

**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-1**



**DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES**

**FILIERE : ELECTROTECHNIQUE**

**SPECIALITE : RESEAUX ELECTRIQUE**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par : MERZOUGUI Nabila**  
**MERZOUGUI Hadjer**

**Intitulé**

***Diagnostic De L'état De Surface D'un Isolateur***  
***De Haute Tension En Utilisant « Current Flow***  
***Problem »***

**Soutenu devant le jury composé de :**

Dr. CHOUCOU Abdelmadjid	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. H.BENGUESMIA	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Dr.BELHOUCHE Khaled	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2018 /2019**



## REMERCIEMENTS

---

*Nous tenons à remercier tout premièrement Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à mon encadreur « **Dr. H. BENGUESMIA** », pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.*

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département Génie électrique qui a contribué à notre formation Par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral.*

*Que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail soient assurées de mes plus sincères remerciements.*



# إهداء

إلى من جرع الكأس فارغا ليسقيني قطرة حب  
إلى من كلت أنامله ليقدّم لنا لحظة سعادة  
إلى من حصد الأشواك عن دربي ليمهد لي طريق العلم  
إلى القلب الكبير "والدي العزيز"

إلى من أرضعتني الحب والحنان  
إلى رمز الحب وبلسم الشفاء  
إلى القلب الناصع بالبياض "والدتي الحبيبة"

إلى القلوب الطاهرة الرقيقة والنفوس البريئة  
إلى رياحين حياتي: "اخوتي واخواتي"

هاجر ♥ نبيلة



*SOMMAIRE*

Introduction Générale .....	1
<i>Chapitre I. Isolateurs de haute tension</i>	
I. Isolateurs de haute tension .....	3
I.1 Introduction .....	3
I.2 Isolateur de haute tension .....	3
I.2.1. Définition .....	3
I.2.2. Fonctionnement et constitution d'un isolateur.....	4
I.2.3. Caractéristiques d'un isolateur .....	4
I.3 Différent types d'isolateurs .....	5
I.3.1. Isolateurs rigides .....	5
I.3.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne .....	6
I.3.2.1 Isolateur long fut .....	6
I.3.2.2 Isolateur capôt et tige .....	7
I.3.2.2.1. Différents profils des isolateurs .....	7
a. Profil standard .....	7
b. Profil anti-brouillard (Forme A) .....	8
b. Profil anti-brouillard (Forme B) .....	8
c. Profil sphérique .....	8
d. Profil plat .....	9
I.4 choix des isolateurs .....	9
I.5 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs .....	10
I.5.1. Céramique .....	10
I.5.2. Verres .....	10
I.5.2.1 Le verres recuit .....	11
I.5.2.2 Le verre trempé .....	11
I.5.3. Matériaux synthétiques .....	11

I.6 Défauts des isolateurs .....	12
I.6.1. Défauts électriques .....	13
I.6.2. Défauts mécaniques .....	14
I.6.3. Défauts dus à la manipulation .....	14
I.7 Vieillessement des isolateurs .....	14
I.7.1. Vieillessement thermique .....	15
I.7.2. Vieillessement Electrochimique .....	15
I.7.3. Vieillessement Electrique .....	15
I.8 Conclusion .....	15

## *Chapitre II. Phénomène de pollution*

II. phénomène de pollution .....	26
II.1 Introduction .....	26
II.2 phénomène de pollution .....	26
II.2.1. Définition .....	26
II.2.2. Source de la pollution .....	27
II.2.2.1 pollution naturelle .....	27
II.2.2.1.1. pollution marine .....	27
II.2.2.1.2. pollution désertique .....	27
II.2.2.1.3. Autre type de Pollution naturelle .....	28
II.2.2.2 pollution industrielle .....	28
II.2.2.3 pollution mixte .....	29
II.2.3. Formation de couches polluantes sur les isolateurs .....	29
II.3 Méthodes d'essais sous pollution .....	29
II.3.1. Essais sous pollution naturelle .....	29
II.3.2. Essais sous pollution artificielle .....	30
II.3.2.1 Méthode de la couche solide .....	30
II.3.2.2 Méthode du brouillard salin .....	30
II.3.2.3 Méthode de pollution liquide .....	30

II.4 Conséquences de la pollution .....	31
• Arc non localisé .....	31
• Arc fixe .....	31
• Contournement des isolateurs .....	32
✚ Étape 1 : Dépôt de la pollution .....	32
✚ Etape 2 : Humidification de la pollution .....	33
✚ Etape 3 : Développement des zones sèches et apparition d'arcs .....	33
✚ Etape 4 : Comportement des arcs .....	34
II.5 Classifications de types de pollution .....	34
II.6 Techniques de lutte contre la pollution .....	36
II.6.1. Allongement de la ligne de fuite .....	36
II.6.2. Graissage et revêtement silicones .....	36
II.6.3. Lavage des isolateurs .....	37
• Elimination des sources de polluant .....	37
II.7 conclusion .....	37

### *Chapitre III. La Méthode des éléments finis*

III. La Méthode des éléments finis .....	38
III.1 Introduction .....	38
III.2 La méthode des Éléments Finis (M.E.F) .....	38
III.2.1. Principe .....	38
III.2.2. Etapes de la méthode des éléments finis .....	39
III.2.3. Approche de la MEF .....	39
III.2.4. Avantages de la M.E.F .....	39
III.2.5. Inconvénients de la M.E.F .....	40
III.3 Logiciel éléments finis FEMM .....	40
III.4 Les domaines d'application .....	42
III.4.1. Le maillage .....	42
• Nœuds et éléments .....	42

III.4.2. Discrétisation géométrique .....	43
III.5 Description du logiciel « COMSOL Multyphysics » .....	43
III.5.1. Méthodologie de conception avec COMSOL Multiphysics .....	43
III.5.2. Étapes de résolution dans COMSOL Multiphasic .....	44
III.5.2.1 Choix du modèle .....	44
III.5.2.2 Géométrie .....	44
III.5.3. Introduction des propriétés des domaines .....	45
III.5.3.1 Maillage des domaines .....	45
III.5.3.2 Résolution du problème .....	45
III.5.3.3 Analyse des résultats .....	45
III.5.4 Avantages de conception avec COMSOL Multiphysics : .....	45
III.6 Modélisation d'un isolateur .....	46
III.7 Conclusion .....	46
<i>Chapitre IV. Résultats et Interprétations</i>	
IV.1 Introduction .....	47
IV.2 Simulation .....	47
IV.3 Simulation du modèle réel par FEMM.....	48
IV.4 propriétés des matériaux.....	48
IV.5 Conditions aux limites.....	49
IV.6 Maillage .....	49
IV.7 Analyse des résultats de simulation par FEMM .....	49
IV.7.1. Etude du potentiel.....	49
IV.7.2. Etude du champ électrique .....	51
IV.9 Simulation du modèle réel par COMSOL .....	51
IV.9.1. Géométrie de l'isolateur utilisé .....	51
IV.9.2. Maillage .....	52
IV.10 Analyse des résultats de simulation par COMSOL .....	54
IV.10.1. Etude du potentiel .....	54

---

IV.10.1.1 Influence de la conductivité .....	54
IV.10.1.2 Influence du nombre d'éléments .....	57
IV.11 Distribution du champ électrique .....	58
IV.11.1 Influence du nombre d'éléments .....	61
IV.12 Comparaison entre FEMM et COMSOL.....	61
IV.13 Conclusion.....	63

## *Introduction générale*

La production, le transport et la distribution de l'énergie électrique forment la colonne vertébrale de l'économie d'un état industriel moderne. Avec la progression de l'industrialisation, naissent des exigences de plus en plus élevées concernant la mise à disposition de cette énergie.

Pour des raisons économiques, le transport et la distribution de l'énergie électrique s'effectuent généralement par des lignes aériennes. Leur fiabilité dépend donc considérablement du comportement mécanique, électrique et diélectrique des différents composants de ces lignes. Parmi ces composants, on note le rôle primordial que jouent les isolateurs. Leur choix est donc de la plus haute importance.[1]

Les isolateurs sont des éléments essentiels dans la conception d'une ligne aérienne. Leur rôle est de relier les conducteurs sous tension aux supports et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux parties constitutives de la ligne.

En effet, le choix du type d'isolateur, les contrôles de réception, la surveillance en exploitation doivent être faite avec un maximum de soin, pour assurer le bon fonctionnement ainsi la continuité de la ligne[2]

Le comportement des isolateurs pollués est un sujet d'intérêt croissant dans de nombreux pays. cet intérêt est lié au désir de choisir au mieux le matériau constituant l'isolateur, étant donné les nombreuses perturbations causées par la pollution [3].

La pollution des isolateurs qui constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie.

Ainsi, la connaissance du degré de pollution est une condition indispensable pour dimensionner convenablement l'isolation extérieure. En effet, l'accumulation des couches polluantes à la surface des isolateurs engendre une conductivité électrique superficielle. [ 4]

La résolution analytique des équations aux dérivées partielles qui régissent le calcul du champ électrique dans notre étude est pratiquement impossible. Par ailleurs, la discrétisation des ces équations est nécessaire pour transformer ces équations différentielles en un système d'équations algébriques. On distingue trois grandes méthodes de discrétisation :

- Méthode des éléments finis (MEF).
- Méthode des différences finies (MDF).
- Méthode des volumes finis (MVF).

Une simulation numérique est une approche qui offre aux chercheurs la possibilité d'analyser le comportement de plusieurs phénomènes qui, en raison de leur complexité, sortent du cadre du calcul classique. Par conséquent, il est important de modéliser les champs et les potentiels électriques lors de l'étude des caractéristiques et du comportement des isolateurs pollués. Pour cette raison, FEMM & COMSOL Multiphysics peut constituer un moyen puissant et interactif de résoudre des problèmes complexes à l'aide de la méthode des éléments finis.

Le présent travail porte sur l'étude de l'effet de la pollution et le phénomène de conduction surfacique sur les isolateurs, l'objectif principal de cette recherche était de calculer les distributions du potentiels et du champ électriques sur un modèle d'isolateur capot et tige type 1512L de haute tension artificiellement pollués, soumis à diverse paramètres tels que la conductivité de la couche polluante. Une étude par simulation du modèle réel, en utilisant le logiciel de calcul du champ bidimensionnel FEMM (Finite Element Magnetism Method), et pour d'obtenir des résultats rapide et précis on utilisant le logiciel commercial COMSOL Multiphysics, les deux logiciels utilisant la méthode des éléments finis, et pour cela on va faire une comparaison entre les deux logiciels.

Le présent travail exposera, dans le premier chapitre les isolateurs de haute tension, leurs différents types ainsi que les matériaux utilisés dans leur fabrication.

Nous entamons le premier chapitre par une présentation d'une synthèse bibliographique sur les isolateurs de haute tension.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique, Ainsi que les techniques de lutte contre ce phénomène.

Le troisième chapitre, nous présentons un aperçu général sur la méthode des éléments finis.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude, via les logiciels FEMM et COMSOL Multiphysics, de la distribution du potentiel et du champ électriques sur un, deux et trois éléments d'isolateurs 1512L de haute tension artificiellement pollués sous tension alternative.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre travail.



*Chapitre I*  
*Isolateurs de haute tension*

# I. Isolateurs de haute tension

## I.1 Introduction

L'isolateur est un élément important dans les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique, il doit présenter de bonnes qualités mécaniques et électriques de façon à remplir son rôle pendant toute sa durée de vie.

Dans ce chapitre, nous présentons les isolateurs de haute tension, leurs différents types et les matériaux utilisés dans la fabrication.

## I.2 Isolateur de haute tension

### I.2.1. Définition

Les isolateurs sont des éléments essentiels dans la conception des ouvrages haute tension.

L'isolateur est un matériau isolant solide que présente une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle. Il est utilisé pour isoler les conducteurs ou les pièces sous tension afin d'empêcher le court-circuit, les pertes de courant et les charges d'électrocution [5].

L'isolateur est formé par un isolant auquel sont fixés deux pièces métalliques M1 et M2.

**Isolant** : Verre, céramique, matériaux synthétiques.

**M1** se fixe au pylône ; **M2** porte le conducteur.

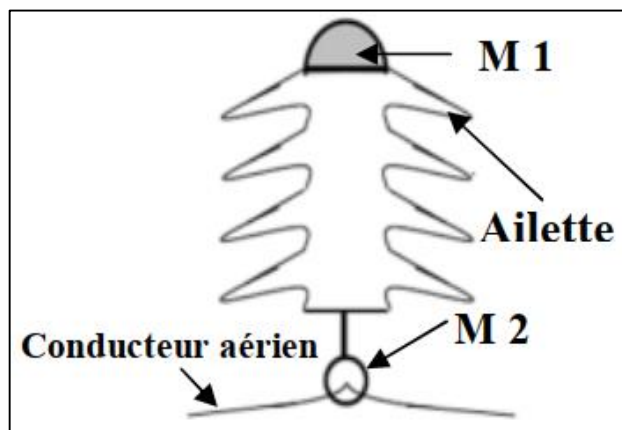


Figure I.1 forme d'un isolateur

Les isolateurs possèdent deux rôles :

Un rôle électrique : l'isolement électrique entre le conducteur (la ligne) et la masse (le pylône).

Les isolateurs sont utilisés en chaînes, leur nombre dépendant de la tension de la ligne.

Un rôle mécanique : la chaîne d'isolateurs doit être capable de résister aux efforts dus aux conducteurs. [1]

### I.2.2. Fonctionnement et constitution d'un isolateur

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique.

Leur importance est reliée directement au fait de :

- Réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes.
- Maintenir les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage).
- Assurer la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique).
- Raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles).
- Jouer le rôle d'une enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure). [1]

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement.

Du point de vue électrique, l'isolateur est considéré comme étant deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents, qui sont les suivants :

- L'intervalle d'air.
- Le matériau diélectrique.
- L'interface air-matériau diélectrique (la longueur de l'interface constitue la ligne de fuite ligne le long de laquelle circulerait le courant de fuite). [6]

### I.2.3. Caractéristiques d'un isolateur

Parmi les valeurs spécifiées dans les normes d'essais d'isolateurs, nous pouvons citer :

**Le pas P** : C'est la distance séparant deux parties homologues de deux isolateurs consécutifs dans une chaîne. La détermination de ce paramètre nous permet donc de connaître la longueur d'une chaîne ayant un nombre donné d'isolateurs.

**La ligne de fuite  $L_f$**  : C'est la plus courte distance, suivant les contours de la surface extérieure des parties isolantes, mesurée entre les parties métalliques.

**La ligne de contournement  $L_c$**  : C'est la distance la plus courte dans l'air entre deux parties conductrices. [4]

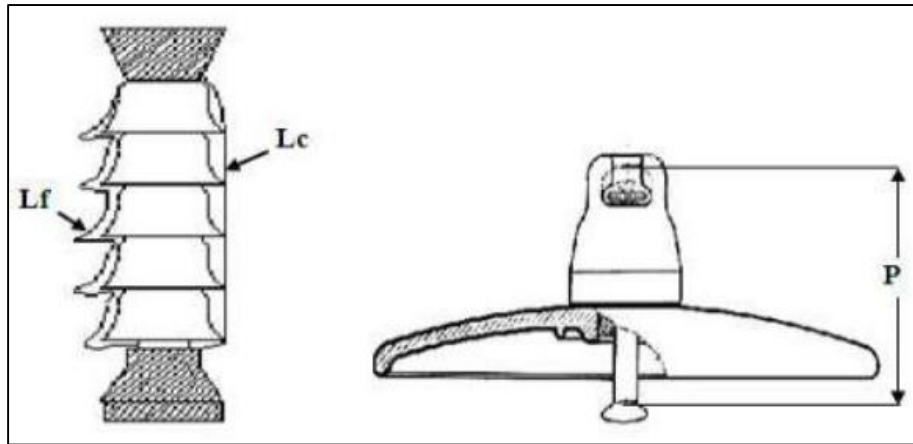


Figure I.2 Les caractéristiques d'un isolateur

### I.3 Différent types d'isolateurs

Les principaux types d'isolateurs sont :

#### I.3.1. Isolateurs rigides

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés les uns 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.
- 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. [7]



Figure 1.3 Isolateur rigide en verre

### I.3.2. 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'ancrage).

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

- Les isolateurs à capôt et tige.
- Les isolateurs à long fût. [8]

#### I.3.2.1 Isolateur long fut

Il est constitué d'un bâton cylindrique plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques muni d'ailettes.

A chaque extrémité il y a une pièce métallique pour les liaisons.

Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, soit elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (figure a), soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (figure b). [9]

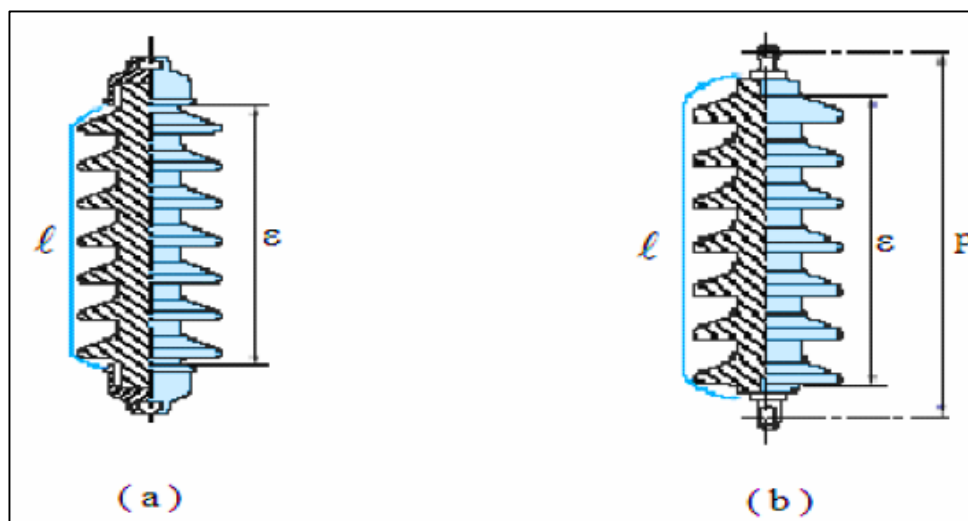


Figure I.4 Isolateur à long fût en porcelaine céramique

$l$ : Plus courte distance dans l'air, extérieure à l'isolateur.

$P$ : Pas nominal.

$\varepsilon$ : Longueur du canal de perforation  $\frac{l}{2} \ll \varepsilon$ .

### I.3.2.2 Isolateur capôt et tige

Élément de chaîne constitué d'un capôt, d'une partie isolante en forme de jupe et d'une tige. [10]

La coupe d'un tel isolateur est schématisée sur la (Figure I.5). La forme de la tête est dessinée de sorte que les efforts de traction appliqués à l'isolateur se transforment, autant que possible, en compression des diélectriques sur lesquels apparaissent, toutefois, inévitablement certaines contraintes de cisaillement. [3]

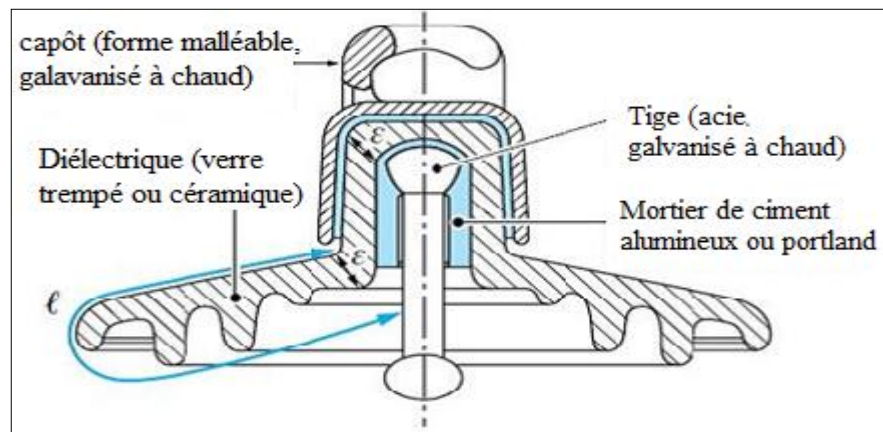


Figure I.5 Vue en coupe d'un isolateur capôt et tige

#### I.3.2.2.1. Différents profils des isolateurs

On peut trouver plusieurs profils d'isolateurs capôt et tige et ceci pour un meilleur fonctionnement.

##### a. Profil standard

Ce sont les plus communs et les plus utilisés sur les lignes installées dans les zones de faible pollution [10]. La faible profondeur, l'espacement entre les anneaux et la ligne de fuite moyenne permet l'utilisation de ce profil dans une zone de pollution modérée. [12]



Figure I.6 Isolateur capôt et tige de profil standard

**b. Profil anti-brouillard**

Nous présentant deux types, au forme déférentes A et B. ils sont recommandés pour les zones de moyenne et forte pollution.

**▪ Forme A**

L'est de conception avec un diamètre plus grand que le type de profil standard muni de deux ou trois rainures à grande profondeur.

Cette conception permet également un lavage manuel facile nécessaire et empêche le claquage entre rainures voisines quand il y a une pollution sévère et tout le profil intérieur simplifie la maintenance [4].



**Figure I.7 Profil antibrouillard (forme A)**

**▪ Forme B**

Dans cette conception, l'épaisseur de la rainure extérieure agit comme une barrière contre l'action du brouillard et le dépôt des sels minéraux sur la surface de l'isolateur, empêchant alors la formation d'un électrolyte conducteur sur la surface.

