

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique**

**CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED**

**INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE**

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**LICENCE ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie électrique et Electronique

Spécialité : Réseaux Electrique

Presenté par : NOM et Prénom

**Thème**

**Détermination expérimentale du coefficient  
de partage octanol/eau de quelques benzènes  
substitués**

Soutenu le 31 Janvier 2011

Devant le jury composé de :

Mr.	BEN ATTOUS Djilani	MC	Président
Mr.	ZELLOUMA Laid	MC	Examineur
Mr.	GUEHRAR Youcef	MA (A)	Rapporteur

2010-2011

## SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b>	1
<b>Chapitre I : Isolateurs de haute tension</b>	
I-1- Introduction	2
I-2- Isolateurs de haute tension	2
I-3- Types d'isolateurs	2
I-3-1- Isolateurs rigides	2
I-3-2- Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne	3
I-3-2-1- Isolateur long fut	3
I-3-2-2- Isolateur capot et tige	4
I-3-2-2-1- Profil standard	5
I-3-2-2-2- Profil anti-brouillard (forme A)	6
I-3-2-2-3- Profil anti-brouillard (forme B)	6
I-3-2-2-4- Profil plat	7
I-3-2-2-5- Profil sphérique	7
I-3-2-2-6- caractéristiques géométriques	8
I-4. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs	8
I-4-1- Céramique	9
I-4-2- Verre	9
I-4-3- Matériaux synthétiques	9
I-5- Pollution des isolateurs	10
I-6- Sources de pollution	11
I-6-1- Pollution naturelle	11
I-6-1-1- Pollution marine	11
I-6-1-2- Pollution désertique	11
I-6-2- Pollution industrielle	11
I-6-3- Pollution mixte	12
I-7- Mesure de la sévérité de la pollution des sites	12
I-8- Comportement des isolateurs sous pollution	13
I-9- Conclusion	14
<b>Chapitre II: Méthodes analytiques et numériques d'évaluation du champ électrique</b>	
II-1- Introduction	15
II-2- Equations de base de l'électromagnétisme	15
II-2-1- Relations constitutives	15
II-2-2 -Equations de Maxwell	18
II-2-3- Equations de Laplace et de Poisson	19
II-3- Cas des isolateurs de Haute Tension	20

II-3-1- Notions fondamentales	20
II-3-1-1 Relation entre charges et capacités	20
II-3-1-2- Relation entre résistance et capacité pour un même réseau de lignes de champ	22
II-4- Méthode des transformations conformes	24
II-5- Méthode des charges fictives	24
II-6- Méthode des différences finies	24
II-7- Méthode des éléments frontières	24
II-8- Méthode des éléments finis	25
II-8-1- Principe de la méthode variationnelle	25
II-8-2- Maillage	25
II-8-3- Choix des fonctions d'approximation	26
II-8-3-a- Critère de Rayleigh-Ritz	27
II-8-3-b- Construction des matrices élémentaires	28
II-8-4- Assemblage des matrices élémentaires	39
II-8-4-a-Extension des matrices élémentaires ...	39
II-8-4-b- Assemblage	30
II-8-5- Réduction du système matriciel	30
II-9- Calcul du champ électrique	31
II-10- conclusion	31

### **Chapitre III : Distribution du Champ Électrique**

II-1- Introduction:	32
III-2- Simulation du modèle réel:	32
III-4- Interprétation des résultats:	33
III-4-1- Répartition du champ électrique sur la plaque:	33
III-4-2- La variation du champ électrique le long de la ligne de fuite:	38
III-4-3- L'influence de la permittivité sur le champ électrique dans la pollution	43
III-5- Conclusion	44
 <b>Conclusion générale</b>	 45
<b>Références bibliographique</b>	46

## **Résumé** (10 à 15 lignes)

Le coefficient de partage  $P$  d'un soluté entre deux phases se traduit par le rapport des concentrations du soluté dans les deux phases. Dans ce travail on propose une nouvelle méthode de calcul théorique pour la détermination de coefficient de partage (octanol/eau d'une série des composés organiques à partir d'un certain nombre des paramètres caractéristique des solvants et du soluté.

Les valeurs de  $P$  calculées par la méthode proposée sont comparées avec celles obtenus par les méthodes expérimentales. La moyenne de l'erreur absolue est de l'ordre de 0.10 et la moyenne de l'erreur relative est 12%.

## **Introduction générale**

L'estimation du rendement de l'extraction liquide-liquide d'un composé chimique, ainsi que la prévision de la valeur de son taux de partage entre les phases présentes dans le mélange, sont les facteurs les plus déterminant de l'opération d'extraction, ces entités varient en fonction de plusieurs paramètres notamment, les volumes des deux phases, la nature du milieu et celle du constituant à extraire, les concentrations des différents composés présents en solution ainsi que les coefficients de partage de la substance à extraire entre les deux phases. Les relations exprimant ces entités sont purement théoriques[1].

Pour une extraction réactive les paramètres les plus influençant sur le coefficient de partage sont la concentration en ligands pour les complexes, et le pH pour les acides et les bases[2]. Ces relations deviennent de plus en plus longues et compliquées au fur et à mesure de l'augmentation du nombre de constituants en solution, ou si ceux-ci réagissent avec les solvants.

## Chapitre I : intitulé du chapitre

### I-1-Définition de coefficient de partage logP

Le coefficient de partage octanol/eau (P), généralement exprimé en logP, d'une substance A est défini comme étant le rapport de la concentration en équilibre de la substance A dans la phase d'octanol et celle dans la phase aqueuse. Les concentrations sont exprimées en termes de masse ou de moles de produit chimique par volume unitaire de liquide.

$$P = \frac{[A]_{\text{octanol}}}{[A]_{\text{eau}}} \quad (1)$$

$[A]_{\text{octanol}}$ : concentration de la substance A dans la phase octanol

$[A]_{\text{eau}}$ : concentration la substance A dans la phase aqueuse

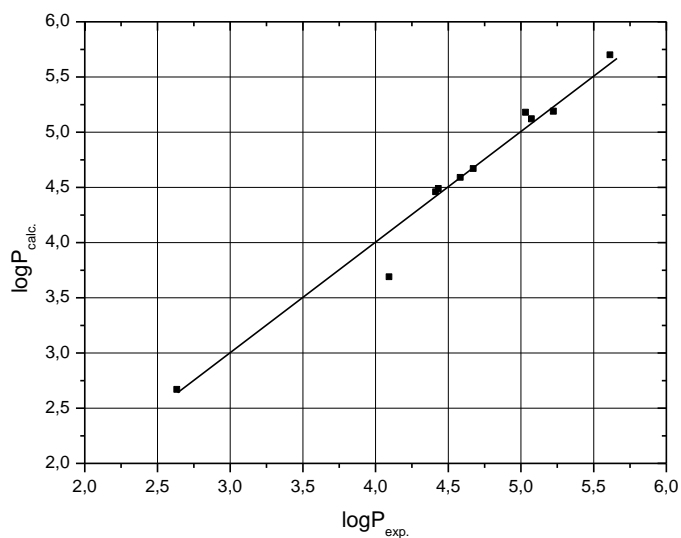
Le coefficient de partage octanol/eau logP est le paramètre physico-chimique le plus facile à mesurer au laboratoire et utilisé pour caractériser quantitativement la nature hydrophobe des composés organiques. Il est l'indicateur majeur concernant le partage entre l'eau et la matière organique.

Le tableau I-1 montre la contribution des fragmentations dans le calcul de logP.

Atom type	Atom type in xlogP	Contribution
Fc	-	2.269
2 CH <sub>3</sub>	1	2×0.484
RNH	64	-0.212
R <sub>3</sub> CH	9	-0.138
R=O	44	-2.057
8 H	37	8×0.046
XRC=X	24	1.637
<b>logP = 2.83</b>		

*Tableau I-1 construction des atomes*

Après avoir appliqué la méthode de calcul de logP sur un très grand nombre des composés organiques diversement substitués, les valeurs expérimentales des logP des mêmes composés sont déterminées par différentes méthodes. Les valeurs calculées de logP sont comparées avec les valeurs expérimentales, la corrélation entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées est représenté dans la figure I-1.



*Figure I-1* Corrélation entre  $\log P$  expérimental et  $\log P$  calculé

### **Conclusion générale**

La méthode de calcul de  $\log P$  proposée dans ce modeste travail, est d'importance cruciale, en effet, en plus des paramètres relatifs à l'opération d'extraction liquide-liquide qu'on peut calculer par la méthode proposée, à savoir rendements et taux de partage, et d'étudier leurs variations en fonction d'entités les plus influents sur l'opération d'extraction, la méthode permet aussi de prédire et de calculer d'autres paramètres tel que  $pL$  (  $pH$  ), quantités des produits après extraction dans les deux phases, ...etc.

C'est donc un outil qui permet de prédire le coefficient de partage avec une grande précision donc éviter des essais erreurs en paillasse, et de prédire le sort de ces opérations c'est-à-dire possibilité ou impossibilité de réalisation pratique, et ce, dans les conditions opératoires choisies.

D'après les exemples des cas étudiés, on peut dire que les résultats des valeurs de  $\log P$  calculées à l'aide de la méthode proposée sont très proches des valeurs expérimentales. D'autre part, la méthode semble être un bon outil pour prédire le  $\log P$  de certaines composés organométalliques de taille raisonnable, comportant moins de 20 atomes de carbones.

## Références bibliographiques

Toutes les références bibliographiques citées dans le texte doivent figurer dans cette section. Les références bibliographiques citées dans le texte doivent être signalées par un numéro entre crochets. Dans la bibliographie, les références seront classées par ordre croissant, conformément aux exemples ci-après.

### ✓ Livres

Les initiales des prénoms d'auteurs suivis des noms, l'année d'édition, *le titre de l'ouvrage*, l'éditeur, le lieu d'édition, les pages de la citation.

Ex : G. Charlot (1983), *les réactions en solution aqueuse*, Masson, Paris, p. 243

### ✓ Thèses et mémoires

Les initiales du prénom d'auteur suivi de nom, l'année, le *titre*, l'intitulé du diplôme, établissement universitaire, les pages de la citation.

Ex : N. Arbaoui (2004). Effet du gradient de température sur la corrosion des concentriques, Mémoire de Magister, Université de Ouargla, p. 67.

### ✓ Article de journal ou de revue :

Les initiales des prénoms d'auteurs suivis des noms, *le titre du périodique*, **le volume**, le numéro (s'il y a lieu), la première page de l'article, l'année de parution de l'article,

Ex: T. Lanez, L. Bechki, and M. Saidi, *J. Soc. Alg. Chim.* **13**, N°2, 251 (2003).

### ✓ Site internet

Nom du cite, date de consultation

Ex : <http://www.gfev.univ-tln.fr/ternaire/extraction.htm>, 21 juin 2007

### ✓ Rapport

Les initiales des prénoms d'auteurs suivis des noms, *le titre du rapport*, le numéro du rapport, l'année d'édition, l'année d'édition.

Ex : H. Naoui, *corrosivité de l'Albien*, N° 12/9.1017, CRD Boumerdes (2000)

## Le mémoire contient par ordre d'apparition:

- Dédicaces
- Remerciements
- Liste des Tableaux
- Liste des Figures
- Liste des abréviations
- Résumé bilingue

### Sommaire contient:

- \* Introduction générale
- \* Chapitre 1.2.3..... chaque chapitre commence par une Introduction et se termine par Conclusion
- \* Conclusion générale
- \* Bibliographie
- \*Annexe

### Type d'écriture:

- Times new Roman ( 12 )
- Les titres sont en Gras
- Interligne 1.5
- Formules et Figures sont numérotées par chapitre

# *Remerciements*

*Avant tout nous remercions ALLAH que nous a éclairé le chemin du savoir, la force et la patience nécessaire Pour mener le présent travail à terme.*

*Ce travail a été réalisé au centre universitaire d'El-Oued du département de Génie Electrique, sous la direction Scientifique de Monsieur Mr T. GUIA.*

*Nous remercions, notre encadreur Mr T. GUIA  
Remercions également Mr A. Khechkhouché Chargé de Cours au centre universitaire d'El-Oued, et tout les enseignants. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude pour tous leurs précieux conseils, leurs suivis permanents.*

*Enfin, Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

Les réseaux de transport sont à très haute tension (de 150 kV à 800 kV) et ont pour but de transporter l'énergie des grands centres de production vers les régions consommatrices d'électricité.

Le transport et la distribution de l'énergie électrique s'effectuent souvent par des lignes aériennes. Celles-ci comportent des isolateurs soumis à diverses contraintes, parmi celles-ci l'exposition de ces derniers à différents dépôts polluants.

L'humidification de ces couches de pollution engendre un courant de fuite, conduisant par effet joule à l'échauffement de la couche de pollution, et par conséquent à son assèchement partiel. Une partie importante de la tension appliquée se trouve reportée aux bornes de cette bande sèche engendrant, si le champ local dépasse un certain seuil, la création d'un arc électrique. Sous certaines conditions, cet arc peut s'allonger jusqu'à provoquer le contournement total du système isolant.[1]

Le travail que nous nous proposons de présenter porte sur un domaine d'études sur la répartition du champ électrique.

Notre mémoire est donc structurée en trois chapitres distincts:

Nous commençons le premier 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 sont présentées.

Nous exposons dans le deuxième chapitre, les différentes méthodes de mesure de champ électrique et nous nous intéressons, plus particulièrement, à la méthode des éléments finis que nous avons retenue pour le calcul de champ dans notre cas.

Dans le troisième chapitre, nous décrivons le logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics) utilisé dans la répartition du champ électrique en deux dimensions.

## **I.1.Introduction :**

Le rôle des isolateurs est de relier les conducteurs aux supports en assurant leur isolation électrique. En effet, un bon choix de dimensionnement des isolateurs s'avère indispensable pour assurer la fiabilité et la qualité de l'isolement de haute tension.

La pollution de ces isolateurs figure comme un vrai problème néfaste à leur bon fonctionnement. La tension de tenue des isolateurs peut diminuer considérablement à cause des dépôts polluants recouvrant leurs surfaces. Ils peuvent même conduire au contournement des isolateurs dans certains cas critiques.

## **I.2. Isolateurs de haute tension [1] :**

L'isolateur est utilisé comme son nom l'indique pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions pour empêcher les courts circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution. L'isolateur est un matériau solide, liquide ou gaz qui a une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle.

