

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



**Projet de Fin d'Etudes**  
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur  
d'Etat en Electrotechnique

### Thème

Etude numérique comparative des  
différents Modèles d'Isolateur, en  
présence de conducteurs parasites, sous  
Tension Alternative 50 Hz

**Proposé et Dirigé par :**

Mme: D.Namane

**Etudié par :**

Mr : TITI Oussama

Mr : KOULL Elmoatazz

Promotion Juin 2012

## ***Remerciements***

*Nous tenons à remercier vivement notre promotrice Mme D.NAMANE, pour ses précieux conseils qu'elle ne cessait de nous prodiguer, de même sa grande contribution et son soutien moral apportés tout le long de notre travail.*

*Nos sincères et chaleureux remerciements à Messieurs A.BOUBAKEUR, A.MEKHALDI et M.Teguar professeurs à l'École Nationale Polytechnique d'Alger, pour leurs aides, leurs appuis moral, et leurs qualités humaines.*

*Nous tenons également à remercier le président et les membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.*

*Que tous les professeurs ayant contribué à notre formation trouvent ici notre profonde reconnaissance.*

## *Dédicaces*

*A mes très chers parents, dont le sacrifice, l'amour, la patience, le soutien, l'encouragement et les prières sont l'essence de ma réussite. Merci d'être si fiers de moi.*

*A la mémoire de ma grande-sœur Nour Elhouda*

*A mes chers frères et sœurs : Aymen, Oumeima et Cheima*

*A toutes mes amies qui m'aiment et à tous ceux qui m'apprécient*

*Je dédie ce mémoire*

*Oussama*

## *Dédicaces*

*A mes très chers parents, dont le sacrifice, l'amour, la patience, le soutien, l'encouragement et les prières sont l'essence de ma réussite. Merci d'être si fiers de moi.*

*A la mémoire de mes grands-parents*

*A mes chers frères et soeurs : Afaf, Rokaia, Jouhaina, Radouane, Oussama, Yahia et Ishak.*

*A toute ma famille*

*A toute la famille ABIMOULOUUD et ABACHA {hibato-elrahman}.*

*A toute Jma3a Khawetna " tche3 l'entreprise".*

*A toute la promo ENP 2012*

*A tous ceux qui ont su croire en moi*

*A tous ceux qui me sont chers*

*Je dédie ce modeste travail .... aya terbah !!!*

*Elmoatazz*

## ملخص:

في هذا العمل، تطرقنا الى تصرف و تمييز نموذج عازل ذو هندسة بسيطة، تكمن هذه الدراسة أساسا في انشاء السعة التي يعرضها بدلالة عدة عوامل كهر و هندسية، في حالة نظيفة ثم ملوثة. كذلك ندرس درجة تأثير نواقل مشوشة على السعة و ذلك حسب وضعيتها و درجة قربها من النموذج المدروس. وجدنا تأثير معتبر على السعة من طرف الناقل المشوش عندما يكون في جهة التوتر العالي خصوصا من أجل مسافات كبيرة للنموذج عن الأرض. تستند دراستنا على تحليل توزيع الشحنة باستخدام برنامج حساب الحقل FEMM4.0 لتفسير نتائج المحاكاة.

**كلمات مفتاحية:** توتر مرتفع، عازل، تلوث، سعة، ثنائي كهربائي، محاكاة، ناقل مشوش، خط التسرب، قطب كهربائي، مقطع، FEMM4.0.

## Résumé:

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés au comportement et à la caractérisation d'un modèle d'isolateur de géométrie simple. L'étude consiste principalement à établir la capacité qu'il présente en fonction de nombreux paramètres électro-géométriques, à l'état propre puis pollué.

Nous étudions en outre, le degré d'influence des conducteurs parasites sur la capacité, selon leur disposition et leur rapprochement du modèle étudié.

Une influence considérable du conducteur parasite placé côté HT sur la capacité est établie, en particulier pour les grandes hauteurs par rapport au sol.

Notre étude est basée sur l'analyse de la répartition de charge (utilisant le logiciel de calcul de champ FEMM 4.0) pour l'interprétation des résultats simulés.

**Mots-Clés :** Haute tension, isolateur, pollution, capacité, diélectrique, simulation, conducteurs parasites, ligne de fuite, électrodes, profil, FEMM4.0.

## Abstract:

In this work, we investigated the behavior and characterization of a model insulator of simple geometry. The study is mainly to establish the capacitance, in function of numerous electro-geometrical parameters, in clean condition then in a polluted one.

We also study the degree of influence of parasitic conductors on the capacitance, according to their disposition and approximation of the model studied.

Considerable influence of the parasitic conductor placed on the HV side on the capacitance is established, especially for large heights from the ground.

Our study is based on the analysis of load balancing (using the field calculation software FEMM 4.0) for the interpretation of simulated results.

**Keywords:** High voltage; insulator, pollution, capacitance, dielectric, simulation, parasitic conductors, creepage distance, electrodes, profile, FEMM4.0.

# Sommaire

---

---

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>01</b>
-----------------------------------	-----------

---

## **CHAPITRE 1 : INTRODUCTION**

<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>03</b>
<b>I.2. Définitions.....</b>	<b>03</b>
<b>I.3. Isolations de haute tension.....</b>	<b>04</b>
I.3.1.Fonctionnement et constitution d'un isolateur.....	04
I.3.2.Types d'isolateurs.....	05
I.3.3.Matériaux utilisés dans la fabrication des isolateurs.....	07
<b>I.4. Pollution des isolateurs.....</b>	<b>08</b>
I.4.1. Sources de pollution.....	08
I.4.2.Contournement d'un isolateur pollué.....	09
I.4.3. Technique de lutte contre la pollution.....	10
<b>I.5. Principaux modèles statiques de contournement.....</b>	<b>12</b>
I.5.1.Modèle d'Obenaus.....	12
I.5.2.Modèle de Neumarker.....	13
I.5.3.Modèle de Rizk.....	13
I.5.4.Modèle de Claverie et Porcheron.....	14
I.5.5.Modèle de Rao et Gopal.....	14
I.5.6.Modèle de Wilkins.....	15
<b>I.6. Modèles étudiés au laboratoire de l'ENP.....</b>	<b>15</b>
I.6.1.Modèle de A.Mekhaldi et S.Bouazabia.....	15
I.6.2.Modèle de D.Namane.....	16
I.6.3.Modèles de M. Tegar.....	17
<b>I.7.Conclusion.....</b>	<b>20</b>

**CHAPITRE 2 : INTRODUCTION AU CODE DE CALCUL**

<b>II.1. Introduction</b> .....	21
<b>II.2. Equations de base de l'électromagnétisme</b> .....	21
II.2.1 Relations constitutive.....	21
II.2.2 Equations de Maxwell.....	24
II.2.3 Equations de Laplace et de Poisson.....	25
<b>II.3. Conditions aux limites à la surface de séparation de diélectrique</b> .....	25
<b>II.4. Cas des isolateurs haute tension</b> .....	27
II.4.1 Notions fondamentales.....	27
II.4.1.1 Relation entre charges et capacités.....	27
II.4.1.2 Relation entre résistance et capacité pour un même réseau de lignes de champ.....	28
<b>II.5. Méthodes de calcul du champ et de potentiel électrique</b> .....	30
II.5.1 Méthode des différences finis.....	30
II.5.2 Méthode des charges équivalentes.....	31
II.5.3 Méthode des éléments finis de frontières.....	31
II.5.4 Méthode des éléments finis.....	31
<b>II.6. Introduction au fonctionnement de FEMM</b> .....	33
<b>II.7. Conclusion</b> .....	36

---

**CHAPITRE 3 : Influence des dimensions et de la forme des électrodes sur la capacité du modèle**

<b>III.1. Introduction</b> .....	37
<b>III.2. Modèle de D.Namane</b> .....	37
<b>III.3. Description des modèles adoptés par simulation</b> .....	40
<b>III.4. Simulation</b> .....	41
III.4.1. Influence des dimensions des électrodes dans le cas des électrodes rectangulaire.....	41
III.4.2. Influence des dimensions des électrodes dans le cas des électrodes demi-circulaire.....	42
III.4.3. Influence de la forme des électrodes.....	44
<b>III.5. Interprétations : Répartition du champ électrique</b> .....	45
III.5.1. Influence de la largeur des électrodes.....	47
III.5.2. Influence de l'épaisseur des électrodes.....	49

<b>III.6. Conclusion.....</b>	<b>54</b>
-------------------------------	-----------

---



---

**CHAPITRE 4 : *Influence de la position des électrodes sur la capacité du modèle***

<b>IV.1. Introduction.....</b>	<b>55</b>
<b>IV.2. Approche de la forme réelle d'un isolateur : différents profils d'isolateurs à capot et tige.....</b>	<b>55</b>
<b>IV.3. Description des modèles.....</b>	<b>57</b>
<b>IV.4. Simulation.....</b>	<b>58</b>
IV.4.1. Influence des dimensions de la plaque.....	58
IV.4.1.1. dans le cas de 1 <sup>er</sup> modèle.....	58
IV.4.1.2. dans le cas de 2 <sup>ème</sup> modèle.....	60
IV.4.2. Influence de la position des électrodes.....	62
IV.4.3. Influence de la proportion de la pollution sur l'isolateur.....	62
<b>IV.5. Interprétation: Répartition du champ électrique.....</b>	<b>65</b>
IV.5.1. Influence des dimensions de la plaque.....	65
IV.5.1.1. Influence de la largeur de la plaque.....	65
IV.5.1.2. Influence de l'épaisseur de la plaque.....	67
IV.5.2. Influence de la proportion de la pollution.....	69
<b>IV.6. Conclusion.....</b>	<b>72</b>

---



---

**CHAPITRE 5 : *Influence de la position des conducteurs parasites sur la capacité du modèle***

<b>V.1. Introduction.....</b>	<b>73</b>
<b>V.2. Influence d'un conducteur parasite.....</b>	<b>73</b>
<b>V.3. Description des modèles.....</b>	<b>77</b>
<b>V.4. Simulation.....</b>	<b>78</b>
V.4.1. Influence du sol.....	78
V.4.2. Influence de la présence d'un conducteur parasite dans le côté d'électrode HT.....	79
V.4.3. Influence de la présence d'un conducteur parasite dans le côté d'électrode terre.....	80
V.4.4. Influence de la présence de plusieurs conducteurs parasites.....	81
<b>V.5. Erreur relative.....</b>	<b>83</b>



## Sommaire

---

---

<b>V.6.Conclusion</b> .....	86
-----------------------------	----

---

---

<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	87
----------------------------------	----

---

---

<b>Références bibliographiques</b> .....	89
--	----

***INTRODUCTION***

***GENERALE***

## Introduction générale

De nos jours, l'énergie électrique joue un rôle très important dans le développement et l'évolution de l'industrie et l'économie du pays. De ce fait, il faut assurer, à tout instant, un bon équilibre entre la demande croissante et la production de l'énergie. C'est pour cela, qu'une très grande part d'importance est attachée aux réseaux électriques, principalement aux lignes de haute tension.

Les isolateurs, choisis en fonction des contraintes locales sont dimensionnés de façon à assurer une isolation correcte entre le pylône et les câbles sous tension [1].

Ces isolateurs des lignes et de poste de transport d'énergie électrique sont le siège de plusieurs contraintes. Entre autres, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie.

De nombreux types d'isolateurs sont utilisés dans la pratique. Ceux-ci ont un profil variable, choisi en fonction des conditions géographiques dans lesquelles ils sont exploités. Cependant, la prise en compte du profil réel de l'isolateur par les chercheurs complique l'observation des phénomènes électriques [2] et nécessite, pour la simulation, l'exécution de calculs numériques plus ou moins laborieux [3, 4].

Aussi, afin de mieux étudier le comportement des isolateurs de haute tension sous pollution, différents modèles de laboratoire ont été proposés [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Ces travaux présentent l'avantage de contourner la difficulté liée à la forme complexe de l'isolateur, par des modèles à géométrie simple. Pour cela la plupart des auteurs cités ci-dessus ont remplacé l'isolateur par une simple plaque parallépipédique isolante et la ligne de fuite de l'isolateur par la distance inter-électrodes. De plus, certains modèles [7, 9, 10, 12] tiennent compte de la discontinuité de la couche de pollution, car celle-ci constitue un facteur incontournable dans le comportement de l'isolateur, ainsi que sur de nombreux modèles de laboratoires, soumis à divers paramètres électro-géométriques [9, 10]. Ces travaux ont conduit à quelques modèles empiriques et des algorithmes de calculs, en régime statique puis dynamique [11, 12]. C'est dans ce contexte que nous nous proposons, dans ce travail, de compléter les travaux effectués au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique, en nous intéressant à l'influence de plusieurs paramètres comme la forme et les dimensions des électrodes, les dimensions de la plaque, la position d'électrodes, la pollution et la présence des conducteurs parasites sur la capacité d'un modèle simulé, en utilisant le logiciel de calcul du champ bidimensionnel FEMM4 (Finite Element Magnetism Method), nous a permis de vérifier les caractéristiques de cette capacité.

Nous avons ainsi établi le lien entre la capacité simulée et les charges induites sur les conducteurs, pour différents paramètres électro-géométriques. Il ressortira de notre étude plusieurs résultats concernant l'effet de ces paramètres.

Notre mémoire est donc structurée en cinq chapitres distincts.

Dans le premier chapitre, nous rappelons quelques définitions spécifiques au domaine de la haute tension pour nous intéresser ensuite aux problèmes liés à la pollution. Nous évoquerons alors quelques méthodes de maintenance et de lutte contre les perturbations causées par ce phénomène, nous présenterons quelques travaux effectués à l'extérieur et au laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Ceux-ci nous ont conduits à opter pour un modèle à géométrie extrêmement simple (modèle plan-plan). Ce choix délibéré a pour objectif de caractériser au mieux l'interface air-matériau diélectrique, c'est-à-dire la zone propre de l'isolateur.

Nous commençons le deuxième chapitre par rappeler quelques équations de base de l'électromagnétisme caractérisant le comportement électrique des diélectriques.

Nous nous intéressons par la suite, à leurs applications dans le domaine de la haute tension.

Différentes méthodes numériques de calcul du champ et du potentiel électriques y sont présentées, afin d'introduire le code de calcul FEMM4.0 et leur mode de fonctionnement.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats de simulations concernant l'influence de la forme et dimensions des électrodes sur la capacité apparente du modèle. De plus, nous étudions la distribution de charges et la répartition du champ électrique sur les conducteurs (haute tension et terre), afin de comprendre les phénomènes électriques et interpréter les résultats simulés.

Le quatrième chapitre présente les résultats de simulation concernant l'influence des dimensions de la plaque de verre et la position des électrodes, ainsi que la présence de la pollution sur l'isolant. On finira par une étude de répartition des charges afin d'interpréter les résultats simulés.

Le cinquième chapitre est entièrement consacré à l'étude d'influence de la présence de conducteurs parasites à proximité du modèle sur la capacité simulé.

Nous terminons par une conclusion générale.

# **CHAPITRE I**

*Introduction*

## I.1 Introduction

Le transport de l'énergie électrique nécessite, pour des raisons techniques et économiques l'utilisation de tensions élevées (lignes HT et THT).

Les équipements de haute tension (HT), présents dans les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique, sont supposés opérer de façon fiable quelles que soient les conditions environnementales. En particulier, les isolateurs, qui représentent relativement un faible pourcentage dans le prix des lignes aériennes, constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement de ces lignes.

Dans ce chapitre, nous rappelons quelques définitions spécifiques à ce domaine, puis présentons les différents types d'isolations dans les réseaux électriques. Nous nous intéressons, en particulier, aux isolateurs haute tension, ainsi qu'à leur constitution et fonctionnement.

Nous abordons également les problèmes liés au phénomène de pollution et son impact sur les performances des isolateurs. Certaines méthodes de maintenance et de lutte contre les perturbations causées par ce phénomène sont alors présentées. Nous présentons également quelques travaux de recherches effectués dans ce domaine.

## I.2. Définitions

On appelle « isolement » d'un ouvrage ou d'un appareil électrique, son aptitude à supporter la tension, ou plus généralement, les contraintes électriques qui lui sont appliquées.

On appelle « isolation » l'élément matériel ou l'ensemble des dispositifs constructifs qui assurent cet isolement. Il est clair qu'aucun diélectrique n'est capable de résister indéfiniment à l'application d'une tension d'amplitude croissante. Il se produit alors une rupture du pouvoir isolant qui se traduit par la formation d'un chemin conducteur à travers le corps isolant.

Les mécanismes de rupture diélectrique sont extrêmement complexes. Ceux-ci dépendent essentiellement de la forme de la tension appliquée (principalement la vitesse de croissance et l'amplitude) et de la nature de l'isolant (air, gaz, diélectrique solide ou liquide...).

Nous rappelons les principales définitions liées à ce domaine :

**I.2.1 -Décharge disruptive:** Phénomène associé à une défaillance de l'isolation sous l'effet de la contrainte électrique, avec chute de la tension et passage d'un courant (une décharge disruptive dans un diélectrique solide entraîne une perte permanente de la rigidité diélectrique) [13].

Dans la pratique on distingue plusieurs types de rupture diélectrique :

**I.2.2 -L'amorçage:** lorsque la disruption a lieu dans un gaz séparant deux électrodes métalliques [14].

**I.2.3 -Le contournement** : représenté par une décharge disruptive le long de la surface de séparation séparant un diélectrique solide et un gaz (*le long de la surface d'un isolateur en porcelaine*); lorsque le contournement se produit sur la surface elle-même, on parle plus volontiers de **cheminement**, surtout lorsqu'il subsiste des traces qui dégradent la surface de l'isolant [14].

**I.2.4 -Le claquage** : lorsque la rupture diélectrique s'est produite dans la masse d'un isolant solide, liquide ou composite (huile, papier dans l'huile, polythène ...). Toutefois ce terme est quelque fois utilisé dans le langage courant dans le cas de l'air [14].

**I.2.5 -Tension de tenue** : c'est le niveau de tension le plus important, que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive (contournement dans le cas des isolateurs) [15].

**I.2.6 -Ligne de fuite** : plus courte distance ou sommes des plus courtes distances suivant les contours des surfaces extérieures des parties isolantes entre les parties qui sont normalement soumises à la tension de service (une distance mesurée à la surface de la matière de scellement conductrice ne doit pas être considérée comme faisant partie de la ligne de fuite) [13].

**I.2.7 -Courant de fuite** : c'est un courant de faible amplitude circulant à travers la couche polluante humectée le long de la surface isolante. Il est de type électrolytique et peut être un courant résistif pour une isolation totalement polluée ou un courant capacitif dans le cas d'une isolation parfaitement propre [16].

**I.2.8 -Courant de fuite critique**: c'est le courant minimal nécessaire pour provoquer un contournement par pollution sur un isolateur à une tension donnée. Il est indépendant du procédé d'essai ainsi que de la forme de l'isolateur. Le seul facteur dont dépend ce courant sous une tension donnée est la ligne de fuite, c'est-à-dire la contrainte spécifique exprimée en kV/cm [9].

**I.2.9 -Longueur critique de l'arc** : c'est la longueur limite de l'arc partiel au-delà de laquelle l'arc conduira au contournement total [17].

**I.2.10 -Conductance superficielle** : la conductance superficielle est le rapport du courant de fuite (à fréquence industrielle) circulant à la surface de l'isolateur sur la tension appliquée. Elle caractérise l'état global de la surface isolante [17].

### **I.3. Isolations de haute tension**

#### **I.3.1.Fonctionnement et constitution d'un isolateur**

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes. Ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage), ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique), ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et

ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure) [18].

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement [19].

Du point de vue électrique, l'isolateur est considéré comme deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents. Ces isolants sont [19]:

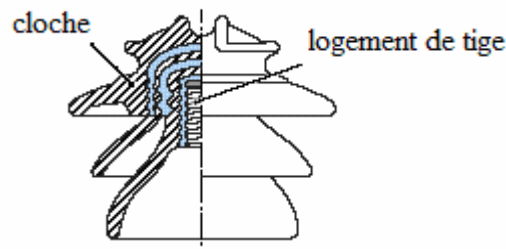
- L'intervalle d'air.
- Le matériau diélectrique.
- L'interface air - matériau diélectrique (la longueur de l'interface constitue la ligne de fuite le long de laquelle circulerait le courant de fuite).

### I.3.2. Type d'isolateur

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs: les isolateurs de type rigide et les éléments de chaîne [20].

#### I.3.2.1 Isolateur de type rigide

Un isolateur rigide (Figure I.1) est relié au support par une ferrure fixe. Cet isolateur est principalement soumis à des efforts de flexion et de compression, lorsqu'il est placé en position verticale. Il peut, dans certains cas, être placé horizontalement, voire à l'oblique. Ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 kV.



**Figure I.1:** Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre

#### I.3.2.2 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 :

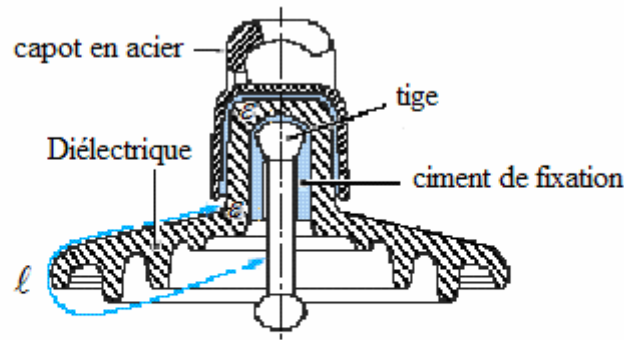
- Les isolateurs à capot et tige;
- Les isolateurs à long fût.



### I.3.2.2.1 Isolateurs à capot et tige

Chaque élément est constitué d'un capot, d'une partie isolante en forme de jupe et d'une tige [20].

La coupe d'un tel isolateur est schématisée sur la (Figure I.2). 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 [13].



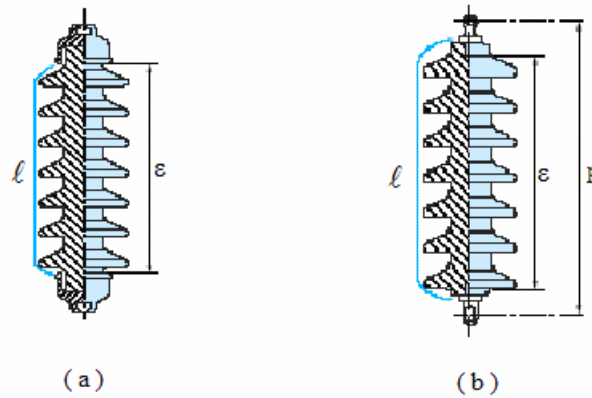
$l$  : plus courte distance dans l'air, extérieure à l'isolateur

$\varepsilon$  : Longueur du canal de perforation,

**Figure I.2:** Isolateurs à capot et tige

### I.3.2.2.2 Isolateurs à long fût

L'isolateur à long fût est constitué d'un bâton cylindrique en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques muni d'ailettes, à chaque extrémité duquel est fixée une pièce métallique de liaison. Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, soit elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (Figure I.3 (a)), soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (Figure I.3 (b)) [20].



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

P : Pas nominal.

$\varepsilon$  : Longueur du canal de perforation,  $\ell/2 \ll \varepsilon$

**Figure I.3:** Isolateurs à long fût

### I.3.3. Matériaux utilisés dans 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.

#### Isolants

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.

#### a) Céramiques :

Elles sont actuellement utilisées pour les isolateurs de haute tension et correspondent à des formules voisines, soit de l' $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  (porcelaine traditionnelle), ou de l' $Al_2O_3$ ,  $5 SiO_2$  (stéatite).

L'isolateur, après usinage de son ébauche cylindrique humide (type à capot et tige) ou sèche (type à long fût), est cuit dans un four à une température et pendant une durée convenable.

Certaines céramiques à grains très fins sont recommandées pour des isolateurs devant supporter des efforts mécaniques élevés.

#### b) Verres : Deux types sont utilisés : le verre recuit et le verre trempé.

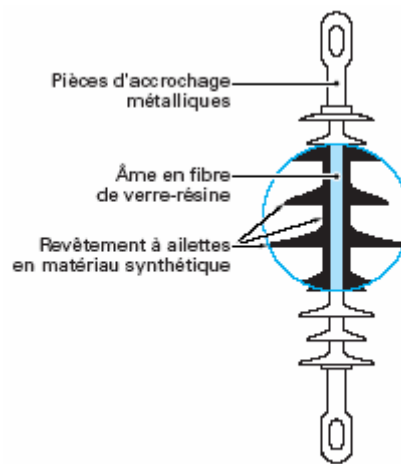
Le **verre recuit** a surtout été utilisé pour les isolateurs rigides. Malheureusement, on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de température. De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension.

Le **verre trempé** est obtenu par réchauffage de l'isolant retiré du moule à une température d'environ  $700^\circ C$ , puis refroidi par des jets d'air sous pression : les couches extérieures de la pièce isolante acquièrent rapidement une rigidité qui ne leur permet plus aucune déformation.

L'intérieur restant à une température supérieure à celle des couches extérieures, il ne peut se contracter librement, lors de son refroidissement ; il reste donc en extension et crée des contraintes de compression sur les couches superficielles. Le verre trempé présente une contrainte mécanique en traction environ 5 à 6 fois plus grande que celle du verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100 °C.

### c) 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 (Figure I.4). Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique [15].



**Figure I.4:** Isolateur composite

## I.4. Pollution des isolateurs

### I.4.1. Sources de pollution

Nous distinguons trois sortes de pollutions : la pollution naturelle, industrielle et mixte.

#### I.4.1.a. Pollution naturelle

La pollution naturelle provient de sels marins dans des régions côtières, de poussières du sol (notamment lors de chantiers importants) et de sables véhiculés par le vent en régions désertiques [21].

#### Pollution marine

Les lignes de haute tension qui passent près de la mer dans les zones côtières, sont exposées au vent marin. Ce dernier 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, parfois, la génération d'un contournement [15, 22].

### **Pollution désertique**

Parmi les phénomènes qui caractérisent la nature désertique, les vents de sable. Malheureusement, après ces vents, des dépôts de sable se déposent sur les surfaces des isolateurs. Lorsque ces dépôts s'humidifient, ils deviennent plus ou moins conducteurs à cause de l'existence de sels dans le sable. Un courant de fuite apparaît brusquement accompagné d'arc partiel, dont la propagation à la surface de l'isolateur peut aussi conduire à un contournement total de l'isolateur [22, 23].

#### **I.4.1.b. Pollution industrielle**

Le problème de la pollution industrielle se présente pour les lignes qui passent près des zones industrielles (les fumées des usines, raffineries, cimenteries, minerais,...), près des grandes villes (les gaz d'échappement des véhicules) ou près des terrains agricoles (les engrais utilisés en agriculture) [21].

#### **I.4.1.c. Pollution mixte**

Ce type de pollution est le plus dangereux. Cette pollution est la résultante de l'existence de différents types de pollution dans la même zone ; cas des isolateurs installés dans les zones industrielles situées près de la mer.

### **I.4.2. Contournement d'un isolateur pollué**

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

#### **Etape 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 [24]:

- ❖ 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 peuvent 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 fortes pluies et vents.

#### **Etape 2: Humidification de la pollution**

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

Pendant le cycle d'humidification, le courant de fuite augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale. Ce courant peut diminuer s'il y a assèchement. Le niveau du courant de fuite dépend du temps, de la nature ainsi que de la quantité des sels.

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

Par effet de joule, la température s'élève, l'eau s'évapore et le dépôt devient moins conducteur. Le courant de fuite est alors réduit en amplitude, par la présence d'une bande sèche. La répartition du potentiel sur l'isolateur est modifiée par cette bande sèche ; car la plus grande portion du potentiel électrique se trouve reportée à ses bornes. Si, cette bande sèche est insuffisante pour supporter le potentiel correspondant, un arc est créé à ses bornes [24].

**Etape 4: Comportement des arcs**

La résistance du dépôt humidifié, non court-circuitée par l'arc, limite le courant et la longueur de l'arc. Si, le courant est trop faible, l'arc s'éteindra, la bande sèche s'humidifiera à nouveau et le mécanisme se répètera encore. Tant que le courant de fuite n'excède pas "le courant critique" correspondant à "une longueur critique" de l'arc, cette situation reste stable. Dans le cas contraire, le contournement de l'isolateur peut survenir [25].

**I.4.3. Technique de lutte contre la pollution**

Pour un niveau de pollution donné, une bonne conception des lignes basée sur des mesures de sévérité de pollution permet de prévenir, autant que possible, les incidents lorsque la ligne est en service. Mais un changement dans les données d'un site est toujours possible, c'est-à-dire même un dimensionnement initialement correct peut s'avérer insuffisant dans certaines conditions [1].

Dans ces circonstances, on utilise des techniques comme l'allongement de la ligne de fuite, l'adaptation d'un autre type des isolateurs capable de résister aux contraintes de la pollution [9].

Par contre, certaines zones très localisées sont soumises à un niveau de pollution exceptionnel. Dans ce cas, la simulation de laboratoire n'est pas recherchée, car aucun isolateur de dimensionnement raisonnable n'est en mesure de résister à ces contraintes [14].

On préfère, généralement, utiliser d'autres types des techniques de lutte contre la pollution. Plusieurs moyens sont utilisés afin de prévenir, autant que possible, les incidents lorsque une ligne est en service.

Ces moyens de lutte doivent tenir compte des données propres au site considéré et au changement possible de la sévérité de pollution dû à de nouveaux facteurs (apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, ...). Les différentes méthodes utilisées consistent à [26, 1]:

**a) Allongement de la ligne de fuite**

Il permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux techniques sont employées :

- Le changement de type d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite): c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste [1].

- L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [27].

### b) Isolateurs plats

Tandis que les deux précédentes méthodes conduisent à allonger la ligne de fuite des isolateurs, l'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminuer. En effet, ces isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont principalement utilisés dans les régions désertiques et soumises à des tempêtes de sable où la principale source d'humidification est la condensation [28].

### c) Graissage périodique

Grâce à ses propriétés hydrophobes, le graissage protège temporairement les isolateurs. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement comprise entre 1 et 4 ans. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de graissage est pénible, longue et coûteuse. Elle nécessite, par ailleurs, une interruption de service [29].

### d) Revêtement silicone

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Comme pour le graissage grâce à ses propriétés hydrophobes, ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre sa longévité est, en général, nettement supérieure à celle du graissage [29].

### e) Les isolateurs composites

Ils sont constitués d'un noyau en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Ces isolateurs présentent l'avantage d'une grande légèreté alliée à une haute résistance mécanique que lui confrère le noyau. Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères [30].

Cependant, ces isolateurs présentent le désavantage de vieillir sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électrique et mécanique).

### f) Nettoyage des isolateurs

- *Le nettoyage manuel* (essuyage à sec de l'isolateur) ou **le lavage hors tension**, peuvent être utilisés de façon périodique, en particulier dans les postes. Comme ces méthodes sont utilisées hors tension, elles entraînent nécessairement des interruptions de service parfois assez longues [29]. Aussi, il faut limiter, autant que possible, leur utilisation.
- *Le lavage sous tension* permet d'éviter ces coupures. Dans son principe, ce type de lavage permet de garder propre l'isolateur. Ce dernier est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans ces cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau de lavage, le processus de lavage

et les distances de sécurité à respecter afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

- *Le nettoyage des isolateurs à l'aide d'un abrasif pulvérisé sous pression est une technique utilisée dans certain pays (Amérique du Nord en particulier). Cette technique permet le nettoyage d'isolateurs recouverts de pollution très adhérente (ciment, par exemple) et peut être utilisée pour dégraisser les isolateurs [29].*

## I.5. Principaux modèles statiques de contournement

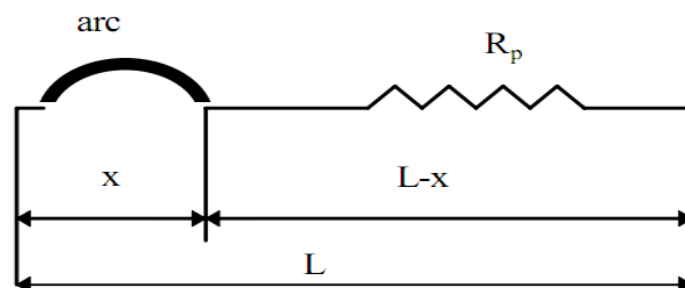
Pour adapter plus rationnellement les isolateurs d'un ouvrage à la sévérité de pollution d'un site, ou pour surveiller la qualité de l'isolement et donc d'éviter les éventuelles défaillances, il est impératif de disposer de modèles permettant de prévoir le contournement des isolateurs. C'est dans cette optique que de nombreux modèles empiriques ou semi-empiriques ont été développés.

### I.5.1. Modèle d'Obenaus

C'est Obenaus [31, 32], qui dans un travail de pionnier, est à l'origine des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur des surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante, sous tension continue. En effet, partant d'un modèle type circuit électrique équivalent constitué d'un arc de longueur  $x$  en série avec une résistance  $R_p$  (figure I.5), il en a déduit la tension d'arc (équation I.1):

$$V_{arc} = \frac{xN}{I^n} \quad I.1$$

Où  $I$  est le courant de fuite,  $n$  et  $N$  sont les constantes de la caractéristique statique de l'arc.



**Figure I.5:** Modèle d'Obenaus.  $L$  représente la longueur de fuite totale.

Les valeurs des paramètres  $n$  et  $N$  dépendent du milieu dans lequel brûle la décharge. Elles varient selon les auteurs [5, 31]. De façon générale:

$$0.4 \leq n \leq 1$$

Et

$$3 \leq N \leq 500$$

A partir de mesures expérimentales sur un canal d'électrolyte, Ghosh et al [33] ont proposé de prendre des valeurs différentes pour les constantes  $N$  et  $n$  caractérisant

l'équation de la décharge selon la nature de l'électrolyte utilisé. Les résultats de leurs mesures sont donnés dans le tableau I.1.

