	P.18
3.2 Identification des domaines dans le logiciel COMSOL Multiphasiques.....	P.18
3.3 Résultats et discussions.....	P.21
3.3.1 Études de la distribution de tension électrique.....	P.21
3.3.2 Études de la répartition de la tension et champ électrique axiale et sur ligne de fuite..	P.24
3.4. Performance dans des conditions contaminées et sous contrainte DC.....	P.28
1.5 Conclusion .....	P.33
Conclusion générale.....	P.34

# Liste des tableaux

---

---

Tableau 1.1. Différents types de profils d'isolateur capot et tige.....	P.5
Tableau 1.2. : Classification de la pollution selon le type d'environnement.....	P.9
Tableau 3.1. Propriétés du matériau utilisé pour la modélisation de l'isolateur.....	P.19
Tableau 3.2. Paramètres du modèle de simulation.....	P.20

# Liste des figures

---

---

Figure 1.1 Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre .....	P.3
Figure 1.2 Assemblage à rotule .....	P.4
Figure 1.3. Isolateur capot tige.....	P.4
Figure 1.4 L'isolateur en céramique .....	P.6
Figure 1.5 L'isolateur composite .....	P.6
Figure 1.6 Figure 1.6 : Source de pollution .....	P.8
Figure 2 .1 Schéma de mesure directe de la tension.....	P.13
Figure 2.2 Schéma de mesure par compensation de la tension.....	P.14
Figure 3.1. Géométrie de l'isolateur réel.....	P.19
Figure 3.2 Maillages des isolateurs réels. ....	P.20
Figure 3.3. Distribution de la tension électrique. ....	P.23
Figure 3.5. Distribution des lignes de champ pour des isolateurs en silicone .....	P.24
Figure 3.6 Lignes de référence du potentiel et champ électrique. ....	P.25
Figure 3.7. Potentiel électrique le long des isolateurs.....	P.26
Figure 3.8. Champ électrique le long des isolateurs. ....	P.28
Figure 3.9. Modélisation de la pollution. ....	P.29
Figure 3.10 Champ électrique le long des isolateurs.....	P.31
Figure 3.11 Potentiel électrique le long des isolateurs.....	P.32

---

# Liste des symboles

## Acronymes

<b>EPDM</b>	Ethylène Propylène Diène Monomère
<b>CEI</b>	Comité électrotechnique internationale
<b>HT</b>	Haut tension
<b>M.E.F</b>	Méthode des Éléments Finis
<b>M.E.F.F</b>	Méthode des Éléments Finis de Frontière
<b>M.D.F</b>	Méthode des Différences Finies
<b>M.S.C</b>	Méthode de Simulation de Charges
<b>M.V.F</b>	Méthode des volumes Finies
<b>HVDC</b>	Courant continu haute tension
<b>HVAC</b>	Courant alternatif haute tension
<b>DC,</b>	Courant continu,
<b>AC</b>	Courant alternatif
<b>2D</b>	Bidimensionnel

## Symboles

<b>V</b>	Voltmètre
<b>P</b>	Point de mesure (p)
<b>RP</b>	Régulateur de tension et de phase
<b>T<sub>2</sub></b>	Tension au secondaire du transformateur
<b>T<sub>2</sub></b>	La valeur de la tension
<b>Q<sub>i</sub></b>	charge locale
$\varphi$	Potentiel électrique(V)
$\epsilon_0$	Le constant diélectrique de l'air
<b>div</b>	Divergence
<b>grad</b>	Gradient
<b>V<sub>DC+</sub></b>	La tension de courant continu positive,
<b>V<sub>DC-</sub></b>	La tension de courant continu négative
<b><math>\nabla^2</math></b>	Leplacien
<b>E</b>	Champ électrique (V/m)
<b>J</b>	Densité volumique de courant (A/m <sup>2</sup> )

**ملخص:** تلعب عوازل الجهد العالي قاعدة رئيسية في أنظمة نقل الطاقة. يتمثل الدور الرئيسي لهذه العوازل في ضمان والحفاظ على مستوى عالٍ من عزل أبراج الخط والذي قد يتأثر بالعوامل البيئية المختلفة مثل الرطوبة والغبار والحرارة والتلوث الكيميائي. الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير نوع الجهد والقطبية على الحقل الكهربائي وتوزيع الجهد على سطح العازل تحت ظروف نظيفة وملوثة. تم قياس توزيع الجهد الكهربائي والمجال الكهربائي باستخدام تقنية (FEM) في برنامج COMSOL Multiphasic. لوحظ أن قطبية الجهد لها تأثير ضئيل للغاية على توزيع الحقل الكهربائي ولكن تأثير نوع الجهد الحقل الكهربائي وتوزيع الجهد. وجد أيضاً أن الحقل الكهربائي أعلى في حالة الجهد المطبق بالتيار المستمر مقارنة بالتيار المتردد في ظل ظروف خدمة مماثلة.

**كلمات مفتاحية:** التيار المستمر، المحاكاة، العوازل الجهد العالي الحقل الكهربائي، التلوث.

## Résumé

L'isolateurs haute tension jouent un rôle majeur dans les systèmes de transmission d'énergie. Le rôle principal de ces isolateurs est d'assurer et de maintenir un niveau élevé d'isolation des pylônes qui peuvent être affectés par différents facteurs environnementaux tels que l'humidité, la poussière, la chaleur et les contaminations chimiques. L'objectif dans ce travail était d'étudier l'effet du type de tension et de la polarité sur la distribution du champ et tension électrique à la surface de l'isolateur dans des conditions propres et contaminées. Les distributions de champ électrique et de tension autour d'isolateur sont quantifiées à l'aide de la méthode des éléments finis (MEF) à l'aide d'un logiciel commercial COMSOL Multiphysiques. Il a été observé que la polarité de la tension a très peu d'effet sur la distribution du champ électrique mais que le type de tension affecte le champ électrique et la distribution du potentiel. Il a également été constaté que le champ électrique est plus élevé dans le cas d'une tension appliquée en courant continu par rapport au courant alternatif dans des conditions de service similaires.

**Mot clé :** Courant continue DC, Simulation, Isolateurs haute tension, Champ électrique, Pollution.

## Abstract

High voltage insulators play a major rule in power transmission systems. The main role of these insulators is to ensure and maintain high level of line-tower insulation which may be affected by different environmental factors such as humidity, dust, heat and chemical contaminations. The objective in this work was to study the effect of voltage type and polarity on electric field and potential distribution at the surface of the insulator under clean and contaminated conditions. electric field and voltage distribution have been quantified using the (FEM) technique in COMSOL Multiphysics software. It was observed that voltage polarity has very little effect on electric field distribution but voltage type effect electric field and potential distribution. It was also found that electric field is higher in the case of DC applied voltage as compared to AC under similar service conditions.

**Key Words:** Direct current DC, Simulation, High voltage insulators, Electric field, Pollution

---



# INTRODUCTION GENERALE

---

Les isolateurs à haute tension sont importants pour l'efficacité opérationnelle de sécurité et d'exploitation des réseaux de transport d'énergie électrique, il n'est donc pas surprenant que ces composants doivent répondre aux exigences particulièrement élevées en matière de fiabilité. On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs, isolateurs de conception classique en porcelaine et isolateurs capot à tige en verre. Durant ces dernières années les isolateurs composites ont acquis une grande importance dans le domaine des réseaux de transport d'énergie électrique haute tension.

La courante continue haute tension (HVDC) est devenu une alternative économiquement et écologiquement aux systèmes à courant alternatif dans la transmission d'énormes d'énergie électrique sur de longues distances. Cependant, avec l'utilisation de HVDC, le contournement de l'isolation des lignes aériennes dans des environnements contaminés a été accentué. Le contournement de la contamination a toujours été un problème sérieux depuis l'avènement de la transmission HT [1]. Ce problème est encore exacerbé sous un stress en DC. Une conception appropriée de l'isolation HVDC pour des performances fiables nécessite une compréhension du comportement des isolateurs et de leurs composants élémentaires. En raison d'un manque de compréhension et d'expérience adéquates, la conception des isolateurs HVDC suit généralement les mêmes directives que celles adoptées pour les lignes HVAC [1]. Ainsi, ces conceptions d'isolateurs en courant continu sont souvent mal adaptées pour combattre les problèmes propres au courant continu. L'objectif principal de cette recherche était de calculer les distributions du potentiel et du champ électrique sur un isolateur en silicone HT sous tension continue (HVDC). À cet effet, la Méthode des Éléments Finis était la mieux adaptée aux contraintes imposées par le problème, et pour d'obtenir des résultats rapide et précis en utilisant le logiciel commercial COMSOL MULTIPHYSICS,

Le présent travail exposera, dans le premier chapitre, une recherche bibliographique consacrée à la présentation des principaux types d'isolateurs utilisés dans les réseaux électriques

Le chapitre 2 portes sur les différentes méthodes numériques applicables au calcul de la distribution du potentiel et du champ électrique le long des isolateurs sont présentées. Le dernier chapitre de ce mémoire consacré sur la répartition de la tension et champ électrique le long d'isolateur en silicone.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

---

# CHAPITRE 01

## GENERALITE SUR L'ISOLATEURS ELECTRIQUE

---

### 1.1 Introduction

Dans la plupart des lignes électriques de haute tension et les postes des réseaux de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. En effet, par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle d'un isolateur et le contournement peut alors survenir [2]. Les isolateurs sont des éléments essentiels dans la conception des ouvrages haute tension. Leur principal rôle est d'assurer l'isolement électrique entre les parties sous tension et celles mise à la terre [3]. De plus il est nécessaire que le choix du type d'isolateur, les contrôles de réception, la surveillance en exploitation doivent être faits avec un maximum de soin.

Dans notre chapitre nous avons composé notre travail en deux parties

- Dont la première partie vis sur quelque définition concernant les contournements, principaux types d'isolateurs, choix d'isolateur, comportement des isolateurs selon le matériau constituant.
- Et la deuxième partie nous présentons les comportements des isolateurs sous pollution.

### 1.2 Quelques définitions concernant les isolateurs

#### 1.2.1 Définition

Un isolateur est un composant électrotechnique destiné à fixer, maintenir ou soutenir les conducteurs électriques nus. Il est constitué de matériau isolant, c'est-à-dire qui ne conduit pas l'électricité.

Son rôle est de séparer deux corps conducteurs, soumis à deux potentiels différents afin d'empêcher le court-circuit, les pertes de courant et les charges d'électrocution [4,5].

#### 1.2.2 Ligne de contournement

La ligne de contournement est la distance la plus courte dans un gaz entre deux parties conductrices. [6].

#### 1.2.3 Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les deux électrodes [7].

La tension de contournement dépend :

- De la résistivité volumique moyenne de la pollution ;
- De la répartition de la couche de pollution ;
- De la longueur de l'isolateur ;
- Du profil de l'isolateur. [7]

#### **1.2.4 Ligne de fuite**

La ligne de fuite est la distance la plus courte le long de la surface d'un isolant entre deux parties conductrices. [7]

#### **1.2.5 Courant de fuite**

C'est le courant qui circule à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur. Ce courant est de faible d'amplitude et son intensité devient de plus en plus importante lorsqu'on s'approche de la tension de contournement.

Ce courant dépend de plusieurs facteurs tels que :

- ✓ La nature de la couche polluante ;
- ✓ La nature de la tension appliquée et sa polarité ;
- ✓ La forme des électrodes ;
- ✓ La longueur de la ligne de fuite.

#### **1.2.6 Isolant**

Un isolant aussi appelé matériau diélectrique, est une partie d'un composant ayant pour fonction d'interdire le passage de tout courant électrique entre deux parties conductrices. Un isolant possède, contrairement à un matériau conducteur ou les charges sont nombreuses et libre de se déplacer sous l'action d'un champ électromagnétique [8].

### **1.3 Fonctionnement et constitution d'un isolateur**

Les isolateurs sont des éléments indispensables au transport et à la distribution d'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents. Accrochés aux pylônes des lignes aériennes, ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateur d'alignement et d'ancrage), assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe (traversées de transformateurs, extrémités de câbles) et constituent également l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres,). Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes introduites par l'environnement [9].

### **1.4 Principaux types d'isolateurs**

L'isolateur est une composante indispensable des lignes de transport. Il assure l'isolation électrique des supports et transmet aussi les efforts mécaniques des conducteurs aux pylônes.