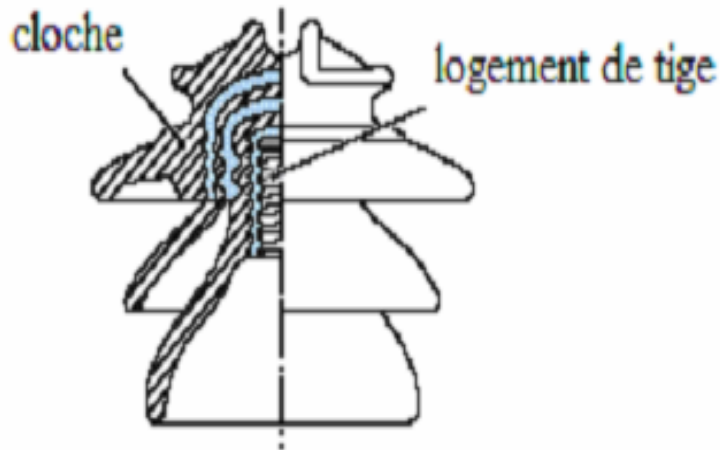
Les isolateurs des lignes aériennes ont deux fonctions principales. D'une part, ils permettent d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et d'autre part, ils ont un rôle mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dues surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent, etc.

## **I.3. Types d'isolateurs [1]:**

Vu les différentes façons d'utilisations et les différentes conditions de fonctionnement des isolateurs, on en distingue des types différents des isolateurs. La différence entre ces types peut se faire soit par leur fonction (support ou traversée), soit par le matériau isolant utilisé pour la fabrication de ces isolateurs, soit encore par leur profil ou par leur mode de fixation.

### **I.3.1 Isolateurs rigides :**

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés entre eux, ils sont fixés aux pylônes par des ferrures de différentes formes (Figure I.1). Ils sont montés sur pylônes soit d'une façon verticale, horizontale ou oblique (inclinée). Mais 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. 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 :

- ❖ L'isolateur capot et tige.
- ❖ L'isolateur long fut.

#### **I.3.2.1 Isolateur long fut :**

Il est constitué d'un bâton cylindrique plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques muni d'ailettes. A chaque extrémité il y a une pièce métallique pour les liaisons. Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, soit elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (figure I.2), soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (figure I.3).

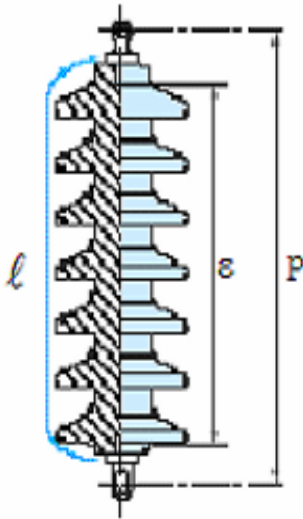


Figure I.2

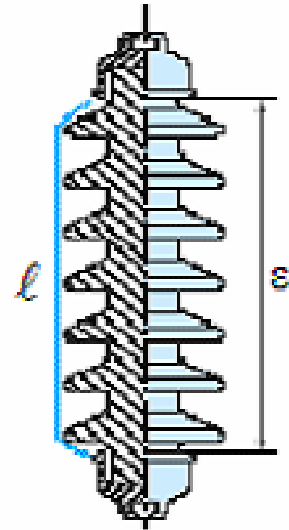


Figure I.3

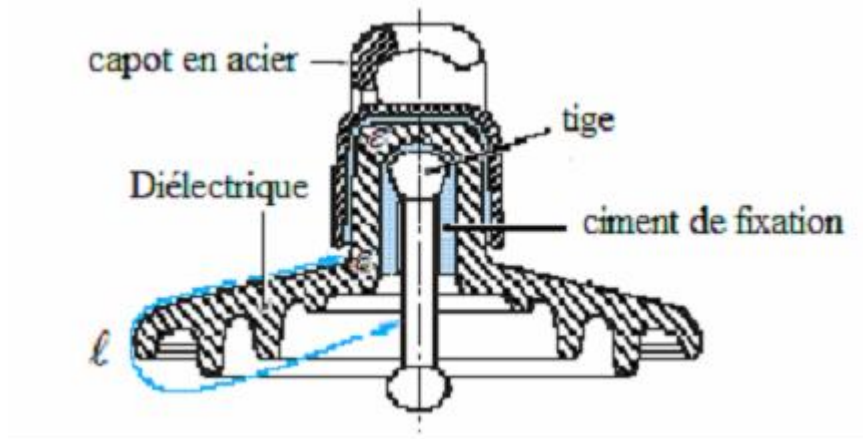
$L$  : plus courte distance dans l'air extérieure à l'isolateur.

$P$  : pas nominal.

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

### I.3.2.2. Isolateur capot et tige :

L'isolateur capot et tige est constitué d'un corps isolant qui porte à l'intérieur une tige en acier, où la tête conique de cette tige est scellée dans le matériau isolant soit le verre soit la porcelaine. L'extrémité supérieure de l'isolateur porte un capot scellé en fonte malléable troué de telle sorte qu'on peut faire entrer l'extrémité inférieure de la tige dans ce trou, et le scellement des éléments de chaîne capot et tige se fait de cette façon en faisant pénétrer la partie inférieure de la tige de l'élément supérieur dans le capot de l'élément inférieur en utilisant du ciment (Figure I.4).



**Figure I.4:** Isolateurs à capot et tige

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

#### **I.3.2.2.1. Profil standard :**

La forme et les dimensions sont en accord avec la normalisation internationale (CEI305 1978), à cause de leur planéité, les rainures internes bien espacées et la longueur de la ligne de fuite supérieure à la demande standard. Ce type est très utilisé dans les endroits à pollution moyenne (Figure I.5).



**Figure I.5 :** Isolateur capot et tige de profil standard.

**I.3.2.2.2. Profil anti-brouillard (forme A):**

Son diamètre est plus grand que celui du profil standard. Il est muni de deux ou trois rainures à grande profondeur. Le profil et les grands espacements des rainures permettent un auto lavage par l'action de vent et de la pluie. Cette conception permet également un lavage manuel facile si c'est nécessaire (Figure I.6).



**Figure I.6 :** Isolateur capot et tige de profil anti-brouillard (forme A).

**I.3.2.2.3. Profil anti-brouillard (forme B):**

Dans cette conception, l'épaisseur de la rainure extérieure agit comme une barrière contre l'action du brouillard et de dépôt des sels minéraux sur la surface de l'isolateur, empêchant alors la formation d'un électrolyte conducteur sur la surface. Ce type d'isolateur est efficace dans les zones côtières (Figure I.7).



**Figure I.7 :** Isolateur capot et tige de profil anti-brouillard (forme B).

**I.3.2.2.4. Profil plat :**

L'élimination complète des rainures internes réduit l'accumulation des agents polluants sur la surface basse, grâce au courant d'air, cette conception est particulièrement efficace dans les zones désertiques où l'auto lavage est peu fréquent par la pluie (figure I.8).



**Figure I.8 :** un isolateur capot et tige de profil plat.

**I.3.2.2.5. Profil sphérique :**

La forme sphérique d'une longueur de fuite importante avec absence des rainures internes permet un lavage manuel facile et efficace (Figure I.9).



**Figure I.9 :** Isolateur capot et tige de profil sphérique.

### I.3.2.2.6. caractéristiques géométriques :

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 I.1).

Désignation CEI	Charge de rupture (kN)	Diamètre extérieur (mm)	Pas Nominal (mm)	Longueur de la ligne de fuite (mm)
U 40	40	175	100 100	185
U70	70	255	127 146	280
U100	100	255 288(1)	127 146(1)	318 440(1)
U160	160	280 320(1)	146 170(1)	370 540(1)
U300	300	320	195	480
U400	400	360 380	206 220	525 550
U530	530	380 440	240 255	600 640

Tableau I.1 : Caractéristiques géométriques des isolateurs à capot et tige (CEI 60305).

(1): Isolateurs utilisés dans des zones polluées.

### I.4. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs [1] :

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine. Mais durant ces dernières années, la porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients principaux qui sont : le poids lourd des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages. Ces dernières années on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères.

### **I.4.1. Céramique :**

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

### **I.4.2. Verre :**

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présente le verre, le bas prix et l'observation des défauts est très facile. On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit.

#### ❖ Le verre trempé :

La résistance à la traction du verre trempé est environ 5 à 6 fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100° C.

#### ❖ Le verre recuit :

Le verre recuit est utilisé pour la fabrication d'isolateurs rigides, mais présente cependant des inconvénients. Parmi ces inconvénients, nous citons le fait qu'il ne résiste pas aux variations brusques de température et qu'il ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles et c'est pour cette raison qu'il n'est pas utilisé pour la fabrication des isolateurs de suspension.

### **I.4.3. Matériaux synthétiques :**

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique (Fig. I.10).

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères (Fig. I.11). L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécaniques, atmosphériques...) (Fig. I.12).

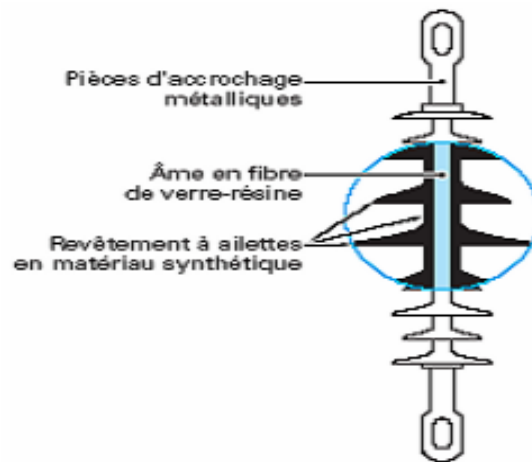


Figure I.10.

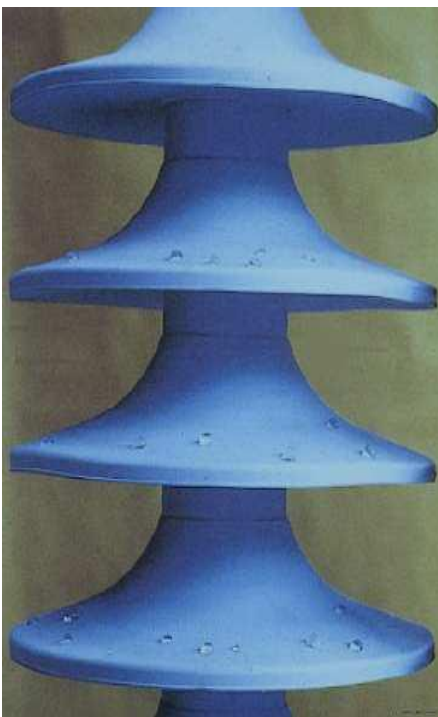


Figure I.11.



Figure I.12.

### I.5. Pollution des isolateurs [1] :

La pollution est un phénomène qui agit négativement sur le comportement des isolateurs de haute tension. C'est un paramètre important à prendre en considération lors du choix et du dimensionnement des chaînes d'isolateurs.

La pollution provoque la formation d'une couche sur la surface des isolateurs. Ces couches de pollution, quand elles sont humidifiées, réduisent considérablement la résistivité des isolateurs ce qui conduit à la diminution de leur tension de tenue.

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

## **I.6. Sources de pollution [1] :**

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

### **I.6.1. Pollution naturelle :**

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

#### **I.6.1.1. Pollution marine :**

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

#### **I.6.1.2. 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 seront humidifiés, les couches de sable deviennent plus ou moins conductrices à cause de l'existence de sels dans le sable.

### **I.6.2. 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 ..... etc.), près des grandes villes (les gaz d'échappement des véhicules) ou près des terrains agricoles (les engrais utilisés en agriculture).

### I.6.3. Pollution mixte :

Ce type de pollution est le plus dangereux, elle est la résultante de l'existence de différents types de pollution dans la même zone, comme les zones industrielles dans des régions côtières.

### I.7. Mesure de la sévérité de la pollution des sites [1]:

La sévérité de la pollution d'un site est généralement mesurée par différentes méthodes. Il y a la méthode de salinité équivalente qui consiste à mesurer la conductivité de la solution obtenue par la dissolution des agents polluants dans de l'eau distillée. Il y a aussi la détermination au laboratoire du courant de fuite d'un isolateur pollué artificiellement. Les essais de laboratoire sont valables dans la mesure où les conditions d'essais conduisent aux mêmes valeurs de courant de fuite observées sur site. La mesure de la sévérité de la pollution d'un site est importante lors du choix des isolateurs à installer dans ce site.

On peut classer les degrés de la pollution suivant quatre niveaux selon la CEI 81-5 qui sont: faible, moyenne, forte et très forte (Tab. I.2).

Faible 0.06 mg/cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zones sans industries et avec faible densité d'habitations équipées d'installation de chauffage</li> <li>• Zones avec faible densité d'industries ou d'habitations mais soumise fréquemment aux vents et/ou pluies.</li> <li>• Régions agricoles.</li> <li>• Régions montagneuses</li> </ul>
Moyenne 0.20mg/cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ou avec une densité moyenne d'habitation équipées d'installation de chauffage.</li> <li>• Zones à forte densité d'habitation et/ou d'industries mais soumises fréquemment à des chutes de pluies.</li> <li>• Zones exposées aux vents de mer, mais trop proches de la cote.</li> </ul>
Forte 0.60mg/cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes villes avec forte densité d'installation de chauffage polluantes.</li> <li>• Zones situées près de la mer, ou en tout cas exposées à des vents relativement fort venant de la mer.</li> </ul>

Très forte > 0.60 mg/cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zones généralement peu étendues, soumises à des fumées industrielles produisant des poussières conductrices.</li> <li>• Zones généralement peu étendues, très proches de la cote et exposées aux embruns ou au vent fort et polluant venant de la mer.</li> <li>• Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant de sable et du sel soumis à une condensation régulière.</li> </ul>
---	---

**Tableau I.2 :** Classement de degré de pollution selon CEI 815.

### **I.8. Comportement des isolateurs sous pollution [1] :**

Le comportement des isolateurs sous pollution est un facteur essentiel pour la conception et l'exploitation des lignes en zones polluées. Il convient donc de connaître les différents phénomènes de conduction sous pollution.

