

# 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)

## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de

*MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE*

Option : Réseaux électriques

Par

M<sup>lle</sup> AOUABED Fatiha

Thème

***Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs  
synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP***

Soutenu le ..... devant la Commission d'examen composée de :

Dr. Mabrouk HACHEMI	M. C. A. à l'université Ferhat ABBAS de Sétif	Président
Dr. Abdelhafid BAYADI	M. C. A. à l'université Ferhat ABBAS de Sétif	Rapporteur
Dr. Ahmed GHERBI	M. C. A. à l'université Ferhat ABBAS de Sétif	Examinateur
Dr. Hamoud RADJEAI	M. C. A. à l'université Ferhat ABBAS de Sétif	Examinateur
Dr. Rabah BOUDISSA	M. C. A. à l'université A. MIRA de Béjaia	Examinateur

## *Dédicaces*

---

---

*A ma très chère mère, qui représente pour moi l'exemple du sacrifice du  
dévouement, et de l'honnêteté.*

*A mon père, symbole de patience et du courage.*

*A toute la Famille*

*A ma chère Amie Samia*

*A Tous mes Amies, chez lesquels j'ai trouvé réconfort  
et soutien dans les moments les plus pénibles*

*Que je dédie ce travail*

*F.AOUABED*

---

## *Remerciements*

---

---

*Mes remerciements Avant tout, louange à « ALLAH » qui ma donnée la force, le courage et la patience de mettre ce modeste travail*

*Je tiens, avant tout, à exprimer ma profonde gratitude à mon rapporteur Monsieur A. BAYADI, qui a été à l'origine de ce travail, pour sa disponibilité, pour sa confiance qu'il m'a témoignée, ainsi que ses conseils précieux et ses encouragements qui m'ont beaucoup aidé à mener à bien la réalisation de ces travaux. Qu'ils trouvent ici ma profonde reconnaissance.*

*Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur R. BOUDISSA qui me fait un grand honneur en acceptant d'aider au long de notre travail et d'examiner ce travail, je lui suis très reconnaissante.*

*Je remercie les membres de jury, chacun par son nom, qui m'a honoré en acceptant d'examiner ce travail.*

*Je remercie M<sup>lle</sup> S. SATTI qui a toujours été à mes cotés tout au long de notre travail, en m'apportant soutien moral et l'aide scientifique*

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

# Sommaire

---

---

Introduction générale	
Chapitre 1 Généralités sur la pollution des isolateurs haute tension	
1.1. Introduction.....	1.1
1.2. Isolateurs.....	1.1
1.2.1 Définition.....	1.1
1.2.2 Principaux types d'isolateurs.....	1.2
1.2.3 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs.....	1.5
1.2.4 Choix des isolateurs.....	1.6
1.3. Pollution des isolateurs.....	1.6
1.3.1 Sources de pollution.....	1.6
1.3.2 Degré de pollution.....	1.8
1.3.3 Densité de dépôt de sel équivalent (DDSE).....	1.8
1.3.4 Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués.....	1.9
1.3.5 Influence de la répartition de la pollution sur la surface des isolateurs.....	1.10
1.3.6 Phénomène du contournement des isolateurs.....	1.11
1.4. Conséquences de la pollution.....	1.14
1.5. Techniques de lutte contre la pollution.....	1.15
1.5.1 Allongement de la ligne de fuite.....	1.15
1.5.2 Isolateurs plats.....	1.16
1.5.3 Graissage périodique.....	1.16
1.5.4 Revêtement silicone.....	1.16
1.5.5 Les isolateurs composites.....	1.16
1.5.6 Nettoyage des isolateurs.....	1.16
1.6. Conclusion.....	1.17
Chapitre 2 Modèles d'isolateurs pollués	
2.1. Introduction.....	2.1
2.2. Modèles de contournements des isolateurs.....	2.1
2.2.1 Modèle d'Obenaus.....	2.1

---

2.2.2	Modèle de Neumarker.....	2.5
2.2.3	Modèles à base de circuits électriques.....	2.6
2.2.4	Modèle Dhahbi, Beroual et krahenbul.....	2.8
2.2.5	Modèle de Dhahbi et Beroual.....	2.9
2.4.	Conclusion.....	2.10

### Chapitre 3 Techniques et résultats expérimentaux

3.1.	Introduction.....	3.1
3.2.	Dispositif expérimental.....	3.1
3.2.1	Circuit d'essai du laboratoire de Bejaia.....	3.1
3.2.2	Circuit d'alimentation.....	3.2
3.2.3	Circuit de mesure.....	3.3
3.3.1	Tension appliquée.....	3.3
3.3.	Objet d'essai.....	3.3
3.3.1	Caractéristique géométrique des objets d'essai cas de l'isolateur réel.....	3.4
3.4.	Mode opératoire.....	3.4
3.4.1	Préparation des isolateurs.....	3.4
3.4.2	Préparation de la solution polluante.....	3.4
3.5.	Correction des résultats en fonction des paramètres physiques de l'air.....	3.5
3.5.1	Correction des résultats suivant les conditions atmosphériques.....	3.5
3.6.	Résultats expérimentaux.....	3.6
3.6.1	Mesure de la tension de contournement à l'état sec et humide.....	3.6
3.6.1.1	Résultats des essais.....	3.7
3.6.2	Etude de la tension de contournement d'un isolateur.....	3.7
3.6.3	Visualisation de la décharge.....	3.12
3.7.	Conclusion.....	3.21

### Chapitre 4 Répartition de la tension le long d'isolateur silicone en utilisant FEMLAB

4.1.	Introduction.....	4.1
4.2.	Méthode des éléments finis.....	4.1
4.2.1	Étapes de la méthode des éléments finis.....	4.1
4.3.	Modèle géométrique d'isolateur.....	4.2
4.4.	Identification des domaines dans le logiciel FEMLAB.....	4.3

---

---

4.4.1	Domaine de l'air.....	4.4
4.4.2	Domaines de silicone.....	4.4
4.4.3	Domaines des électrodes.....	4.4
4.4.4	Domaine de pollution.....	4.5
4.4.5	Conditions aux limites.....	4.6
4.5.	Visualisation des résultats et analyse.....	4.7
4.5.1	Isolateur propre.....	4.8
4.5.2	Isolateur polluée.....	4.8
4.6.	Etudes de la distribution de tension et champ dans les conditions polluées.....	4.15
4.7.	Conclusion.....	4.16

## Chapitre 5 Circuit équivalent de l'isolateur sous condition de pollution

5.1.	Introduction.....	5.1
5.2.	Modélisation de l'isolateur .....	5.1
5.3.	Calcul des paramètres électriques du circuit.....	5.2
5.3.3	Modélisation de la couche de pollution.....	5.6
5.4	Résultats de simulation et interprétations .....	5.7
5.4.1	Performance du l'isolateur à l'état propre .....	5.7
5.4.2	Performance du l'isolateur sous pollution.....	5.09
5.4.2.1	Cas de l'état humide .....	5.09
5.4.2.2	Cas de la bande sèche.....	5.12
5.5.	Décharge à travers la bande sèche.....	5.15
5.6.	Conclusion.....	5.17

Conclusion générale

Références bibliographiques

Annexe A1

Annexe A2

---

# Liste des figures

## Chapitre 1

- Fig. 1.1 Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre
- Fig. 1.2 Isolateurs à capot et tige
- Fig. 1.3 Isolateurs à long fût
- Fig. 1.4 Isolateur composite

## Chapitre 2

- Fig. 2.1 Circuit électrique équivalent
- Fig. 2.2 Modèle cylindrique
- Fig. 2.3 Modèle de Danis
- Fig. 2.4 Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire
- Fig. 2.5 Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent
- Fig. 2.6 Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge

## Chapitre 3

- Fig. 3.1 Montage de mesure et de visualisation
- Fig. 3.2 Principaux équipements HT utilisés
- Fig. 3.3 Schéma d'un isolateur réel
- Fig. 3.4 Facteur de correction  $K_h$
- Fig. 3.5 Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle
- Fig. 3.6 Contournement à la surface d'un isolateur pollué uniformément
- Fig. 3.7 Tension de contournement en fonction du rapport de conductivité
- Fig. 3.8 Développement de l'arc à la surface d'un isolateur pollué différemment
- Fig. 3.9 Principe de division de la surface de l'isolateur
- Fig. 3.10 Tension de contournement en fonction du rapport de conductivités
- Fig. 3.11 Développement d'arc à la surface d'un isolateur pollué (cas 33%)
- Fig. 3.14 Tension de contournement en fonction de la conductivité
- Fig. 3.15 Développement de l'arc de contournement de la surface d'un isolateur pollué
- Fig. 3.16 Tension de contournement en fonction du rapport de conductivité
- Fig. 3.17 Développement d'arc de contournement pour différents cas
- Fig. 3.18 Tension de contournement en fonction du rapport de conductivité
- Fig. 3.19 Développement d'arc pour une pollution transversale
- Fig. 3.20 Tension de contournement en fonction de la conductivité
- Fig. 3.21 Développement de l'arc de contournement pollué uniformément
- Fig. 3.22 Tension de contournement en fonction du rapport de conductivités
- Fig. 3.23 Développement de l'arc de contournement pollué transversalement
- Fig. 3.2 Principaux équipements HT utilisés

## Chapitre 4

- Fig. 4.1 Diagramme de différentes étapes de résolution dans FEMLAB
- Fig. 4.2. Modèle géométrique de l'isolateur
- Fig. 4.3 Différents domaines de l'isolateur polymère
- Fig. 4.4 Domaine de la pollution (rouge)

- Fig. 4.5 Conditions aux limites appliquées
- Fig. 4.6 Maillage de l'isolateur
- Fig. 4.7 Distribution des lignes équipotentiellles pour un isolateur propre
- Fig. 4.8 Distribution des lignes équipotentiellles pour plusieurs valeurs de la conductivité
- Fig. 4.9 Distribution de la tension pour les différentes valeurs de  $\sigma$  (uniforme)
- Fig. 4.10 Distribution du champ électrique pour les différentes valeurs de  $\sigma$  (uniforme)
- Fig. 4.11 Lignes équipotentiellles pour un isolateur pollué
- Fig. 4.12 Distribution de la tension pour les différentes valeurs de  $\sigma$
- Fig. 4.13 Distribution du champ électrique pour les différentes valeurs de  $\sigma$
- Fig. 4.14 Pollution non-uniforme ( $\sigma_1$  fixe pour l'ailette supérieure et  $\sigma_2$  variable pour les trois ailettes inférieures)
- Fig. 4.15 Pollution non-uniforme ( $\sigma_1$  fixe pour les deux ailettes supérieures et  $\sigma_2$  variable pour les deux ailettes inférieures)
- Fig. 4.17 Distribution de la tension pour les différentes valeurs de  $\sigma$  (non-uniforme)
- Fig. 4.18 Distribution du champ électrique pour les différentes valeurs de  $\sigma$  (non-uniforme)

## Chapitre 5

- Fig. 5.1 Principe de la modélisation
- Fig. 5.2 Circuit équivalent complet de l'isolateur
- Fig. 5.3 Assimilation théorique d'un isolateur à un cylindre
- Fig. 5.4 Circuit équivalent complet de l'isolateur pollué avec bandes sèches
- Fig. 5.7 Formes d'ondes simulées du courant de fuite pour le cas d'un isolateur propre
- Fig. 5.8 Variations du courant de fuite en fonction de l'amplitude de la tension appliquée
- Fig. 5.9 Formes d'ondes simulées des tensions en différents points de la surface de l'isolateur propre
- Fig. 5.10 Répartition de la tension maximale en différents points de l'isolateur propre
- Fig. 5.11 Formes d'onde du courant de fuite simulées sous les conditions humide.
- Fig. 5.12 Variations du courant de fuite en fonction de la tension appliquée
- Fig. 5.13 Formes d'ondes simulées des tensions en différents points de la surface de l'isolateur pollué.
- Fig. 5.14 Répartition de la tension maximale en différents points de l'isolateur pollué.
- Fig. 5.15 Formes d'onde de tension pour différents points de l'isolateur
- Fig. 5.16 Répartition de la tension pour plusieurs largeurs de la bande sèche
- Fig. 5.17 Formes de la tension de la bande sèche pour plusieurs valeurs de sa largeur
- Fig. 5.18 Formes du courant de la bande sèche pour plusieurs valeurs de sa largeur
- Fig. 5.19 Formes du courant de la bande sèche pour plusieurs valeurs de sa largeur
- Fig. 5.20 Variations la tension du cas de contournement de la bande sèche
- Fig. 5.21 Variations du courant de fuite du cas de contournement de la bande sèche
-

## *Liste des tableaux*

---

---

Tableau 3.1 : Dimensions d'isolateur réel

Tableau 3.2 : Caractéristiques du kaolin

Tableau 3.3. Tableau de mesure

Tableau 4.1 Données nécessaires pour le cas propre

Tableau 5.1 valeurs des capacités des éléments de la chaîne obtenus par la MEF (cas propre)

Tableau 5.2 Données de l'enveloppe en polymère

Tableau 5.3 Valeurs de la résistance et de la capacité obtenus par la MEF (cas pollué)

## *Listes des Symboles*

---

---

<b>Symboles</b>	<b>Signification</b>
R	Répartition
L	Longitudinale
T	Transversale
P	Périodique
FP	Fortement Polluée
fP	faiblement Polluée
AS	Ailette Supérieure
AI	Ailette Inférieure
$V_{\text{moy}}$	Tension moyenne de contournement
$V_c$	Tension moyenne corrigée de contournement
$V_m$	Tension de mesure
$L_1$	Largeur fortement polluée
$L_2$	Largeur faiblement polluée
L	Largeur totale
$\epsilon_r$	Permittivité relative
$\sigma_1$	Conductivité de la couche faiblement polluée
$\sigma_2$	Conductivité de la couche fortement polluée
Rdb	Résistance de la bande sèche
Cdb	Capacité de la bande sèche
RH	Résistance humide
$R_s$	Résistance de la couche de pollution
$C_s$	Capacité de la couche de pollution

---

# INTRODUCTION GENERALE

---

Les lignes aériennes et les postes des réseaux de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes telles que la pollution des isolateurs. Celle-ci constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie.

En effet par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut alors survenir. L'humidification des couches polluantes facilite en fait, la circulation d'un courant de fuite sur les surfaces isolantes provoquant des échauffements locaux et par la suite l'assèchement de la couche de pollution. Ainsi, la répartition du potentiel est modifiée d'une façon significative et des arcs partiels peuvent apparaître. Ces derniers peuvent évoluer jusqu'au contournement total de l'isolateur. Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de l'équipement haute tension et par suite la continuité de service n'est plus assurée. Ainsi, une des caractéristiques principales d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est utilisé.

Plusieurs travaux expérimentaux et théoriques ont été consacrés pour expliquer le mécanisme conduisant au contournement des isolateurs pollués. Le but de ces travaux est d'élaborer un modèle pouvant tenir compte des paramètres réels intervenant dans la génération et la propagation des arcs électriques sur les surfaces isolantes. Il s'agit en particulier de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes, de la résistivité des échanges thermiques, de la non-uniformité du mouillage, de l'intensité des arcs au voisinage de la surface isolante, de la formation d'arcs multiples et de la détermination de la tension de contournement.

Le présent notre travail exposera, dans une première partie, les concepts fondamentaux liés aux isolateurs et au phénomène de pollution de leurs surfaces ainsi qu'une recherche bibliographique des différents modèles statiques et dynamiques développées dans ce domaine.

Dans un second volet, il présentera les techniques expérimentales utilisées pour étudier les caractéristiques des arcs électriques parallèles ainsi que leur développement sur un isolateur synthétique non-uniformément polluée. Pour une première étape plusieurs essais préliminaires ont été réalisés dans le but de mettre en œuvre toutes les contraintes soit physiques ou techniques. Ces essais ont été réalisés au Laboratoire de Haute Tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia, dans la seconde partie, des mesures ayant pour but la détermination de la tension de contournement et la visualisation développement d'arc électrique sur la surface d'un isolateur synthétique. Out été faite cette investigation est faite dans le but de déterminer l'influence de la discontinuité et la continuité de la couche polluante sur son comportement.

Une dernière partie sera consacrée à la simulation basée sur la méthode des éléments finis ayant pour objectif principal la détermination de la distribution du potentiel et du champ électrique le long de l'isolateur. Cette étape, nous permettra de développer un circuit équivalent pour l'isolateur en tenant compte de la pollution. Ce dernier, dont les paramètres seront identifiés en se basant sur l'approche élément finis, sera par la suite implanté dans l'ATP/EMTP. Enfin nous terminerons cette partie par la présentation des différents résultats et leurs interprétations.

Le travail sera terminé par une conclusion générale et perspective.

## *Chapitre 01*

# GENERALITES SUR LA POLLUTION DES ISOLATEURS HAUTE TENSION

---

---

### **1.1. Introduction**

Les lignes aériennes et les postes des réseaux de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs qui constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. En effet par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut alors survenir. L'humidification des couches polluantes facilite en fait, la circulation d'un courant de fuite sur les surfaces isolantes provoquant des échauffements locaux et par la suite l'assèchement de la couche de pollution [1]. Ainsi, la répartition du potentiel est modifiée d'une façon significative et des arcs partiels peuvent apparaître. Ces derniers peuvent évoluer jusqu'au contournement total de l'isolateur. Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service l'équipement haute tension. Ainsi, une des caractéristiques principale d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est utilisé [2].

### **1.2. Isolateurs**

Les isolateurs sont des éléments essentiels dans la conception des ouvrages haute tension. Leur principal rôle est d'assurer l'isolement électrique entre les parties sous tension et celles mise à la terre [3]. De plus il est nécessaire que le choix du type d'isolateur, les contrôles de réception, la surveillance en exploitation doivent être faits avec un maximum de soin.

## 1.2.1. Définition

### 1.2.1.1. Isolateur

L'isolateur est constitué principalement d'un matériau isolant solide qui présente une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle [4]. Il est utilisé pour isoler les conducteurs ou les pièces sous tension afin d'empêcher les courtes circulations, les pertes de courant et les charges d'électrocution.

### 1.2.1.2. Contournement

Le contournement est dû au déplacement des charges libres accélérées par le champ électrique appliqué [5]. Il se manifeste par un arc électrique dans l'air environnant entre deux pièces conductrices. L'endommagement est superficiel à cause de l'énergie thermique dégagée par l'arc.

### 1.2.1.3. Ligne de fuite

La ligne de fuite ( $L_f$ ) est la distance la plus courte le long de la surface d'un isolateur entre les deux électrodes [5, 6].

### 1.2.1.4. Ligne de contournement

La ligne de contournement ( $L$ ) est la distance la plus courte dans un gaz entre les électrodes [6].

## 1.2.2. Principaux types d'isolateurs

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs : les isolateurs rigides et les éléments de chaîne

### 1.2.2.1. Isolateur rigide

Un isolateur rigide (Figure 2.1) est relié au support par une ferrure fixe. Cet isolateur est principalement soumis à des efforts de flexion et de compression, lorsqu'il est placé en position verticale [2, 3]. Il peut, dans certains cas, être placé horizontalement, voire oblique.

Ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 kV.



**Fig. 1.1** *Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre*

### **1.2.2.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne**

Ils sont constitués par le matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et à donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs. La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (chaîne d'alignement), soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage) [3, 4].

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

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

#### ***a. Isolateurs à capot et tige***

Chaque élément est constitué d'un capot, d'une partie isolante en forme de jupe et d'une tige. La coupe d'un tel isolateur est schématisée sur la (Figure 1.2) [2]. La forme de la tête est dessinée de sorte que les efforts de traction appliqués à l'isolateur se transforment, autant que possible, en compression des diélectriques sur lesquels apparaissent, toutefois, inévitablement certaines contraintes de cisaillement [3, 7].



**Fig. 1.2** *Isolateurs à capot et tige*

***b. Isolateurs à long fût***

**a) En céramique**

L'isolateur à long fût (Fig. 1.3) est constitué d'un bâton cylindrique en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques muni d'ailettes, à chaque extrémité duquel est fixée une pièce métallique de liaison. Ils sont utilisés pour les lignes haute tension [7, 8]. Leur avantage est d'être plus léger que les isolateurs à capot et tige avec un inconvénient de fragilité aux chocs mécaniques.