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs : les isolateurs de type rigide et les isolateurs suspendus ou éléments de chaîne.

### 1.4.1 Isolateurs de type rigide

Ce type d'isolateur (Figure 1.1) permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'une ou de plusieurs pièces isolantes encastrées et scellées les unes dans les autres.

Ces isolateurs sont fixés au pylône par des ferrures de forme diverses. Ils sont principalement utilisés dans les lignes aériennes pour des tensions ne dépassant pas généralement 60 kV. Les isolateurs rigides peuvent être placés en position horizontale, verticale ou oblique.

Il existe deux types principaux d'isolateurs rigides : les isolateurs rigides à tige et les isolateurs rigides à socle :

➤ Isolateur rigide à socle

Isolateur rigide qui comporte une ou plusieurs pièces en céramique ou en matériau synthétique, assemblées de façon permanente sur un socle métallique, et qui est destiné à être monté sur un support au moyen d'une tige centrale ou de boulons solidaires du socle. [10]

➤ Isolateur rigide à tige

Isolateur rigide qui comporte une ou plusieurs pièces en céramique en forme de cloche, assemblées de façon permanente, et qui est destiné à être monté sur un support au moyen d'une tige à visser à l'intérieur de l'isolateur. [10].



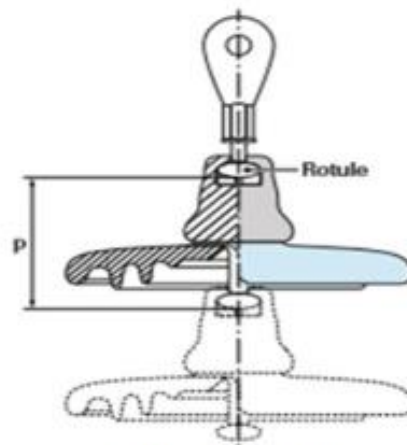
Figure 1.1. Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre [11].

### 1.4.2 Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

Ils sont constitués par le matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et à donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs. La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (chaîne d'alignement), soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrages). [12]

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

- Les isolateurs à capot et tige. [13]
- Les isolateurs à long fût.



a) Capot et tige

Figure 1.2. Assemblage à rotule [13].

#### 1.4.2.1 L'isolateur capot et tige

Capot et tige est constitué d'un corps isolant qui porte à l'intérieur une tige en acier, où la tête conique de cette tige est scellée dans le matériau isolant soit le verre soit la porcelaine. L'extrémité supérieure de l'isolateur porte un capot scellé en fonte malléable troué de telle sorte qu'on peut faire entrer l'extrémité inférieure de la tige dans ce trou, et le scellement des éléments de chaîne capot et tige se fait de cette façon en faisant pénétrer la partie inférieure de la tige de l'élément supérieur dans le capot de l'élément inférieur en utilisant du ciment. [13]. Les différents profils des isolateurs à capot et tige existant sont donnés dans le tableau 1.1.

Selon la norme IEC 60815[13], ces isolateurs sont utilisés selon la nature de la zone polluée (tableau 1.1) :

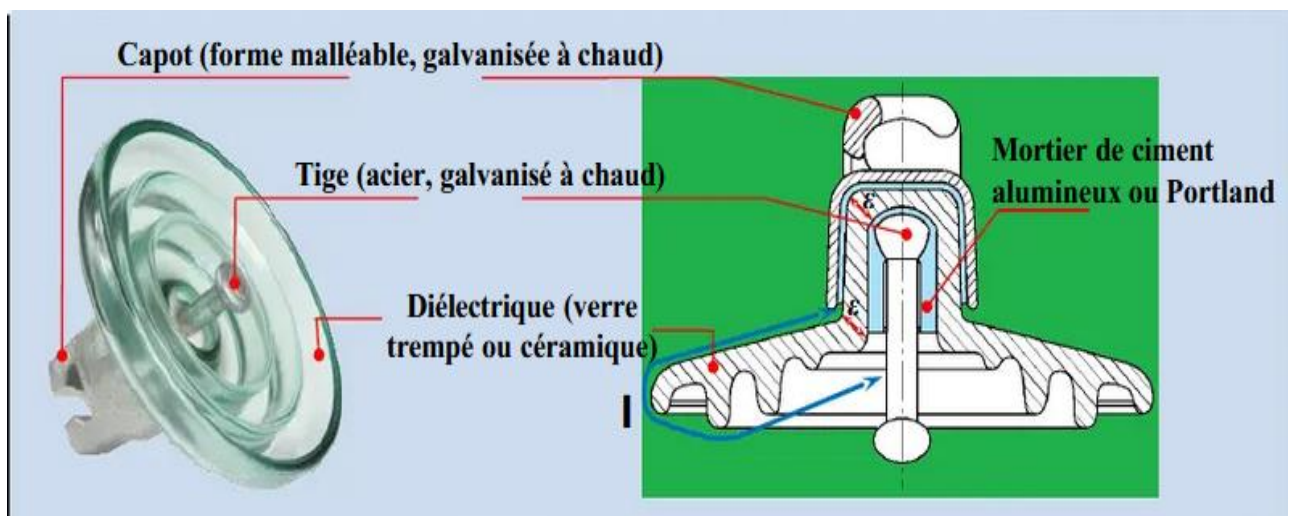


Figure 1.3. Isolateur capot tige [13]

**Tableau 1.1.** Différents types de profils d'isolateur capot et tige [14].

Profils	Caractéristiques
 <p data-bbox="448 591 558 622"><b>Standard</b></p>	<p data-bbox="831 510 1417 542">Ce profil est utilisé dans la zone de pollution modérée</p>
 <p data-bbox="413 904 592 936"><b>Anti-brouillard</b></p>	<p data-bbox="831 797 1430 860">Ce type d'isolateur est efficace dans les zones côtières et les zones de moyenne et forte pollution</p>
 <p data-bbox="440 1198 563 1229"><b>Sphérique</b></p>	<p data-bbox="831 1050 1430 1144">La forme sphérique et l'absence de rainures internes rend difficile le dépôt des grains de pollution et permet aussi un lavage manuel facile et efficace.</p>
 <p data-bbox="480 1462 528 1494"><b>Plat</b></p>	<p data-bbox="831 1301 1430 1395">Cette conception est particulièrement efficace dans les Zones désertiques où l'auto lavage est peu fréquente par pluie</p>

#### 1.4.2.2 L'isolateur long fût

##### a. En céramique

Le développement et la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances [6]. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des céramiques à grains très fins. Souvent on trouve les céramiques dans les postes : isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance. [15]

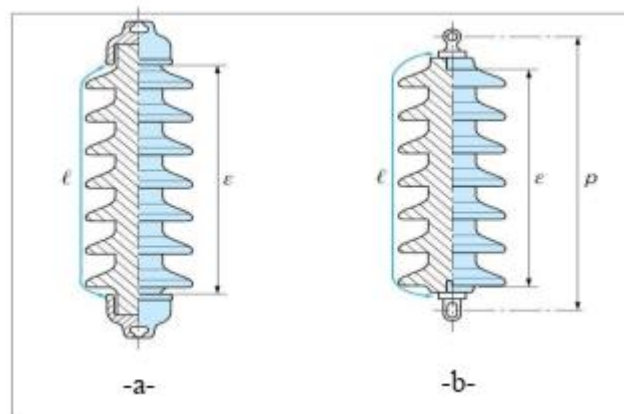
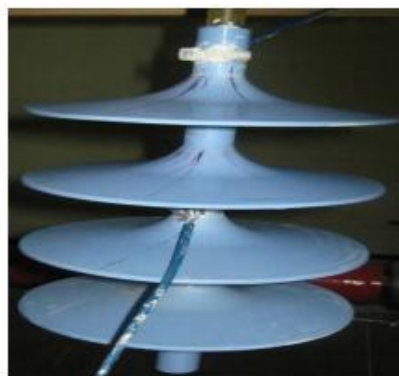
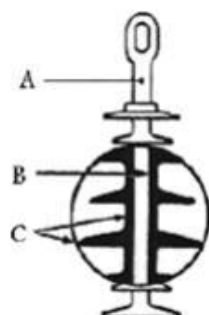


Figure 1.4. L'isolateur en céramique. [15]

### b. En matériaux synthétiques

Constitué d'un matériau synthétique dont la caractéristique principale est la bonne tenue à la pollution, le faible encombrement, la résistance au vandalisme et la légèreté, en particulier lorsqu'on les compare aux chaînes d'isolateurs pour les lignes de tension électrique élevée. [15], Ce type d'isolateurs est appelé composite, il est constitué de trois parties selon le rôle :

- Un noyau en fibre de verre, imprégnées de résine, capable d'assurer l'isolement et de supporter les efforts mécaniques générés par les conducteurs. [16]
- Un revêtement en élastomère en EPDM (Ethylène Propylène Diène Monomère), vulcanisés à chaud qui donne le profil et précise la ligne de fuite tout en protégeant le noyau contre toute attaque des agents extérieurs en assurant l'étanchéité au raccordement avec les pièces métalliques d'extrémités. Son profil à ailettes alternées permet d'accroître la tenue sous pollution. [16]
- Des pièces métalliques, en fonte malléable ou acier forgé galvanisé à chaud, sont nécessaires au montage de l'isolateur et à la transmission des efforts mécaniques [16]



A : Pièces d'accrochage métallique : noyau en fibre de verre résine : Revêtement à ailettes en matériaux synthétiques

Figure1.5. L'isolateur composite [16]

## 1.5 Choix des isolateurs [7]

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service [14]

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluant le moins élevé, c'est-à-dire les isolateurs qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage. [15]

## 1.6 Comportement des isolateurs selon le matériau constituant

Les travaux de Babinski et al [15] ont été effectués sur principaux types des isolateurs de différents matériaux. Il a basé son étude sur le comportement du courant de fuite. Il Conclut que le courant de fuite est souvent capacitif en caractère et sinusoïdal en forme :

Une fois l'hydrophobie perdue, le courant de fuite devient de plus en plus résistif, avec des pics dus aux décharges dans les zones sèches et ceci engendre l'apparition de nouveaux harmoniques.

- Pour les isolateurs qui gardent leur hydrophobicité, le courant de fuite est capacitif, sinusoïdal et de l'ordre de la mA.
- Pour les isolateurs dont la surface est complètement mouillée, le courant de fuite est sinusoïdal à caractère résistif d'ordre relativement élevé.
- Pour les isolateurs ayant perdu totalement ou partiellement leur hydrophobicité, le courant de fuite a une forme non linéaire avec une amplitude dont l'ordre de grandeur est relativement élevé [15].

## 1.7 Pollution des isolateurs

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème sur l'isolement des ouvrages de haute tension, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de haute tension. Ceci est dû à la formation de couches plus ou moins conductrices sur la surface des isolateurs. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle des surfaces isolantes et par suite la diminution de la tension de contournement des isolateurs. [17]

### 1.7.1 Sources et nature de pollution

Par pollution, on entend les particules solides qui se trouvent dans l'atmosphère et qui se déposent sur la surface de l'isolateur. Cette pollution constitue l'origine du problème. A ce titre, des efforts considérables ont été menés afin de la classier quantitativement qualitativement. La nature de la pollution dépend de la situation géographique et climatique [17].