Lors de la mise en place d'une chaîne d'isolateurs, la longueur de la ligne de fuite de l'ensemble est telle que le champ électrique en chaque point est très inférieur à la rigidité diélectrique de l'atmosphère ambiante. La conductivité superficielle créée par la couche de pollution, modifie la répartition du potentiel de la ligne de fuite, selon les contraintes auxquelles est soumis. Trois cas peuvent se présenter :

- Arc non localisé : l'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçe à un autre endroit et ainsi de suite. Ces arcs peuvent être dus soit à la formation d'une zone sèche à la suite du passage d'un courant de fuite, comme ils peuvent être dus à l'état de surface de l'isolateur, (l'existence des pics sur la couche de pollution).
- Arc fixe : l'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (source continue), soit en réamorçant au même endroit (source alternative). L'impédance de dépôt et de la surface propre d'isolateur est en série avec l'arc, elle limite ainsi le courant de l'arc et sa longueur. Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra. Généralement ce type d'arcs entraîne par effet thermique une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défailant.

- Contournement électrique : le phénomène de contournement des isolateurs pollués résulte de la combinaison de plusieurs paramètres.
- dépôt d'une couche de matériaux solides (conductrice ou isolante).
- humidification de ces dépôts.
- existence d'une tension appliquée.

Le contournement des isolateurs pollués est accompli selon les phases suivantes:

Phase 1: un courant de fuite s'écoule à travers la couche électrolytique qui recouvre l'isolant, il provoque un échauffement de l'électrolyte, qui a pour effet d'accroître la conductivité du milieu et par suite courant.

Phase 2: l'échauffement croissant provoque un assèchement local de la couche polluante.

Phase 3: la tension se trouve reportée aux bornes de la zone sèche et des arcs locaux sont susceptibles de s'amorcer, élargissant ainsi la zone sèche.

Phase 4 : à partir de ce stade, l'arc s'allonge longitudinalement jusqu'à atteindre les électrodes est provoqué ainsi le contournement. L'existence de ces phases dépend de nombreux paramètres caractéristiques de l'isolateur pollué: tension appliquée, conductivité de la couche, largeur de la zone sèche, profil de l'isolateur, longueur de fuite...

## **I.9. Conclusion :**

Avant toute réalisation de n'importe quel ouvrage de haute tension, une étude de détermination du degré de pollution du site concerné doit être nécessairement faite, afin de permettre le bon dimensionnement et le bon choix de l'isolation à utiliser. En effet, la détermination du degré de pollution par, entre autres, la méthode de la salinité équivalente du site par une expérimentation aussi longue que possible dans ce site, est recommandée pour les sites à pollution forte ou même très forte.

Plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont proposées. Nous citons par exemple le lavage manuel périodique des isolateurs lors de la diminution des précipitations pluviales, l'allongement de la ligne de fuite totale de la chaîne d'isolateurs en augmentant le nombre de ces derniers ...

## **II.1- Introduction:**

La modélisation de nombreux phénomènes physiques conduit à l'étude d'équations ou de systèmes d'équations aux dérivées partielles linéaires ou non linéaires. Si les outils traditionnels des mathématiques (analyse de Fourier, développement en série,.....), permettent d'obtenir des solutions dans certains cas particuliers, on doit souvent recourir aux techniques de calcul numérique pour traiter les problèmes concrets posés par la recherche.

Grâce à la simulation numérique, on peut compléter l'expérimentation qui parfois est coûteuse ou longue à mettre en œuvre.

Dans ce qui suit nous présentons sommairement certaines méthodes analytiques et numériques de calcul de champ, et nous donnons plus de détails sur la méthode des éléments finis que nous avons retenue pour le calcul de champ dans notre cas.

## **II.2- Équations de base de l'électromagnétisme [3]:**

### **II.2.1 Relations constitutives:**

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[ :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (\text{II.1})$$

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

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

Avec:

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

$$\iint_s \vec{J}_c \cdot \vec{ds} = I_c, \text{ tel que } I_c \text{ est le courant de conduction;}$$

$\gamma$ : la conductivité du matériau .

$\mu_0 = 4. \pi. 10^{-7} \text{ H/m}$  : la perméabilité du vide ;  $\mu_r$  : la perméabilité relative du matériau;  
 $\epsilon_0 = 8,84. 10^{-12} \text{ F/m}$  : la perméabilité du vide ;  $\epsilon_0$  : la permittivité relative du matériau;

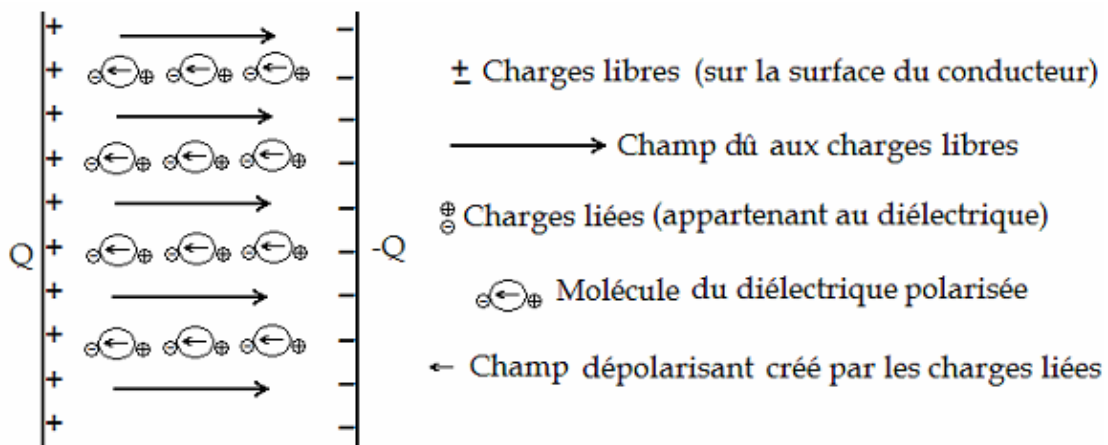
**• Permittivité et champ électrique :**

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  $C = Q/\Delta V$  du condensateur.



**FigureII.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 ( $\vec{j}_d = \partial \vec{D} / \partial t$ ). Au contraire, si les charges sont libres de se déplacer et sont dissociées de la molécule, il s'agit d'un phénomène de conduction (équation II.2). 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 Équations 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 :

	Forme locale	Forme intégrale	
Théorème d'Ampère	$\text{rot } \vec{H} = \vec{j}_c + \frac{\partial D}{\partial t}$	$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{i=1}^n I_i$	(II. 4)

Téorème de conservation du flux	$\text{div } \vec{B} = 0$	$\oiint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$	(II. 5)
---------------------------------	---------------------------	---------------------------------------	---------

Loi de Lenz	$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$e = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$	(II. 6)
-------------	--	---	---------

Avec  $\Phi = \oiint_s \vec{B} \cdot d\vec{s}$ ;  $e$ : fem induite

Téorème de Gauss  $\text{div } \vec{D} = \rho_{libres} \quad \oiint_s \vec{D} \cdot \vec{ds} = Q_{int} \quad (II.7)$

Avec  $Q_{int} = \iiint_{\tau} \rho_{libres} \vec{d\tau} = \text{charge}$

On remarque dans la première équation de Maxwell l'existence de deux 'sortes' de courants : ( $\vec{J}_c = \gamma \vec{E}$ ) et le courant de déplacement ( $\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ ).

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  $\gamma$ .

### II.2.3 Équations 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 .

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  $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$ , et on a donc:  $\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{E}) = 0$ .

Or, on sait que le rotationnel d'un gradient est toujours nul ( $\overrightarrow{\text{rot}}(\overrightarrow{\text{grad}} V) = 0$ ):

on peut alors définir un potentiel  $V$  comme étant un scalaire satisfaisant la relation :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}(V) \quad (\text{II. 8})$$

En utilisant le théorème de Gauss, on obtient :

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

Cette dernière équation représente l'équation de Poisson .

En l'absence de charges, on aura l'équation de Laplace :

$$\Delta V = 0 \quad (\text{II. 9})$$

### **II.3 Cas des isolateurs de Haute Tension [3]:**

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 .

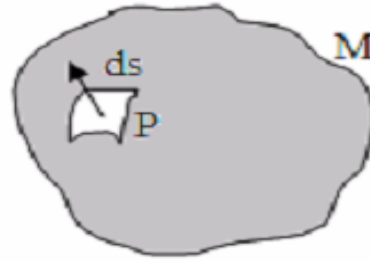
Ce paragraphe aborde les relations fondamentales entre les charges induites sur les conducteurs (électrodes) et la capacité d'un isolant. Dans les systèmes aussi complexes que ceux que l'on rencontre dans les isolateurs HT, ces notions de bases sont généralement appliquées, à partir de logiciels de calcul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

#### **II.3.1 Notions fondamentales :**

##### **II.3.1.1 Relation entre charges et capacités:**

Soit un conducteur à l'équilibre électrostatique (Figure II.2), isolé dans l'espace, chargé avec une distribution surfacique  $\sigma$  et porté au potentiel  $V$ . Celui-ci s'écrit :

$$V(M) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint_{\text{surface}} \frac{\sigma(P)}{PM} dS \quad (\text{II. 10})$$



**Figure II.2 :** Conducteur en équilibre électrostatique

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

$$Q = \iint_{\text{surface}} \sigma \, ds \quad (\text{II.11})$$

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

$$C = \frac{Q}{V} \quad (\text{II.12})$$

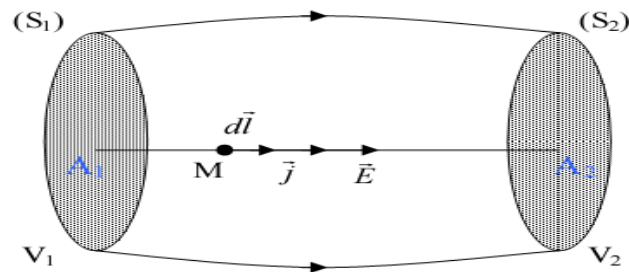
où  $Q$  est la charge électrique totale du conducteur porté au potentiel  $V$ .

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.3.1.2 Relation entre résistance et capacité pour un même réseau de lignes de champ:**

La figure (II.3) 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.3 :** 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 :

$$\Delta V = \int_{A_2}^{A_1} \vec{E} \cdot \vec{dl} \tag{II.13}$$

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

$$Q = \iint_{S_1} \sigma_1 \, ds \tag{II.14}$$

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

$$Q = \iint_{S_1} \vec{D} \cdot \vec{ds} = \epsilon \iint_{S_1} \vec{E}_1 \cdot \vec{ds} \tag{II.15}$$

En outre, le courant de conduction s'écrit:

$$I = \iint_{S_1} \vec{j}_c \cdot \vec{ds} = \gamma \iint_{S_1} \vec{E}_1 \cdot \vec{ds} \quad (\text{II.16})$$

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

$$R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{\int_{A_1}^{A_2} \vec{E} \cdot d\vec{l}}{\gamma \iint_{S_1} \vec{E}_1 \cdot \vec{ds}} \quad (\text{II.17})$$

et

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{\varepsilon \iint_{S_1} \vec{E}_1 \cdot \vec{ds}}{\int_{A_1}^{A_2} \vec{E} \cdot d\vec{l}} \quad (\text{II.18})$$

On obtient, si on effectue le produit RC :

$$RC = \frac{Q}{I} = \frac{\varepsilon}{\gamma} = \rho\varepsilon \quad (\text{II.19})$$

$\rho = \frac{1}{\gamma}$  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.

#### **II.4- Méthode des transformations conformes :**

Méthode analytique utilisant des passages d'un plan complexe, dans lequel les champs sont réels, à un autre plan complexe représentant les champs simples. Les formules de passage sont généralement difficile à trouver [4].

#### **II.5- Méthode des charges fictives :**

Utilisé pour les installations extérieures car elle nécessite uniquement la connaissance des conditions limites des tensions sur les électrodes.

Son principe est basé sur la simulation de la distribution superficielle des charges électriques sur la surface des électrodes **par une distribution discrète des charges fictives** à l'intérieur des conducteurs. Leurs emplacements et leurs grandeurs doivent satisfaire les conditions limites de la tension connue sur la surface des électrodes. La précision de cette méthodes dépend du nombre de charges fictives introduites pour la résolution du système à étudier [4].

#### **II.6- Méthode des différences finies:**

Méthode numérique basée sur l'approximation de l'opérateur différentiel par un opérateur aux différences finies. Le système d'équations résultant est traité sous forme matricielle [4].

Les principales étapes à suivre pour exécuter cette méthode sont :

- 1-La discrétisation du domaine d'étude pour définir le réseau de nœuds à considérer.
- 2-L'écriture des équations potentielles aux différences finies en chaque nœud.
- 3-La résolution du système d'équations.

On utilisera par la suite l'équation  $\vec{E} = -\overrightarrow{grad}(V)$  pour le calcul de l'intensité du champ électrique dans chaque point du domaine, on notera aussi que la précision de cette méthode dépend de l'ordre atteint dans le développement en série de Taylor utilisé pour l'approximation des dérivée partielles par des différences finie et aussi du pas de discrétisation.

#### **II.7- Méthode des éléments frontières :**

C'est une méthode basée sur la discrétisation de la frontière uniquement plutôt que le domaine tout entier d'où la convergence rapide de la solution .La formulation de cette méthode se repose sur la méthode générale des résidus pondérés [4]. Pour une résolution numérique de la méthode des intégrales frontières il faut suivre les étapes suivantes :

- \_ Discrétisation de la frontière.
- \_ Calcul des coefficients d'influences et formation du système matriciel.
- \_ Résolution de équations.

## II.8- Méthode des éléments finis :

Parente proche de la différence finie, cette méthode consiste à "minimiser l'énergie" dans la région d'intérêt. Celle-ci est découpée en petits éléments (triangles, rectangles, ...) dans chacun duquel on admet une variation linéaire du potentiel, ce qui permet une résolution matricielle simple. Pour une bonne précision, il est cependant nécessaire de diviser une région comportant de grandes variations de potentiel en de plus nombreux éléments, il existe différentes approches à l'approximation par éléments finis, mais la plus utilisée est **la méthode variationnelle** car elle est simple à formuler.

### II.8.1- Principe de la méthode variationnelle:

C'est une méthode qui consiste à **approcher** la solution exacte  $V_e$  par une fonction  $V$  de  $n$  paramètre (**a, b, c...**), ces derniers doivent être déterminé de manière à **minimiser la fonctionnelle d'énergie  $I(V)$** , et par la même résoudre l'équation aux dérivées partielles.

$$I(V) = \iint_D \varepsilon \left[ \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy - \int_{C_2} 2.V.h.dl \quad (II.20)$$

$V$  : fonction potentielle

$\varepsilon$ : permittivité du milieu

$h$  : valeur du champ de la portion de frontière  $C_2$

### II.8.2- Maillage:

La première étape d'une résolution en éléments finis (e) consiste à discrétiser le domaine d'étude (D) concerné à l'aide de triangles, de quadrangles, de tétraèdres et autres de telle façon à former un **maillage**. L'ensemble de tous les éléments doit constituer un domaine aussi proche que possible que le domaine d'étude (D).

