

# وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

جامعة فرحات عباس - سطيف  
UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF  
UFAS (ALGERIE)

Faculté de technologie  
Département d'Electrotechnique

## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de

*MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE*

Option : Réseaux électriques

Par M. OUCHEN Lyamine.

## THEME

### ***Modélisation Et Simulation Des Isolateurs Par La Méthode Des Eléments Finis***

*Soutenu le 14/12 /2010 devant la Commission d'examen composée de :*

<i>Dr. HACHEMI Mabrouk</i>	<i>M.C.A à l'université Ferhat Abbas de Sétif</i>	<i>Président</i>
<i>Dr. BAYADI Abdelhafid</i>	<i>M.C.A à l'université Ferhat Abbas de Sétif</i>	<i>Encadreur</i>
<i>Dr. BELKHIAT Saad</i>	<i>M.C.A à l'université Ferhat Abbas de Sétif</i>	<i>Examineur</i>
<i>Dr. GHERBI Ahmed</i>	<i>M.C.A à l'université Ferhat Abbas de Sétif</i>	<i>Examineur</i>
<i>Dr. HALIS Abderrahmane</i>	<i>M.C.B à l'université Ferhat Abbas de Sétif</i>	<i>Invité</i>

## *Dédicaces*

---

---

*D'abord je remercie mon Dieu de m'avoir aidé pour terminer ce travail.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes chers parents pour sacrifice pour mes études.*

*A ma chère grande mère.*

*A mon très chère frère « Abdelhalim et Slimane, Moufida et Salim, Fatiha et Salima, Sassi et Abd Rahman »*

*A toute ma famille loin ou près.*

*A mes collègues « Namir et Yacine et Sofiane et Walid, Salim et Laid ».*

*A tous mes enseignants de ma carrière d'étude.*

*« OUCHEN LYAMINE »*

## ***Remerciements***

---

---

*Je remercie en premier lieu Dieu puissant pour m'avoir donné la force, le courage et la volonté d'accomplir ce travail.*

*Je tiens, avant tout, à exprimer ma profonde gratitude à monsieur Dr Abdelhafid BAYADI, qui a assumé la direction de ce travail. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma reconnaissance pour son dévouement, sa patience, sa disponibilité, ses conseils et son aide constant qu'il m'a apporté tout au loin de ce travail.*

*Je remercie les membres de jury, chacun par son nom, qui ont accepté de juger ce travail.*

*Tous les enseignants qui ont participé le long de ces années à ma formation.*

*J'adresse mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

« OUCHEN LYAMINE »

# *Sommaire*

---

---

Introduction générale	
Chapitre 1 Généralités sur les Isolateurs haute tension	
1.1. Introduction	1.1
1.2. Définitions	1.1
1.2.1. Isolement	1.1
1.2.2. Isolation	1.1
1.2.3. Gradation de l'isolement	1.1
1.2.4. Décharge disruptive	1.2
1.2.5. Contournement	1.2
1.2.6. Tension de contournement	1.3
1.2.7. Tension de tenue (Tension d'essai)	1.3
1.2.8. Courant de fuite	1.3
1.2.9. Conductance superficielle	1.5
1.3. Principaux types d'isolateurs et leur constitution	1.5
1.3.1. matériaux utilisés dans la constitution des isolateurs	1.5
1.3.2. Principaux types d'isolateurs	1.7
1.4. Choix des isolateurs	1.9
1.5. Les contraintes supportées par les isolateurs	1.10
1.5.1. Contraintes mécaniques	1.10
1.5.2. Contraintes climatiques et d'environnement	1.11
1.5.3. Contraintes électriques	1.11
1.6. Études de la performance électrique des isolateurs	1.12
1.6.1. Influence de la forme de l'isolateur	1.12
1.6.2. Influence du diamètre	1.13
1.7. Techniques de lutte contre la pollution	1.15
1.7.1. Allongement de la ligne de fuite	1.15
1.7.2. Isolateurs plats	1.16
1.7.3. Graissage périodique	1.16
1.7.4. Revêtement silicone	1.16
1.7.5. Les isolateurs composites	1.16

---

1.7.6. Nettoyage des isolateurs	1.16
1 .8. Conclusion	1.17
Chapitre 2 Méthodes numériques de calcul du potentiel et du champ électrique	
2.1. Introduction	2.1
2.2.Équations de Maxwell	2.1
2.2.1. Équations en potentiel scalaire : Poisson et Laplace	2.1
2.2.2. Conditions aux limites	2.3
2.2.3. Conditions d'interfaces	2.3
2.3. La méthode des Différences Finies ( <i>M.D.F</i> )	2.4
2.3.1. Principe	2.4
2.3.2. Avantages de la <i>.M.D.F</i>	2.6
2.3.3. Inconvénients de la <i>M.D.F</i>	2.6
2.4. La méthode de Simulation de Charges ( <i>M.S.Q</i> )	2.7
2.4.1 Principe	2.7
2.4.2. Application à un problème présentant plusieurs diélectriques	2.8
2.4.3 Types de charges de simulation utilisés	2.9
2.4.4. Avantages de la <i>.M.S.C</i>	2.10
2.4.5 Inconvénients de la <i>.M.S.C</i>	2.11
2.5. La méthode des éléments finis de frontière ( <i>M.E.F.F</i> )	2.11
2.5.1 Introduction	2.11
2.5.2 Formulation indirecte de la <i>.M.E.F.F</i>	2.11
2.5.2.1 Principe	2.12
2.5.2.2. Résolution des équations intégrales	2.13
2.5.2.3. Avantages de la méthode indirecte	2.14
2.5.2.4. Inconvénients de la méthode indirecte	2.14
2.5.3. Formulation directe	2.15
2.5.3.1. Solution fondamentale de l'équation de Laplace	2.15
2.5.3.2. Méthode de l'identité de Green	2.15
2.5.3.3. Avantages et inconvénients de la formulation directe	2.16
2.6. Méthode des Éléments Finis ( <i>M.E.F</i> )	2.17
2.6.1. Principe	2.17

---

2.6.2. Avantages de la <i>M.E.F</i>	2.19
2.6.3. Inconvénients de la <i>M.E.F</i>	2.20
2.7. Conclusion	2.21
Chapitre 3 Mesure des Dimensions des isolateurs	
3.1. Introduction	3.1
3.2. Présentation de l'isolateur étudié	3.1
3.3. Instruments usuels de mesure	3.1
3.4. L'incertitude de mesurage.	3.3
3.5. Principaux caractéristiques d'un instrument de mesure	3.4
3.6. Erreur systématique	3.6
3.7. Mesure des dimensions de la surface	3.6
3.8. Mesure des dimensions du diamètre	3.7
3.9. Mesure des dimensions des nervures	3.8
3.10. Mesure des dimensions de la tige	3.9
3.11. Mesure des dimensions du capot	3.11
3.12. Conclusions	3.11
Chapitre 4 Simulation bidimensionnelle en utilisant Femlab	
4.1 Introduction	4.1
4.2 Description du logiciel	4.1
4.3 Géométrie de l'isolateur	4.2
4.4 Identification des domaines dans le logiciel FEMLAB	4.3
4.5 Conditions aux limites	4.5
4.6 Visualisation des résultats et analyse	4.5
4.7 Modélisation de la chaîne d'isolateur	4.9
4.8 Calcul des paramètres de circuit équivalent	4.11
4.9 Implantation dans l'EMTP et interprétations résultats de simulation.	4.12
4.10 Variation de courant de fuite en fonction de tension de service	4.13
4.12 Etude de la distribution de tension dans les conditions polluées	4.17
4.13 Effet de la bande sèche	4.20

4.14 Décharge à travers la bande sèche 4.23

4.15 Conclusion 4.24

Conclusions Générales et Perspectives

Références bibliographiques

Annexe

## *Liste des figures*

---

---

- Fig. 1.1 Niveaux de tension.
- Fig. 1.2 Exemple d'essai (isolateur en résine Epoxy).
- Fig. 1.3 Variations du courant de fuite durant un test de tenue
- Fig. 1.4 Isolateur rigide en verre.
- Fig. 1.5 Isolateur à capot et tige.
- Fig. 1.6 Isolateur à long fut en porcelaine.
- Fig. 1.7 Assemblage à rotule.
- Fig. 1.8 Définition du facteur de profil
- Fig. 1.9 Influence de profil sur la tension de tenue des isolateurs
- Fig. 1.10 Assimilation théorique d'un isolateur à un cylindre
- Fig. 1.11 Diamètre moyen des isolateurs IEEE et EPDM
- Fig. 1.12 Performance des isolateurs en fonction du diamètre moyen
- Fig. 2.1 Maillage carré.
- Fig. 2.2 Point centrale et ses voisins.
- Fig. 2.3 Position des charges fictives
- Fig. 3.1 Isolateur capot et tige étudiés
- Fig. 3.2 Le pied à coulisse
- Fig. 3.3 Le micromètre
- Fig. 3.4 Le Comparateur
- Fig. 3.5 Sensibilité d'un instrument de mesure
- Fig. 3.6 Présentation d'erreur de fidélité et l'écart type
- Fig. 3.7 Mesure des dimensions de la surface
- Fig. 3.8 Mesure du diamètre
- Fig. 3.9 Mesure des dimensions des nervures
- Fig. 3.10 Mesure des dimensions de la tige
- Fig. 3.11 Mesure des dimensions du capot
- Fig. 4.1 Géométrie du modèle
- Fig. 4.2 Identifications des différents domaines de l'isolateur
- Fig. 4.3 Conditions aux limites



- Fig. 4.4 Résultats obtenus pour un isolateur
- Fig. 4.5 lignes équipotentiels pour un isolateur sain
- Fig. 4.6 Distribution de la tension le long d'une chaîne d'isolateur
- Fig. 4.7 Variation du potentiel électrique par rapport au centre de la chaîne
- Fig. 4.8 Variation du champ électrique par rapport au centre de la chaîne
- Fig. 4.9 Circuit équivalent d'une chaîne d'isolateur soumis à une tension alternative
- Fig. 4.10 Implantation dans EMTP
- Fig. 4.11 Variation de potentiel dans les différents éléments de la chaîne.
- Fig. 4.12 Formes d'onde du courant de fuite
- Fig. 4.13 Effet de la tension appliquée sur le courant de fuite
- Fig. 4.14 Distribution de la tension pour différentes conductivités de la couche polluée
- Fig. 4.15 Répartition de la tension pour différentes conductivités de la couche polluée
- Fig. 4.16 Formes d'onde du courant de fuite pour différentes conductivités
- Fig. 4.17 Répartition du courant de fuite maximale pour différentes conductivités
- Fig. 4.18 Modèle d'Obenaus
- Fig. 4.19 Formes d'ondes du courant pour différents bande sèche
- Fig. 4.20 Effet de la bande sèche
- Fig. 4.21 Chute de tension dans la bande sèche pour différents bande sèche
- Fig. 4.22 Décharge à travers la bande sèche

## *Liste des tableaux*

---

---

Tableau 3.1 Dimensionnement de la courbe à l'extérieur à la surface de l'isolateur

Tableau 3.2 Mesure du diamètre et du pas de l'isolateur

Tableau 3.3 Valeurs des mesures obtenues des dimensions des nervures de l'isolateur

Tableau. 3.4 Mesure des dimensions de la tige de l'isolateur

Tableau. 3.5 Valeurs de Mesure obtenues des dimensions du capot de l'isolateur

Tableau 4.1 Caractéristiques de l'isolateur à capot et tige type E120/146

Tableau 4.2 Caractéristiques électriques des différents domaines

Tableau 4.3 Valeurs des capacités des éléments de la chaîne obtenus par la MEF

## *Listes des Symboles*

---

---

<b>Symboles</b>	<b>Signification</b>
$U_p$	Tension de perforation
$U_c$	Tension de contournement
$U_e$	Tension d'essai
$H$	Champ magnétique
$B$	induction magnétique
$E$	Champ électrique
$D$	Induction électrique
$\rho_v$	densité de charge
$\sigma$	Conductivité électrique
$\varepsilon$	Permittivité
$V$	Potentiel électrique
$C$	Capacité
$R$	Resistance
$I$	Courant
$\rho$	Résistivité électrique
$X$	Longueur de la bande sèche
$Q$	Charge de conducteur
$W_e$	Energie emmagasinée dans le condensateur.

# *Introduction Générale*

---

---

La production, le transport et la distribution de l'énergie électrique forment la colonne vertébrale de l'économie d'un état industriel moderne. Avec la progression de l'industrialisation, naissent des exigences de plus en plus élevées concernant la mise à disposition de cette énergie. Pour des raisons économiques, le transport et la distribution de l'énergie électrique s'effectuent généralement par des lignes aériennes. Leur fiabilité dépend donc considérablement du comportement mécanique, électrique et diélectrique des différents composants de ces lignes. Parmi ces composants, on note le rôle primordial que jouent les isolateurs. Leur choix est donc de la plus haute importance.

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. Leur rôle est d'assurer l'isolement électrique entre les parties portées à la H.T ou entre les parties H.T, et les parties mises à la terre. Depuis plusieurs années, l'une des principales cibles dans les travaux de recherche et de développement dans le champ de la transmission et de la distribution électrique a été la diminution du nombre et de la durée des interruptions de l'alimentation en énergie électrique des consommateurs.

Une quantité importante d'isolateurs est utilisée sur les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique et en pratique, ces isolateurs sont employés dans différents environnements tels que tropical, arctique, côtier, atmosphère polluée, etc.

L'objectif principal de cette recherche était de calculer les distributions du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur capot et tige de haute tension. Comme il était très difficile de mesurer de façon précise la distribution du potentiel et surtout du champ électrique le long d'un isolateur, l'utilisation d'une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel commercial s'est avérée être une des meilleures solutions. A cet effet, la Méthode des Éléments Finis était la mieux adaptée aux contraintes imposées par le problème.

Le présent travail porte sur la modélisation et la simulation de champs électriques et de potentiels le long d'une chaîne d'isolateurs type capot et tige en verre par la méthode des

éléments finis sous tension alternatif à fréquence industrielle.

Ce mémoire apporte les contributions suivantes :

Dans le chapitre 1, on a donné des connaissances générales concernant les divers types des isolateurs. Il est constitué tout d'abord d'un très bref rappel (définitions), puis, d'un certain nombre d'informations générales mais très utiles pour la compréhension du fonctionnement de ces isolateurs haute tension.

Le chapitre 2 a été réservé à la comparaison des différentes méthodes numériques applicables au calcul de la distribution du potentiel et du champ électrique le long des isolateurs. Nous avons choisi la méthode des éléments finis du fait de son adéquation avec le problème posé et la disponibilité d'un logiciel commercial (COMSOL Multiphysics version 3.4).

Un calcul plus exact (chapitre 3) est effectuée les mesures dimensionnelles concernant le modèle d'isolateur.

La quatrième porte sur les simulations bidimensionnelles d'un isolateur de haute tension qui ont été effectuées avec le logiciel commercial basé sur la M.E.F.

En particulier, l'influence de plusieurs paramètres sur la distribution du potentiel et du champ électrique a été étudiée. Nous déterminons à la fin du chapitre les paramètres d'un circuit équivalent préliminaire d'une chaîne d'isolateur.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre travail et perspectives

# Chapitre 01

## GENERALITES SUR LES ISOLATEURS HAUTE TENSION

---

---

### 1.1. Introduction

L'isolateur est un dispositif constitué spécialement d'un matériau isolant solide, capable de résister à la contrainte électrique. Il est caractérisé par une grande impédance au passage du courant électrique. Son rôle est de séparer deux corps conducteurs, soumis à deux potentiels différents [LER1984]. Dans les réseaux de transport d'énergie électrique, l'isolement pylône-conducteur est assuré par une chaîne d'isolateurs. Chaque chaîne est caractérisée principalement par sa longueur de fuite (nombre d'éléments). Cette longueur est dépendante du niveau de tension de service.

Ce chapitre présente un aperçu sur les divers types des isolateurs, leur constitution et les perturbations qui peuvent nuire au fonctionnement correct de ces dispositifs en passant par quelques définitions nécessaires à la compréhension de ce domaine.

### 1.2. Définitions

#### 1.2.1. Isolement

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.

#### 1.2.2. Isolation

L'isolation est un procédé permettant de supprimer ou de réduire la propagation de courant d'un milieu à un autre. Un matériau qui remplit ce rôle est dit isolant.

#### 1.2.3. Dégradation de l'isolement

Les appareils dont la coordination de l'isolement est correcte, présentent les niveaux de tension montrés dans la figure (1.1).

- Tension de perforation  $U_p$  (isolation interne)
- Tension de contournement  $U_c$  (isolation externe)
- Tension d'essai fixée par les règles de coordination des isolements  $U_e$  (Prescription CEI [BSI 1996, BSI 1997, IEC 2004]).

#### 1.2.4. Décharge disruptive

C'est le phénomène associé à une défaillance de l'isolation sous l'effet de contrainte électrique, avec chute de tension et passage d'un courant. On parlera de l'amorçage pour les diélectriques gazeux; de claquage pour les liquides et enfin de perforation pour les solides [BOU1988].

#### 1.2.5. Contournement

C'est la décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne ce dernier. Dans notre cas, c'est de l'isolateur qu'il s'agit. Aussi le terme contournement est employé pour des décharges disruptives par amorçage dans l'air entourant l'isolateur [BOU1988].

Quant au contournement, il faut distinguer deux cas :

- Le premier est dû à une surtension qui provoquera une décharge électrique à la surface de l'isolateur suivant les mécanismes classiques des décharges.
- Le second cas correspond à la pollution atmosphérique [BER1992]. Ce type de contournement est la conséquence de la combinaison de plusieurs paramètres. Il a été montré que le comportement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en quatre grandes étapes :

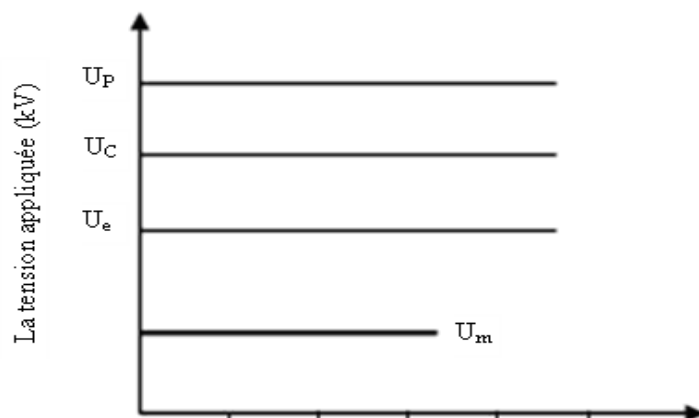


Fig. 1.1 Niveaux de tension [LER1984]

- Dépôt d'une couche de pollution sur la surface de l'isolateur,
- Humidification progressive de la couche de pollution,
- Développement de zones sèches,
- Apparition d'arcs partiels et enfin leurs extension si les conditions sont favorables jusqu'à court-circuiter l'isolateur.

### **1.2.6. Tension de contournement**

C'est le niveau de tension le plus bas au delà duquel les arcs électriques joignent les deux électrodes. La tension de contournement dépend [MEK1999, LAN1971]:

- de la conductivité de la couche polluée sur l'isolateur.
- de la répartition de la couche de pollution.
- la forme de l'isolateur (profil).

### **1.2.7. Tension de tenue (Tension d'essai)**

- C'est le niveau de tension le plus important que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive.
- La tension d'essai ou de tenue est fixée par les règles nationales ou internationales et permet une coordination correcte de l'isolement [BSI 60-1 BSI 60-2].

- **Exemple :** Essai au choc d'un isolateur en résine Epoxy (Fig. 1.2).

- Tension nominale la plus élevée 24 kV efficace.
- Tension d'essai 125 kV, onde 1,2 /50  $\mu$ s.

Pour déterminer la tension de perforation de l'isolateur, il faut immerger ce dernier dans de l'huile ou dans du gaz sous pression (par exemple  $N_2$ ,  $SF_6$ ).

### **1.2.8. 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 [CLA1973]. Son intensité devient importante lorsqu'on s'approche



de la tension de contournement.

La figure (1.3), relevée à l'aide du système d'acquisition **Viewdac**, présente à titre d'exemple l'évolution du courant de fuite jusqu'au contournement sur une chaîne d'isolateurs IEEE dans un régime humide ( $V=75$  kV).

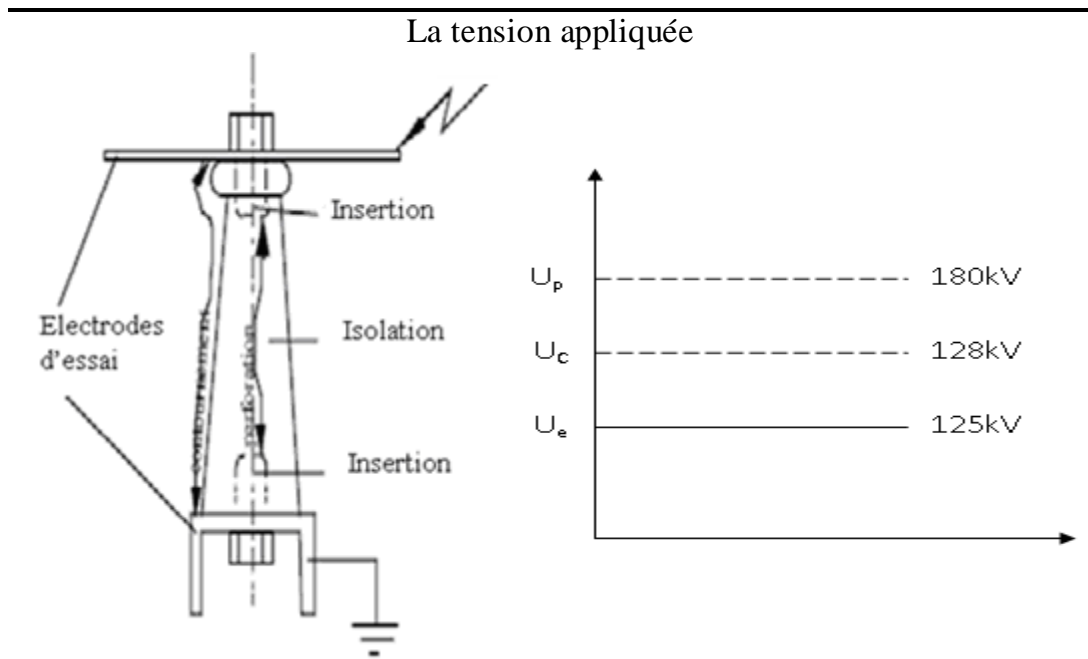


Fig. 1.2 Exemple d'essai (isolateur en résine Epoxy) [MEK1999]

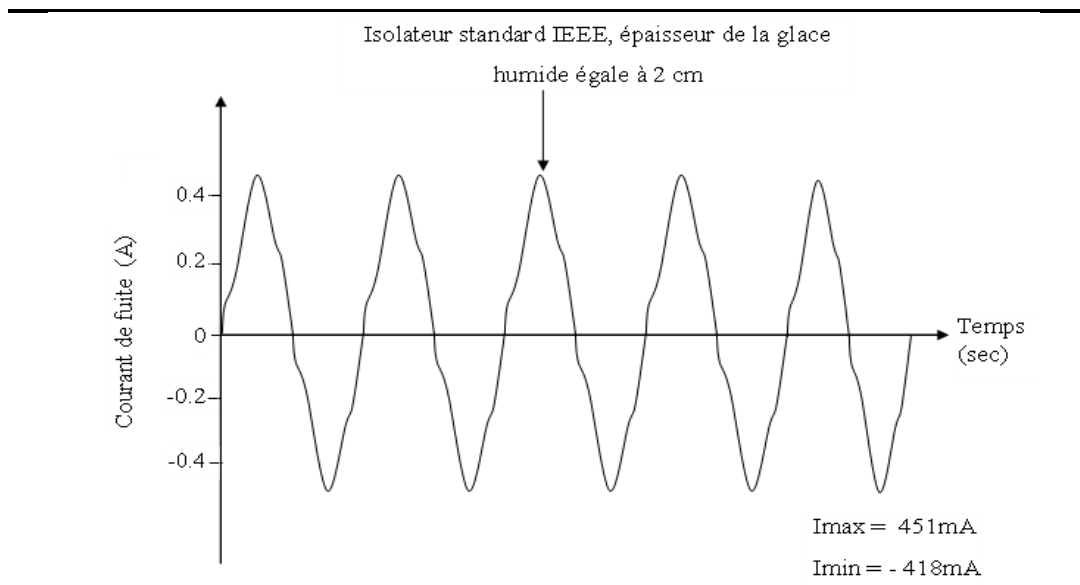


Fig. 1.3 Variation s du courant de fuite durant un test de tenue [HAR1979]

### **1.2.9. Conductance superficielle**

La conductance superficielle est le rapport du courant de fuite traversant l'isolateur à la tension appliquée. Elle caractérise l'état global de la surface d'isolateur [HEI1982].

### **1.3. Principaux types d'isolateurs et leur constitution**

L'isolateur est un matériau isolant solide présentant une très grande résistance au passage du courant et dont la conductivité est pratiquement nulle. Il est utilisé pour isoler les conducteurs ou les pièces sous tension, afin d'empêcher les court circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution.

Les isolateurs utilisés dans les réseaux électriques peuvent être classés selon leurs constitutions en deux groupes [RIQ1998] :

- les isolations internes qui sont hermétiquement isolées (isolation des câbles, des transformateurs, gaz comprimés, etc.).
- Les isolations externes sont constituées par les distances dans l'air et par les lignes de fuite le long des isolants solides tels que les supports de l'appareillage, les traversées de transformateurs et les chaînes d'isolateurs.

Les matériaux isolants solides les plus utilisés sont essentiellement le verre trempé et la porcelaine.

L'isolateur est considéré comme deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents, qui sont les suivants :

- L'intervalle d'air,
- Le matériau diélectrique,
- L'interface air matériau diélectrique.

#### **2.3.1 Matériaux utilisés dans la constitution 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'à quelques années de cela seuls le verre et la céramique ont justifié d'un bon

comportement en exploitation, bien que ces deux matériaux soient de nature fragile [NOT1977].

#### **a) Céramique**

Elle est généralement utilisée pour les isolateurs à haute tension et aussi pour les isolateurs support (long fût). La composition des céramiques et leur fabrication sont longuement développées. Certaines céramiques à grains très fins sont recommandées pour des isolateurs devant supporter des efforts mécaniques élevés.

#### **b) Verres**

Outre son bas prix, le verre présente l'avantage de permettre de détecter les défauts par une simple observation. Deux types de verres existent sur le marché.