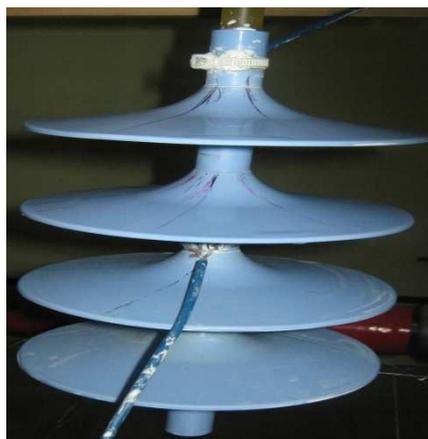
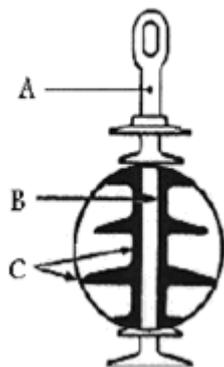


**Fig. 1.3** *Isolateurs à long fût*

### b) En matériaux synthétiques

L'intérêt principal de tels isolateurs est leur meilleure tenue à la pollution, leur faible encombrement, leur résistance au vandalisme et leur légèreté, en particulier lorsqu'on les compare aux chaînes d'isolateurs pour les lignes de tension électrique élevée [8]. De par leur constitution, ces isolateurs sont appelés composites. Ils sont constitués de trois parties ayant des rôles différents Fig. 1.4 :

- Un noyau en fibre de verre, imprégnées de résine, capable d'assurer l'isolement et de supporter les efforts mécaniques générés par les conducteurs ;
- Un revêtement en élastomère en EPDM (Ethylène Propylène Diène Monomère), vulcanisés à chaud qui donne le profil et la ligne de fuite tout en protégeant le noyau contre toute attaque des agents extérieurs en assurant l'étanchéité au raccordement avec les pièces métalliques d'extrémités. Son profil à ailettes alternées permet d'accroître la tenue sous pollution ;
- Des pièces métalliques, en fonte malléable ou acier forgé galvanisé à chaud, sont nécessaires au montage de l'isolateur et à la transmission des efforts mécaniques [9, 10].



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

**Fig. 1.4** *Isolateur composite*

### **1.2.3. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs**

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

#### **1.2.3.1. Céramique**

Le développement et la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances [8]. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des céramiques à grains très fins. Souvent on trouve les céramiques dans les postes: isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance.

#### **1.2.3.2. Verre**

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présente le verre, le bas prix et l'observation des défauts sont très facile [3, 9]. On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit [11].

#### **1.2.3.3. Matériaux synthétiques**

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique [3, 11, 12]. Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécaniques, atmosphériques...).

### 1.2.4. Choix des isolateurs

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépend la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service [2, 8].

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.

### 1.3. Pollution des isolateurs

Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident. La sévérité de la pollution d'un site peut changer. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation. Le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution.

#### 1.3.1. Sources de pollution

On peut classer les différentes sources de pollution en trois catégories [10, 13]:

- Pollution naturelle (marine, désertique,...)
- Pollution industrielle
- Pollution mixte.

##### 1.3.1.1. Pollution naturelle

Cette pollution peut être marine, désertique ou autre, provenant des dépôts de poussières véhiculés par les vents.

###### a. Pollution marine

Dans les installations en bordure de mer, les embruns portés par le vent déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel qui, à plus ou moins longue échéance, recouvre toute la surface de l'isolateur y compris les parties les mieux

protégées. Cette couche de sel, humidifiée par les embruns eux même, ou par un brouillard ou simplement par condensation, devient conductrice. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance dans certaines conditions, et se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur [3, 14].

### **b. Pollution désertique**

Dans les régions désertiques, les fréquentes tempêtes de sables déposent progressivement sur les surfaces des isolateurs une couche de pollution contenant des sels. Une fois humidifiée, cette couche devient beaucoup plus conductrice. Un courant de fuite apparaît brusquement accompagné d'arcs partiels, dont la propagation à la surfaces de l'isolateur peut aussi conduire à un contournement total de l'isolateur [14, 15].

### **c. Autres sources de pollution naturelle**

La pluie est un phénomène naturel propice à l'humidification des isolateurs par excellence. Lorsqu'elle est intense, elle est susceptible de provoquer la désagrégation des dépôts solides. Cependant, cet auto lavage, favorable à l'amélioration des qualités diélectriques des isolateurs, est contrarié par le phénomène de ruissellement.

En présence d'une pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne ou de colonne isolante [2, 3, 14]. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut entraîner le contournement de la chaîne d'isolateur ; c'est le contournement sous pluie.

#### **1.3.1.2. Pollution industrielle**

Ce type de pollution est fréquent dans les zones industrielles surtout à proximité des usines, entreprises de production éjectant des fumées (raffinerie, cimenterie, .....).

Par ailleurs les gaz d'échappements (centrale thermiques) et les engrais utilisés en agriculture contribuent aussi aux dépôts observés à la surface des isolateurs[13, 15].

En présence d'une humidité intense, le sel contenu dans ces polluants abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs et le contournement peut parfois avoir lieu [17].

### 1.3.1.3. Pollution mixte

Ce type de pollution résulte de la combinaison entre deux ou plusieurs pollutions précitées, comme exemple les pollutions marine et industrielle lorsque les installations électriques sont situées en bord de mer [13, 14].

### 1.3.2. Degré de pollution

C'est la valeur qui caractérise la pollution telle que la salinité, la conductivité de la couche et la densité de dépôt de sel [8, 21].

### 1.3.3. Densité de dépôt de sel équivalent (DDSE)

La DDSE est utilisée comme un paramètre de base pour l'évaluation du comportement d'isolateur sur site. Elle est le dépôt équivalent exprimé en mg de Na Cl par cm<sup>2</sup> de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel, lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau [5, 13].

La densité du dépôt de sel équivalent est donnée comme suit :

$$DDSE = S_a \frac{V}{S} \quad (1.1)$$

Telle que :

V est le volume de la suspension en cm<sup>3</sup> ;

S est la surface nettoyée en cm<sup>2</sup> ;

S<sub>a</sub> est la salinité exprimé en kg/m<sup>3</sup>.

#### 1.3.3.1. Densité de dépôt non soluble (DDNS)

Elle correspond à la quantité de produits polluants non solubles présents dans une couche de pollution [13]. La détermination de la DDNS s'effectue comme suit :

La solution obtenue par la méthode de la DDSE est filtrée à l'aide d'un papier filtre. Le dépôt non soluble restant après filtrage est séché puis pesé.

La DDNS peut être calculée par la formule suivante :

$$DDNS = \frac{1000(m_f - m_i)}{A} \quad (1.2)$$

Où :

DDNS est la densité de dépôt non soluble ;

m<sub>f</sub> est la masse du papier filtre contenant la pollution après séchage en g ;

$m_i$  est la masse initiale du papier filtre en g ;

$A$  est la surface lavée de l'isolateur en  $\text{cm}^2$ .

#### **1.3.4. Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués**

La tenue électrique d'isolateurs dépend de plusieurs facteurs météorologiques et parmi eux on distingue:

##### **a. le Vent**

Le vent joue un double rôle. Il assure d'une part le transport et la distribution des dépôts polluants formés sur les surfaces des isolateurs électriques, d'autre part il peut se comporter comme agent d'auto-nettoyage lorsque sa vitesse est élevée [16].

##### **b. la Pluie**

Les fortes pluies permettent en général le nettoyage des surfaces polluées des isolateurs, ce pendant, les fines pluies peuvent mouiller les surfaces polluées, ce qui augmente le risque de contournement [8, 22].

##### **c. l'Humidité**

L'humidification est considérée comme un obstacle car elle influe négativement sur la tenue électrique des isolateurs puisqu'elle accroît la conductivité électrique des agents polluants déposés à leur surface et entraîne par conséquent la diminution de leur tenue [8].

##### **d. la Température**

Contrairement à l'humidité, l'élévation de la température favorise l'assèchement des dépôts polluants, ce qui fait augmenter leur résistivité et par conséquent la tenue des isolateurs contaminés devient plus importante. Cependant, la différence de température entre le jour et la nuit peut provoquer le phénomène de condensation et l'humidification de la couche de pollution.

### **1.3.5. Influence de la répartition de la pollution sur la surface des isolateurs**

La répartition de la couche de pollution dépend du profil des isolateurs [2], de la hauteur et de la disposition des chaînes d'isolateurs par rapport au sol et le niveau de la tension qui leur est appliqué. On en compte trois catégories:

- Longitudinale non-uniforme et non-périodique;
- Transversale non-uniforme;
- Longitudinale non-uniforme et périodique.

#### **1.3.5.1. Répartition Longitudinale non-uniforme et non-périodique par groupe**

Elle est caractérisée par un ensemble de groupes d'isolateurs, soumis à différentes conductivités de la couche de pollution, dont la valeur est constante dans chaque groupe. Nous retrouvons ce type de pollution dans les cas suivants:

- Temporairement pendant le lavage sous tension,
- Dans les chaînes d'isolateurs en forme de « T »,

#### **1.3.5.2. Répartition transversale non-uniforme**

Ce type de non uniformité est caractérisé par des secteurs ou bandes de pollution de différentes largeurs, dont la conductivité superficielle est variable d'un secteur à l'autre le long du périmètre de l'isolateur tout en restant constante dans le même secteur, le long de la ligne de fuite. Ce type de répartition est dû principalement à l'existence d'une direction privilégiée des vents et des pluies [2,18].

#### **1.3.5.3. Répartition Longitudinale non-uniforme périodique**

Ce type est le plus fréquent. Il est caractérisé par une variation périodique de la conductivité de la couche de pollution le long de la ligne de fuite, mais elle garde une symétrie circulaire. Ces principales spécifications sont :

- la face inférieure de l'isolateur présente une conductivité plus grande que la face supérieure,

- la concentration de la pollution augmente de la zone périphérique vers la zone centrale,
- la pollution est plus accentuée entre les nervures.

Ce type de regroupement concerne une accumulation progressive de la pollution et ne peut pas rendre compte des accumulations aléatoires en cas de conditions atmosphériques exceptionnelles [18]

### **1.3.6. Phénomène du contournement des isolateurs**

#### **1.3.6.1. Tension de contournement**

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les deux électrodes. Elle dépend de [8, 19]:

- la nature de la tension et sa polarité;
- la longueur de l'isolateur;
- la forme des électrodes;
- la résistivité volumique moyenne de la couche polluante;
- la répartition de la couche de pollution;
- le profil de l'isolateur;
- les conditions climatiques.

#### **1.3.6.2. Tension de tenue**

Elle est définie comme étant le niveau de tension le plus important, qu'une isolation peut supporter sans provoquer de contournement [6].

#### **1.3.6.3. Courant de fuite**

C'est le courant qui circule à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur [8, 17]. Ce courant est de faible d'amplitude et son intensité devient de plus en plus importante lorsqu'on s'approche de la tension de contournement.

Ce courant dépend de plusieurs facteurs tels que:

- la nature de la couche polluante;
- la nature de la tension appliquée et sa polarité;
- la forme des électrodes;

- la longueur de la ligne de fuite.

#### 1.3.6.4. Conductance superficielle

C'est le rapport du courant traversant l'isolateur et la tension qui lui est appliquée [11].

$$G = \frac{I}{V} \quad (1.3)$$

Tels que:

$I$  courant en (A);

$V$  tension en (V);

$G$  conductance en (S).

En utilisant le facteur de forme  $F$  de l'isolateur donné par:

$$F = \oint_L \frac{dL}{p(L)} \quad (1.4)$$

La conductivité superficielle peut être déterminée selon:

$$K = F G \quad (1.5)$$

La connaissance de l'épaisseur de la couche de pollution nous permet de déduire la conductance et la conductivité volumique.

Dans le cas d'une couche non homogène, la conductivité superficielle locale peut être obtenue en mesurant la conductance d'une partie de la surface isolante en utilisant des électrodes auxiliaires intermédiaires.

#### 1.3.6.5. Courant de fuite critique

C'est le courant minimal nécessaire pour provoquer un contournement sur un isolateur à une tension donnée, sa valeur est obtenue dans la dernière demi période avant le contournement [20]. Il est indépendant de la forme de l'isolateur et du procédé d'essai auquel il est soumis, mais il dépend du rapport entre la tension appliquée et la longueur de la ligne de fuite de l'isolateur.

### 1.3.6.6. Ligne de fuite spécifique ( $L_s$ ) d'un isolateur

La ligne de fuite spécifique peut être obtenue en utilisant [11]:

$$L_s = \frac{L}{(\sqrt{3}V_e)} \quad (1.6)$$

Avec:

$L$  en mm;

$V_e$  en kV.

### 1.3.7. Contournement

Le phénomène de contournement est une décharge disruptive accompagnée d'étincelles qui se déplacent sur l'interface de l'isolateur, d'une électrode vers une autre et finir par la formation d'un pont conducteur entre ses deux électrodes [2, 8].

Le contournement des isolateurs sous pollution peut être décrit en quatre étapes:

#### 1.3.7.1. Dépôt de pollution

Les particules du dépôt sont apportées et déposées par le vent sur la surface des isolateurs. Celles-ci se concentrent entre les nervures ou derrière le capot. Leur accumulation est continue et n'est modifiée que par le vent et la pluie [2]. Les facteurs de vitesse d'accumulation de ces agents polluants sont les suivants:

- Nature du dépôt, poids et taille des particules;
- Distance de l'isolateur par rapport à la source de pollution et par rapport au sol;
- Vitesse du vent;
- Orientation de la chaîne d'isolateur;
- Ecran éventuel des structures avoisinantes;
- Forme de l'isolateur et son aptitude à l'auto nettoyage par les pluies et les vents.

#### 1.3.7.2. Humidification de la pollution

Le brouillard, la condensation et la petite pluie humidifient graduellement et pratiquement sans délayage la surface de l'isolateur. Ces conditions correspondent à des

conditions dites critiques. Les sels contenus dans le dépôt polluant se dissolvent et créent un électrolyte conducteur sur la surface de l'isolateur. Un courant de fuite prend alors naissance dès qu'un film conducteur se forme sur la surface de l'isolateur. Pendant le cycle d'humidification, le courant de fuite augmente jusqu'à la valeur maximale mais diminue s'il y a délayage ou séchage. Le niveau de ce courant de fuite dépend du temps, de la nature et de la quantité des sels solubles et des produits insolubles contenus dans le dépôt. Les produits insolubles maintiennent par absorption une certaine quantité d'eau à la surface de l'isolateur, entretenant ainsi l'humidification du dépôt [8].

### **1.3.7.3. Développement des zones sèches et apparition des arcs**

Par effet joule, la température s'élève, l'eau s'évapore et le dépôt devient moins conducteur favorisant la création de bandes sèches [2, 8]. On observe alors une réduction du courant ainsi qu'une modification de la répartition de potentiel. Ce dernier est appliqué exclusivement aux bornes de ces bandes. Si leur largeur est insuffisante pour supporter le potentiel correspondant, un arc prend naissance.

### **1.3.7.4. Comportement des arcs**

La résistance du dépôt modifié est en série avec l'arc. Elle limite ainsi le courant de l'arc et sa longueur. Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra. La bande sèche s'humidifiera à nouveau et le mécanisme se répétera encore [2, 3, 8]. Tant que le courant de fuite n'excédera pas ce que l'on appelle «le courant critique» correspondant à une «longueur critique» de l'arc, cette situation reste stable. Si la résistivité de la pollution humidifiée est suffisamment faible et ce courant de fuite augmente jusqu'au point de dépasser le seuil du courant critique, l'arc s'allonge rapidement et l'isolateur contourne.

## **1.4. Conséquences de la pollution**

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs provoquent une conductivité électrique superficielle [2, 12, 13, 23]. Celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. Suivant les conditions atmosphériques (pluie fine, brouillard,...), la tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points

de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur :

***a. Arc non localisé***

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçe à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courant de fuite entraînant une petite perte d'énergie, généralement supportable par l'installation [24].

***b. Arc fixe***

L'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en se réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant.

***c. Court-circuit***

Dans ce cas, l'arc électrique atteint l'électrode opposée. Ainsi, la formation d'un pont conducteur sur la surface isolante polluée favorise le passage d'un fort courant, ce cas engendre la rupture totale de l'isolation [23, 24].

## **1.5. Techniques de lutte contre la pollution**

L'augmentation du degré de pollution représente un risque immense pour les installations électriques [2]. Pour cela plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées.

### **1.5.1. Allongement de la ligne de fuite**

Cette méthode permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux techniques sont 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.
- L'utilisation de prolonger de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [25].

### **1.5.2. Isolateurs plats**

Les isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'autonettoient sous l'effet du vent [12, 26].

### **1.5.3. Graissage périodique**

Par mesure économique, seule les isolateurs de postes sont concernés [2]. On utilise des graisses silicones. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs.

### **1.5.4. Revêtement silicone**

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau [26], 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.

### **1.5.5. Les isolateurs composites**

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères [13, 20]. 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.

### **1.5.6. Nettoyage des isolateurs**

Le nettoyage manuel et le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde [2]. Néanmoins, l'application de ces méthodes pose des problèmes majeurs à cause des interruptions de service, parfois assez longues. 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 [12, 15, 26].

## **1.6. Conclusion**

La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension.

Pour mieux dimensionner l'isolateur, 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 (degré de pollution) 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.

# MODELES DU CONTOURNEMENTS

### 2.1. Introduction

Plusieurs travaux expérimentaux et théoriques ont été consacrés pour expliquer le mécanisme conduisant au contournement des isolateurs pollués. Le but de ces travaux est d'élaborer un modèle pouvant tenir compte des paramètres réels intervenant dans la génération et la propagation des arcs électriques sur les surfaces isolantes. Il s'agit en particulier de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes (homogènes ou non homogènes), de la résistivité des échanges thermiques, de la non uniformité du mouillage, de l'intensité des arcs au voisinage de la surface isolante, de la formation d'arcs multiples et de la détermination de la tension de contournement [27].

Dans ce qui va suivre, nous allons exposer une recherche bibliographique des différents modèles statiques et dynamiques développés dans ce domaine.

Devant le nombre incalculable de paramètres pouvant intervenir dans le comportement des isolateurs, des modèles de laboratoires sont parfois adoptés par les chercheurs. Ces travaux présentent l'avantage de contourner la difficulté liée à la forme complexe de l'isolateur, par des modèles à géométrie simple.

Nous citons brièvement quelques uns de ces modèles sous pollution:

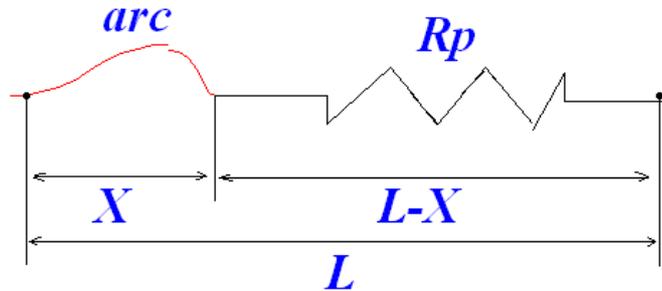
### 2.2. Modélisation du contournement des isolateurs sous pollution

#### 2.2.1. Modèle d'Obenaus

Le premier chercheur qui était à l'origine des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante, sous tension continue est Obenaus [27, 28, 29]. Partant d'un modèle type circuit électrique équivalent, constitué d'un arc de longueur  $x$  en série avec une résistance  $R_p$  représentant la résistance de la pollution (Figure 2.1) où  $L$  représente la longueur de fuite totale, il en a déduit la tension d'arc :

$$V_{arc} = \frac{AN}{I^n} \quad (2.1)$$

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



**Fig. 2.1** circuit électrique équivalent [29, 30]

En effet, en appliquant la loi d'Ohm à ce circuit, on peut écrire:

$$V = V_e + V_{arc} + R_p(X)I \quad (2.2)$$

Avec :

$V$  : est la tension appliquée ;

$V_e$  : la chute de tension totale aux bornes des électrodes; cette dernière dépend des conditions expérimentales.

$R_p(X)$  : est la résistance de la couche polluée.

$V_{arc}$  : la tension d'arc telle que :

$$V_{arc} = R_{arc}(X)I \quad (2.3)$$

$R_{arc}$  est la résistance d'arc par unité de longueur ;

$I$  le courant qui traverse la couche polluée.