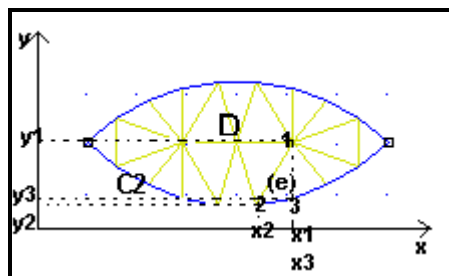


Figure II.4 : Discrétisation du domaine D

La présentation du maillage doit contenir pour chaque élément les informations suivantes :

- La nature physique du sous domaine que l'élément renferme.
- Le numéro de l'élément.
- Les numéros des nœuds.
- Les coordonnées de sommets formant un élément (des noeuds).
- Les potentiels aux nœuds tout en tenant compte des **conditions aux limites et de valeurs imposées**.

### II.8.3- Choix des fonctions d'approximation :

Considérons un élément fini triangulaire (e) dont les trois sommets sont indiqués par les chiffres 1, 2, 3. Le potentiel approximé supposé varié linéairement suivant l'équation :

$$V^{(e)}(x, y) = a^{(e)} + b^{(e)} x + c^{(e)} y \quad (\text{II.21})$$

Où les coefficients  $a^{(e)}$ ,  $b^{(e)}$ ,  $c^{(e)}$  peuvent être calculés en fonction des valeurs du potentiel aux sommets 1, 2, 3, soit  $V_1, V_2, V_3$  :

$$\begin{aligned} V_1 &= a^{(e)} + b^{(e)} x_1 + c^{(e)} y_1 \\ V_2 &= a^{(e)} + b^{(e)} x_2 + c^{(e)} y_2 \\ V_3 &= a^{(e)} + b^{(e)} x_3 + c^{(e)} y_3 \end{aligned} \quad (\text{II.22})$$

Le système d'équations (2.22) est un système à trois équations et trois inconnus, sa résolution donne les solutions suivantes :

$$\begin{aligned} a^{(e)} &= [(x_2 y_3 - x_3 y_2) V_1 + (x_1 y_3 - x_3 y_1) V_2 + (x_1 y_2 - x_2 y_1) V_3] / \det. \\ b^{(e)} &= [(y_2 - y_3) V_1 + (y_3 - y_1) V_2 + (y_1 - y_2) V_3] / \det. \\ c^{(e)} &= [(x_3 - x_2) V_1 + (x_1 - x_3) V_2 + (x_2 - x_1) V_3] / \det. \end{aligned} \quad (\text{II.24})$$

Avec det est le déterminant du système (2.22) :

$$\det = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = (x_2 y_3 - x_3 y_2) - (x_1 y_3 - x_3 y_1) + (x_1 y_2 - x_2 y_1)$$

On remplace les coefficients  $a^{(e)}$ ,  $b^{(e)}$ ,  $c^{(e)}$  dans la relation (2.21) et en mettant chacun des potentiels  $V_1, V_2, V_3$  en facteur, on obtient :

$$V^{(e)}(x, y) = \phi_1^{(e)}(x, y) \cdot V_1 + \phi_2^{(e)}(x, y) \cdot V_2 + \phi_3^{(e)}(x, y) \cdot V_3 \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$$\begin{aligned} \phi_1^{(e)}(x, y) &= [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3) \cdot x + (x_3 - x_2) \cdot y] / \det \\ \phi_2^{(e)}(x, y) &= [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1) \cdot x + (x_1 - x_3) \cdot y] / \det \\ \phi_3^{(e)}(x, y) &= [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2) \cdot x + (x_2 - x_1) \cdot y] / \det \end{aligned} \quad (\text{II.26})$$

On note :

$$V^{(e)}(x,y)=[\phi]^T \cdot [V]$$

$$\text{Avec } [V] = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix}$$

De la sorte, l'approximation sur tout le domaine (D) sera la somme des approximations élémentaires  $V^{(e)}$  :

$$V(x, y) = \sum_{e=1}^e V^{(e)}(x, y) \quad (\text{II.27})$$

### II.8.3.a- Critère de Rayleigh-Ritz :

Remplaçons V dans la fonctionnelle d'énergie par la fonction (II.27), on aura

$$I(V) = I(V_1 \dots V_n) =$$

$$\iint_D \epsilon \left[ (\partial/\partial x \cdot \sum_{e=1}^e V^{(e)}(x, y))^2 + (\partial/\partial y \cdot \sum_{e=1}^e V^{(e)}(x, y))^2 \right] dx dy - \int_{\hat{C}_2} 2 \cdot \sum_{e=1}^e V^{(e)}(x, y) h dl$$

Comme chaque fonction  $V^{(e)}$  est nulle en dehors de l'élément ou elle est définie

$$I(V_1 \dots V_n) = \sum_{e=1}^e \left\{ \iint_D \epsilon \left[ (\partial/\partial x \cdot V^{(e)}(x, y))^2 + (\partial/\partial y \cdot V^{(e)}(x, y))^2 \right] dx dy - \int_{\hat{C}_2} 2 \cdot V^{(e)}(x, y) \cdot h dl \right\}$$

Soit :

$$I(V_1 \dots V_n) = \sum_{e=1}^e I^{(e)} \quad (\text{II.28})$$

Avec:

$$I^{(e)} = \iint_D \epsilon \left[ (\partial/\partial x V^{(e)}(x, y))^2 + (\partial/\partial y V^{(e)}(x, y))^2 \right] dx dy - \int_{\hat{C}_2} 2 \cdot V^{(e)}(x, y) \cdot h dl \quad (\text{II.29})$$

Le critère de Rayleigh-Ritz stipule que la fonctionnelle  $I(V_1 \dots V_n)$  est **minimum** si :

$$\partial I / \partial V_i = 0 \quad \text{pour tout } i=1, \dots, n$$

Soit en vertu de (2.28) :

$$\partial I / \partial V_i = \partial / \partial V_i \left( \sum_{e=1}^e I^{(e)} \right) = \sum_{e=1}^e \partial I^{(e)} / \partial V_i = 0 \quad (\text{II.30})$$

Ce résultat montre que l'énergie est minimum dans le domaine (D), si elle l'est dans chaque élément (e).

### II.8.3.b- Construction des matrices élémentaires :

Comme les éléments sont disjoint et en vertu de (II.30),  $I^{(e)}$  sera minimum si :

$$\partial I^{(e)} / \partial V_i = 0 \quad \text{avec } i=1, 2, 3$$

Soit :

$$\begin{aligned} \partial I^{(e)} / \partial V_i &= \partial / \partial V_i \cdot \left\{ \iint_D \varepsilon [(\partial V^{(e)} / \partial x)^2 + (\partial V^{(e)} / \partial y)^2] dx dy - \int_{C_2} 2 \cdot V^{(e)} \cdot h dl \right\} \\ &= \iint_D \varepsilon [\partial / \partial V_i (\partial V^{(e)} / \partial x)^2 + \partial / \partial V_i (\partial V^{(e)} / \partial y)^2] dx dy - \int_{C_2} 2 \cdot (\partial V^{(e)} / \partial V_i) \cdot h dl \end{aligned}$$

On a :

$$\partial / \partial V_i (\partial V^{(e)} / \partial x)^2 = 2 \cdot \partial V^{(e)} / \partial x \cdot \partial / \partial V_i (\partial V^{(e)} / \partial x) = 2 \cdot \partial V^{(e)} / \partial x \cdot \partial / \partial x (\partial V^{(e)} / \partial V_i)$$

D'après (II.25), on a :

$$V^{(e)}(x,y) = \phi_1^{(e)}(x,y) \cdot V_1 + \phi_2^{(e)}(x,y) \cdot V_2 + \phi_3^{(e)}(x,y) \cdot V_3 = (\phi_1^{(e)} \quad \phi_2^{(e)} \quad \phi_3^{(e)}) \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix}$$

$$(\partial V^{(e)} / \partial V_i) = \phi_i^{(e)} \quad \text{et} \quad \partial V^{(e)} / \partial x = (\partial \phi_1^{(e)} / \partial x \quad \partial \phi_2^{(e)} / \partial x \quad \partial \phi_3^{(e)} / \partial x) \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix}$$

$$\partial / \partial V_i (\partial V^{(e)} / \partial x)^2 = 2 \cdot (\partial \phi_i^{(e)} / \partial x) \cdot (\partial \phi_1^{(e)} / \partial x \quad \partial \phi_2^{(e)} / \partial x \quad \partial \phi_3^{(e)} / \partial x) \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix}$$

De même :

$$\partial / \partial V_i (\partial V^{(e)} / \partial y)^2 = 2 \cdot (\partial \phi_i^{(e)} / \partial y) \cdot (\partial \phi_1^{(e)} / \partial y \quad \partial \phi_2^{(e)} / \partial y \quad \partial \phi_3^{(e)} / \partial y) \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix}$$

Il vient :

$$\frac{\partial \Gamma^{(e)}}{\partial V_i} = 2 \sum_{j=1}^e A_{jj}^{(e)} \cdot V_j - 2 \cdot b_i^{(e)} \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$$A_{ij}^{(e)} = \iint_D \varepsilon \left( \frac{\partial \phi_i^{(e)}}{\partial x} \cdot \frac{\partial \phi_j^{(e)}}{\partial x} + \frac{\partial \phi_i^{(e)}}{\partial y} \cdot \frac{\partial \phi_j^{(e)}}{\partial y} \right) dx dy$$

$$b_i^{(e)} = \int_{C_2} h \cdot \phi_i^{(e)} dl$$

Pour les trois nœuds 1, 2,3 de l'élément, (II.31) peut s'écrire :

$$(A^{(e)}) \cdot (V^{(e)}) = (b^{(e)}) \quad (\text{II.32})$$

Ou :

$(A^{(e)})$  : **la matrice élémentaire** (matrice (3,3))

$$V^{(e)} : \text{vecteur colonne } \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix}, \quad b^{(e)} : \text{vecteur colonne } \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} : (\text{vecteurs élémentaires})$$

Le système (II.32) est l'écriture matricielle de la minimisation de la fonctionnelle sur un élément (e).

### II.8.4- Assemblage des matrices élémentaires :

Notre but est d'obtenir un système matriciel dont le vecteur solution V minimise l'énergie dans tout le domaine (D) ce qui nous conduit à assembler les matrices élémentaires.

#### II.8.4.a-Extension des matrices élémentaires :

Le système (2.32) s'écrit :

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} \end{matrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}$$

Pour faire intervenir le vecteur global  $V = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix}$ , il suffit d'étendre la matrice élémentaire  $A^{(e)}$

et le vecteur  $b^{(e)}$  à l'ordre n, en annulant les autres termes dont le rang est différent de 1,2,3

$$\begin{matrix} & 1 & 2 & 3 & \dots & n \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ n \end{matrix} & \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & 0 & \dots & \dots \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & 0 & \dots & \dots \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & 0 & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix} & = & \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (\text{II.33})$$

**II.8.4.b- Assemblage :**

D'après (II.30), (II.31), (II.32) le système global s'écrit :

$$(A).(V)=(b) \quad (\text{II.34})$$

Avec :

$$(A)=\sum_{e=1}^E(A^{(e)}), \quad (V)=(V_1,V_2,\dots,V_n)^t, \quad (b)=\sum_{e=1}^E(b^{(e)})$$

**II.8.5- Réduction du système matriciel:**

En vertu des conditions limites, le vecteur global (V) contient des composants connus ; il s'agira de partitionner le système de manière à le résoudre par rapport aux composantes inconnues restantes.

Le vecteur (V) peut être écrit :

$$(V) \begin{pmatrix} (V)_1 \\ (V)_2 \end{pmatrix} \quad \text{où :}$$

(V)<sub>1</sub> :Le vecteur à p lignes de potentiels connus.

(V)<sub>2</sub> :Le vecteur à (n-p) lignes de potentiels à **déterminer** .

Après permutation de quelques lignes et colonnes, le système (II.34) s'écrit :

(A) et une matrice symétrique

$$\begin{pmatrix} (A)_{11} & (A)_{12} \\ (A)_{12}^t & (A)_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (V)_1 \\ (V)_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (b)_1 \\ (b)_2 \end{pmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

(A)<sub>11</sub> :matrice (p,p)

(A)<sub>12</sub> :matrice (n-p,p)

(A)<sub>22</sub> :matrice (n-p,n-p)

En développant le système (II.35), on aura

$$\begin{cases} (A)_{11} \cdot (V)_1 + (A)_{12} \cdot (V)_2 = (b)_1 \\ (A)_{12}^t \cdot (V)_1 + (A)_{22} \cdot (V)_2 = (b)_2 \end{cases}$$

Etant  $(V)_2$  est le vecteur à déterminer, on peut réduire le système à :

$$(A)_{22} \cdot (V)_2 = (b)_2 - (A)_{12}^t \cdot (V)_1$$

### **II.9- Calcul du champ électrique :**

On peut calculer le champ E dans un élément (e) à partir du potentiel V qui à présent connu en tout point du domaine (D) :  $E^2 = E_x^2 + E_y^2$

$$E_x = -\partial V(x,y)/\partial x \quad \text{et} \quad E_y = -\partial V(x,y)/\partial y$$

A partir des équations (II.25), (II.26) ;

$$\partial V(x,y)/\partial x = \sum_{i=1}^E \partial \phi_i^{(e)} / \partial x \cdot V_i$$

$$\partial V(x,y)/\partial y = \sum_{i=1}^E \partial \phi_i^{(e)} / \partial y \cdot V_i$$

Le champ électrique E dans un élément (e) s'écrit :

$$E^2 = (\sum_{i=1}^E \partial \phi_i^{(e)} / \partial x \cdot V_i)^2 + (\sum_{i=1}^E \partial \phi_i^{(e)} / \partial y \cdot V_i)^2$$

### **II.10- conclusion :**

Les méthodes analytiques et numériques de calcul du champ électrostatique résolvent le même problème, en se basant sur de considérations différentes.