- **Verre recuit**

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

- **Verre trempé**

Celui-ci est obtenu par réchauffage de l'isolant retiré du moule à une température d'environ 700 °C, puis refroidi par des jets d'air sous pression judicieusement répartis sur toute sa surface; les couches extérieures de la pièce isolante acquièrent rapidement une rigidité qui ne leur permet plus aucune déformation. 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.

En exploitation, l'isolateur en verre trempé ne peut avoir que deux états :

Il est entier ; on est sûr qu'il est électriquement et mécaniquement intact.

Il est moignon suite au bris de sa jupe ; on peut ainsi facilement le repérer mais on n'est pas dans l'obligation de le remplacer immédiatement car la résistance mécanique résiduelle est suffisante pour continuer l'exploitation de la ligne jusqu'à son remplacement programmé.

#### **Note**

*Il est à noter que la couleur verte de l'isolateur en verre provient de l'oxyde de fer*

---

*présent dans sa composition, si celui-ci est absent le verre est transparent.*

#### ❖ Pièces métalliques de liaison :

Les parties isolantes constitutives de l'isolateur sont reliées entre elles ou au support par des pièces métalliques, réalisées par des métaux qui doivent répondre aux contraintes mécaniques et thermiques appliquées à l'isolateur au cours de son exploitation.

### 1.3.1. Principaux types d'isolateurs

On peut distinguer les principaux types d'isolateurs suivants :

#### 1.3.1.1. Isolateurs de type rigide

Un isolateur rigide (Fig. 1.4) est relié au support par une ferrure fixe. Tous les isolateurs rigides normalisés sont livrés avec une douille scellée de telle façon qu'ils puissent être vissés directement sur les ferrures correspondantes. La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides.

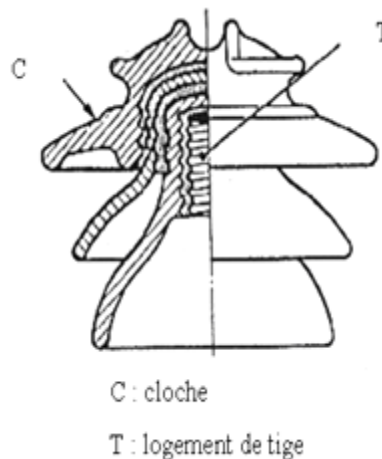


Fig. 1.4 *Isolateur rigide en verre* [RIQ1998]

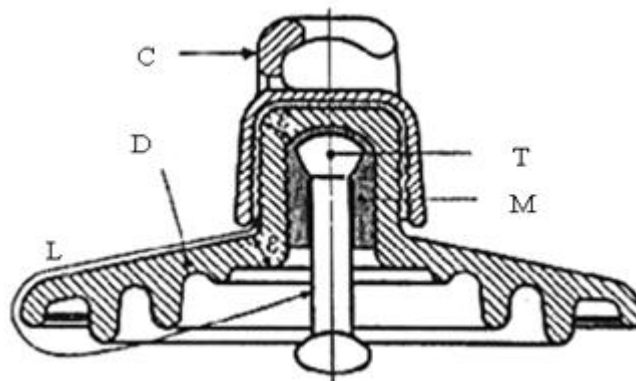
#### 1.3.1.2. Isolateurs capot et tige

L'isolateur capot et tige (Fig. 1.5) est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre (ou la porcelaine). L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer

dans le capot de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille [AMI1998, KOS1970]. L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du Ciment, puis celui de la tige et du diélectrique, le tout est posé sur une table vibrante pendant une minute afin d'obtenir un bon scellement.

### 1.3.1.3. Isolateur à long fût en porcelaine

Ils sont constitués d'un cylindre plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes (Fig. 1.6). A chaque extrémité est fixée une pièce métallique de liaison. Celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le cylindre, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet. De tels isolateurs peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis [POR1988].



- C : Capot (fonte malléable, galvanisée à chaud)
- D : Diélectrique (verre trempé ou céramique)
- M : Mortier de ciment alumineux ou Portland
- T : tige (acier, galvanisé à chaud)
- L : Plus courte distance dans l'air ; extérieure à l'isolateur

Fig. 1.5 *Isolateur à capot et tige* [AMI1 1998]

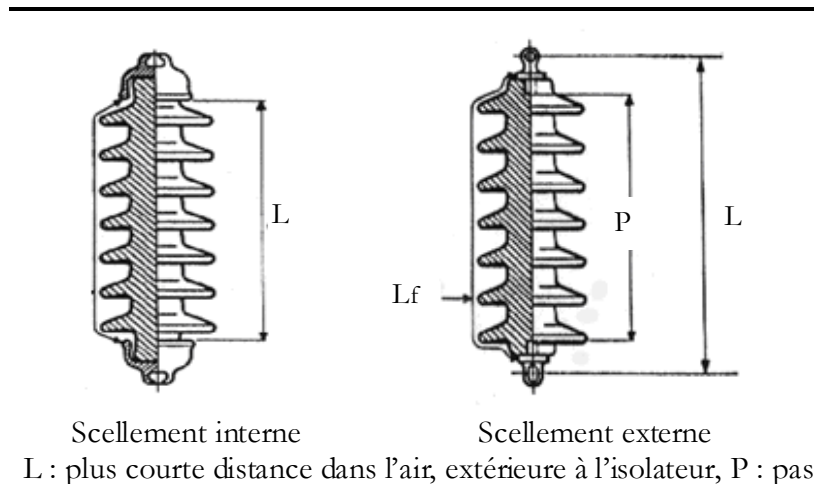


Fig.1.6 *Isolateur à long fut en porcelaine* [POR1988]

#### 1.3.1.4. Chaînes d'isolateurs

Les chaînes d'isolateurs sont constituées d'un ensemble d'isolateur de type capot et tige ou à long fût équipés de pièces métalliques de liaison, nécessaires pour les relier de façon flexible les uns aux autres (Fig. 1.7), à la pince de suspension du conducteur ou au support. Les éléments de chaînes sont soumis principalement à des efforts de traction. Ils sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (chaînes d'alignement), soit horizontales (chaînes d'ancrages).

#### 1.4. Choix des isolateurs

L'isolateur entre pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, il est un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service [GUI2001].

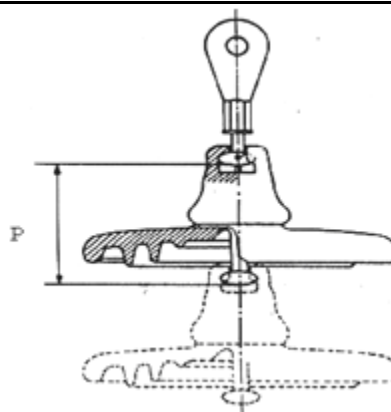


Fig. 1.7 *Assemblage à rotule* [POR1988]

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

Le choix des isolateurs se fait en fonction de :

- La charge mécanique de rupture;
- La tension de tenue à fréquence industrielle à sec;
- La tension de tenue à fréquence industrielle sous pluie;
- La tension de tenue aux chocs de foudre;
- La tenue à la perforation;
- Le diamètre nominal de la partie isolante;
- Le pas nominal;
- La ligne de fuite nominale;
- Le poids approximatif.

Donc le choix des isolateurs est lié aux contraintes suivantes :

### **1.5. Contraintes supportées par les isolateurs**

Trois types de contraintes sont imposée aux isolateurs, chaque type comprend lui-même plusieurs types. Ces contraintes sont généralement d'amplitude variable et agissent simultanément, si bien que les isolateurs sont soumis à des régimes complexes [CLA1984].

#### **1.5.1. Contraintes mécaniques**

Du fait de leur conception, les chaînes d'isolateurs sont articulées (avec un faible degré de liberté) à chaque isolateur, ce qui permet de les faire travailler exclusivement à la traction :

- Charge permanente appliquée à la chaîne (poids des conducteurs, des accessoires etc.).
- Surcharge exceptionnelle due au vent.

Les dimensions d'isolateur dépendent de la charge mécanique qui est supporté en service ; lorsque la charge augmente les dimensions augmentent aussi.

### **1.5.2. Contraintes climatiques et d'environnement**

Les isolateurs sont spécialement influés par la contamination de l'environnement, dans les ouvrages (lignes ou postes) installés en bordure de mer, les embruns portés par les vents déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel, qui à plus ou moins longue échéance, ensuite recouvre toute la surface l'isolant y compris les parties mieux protégées. Cette couche de sel humidifiée par les embruns eux –mêmes par un brouillard ou simplement par condensation, devient conductance ce qui donne naissance à un courant de fuite qui s'établit à travers la couche superficielle, et dans certaines conditions des arcs peuvent se développer et provoquer le contournement totale de l'isolateur.

Les remèdes contre les amorçages produits par la pollution sont divers, on site :

- l'augmentation du nombre d'isolateurs qui engendre l'augmentation e la ligne de fuite totale d'une chaîne.
- l'utilisation des isolateurs spéciaux appelés « isolateurs antipollution ».
- protection par l'utilisation des graisses, soit à minérales, soit à base de silicone.

Puisque l'entretien continu et le remplacement des isolateurs en défaut sont des processus coûteux et fastidieux ; le choix et le dimensionnement de l'isolateur demeurent très importants.

### **1.5.3. Contraintes électriques**

Les isolateurs sont soumis à des contraintes électriques importantes telles que :

- La tension de service : c'est la tension normale que supporte l'isolateur en service.
- Décharge disruptive : phénomène associé à une défaillance de l'isolateur, avec chute de tension et passage d'un courant qui entraîne une perte permanente de la rigidité diélectrique.
- La tension de contournement (à sec et sous pluie) : la plus faible tension produisant un amorçage entre conducteur et la masse.
- Les surtensions accidentelles.



## 1.6. Études de la performance électrique des isolateurs

### 1.6.1. Influence de la forme de l'isolateur

La longueur de fuite est un important paramètre qui influence la tenue des isolateurs. Pour augmenter la performance d'un isolateur, on pourrait être tenté d'augmenter la longueur de fuite. Cependant, la forme des isolateurs est différente d'un type à l'autre. Un isolateur dont le profil est simple (Fig. 1.8.a) possède une ligne de fuite plus petite que celui dont le profil comporte de nombreuses nervures comme les isolateurs antipollution (Fig. 1.8.b) lorsqu'ils sont identiquement pollués [LER1984]. En effet, si la couche de pollution est uniformément répartie, des arcs locaux peuvent se développer sous certaines conditions. Si les arcs locaux restent en contact avec la surface isolante, la ligne de fuite est complètement utilisée.

Un critère empirique appelé facteur de profil,  $FP$ , présenté dans la fig. 1.8, a été introduit comme le rapport entre la ligne de fuite simplifiée ( $2P + S$ ) et la ligne de fuite réelle ( $LS$ ) pour 1 pas de l'isolateur, ( $P$ ) étant la profondeur horizontale maximale des ailettes et ( $S$ ) la distance entre deux ailettes.

Les expériences sur les isolateurs ont montré que pour un niveau de pollution donné, la tension de contournement des isolateurs est d'autant plus faible que le facteur de profil est plus petit (Fig. 1.9) [LER1984]

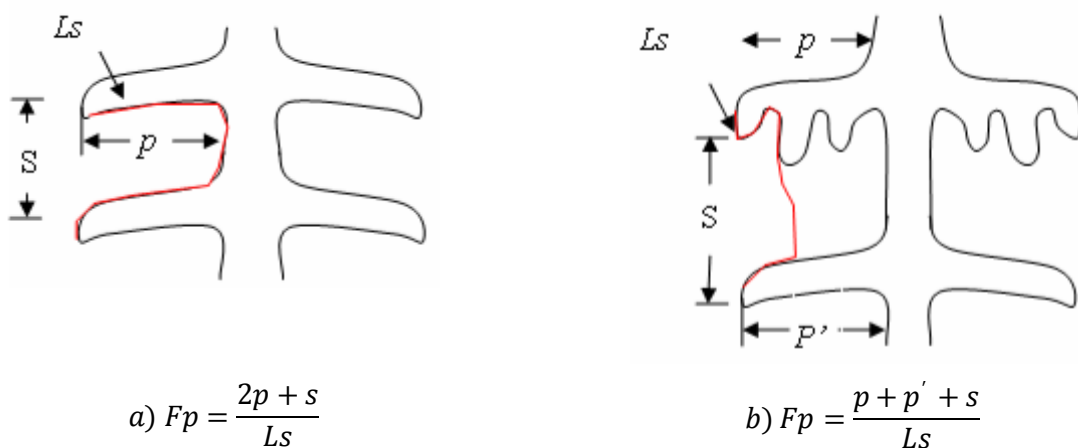


Fig. 1.8 Définition du facteur de profil [RAB2003]

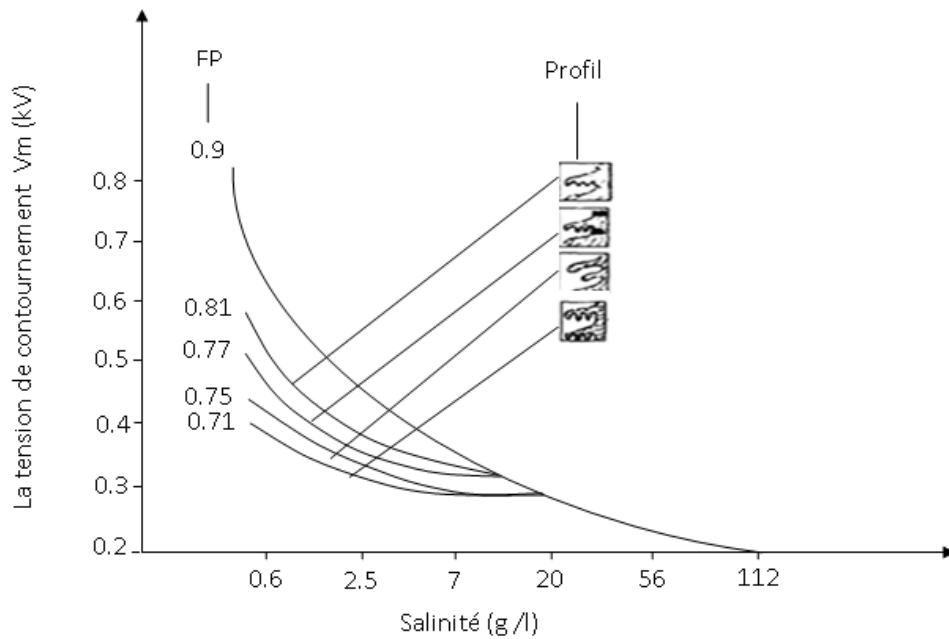


Fig. 1.9 Influence de profil sur la tension de tenue des isolateurs

**1.6.2. Influence du diamètre**

Par définition, le diamètre moyen  $\phi$  d'un isolateur réel correspond au diamètre d'un isolateur qui serait cylindrique et qui posséderait la même ligne de fuite,  $L$ , et la même résistance lorsqu'il est recouvert de la même couche polluante,  $e$ , que l'isolateur réel (Fig. 1.10)

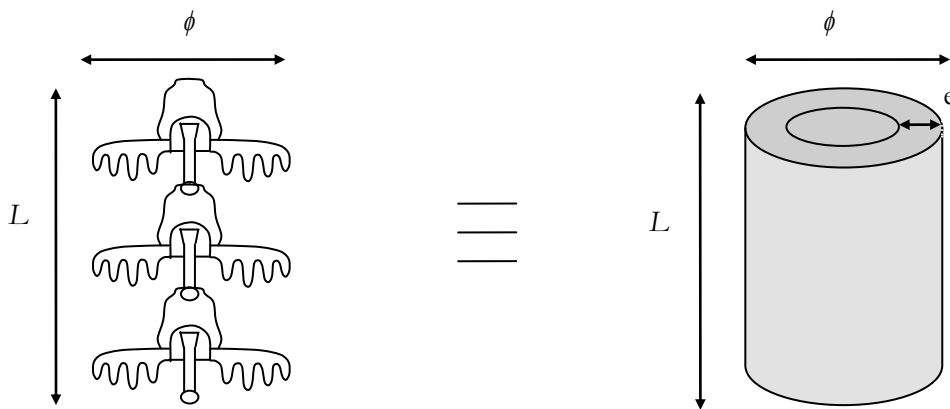


Fig. 1.10 Assimilation théorique d'un isolateur à un cylindre [LER1984]

En effet, la longueur d'un cylindre est donnée par :

$$L = \frac{S}{\pi \cdot \phi} \tag{1.1}$$

Où  $S$  est la surface latérale du cylindre et  $\phi$  est le diamètre. Par conséquent, si on intègre  $\phi$  le long du profil de l'isolateur, on aura une approximation de son facteur de forme :

$$f = \int_0^L \frac{dS}{\pi \cdot \phi} \tag{1.2}$$

D'une part, si on assimile la couche polluante à un film régulier d'épaisseur  $e$  et de résistivité volumique  $\rho$ , la résistance de l'isolateur sera:

$$R = \rho \int_0^L \frac{dS}{\pi \cdot \phi \cdot e} = \frac{\rho}{e} f \tag{1.3}$$

Où  $f$  est le facteur de forme de l'isolateur. D'autre part, la résistance du cylindre équivalent est :

$$R = \rho \frac{dS}{\pi \cdot \phi \cdot e} \tag{1.4}$$

En conclusion, en assimilant l'isolateur réel à un isolateur cylindrique (Fig. 1.10) ayant une même ligne de fuite  $L_f$  et une même couche polluante, le diamètre moyen s'écrit:

$$\phi = \frac{L_f}{\pi \cdot f} \tag{1.5}$$

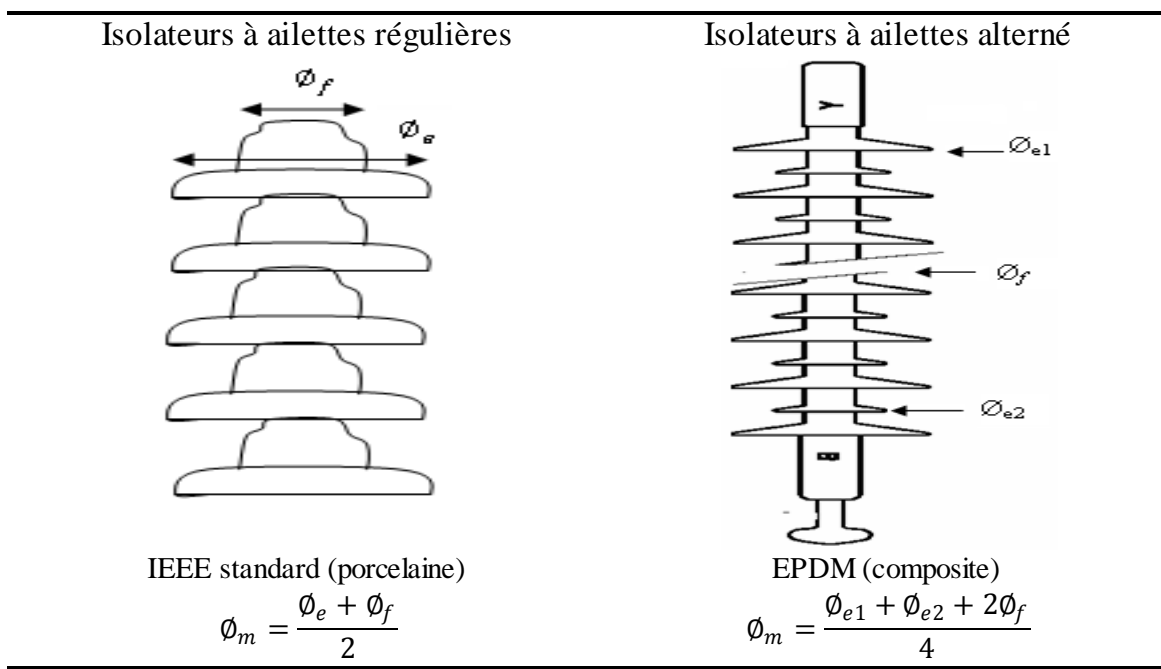


Fig. 1.11 Diamètre moyen des isolateurs IEEE et EPDM [LER 1984]

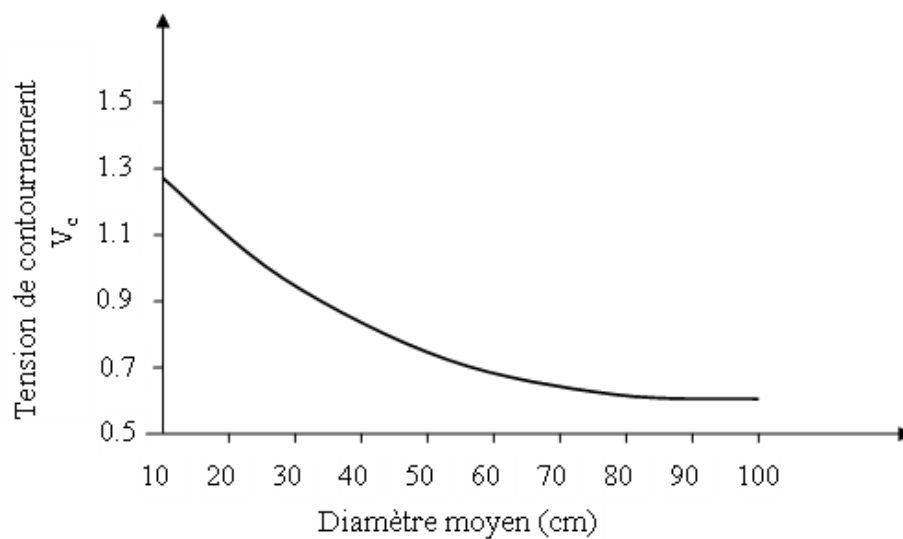


Fig. 1.12 Performance des isolateurs en fonction du diamètre moyen [LER 1984]

Pour les isolateurs de gros diamètre, on peut résumer le diamètre moyen comme suit :

Le fait qu'un large diamètre  $\phi$  signifie une plus grande exposition de la surface à la pollution, diminuant ainsi la résistance et réduisant par conséquent la tension de contournement. Par contre, une augmentation relative du diamètre peut causer un supplément d'arcs locaux provoquant une baisse de tension aux bornes de l'électrode. Cette baisse de tension compense partiellement la baisse de la tension de contournement. De plus, l'augmentation du diamètre peut impliquer l'augmentation de la distance de fuite qui atténue la diminution de la tension de contournement. La figure 1.12 exprime les tensions de contournement mesuré ( $V_c$ ) en fonction du diamètre moyen de l'isolateur.

## 1.7. Techniques de lutte contre la pollution

L'augmentation du degré de pollution représente un risque immense pour les installations électriques. Pour cela plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées.

### 1.7.1. Allongement de la ligne de fuite

Cette méthode permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. On cite parmi les techniques utilisées :

- Le changement de type d'isolateur (pour rallonger la ligne de fuite) : c'est une technique très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.

- Prolonger de ligne de fuite par l'utilisation matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [EYE1978].

**1.7.2. Isolateurs sans nervures (plats) :** ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'autonettoyant très bien sous l'effet du vent [CIM1978].

### **1.7.3. Graissage périodique**

Par mesure économique, seule les isolateurs de postes sont concernés. On utilise des graisses silicones. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs.

### **1.7.4. 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. Ce revêtement protège les isolateurs et améliore leurs tenues sous pollution.

### **1.7.5. Les isolateurs composites**

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère voient leurs caractéristiques changer au cours du temps ; ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service.

### **1.7.6. Nettoyage des isolateurs**

Le nettoyage manuel et le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde. Néanmoins, l'application de ces méthodes pose des problèmes majeurs à cause des interruptions de service, parfois assez longs. Pour éviter ces coupures, un lavage sous tension des isolateurs est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau du lavage, le processus du lavage et les distances de sécurité, et ce afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

## **1.8. Conclusion**

Dans le matériel électrique destiné à fonctionner en HT, l'isolation des conducteurs prend une grande importance d'où, les matières isolantes pour chaque type d'isolateur sont choisies en tenant compte de leurs propriétés et les différentes contraintes supportées.

Nous avons présenté certains types d'isolateur et leur utilisation. Dans la suite du travail nous allons entreprendre un calcul de la distribution du potentiel et la détection des régions critiques où la concentration du champ électrique est élevée en utilisant la méthode des éléments finis.

## Chapitre 02

# METHODES NUMERIQUES DE CALCUL DU POTENTIEL ET DU CHAMP ELECTRIQUE

### 2.1. Introduction

La détermination de la distribution du champ et du potentiel électrique de tout système haute tension est un problème complexe de calcul non pas par la simplicité des équations aux dérivées partielles qui les décrivent mais plutôt à cause de la forme irrégulière des diélectriques, de la proximité de surfaces métalliques aux formes complexes, des lignes de transmission, 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 électrique. Les méthodes numériques les plus connues et les plus utilisées dans ce type de problème sont donc la méthode des Différences Finies (M.D.F), la méthode des Éléments Finis (M.E.F), la méthode de Simulation de Charges (M.S.C) et la méthode des Éléments Finis de Frontière (M.E.F.F).

Ces méthodes, dont le principe et les caractéristiques sont développés dans ce chapitre, sont basées sur la résolution de l'équation de Laplace en imposant les conditions aux frontières adaptées à chaque problème.

### 2.2. Equations de Maxwell

#### 2.2.1. Équations en potentiel scalaire

Les équations qui gouvernent la répartition du potentiel et du champ électrique, dans un milieu donné, dérivent des équations de Maxwell. Celles-ci sont formées par quatre équations aux dérivées partielles qui lient les phénomènes magnétiques caractérisés par le champ magnétique  $H$  et l'induction magnétique  $B$  aux phénomènes électriques caractérisés par le champ électrique  $E$  et l'induction électrique  $D$ .

Ces quatre équations sont :

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

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

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

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

Avec  $\rho_v$  représente la densité volumique de charges.

Outre ces quatre équations, il existe des relations constitutives qui lient l'induction électrique  $D$  et la densité de courant  $J$  au champ électrique  $E$  ainsi que l'induction magnétique  $B$  au champ magnétique  $H$ :

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

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.6)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.7)$$

Avec  $\varepsilon$ ,  $\mu$  et  $\sigma$  représentent respectivement la permittivité électrique, la susceptibilité magnétique, et la conductivité électrique du milieu.