La décharge est caractérisée par la présence d'un champ électrique longitudinal  $E_a$ :

$$E_a = \frac{V_{arc}}{X} = N \cdot I^{-n} \quad (2.4)$$

D'où l'équation:

$$V_{arc} = N \cdot X \cdot I^{-n} \quad (2.5)$$

Ainsi, on obtient l'équation de la tension totale appliquée au système:

$$V = V_e + N \cdot X \cdot I^{-n} + R_p(X) \cdot I \quad (2.6)$$

Les valeurs des paramètres  $n$  et  $N$  dépendent du milieu dans lequel brûle la décharge.

$$0.40 \leq n \leq 1 \quad \text{et} \quad 3 \leq N \leq 500$$

### 2.2.2. Modèle de Neumarker

En reprenant les travaux d'Obenaus, et en y ajoutant l'hypothèse d'une couche de pollution de résistance  $r_p$  uniforme par unité de longueur de fuite, Neumarker [30, 31, 32] a proposé l'expression suivante pour la résistance de pollution  $R_p$  :

$$R_p = r_p(L - x) \quad (2.7)$$

En introduisant cette expression dans le modèle d'Obenaus et en négligeant les chutes de tension cumulées aux électrodes, la tension  $V$  aux bornes de l'isolateur sera :

$$V = V_{arc} + r_p(L - x) \quad (2.8)$$

Ou encore :

$$V = \frac{NX}{I^n} + r_p(L - x) \quad (2.9)$$

Ainsi, Neumarker déduit le courant et la longueur d'arc critiques :

$$I_c = \left( \frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (2.10)$$

Et

$$x_c = \frac{L}{n+1} \quad (2.11)$$

L'expression de la tension critique de contournement est par conséquent :

$$U_c = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} L \quad (2.12)$$

D'autres chercheurs ont introduit des modifications au modèle d'Obenaus. Ces modifications se résument comme suit :

- Dans la référence [33, 34,35], les auteurs ont déterminé la condition de maintien de l'arc électrique pour le modèle cylindrique (Fig. 2.2) donnée par :

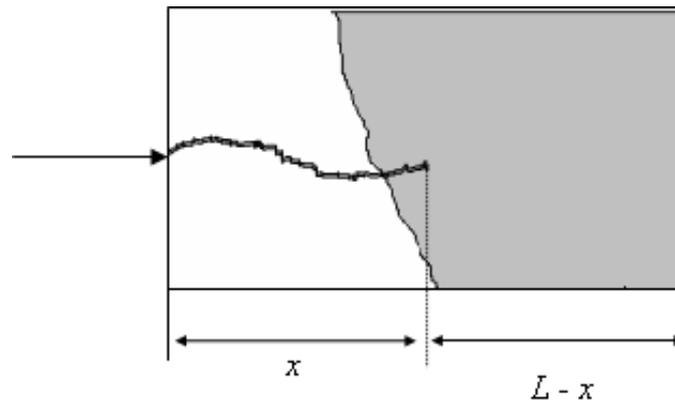
$$V_{CX} = (n+1)(NX)^{\frac{1}{n+1}} \left( \frac{r(L-X)}{n} \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (2.13)$$

Avec :

$X$  : longueur de l'arc ;

$L - X$  : longueur de la zone non court-circuitée par l'arc ;

Les valeurs de  $n$  et  $A$  dépendent du milieu dans lequel s'amorce la décharge.



**Fig. 2.2** Modèle cylindrique [33]

- Un autre modèle a été développé par Danis [36, 37] dans lequel le montage expérimental est constitué d'une plaque isolante, munie de deux électrodes identiques, rectangulaires et placées aux deux extrémités de la plaque (Figure 2.3). Des zones sèches sont préétablies sur le modèle, à différents endroits de la plaque, afin d'étudier le développement de l'arc électrique. En considérant que la résistance de la couche polluante est linéaire par rapport à la longueur, l'équation qui régit le modèle est :

$$V = K \cdot I^{-n} + r_p (L - x)I \quad (2.14)$$

Avec  $n \leq 0.5$  et  $200 \leq A \leq 400$ ,

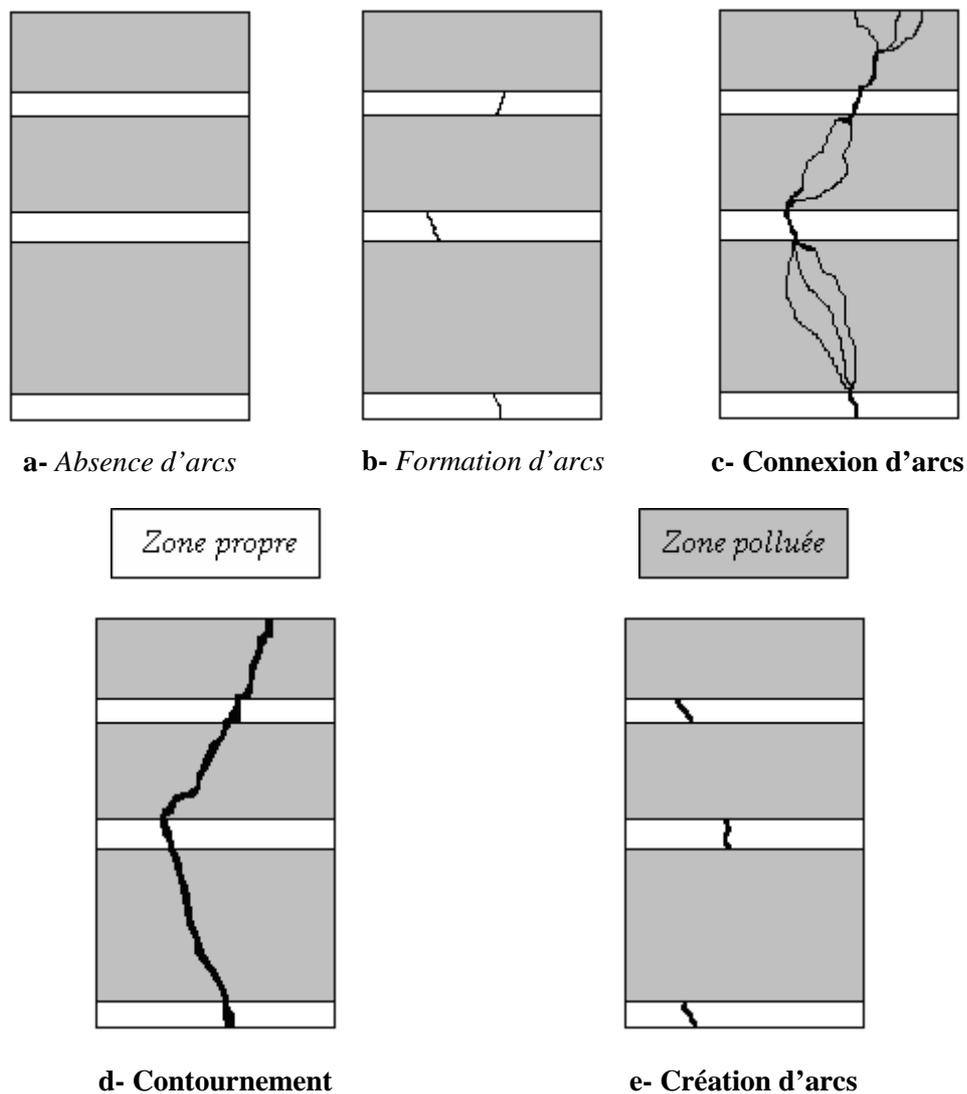
$r_p$  est la résistance linéique.

Le courant et les tensions critiques déduites par l'auteur sont donnés par les expressions :

$$I_c = \left( \frac{K}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (2.15)$$

et

$$U_c = L(Kr_p)^{\frac{1}{n+1}} = KI_c^{-1} \quad (2.16)$$



**Fig. 2.3** Modèle de Danis [37]

### 2.2.3. Modèles à base de circuits électriques

Les chercheurs utilisant cette technique considèrent que la décharge peut être représentée par un circuit électrique équivalent, dans la référence [38] l'auteur a élaboré un modèle statique en tension alternative pour les deux cas de pollution continue et discontinue. Pour une pollution continue et en basant sur le modèle d'Obenaus, l'auteur reporte que son modèle permet d'avoir les différentes caractéristiques concernant le développement de l'arc électrique sur une surface isolante uniformément polluée.

En se basant sur l'équation du circuit et sur la condition limite de réamorçage [39, 40], il a déterminé l'expression donnant la résistance de pollution en série avec l'arc, en

fonction de la tension appliquée et le courant de fuite :

$$R_p = \frac{1}{\rho} \frac{K - 100 U}{K I} = \rho F_p \quad (2.17)$$

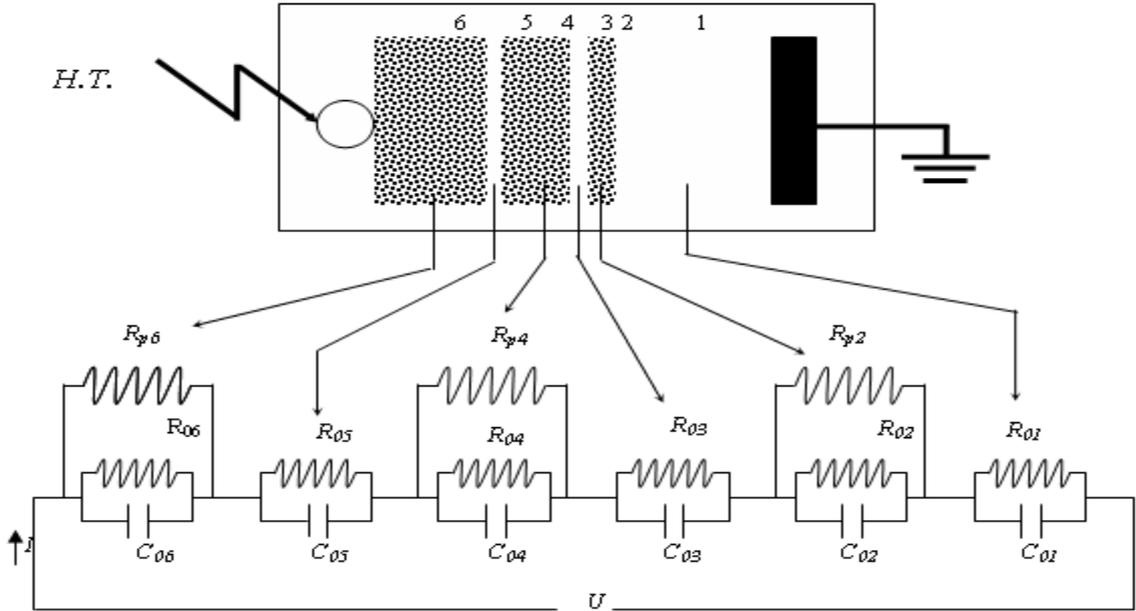
Où  $\rho$  représente la résistivité de la couche de pollution et K la constante de la caractéristique statique de l'arc.

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

Un modèle amélioré a été mis au point par Tegar [41] pour caractériser la propagation d'une décharge électrique sur des surfaces isolantes soumises à une pollution continue non uniforme.

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

La figure 2.4 représente le circuit électrique équivalent au modèle de laboratoire sous pollution discontinue. Dans ce circuit, chaque bande est constituée d'une résistance  $R_{0i}$  en parallèle avec une capacité  $C_{0i}$ . Pour chaque bande polluée, ces circuits sont shuntés par une résistance  $R_{pi}$  représentant la couche de pollution.



**Fig. 2.4** Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire [38]

Le fait que les couches polluantes possèdent des formes rectangulaires et selon la recommandation de la CEI 60-1 [42], l'expression de la résistance pour chaque bande polluée  $i$  peut être formulée par :

$$R_{pi} = R_{sp} \int_0^{L_i} \frac{dl}{b} = R_{sp} \frac{L_i}{b} = R_p f \frac{L_i}{b} \tag{2.18}$$

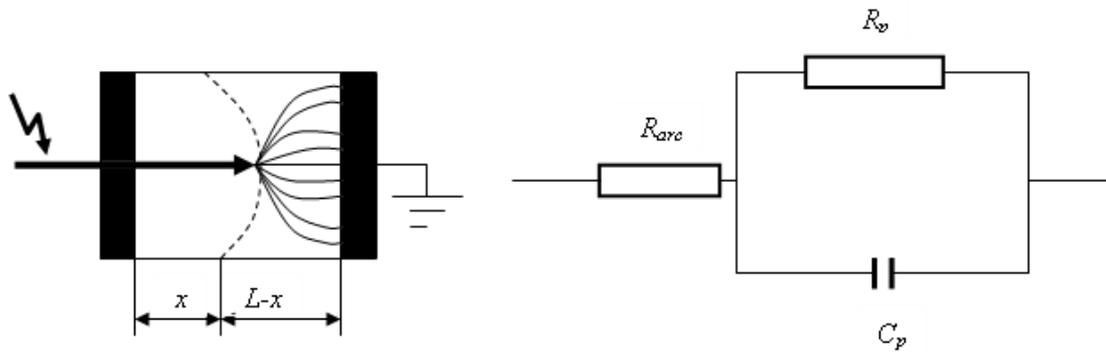
Avec

- $R_{pi}$ : la résistance de la couche de pollution;
- $dl$ : élément de longueur;
- $L_i$ : la longueur de la pollution;
- $b$ : la largeur de la couche de pollution;
- $f$ : le facteur de forme.

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

**2.2.4. Modèle Dhahbi, Beroual et Krahenbul**

Ces auteurs [30, 43] ont proposé un nouveau critère analytique de propagation de la décharge en faisant intervenir l'impédance équivalente  $Z_{eq}$  d'un circuit électrique (Figure 2.5), simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite.



**Fig. 2.5** Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent [43]

En utilisant la condition nécessaire à la propagation de l'arc, donnée par :

$$\frac{d|Z_{eq}|}{dx} \leq 0 \tag{2.19}$$

Ces auteurs ont abouti à un critère qui est :

$$E_{arc} \geq \frac{E_p}{\sqrt{a}} \tag{2.20}$$

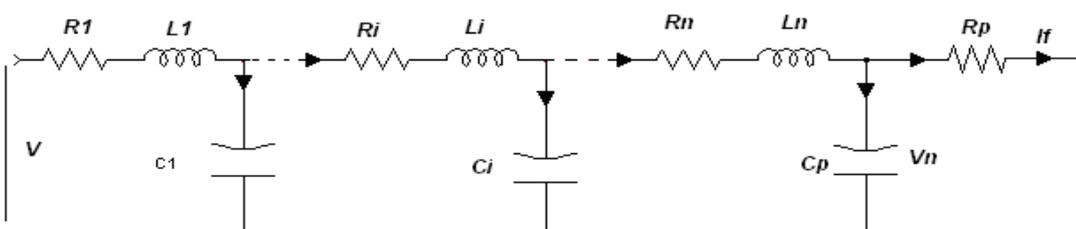
Sous tension continue  $a=1$ , car  $a = 1 + \omega^2 \rho_p^2 \varepsilon^2$

Où

$\omega$  : la pulsation,  $\rho_p$  : la résistivité de la pollution,  $\varepsilon$  : la permittivité de la pollution.

### 2.2.5. Modèle de Dhahbi et Beroual

Ces deux chercheurs [44,45] considèrent que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure 2.6. Sachant que pour chaque saut de l'arc, on obtient une nouvelle cellule ayant les paramètres suivants :  $R_i$ ,  $C_i$ ,  $L_i$  et  $U_i$ .



**Fig. 2.6** Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge [45]

Où

$R_p$  : la résistance de la pollution,

$C_p$  : la capacité de la couche de pollution,

$R_i$  : la résistance de l'arc,

$C_i$  : la capacité de la décharge,

$L_i$  : l'inductance de la décharge.

Ce modèle est basé sur le critère d'impédance. Pour déterminer ces paramètres ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ), utilise l'équation de Mayer pour calculer la variation de la résistance, l'approximation sphérique pour déterminer la capacité et concernant l'inductance du canal de la décharge, les auteurs ont utilisé les simplifications proposées par I. Fofana et A. Beroual.

### **2.3. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons mené une recherche bibliographique qui nous a permis d'explorer les principaux modèles statiques et dynamiques, ainsi que de citer certains mécanismes et critères de propagation de la décharge sous tensions continue, alternative.

La plupart des modèles traitent le problème de manière statique et reposent sur le modèle proposé par Obenaus. Ils traitent le phénomène de contournement sous un aspect global en lui associant des critères d'extension se basant soit sur le champ électrique, soit sur l'énergie ou encore la puissance dissipée.

Les principaux critères de propagation rencontrés dans la littérature ont été établis sur la base de conditions faisant intervenir soit l'impédance vue des électrodes, soit le courant, soit le champ électrique, soit la puissance ou encore l'énergie fournie par la source.

# TECHNIQUES ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

### 3.1. Introduction

Dans le but de déterminer l'influence de la discontinuité et la continuité de la couche polluante sur le comportement des isolateurs, nous avons effectué de nombreux essais sur un isolateur réel en silicone. Ces essais ont été réalisés au Laboratoire de Haute Tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia. Ils concernent la mesure de la tension de contournement et la visualisation du développement d'arc électrique sur la surface de l'isolateur.

Dans ce chapitre on décrit en premier lieu les techniques expérimentales utilisées pour étudier les caractéristiques des arcs électriques ainsi que leur développement sur une surface isolante non uniformément polluée. Pour cela plusieurs essais préliminaires ont été réalisés dans le but de s'assurer du bon fonctionnement du matériel en tenant compte de toutes les contraintes qu'elles soient physiques ou techniques. Et en deuxième lieu nous présenterons les résultats de mesure obtenus et leurs discussions.

### 3.2. Dispositif expérimental

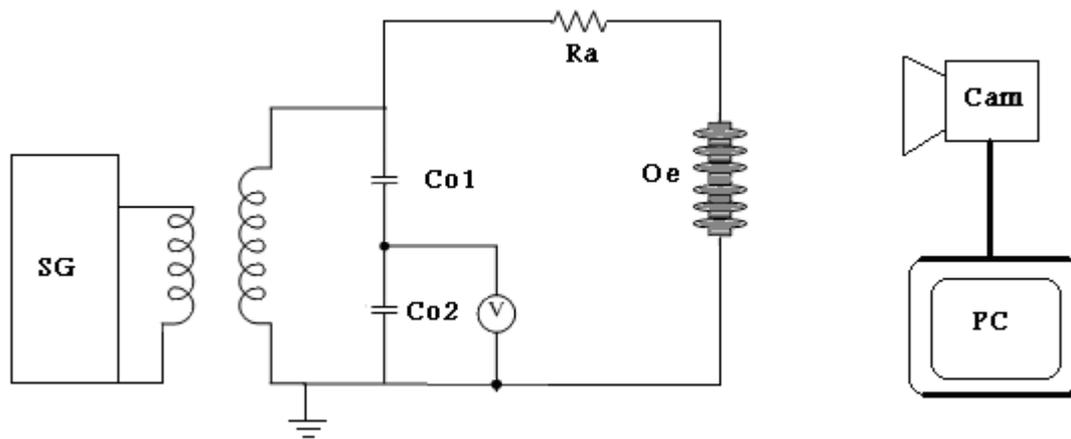
#### 3.2.1. Circuit d'essai du laboratoire de Bejaia

La figure 4.1 représente le dispositif expérimental du laboratoire de haute tension (cellule des diélectriques) de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia. Ce dispositif est constitué de:

- Circuit d'alimentation (transformateur 0,08 A/135 kV);
- Circuit de mesure (tension de contournement, courant de fuite);
- Modèle expérimental (isolateurs de silicone réels);
- Système audiovisuel (caméscope ...).

En outre, nous disposons d'un baromètre, d'un thermomètre et d'un hygromètre à cheveux pour la mesure des paramètres physiques de l'air ambiant.

La partie haute tension est isolée du manipulateur par une grille de protection reliée à la terre.



**Fig. 3.1** Montage de mesure et de visualisation

Avec :

Tr : Transformateur 0.08 A/135 kV;

Ra : Résistance d'affaiblissement du courant;

Oe : Objet d'essai (isolateur sous pollution);

V: Voltmètre de crête (MU11);

Cam : Caméscope numérique ;

SG: Appareil de Commande manuelle ou automatique du transformateur;

PC: Ecran de PC.

$C_{01}$  ;  $C_{02}$  diviseur capacitif.



SG



Voltmètre de crête



PC



Transformateur



Filtrage



Objet d'essai

**Fig. 3.2** Principaux équipements HT utilisés

### 3.2.2. Circuit d'alimentation

Il est constitué d'un transformateur d'essai dont le primaire est relié à l'autotransformateur intégré dans SG et qui permet d'ajuster la tension à la valeur désirée. Cette tension varie de 0 à 135 kV avec un courant de 0,08 A et une puissance de 8 kVA.

### 3.2.3. Circuit de mesure

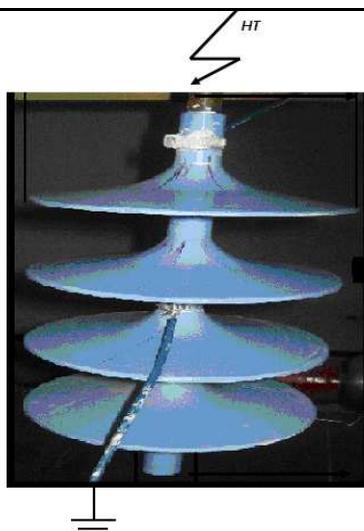
La tension d'essai est mesurée à l'aide d'un diviseur de tension capacitif, constitué d'une capacité haute tension  $C_{01}$  en série avec la résistance basse tension, capacité du câble coaxial et les résistances d'entrée des appareils de mesure, ce qui nous permet de réduire de  $1/404$  la tension réelle appliquée en tension alternative. Le voltmètre de crête (MU11) affiche la tension réduite et mémorise automatiquement la tension de contournement pendant quelques secondes.