Electrolyte	N	n
NaCl	360	0,59
CaCl <sub>2</sub>	461	0,42
FeCl <sub>3</sub>	270	0,66
CuSO <sub>4</sub>	450	0,49

**Tableau I.1:** Mesures expérimentales sur un canal d'électrolyte

### I.5.2. Modèle de Neumarker

En reprenant les travaux d'Obenaus, et en y ajoutant l'hypothèse d'une couche de pollution de résistance  $r_p$  uniforme par unité de longueur de fuite, Neumarker [31] propose l'expression suivante pour la résistance de pollution  $R_p$  (équation I.2):

$$R_p = r_p (L - x) \quad \text{I.2}$$

En introduisant cette expression dans le modèle d'Obenaus, la tension  $U$  aux bornes de l'isolateur sera (équation I.3, I.4):

$$U = V_{arc} + r_p (L - x) \quad \text{I.3}$$

Ou encore:

$$U = \frac{Nx}{I^n} + r_p (L - x) \quad \text{I.4}$$

Ainsi, Neumarker déduit le courant et la longueur d'arc critiques (équation I.5, I.6):

$$I_c = \left( \frac{Nx}{I^n} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad \text{I.5}$$

Et

$$X_c = \frac{L}{n+1} \quad \text{I.6}$$

D'où l'expression de la tension critique de contournement (équation I.7):

$$U_c = N^{\frac{1}{1+n}} + r_p^{\frac{1}{1+n}} L \quad \text{I.7}$$

Les modèles établis en courant continu ci dessus, ont été étendus au cas d'une tension alternative en y apportant certaines modifications.

### I.5.3. Modèle de Rizk

A partir d'une analyse théorique, Rizk [31] a décrit le phénomène d'entretien de l'arc par le mécanisme de la rupture diélectrique. Il a mis en évidence l'expression de la



rigidité diélectrique de l'espace résiduel et établi une relation entre la tension minimale  $U_c$  (tension de contournement minimale) nécessaire à l'entretien de l'arc, la résistance de pollution linéique  $r_p$  et la longueur de fuite  $L$  de la forme (équation I.8):

$$\frac{U_c}{L} = 23 r_p^{0,4} \quad \text{I.8}$$

#### I.5.4. Modèle de Claverie et Porcheron

Plusieurs modèles expérimentaux ont été proposés pour le cas d'une tension alternative. Le plus connu est celui de Claverie et Porcheron [5, 34]. Ces auteurs ont montré que pour un modèle d'isolateur plan (figure I.6), la tension d'arc est de la forme (équation I.9):

$$V_{arc} = \frac{100x}{\sqrt{I}} \quad \text{I.9}$$

et la tension minimale d'entretien de l'arc  $U_{ex}$  est (équation I.10):

$$U_{ex} = \frac{800x}{\sqrt{I}} \quad \text{I.10}$$

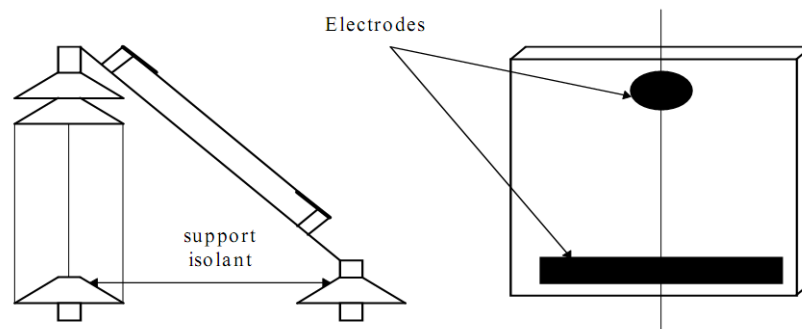


Figure I.6 : Montage expérimental pour le modèle de Claverie et Porcheron [25]

#### I.5.5. Modèle de Rao et Gopal

D'après Rao et Gopal [35], l'équation de la tension de type  $xN$  (équation I.11):

$$V_{arc} = \frac{xN}{I^n} \quad \text{I.11}$$

n'est valable que pour une décharge de type intermédiaire entre la luminescence et l'arc [36]; ce type d'équation peut être contesté lorsque la décharge se réamorçait périodiquement. Ainsi, ces auteurs ont essayé d'expliquer les écarts entre les prédictions des modèles et les valeurs mesurées pendant le contournement, en introduisant une nouvelle équation exprimant le champ dans la colonne de la décharge (équation I.12):

$$U = \alpha + (\beta + x)v \left( \ln \frac{I}{\delta} \right)^{-3} \quad \text{I.12}$$

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\nu$  et  $\delta$  sont des constantes qui dépendent de la nature des électrodes entre lesquelles brûle la décharge.

Cette équation a été établie par Rieder [35]. Elle exprime la caractéristique  $U(I,x)$  d'un arc de faible intensité brûlant dans l'atmosphère.

### I.5.6. Modèle de Wilkins

Le Modèle de Wilkins est constitué d'une électrode mise sous tension et située au dessus d'un bac rempli d'eau additionnée de sel, permettant de simuler la zone polluée. La zone sèche étant considérée comme l'espace compris entre l'électrode et l'eau (Figure I.7).

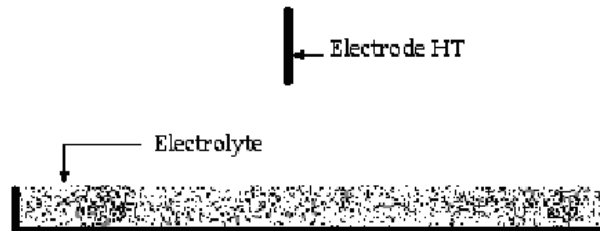


Figure I.7 : Modèle de Wilkins

### I.6. Modèles étudiés au laboratoire de l'ENP

Plusieurs travaux sur des modèles plans similaires à celui considéré par **P. Claverie** et **Y. Porcheron** [5] ont été effectués au laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique. Ainsi, l'isolateur de haute tension a été remplacé par une simple plaque parallélogrammique isolante, et la ligne de fuite de l'isolateur est illustrée par la distance inter électrodes. Nous présentons les principaux travaux antérieurs, auxquels notre travail fait suite.

#### I.6.1 Modèle de A.Mekhaldi et S.Bouazabia

Les équations, correspondant au modèle de Claverie et Porcheron [5], ont été proposées par A.Mekhaldi et S.Bouazabia [37]. Ces derniers, utilisant les équations de l'électromagnétisme classique (équation de poisson), ont établi, en assimilant le modèle à un système cylindrique (Figure I.8), l'expression du courant de fuite (équation I.13) :

$$I = \frac{U\sigma\alpha e}{\frac{a+L}{a+x}} \quad \text{I.13}$$

Avec :

$$\alpha = 2\arctg(d/2(a+L))$$

$\sigma$ : conductivité

U : tension d'alimentation

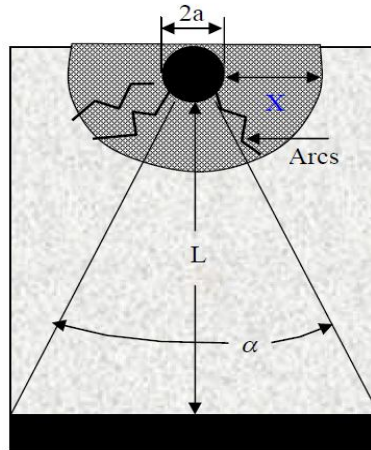
a : rayon de l'électrode circulaire

L : distance inter électrodes

x : longueur de l'arc

e : épaisseur de l'électrode

d : longueur de l'électrode circulaire



**Figure I.8:** Modèle de A.Mekhaldi et S.Bouazabia [37]

Les auteurs ont déduit la résistance de la pollution (équation I.14):

$$R = \frac{Ln \left[ \frac{a+L}{a+x} \right]}{\sigma \alpha e} \quad \text{I.14}$$

Quelques comparaisons avec des résultats expérimentaux sont alors effectuées, montrant une assez bonne concordance entre les deux approches (théorique et pratique) pour les faibles niveaux de tension et pour les grandes épaisseurs de la couche de pollution.

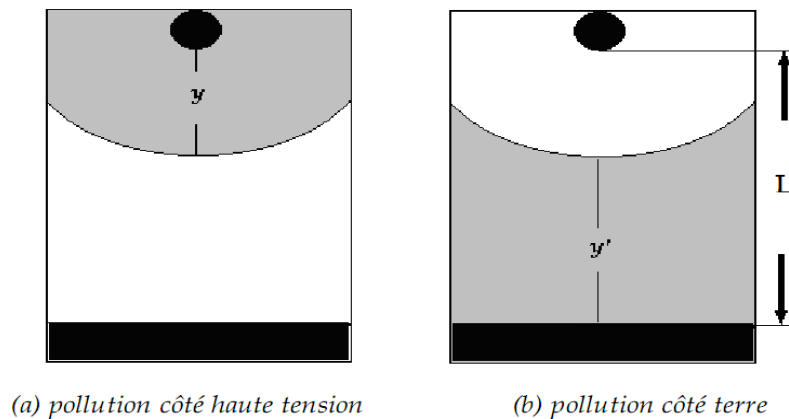
Pour les tensions élevées et les faibles épaisseurs de la pollution, la corrélation est plutôt mauvaise, les auteurs imputant cet état de fait au parcours linéaire, le courant empruntant le chemin le moins résistant :

Le modèle serait alors assimilé à un système pointe-plan.

### I.6.2. Modèle de D.Namane

Afin d'examiner le comportement des surfaces isolantes sous pollution discontinue, D.Namane [9] a utilisé un modèle plan rectangulaire (Figure I.9). Les différentes contraintes sous lesquelles est soumis son modèle de laboratoire sont : la discontinuité de la pollution en variant de manière régulière la largeur de la pollution, la position de la pollution par rapport aux électrodes ainsi que la conductivité de la couche polluante appliquée sur la plaque.

L'influence de ces contraintes sur le courant de fuite, sur la tension d'entretien de l'arc électrique et sur la tension de contournement est alors examinée.



**Figure I.9:** Modèle de D.Namane

L'auteur a proposé un modèle théorique, décrivant l'isolateur en pollution discontinue. Ce modèle est basé sur le calcul de deux impédances équivalentes à la zone sèche et à celle polluée.

Une bonne corrélation a été constatée entre les résultats expérimentaux et le modèle empirique tant que la zone sèche garde les mêmes propriétés d'isolement. Au-delà, le modèle théorique montre ses limites et ne convient plus puisque celui-ci ne tient pas compte de la variation de l'impédance de la zone sèche avec la tension reportée à ses bornes.

Par ailleurs et dans le cas de la plaque propre, D.Namane a relevé la caractéristique courant-tension afin d'étudier son comportement.

Ces essais ont été effectués pour plusieurs niveaux de tension et ont permis de noter que l'amplitude du courant croît d'une manière quasi-linéaire en fonction de la tension, ce qui a permis la détermination de l'impédance équivalente  $Z_0$  de la plaque propre dans les limites des tensions utilisées. L'impédance obtenue est:

$$Z_0 = 4,24 \cdot 10^8 \Omega.$$

L'impédance expérimentale  $Z_0(y)$  moyenne est alors déterminée à partir de la tension et du courant de fuite correspondant pour les deux configurations (côté terre et côté haute tension). La fonction choisie, la plus proche des résultats expérimentaux est donnée par :

$$Z_{oe}(y) = Z_{oe}(y') = [Z_o(y=0)] [(L-y)/L]^{0,42}$$

Avec :

$Z_{oe}$  : impédance empirique de la zone sèche en fonction du largeur de la couche polluée,  $Z_o(y=0)$  : impédance totale mesurée de la plaque propre lorsqu'il n'y a pas de pollution, celle-ci a été évaluée à :  $4,24 \cdot 10^8 \Omega$ ,

$L$  : distance inter-électrodes égale à 40 cm,

$y$  (ou  $y'$ ) : largeur de la pollution en cm (côté terre ou côté haute tension).

L'auteur a adopté cette fonction empirique de manière à retrouver les deux valeurs extrêmes de pollution à savoir :

$$y = y' = 0 \Rightarrow Z_{oe}(0) = 4,24 \cdot 10^8 \Omega \quad \text{et} \quad y = y' = L \Rightarrow Z_{oe}(L) = 0$$

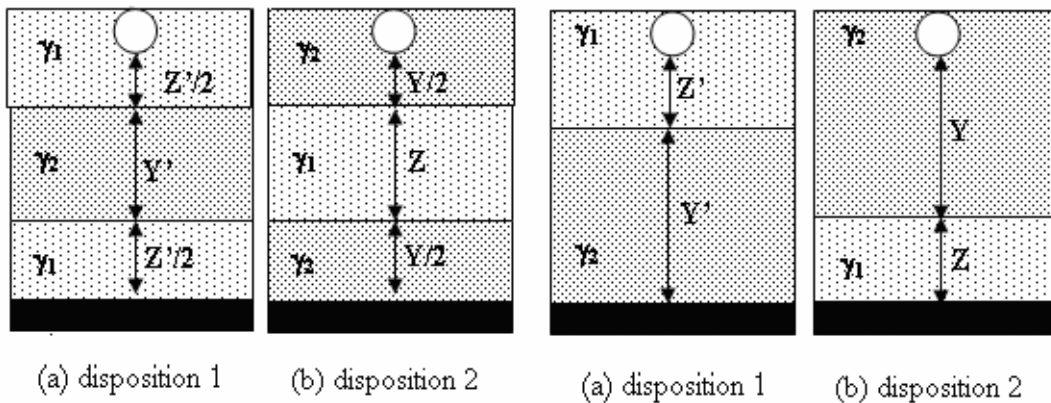
### I.6.3. Modèles de M. Tegar

Un premier modèle utilisé par **M. Tegar** [12] est similaire à celui de D. Namane [9], comprenant deux électrodes planes, l'une circulaire mise sous tension et l'autre rectangulaire mise à la terre.

Deux configurations de la pollution sont considérées. Chacune d'elles possède deux dispositions distinctes des couches polluantes.

Dans la première configuration (Figure I.10 (a)), trois couches de pollution dont deux sont de conductivité et de dimensions identiques et l'autre d'une conductivité différente. Dans une première disposition, la couche faiblement conductrice est située des deux côtés de la plaque isolante, contrairement à la seconde où cette couche est appliquée au milieu.

Concernant la deuxième configuration, l'auteur a considéré deux milieux de conductivités différentes. La couche fortement conductrice est totalement établie du côté terre, pour une première disposition et du côté haute tension, pour la seconde (Figure I.10 (b)).



**Figure I.10.a:** Première configuration

**Figure I.10.b:** Deuxième configuration

$Y$  ou  $Y'$  : la longueur de la partie fortement conductrice ( $\gamma_2=420 \mu\text{S/cm}$ ).  
 $Z$  ou  $Z'$  : la longueur de la partie faiblement conductrice ( $\gamma_1=42 \mu\text{S/cm}$ ).

L'auteur a abouti aux résultats suivants :

- La tension de contournement, dans le cas de la première configuration, est supérieure lorsque la couche fortement conductrice est située au milieu de la plaque isolante. Ce qui veut dire que le système avec cette disposition de la pollution est plus rigide.
- pour la deuxième configuration, la tension de contournement est pratiquement insensible à la position des deux couches polluées par rapport aux électrodes.
- Pour les deux configurations, le courant de fuite augmente régulièrement aussi bien avec la tension appliquée qu'avec la longueur de la couche fortement conductrice.

Dans un autre travail M. Tegar utilise un modèle statique sous tension alternative, soumis à une répartition discontinue de la pollution, reproduisant l'état de surface de l'isolateur capôt et tige type 1512L, prélevé de la zone SONELGAZ de Hassi R'mel [26-38].

### a. Cas de pollution continue

M. Tegar [26] a élaboré un modèle statique en tension alternative. Son modèle est basé sur celui d'Obenaus [39], et permet d'avoir les différentes caractéristiques concernant le développement de l'arc électrique sur une surface isolante uniformément polluée.

En se basant sur l'équation du circuit et sur la condition limite de réamorçage [5, 34], il a déterminé l'expression donnant la résistance de pollution en série avec l'arc, en fonction de la tension appliquée et le courant de fuite (équation I.15):

$$R_p = \frac{1}{P} \frac{K - 100 U}{K I} = \rho F_p \tag{I.15}$$

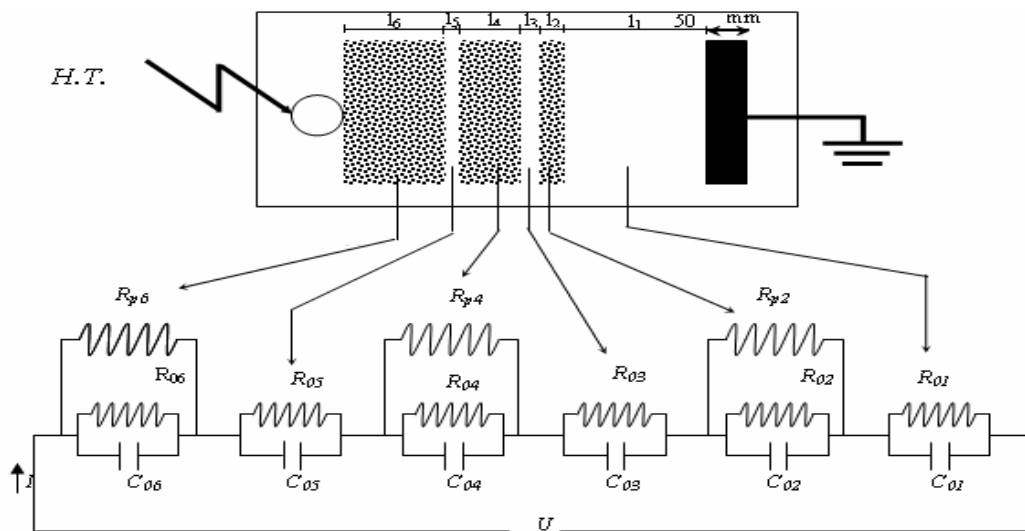
Où  $\rho$  représente la résistivité de la couche de pollution et  $K$  la constante de la caractéristique statique de l'arc.

Cette équation lui a permis d'évaluer la longueur critique de l'arc et par la suite tous les paramètres caractérisant les phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes uniformément polluées.

Un modèle amélioré a été mis au point par M. Tegar [12] pour caractériser la propagation d'une décharge électrique sur des surfaces isolantes soumises à une pollution continue non uniforme.

**b. Cas de pollution discontinue**

M. Tegar [12] a élaboré un algorithme qui permet d'obtenir les différentes caractéristiques des phénomènes de conduction sur les surfaces isolantes sous pollution discontinue. Les bandes propres et polluées sont représentées pas des circuits électriques. Les composants de ces circuits sont déterminés à partir des essais effectués sur la plaque propre et celle uniformément polluée. Le courant de fuite critique et la tension de contournement sont calculés à partir de la connaissance de la tension de contournement obtenue expérimentalement dans le cas où les couches de la pollution discontinue sont remplacées par du papier aluminium.



**Figure I.11:** Circuit électrique équivalent selon M. Tegar

La figure I.11 représente le circuit électrique équivalent au modèle de laboratoire sous pollution discontinue. Dans ce circuit, chaque bande  $i$  ( $i=1$  à  $6$ ) est constituée d'une résistance  $R0i$  en parallèle avec une capacité  $C0i$ . Pour chaque bande polluée  $i$  ( $i=2, 4, 6$ ), ces circuits sont shuntés par une résistance  $Rpi$  représentant la couche de pollution (peinture semi-conductrice à base de graphite).

Le fait que les couches polluantes possèdent des formes rectangulaire et selon la recommandation de la CEI 60-1 [40], l'expression de la résistance pour chaque bande polluée  $i$  peut être formulée par (équation I.16):

$$R_{pi} = R_{sp} \int_0^{L_i} \frac{dl}{b} = R_{sp} \frac{L_i}{b} = R_p f \frac{L_i}{b} \quad \text{I.16}$$

Avec :

$i=2, 4, 6,$

$R_{pi}$  : la résistance de couche de pollution,

$dl$  : élément de longueur,

$L_i$  : la longueur de la pollution,

$b$  : largeur de la couche de pollution,

$f$  : facteur de forme.

Les résultats simulés concordent assez parfaitement avec ceux obtenus expérimentalement pour les grandes largeurs de couches polluantes.

### **I.7.Conclusion**

L'amélioration des connaissances sur la performance des isolateurs est nécessaire si l'on veut augmenter la fiabilité du transport et de la distribution de l'énergie électrique.

Une ligne aérienne est constituée d'un agencement judicieux de matériaux conducteurs qui servent à transporter l'énergie électrique (ou l'information) là où elle doit être utilisée et de matériaux isolants qui permettent d'empêcher celle-ci de se perdre en empruntant le plus «court» chemin d'un potentiel à un autre. Outre leur fonction première qui est de s'opposer au passage du courant, les isolateurs ont également le rôle de maintenir mécaniquement les conducteurs dans des conditions prédéterminées.

Cependant, la pollution se présente comme un ensemble de facteurs, tout aussi complexes les uns que les autres et pouvant provoquer par leurs actions communes de nombreuses perturbations dans le fonctionnement des réseaux électriques. Par conséquent, un bon dimensionnement des isolateurs dans les lignes de haute tension ne se fera qu'en tenant compte du facteur de pollution.

Les difficultés rencontrées aujourd'hui pour arriver à une bonne maîtrise de la tenue des isolateurs montrent que des efforts en matière de recherche restent indispensables.

Cependant, vu la complexité du calcul du champ sur la surface des isolants possédant des formes irrégulières et complexes, des codes de calculs peuvent être utilisés afin de surmonter cette difficulté. Dans le prochain chapitre, nous abordons justement l'étude, d'une manière générale, des équations de bases de l'électromagnétisme et leur application, sur lesquels s'appuient ces codes de calculs.

C'est dans ce contexte que le code de calcul FEMM4, que nous avons utilisé lors de notre travail, est présenté.

## **CHAPITRE II**

*Introduction au code de  
calcul*



## II.1. Introduction

Dans les systèmes aussi complexes que ceux que l'on rencontre dans les isolateurs HT, les équations de bases de l'électromagnétisme peuvent être appliquées, à partir de codes de calculs de champ puisque les méthodes analytiques habituellement utilisées pour les condensateurs classiques ne sont pas applicables. Il est donc d'usage de passer par des méthodes numériques de calcul de champ, pour ensuite, identifier l'isolant à travers sa capacité. Celle-ci peut être ainsi calculée dans le domaine de l'électrostatique, pour être utilisée en régime quasi stationnaire ( $f=50$  Hz).

Les progrès de l'informatique ont permis de développer des codes de calculs qui déterminent de façon assez précise la distribution du champ et du potentiel électriques. Les méthodes numériques utilisées sont basées sur la résolution de l'équation de Laplace en imposant les conditions aux limites adaptées à chaque problème.

Donc dans ce chapitre nous présentons les équations de base de l'électromagnétique. Ainsi, nous citons quelques méthodes numériques de calcul de champ et potentiel électrique, vu leurs succès dans la détermination des caractéristiques des diélectriques. Enfin une description du code de calcul FEMM que nous utilisons dans notre travail dans les prochains chapitres.

## II.2. Equations de base de l'électromagnétisme

Tous les logiciels de calculs du champ électromagnétique sont basés sur la résolution des équations de Maxwell dans différents milieux, où des conditions aux limites établis par ces mêmes équations, permettent de connaître la répartition du champ et du potentiel dans tout l'espace fermé choisi par l'utilisateur. Un rappel des équations de base de l'électromagnétisme, sur lesquels s'appuient ces codes de calculs est alors nécessaire.

### II.2.1 Relations constitutive

Une description des phénomènes électromagnétiques peut être effectuée à l'aide de l'induction magnétique  $\vec{B}$ , l'excitation magnétique (ou champ magnétique)  $\vec{H}$ , l'induction électrique  $\vec{D}$ , et du champ électrique  $\vec{E}$ . Ces vecteurs sont liés entre eux par des équations aux dérivées partielles : les équations de Maxwell, et dépendent du milieu matériel dans lequel se trouve le champ électromagnétique.

Le milieu est caractérisé par sa *perméabilité*, sa *permittivité* ainsi que sa *conductivité*. On a alors les relations :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad \text{II.1}$$

$$\vec{J}_c = \gamma \vec{E} \quad \text{II.2}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad \text{II.3}$$

Avec  $\vec{J}_c$  étant la densité du courant de conduction

$$\iint_s \vec{J}_c \cdot d\vec{S} = I_c \quad \text{II.4}$$

tel que  $I_c$  est le courant de conduction.

$\gamma$  : La conductivité du matériau.

$\mu_0 = 4.10^{-7}$  H/m : la perméabilité du vide.

$\mu_r$  : La perméabilité relative du matériau.

$\epsilon_0 = 8,84.10^{-12}$  F/m : La permittivité du vide.

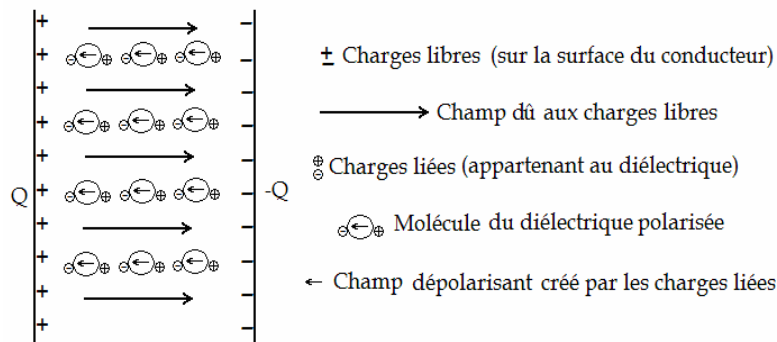
$\epsilon_r$  : La permittivité relative du matériau.

• **Permittivité et champ électrique**

Le rapport entre l'induction électrique  $\vec{D}$  et le champ  $\vec{E}$ , illustré par la permittivité absolue  $\epsilon_0 \epsilon_r$  (équation II.1), est lié à la **polarisabilité** du milieu. Celle-ci est associée aux charges dites 'liées', parce qu'elles sont rattachées à la molécule polarisée, par opposition aux charges dites 'libres' qui se déplacent dans le matériau.

Ainsi, la polarisation d'un milieu assure la création d'un champ local (moment dipolaire) au niveau moléculaire qui se superpose au champ extérieur. Si on prend, par exemple, le cas simple d'un condensateur plan possédant une charge  $Q$  et  $-Q$  sur chacune des armatures (Figure II.1), la polarisation se manifeste par une diminution du champ global qui existait avant l'introduction du matériau. Cette diminution, due au champ 'dépolarisant' du matériau, conduit à une diminution de la différence de potentiel  $\Delta V$  inter armatures ( $\Delta V = Ed$ ,  $d$  étant la distance inter armatures). Ceci a

pour conséquence une augmentation de la capacité  $C = \frac{Q}{\Delta V}$  C du condensateur.



**Figure II.1** : déplacement des charges libres dans un condensateur plan.

Il s'agit, dans cet exemple, d'une situation où la charge  $Q$  déposée sur l'armature métallique est constante. On peut imaginer (c'est peut être un peu plus courant), que ce soit la tension  $\Delta V$  qui soit maintenue constante grâce à une source de tension. Puisque la tension est imposée, le champ résultant l'est aussi : cela se traduit par un apport plus important de charges fournies par la source sur la surface du conducteur lors de l'introduction du diélectrique : on voit bien que, dans ces conditions, la capacité est augmentée puisque  $\Delta V$  reste constant tandis que  $Q$  augmente.

Lorsque, pour une faible excitation, la polarisation est intense, cela signifie que la permittivité relative est élevée : cette propriété est utilisée pour réaliser, par exemple, des capacités de faible encombrement. On renforce ainsi l'énergie réactive fournie à un circuit électrique.

Notons que le champ résultant à l'intérieur du diélectrique ne donne lieu à aucune consommation active, sauf s'il existe un retard entre l'excitation extérieure et la réponse illustrée par  $\vec{D}$ . La fréquence joue donc un rôle dans le comportement du matériau lorsque le champ est alternatif, car elle peut conduire à un échauffement.

Par ailleurs, il faut bien faire la distinction entre les deux phénomènes de **polarisation**, associée à la permittivité, et d'**ionisation** associée aux charges 'libres' et à la conductivité. Ainsi, si les charges restent toujours liées à la molécule, on parle d'un courant de **déplacement** (équation II.5).

$$\vec{J}_d = \partial \vec{D} / \partial t \quad \text{II.5}$$

Au contraire, si les charges sont libres de se déplacer et sont dissociées de la molécule, il s'agit d'un phénomène de conduction.

D'une manière générale, la permittivité relative des isolants (tableau II.1) ne dépasse pas la dizaine d'unités, excepté pour les matériaux ferroélectriques, qui possèdent des analogies remarquables avec les matériaux ferromagnétiques.

Matériau	Air	Téflon	Huile	Nylon	Porcelaine	Mica	Verre	Eau
Permittivité relative	1,0006	2,1	2,4	3,5	6,0	6,0	5 à 10	80,0

**Tableau II.1** : permittivité relative des isolants.

- **Conductivité et champ électrique**

La relation entre la conductivité et le champ électrique peut être donnée par l'équation (II.2). Par définition, un conducteur contient une grande quantité de charges dites 'libres'. Ces charges sont constituées d'électrons qui, par leur faible couplage aux atomes auxquels ils appartiennent, peuvent passer d'atomes en atomes. Cependant, les charges responsables du phénomène de conduction dans un matériau quelconque, ne sont pas forcément des électrons. Ainsi, les porteurs de charges peuvent être aussi des anions ou des cations. De plus, l'application d'un champ très élevé peut conduire à l'ionisation des molécules, qui renforce le flux de porteurs de charges, et par la même la conductivité.

Notons que, même les isolants (ou diélectriques) les plus parfaits, possèdent toujours une conductivité résiduelle plus ou moins élevée, suivant la composition, la pureté ou les conditions d'application du champ extérieur. En courant continu, un échauffement est alors observé. En courant alternatif, un autre phénomène d'échauffement (autre

que le phénomène de conduction) peut avoir lieu, et qui est dû à l'hystérésis électrique.

### II.2.2 Equations de Maxwell

Il s'agit des équations fondamentales pour tout électrotechnicien. Appliquées sous leur forme locale, elles conduisent le plus souvent à des équations différentielles qui, une fois résolues, permettent de connaître le champ électromagnétique en tout point de l'espace.

Heureusement, on peut les utiliser sous leur forme intégrale, dans de nombreux cas pratiques, quand la simplicité du circuit le permet.

On rappelle les quatre équations de Maxwell [41]:

<p><i>Forme locale :</i></p> $\left\{ \begin{array}{l} \text{rot} \vec{H} = \vec{j}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \text{div} \vec{D} = \rho_{\text{libre}} \\ \text{div} \vec{B} = 0 \end{array} \right.$	<p><i>Forme intégrale :</i></p>	$\oint_S \vec{H} d\vec{l} = \iint_S \left( \vec{j}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S} \quad \text{(Théorème d'ampère)} \quad \text{II.6}$
		$\oint_S \vec{E} d\vec{l} = \iint_S \left( -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) d\vec{S} \quad \text{(Loi de Faraday)} \quad \text{II.7}$
		$\oiint_S \vec{D} d\vec{S} = \iiint_V \rho dV \quad \text{(Théorème de Gauss)} \quad \text{II.8}$
		$\oiint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad \text{(Loi de conservation de flux)} \quad \text{II.9}$

On remarque dans la première équation de Maxwell l'existence de deux 'sortes' de courants :  $\vec{J}_c$  et  $\partial \vec{D} / \partial t$ . Ceux-ci représentent respectivement les courants de conduction ( $\vec{J}_c = \vec{E}$ ) et le courant de **déplacement** ( $\vec{J}_d = \partial \vec{D} / \partial t = \epsilon \partial \vec{E} / \partial t$ ).

La somme des deux courants  $\vec{J}_c + \vec{J}_d$  constitue le courant total  $\vec{J}_t$ .

Dans le cas où on a affaire à des *conducteurs* alimentés à des fréquences basses (par exemple, à la fréquence industrielle de 50 Hz), un simple calcul permet de montrer que le courant de conduction est très nettement supérieur au courant de déplacement et le terme  $\partial \vec{D} / \partial t$  peut être négligé.

Par contre, dans le cas des *diélectriques*, c'est la conductivité qui devient négligeable, on alors affaire à un courant de déplacement.

Dans la plupart des situations, il est toujours possible de négliger un terme par rapport à l'autre selon le milieu ou le régime fréquentiel dans lequel on est : il ne faut cependant oublier que, dans les cas des fréquences très élevées, les **deux courants** peuvent coexister si par exemple, le produit  $\omega \epsilon$  devient assez élevé pour être du même ordre de grandeur que la conductivité  $\gamma$  [41].

### II.2.3 Equations de Laplace et de Poisson

Il peut être intéressant de définir d'autres grandeurs électriques liées au champ électromagnétique pour, d'une part, simplifier les calculs associés à des résolutions vectorielles, et, également pour illustrer les propriétés remarquables de certaines configurations [41].

Pour cela, on introduit la notion de potentiel scalaire  $V$  pour le champ électrique.

En appliquant les équations de Maxwell au domaine quasi stationnaires, on peut considérer que  $\partial \vec{B} / \partial t = 0$ , et on a donc:  $\overrightarrow{rot}(\vec{E}) = 0$ . Or, on sait que le rotationnel d'un gradient est toujours nul  $\overrightarrow{rot}(\overrightarrow{grad} V) = 0$  : on peut alors définir un potentiel  $V$  comme étant un scalaire satisfaisant la relation :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}(V)$$

En utilisant le théorème de Gauss, on obtient :

$$\text{div } \varepsilon \vec{E} = -\varepsilon \text{div } \overrightarrow{grad}(V) = -\varepsilon \overrightarrow{\nabla} \cdot \overrightarrow{\nabla} V = \rho \text{ ce qui nous donne } \Delta V = -\frac{\rho_{\text{libre}}}{\varepsilon}.$$

Cette dernière équation représente l'équation de Poisson.

En l'absence de charges, on aura l'équation de Laplace:  $\Delta V = 0$

### II.3. Conditions aux limites à la surface de séparation de diélectrique

Dans le cas d'un diélectrique homogène la répartition des grandeurs électriques est continue. Cependant, ces grandeurs peuvent subir une discontinuité à la surface de séparation de deux ou plusieurs diélectriques. Il est donc important de décrire le comportement des grandeurs électriques dans un tel cas. Les relations déterminant ces comportements sont données ce qu'on appelle les conditions aux limites.