Lorsque l'on applique une différence de potentiel alternative, la dérivation des grandeurs électriques par rapport au temps revient à les multiplier par la quantité  $j\omega$  où  $j$  est l'unité imaginaire et  $\omega$  la pulsation de la source. En tenant compte des relations constitutives, les équations (2.1) et (2.3) deviennent :

$$\text{rot} \vec{E} = -j\omega\mu \vec{H} = 0 \quad (2.8)$$

$$\text{div}(\vec{E}) = -\frac{\rho_v}{\varepsilon_0} \quad (2.9)$$

$$\text{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega\varepsilon \vec{E} \quad (2.10)$$

Comme le champ magnétique est faible, dans les équipements HT considérés, le second membre de l'équation (2.8) peut être négligé.

On peut donc découpler les équations (2.9) et (2.10) qui gouvernent les grandeurs électriques de celles qui gèrent les grandeurs magnétiques. L'équation (2.9) n'est alors rien d'autre que la forme locale du théorème de Gauss qui traduit la conservation de la charge. L'équation (2.8) permet de dire que le champ  $E$  dérive d'un potentiel  $\varphi$  avec :

$$\vec{E} = -\text{grad} \varphi \quad (2.11)$$

L'introduction de la relation (2.11) dans l'équation (2.9) donne :



$$\operatorname{div}(-\operatorname{grad}\varphi) = \frac{\rho_v}{\varepsilon_0} \quad (2.12)$$

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

Pour des matériaux isolants, généralement utilisés dans les appareillages H.T, la densité volumique de charge  $\rho_v$  est nulle. Avec ces hypothèses, on obtient l'équation de Laplace (2.13) qui gouverne la répartition du potentiel dans les matériaux isolants

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (2.13)$$

- On peut noter que cette équation gouverne aussi la répartition du potentiel dans les matériaux conducteurs tels que les électrodes car ceux-ci sont des volumes équipotentiels.

### 2.2.2. Conditions aux limites

Il existe plusieurs solutions aux équations différentielles précédemment définies. Les conditions aux limites servent en fait à déterminer une solution unique de ces équations. Ces conditions sont principalement de deux types : la condition de Dirichlet et la condition de Neumann. La condition de Dirichlet impose la valeur du potentiel comme par exemple les surfaces des conducteurs, les surfaces équipotentiels, ou les limites infinies du domaine d'étude. La condition de Neumann impose la valeur de la dérivée normale du potentiel tel les plans de symétrie ou les surfaces à flux imposé. Les conditions de Dirichlet et de Neumann sont dites homogènes si les valeurs imposées sont nulles. Elles sont dites non homogènes dans le cas contraire.

### 2.2.3. Conditions d'interfaces

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

À la frontière de deux milieux de propriétés différentes, les équations dites d'interfaces,

en l'absence de charges et de courants superficiels, s'écrivent :

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (2.14)$$

## 2.3. La méthode des Différences Finies (M.D.F)

### 2.3.1. Principe

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 est, historiquement, la première méthode connue pour calculer, sur ordinateur, la solution d'une équation différentielle [CHA1993]. Elle consiste à décomposer le domaine d'étude en une grille rectangulaire uniforme dont chaque nœud est à équidistance de son voisin suivant les axes  $x$  et  $y$  et en chaque nœud, le système différentiel est satisfait. L'utilisation d'un maillage régulier permet d'avoir, en tout point, la même forme pour les équations [BIN1973]. Le plus simple de ces maillages réguliers est le maillage carré, (Fig. 2.1). L'équation aux dérivées partielles est alors remplacée par un système d'équations algébriques pour les valeurs nodales. Dans le calcul du potentiel et du champ électrique, ces équations sont linéaires et la solution de chaque valeur nodale est obtenue par itération ou inversion de matrice. Une illustration de cette présentation est donnée dans la figure 2.1.

Soit les indices  $i$  et  $j$ , les coordonnées de la position d'un nœud quelconque, (voir Fig. 2.2), avec  $\Delta x = \Delta y = h$  dans le cas d'un maillage carré, et  $\varphi_{i,j}$  la valeur du potentiel en ce nœud qui est donné par :

$$\varphi_{i,j} = \varphi(x_0 + i.\Delta x, y_0 + j.\Delta y) \quad (2.15)$$

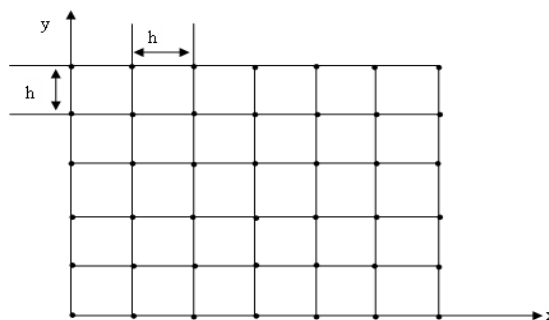


Fig. 2.1 Maillage carré [VOL2002]

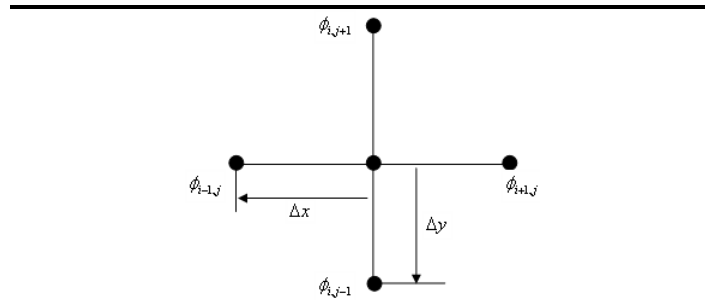


Fig. 2.2 Point centrale et ses voisins [VOL2002]

Où  $x_0$  et  $y_0$  représentent les conditions initiales.

Comme montré dans la figure 2.2, l'approximation algébrique de la dérivée  $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$  est donnée

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \cong \frac{1}{\Delta x} \cdot (\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}) \quad (2.16)$$

Une approximation similaire donne :

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \cong \frac{1}{\Delta x^2} \cdot (\varphi_{i+1,j} - 2 \cdot \varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j}) \quad (2.17)$$

Ces expressions sont exactes lorsque  $\Delta x$  tend vers 0, mais dans l'analyse numérique,  $\Delta x$  et  $\Delta y$  sont finis (d'où le terme de différences finies).

Nous obtenons la formulation algébrique suivante :

$$2 \cdot \left(1 + \left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)^2\right) \cdot \varphi_{i,j} \cong \varphi_{i-1,j} + \varphi_{i+1,j} + \left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)^2 \cdot (\varphi_{i,j-1} + \varphi_{i,j+1}) \quad (2.18)$$

Où  $\left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)$  dépend du choix de la taille du maillage.

Pour un maillage carré ( $\Delta x = \Delta y$ ) et l'équation (2.18) se simplifie comme suit :

$$\varphi_{i,j} \cong \frac{1}{4} (\varphi_{i,j+1} + \varphi_{i,j-1} + \varphi_{i-1,j} + \varphi_{i+1,j}) \quad (2.19)$$

On obtient ainsi un système d'équations linéaires implicites lorsque les formulations analytiques sont considérées à chaque nœud. À partir du système d'équations, on obtient un système algébrique qui peut s'écrire sous forme matricielle :

$$[A]\{\varphi\} = \{B\} \quad (2.20)$$

Où  $\{\varphi\}$  est le vecteur formé par les inconnues en potentiel de tous les points intérieurs au domaine et  $\{B\}$  le vecteur des conditions aux limites. La résolution du système (2.20) permet ainsi d'évaluer le potentiel en chacun des nœuds.

### 2.3.2. Avantages de la M.D.F

- La méthode des différences finies est une méthode simple à appliquer lorsque la géométrie le permet et c'est une méthode raisonnablement exacte.
- De plus, elle se programme facilement et nécessite peu de mémoire pour le stockage des données.

### 2.3.3. Inconvénients de la M.D.F

- Lorsque la géométrie est de frontière courbe, le schéma ne peut s'appliquer près des frontières irrégulières et donc cette méthode devient difficilement applicable. On doit alors rechercher à la place une méthode qui est valide indépendamment de la géométrie.
- Elle n'est pas applicable pour des problèmes en 3 dimensions.
- Enfin, cette méthode nécessite la connaissance, sur toute la frontière entourant le domaine étudié, du potentiel, ce qui n'est pas toujours le cas en général.

La méthode des différences finies fait une approximation des opérateurs d'une équation différentielle par des différences finies calculées aux nœuds d'un maillage.

## 2.4. La méthode de Simulation de Charges (M.S.C)

### 2.4.1. Principe

Dans la M.S.C, le champ électrique est simulé par un champ électrique engendré par un nombre de charges discrètes [SIN1974, CHA1993], qui sont placées en dehors de la région dans laquelle le champ électrique doit être calculé. Les valeurs affectées aux charges discrètes sont déterminées par la satisfaction des conditions aux limites à des points de contour bien déterminés. Une fois que les valeurs et les positions des différentes charges de simulation sont connues, le potentiel et le champ électrique peuvent être calculés n'importe où dans l'espace considéré. En fait, le principe de base de la méthode est assez simple. Si plusieurs charges discrètes de formes différentes sont présentes dans une région, le potentiel électrostatique, à n'importe quel point C appartenant à cette région, peut être déterminé par la sommation des potentiels résultant des charges ponctuelles (application du théorème de superposition) tant que le point C n'est pas situé

sur aucune charge ponctuelle. On peut donc écrire l'équation suivante :

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j \quad (2.21)$$

Où :

-  $P_{ij}$  Représente le coefficient de potentiel, dépendant du type de charges utilisées et qui peut être évalué analytiquement par résolution de l'équation de Laplace ou de Poisson,

-  $Q_j$  Représente la charge ponctuelle au point  $j$

Dès lors, une fois que le type et la position des charges sont définis, il est possible de déterminer  $\varphi_i$  et  $Q_j$  en tout point de la frontière du domaine étudié. Dans la M.S.C, les charges de simulation sont placées à l'extérieur de l'espace dans lequel on veut connaître le champ électrique (ou à l'intérieur de toute surface équipotentielle comme des électrodes métalliques). Si le point  $C$  est situé sur la surface d'un conducteur, alors  $\varphi$  en ce point sera égal au potentiel du conducteur. Lorsque cette procédure est appliquée à  $m$  points situés sur le contour de T espace considéré, nous obtenons un système de  $m$  équations linéaires pour  $n$  charges connues, c'est-à-dire :

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{m1} & P_{m2} & P_{mn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_1 \\ \cdot \\ Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \cdot \\ \varphi_m \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

#### 2.4.2. Application à un problème présentant plusieurs diélectriques

Le calcul du champ électrique pour des problèmes ayant plus de un diélectrique devient plus compliqué. Ceci est dû au fait que, sous l'influence d'une tension appliquée, une charge nette apparaît à la surface du diélectrique. Alors, en plus des électrodes, chaque interface diélectrique- diélectrique doit être simulée par des charges discrètes.

Pour illustrer ce problème, on considère l'exemple décrit par la figure 2.3. Sur cette figure, les charges 1 à 3 sont utilisées pour simuler l'électrode tandis que les charges 4 à 7 sont utilisées pour simuler l'interface diélectrique- diélectrique. Les points de contour 1 à 3 sont sélectionnés à la surface de l'électrode et les points 4 à 5 sur l'interface diélectrique- diélectrique. Dans le but de déterminer les charges de simulation, un système d'équations est obtenu en imposant les conditions aux frontières suivantes :

1. Sur chaque électrode, le potentiel doit être égal au potentiel connu du conducteur.

2. À l'interface diélectrique- diélectrique, le potentiel et sa dérivée normale doivent être continus au travers de celle-ci.

Lorsque l'on formule les équations pour un point de contour donné, les charges présentes dans le même diélectrique que le point de contour considéré est ignoré. Par exemple, sur la figure 2.3, le potentiel au point de contour n° 1 est calculé par superposition des charges 1 à 5 seulement. Similairement, le potentiel et le champ électrique au point de contour n° 5, lorsqu'il est vu depuis le diélectrique A, seront déterminés par superposition des charges 1 à 3 et 6 à 7. De plus, lorsque la condition aux frontières 1 est appliquée aux points de contour 1 à 3 (c'est-à-dire  $i = 1..3$ ), on obtient les équations suivantes :

$$\sum_{j=1}^5 P_{ij} Q_j = \varphi_c (i = 1) \quad (2.23)$$

$$\sum_{j=1}^3 P_{ij} Q_j + \sum_{j=6}^7 P_{ij} Q_j = \varphi_c (i = 1,3) \quad (2.24)$$

Lorsque la condition aux frontières 2 est appliquée pour les points de contour 4 et 5, les équations ainsi obtenues sont :

$$\sum_{j=4}^5 P_{ij} Q_j + \sum_{j=6}^7 P_{ij} Q_j = 0 \quad (2.25)$$

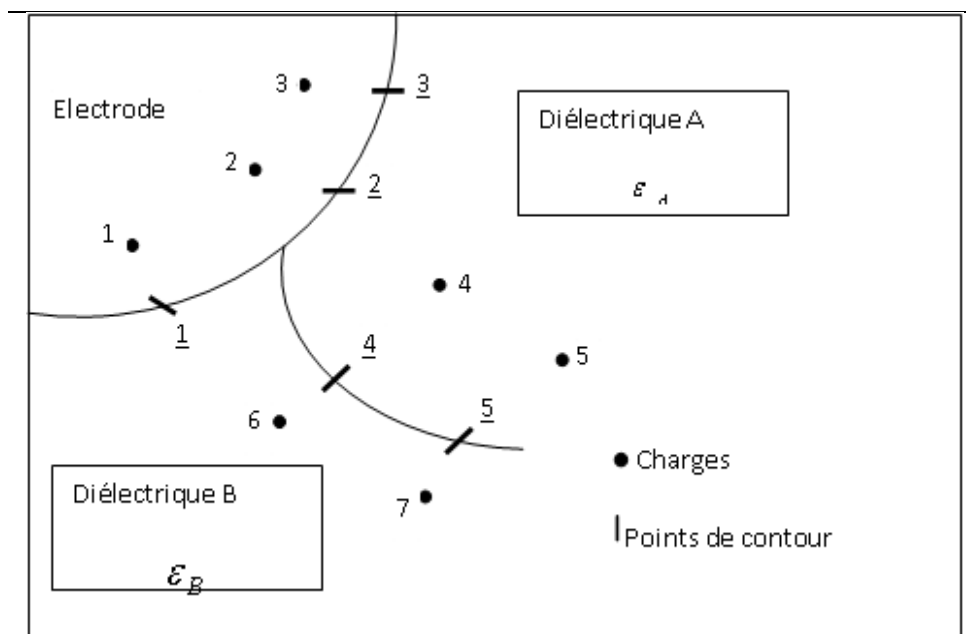


Fig. 2.3 Position des charges fictives [VOL 2002]

$$(\varepsilon_A - \varepsilon_B) \sum_{j=1}^3 f_{ij} Q_j + \varepsilon_A \sum_{j=6}^7 f_{ij} Q_j - \varepsilon_B \sum_{j=4}^5 f_{ij} Q_j = 0 \quad (2.26)$$

Pour  $i = 4$  à  $5$ , ou  $f_{ij}$  sont les coefficients de champ dans la direction normale à la surface du diélectrique au point de contour considéré. Les équations (2.25) et (2.26) sont résolues afin de déterminer la valeur des charges inconnues.

### 2.4.3. Types de charges utilisées

Le choix du type de charges dans l'utilisation de la M.S.C est un facteur très important [KIS1994]. De manière générale, les types de charges les plus couramment utilisés sont les charges ponctuelles, les lignes chargées de longueur infinie ou semi-finie et les charges en anneau. Plus récemment, une variété d'autres configurations de charges ont été utilisées. Ces nouveaux types de charge de simulation incluent des cylindres elliptiques, des charges sphéroïdales, des disques chargés, des charges de volume, etc. Dans le but d'utiliser les différents types de charge de simulation, il est essentiel de déterminer les coefficients de champ et de potentiel associés à chaque type de charge.

En général, les coefficients de potentiel et de champ des charges ponctuelles ou des lignes chargées sont donnés par une simple expression analytique (que l'on trouve dans la littérature spécialisée) qui nécessite un temps de calcul minimum. Pour des configurations de charges plus compliquées, les différents coefficients doivent être déterminés numériquement.

D'autre part, il est possible d'utiliser une configuration de charges complexes afin de réduire le nombre de charges utilisées pour un problème donné et ainsi diminuer le temps de calcul. L'utilisation de charges complexes peut être recommandée pour :

1. réduire le nombre de charges de simulation et par conséquent la taille du système d'équations ;
2. modéliser des problèmes à trois dimensions présentant ou pas des symétries ;
3. calculer le champ électrique dans des problèmes à plusieurs diélectriques ;
4. modéliser des systèmes avec des électrodes fines.

### 2.4.3.1. Avantages de la M.S.C

- La *M.S.C* permet de calculer le potentiel et le champ électrique pour des problèmes à plusieurs diélectriques présentant des formes géométriques complexes (comme par exemple les isolateurs de haute tension).
- Cette méthode ne nécessite aucune discrétisation du domaine d'étude, on ne travaille seulement qu'au voisinage de la frontière de celui-ci.
- Le grand intérêt porté à cette méthode pour les problèmes de calcul de champ électrique a permis à celle-ci d'acquérir une grande recherche ce qui lui permet d'être soumise à diverses améliorations pour la rendre encore plus efficace et précise.

### 2.4.3.2. Inconvénients de la M.S.C

- Lorsque le problème à étudier présente plus de deux diélectriques, l'utilisation de la *M.S.C* devient alors complexe et la programmation d'un tel modèle s'en trouve détériorée.
- La *M.S.C* est une méthode numérique simple par son expression mais tout de même assez difficile à mettre en œuvre en ce qui concerne la précision à atteindre. En effet, la précision requise dépend de nombreux paramètres (comme le type de charges utilisées, leur localisation, leur nombre et le nombre de points de contour). Il est donc nécessaire d'effectuer un nombre assez important d'essais par itération (en modifiant un par un les différents paramètres des charges) ou d'utiliser des procédés d'optimisation afin d'atteindre la précision désirée. Ceci agit par conséquent sur le temps de calcul qui devient de plus en plus long en fonction de la complexité du problème à traiter.

## 2.5. La méthode des éléments finis de frontière (M.E.F.F)

### 2.5.1. Introduction

L'utilisation des équations intégrales de frontière dans la résolution des problèmes de calcul de distribution de champ électrique est assez récente. Cette méthode s'est avérée très efficace dans la résolution des problèmes de champ magnétique [MLS1985], et dans le calcul de la distribution du champ électrique autour des isolateurs pollués



[FAW1987].Le principe de cette méthode est la reformulation des équations aux dérivées partielles qui décrivent le problème sous forme d'équations intégrales qui ne font intervenir que des inconnues sur la frontière du domaine. La solution de ces équations est obtenue par la méthode des éléments de frontière qui est basée sur l'application de la technique des éléments finis sur le contour du domaine étudié.

En général, dans les problèmes de calcul de potentiel et de champ électrique, nous trouvons deux formulations différentes pour la M.E.F.F: la formulation indirecte et la formulation directe. Pour la formulation directe, on évalue directement le potentiel et le champ électrique normal alors que pour la formulation indirecte, la distribution de charges est évaluée dans un premier temps et on en déduit ensuite le potentiel et le champ électrique.

## 2.5.2. Formulation indirecte de la M.E.F.F

### 2.5.2.1. Principe

Une expression par formulation indirecte peut être obtenue si les conditions aux frontières peuvent s'exprimer sous forme de potentiel de simple couche en tout point.

Pour la formulation indirecte, on part de l'équation suivante :

$$\varphi = \int_s \frac{\rho_s}{\epsilon_0} G ds \quad (2.27)$$

Où  $\rho_s$  est la distribution de charges surfaciques et  $G$  la fonction de Green.

En prenant la dérivée de l'équation (2.27) suivant la normale  $n$ , on obtient :

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \int_s \frac{\rho_s}{\epsilon_0} \frac{\partial G}{\partial n} ds \quad (2.28)$$

Soit un point situé sur une interface diélectrique- diélectrique  $\Gamma_{ij}$  où la normale  $\vec{n}$  est dirigée du diélectrique ( $i$ ) vers le diélectrique ( $j$ ). En considérant un point appartenant au diélectrique ( $j$ ) et approchant la surface  $\Gamma_{ij}$  le long de la normale  $n$ , on obtient :

$$\epsilon_0 \left( \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)_j = -\frac{1}{2} \rho_s + \int_{\Gamma} \rho_s \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma \quad (2.29)$$

En répétant le procédé pour un point appartenant au diélectrique ( $i$ ), on obtient :

$$\epsilon_0 \left( \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right)_i = -\frac{1}{2} \rho_s + \int_{\Gamma} \rho_s \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma \quad (2.30)$$

Pour les points situés sur les électrodes, on utilise l'équation suivante :

$$V_i = \int_{\Gamma} \frac{\rho_s}{\varepsilon_0} G d\Gamma \quad (2.31)$$

Les équations (2.30) et (2.31) permettent de calculer la densité de charges équivalentes à la surface des conducteurs et du diélectrique.

### 2.5.2.2. Résolution des équations intégrales

Le traitement numérique des équations intégrales (formulation directe ou indirecte) se fait par application de la méthode des éléments finis sur la frontière du domaine étudié (frontière sur laquelle sont évaluées les équations intégrales). Pour ce faire, la frontière est discrétisée en éléments géométriques sur lesquels sont évalués les différents noyaux ( $\int_{\Gamma} G d\Gamma \int_{\Gamma} \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma$ ) par une méthode numérique adaptée.

Les éléments géométriques utilisés sont de type segments de droite (discrétisation d'une courbe) pour un problème en deux dimensions et pour des problèmes en trois dimensions, les éléments utilisés lors de la discrétisation, sont de type triangulaire ou quadrilatère (discrétisation d'une surface). En fait, ce sont les mêmes types d'éléments que l'on retrouve dans la M.E.F pour des problèmes à une et deux dimensions respectivement.

Une fois la transformation sur l'espace de référence effectuée, il ne reste plus qu'à évaluer les noyaux sur tous les éléments de discrétisation en chaque point de collocation. Cela permet d'obtenir un système d'équations linéaires qui est ensuite résolu par la méthode d'élimination de Gauss. Le système ainsi obtenu est de la forme suivante :

$$[A]\{\rho_s\} = \{B\} \quad (2.32)$$

Où représente le vecteur d'inconnues de charges,  $[A]$  la matrice des coefficients relatifs au calcul des différents noyaux et le vecteur  $\{B\}$  contenant les différentes conditions aux limites.

Après avoir résolu le système de matrice (2.32) et ainsi déterminé la densité de charges équivalentes, le potentiel et le champ électrique peuvent alors être calculés en tout point du domaine d'étude.

### 2.5.2.3. Avantages de la méthode indirecte

- La discrétisation du milieu infini ne cause plus de problème puisque tout est ramené sur la frontière du milieu étudié.

- La transformation des équations aux dérivées partielles en équations intégrales réduit de un la dimension du problème et même de deux si le problème présente une symétrie de révolution.
- Lorsqu'une modification au niveau de la géométrie intervient, il n'est pas nécessaire de reconsidérer tout le maillage comme pour la M.E.F. Il suffit seulement de modifier les paramètres de la portion de la frontière considérée puisque la formation de base des équations intégrales est exempte de toute référence à des géométries particulières.
- Les inconnues du problème (c'est-à-dire le potentiel et sa dérivée normale) peuvent être évaluées soit sur la frontière du domaine, soit à l'intérieur de celui-ci, et de plus, elles sont calculées avec le même niveau d'erreur. D'où une plus grande précision par rapport aux autres méthodes.
- Par rapport aux autres méthodes numériques, le nombre d'inconnues à déterminer est moindre pour un problème équivalent, d'où un gain en temps de calcul non négligeable.

#### **2.5.2.4. Inconvénients de la méthode indirecte**

- La méthode indirecte ne permet pas de calculer directement le potentiel et le champ électrique. Cela nécessite donc des calculs supplémentaires qui peuvent s'avérer coûteux pour des problèmes de grandes tailles.
- L'extension de la M.E.F.F. aux problèmes non linéaires est difficile car dans ces conditions, on doit discrétiser la totalité du domaine ou se produit le non linéarité matérielle ou géométrique, perdant ainsi l'avantage de la M.E.F.F. d'une discrétisation de la frontière uniquement.

#### **2.5.3. Formulation directe**

Résoudre l'équation (2.14) revient à inverser le laplacien [RAS1989]. Cette inversion se fait en utilisant la méthode de l'identité de Green. On transforme l'équation de Laplace en une équation intégrale qui lie la valeur du potentiel  $\varphi(P)$  en un point  $P$  à l'intérieur du domaine  $\Omega$  à la valeur du potentiel  $\varphi$  et sa dérivée normale  $\frac{\partial \varphi}{\partial n}$  sur l'ensemble des points de sa frontière  $\Gamma$ .

### 2.5.3.1. Solution fondamentale de l'équation de Laplace

Le potentiel  $\varphi^*(p)$  créé en un point  $P$  appartenant à un domaine  $\Omega$  par une charge unitaire placée en un point  $M$  est solution de l'équation

$$\nabla^2 \varphi(P) = \delta(M, P) \quad (2.33)$$

Avec  $\delta(M, P)$  défini comme  $\delta(M, P) = 1$  si  $P = M$  et  $\delta(M, P) = 0$  si  $P \neq M$ .

Si  $P \neq M$ , c'est la solution de l'équation (2.44) qu'on appelle fonction de Green ( $G = G(M, P)$ ) de l'équation de Laplace. Sa valeur est égale  $G = \frac{1}{4\pi R^2}$  à en 3-D et  $G = \frac{1}{4\pi R}$  en 2-D avec  $R$  la distance entre les points  $M$  et  $P = |PM|$ .

### 2.5.3.2. Méthode de l'identité de Green

Étant donné deux fonctions scalaires, continues et différentiables  $u$  et  $v$  sont définies dans un domaine de frontière, la seconde identité de Green s'écrit :

$$\int_{\Omega} (u \nabla^2 v - v \nabla^2 u) d\Omega = - \int_{\Gamma} \left( u \frac{\partial v}{\partial n} - v \frac{\partial u}{\partial n} \right) d\Gamma \quad (2.34)$$

Avec  $n$  la normale extérieure en un point  $M$  de  $\Gamma$ .