Les divers types de pollution atmosphérique les plus fréquemment observés peuvent être selon leurs



origines. D'après la norme CEI [17], nous citons les principales sources de pollution comme la figure 1.6

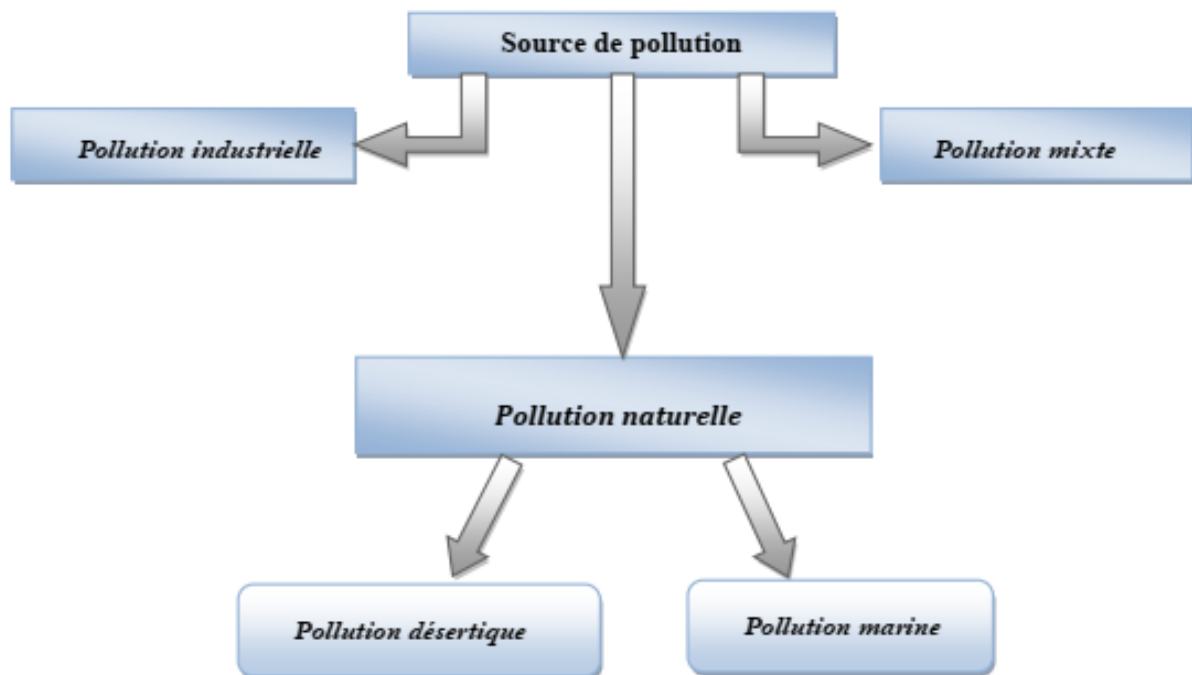


Figure 1.6 : Source de pollution [17].

### 1.7.2 Classification des sites pollués

La composition de cette pollution est variable suivant les sources de contamination et les conditions auxquelles sont soumis les isolateurs.

On peut classer les degrés de la pollution suivant quatre niveaux selon la CEI815 (Tableau 1.2) qui sont :

- Faible, Moyen, Fort, Très fort.

### 1.7.3 Conséquences de la pollution

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

La rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite. Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur [18].

**Tableau 1.2.** : Classification de la pollution selon le type d'environnement [19]

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

### 1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse des principales caractéristiques des isolateurs électriques. Nous avons présenté certaine définition d'isolateur, leur fonctionnement et en présenté quelques définitions concernant les contournements. Cette synthèse montre l'importance de cette thématique qui continue de faire l'objet de nombreuses études. En effet, la fiabilité des systèmes de transport et de distribution de l'énergie électrique est tributaire de la qualité du système d'isolation. Dans la suite du travail nous allons les aspects importants concernant les contraintes de comportement de la pollution sur l'isolateurs en HT. Le phénomène de pollution provient de diverses origines ; on peut en citer trois ; naturels, industriels et mixtes.

Le chapitre suivant traite les différentes méthodes numériques les plus connues et les plus utilisées dans ce type de problème.

## CHAPITRE 02

# METHODES DES CALCULS

---

### 2.1 Introduction

L'étude des champs électriques est importante dans l'engineering haut tension. En effet, plus la tension est élevée, plus les distances d'isolation nécessaires sont importantes et le matériel est encombrant, donc cher .il faut utiliser au mieux les systèmes afin de réduire la taille des appareils, mais sans pour autant en diminuer la qualité. Un champ trop élevé signifie inéluctablement une durée de vie courte et un manque de fiabilité [20], donc il est très utile de connaître complètement la distribution du potentiel et du champ électrique.

La mesure des champs électriques autour des isolateurs pratiques est difficile et devient de plus en plus compliquée dans des conditions de surface polluées. Des configurations expérimentales telles que la sonde électrostatique peuvent être utilisées, mais elles sont sujettes à des erreurs périodiques, bien que cela puisse être amélioré en utilisant un système de détection de champ plus avancé [21],

Les progrès de l'informatique ont permis de développer des méthodes numériques de calcul afin de déterminer de façon précise la distribution du champ et du potentiel électrique. Les méthodes numériques les plus connues et les plus utilisées dans ce type de problème sont donc la méthode des Différences Finies (M.D.F), la méthode des Éléments Finis (M.E.F), la méthode de Simulation de Charges (M.S.C) et la méthode des Éléments Finis de Frontière (M.E.F.F) [22]. Ces méthodes, dont le principe et les caractéristiques sont développés dans ce chapitre, sont basées sur la résolution de l'équation de Laplace en imposant les conditions aux frontières adaptées à chaque problème.

### 2.2 Équations de Maxwell

#### 2.2.1. Equation de base

Les équations de base utilisées pour calculer le potentiel (champ électrique), sont les équations de Maxwell. Celles-ci sont formées par quatre équations aux dérivées partielles qui liés les

phénomènes magnétiques caractérisés par le champ magnétique  $H$  et l'induction magnétique  $B$  aux phénomènes électriques caractérisés par le champ électrique  $E$  et l'induction électrique  $D$ . Ces quatre équations sont :

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho_v \quad (2.2)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

Pour le model électrostatique, on utilise les équations suivantes :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{E} = -\text{grad } V \quad (2.6)$$

L'implantation de la relation (2. 2) dans l'équation (2.6) donne :

$$\text{div } \varepsilon_0 (-\overrightarrow{\text{grad}} V) = \rho_v \quad (2.7)$$

$$\text{div}(\overrightarrow{\text{grad}} V) = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (2.8)$$

On obtient ainsi l'équation qui gouverne la répartition du potentiel dans un milieu de permittivité absolue avec une densité de charge volumique  $\rho_v$ .

Pour des matériaux isolants, généralement utilisés dans les appareillages HT, la densité volumique de charge  $\rho_v$  est nulle.

Avec ces hypothèses, on obtient l'équation de Laplace (2.10) qui gouverne la répartition du potentiel dans les matériaux isolants.

$$\text{div}(\overrightarrow{\text{grad}} V) = 0 \quad (2.9)$$

Où :

$$\nabla \cdot (\nabla V) = 0 \quad (2.10)$$

### 2.2.2. Conditions aux limites

Il existe plusieurs solutions aux équations différentielles précédemment définies. Les conditions aux limites servent en fait à déterminer une solution unique de ces équations [22]

Ces conditions sont principalement de deux types : la condition de Dirichlet et la condition de Neumann. La condition de Dirichlet impose la valeur du potentiel comme par exemple les surfaces des conducteurs, les surfaces équipotentielles, ou les limites infinies du domaine d'étude. La condition de Neumann impose la valeur de la dérivée normale du potentiel tel les plans de symétrie ou les surfaces à flux imposé. Les conditions de Dirichlet et de Neumann sont dites homogènes si les valeurs imposées sont nulles. Elles sont dites non homogènes dans le cas contraire.

### 2.2.3. Conditions d'interfaces

L'équation (2.13) a été obtenue en émettant l'hypothèse que la permittivité absolue  $\epsilon$  est constante sur tout le domaine d'étude. Cette équation n'est donc valable que pour des milieux homogènes et isotropes. Dans le cas où plusieurs milieux coexistent, ce qui est généralement le cas dans les problèmes H.T, l'équation (2.10) n'est plus vraie dans l'ensemble du domaine d'étude. Il faut alors chercher une solution dans chaque milieu et lier les différentes solutions par des conditions d'interfaces.

À la frontière de deux milieux de propriétés différentes, les équations dites d'interfaces, en l'absence de charges et de courants superficiels, s'écrivent :

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (2.11)$$

## 2.3 Les méthodes de calculs du champ électrique le long des isolateurs

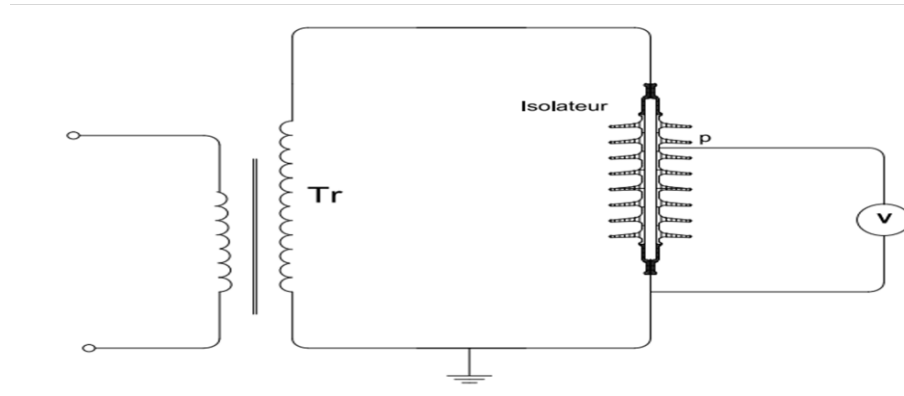
### 2.3.1. Méthode expérimentales

Parmi les méthodes expérimentales, on peut citer celles basées sur la mesure des équipotentielles à savoir [23] :

- La méthode de mesure directe.
- La méthode par compensation

**a. Méthodes de mesure direct de la tension,**

En connectant un voltmètre électrostatique (V) entre le point de mesure (p) et la terre figure (1-1).



**Figure 2 .1**Schéma de mesure directe de la tension [24]

L'avantage de cette méthode est le matériel restreint utiliser son inconvénient est la présence d'une sonde de mesure. Dérivant un courant de mesure qui perturbe la forme du champ électrique local. [25]

**b. Méthodes de mesure par compensation**

Le point (p) dont on veut déterminer la tension est relié à travers un éclateur à gaz au secondaire d'un transformateur à haute tension (T1). Le primaire de ce transformateur est alimenté le réseau à travers un régulateur de tension et de phase (RP)

Lorsque la tension au secondaire du transformateur (T2) a atteint la valeur et la phase de la tension du point (p) à mesurer l'éclateur à gaz s'éteint, et si l'on connaît le rapport de transformateur de (T2), on peut lire directement la valeur de la tension (T2) sur un voltmètre connecté au primaire de (Up).

L'avantage de cette méthode dite de zéro est qu'elle perturbe peu le champ électrique local. L'inconvénient réside dans la difficulté d'équilibrage nécessitant l'utilisation du régulateur RP. [26]

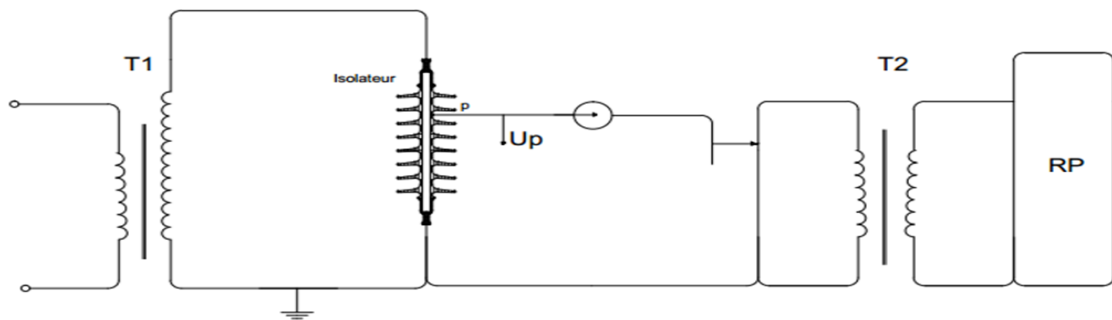


Figure 2-2 Schéma de mesure par compensation de la tension [27]

### 2.3.2. Méthode numérique

La détermination du champ électrique à proximité d'un dispositif à haute tension se heurte à deux difficultés fondamentales :

- La forme géométrique (conditions aux limites) compliquée du système.
- L'espace dans lequel le problème est posé s'étend à l'infini. [25]

C'est pourquoi on a recours à des techniques numériques pour déterminer l'intensité du champ et tension électrique.

Les principales méthodes numériques de calcul du champ et tension électrique sont :

- La méthode des charges fictives ;
- La méthode des différences finies ;
- La méthode des volumes finis ;
- La méthode des éléments finis.