Ce type d'isolateur est efficace dans les zones côtières [7].

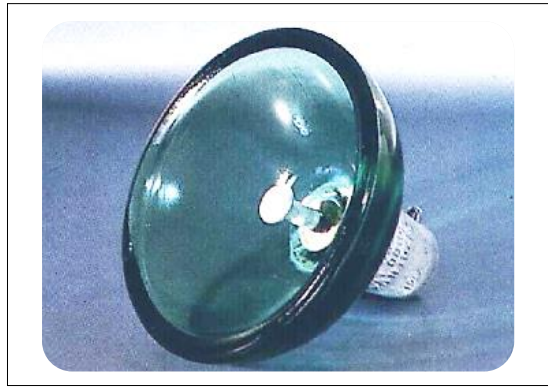


**Figure I.8 Profil antibrouillard (forme B)**

**c. Profil sphérique**

L'absence de nervures sur la pièce de verre rend difficile le dépôt de particules sur la surface du diélectrique, tout en facilitant le nettoyage par le vent et la pluie.

De plus, sa forme sphérique le rend plus résistant au vandalisme [11].



**Figure I.9 Profil sphérique**

**d. Profil plat**

L'élimination complète des rainures internes réduit l'accumulation des agents polluants sur la surface basse, grâce au courant d'air, cette conception est particulièrement efficace dans les zones désertiques ou l'auto lavage est peu fréquent par la pluie (Figure I.10). [7]



**Figure I.10 Profil plat**

## **I.4 choix des isolateurs**

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.

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

Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident :

- La sévérité de la pollution d'un site peut changer.
- L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste.
- La construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique. Exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation [13].

## I.5 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs

Un isolateur est constitué en général de deux parties : une partie isolante et des pièces métalliques de liaison, scellées sur cette partie isolante, Jusqu'aux années quatre-vingt, seuls le verre et la céramique ont justifié d'un bon comportement en exploitation, bien que ces deux matériaux soient, par essence, des matériaux fragiles [9].

On trouve plusieurs isolants solide pour a fabrication des isolateurs de haute tension :

### I.5.1. Céramique

Le développement et la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances.

Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il y 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. [8]



Figure I.11 isolateur en céramique

### I.5.2. Verres

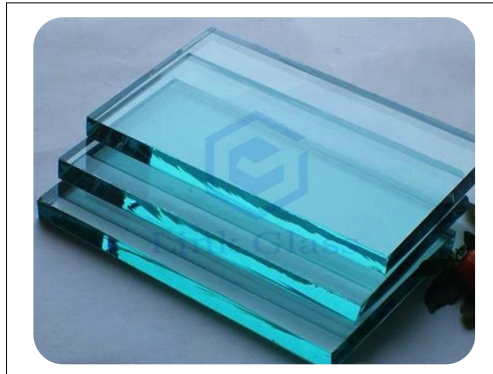
En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présentent le verre, le bas prix et l'observation des défauts est très facile.

On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit [8].

#### I.5.2.1 Le verres recuit

Le verre recuit a surtout été utilisé pour les isolateurs rigides. Malheureusement, on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de température.

De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension. [3]



**Figure I.12 Verre recuit**

### **I.5.2.2 Le verre trempé**

Résistance mécanique et thermique supérieure au verre renforcé à la chaleur. Environ quatre à cinq fois plus résistant à l'impact qu'un verre non trempé régulier, lors d'un bris, le verre trempé va éclater en fines rondelles réduisant ainsi le risque de blessures des gens aux alentours.

Le verre trempé libère beaucoup d'énergie lors de l'impact et il va généralement tomber en fins morceaux. Le verre trempé est considéré comme un verre de sécurité. [14]

Le verre trempé résiste à des différences de températures que peuvent aller jusqu'à 200° C (60°C pour un verre non trempé). [15]



**Figure I.13 Isolateur en verre trempé**

### **I.5.3. Matériaux synthétiques**

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère.

Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique (Figure I.14).

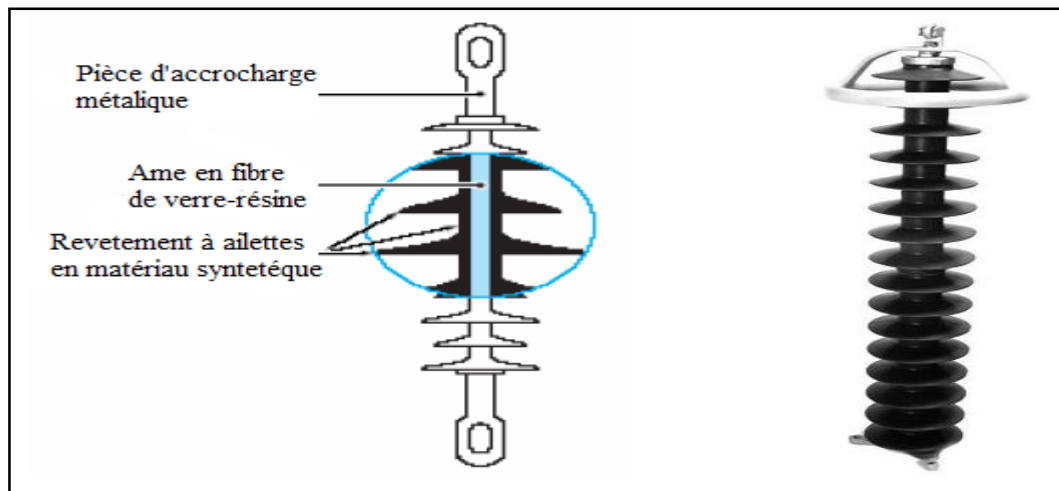


Figure I.14 Isolateur composite

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères (Figure1).

L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécaniques, atmosphériques...) figure 2. [2]

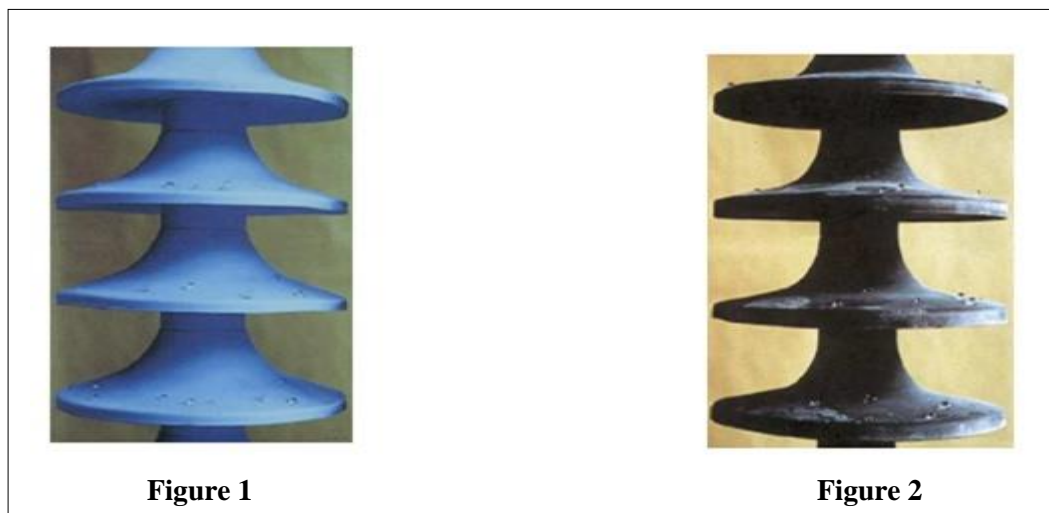


Figure I.15 Inconvénient des matériaux

## I.6 Défauts des isolateurs

Les isolateurs composites des générations précédentes ont présenté comme principaux problèmes l'érosion, l'acheminement, la décharge de couronne...etc.

Ces problèmes ont été éliminés par le bon choix des matériaux et le développement de nouvelles techniques de fabrication. L'inconvénient des isolateurs composites est la difficulté d'identifier l'isolateur défectueux de l'isolateur sain, d'où la nécessité de développer une méthode de diagnostic pour différencier entre un isolateur défectueux et un isolateur sain [9].

On peut distinguer deux types de défauts : défauts électriques et défauts mécaniques. Ces deux types de défauts sont mutuellement dépendants.

### **I.6.1. Défauts électriques**

Le vieillissement des isolateurs est causé par les conditions climatiques auxquelles l'isolateur est exposé ainsi que son profil.

Un profil qui permet l'accumulation des agents polluants favorise l'apparition des décharges locales menant à l'érosion et par la suite au cheminement.

L'effet de couronne est considéré comme agent principal de vieillissement des Isolateurs.

Cet effet se caractérise par la réduction de l'hydrophobie, la décoloration de la surface de l'isolateur ainsi que l'érosion sous l'effet des gaz de décharge.

Les gouttelettes d'eau sur la surface de l'isolateur affectent la distribution du champ sur cette surface (la permittivité relative de l'eau est élevée ce qui augmente l'intensité du champ aux voisinages des gouttelettes), les gouttelettes se déforment dans la direction du champ.

Un excellent isolateur est caractérisé par son hydrophobicité, cette hydrophobie peut être perdue suite à l'accumulation des agents polluants sur la surface de l'isolant, ou même après avoir subi des chocs électriques (arcs locaux) ; certains isolateurs peuvent réacquérir leurs états hydrophobes après immigration des molécules de faible poids (Low Molar Weight) du centre de l'objet jusqu'à la surface [9].

Le mouillage de la surface favorise l'apparition de l'effet couronne dans les régions de forte intensité de champ, d'où la perte locale de l'hydrophobie ; une quantité de pollution se dissout et forme une couche plus ou moins conductrice, par conséquent une nouvelle distribution du champ s'établit.

Ce processus se poursuit et le chemin conducteur mouillé se développe à travers l'isolateur, par la suite le courant circulant à travers ce chemin cause l'assèchement des régions à forte densité de courant ce qui conduit au développement d'un arc local ; celui-ci provoque d'avantage de perte d'hydrophobie, d'érosion de surface et augmente l'amplitude du courant de fuite.

Dans le cas d'un isolateur en polymère, le séchage de sa surface lui permet de réacquérir ses propriétés hydrophobes.

Dans le cas des isolateurs en verre ou en porcelaine, le mécanisme de décharge est différent de celui des isolateurs en polymère, le mouillage de la pollution accumulée sur la surface des isolateurs en verre ou en porcelaine conduit à l'apparition d'un film d'eau continu, donc l'arc peut se développer directement.

Le séchage de la partie restante et l'élongation de l'arc causent le contournement de l'isolateur. Les premières étapes sont similaires à celles des SIR. De plus, la couche de pollution développée est souvent mince, ce qui limite l'intensité du courant de fuite et par la suite, la tension de contournement augmente [9].

### **I.6.2. Défauts mécaniques**

Les défauts mécaniques d'un isolateur peuvent mener à des conséquences fatales. Dans le cas des isolateurs en SIR, la plupart des défauts sont d'ordre mécanique.

### **I.6.3. Défauts dus à la manipulation**

Les isolateurs en porcelaine peuvent être endommagés facilement mais le taux de tels endommagements est toujours faible.

Les isolateurs composites ne sont pas fragiles mais marquent un taux relativement élevé d'endommagements.

En effet, un nombre d'endommagements plus ou moins important a été constaté dû des manœuvres durant le transport et l'installation. Pour prendre en charge ces problèmes, le groupe CIGRE (Conférence International des Grands Réseaux Electriques) prépara un guide de manipulation qui contient des recommandations relatives aux méthodes de manipulation de ce type d'isolateurs, en commençant de l'endroit de fabrication jusqu'à sa mise sous tension [9].

## **I.7 Vieillessement des isolateurs**

Le vieillissement est caractérisé surtout par une dégradation des propriétés électriques, mécaniques ou chimiques (par exemple : augmentation des pertes diélectriques, diminution de la résistivité ou de l'hydrophobicité).

Soumis à différentes contraintes durant l'exploitation, les isolants vieillissent. Et selon le type de réaction produite sur le matériau composite, on distingue plusieurs types de vieillissement dont les principaux sont :

Le vieillissement thermique provoqué par l'action de longue durée de hautes températures, sur le diélectrique.

- Le vieillissement électrochimique engendré par certains processus dont la cause est le phénomène d'électrolyse ayant lieu dans le diélectrique.
- Le vieillissement électrique (ionisation - décharges partielles) résultant des décharges à la surface et dans les cavités surtout gazeuses enfermées dans les diélectriques. [16]

### **I.7.1. Vieillessement thermique**

Le vieillissement thermique dépend de la structure du diélectrique. La dégradation du matériau est activée par la présence d'oxygène. Les principaux processus de vieillissement thermique sont :

- La rupture des chaînes multimoléculaires, accompagnée par une dégradation des propriétés électriques et mécaniques,
- Le dégagement de gaz à faible poids moléculaire,
- L'oxydation conduisant à l'apparition d'acides carboxyliques. [16]

### **I.7.2. Vieillessement Electrochimique**

Lors du processus de vieillissement électrochimique, la température du diélectrique augmente.

Cette augmentation engendre non seulement une augmentation de la conductivité du matériau mais aussi une activation des réactions chimiques qui sont la cause du vieillissement. [16]

### **I.7.3. Vieillessement Electrique**

Le vieillissement électrique est caractérisé par une dégradation des propriétés diélectriques du matériau, sous l'action prolongée d'une contrainte électrique (champ électrique) relativement élevée.

Il est caractérisé par l'augmentation des pertes diélectriques et une diminution de la résistivité transversale du matériau. [16]

## **I.8 Conclusion**

Nous avons vu dans ce chapitre l'intérêt des isolateurs de haute tension dans les réseaux électrique et leurs types qui dépendent à l'utilisation.

Les isolateurs sont des éléments essentiels dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service. Ils les mieux adaptées environnement donné sont ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

Dans le deuxième chapitre nous allons présenter le phénomène de pollution ainsi leurs conséquences sur les ouvrages de haute tension.



*Chapitre II*  
*Phénomène de pollution*

## II. phénomène de pollution

### II.1 Introduction

Le phénomène de pollution des lignes aériennes est un sujet d'étude d'une importance primordiale.

La pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de haute tension, elle constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie.

En effet, et suite à l'interaction entre l'air transportant des grains de poussières et l'isolateur, une couche étrangère se dépose sur les surfaces de celui-ci. Une fois cette couche est humidifiée, la tension de tenue des isolateurs peut diminuer considérablement à cause des dépôts polluants recouvrant leurs surfaces, cela est dû à plusieurs facteurs dont les plus importants sont le profil de l'isolateur et la nature de l'agent polluant.

Le présent chapitre porte sur l'étude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des isolateurs sous pollution. Ce chapitre est consacré à l'étude des phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique. Les principaux paramètres associés ainsi les moyens de lutte contre ce phénomène, y sont également présentés.

### II.2 phénomène de pollution

Un isolateur placé à l'extérieur est exposé aux différents agents constituant l'atmosphère qui le contamine. Cette contamination d'un dépôt de pollution à sa surface. Son importance dépend de :

- La géométrie et la position de l'isolateur.
- Les conditions du milieu.
- La durée d'exposition de l'isolateur.

Cette pollution est généralement constituée de matières solubles et insolubles :

- ✚ Matières solubles : Elles sont composées essentiellement de sels ioniques.
- ✚ Matières insolubles : caractérisées par leur faible conductivité sont de nature minérale inorganique solide. [12]

#### II.2.1. Définition

La pollution est un phénomène qui agit négativement sur le comportement des isolateurs haute tension.

Selon l'emplacement et les zones environnantes, les isolateurs rencontrent différents types de polluants : les grains de sable dans les régions désertiques et les zones minières, des

substances métalliques et chimiques dans les zones industrielles et agricoles, et les particules de sel dans les régions côtières.

Elle est un paramètre important à prendre en considération lors du choix et du dimensionnement des isolateurs ou chaînes d'isolateurs. En effet, la pollution provoque la formation d'une couche sur la surface des isolateurs.

Ces couches de pollution, quand elles sont humidifiées, réduisent considérablement la résistivité surfacique des isolateurs ce qui conduit à la diminution de leur tenue diélectrique.

Notons que dans la pratique, cette couche de pollution n'est pas homogène et sa distribution n'est pas uniforme. La non-homogénéité est due à la présence de différents agents polluants dans une même région, et la non-uniformité de la répartition sur les surfaces des isolateurs est due aux profils des isolateurs, le sens et la direction des vents dans cette région, la pluie, la position de la chaîne d'isolateurs par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), la position de l'isolateur dans la chaîne, le degré de pollution du site où se trouvent les isolateurs ainsi que la surface inférieure ou supérieure de l'isolateur. [16]

## **II.2.2. Source de la pollution**

Les isolateurs sont exposés à différents types de pollution, selon leurs situations géographiques : pollution naturelle : "pollution marine et désertique", industrielle et mixte ou en présence de glace dans les régions froides ...).

### **II.2.2.1 pollution naturelle**

Elle dépend du climat et des facteurs météorologiques des régions. Elle est constituée de dépôts de poussières véhiculées par les vents tels que : sable, embruns marins,.... Ces dépôts, et selon leur nature, [17] se présentent comme suit :

#### **II.2.2.1.1. pollution marine**

Les lignes de haute tension qui passent près de la mer dans les zones côtières sont exposées au vent qui vient de la mer et qui porte des embruns causant la formation d'une couche polluante de sel sur les surfaces des isolateurs. Cette couche peut devenir conductrice lorsqu'elle est humidifiée ou mouillée ce qui conduit à la circulation d'un courant de fuite et par suite, la génération d'arcs électriques ou même la génération d'un contournement. [2]

#### **II.2.2.1.2. pollution désertique**

Dans quelque zone, les isolateurs des lignes électriques sont sujets souvent au dépôt des substances de contaminants des déserts. Ceci peut causer une réduction sérieuse de l'efficacité de l'isolateur, ayant en conséquence. L'étincelle de rupture et le manque d'approvisionnement en l'électricité. Également les tempêtes du sable doivent être maintenues dans l'esprit.

Le type des conditions environnementales affecteront considérablement aux isolateurs. Les éléments prédominants dans ce type de la pollution sont :

- Le sable et la poussière répandue et salée dans une atmosphère sèche.
- Le climat de désert est caractérisé pour les tempêtes de sable et les ouragans qui contiennent les particules qui se déplacent à une grande vitesse. Ces particules heurtent sur la surface de l'isolateur causant l'érosion matérielle.
- Les tempêtes du sable sont un facteur important qui cause une diminution de fiabilité dans les lignes électriques. [18]

### **II.2.2.1.3. Autre type de Pollution naturelle**

La pluie est un phénomène naturel. Dans certaines conditions de pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne d'isolateur. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut conduire au contournement ; c'est le contournement sous pluie. [17]

### **II.2.2.2 pollution industrielle**

Les personnes dans leur travail quotidien produisent de la fumée, la poussière ou particules qui sont en suspension dans le ciel.

Ces particules principalement par l'action du vent répartissent les zones où les lignes électriques existent.

La pollution industrielle des isolateurs apparaît avec développement d'industries et par les contaminants produit et expulsé à l'atmosphère, étant possible types divers : métallurgique, produits chimiques, la poussière, fumée, ciment...

Ces substances arrangeront pour l'action du vent, poids, champs électriques..., sur les isolateurs créant à couche de contaminant. Cette couche arrangée sur les isolateurs est formé lentement au cours d'une période qui peut durer des mois ou années. Au cours de cette période alternera des époques sèches avec époques humides.

La manière la plus directe d'établir le comportement de l'isolateur pendant ce type de pollution est de commander comportement de l'amplitude du courant de fuite avec du temps de respect, ou la charge du courant de fuite accumulé au cours d'une certaine période. [18]

### **II.2.2.3 pollution mixte**

Ce type de pollution est le plus dangereux, C'est une combinaison entre la pollution naturelle et industrielle. Par exemple une usine industrielle au bord de la mer.

### **II.2.3. Formation de couches polluantes sur les isolateurs**

La disposition des isolateurs dans les lignes forme un obstacle à l'écoulement d'un air transportant de la poussière.

Une couche de pollution se développe progressivement sur la surface de ceux-ci. De nombreuses observations ont montré que la répartition de la pollution le long des isolateurs est non-uniforme.

La disposition de la pollution dépend de la position de la chaîne (verticale, horizontale ou inclinée), et le profil de l'isolateur.

Généralement, la pollution se concentre sur les éléments de la chaîne situés du côté du conducteur de haute tension et dans les parties protégées contre les facteurs d'auto-nettoyage. [19]

### **II.3 Méthodes d'essais sous pollution**

Pour comparer les performances de divers types d'isolateurs et sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution, il est nécessaire de les soumettre à des essais. Ces derniers peuvent être effectués dans les conditions naturelles (sur site) ou au laboratoire.

On distingue deux catégories de recherches sur les isolateurs pollués : les essais sous pollution naturelle et les essais sous pollution artificielle.

#### **II.3.1. Essais sous pollution naturelle**

Ils consistent à installer, dans les différents sites pollués, des stations dans lesquelles on observe le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs de longueurs ou de profils différents. Les qualités respectives de ces isolateurs, placés sous la même tension, sont appréciées en fonction des temps au contournement.

On peut classer les isolateurs en distinguant ceux qui ont contourné de ceux qui ont tenu, durant deux ou trois ans d'exposition, par exemple.

Ces essais ont l'avantage de tenir compte de l'effet de toutes les contraintes, dans toutes leurs complexités sur un site donné.