La diversité de ces méthodes nous amène à choisir celle qui répond de manière optimale aux exigences de son problème, les critères de choix sont essentiellement :

- La rapidité du calcul.
- La meilleure précision.
- Une moindre occupation d'espace.

**III.1 Introduction:**

Afin de calculer le champ électrique, nous avons utilisé le logiciel FEMM (Finite Element Magnetism Method). Ce dernier est une suite des programmes permettant de donner la répartition du champ électrique en deux dimensions.

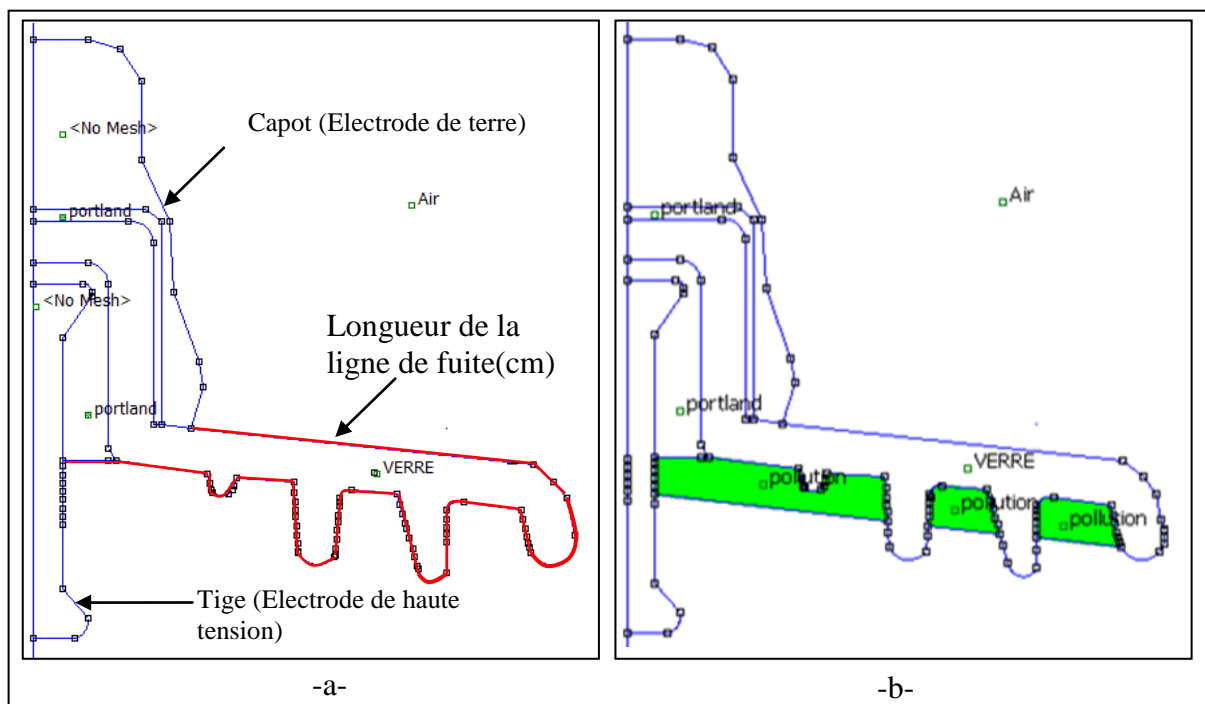
Pour cela, nous avons introduit, dans ce logiciel, notre modèle avec toutes ses spécifications (formes et nature des électrodes, nature et dimensions de la pollution, permittivité des différents milieux, tension appliquée, conditions aux limites, ...).

**III.2 Simulation du modèle réel:**

La simulation de notre modèle réel a été faite à l'aide d'un logiciel à deux dimensions "FEMM 4.2" utilisant la méthode des éléments finis.

La configuration simple de notre modèle nous a permis une représentation relativement aisée (FigureIII.1)

On injecte dans le logiciel les mêmes paramètres géométriques considérés lors des expérimentations, ainsi que les valeurs des permittivités du verre et des agents pollués.



**FigureIII.1** Représentation du modèle réel sur le logiciel FEMM.

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V$$

C'est l'équation que FEMM résout pour le voltage  $V$  sur domaine programmé par l'utilisateur et on définissons aussi la source et les conditions aux limites.

Pour cela, nous avons introduit, dans ce logiciel, notre modèle réel avec toutes ses spécifications (formes des électrodes, nature et dimensions de la pollution, permittivité des différents milieux, conditions aux limites, ...). Ainsi, nous avons fixé la tension appliquée à l'électrode active de 30kV pour les deux cas (modèle propre et modèle polluée).

### III.4 Interprétation des résultats:

#### III.4.1 Répartition du champ électrique sur la plaque:

Dans le cas de la plaque propre (figure III.2), le champ électrique est intense près de l'électrode active. Il diminue au fur et à mesure qu'on se dirige vers l'électrode de terre sur le long de la ligne de fuite. Par ailleurs, les lignes du champ sont divergentes (sortantes de l'électrode de haute tension).

Les figures (III.3-8) nous montrent l'influence de la largeur de la pollution (N1, N4 et N8), pour une permittivité donnée ( $\epsilon = 9$ ), Il ressort de ces caractéristiques les remarques suivantes :

- Le champ électrique est intense à l'extrémité de l'électrode de haute tension.
- Le champ électrique est pratiquement nul à l'intérieur des deux électrodes, car les deux électrodes sont des conducteur.
- Le champ électrique est important dans la zone près de l'électrode active.
- Le champ électrique est nul dans les zones propres.
- La première zone de pollution serré a augmenté l'électrode de haute tension par contre elle diminue la ligne de fuite.
- Les lignes du champ électrique étant perpendiculaires aux surfaces équipotentielles, partent de l'électrode sous tension et arrivent au niveau de l'électrode terre. Les vecteurs représentés sur les figures (III.2-8) sont tangentiels aux lignes de champ électrique, nous remarquons que le champ électrique est plus important du coté intérieur des électrodes.

Les vecteurs représentés sur les figures (III.2-8) sont tangentiels aux lignes de champ électrique, nous remarquons que le champ électrique est plus important du côté intérieur des électrodes.

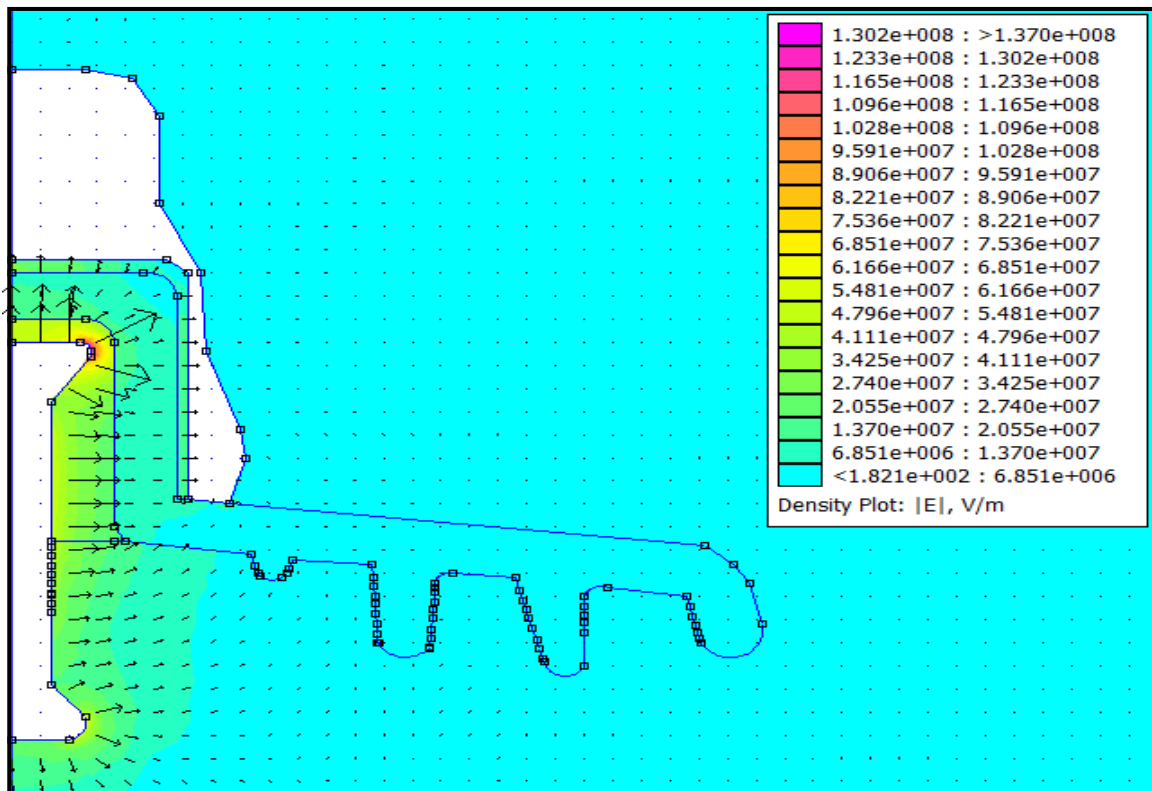


Figure III.2 Répartition du champ électrique dans le cas propre.

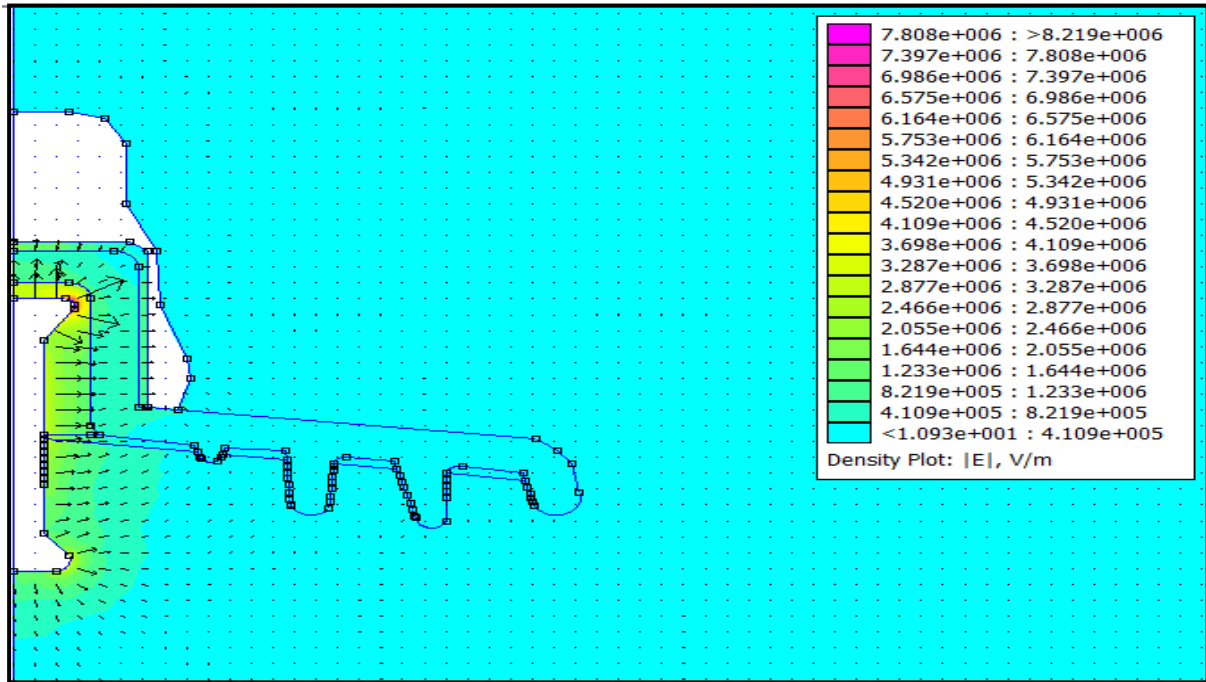


Figure III.3 Réparation du champ électrique dans le cas pollué.  
 $N1=Cste$ ,  $\mathcal{E} =9$ .

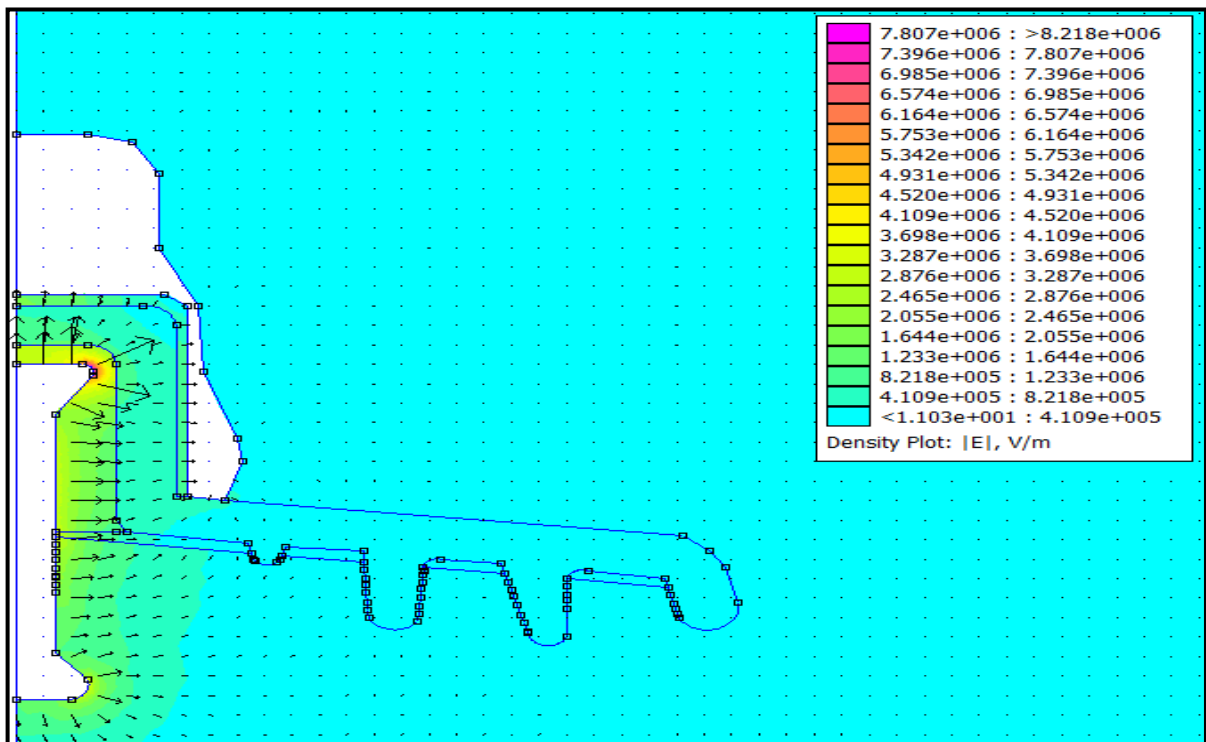


Figure III.4 Réparation du champ électrique dans le cas pollué.  
 $N1=Cste$ ,  $\mathcal{E} =12$ .