#### 2.3.2.1. Méthodes des charges fictives [28]

La méthode des charges fictives est basée sur une simulation de la distribution superficielle des charges électriques sur la surface des électrodes par une distribution discrète des charges fictives, à l'intérieur de ces dernières l'emplacement et la grandeur de ces charges fictives seront déterminées de manière à ce que leur effet intégré satisfait aux conditions aux limites du potentiel connu sur la surface des électrodes.

La nature discrète de la méthode des charges fictives impose l'introduction d'un nombre assez élevé de charge pour atteindre une précision raisonnable, c'est pourquoi l'utilisation de l'ordinateur s'avère nécessaire

Si  $Q_i$  étant les charges fictives mises en place, le potentiel  $V$  et le champ  $E$  en un point quelconque «  $p$  » de l'espace, où  $V$  et  $E$  sont exprimés par :

$$V(p) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i} \quad (2.12)$$

$$\vec{E}(p) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i^3} \vec{r}_i \quad (2.13)$$

Où  $r_i$  est la distance entre la charge locale  $Q_i$  et le point P.

$\epsilon_0$  : la constante diélectrique de l'air (F/m).

La méthode de calcul des champs électrique par l'intermédiaire des charges électriques fictives ne nécessite de valeur du potentiel sur les électrodes, et n'exigeant par la présence de contours fermés.

Elle s'applique donc particulièrement bien au calcul des champs électriques dans les installations extérieures.

### **2.3.2.2. Méthode des Différences Finies (M.D.F)**

La méthode des différences finies (M.D.F) est de fournir une approximation des dérivées partielles qui régissent les problèmes par des « différences » entre les valeurs nodales qui sont séparées par une distance finie [29 ; 30]. Elle consiste à décomposer le domaine d'étude en une grille rectangulaire uniforme dont chaque nœud est à équidistance de son voisin suivant les axes x et y et en chaque nœud, le système différentiel est satisfait. L'utilisation d'un maillage régulier permet d'avoir, en tout point, la même forme pour les équations [29].

### **2.3.2.3. Méthodes des volumes finis (MVF) :**

Dans cette méthode, le domaine d'étude est subdivisé en un nombre fini d'élément de volume de telle manière que chaque volume entoure un nœud du maillage [31]. L'équation de dériver partielles (EDP) est intégrée sur chaque volume élémentaire.

Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire, la fonction inconnue est présentée à l'aide d'une fonction d'approximation entre deux nœuds consécutifs, ensuite la forme intégrale est discrétisé dans le domaine d'étude.

Grâce à un libre choix de la fonction de liaison entre nœuds consécutifs la procédure conduite à une solution plus précise [32,33].



Sa mise en œuvre est simple si les volumes élémentaires sont des rectangles en 3D. Cependant, cette méthode permet d'utiliser des volumes élémentaires de forme quelconque, donc de traiter des géométries complexes ce qui est un avantage [34].

En détaillant certaines méthodes choisies qui seront utilisées dans le reste de notre étude comme la méthode des éléments finis.

#### ***2.3.2.4. Méthode des Éléments Finis (M.E.F) [35]***

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

##### ***a. Etape de la méthode des éléments finis***

C'est la méthode la plus utilisée vu sa généralisation et sa capacité de résoudre les problèmes les plus complexes, le système d'équations algébriques est obtenu en appliquant la méthode des résidus pondérés, ou la méthode vibrationnelle, la résolution du système permet d'obtenir la solution du problème original [31]. La méthode des éléments finis peut être résumée [36] dans les étapes suivantes :

- Discrétisation du domaine ;
- Formulation intégrale des équations différentielles partielles ;
- Choix des fonctions d'interpolation ;
- Formation des matrices et vecteurs élémentaires ;
- Assemblage ;
- Résolution du système algébrique globale

**b. Avantages et inconvénients de la méthode des éléments finis**

La méthode des éléments finis est la plus utilisée car :

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

L'avantage majeur de la méthode des éléments finis, par rapport aux autres méthodes provient du fait que dans cette méthode, chaque élément peut avoir des caractéristiques électriques et géométriques particulières et indépendantes des autres éléments. Ainsi il est possible de résoudre de manière relativement efficace des cas de géométrie complexe présentant des propriétés différentes, Cependant l'inconvénient majeur de cette méthode est la difficulté à modéliser des systèmes à domaine ouvert. [29]

**2.4. Conclusion**

La détermination de la distribution du potentiel et du champ électrique de tout système haute-tension est un problème complexe de calcul non pas par la simplicité des équations aux dérivées partielles qui les décrivent mais plutôt à cause de la forme irrégulière des diélectriques, de la proximité de surfaces métalliques aux formes complexes, des lignes de transmission.

Plusieurs méthodes numériques sont proposées pour la résolution des problèmes posés. Ces méthodes sont adaptées à différentes formes complexes et irrégulières des isolants afin de les identifier.

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe et les caractéristiques de quelques méthodes numériques (La Méthode des Différences Finies (M.D.F), la Méthode des Éléments Finis (M.E.F), la Méthode de Charges Fictives (M.C.F) et la Méthode des Volumes Finis (M.V.F).). Ces méthodes sont basées sur la résolution de l'équation de Laplace en imposant les conditions aux limites adaptées à chaque problème.

## **CHAPITRE03**

# **REPARTITION DU CHAMP ET TENSION ELECTRIQUESUR LASURFACE DE L'ISOLTEUR**

---

### **3.1 Introduction**

Malgré les avantages des isolateurs polymériques par rapport aux systèmes d'isolation en céramique, des préoccupations subsistent quant à leur performance dans des environnements contaminés. Il ne peut être obtenu une compréhension approfondie des problèmes tels que les bandes sèches et les décharges électriques que grâce à une détermination précise de la distribution du champ électrique le long de la surface de l'isolateur et c'est un facteur clé dans le développement d'un bon isolateur pour une performance optimale dans diverses conditions atmosphériques [17].

Dans ce chapitre, la simulation par ordinateur basée sur la méthode des éléments finis est utilisée pour calculer les distributions de potentiel et de champ électrique le long de la ligne de fuite. Le modèle d'isolateur est développé et simulé dans des conditions de la surface propre, en utilise le logiciel COMSOL Multiphasiques. V.5.0, qu'est un logiciel commercial utilisé pour les simulations bidimensionnelles et tridimensionnelles.

### **3.2 Identification des domaines dans le logiciel COMSOL Multiphasiques**

Les simulations tridimensionnelles ont été réalisées avec le logiciel COMSOL Multiphasiques. V.5.0, qu'est un logiciel commercial utilisé pour les simulations bidimensionnelles et tridimensionnelles. Il offre les mêmes possibilités de modélisation et aussi basé sur la formulation indirecte de la Méthode d'Elément Finis, une attention particulière doit être portée sur la taille des éléments utilisés dans la discrétisation de la pollution.

Dans ce cas on a fait un modèle de simulation sur un isolateur réel en 3D utilisant le COMSOL en 3D pour dessiner la géométrie de l'isolateur. La modélisation et la simulation d'un isolateur réel peut se résumer en cinq étapes successives suivantes :

**a. Première étape**

La première étape consiste à définir la géométrie entière de l'isolateur réel avec COMSOL MULTIPHASIQUES. L'étude est faite sur un isolant en silicone. Il a environ 450mm de long avec 7 ailettes. Une vue publique de l'isolant en silicone est donnée à la Figure.3.1. Étant donné que l'isolateur est à symétrie axiale, seule la moitié du modèle d'isolateur a été choisie puisque sa forme géométrique est cylindrique.

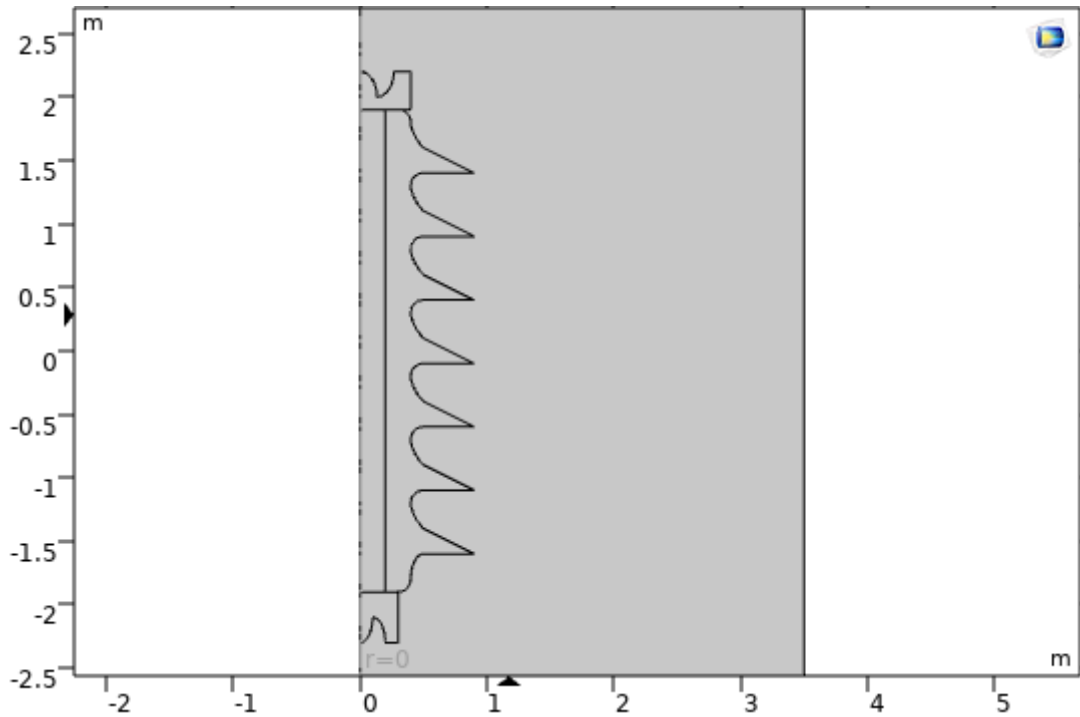


Figure.3.1. Géométrie de l'isolateur réel.

**b. Deuxième étape (définis les matériaux)**

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

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

Matériaux	Permittivité relative $\epsilon_r$	Conductivité $\sigma$
Silicone	4,3	$10^{-14}$
Fibre de verre	7,1	$10^{-14}$
Electrodes en Cuivre	1	$5.9 \cdot 10^7$
Air	1	$10^{-15}$

### c. Troisième étape (Conditions aux limites)

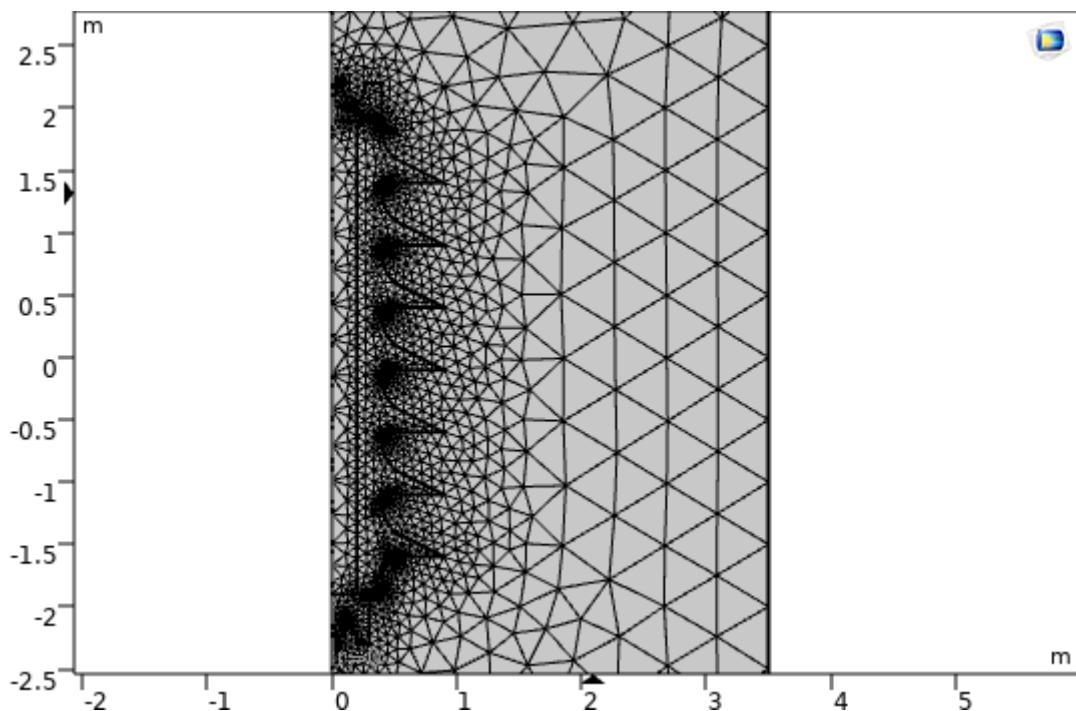
Pour toutes les simulations, la tension appliquée aux bornes de l'isolateur composite correspond à la tension de service entre phase et terre en considérant. L'une des électrodes est soumise à la valeur efficace de la tension simple du réseau tandis que l'autre électrode et les bords extérieurs de la région d'air entourant l'isolateur sont affectés au potentiel zéro (0). L'espace d'air est suffisamment grand pour minimiser l'effet sur la distribution du potentiel à proximité des électrodes et le long du profil de l'isolateur. La tension appliquée pour le modèle est égale 40 kV pour HVDC et 33 kV pour HVAC. Les paramètres spécifiques du modèle de simulation sont résumés dans le tableau 3.2.