L'inconvénient majeur de ces essais est qu'ils nécessitent plusieurs années, pour pouvoir étudier valablement les performances des isolateurs.

#### **II.3.2. Essais sous pollution artificielle**

Ils consistent à reproduire en laboratoire les conditions de la pollution naturelle. Ils sont aujourd'hui largement utilisés et ont l'avantage d'être rapides.

Les méthodes d'essais qui demeurent actuellement normalisées sont les méthodes de la couche solide, la méthode du brouillard salin et la méthode de la pollution liquide.

### **II.3.2.1 Méthode de la couche solide**

Dans ces méthodes, la surface isolante est recouverte par pulvérisation d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte. La conductivité de cette suspension est réglée par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium.

Si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérité est défini par la densité de dépôt de sel en  $\text{mg}/\text{cm}^2$ .

Par ailleurs, si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini par la conductivité de la couche polluante.

Certains chercheurs ont utilisé une couche semi-conductrice comme agent polluant.[17]

### **II.3.2.2 Méthode du brouillard salin**

La solution saline utilisée dans la méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière insoluble.

Dans cette méthode, l'isolateur soumis à la tension d'essai, est placée dans un brouillard salin dont le taux de salinité définit la sévérité.

D'après la classification des sites pollués, les valeurs de salinités appliquées sont choisies selon une progression allant de 2.5 à 160  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

### **II.3.2.3 Méthode de pollution liquide**

Cette méthode s'apparente à la méthode du brouillard propre dans la mesure où un mélange liquide est appliqué sur l'isolateur avant l'essai.

Cependant, dans ce cas la pollution n'est pas séchée avant l'essai. Elle est constituée d'eau, de craie et de méthyl cellulose ou de kaolin.

Comme pour la méthode de la couche solide la conductivité est ajustée par addition de chlorure de sodium. [17]

## **II.4 Conséquences de la pollution**

Lorsque l'isolateur est propre ou recouvert d'une couche de pollution sèche, la résistivité à la surface est très grande et le courant capacitif circulant à la surface est très faible.

Par contre, et quelle que soit sa nature, le dépôt de pollution accumulé à la surface de l'isolateur provoque, en présence de l'humidité, la formation d'une couche électrolytique augmentant ainsi la conductivité superficielle.

Cette couche devient, par la suite, le siège d'un courant de conduction de valeur relativement importante.

Ce qui peut conduire à la formation et au développement d'arcs électriques le long de la surface de l'isolateur. [17]

Selon les conditions auxquelles est soumis l'isolateur, trois cas peuvent se présenter :

- **Arc non localisé**

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçe à un autre endroit et ainsi de suite. Ces arcs peuvent être dus soit à la formation d'une zone sèche à la suite du passage d'un courant de fuite, comme ils peuvent être dus à l'état de surface de l'isolateur, (l'existence des pics sur la couche de pollution). [2]

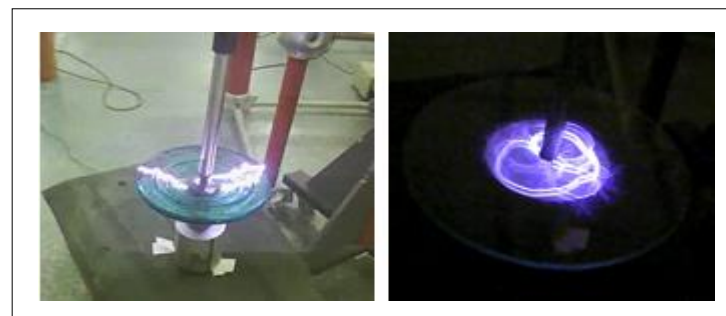


**Figure II.1 Initialisation des arcs électriques**

- **Arc fixe**

L'arc électrique se fixe sur la surface de l'isolateur, soit en s'y maintenant (courant continu) soit, en se réamorçant au même endroit (courant alternatif).

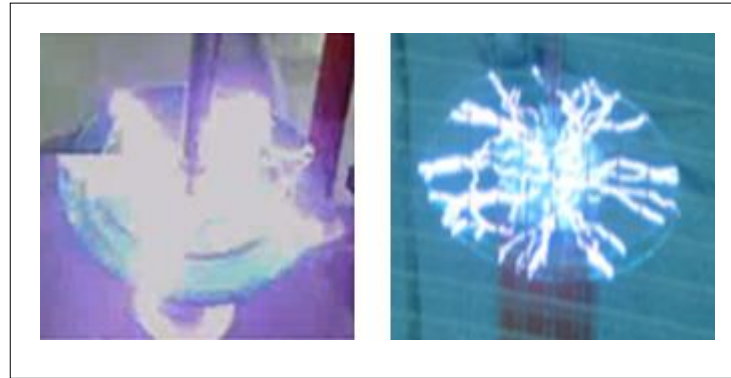
Cet arc peut entraîner par effet thermique une dégradation du support isolant de l'élément défaillant. [19]



**Figure II.2 Evolution des arcs électriques**

- **Contournement des isolateurs**

Généralement, les principaux phénomènes conduisant au contournement d'un isolateur pollué, soumis à la tension de service, comprenant la formation d'une couche électrolytique conductrice par humidification du dépôt de pollution sur la surface de l'isolateur, ce qui entraîne l'apparition d'un courant de fuite accompagné de la formation d'une bande sèche et d'arcs partiels, et la propagation de l'arc qui peut couvrir tout l'isolateur.[19]



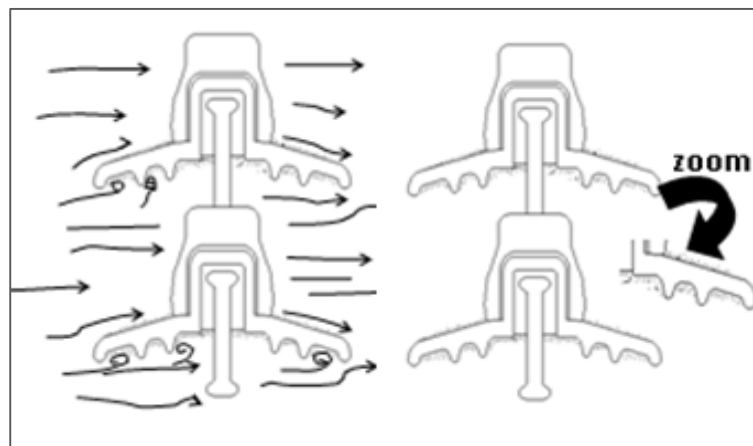
**Figure II.3 Contournement total**

Le contournement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en quatre étapes distinctes.

#### ✚ **Étape 1 : Dépôt de la pollution**

Les particules du dépôt sont apportées par le vent et se concentrent entre les nervures ou autour du capot. Les facteurs d'accumulation sont les suivants :

- La nature, le poids et la taille des particules polluantes.
- La distance de l'isolateur par rapport à la source de pollution et par rapport au sol d'où peut provenir des poussières.
- La vitesse du vent.
- L'orientation de la chaîne. La forme de l'isolateur et son aptitude à l'auto nettoyage par les forts pluies et vents. [20]

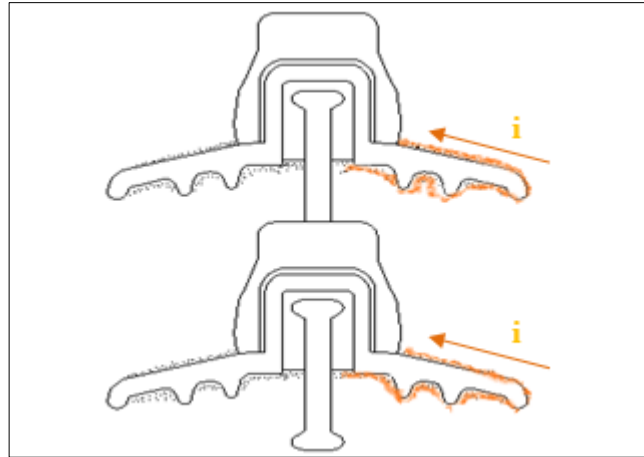


**Figure II.4 Dépôt et évolution de l'agent polluant**

#### ✚ **Étape 2 : Humidification de la pollution**

Le brouillard et la pluie fine humidifient la couche polluante, provoquant la dissolution des sels contenus dans le dépôt et créant un électrolyte conducteur sur la surface de l'isolateur. Un courant de fuite prend naissance.

Pendant le cycle d'humidification, le courant de fuite augmente jusqu'à une valeur maximale, mais diminue s'il y a assèchement. Le niveau du courant de fuite dépend du temps, de la nature et de la quantité des sels. [19]



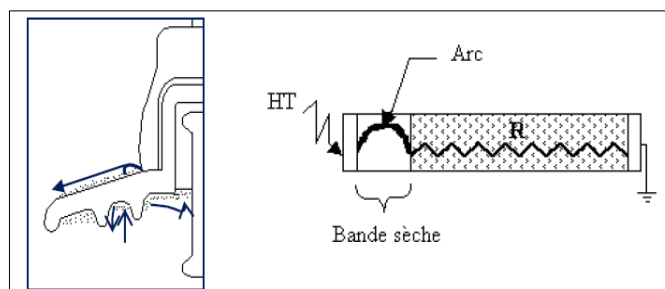
**Figure II.5 Humidification du dépôt polluant et création d'un courant de fuite**

### ✚ Etape 3 : Développement des zones sèches et apparition d'arcs

La densité du courant de fuite est beaucoup plus importante près des ferrures de l'isolateur. Par effet Joule, la température s'élève, l'eau s'évapore et le dépôt devient moins conducteur. Le courant est alors très réduit en amplitude par la présence d'une «bande sèche».

La répartition de potentiel sur l'isolateur est modifiée par cette bande sèche, car la plus grande portion du potentiel électrique se trouve reportée aux bornes de cette bande sèche.

Si la largeur de cette dernière est insuffisante pour supporter le potentiel correspondant, un arc se crée (Figure II.6). [21]



**Figure II.6 Arc et bande**

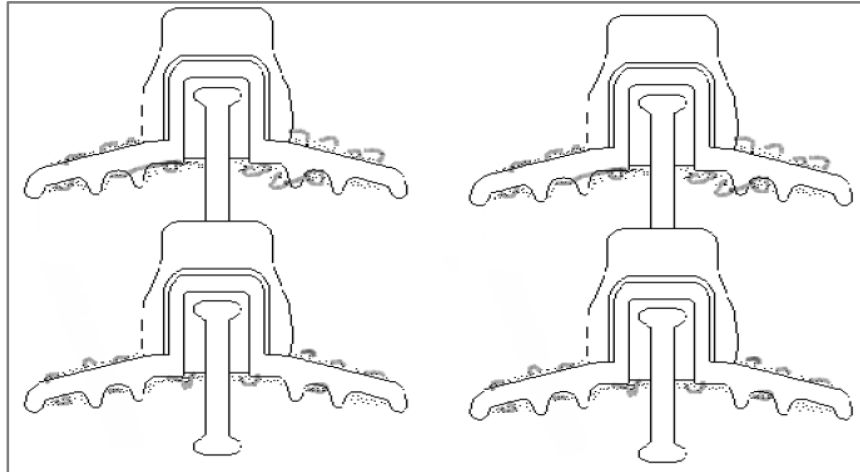
### ✚ Etape 4 : Comportement des arcs

La résistance du dépôt humidifié  $R$ , en série avec l'arc, limite le courant et la longueur de l'arc (Figure II.7).

Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra, la bande sèche s'humidifiera à nouveau et le mécanisme se répétera encore.

Tant que le courant de fuite n'excède pas ce que l'on appelle « courant critique » correspondant à une « longueur critique » de l'arc, cette situation reste stable (Figure II.7).

Dans le cas contraire, le contournement de l'isolateur peut survenir.



**Figure II.7 Régime d'arcs sous pollution**

## II.5 Classifications de types 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 classifier quantitativement et qualitativement.

La composition de cette pollution est variable suivant les sources de contamination et les conditions auxquels sont soumis les isolateurs. La norme CET 815 donne le classement de la pollution suivant son origine (Tableau II.1).

Essentiellement, les types de pollution qui existent sont : la pollution naturelle, la pollution industrielle et la pollution mixte.

### **Faible (2.5 g/l)**

- Zones sans industries et avec faible densité d'habitation équipées d'installation de chauffage
- Zones avec faible densité d'industries ou d'habitations mais soumise fréquemment aux vents et/ou pluies.
- Régions agricoles.
- Régions montagneuses.

<b>Moyenne (10 g/l)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ou avec une densité moyenne d'habitation équipée d'installation de chauffage.</li> <li>• Zones à forte densité d'habitation et/ou d'industries mais soumises fréquemment à des chutes de pluies.</li> <li>• Zones exposées aux vents de mer, mais trop proches de la cote.</li> </ul>
<b>Fort (80 g/l)</b>	<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>
<b>forte (160 g/l)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zones généralement peu étendues, soumises à des fumées industrielles produisant des poussières conductrices.</li> <li>• Zones généralement peu étendues, très proches de la cote et exposées aux embruns ou au vent fort et polluant venant de la mer.</li> <li>• Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant de sable et du sel soumis à une condensation régulière.</li> </ul>

**Tableau II.1 Classement de degré de pollution**

Le phénomène de pollution des isolateurs des lignes aériennes constitue un sujet d'étude d'une importance essentielle.

Cela provient du fait que la pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de haute tension.

En effet, et suite à l'interaction entre, l'air transportant des grains de poussières et l'isolateur, une couche étrangère se dépose sur les surfaces de celui-ci.

Une fois cette couche humidifiée, la tension de tenue peut diminuer considérablement, provoquant des incidents très graves [22].

## **II.6 Techniques de lutte contre la pollution**

Pour éviter l'effet de la pollution sur les isolateurs à soyez trois solutions de rechange :

- Election correcte du type d'isolateur, entretien des isolateurs et de l'élimination de la source de pollution.
- L'effet de la pollution dépendra de la région et dessus.
- L'efficacité des plans d'entretien et de la correcte élection du type d'isolateur. [23]

Parmi les techniques de lutte contre la pollution des isolateurs nous citons :

### **II.6.1. Allongement de la ligne de fuite**

Cette méthode permet d'adapter le dimensionnement de l'isolation aux nouvelles conditions de pollution, en utilisant, par exemple, des prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères collés sur la surface des isolateurs existants. [23]

### **II.6.2. Graissage et revêtement silicones**

Cette technique couramment utilisée sur les isolateurs de postes consiste en l'application sur la surface des isolateurs, de graisses siliconées qui, en plus de leur caractère hydrophobe, ont la propriété d'absorber les poussières.

En effet, l'huile exsudée enrobe chaque grain de poussière, ce processus est plus ou moins lent selon la composition de la graisse.

Cette propriété permet à la graisse de conserver ses propriétés initiales, à savoir une grande résistance superficielle, ceci tant que la saturation n'est pas atteinte d'une part et d'autre part tant que la graisse n'a pas subi une importante altération par les rayons UV auxquels elle est très sensible.

Cette altération se traduit par un durcissement qui peut ralentir ou stopper le phénomène d'exsudation et par conséquent annihiler la faculté de piégeage des poussières.

L'isolateur se comporte alors comme un isolateur pollué et la graisse doit être renouvelée. [23]

### **II.6.3. Lavage des isolateurs**

Le lavage peut avoir lieu lorsque l'installation est hors ou sous tension. Dans ce dernier cas, des précautions doivent être prises pour éviter que le contournement ne se produise pendant le lavage.

Le nettoyage des isolateurs est effectué à l'aide d'un abrasif pulvérisé sous pression. Elle permet le nettoyage d'isolateurs recouverts de pollution très adhérente telle que le ciment et peut aussi être utilisée pour dégraisser les isolateurs. [23]

- **Elimination des sources de polluant**

Généralement, la recherche a été orientée sur méthodes de réduction de pollution.

Elle est des eaux fait cela l'élimination de la source du contaminant est seulement possible quand le type de contaminant est industriel, en raison de la difficulté pour éliminer l'autre contaminant sources, telles que le désert, mer... [18].

## **II.7 conclusion**

Les principales conclusions que l'on tire de cette synthèse sont :

- La pollution reste un facteur déterminant pour le dimensionnement des isolateurs dans les ouvrages de haute tension.
- La méthode d'essai sous pollution artificielle est largement utilisée. Elle consiste à reproduire au laboratoire les conditions de la pollution naturelle, ainsi qu'elle possède l'avantage d'être rapide.
- Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (graissage, lavage, nouveaux types d'isolateurs, revêtements hydrophobes...), permettent de disposer aujourd'hui de solutions curatives à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants sur le réseau.
- Dans ce qui suit, nous présentons la méthode des éléments finis, largement utilisé pour le calcul du champ et potentiel électriques.

A graduation cap (mortarboard) with a red tassel and a rolled-up diploma tied with a red ribbon are positioned in the background. The cap is dark grey and the diploma is cream-colored.

*Chapitre III*  
*La méthode des éléments finis*

## III. La Méthode des éléments finis

### III.1 Introduction

La méthode des éléments finis a pris un essor considérable avec l'avènement des moyens informatiques.

Dès les années 1960, elle est devenue, par sa souplesse d'emploi et sa très grande généralité, une méthode numérique indispensable pour la résolution des problèmes aux dérivées partielles en électromagnétisme basse fréquence.

Enfin, les logiciels évoluent aujourd'hui dans le sens d'une meilleure intégration au sein du processus de conception des dispositifs ; c'est ainsi que des travaux significatifs sur l'utilisation des méthodes d'optimisation par simulation numérique ont été effectués, actuellement, il existe différents logiciels qui utilisent cette méthode comme le Femlab, Maxwell, Flux2D et **FEMM**, **COMSOL**, et nous terminerons ce chapitre par la présentation des logicielles (FEMM et COMSOL).

### III.2 La méthode des Éléments Finis (M.E.F)

La méthode des éléments finis a connus un essor considérable ces vingt dernières années [24].

Elle est devenue, par sa souplesse d'emploi et sa très grande généralité, une méthode numérique indispensable pour la résolution des problèmes aux dérivées partielles. [13]

La MEF est une méthode générale qui s'applique à la majorité des problèmes rencontrés dans la pratique : problèmes stationnaires ou non stationnaires, linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine géométrique quelconque à une, deux ou trois dimensions. En plus, elle s'adapte bien aux milieux hétérogènes. [25]

Dans beaucoup de domaines, elle est la plus utilisée de nos jours. [26]

#### III.2.1. Principe

La méthode des éléments finis, outil numérique très puissant, est très utilisé dans la résolution des problèmes à domaine spatial fini [3].

Le principe de cette méthode consiste à diviser le domaine d'étude en plusieurs éléments finis (appelé maillage).

C'est une étape très importante puisque le choix de la forme de l'élément de maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus. Il est donc nécessaire de trouver la forme et le degré d'approximation de celui-ci qui soient les plus adaptés à la géométrie du domaine d'étude.

Il existe un grand nombre de formes géométriques pour les éléments de maillage tels que :

1. des triangles, des rectangles, des quadrilatères arbitraires pour les problèmes à deux dimensions.
  2. des tétraèdres, des hexaèdres, des cubes, des prismes pour des problèmes à trois dimensions.
- [27]

### III.2.2. Etapes de la méthode des éléments finis

Pour une analyse par éléments finis, tout un travail de préparation et de finalisation doit être effectué, c'est ce que nous décrivons dans les étapes suivantes :

1. L'équation différentielle.
2. L'équation différentielle à une intégrale.
3. Approximation par éléments finis.
4. Equation matricielle.
5. Résolution du système matricielle.

Actuellement, il existe différents logiciels qui utilisent cette méthode comme le Femlab, Maxwell, Flux2D et FEMM. [9]

### III.2.3. Approche de la MEF

L'essor de la méthode des éléments finis repose sur deux ingrédients fondamentaux. D'une part, les propriétés interpolées des éléments finis : ceux-ci permettent d'approcher des fonctions définies sur un domaine en maillant ce domaine puis en choisissant sur chaque maille des combinaisons linéaires de fonctions de forme (par exemple polynômes).

D'autre part, la méthode de Galerkin, qui fournit un cadre d'approximation général pour une large classe de problèmes où l'inconnue est une fonction qui doit satisfaire une ou plusieurs équations aux dérivées partielles et des conditions aux limites.[26]

### III.2.4. Avantages de la M.E.F

- La flexibilité est l'un des plus importants avantages de la M.E.F. Les éléments peuvent avoir plusieurs formes variées et peuvent donc s'adapter facilement à n'importe quelles formes géométriques complexes et aussi tenir compte des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux.
- Les matrices formant le système final d'équations sont symétriques ce qui simplifie grandement la résolution de celui-ci.
- La programmation de la méthode est assez simple surtout lorsqu'il s'agit de tenir compte de l'introduction des conditions aux limites.
- La M.E.F a fait ses preuves dans beaucoup de domaines en ingénierie.
- De plus, avec son développement important, il existe de très bons logiciels commerciaux qui sont basés sur cette méthode et qui la rendent très accessible, et par conséquent, elle est

applicable à beaucoup de problèmes sans que nous connaissions nécessairement la M.E.F en détail. [28]

### III.2.5. Inconvénients de la M.E.F

- Dans les problèmes de calcul de champs électriques présentant un domaine spatial infini, l'établissement de la frontière artificielle peut causer certaines difficultés dans la réalisation d'un programme simple. D'une part, celle-ci doit être beaucoup plus vaste que le domaine d'étude, ce qui engendre un temps de calcul (en ce qui concerne le maillage) beaucoup plus important que pour des domaines finis.
- D'autre part, le choix de cette frontière à une grande importance dans la précision des calculs et son influence sur celle-ci doit être pris en compte dans tout programme de ce type.
- Il a été dit que la M.E.F était une méthode flexible car elle s'adapte facilement aux différentes géométries, mais ce n'est pas le cas du maillage car celui-ci doit être entièrement refait si une modification sur une partie de la géométrie du problème considéré intervient.
- L'utilisation de la M.E.F pour la résolution d'un problème donné nécessite la connaissance parfaite de la géométrie du problème mais aussi des conditions aux limites ; ce qui n'est pas toujours le cas.
- Une fois le potentiel connu en chaque nœud, il faut procéder à un autre calcul numérique pour déterminer le champ électrique en tout point ce qui peut engendrer d'autres erreurs.