En identifiant  $u$  au potentiel  $\varphi$  inconnu dans le domaine  $\Omega$  et  $v$  à la solution fondamentale (fonction de Green) du laplacien, l'équation (3.45) devient :

$$\int_{\Omega} (\varphi \nabla^2 G - G \nabla^2 \varphi) d\Omega = - \int_{\Gamma} \left( \varphi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) d\Gamma \quad (2.35)$$

Cette équation est valable pour tout point intérieur à  $\Omega$ . Si on fait tendre le point  $P$  vers un point  $M$  appartenant à la frontière  $\Gamma$ , le membre de gauche de (2.35) devient :

$$\lim_{p \rightarrow M} \int_{\Omega} (\varphi \nabla^2) d\Omega = C \varphi(M) \quad (2.36)$$

Avec  $C = B/4\pi$  où  $B$  désigne l'angle solide sous lequel le point  $M$  voit la frontière  $\Gamma$ .

On obtient ainsi une équation qui lie entre elles les valeurs du potentiel  $\varphi$  et de sa dérivée normale ou composante normale du champ électrique  $\frac{\partial \varphi}{\partial n}$  à la surface d'un domaine :

$$C \varphi(M) = - \int_{\Gamma} \left( \varphi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) d\Gamma \quad (2.37)$$

L'équation (2.37) ainsi obtenue permet de calculer le potentiel et la composante normale du champ électrique en tout point appartenant à la frontière du domaine moyennant la connaissance de quelques conditions aux limites bien posées. Pour ce faire, il faut

résoudre numériquement l'équation (2.37) en discrétisant la frontière *du* domaine en éléments de frontière  $S_e$  afin de construire un système linéaire à résoudre. Cela permet d'écrire l'équation (2.38) sous la forme discrétisée suivante :

$$C\varphi(M) = - \sum_{e=S_e}^{e_{tot}} \int \left( \varphi \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right) dS_e \quad (2.38)$$

Où  $M$  est le point d'observation,  $e$  est le numéro d'élément,  $e_{tot}$  est le nombre total d'éléments utilisés pour discrétiser la surface  $\Gamma$  du domaine considéré.

En écrivant l'équation (2.38) sur chaque élément de frontière, en tenant compte des conditions d'interfaces et après introduction des conditions aux limites, on obtient un système linéaire de la forme suivante :

$$[A]\{X\} = \{B\} \quad (2.39)$$

Où  $X$  représente un vecteur constitué d'inconnues en potentiel  $\varphi$  et en composante normale du champ électrique  $\frac{\partial \varphi}{\partial n}$ ,  $[A]$  la matrice des coefficients relatifs au calcul des différents noyaux  $\int_{\Gamma} G d\Gamma$  et  $\int_{\Gamma} \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma$  et  $\{B\}$  le vecteur contenant les différentes conditions aux limites.

### 2.5.3.3. Avantages et inconvénients de la formulation directe

La formulation directe possède les mêmes avantages et inconvénients que la formulation indirecte mais elle permet en plus, ce qui en fait sa grande force, de travailler directement avec les grandeurs physiques cherchées c'est-à-dire le potentiel et sa dérivée normale. De plus, elle offre la possibilité de travailler en sous régions ce qui peut être intéressant lorsque l'on doit traiter des problèmes de grande taille et de forme allongée.

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

La *M.E.F*, outil numérique très puissant, est beaucoup utilisée dans la résolution des problèmes à domaine spatial fini [ASE1997], surtout en mécanique où elle a connu son plus fort développement. Cette méthode a été appliquée avec succès dans les problèmes de calcul de potentiel et de champs électriques [BOS 1991].

L'idée de la méthode est de chercher une solution approchée à une équation différentielle après une reformulation sous forme d'identité intégrale appelée forme faible ou variationnelle. Au lieu de chercher à satisfaire l'équation aux nœuds, on décompose ici le domaine

en sous domaines appelés éléments finis, et on impose la satisfaction des équations par sous domaine. L'introduction d'une approximation locale par sous domaine (dit élément fini) permet de contourner le problème de complexité des géométries car il suffit alors de choisir une approximation ou une décomposition (maillage) qui respecte la géométrie [XIN 2006].

### 2.6.1. Principe

Le principe de cette méthode consiste à diviser le domaine d'étude en plusieurs éléments finis (appelé maillage). C'est une étape très importante puisque le choix de la forme de l'élément de maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus. Il est donc nécessaire de trouver la forme et le degré d'approximation de celui-ci qui soient les plus adaptés à la géométrie du domaine d'étude. Il existe un grand nombre de formes géométriques pour les éléments de maillage tels que :

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

Sur chacun des éléments issus de la subdivision, la fonction qui modélise le phénomène est définie par une fonction d'interpolation. Souvent, on choisit des polynômes comme fonction d'interpolation pour les variables car ceux-ci sont faciles à intégrer ou à différencier. Le degré du polynôme dépend du nombre de nœuds assignés à chaque élément, de la nature et du nombre d'inconnues à chaque nœud et surtout du degré de dérivabilité des variables apparaissant dans la forme variationnelle associée aux E.D.P du problème avec conditions aux limites.

Ces fonctions d'interpolation permettent alors de donner une approximation du potentiel  $\varphi$ , notée  $\tilde{\varphi}$ , sur chaque élément en fonction de ses valeurs aux nœuds de l'élément comme suit [KAT, al1979] :

$$\tilde{\varphi} = \sum_{i=1}^{N_e} N_i \varphi_i \quad (2.40)$$

Avec  $N_e$  le nombre de nœud d'interpolation,  $N_i$  les fonctions d'interpolation  $\varphi_i$  et les valeurs nodales du potentiel.

Pour illustrer le principe de la M.E.F, on reprend l'exemple de l'équation de Laplace et on cherche à minimiser la quantité  $R$  telle que :

$$R = (\nabla^2 \tilde{\varphi}) \quad (2.41)$$

Parmi toutes les méthodes qui permettent d'annuler une grandeur dans un domaine  $\Omega$ , la méthode des résidus pondérés est bien connue et souvent utilisée. Elle consiste à choisir un ensemble de fonctions linéairement indépendantes  $W_n$ , appelées fonctions de projection, et annuler ainsi toutes les intégrales (2.42) sur chacun des éléments finis.

$$I_n = \int_{\Omega} W_n R d\Omega \quad (2.42)$$

On obtient ainsi une formulation intégrale forte de la méthode des éléments finis. Par la suite, une intégration par partie permet de diminuer le degré de dérivabilité de potentiel dont on cherche la solution approchée et d'augmenter celui du champ de pondération. Le choix du degré d'approximation sur l'élément sera alors sur le niveau de continuité requis par cette forme intégrale obtenue par intégration par partie que l'on appelle forme variationnelle ou faible.

La méthode des résidus pondérés conduit à des sous méthodes (Galerkine, moindre carré), selon le choix de la grandeur de pondération. Parmi toutes ces méthodes, la méthode de Galerkine est la plus utilisée. Elle consiste à prendre les mêmes expressions pour les fonctions de projection et les fonctions d'interpolation, ( $N_i = W_i$ ).

L'intégration par partie de l'équation (2.42) donne :

$$I_n = \int_{\Omega_e} grad \tilde{\varphi} \cdot grad W_n d\Omega + \int_{se} (grad \tilde{\varphi} \cdot n) grad W_n d\Omega \quad (2.43)$$

Pour chaque élément, on annule les intégrales  $I_n$  (2.43) de nombre  $n$  qui correspondent aux  $n$  fonctions de projection. On obtient un ensemble de  $n$  équations à  $n$  inconnues formant ainsi un système élémentaire pouvant s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$[A_e] \{\varphi_e\} = \{b_e\} \quad (2.44)$$

La matrice  $[A_e]$  est associée à l'élément considéré. Ses coefficients sont fonctions des coordonnées des nœuds de l'élément. Les composantes de  $\{\varphi_e\}$  sont les inconnues du potentiel électrique aux nœuds du même élément. Le vecteur  $\{b_e\}$  tient compte des éventuelles conditions aux limites présentes sur certains nœuds de l'élément considéré. En écrivant (2.45) pour tous les éléments constituant le maillage, on obtient un système

d'équations algébriques dont la solution fournit la distribution du potentiel dans le domaine étudié. La résolution du système final est simple puisque les équations obtenues sont linéaires et les matrices ainsi formées sont symétriques. Pour déterminer la distribution du champ électrique, il faut calculer la dérivée du potentiel par une méthode numérique adaptée.

### **2.6.2. Avantages de la M.E.F**

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

### **2.6.3. Inconvénients de la M.E.F**

- Dans les problèmes de calcul de champs électriques présentant un domaine spatial infini, l'établissement de la frontière artificielle peut causer certaines difficultés dans la réalisation d'un programme simple. D'une part, celle-ci doit être beaucoup plus vaste que le domaine d'étude, ce qui engendre un temps de calcul (en ce qui concerne le maillage) beaucoup plus important que pour des domaines finis. D'autre part, le choix de cette frontière à une grande importance dans la précision des calculs et son influence sur celle-ci doit être pris en compte dans tout programme de ce type.
- Il a été dit que la M.E.F était une méthode flexible car elle s'adapte facilement aux



différentes géométries, mais ce n'est pas le cas du maillage car celui-ci doit être entièrement refait si une modification sur une partie de la géométrie du problème considéré intervient.

- L'utilisation de la M.E.F pour la résolution d'un problème donné nécessite la connaissance parfaite de la géométrie du problème mais aussi des conditions aux limites; ce qui n'est pas toujours le cas.
- Une fois le potentiel connu en chaque nœud, il faut procéder à un autre calcul numérique pour déterminer le champ électrique en tout point ce qui peut engendrer d'autres erreurs.

La méthode des éléments finis utilise une approximation par morceau de la fonction inconnue pour résoudre une équation différentielle. On peut aussi utiliser les équivalences physiques pour chercher la solution d'une équation aux dérivées partielles. La méthode de simulation de charges en est une bonne illustration.

## **2.7. Conclusion**

Pour la méthode des différences finies, la répartition du potentiel se calcule directement. Cependant, elle présente l'inconvénient d'utiliser un nombre d'inconnues élevé lorsqu'il s'agit de travailler sur des configurations de formes complexes en deux ou trois dimensions pour lesquelles, le maillage régulier de la M.D.F n'est pas adapté. De plus, pour cette méthode, les approximations sont faites dans tout l'espace et cela constitue un handicap pour la résolution de problèmes non bornés. La méthode de simulation de charges pose un problème de localisation des charges fictives, par contre, elle est très bien adaptée pour la modélisation de configurations complexes comme celle des isolateurs capot et tige en verre ou en porcelaine. La méthode des éléments finis de frontière semble présenter des avantages importants par rapport aux précédentes. En effet, la recherche de la solution étant ramenée sur les frontières, le nombre d'inconnues est considérablement réduit. Cette méthode est donc très pratique pour l'étude des problèmes tridimensionnels et s'adapte de façon naturelle à la résolution des problèmes ouverts. La méthode des éléments finis est une application toute appropriée dans le cas d'isolateurs sains ou pollués. C'est pourquoi cette méthode a été retenue pour réaliser les différentes simulations qui sont présentées dans le chapitre suivant.

# DETERMINATION EXPERIMENTALE DES DIMENSIONS DE L'ISOLATEUR ETUDIE

### 3.1. Introduction

Les dimensions disponibles dans les data-sheets des constructeurs sont insuffisants pour permettre d'implanter la forme géométrique très complexe de l'isolateurs capot et tige en verre. Ce type d'isolateurs a été choisi dans ce travail puisque il constitue l'isolateur le plus répandu dans les réseaux de la SONEGAS. Pour remédier à ce problème des mesures métrologiques se sont avérées nécessaires pour la suite de ce travail. A cet effet nous avons fait appel au laboratoire de métrologie de l'ex département d'optique et de mécanique de précision de l'université pour réaliser des mesures sur des isolateurs en verre. Dans la suite nous présenterons ces mesures qui sont l'essence de la partie concernant l'implantation du modèle élément finis dans le logiciel COMSOL Multiphysics version 3.4.

### 3.2. Présentation de l'isolateur étudié

L'isolateur étudié est représenté dans la figure 3.1. Pour faciliter la mesure des dimensions du capot et de la tige on a brisé un isolateur semblable.

### 3.3. Instruments usuels de mesure

Les instruments usuels de mesure de longueur sont par définition des instruments d'usage courant, ne nécessitant ni une formation trop longue ni haut niveau de connaissance, et donc utilisant des principes de mesure simple [BER1997].

Les instruments dits usuels d'aujourd'hui sont généralement des instruments qui étaient déjà utilisés dans le courant du siècle dernier, voire avant pour le pied à coulisse ou micromètre, dont les premiers instruments datent de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle.



Fig. 3.1 *Isolateur capot et tige étudié*



Fig. 3.2 *le pied à coulisse [BER1997]*

Le principe du vernier consiste à placer une réglette gravée, proche de la règle, le plus souvent sur une partie biseautée au-dessus de celle-ci. Le vernier le plus courant est le vernier au  $1/50\text{mm}$ , la règle est gravée tous les millimètres et le vernier est constitué de 50 traits sur 49 mm ; pour le vernier au  $1/20\text{mm}$ , il comporte 20 traits sur 19mm, et enfin pour le vernier au  $1/10\text{ mm}$  (qui n'est pratiquement plus utilisé aujourd'hui), il comporte 10 traits sur 9mm.

Le micromètre, souvent encore appelé du nom de son inventeur J.L.Palmer en 1848, est constitué d'une vis de précision, la lecture étant effectuée à l'aide d'un tambour gradué pour les instruments au  $1/100\text{mm}$  et parfois à l'aide d'un vernier pour les instruments au  $1/1000\text{mm}$ .



Fig. 3.3 *Le micromètre* [BER1997]



Fig. 3.4 *Le Comparateur* [BER1997]

Les comparateurs ont permis la mise au point de toute une métrologie. Il est vrai que toute mesure est une comparaison, mais les habitudes sont telles que l'appellation comparaison est plus réservée aux méthodes de mesure dans lesquelles la pièce à mesurer est « comparée » à un étalon de même nature, c'est-à-dire même forme de surface et dimension proche de la dimension de la pièce.

### 3.4. L'incertitude de mesurage

L'incertitude de mesurage est un paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurable.

Le paramètre peut être, par exemple, un écart-type (ou un multiple de celui-ci) ou la demi largeur d'un intervalle de niveau de confiance déterminé.

L'incertitude de mesure comprend, en général, plusieurs composantes. Certaines peuvent être évaluées à partir de la distribution statistique des résultats de séries de mesurage et peuvent être caractérisées par des écart-types expérimentaux. Les autres composantes, qui peuvent aussi être caractérisées par des écart-types, sont évaluées en admettant des distributions de probabilité, d'après l'expérience acquise ou d'après d'autres informations. Différents facteurs influent sur un résultat de mesurage.

Ce qui engendre des erreurs d'incertitudes. On cite à titre d'exemple les cinq facteurs suivants :

- Environnement,
- Méthode de mesurage
- Opérateur,
- Pièce à mesurer

### 3.5. Principaux caractéristiques d'un instrument de mesure

- Les principales caractéristiques d'un instrument de mesure sont résumées dans les points suivants :

- 1) **Etendue de Mesure (Capacité)** : Ensemble des valeurs d'une grandeur à mesurer pour lesquelles l'erreur d'un instrument de mesure est supposée maintenue entre des limites spécifiées. Les limites supérieures et inférieures de l'étendue spécifiée sont parfois appelées respectivement «portée maximale» et «portée minimale».
- 2) **Résolution** : C'est la plus petite différence d'un dispositif afficheur qui peut être aperçue d'une manière significative. Pour les appareils à affichage numérique, on considère que le dernier chiffre affiché est connu à une unité près.
- 3) **Sensibilité** : C'est le quotient de l'accroissement de la réponse par l'accroissement de signal d'entrée. Rapport entre l'accroissement de la réponse ( $\Delta d$ ) sur l'accroissement de la grandeur mesurée ( $\Delta m$ ) : 
$$S = \frac{\Delta d}{\Delta m}$$
- 4) **Justesse** : C'est l'aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications *exemptes d'erreur systématiques*. L'erreur de justesse de l'instrument dépend de la qualité de fabrication de l'instrument : C'est la composante systématique de l'erreur d'un instrument de mesure (paramètre de position).

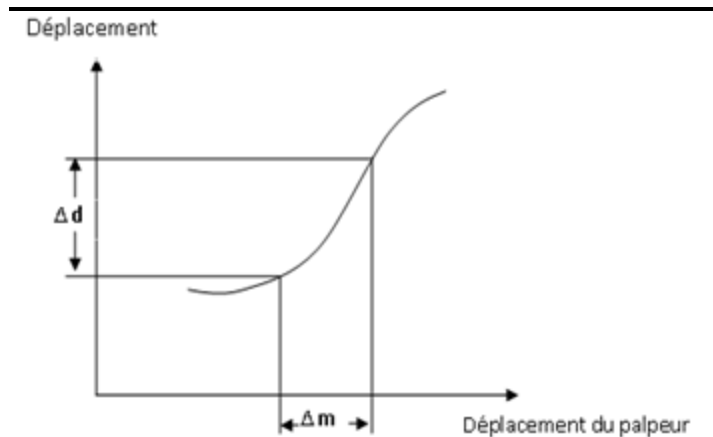


Fig. 3.5 Sensibilité d'un appareil de mesure.

$$J = M - \bar{M} \quad (3.1)$$

$$\bar{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i \quad (3.2)$$

$J$  : Erreur de justesse.

$\bar{M}$  : Moyenne de  $n$  valeurs mesurées  $M_i$ .

$M$  : valeur conventionnellement vraie.

4) **Fidélité** : C'est l'aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisines lors de l'application répétée de la même mesurant dans les mêmes conditions de mesure qui comprennent :

- Réduction en minimum de variation du à l'observateur
- Même observateur
- Même mode opératoire (Même instrument, même condition de mesure)
- Même lieu
- Répétition durant une constante période de temps

On a comme valeur de l'écart type :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^{i=n} (M - \bar{M})^2} \quad (3.3)$$

L'erreur de fidélité est égale à 6 fois la valeur de l'écart type :

$$F = 6. \sigma \quad (3.4)$$

### 3.6. Erreur systématique

C'est la moyenne qui résulterait d'un nombre finie de mesurage de même mesurant effectué dans les conditions de répétitivité moins la valeur vraie de mesurant (Conventionnellement vraie). L'erreur systématique et ses causes peuvent être déterminées complètement.

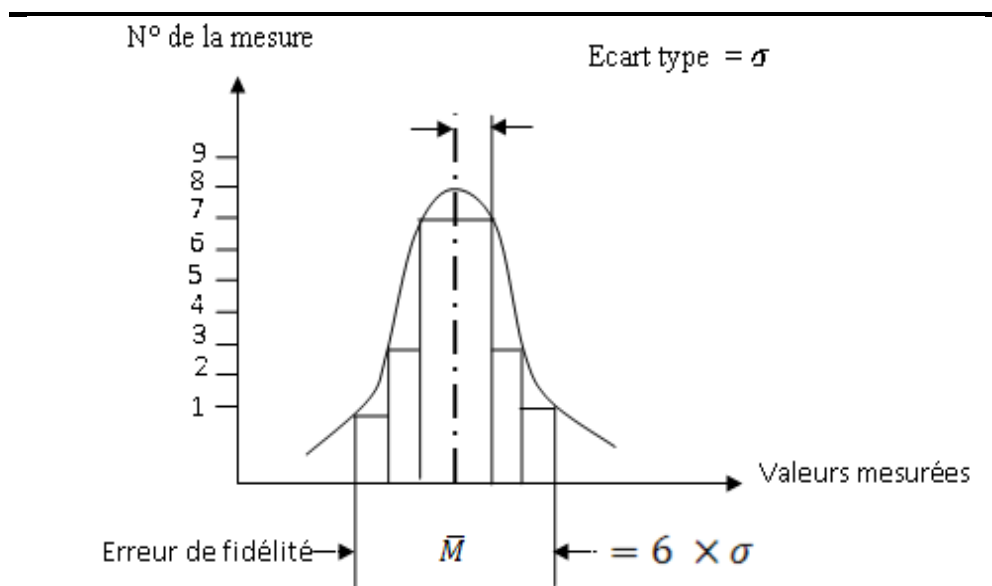


Fig. 3.6 Présentation d'erreur de fidélité et l'écart type [BER1997]

### 3.7. Mesure des dimensions de la surface

La forme extérieure de la jupe est très complexe, on prend des points spécifiées par deux cordonnés (x, y) avec un pas de 2cm. on utilisant le comparateur pour mesurer la surface, comme montre la figure. 3.7.

La jupe est la partie la plus intéressante dans l'isolateur, pour cette raison on a concentré nos mesures sur la courbure extérieure pour implanter la géométrie avec une bonne précision.

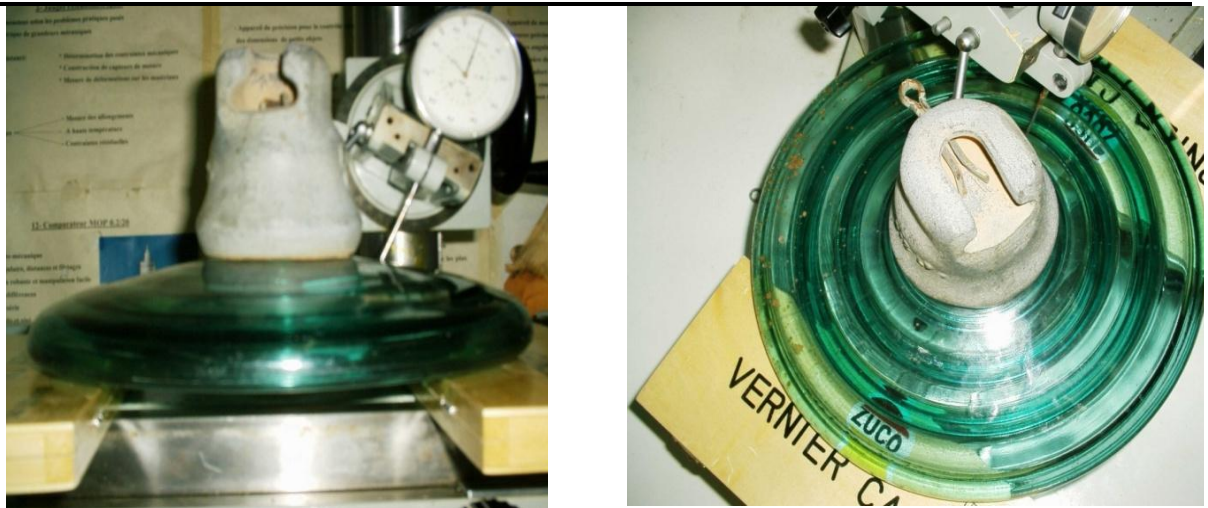


Fig. 3.7 Mesure des dimensions de la surface.

Les résultats de mesures sont résumés dans le tableau 4.1

N° de la mesure	1	2	3	5	6	7	8	9	10
X (cm)	0	2	4	8	10	12	14	16	18
Y (cm)	0,00	1,60	1,94	3,47	4,10	4,70	5,35	6,60	6,74
	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	20	22	24	26	28	30	32	34	36
	7,58	8,00	8,47	9,00	9,48	10,10	10,55	11,11	11,45
	20	21	22	23	24	25	26	27	28
	38	40	42	44	46	48	50	52	54
	12,60	12,34	12,67	13,00	13,38	13,78	14,85	14,25	14,53
	29	30							
	56	58							
	14,88	15,41							

Tableau 3.1 Dimensionnement de la courbe à l'extérieur à la surface de l'isolateur

### 3.8. Mesure des dimensions de la jupe de l'isolateur.

Une première étape a été consacrée à la mesure du diamètre extérieur de l'isolateur (Fig. 3.8). Cinq mesures ont été effectuées dans ce cas à l'aide d'un pied à coulisse comme il est montré dans le tableau 3.2.



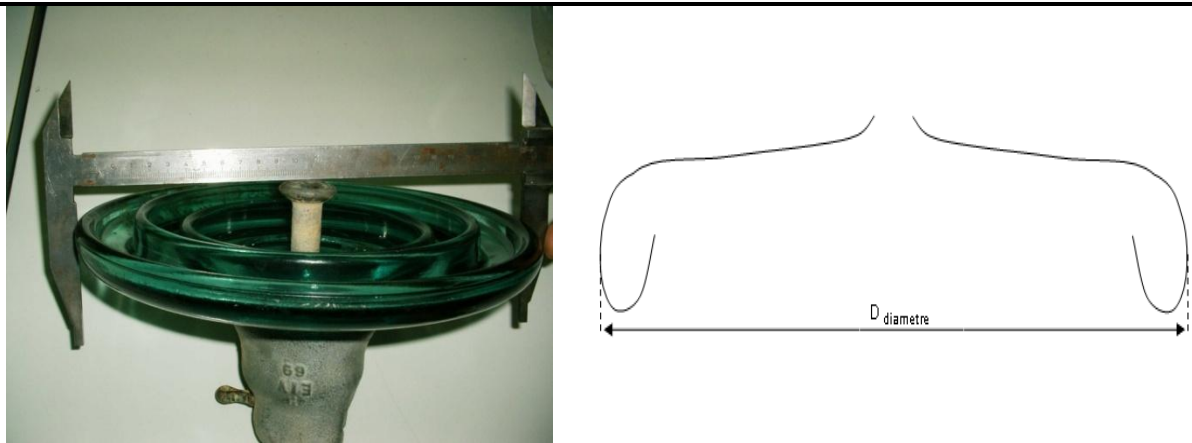


Fig. 3.8 Mesure du diamètre de l'isolateur.

N° de la mesure	1	2	3	4	5	$\bar{x}_k$ (mm)
Diamètre de la jupe (mm)	256,0	256,5	256,4	256,7	256,4	256,4
Erreur $\epsilon_d$ %	0,156	0,04	0	0,11	0	
Pas de l'isolateur P en (mm)	145,1	145,5	145,5	145,6	145,5	145,44
Erreur $\epsilon_p$ %	0,23	0,04	0,04	0,11	0,04	

Tableau 3.2 Résultats de mesure du diamètre et du pas de l'isolateur

### 3.9. Mesure des dimensions des nervures de l'isolateur.

Cette étape nous a permis d'accéder aux différentes dimensions des nervures des isolateurs qui sont totalement introuvables dans la littérature. La figure 3.9 montre la procédure et les instruments utilisés à cette fin.