Soit une surface (S) séparant deux milieux matériels ( $\varepsilon_1$ ) et ( $\varepsilon_2$ ). Ces milieux peuvent être indifféremment le vide, un métal ou un diélectrique. Comme le champ électrique est un champ conservatif, l'intégrale le long d'une ligne fermée de  $\vec{E} \cdot d\vec{l}$  est nulle quelque soit le chemin suivi ; la figure II.2 présente un chemin rectangulaire dont les coins sont numérotés 1, 2, 3 et 4.

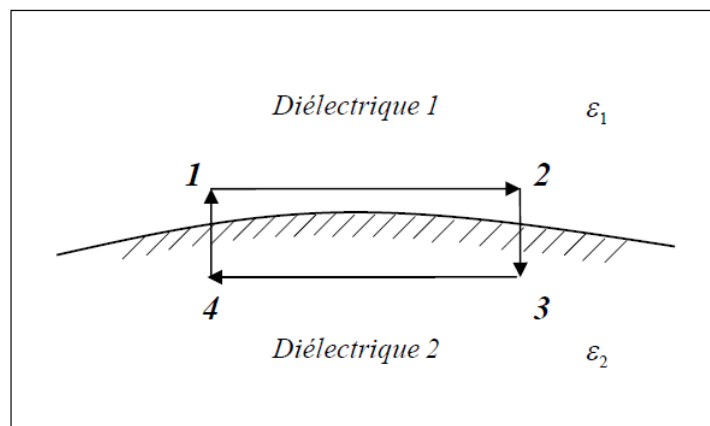


Figure II.2: Surface de séparation entre deux diélectriques différents.

Nous aurons donc : 
$$\int_1^2 \vec{E}.d\vec{l} + \int_2^3 \vec{E}.d\vec{l} + \int_3^4 \vec{E}.d\vec{l} + \int_4^1 \vec{E}.d\vec{l} = 0 \quad \text{II.10}$$

Les intégrales  $\int_2^3 \vec{E}.d\vec{l}$  ,  $\int_4^1 \vec{E}.d\vec{l}$  sont nulles.

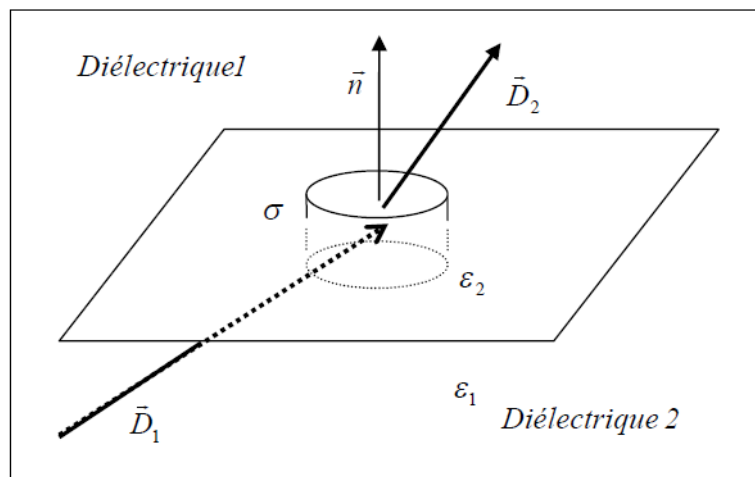
Le vecteur  $d\vec{l}$  étant parallèle à la surface (S) cette relation ne concerne que les composantes tangentielles de  $\vec{E}$  elles aussi parallèle à (S).

$$\int_1^2 \vec{E}_{t1}.d\vec{l} + \int_3^4 \vec{E}_{t2}.d\vec{l} = 0. \quad \text{II.11}$$

La composante tangentielle de  $\vec{E}$  est continue à la traversée de la surface de séparation des diélectriques, ce qui peut s'écrire :

$$\vec{E}_{t1} = \vec{E}_{t2} \quad \text{Soit} \quad \frac{D_{t1}}{\epsilon_{r1}} = \frac{D_{t2}}{\epsilon_{r2}} \quad \text{II.12}$$

Pour obtenir les conditions sur les composantes normales, on considère un cylindre circulaire droit fermé et de petites dimensions. Il est traversé par la surface de séparation comme l'indique la figure II.3 :



**Figure II.3:** Discontinuité de l'induction à la limite de deux diélectriques

Sur la surface  $\Delta S$  délimitée par le cylindre, plaçons une charge libre de densité superficielle  $\sigma$  , soit  $\vec{n}$  le vecteur unitaire perpendiculaire à  $\Delta S$ . En appliquant la loi de Gauss on établit la relation :

$$|D_{n2} - D_{n1}| \Delta S = \sigma \Delta S \quad \text{II.13}$$

$D_{n2}$  et  $D_{n1}$  sont les composantes de l'induction dans les milieux de  $(\epsilon_1)$  et  $(\epsilon_2)$ . La composante normale  $\vec{D}$  subit une discontinuité de valeur  $\sigma$  , à la traversée de la surface de séparation, ce qui peut s'écrire :

$$|D_{n2} - D_{n1}| = \sigma \quad \text{soit} \quad \varepsilon_{r2} E_{n2} - \varepsilon_{r1} E_{n1} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad \text{II.14}$$

Si la surface de séparation ne porte pas de charges libres ( $\sigma = 0$ ) on obtient :

$$D_{n2} = D_{n1} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{r2} E_{n2} = \varepsilon_{r1} E_{n1} \quad \text{II.15}$$

#### II.4. Cas des isolateurs haut tension

L'isolateur est constitué principalement d'un matériau isolant solide ; son identification passe par la connaissance de ses caractéristiques électriques, en particulier son impédance et donc sa capacité, en présence ou non d'agents polluants sur sa surface. Il s'agit alors d'une impédance (capacité) 'vue' de deux électrodes, dont la dimension et la disposition sur l'isolateur influe sur l'impédance (capacité) apparente. Celle-ci est liée aux lignes de champ imposées par l'ensemble du dispositif conducteur -isolant. Par ailleurs, si l'isolant présente une conductivité résiduelle, on peut établir le lien entre la capacité et la résistance présentées.

Ce paragraphe aborde les relations fondamentales entre les charges induites sur les conducteurs (électrodes) et la capacité d'un isolant. Dans les systèmes aussi complexes que ceux que l'on rencontre dans les isolateurs HT, ces notions de bases sont généralement appliquées, à partir de logiciels de calcul de champ, pour établir par simulation les contraintes propres d'un tel isolant.

#### II.4.1 Notions fondamentales

##### II.4.1.1 Relation entre charges et capacités

Soit un conducteur à l'équilibre électrostatique (Figure II.4), isolé dans l'espace, chargé avec une distribution surfacique  $\sigma$  et porté au potentiel  $V$ . Celui-ci s'écrit :

$$V(M) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \iint_{\text{surface}} \frac{\sigma(P) dS}{PM} \quad \text{II.16}$$

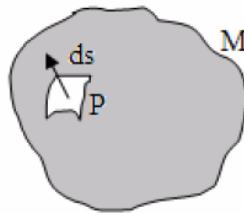


Figure II.4: Conducteur en équilibre électrostatique

Par ailleurs, la **charge** électrique totale portée par ce conducteur est donnée par :

$$Q = \iint_{\text{surface}} \sigma(P) dS \quad \text{II.17}$$

Si, on multiplie la densité surfacique par un coefficient constant  $a$ , on obtient une nouvelle charge totale  $Q' = a Q$  et un nouveau potentiel  $V' = a V$ . On a ainsi un nouvel

état d'équilibre électrostatique, parfaitement défini. On voit donc que, quoi qu'on fasse, tout état d'équilibre d'un conducteur isolé (caractérisé par  $Q$  et  $V$ ) est tel que le rapport  $Q/V$  reste constant, (cela résulte de la linéarité de  $Q$  et  $V$  en fonction de  $\sigma$ ); d'où la notion de la capacité électrostatique.

La **capacité** électrostatique d'un conducteur à l'équilibre est définie par :

$$C = \frac{Q}{V} \quad \text{II.18}$$

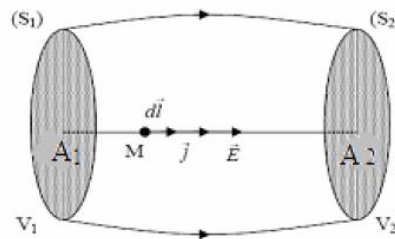
où  $Q$  est la charge électrique totale du conducteur porté au potentiel  $V$ .

Dans le domaine des isolateurs HT, la capacité calculée entre l'électrode de Terre et celle de HT est complexe. C'est pourquoi, les méthodes analytiques habituellement utilisées pour les condensateurs classiques ne peuvent plus être appliquées. Il est alors d'usage de passer par des méthodes numériques de calcul de champ, pour ensuite, identifier l'isolant à travers sa capacité. Celle-ci peut être ainsi calculée dans le domaine de l'électrostatique, puis utilisée en régime quasi stationnaire ( $f=50$  Hz).

Théoriquement, la capacité ne dépend que des caractéristiques géométriques et du matériau diélectrique. Pratiquement, dans le domaine des tensions élevées, la capacité peut changer du fait d'un changement des caractéristiques du milieu diélectrique et ce, en raison des fortes contraintes électriques imposées.

#### II.4.1.2 Relation entre résistance et capacité pour un même réseau de lignes de champ

La figure (II.5) illustre le cas d'un isolant placé entre deux surfaces conductrices de section  $S_1$  et  $S_2$ . Celles-ci sont donc des surfaces équipotentielles et les points  $A_1$  et  $A_2$ , appartenant à ces surfaces, peuvent être pris de manière tout à fait arbitraire.



**Figure II.5:** un diélectrique placé entre deux armatures

Si, l'isolant possède une conductivité  $\gamma$  et une permittivité  $\epsilon$ , on peut établir une relation simple entre la capacité présentée et la résistance. En effet, on peut exprimer la différence de potentiel  $\Delta V$  comme :

$$\Delta V = \int_{A1}^{A2} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad \text{II.19}$$



Par ailleurs, la charge  $Q$  induite sur la surface  $S_1$ , si on considère qu'elle possède la densité surfacique  $\sigma_1$ , s'écrit :

$$Q = \iint_{S_1} \sigma_1 ds \quad \text{II.20}$$

Comme la densité de surface est égale à la composante normale de l'induction, on peut aussi exprimer la charge par :

$$Q = \iint_{S_1} \vec{D}_1 d\vec{s} = \varepsilon \iint_{S_1} \vec{E}_1 d\vec{s} \quad \text{II.21}$$

En outre, le courant de conduction s'écrit :

$$I = \iint_{S_1} \vec{J}_c d\vec{s} = \gamma \iint_{S_1} \vec{E}_1 d\vec{s} \quad \text{II.22}$$

On peut donc exprimer respectivement la résistance et la capacité par :

$$R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{\int_{A_1}^{A_2} \vec{E} d\vec{l}}{\gamma \iint_{S_1} \vec{E}_1 d\vec{s}} \quad \text{II.23}$$

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{\varepsilon \iint_{S_1} \vec{E}_1 d\vec{s}}{\int_{A_1}^{A_2} \vec{E} d\vec{l}} \quad \text{II.24}$$

On obtient, si on effectue le produit  $RC$  :

$$RC = \frac{Q}{I} = \frac{\varepsilon}{\gamma} = \rho\varepsilon \quad \text{II.25}$$

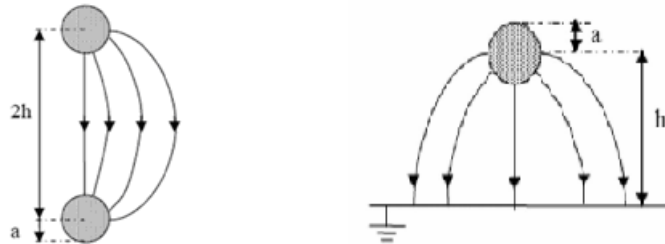
( $\rho = \frac{1}{\gamma}$ ) étant la résistivité du matériau.

Le produit  $RC$  peut être étendu à toutes les structures (condensateur ou résistance) présentant le même réseau de lignes de champ électrique.

On peut ainsi expliciter sans difficulté la résistance de fuite entre deux fils conducteurs parallèles, ou entre un fil et le sol (Figure II.6).

$$C = \frac{\pi\varepsilon}{\ln \frac{2h}{a}} \Rightarrow R = \frac{\rho}{\pi} \ln \frac{2h}{a} \quad \text{II(a).26}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{2h}{a}} \Rightarrow R = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{2h}{a} \quad \text{II(b).26}$$



**Figure II.6:** Relation entre capacité et résistance pour des modèles simples

### II.5.Méthodes de calcul du champ et de potentiel électrique

La détermination de la distribution du champ et du potentiel électriques de tout système HT est un problème complexe de calcul à cause de la forme irrégulière des diélectriques de la proximité de surfaces métalliques aux formes complexes, des lignes de transmission, et dans certains cas, de la présence d'une couche conductrice.

Les progrès de l'informatique ont permis de développer des méthodes numériques de calcul afin de déterminer de façon précise la distribution du champ et du potentiel électriques.

Les méthodes numériques les plus connues et les plus utilisées dans ce type de problème sont donc la Méthode des Différences Finies (M.D.F), la Méthode des Éléments Finis (M.E.F), la Méthode des Charges équivalentes (M.C.E) et la Méthode des Éléments Finis de Frontière (M.E.F.F). Ces méthodes sont basées sur la résolution de l'équation de Laplace en imposant les conditions aux frontières adaptées à chaque problème.

#### II.5.1 Méthode des différences finis

L'idée principale de la M.D.F est de fournir une approximation des dérivées partielles qui régissent les problèmes par des « différences » entre les valeurs nodales qui sont séparées par une distance finie. Elle consiste à décomposer le domaine d'étude en une grille rectangulaire uniforme dont chaque nœud est à équidistance de son voisin suivant les axes  $x$  et  $y$  (Figure II.7).

Cette méthode nécessite la connaissance du potentiel, sur toute la frontière entourant le domaine étudié. Elle devient difficilement applicable, lorsque la géométrie est de frontière courbe, car le schéma ne peut s'appliquer près des frontières irrégulières.

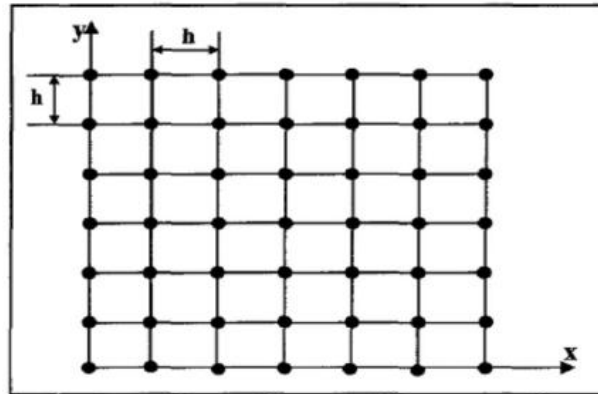


Figure II.7: Maillage rectangulaire

### II.5.2 Méthode des charges équivalentes

La méthode utilisant des charges équivalentes consiste à chercher une distribution de charges discrètes, à valeurs complexes inconnues, dont le type et la position sont choisis. Pour un ensemble de charges  $Q(j)$  donné, les expressions du potentiel et du champ en un point  $i$  sont données respectivement par les équations II.27 et II.28 :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_i = \sum_j P(i, j)Q(j) \\ E_i = \sum_j F(i, j)Q(j) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{II.27} \\ \text{II.28} \end{array}$$

Où  $P(i,j)$  et  $F(i,j)$  sont des coefficients qui dépendent du type de charge et de la distance entre les points  $i$  et  $j$ . Les  $Q(j)$  peuvent être des charges ponctuelles, des densités linéiques de charges réparties sur des segments de droite où des anneaux.

### II.5.3 Méthode des éléments finis de frontière

Quelle soit directe ou indirecte, la méthode des éléments de frontières consiste à résoudre le problème aux frontières des différents milieux. Pour la méthode directe, on travaille directement avec le potentiel et le champ, alors que pour celle indirecte, on travaille avec les charges. Après détermination de celles-ci, on calcule les valeurs du potentiel et du champ.

### II.5.4 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis, outil numérique très puissant, est très utilisé dans la résolution des problèmes à domaine spatial fini [42]. Le principe de cette méthode consiste à diviser le domaine d'étude en plusieurs éléments finis. C'est une étape très importante, puisque le choix de la forme des éléments de maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus.

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

- Triangulaires, rectangulaires, quadrilatérale arbitraires pour les problèmes à deux dimensions.
- Tétraédrales, hexaédrales et sous formes de prismes pour des problèmes à trois dimensions [42].

La méthode des éléments finis est flexible, car elle s'adapte facilement aux différentes géométries et tient compte aussi des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux. Dans le calcul du champ électrique 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 (notamment pour le maillage) beaucoup plus important que pour des domaines finis. D'autre part, le choix de cette frontière a une grande importance dans la précision des calculs, et son influence sur celle-ci doit être prise en compte dans tout programme de ce type.

Dans le calcul de la capacité d'un système, Andersen [43] utilise une méthode hybride utilisant à la fois les éléments finis et les réseaux de capacités et de résistances. Cet auteur part des deux constatations suivantes :

- la minimisation de l'énergie électrostatique conduit à une relation linéaire entre la valeur du potentiel d'un nœud donné et celles des autres nœuds qui l'entourent :

$$V_0 = \sum_{i=1}^n V_i \quad \text{II.29}$$

Si, on remplace l'élément de maillage triangulaire (Figure II.8.a) par un réseau de capacités (Figure II.8.b) et si, on utilise la loi de Kirchhoff (la somme algébrique des intensités des courants qui passent par un nœud est nulle), on obtient une autre relation linéaire liant la valeur du potentiel au nœud  $o$  et celles de ces voisins immédiats.

$$j\omega \sum_{n=1}^6 (V_n - V_0) C_n = 0 \quad \text{II.30}$$

où  $C_n$  est la capacité qui lie le nœud  $o$  au nœud  $n$ . Ce qui donne par identification :

$$C_n = k_n \sum_{n=1}^6 C_i \quad \text{II.31}$$

Pour trouver la somme des capacités, on met un potentiel fictif de 1 V au nœud  $o$  et 0V aux nœuds voisins. En calculant l'énergie emmagasinée dans les six triangles (d'épaisseur égale à l'unité pour les géométries planes et sur un angle de 1 radian pour les géométries axisymétriques) et en l'égalisant avec la somme d'énergie emmagasinée dans les six capacités, on obtient la somme des six capacités. L'utilisation de l'équation (II.24) donne la valeur de chaque capacité.

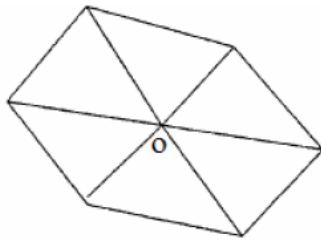


Figure II.8.a : Maillage utilisé

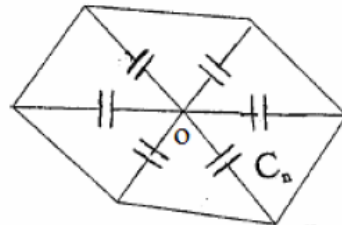


Figure II.8.b : Réseau de capacités

## II.6. Introduction au fonctionnement de FEMM [44]

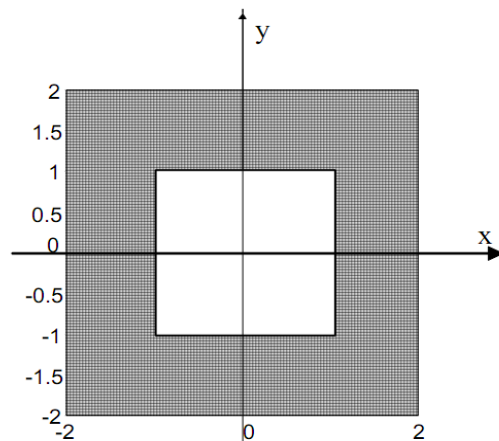
Dans tout le travail présenté, la simulation a été réalisée à l'aide d'un code de calcul à deux dimensions "FEMM 4.0" (Finite Element Magnetism Method) utilisant la méthode des éléments finis.

Le code de calcul de type 2D permet de visualiser en 'coupe' transversale le champ, l'induction ainsi que le potentiel en tout point à l'intérieur d'un contour choisi, avec des conditions aux limites adaptées.

Donc la méthode d'élément fini magnétique (FEMM) est un paquet d'élément fini pour résoudre les problèmes 2D dans l'électrostatique et dans la magnétique de basse fréquence. Le programme fonctionne sous des versions Windows 95, 98, ME, NT, 2000, XP et Seven. Le programme peut être obtenu par l'intermédiaire de la page d'accueil de FEMM [45].

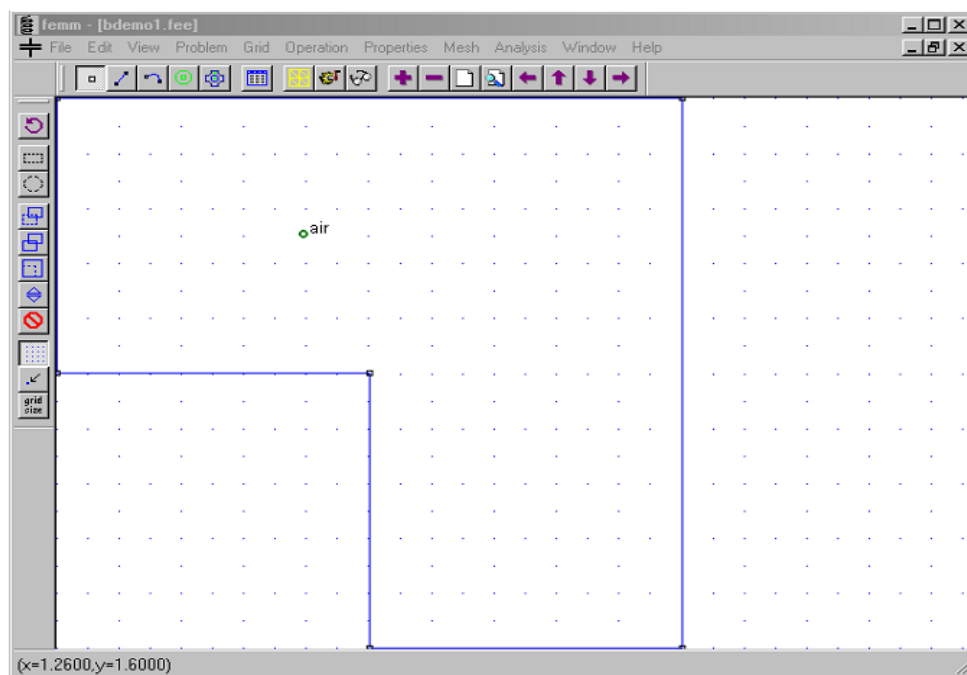
Les utilisateurs devraient d'abord se référer au manuel d'utilisation de FEMM concernant l'interface générale (des commandes c.-à-d. de clavier et de souris).

L'exemple d'un condensateur dont les armatures ont une forme carrée en coupe, représenté ci-dessous (figure II.9) est proposé dans le manuel. Les côtés des deux armatures ont respectivement des tailles de 2 et 4 cm. La « profondeur » choisie est de 100cm. Le diélectrique entre les armatures est l'air. Nous cherchons à établir le problème, l'analysons, et déterminons la capacité.




**Figure. II.9 :** Condensateur en coupe carré


En raison de la symétrie, seulement un quart du dispositif peut être modélisé (figure II.10).




**Figure. II.10:** Exemple réalisé dans le préprocesseur d'électrostatique.

Ainsi, pour créer un modèle il faut définir le rôle de chaque fenêtre de FEMM, ce que nous montrons brièvement dans ce qui suit.

Choisir les nœuds « nodes » de la barre d'outil (c'est le bouton le plus lointain du côté gauche avec une petite boîte noire :  ).


Choisir les lignes « lines » à partir de la barre d'outil (deuxième bouton de la gauche avec une ligne bleue :  ).


Pour ajouter les matériaux au modèle on choisit « Properties|Materials» au loin du menu principal. Dans le dialogue qui apparaît, cliquer sur le bouton « Add Material ». Un dialogue apparaîtra vers le haut pour proposer les diverses propriétés matérielles.

Pour définir les matériaux pour chaque région on utilise le bouton de barre d'outils avec les cercles verts .

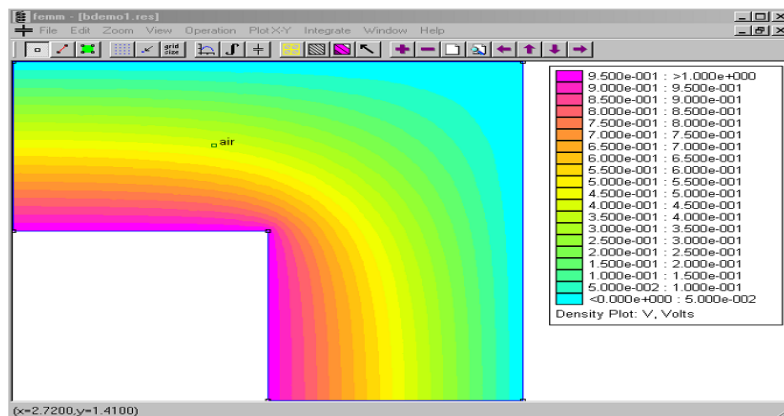
Pour définir les tensions de conducteurs choisir « Properties|Conductors» de la barre de menu, cliquer alors dessus « Add Property » pour définir la tension de chaque conducteur.

Pour introduire les caractéristiques de problème comme les unités qu'on va utiliser la précision...etc. il aller vers « Problem» à partir de la barre de menu. Dans le dialogue qui apparaît, s'assurer que le type de problème est « planar ». Placer les unités de longueur en centimètres cliquant « Centimeters » et placer le paramètre profondeur « depth » à 100 par exemple. La précision du solveur de défaut de  $10^{-8}$ .

Et enfin pour voir s'il ya des erreurs dans le modèle après enregistrement on utilise  le bouton 'compiler' pour lancer l'algorithme.

S'il ya pas d'erreurs il ne reste que l'affichage des résultats en utilisant l'icône  pour afficher la solution dans une fenêtre de postprocesseur.

La solution sera alors affichée, comme suit (figure II.11).



**Figure. II.11:** Solution à l'exemple rendu dans le postprocesseur d'électrostatique.

**II.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons introduit différentes relations de l'électromagnétisme caractérisant le comportement électrique des matériaux diélectriques.

Les progrès de l'informatique ont permis de développer des codes de calculs qui déterminent de façon assez précise la distribution du champ et du potentiel électriques.

Les méthodes numériques utilisées sont basées sur la résolution de l'équation de Laplace en imposant les conditions aux limites adaptées à chaque problème.

Le logiciel FEMM (basé sur la méthode des éléments finis), que nous nous proposons d'utiliser dans les prochains chapitres, est un outil avantageux pour le calcul de champs et potentiel électrique, en raison de sa simplicité d'utilisation et de la précision des résultats généralement obtenus [46].



## **CHAPITRE III**

*Influence des dimensions et  
de la forme des électrodes  
sur la capacité du modèle*

### III.1. Introduction

Des travaux antérieurs [46] effectués au niveau du laboratoire de Haute Tension de l'École Nationale Polytechnique, ont porté sur l'étude du comportement d'un modèle d'isolateur plan de géométrie simple. Ainsi différents paramètres électro-géométriques ont été variés à savoir : la distance inter électrodes, la nature du diélectrique (verre ou plexiglas) ainsi que son épaisseur.

Les dimensions des électrodes ont été gardées constantes et leur épaisseur a été négligée lors de la simulation, étant donné que le papier aluminium qui a été utilisé lors des essais possède une épaisseur de l'ordre du micromètre.

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'établir par simulation, à l'aide du logiciel FEMM, le degré d'influence des dimensions et de la forme des électrodes sur le comportement du modèle plan en variant la largeur et l'épaisseur des électrodes dans le cas des électrodes rectangulaire ainsi qu'avec des électrodes demi circulaires.

### III.2. Modèle de D.Namane

Nous présentons dans ce paragraphe le travail de D.Namane auquel notre étude fait suite. Ce travail est une contribution à la modélisation des isolateurs HT, à travers l'analyse du comportement d'un modèle plan en verre ou en plexiglas. L'étude consiste principalement à établir l'impédance à la fréquence industrielle ainsi que la capacité qu'il présente en fonction de nombreux paramètres électro-géométriques. L'étude expérimentale a été confrontée avec succès, à une approche théorique basée sur l'analyse de la répartition de la charge (utilisant le logiciel de calcul de champ FEMM 4.0). Aussi, une autre approche par simulation a permis d'étendre la plage de variation des paramètres géométriques. Une méthode de superposition est alors proposée par l'auteur afin d'établir le degré d'influence de chaque diélectrique (air-matériau) sur la capacité (impédance) globale apparente. Cette étude est complétée par une analyse de l'influence du sol sur les paramètres mesurés.

Pour tous les essais, D.Namane a utilisé un modèle plan avec des plaques de diélectrique (verre ou plexiglas), de forme carrée de côté  $L$ , et d'épaisseur notée  $(e)$  (Figure III.1).

Des électrodes en papier aluminium (épaisseur négligeable), rectangulaires et identiques, ont été placées, à plusieurs distances  $(d)$ . Ces électrodes possédant une largeur  $(a)$ , et une longueur  $(D)$  ont été arrondies de manière à éviter les décharges associées à l'effet de pointe.

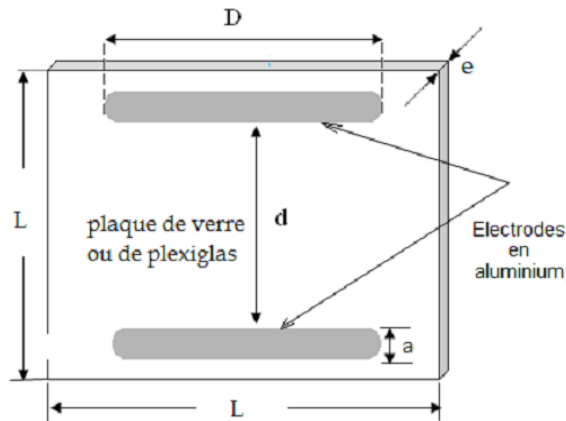


Figure III.1: Modèle expérimental de D.Namane

Le modèle ainsi adopté a été soumis à une tension sinusoïdale, délivrée par un transformateur 0,5/300kV, 50Hz.

Dans une première étape D.Namane a étudié, pour une distance au sol  $h$  constante, l'influence des différents paramètres électro-géométriques suivants sur le comportement électrique de l'isolant:

- Distance inter-électrodes  $d$
- Epaisseur du matériau  $e$
- Permittivité du matériau  $\epsilon$

L'auteur a conclu que, autant la tension de contournement ne dépend ni de la permittivité, ni de l'épaisseur du matériau diélectrique, autant le courant de fuite, pour les mêmes configurations dépend incontestablement de ces deux paramètres, pour une même distance inter-électrodes.

Aussi l'impédance apparente croît de manière quasi logarithmique avec la distance inter-électrodes. Cette allure s'explique par la répartition complexe des charges sur les deux surfaces interne ( $S_i$ ) et externe ( $S_e$ ) constituant le conducteur (Figure III.2).

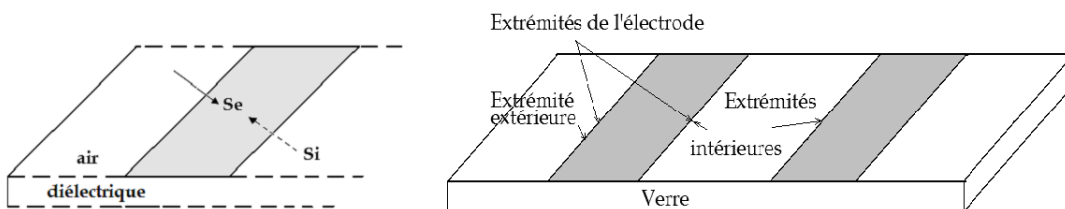


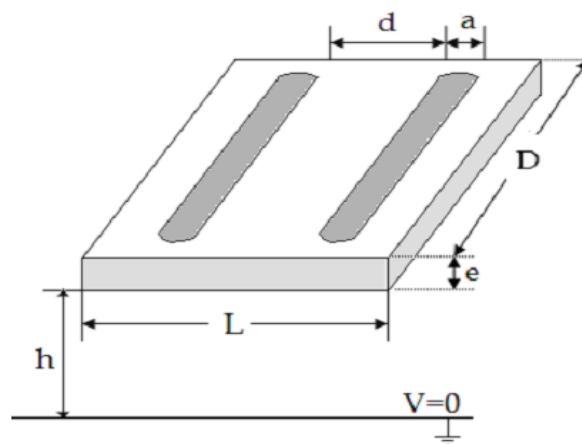
Figure III.2: Illustrations des extrémités intérieures et extérieures et des surfaces internes et externes

Une influence indéniable de l'épaisseur et de la permittivité du matériau sur l'impédance apparente est observée.

Dans une deuxième étape D.Namane a étudié le degré d'influence du sol sur le comportement du modèle plan (Figure III.3).

Ainsi, le modèle est étudié pour plusieurs distances par rapport au sol et ce en variant la distance inter-électrodes. Les résultats expérimentaux concernent la tension de contournement, le courant de fuite, l'impédance électrique équivalente et la capacité totale du système.

Une approche par simulation est faite, en considérant les mêmes paramètres. Une comparaison est effectuée entre les valeurs simulées et mesurées de la capacité du système, l'impédance totale et du courant de fuite.



**Figure III.3:** Modèle expérimental

L'auteur a tiré les conclusions suivantes à partir des résultats expérimentaux et simulés obtenus:

- La tension de contournement dépend très peu de la distance au sol, contrairement au courant de fuite.
- La capacité apparente augmente d'une manière considérable en fonction de la distance au sol, surtout pour les grandes distances inter électrodes.
- Pour une même distance au sol, l'allure quasi logarithmique de l'impédance apparente est toujours confirmée.