**Tableau 3.2.** Paramètres du modèle de simulation

Système HVDC	$V_{DC+}=40\text{kV}$ $V_{DC-}=-40\text{kV}$
Système -HVAC	$V_{LI}=33\text{kV}\cdot\sin(314\cdot t+120)$

### d. Quatrième étape (maillage et l'étude)

La quatrième étape porte sur la définition du maillage qui consiste à discrétiser les différentes interfaces entre les matériaux en éléments finis. Le maillage se fait automatiquement ou manuellement comme montre dans la figure 3.2.



**Figure .3.2** Maillages des isolateurs réels.

### ***e. La cinquième étape***

La cinquième étape consiste à la résolution du problème par l'application de la méthode numérique et par la construction du système d'équations.

Suivant la taille du problème, on peut choisir de résoudre le système d'équations soit directement pour un faible nombre d'inconnues ou soit itérativement pour des problèmes de grande taille.

Le but de ce travail est l'étude la distribution de la tension et du champ électrique à la surface de l'isolateur synthétique en utilisant la méthode des éléments finies. Les équations de bases utilisées pour calculer le potentiel (champ électrique) sont les équations de MAXWELL [17]. Pour le modèle électrostatique et en prenant en considération la charge d'espace on utilise l'équation de Poisson :

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (3.1)$$

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

$$\nabla^2 V = 0 \quad (3.2)$$

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

$$\nabla \varepsilon \nabla V = 0 \quad (3.3)$$

$$-\nabla \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V) - \nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (3.4)$$

## **3.3 Résultats et discussions**

### **3.3.1. Études de la distribution de tension électrique**

Pour étudier l'effet du type de tension sur le champ et de la tension électrique, de la simulation de chaînes d'isolateurs a été réalisé par un logiciel de COMSOL basé sur FEM et les résultats ont été présentés.

En raison du grand nombre de simulations effectuées, seuls quelques résultats de type de silicone chaînes de isolateurs ont été extraites à partir du logiciel COMSOL et est présenté ici comme un échantillon. Les résultats d'autres types de tension sont discutés à travers des figures suivantes.

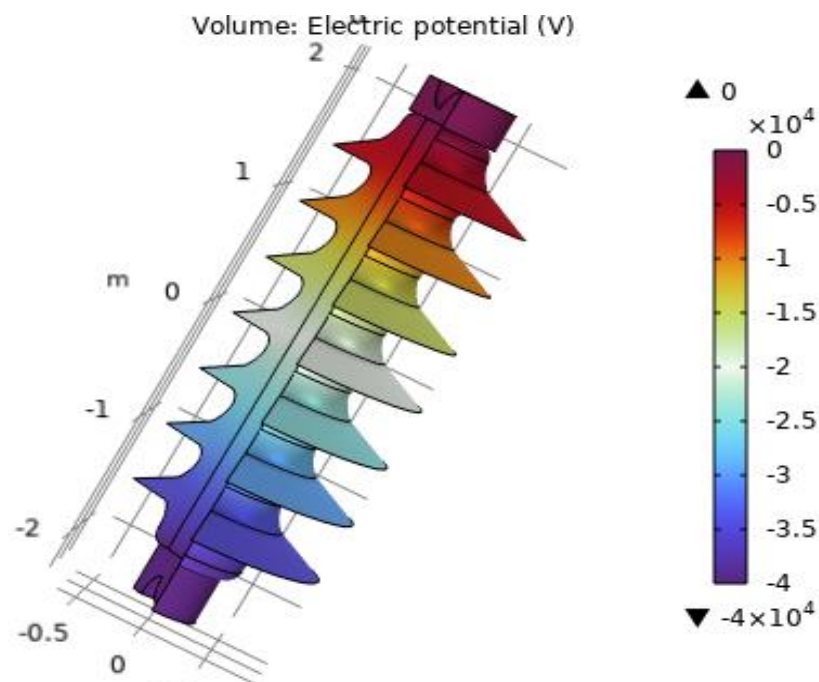
La figure (3.3), représente les résultats de simulation pour la distribution de la tension électrique pour des isolateurs propres en 3D avec différents types de tension (DC et AC).

De ces résultats nous pouvons conclure que la distribution de la tension n'est pas uniforme et que la zone proche de l'électrode HT est la plus contraignante alors que celle près de l'électrode terre la tension est presque nulle. On observe aussi que les distributions de la tension dans les deux systèmes DC et AC sur l'isolateurs est presque les mêmes.

Les résultats de simulation des lignes équipotentielles et lignes du champ électrique obtenus avec deux types de tension HVDC et HVAC sont représentés sur les Figures 3. 4 à 3. 5.

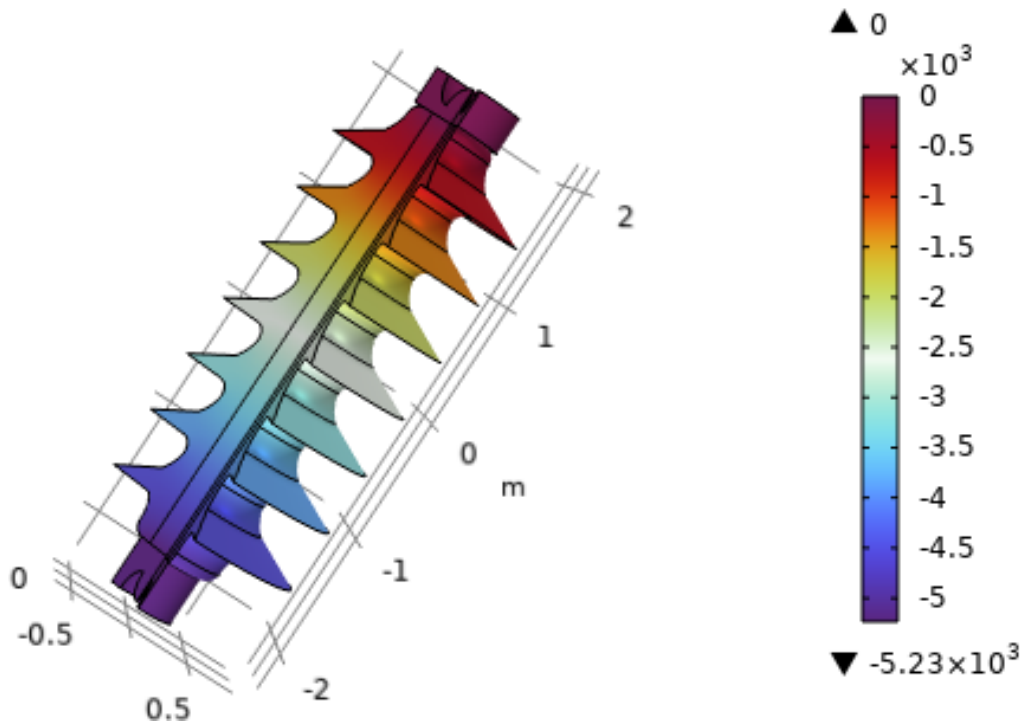
La figure 3.4 représente les résultats de simulation pour les lignes équipotentielles pour DC et AC. De ces résultats nous pouvons conclure que la répartition de la tension n'est pas uniforme et que zone proche de l'électrode HT est la plus contraignante alors que celle près de l'électrode terre la tension est presque nulle. Mais dans la distribution des lignes équipotentielles dans des isolateurs DC nous remarquons que seulement un changement minime qui a eu lieu. Cette différence est plus claire en examinant les courbes de la figure 3.7 qui donne la répartition axiale de la tension.

Le champ électrique généré par la configuration utilisée est très intense au niveau des électrodes pour des deux isolateurs silicone (figure 3.5), et que la zone proche de l'électrode HT est la plus élevée alors que celle près de l'électrode terre la tension est presque nulle.



a. Tension DC

Volume: Electric potential (V)



b. Tension AC

Figure 3.3. Distribution de la tension électrique.

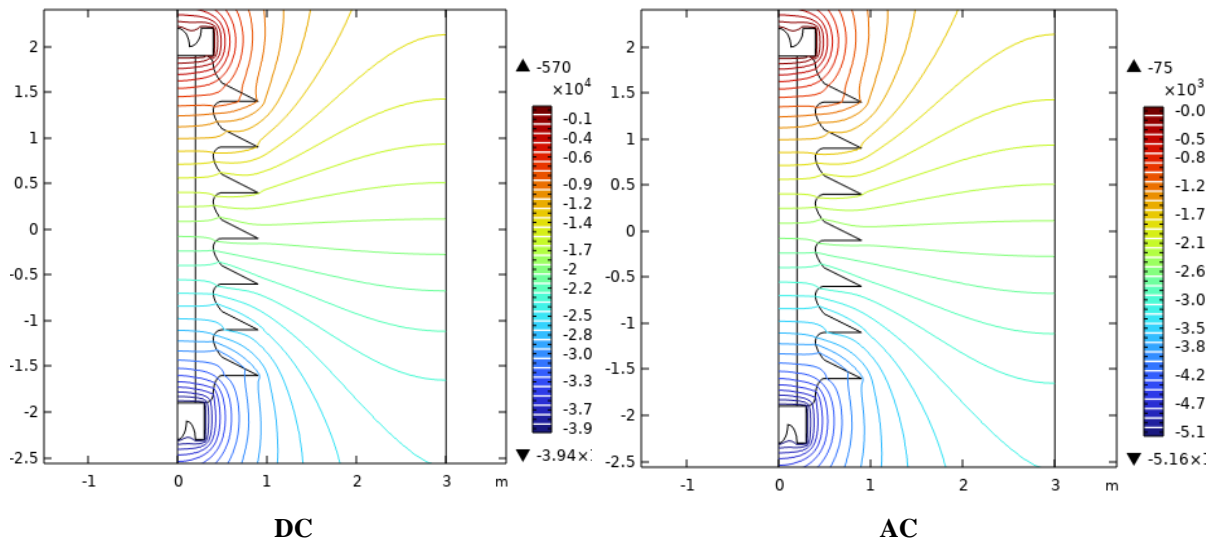


Figure 3.4. Distribution des lignes équipotentielles pour DC et AC



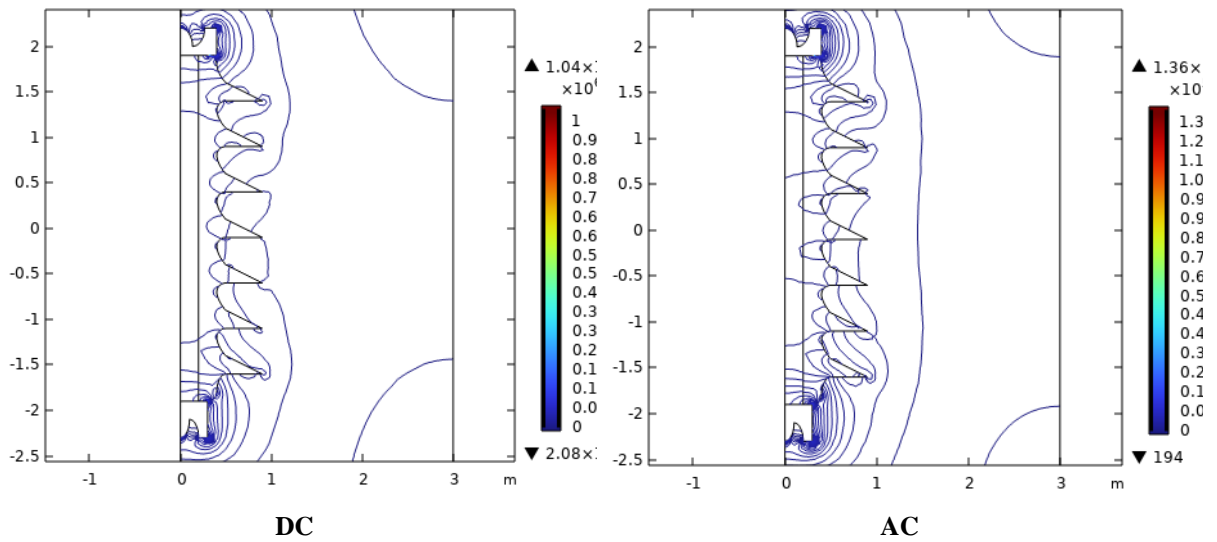


Figure 3.5. Distribution des lignes de champ pour des isolateurs en silicone

**3.3.2. Études de la répartition de la tension et champ électrique axiale et sur ligne de fuite**

Les distributions du potentiel et du champ électrique ont été calculées le long d'un axe de référence et la ligne de fuite donnée figure (3.6).