Les caractéristiques techniques de MU11 sont:

- Haute tension maximale mesurable en alternatif  $U_{MOY} = 700$  kV;
- Tension de mesure maximale sans diviseur  $\hat{U} = 1000$  V;
- Erreur  $\pm 1$  % de la valeur mesure;
- Plage de mesure  $20V < U_{\text{crête}} < 1000$  V;
- Fréquence de la tension de mesure  $20$  Hz  $< f < 1000$  Hz;

### 3.3. Objet d'essai

Les essais sont effectués sur l'isolateur réel montré dans la figure 4.3



**Fig. 3.3 Schéma d'un isolateur réel**

Les dimensions de l'isolateur sont mesurées grâce à un mètre ruban. Les résultats de mesures concernant la longueur de la ligne de fuite et les dimensions de l'isolateur sont représentés dans le tableau 3.1 :

Tableau 3.1 <i>Dimensions d'isolateur réel</i>	
Grandeur	Taille en cm
Rayon de l'ailette	16,55
Ligne de fuite	89,5
Langueur	40
Pas entre ailettes	3,6
Rayon de la fibre en verre	5,2

### 3.4. Mode opératoire

Avant chaque essai, l'isolateur doit être bien rincée avec l'eau dont la conductivité est inférieure à celle de la couche de pollution puis séchée à l'aide du papier absorbant.

Lors de l'essai sous pollution l'espace polluée est fixée à 5 cm et on fait varier la conductivité superficielle, la configuration de la pollution.

Le modèle d'essai est déposé horizontalement sur un isolateur support en bois, ce modèle expérimental se trouve ainsi placé à un mètre environ du sol et à une distance suffisamment grande du transformateur d'essai, pour éviter tout phénomène parasite dû au sol et au bobinage du transformateur.

#### 3.4.1. Préparation des isolateurs

L'isolateur est lavé à l'eau du robinet, séché en utilisant des serviettes en papier et laissé reposer pendant une journée. Après quoi on applique, à l'aide d'une éponge, une couche de solution composée de 20 g de Kaolin et 1/4 litre d'eau distillée suivi d'une opération d'assèchement. On répète cette phase 3 fois. L'isolateur est maintenant prêt à l'utilisation.

#### 3.4.2. Préparation de la solution polluante

La solution polluante est préparée à partir de l'eau distillée et de kaolin; avec les proportions suivantes :

20g de kaolin (tableau (3.2)) pour un litre d'eau distillée auxquels on rajoute des petites quantités de sel pour varier la conductivité de la pollution. Ainsi nous fixons la

conductivité de la solution ionique à la valeur désirée, grâce à un conductimètre, qui affiche la conductivité de la solution ramenée à la température ambiante 20°C.

Les valeurs de la conductivité volumique sont 0,58; 2,5; 5 ; 10 et 17,5mS/cm, et celles de la conductivité superficielle sont respectivement de 1,5µS; 3µS; 4µS; 5µS et 7 µS. A chaque essai, la conductivité est vérifiée et ajustée afin de garder les mêmes caractéristiques de la pollution.

Les principales caractéristiques do kaolin sont décrites dan le tableau (3.2).

<b>Tableau 3.2</b> <i>Caractéristiques de kaolin</i>								
<b>Matière inerte</b>	<b>Composition en poids %</b>				<b>Granulométrie (Distribution cumulée) µm</b>			<b>Conductivité Volumique µS/cm</b>
<b>Kaolin</b>	SiO <sub>2</sub>	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	16%	50%	84%	15-200
	40-50	30-40	0,3-2	7-14	0,1-0.2	0,4-1	2-10	

### **3.5. Correction des résultats en fonction des paramètres physiques de l'air**

Les paramètres physiques de l'air influent d'une manière directe sur les mesures effectuées, telles que la tension de contournement, le courant de fuite et la propagation des arcs sur la surface de l'isolateur. En effet nous avons remarqué une différence entre les résultats d'un même essai, ce qui exige, de tout ramener aux conditions normales de la température, de la pression et de l'humidité ( $\Theta_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $P_0=100$  kPa,  $H_0 = 11\text{g/m}^3$ ), conformément à la norme CEI 60-1 [42] et 60-2 [46].

#### **3.5.1. Correction des résultats suivant les conditions atmosphériques**

La tension de contournement des isolateurs électriques de haute tension est strictement liée aux conditions atmosphériques nominales, dont on trouve la température ambiante, la pression et l'humidité de l'air environnant. La valeur de la tension de contournement ramenée aux conditions normales de température  $\theta_0$ , de pression  $P_0$  et d'humidité  $H_0$  ( $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $P_0 = 100$  kPa et  $H_0 = 11\text{g/m}$ ), est donnée par la relation suivante:

$$U = \frac{K_h}{K_d} U_m \quad (3.1)$$

Avec:

$U_m$ : tension de contournement mesurée à la température  $\theta$ , à la pression  $P$  et à l'humidité  $H$ ;

$U$ : tension de contournement ramenée aux conditions normales de température  $\theta_0$ , de pression  $P_0$  et d'humidité  $H_0$ .

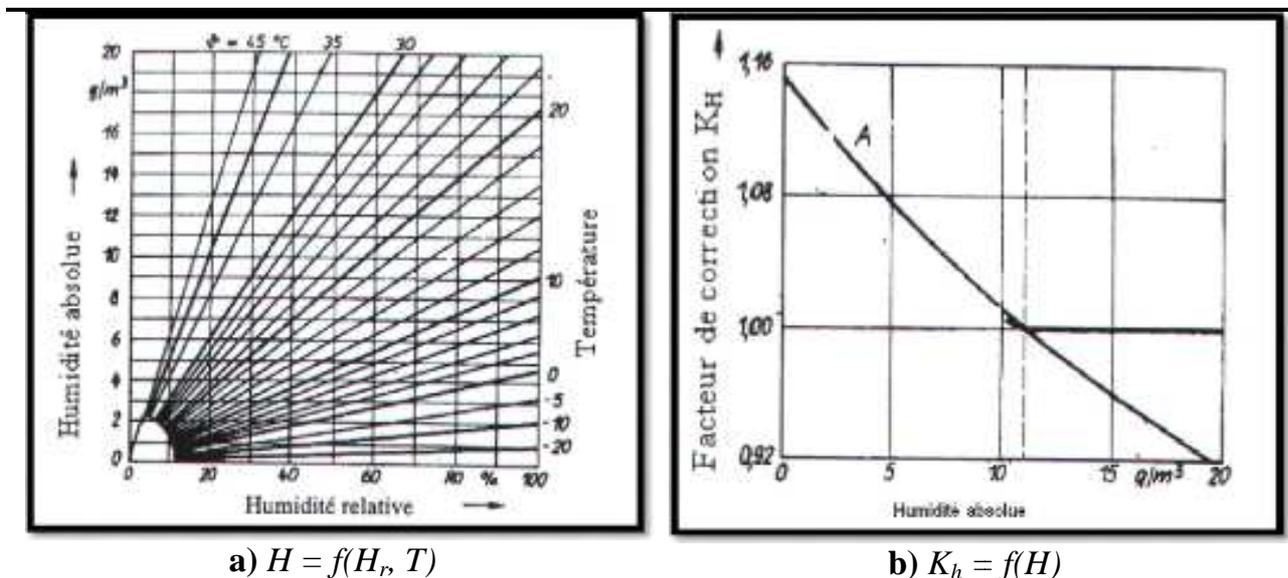
$K_d$ : facteur de correction relatif à la température  $\theta$  et à la pression  $P$ ;

$$K_d = \frac{P}{100} \frac{(273 + 20)}{(273 + \theta)} = \frac{2,93P}{(273 + \theta)} \quad (3.2)$$

Avec:  $P$  en kPa, et  $\theta$  en  $C^\circ$

$K_h$ : facteur de correction relatif à l'humidité

Pour déterminer le facteur de correction  $K_h$ , relatif à l'humidité, une transformation de l'humidité relative  $H_r$  (%) vers l'humidité absolue  $H$  ( $g/m^3$ ), est nécessaire, car  $K_h$  est donné en fonction de cette dernière. L'abaque de la figure 3.4.a, donne la transformation de l'humidité relative en humidité absolue, en fonction de la température. Pour déduire  $K_h$ , la valeur de l'humidité absolue (Fig. 3.4.a) est reportée sur l'abaque de la figure 4.4.b. Sur base de la figura 3.4 on peut corriger les tensions de contournement et ainsi les ramener aux conditions normales conformément à la norme CEI 60-1 et 60-2 [42, 46].



**Fig. 3.4** Facteur de correction  $K_h$

### 3.6. Résultats expérimentaux

Dans cette partie, nous présentons les résultats des tests qui ont servi à déterminer la tension de contournement de l'isolateur en fonction de la conductivité de la solution polluante. Ces essais sont effectués sur un isolateur pollué et propre.

#### 3.6.1. Mesure de la tension de contournement à l'état sec et humide

Chaque isolateur est soumis à dix essais de contournement de l'isolateur sec et humide, et la tension de contournement sera égale à la valeur moyenne des dix valeurs obtenues. Les valeurs trouvées seront corrigées conformément à la norme CEI 60-1.

##### 3.6.1.1. Résultats des essais

Le tableau suivant donne les tensions obtenues pour chaque essai et leurs moyennes ; et cela pour les différentes conductivités :

Procédure des mesures :

- La période de travail est étalée entre le 18 juin 2009 et 6 juillet 2009 .
- Pour chaque degré de sévérité, la valeur retenue de la tension de disruption est la moyenne arithmétique de l'ensemble de celles des tensions disruptives de la même série de mesure.

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.3)$$

- **Exemple de la mesure**

Le 21/06/2009 à 8H : 00, la température ambiante était égale à  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , la pression était  $P=1018 \text{ Pa}$  et une humidité de  $H_r = 53\%$ . La Surface polluée est prise égale à  $d= 5 \text{ cm}$ . Les résultats des 10 mesures effectués sont résumés dans le tableau 3.3.

La moyenne de la tension de contournement est :

$$V_m = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} V_i = \frac{127+128+128+134+131+128+129+133+132+129}{10} = 129,9 \text{ kV}$$

<b>Tableau 3.3</b> <i>Tableau de mesure</i>							
N° d'essais	$\sigma \mu S$	0	1,5	3	4	5	7
	1		127	115	117	95,3	71,9
2		128	119	119	92,3	85,9	75,4
3		128	119	105	94,5	90,7	83,9
4		134	104	94,7	88,8	81,9	80,1
5		131	110	108	88,9	71,9	81,9
6		128	108	111	105	91	78,9
7		129	115	109	97	80,9	77,9
8		133	107	94,8	105	95,8	90,4
9		132	123	104	107	76,9	78,4
10		129	119	112	95	82,2	73,9
Valeur moyenne		129,9	113,9	107,45	96,88	82,9	79,89
Correction de valeur moyenne		128,6	112,76	106,37	95,91	81,24	78,3

En utilisant les formules de correction suscitées et les abaques dans la figure 3.4, on

$$\text{retrouve : } K_d = \frac{P (273 + 20)}{100 (273 + \theta)} = \frac{2,93 \times 1,018}{(273 + 25)} = 0,01 \text{ et } K_h = 0,98$$

D'où la tension corrigée sera :

$$V_c = \frac{K_h}{K_d} V_m = \frac{0,98}{0,01} 129,9 = 128,6 kV$$

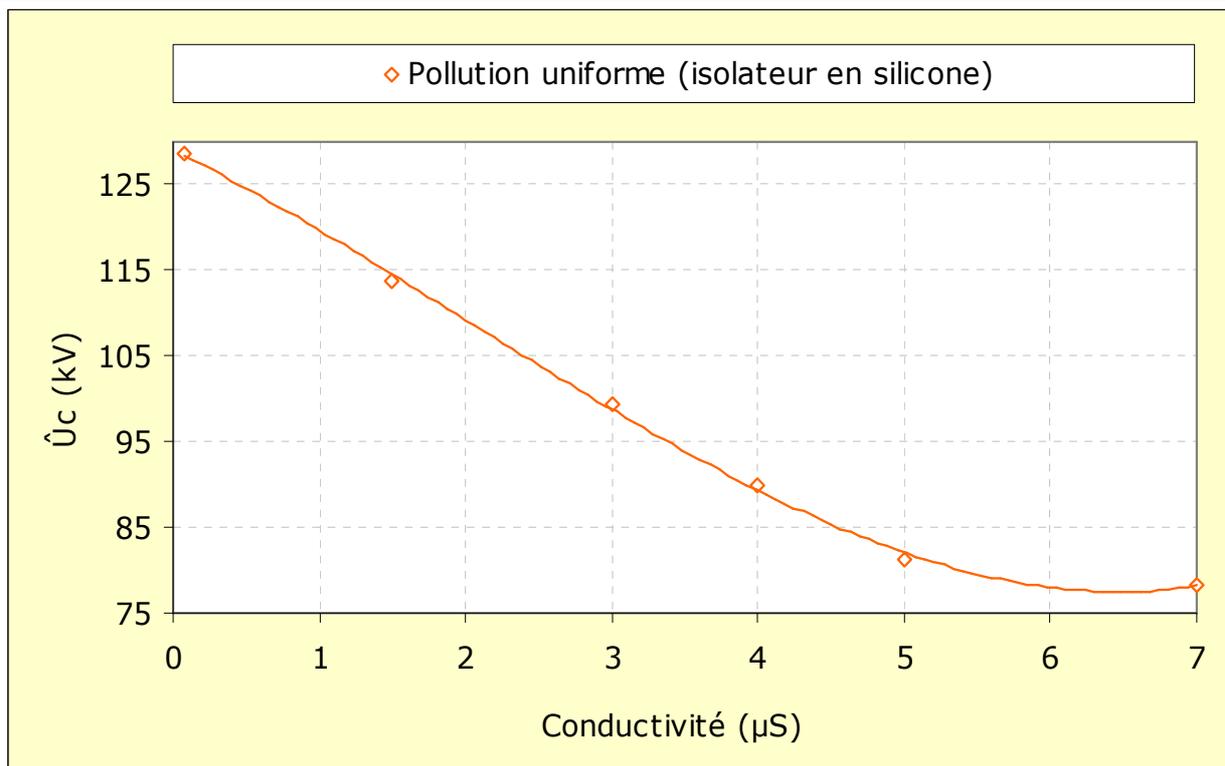
Les valeurs corrigées de tous les cas réalisés sont aussi résumés dans le tableau 3.3.

### 3.6.2. Etude de la tension de contournement d'un isolateur

Dans le but de déterminer l'influence de la conductivité superficielle et le rapport de conductivités de la couche polluante sur le comportement des isolateurs, nous avons effectué de nombreux essais sur l'isolateur.

#### 3.6.2.1. Première série d'essais (Effet de la conductivité)

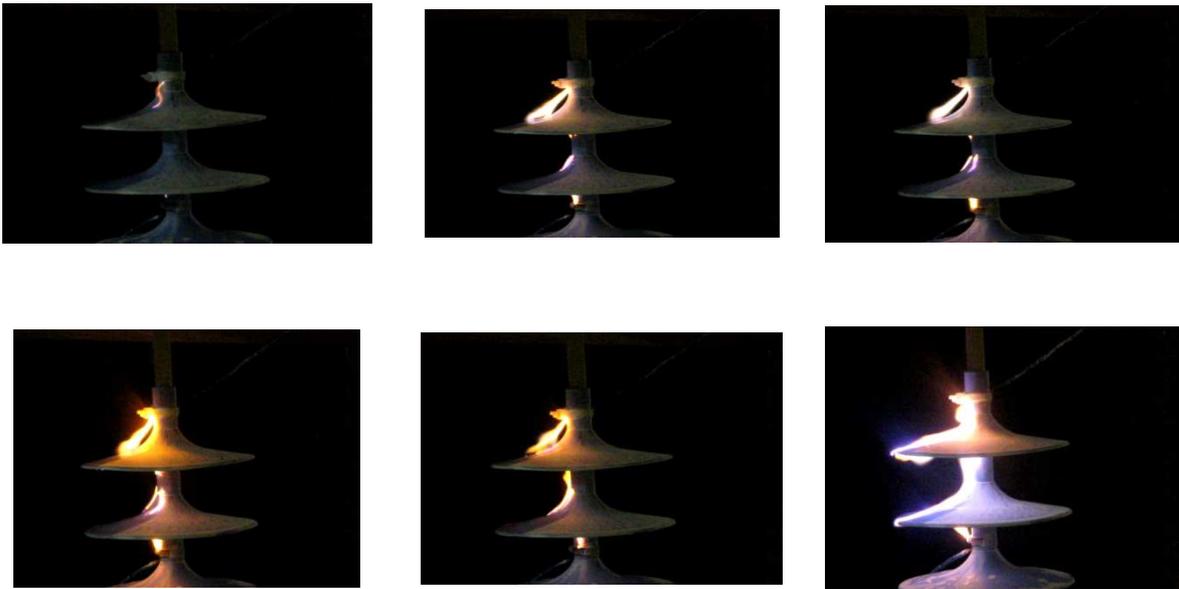
Dans cette première série une couche uniforme de pollution de différentes conductivités est déposée sur la surface d'isolateur en silicone. La figure 3.5 présente la variation de la valeur moyenne de la tension de contournement en fonction de la conductivité volumique de la couche polluante, la valeur de la tension de contournement est obtenue pour 6 conductivités.



**Fig. 3.5** Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle

D'après ces résultats nous remarquons que la tension de contournement diminue de manière non-linéaire. Pour des conductivités relativement élevées, la tension de contournement est légèrement affectée par l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution. L'explication que l'on peut apporter à ces résultats est qu'une plus grande conductivité semble dans un sens général augmenter la vitesse de propagation des streamers et provoquer le contournement à des niveaux plus bas de la tension. Les phénomènes d'attachement à la surface due à la forte présence des atomes de chlore et la perturbation du champ électrique par les charges surfaciques peuvent expliquer ce phénomène.

L'évolution de l'arc électrique dans le cas propre prend beaucoup de temps pour atteindre le contournement (Fig 3.6.a) (environ 30ms à 135kV). La figure 3.6.b montre clairement que lorsque l'isolateur est pollué sur les surfaces utilisées, la décharge s'initie à partir de l'électrode terre ensuite apparaît sur l'électrode HT après les avoir asséchées partiellement.