Les résultats obtenus par simulation concordent avec les valeurs mesurées. Illustrée, par simulation, à partir de la composante normale de l'induction électrique sur les surfaces conductrices, la répartition des charges au niveau du sol est concentrée dans la zone située en face de l'électrode HT.

Pour les grandes distances inter électrodes, il faut prévoir une distance au sol d'autant plus grande pour éviter les erreurs de mesure. Au contraire, l'effet du sol est plus modéré pour les faibles distances inter électrodes.

**III.3. Description des modèles adoptés par simulation**

Ceux-ci s’inspirent du modèle de D.Namane, seules les dimensions et formes des électrodes sont considérées afin d’étudier leur influence, notamment sur la capacité apparente obtenue. Celle-ci est liée à la quantité de charges réparties sur la surface totale d’un des conducteurs.

L’approche par simulation de nos modèles a été faite à l’aide du logiciel à deux dimensions ‘‘FEMM 4.0’’ utilisant la méthode des éléments finis.

La configuration simple de nos modèles nous a permis une représentation relativement aisée (Figure III.4, Figure III.5).

En procédant à une coupe transversale, on élimine une variable, c'est-à-dire qu’on suppose la distance  $D$  suffisamment grande devant les autres variables.

• **Modèles adoptés**

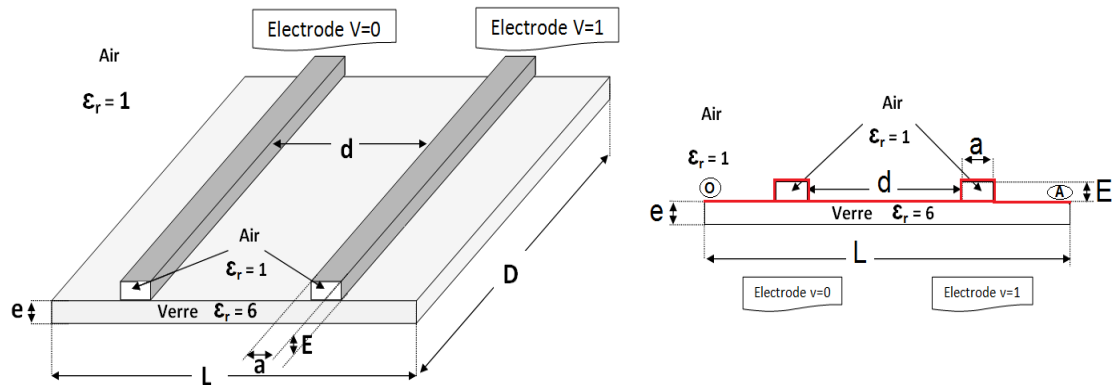
Plusieurs paramètres ont été variés pour la simulation, Nous avons choisi une plaque de verre ( $\epsilon_r=6$ ) avec les paramètres suivants (Figure III.4, Figure III.5):

$L=100\text{cm}$ ,  $D=100\text{cm}$ ,  $e=10\text{cm}$

Il s’agit alors d’analyser l’influence des paramètres suivants sur le comportement électrique de l’isolant:

- Epaisseur d’électrode  $E$
- Largeur d’électrode  $a$

Un premier modèle, illustrée sur la figure III-4, a été considéré, où l’épaisseur de l’électrode est variée, tout en maintenant la forme parallélépipédique de chaque conducteur.



**Figure III.4 : Modèle simulé 01**

Un second modèle où nous avons changé la forme des électrodes en donnant une forme semi-cylindrique à la partie supérieure de chaque conducteur (figure III-5).

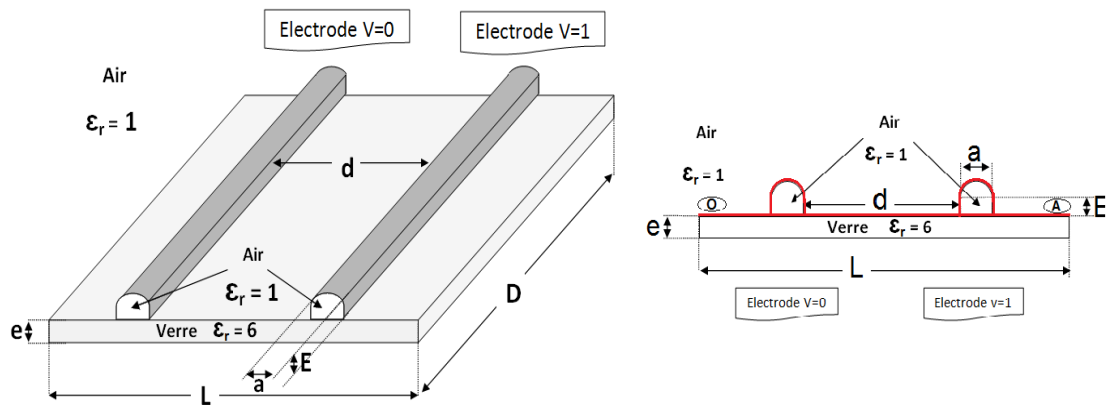


Figure III.5: Modèle simulé 02

L'utilisation du logiciel nous a permis de visualiser la distribution du champ électrique, du vecteur déplacement ainsi que la répartition du potentiel.

De plus, nous l'avons exploité pour déterminer la capacité du système afin d'étudier l'influence des facteurs dimension et forme des électrodes.

Nous présentons dans ce qui suit les résultats obtenus par simulation.

### III.4. Simulation

#### III.4.1. Influence des dimensions des électrodes dans le cas des électrodes rectangulaires

Nous observerons l'influence des différents paramètres (largeur d'électrode 'a' et l'épaisseur d'électrode 'E') sur la capacité, pour notre 1<sup>er</sup> modèle. Nous fixons une distance inter électrodes d=40 cm.

La figure III.6 illustre les variations de la capacité en fonction de l'épaisseur des électrodes pour différentes largeurs des électrodes.

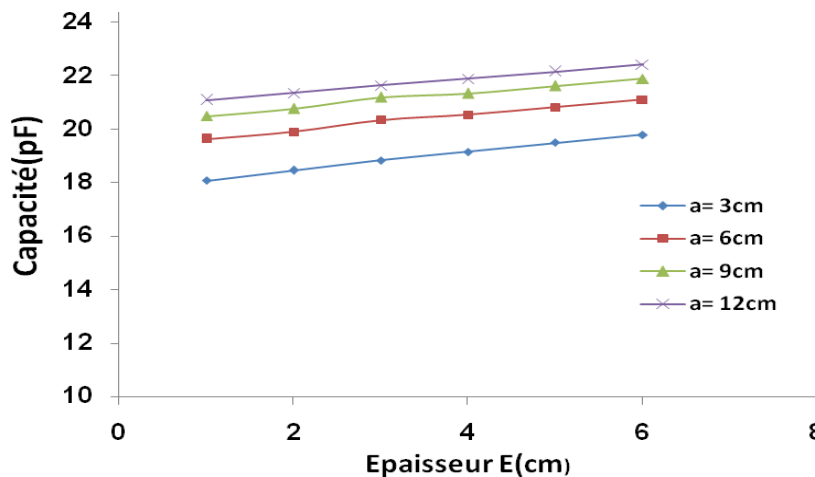


Figure III.6: Capacité en fonction de l'épaisseur des électrodes pour des différentes largeurs

Des variations de l'épaisseur des électrodes de E = 1 cm à E = 6 cm (Figure III.6) et pour des différentes largeurs a montrent que la capacité augmente avec l'épaisseur des

électrodes. Cependant cette variation ne semble pas très importante, car en augmentant, par exemple, la valeur de l'épaisseur de 2cm à 6cm la capacité ne varie que de 6% pour les différentes largeurs d'électrodes.

Afin d'illustrer l'influence de la largeur des électrodes, nous traçons également l'ensemble des caractéristiques C(a) pour les différentes épaisseurs E des électrodes. La figure III.7 illustre les variations de la capacité en fonction de la largeur des électrodes pour différentes épaisseurs.

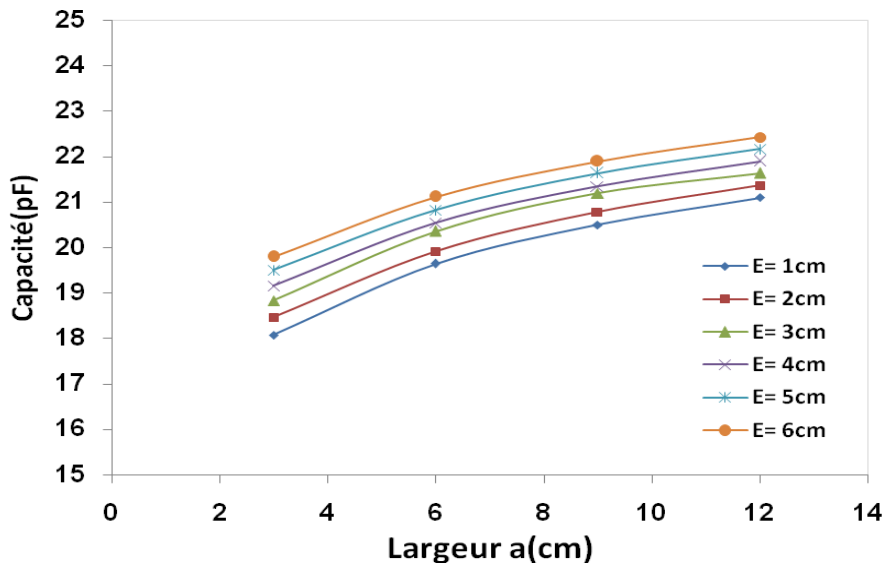


Figure III.7: Capacité en fonction de la largeur des électrodes pour différentes épaisseurs

On remarque aussi que pour des variations de la largeur des électrodes (Figure III.7) et pour des différentes épaisseurs, la capacité augmente avec la largeur des électrodes, cependant cette variation ne semble pas très importante, car en augmentant la largeur a de 3cm à 9cm la capacité ne varie que de 12% pour les différentes épaisseurs d'électrodes.

**III.4.2. Influence des dimensions des électrodes dans le cas des électrodes demi-circulaires**

Nous observerons l'influence des différents paramètres (largeur d'électrode "a" et l'épaisseur d'électrode "E ") sur la capacité, pour notre 2<sup>ème</sup> modèle.

La figure III.8 illustre les variations de la capacité en fonction de l'épaisseur des électrodes pour différentes largeurs des électrodes.

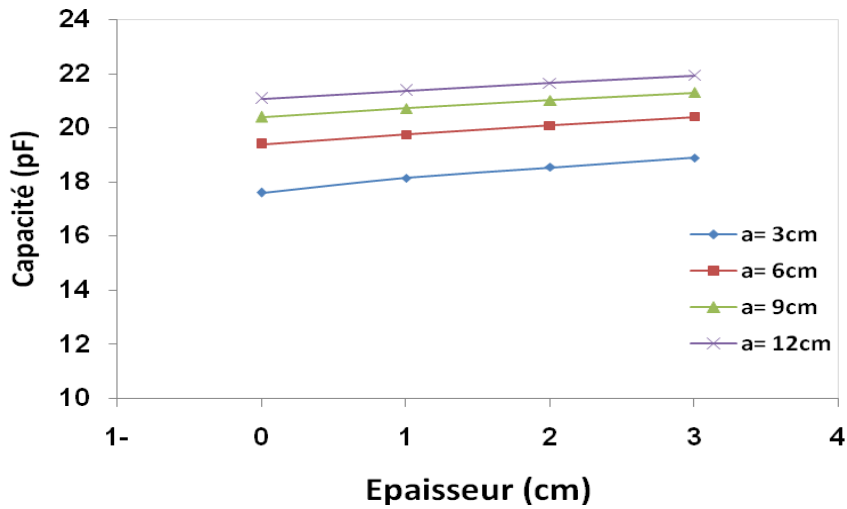


Figure III.8: capacité en fonction de l'épaisseur des électrodes pour des différentes largeurs

On remarque aussi pour des variations de l'épaisseur des électrodes de  $E = 0$  cm à  $E = 3$  cm (Figure III.8) et pour des différentes largeurs  $a$  montrent que la capacité augmente avec l'épaisseur des électrodes, cependant cette variation ne semble pas très importante, car en augmentant l'épaisseur  $e$  de 0cm à 3cm la capacité ne varie que de 5% pour les différentes épaisseurs d'électrodes.

La figure III.9 illustre les variations de la capacité en fonction de la largeur des électrodes pour différentes épaisseurs des électrodes.

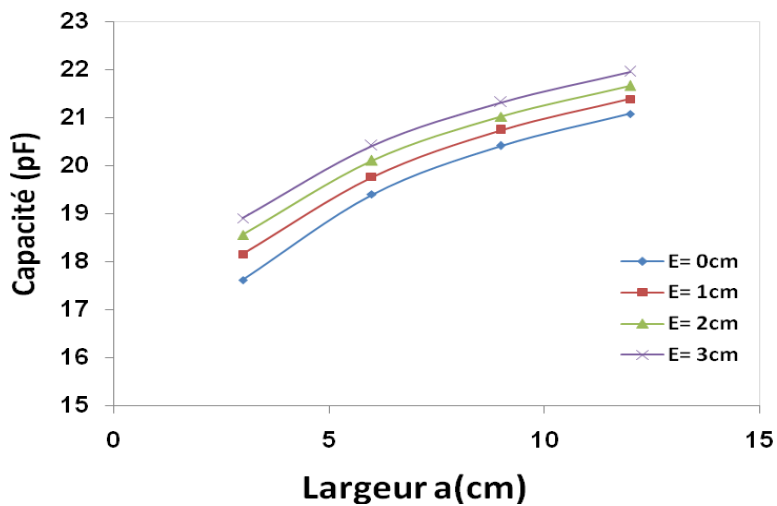


Figure III.9: capacité en fonction de la largeur des électrodes pour des différentes épaisseurs

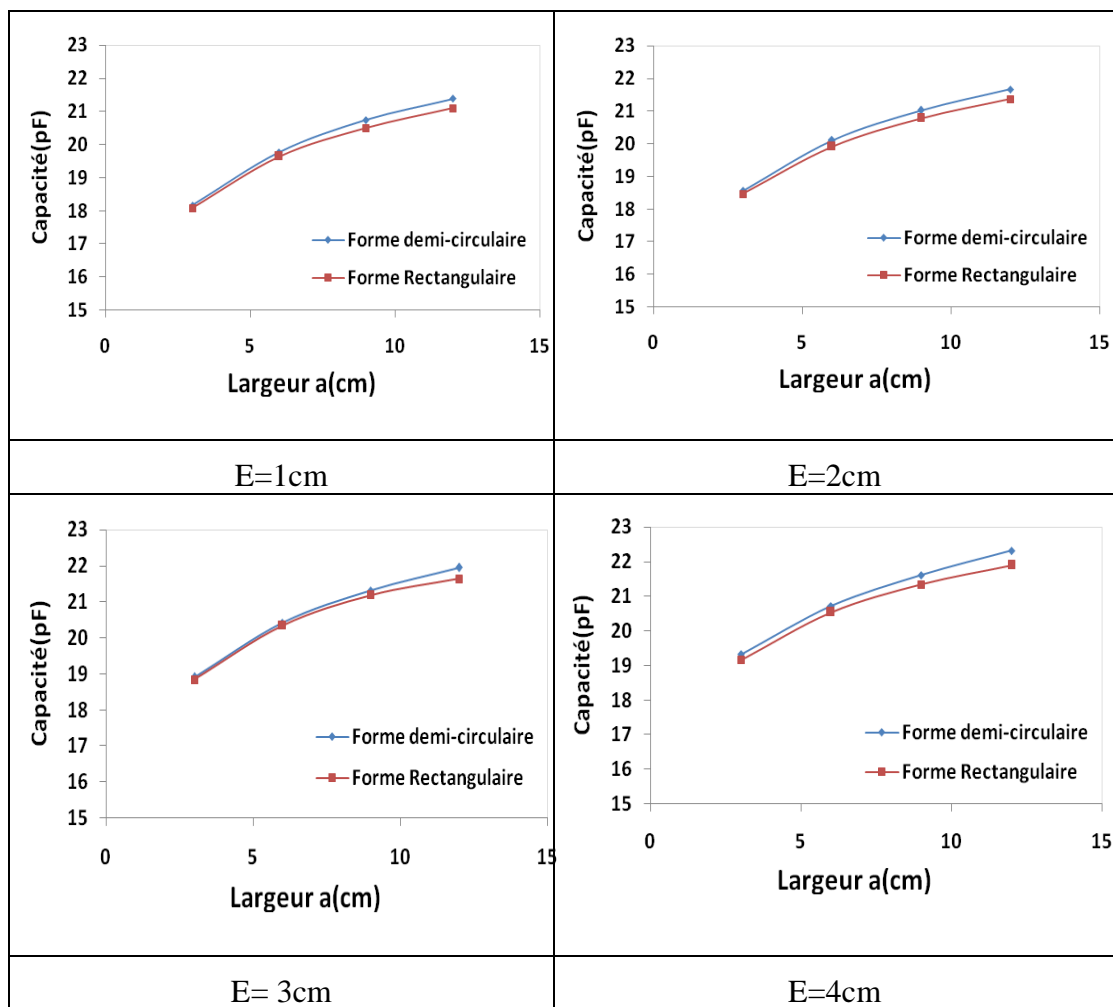


Pour le 2<sup>ème</sup> modèle aussi, nous fixons une distance inter électrodes  $d=40$  cm, des variations de la largeur des électrodes et pour des différentes épaisseurs  $E$  (Figure III.9) montrent que la capacité augmente avec la largeur des électrodes, cependant cette variation ne semble pas très importante, car en augmentant la valeur de la largeur de 3cm à 9cm la capacité ne varie que de 14% pour les différentes épaisseurs d'électrodes.

**III.4.3. Influence de la forme des électrodes**

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à l'influence de la forme des électrodes sur la capacité, pour notre 1er et 2ème modèle.

La figure III.10 illustre les variations de la capacité en fonction de la largeur des électrodes pour les deux formes des électrodes.

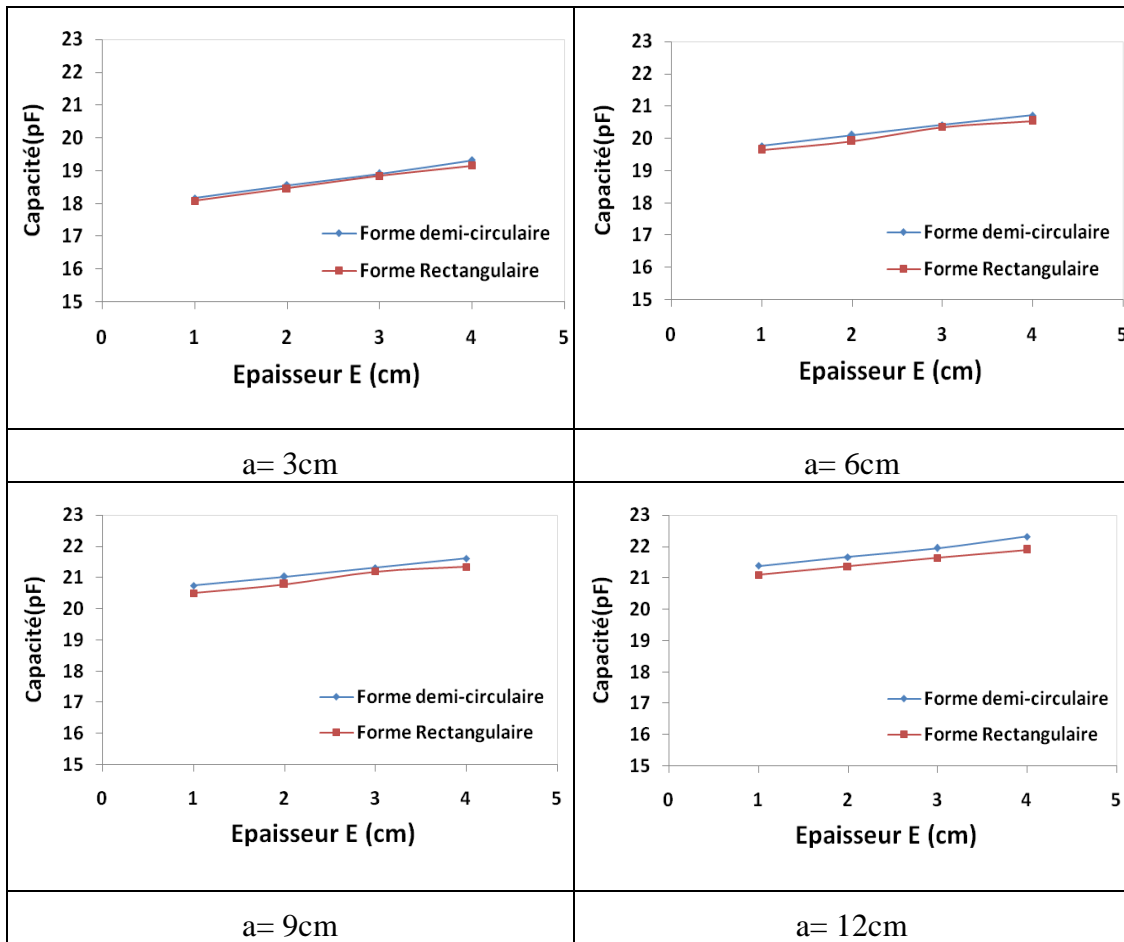


**Figure III.10:** capacité en fonction de la largeur des électrodes pour les deux modèles simulés

Avec les différentes valeurs des épaisseurs  $E$  des deux modèles et pour une même distance inter électrodes  $d= 40$ cm, nous remarquons que la capacité augmente quand

nous augmentons la largeur des électrodes  $a$  et ceci pour les deux modèles simulés, le modèle rectangulaire et demi-circulaire, cependant la capacité correspondante au 2<sup>ème</sup> modèle est légèrement importante que celui du 1<sup>er</sup> modèle.

La figure III.11 illustre les variations de la capacité en fonction de l'épaisseur des électrodes pour les deux formes des électrodes.



**Figure III.11:** capacité en fonction de l'épaisseur des électrodes pour les deux modèles simulés

Avec des différentes valeurs de la largeur d'électrodes des deux modèles et pour une même distance inter électrodes  $d = 40\text{cm}$ , nous remarquons que la capacité augmente quand nous augmentons l'épaisseur des électrodes  $E$  et ceci pour les deux modèles simulés, le modèle rectangulaire et demi-circulaire, cependant la capacité correspondante au 2<sup>ème</sup> modèle est légèrement importante que celui du 1<sup>er</sup> modèle.

**III.5. Interprétations : Répartition du champ électrique**

Nous nous proposons d'illustrer, dans ce qui suit, les différents champs, pour essayer d'interpréter les résultats obtenus précédemment.

Nous choisissons deux contours d'intégration (Figure III.13) :

Par rapport à l'axe OX, le contour OA est choisi correspondant à l'interface associée à la surface de séparation des différents milieux, à savoir l'interface air-verre et l'interface conducteur-air correspondant à la surface externe du conducteur exposée à l'air.

La composante normale de l'induction à la surface des conducteurs renseigne sur la distribution de la charge. Par ailleurs, la charge totale permettant de déterminer la capacité est celle répartie sur la surface totale du conducteur, à savoir sur les deux surfaces : externe qu'on part de A à O, et interne Si on part de O à A (interface conducteur-verre) (Figure III.12).

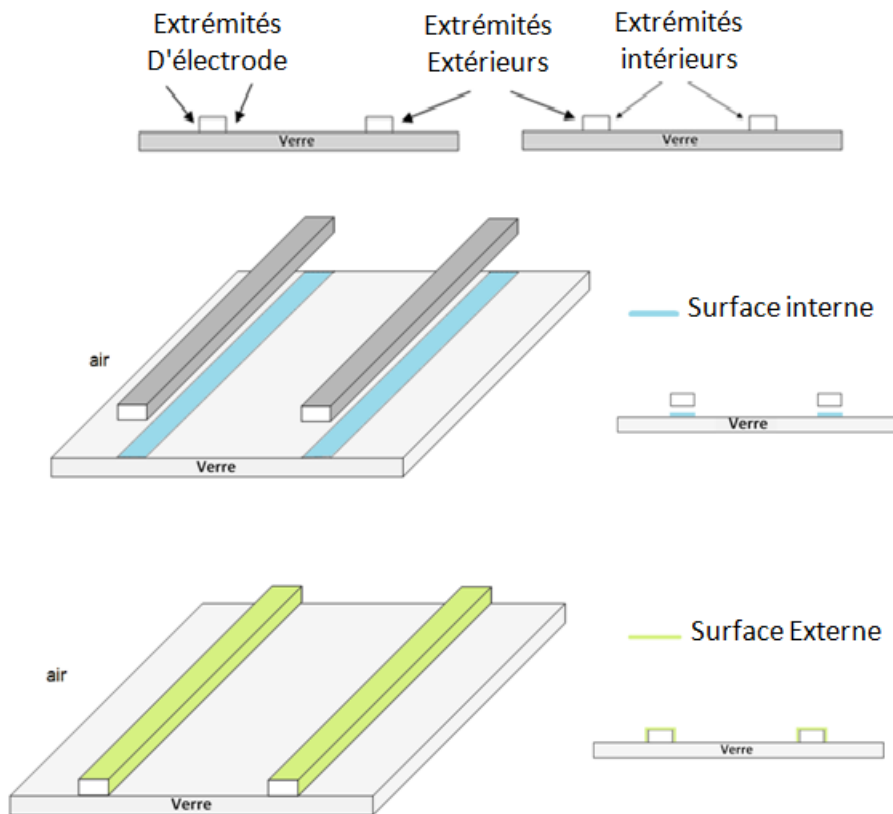


Figure III.12: Illustrations des extrémités et surfaces externe et interne

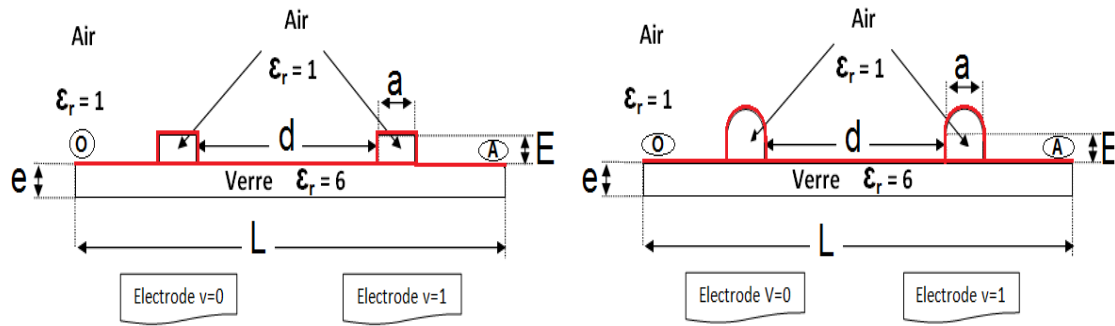
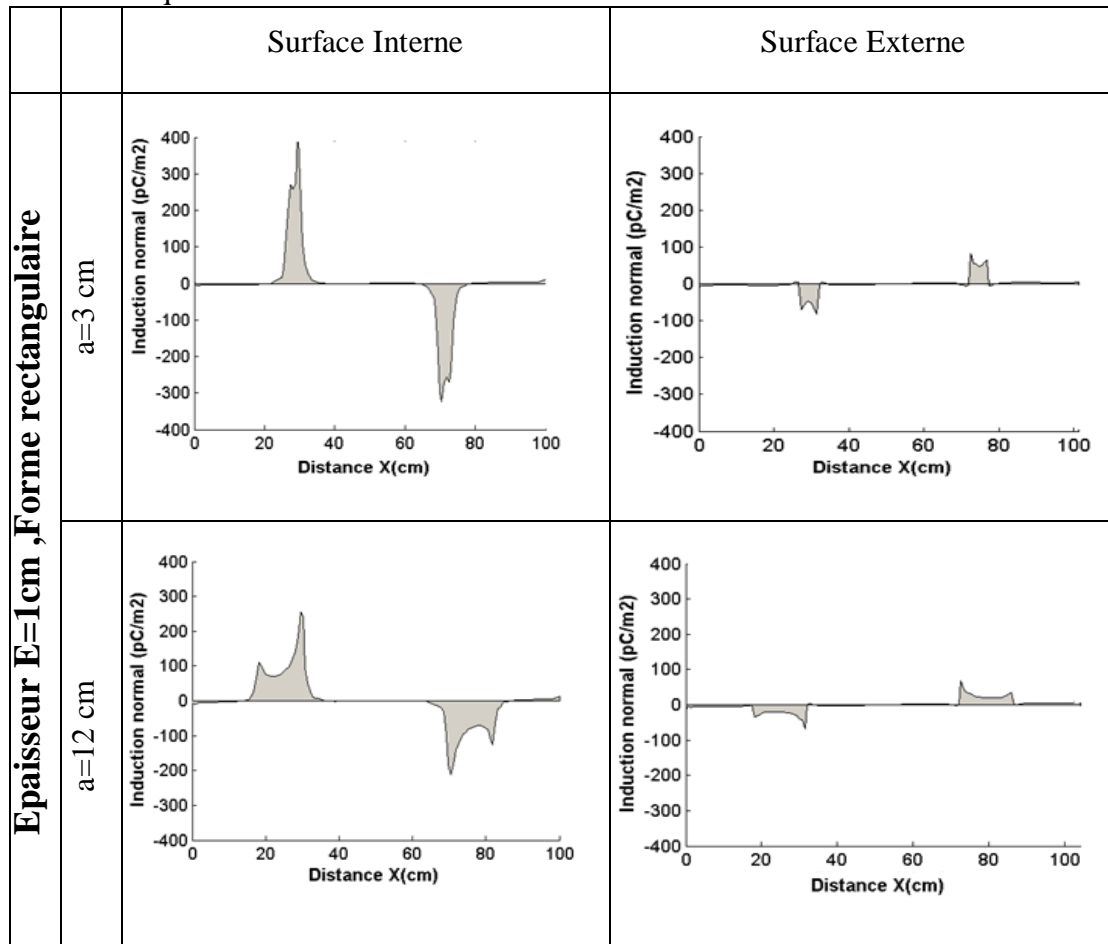
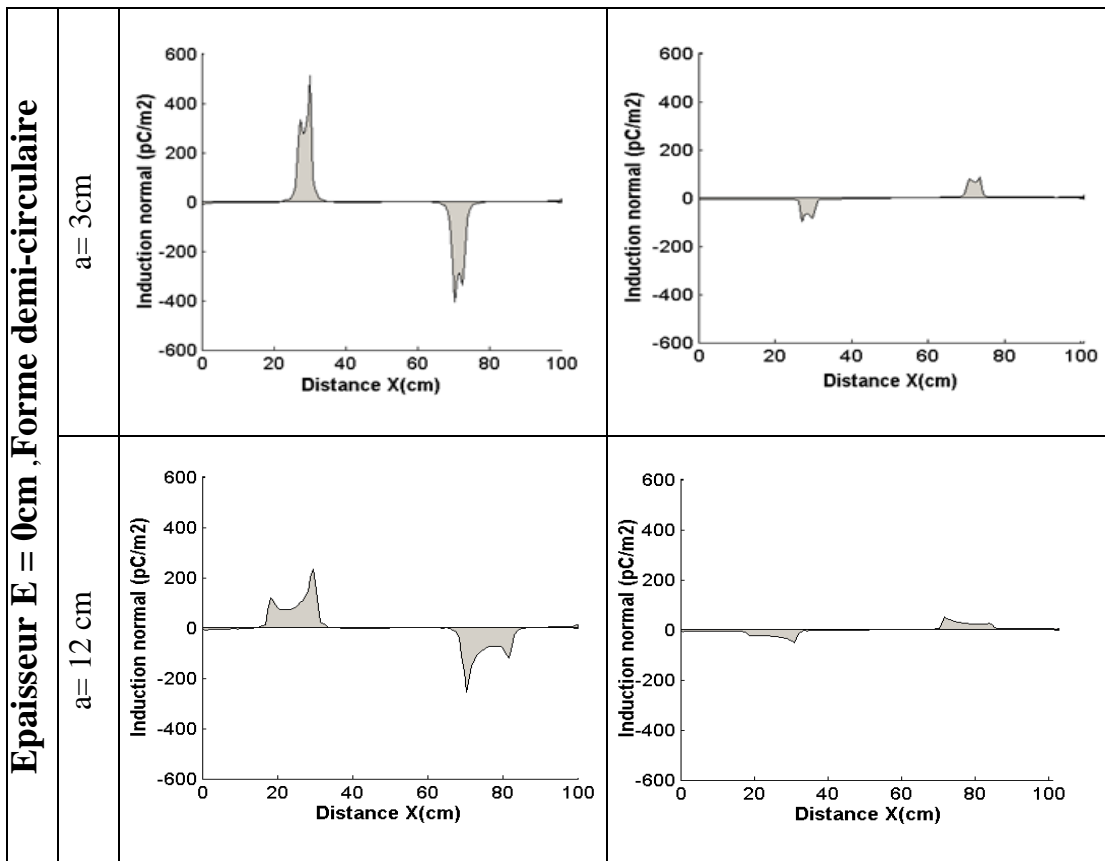


Figure III.13: Choix des contours d'intégration

III.5.1. Influence de la largeur des électrodes

La figure III.14 illustre les variations de l'induction normale en fonction de la distance  $x$  sur les deux surfaces des électrodes interne et externe et pour les deux formes rectangulaire et circulaire en prenant les deux cas extrêmes de la largeur des électrodes qu'on a étudiées.





**Figure III.14:** Induction normale en fonction de la distance pour des différentes largeurs

Nous avons fait varier, par simulation, pour une même distance inter électrodes  $d=40\text{cm}$ , la largeur des électrodes  $a$  en prenant les deux cas extrêmes  $3\text{cm}$  et  $12\text{cm}$ .

Nous avons choisi, arbitrairement, une largeur ( $L$ ) de la plaque de verre égale à  $1\text{m}$ . La longueur ( $D$ ) des électrodes est également fixée à  $1\text{m}$ . Les électrodes choisies possèdent une épaisseur égale à  $1\text{cm}$  pour des électrodes rectangulaire et  $0\text{cm}$  pour des électrodes demi-circulaire. Pour une tension de  $1\text{V}$ , nous nous proposons d'illustrer, sur les deux interfaces, la composante normale de l'induction électrique qui traduit, entre autre, la répartition de la charge sur les conducteurs (Figure III.14).