Les valeurs de mesure obtenues sont résumées dans le tableau 3.3

Les nervures	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$	$e_7$	$e_8$
Les mesures	11,10	12,00	13,50	13,70	12,24	10,00	10,00	9,00

Tableau 3.3 Valeurs des mesures obtenues des dimensions des nervures de l'isolateur

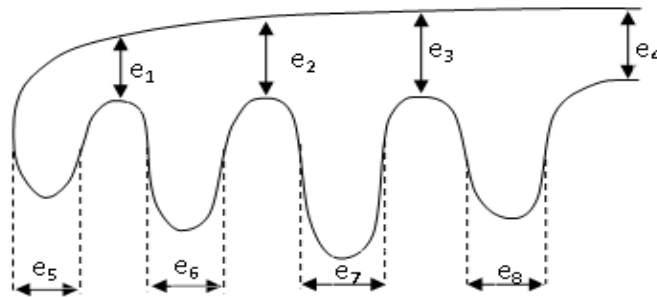


Fig. 3.9 Mesure des dimensions de la jupe de l'isolateur

### 3.10. Mesure des dimensions de la tige

En utilisant le pied à coulisse pour identifier les dimensions de la tige, elle est divisée à deux parties, l'une fixée dans le capot par le ciment, et l'autre utilisée pour porter d'autre élément. La tige est fabriquée avec des matériaux très résistifs aux contraintes mécaniques. La valeur moyenne de mesure indiquée dans le tableau a été calculée par :

$$\bar{x}_k (mm) = \sum_{i=1}^5 \frac{x_i}{5}; \quad k = d \text{ ou } p \quad (3.5)$$

L'erreur par rapport à la moyenne est calculée selon la formule :

$$\varepsilon_k = \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} \quad (3.6)$$

Avec :  $k = L, L_1, L_2, D$  ou  $d$

Les résultats des mesures pour les différentes dimensions de la tige sont résumés dans le tableau 3.4

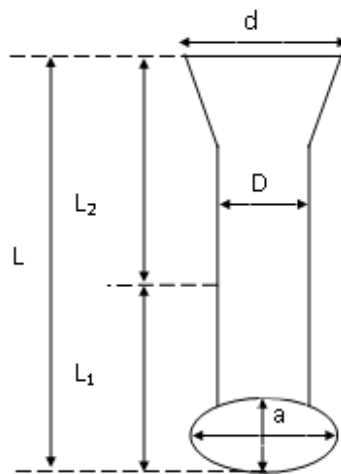


Fig. 3.10 Mesure des dimensions de la tige de l'isolateur

N° de la mesure	1	2	3	4	5	$\bar{x}_k$ (mm)
Longueur totale de la tige $L$ (mm)	95,30	95,40	95,20	95,10	95,20	95,04
Erreur $\epsilon_L$ %	0,27	0,00	0,17	0,06	0,17	----
Longueur extérieur $L_1$ (mm)	40,00	40,20	40,00	40,10	39,90	40,04
Erreur $\epsilon_{L_1}$ %	0,09	0,40	0,09	0,15	0,35	----
Longueur intérieur $L_2$ (mm)	55,3	55,20	55,20	55	54,30	55,00
Erreur $\epsilon_{L_2}$ %	0,54	0,36	0,36	0,00	1,27	----
Diamètre $D$ (mm)	16,50	16,60	16,50	16,30	16,60	16,50
Erreur $\epsilon_D$ %	0,00	0,6	0,00	1,21	0,6	----
Diamètre $d$ (mm)	29,00	29,00	28,25	29,00	29,10	29,03
Erreur $\epsilon_d$ %	0,10	0,10	2,68	0,10	0,24	----
Distance $a$ (mm)				15,00		
Distance $b$ (mm)				29,00		

Tableau. 3.4 Mesure des dimensions de la tige de l'isolateur

### 3.11. Mesure les dimensions de capot

La forme de capot est non uniforme, on prend les mesures dans les gorges comme montre la figure. 3.11.

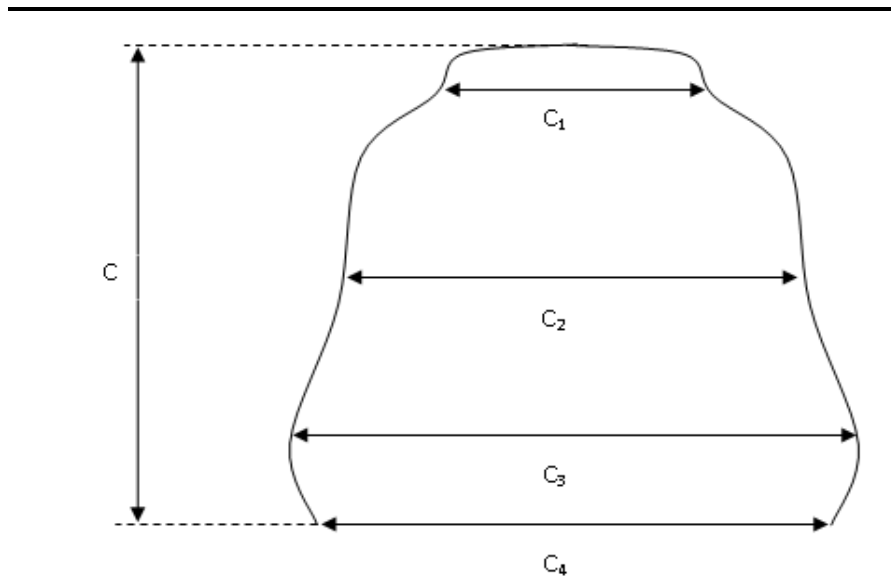


Fig. 3.11 Mesure des dimensions de capot de l'isolateur

Les paramètres du capot	C	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
Les mesures effectuées en (mm)	89,7	57,0	71,6	87,0	85,4

Tableau. 3.5 Valeurs de Mesure obtenues des dimensions du capot de l'isolateur

### 3.12. Conclusion

Dans les catalogues donnés par les constructeurs parlent tous simplement sur le pas, le diamètre de l'isolateur et la ligne de fuite, la ou nous avons trouvé une difficulté pour implanter la géométrie exacte de l'isolateur, pour cette raison on a effectué les mesures dimensionnelles du modèle étudié. ces derniers ont réalisé à le laboratoire de métrologie physique au département de mécanique à l'université de Ferhat Abbas Sétif.

# REPARTITION DE LA TENSION LE LONG D'ISOLATEUR CAPOT ET TIGE EN VERRE

### 4.1. Introduction

L'objectif principal de cette simulation est de calculer la distribution du potentiel et du Champ électrique le long d'une chaîne d'isolateurs type capot et tige en verre. Comme il était très difficile de mesurer expérimentalement de façon précise la distribution du potentiel et surtout du champ électrique le long d'un Isolateur, l'utilisation d'une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel s'est avérée être une des meilleures solutions. À cet effet, la méthode des éléments finis est la mieux adaptée au problème posé. L'utilisation et l'application des logiciels basés sur cette méthode numérique couvrent généralement un domaine plus vaste que le problème étudié et dans certains cas, ils ne répondent pas aux exigences spécifiques d'un problème. Cependant, ils offrent souvent une interface simplifiant la modélisation du problème (interface de conception et définition des propriétés des matériaux), la résolution du problème (définition des conditions initiales et conditions aux limites, maillage automatique ainsi que différents solveurs) et enfin, la visualisation des résultats (affichage des résultats sous forme de courbes, d'équipotentiels, de vecteurs, etc...).

Cette dernière solution a ainsi été retenue pour réaliser les différentes simulations. Une description rapide du logiciel et de ses capacités est présentée dans la section suivante.

### 4.2. Description du logiciel

Parmi les différents logiciels disponibles nous avons utilisé COMSOL multiphysics version 3.4. Le logiciel possède un environnement interactif puissant pour modéliser et résoudre beaucoup problèmes scientifiques et d'ingénierie basés sur des équations aux dérivées partielles (EDP).

Il a été retenu pour les raisons suivantes :

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

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

Ce logiciel utilise la formulation intégrale de la *M.E.F.* dont le principe a été décrit au chapitre 2.

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

- ❖ La première étape consiste à définir la géométrie entière de modèle l'isolateur par l'intermédiaire d'une interface graphique de conception.
- ❖ La deuxième étape porte sur la définition des propriétés électriques des matériaux présents. Cela consiste à définir les permittivités relatives et les conductivités de chaque domaine. De plus, il faut faire le choix du type d'analyse, c'est-à-dire soit statique ( $f=0$  Hz) ou soit quasi-statique ( $f=50$  Hz).
- ❖ Dans la troisième étape on définit les conditions aux limites qui se traduisent par le potentiel imposé sur chaque électrode et déterminer les frontières de l'isolation électrique c'est-à-dire les frontières où le champ électrique peut être considéré comme nul.
- ❖ La quatrième étape consiste en la résolution du problème par l'application de la méthode numérique.
- ❖ La dernière étape consiste à l'affichage des résultats obtenus parmi les quels les équipotentielles, la norme du champ électrique et ses composantes normales et tangentielles, etc.

### 4.3. Géométrie de l'isolateur

Dans ce travail, les simulations numériques sont réalisées sur un modèle capot et tige en verre trempé utilisé actuellement dans les réseaux de la SONEGAS de type E120/146. Selon la CEI (Commission Electrotechnique Internationale), le pas de cet élément est de 146mm, son diamètre moyen  $\phi$  est d'environ 255mm, tandis que la ligne de fuite est autour de 315mm. Les caractéristiques de cet isolateur sont résumées dans le tableau 4.1.

Caractéristiques dimensionnelles	Pas (P) mm	146
	Diamètre (D) mm	255
	Ligne de fuite mm	315
	Désignation de l'assemblage	16A
Caractéristiques électriques	Tension tenue a fréquence industrielle à sec (kV)	70
	Tension tenue a fréquence industrielle à sec (kV)	40
	Tension tenue au choc (kV)	100
	Tension perforation dans l'huile (kV)	130
Caractéristiques emballage	Poids net approximatif (kg)	3,8
	N° de l'isolateur/caisse bois	6

Tableau 4.1 les différentes caractéristiques de l'isolateur capot et tige type E120/146

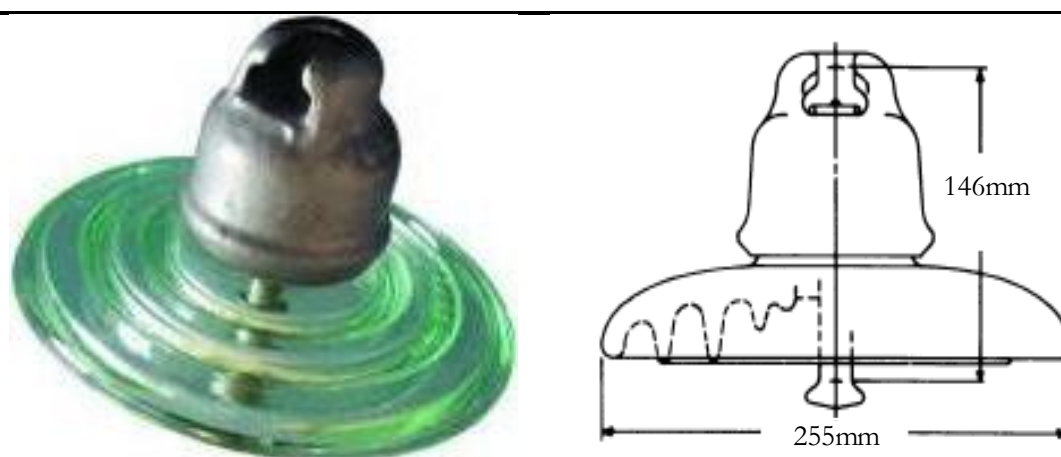
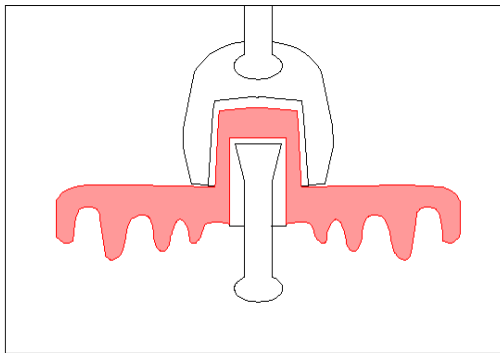


Fig. 4.1 Géométrie d modèle

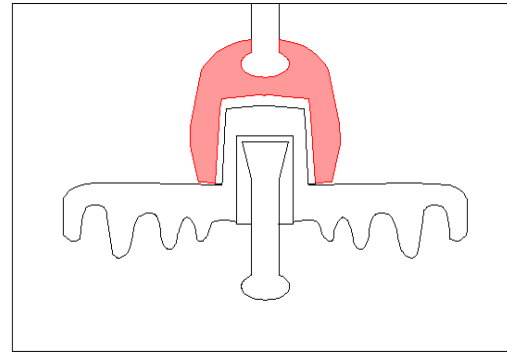
#### 4.4. Identification des domaines dans le logiciel FEMLAB

Il existe cinq domaines, chacun est caractérisé par la constante diélectrique relative  $\epsilon_r$  et la conductivité  $\sigma$ . On tire ces valeurs à l'aide de la bibliothèque des matériaux s'il existe, sinon on cherche dans les revues bibliographiques.

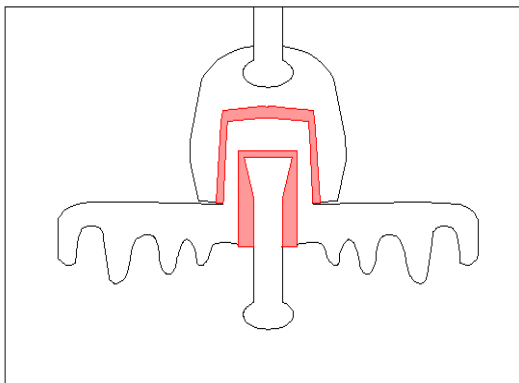
Les caractéristiques électriques des domaines sont résumées dans le tableau. 4.2



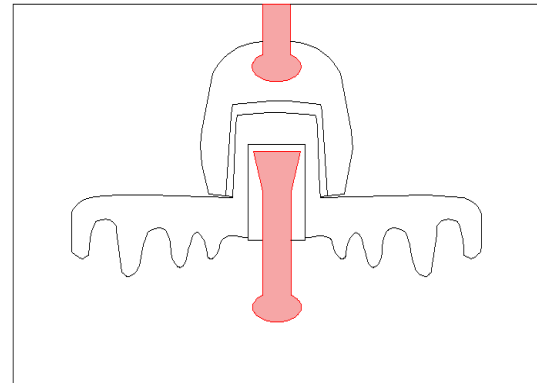
a) *Domaine du verre trempé*



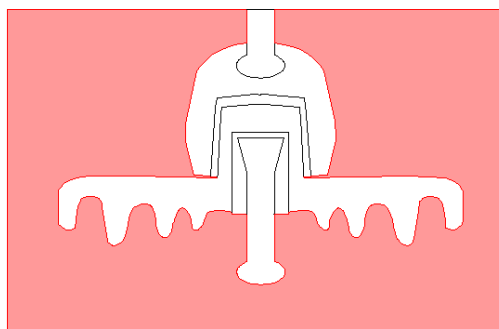
b) *Domaine de la fonte malléable*



c) *Domaine de ciment alumineux*



d) *Domaine de l'acier*



e) *Domaine de l'air*

Fig. 4.2 *Identification des différents domaines de l'isolateur*



Matériau	Constante diélectrique relative $\epsilon_r$	Conductivité $\sigma$ .
<i>Verre trempé</i>	4,20	$10^{-14}$
<i>Fonte malléable</i>	1,00	$4,03.10^6$
<i>Ciment alumineux</i>	5,90	$10^{-10}$
<i>Acier</i>	1,00	$4,0010^6$
<i>Air</i>	1,00	0,00

Tableau.4.2 *Caractéristiques électriques des différents domaines*

#### 4.5. Conditions aux limites

La figure 4.3 représente les conditions aux limites concernant le modèle de l'isolateur étudié.

- **L'isolation électrique** : les traits en bleu présente les conditions aux limites d'isolation électrique qui est régie selon l'équation de suivant :

$$n \cdot j = 0 \quad (4.1)$$

- **Les deux électrodes** : pour le cas étudié, nous avons pris comme conditions aux limites pour l'électrode qui est en noir et supérieur du capot un potentiel nul (0kV) de valeur et celui qui en rouge un potentiel de valeur 20kV.

#### 4.6. Visualisation des résultats et analyse

Dans notre cas l'isolateur est propre, en examinant les résultats de simulation présentés dans la figure 4.4, 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.

Le maillage simple est suffisant pour la résolution de problème, on peut faire le maillage fin pour but de limiter l'erreur de calcul.

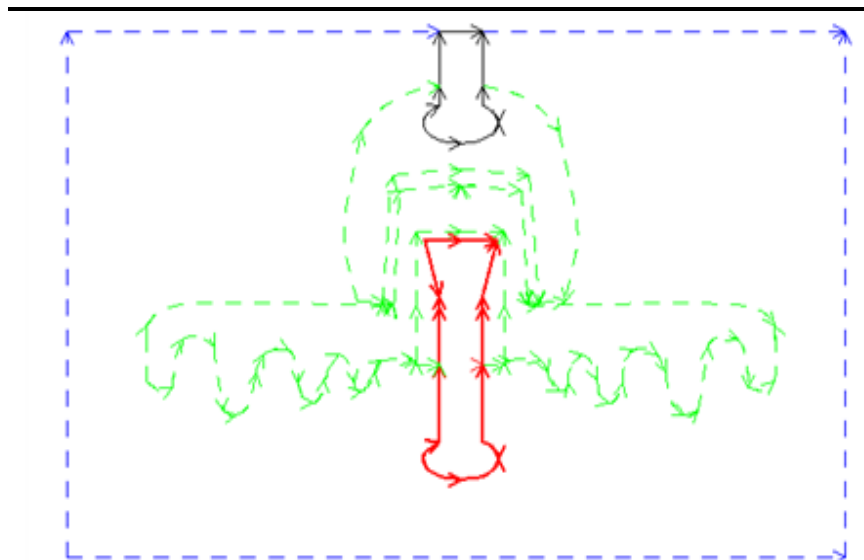
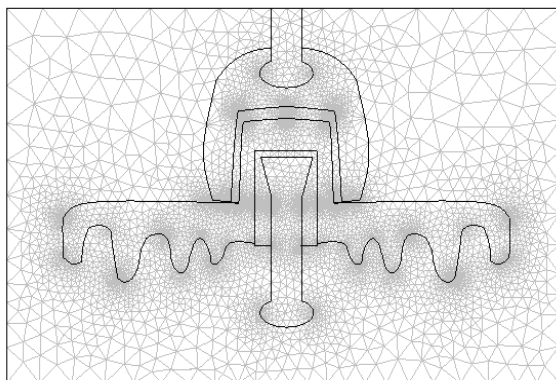
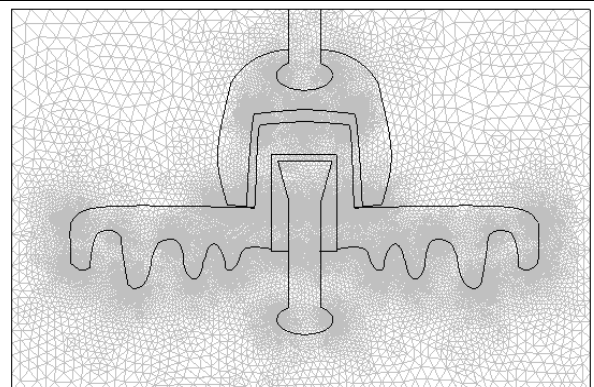


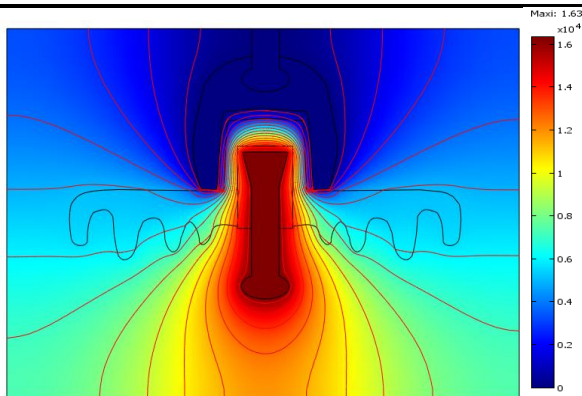
Fig. 4.3 Conditions aux limites



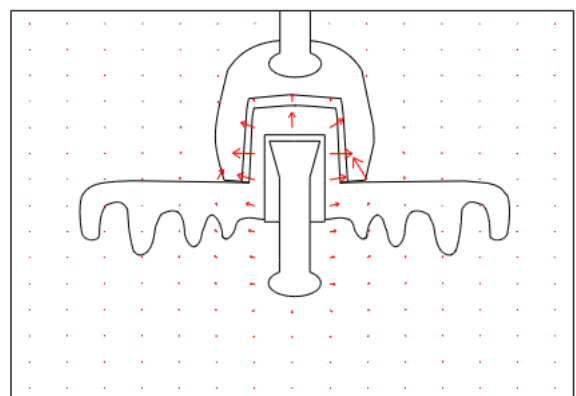
a) Maillage simple (19769 éléments)



b) Maillage fin (79076 éléments)



c) Potentiel électrique



d) Champ électrique

Fig. 4.4 Résultats obtenus pour l'isolateur étudié

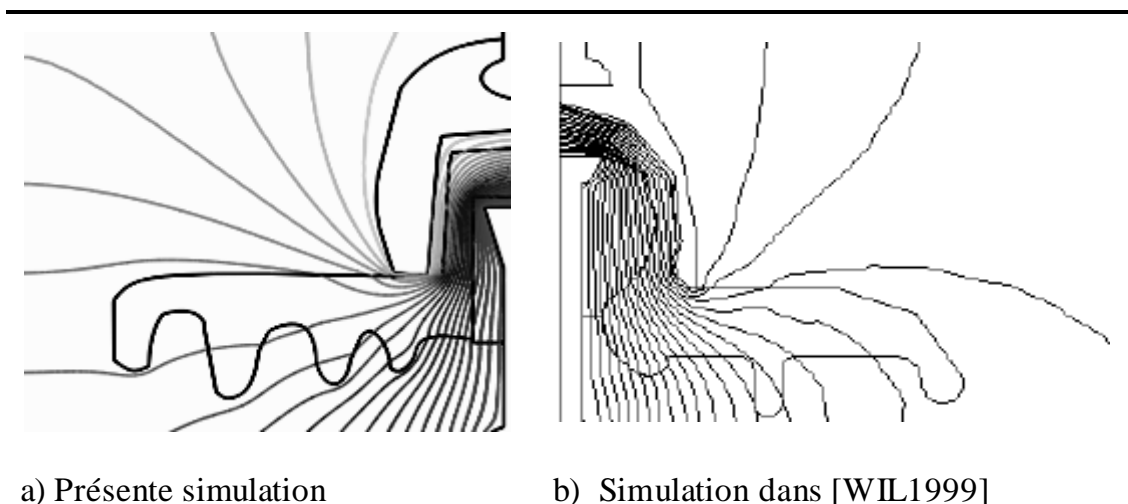


Fig. 4.5 Comparaison des résultats de simulation

On faites une comparaison entre présence simulation et le référence [WIL1999], les lignes équipotielles sont concentré dans l'isolation (verre), et diminué dans les parties conductrices

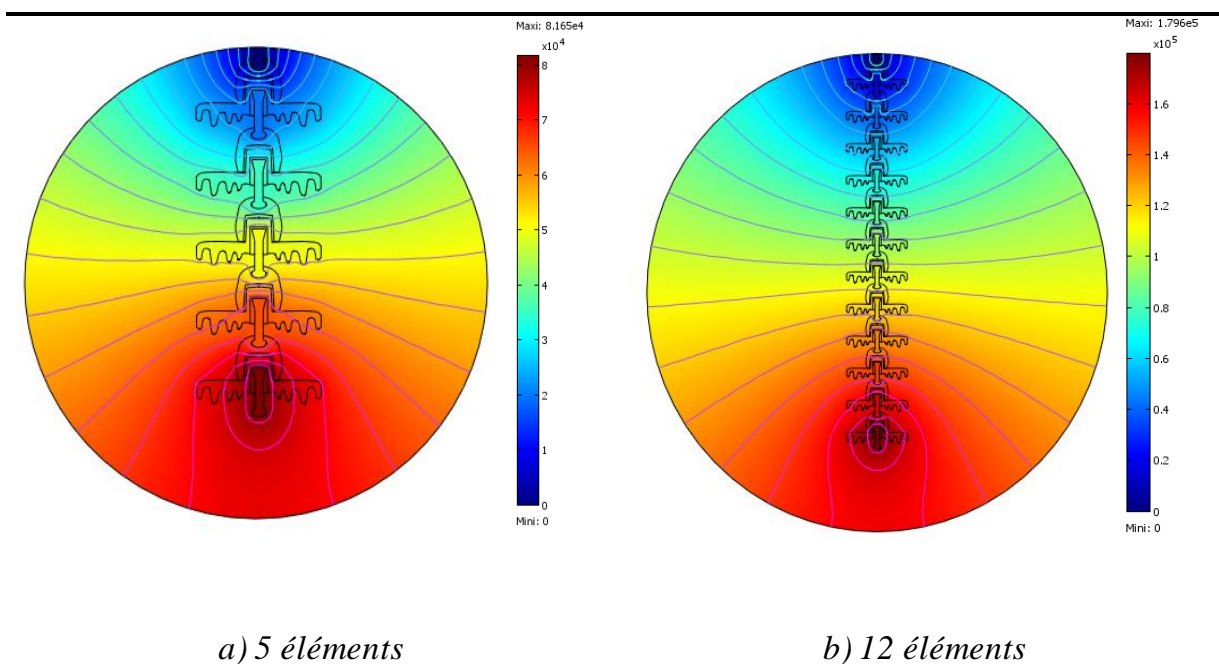
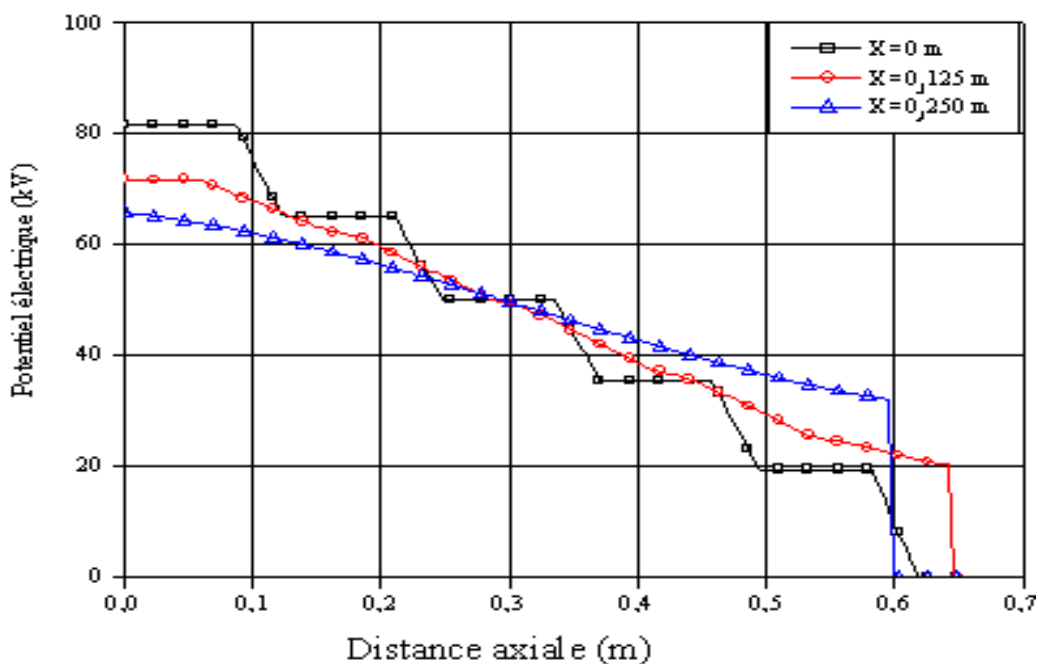
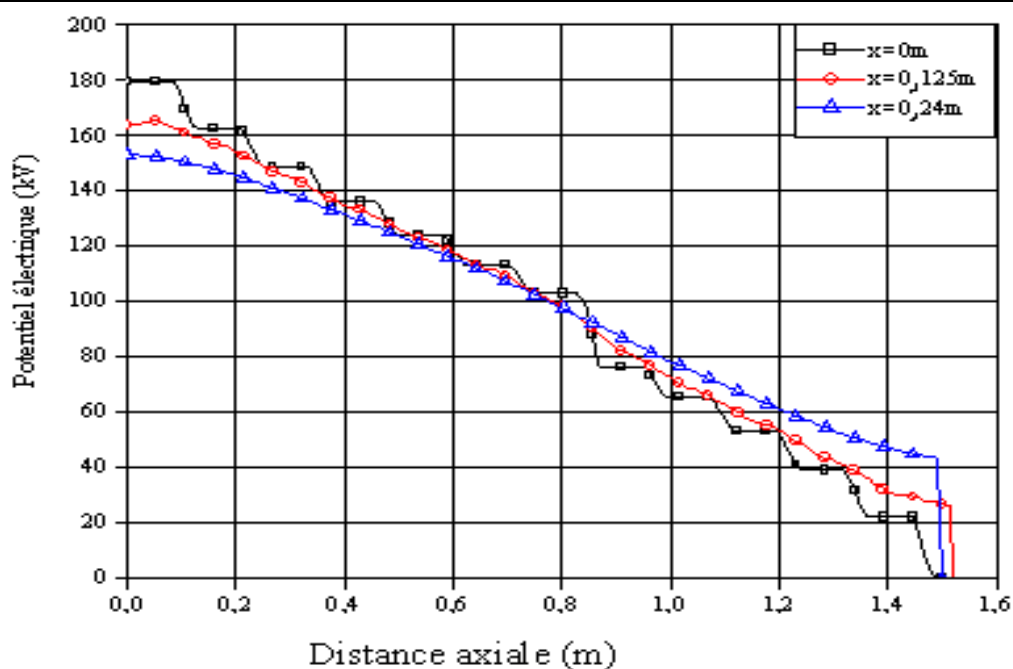