La méthode des éléments finis utilise une approximation par morceau de la fonction inconnue pour résoudre une équation différentielle.

On peut aussi utiliser les équivalences physiques pour chercher la solution d'une équation aux dérivées partielles.

La méthode de simulation de charges en est une bonne illustration. [27].

## III.3 Logiciel éléments finis FEMM

Il est un logiciel libre et gratuit, disponible sur le réseau internet. Ce logiciel est devenu un outil très convoité par les chercheurs.

La méthode qu'il utilise est celle des éléments finis, méthode appliquée aux structures électromagnétique, électrostatique...etc.

Le logiciel FEMM est composé de trois modules essentiels, un module d'édition qui permet de définir le type de problème, de tracer la géométrie, de définir les différents milieux, ainsi que les conditions aux limites, et de mailler la structure proposée (préprocesseur).

Un deuxième module permet de résoudre le problème (processeur). Et un troisième module qui permet d'exploiter les résultats du calcul (post processeur). Le logiciel est utilisé généralement en compagnie d'un outil de programmation (lua scripting). [25]

Composantes principales logiciel :

- **Éditeur** : édition géométrie du problème, propriétés des matériaux utilisés et conditions aux frontières du domaine d'étude.
- **Maillage Éléments Finis** : Discrétisation spatiale du domaine d'étude en triangles (maillage éléments finis).
- **Processeur** : Résolution des équations locales aux dérivées partielles discrétisées sur tout le domaine d'étude en tenant compte des conditions imposées aux frontières du domaine d'étude.
- **Post-Processeur** : Affichage & Traitement des résultats. [29]

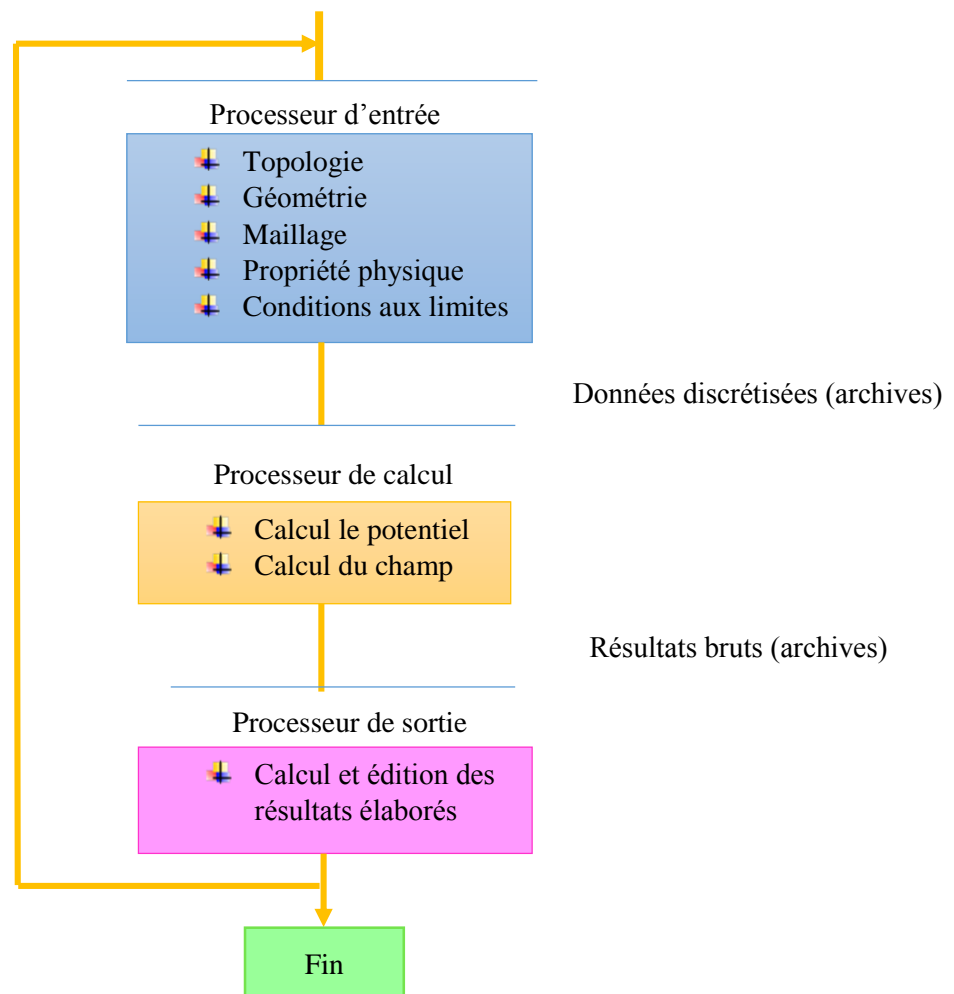


Figure III.1 Organigramme du logiciel Femm

### III.4 Les domaines d'application

- **Magnétisme** : calcul des grandeurs électriques et magnétiques dues à des aimants, à des flux imposés, à des courants continus ou variables, imposés ou induits.
- **Electrostatique** : calcul en régime permanent des potentiels et champs électriques avec ou sans circulation de courants dans les milieux diélectriques ou conducteurs.

- Thermique : calcul de la répartition des températures créées par des puissances dissipées, des différences de températures ou des flux thermiques. [30]

### III.4.1. Le maillage

Un maillage est un ensemble de nœuds et d'éléments un nœud est un point géométrique supportant une ou plusieurs inconnues, un élément est un ensemble de nœuds associés à un domaine géométriquement simple.

La définition de chaque élément par les nœuds le composant est assujetti à des règles précises assurant sa validité (par exemple, en dimension 2, parcours des nœuds dans le sens trigonométrique direct). [31]

#### • Nœuds et éléments

Une description non-sophistiquée de la MEF pourrait être définie sous la forme suivante : la structure à analyser est divisée en plusieurs éléments (petites pièces comme celles qui forment un puzzle). Ces éléments sont ensuite reconnectés par l'intermédiaire des nœuds (figure III.2). Ces nœuds sont « des punaises » ou « des points de colle » qui maintiennent les éléments dans un ensemble unitaire. [32]

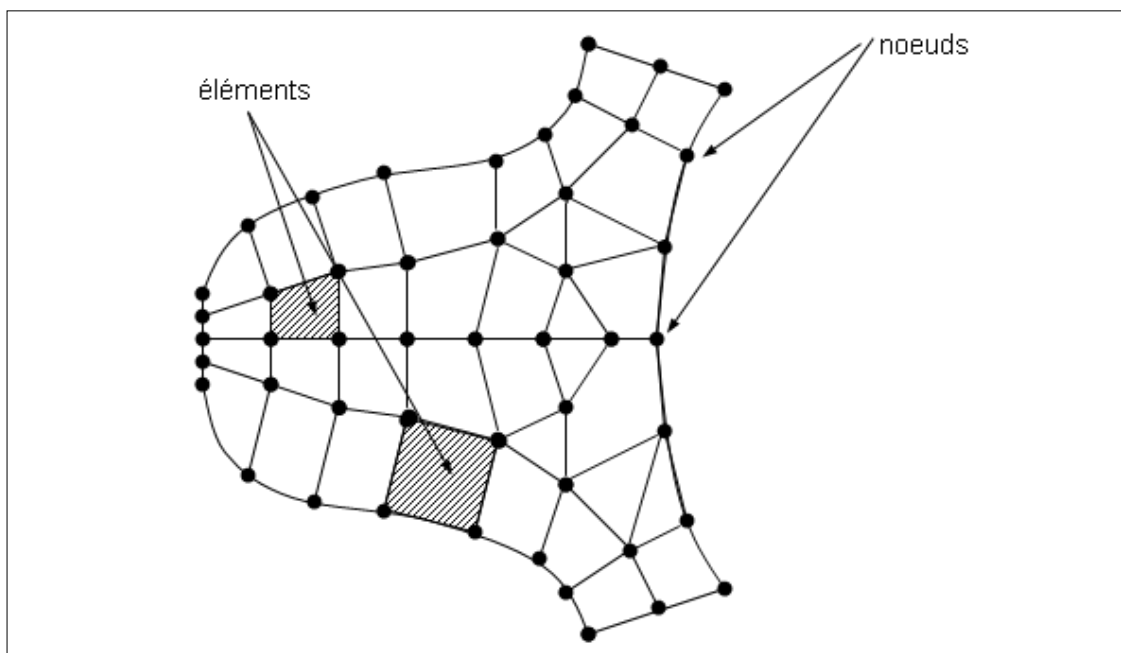


Figure III.2 Discrétisation d'une structure en nœuds et éléments (dent d'une roue dentée)

### III.4.2. Discrétisation géométrique

Cette opération consiste à procéder à un découpage du domaine continu en sous domaines :

Il faut donc pouvoir représenter au mieux la géométrie souvent complexe du domaine étudié par des éléments de forme géométrique simple.

Il ne doit y avoir ni recouvrement ni trou entre deux éléments ayant une frontière commune. [33]

### **III.5 Description du logiciel « COMSOL Multyphysics »**

C'est un logiciel conçu par l'entreprise «Comsol » qui est fondée en 1986. Elle se spécialise dans le domaine de développement de logiciels de support technique et de formation spécialisé et de conseil, développé au Royal Institute of Technology (Suède).

Le logiciel est utilisé par plusieurs grandes entreprises à travers le monde. Vous pouvez modéliser et simuler tout système basé sur la physique en utilisant un logiciel de COMSOL. [34]

Le logiciel COMSOL Multiphysics, anciennement appelé FEMLAB, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis.

Développé initialement comme une TOOLBOX de MATLAB, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement. [35]

COMSOL Multiphysics est un outil très employé dans des secteurs divers de recherche, car il facilite amplement les étapes de modélisation et de simulation, soit : la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats.

Par ailleurs, le logiciel ne demande pas de connaissances approfondies dans les dynamiques ou les analyses numériques.

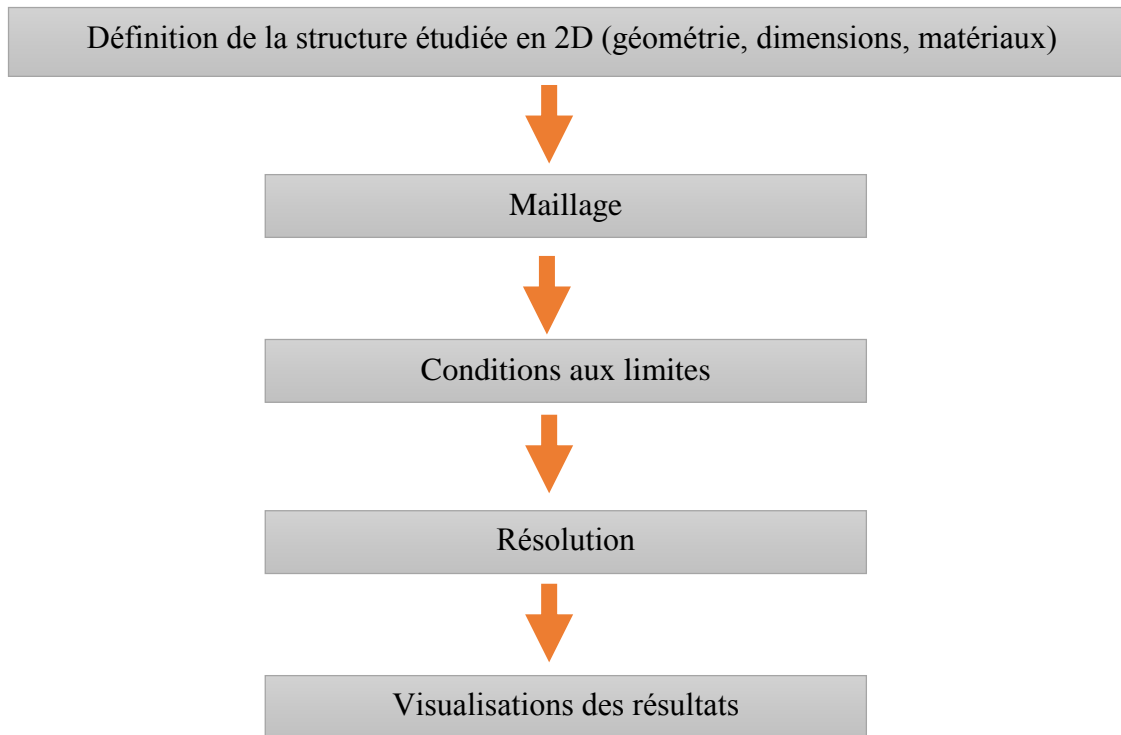
En effet, toutes les équations nécessaires à la résolution sont déjà prédéfinies, il suffit alors de préciser dans quel domaine (électromagnétisme, transfert de chaleur, acoustique...) et dans quel régime (stationnaire, temporel...) le modèle doit être construit selon ce choix, la modélisation est disponible en 1D, 2D, 2D axisymétrique ou encore en 3D. [36].

#### **III.5.1. Méthodologie de conception avec COMSOL Multiphysics**

Dans notre projet on va passer étape par étape commençant par la création de la géométrie du modèle à concevoir.

Après avoir dessiné notre modèle on doit rajouter les caractéristiques de la matière à chacune des formes. Les conditions aux limites et les paramètres du modèle sont rajouté. [34]

- La modélisation avec COMSOL Multiphasiques se résume en 5 étapes :



**Figure III.3** Diagramme de différentes étapes de résolution dans COMSOL

Les solutions sont obtenues sous forme de graphiques en 2D, courbes ou tableaux de valeurs. Il est important de vérifier que ces solutions ne dépendent pas d'une manière significative du maillage, et qu'elles sont analogues aux résultats obtenus expérimentalement ou rapportés dans la littérature. [34]

### **III.5.2. Étapes de résolution dans COMSOL Multiphasic**

#### **III.5.2.1 Choix du modèle**

Nous allons commencer par le choix du modèle. Lancez donc le module électrostatique (es) dans le navigateur de modèle. Nous allons ici nous limiter à une étude à 3D.

#### **III.5.2.2 Géométrie**

La première chose à faire une fois le programme ouvert est de dessiner la géométrie de notre système (isolateur).

#### **III.5.3. Introduction des propriétés des domaines**

Le but ici est de définir les paramètres physiques qui définissent le domaine: la constante diélectrique, la conductivité, etc. Les paramètres sont évidemment liés à notre modèle physique étudié.

Pour résoudre les EDP, il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites cohérentes.

A chaque frontière de domaine est associé un segment orienté. Il est possible de donner des valeurs de condition aux limites pour chacun de ces segments.

Les options seront différentes suivant qu'il s'agisse ou non d'une frontière intérieure au système. [14]

### **III.5.3.1 Maillage des domaines**

Le maillage des domaines est automatique. Il est possible de le raffiner globalement ou de manière localisée. [7]

### **III.5.3.2 Résolution du problème**

Lorsque le problème est complètement défini, il ne reste plus qu'à le résoudre. Il est possible d'accéder à des menus pour modifier la résolution.

De même, lors de la résolution d'un problème multi- physique, il est possible de ne résoudre que pour une certaine partie des variables. [7]

### **III.5.3.3 Analyse des résultats**

Lorsque le programme a convergé vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de post traitement, qui permet d'analyser les résultats.

Il est possible de les visualiser sous forme de remplissage de couleur, de lignes de courant, de champ de flèches, etc...[14]

### **III.5.4 Avantages de conception avec COMSOL Multiphysics :**

Le principal but de la création de COMSOL Multiphysics est d'avoir un logiciel où les scientifiques et les ingénieurs peuvent formuler, à l'aide de l'interface utilisateur, n'importe quel système d'équations aux dérivées partielles (EDP) sur la base des lois de la physique et surtout de se baser sur les zones les plus communes dans la physique et en génie.

Cette interface est basée sur un interpréteur d'équation qui formule une discrétisation par éléments finis, "à la volée", par le système entièrement couplé.

Des interfaces de modélisation prédéfinies pour les différents domaines de la physique appliquée, y compris des couplages multi physiques.

Grâce à la technologie sous-jacente, les propriétés, les sources, les puits et les conditions aux limites peuvent être des fonctions des variables modélisées et leurs dérivées partielles.

Les équations complètes sont également disponibles dans l'interface utilisateur pour une manipulation. [34]

Il a été retenu pour les raisons suivantes:

- Il est spécialisé dans la résolution de problèmes électromagnétiques.
- Il permet de prendre en compte la présence de plusieurs diélectriques.

- Il permet de modéliser une surface conductrice de faible épaisseur (couche de pollution).
- Il permet de travailler en régime statique ou quasi-statique (50 Hz).
- Enfin, il permet une modélisation rapide du problème. [37]

### III.6 Modélisation d'un isolateur

La modélisation et la simulation d'un isolateur peuvent se résumer en cinq étapes successives suivantes:

- La première étape consiste à définir la géométrie entière de modèle l'isolateur par l'intermédiaire d'une interface graphique de conception.
- Dans la deuxième étape on définit les conditions aux limites qui se traduisent par le potentiel imposé sur chaque électrode et déterminer les frontières de l'isolation électrique c'est-à-dire les frontières où le champ électrique peut être considéré comme nul.
- La quatrième étape consiste en la résolution du problème par l'application de la méthode numérique.
- La dernière étape consiste à l'affichage des résultats obtenus parmi lesquels les équipotentielles, la norme du champ électrique et ses composantes normales et tangentielles, etc.[7]

### III.7 Conclusion

La détermination de la distribution du champ et du potentiel électriques de tout système de haute tension, est un problème de calcul complexe. Pour remédier à ce problème, la méthode des Éléments Finis était la mieux adaptée aux contraintes imposées par le problème.

Les logiciels FEMM et COMSOL Multiphysics peut servir d'une manière puissante et interactive à les résoudre en se fondant sur la méthode des éléments finis.

Dans le dernier chapitre qui suit nous allons présenter les résultats de simulation concernant la distribution du potentiel et du champ électrique sur l'isolateur (1512 L) pour un, deux et trois éléments.

A graduation cap (mortarboard) with a red tassel and a rolled-up diploma tied with a red ribbon are positioned in the background. The text is overlaid on the cap.

*Chapitre IV*  
*Résultats et Interprétations*

## IV.1 Introduction

Dans notre simulation, nous avons choisi deux logiciels :

**FEMM** : pour la simulation d'un élément d'isolateur dans les deux cas propre et pollué.

**COMSOL** : pour la simulation d'une chaîne d'isolateurs dans les deux cas propre et pollués.

La modélisation est une étape importante dans toute simulation numérique. En particulier, elle permet, en définissant et en étudiant les caractéristiques géométriques et physiques du problème étudié.

FEMM & COMSOL sont des outils très employés dans des secteurs divers de recherche, car ils facilitent amplement les étapes de modélisation et de simulation, soit : la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats. Par ailleurs, les deux logiciels ne demandent pas de connaissances approfondies dans les mathématiques ou les analyses numériques.

L'objectif principal de cette simulation est de calculer la distribution du potentiel et du champ électrique pour une chaîne d'isolateurs de haute tension.

Afin de calculer le champ électrique, nous avons utilisé le logiciel FEMM (Finite Element Magnetism Method) et COMSOL.

**FEMM** : est une suite des programmes permettant de donner la répartition du champ électrique en deux dimensions.

**COMSOL** : Permettant de donner la répartition du champ électrique en un, deux et trois dimensions.

Pour cela, nous avons introduit, dans ce logiciel, notre modèle avec toutes ses spécifications (formes et nature des électrodes, nature et dimensions de la pollution, permittivités, conductivités des différents milieux, tension appliquée, conditions aux limites, ...).

Dans ce dernier chapitre, nous nous sommes intéressés à la détermination des répartitions des potentiels et du champ électriques le long des isolateurs 1512L. Pour cela, COMSOL et FEMM, basé sur la méthode des éléments finis, a été utilisé.

## IV.2 Simulation

FEMM et Comsol, les deux logiciels utilisent la méthode des éléments finis, la simulation de l'isolateur 1512L qui utilisé on Algérie par la SONALGAZ pour les lignes de haut tension (220 kV) peut se résumer dans les quatre étapes successives suivantes :

- La première étape consiste à définir la géométrie entière en deux dimensions de l'isolateur par FEMM et COMSOL.
  - La deuxième étape porte sur la définition des propriétés électriques des matériaux présents. Cela consiste à définir les permittivités relatives et les conductivités pour chaque partie de l'isolateur.
- De plus, il faut définir les conditions aux limites qui se traduisent par le potentiel imposé sur chaque électrode (conditions de Dirichlet).
- La troisième étape est consacrée à la résolution du problème par l'application de la méthode numérique et par la construction du système d'équations ( $\nabla^2 V = 0$ ), et cela en introduisant les facteurs de chaque partie de l'équation.
  - La dernière étape consiste en l'affichage des résultats comme le potentiel et le champ électriques avec leurs modules, suivant chaque partie de l'isolateur et leurs répartitions spatiales.