Une attention particulière doit être accordée à la répartition de la charge sur les surfaces interne et externe des électrodes afin d'illustrer les zones de concentration maximales. On observe qu'il y a une forte concentration de la charge dans cette région.

Cette intensité est renforcée sur les extrémités intérieures qui se font face. Il s'agit d'un effet de 'pointe'. Cet effet de pointe, associé à l'effet de proximité des électrodes, conduit à un champ maximal autour des extrémités intérieures.

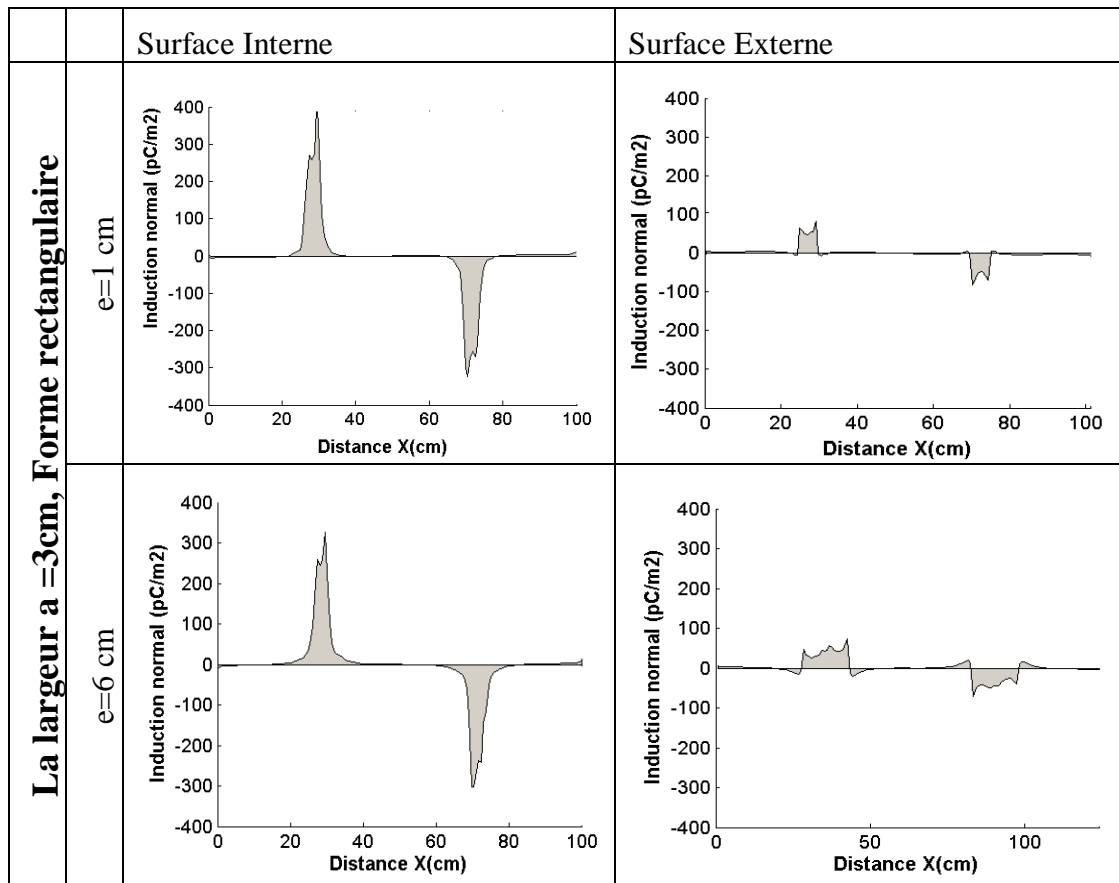
Il est important de noter que

- la quantité de charges accumulée sur la surface interne est toujours plus importante à cause de la permittivité du verre ( $\epsilon_r=6$ ) qui est plus importante que de l'air ( $\epsilon_r=1$ ).

- La quantité de charge accumulée sur la surface interne et externe reste presque constante pour les deux valeurs extrêmes de la largeur, seule la répartition de la charge varie. On note que quand la largeur des électrodes est faible, la surface de contact conducteur-matériau diélectrique donne lieu à une densité de charge importante, par contre si cette surface est grande ceci signifie une faible densité de charge.

**III.5.2. Influence de l'épaisseur des électrodes**

La figure III.15 illustre les variations de l'induction normale en fonction de la distance x sur les deux surfaces des électrodes interne et externe et pour les deux formes rectangulaire et circulaire en prenant les deux cas extrêmes d'épaisseurs que nous avons étudié.



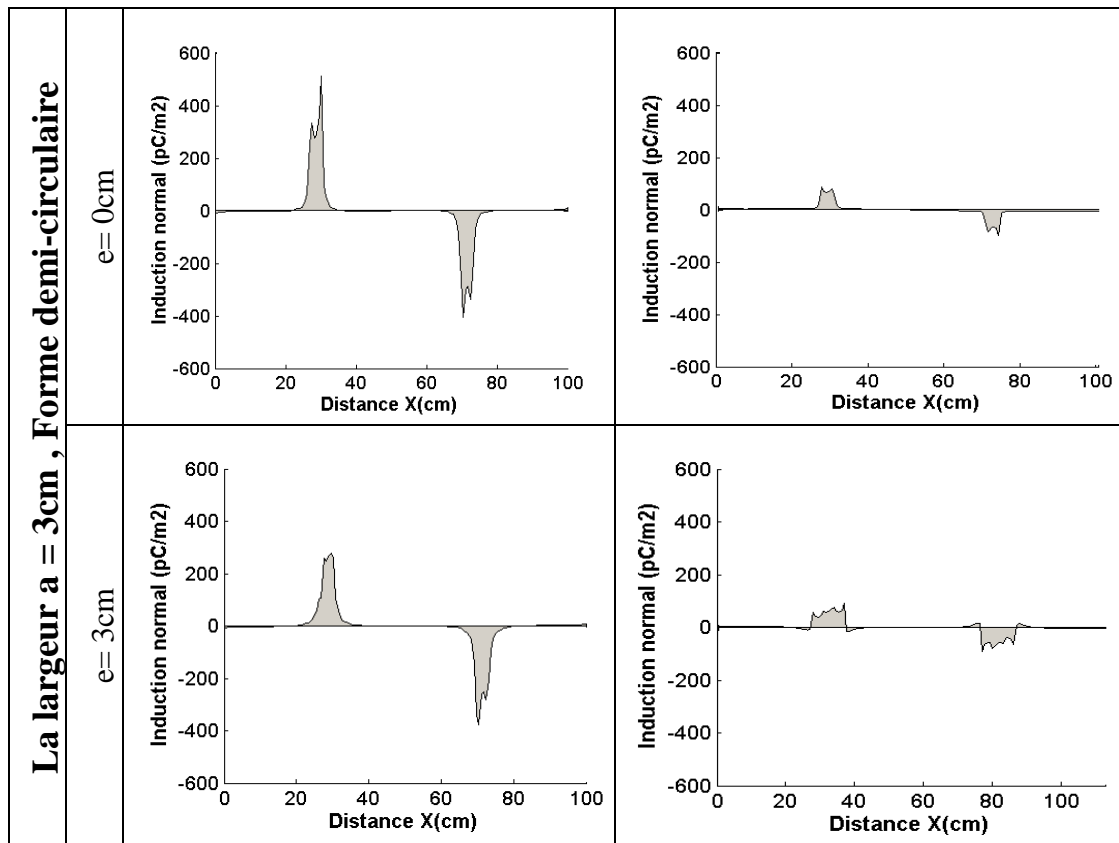


Figure III.15: Induction normale en fonction de la distance pour des différentes épaisseurs

Afin d'évaluer le degré d'influence de l'épaisseur sur les charges induites sur l'électrode, nous présentons (Figure III-15), pour une distance inter-électrodes constante de 40cm, la répartition des charges sur les deux surfaces interne et externe des électrodes, pour deux valeurs extrêmes d'épaisseurs des électrodes (1cm, 6cm) pour des électrodes rectangulaire et (0cm, 3cm) pour des électrodes demi-circulaires.

Nous avons choisi, arbitrairement, une largeur (L) de la plaque de verre égale à 1m. La longueur (D) des électrodes est également fixée à 1m. Les électrodes choisies possèdent une largeur égale à 3cm pour des électrodes rectangulaire et pour des électrodes demi-circulaires. Pour une tension de 1V, nous nous proposons d'illustrer, sur les deux interfaces, la composante normale de l'induction électrique qui traduit, entre autre, la répartition de la charge sur les conducteurs.

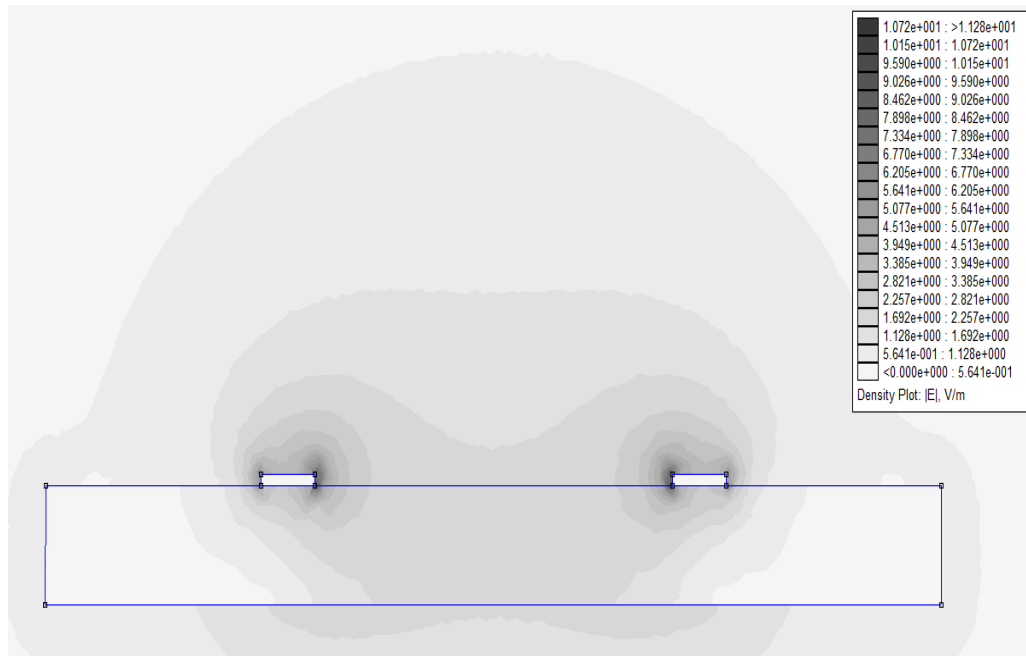
On remarque que

- la quantité de charges accumulée sur la surface interne est toujours plus importante à cause du facteur de permittivité.
- La densité de charge sur la surface interne reste presque constante pour les deux valeurs extrêmes de l'épaisseur pour la valeur de la largeur des électrodes étudiée, et ce parce que la surface de contact conducteur-matériau diélectrique ne change pas.

- la densité de charge sur la surface externe n'est pas la même pour les deux valeurs extrêmes de l'épaisseur due à l'augmentation de la surface air-conducteur quand on augmente l'épaisseur d'électrode.
- Cette augmentation de la quantité de charge accumulée sur la surface externe influe peu sur la quantité de charge totale du conducteur (capacité) puisque elle est faible devant celle accumulée sur la surface interne à cause du facteur de permittivité du verre qui est plus important que de l'air.

La figure III.16 et la figure III.17 illustre la distribution de champ et de l'induction normale respectivement sur la surface des électrodes et de diélectrique pour les deux formes des électrodes rectangulaire et demi circulaire.

- **Forme rectangulaire**



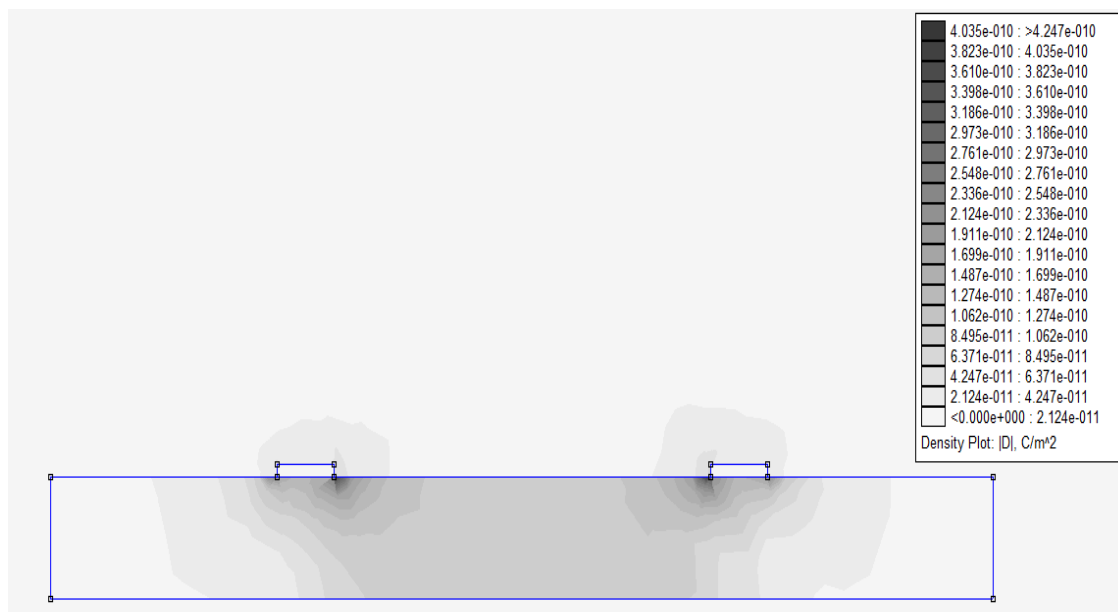


- **Forme demi-circulaire**

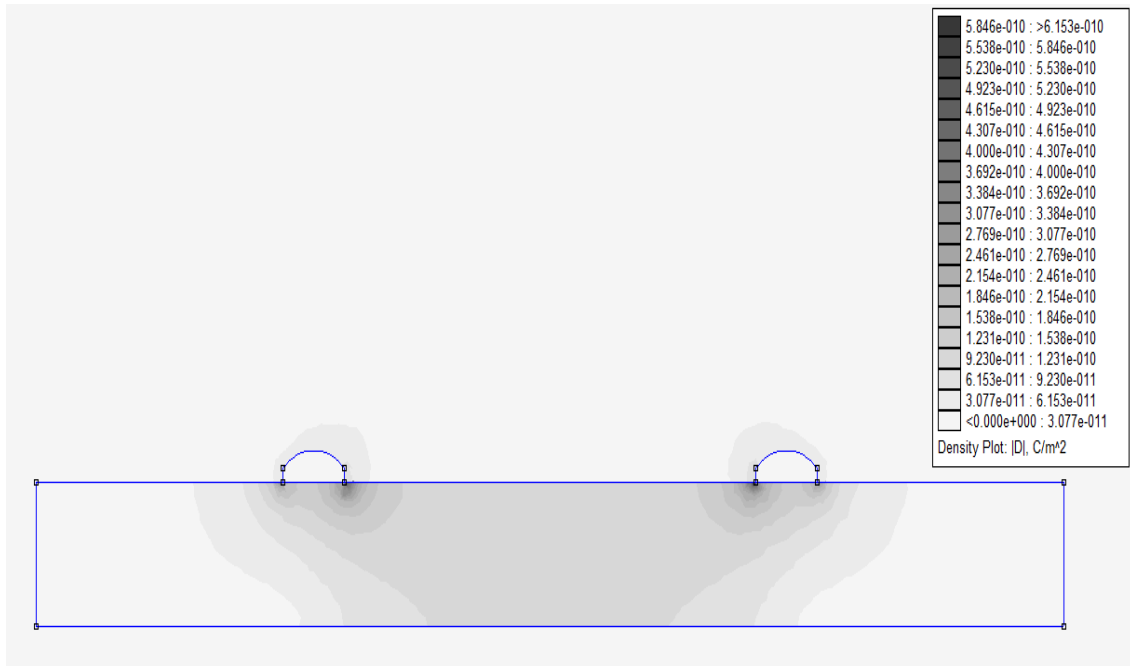


**Figure III.16:** Illustration du champ électrique sur une section plane du dispositif

- **Forme rectangulaire**



- **Forme demi-circulaire**



**Figure III.17:** Illustration de l’induction électrique sur une section plane du dispositif

Nous observons bien que le champ est intense au voisinage des extrémités des électrodes, notamment autour des extrémités qui se font face, ainsi que nous l’avons établi précédemment. Nous remarquons que le champ est aussi intense dans l’air que dans le verre. Par contre, l’induction électrique, est concentrée principalement dans le verre, en raison de sa grande permittivité : la charge est donc plus élevée sur la surface interne de l’électrode. La répartition dans la section plane présentée vient donc confirmer l’allure des caractéristiques de l’induction normale présentées pour les deux interfaces.

### **III.6.Conclusion**

Ce chapitre nous a permis d'établir que la forme et la dimension des électrodes posées sur un isolant influent peu sur la valeur de la capacité globale de l'isolateur. En effet, la surface interne est celle où les charges sont le plus concentrées en raison du rapport des permittivités air-verre. De plus la largeur influe modérément sur la valeur de la capacité en raison de la répartition de la charge qui conduit à une densité d'autant plus grande que la largeur est faible. En augmentant la largeur, cette densité diminue, ce qui conduit à une charge totale qui augmente mais très modérément.

Les conclusions suivantes peuvent être donc tirées à partir des résultats simulés obtenus:

- ✓ La capacité augmente modérément avec les dimensions des électrodes, à savoir la largeur  $a$  et l'épaisseur  $E$ .
- ✓ La forme des électrodes n'influe pas sur la capacité d'isolateur d'après les résultats de simulation du modèle rectangulaire et demi-circulaire.

Ces résultats s'expliquent par la complexité de la répartition de la charge sur les deux surfaces interne et externe du conducteur.

## **CHAPITRE IV**

*Influence de la position des  
électrodes sur la capacité du  
modèle*

### IV.1. Introduction

Le profil de l'isolateur à une grande influence sur sa capacité.

La longueur de fuite est un paramètre important qui influe sur la tenue diélectrique des isolateurs. Pour améliorer la performance d'un isolateur, on pourrait être tenté d'augmenter la longueur de fuite. En effet, plusieurs formes d'isolateurs sont utilisées.

Dans ce chapitre une simulation, à l'aide du logiciel FEMM est proposée, pour étudier le degré d'influence de la position des électrodes sur la capacité d'isolateur en variant plusieurs paramètres comme la longueur et l'épaisseur de la plaque du verre donc en variant la longueur de la ligne de fuite. Par la suite l'influence de la proportion de la pollution sur l'isolateur est envisagée.

### IV.2. Approche de la forme réelle d'un isolateur : différents profils d'isolateurs à capot et tige

Les caractéristiques des éléments des isolateurs de type capot et tige sont régies par la norme CEI-60305. Cette norme est destinée aux isolateurs situés dans les régions non pollués et pollués. Cependant, pour des conditions extrêmes, on peut modifier certain caractéristiques des isolateurs (ligne de fuite, forme, etc.), afin d'obtenir un meilleur fonctionnement.

La figure IV.1 présente les différents profils des isolateurs [15] à capot et tige qui sont :

#### a) Profil standard

La faible profondeur, l'espacement entre les anneaux (nervures) et la ligne de fuite moyenne permettent l'utilisation de ce profil dans une zone de pollution modérée.

#### b) Profil antibrouillard

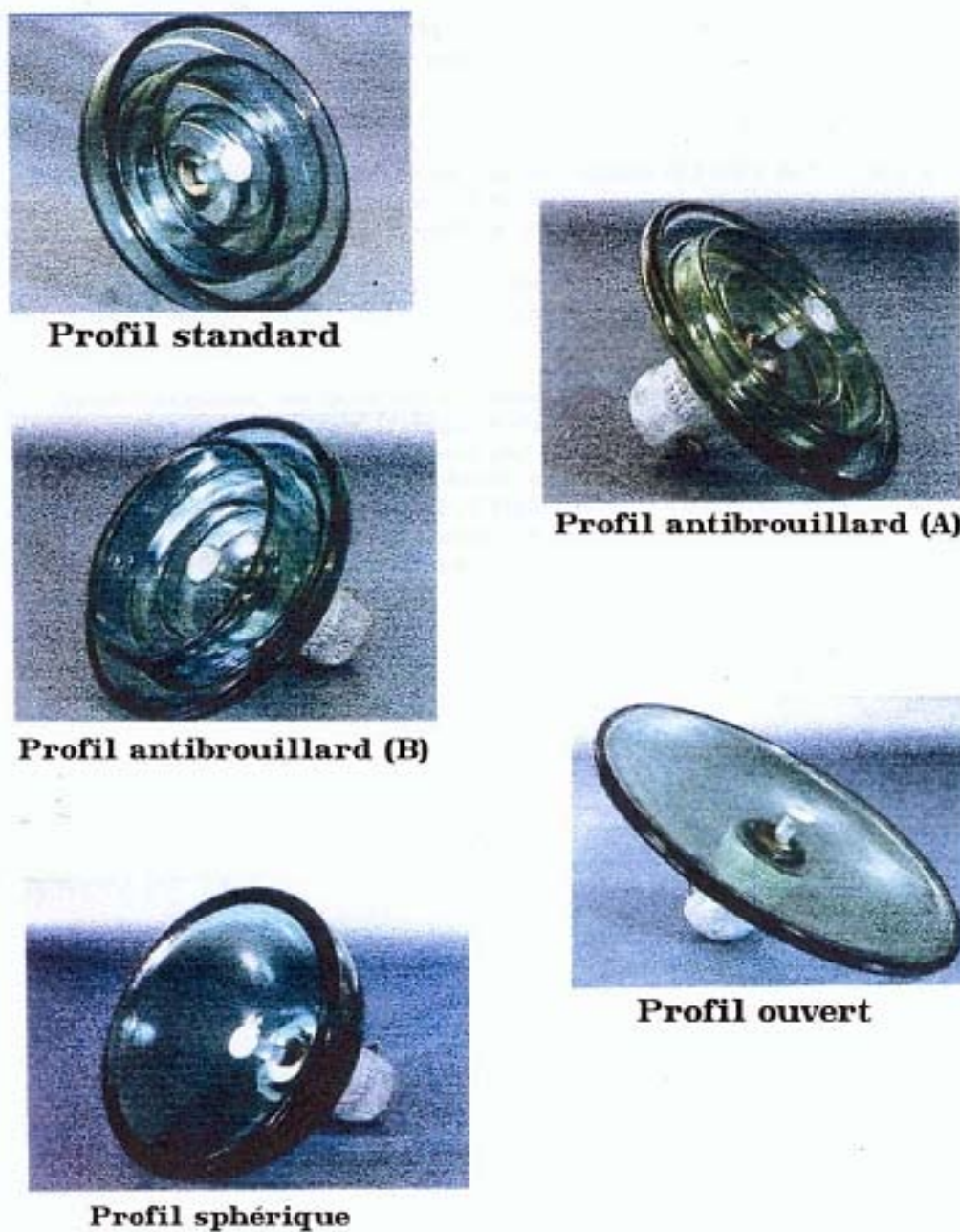
Il est plus large que le profil standard. L'écartement entre les anneaux permet un bon nettoyage par le vent ou la pluie et facilite le lavage manuel si nécessaire. L'espacement prévient également l'apparition d'arcs entre les anneaux adjacents dans des conditions sévères de pollution.

#### c) Profil ouvert

La suppression complète des anneaux permet de réduire l'accumulation des dépôts polluants. Ce type de profil est particulièrement efficace en régions désertiques où le lavage par pluie est très rare.

#### d) Profil sphérique

Ce type de profil donne une ligne de fuite équivalente au profil standard, mais l'absence d'anneaux facilite le nettoyage manuel.



**Figure VI.1:** Différents profils d'isolateurs à capot et tige [15]

### **Caractéristiques géométriques des isolateurs à capot et tige**

En effet, les caractéristiques géométriques (diamètre externe de la partie isolante, longueur de la ligne de fuite...) des isolateurs à capot et tige diffèrent selon leurs conditions de service (tension de service, sévérité de la pollution du site ...). Ci-dessous quelques caractéristiques géométriques selon la publication CEI 60305 (Tab VI.1) [22].

Désignation CEI	Charge de rupture (kN)	Diamètre extérieur (mm)	Pas Nominal (mm)	Longueur de la ligne de fuite (mm)
U 40	40	175	100 110	185
U 70	70	255	127 146	280
U 100	100	255 288 <sup>(1)</sup>	127 146 <sup>(1)</sup>	318 440 <sup>(1)</sup>
U 160	160	280 320 <sup>(1)</sup>	146 170 <sup>(1)</sup>	370 540 <sup>(1)</sup>
U 300	300	320	195	480
U 400	400	360 380	206 220	525 550
U 530	530	380 440	240 255	600 640

Tableau VI.1 : Caractéristiques géométriques des isolateurs à capot et tige (CEI 60305) [22].

IV.3. Description des modèles choisis

Dans ce chapitre comme nous allons étudier l'influence de la position des électrodes sur la capacité d'isolateur en plaçant une électrode au dessus de la plaque et l'autre au dessous et ce dans le but de se rapprocher de la forme de l'isolateur à capot et tige (Figure IV.3). Une comparaison est faite avec le modèle étudié dans le chapitre 3 en faisant varier les différents paramètres comme la largeur et l'épaisseur de la plaque.

1er Modèle: les deux électrodes sur la plaque du verre

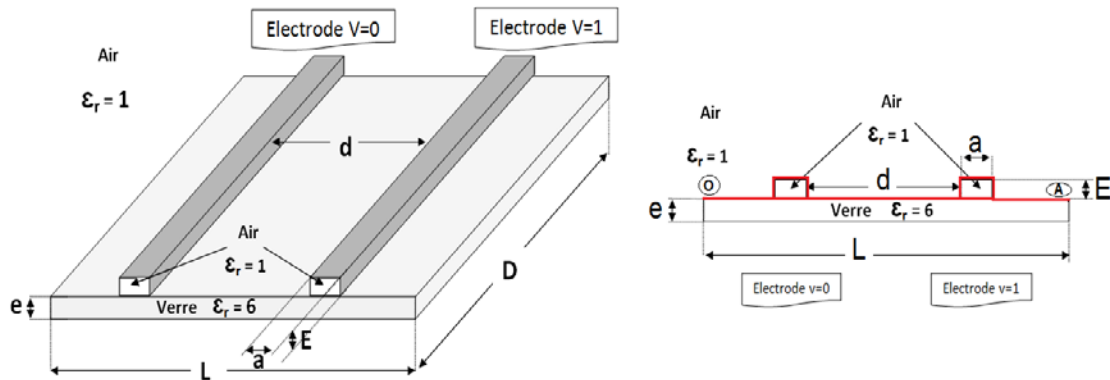
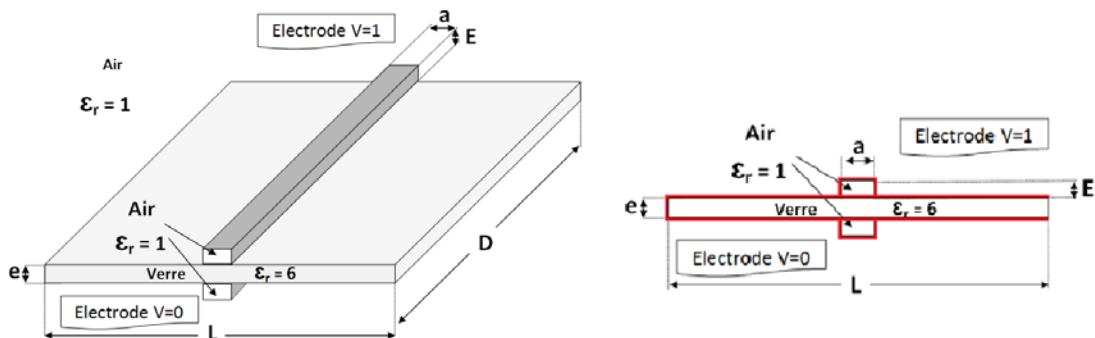


Figure IV.2: Modèle simulé 01

**2eme Modèle: approche de l'isolateur à capot et tige****Figure IV.3:** Modèle simulé 02

Ainsi donc, plusieurs paramètres ont été variés durant la simulation.

Nous avons choisi des électrodes rectangulaires avec les paramètres suivants (Figure IV.2, Figure IV.3):  $a=12\text{cm}$ ,  $D=100\text{cm}$ ,  $E=1\text{cm}$ .

Il s'agit alors d'analyser l'influence des paramètres suivants sur le comportement électrique de l'isolant:

- Epaisseur de la plaque de verre  $e$
- Largeur de la plaque de verre  $L$

L'utilisation du logiciel nous a permis de voir la distribution du champ électrique, du vecteur déplacement ainsi que la répartition du potentiel.

De plus, nous l'avons exploité pour déterminer la capacité du système afin d'étudier l'influence de la position des électrodes sur l'isolateur.

Nous présentons dans ce qui suit les résultats de la simulation. Ces résultats concernent essentiellement la capacité simulée.

**IV.4. Simulation****IV.4.1. Influence des dimensions de la plaque**

De la même façon que dans le chapitre 3, nous avons fait varier, par simulation, l'épaisseur et la largeur de la plaque du verre.

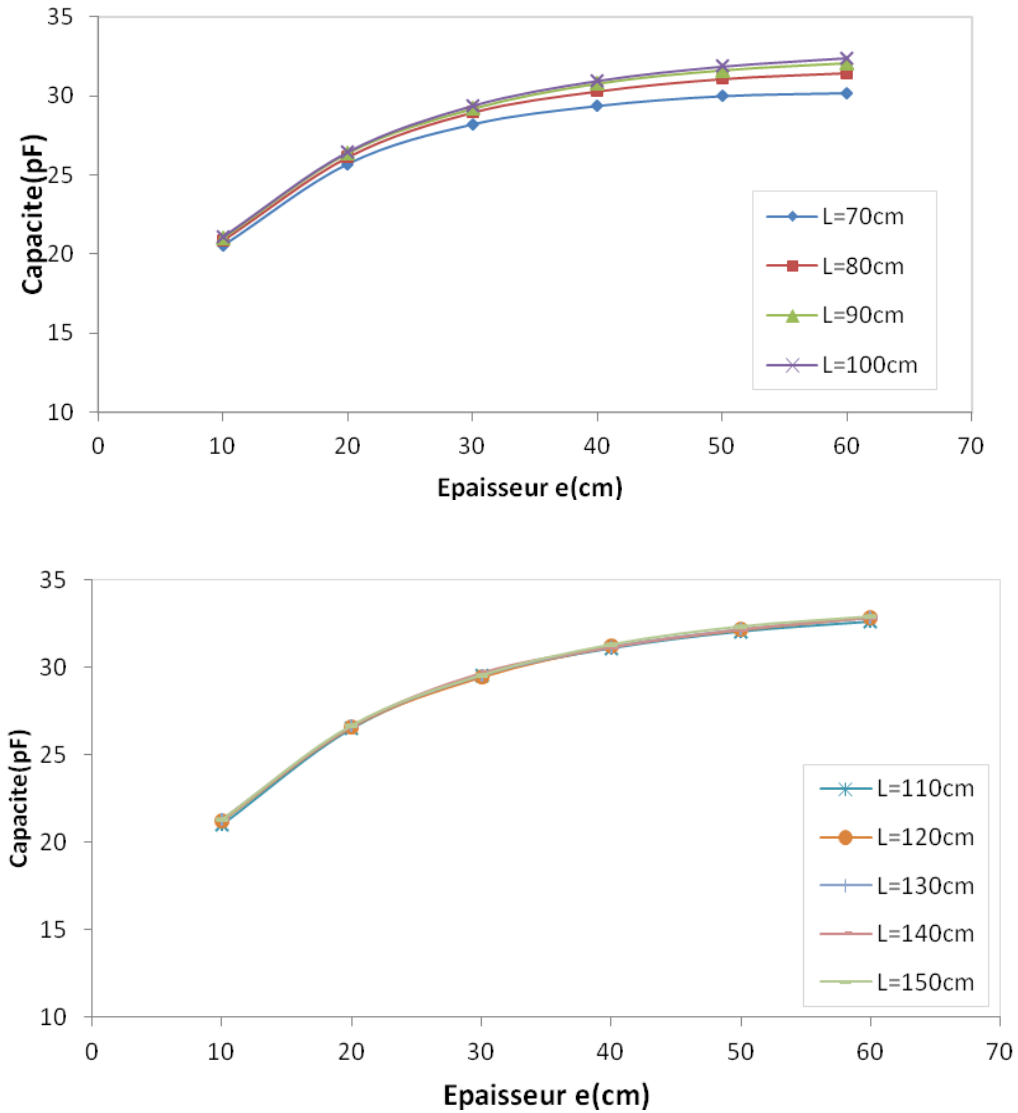
Nous observerons l'influence de ces différents paramètres sur la capacité, pour notre 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> modèle.

**IV.4.1.1. dans le cas de 1<sup>er</sup> modèle**

Nous avons fixé la distance inter électrode  $d=40\text{cm}$ , considérée comme étant la longueur de la ligne de fuite.

La figure IV.4 illustre les variations de la capacité en fonction de l'épaisseur de la plaque pour différentes largeurs de la plaque.





**Figure VI.4:** Capacité en fonction de l'épaisseur de la plaque pour des différentes largeurs

L'allure de ces deux familles de caractéristiques montre que, pour les différentes largeurs de la plaque de verre L, la capacité croît de manière prononcée pour les épaisseurs inférieures à 30cm, puis finit par se stabiliser à partir de cette valeur.

Par ailleurs, la figure IV.5 illustre les variations de la capacité en fonction de la largeur de la plaque pour différentes épaisseurs de la plaque.