Fig. 4.6 Distribution des lignes équipotielles sur une chaîne d'isolateurs

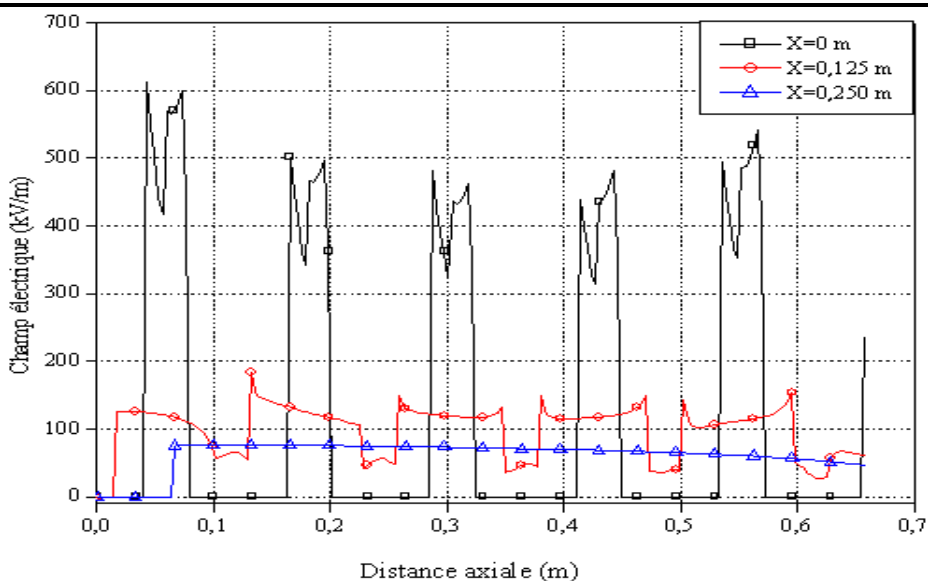


a) 5 éléments

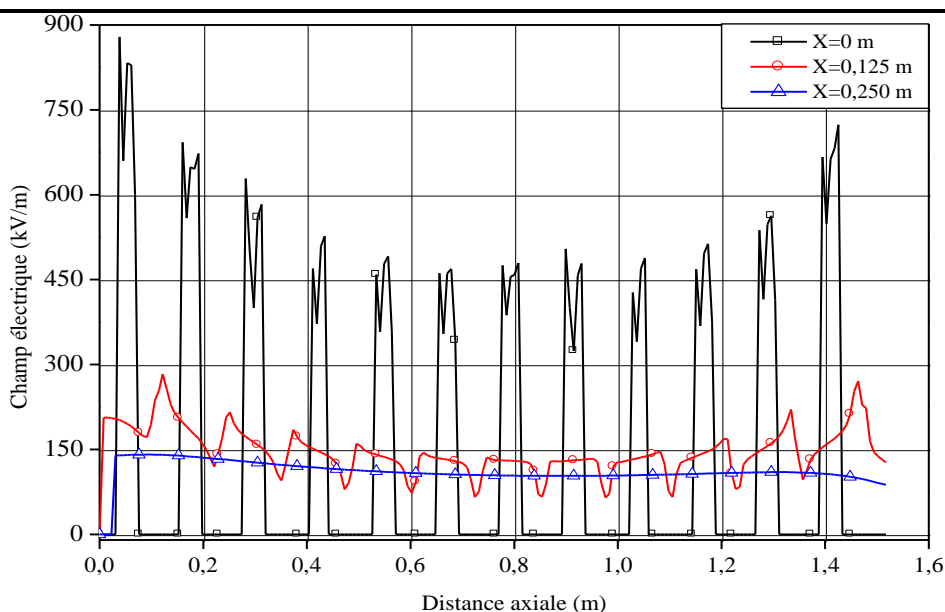


b) 12 éléments

Fig. 4.7 Variation du potentiel électrique en fonction de la distance axiale de la chaîne



a) 5 éléments



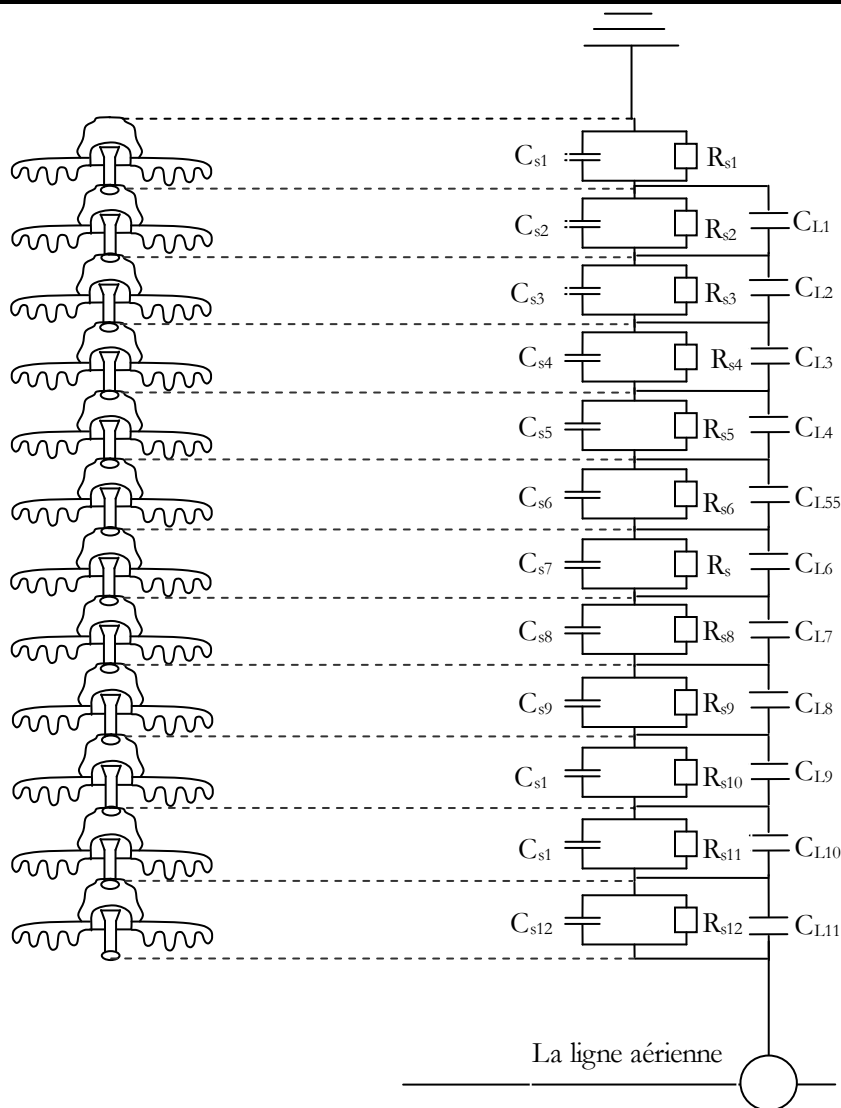
b) 12 éléments

Fig. 4.8 Variation du champ électrique en fonction de la distance axiale de la chaîne

### 4.7. Circuit équivalent de la chaîne d'isolateurs

Dans cette partie nous présenterons le circuit équivalent complet développé pour la simulation des performances de l'isolateur capot et tige en verre sous les conditions propres soumis à une tension alternative. Nous présenterons aussi les détails de modélisation de ces différentes parties. Ce circuit équivalent, illustré dans la figure 4.9, se

compose d'un réseau de cellules R-C parallèle qui représente les résistances et les capacités propres des éléments de la chaîne. Chacune de ces cellules représente donc la surface isolante en verre. Etant donné la présence de capacités parasites contre terre et contre la ligne, non négligeables par rapport à la capacité d'un élément de chaîne d'isolateurs, ces éléments ont été pris en considération puisque ils jouent un rôle important dans la détermination de la répartition de tension le long de la chaîne.



$C_{s1}, C_{s2}, C_{s3} \dots$  : Capacités des éléments de la chaîne.

$C_{L1}, C_{L2}, C_{L3} \dots$  : Capacités parasites des éléments de la chaîne contre ligne.

$R_{s1}, R_{s2}, R_{s3} \dots$  : Résistances des éléments de la chaîne.

Fig. 4.9 Circuit équivalent d'une chaîne d'isolateur

#### 4.8. Calcul des paramètres du circuit équivalent

La méthode des éléments finis a été employée via le logiciel COMSOL multiphysics version 3.4 pour calculer les distributions de tension et du champ électrique le long d'une chaîne d'isolateur. Les valeurs du champ électrique calculées sont employées pour obtenir l'énergie électrique emmagasinée dans différents éléments de la chaîne. Ces valeurs d'énergie combinées avec les potentiels calculés permettent la détermination des diverses capacités du circuit équivalent.

Dans ce qui suit une brève description de la méthode qui a servi pour la détermination des paramètres est donnée.

Par définition, la capacité est donnée par l'expression suivante :

$$C = \frac{Q}{V} \quad (4.2)$$

$$Q = C.V \quad (4.3)$$

$V$  : tension entre conducteurs.

$Q$  : charge des conducteurs positifs et négatifs.

L'énergie emmagasinée dans un condensateur est donnée par l'expression :

$$W_e = \frac{Q^2}{2.C} \quad (4.4)$$

Ce qui devrait être à l'énergie du champ électrique, donnée par :

$$w_e = \int_{\Omega} D.E dV \quad (4.5)$$

Alors la capacité peut être obtenue par :

$$C = \frac{Q^2}{W_e} \quad (4.6)$$

Combinant l'équation (4.3) dans l'équation (4.6) on obtient la formule (4.7) utilisée pour calculer les valeurs des capacités des éléments de la chaîne.

$$C = \frac{2.W_e}{V^2} \quad (4.7)$$

Pour calculer la résistance unitaire de l'isolateur D'autre part, la résistance du cylindre équivalent est : Alors le courant qui passe est très faible, et on peut écrire :

$$R = \frac{V}{I} \quad (4.9)$$

Capacités des éléments ( $\mu\text{F}$ )	Capacités contre ligne ( $\mu\text{F}$ )	Capacités contre terre ( $\mu\text{F}$ )	Résistances des éléments ( $\text{M}\Omega$ )
$C_{s1} = 4,17.10^{-5}$	$C_{L1} = 0,41.10^{-5}$	$C_{t1} = 4,44.10^{-5}$	$R_{s1} = 22,90.10^8$
$C_{s2} = 4,54.10^{-5}$	$C_{L2} = 0,44.10^{-5}$	$C_{t2} = 2,22.10^{-5}$	$R_{s2} = 23,38.10^8$
$C_{s3} = 4,59.10^{-5}$	$C_{L3} = 0,48.10^{-5}$	$C_{t3} = 1,26.10^{-5}$	$R_{s3} = 23,50.10^8$
$C_{s4} = 4,62.10^{-5}$	$C_{L4} = 0,54.10^{-5}$	$C_{t4} = 1,01.10^{-5}$	$R_{s4} = 23,80.10^8$
$C_{s5} = 4,55.10^{-5}$	$C_{L5} = 0,63.10^{-5}$	$C_{t5} = 0,88.10^{-5}$	$R_{s5} = 24,00.10^8$
$C_{s6} = 4,54.10^{-5}$	$C_{L6} = 0,72.10^{-5}$	$C_{t6} = 0,54.10^{-5}$	$R_{s6} = 24,00.10^8$
$C_{s7} = 4,67.10^{-5}$	$C_{L7} = 0,80.10^{-5}$	$C_{t7} = 0,57.10^{-5}$	$R_{s7} = 24,00.10^8$
$C_{s8} = 4,66.10^{-5}$	$C_{L8} = 1,00.10^{-5}$	$C_{t8} = 0,50.10^{-5}$	$R_{s8} = 24,00.10^8$
$C_{s9} = 4,65.10^{-5}$	$C_{L9} = 1,30.10^{-5}$	$C_{t9} = 0,45.10^{-5}$	$R_{s9} = 23,00.10^8$
$C_{s10} = 4,70.10^{-5}$	$C_{L10} = 1,75.10^{-5}$	$C_{t10} = 0,47.10^{-5}$	$R_{s10} = 22,00.10^8$
$C_{s11} = 4,94.10^{-5}$	$C_{L11} = 2,57.10^{-5}$	$C_{t11} = 0,37.10^{-5}$	$R_{s11} = 21,00.10^8$
$C_{s12} = 5,77.10^{-5}$	$C_{L12} = 5,77.10^{-5}$	$C_{t12} = 0,34.10^{-5}$	$R_{s12} = 16,00.10^8$

Tableau 4.3 Valeurs des capacités des éléments de la chaîne obtenus par la MEF

#### 4.9. Implantation du circuit et résultats de simulation

En utilisant l'ATP-EMTP, le circuit équivalent a été ensuite implanté pour déterminer les différentes tensions et les courants de fuite circulant à la surface de l'isolateur. Ce circuit est montré dans la figure. 4.10.

Les valeurs des différents éléments du circuit équivalent obtenues dans le cas d'une surface propre sont introduites dans le circuit équivalent.

A partir de ce circuit on peut prendre toutes les caractéristiques électriques de la chaîne d'isolateurs (tension, courant, énergie, etc.)

La figure 4.11.a montre les formes d'onde de la tension en différents points de la surface de l'isolateur et la figure 4.11.b montre la répartition de la tension maximale le long de l'isolateur propre. Dans cette figure nous avons aussi tracé la variation de potentiel dans



les différents éléments de la chaîne obtenu par l'approche éléments finis et celle obtenu analytiquement en utilisant l'équation [MIC2001] donnée par :

$$U_x = \left[ C_l' + C_t' \frac{\sinh(rx)}{\sinh(rl)} - C_l' \frac{\sinh(l-x)}{\sinh(rl)} \right] \frac{U}{C_l' + C_t'} \quad (4.10)$$

Avec :

$U$  : Tension de appliquée

$U_x$  : Tension dans chaque élément

$C_l'$  : Capacité linéique contre ligne

$C_t'$  : Capacité linéique contre terre

$l$  : Longueur totale de la chaîne

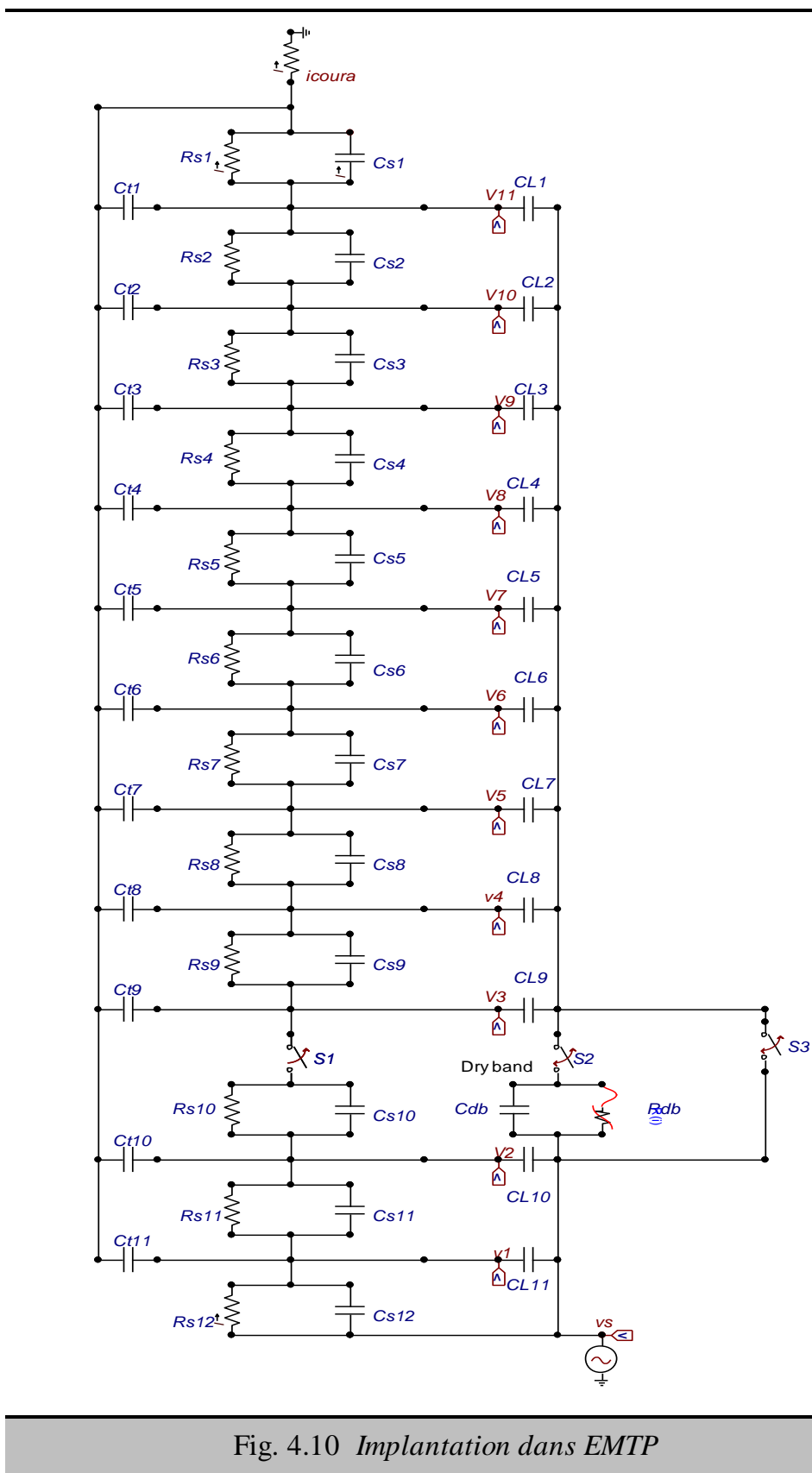
$x$  : Longueur d'un seul élément

$r$  : Constante

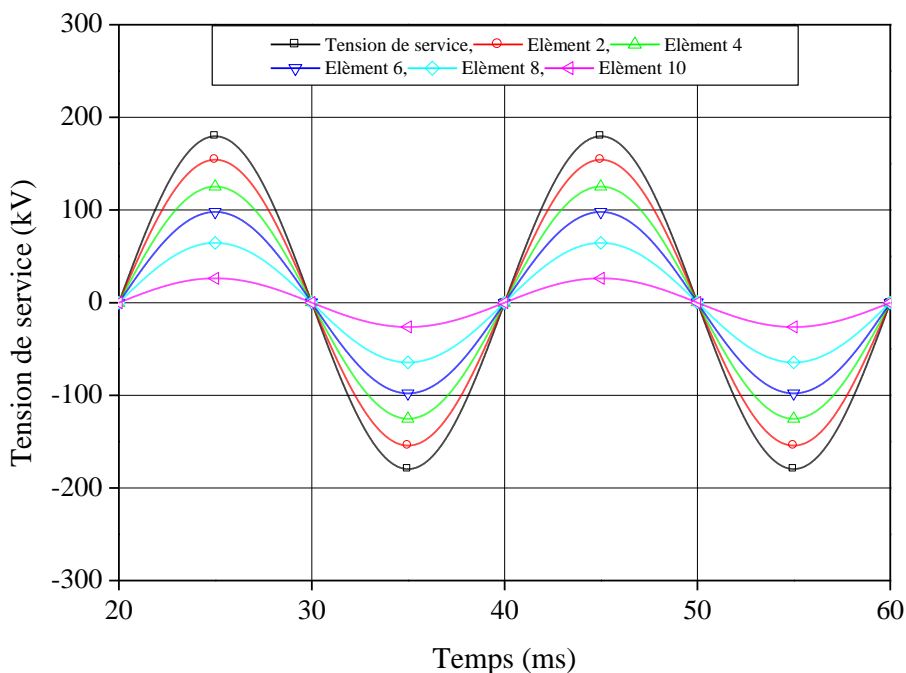
Comme on peut le remarquer les approches éléments finis et celle du circuit équivalent donne la même répartition moyennent une légère erreur. Au contraire cette erreur est plus marquée quand on compare les résultats avec celle obtenues avec l'expression analytique mais les trois approches gardent la même tendance. Les différences peuvent être attribuées aux hypothèses simplificatrices faites dans la détermination de l'expression analytique d'une part et les erreurs de calcul engendrées par les méthodes numériques de l'autre part.

#### **4.10. Variation de courant de fuite en fonction de tension de service**

Dans le but de voir l'effet de l'amplitude de la tension appliquée, des simulations sont répétées pour trois valeurs de cette dernière. La figure 4.13 illustrent les résultats obtenues de cette investigation où l'on montre les formes d'ondes du courant de fuite pour des amplitudes de 220, 230 et 240kV (Fig.4.13.a).