L'axe vertical parallèle de distance 0.5m par rapport à l'axe d'isolateur en silicone en rouge et la ligne de fuite en bleu.

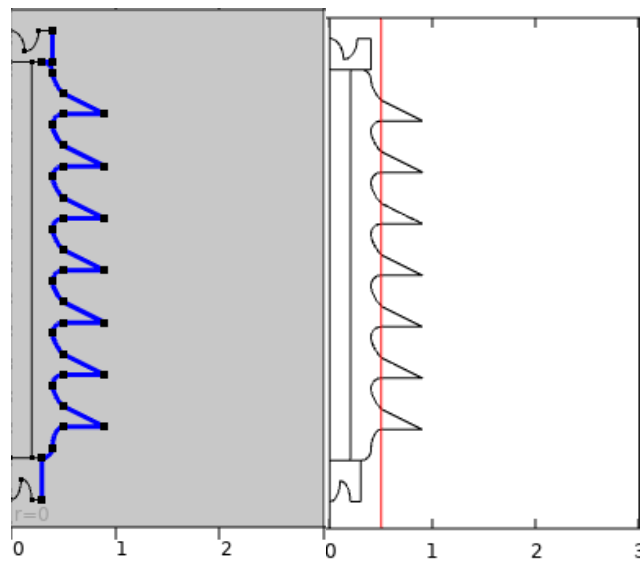
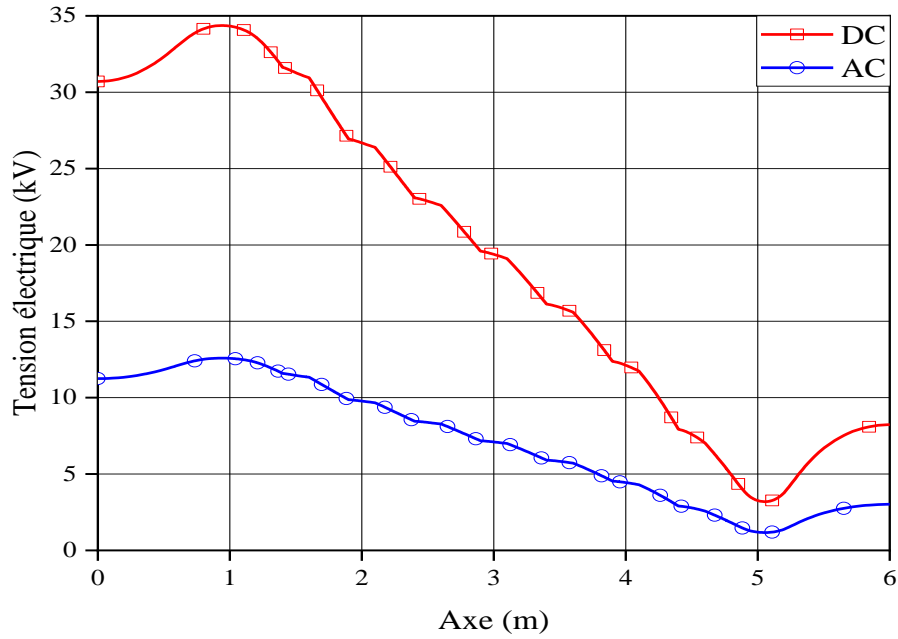


Figure 3.6 Lignes de référence du potentiel et champ électrique.

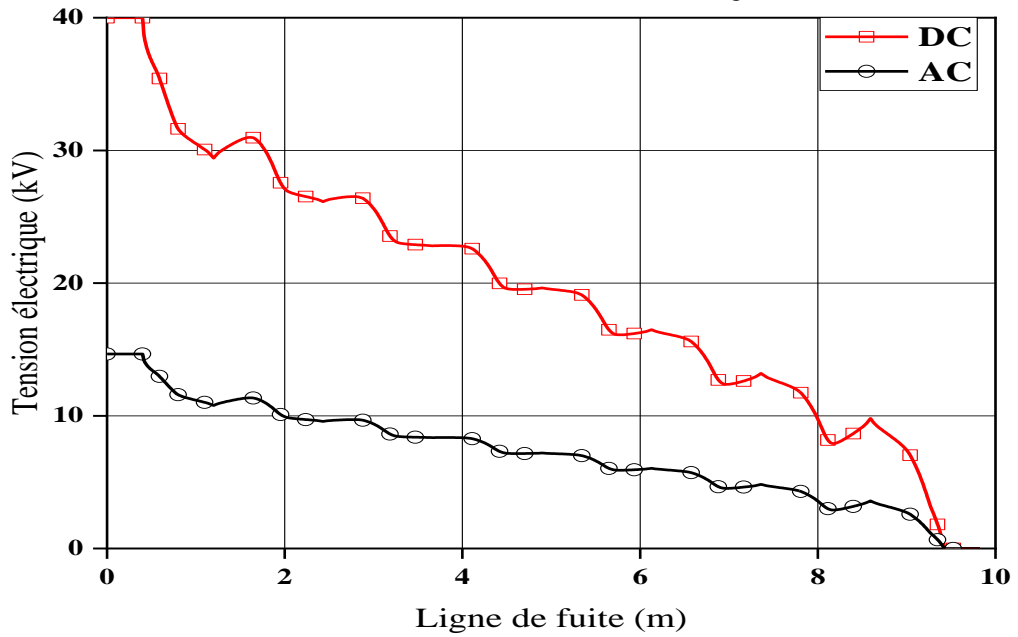
**a. Tension électrique**

La figure 5 montre la répartition de la tension le long de l'isolateur pour les tensions DC+ et AC pour les deux axes de référence choisis.

La distribution de la tension continue est plus uniforme par rapport au courant alternatif en raison du changement de polarité à chaque cycle dans le cas du courant alternatif



**a. Axe de référence à distance en rouge**

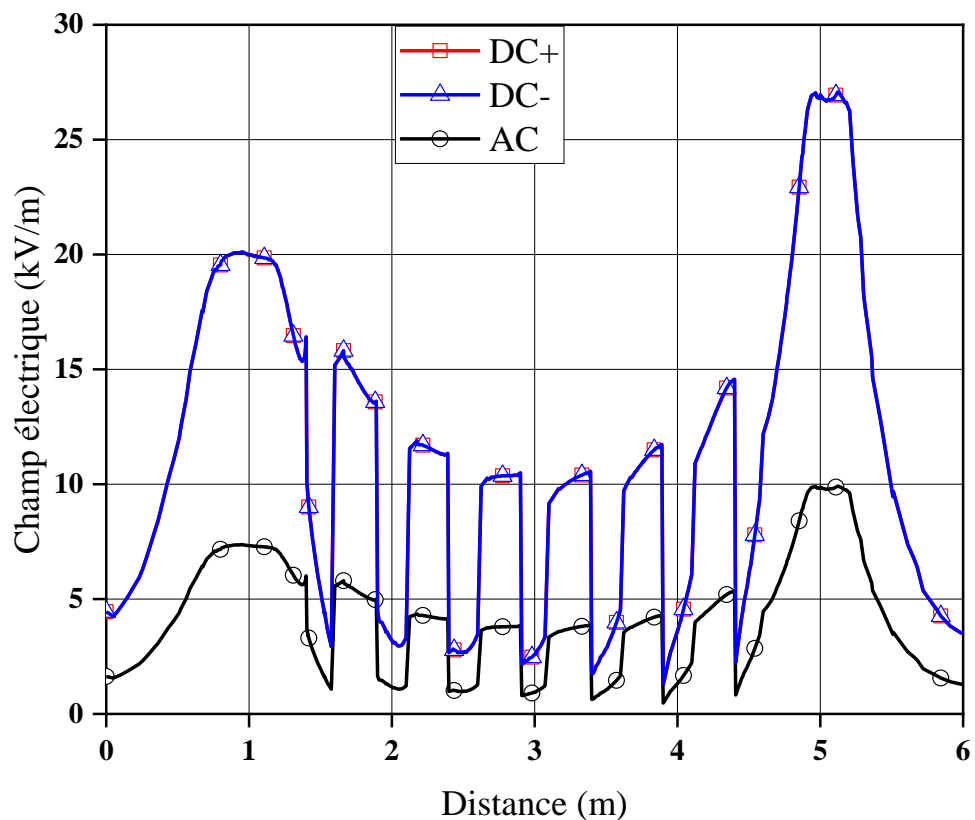


**b. Ligne de fuite en bleu**

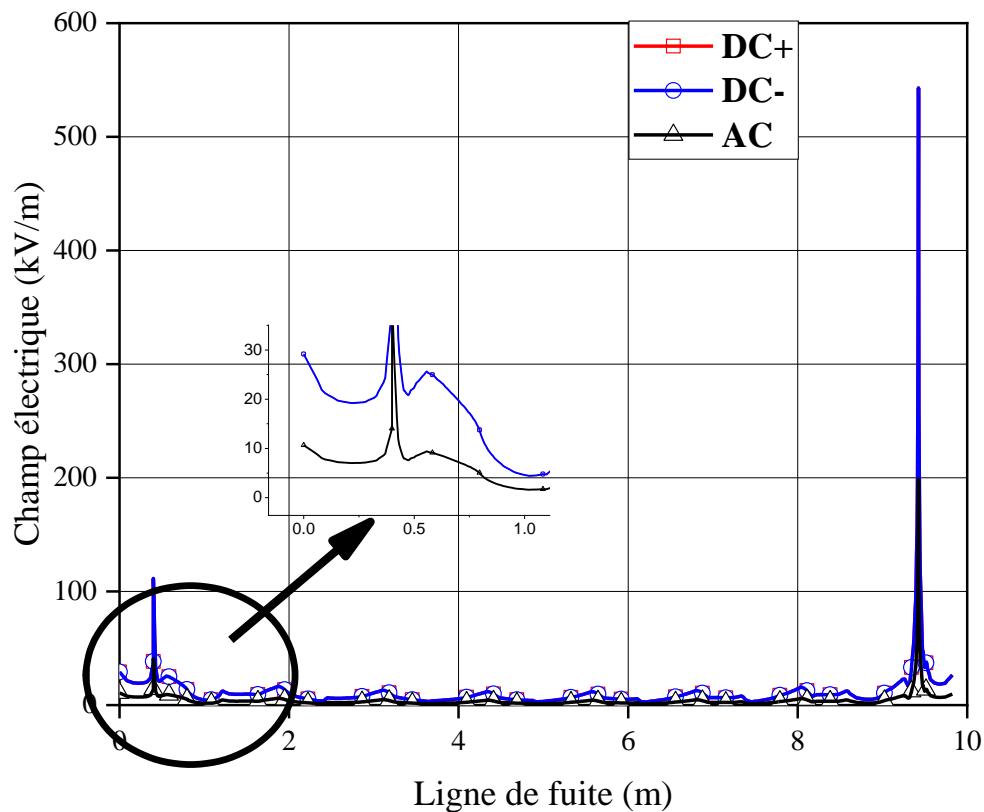
**Figure 3.7.** Potentiel électrique le long des isolateurs