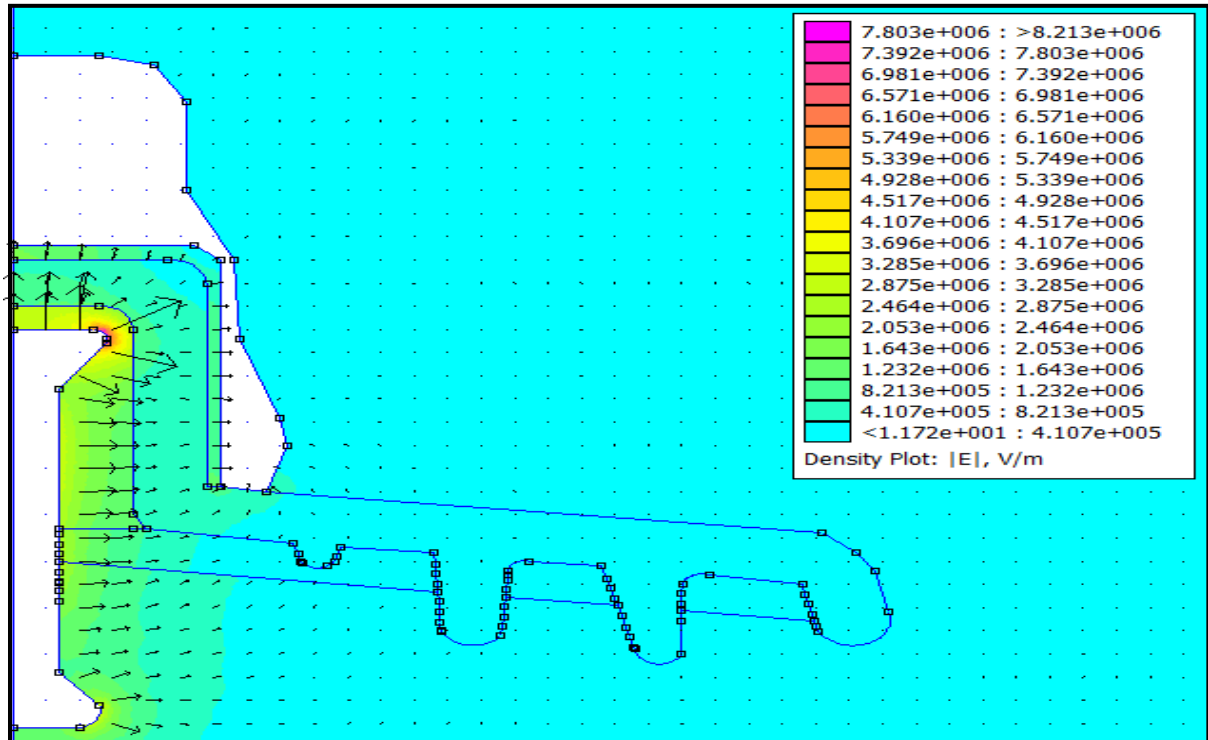


Figure III.5 Réparation du champ électrique dans le cas pollué.  
 $N_4=Cste$ ,  $\epsilon = 9$ .

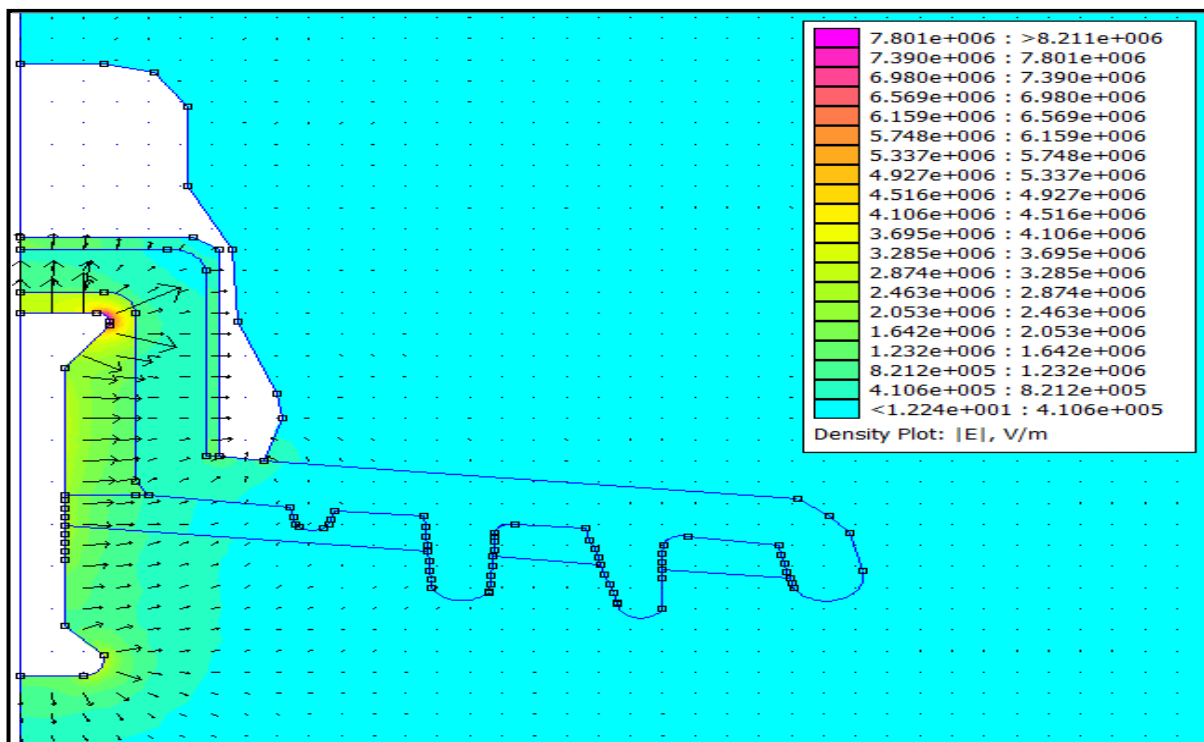


Figure III.6 Réparation du champ électrique dans le cas pollué.  
 $N_4=Cste$ ,  $\epsilon = 12$ .

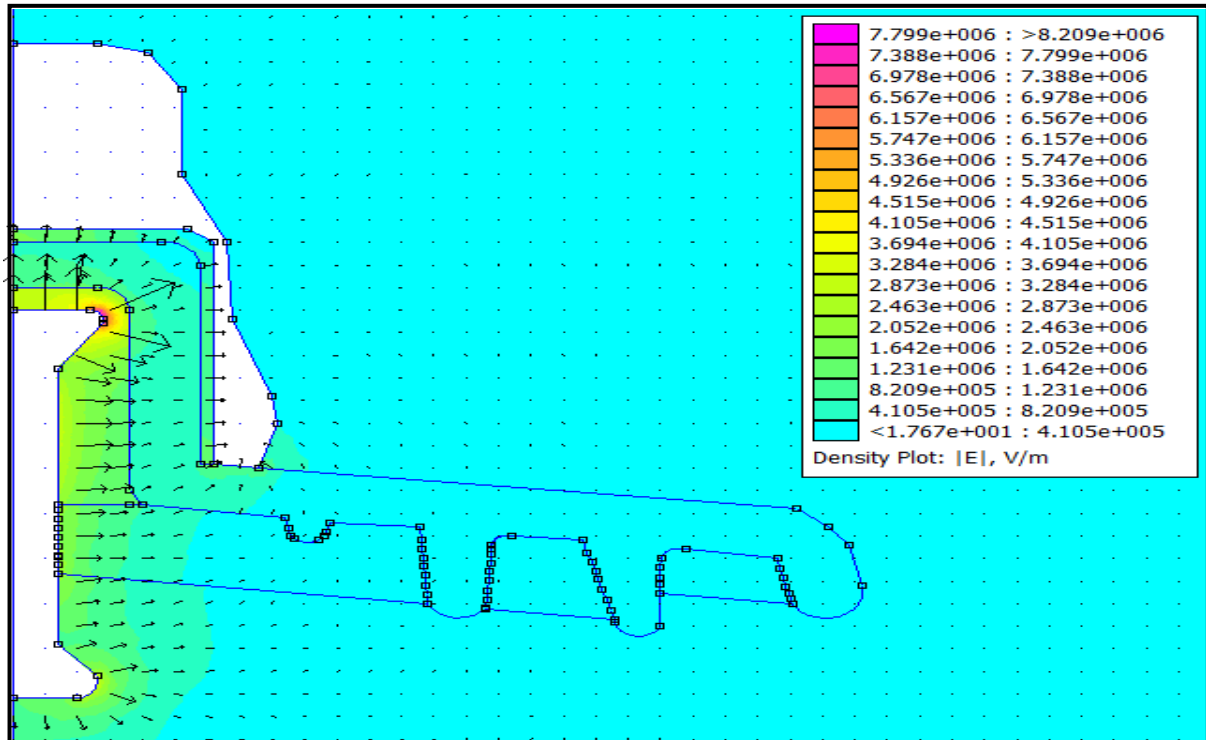


Figure III.7 Réparation du champ électrique dans le cas pollué.  
 $N8=Cste, \epsilon =9.$

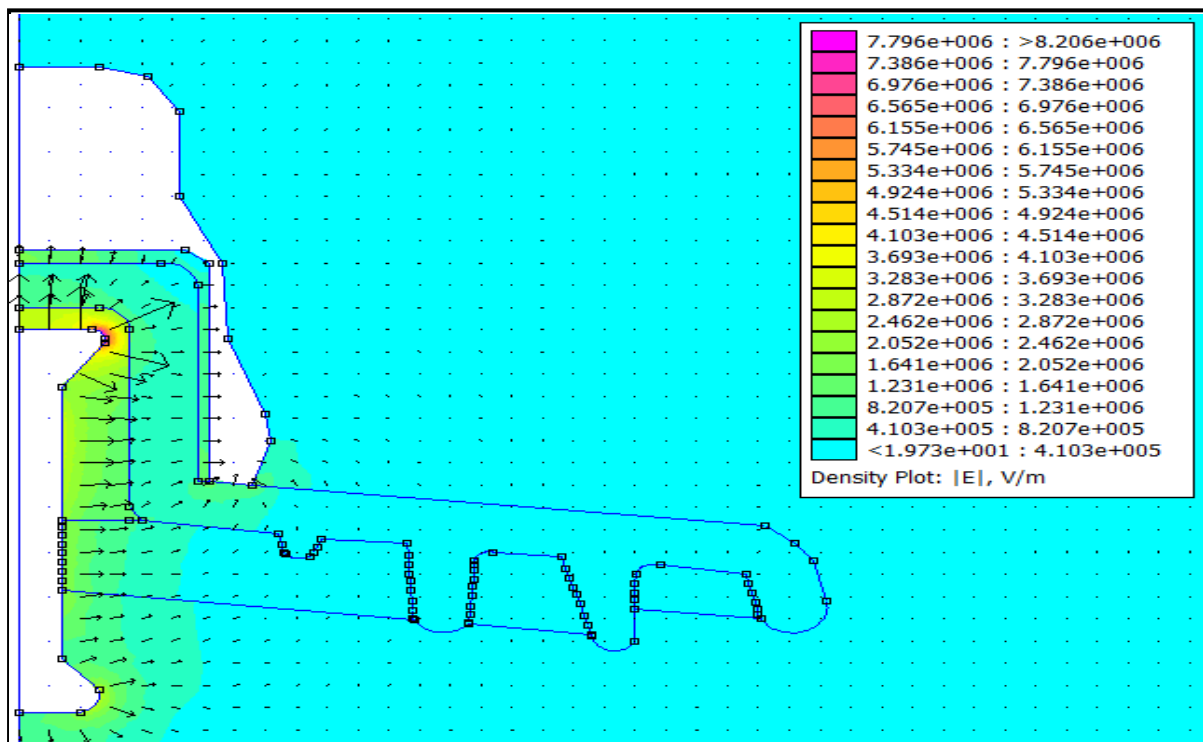


Figure III.8 Réparation du champ électrique dans le cas pollué.  
 $N8=Cste, \epsilon =12.$

**III.4.2. La variation du champ électrique le long de la ligne de fuite:**

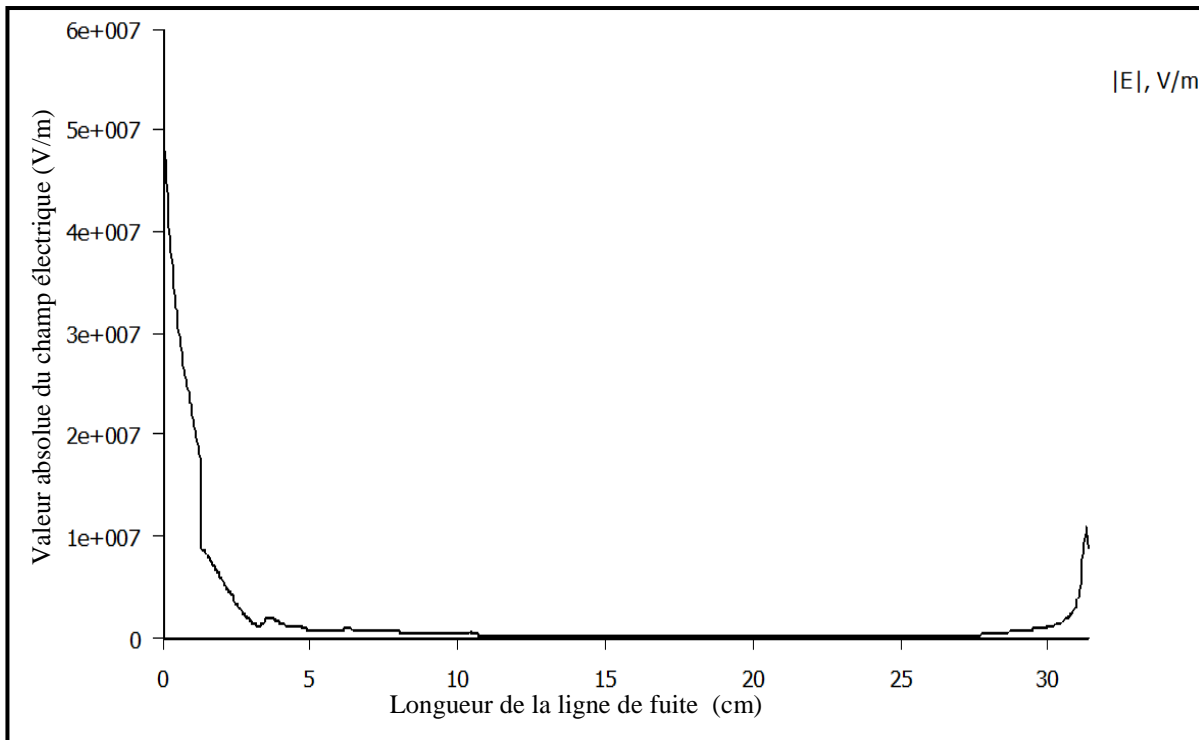
Nous nous sommes, principalement, intéressés à l'étude de la variation du champ électrique le long de la ligne de fuite, (ligne rouge sur la Figure III.1). Ce choix est justifié par le fait que c'est la ligne de fuite d'un isolateur réel, où le champ est intense.