On peut clairement voir que le courant de fuite augmente au fur à mesure que la tension d'alimentation augmente. Pour mieux voir cet effet, nous présentons dans la figure 4.13.b la variation de la valeur maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée. Cette augmentation est linéaire. Toutefois ces valeurs restent faibles à cause de l'impédance équivalente élevée du milieu.



a) formes d'ondes de la tension

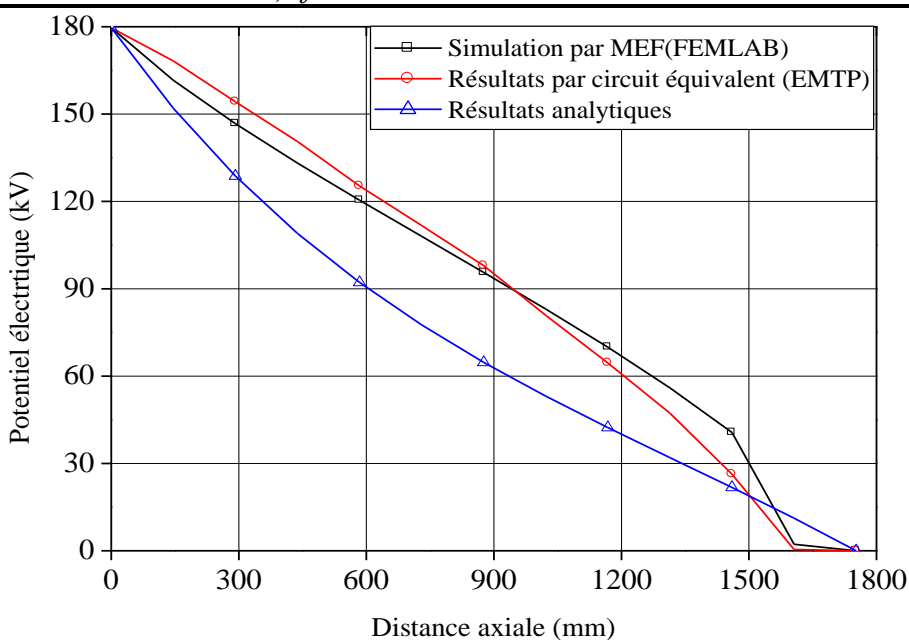


Fig. 4.11 Variation de potentiel dans les différents éléments de la chaîne

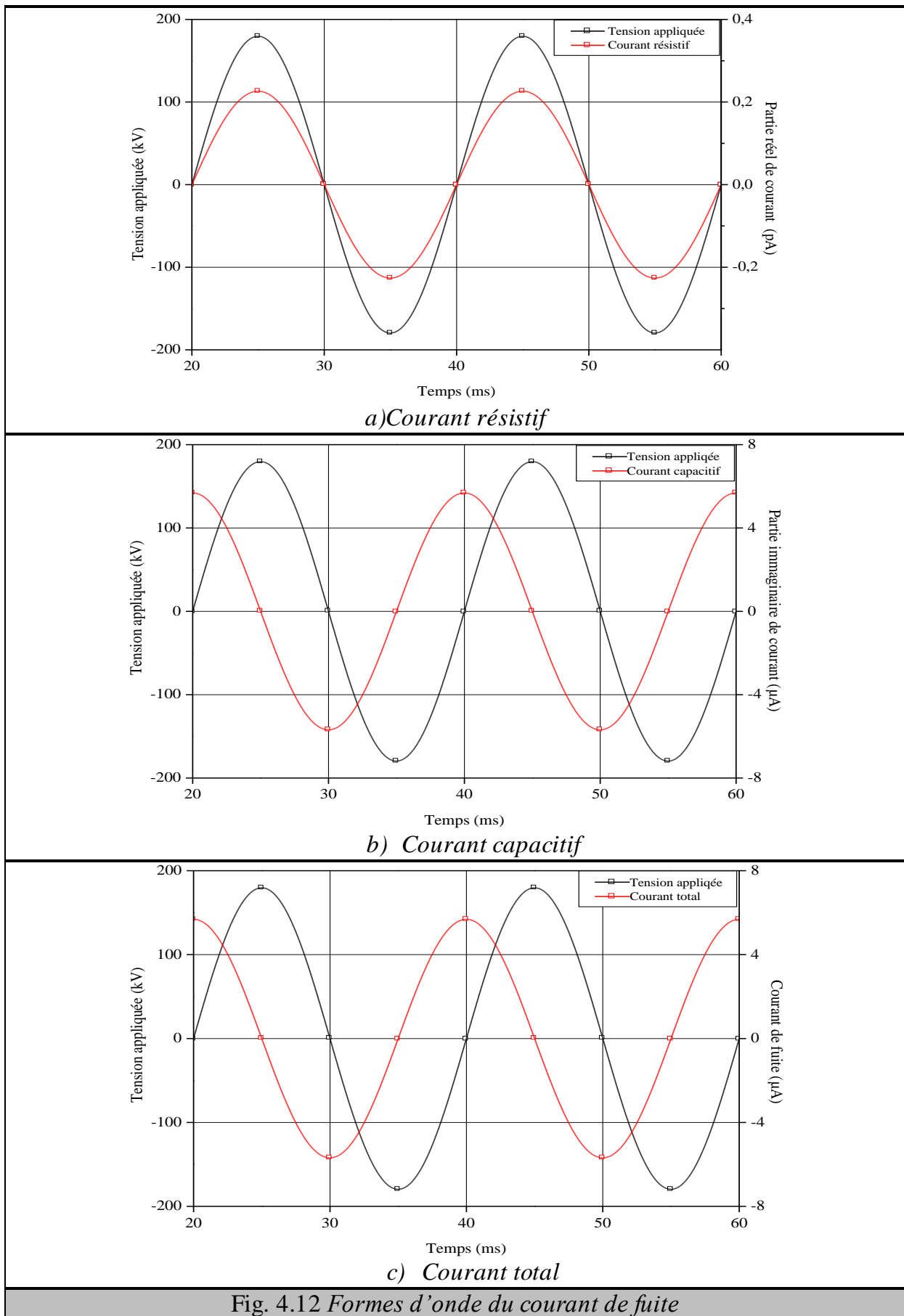
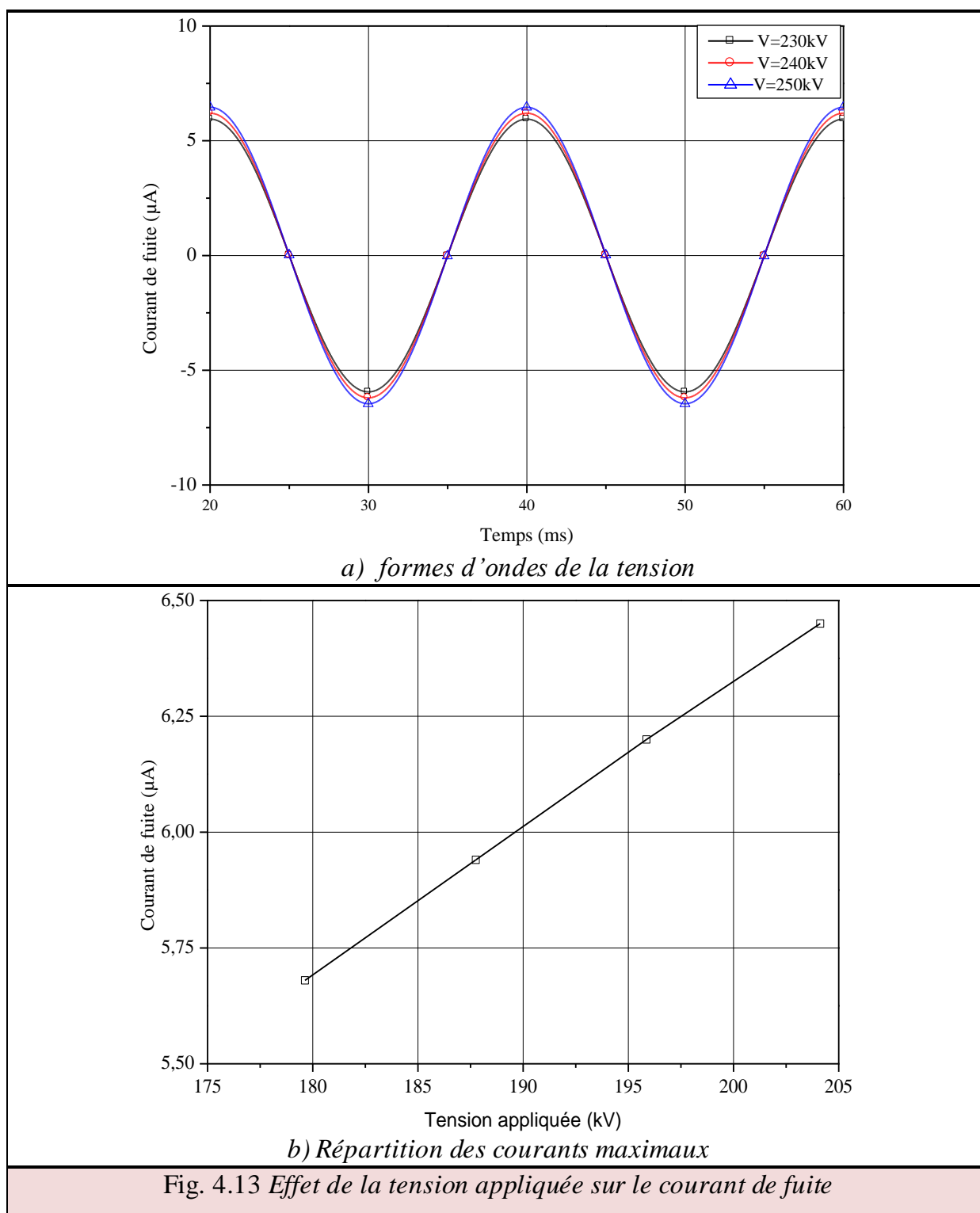


Fig. 4.12 Formes d'onde du courant de fuite



#### 4.11. Études de la distribution de tension dans les conditions polluées

La pollution joue un rôle important dans la détermination de la répartition de la tension le long d'une chaîne d'isolateurs. Pour voir cet effet, plusieurs valeurs de la conductivité de la couche de pollution ont été ( $\sigma = 200 \mu\text{S}$ ,  $\sigma = 70 \mu\text{S}$  et  $\sigma = 20 \mu\text{S}$ ). En examinant les

résultats de simulation présentés dans la figure 4.14.

Dans notre étude trois niveaux de la conductivité de la couche polluante qu'on a cite précédemment sont représentés on a considéré que le dépôt polluant se fait d'une manière uniforme.

La figure 4.15 et 4.16 représentent la distribution de la tension le long une chaine d'isolateurs. De ces dernières on peut facilement voir que l'augmentions de la conductivité de la couche polluée favorise la distribution non uniforme de la tension le long de la chaine d'isolateur.

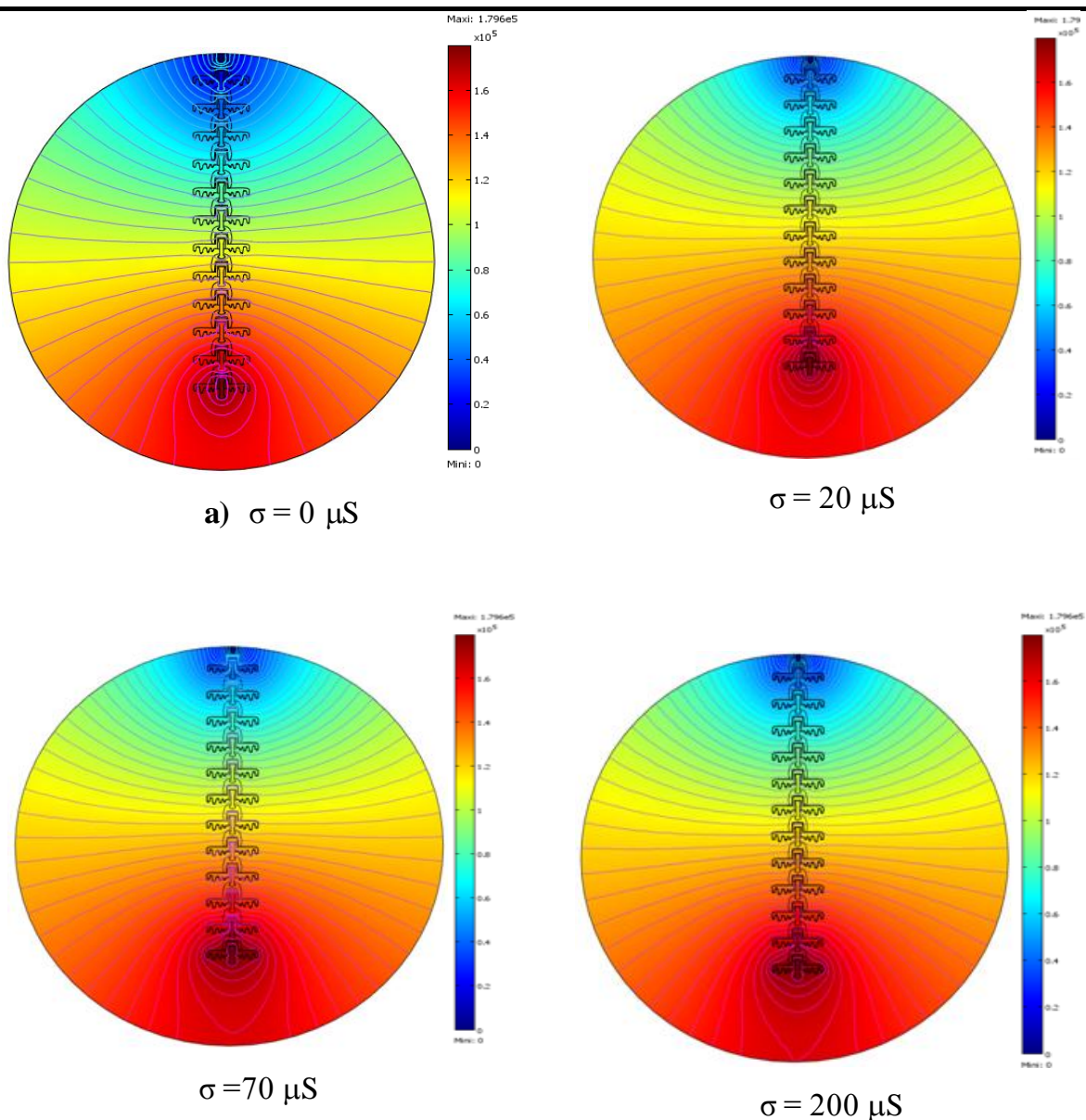


Fig. 4.14 *Distribution de la tension pour différentes conductivités de la couche polluée*

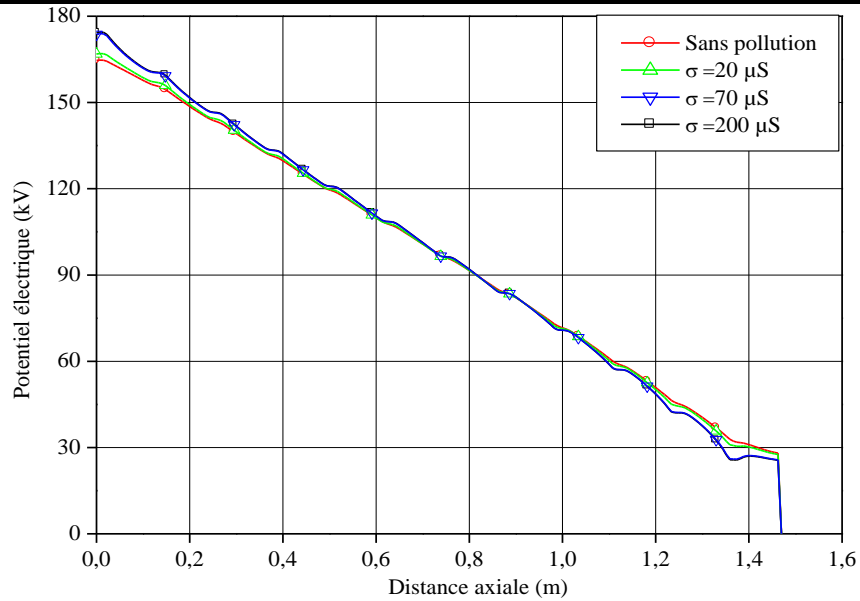


Fig. 4.15 Répartition de la tension pour différentes conductivités de la couche polluée

Lorsque la surface extérieure de l'isolateur polluée atteint de grandes valeurs de conductivités ( $\sigma = 200 \mu\text{S}$  et  $\sigma = 70 \mu\text{S}$ ), un courant de fuite circule dans cette couche conductrice qui traverse l'enveloppe et l'interface diélectrique. En conséquence, les isolateurs qui se situent proche à l'électrode HT atteignent de grandes valeurs de tensions par rapport aux autres isolateurs.

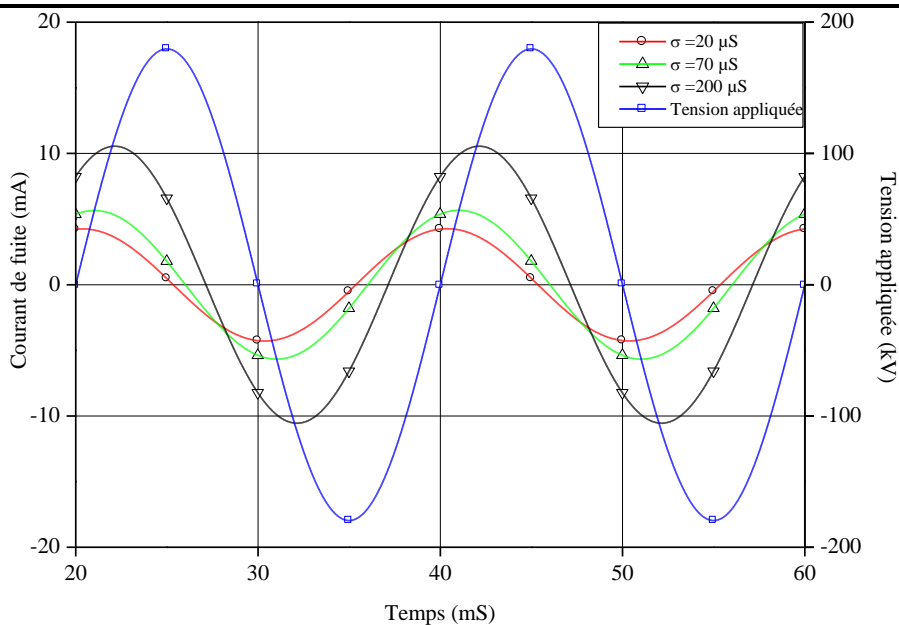


Fig. 4. 16 Formes d'onde du courant de fuite pour différentes conductivités

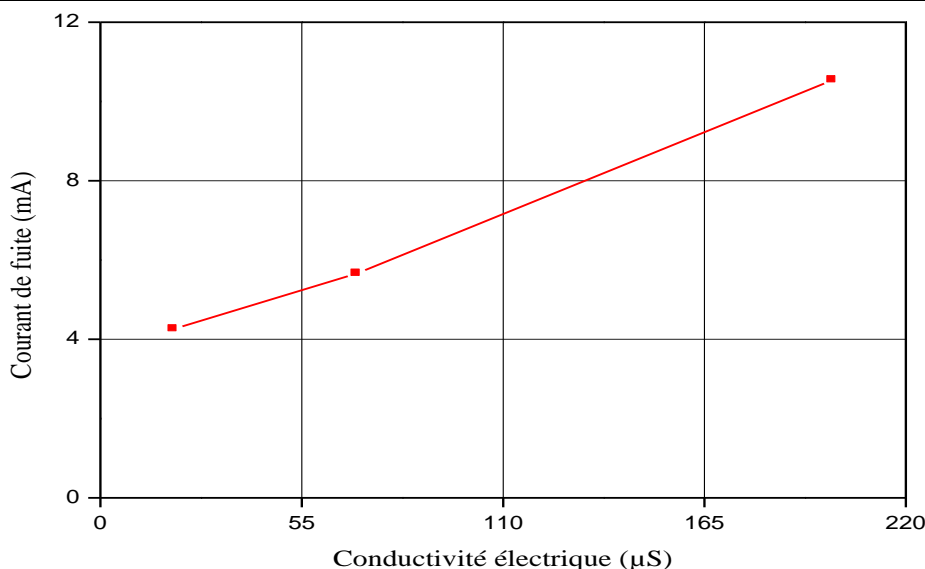


Fig. 4.17 Répartition du courant de fuite maximale pour différentes conductivités

Le cas sans pollution est introduit pour but de comparaison. Les résultats montrent que pour les grandes sévérités de pollution la distribution de la tension à l'extérieur de l'isolateur est non uniforme. La sévérité de pollution dépend des conditions environnementales dans l'endroit où les isolateurs sont montés.

En général, la chaîne d'isolateur situés dans les sites non pollués représente une résistance très élevée, et la distribution du potentielle électrique le long de l'isolateur est uniforme, par contre la non uniformité de potentiel pour des cas pollués.

#### 4.12. Effet de la bande sèche

La bande sèche était modélisée comme une section de résistance non linéaire, sa caractéristique (V-I) est représentée par l'expression suivante :

$$V = A \cdot I^{-n} \cdot X \tag{4.9}$$

On a:

$$V = R \cdot I \tag{4.10}$$

On introduit l'équation (4.10) dans l'équation (4.9), on trouvera la formule de la résistance non linéaire de la bande sèche suivante :

$$R = A \cdot I^{-(n+1)} \cdot X \tag{4.11}$$



Avec,  $A, n$  : Sont des constants. Leurs valeurs d'après les auteurs [BOE1964, MUK2002] sont comme suit :  $3 < A < 500$  et  $0.4 < n < 1$

$X$  : Longueur de la bande sèche (section).

$I$  : Le courant qui traverse la couche polluante.

$V$  : Tension à travers la bande sèche.

$R$  : Résistance de la bande sèche

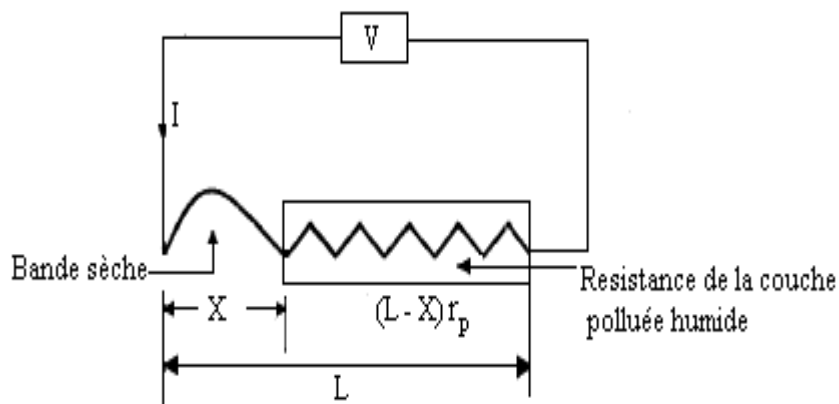


Fig. 4.18 *Modèle d'Obenaus*

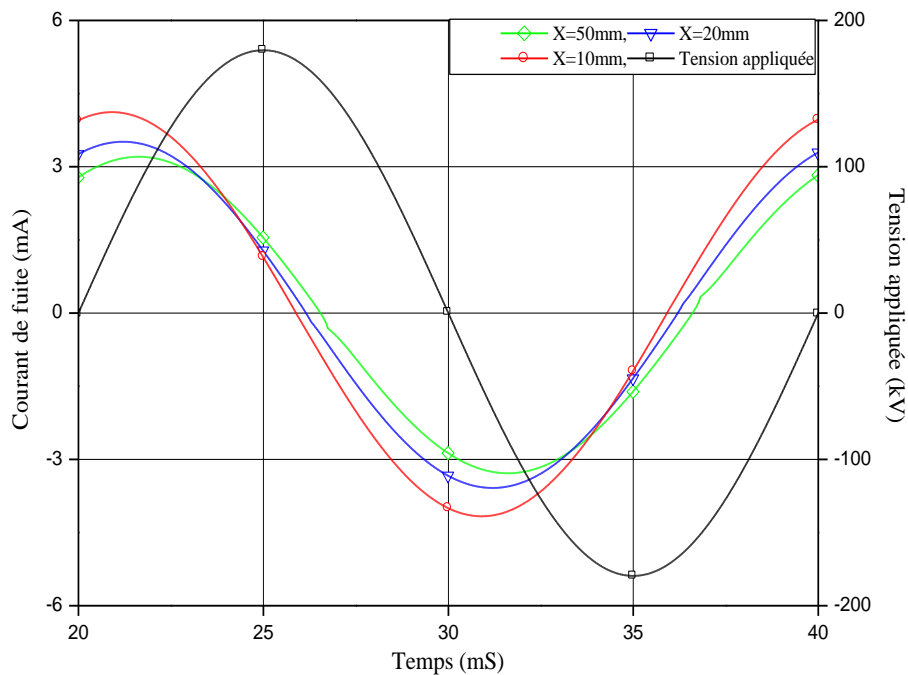


Fig. 4.19 *Formes d'ondes du courant pour différents bande sèche*

Une simulation avec diverses largeurs de la bande sèche (10mm, 20mm et 50mm) à été faite pour étudier l'effet de la variation de la largeur de la bande sèche sur le fonctionnement de l'isolateur. Dans nos travaux on prend cette bande sur l'ailette N°3.

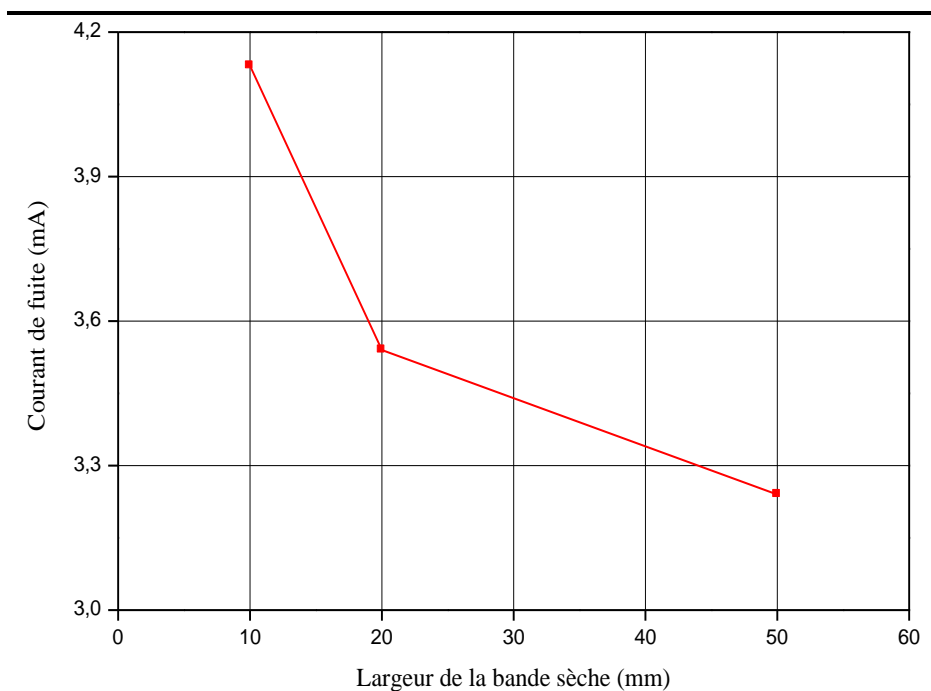


Fig. 4.20 Effet de la bande sèche

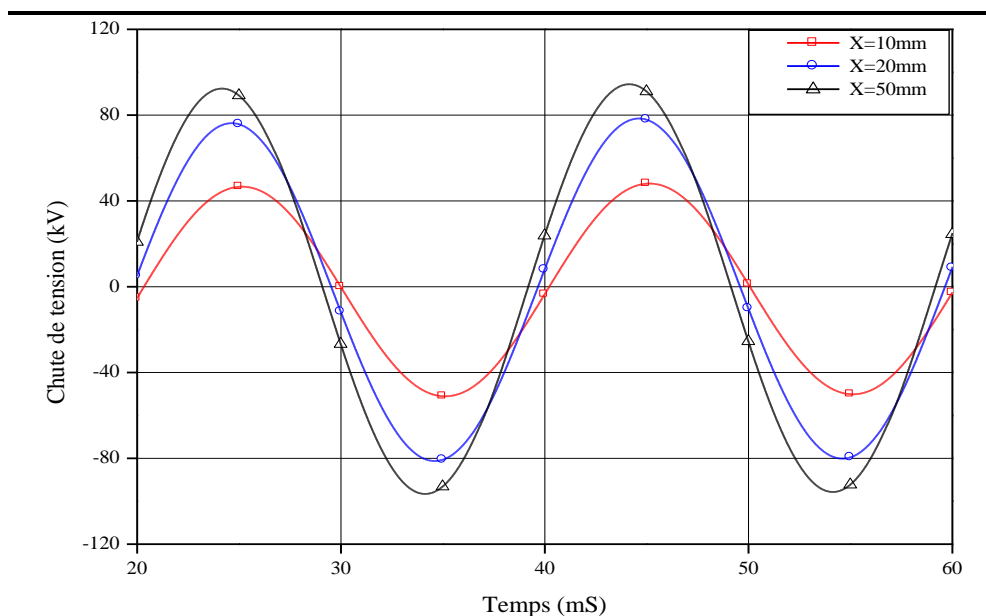


Fig. 4.21 Chute de tension dans la bande pour différents bande sèche

En simulant avec une tension sinusoïdale de 220kV et une fréquence de 50Hz.les résultats obtenus sont montrés dans les figures 4.19 et 4.20, 4.21

Les courants de fuite correspondants aux valeurs de la largeur de bande sèche 10mm, 20mm et 50 mm sont montrées dans la figure 4.19 et 4.20, On peut voir que la variation de la largeur de la bande sèche influe sur la phase et l'amplitude du courant de fuite. Lorsque la largeur de la bande sèche augmente, le courant de fuite diminue. Donc l'augmentation de la largeur de la bande sèche conduit à un courant de fuite plus faible et de plus en plus capacitif ce qui est parfait concordance avec le résultat obtenu pour un isolateur sec et propre.