**b. Champ électrique**

La figure 3.8 montre une comparaison des champs électriques DC et AC. Il ressort de la figure 3.8 que la norme de champ électrique dans le cas de DC + et DC- est assez similaire mais différente de celle du courant alternatif. Le champ électrique plus élevé dans le cas d'une tension continue appliquée est dû à l'accumulation de charge statique sur la surface de l'isolant et à la dépendance de la conductivité du matériau à la température de surface.



a. Axe de référence à distance en rouge



b. Ligne de fuite en bleu

**Figure 3.8.** Champ électrique le long des isolateurs.

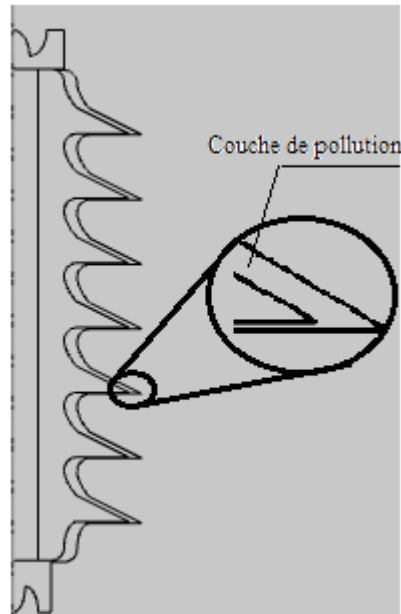
### 3.4 Performance dans des conditions contaminées et sous contrainte DC

Il a été trouvé dans la littérature [37] que les isolateurs soumis à une tension de courant continu attirent 20% plus de contamination que sous courant alternatif. Ce phénomène est dû au fait que la tension continue produit un champ électrique mono polaire stable qui attire en permanence les ions et autres particules environnantes. D'autre part, dans le cas d'une tension alternative, le champ électrique continue d'alterner, ce qui rend le processus d'attraction moins efficace que sous une tension continue.

D'après les résultats dans la figure 3.8 ce qui montre qu'il existe une différence notable entre les champs électriques AC et DC. Ainsi, une plus grande attention devrait être accordée aux isolateurs soumis au HVDC. Donc, dans cette section nous allons expliquer les performances des isolateurs HT dans des conditions contaminées soumises à une contrainte DC.

Pour observer le comportement de la distribution de tension le long de l'isolateur, la couche de pollution a été modélisée comme une fine couche conductrice ( $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) d'un

millimètre uniformément réparti sur la surface de l'isolateur, comme la figure 3.9.



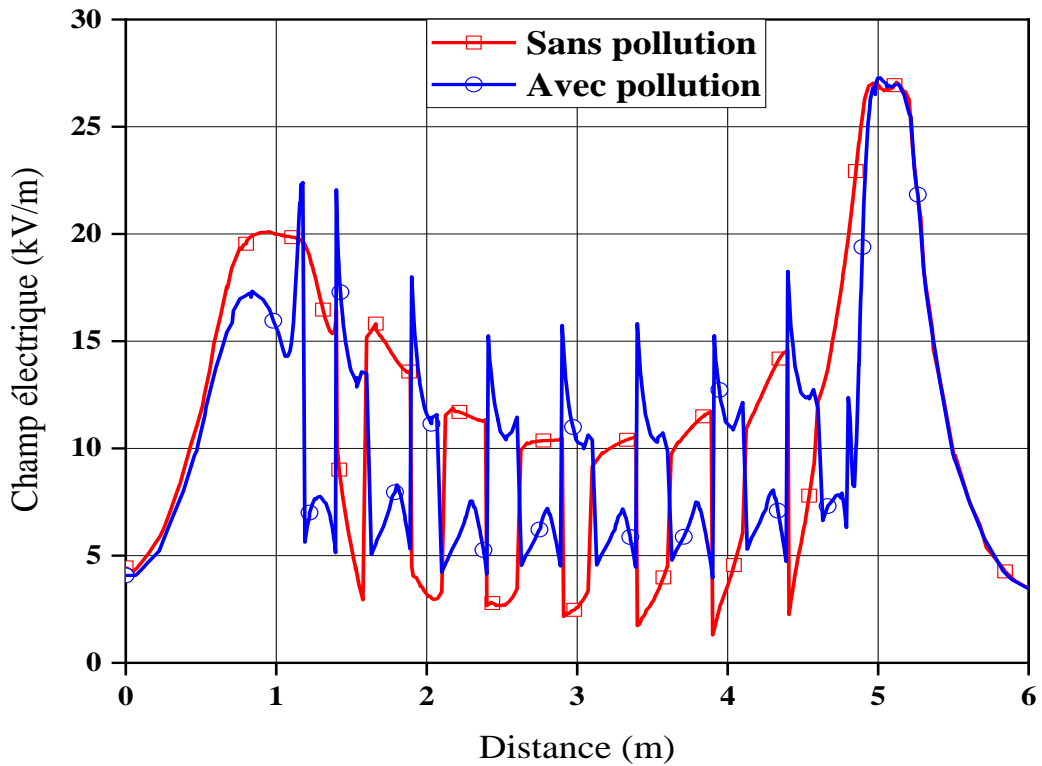
**Figure 3.9.** Modélisation de la pollution.

Dans cette partie du travail, l'étude de la répartition de la tension et champ électrique en présence d'une couche de pollution à la surface de l'isolateur se fait sous tension continu. On présente la répartition axiale et sur la ligne de fuite de la tension et champ électrique le long d'isolateur dans les figures (3.10 et 3.11) respectivement.

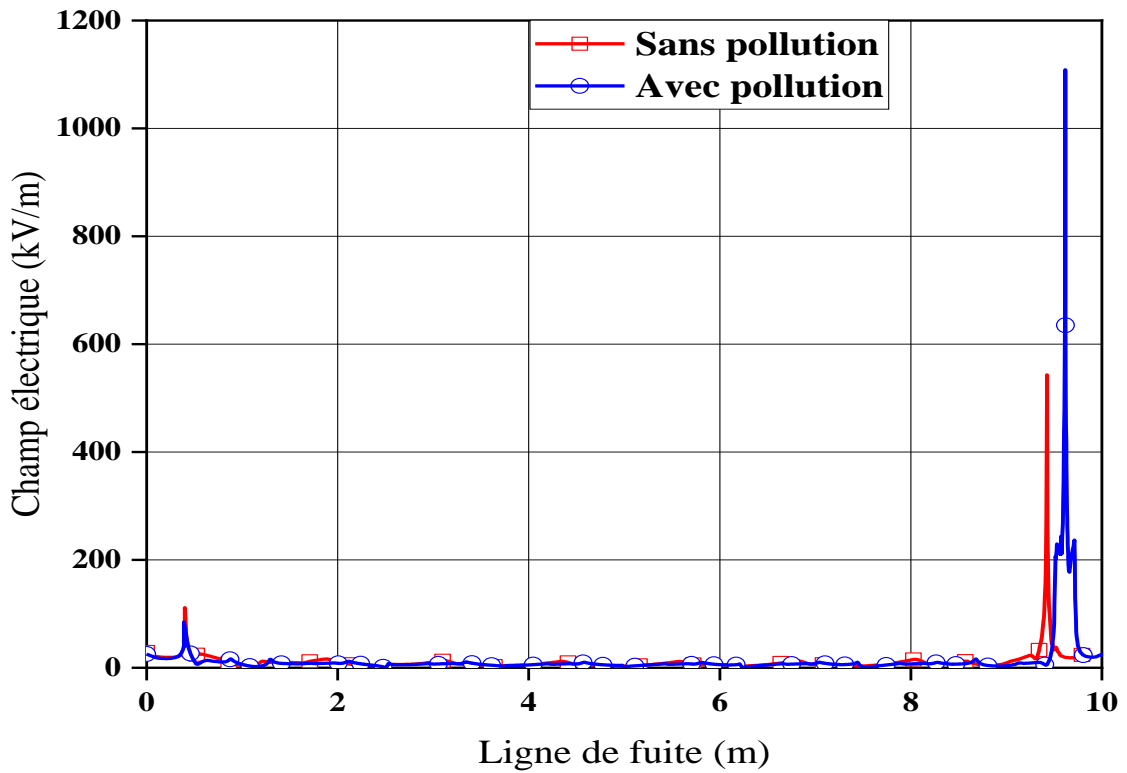
La Figure 3.10) représente la distribution du champ électrique autour d'isolateur pour le cas propre et pollué, ce résultat est obtenu par l'application d'une tension continue.

La déformation du champ est causée par l'effet de la différence entre les permittivités des matériaux isolants (silicone) et l'air. La comparaison entre les deux cas montre que le champ électrique est plus grand dans le cas pollué. Le champ est concentré dans les deux électrodes et son valeur est minimale au milieu d'isolateur.

La figure (3.11) représente la répartition de la tension des isolateurs en fonction de longueur d'isolateur. On remarque que le potentiel électrique est uniformément distribué le long de l'isolateur, le potentiel maximal est remarqué sur l'électrode de l'alimentation. Une déformation entre le cas pollué et propre due à l'effet des caractéristiques électrique de la couche de pollution, l'augmentation de la conductivité de la pollution rend toujours le potentiel électrique plus faible que dans le cas d'une surface propre et polluée.