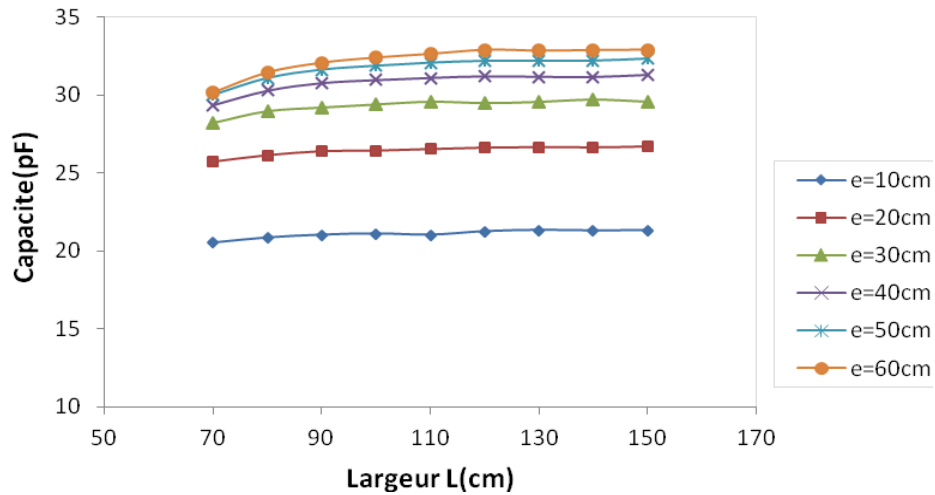


Figure VI.5: Capacité en fonction de la largeur de la plaque pour des différentes épaisseurs

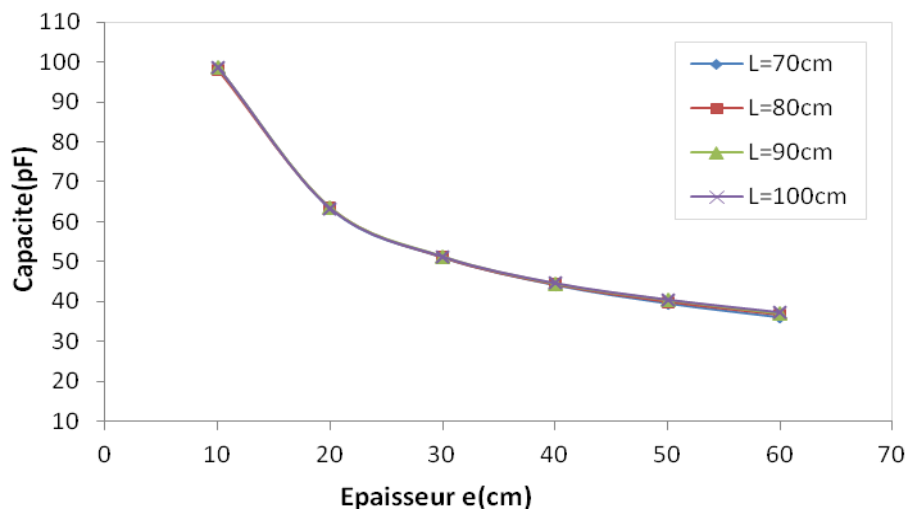
Pour des variations de la largeur de la plaque de  $L = 70 \text{ cm}$  à  $L = 150 \text{ cm}$  (Figure IV.5) et pour des différentes épaisseurs  $e$  montrent qu'il n'y a pas d'influence de la largeur sur la capacité du modèle celle-ci reste presque constante quand on augmente la largeur de la plaque.

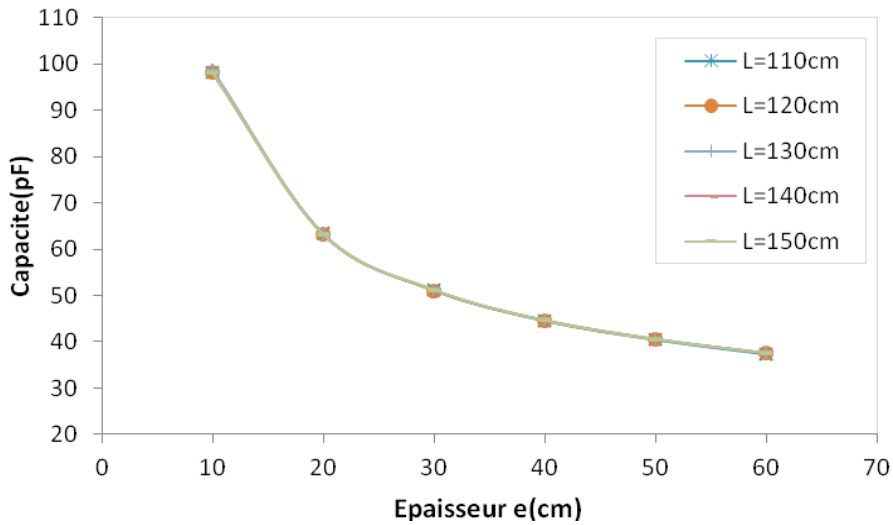
#### IV.4.1.2. dans le cas de 2<sup>ème</sup> modèle

On a varié les dimensions de la plaque de verre (épaisseur et largeur) donc on a varié la longueur de la ligne de fuite.

Nous étudions ainsi l'influence de la longueur de la ligne de fuite sur la capacité du modèle étudié une fois en variant l'épaisseur puis en variant la largeur de la plaque.

La figure IV.6 illustre les variations de la capacité en fonction de l'épaisseur de la plaque pour différentes largeurs de la plaque.

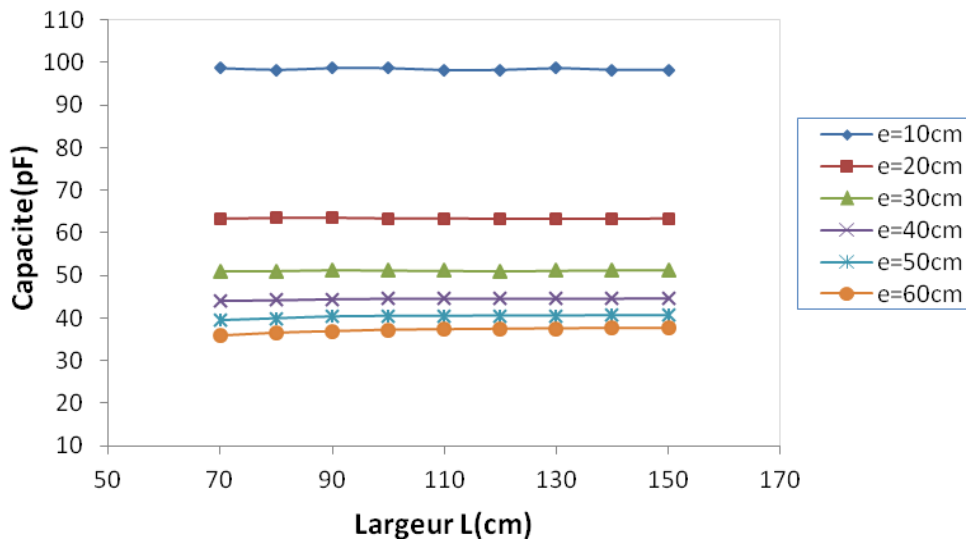




**Figure VI.6:** Capacité en fonction de l'épaisseur de la plaque pour des différentes largeurs

L'allure de ces deux caractéristiques montre que, pour la différente largeur de la plaque de verre L, la capacité décroît de manière très prononcée en fonction de l'épaisseur de la plaque.

La figure IV.7 illustre les variations de la capacité en fonction de la largeur de la plaque pour différentes épaisseurs de la plaque.



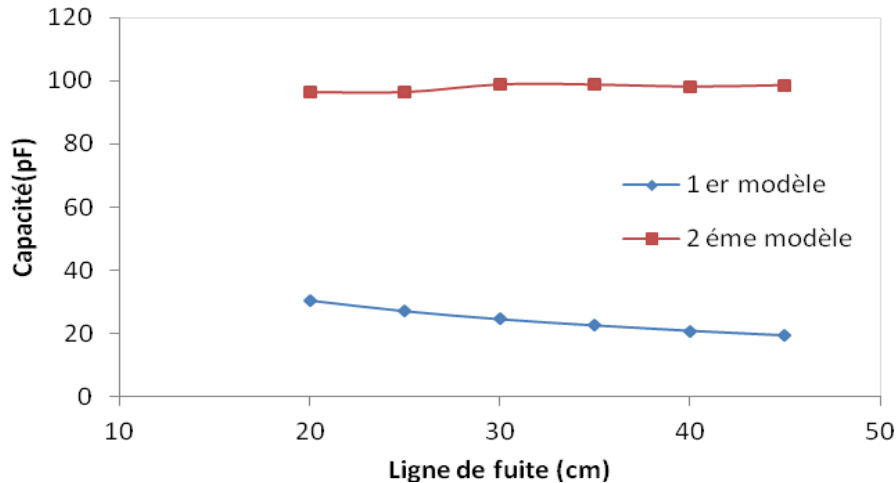
**Figure VI.7:** Capacité en fonction de la largeur de la plaque pour des différentes épaisseurs

Pour les déférents valeurs d'épaisseurs (Figure IV.7) la capacité du modèle reste presque constante quand on augmente la largeur de la plaque cela signifie qu'il n ya pas une grande influence de la largeur.

#### IV.4.2. Influence de la position des électrodes

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à l'influence de la position des électrodes pour différents longueur de ligne de fuite sur la capacité, pour notre 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> modèle.

La figure IV.8 illustre les variations de la capacité en fonction de la longueur de la ligne de fuite pour les deux modèles étudiés.



**Figure IV.8:** capacité en fonction de la longueur de la ligne de fuite pour les deux modèles simulés

Comme on a fixé l'épaisseur de la plaque ( $e=10\text{cm}$ ) pour les modèles simulés, en augmentant la longueur de la ligne de fuite par augmentation de la largeur de la plaque pour le 2<sup>ème</sup> modèle et par augmentation de la distance inter-électrode pour le 1<sup>er</sup> modèle.

On voit que la capacité est toujours plus importante pour le 2<sup>ème</sup> modèle que pour le 1<sup>er</sup> quand on augmente la longueur de la ligne de fuite.

On peut expliquer ça si on considère le 2<sup>ème</sup> modèle similaire à un condensateur plan donc quand on augmente la ligne de fuite sans augmenter l'épaisseur ça n'influe pas sur la capacité. Par contre dans le 1<sup>er</sup> modèle, l'augmentation de la ligne de fuite (distance inter-électrode) diminue la capacité du modèle.

#### IV.4.3. Influence de la proportion de la pollution sur l'isolateur

Dans ce paragraphe nous allons étudier l'influence de la présence de la pollution sur la plaque du verre, pour cela on a fait une simulation avec le 2<sup>ème</sup> modèle pour une plaque de verre propre et pour une plaque de verre polluée en présentant cette pollution comme un conducteur isolé de charge totale nulle.

La figure VI.9 présente une description du modèle simulé.

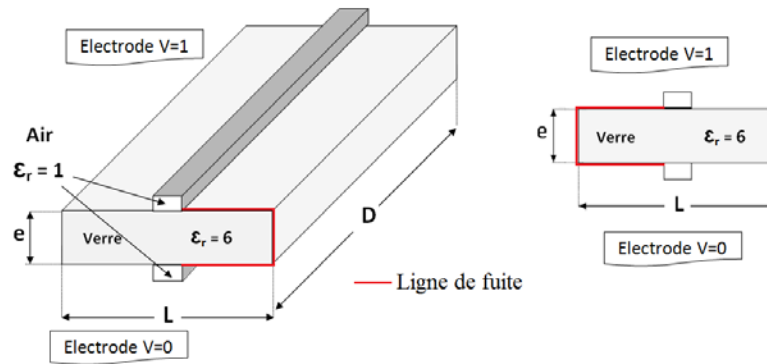


Figure VI.9.a : plaque propre

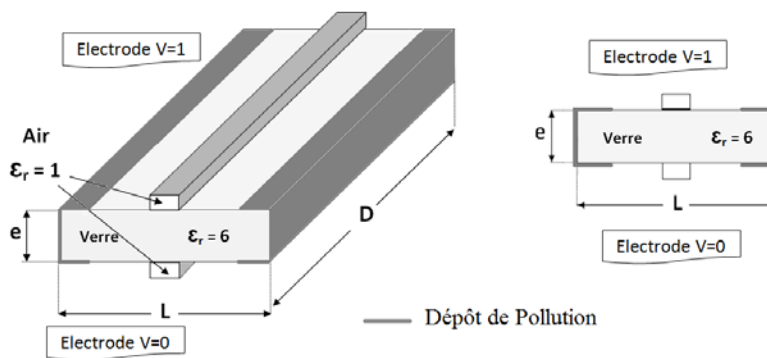
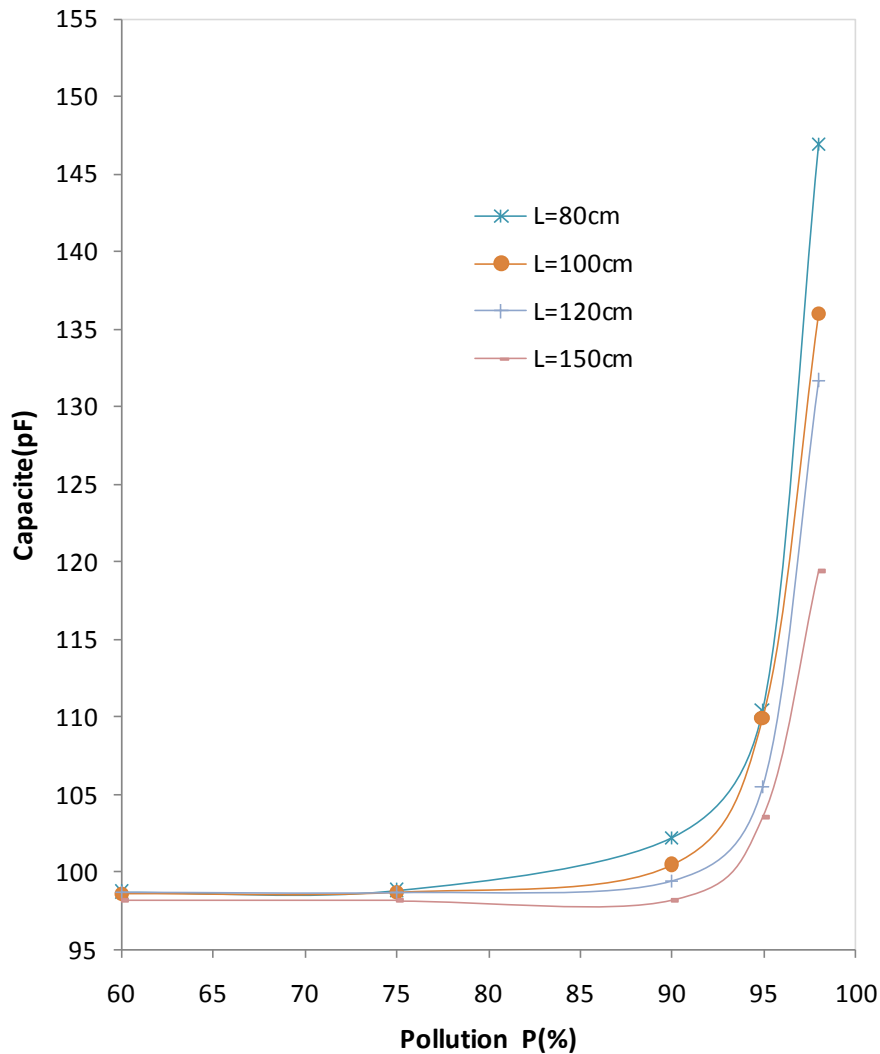


Figure VI.9.b : plaque polluée

Pour différentes largeurs de la plaque on fait varier la largeur de la pollution de 60% à 98% de la largeur de la ligne de fuite.

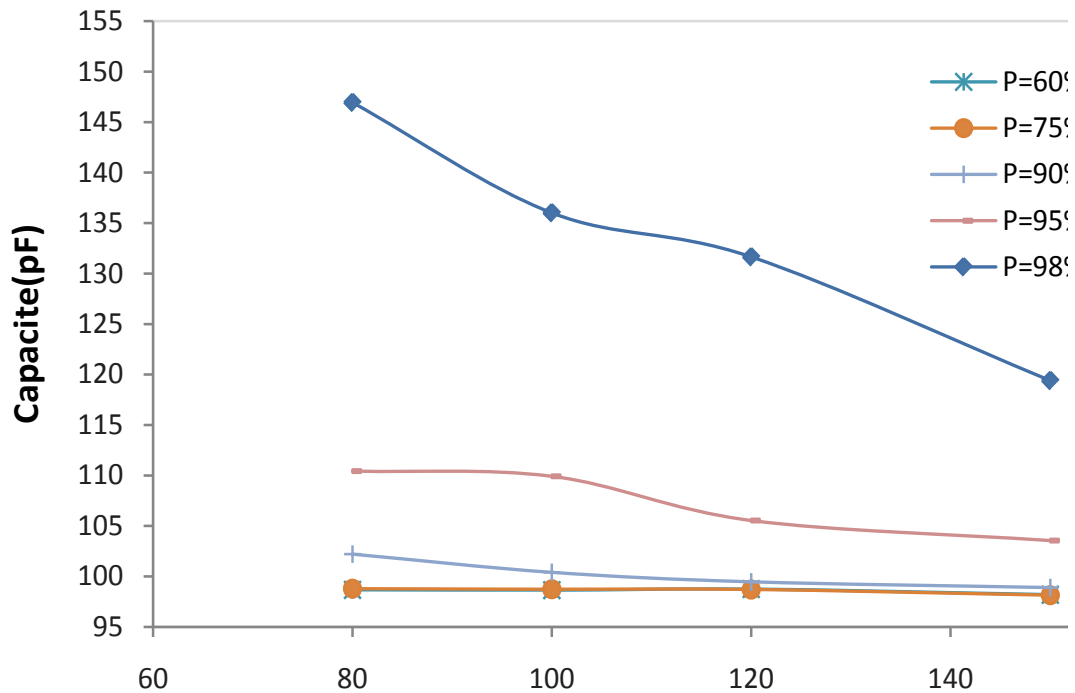
La figure VI.10 illustre la variation de la capacité en fonction de pourcentage de pollution pour les différentes largeurs de la plaque de verre.



**Figure VI.10:** capacité en fonction du pourcentage de pollution pour différentes largeurs de la plaque de verre

Pour des variations du pourcentage de la pollution pour différentes largeurs de la plaque (donc pour de différentes longueurs de la ligne de fuite (figure VI.10)), on voit qu'il y a une petite augmentation de la capacité quand on augmente le pourcentage de la pollution de 60% à 90% de la longueur de la ligne de fuite, cependant cette augmentation est très faible. À partir de 90% de pollution on voit une augmentation très prononcée voire brutale de la capacité.

La figure VI.11 illustre la variation de la capacité en fonction de la largeur de la plaque (largeur de la ligne de fuite) pour les différents pourcentages de pollution.



**Figure VI.11:** capacité en fonction de la largeur de la plaque pour les différents pourcentages de pollution

Par variation de la largeur de la plaque on voit que la capacité reste presque constante pour des pourcentages de la pollution inférieure à 90%, à partir de cette valeur on voit une diminution prononcée de la capacité en fonction de la largeur de la plaque.

#### IV.5. Répartition du champ électrique

De même que pour ce qui a été présenté au chapitre précédent, nous nous proposons d'illustrer dans ce qui suit, les différents champs, pour essayer d'interpréter les résultats obtenus précédemment.

En utilisant le même contour d'intégration qu'on a utilisé dans le chapitre 3, on définit la surface externe l'interface exposé à l'aire et la surface interne l'interface conducteur-verre.

##### IV.5.1. Influence des dimensions de la plaque

###### IV.5.1.1. Influence de la largeur de la plaque

La figure IV.12 illustre les variations de l'induction normale en fonction de la distance  $x$  sur les deux surfaces des électrodes interne et externe et pour les deux modèles simulés en prenant les deux cas extrême de la largeur de la plaque qu'on a étudiées.

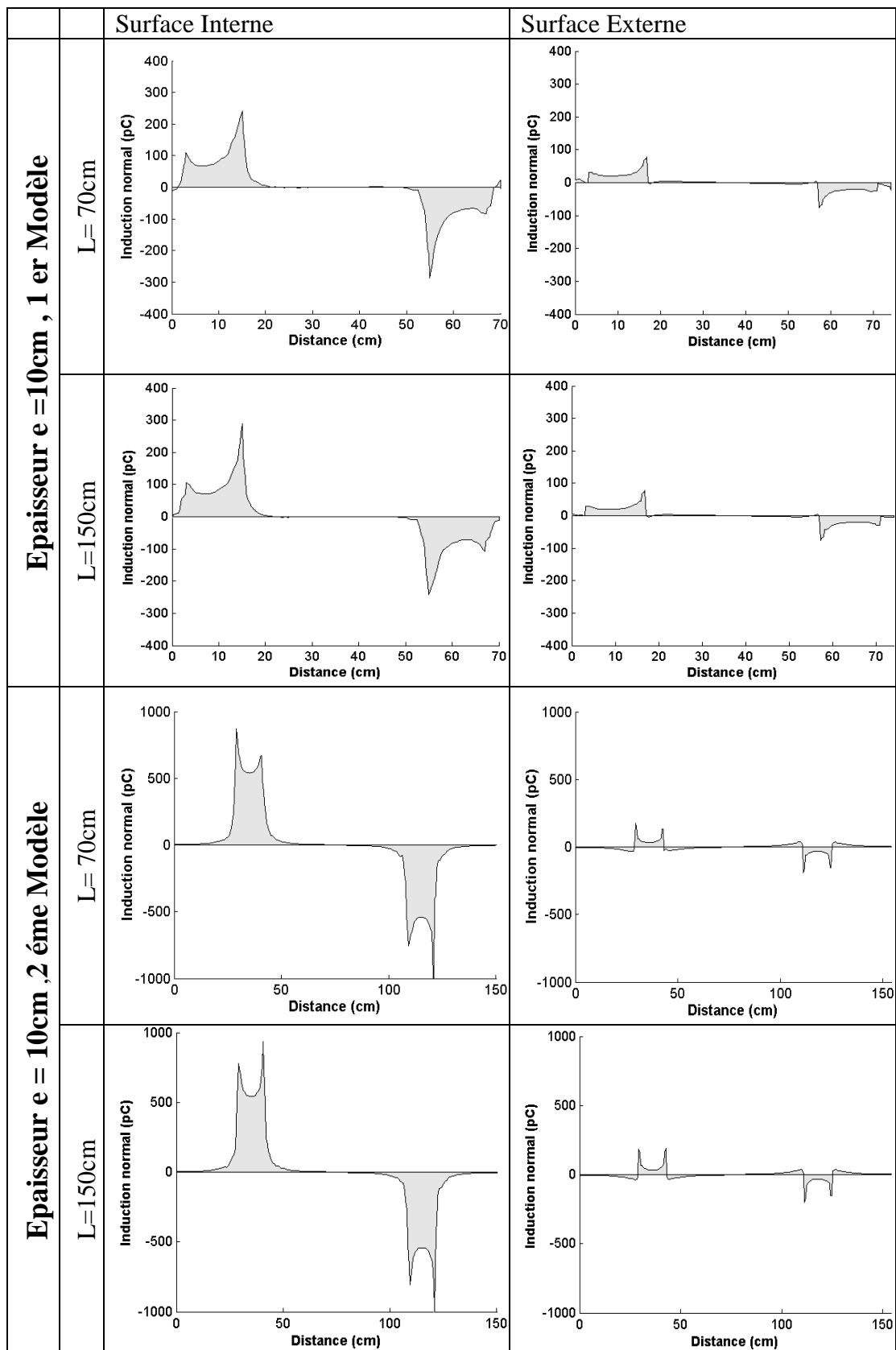


Figure IV.12: Induction normal en fonction de la distance pour des différentes largeurs



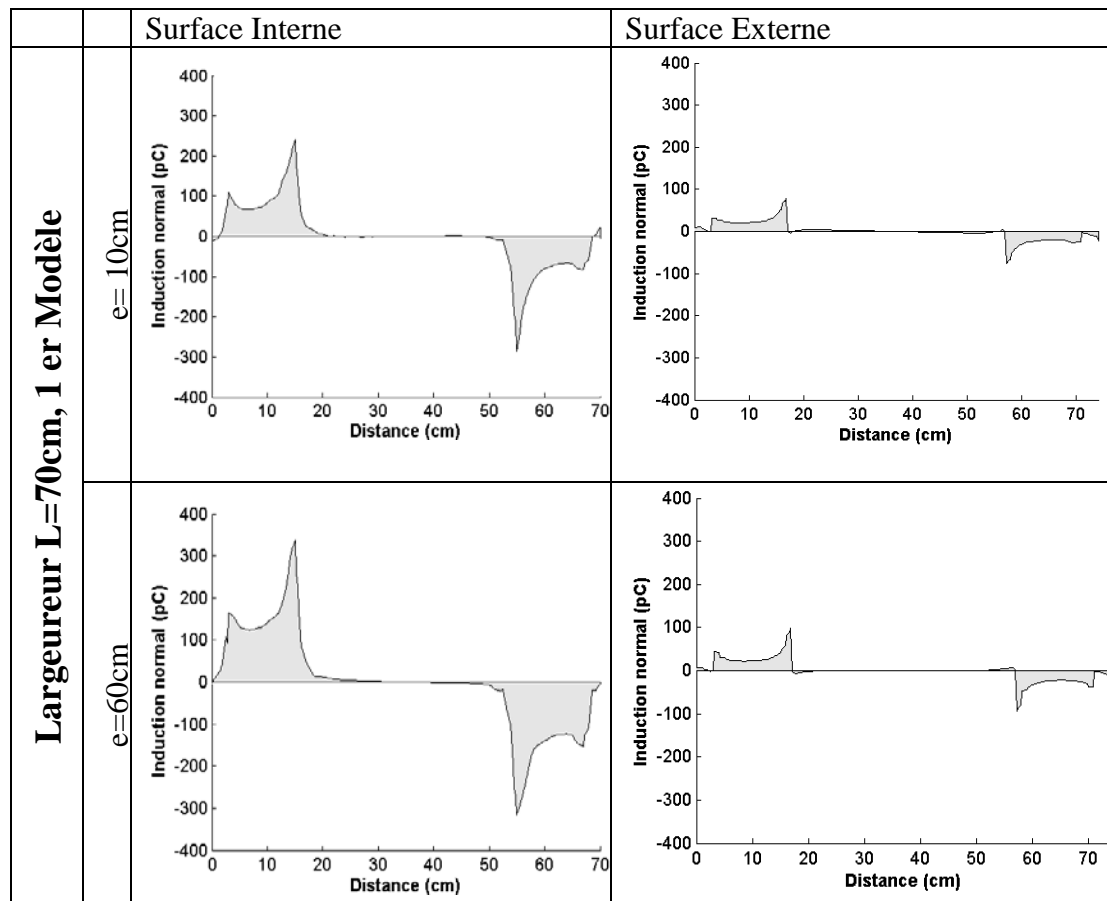
Nous avons fait varier, par simulation, la largeur de la plaque L en prenant les deux cas extrêmes 70cm et 150 cm. Pour une tension de 1V, nous nous proposons d'illustrer, sur les deux interfaces, la composante normale de l'induction électrique qui traduit, entre autre, la répartition de la charge sur les conducteurs.

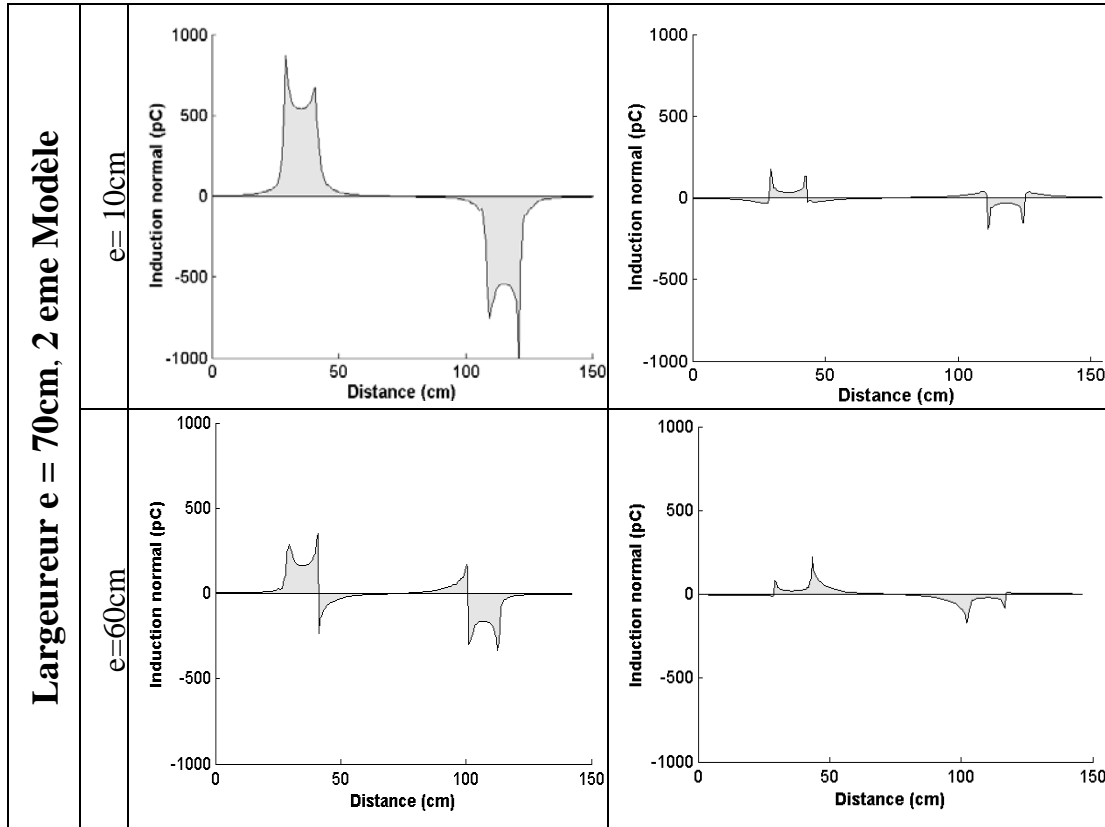
D'après les courbes ci-dessus on remarque qu'il n'y a pas une variation de la distribution de la charge quand on augmente la largeur de la plaque pour les deux modèles étudiés.

On peut expliquer cette variation comme suit, l'augmentation de la largeur de la plaque n'affecte pas le trajet des lignes de champ. Donc la surface de contact conducteur-verre ne change pas c'est pourquoi il n' ya pas une grande variation de la capacité d'isolateur.

**IV.5.1.2. Influence de l'épaisseur de la plaque**

La figure IV.13 illustre les variations de l'induction normale en fonction de la distance x sur les deux surfaces des électrodes interne et externe et pour les deux modèles simulés en prenant les deux cas extrême d'épaisseurs qu'on a étudiées





**Figure IV.13:** Induction normal en fonction de la distance pour des différentes épaisseurs

D'après les courbes ci-dessus on voit que la charge augmente quand on augmente l'épaisseur pour le 1<sup>er</sup> modèle et par contre se diminue pour le 2<sup>ème</sup>. Ainsi cette variation s'effectue au niveau de la surface interne d'électrodes.

Pour le 1<sup>er</sup> modèle en supposant que le système présente un ensemble de deux capacités (celle de l'air et celle du matériau diélectrique qui est le verre dans notre cas), une augmentation de l'épaisseur du diélectrique ne peut qu'augmenter la capacité totale du système.

Cette stabilisation s'explique aisément quand on 'imagine' les lignes de champs partant d'une électrode à une autre et qui finissent par avoir le même trajet, dans le même matériau (le diélectrique) lorsqu'on augmente indéfiniment l'épaisseur du verre : ce n'est pas le cas des faibles épaisseurs où le trajet des lignes de champs, même si elles ont un trajet à peu près similaire (la réfraction n'est pas très prononcée), ne rencontrent pas le même milieu selon l'épaisseur du matériau.

Pour le 2<sup>ème</sup> modèle on peut expliquer cette variation si en supposant que le système présente une seule capacité similaire à un condensateur plan, alors quand on augmente l'épaisseur donc la distance inter électrode (longueur de la ligne de fuite) la capacité diminue.

IV.5.1. Influence de la proportion de la pollution

La figure IV.14 illustre les variations de l'induction normale en fonction de la distance  $x$  sur les deux surfaces des électrodes interne et externe et pour le 2<sup>ème</sup> modèle. une fois en prenant les deux cas extrêmes de la pollution pour différentes longueurs de la ligne de fuite et autre fois l'inverse.