La figure 2.11 montre la chute de tension à travers de diverses largeurs des bandes sèches pour une tension d'application 220kV. Les résultats de simulation prouvent que la chute de tension à travers la bande sèche est proportionnelle à sa largeur. Ceci signifie l'augmentation de la largeur de la bande sèche mène la chute de tension à travers cette dernière plus grande. La résistance qui représente la section de la bande sèche devient plus grande pour les grandes largeurs de bande sèche.

#### **4.13. Décharge à travers la bonde sèche**

La figure 4.22 montre la simulation de la décharge sur la bande sèche. Ceci a été réalisé en ouvrant premièrement l'interrupteur S1 au même temps en fermant l'interrupteur S2 (qui était ouvert au commencement). Le fonctionnement de ces deux interrupteurs a simulé une formation d'une bande sèche. Puis, après un peu de temps de 25ms, en fermant l'interrupteur S3 pour une courte durée de 10ms pour simuler une décharge à travers la bande sèche. Comme peut être observé sur cette figure, les formes d'ondes de courant total et le courant de la bande sèche ont été accompagnés par des pics (transitoires) de polarité semblable.

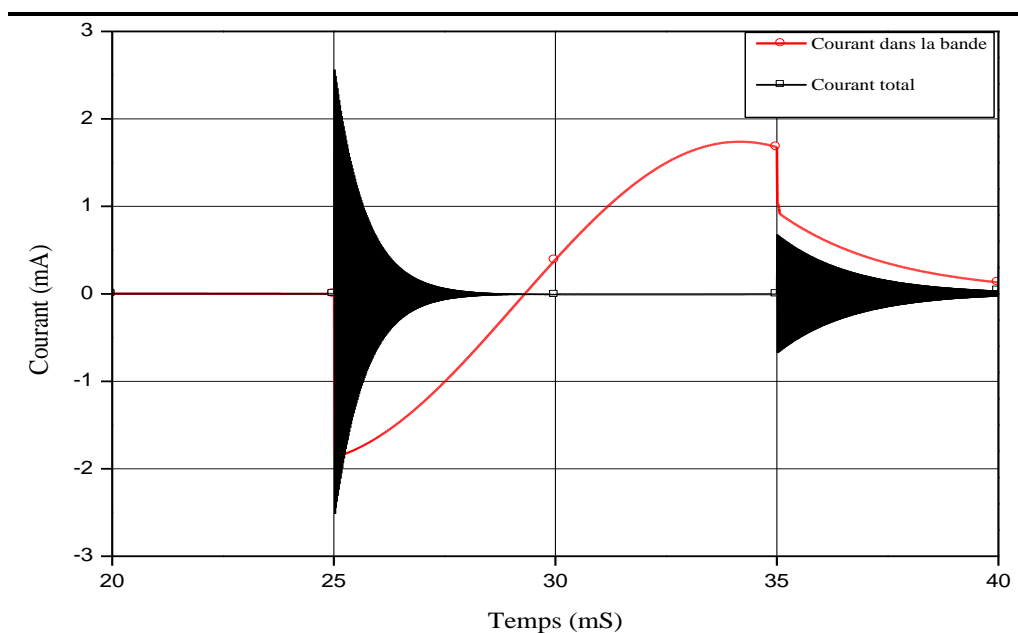


Fig. 4.22 Décharge à travers la bande sèche

#### 4.14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents résultats de simulation concernant le modèle étudié. Nous disposons d'un modèle numérique qui permet d'avoir la répartition du potentiel et du champ électrique dans une chaîne d'isolateurs en verre type capot et tige utilisé dans les réseaux électriques de la SONELGAZ. Un circuit équivalent préliminaire formé d'un réseau RC parallèle est développé. Ses paramètres ont été identifiés en se basant sur la méthode des éléments finis. Nous avons implanté ce circuit équivalent dans le logiciel de simulation ATP/EMTP. Les résultats obtenus par cette approche se sont montrés très prometteurs. Néanmoins dans un travail futur la mesure de courant de fuite est fortement recommandée pour être comparé avec les résultats du circuit équivalent et introduire les modifications nécessaires pour tenir compte de la pollution et essayer de réaliser un interfaçage entre l'approche élément finis et celles des régimes transitoires dans les systèmes électro-énergétique.

Cette étude a révélée que :

De plus il ressort de notre étude que :

- ✓ La distribution de potentiel électrique est uniforme dans le cas des zones propres.
- ✓ La distribution du potentiel électrique est intense près de l'électrode active. Il

diminue au fur et à mesure qu'on se dirige vers l'électrode de terre.

- ✓ Le champ électrique est nul dans le domaine conducteur, et intense dans matériaux isolantes comme le verre.
- ✓ La répartition uniforme de la pollution à l'état humide influe sur la forme du courant qui circule dans la couche polluée, par contre la répartition non uniforme (l'existence de la bande sèche) et à la présence des décharges à travers la couche la bande sèche influe sur la forme de courant de fuite.

## *Conclusion Générale*

---

---

La méthode des éléments finis s'est avérée être un bon choix parmi les différentes méthodes numériques proposées. Cette méthode, qui permet de se contenter d'une description surfacique des objets modélisés, présente les avantages importants par rapport aux différentes méthodes existantes du point de vue du nombre d'inconnues mis en jeu, de la prise en compte des domaines infinis.

L'objectif principal de ce travail était l'étude de la distribution de tension le long des isolateurs dans le cas propre et le cas de pollution. Nous nous sommes intéressés essentiellement à l'influence de la formation de la bande sèche sur le courant de fuite qui circule dans la surface contaminée.

Pour cette étude nous avons procédé à la mesure des différentes dimensions de l'isolateur qui présente une géométrie très complexes et par la suite nous l'avons dans le logiciel de simulation FEMLAB. Les différents résultats de simulations ont été présenté et discutés (potentiels électriques, champ électriques, etc.).

Les paramètres électriques du circuit sont déterminés à l'aide de méthode des éléments finis. Nous avons présenté le circuit équivalent dans le logiciel de simulation EMTP dans le but de simuler les tensions et les courants de fuite.

Les résultats de simulation obtenus dans le cadre de cette étude peuvent être résumés de la façon suivante :

- La distribution de la tension et le champ électrique le long d'isolateur est uniforme à cause de l'absence de la couche polluante conductrice.
- Le nombre des éléments de la chaine influent sur la distribution du champ électrique le long de certes dernières.
- L'augmentation de la tension pour un niveau qui dépasse la tension de service normale d'isolateur mène à la défaillance de ce dernier.
- Dans les régions humides la distribution de tension le long de l'isolateur est non uniforme

- L'état humide de la pollution et la présence de la décharge externe à travers la bande sèche influent sur la forme des deux courants.

Par conséquent, les résultats de simulation sont très proches aux résultats d'analytique.

Les résultats obtenus sont en concordance avec les résultats publiés dans la littérature l'approche décrite dans le présent travail va, sans doute, nous permettre dans le futur de réaliser des études sur des isolateurs en 3D et pollués.

Bref, Les résultats de cette investigation sont prometteurs, de plus ils nécessitent une étude plus approfondie. Cette étude aboutira sans doute à des résultats importants et économiquement justifiables pour la SONELGAZ. La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des équipements électriques de haute tension.

Pour mieux dimensionner les isolateurs, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés. La connaissance de cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation. Il n'en demeure pas moins que trois années sont au minimum nécessaires pour déterminer la sévérité d'un site.

La tension de contournement d'un isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité du dépôt polluant ainsi que de la répartition de la couche de pollution sur la surface isolante. La connaissance de ce degré de pollution est par conséquent, une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau de l'isolement des ouvrages installés sur site, en vue de dimensionner convenablement l'isolation.

## Annexe A

La conductivité du domaine de ciment alumineux et sa permittivité relative n'existent pas dans la bibliographie des matériaux du logiciel. Selon [VOL2002], elles ont varié en fonction de la fréquence.

Conductivité volumique et permittivité relative ordinaire du ciment en fonction de la fréquence

Les propriétés diélectriques du ciment permettant de sceller les électrodes au Verre trempé de l'isolateur capot à tige ont été déterminées au Laboratoire d'Instrumentation et de Matériaux d'Annecy (LAIMAN) à l'aide d'un analyseur d'impédance de type HP4284A.

Ainsi, ces mesures ont permis de déterminer la partie réelle  $\varepsilon_r$  de la permittivité relative ordinaire du ciment, notée  $\varepsilon_r^*$ , figure. 1, et sa conductivité  $\sigma_v$ , figure. 2, relative à la formule suivante :

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r - j \frac{\sigma_v}{\omega \cdot \varepsilon_0}$$

Avec  $\omega$  la pulsation angulaire et  $\varepsilon_0$  la permittivité du vide.

Ainsi, on peut remarquer, sur la figure.1, que la valeur de la partie réelle de la permittivité relative du ciment  $\varepsilon_r$ , dépend peu de la fréquence entre 100 Hz et 1MHz. La valeur ainsi obtenue est d'environ 5.9, Cependant, les valeurs disparates obtenues entre 10 et 100 Hz proviennent des erreurs de l'appareil de mesure utilisé induites par l'effet important de polarisation de charges pour les faibles fréquences. Ainsi, on peut considérer, si l'on ne tient pas compte des perturbations rencontrées dans les mesures à basse fréquence, que la valeur de la partie réelle de la permittivité relative du ciment est égale à 5,9 pour une fréquence de 60 Hz.

Pour ce qui est de la conductivité volumique  $\sigma_v$  du ciment, figure.1. Celle-ci augmente avec la fréquence. Pour les fréquences inférieures à 100 Hz, les valeurs  $\sigma_v$  de sont de l'ordre de  $10^{-10}$  S/m.



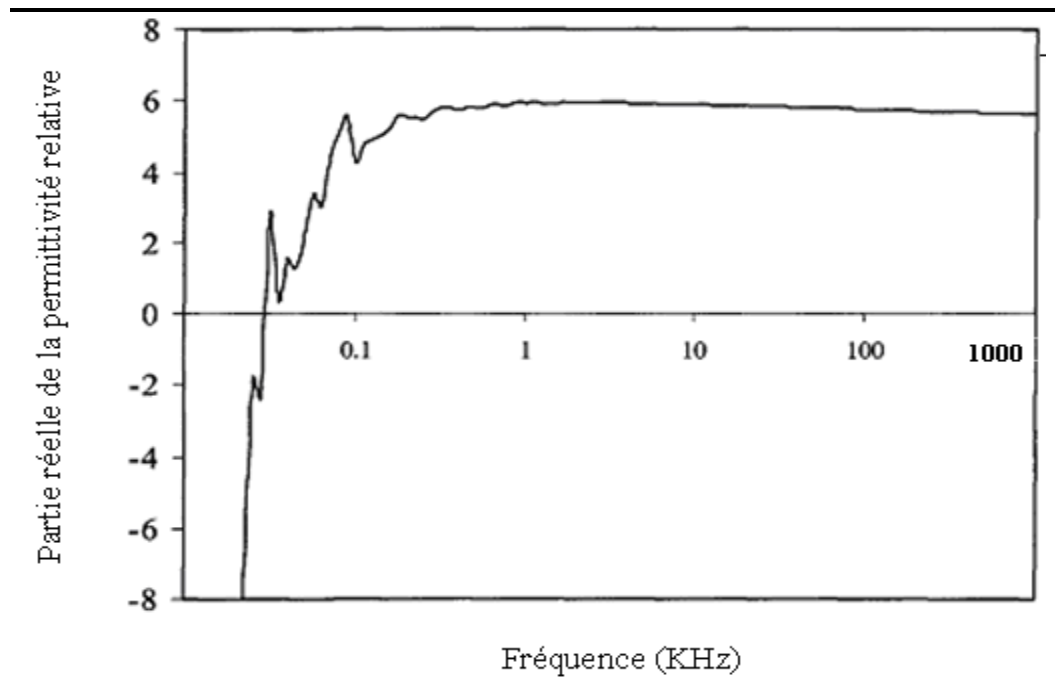


Fig.1 *Partie réelle de la permittivité relative ordinaire du ciment*

Le ciment se comporte donc comme un très bon diélectrique et peut donc être considéré, pour la fréquence du réseau, comme un isolant parfait puisque sa conductivité volumique est très faible.

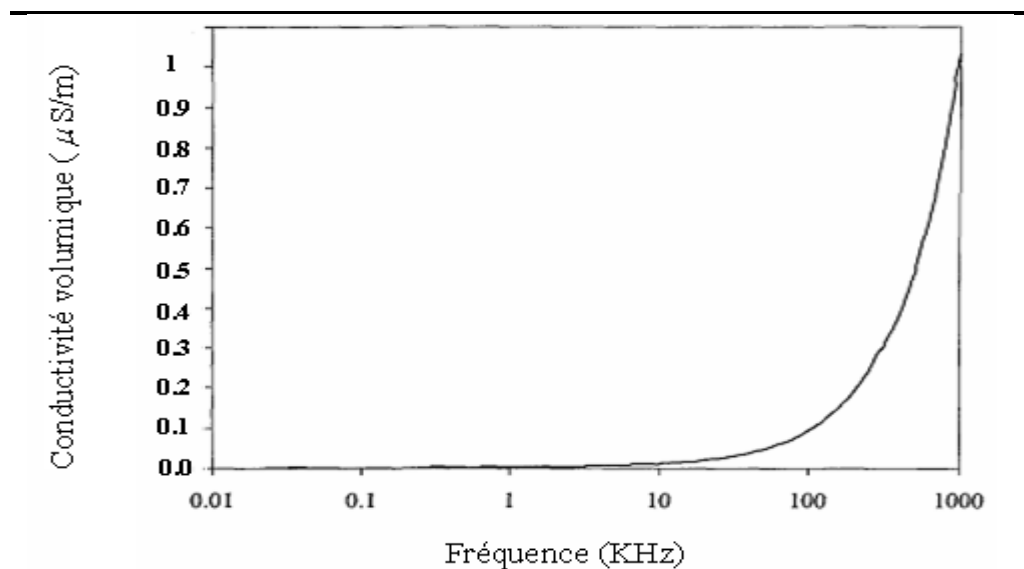


Fig. 2 *Conductivité volumique du ciment en fonction de la fréquence*

## *Références Bibliographiques*

---

---

[AMI1998] F. AMIDI, K. OUERDANE, 'Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30kV en régions littorales', projet de fin d'études, département d'électrotechnique, université des sciences et technologies houari Boumediene, bab Ezzouar, juin 1998.

[ASE1997] ASENJO E., N. MORALES ET A. VALDENEGRO, 'Solution of low frequency complex fields in polluted insulators by means of the finite element method', IEEE trans, on dielectrics and electrical insulation, vol. 4, no. 1, pp. 10-16, Février 1997.

[BER1992] A. BEROUEL 'les phénomènes de pollution et leur conséquences sur le transport d'énergie électrique'.laboratoire haute tension ENP d'Alger1992.

[BER1997] BERNAR SCHATZ 'Instruments usuels de mesure de longueur', techniques de l'ingénieur R 1260, 1997.

[BIH2006] BIHANE MOHAMED 'Contribution à l'étude des dispositifs planaires micro-ondes à ferrites pour des applications en télécommunications', thèse de magister en télécommunications, 2006.

[BIN1973] BINNS K.J ET P.J. LAWRENSON, 'Analysis and computation of electric and magnetic field problems', PERGAMON Press LTD, 1973.

[BOE1966] H. BOEHME, F. OBENAUUS 'Pollution flashover test on insulators in laboratory and in systems and model concept of crepage path flashover',CIGRE, 1485.11. paper N° 406, June 1966.

[BOS1991] BOSSAVIT A., C. EMSON et I.D. MAYERGOYZ 'Méthodes numériques en électromagnétisme', Éditions Eyrolles, Paris, 1991.

[BOU1988] S. BOUAZABIA, T. CHIKHAOUI, 'Méthodes d'essais sur des isolateurs pollués dans les conditions désertiques', projet de fin d'études, département de génie électrique, laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger, 1988.

[BSI 1996] BS EN 60071-1: 1996, IEC 71-1: 1993, Insulation-Co-ordination part 1: Definition, principles and rules.

[BSI 1997] BS EN 60071-2: 1997, IEC 71-2: 1996, Insulation-Co-ordination Part 2: Application guide.

[CHA1993] CHAVENT. G 'Méthodes aux différences finies', Technique de l'ingénieur, A550,1993.

[CHA1993] CHAKRAVORTI S. ET P.K. MUKHERJEE, 'Power frequency and impulse field calculation around a H.V insulator with uniform or non uniform surface pollution', IEEE Trans, on electrical insulation, vol. 28, no. 1, pp. 43-53, février 1993.

---

[CIM1978] A. CIMADOR, M. COJAN, P. HAUTEFEUILLE ET M. MOREAU, 'Méthodes de dimensionnement des isolateurs de lignes aériennes en régions polluées', CIGRE, rapport 33.04, Paris, France, 1978.

[CLA1973] P. CLAVERIE, Y. PORCHERON, 'les phénomènes de pollution des isolateurs et l'isolement des ouvrages en régions polluées', RGE, tome 82, no. 3, pp. 166-194, mars 1973, Paris, France.

[CLA1984] CLAUD GARY : 'les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions' édition 1984.

[EYY1978] C. H. A. ELY, P. J. LAMBETH, J. S. T. LOOMS ET D. A. SWIFT, C.E.G.B « 'Contournement des polymères humides et pollués l'ailette booster » », CIGRE, rapport 15.02, Paris, France, 1978.

[FAW1987] FAWI T.H. ET Y.A. SAFAR, 'Boundary methods for the analysis and design of high-voltage insulators', computer methods in applied mechanics and engineering, pp. 134-369, 1987.

[GUI2001] GUIA TALAL, 'Comportement d'un modèle d'isolateur sous tension impulsionnelle', mémoire de magister en génie électrique, laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger, 2001.

[HAM1964] B.F. HAMPTON 'Flashover mechanism of polluted insulation', Proc. PIEE, Vol.111 N°5, pp. 985-990, July 1964.

[HAR1979] M. HARA ET L.C. PHAN, 'leakage current and flashover performance of iced insulators', IEEE transaction on power apparatus & systems, vol. PAS-98, no. 3, pp. 849-859, May/June 1979.

[HEI1982] 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, Paris, France, 1982.

[IEC 2004] PD IEC TR 60071-4: 2004, Insulation-Co-ordination part 4: Computational guide to insulation-co-ordination and modelling of electrical networks.

[KAT1979] KATO S, H. KOKAI, AL 'Finite element method for calculation of potential distribution to the porcelain insulator with semi conducting surface layer' ISH, Milan, No. 12-11, août 1979.

[KIS1994] EL-KISHKY H. ET R.S. GORUR, 'Electric potential and field computation along AC HV insulators », IEEE Trans, on dielectrics and electrical insulation, vol. 1, no. 6, pp. 982-988, Dec 1994.

[KOS1970] M. A. B. EL KOSHAIRY, F. A. M. RIZK, 'Comportement des isolateurs des lignes de transport à très haute tension dans les conditions de pollution désertiques', CIGRE, rapport 33.05, Paris, 1970.

[LAN1971] LANPETHanp P.J. 'effect of pollution du service prévention et sécurité d'électricité en France' Décembre 1971.

---

---

[LER1984] G. LEROY et all, 'Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions', édition Eyrolles, paris, France, 1984.

[LER1984] LEROY ET CIE, 'Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions', collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, paris 1984.

[MEK1999] A. MEKHALDI 'Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50hz', thèse de doctorat d'état, 1999, département de génie électrique, laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger.

[MIC2001] Michel A., Michel L 'Traité d'électricité' 2ème édition, vol XXII, lausanne 2001.

[MLS1985] MLSAKI T. ET H. TSUBOI, 'Computation of 3-dimensional eddy current problems by using boundary element method', IEEE Trans, on magnetics, vol. Mag-21, pp. 2227- 2230, no. 6, November 1985.

[MUK2002] MUKDEN UDUR, AYTEN KUNTMAN, AHMET MEREV 'Comparison of the artificial contamination accelerated test methods used in the assessment of the polymeric insulators' ELEKTRÝK-ELEKTRONÝK DERGÝSÝ, pp, 111 – 122. 2001-2002

[NOT1977] Notice technique du service de transport d'énergie ' les lignes aériennes du réseau de transport, et leurs divers matériaux d'équipement' 1977.

[POR1988] Y. PORCHERON, « lignes aériennes : matériels entrant dans la constitution d'une Ligne aérienne », technique de l'ingénieur D4425, 1975.

[RAB2003] RABAH CHAARANI : 'Etude de l'influence des caractéristiques des isolateurs sur leurs performances électriques dans des conditions de givrage', thèse doctorat en ingénierie présentée à l'université du Québec à Chicoutimi 2003.

[RAS1989] RASOLOJANAHARY J.L ET L. KRAENBUHL, 'Modélisation 3D de la conduction surfacique sur les isolateurs pollués', rapport annuel no. 1, décembre 1989.

[RIQ1998] G. RIQUEL, E. SPAN GENBERG, 'De la céramique au synthétique', EDF-EPURE, n° 58, avril 1998.

[SIN1974] SINGER H., H. STEINBIGLER ET P. WEISS, 'a charge simulation method for the calculation of high voltage field', IEEE Trans. PAS 93, pp. 1660-1668, Sep-Oct 1974.

[VAS2006] VASSILIKI T. KONTARGYRI, IOANNIS F. GONOS 'Simulation of the Electric Field on High Voltage Insulators using the Finite Element Method' IEEE Trans, Manuscript received April 24, 2006.

[VOL2002] VOLAT C, 'Calcul du potentiel et du champ électrique le long des surfaces de glace recouvrant un isolateur H.T. et dans les intervalles d'air entre celles-ci'. Thèse de doctorat, UQAC, 2002.

[WIL1999] D.L.Williams, A. HADDAD, A.R.ROWLANDS 'formation and characterization of dry bans in clean fog on polluted insulators' IEEE. Trans, October 1999.

---

---

[XIN2006] XINQUAO WU, ZONGREN PENG ‘Calculation of Electric-field Distribution and Research on Characteristics of Shielding Ring along the Long-rod Post Porcelain Insulators Used in 1000kv System’ NSFC IEEE 2006.

**ملخص:** إن توزيع التوتر على العازل يتأثر بمكثفات مشوشة و طفيلية، حيث عند تواجد هذه الأخيرة فإن التوتر يتوزع بشكل غير منتظم، مما يؤدي إلى إتلاف هذا الأخير و بالتالي تقلص مدة صلاحيته . وعند تواجد هذا الأخير في مناطق ملوثة تلتصق على سطحه الخارجي جزيئات مختلفة كالغبار، الغازات و الندى فتنتج تفريغا كهربائي على شكل شرارات كهربائية جزئية والسبب يعود إلى التوزيع الغير منتظم للتوتر الناتج عن التيار الهارب.

من خلال هذه المذكرة قمنا بدراسة توزيع التوتر في داخل و خارج العازل باستخدام، في مرحلة أولى، طريقة العناصر المحددة (FEM) و التي أثبتت نجا عنها في مثل هذه الدراسات. بجدر بنا الذكر بأن العازل من نوع E120/146 ذو غطاء زجاجي. سمحت لنا هذه الطريقة بالتعرف على مكونات الشبكة الكهربائية المماثلة للعازل المدروس في هذه المذكرة. في مرحلة ثانية قمنا بإدخال الشبكة المماثلة في البرنامج الخاص بالظواهر العابرة (EMTP). إن النتائج المتحصل عليها سمحت لنا بدراسة تأثير المكثفات المشوشة أو الطفيلية على سلوك العازل في المناطق الملوثة

**الكلمات المفتاحية:** العوازل، العناصر المحدودة، توزيع التوتر، التلوث، المحاكاة، صناعة النماذج، برنامج FEMLAB

**Résumé :** La tenue diélectrique des isolateurs extérieurs est influencée par plusieurs facteurs de l'environnement qui peut réduire leur rigidité diélectrique, causer leur contournement et, en conséquence, les pannes du service électrique. Ce travail porte sur la modélisation et la simulation d'un isolateur capot et tige en verre de type E120/146. La méthode des éléments finis est mieux adapter pour calculer la tension et le champ électrique dans et autour de la chaine, les isolateurs fonctionnant dans les milieux pollués, peuvent être assujettis à de sévères contraintes causant des risques de claquage externe, des décharges partielles internes. La cause principale est la distribution non identique de la tension créée par les courants de fuite. La connaissance de ces derniers donne l'aide pour définir les différents paramètres du circuit électrique équivalent et des résultats satisfaisant ont été obtenus.

**Mots clés :** Isolateur, Eléments Finis, Répartition de tension, Pollution, Simulation, Modélisation, Femlab, Contournement.

**Abstract:** Flashover of insulators in transmission and distribution systems may cause costly outages for power companies and their customers. The voltage distribution along the insulator is affected by the stray capacitances. The existence of any stray capacity will cause a non-uniform voltage distribution which is created by the leakage currents. In this work, we present simulation and modelling of the electric voltage, the leaking current, the electric field in insulator cap and pin en glass. The numerical calculation of the potential by the finite element method is a very effective approach. For the case of fog conditions, pollution layers on the insulator will become conducting and could result in a significant redistribution of the voltage. The equivalent circuit is employed to simulate the effects of the capacitive coupling to polluted layers on the insulator.

**Keywords:** Insulator, Finite element method, Voltage Distribution, Pollution, Simulation, Modeling, Leakage Current, flashover.