## IV.3 Simulation du modèle réel par FEMM

La simulation de notre modèle réel a été faite à l'aide d'un logiciel à deux dimensions "FEMM" utilisant la méthode des éléments finis.

La configuration de notre modèle donne une représentation relativement difficile (figure (IV.1)).

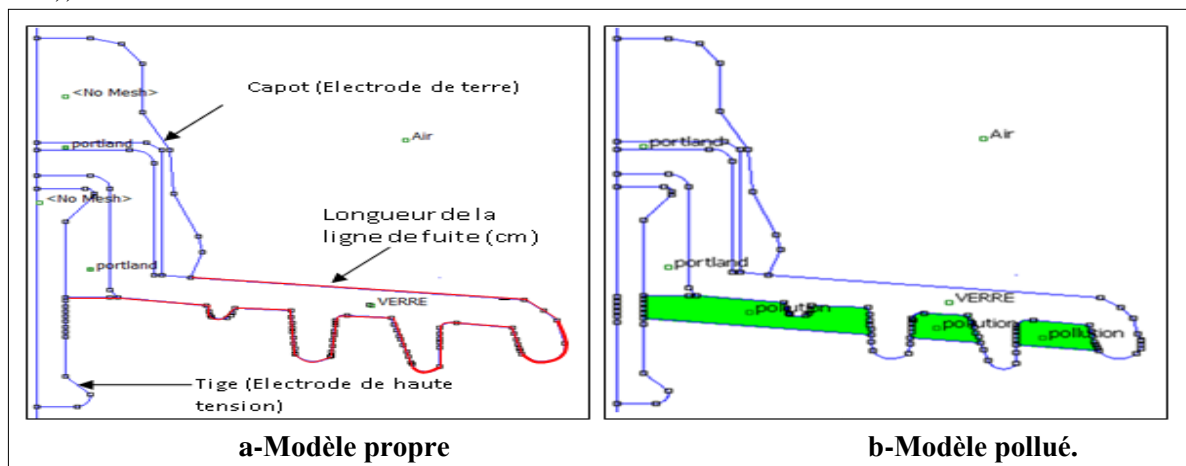


Figure IV.1 Représentation du modèle réel sur le logiciel FEMM

## IV.4 propriétés des matériaux

Nous avons choisi dans notre simulation l'isolateur 1512L. Ce dernier est constitué de trois parties ayant des propriétés différentes : le verre ayant une permittivité relative de 6, le capôt et

la tige en métal de permittivité relative de 1000000 et de conductivité de 1000000, rattachés entre eux par du ciment ayant une permittivité relative de 5. L'air entourant l'isolateur a une permittivité de 1,0005. Afin de simuler la couche polluante, nous avons rajouté une fine couche autour du verre qui a une permittivité relative de 80 (représentant une solution saline), Dans notre cas 3000mS/cm.

## IV.5 Conditions aux limites

Pour le cas étudié, nous avons pris comme conditions aux limites pour l'électrode un potentiel constant de valeur 30kV (haute tension) et celui de l'électrode inférieure un potentiel nul ou encore prendre la condition prédéfinie dans le logiciel 'terre'. Le champ électrique est supposé nul (isolation électrique) suffisamment loin de l'isolateur.

## IV.6 Maillage des domaines :

Concernant le maillage, la densité des éléments finis est important pour les régions critiques (proches de la surface de l'isolateur) où une plus grande précision est exigée, car les propriétés électriques des matériaux sont très changeantes. En effet, nous avons considéré :

- Pour un élément le maillage comporte 16990 nœuds et 33205 éléments dans le cas d'isolateur propre.
- Pour un élément le maillage comporte 53222 nœuds et 106248 éléments dans le cas d'isolateur pollué.
- Avec un temps de calcul longs.

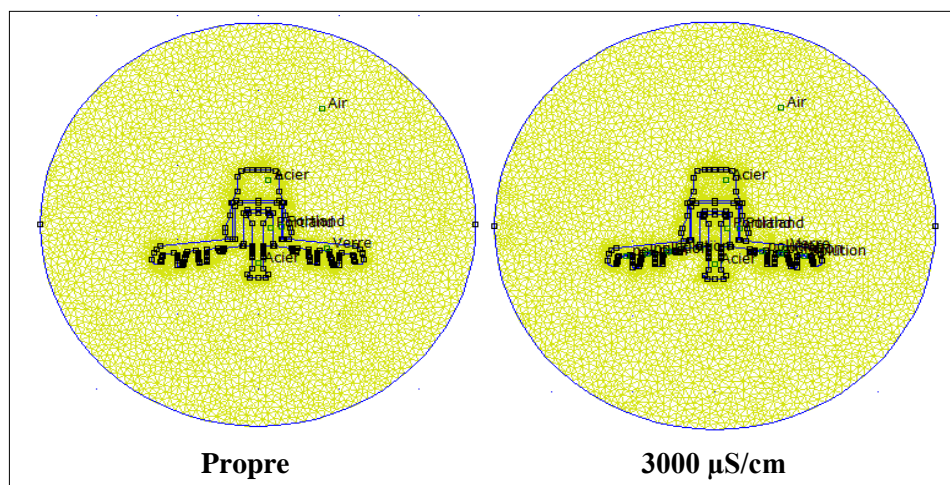


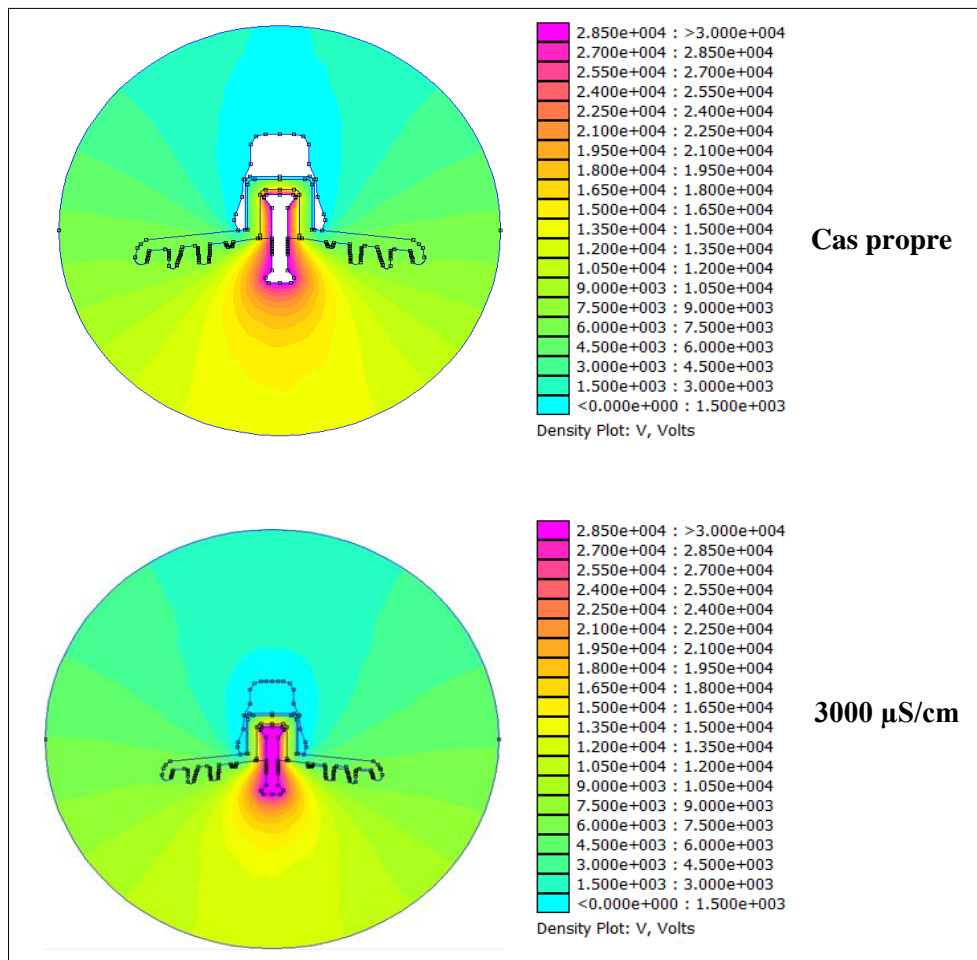
Figure IV.2 Maillage de l'isolateur

## IV.7 Analyse des résultats de simulation par FEMM

### IV.7.1. Etude du potentiel

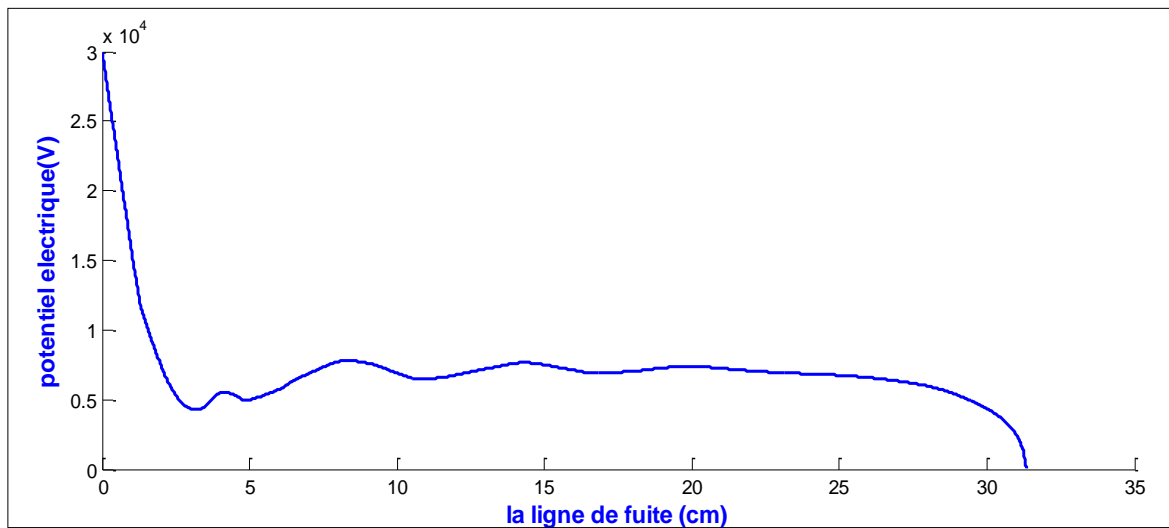
Dans notre cas nous sommes intéressés à la détermination de la répartition du potentiel d'isolateurs 1512L pour un élément, en fonction de la conductivité. Pour cela, nous avons introduit dans le logiciel, outre la valeur de la conductivité ( $3000\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

La tension a été maintenue constante et égale à 30 kV (Pris de diagnostyka de mon encadreur). Ceci permet de simuler le comportement d'une d'isolateurs de ligne 220 kV. Les figures IV.3 et IV.4 et illustrent respectivement la variation du potentiel le long de la ligne de fuite et la distribution du potentiel le long d'un isolateur de HT, pour Les deux cas propre et polluées.



**Figure IV.3 Distribution du potentiel d'un isolateur de HT (pour un élément)  
Dans les deux cas propre et polluée**

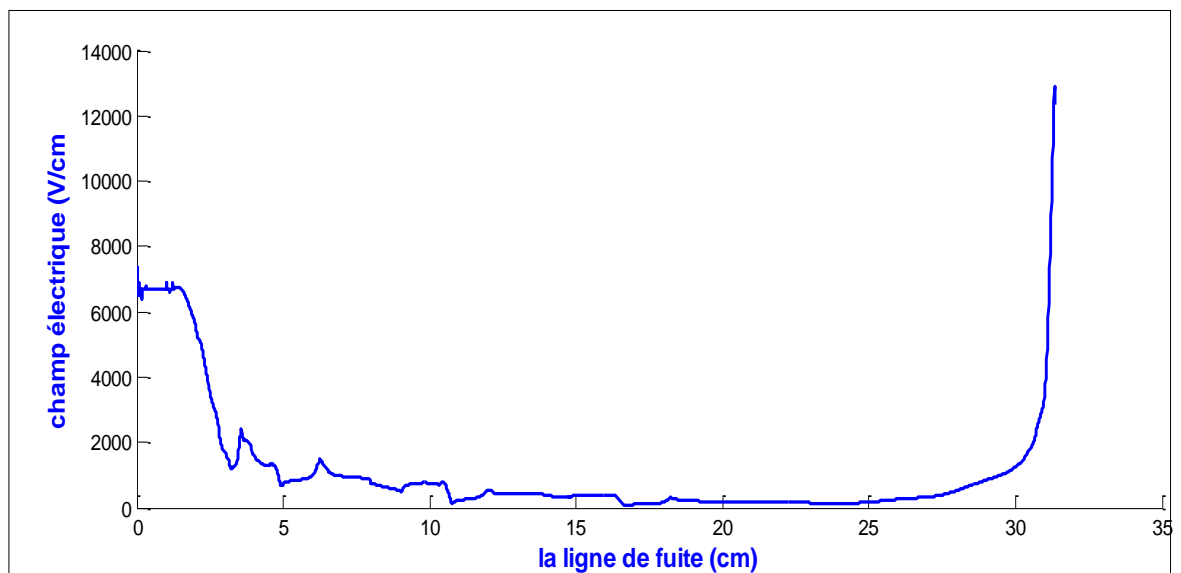
- Pour une meilleure exploitation des résultats obtenus, nous avons utilisé le MATLAB.



**Figure IV.4 Répartition des potentiels sur la surface de la jupe isolante par MATLAB, dans le cas propre**

#### IV.7.2. Etude du champ électrique

Pour une de tension (30 kV), la figure (IV.5) montre que la variation de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur 1512L pour un élément dans le cas propre.



**Figure IV.5 Répartition des champs sur la surface de la jupe isolante par MATLAB, dans le cas propre**

#### IV.9 Simulation du modèle réel par COMSOL

Nous allons commencer par le choix du modèle. Lancez donc le module électrostatique dans le navigateur de modèle. Nous allons ici nous limiter à une étude à 2D.

### IV.9.1. Géométrie de l'isolateur utilisé

La première chose à faire une fois le programme ouvert est de dessiner la géométrie de notre système un, deux et trois éléments).

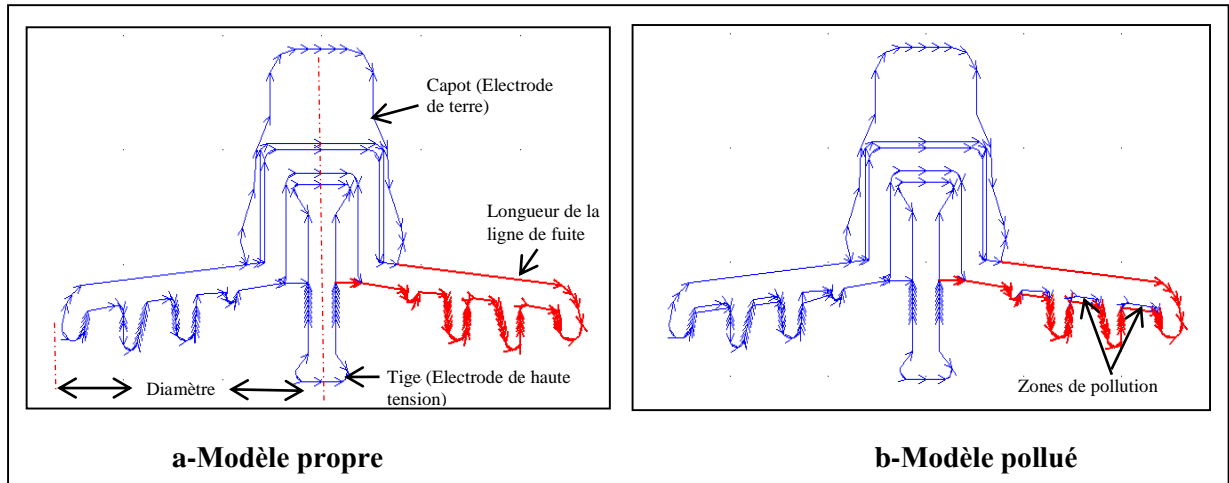


Figure IV.6 Représentation du modèle réel sur le logiciel COMSOL pour un élément

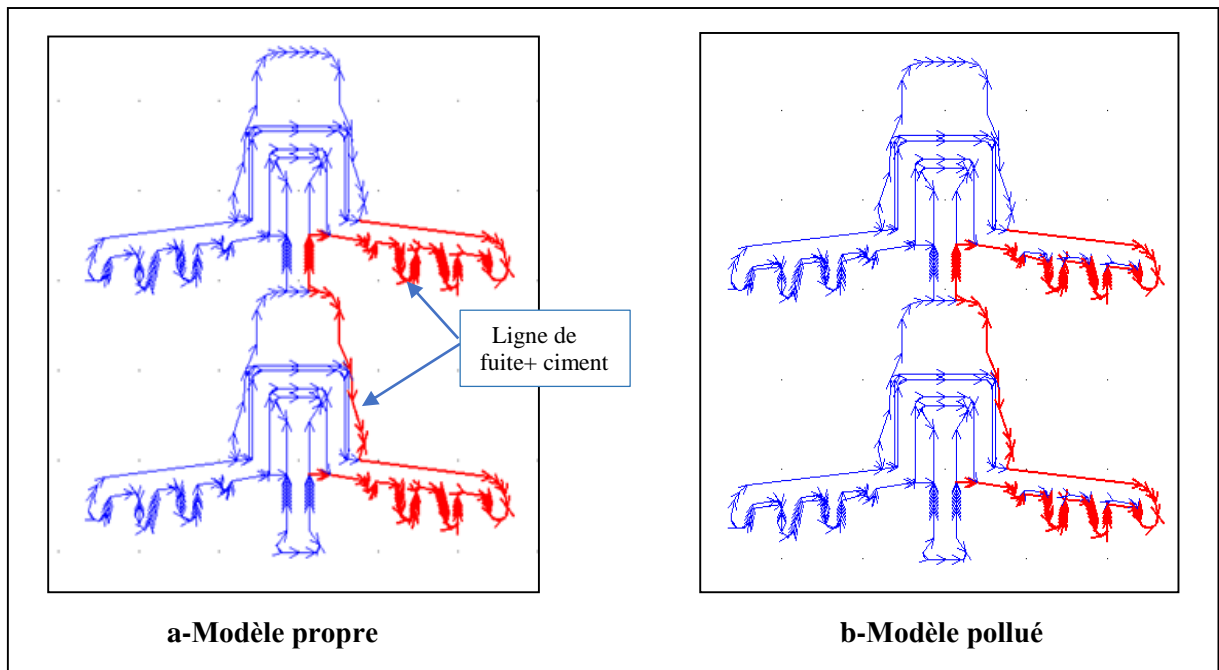
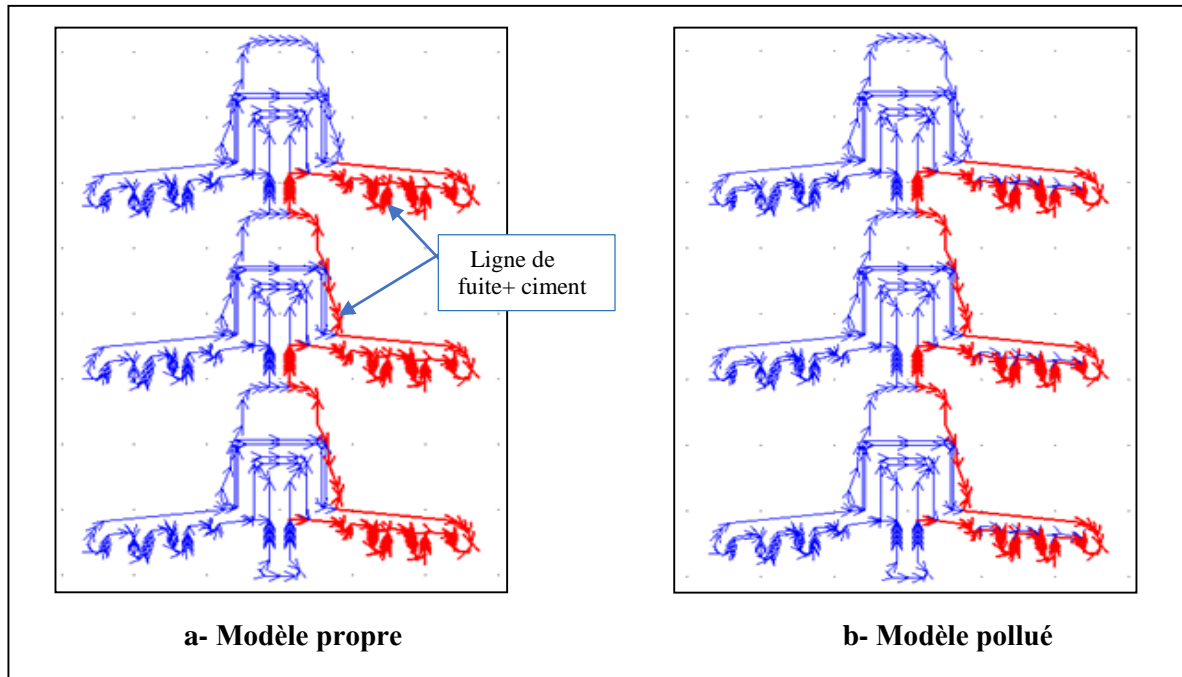


Figure IV.7 Représentation du modèle réel sur le logiciel COMSOL pour deux éléments



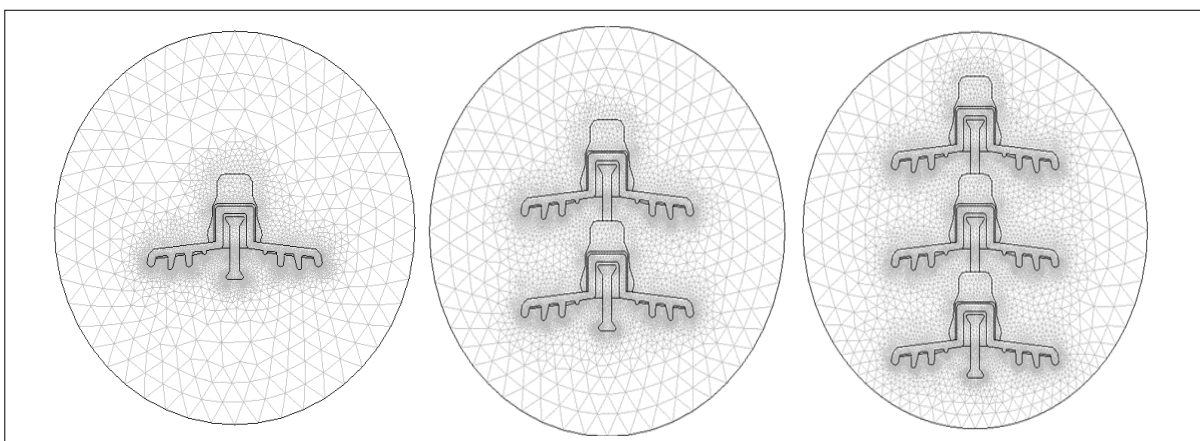
**Figure IV.8** Représentation du modèle réel sur le logiciel COMSOL pour trois éléments

#### IV.9.2. Maillage :

Nous avons considéré :

- Pour un élément le maillage comporte 14846 éléments dans le cas d'isolateur propre.
- Pour deux éléments le maillage comporte 27378 éléments dans le cas d'isolateur propre.
- Pour trois éléments le maillage comporte 39912 éléments dans le cas d'isolateur propre.