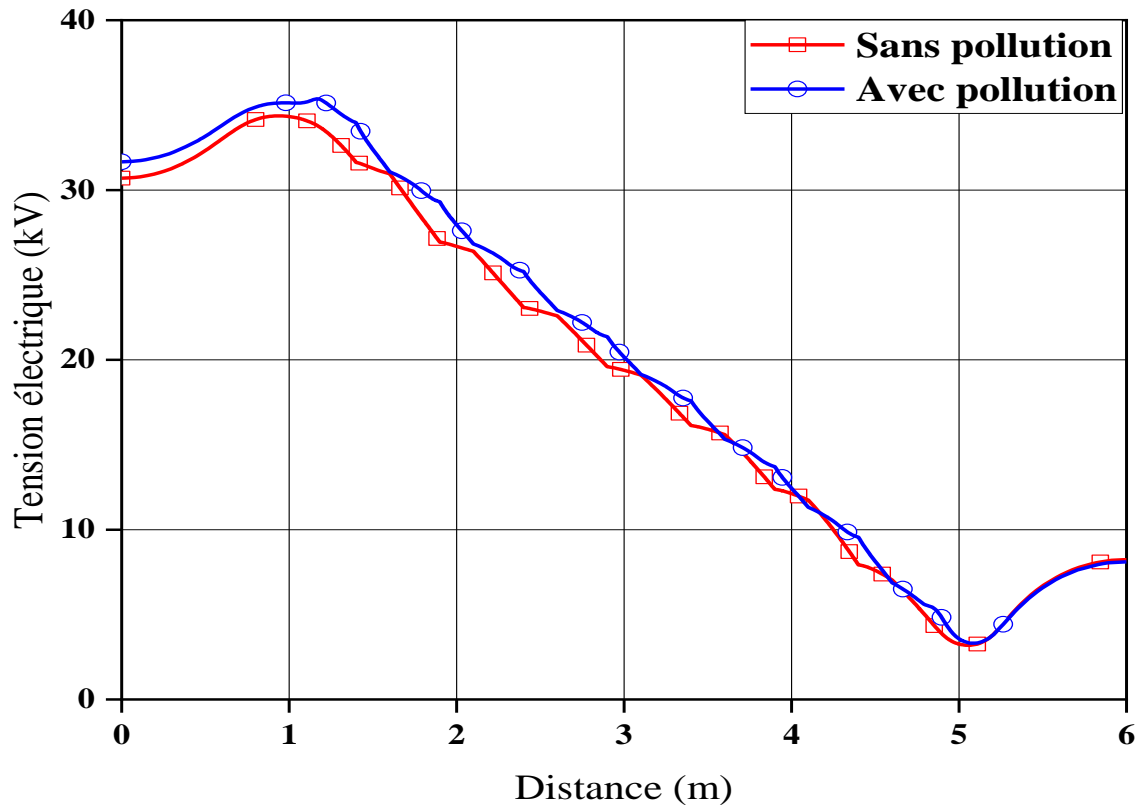


a. Axe de référence à distance en rouge

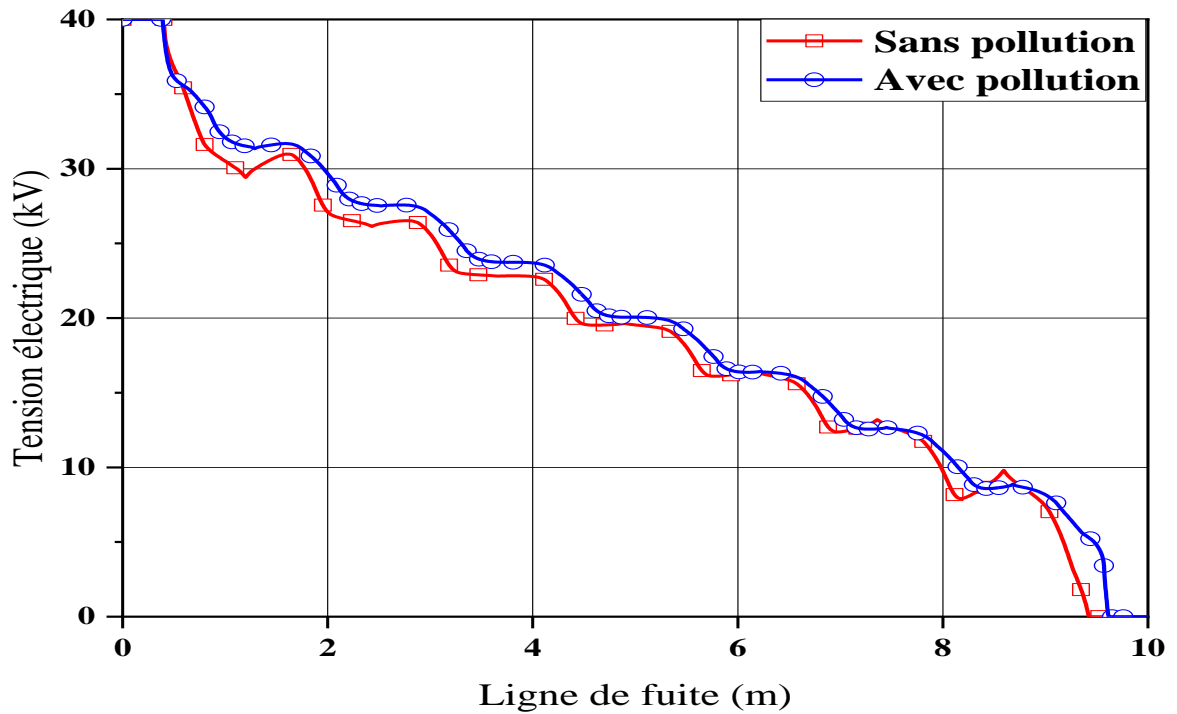


b. Ligne de fuite en bleu

Figure 3.10 Champ électrique le long des isolateurs



a. Axe de référence à distance en rouge



b. Ligne de fuite en bleu

Figure 3.11. Potentiel électrique le long des isolateurs

### 3.5 Conclusion

L'objectif dans ce chapitre était d'étudier l'effet du type de tension et de la polarité sur la distribution du champ et tension électrique à la surface de l'isolateur dans des conditions propres et contaminées. Les distributions de champ électrique et de tension autour de ces isolateurs sont quantifiées à l'aide de la méthode des éléments finis (MEF) à l'aide d'un logiciel commercial COMSOL Multiphasiques. Ainsi, les principales conclusions dans ce chapitre peuvent être résumées comme suit :

- ✓ La concentration du champ électrique est remarquée dans les électrodes HT et masse.
- ✓ La polarité de la tension a très peu d'effet sur la distribution du champ électrique mais que le type de tension affecte le champ électrique et la distribution du potentiel.
- ✓ Le champ électrique est plus élevé dans le cas d'une tension appliquée en courant continu par rapport au courant alternatif dans des conditions de service similaires.
- ✓ La distribution de la tension et le champ électrique le long d'isolateur est uniforme à cause de l'absence de la couche polluante conductrice.
- ✓ Dans les régions humides la distribution de tension le long de l'isolateur est non uniforme.
- ✓ La distribution du potentiel et du champ électrique fortement influence par les caractéristiques électriques de la couche de pollution.



## CONCLUSIONS GENERALES

---

L'isolateurs haute tension jouent un rôle majeur dans les systèmes de transmission d'énergie. Le rôle principal de ces isolateurs est d'assurer et de maintenir un niveau élevé d'isolation des pylônes qui peuvent être affectés par différents facteurs environnementaux tels que l'humidité, la poussière, la chaleur et les contaminations chimiques. Les isolateurs HT ont été largement étudiés sous tension alternative. Cependant, sous tension continue, les investigations sont encore prématurées.

Dans ce travail de thèse, la distribution du champ et tension électrique à la surface de l'isolateur HT ont été étudiés dans des conditions propres et contaminées soumises à des tensions continues.

Ce travail, nous avons jugé nécessaire de le développer suivant deux parties distinctes :

- Une partie théorique porte sur l'isolateur de haute tension, le phénomène de pollution, et méthodes numériques est utilisée pour calculer la distribution du champ et tension électrique
- Une partie de simulation permettant la détermination des distributions du potentiel et du champ électriques le long d'isolateur en 3D à l'aide d'un logiciel commercial COMSOL Multiphasiques ce dernier est basé sur la méthode des éléments finis (MEF). Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :
  - ✓ La concentration du champ électrique est remarquable dans les électrodes HT et masse.
  - ✓ La polarité de la tension a très peu d'effet sur la distribution du champ électrique mais que le type de tension affecte le champ électrique et la distribution du potentiel.
  - ✓ Le champ électrique est plus élevé dans le cas d'une tension appliquée en courant continu par rapport au courant alternatif dans des conditions de service similaires.
  - ✓ La distribution de la tension et le champ électrique le long d'isolateur est uniforme à cause de l'absence de la couche polluante conductrice.
  - ✓ Dans les régions humides la distribution de tension le long de l'isolateur est non uniforme.
  - ✓ La distribution du potentiel et du champ électrique fortement influence par les caractéristiques électriques de la couche de pollution.

Les résultats de cette étude aideront les scientifiques et les ingénieurs dans la sélection d'isolateurs pour les applications AC et DC dans des conditions contaminées.

# Bibliographies

- [1] **Fazelian, M., Wu, C.Y., Cheng, T. C., Nour, H., Wang, L.J** «A study on the profile of HVDC insulators-DC flashover performance», IEEE Trans. Electro. Insult. vol. 24, no. 1, pp. 119–125, 1989
- [2] [www.electrosup.com/lisolateur.PDF](http://www.electrosup.com/lisolateur.PDF)
- [3] **S. Tunis, F. Cheikh**, « Influence du Sol sur le Comportement d'un Modèle d'Isolateur sous-tension », Mémoire du projet de fin d'études, école nationale polytechnique d'Alger. Juin 2008
- [4] **Sayah Moatez Béllah** « Prédiction du contournement d'une Chaîne d'isolateur MT 175 CTV-Sonelgaz Polluée Artificiellement par la Logique Floue », Biskra Mémoire de Fin d'études, Juin 2014.
- [5] **GENBERG**, «Isolateur en céramique et en synthétique», EDF-EPURE, 1998.
- [6] **K. OUERDANE**, « Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30kV en régions littorales », projet de fin d'études, Université Bâb Ezzouar, 1998.
- [7] **D. DUMORA**, « Matériaux isolants cramiques en électrotechnique, » Techniques de l'ingénieur, p. D275, 1975.
- [8] <http://www.surprises.ch>.
- [9] **M.Terkmani, M.Babouamer**, «Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension», PFE, Département de Génie Electrique, USTO, Oran, Juin 2005.
- [10] **M. TEGUAR**, « Etude mathématique des mécanismes de développement », Alger : Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, Juillet 1993.
- [11] **SATTA Samia**, « Contribution à l'étude de l'influence de la pollution discontinue sur le comportement des isolateurs : expérimentation et simulation », Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2010.
- [12] **Y. Percheron**, « Lignes aériennes : Matériels entrant dans la constitution d'une ligne aérienne », Technique de l'ingénieur D4425.
- [13] **MEKHALDI Abdelouahab** « Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz », Thèse de doctorat d'Etat en Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique Alger 1999.
- [14] **Fernando**, « Leakage Current Patterns on Contaminated, », IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, vol. 6, n° percentage15, October 1999.
- [15] **R. BOUZEROURA**, « Etude du développement d'arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue, », Mémoire de magister, Université de Bejaia, 2009.
- [16] **AOUABED Fatiha**, « Contribution à l'étude et à l'évaluation des performances électriques des isolations en silicone polluées sous tension alternative » Thèse de Doctorat en Sciences setif-1- 2018
- [17] **F. AOUABED**, « Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP », Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2010.
- [18] **M. Amin and M. Salman**, « Aging of polymeric insulator (an overview) », Rev. Ad materials Science, pp.96–116, 2006
- [19] **AFFOLTER Jean-François** « Haute tension » Ecole d'ingénieurs du canton DEV AUD Yverdon-les-Bains, octobre2000.
- [20] **Wei H. J., Jay Aram S., and Cheney E. A.**, « A study of electrical stress grading of composite bushings by means of a resistive silicone rubber coating, », Journal of Electrostatics, vol. 63, pp. 273-283, 2005.
- [21] **C. Volât**, « Modélisation physique et numérique par la méthode des éléments finis de frontière de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur standard de poste 735 kV recouvert de glace », Thèse de doctorat, Université du Québec Juin 2002.
- [22] **F. ZITOUNI**, « Calcul du champ électrique et magnétique produits par les lignes de transport », Chez conférence de sonal gaz, Alger, 1999.
- [23] **L. ALLOUI**, « Modélisation magnétique tridimensionnelle du problème par la méthode des volumes finis », Université de Biskra, 2001
- [24] **A. KACL**, « Calcul du champ électromagnétique 2D et 3D par une technique de Monte Carlo », Thèse ingénieur d'état de l'université Jijel, 2002.
- [25] **G. Talla**, « Comportement d'un modèle d'isolateur sous tension impulsionnelle », pp. 173-183, 2005
- [26] **M. ADEL Kara**, « Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué » Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2013.
- [27] **Michel Aguet et Michel Lanoz**, « Traité d'électricité Haute tension », Volume XXII, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [28] **K. J. Bins, P. J. Lawperson**, « Analysis and Computation of Electric and Magnetic Field Problems», second end, Pergamum Press, London, 1973.
- [29] **E. S. Arsenio, N. O. Morales**, « Low Frequency Complex Fields in Polluted Insulators» IEEE Trans. Select. Insula. Jaune 1982.
- [30] **KACI. Anissa**, « Calcul du champ électromagnétique 2D et 3D par une technique de monte Carlo », Thèse de magistère, Université Jijel 2002.

- [31] **KEBBAB. F, SALOUM. B,** « Calcul de champ électromagnétique bidimensionnel par une technique de Monte Carlo  
« Thèse d'ingénieur d'état de l'université Ferhat Abbas 2005.
- [32] **RADJELI. HAMMOUDI,** « Modélisation d'un convertisseur électromagnétique par la méthode des éléments finis »,  
Thèse d'ingénieur d'état de l'université Ferhat Abbas Sétif. 2004.
- [33] **SAÏAC Jacques-Hervé,** « Mathématiques pour l'électricien méthode numérique », D36
- [34] **Nisrine MHAGUEN,** « développement de modèles dynamiques de prédiction de la tension critique de contournement  
des isolateurs recouverts de glace basés sur la méthode des éléments finis », Canada : université du Québec, juin 2011.
- [35] **J. HERVE,** « Mathématiques pour l'électricien méthode numérique », vol. D1, pp. 36-2.
- [36] **L. Qisheng, W. Lai, S. Zhiyi, L. Yansheng, K. Morita, R. Matsuoka and S. Ito,** «Natural contamination test  
results of various insulators under DC voltage in an inland area in China», in Properties and Applications of  
Dielectric Materials, china,1991.