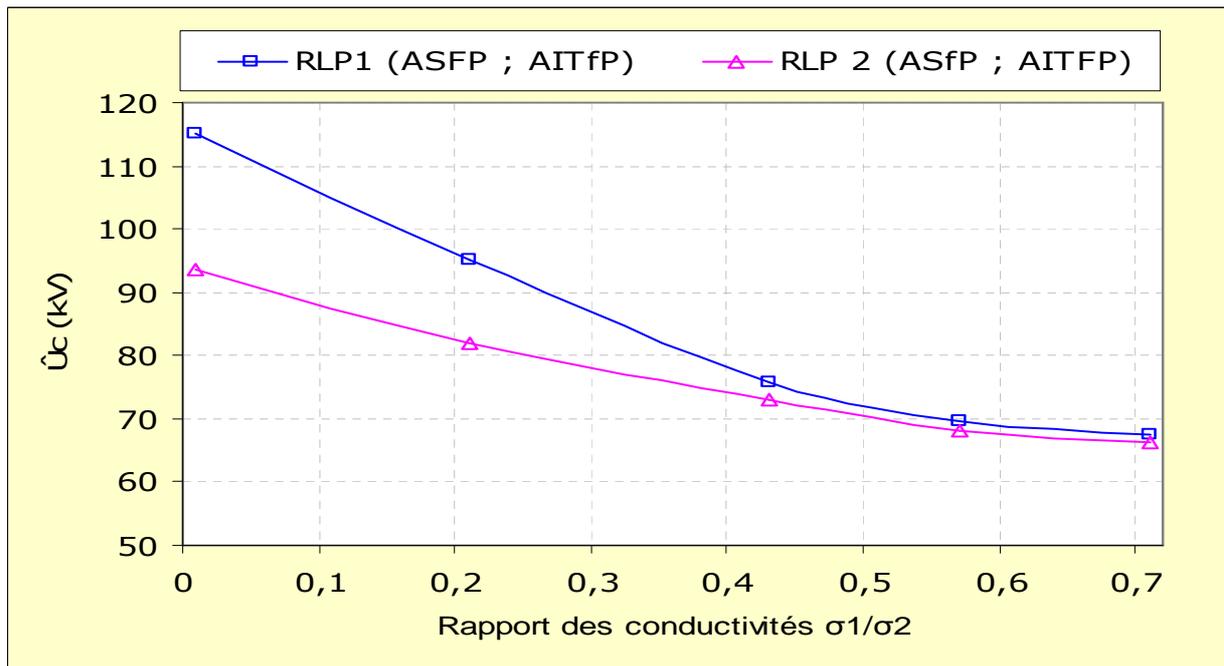
a) *Cas propre*b)  $\sigma = 2,5\mu S$ **Fig. 3.6** *Contournement à la surface d'un isolateur pollué uniformément*

### 3.6.2.2. 2<sup>ème</sup> série d'essais (pollution non – uniforme)

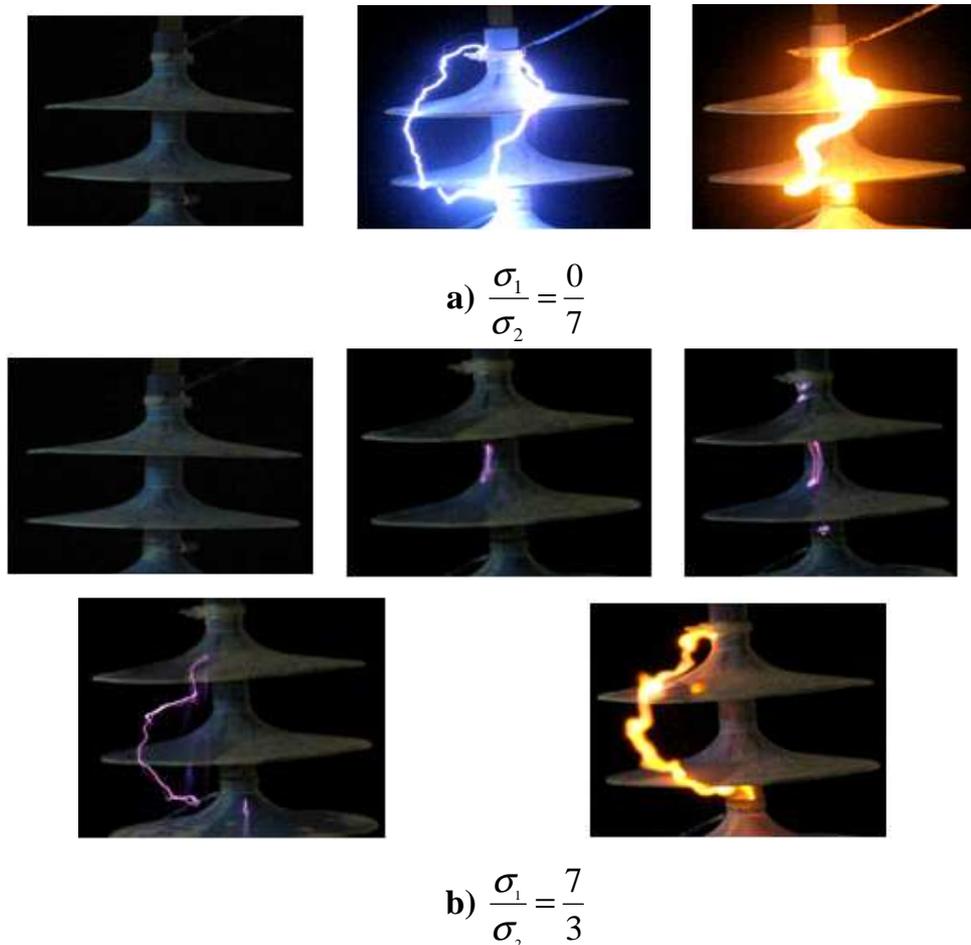
Dans cette série on procède à plusieurs cas de répartition de la couche de pollution que l'on va détailler dans les paragraphes suivants.

#### a. Répartition longitudinale périodique (R.L.P)

Dans ce type de répartition (voir chapitre 2), on fixe dans un premier temps la conductivité  $\sigma_1$  à  $7\mu S$  et on a fait varier  $\sigma_2$  puis on procède au cas inverse. La figure 3.7 représente l'allure de la tension de contournement en fonction du rapport des conductivités; on remarque que la tension de contournement diminue rapidement jusqu'à un point donné de rapport 0,57, seuil au delà duquel l'allure de la tension de contournement est plus ou moins stable malgré l'augmentation de ce rapport. L'isolateur



**Fig. 3.7** Tension de contournement en fonction du rapport de conductivité

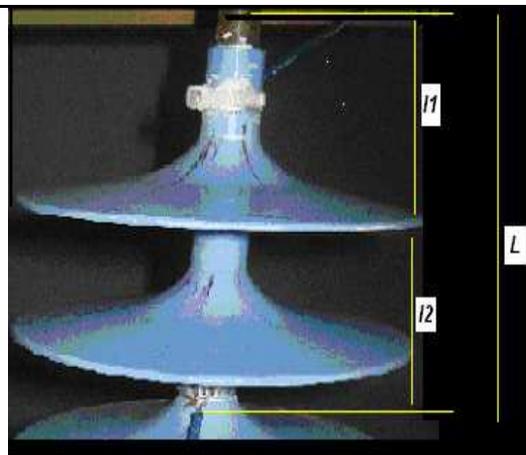


**Fig. 3.8** Développement de l'arc à la surface d'un isolateur pollué différemment

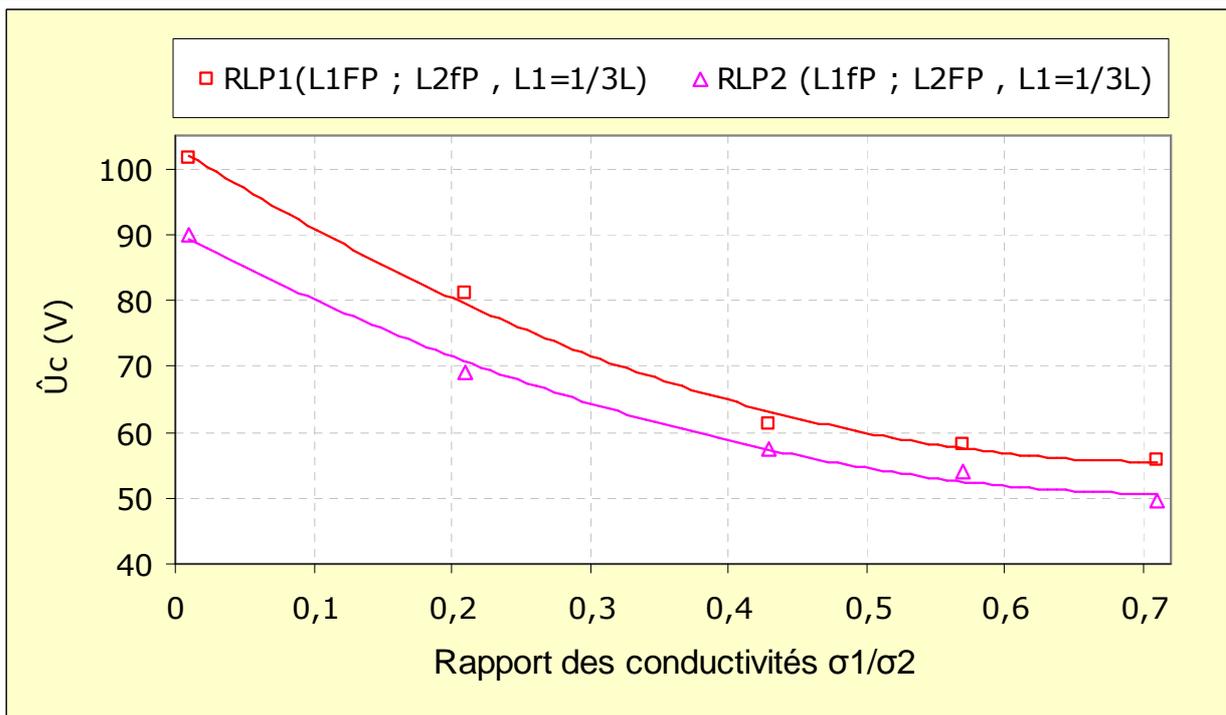
est plus rigide dans le cas fortement pollué sur le côté HT. Cela est expliqué par le fait que la couche polluante est devenue très conductrice à ce niveau d'augmentation de la conductivité. La figure 3.8 montre que lorsque l'isolateur est pollué faiblement sur le côté terre et fortement sur le côté HT, la décharge commence à se développer sur l'électrode terre dans une première phase, puis sur les côtés après les avoir asséchés partiellement. Les deux arcs électriques partiels finissent par se rencontrer une fois la longueur critique de l'arc résultant est atteinte.

### ***b. Répartition longitudinale périodique (R.L.P) 33%***

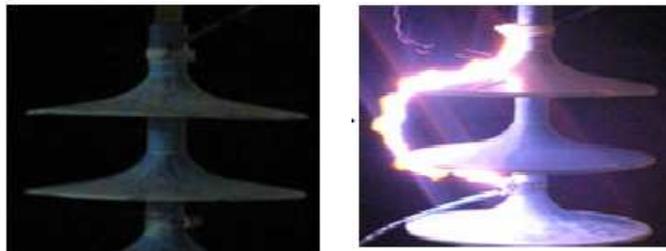
Dans cette partie du travail expérimental, on a choisi de faire une répartition longitudinale périodique à 33%. C'est à dire le tiers de la longueur de fuite est pollué avec une conductivité  $\sigma_1$  et le reste de la surface de l'isolateur avec une conductivité  $\sigma_2$  (Fig. 3.9). Les essais sont répétés pour plusieurs rapports de conductivités. La figure 3.10 montre les résultats obtenus pour le cas où le côté HT est fortement pollué (trait rouge sur la figure) et pour le cas où le côté terre est fortement pollué (trait bleu sur la figure). Il résulte de cette investigation que la tension de contournement diminue lorsque la conductivité superficielle augmente indépendamment de la surface polluée. Le maximum de la tension de contournement est obtenu lorsque la surface de l'isolateur près de l'électrode HT est polluée quel que soit le degré de pollution de l'isolateur. La figure 3.11 montre le développement de l'arc enregistré par le caméscope pour deux cas de conductivités.



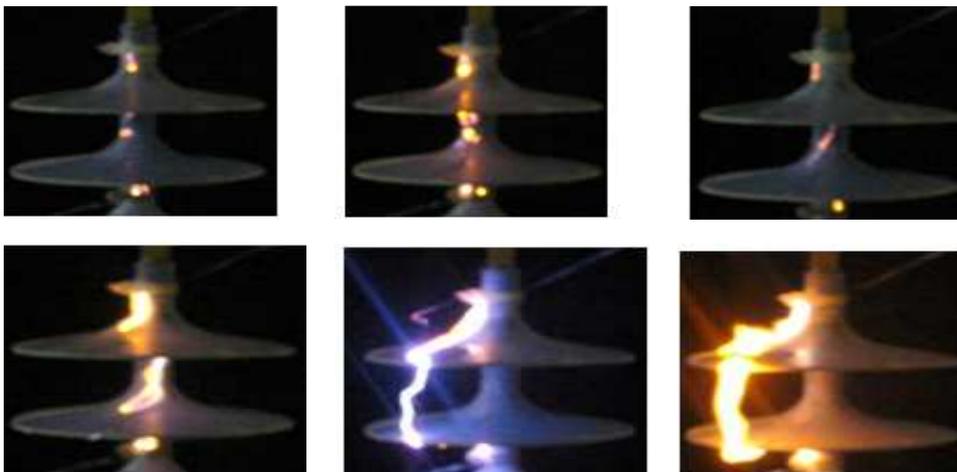
**Fig. 3.9** Principe de division de la surface de l'isolateur



**Fig. 3.10** Tension de contournement en fonction du rapport de conductivités



a)  $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{7}{0}$



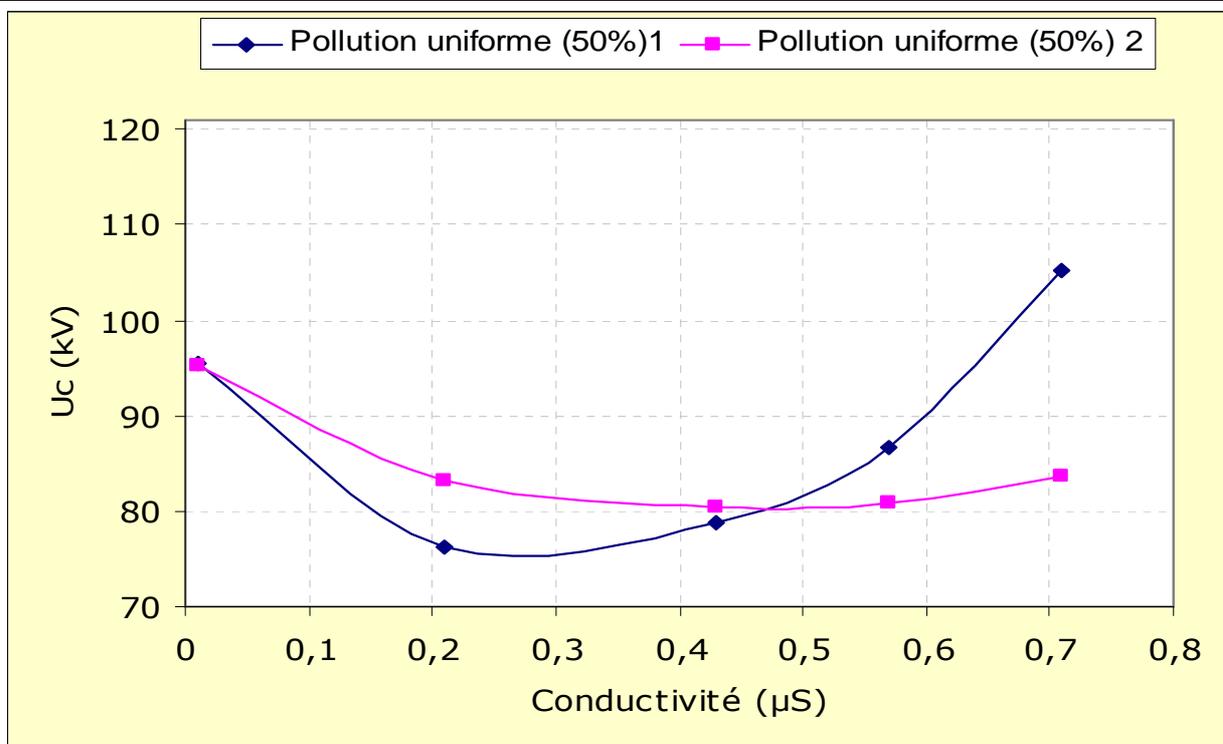
b)  $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{7}{4}$

**Fig. 3.11** Développement d'arc à la surface d'un isolateur pollué (cas 33%)

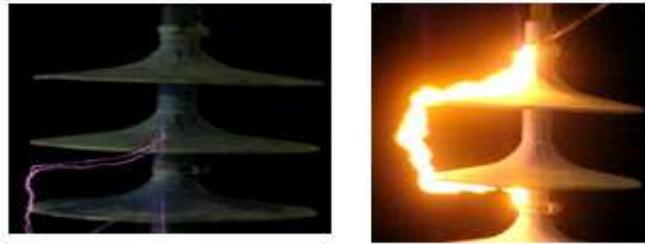
### c. Répartition longitudinale périodique (R.L.P) 50% et 25%

En adoptant dans un cas une répartition des couches polluées à parts égales (50%-50%) et en répétant les essais pour plusieurs conductivités, les résultats obtenus sont montrés dans la figure 3.14. La figure 3.15 donne un aperçu du développement de l'arc de contournement dans ce cas. Pour l'autre cas caractérisé par une répartition 25%, les résultats sont montrés dans la figure 3.16. La figure 3.17 montre l'arc peut se développer à n'importe quelle position le long de la zone sèche et aucune position n'est donc privilégiée par rapport à une autre.

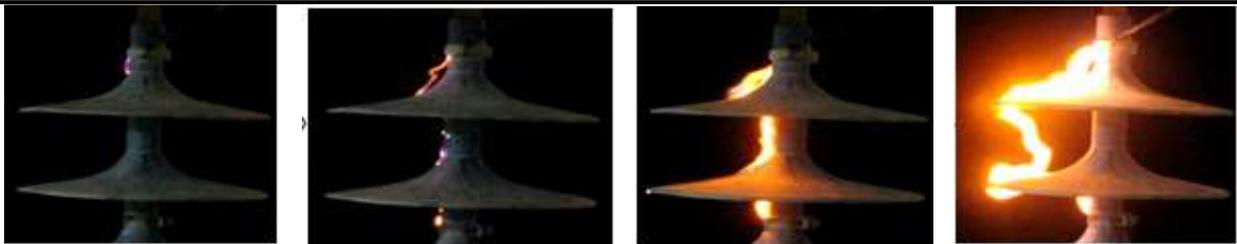
En examinant les figures 3.14 et 3.16, qui donnent l'allure de la tension de contournement en fonction du rapport des conductivités, on remarque que les courbes présentent un minimum de tension pour un rapport de conductivités compris entre 0,1 et 0,4 (i. e.  $0,1 < \sigma_1/\sigma_2 < 0,4$ ). L'explication que l'on peut apporter pour expliquer les points minimum est que si les arcs locaux restent en contact avec la surface isolante, la ligne de fuite est complètement utilisée. Par contre si les arcs adoptent un trajet plus court dans l'air, une partie de la ligne de fuite n'est plus utilisé, on admet que la tension de contournement est inférieure à celle exempte de points minimum.



**Fig. 3.14** Tension de contournement en fonction de la conductivité

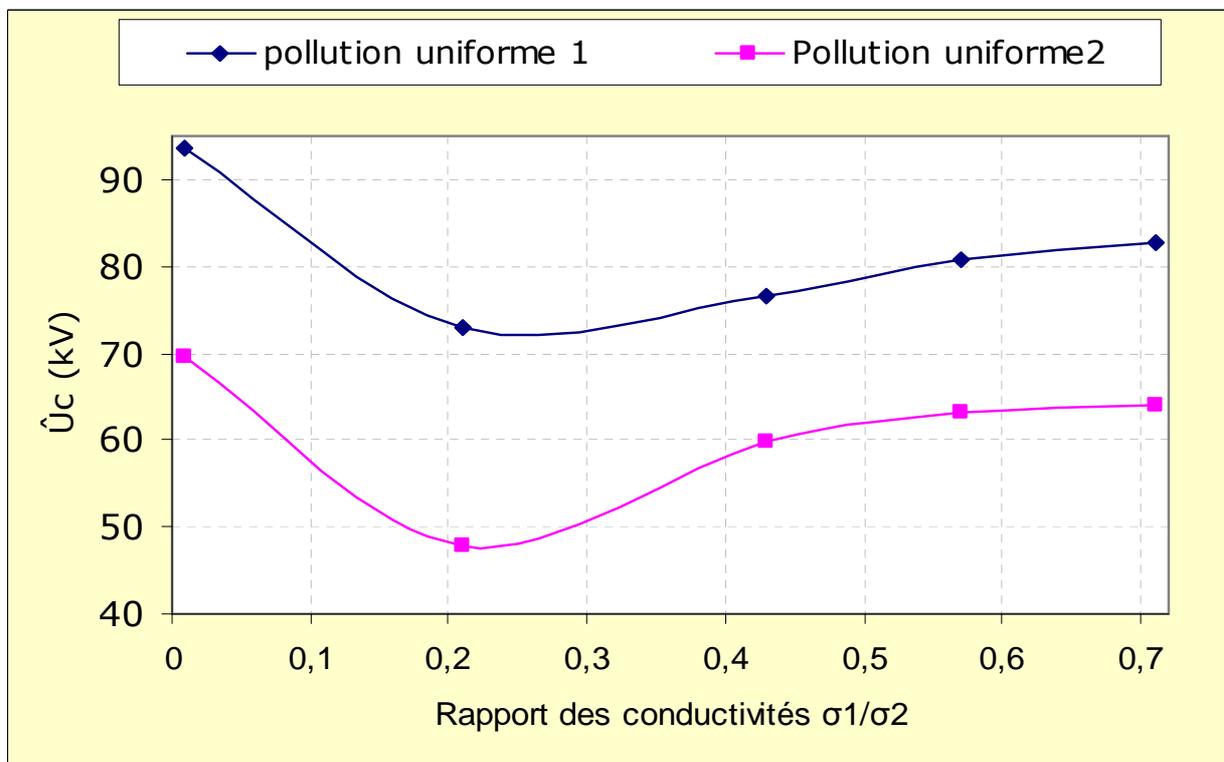


a)  $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{7}{0}$

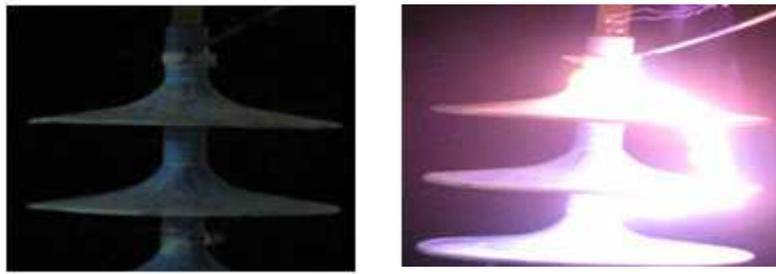


b)  $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{7}{1,5}$

**Fig. 3.15** Développement de l'arc de contournement de la surface d'un isolateur pollué



**Fig. 3.16** Tension de contournement en fonction du rapport de conductivité



$$a) \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{7}{0}$$



$$b) \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{7}{3}$$

**Fig. 3.17** Développement d'arc de contournement pour différents cas

#### ***d. Répartition transversale périodique (R.T.P)***

Dans cette investigation une répartition transversale périodique est appliquée sur une partie de 6cm de la surface de l'isolateur pour différentes valeurs des conductivités  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ . Pour une tension d'alimentation alternative sinusoïdale d'amplitude 135kV, les résultats obtenus sont présentés dans la figure 3.18. On remarque que la tension de contournement décroît d'une manière pratiquement hyperbolique avec l'augmentation du rapport des conductivités de la pollution. La rigidité diélectrique diminue au fur et à mesure que la conductivité de faces polluées augmente particulièrement lorsque toutes les faces de l'isolateur sont polluées. Dans la figure 3.19, nous présentons aussi les résultats obtenus avec une caméra digitale concernant le développement de l'arc pour deux cas différents.