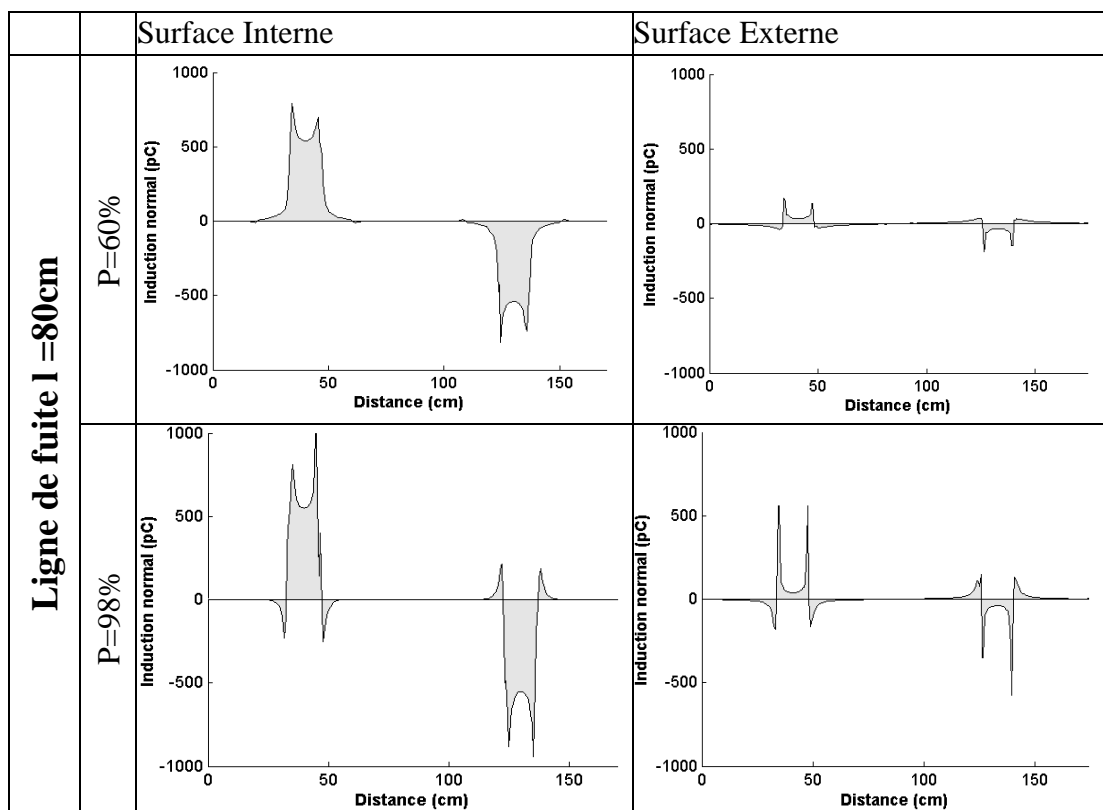
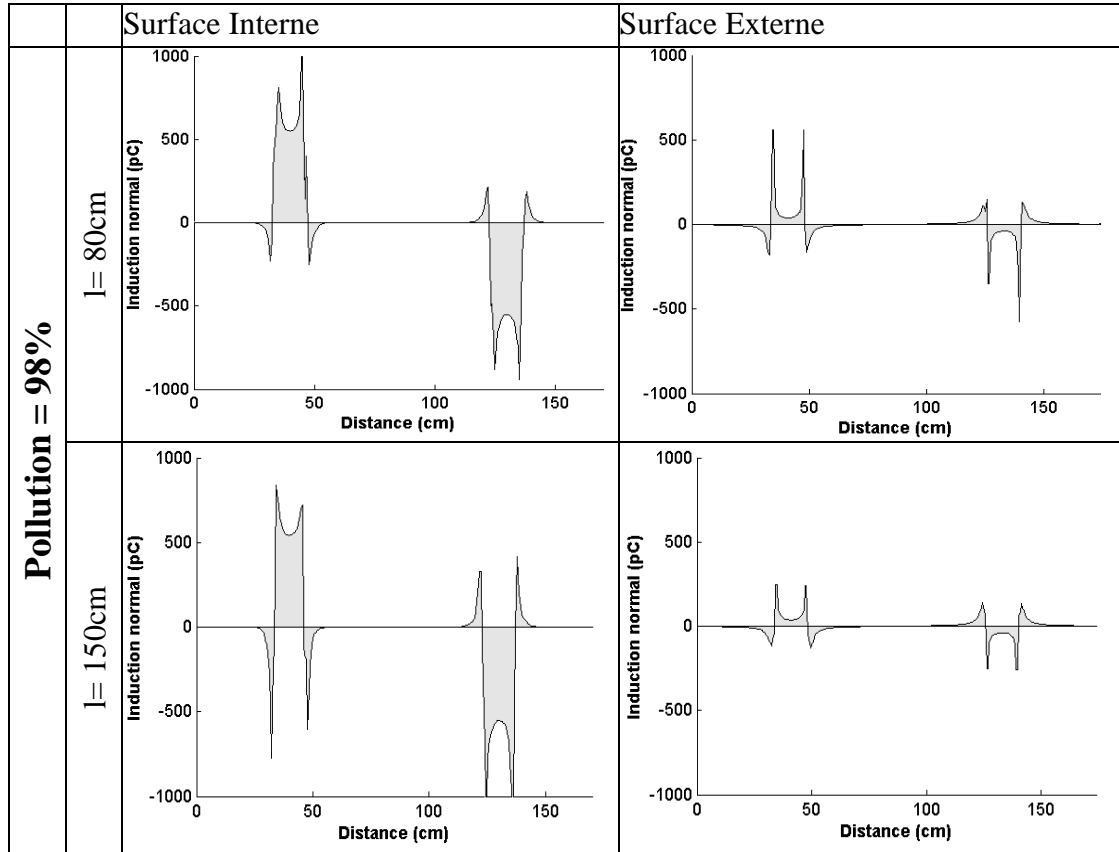


Figure IV.14.a: Induction normal en fonction de la distance pour des différents pourcentages de pollution



**Figure IV.14.b:** Induction normal en fonction de la distance pour des différentes longueurs de la ligne de fuite

D'après les courbes ci-dessus on remarque qu'il n'ya pas une variation de la distribution de la charge sur la surface interne quand on augmente le pourcentage de la pollution (Figure VI.14.a) même si on augmente la longueur de la ligne de fuite (Figure VI.14.b).

Par contre il ya une variation de la densité de charge sur la surface externe quand la pollution est plus proche du conducteur, donc il ya une concentration de la charge à cause de l'effet de proximité conducteur-pollution.

On peut voir cet effet dans la figure VI.15 qui illustre la distribution de champ sur les surfaces des électrodes.

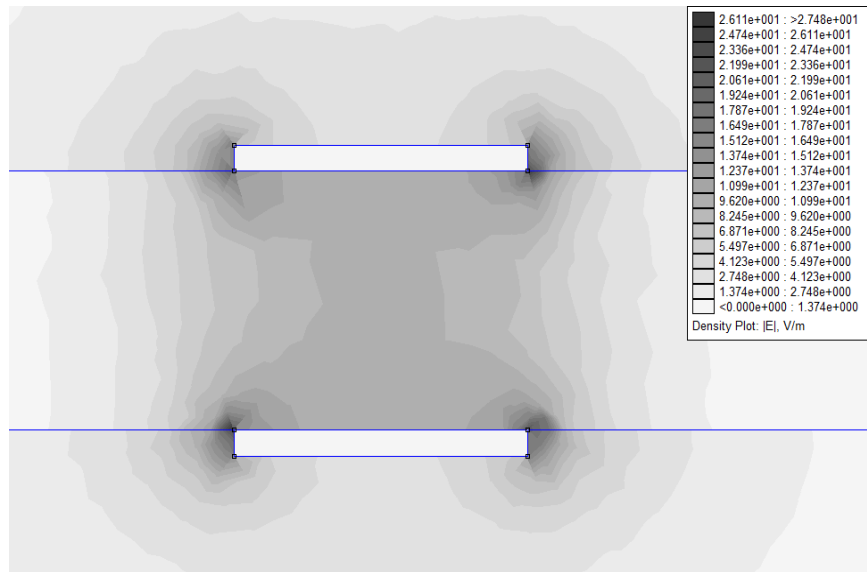


Figure VI.15.a Illustration du champ électrique sur une section plane pour une pollution de 60%

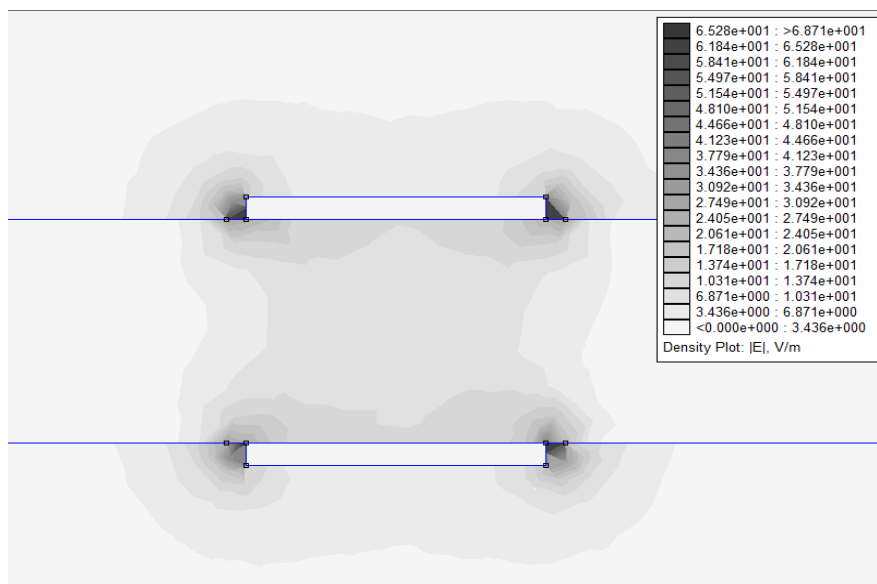


Figure VI.15.a Illustration du champ électrique sur une section plane pour une pollution de 98%

#### IV.6.Conclusion

D'après les résultats établis avec le logiciel on peut tirer les conclusions suivantes:

- Pour le 1<sup>er</sup> modèle

Pour des variations de l'épaisseur sur des grandes plages. Nous avons observé que la capacité croit d'une façon très importante pour les petites valeurs de l'épaisseur, puis augmente jusqu'à se stabiliser pour les grandes valeurs de l'épaisseur. Ceci signifie que la capacité du système est une contribution des deux milieux.

Donc à partir d'une certaine épaisseur (limite), la capacité du système possède la même allure que celle du diélectrique puis finit par prendre une valeur constante quelque soit l'épaisseur de ce dernier. Dans ce cas de figure, les lignes de champs ont le même trajet, dans le même matériau (le diélectrique) lorsqu'on augmente indéfiniment l'épaisseur du verre.

Pour des variations de la largeur la capacité du modèle reste presque constante, cette variation n'affecte pas le trajet des lignes de champ.

- Pour le 2<sup>ème</sup> modèle

Ce modèle est similaire à un condensateur plan, donc l'augmentation de l'épaisseur ou en peut dire l'augmentation de la longueur de la ligne de fuite de terme épaisseur donne une diminution prononcée de la capacité de modèle.

De même que pour le 1<sup>er</sup> modèle pour des variations de la largeur la capacité du modèle reste presque constante, cette variation n'affecte pas le trajet des lignes de champ.

- La capacité du 2<sup>ème</sup> modèle reste toujours importante que de 1<sup>er</sup> à cause de leur géométrie.

La présence de la pollution sur le matériau diélectrique a une grande influence sur la capacité cette influence est visible quand la pollution est très proche du conducteur et ça due à l'effet de proximité électrode-pollution ou il y'a une concentration du champ électrique sur les extrémités. Cet effet conduit à une grande augmentation de la capacité de modèle.

## **CHAPITRE V**

*Influence de la position des  
conducteurs parasites sur  
la capacité du modèle*

### V.1. Introduction

Les mesures spécifiques au domaine de la haute tension doivent souvent être accompagnées de mesures supplémentaires, afin d'étudier, sans risque d'erreurs, les dispositifs mis sous tension. En effet, l'utilisation de tensions élevées peut donner lieu à des courants capacitifs indésirables, susceptibles de fausser les mesures de courants, déjà très faibles (de l'ordre du micro-ampère), qui circulent à travers l'isolant.

Ces courants dérivés proviennent de matériaux conducteurs, constituant l'environnement expérimental (transformateur, porte métallique, sol, etc.), et situés à une distance donnée de l'objet d'étude. Ces conducteurs peuvent être placés sous un potentiel fixe (exemple : sol mis à la terre) ou isolés (dans ce cas, on considère le conducteur comme globalement neutre).

Dans les deux cas de figures, les lignes de champ sont déviées, et les charges induites sur les conducteurs traduisent une consommation capacitive supplémentaire.

Une étude par simulation [46] a montré qu'il existe une influence non négligeable de la présence du sol (ou tout autre conducteur situé à proximité du dispositif), mis à la terre, sur les différentes mesures ; nous nous sommes inspirées de cette idée et l'avons développée dans le travail que nous présentons dans ce chapitre.

Notre travail porte sur l'étude de l'influence de la présence des conducteurs parasites sur la capacité d'un des modèles plans déjà étudiés dans les chapitres précédents. Des simulations sont faites pour étudier le cas du sol et aussi le cas où on a un conducteur parasite placé perpendiculairement à la plaque dans les deux cas de figure, côté conducteur HT puis côté Terre.

### V.2. Influence d'un conducteur parasite

Nous présentons dans ce qui suit une illustration, à titre d'exemple, des lignes de champ, des charges induites et des équipotentiels dans le cas particulier de conducteurs cylindriques, représentant une ligne bifilaire.

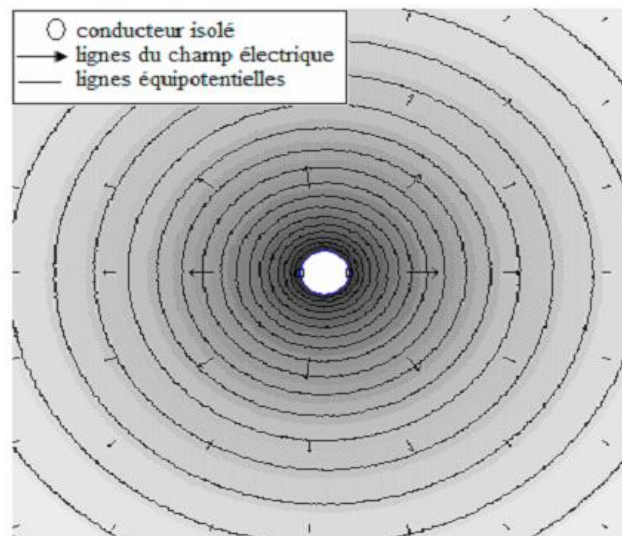
- **Ligne bifilaire isolée**

Une ligne bifilaire peut être considérée comme étant constituée de deux cylindres de longueur infinie (câbles) et portés à des potentiels différents.

Si l'un des câbles est suffisamment éloigné de tout autre conducteur, un potentiel imposé à ce dernier, s'accompagne d'une accumulation surfacique uniforme de charge. Dans ces conditions, les lignes de champ électriques sont radiales et on leur associe un ensemble de surfaces équipotentiels cylindriques orthogonales (Figure V.1).

L'intensité du champ est représentée par le ton du gris. Ainsi, c'est à proximité du conducteur que le gris est le plus foncé, ce qui veut dire que le champ est plus important.

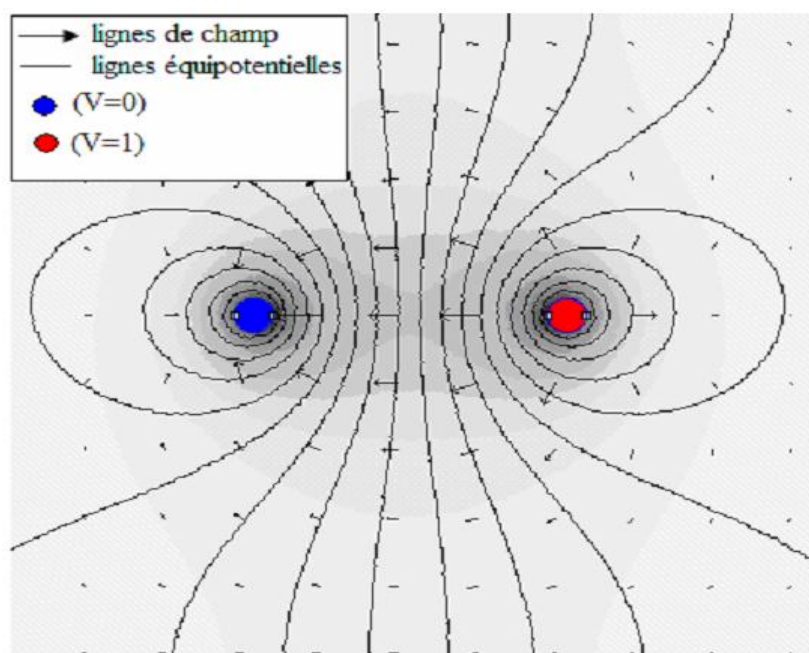




**Figure V.1 :** Lignes du champ et équipotentielles cas d'un conducteur isolé

Si on tient compte de la proximité des deux câbles portés à des potentiels différents, et suffisamment éloignée de tout conducteur parasite, les lignes équipotentielles et l'intensité du champ autour des conducteurs, possèdent une allure symétrique et les charges se répartissent de manière égale sur chacun des conducteurs. Cependant, la répartition des charges n'est pas uniforme : la densité de charge est renforcée sur les parties conductrices les plus proches.

Une simulation sur FEMM4, en injectant des valeurs arbitraires, nous a permis d'illustrer les lignes équipotentielles et l'intensité du champ, dans ces conditions (Figure V.2).



**Figure V.2 :** Illustration des lignes équipotentielles et de l'intensité du champ d'une ligne bifilaire isolée

La présence d'un conducteur neutre ( $Q=0$ ) ou d'un conducteur soumis à un potentiel donné (par exemple,  $V=0$ ) situé à proximité de cette ligne, change la répartition et la quantité de la charge induite : la distribution du champ et les lignes équipotentielles seront donc modifiées.

Dans ce qui suit, nous présentons une projection géométrique des deux électrodes ( $V=0$  et  $V=1$ ) sur le conducteur, pour repérer la concentration des charges induites sur les zones situées en face des deux électrodes.

Les zones sont donc repérées par les couleurs 'bleu' et 'rouge' (Figures V.3 et V.4):

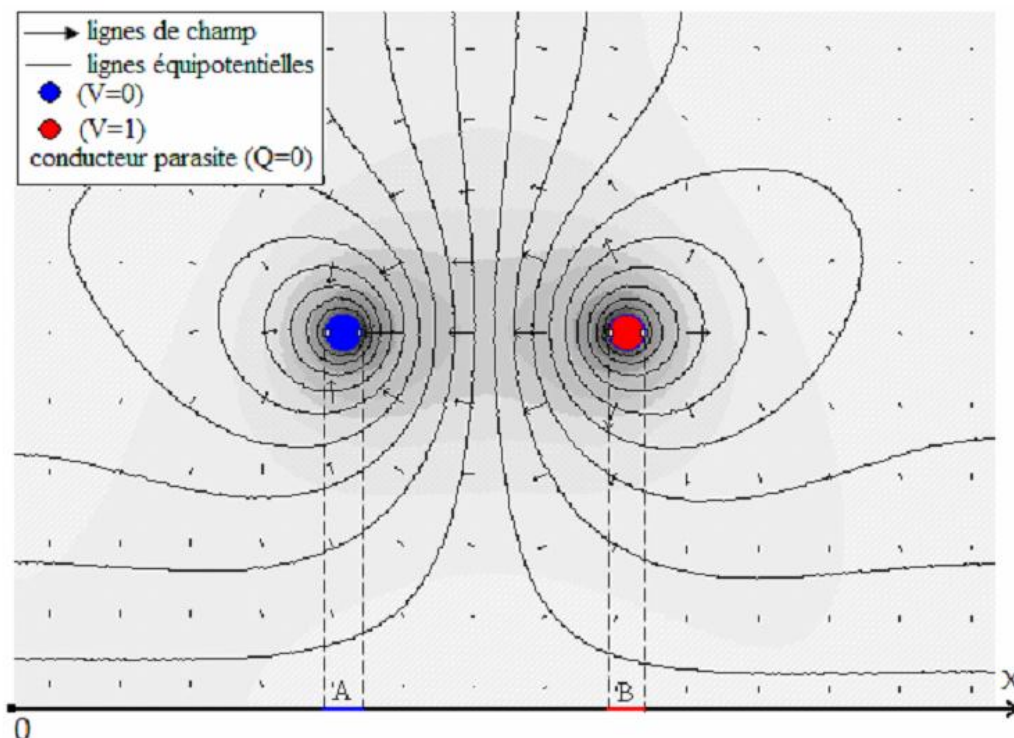
$$V=0 \Rightarrow \underline{A} \quad V=1 \Rightarrow \underline{B}$$

- Influence d'un conducteur parasite isolé ( $Q=0$ )

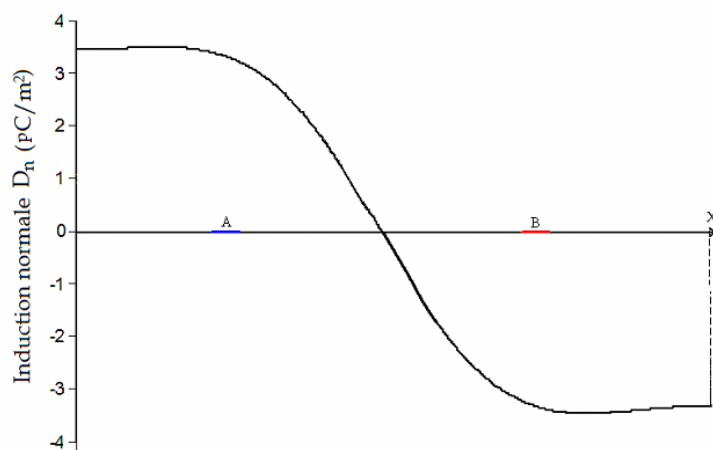
Dans le cas où le conducteur parasite est neutre (Figure V.3 (a)), les lignes équipotentielles sont réparties d'une manière symétrique et la quantité de charge induite est distribuée équitablement entre les deux câbles. On peut montrer que, dans l'exemple que nous avons pris, la charge augmente de la même manière sur les deux conducteurs lorsqu'on rapproche le conducteur parasite de la ligne.

Comme le conducteur parasite est initialement neutre, la charge totale reste toujours nulle.

Cependant, on note une accumulation locale équilibrée sur le sol, dans les deux zones située en face des électrodes (induction normale sur le conducteur, en fonction de la distance  $x$  par rapport à l'origine 0 illustrée sur la figure V.3 (b)).



(a) Répartition du champ et des lignes équipotentielles



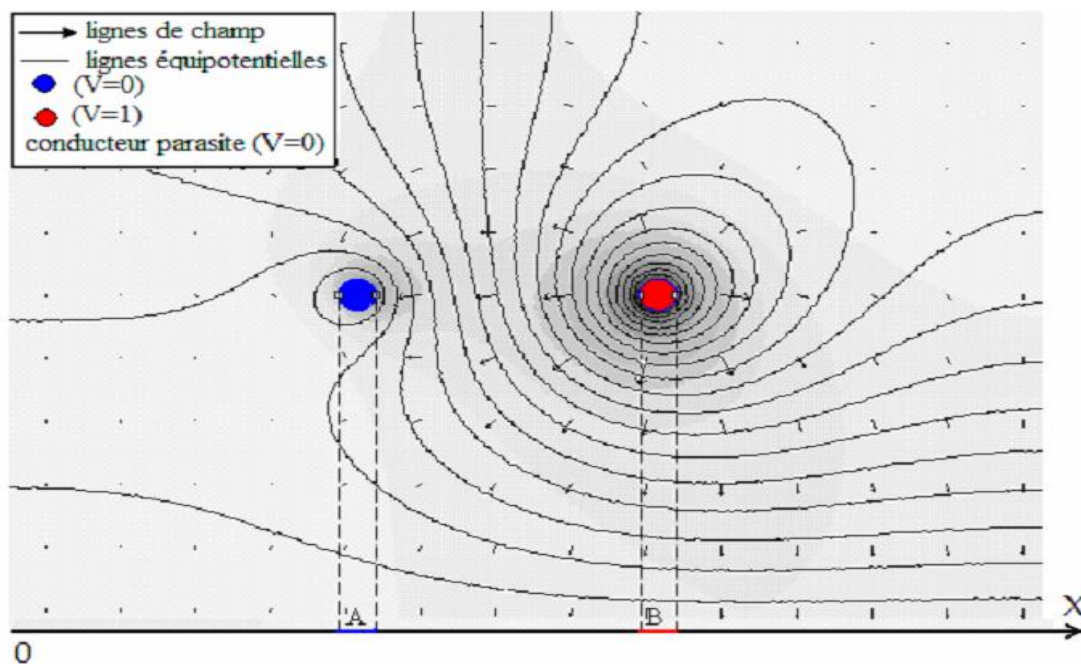
(b) Induction normale sur le conducteur parasite

**Figure V.3 :** Influence d'un conducteur neutre ( $Q=0$ )

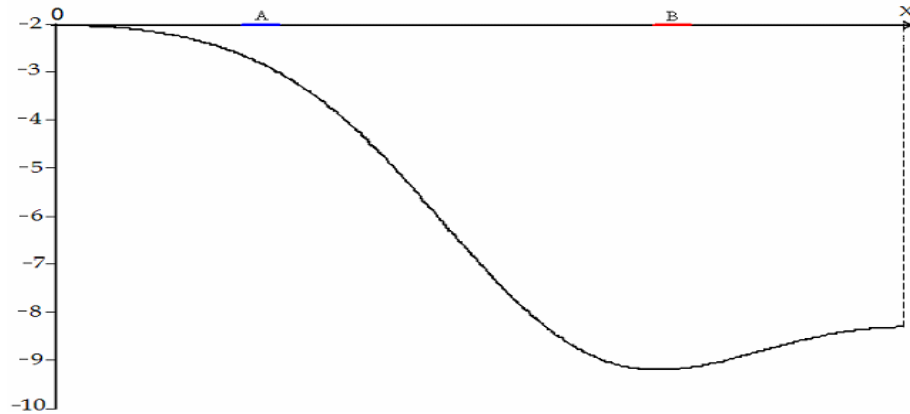
Dans le cas où le conducteur parasite est soumis à un potentiel donné ( $V=0$  dans notre exemple), les charges se répartissent de manière plus complexe. Ainsi, l'influence dépend de la différence de potentiel entre chaque câble et le conducteur parasite.

Dans l'exemple que nous avons traité, l'intensité du champ électrique ainsi que les surfaces équipotentielles sont concentrées sur l'électrode  $V=1$  (Figure V.4 (a)). Ainsi la présence du conducteur parasite renforce l'accumulation de charge sur l'électrode  $V=1$ , au détriment de l'électrode portée à  $V=0$  sur laquelle on peut montrer que la densité  $y$  est d'autant moins élevée que le conducteur se rapproche.

Dans ces conditions, les charges induites au niveau du conducteur parasite sont principalement concentrées dans la zone située en face de l'électrode HT (induction normale en fonction de la distance  $x$  illustrée sur la figure V.4 (b)). Ces charges sont de signe opposé (négatif dans notre exemple) à celui de la borne  $V=1$ .



(a) Répartition du champ et des lignes équipotentielles



(b) Induction normale sur le conducteur parasite

**Figure V.4** : Influence d'un conducteur de potentiel nul ( $V=0$ )

### V.3. Description des modèles

Le même modèle plan étudié dans les chapitres précédents est considéré. Cependant les électrodes sont placées aux extrémités de la plaque de verre. Nous avons choisi la même plaque avec les paramètres suivants :

$a=3\text{cm}$ ,  $E=1\text{cm}$ ,  $L=46\text{cm}$ ,  $D=100\text{cm}$ ,  $e=10\text{cm}$

La simulation est faite en variant la position de conducteur parasite par rapport au modèle, donc plusieurs configurations sont établies :

- ✓ Le sol comme conducteur parasite (Figure V.5(a))
- ✓ Un conducteur parasite situé au côté de l'électrode HT (Figure V.5(b))
- ✓ Un conducteur parasite situé au côté de l'électrode terre (Figure V.5(c))
- ✓ La présence des trois conducteurs précédents (Figure V.5(d))

Les conditions aux limites pour chaque configuration sont donc choisies comme indiqué sur la figure V.5.

N.B: On définit  $L_m$  la distance entre l'extrémité extérieure d'électrode terre et le conducteur parasite (Figure V.5).

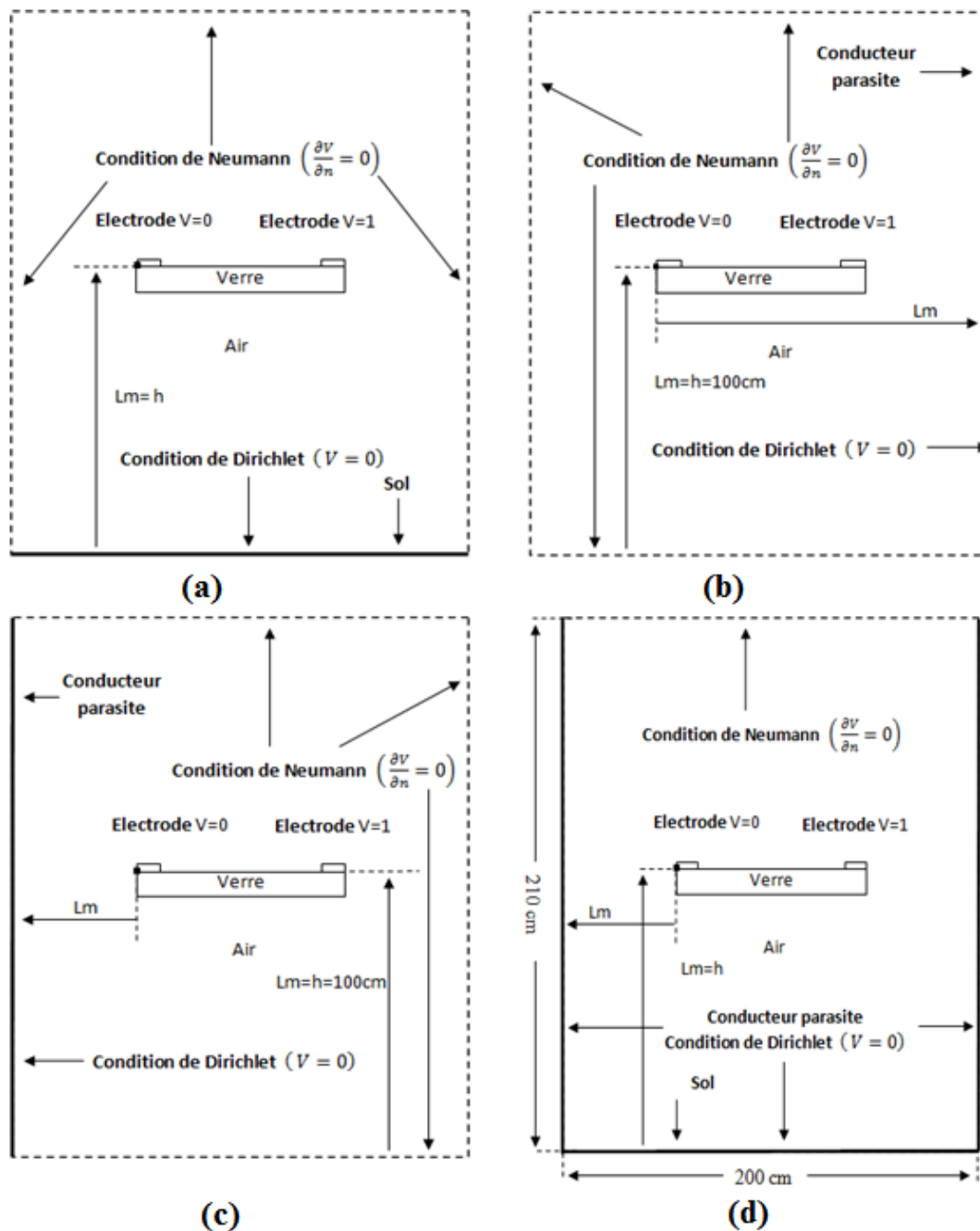


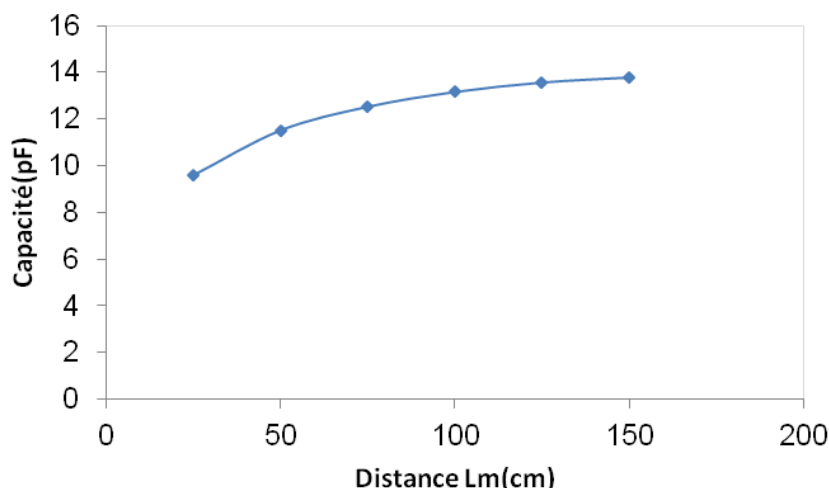
Figure V.5 : Conditions aux limites et choix des paramètres de calcul

## V.4. Simulation

### V.4.1. Influence du sol

Nous avons fait varier la distance  $L_m$  du modèle par rapport au sol qui représente la hauteur  $h$  (Figure V.5(a)), et on note les valeurs de la capacité simulée pour chaque distance. Celle-ci est égale à la charge induite sur l'électrode terre puisque la différence de potentiel est toujours choisie comme étant égale à 1 volt.

La Figure V.6 illustre la variation de la capacité en fonction de la distance  $L_m$  par rapport au sol.



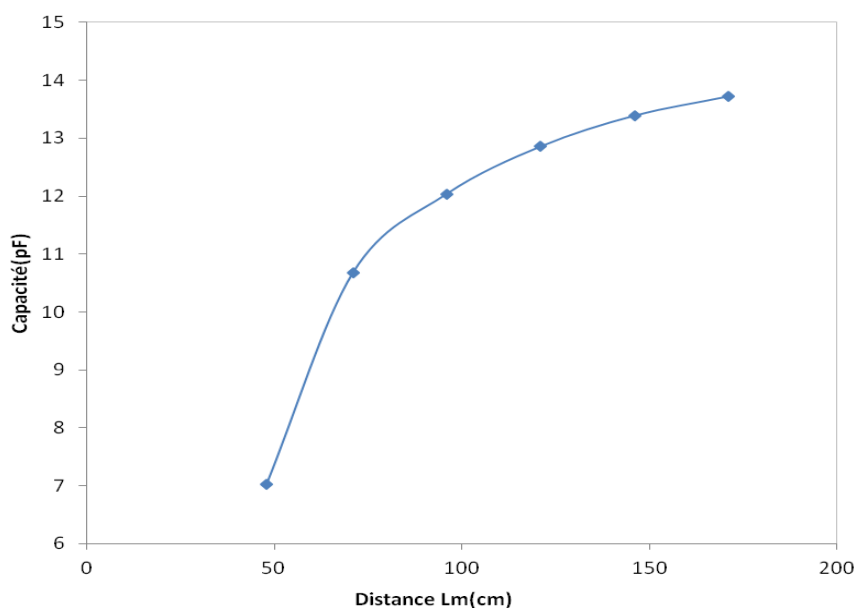
**Figure V.6 :** Capacité en fonction de la distance du modèle par rapport au sol (Lm)

Une augmentation non négligeable de la capacité en fonction de la hauteur par rapport au sol est observée (Figure V-5). Nous remarquons qu'à partir d'une hauteur de 100cm, l'augmentation de la capacité est moins importante. Il s'agit logiquement d'une situation où le modèle est assez éloigné du sol pour négliger leur effet.