Les figures (III.9-15) présentent la variation du champ électrique le long de la ligne de fuite, et dans le cas d'une modèle propre (Figure III.9), le champ électrique atteint sa valeur maximale à 3 cm, et diminue lentement pour les distances inférieurs à 3cm de l'électrode active, jusqu'à l'annulation pour les distances supérieures à 11cm (de l'électrode de active), puis une légère augmentation avant au premier contact avec l'électrode de masse, où le champ s'annule. avant, qui signifie que l'opposition des deux électrodes(HT et masse) provoque une légère augmentation du champ, En effet, le système est plus rigide dans le cas propre.

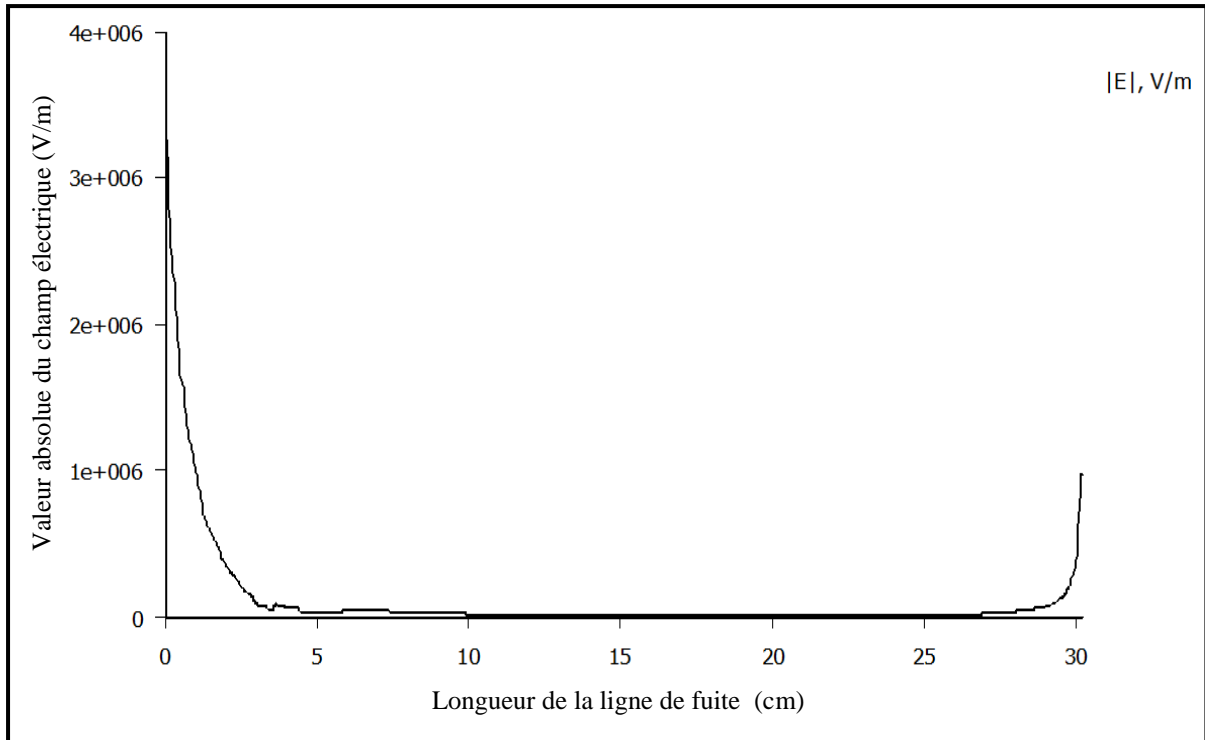
Dans le cas pollué (Figure III.9-15), pour différent niveaux de pollution, le champ électrique est quasiment faible dans des zones de pollution, l'augmentation des niveaux de pollution engendre une diminution du champ électrique, nous envoyons bien que le champ électrique est maximal dans le cas propre, et diminue avec l'augmentation de niveaux de pollution, Dû à la faible dimension longitudinale, ce qui est bien le cas en pratique puisque des arcs électriques ont été observés, pour confirmer davantage ce résultat, ceci confirmer encore une fois que la probabilité de contournement est le plus grand où le niveau de pollution est élevés.

Nous constatons que la largeur de la couche polluante (niveau de pollution), pour une permittivité donné contribue considérablement à l'élévation de la tension 'reportée' sur les zones propres.

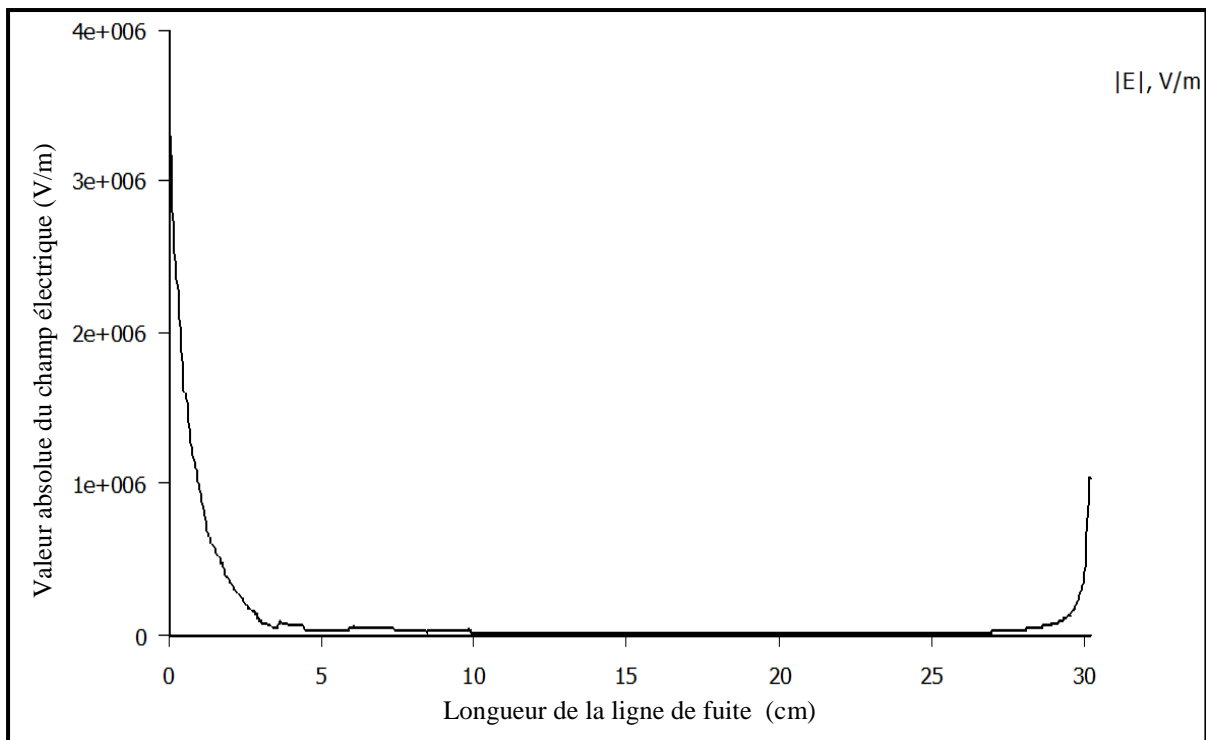
Le champ électrique est un peu intense le long de la première zone propre, et est plus intense dans la zone qui est proche de l'électrode de terre atteint a sa valeur maximal.



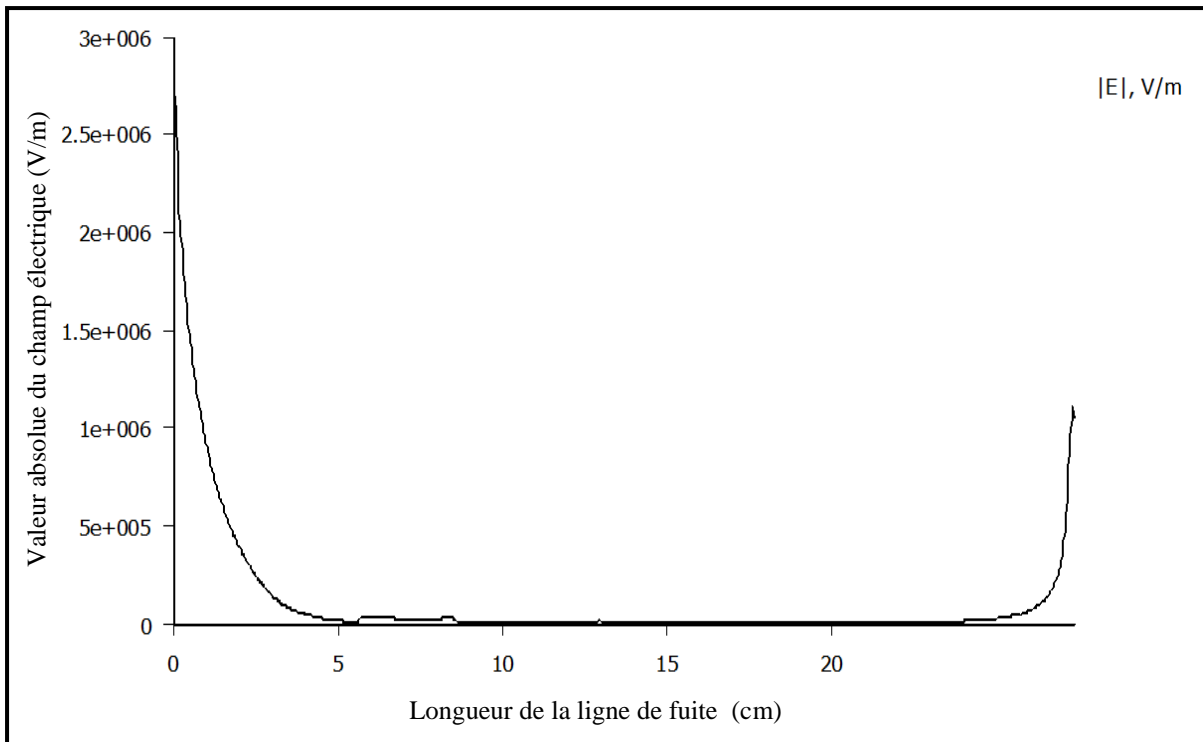
**Figure III.9** Variation du champ électrique le long de la ligne de fuite, dans le cas d'une modèle propre.



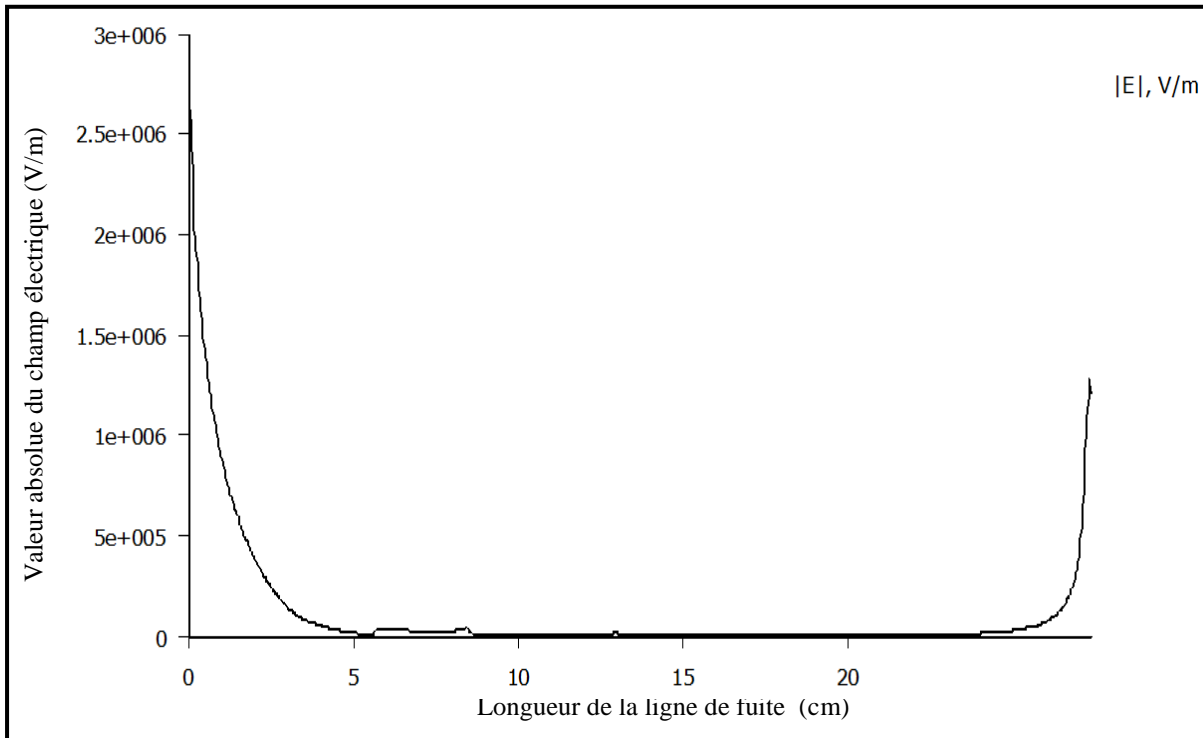
**Figure III.10** Variation du champ électrique le long de la ligne de fuite, dans le cas pollué,  
 $N1=Cste$ ,  $\mathcal{E} = 9$ .