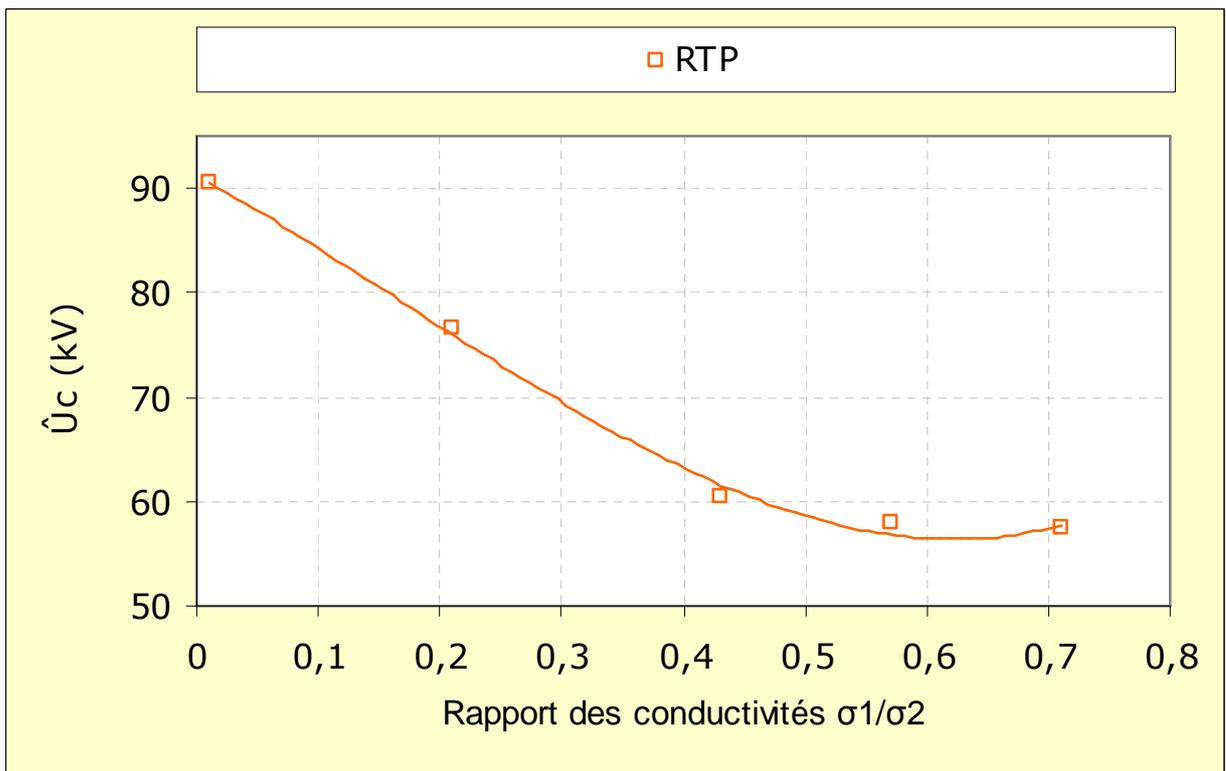
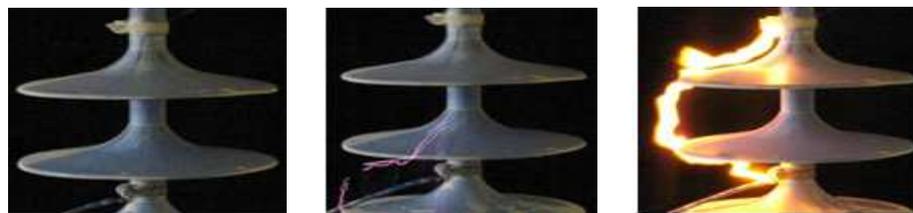
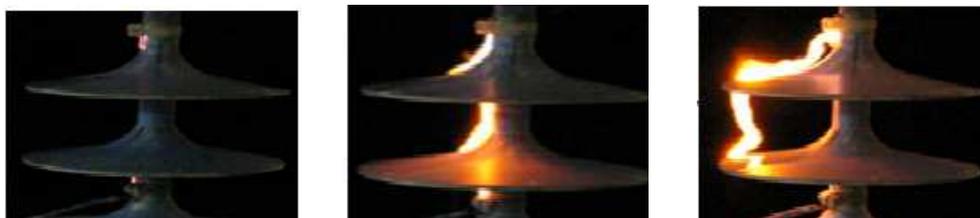


Fig. 3.18 Tension de contournement en fonction du rapport de conductivité



a)  $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{7}{0}$



b)  $\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{7}{4}$

Fig. 3.19 Développement d'arc pour une pollution transversale

*e. 3<sup>ème</sup> série d'essais : Pollution par pulvérisation*

- *Effet de la conductivité*

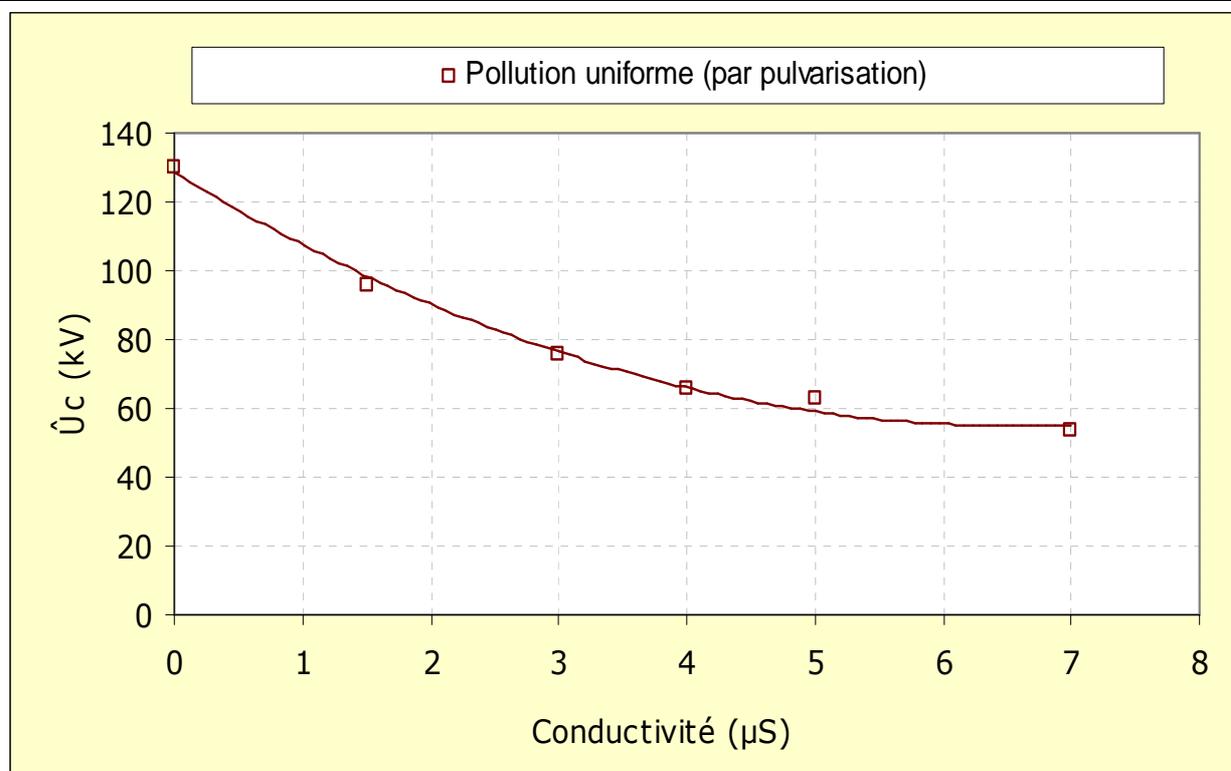
L'humidification de la surface de l'isolateur par une solution de conductivité donnée, est obtenue par pulvérisation. L'ouverture du pulvérisateur est gardée tout au long des essais à la même position, pour l'isolateur réel,

La remarque principale à tirer des allures de la figure 3.20 est la diminution de la tension de contournement avec l'augmentation de la conductivité superficielle.

- *Effet de rapport de la conductivité*

La courbe de la figure 3.22 donne l'allure de la tension de contournement en fonction du rapport des conductivités, on remarque que l'augmentation du rapport des conductivités avec la diminution de la tension de contournement.

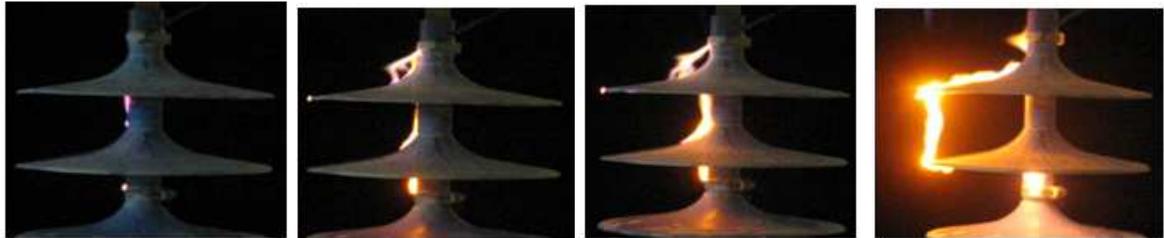
L'arc se développe toujours d'abord à travers la zone sèche, puis dans la zone humide.



**Fig. 3.20** Tension de contournement en fonction de la conductivité

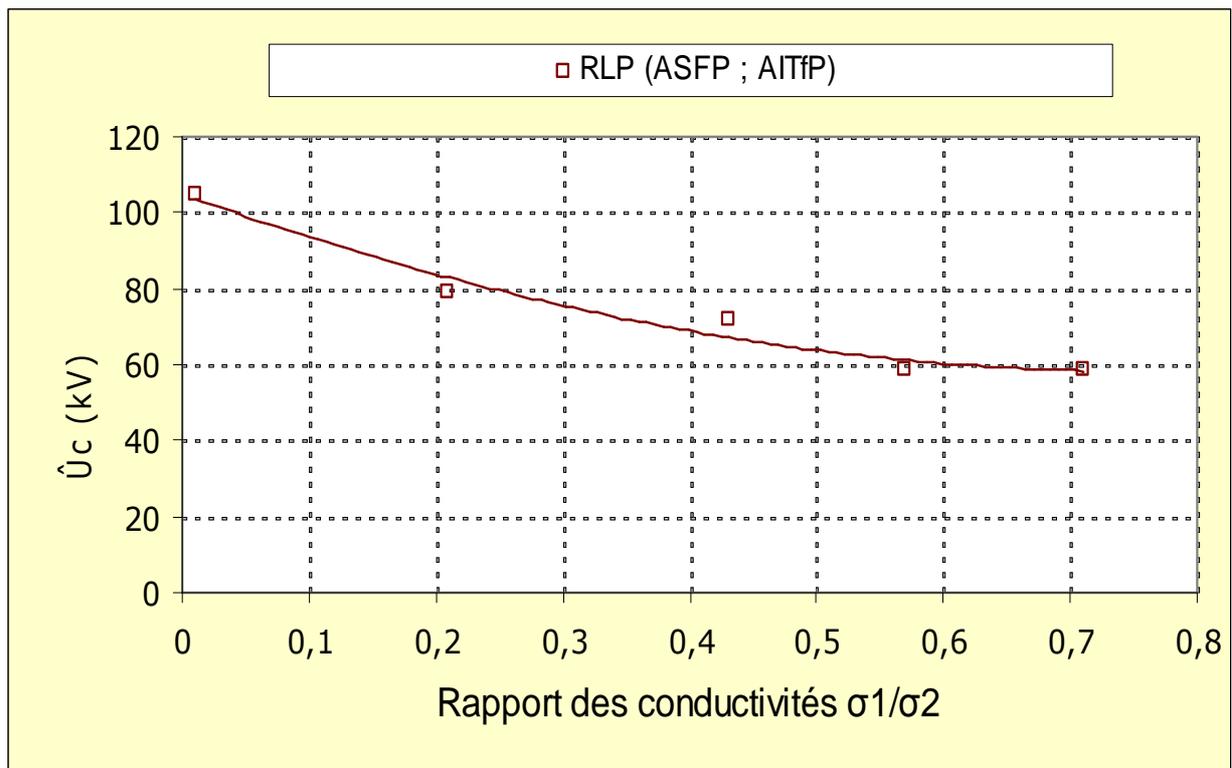


a)  $\sigma = 1,5\mu S$

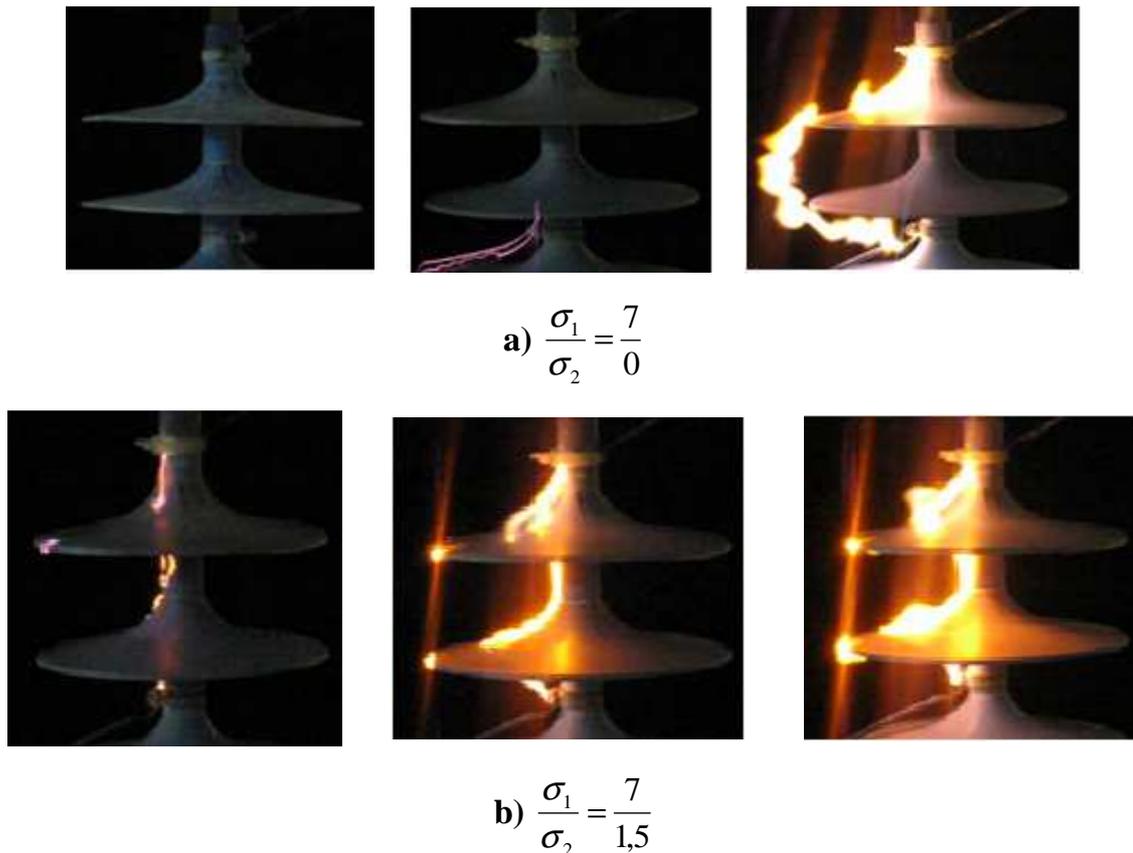


b)  $\sigma = 5\mu S$

**Fig. 3.21** Développement de l'arc de contournement pollué uniformément



**Fig. 3.22** Tension de contournement en fonction du rapport de conductivités



**Fig. 3.23** Développement de l'arc de contournement pollué transversalement

### 3.7. Conclusion

Il résulte de cette étude que la rigidité diélectrique de l'isolateur est plus faible en tension alternative, la répartition de la pollution a donné une rigidité diélectrique plus faible que celle obtenue en pollution non uniforme

La tension de contournement diminue de manière non linéaire. Pour des conductivités relativement élevées, la tension de contournement est légèrement affectée par l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution, pour les différentes conductivités utilisées.

# REPARTITION DE LA TENSION LE LONG D'ISOLATEUR SILICONE EN UTILISANT FEMLAB

### 4.1. Introduction

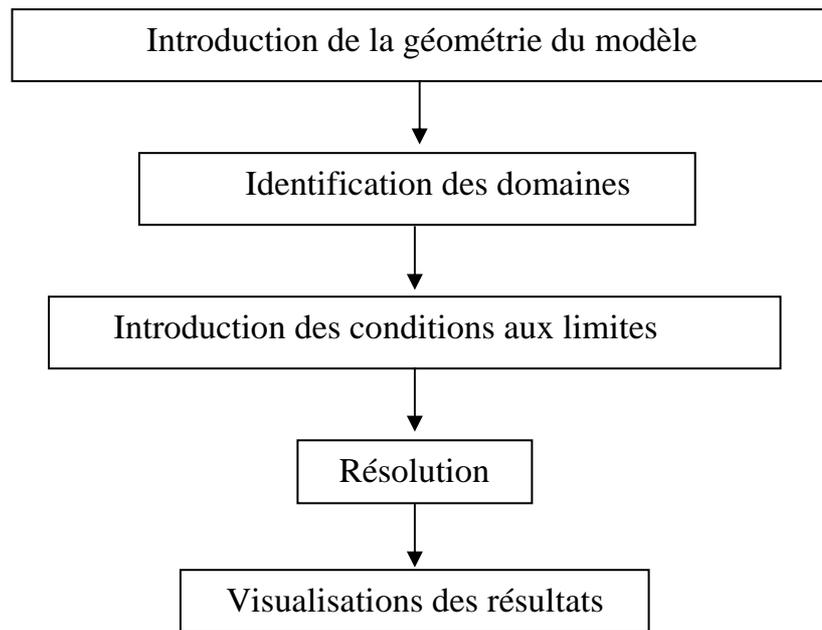
L'objectif principal de cette simulation est de déterminer la distribution du potentiel et du Champ électrique le long d'un d'isolateurs en silicone. L'utilisation d'une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel s'est avérée être une des meilleures solutions compte tenu de la difficulté des mesures. À cet effet, la méthode des Éléments Finis était la mieux adaptée aux contraintes imposées par le problème. De plus, cette méthode numérique avait été appliquée avec succès dans le calcul du potentiel et du champ électrique autour des isolateurs.

### 4.2. Etapes de la méthode des éléments finis

C'est la méthode la plus utilisée vue sa généralisation et sa capacité de résoudre les problèmes les plus complexes, le système d'équations algébriques est obtenue en appliquant la méthode des résidus pondérés, ou la méthode variationnelle, la résolution du système permet d'obtenir la solution du problème original [47]. La méthode des éléments finis peut être résumée [48] dans les étapes suivantes :

- discrétisation du domaine;
- formulation intégrale des équations différentielles partielles;
- choix des fonctions d'interpolation;
- formation des matrices et vecteurs élémentaires;
- Assemblage;
- résolution du système algébrique globale.