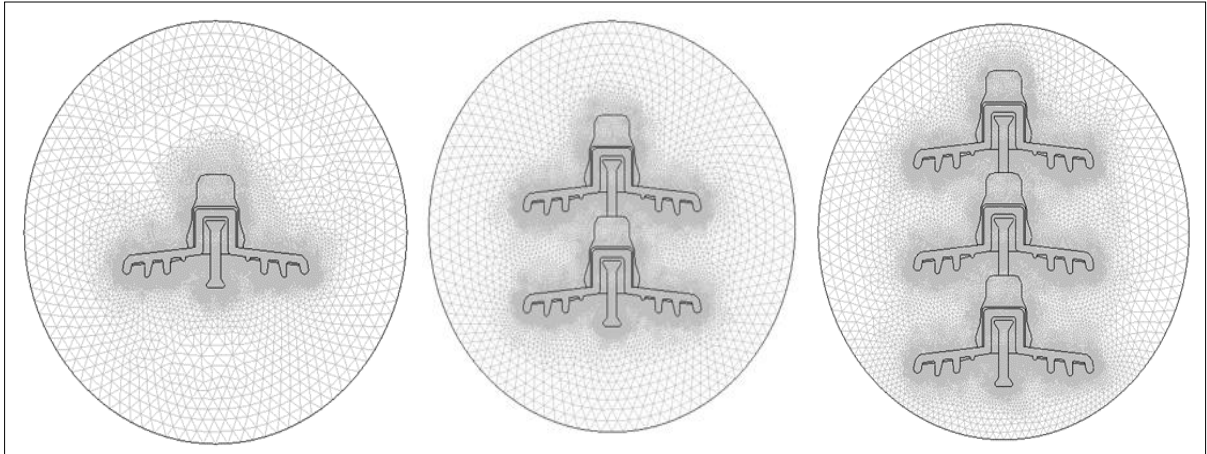
Avec temps de calcul moyenne 12,286 s.



**Figure IV.9** Maillage de l'isolateur réel

Et après le raffinage nous trouvons :

- Pour un élément le maillage comporte 59384 éléments dans le cas propre.
- Pour deux éléments le maillage comporte 109968 éléments dans le cas propre.
- Pour deux éléments le maillage comporte 161320 éléments dans le cas propre.



**Figure IV.10** Maillage de l'isolateur après le raffinage

## **IV.10 Analyse des résultats de simulation par COMSOL**

### **IV.10.1. Etude du potentiel**

#### **IV.10.1.1 Influence de la conductivité**

Dans notre cas nous sommes intéressés à la détermination de la répartition du potentiel le long de la chaîne d'isolateurs composée de 1, 2 et 3 éléments, en fonction de la conductivité. ( $3000\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Pour cela, nous avons introduit dans le logiciel, outre des valeurs de la conductivité déjà considérées lors des essais ( $3000\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

La tension a été maintenue constante et égale à 30 kV. Ceci permet de simuler le comportement d'une d'isolateurs de ligne 30 kV. Les figures IV.11, IV.13 et IV.15 et illustrent respectivement la variation du potentiel le long de la ligne de fuite et la distribution du potentiel le long de la chaîne d'isolateurs, pour les conductivités considérées.

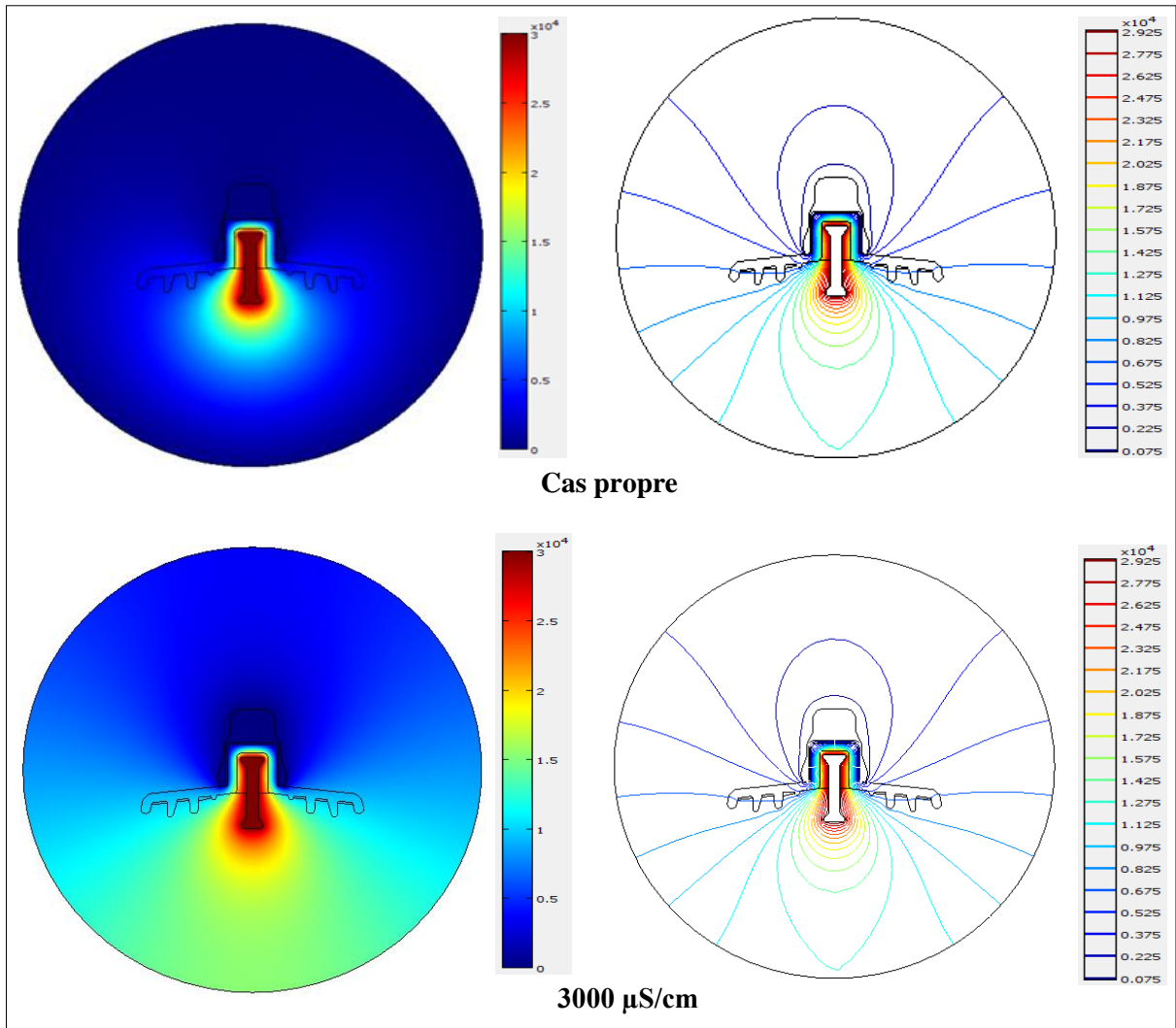


Figure IV.11 Distribution du potentiel d'un isolateur pour un élément en fonction de la conductivité

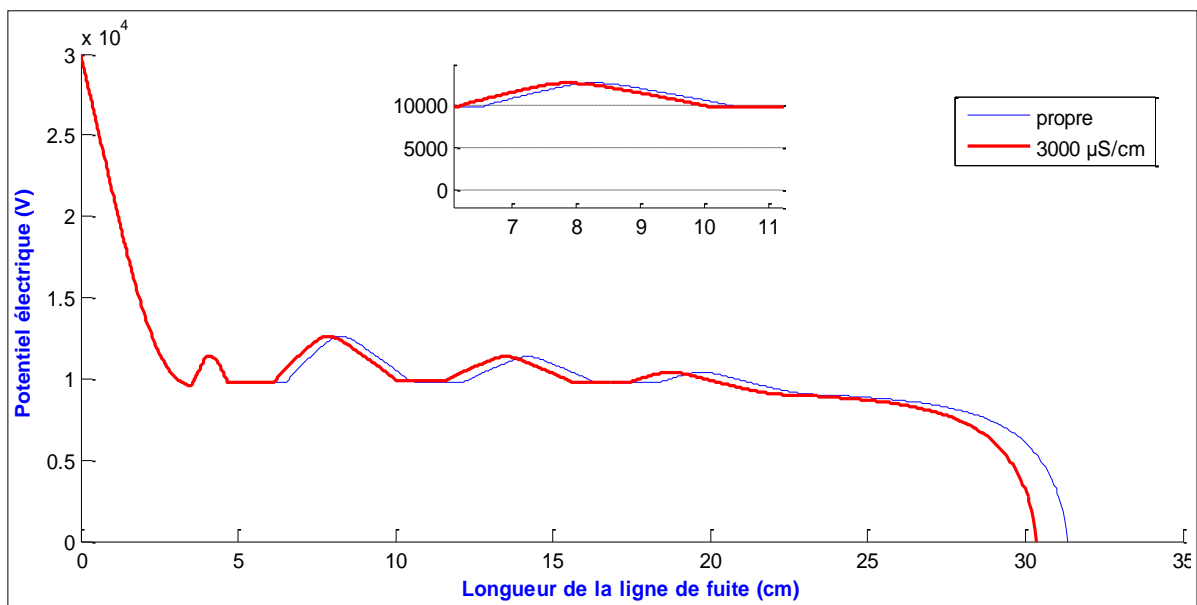


Figure IV.12 Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur (propre et pollué)

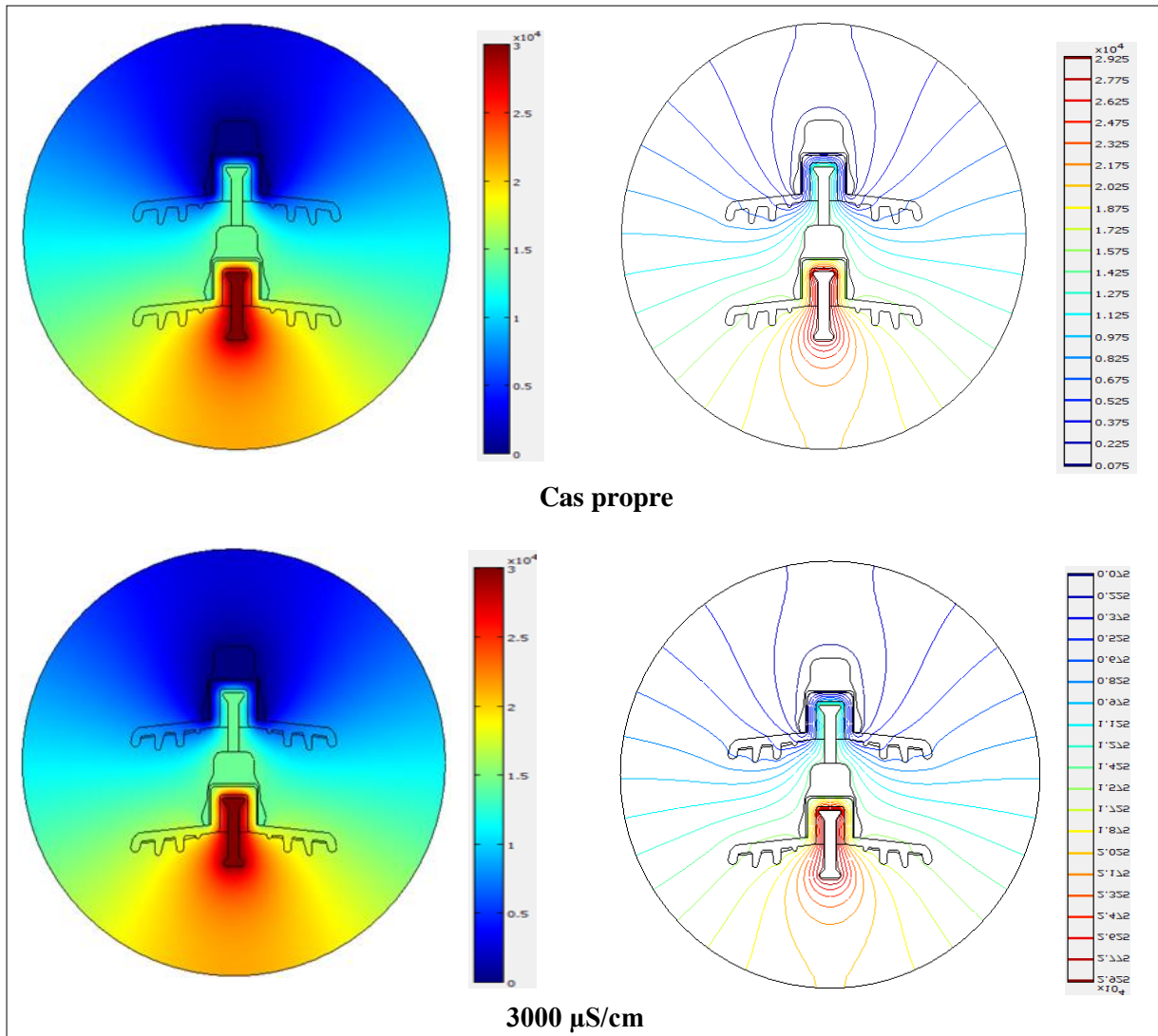


Figure IV.13 Distribution du potentiel d'un isolateur pour deux éléments en fonction de la conductivité

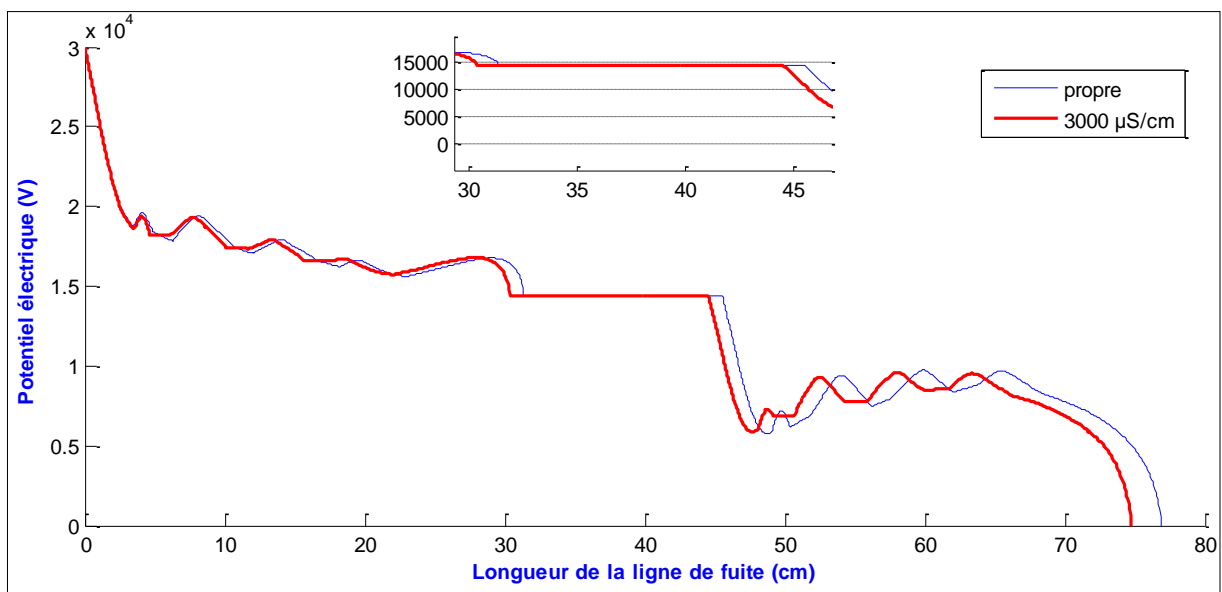


Figure IV.14 Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaine (2 éléments), (Propre et polluée)

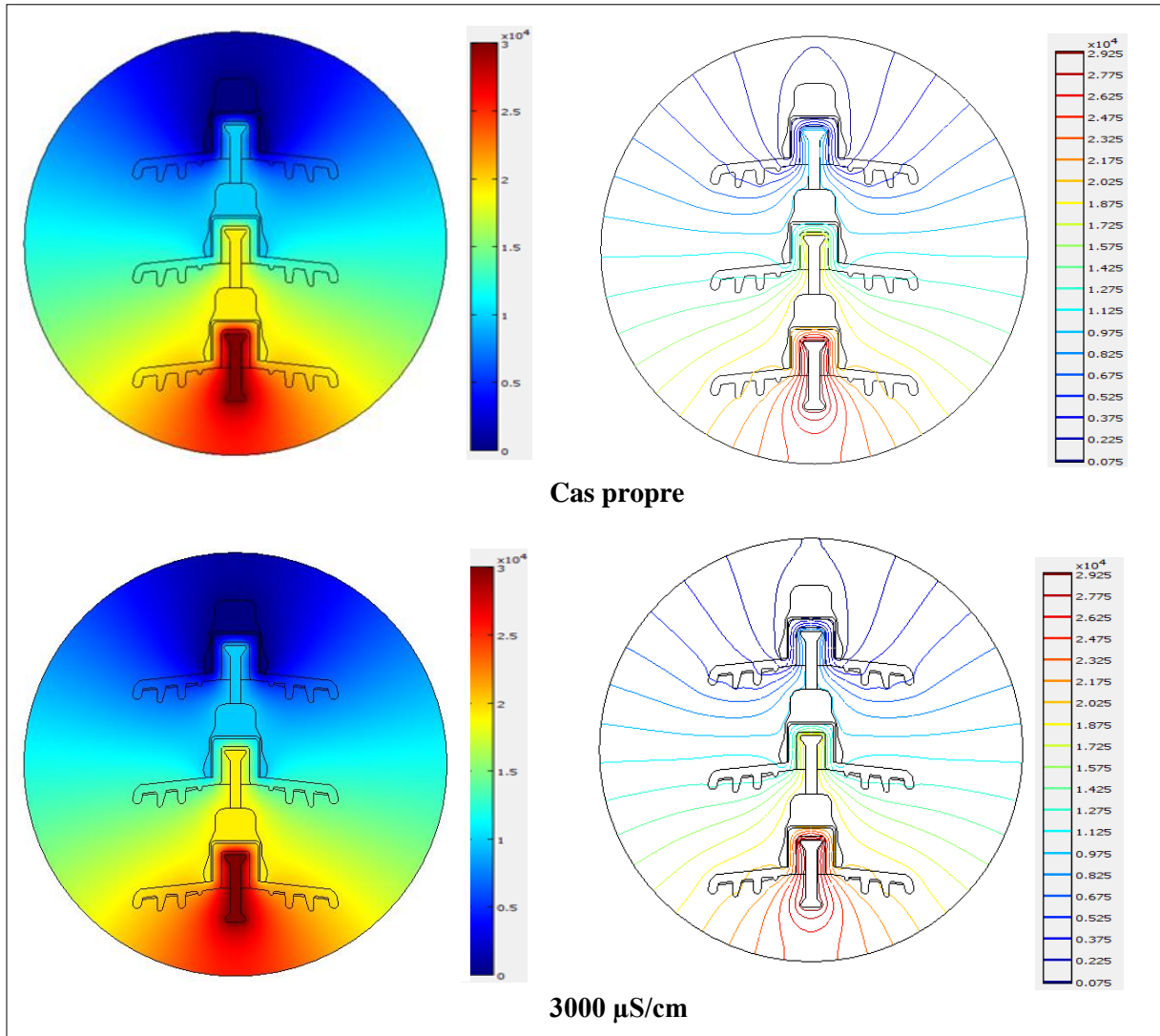


Figure IV.15 Distribution du potentiel d'un isolateur pour deux éléments en fonction de la conductivité

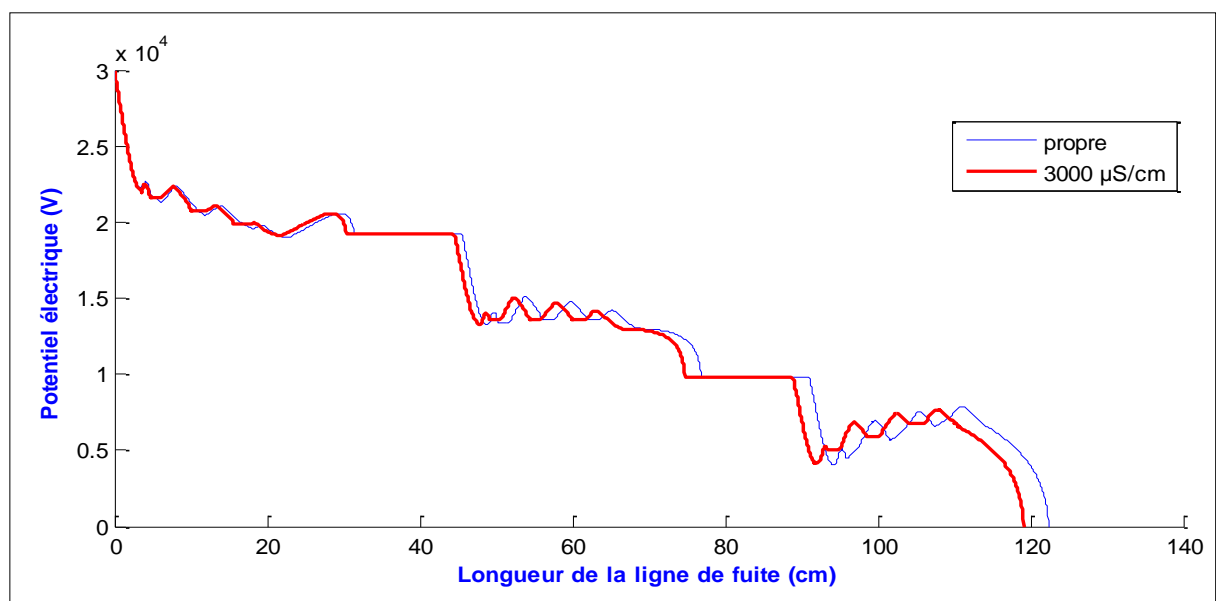


Figure IV.16 Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne (3éléments), (propre et polluée)

Les figures (IV.12, IV.14 et IV.16) illustrent respectivement la variation du potentiel le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs pour les conductivités considérées.