#### V.4.2. Influence de la présence d'un conducteur parasite dans le côté d'électrode HT

Nous avons fait varier la distance Lm du modèle par rapport au conducteur parasite côté HT (Figure V.5(b)), et on note les valeurs de la capacité simulé pour chaque distance.

La Figure V.7 illustre la variation de la capacité en fonction de la distance Lm.



**Figure V.7 :** Capacité en fonction de la distance du modèle par rapport au conducteur parasite côté HT

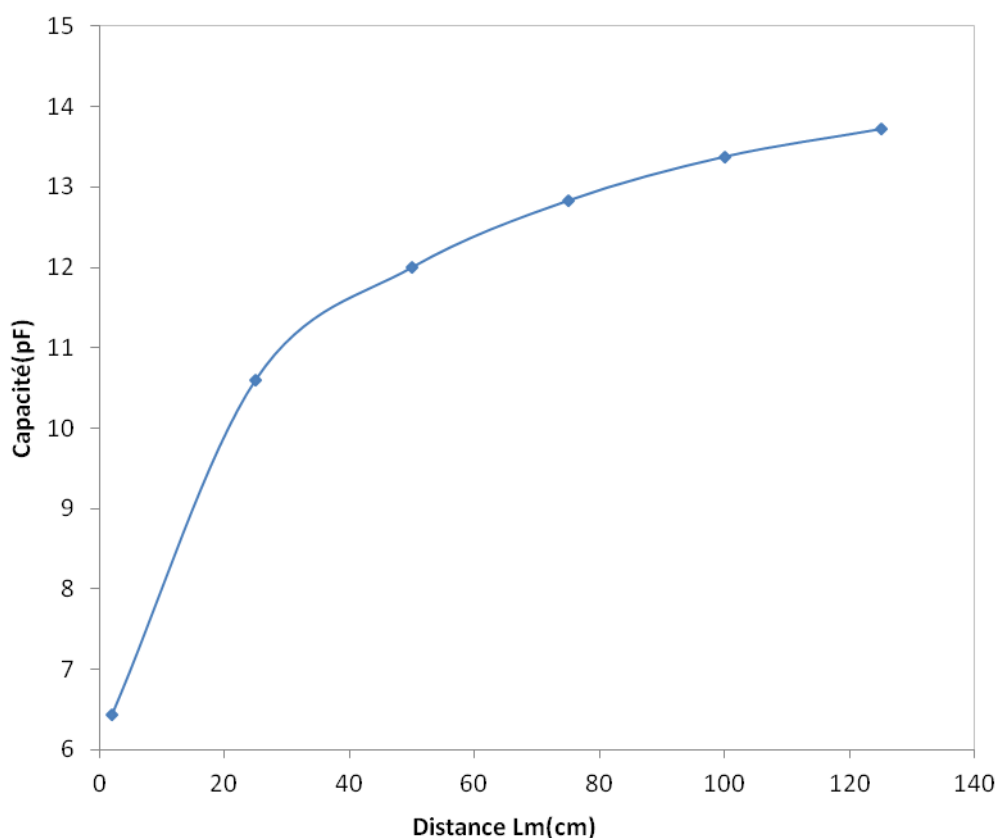


On remarque qu'il y a une augmentation considérable de la capacité quand on éloigne de conducteur parasite côté HT (Figure V.7), cette augmentation est moins importante à partir de  $L_m=130\text{cm}$ . Il s'agit logiquement d'une situation où le modèle est assez éloigné du conducteur parasite pour négliger leur effet.

#### V.4.3. Influence de la présence d'un conducteur parasite dans le côté d'électrode terre

Nous procédons de la même façon que précédemment, en variant la distance  $L_m$  du modèle par rapport au conducteur parasite côté électrode terre (Figure V.5(c)), et on note les valeurs de la capacité simulé pour chaque distance.

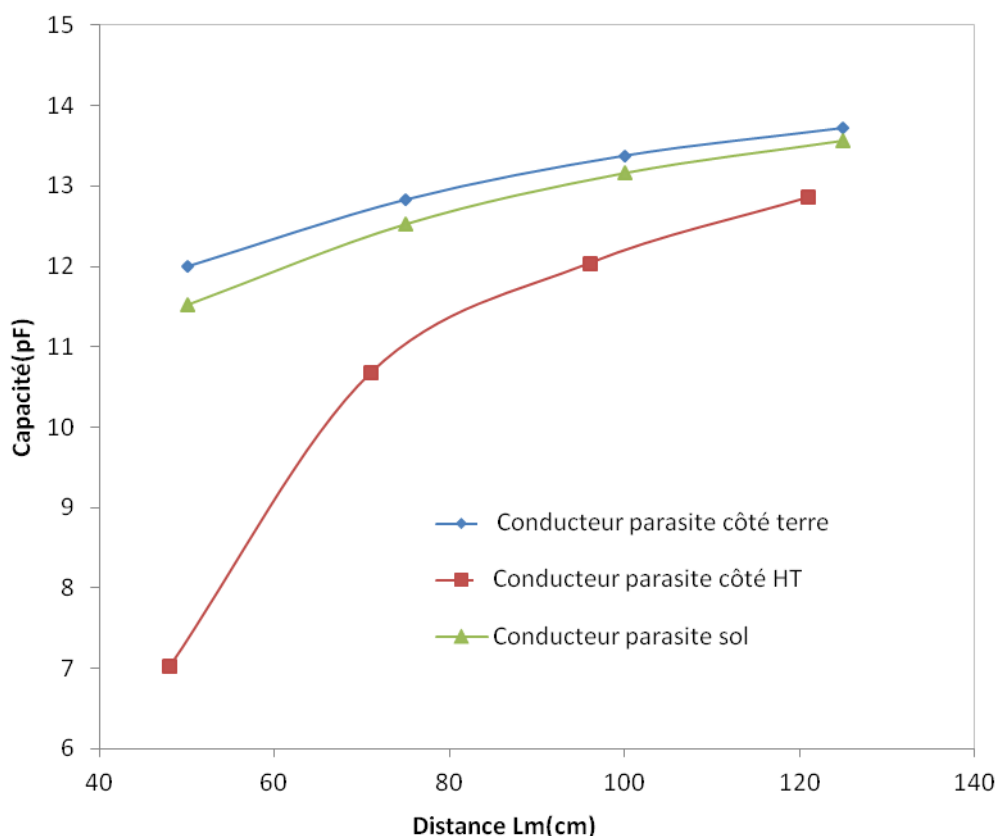
La Figure V.8 illustre la variation de la capacité en fonction de la distance  $L_m$ .



**Figure V.8 :** Capacité en fonction de la distance du modèle par rapport au conducteur parasite côté terre

On remarque qu'il y a une augmentation considérable de la capacité quand on s'éloigne du conducteur parasite (Figure V.8). Cette augmentation est moins importante à partir de  $L_m=100\text{cm}$ .

Nous présentons sur la figure ci-dessous (figure V.9) une comparaison entre les trois cas étudiés.



**Figure V.9:** Influence de la position de conducteur parasite

On voit que la capacité du modèle en fonction de la distance Lm par rapport au conducteur parasite côté HT est toujours inférieure à celle en fonction de la même distance Lm par rapport au conducteur parasite côté terre et le sol. Ceci est dû à l'effet de la distance inter électrode qui met le conducteur parasite côté HT toujours le plus proche par rapport à l'électrode HT pour chaque distance Lm. Les lignes de champs sont fortement déviées dans ces conditions.

On voit aussi que les deux courbes de la capacité en présence du conducteur parasite côté terre et le sol sont presque superposés donc il n'y a pas une grande influence de la position du conducteur parasite (qu'il soit vertical ou horizontal).

#### V.4.4. Influence de la présence de plusieurs conducteurs parasites

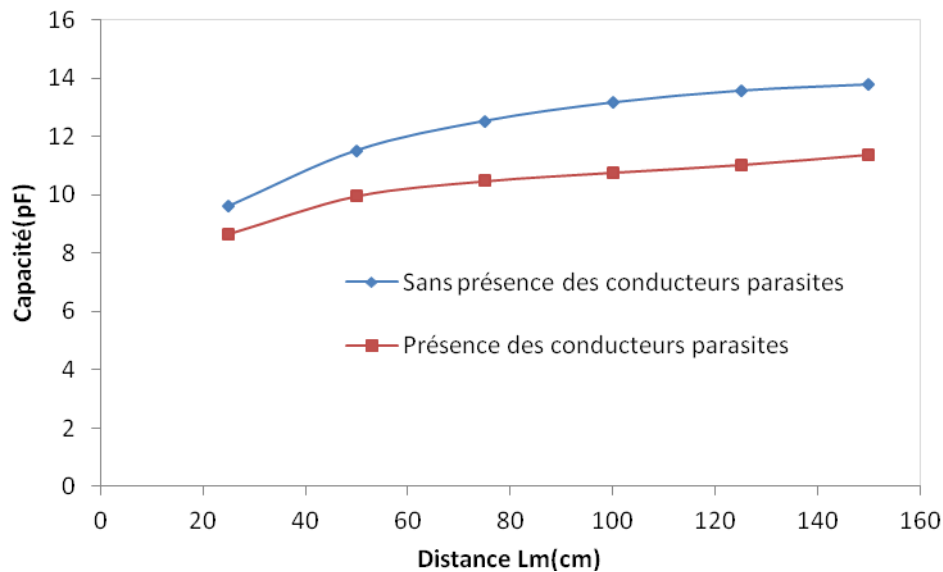
Dans ce paragraphe l'influence de la présence de plusieurs conducteurs parasites sur la capacité de notre modèle est considérée (Figure V.5(d)). Pour cela nous plaçons les trois conducteurs parasites étudiés précédemment et faisons varier la distance entre notre modèle et l'un de ces conducteurs.

- **Variation de la distance par rapport au sol**

On place notre modèle au milieu entre les deux conducteurs parasites côté HT et terre en variant la distance Lm entre le modèle et le sol. On trace la courbe de la capacité en fonction de la distance par rapport au sol en comparant cette courbe avec la courbe précédente de la variation de la capacité en fonction de la distance au sol sans présence des deux autres conducteurs parasites.



La Figure V.10 illustre les variations de la capacité simulé en fonction de la distance par rapport au sol pour les deux cas, présence des deux autres conducteurs parasites côté HT et côté terre et sans présence de ces conducteurs parasites.



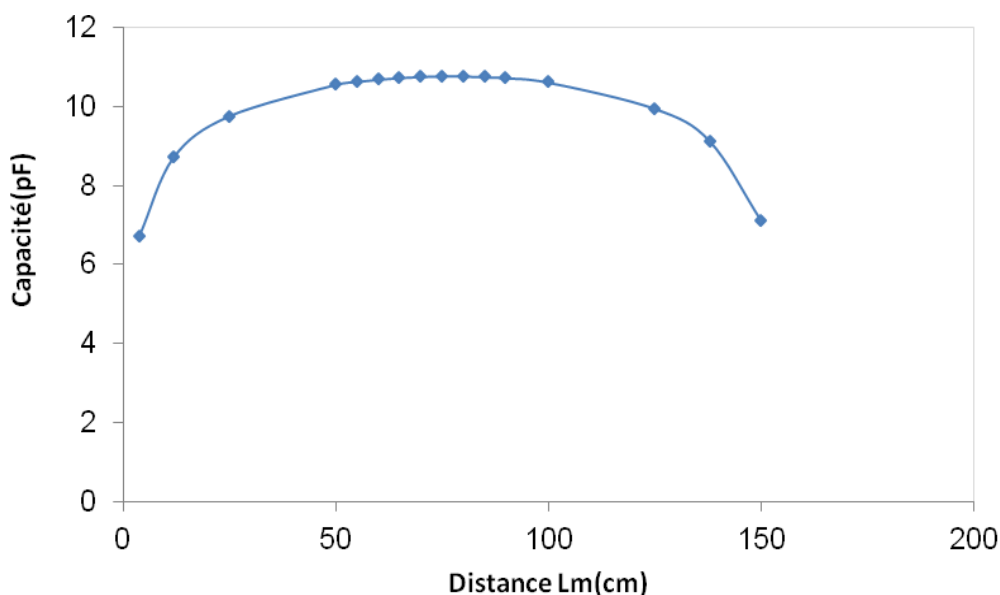
**Figure V.10** : Capacité en fonction de la distance du modèle par rapport au sol

On note une augmentation non négligeable de la capacité en fonction de la hauteur par rapport au sol (Figure V-10). Nous remarquons toujours qu'à partir d'une hauteur de 100cm, l'augmentation de la capacité est moins importante. Cependant la capacité du modèle dans le cas où il y'a les deux autres conducteurs parasites est toujours inférieure.

- **Variation de la distance par rapport conducteurs parasites côté HT et terre**

On fixe la distance par rapport au sol de 100 cm en variant les distances Lm entre le modèle et les deux conducteurs parasites côté terre et côté HT. On trace la courbe de la capacité en fonction de la distance Lm.

La Figure V.11 illustre les variations de la capacité simulé en fonction de la distance Lm.



**Figure V.11** : Capacité simulé en fonction de la distance Lm

D'après la courbe présentée sur la figure V.11 on remarque que la valeur de la capacité simulée de notre modèle augmente quand on s'éloigne de l'un des deux conducteurs parasites, cette augmentation est moins importante quand le modèle se trouve au milieu entre ces deux conducteurs.

Si on compare la valeur maximum de la capacité qui est environ 10.5pF (Figure V.11) on trouve qu'elle est inférieure par rapport à celle dans le cas où il n'y a un seul conducteur parasite côté terre ou côté HT sans présence de sol qui est environ 14pF (Figure V.7, Figure V.8).

### V.5. Erreur relative:

Afin d'évaluer le degré d'influence du conducteur parasite, en supposant que la capacité simulée correspond à la valeur optimale de la capacité dans le cas où il n'y a aucun conducteur parasite, nous avons tracé la différence  $C_{(Optimale)} - C_{(Lm)}$ .

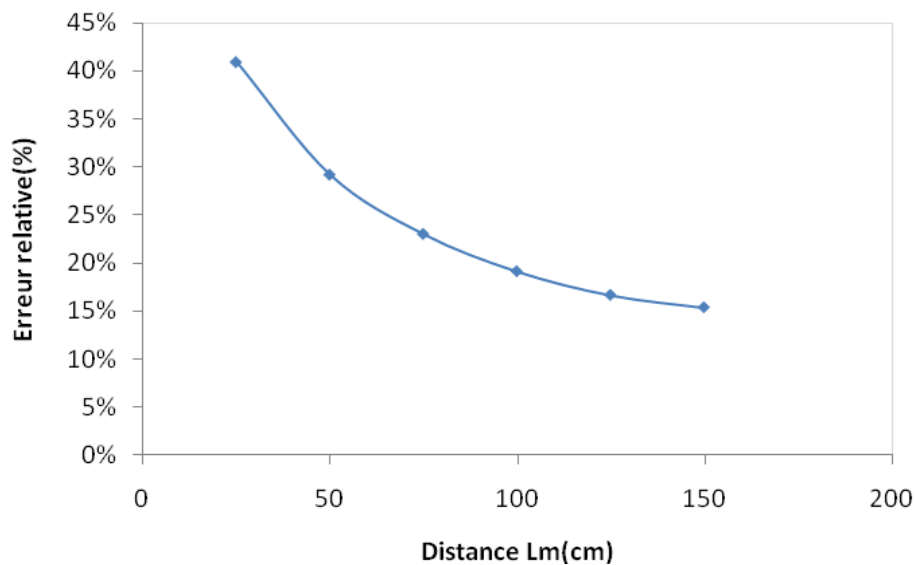
Cette capacité optimale a été déterminée en choisissant sur tout le contour les conditions de Neumann. La valeur trouvée est d'environ 16,3 pF.

Ainsi donc, si on suppose que  $C_{(Optimale)}$  est la capacité optimale, la différence calculée représente l'erreur de mesure introduite par la présence du conducteur parasite.

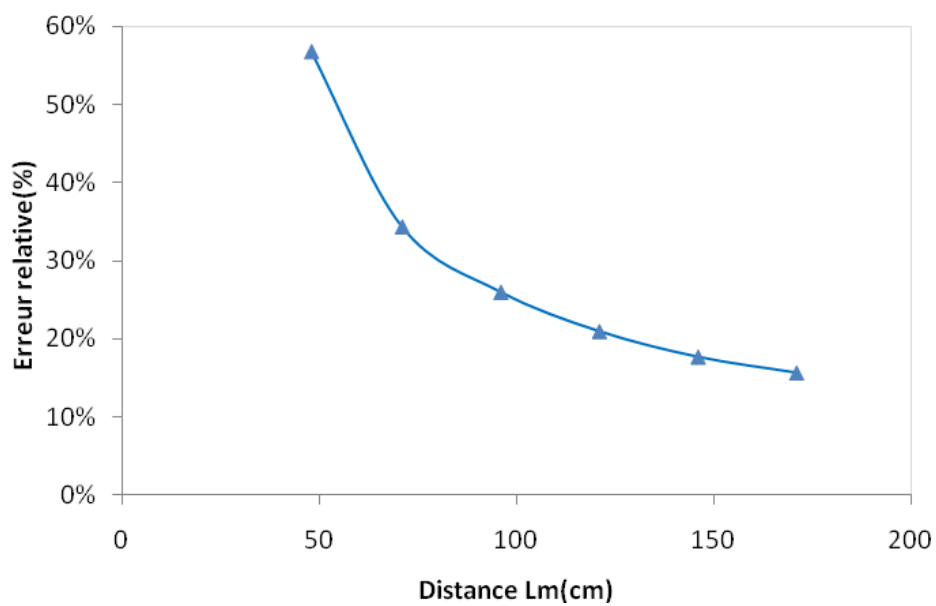
On écrit, dans ces conditions, l'erreur relative :

$$\frac{C_{(Optimale)} - C_{(Lm)}}{C_{(Optimale)}} \quad V.1$$

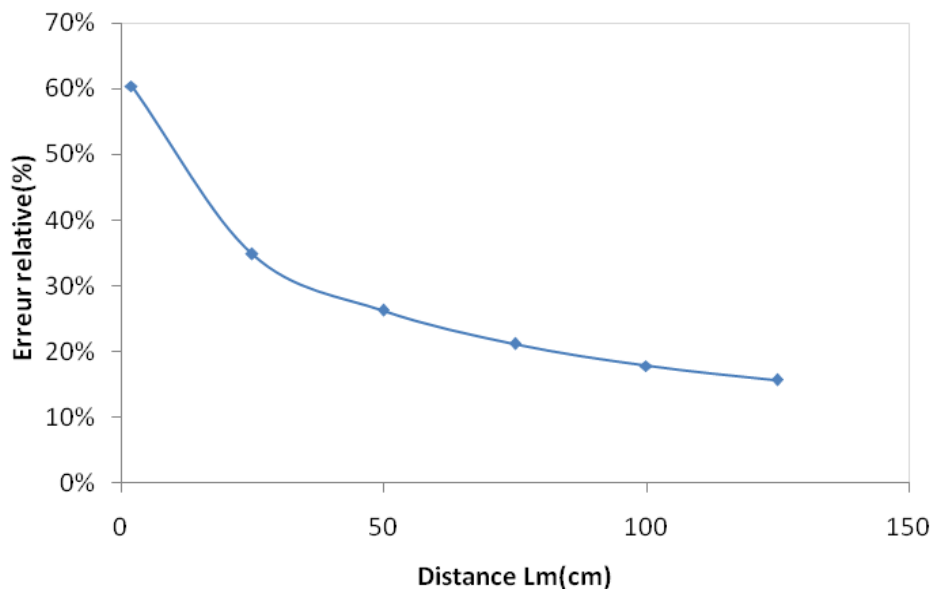
Les figures V.12, V.13, V.14 et V.15 illustrent l'erreur relative théorique de mesure de la capacité simulée introduite par le sol, le conducteur parasite côté HT, côté terre et les trois respectivement.



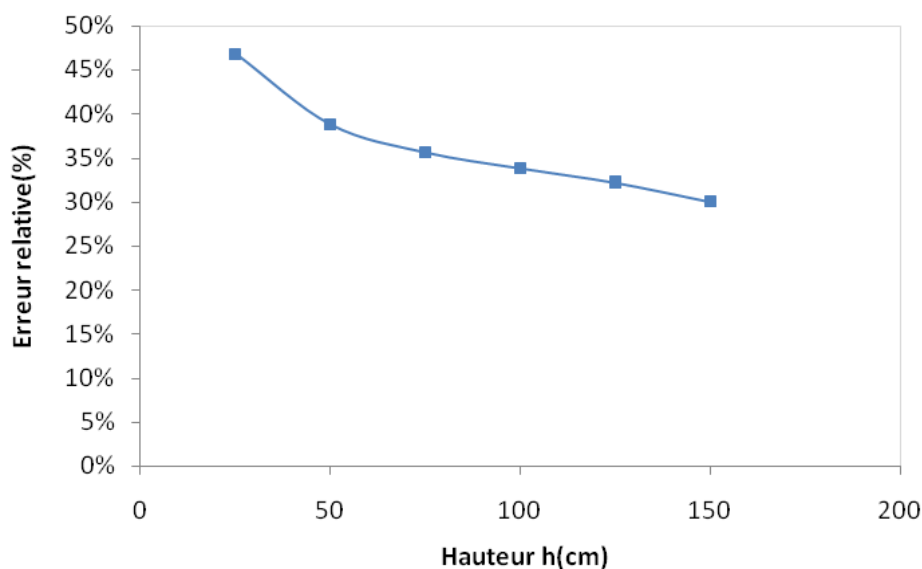
**Figure V.12:** Erreur relative due à la présence du sol



**Figure V.13:** Erreur relative due à la présence du conducteur parasite côté HT



**Figure V.14:** Erreur relative due à la présence du conducteur parasite côté terre



**Figure V.15:** Erreur relative due à la présence des trois conducteurs parasites côté HT terre et le sol

D'après les courbes ci-dessus ou on présente l'erreur relative (Figure V-12 V.13 V.14 et V.15) montre que l'influence du conducteur parasite ne peut être négligée que pour les grandes distances par rapport à lui.

**V.6.Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de mettre en évidence l'influence des conducteurs parasites sur la capacité pour caractériser notre modèle simulé.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées à partir des résultats simulés obtenus:

- ✓ La capacité simulée augmente d'une manière considérable en fonction de la distance au conducteur parasite.
- ✓ L'effet de conducteur parasite côté HT est dominant devant l'effet des autres conducteurs parasites.
- ✓ Pour minimiser l'erreur due à la mesure quand il y'a un conducteur parasite il faut prévoir une grande distance par rapport à celui-ci. On note que dans le cas que nous avons étudié, qui correspond à une distance inter-électrodes de l'ordre de dizaines de centimètres, il faut prévoir des distances supérieures à 150 cm pour avoir un pourcentage d'erreur au moins inférieur à 10%. Ce résultat confirme les travaux antérieurs effectués au niveau de notre laboratoire [46].

***CONCLUSION***

***GENERALE***

### Conclusion générale

Le travail que nous avons effectué a montré que, malgré la simplicité géométrique du modèle adopté pour représenter la zone sèche et pollué d'un isolateur haute tension, la détermination de la capacité apparente en fonction des paramètres électrogéométriques n'est pas aisée.

Une approche par simulation du modèle étudié, par le biais du logiciel de calcul bidimensionnel du champ électrique FEMM4.0 (Finite Element Magnetism Method), nous a permis d'interpréter les allures obtenues.

Il ressort de notre étude que :

Dans le cas du 1<sup>er</sup> modèle

- ✓ La capacité augmente modérément avec les dimensions des électrodes, à savoir la largeur  $a$  et l'épaisseur  $E$ .
- ✓ La forme des électrodes n'influe pas sur la capacité d'isolateur d'après les résultats de simulation du modèle rectangulaire et demi-circulaire.
- ✓ L'influence de l'épaisseur du matériau est assez importante, ce qui signifie que le courant présente bien un caractère volumique : celui-ci, à l'instar du champ électrique, part d'une électrode, traverse une partie du verre pour rejoindre l'autre électrode. La capacité globale est donc une contribution du diélectrique (verre) et de l'air.
- ✓ Pour des variations de la largeur de la plaque, la capacité du modèle reste presque constante. Ceci peut s'expliquer par le fait que cette variation n'affecte pas le trajet des lignes de champ : la quantité de charges induites sur les électrodes, et par suite la capacité, reste donc quasiment constante.
- ✓ La capacité simulée augmente d'une manière considérable en fonction de la distance par rapport au conducteur parasite.
- ✓ L'effet du conducteur parasite côté HT est dominant devant l'effet des autres conducteurs parasites.
- ✓ Pour minimiser l'erreur due à la mesure quand il ya un conducteur parasite il faut prévoir une grande distance par rapport à celui-ci.

Dans le cas du 2<sup>ème</sup> modèle

Ce modèle est similaire à un condensateur plan, l'allongement de la longueur de la ligne de fuite en augmentant l'épaisseur donne par conséquent une diminution prononcée de la capacité de modèle. De même que pour le 1<sup>er</sup> modèle pour des variations de la largeur de la plaque, la capacité du modèle reste presque constante, puisque cette variation n'affecte pas le trajet des lignes de champ.

Par ailleurs, la comparaison entre les deux modèles, nous a permis de tirer les résultats suivants :

- ✓ La capacité du 2<sup>ème</sup> modèle reste toujours plus importante que celle du 1<sup>er</sup> à cause de la disposition géométrique des électrodes sur l'isolant.
- ✓ La présence de la pollution sur le matériau diélectrique a une grande influence sur la capacité. Cette influence est visible quand la pollution est très proche des électrodes. Ceci s'explique par l'effet de proximité électrode-pollution où il y'a une concentration du champ électrique sur les extrémités, et par suite une grande concentration de charges sur l'électrode. Cet effet conduit donc à une grande augmentation de la capacité de modèle.



***REFERENCES***

***BIBLIOGRAPHIQUES***

- [1] **A. Cimador, S. Vitet**, "La Pollution des Isolateurs", EDF-Epure, No. 27, Juillet 1990.
- [2] **L.E.Zaffanella, H.M.Schneider, J.H.Dunlap**, "Performance des isolateurs pollués pour lignes CCHT", CIGRE, 1986, rapport 33-05.
- [3] **R.Sundarajan, R.S.Gorur**, "Dynamic arc modeling of pollution flashover of insulators under dc voltage", IEEE Trans. on Elect. Insul, vol. 28, n° 2, April 1993.
- [4] **Z.Aydogmus, M.Cebeci**, "A new flashover dynamic model of polluted HV insulators", IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., vol. 11, August 2004, pp. 577-584.
- [5] **P. Claverie, Y. Porcheron**, "How to Choose Insulators for Polluted Areas", IEEE Trans. PAS, Vol. 92, N° 3, pp. 1121-1131, 1973.
- [6] **C.Hurax, A.M.Rahal**, "Le contournement des isolateurs haute tension : approche à l'aide d'un modèle de laboratoire ", RGE, juin 1975, pp. 425-429.
- [7] **J.Danis**, "A stochastic pollution flashover model", 4th International Symposium on High Voltage Engineering, rapport 46-12, September 1983, Athens, 5-9.
- [8] **M.N.Rayes, M.Zhirh**, "Investigation about flashover performance of insulators under uniform and non uniform contamination", 7e International Symposium on High Voltage Engineering, rapport 43-08, Dresde, August 1991, pp. 26-30.
- [9] **D. Namane**, "Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateurs haute tension, sous la fréquence 50Hz", Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute.
- [10] **A.Mekhaldi, D.Namane, S.Bouazabia, A.Beroual** "Flashover of discontinuous pollution layer on high voltage insulators", IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., vol. 6, December 1999, pp. 900-906.
- [11] **M.Teguar, A.Mekhaldi, A.Boubakeur**, "Algorithm for HV insulator flashover under discontinuous pollution", Archives of Electrical Engineering, vol. LI, n° 2, 2002, pp. 119-136.
- [12] **M.Teguar**, "Modélisations d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro géométriques", Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique, Avril 2003.
- [13] **X. Ducouret**, "Lignes aériennes: matériels. Isolateurs ", Technique de l'ingénieur D4423 – 2006.
- [14] **G. Leroy, C. Gary**, "les propriétés diélectrique de l'air et les très hautes tensions", Eyrolles, paris 1984.
- [15] **M. Teguar, A. Boubakeur** "Pollution des Isolateurs de Haute Tension", Laboratoire de Haute Tension, Département de Génie Electrique Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P.) janvier 2004.
- [16] **D. Dumora**, "Matériaux isolants céramiques en électrotechnique", Technique de l'ingénieur D275- 1997.
- [17] **W. Heise, G.F, luxa, G.Revrery, M. P. Verma**, "Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide " CIGRE, rapport 33-09 1972.
- [18] **G.Riquel, E.Span genberg**, "De la céramique au synthétique", EDE-Epure, No. 58, Avril 1998.
- [19] **Y.Porcheron**, "Lignes aériennes : matériels entrant dans la constitution d'une ligne aérienne", Techniques de l'ingénieur D4425-1997.
- [20] [http://www.hydroquebec.com/terminologie/chroniques/chro\\_isolateur.html](http://www.hydroquebec.com/terminologie/chroniques/chro_isolateur.html).
- [21] **M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubaski**, "Leakage Current Patterns on Contaminated Polymeric Surfaces", IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation Vol. 6, No. 5, October 1999.

- [22] **M. TERKMANI, M.BABOUAMER**, " Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension ", PFE, USTO, juin 2005.
- [23] **S. Lotfi, S. Djafri**, "Contribution à l'Etude de la Pollution des Isolateurs des Lignes Ariennes de Haute Tension dans la région de l'Arbaa", Projet de Fin d'Etudes, Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Juin 1982.
- [24] **K. Amriche, S. Benayed**, "Modélisation des principes caractéristiques d'un isolateur pollué sous tension continue", Projet de Fin d'Etudes, Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Juin 2004.
- [25] **S. Guerfi**, "Modélisation des isolateurs de haute tension pollué sous tension continue", Mémoire de Magistère, Génie Electrique, Université Abderahmane Mira, Bejaia.
- [26] **M. Tegar**, " Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées ", Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juillet 1993.
- [27] **C. H. A. Ely, P. J. Lambeth, J. S. T. Looms, D. A. Swift, C.E.G.B** "Contournement des polymères humides et pollués: l'ailette BOOSTER", CIGRE, rapport 15 - 02, 1978.
- [28] **A. Mekhaldi**, "Etude du Développement d'un Arc Électrique sur des Surfaces Isolantes Contaminées par la Pollution Désertique", Thèse de Magister, ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Juin 1990.
- [29] **A. El-Arabaty, A. Nosseir, S. El-Debeiky, E. Nasser, El-Sharky**, " Choix d'Isolateurs Utilisables dans des Ambiances Polluées et Notamment dans des Régions désertiques ", CIGRE, rapport 33 - 11, Paris, France, 1980.
- [30] **G. Riquel, E. Span genberg**, "De la céramique au synthétique ", EDE-Epure, N° 58, Avril 1998.
- [31] **F. Rizk**, "Mathematical Models for Pollution Flashover", Electra, Vol. 78, pp. 71-103, 1981.
- [32] **H. Boeme and F. Obenaus**, "Pollution Flashover Tests on Insulators in Laboratory and in Systems and Model Concept of Creepage Path Flashover", Cigre, 1485.11, paper N° 406, June 1966.
- [33] **P. S. Gohsh, S. Chakvravorti and N. Chatterjee**, "Estimation of Time to Flashover Characteristics of Contaminated Electrolytic Surfaces using a Neural Network", IEEE Trans. on Dielect and Elect Insul, Vol. 2, N° 6, pp. 1064-1074, 1995.
- [34] **P. Claverie**, "Predetermination of the Behaviour of Polluted Isulators", IEEE Trans. PAS, Vol. 90, N°. 4, pp. 1902-1908, Juillet, 1971.
- [35] **S. Gopal and Y. Narayana Rao**, "On the Flashover Machanisms of Polluted Insulators", I S P P I S D, IIT., MADRAS, pp. 1.06, 1983.
- [36] **M.D. Mahi**, "Dynamique de L'Allongement sur une Surface Faiblement Conductrice d'une Décharge Electrique Alimentée en Courant Alternatif", Thèse es Science de l'Université Paul Sabatier, 1986.
- [37] **A. MEKHALDI, S. BOUAZABIA**, "Conduction Phenomena on polluted insulating surface Under AC High Voltages ", *7<sup>e</sup> international symposium on high voltage engineering, rapport 3174, Autriche, 28 Août -1e Septembre 1995.*

- [38] **A.Mekhaldi, M.Teguar, A.Beroual**, "Algorithm for pollution flashover calculations ", Archives of Electrical Engineering, Vol. XLV, No. 4, pp. 385-397, 1996.
- [39] **F.Obenaus**, "Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge", Deutsche Elektrotechnik, Vol.4, 1958, p. 135-136.
- [40] **CEI 60-1**, "Techniques des essais à haute tension. 1- Définitions et Prescriptions Générales relatives aux Essais", Deuxième Edition, 1989.
- [41] **J.A. EDMINISTER** "ELECTROMAGNETIME, Cours et problèmes", (1983)
- [42] **K.Nassour, M.Braham, M.Rahli, A.Bendaoud, M.Miloudi** "Modélisation numérique par la méthode des éléments finis de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur haute tension", Conférence Nationale sur la Haute Tension, Taghit 5-7 Novembre 2007.
- [43] **O.W.Andersen** "Finite element solution of complex potential electric fields", IEEE Trans. PAS, Vol. 96, Juillet-Aout 1977, p. 1156-1161.
- [44] **FEMM 4.0 Electrostatics Tutorial**.
- [45] <http://femm.foster-miller.com>
- [46] **D. Namane**, "Modélisations expérimentale et numérique d'isolateurs HT sous tension alternative 50Hz", Thèse de Doctorat, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute tension, 2012.