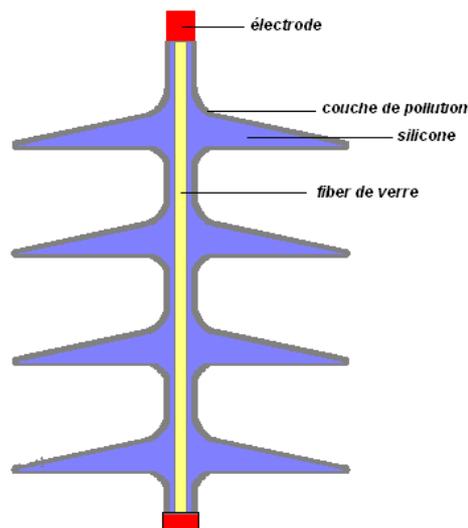
Actuellement, il existe différents logiciels qui utilisent cette méthode comme le Femlab, Maxwell, Flux2D et FEMM. Dans la suite de ce travail, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics version 3.4. Les étapes de résolution peuvent être résumées selon l'organigramme montré dans la figure 4.3



**Fig. 4.1** Diagramme de différentes étapes de résolution dans FEMLAB

### 4.3. Géométrie de l'isolateur utilisé

Dans ce travail, la taille totale de l'isolateur est de 32 cm environ, et le diamètre de la fibre en verre est environ 2,5 cm, Le diamètre des ailettes est de 16,6 cm. La géométrie de l'isolateur complet pour les deux cas sans et avec pollution est illustrée dans la figure 4.2.



**Fig. 4.2.** Modèle géométrique de l'isolateur

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

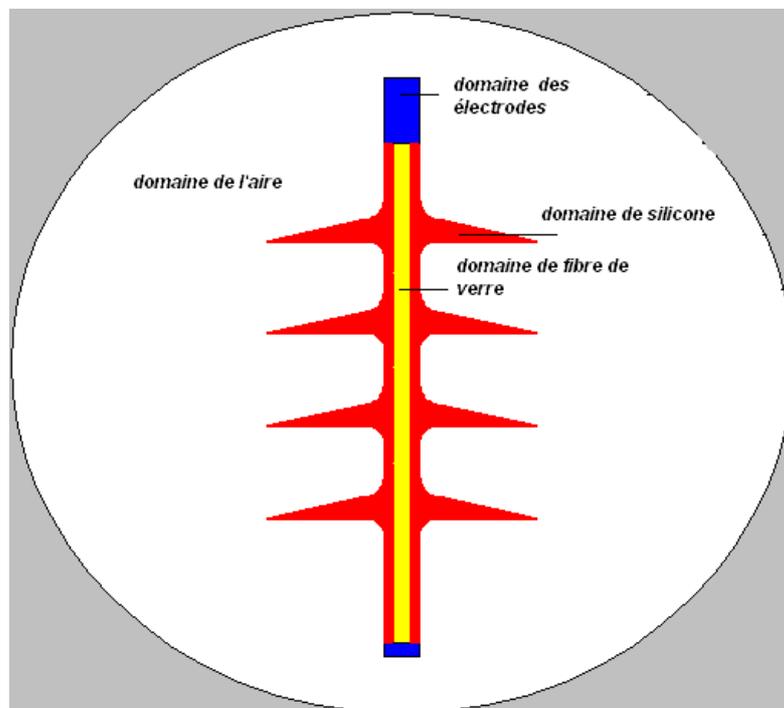
Nous avons définie les différents domaines de l'isolateur étudié dans FEMLAB en introduisant pour chacun d'eux la constante diélectrique relative  $\epsilon_r$  et la conductivité  $\sigma$ .

La figure 4.3 montre les différents domaines constituant l'isolateur, il s'agit du domaine:

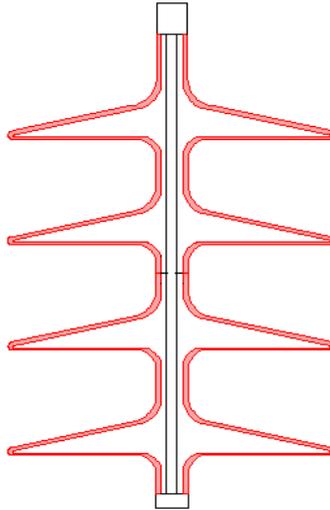
- des électrodes où la conductivité et la constante diélectrique relative sont définies directement dans la bibliothèque des matériaux du logiciel.
- de l'air défini par une conductivité et une constante diélectrique relative égales à 1.
- de silicone défini par une conductivité égale à  $10^{-12}$  S et une constante diélectrique relative égale à 3,9.

Dans le cas de l'existence de la pollution, deux cas ont été considérés à savoir :

- Le cas de l'absence de la bande sèche où le domaine de la pollution montré dans la figure 4.4 peut être représenté en introduisant seulement la valeur de la conductivité désirée.



**Fig. 4.3** Différents domaines de l'isolateur polymère



**Fig. 5.4** *Domaine de la pollution (rouge)*

- Le second concerne la formation de la bande sèche, où la conductivité suivra la loi suivante :

$$\sigma = \frac{(X \cdot A)^{\frac{1}{n}}}{V^n} \quad (4.1)$$

Avec ;

$V$  : Tension à travers la bande sèche en (V)

$A$  : et  $n$  sont des constantes

$X$  : largeur de la bande sèche en (m).

La constante diélectrique relative du domaine de la bande sèche est prise égale à 1.

#### 4.5. Conditions aux limites

- La condition adéquate d'interface aux interfaces entre différents éléments du modèle est comme suite :

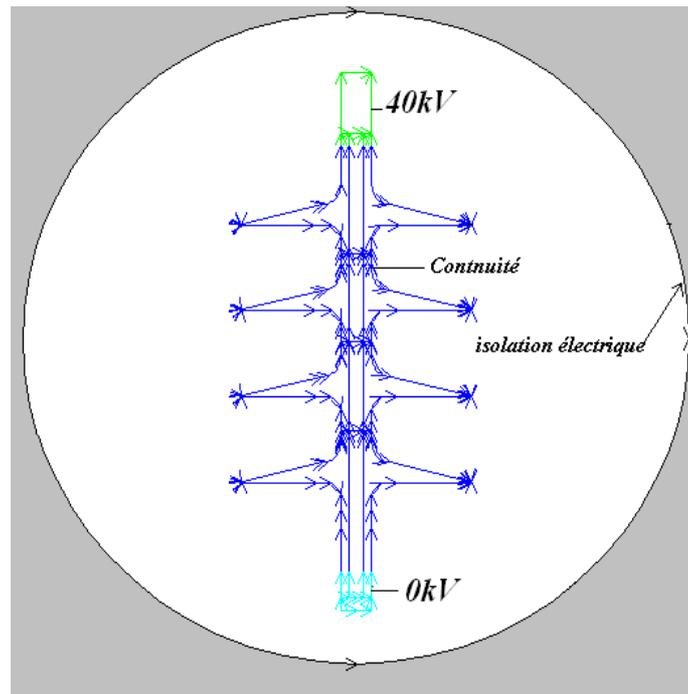
$$n_2 \cdot (D_1 - D_2) = \rho_s \quad (4.2)$$

Pour notre étude la charge d'espace  $\rho_s$  est nulle. Donc, l'équation (4.2) devient:

$$(D_1 - D_2) = 0 \quad (4.3)$$

- Condition aux limites du potentiel électrique

Pour le cas étudié, nous avons pris comme conditions aux limites pour l'électrode supérieur du isolateur (Figure 4.5) un potentiel constant de valeur 40kV (haute tension) et



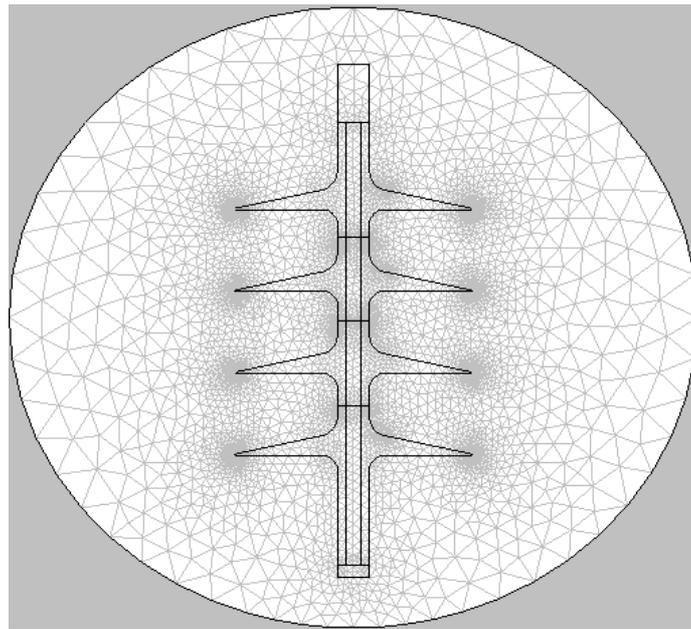
**Fig. 4.5** Conditions aux limites appliquées

celui de l'électrode inférieure un potentiel nul ou encore prendre la condition prédéfinie dans le logiciel 'terre'.

Le champ électrique est supposé nul (isolation électrique) suffisamment loin de l'isolateur.

#### **4.6. Visualisation des résultats et analyse**

Comme il a été signalé la pollution joue un rôle important dans la détermination de la répartition de la tension le long de l'isolateur. Pour élucider cet effet, plusieurs valeurs de la conductivité de la couche de pollution ont été utilisées. Le cas sans pollution a été aussi introduit pour but de comparaison. Un exemple de maillage est illustré dans la figure 4.6.



**Fig. '6 Maillage de l'isolateur**

#### 4.6.1. Études de la distribution de tension dans les conditions propres

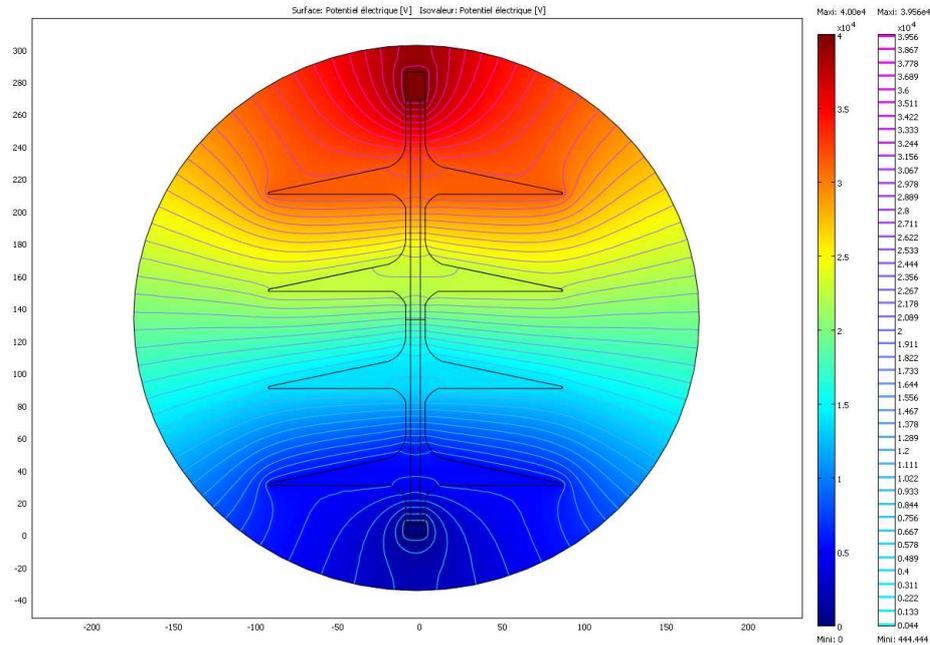
Une fois que les données nécessaires au modèles et résumées dans le tableau 4.1. On lance la simulation. La figure 4.7 représente les résultats de simulation pour les lignes équipotentiels pour un isolateur propre. De ces résultats nous pouvons conclure que la répartition de la tension n'est pas uniforme et que la zone proche de l'électrode HT est la plus contraincée alors que celle près de l'électrode terre la tension est presque nulle.

**Tableau 4.1 Données nécessaires pour le cas propre**

Domaine	Constante diélectrique relative $\epsilon_r$	Conductivité $\sigma$ (S).
Electrodes	1,0	$1.10^{20}$
Silicone	3,9	0,02
Air	1,0	1,0

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

Dans cette partie du travail, L'étude de la répartition de la tension et du champ électrique en présence d'une couche de pollution à la surface de l'isolateur sera faite. Elle aura pour objectifs de voir l'effet des différentes conductivités et la nature de la pollution sur la dite distribution de tension. A cet effet nous allons procéder à plusieurs scénarios que l'on

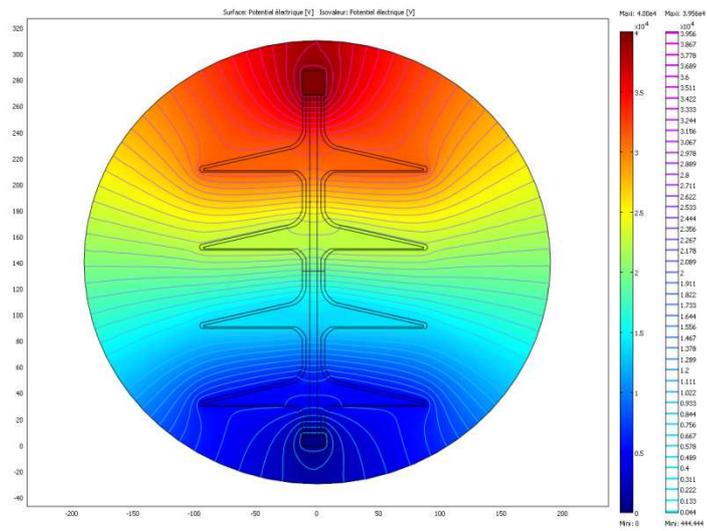


**Fig. 4.7** *Distribution des lignes équipotentielles pour un isolateur propre*

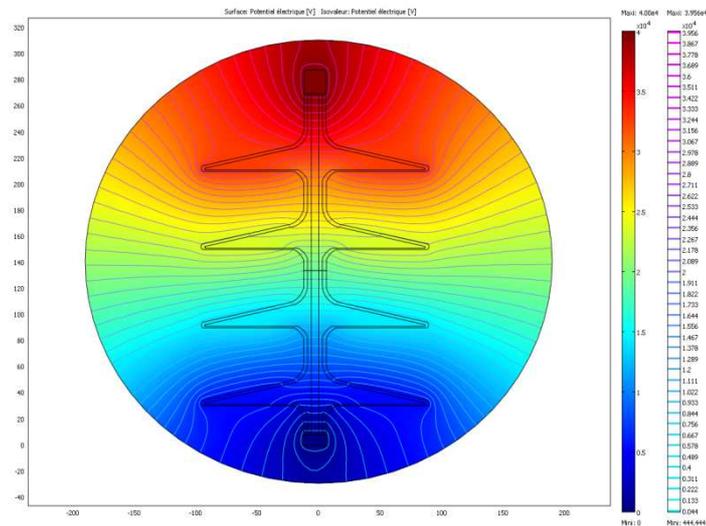
présentera séparément dans les paragraphes qui suivent tout en introduisant le cas sans pollution pour comparaison.

#### **a) Pollution uniforme**

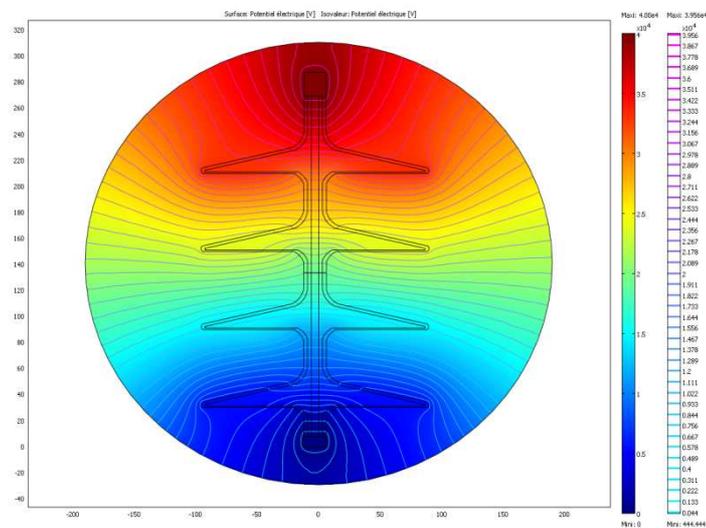
Dans ce premier essai, une couche de pollution uniforme ayant les conductivités égales à  $1,5\mu\text{S}$ ,  $5\mu\text{S}$  et  $7\mu\text{S}$  est appliquée à la surface de l'isolateur. Les résultats sont montrés dans les figures 4.8 et 4.9. Dans la figure 4.8 on présente la distribution des lignes équipotentielles où on peut remarquer que seulement un changement minime qui a eu lieu. Cette différence est plus clair en examinant les courbes de la figure 4.9 qui donne la répartition axiale de la tension. Comme il était attendu le type de pollution influe énormément sur la distribution du potentiel et la rend non-uniforme ce qui veut dire que l'isolateur n'est pas contraint de la même manière ce qui favorise l'apparition des contournements (voir partie pratique). Ce constat est en accord avec la distribution du champ électrique montré dans la figure 4.10.