- Le potentiel est important pour l'électrode haute tension puis diminue à mesure que l'on s'éloigne de l'électrode de terre (30V). Dans le cas du modèle propre et polluée, 30kV est la valeur maximale de la tension, indiquée autour de l'électrode active, puis décroît linéairement à fur à mesure qu'elle s'éloigne de cette électrode vers l'électrode de mise à la terre ou le potentiel est annulé.
- Dans le cas propre, les courbes du potentiel sont plus proches de celle de  $\sigma = 3000 \mu\text{S/cm}$ . nous notons que la variation de la conductivité de la couche polluée n'a aucun effet sur le potentiel le long de la distance de fuite de l'isolateur. Aucune différence n'a été observée comparant le potentiel obtenu pour deux cas : isolateur propre et pollué.
- Pour la pollution uniforme  $\sigma = 0,3000 \mu\text{S/cm}$  les courbes du potentiel sont confondues.
- Les deux courbes de potentiel passent également par des régions où le potentiel reste constant, il s'agit des électrodes, et diminuent au niveau du verre.

#### IV.10.1.2 Influence du nombre d'éléments

Le potentiel le long de la ligne de fuite de la chaîne d'un, deux ou trois isolateurs, pour un niveau de tension constant (30 kV). Nous constatons que le potentiel au niveau des parties métalliques est fixe, tandis qu'elle chute brusquement au contact des parties isolantes (verre et ciment). Cela est nettement visible dans le cas d'un seul élément.

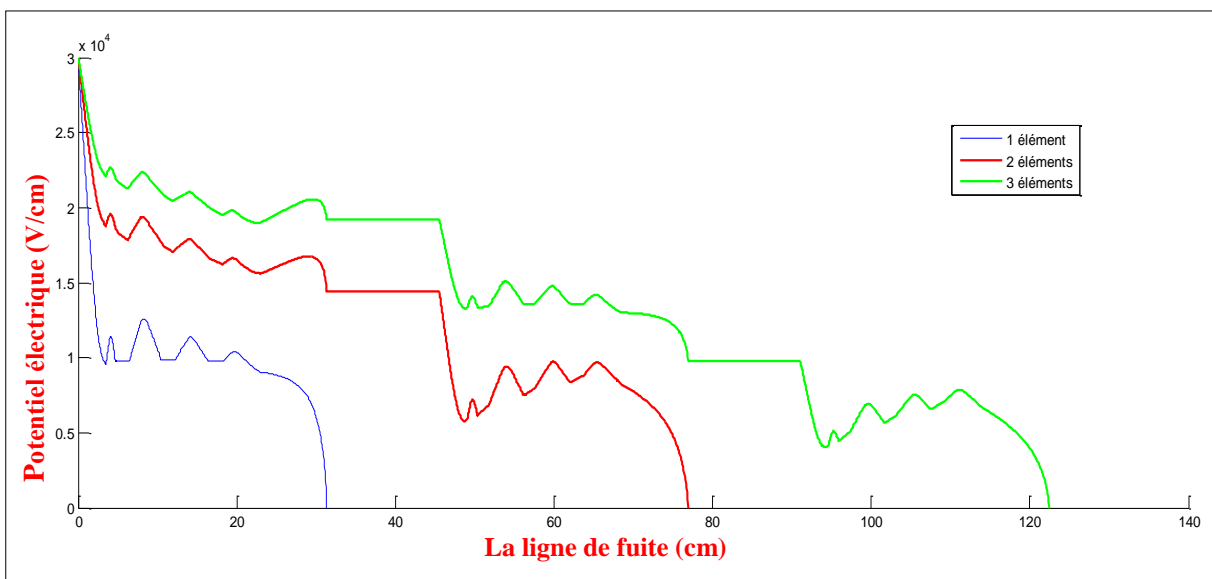
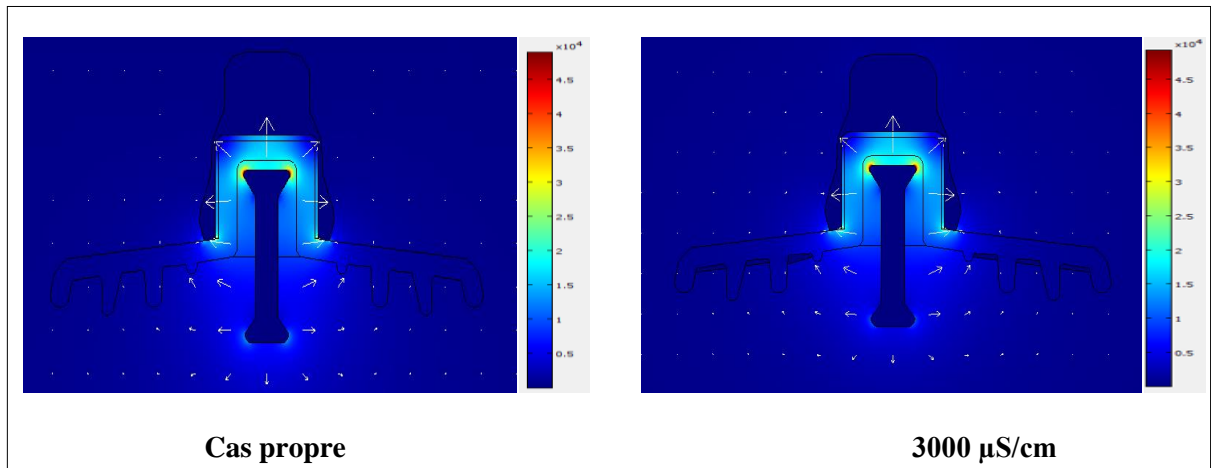


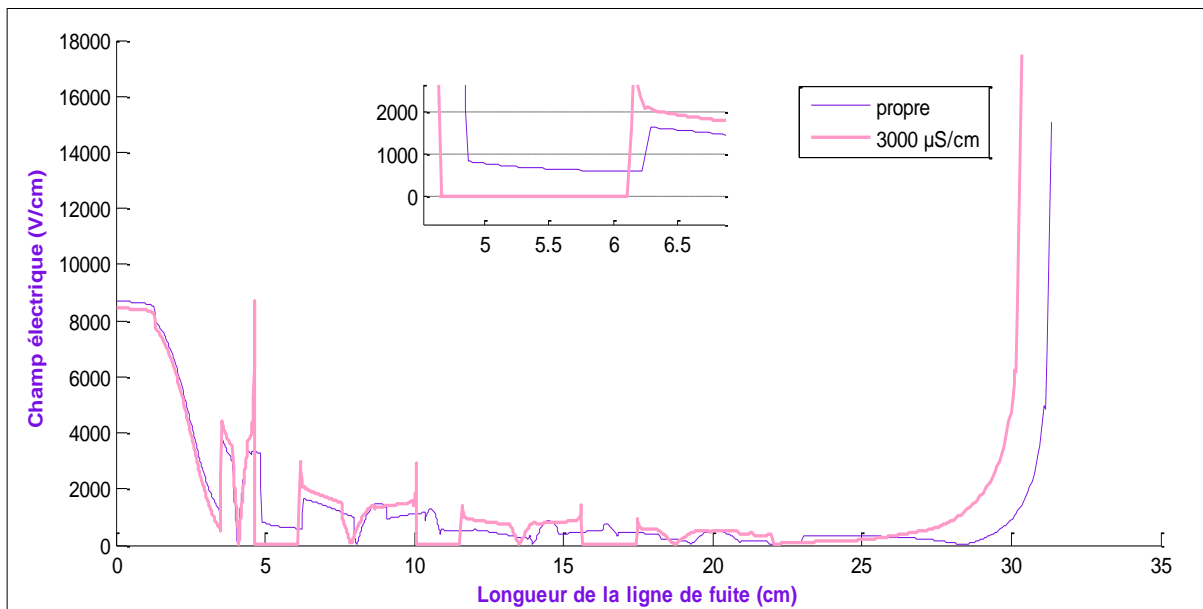
Figure IV.17 Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne, 1, 2 et 3 éléments dans le cas propre.

## IV.11 Distribution du champ électrique

Pour une de tension (30 kV), la figure (IV.18), (IV.20) et (IV.22) montre la variation de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur 1512L pour 1,2 et 3 éléments en fonction de la conductivité (3000 $\mu$ S/cm).



**Figure IV.18** Distribution du champ électrique d'un isolateur pour un élément, dans les deux cas propre et polluée



**Figure IV.19** Champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur (un élément), dans le cas propre et polluée

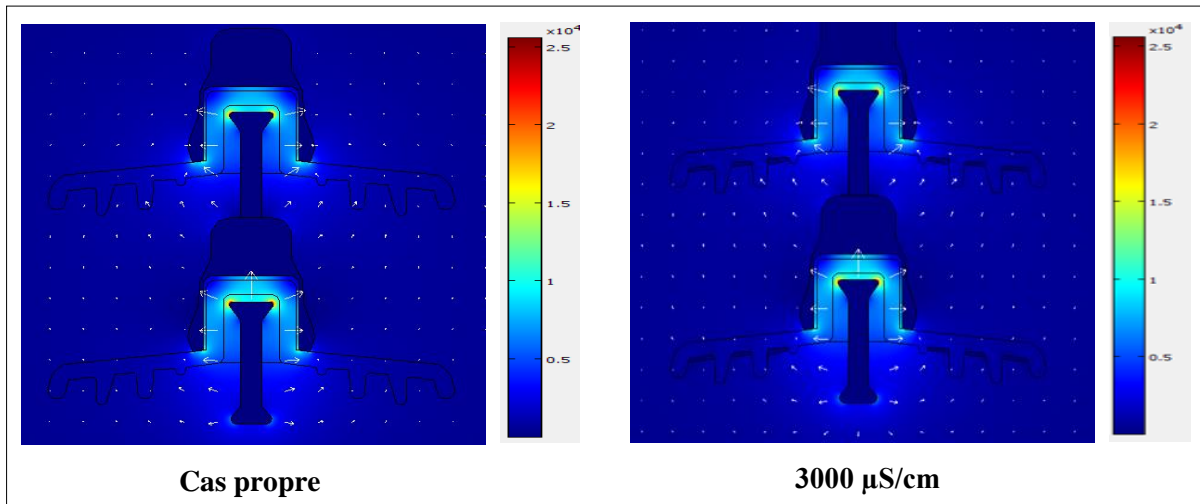


Figure IV.20 Distribution du champ électrique d'un isolateur pour deux éléments, dans le cas propre et polluée

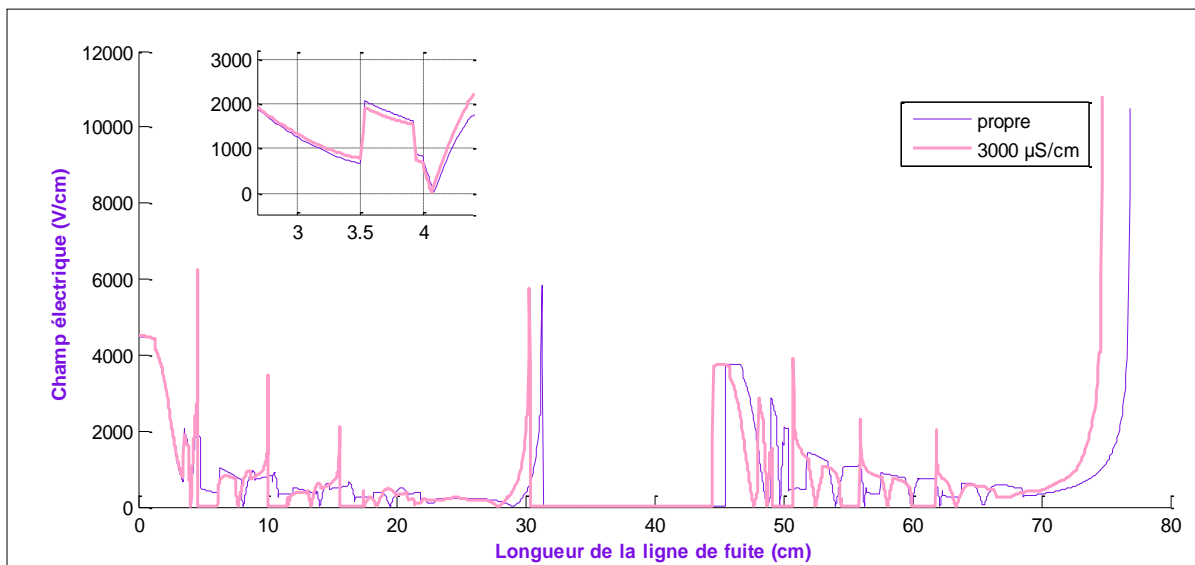


Figure IV.21 Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateur (deux éléments), dans le cas propre et polluée

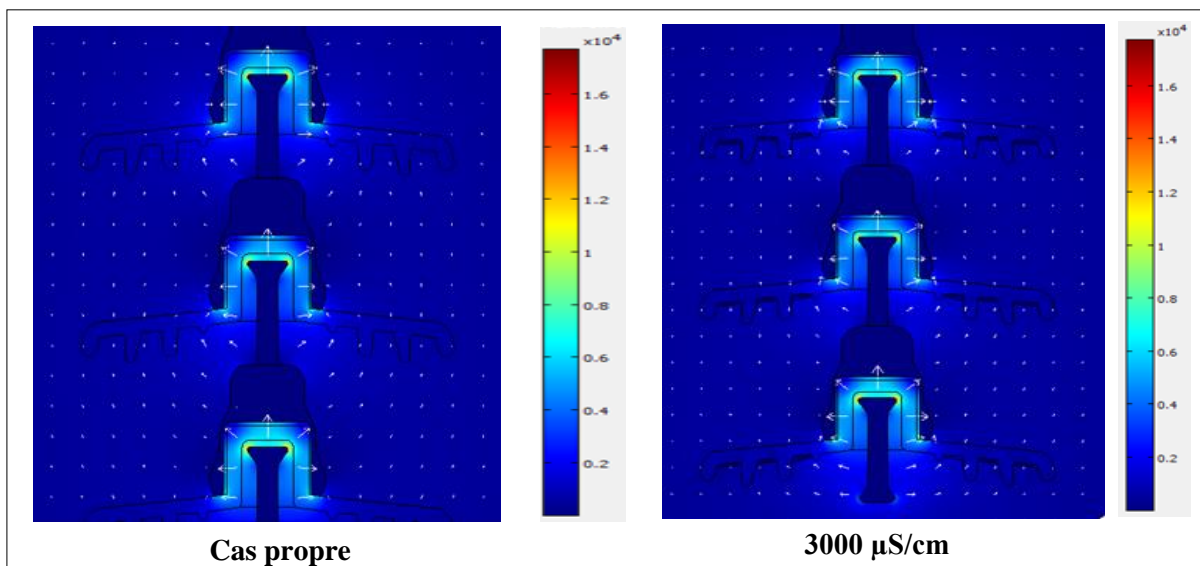
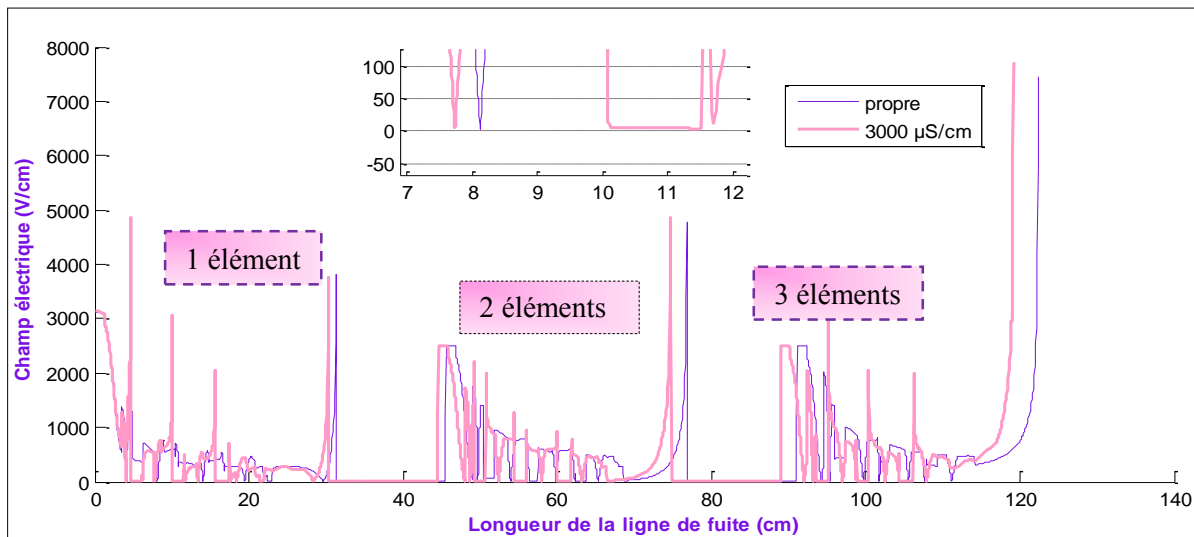


Figure IV.22 Distribution du champ électrique d'un isolateur pour trois éléments, dans les deux cas propre et polluée



**Figure IV.23** Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs, trois éléments, dans les deux cas propre et polluée

Pour la même tension (30 kV), et d'après les figures (IV.19, IV. 21 et IV.23) qui montre la variation de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne. Nous constatons :

- influence légère sur l'intensité du champ électrique, la forme demeure la même.
- Le champ électrique n'est pas affecté par les conditions de la surface (polluée ou propre) de l'sauteur.
- Les lignes de champ électrique divergent de l'électrode active (orientées de l'électrode HV vers les extrémités de l'isolateur et convergent vers l'électrode de masse), le système devient moins rigide et la conductivité de la surface de l'isolateur augmente.
- À la proximité de l'électrode active, le champ électrique est intense et diminue à mesure qu'il s'éloigne de l'électrode active et se rapproche de l'électrode de masse. De plus, les lignes de champ électrique divergent (de l'électrode HV (active) à l'électrode de masse). Dans la zone proche de l'électrode active, le champ électrique est important et presque nul dans les zones propres.
- L'intensité du champ électrique est très élevée notamment lorsque le modèle pollué, dans le capot de l'isolateur.
- La diminution de la ligne de fuite dans le cas pollué.

#### IV.11.1 Influence du nombre d'éléments

Nous voyons clairement que le champ électrique se concentre uniquement sur les éléments soumis à une tension (électrodes HT et terre).

Par ailleurs, l'intensité du champ électrique augmente avec la diminution du nombre d'éléments.