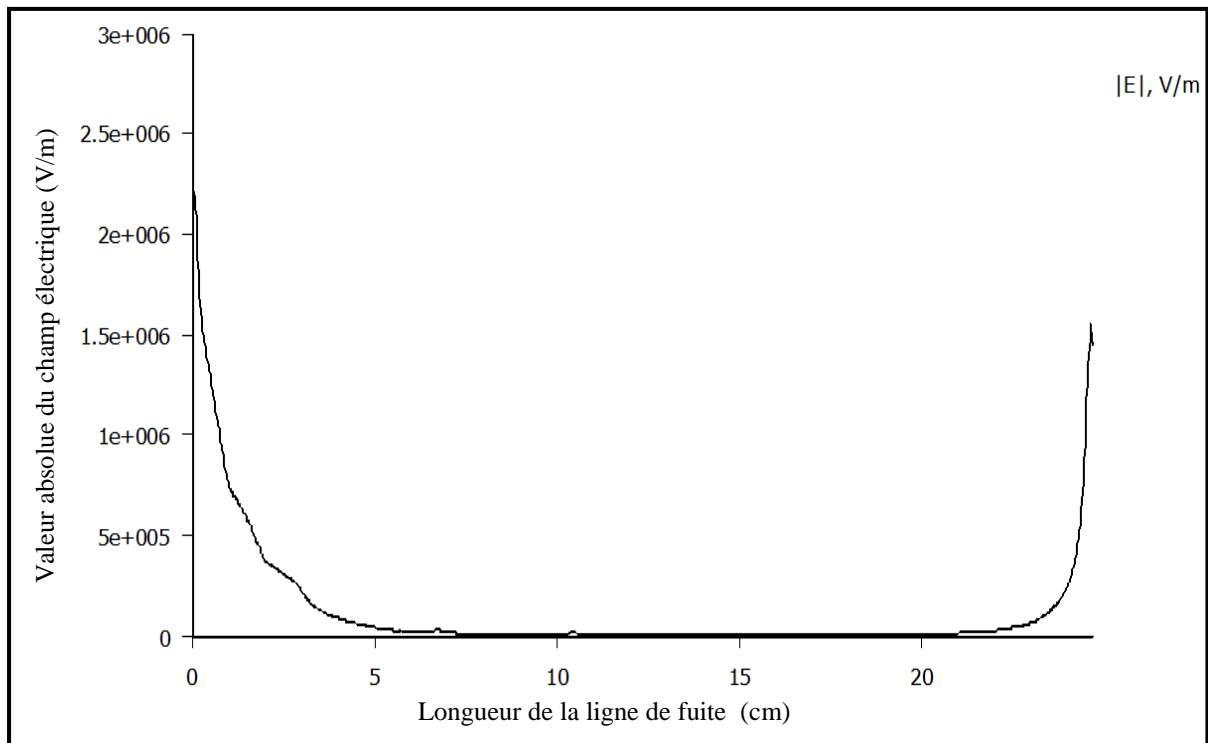
**Figure III.11** Variation du champ électrique le long de la ligne de fuite, dans le cas pollué,  
 $N1=Cste$ ,  $\mathcal{E} = 12$ .



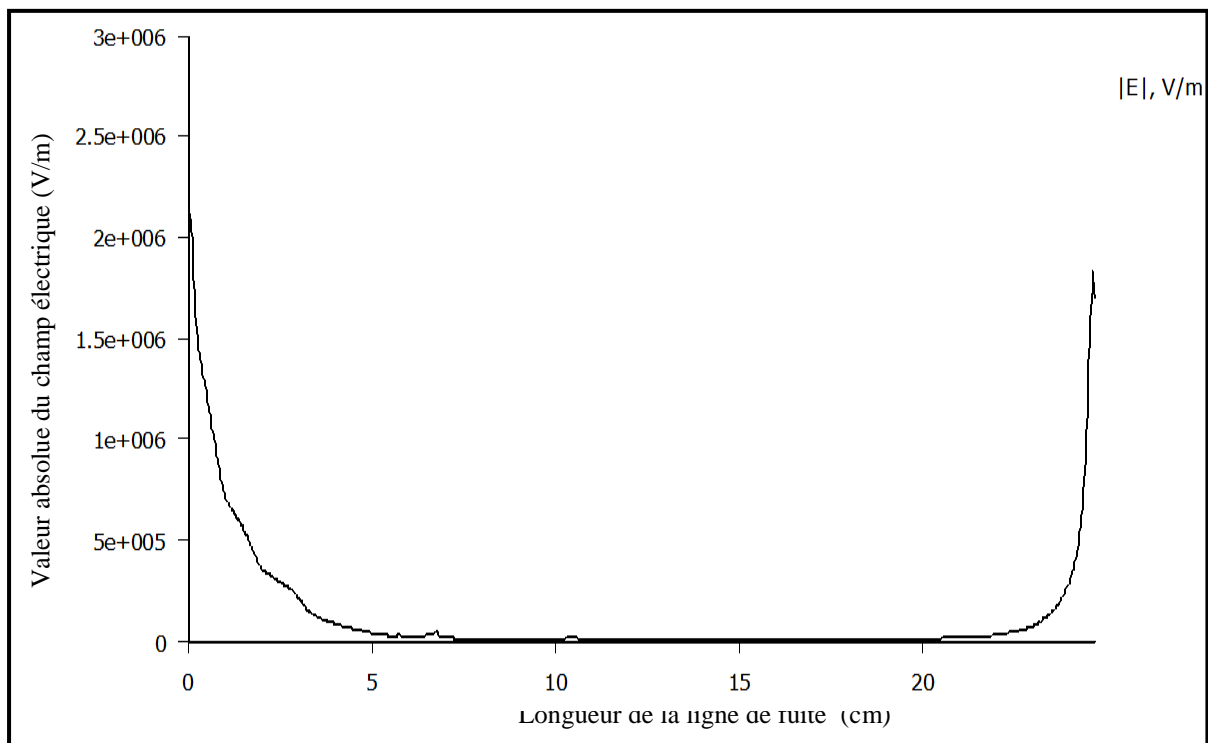
**Figure III.12** Variation du champ électrique le long de la ligne de fuite, dans le cas pollué,  
 $N4=Cste$ ,  $\epsilon = 9$ .



**Figure III.13** Variation du champ électrique le long de la ligne de fuite, dans le cas pollué,  
 $N4=Cste$ ,  $\epsilon = 12$ .



**Figure III.14** Variation du champ électrique le long de la ligne de fuite, dans le cas pollué,  $N8=Cste$ ,  $\epsilon =9$ .

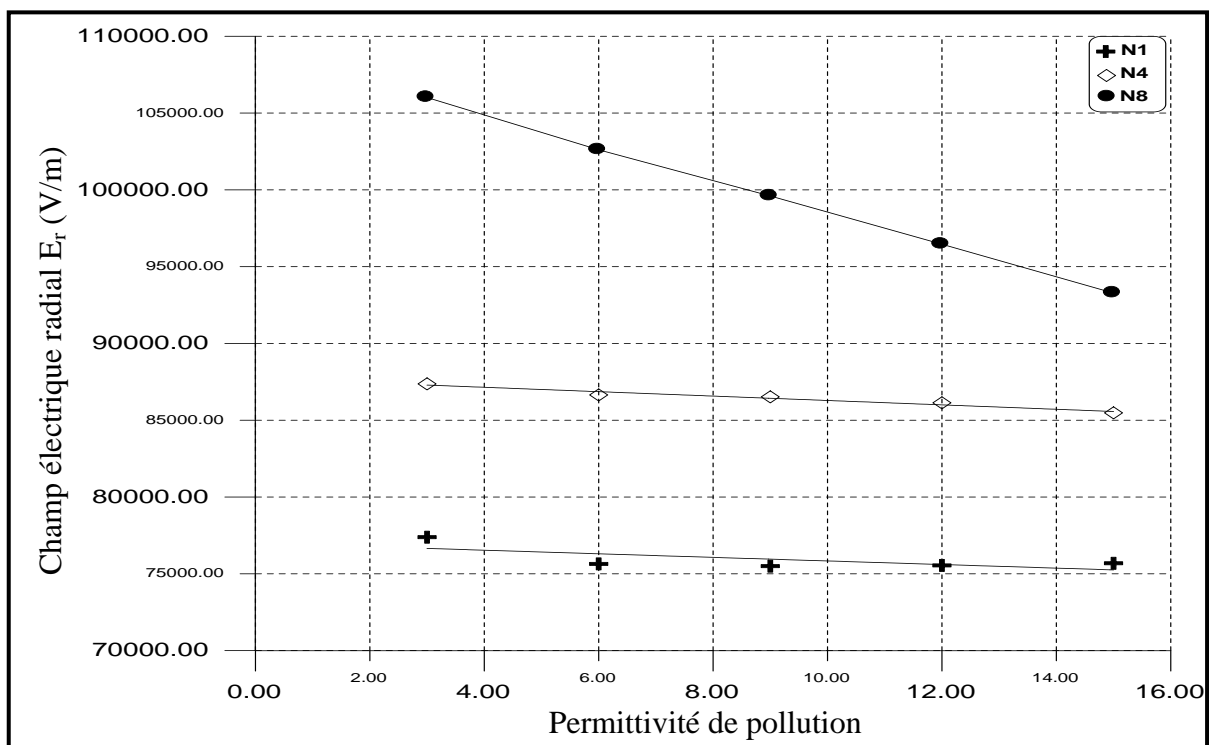


**Figure III.15** Variation du champ électrique le long de la ligne de fuite, dans le cas pollué,  $N8=Cste$ ,  $\epsilon =12$ .

### III.4.3 L'influence de la permittivité sur le champ électrique dans la pollution

Des études antérieures à confirmer que la variation de la permittivité des différentes sources de pollution (sable, ciment, etc.) faire varie en fonction de humidification de ces derniers, cette variation de permittivité est entre 3 et 15 pour cela on a pris 5 valeurs de permittivité comme suit : 3, 6, 9,12 et 15.

D'après la figure III.16, on illustre que avec l'augmentation de la permittivité, la valeur absolue du champ électrique radiale diminue linéairement avec la permittivité qui signifie que la conduction du courant de fuite ce dirige vers la surface des agents pollués, en conséquence ce le contournement d'isolateur se fait superficiel.



**Figure III.16** Variation de la composante radiale  $E_r$  du champ électrique dans la pollution en fonction de la permittivité.

### **III.5 Conclusion**

Les conclusions que nous avons retenues lors de cette application du logiciel FEMM sont :

- Ainsi que, pour le cas d'une modèle propre, le champ électrique atteint sa valeur maximale à 3cm, et diminue lentement pour les distances inférieurs à 3 cm de l'électrode active, où il s'annule.
- Par ailleurs, le champ augmente puis diminue on voisine de la masse en allons au premier contact vers l'électrode de masse où il s'annule.
- Les caractéristiques du champ électrique le long de la ligne de fuite, obtenus pour des différent largeur de pollution(N1, N4 et N8) , le champ électrique est maximal dans le cas propre, et diminue avec l'augmentation de niveaux de pollution.
- Le champ électrique est quasiment faible dans des zones de pollution.

## **Conclusion générale:**

Dans le but d'atteindre une meilleure isolation, les principales études ont pour objet l'explication du phénomène physique de la décharge électrique. Ces investigations ont conduit à élaborer une méthode de détermination de la distribution du champ électrique à l'isolateur.

Notre travail est orienté vers la détermination de la distribution du champ électrique sur le modèle avec toutes ses spécifications.

La modèle que nous avons représentée, est incorporée dans un système d'électrodes capot et tige, les divers essais effectués ont permis de donner la distribution du champ électrique en fonction de plusieurs paramètres:

- Intervalle d'air entre la tige HT et le capot.
- Niveaux de pollution.
- L'influence de la permittivité.

Les résultats obtenus au laboratoire n'ont pas illustré l'influence de tous les paramètres de la configuration, c'est la raison pour laquelle nous avons fait appel à des méthodes numériques. Ainsi la méthode des éléments finis est celle exploitée pour la détermination du champ électrique et ceci en utilisant un logiciel de calcul numérique qui est le FEMM.

- [1] Redouane LADJAL et AssiaBOUAROURI:« ComportementetCaractérisation Electriques d'unModèle d'Isolateur sousTensionAlternative». Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Electrotechnique - ENP Alger 2006-.
- [2] Bourim HAMMOUM et Ahmed KERBOUCHE:« Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien» Mémoire du projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique- ENP Alger 2007-.pages[6-17]
- [3] Saliha TOUNSI et Farida CHIKH :« Influence du Sol sur le Comportement d'un Modèle d'Isolateur sous Tension» Mémoire du projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique- ENP Alger 2008-pages[3-12].
- [4] AIT-AMARA Mohamed et BENSARI Sihem:« Mesure de champ électrique en présence d'un paratonnerre dans un intervalle d'air tige - plan » Mémoire du projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique- ENP Alger 2005-pages[41-49].

## ملخص

يعرض هذا العمل دراسة حول توزيع الحقل الكهربائي على عازل التوتر العالي من خلال محاكاة نموذج حقيقي في الحالة المثالية و في حالة التلوث ، كما تطرق إلى طرق حساب الحقل الكهربائي والتي من بينها «طريقة العناصر المنتهية» ، من اجل ذلك أستعمل برنامج ف أم م وأدخل فيه نفس العوامل البعدية المعتبرة بناء على التجربة وكذلك قيم سماحية الزجاج و عوامل التلوث ، بعدها يعرض النتائج المتحصل عليها والتي تبين توزيع الحقل حيث يتضح أين يكون شديد وأين يكون ضعيف ، كما يتبين كذلك مدى تأثير عامل التلوث من خلال المقارنة بين الحالتين.

### **Résumé :**

Ce travail présente une étude de la distribution du champ électrique sur isolateur haute tension à travers de simulation du modèle réel dans le cas propre et dans le cas pollué ainsi expose des méthode de calcul de champ électrique et utilise le logiciel FEMM (Finite Element Magnetism Method), On injecte dans le logiciel les mêmes paramètres géométriques considérés lors des expérimentations, ainsi que les valeurs des permittivités du verre et des agents pollués. ensuite expose les résultats qui démontrent la distribution du champ Où être très clair où et quand à être faible, comme le montre ainsi que l'impact du facteur de la pollution à travers la comparaison entre les deux cas