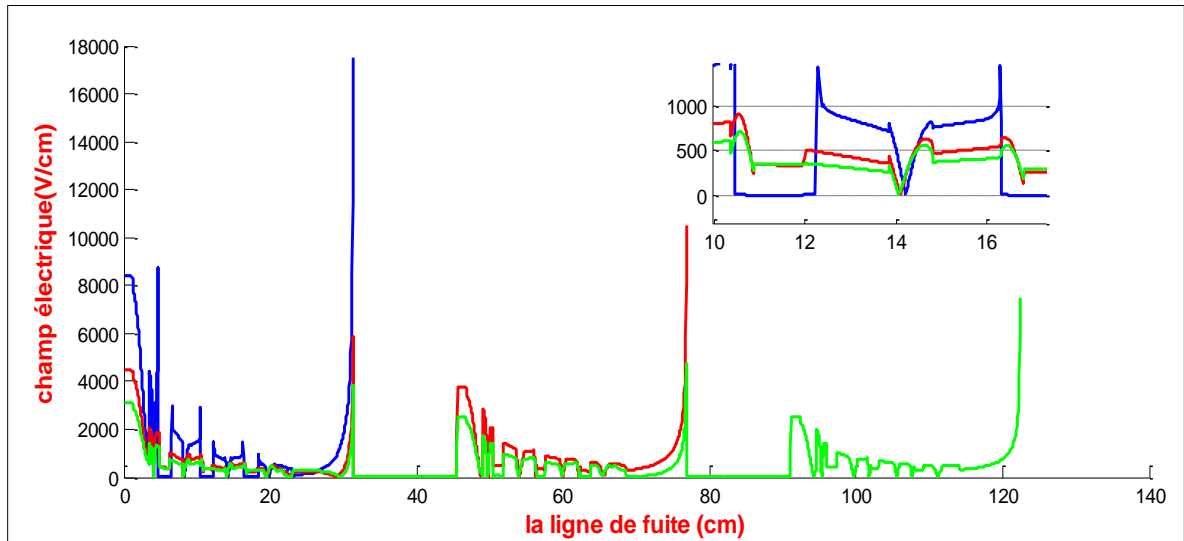


Figure IV.24 Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs, 1,2 et 3 éléments dans le cas propre

## IV.12 Comparaison entre FEMM et COMSOL

Nous essayons de comparer entre les deux logiciels qui utilisent la méthode des éléments finis (COMSOL et FEMM).

Les figures (IV.25) et (IV.26) illustrent respectivement la variation du potentiel et du champ le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs dans le cas propre par MATLAB.

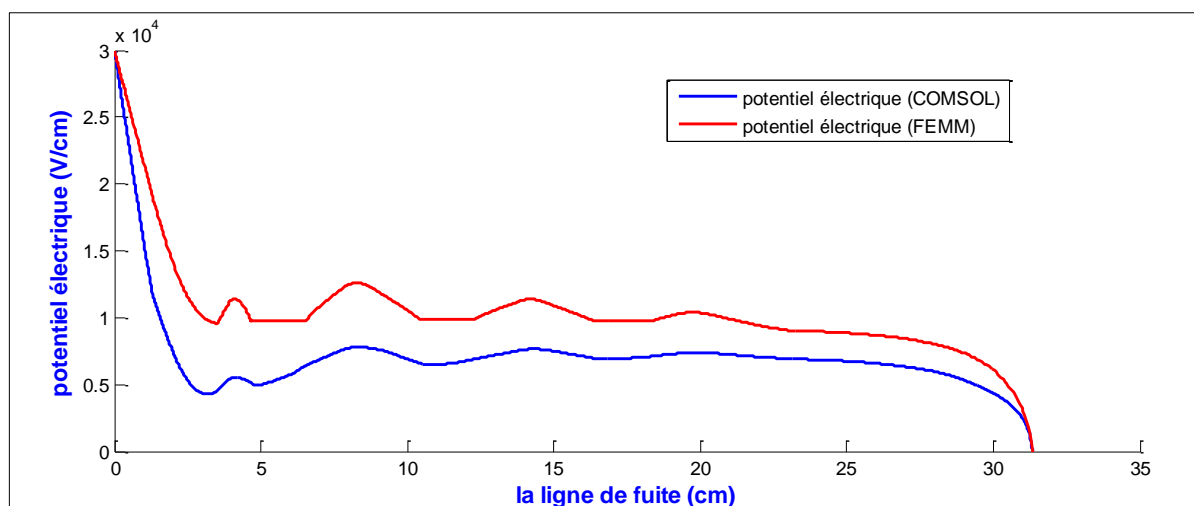
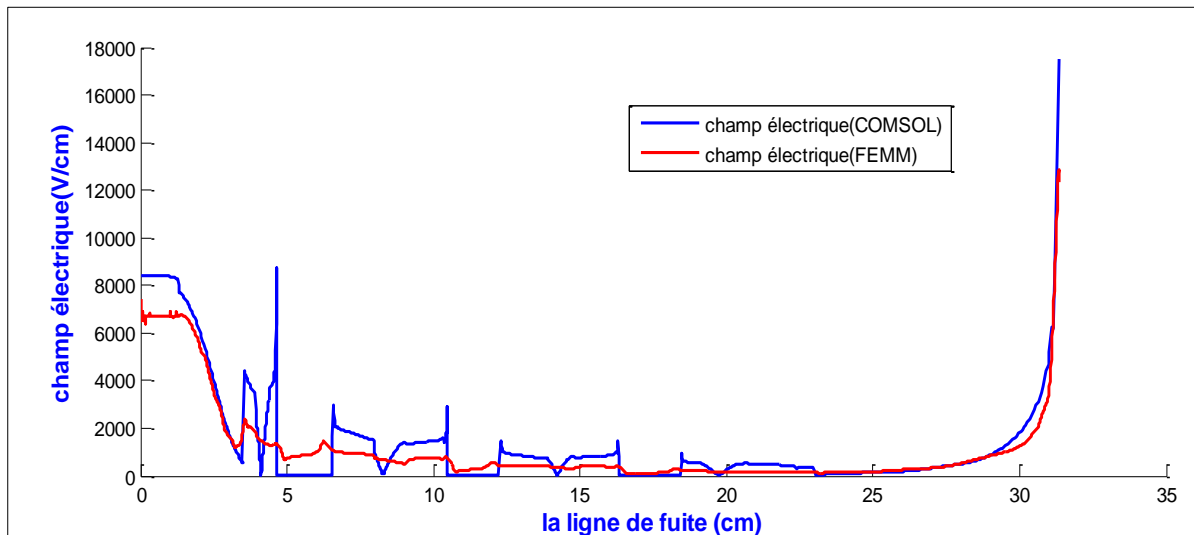


Figure IV.25 Variation du potentiel le long de la ligne de fuite (un élément) dans le cas propre



**Figure IV.26** Variation du champ électrique le long de la ligne de fuite (un élément) dans le cas propre

	FEMM	COMSOL
Temps de calcul	Long	Petite
Poursuite (COMSOL-FEMM)	Bonne	Bonne
Nombre d'éléments	33205	59384

**Tableau IV.1** Comparaison entre FEMM & COMSOL

- Nous trouvons aussi la différence dans les méthodes itératives.
- Il faut voir l'expérimentale pour meilleure comparaison entre FEMM et COMSOL.

Nous avons comparé les résultats ainsi obtenus avec ceux obtenus sous FEMM. Une forte adéquation entre les résultats des deux logiciels a pu être observée.

Les résultats obtenus par les deux logiciels de simulations ont permis de conclure que les deux méthodes présentent une très forte corrélation.

### IV.13 Conclusion

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de la différente simulation effectuée sur le modèle d'un isolateur 1512 L (un, deux et trois éléments). Ce chapitre nous a permis étude la distribution du potentiel et du champ électrique par deux logiciels COMSOL ainsi FEMM basé sur la méthode de élément fini.

Comme principaux résultats, nous pouvons dire que la conductivité de la couche polluante n'a pratiquement pas d'effet sur les répartitions du potentiel et du champ électriques. Par contre l'état de surface de l'isolateur influe sur la répartition du champ électrique. Ce dernier est plus élevé dans le cas pollué (un, deux ou trois éléments).

## *Conclusion général*

Notre travail a porté sur l'étude de diagnostic de l'état de surface d'un isolateur et chaîne d'isolateurs de haute tension pour voir la distribution du potentiel et du champ électriques le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs réel. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Mutliphysics, ainsi le FEMM basé sur la méthode des éléments finis. Ce travail, nous avons jugé nécessaire de le développer suivant deux parties distinctes:

- Une partie théorique porte sur l'isolateur de haute tension, ainsi le phénomène de pollution,
- Une partie de simulation permettant la détermination des distributions du potentiel et du champ électriques le long de la chaîne d'isolateurs 1en utilisant 1512L en 2D en utilisant le FEMM et Comsol multiphysics.

Les résultats de simulation obtenus concernant la distribution du champ électrique ainsi la distribution du potentiel électrique en fonction de la distance de ligne de fuite a été également étudiée, sont représentés dans le quatrième chapitre. Nous avons clôturé notre chapitre par une comparaison entre les deux programmes basé sur la méthode des éléments finis. (FEMM & Comsol).

Comme principaux résultats, nous pouvons dire que:

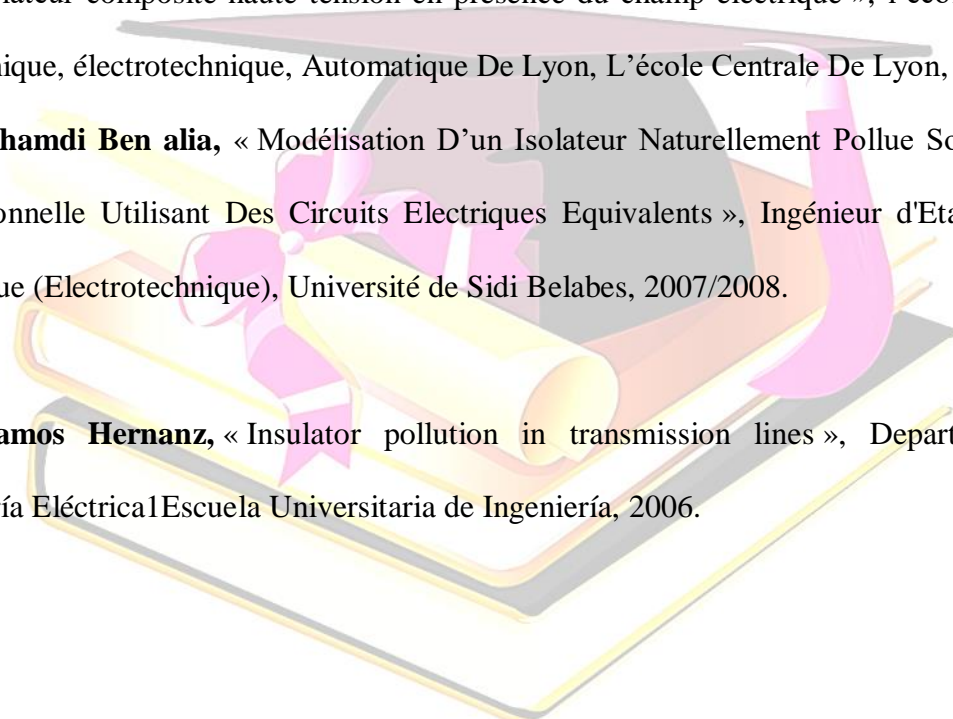
- La conductivité de la couche polluante n'a pratiquement pas d'effet sur les répartitions du potentiel et du champ électriques. Par contre l'état de surface de l'isolateur influe sur la répartition du champ électrique.
- Le champ maximal est atteint au niveau de la tige quelles que soient les dimensions de l'isolateur ( un, deux et trios elements) donc le champ reste relativement élevé au niveau du capot.
- L'isolateur ou la chaîne d'isilateurs, est plus rigide dans le cas proper, et deviant moins rigide dans le cas polluée.
- Le champs est relativement intense au niveau de capot a l'etat polluée
- Les résultats obtenus par les deux logiciels de simulations ont permis de conclure que les deux méthodes présentent une très forte corrélation.

La démarche suivie et les résultats présentés dans ce travail ouvrent de multiples perspectives tant d'un point de vue expérimental que d'un point de vue de la modélisation et de la simulation numérique des phénomènes physiques intervenant sur des isolateurs de lignes

de transport et de distribution de l'énergie électrique dans des conditions d'humidité (pluie, rosée ...) dans le but d'optimisation du modèle réel en utilisant ANSYS fenêtre surface de réponse.

## *Références bibliographiques*

- [1] **Adel Kara**, « contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué » mémoire de magister, département de génie électrique, UNIVERSITE de SETIF 1 UFAS(ALGERIE), 2013.
- [2] **Sayah Moatez Béllah**, « Prédiction Du Contournement D'une Chaîne D'isolateur Mt 175 Ctv-Sonelgaz Polluée Artificiellement Par La Logique Floue », Mémoire De Fin D'études En Vue De L'obtention Du Diplôme : Master, Département De Génie Electrique, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [3] **S. Tounsi, F. Chikh**, « Influence Du Sol Sur Le Comportement D'un Modèle d'Isolateur Sous Tension », Mémoire Du Projet De Fin D'études Pour L'obtention Du Diplôme d'Ingénieur d'Etat En Electrotechnique, Département De Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, 2008.
- [4] **Beriala, Agal**, «Détection Des Phénomènes De Conductions Des Isolateurs Polluent De Haute Tension », Mémoire de Master Professionnel, département d'électronique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [5] **Abdelouahab Mekhaldi**, « 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.
- [6] **M. A. Boudjamaa, R. Sebti**, « Modélisation Des Phénomènes De Pollution Des isolateurs De Haute tension », Mémoire de Master, université d'Ouargla, 2012.
- [7] **Hamza Slamet Amina**, «Contribution à l'étude du modèle développé d'un isolateur Pollué », Mémoire de Magister en électrotechnique, université d'Oran, 2013.

- [8] **Fatiha Aouabed**, « Contribution A L'étude D'un Circuit Equivalent Des Isolateurs Synthétiques Sous Pollution En Utilisant L'emtp », Mémoire De Magister, Sétif.
- [9] **Dilmi. A, Maarouf. A**, « Influence De La Pollution Sur Le Comportement D'un Modèle Plan D'isolateur Sous Haute Tension », Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme De Master, Département Génie Electrique, 2017.
- [10] <http://www.hydroquebec.com/comprendre/notions-de-base/vocabulaire.html>.
- [11] INSULATORS, Glass insulators, isolateurs en verre.
- [12] **Satta Samia**, «contribution à l'étude de l'influence de la pollution discontinue sur le Comportement des isolateurs : expérimentation et simulation », mémoire de magister, Sétif.
- [13] **Bentriou Cherifa**, « simulation numérique d'un isolateur de haute tension a fréquence industrielle 50 Hz », mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme master en génie électrique, Université Mohamed Boudiaf Msila, 2015/2016.
- [14] fiche technique/Québec, traitement thermique de verre, version 2.1.
- [15] <http://www.miroiteriegbm.com/Les-verres-trempes>
- [16] **Ndoumbe Jean**, « Étude comportementale des gouttelettes d'eau déposées sur la surface d'un isolateur composite haute tension en présence du champ électrique », l'école doctorale Électronique, électrotechnique, Automatique De Lyon, L'école Centrale De Lyon, 2014.
- [17] **M'hamdi Ben alia**, « Modélisation D'un Isolateur Naturellement Pollue Sous Tension Impulsionnelle Utilisant Des Circuits Electriques Equivalents », Ingénieur d'Etat en Génie Electrique (Electrotechnique), Université de Sidi Belabes, 2007/2008.
- [18] **Ramos Hernanz**, « Insulator pollution in transmission lines », Departamento de Ingeniería Eléctrica Escuela Universitaria de Ingeniería, 2006.
- 

- [19] **N. Khairoune et A. D. Zellouta**, « Essais Sur Isolateurs Pollues Et Modélisation », Mémoire du projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007/2008.
- [20] **M. Bouhamama**, « Modélisation Du Contournement Sur isolateur Réel Pollue », doctorat en science, département électrotechnique, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, 2018.
- [21] **Meraghni Tahar, Guia Issam**, « L'effet de la pollution désertique sur l'isolateur de haute tension », Université d'El Oued, Département des Sciences et de la Technologie, Mémoire, 2014 / 2015.
- [22] **Mebaoudj. S, Mezaour. H**, « prédiction de la tension de contournement d'un isolateur de haut tension en utilisant a logique floue », Universite Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des Sciences Appliquées, Département de Génie Electrique, 2015.
- [23] **Bouzeroura Abdelghani**. « Etude du développement d'arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue », Mémoire de Magister, Département d'électrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Béjaia, 2007-2009.
- [24] **M. Récan**, « Application de la méthode des éléments finis à la simulation des transferts dans les eaux souterraines », bureau de recherches géologiques et minières, département eau, 1986.
- [25] **Ourdia Hamadouche**, « Modélisation numérique du transport de charges dans les diélectriques soumis à un champ électrique extérieur », Mémoire, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Département de physique.
- [26] **Yahia Abdelhamid Kerdache**, « Etude de l'influence du maillage sur la simulation de la fatigue mécanique de l'acier 304L », Mémoire de Master, Département de Métallurgie, 2016.

- [27] **M. ouchen Lyamine**, « Modélisation Et Simulation Des Isolateurs Par La Méthode Des Eléments Finis », Université Ferhat Abbas-Setif, Département d'Electrotechnique, 2010.
- [28] **M. O. Meftah, M. Rahal**, « Performances d'Isolateurs HT Pollués sous Tension Alternative 50Hz et Distributions du Champ et du Potentiel Electriques utilisant COMSOL », école nationale polytechnique, département d'électrotechnique, Mémoire du Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, 2011.
- [29] « Actionneur A Réductance Expérimentation Simulée Par Calcul Des Champs Utilisation De Femm », Université Laval, Département De Génie Electrique Et De Génie Informatique, Gel-2004 Design Ii.
- [30] **Rebahi Fares**, « Etude De L'influence Des Paramètres Géométriques Et De Contrôle Sur Les Performances Des Mrv Cylindriques », Université Des Frères Mentouri Constantine, Département D'electrotechnique, 2016.
- [31] **Christian Le Cartier de Veslud**, « présentée devant l'Institut National Polytechnique de Lorraine pour l'obtention du titre de Docteur de l' I.N.P.L », 1991.
- [32] <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:KCHw0UBrLHMJ:https://elearn.univ-ouargla.dz/2013-2014/main/document/document.php%3FcidReq%3DMECANIQUE%26action%3Ddownload+folder+%&cd=1&hl=fr&ct=clnk&gl=dz>
- [33] **Hervé Oudin**, « Méthode des éléments finis », Engineering school. Ecole Centrale de Nantes, 2008, pp.63. ffcel-00341772v1f.
- [34] **Mariem Ben Hamouda**, « étude, conception et modélisation de la diffusion de la chaleur dans les tissus biologiques », mémoire présenté à l'université du québec à trois-rivières, mars 2015.

- [35] **Seyf Eddine Hamdi**, « Modélisation d'une machine asynchrone par logiciel COMSOL –Multiphysics », Mémoire de Fin d'Etudes, Université Mohamed Khider Biskra, Département de Génie Electrique, 2018.
- [36] **Khelfaoui. A, Bouberma. O**, « modélisation par méthode des éléments finis des phénomènes de conduction surfacique sur l'isolateur pollues », Mémoire de master académique, Universite Kasdi Merbah Ouargla, Département de Génie Electrique, 2014.
- [37] **H. Benguesmia, N. M'ziou, A. Boubakeur**, «simulation of the potential and electric field distribution on high voltage insulator using the finite element method », diagnostyka, 2018, vol. 19, no. 2.



### ملخص:

ان الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو محاكاة توزيع الكمون والحقل الكهربائي على طول خط التسرب لعوازل ملوث التوتر العالي من نوع 1512L اصطناعيا تحت توتر متناوب 50 هرتز .  
اخذين بعين الاعتبار تأثير بعض العوامل المتمثلة في قيمة الناقلية، وعدد العوزال المستعملة في السلسلة.  
بالاضافة الى مقارنة النتائج المتحصل عليها :  
باستعمال برنامج COMSOL Multiphysics و FEMM الذي يعتمد على طريقة العناصر المنتهية.  
النتائج المتحصل عليها جيدة وواحدة.  
الكلمات المفتاحية:العوازل، تلوث، محاكاة، ناقلية، كمون، حقل كهربائي.

### Résumé :

L'objectif principal de cette étude est de simuler en 2D la répartition du potentiel et du champ électrique, le long de la ligne de fuite d'isolateur de type 1512L artificiellement pollué sous tension alternative 50Hz.

Nous avons pris en considération l'influence la conductivité des couches polluées, ainsi le nombre d'élément de la chaîne, ainsi la comparaison entre les résultats obtenus.

En utilisant les deux logiciels FEMM et COMSOL Multiphysics, basés sur la méthode des éléments finis. Les résultats sont favorables et prometteurs.

**Mots Clés :** isolateur, pollution, simulation, Conductivité, champ électrique, potentiel électrique, COMSOL Multiphysics, FEMM.

### Abstract :

The principal objective of this study is to simulate in 2D the repartition of the electric potential and field along of the leakage distance of the polluted insulator under alternating voltage 50Hz.

Taking into account some of parameters, the pollution layer's conductivity, the number of insulators thus the comparison between the results obtained

Using the FEMM and COMSOL Multiphysics software based on the finite element method. The results are auspicious and promising.

Key words : insulators, pollution, simulation, conductivity, potential, electric field, COMSOL Multiphysics, FEMM.