a)  $\sigma = 1,5\mu S$

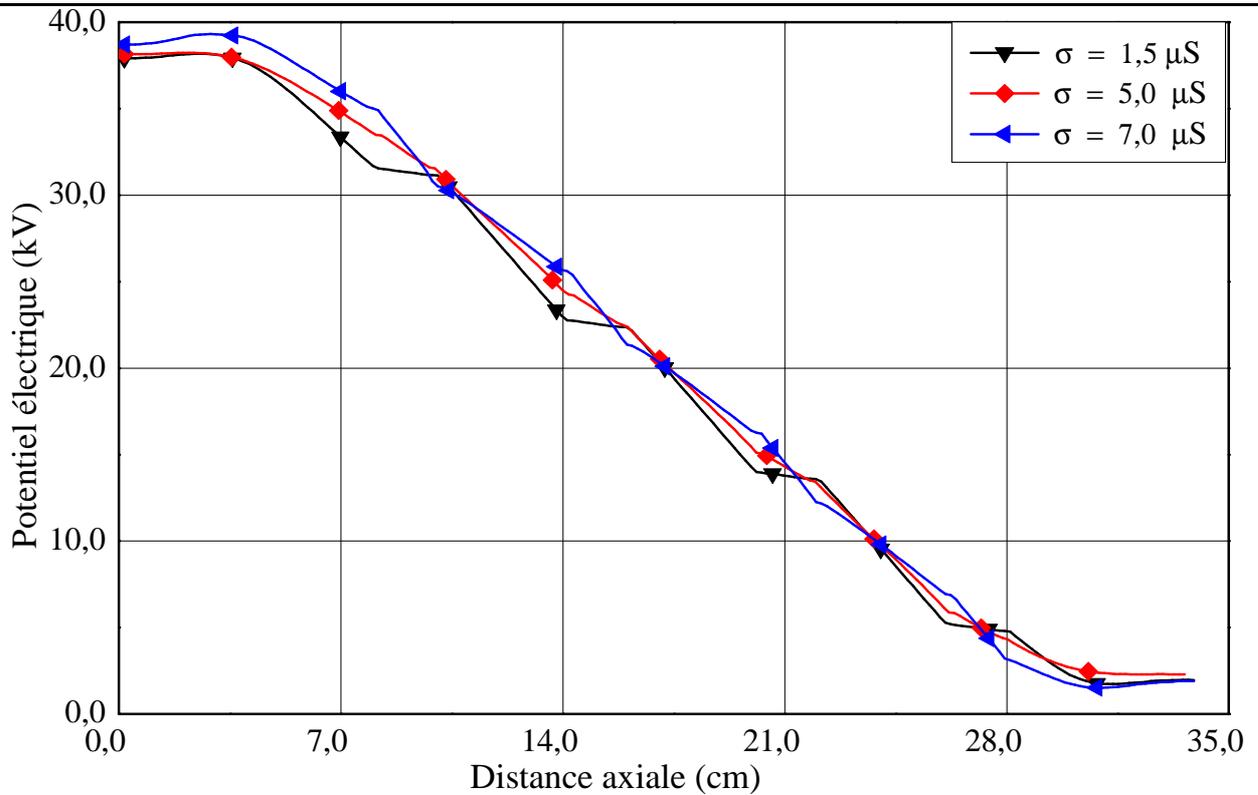


b)  $\sigma = 5\mu S$

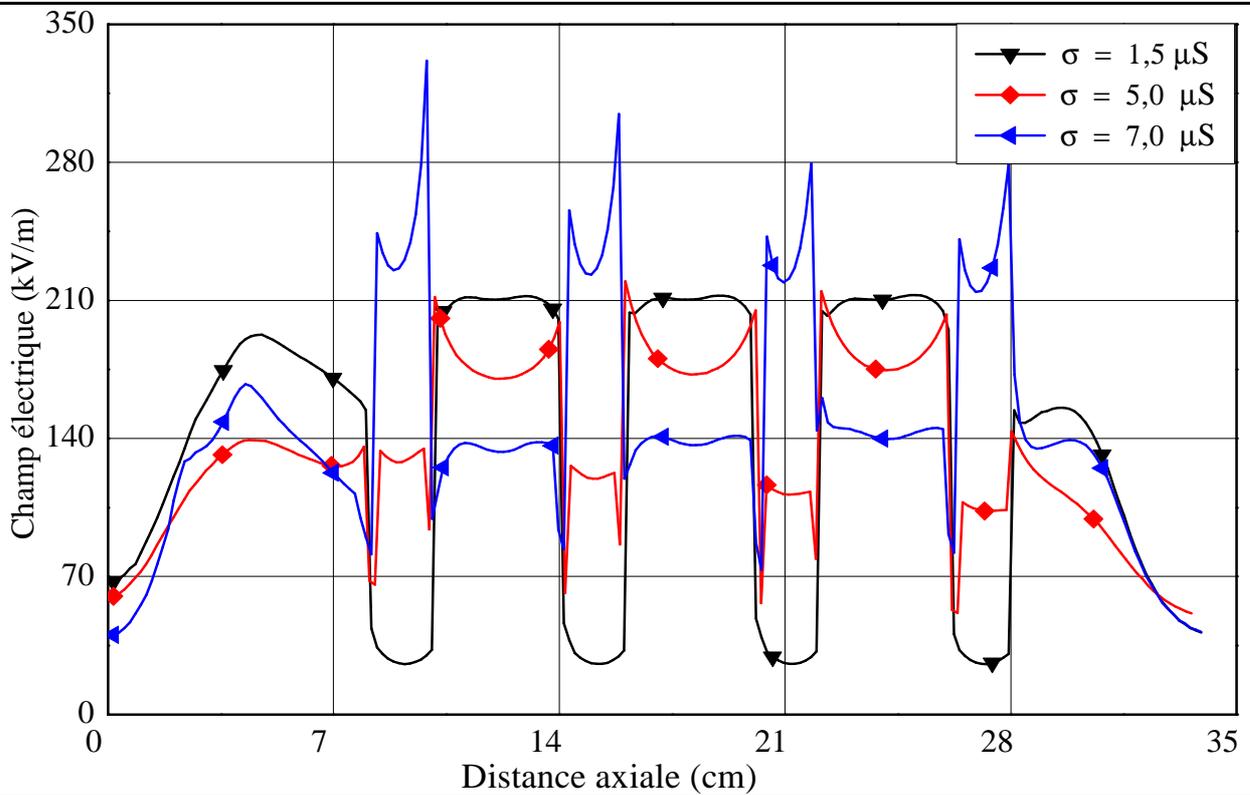


c)  $\sigma = 7\mu S$

**Fig. 4.8** Distribution des lignes équipotentielles pour plusieurs valeurs de la conductivité



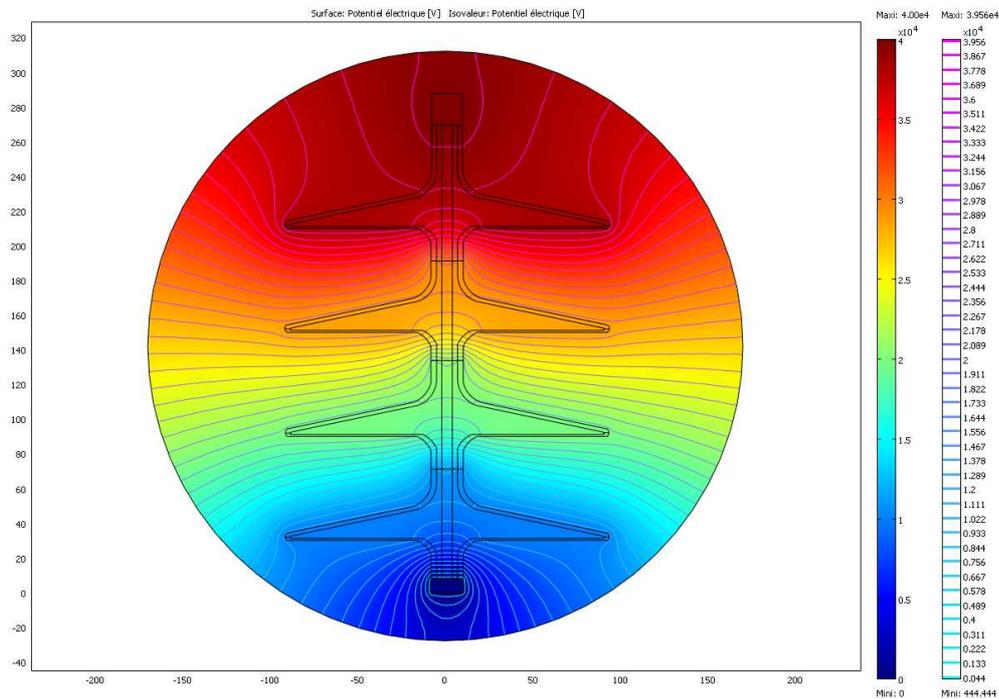
**Fig. 4.9** Distribution de la tension pour les différentes valeurs de  $\sigma$  (uniforme)



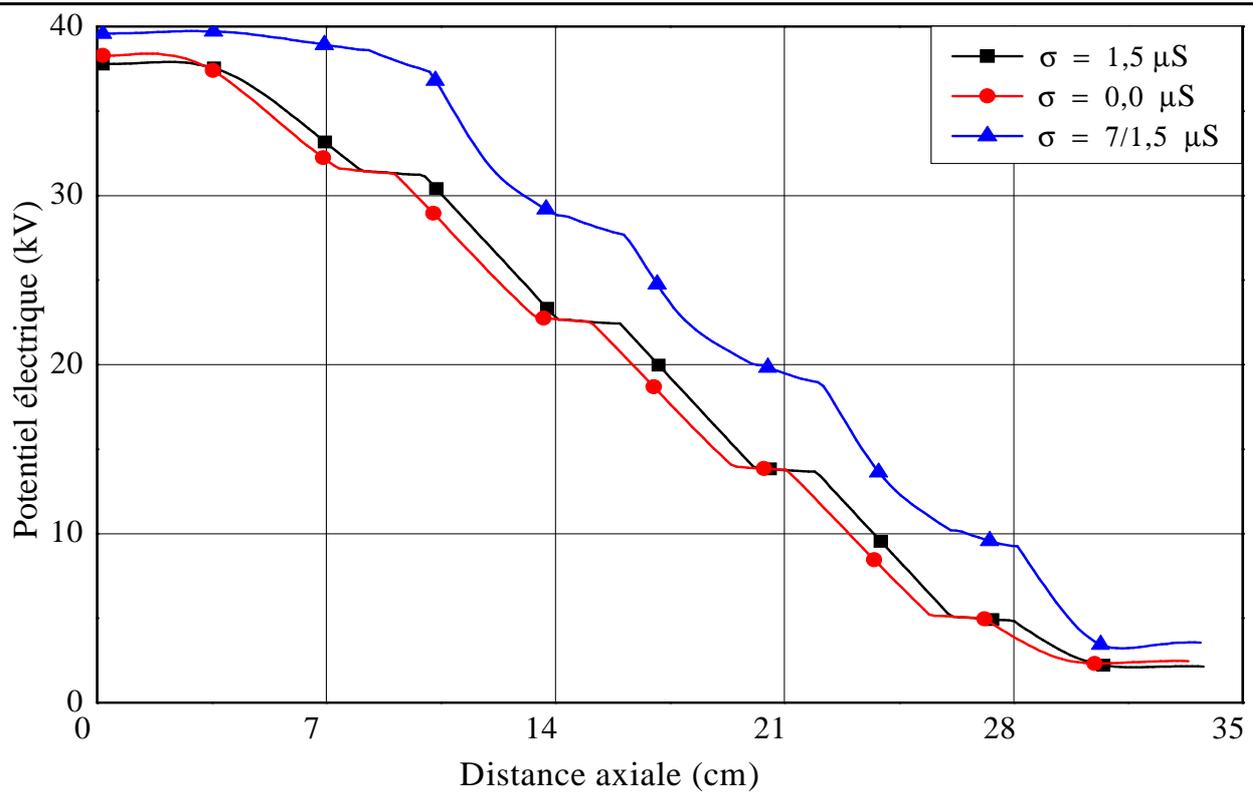
**Fig. 4.10** Distribution du champ électrique pour les différentes valeurs de  $\sigma$  (uniforme)

### b) Pollution non-uniforme

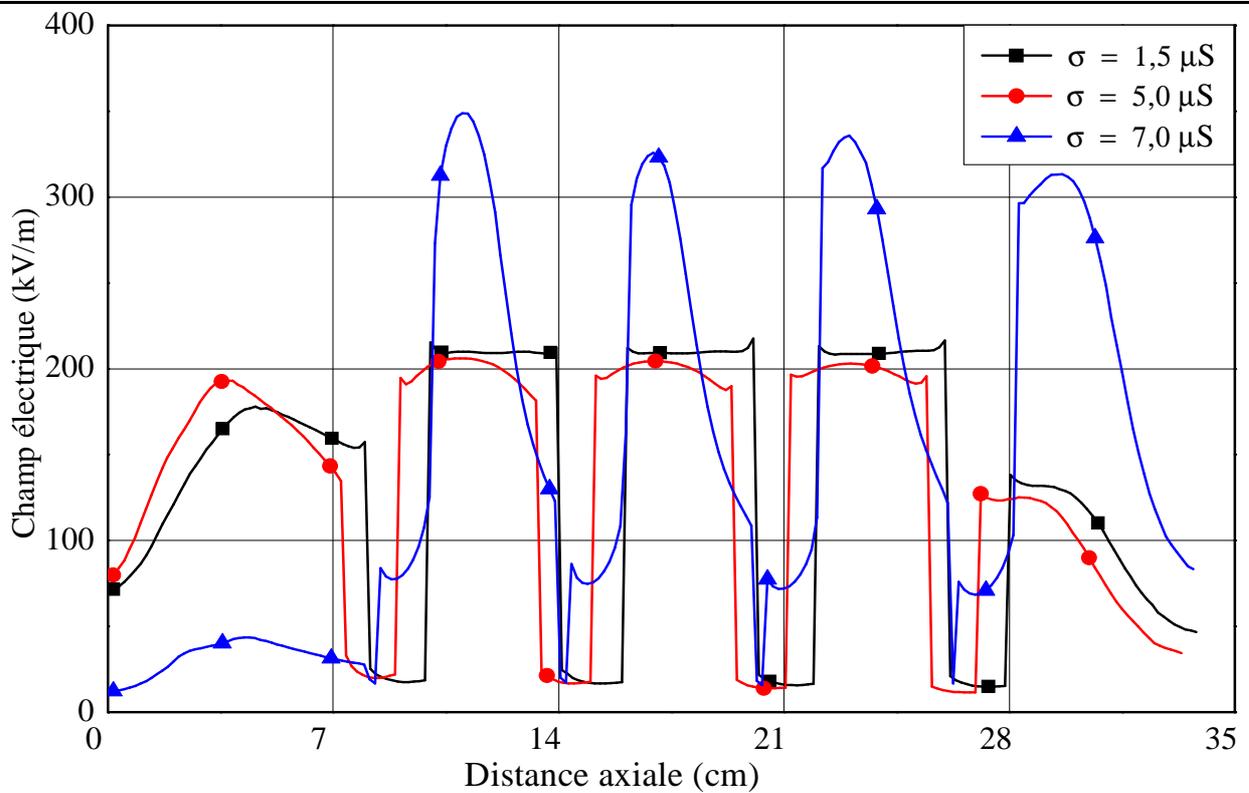
Dans le deuxième essai, une couche de pollution non-uniforme ayant une conductivité égale à  $7/1,5\mu\text{S}$  est appliquée à la surface de l'isolateur. Les résultats sont montrés dans les figures 4.11 et 4.12. Dans la figure 4.11 on présente la distribution des lignes équipotentielles où peut remarquer qu'un changement minime en comparaison avec les cas sans pollution (figure 4.7, figure 4.8.a). Cette différence est plus clair en examinant les courbes des la figure 4.13 qui donne la répartition axiale de la tension. De plus on remarque, comme il était attendu que les valeurs maximales des potentiels sont près de l'électrode haute tension et commence à décroître jusqu'à son annulation quand on se rapproche de l'électrode de masse. Ce constat est en accord avec la distribution du champ électrique montré dans la figure 4.13.



**Fig. 4.11** Lignes équipotentielles pour un isolateur pollué



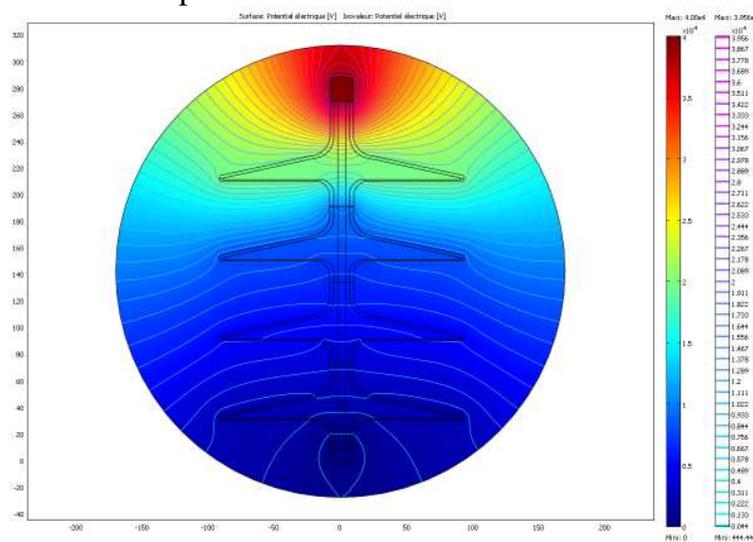
**Fig. 4.12** Distribution de la tension pour les différentes valeurs de  $\sigma$



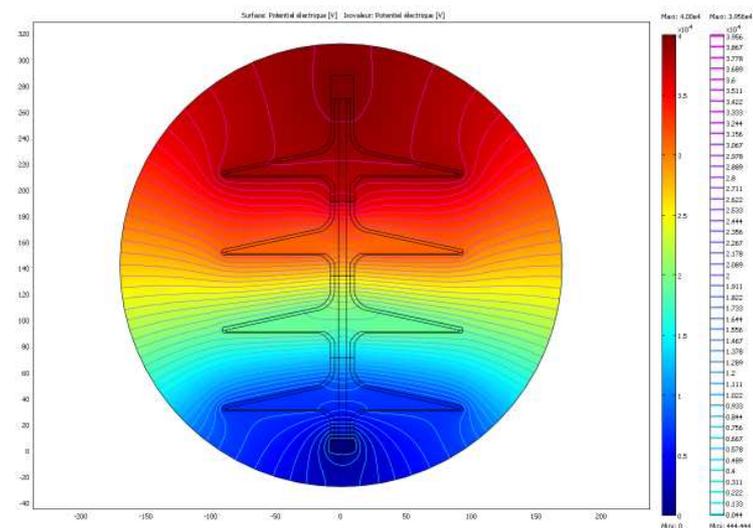
**Fig. 4.13** Distribution du champ électrique pour les différentes valeurs de  $\sigma$

c) 3<sup>ème</sup> essais

Afin de comprendre mieux, une troisième série de simulations a été entamée. Elle consiste à une distribution de pollution non uniforme, on fixe la conductivité  $\sigma_2 = 7\mu\text{S}$  et on varie  $\sigma_1$  avec différents valeurs puis on inverse le cas en fixant  $\sigma_1$  et en faisant varier  $\sigma_2$ . Les résultats sont montrés dans les figures 4.14 pour le cas ( $\sigma_1/\sigma_2=1,5/7 \mu\text{S}$  ;  $\sigma_1/\sigma_2=7/1,5 \mu\text{S}$ ) et dans la figure 4.15 dans le cas ( $\sigma_1/\sigma_2=1,5/7 \mu\text{S}$  ;  $\sigma_1/\sigma_2=7/1,5 \mu\text{S}$ ) respectivement. De plus on remarque, comme il était attendu que les valeurs maximales des potentiels sont près de l'électrode haute tension et commence à décroître jusqu'à son annulation quand on se rapproche de l'électrode de masse. La distribution axiale du potentiel et du champ électrique pour les cas de couche de pollution sont représentées dans les figure 4.17 et 4.18 respectivement.

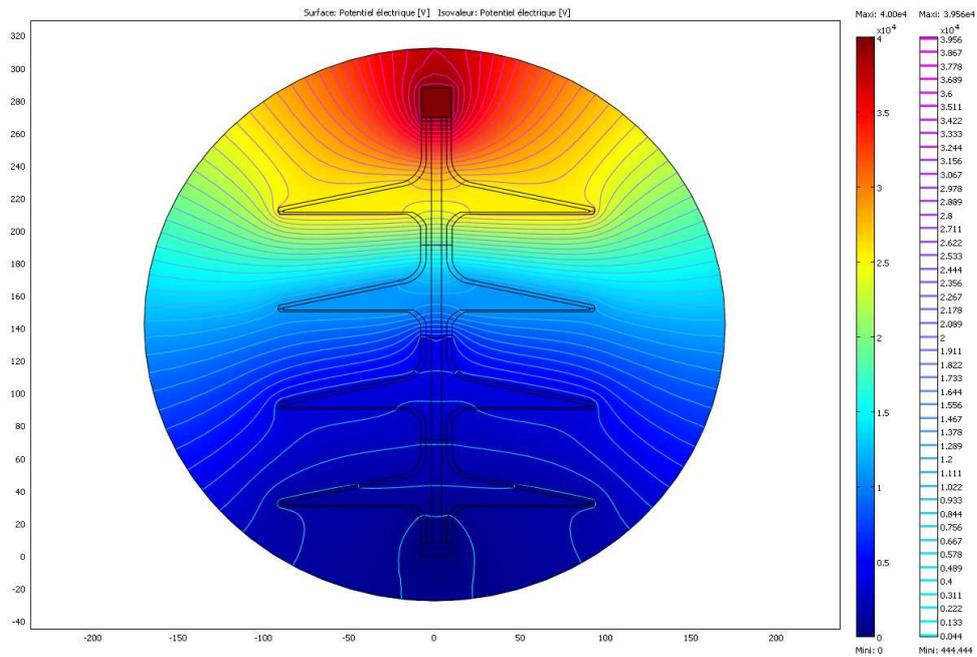


$$\sigma_1 = 7\mu\text{S}, \sigma_2 = 1,5 \mu\text{S}$$

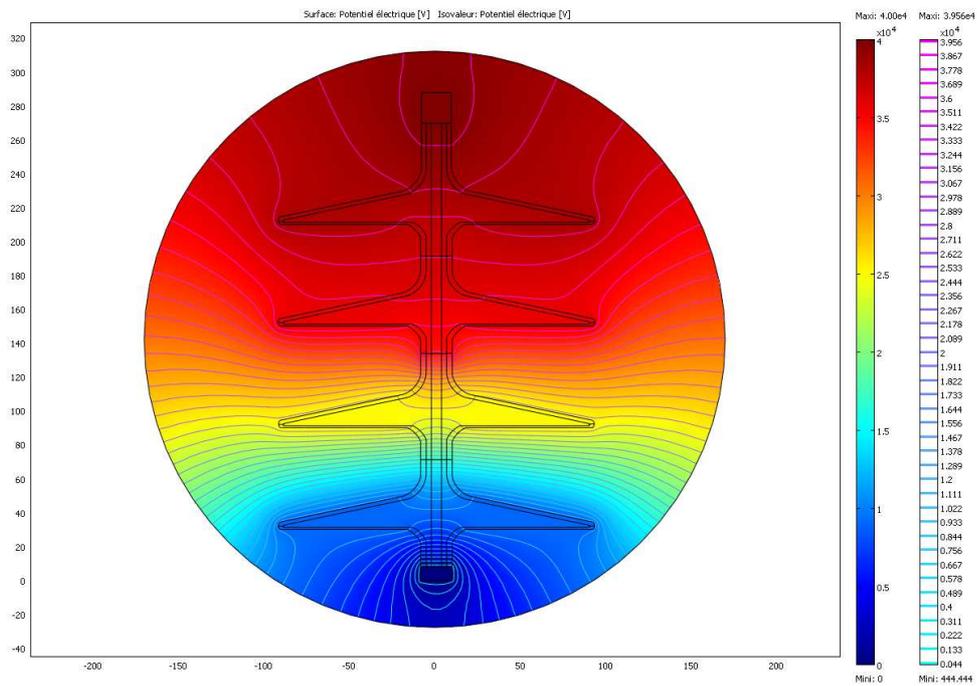


$$\sigma_1 = 1,5\mu\text{S}, \sigma_2 = 7 \mu\text{S}$$

**Fig. 4.14** Pollution non-uniforme ( $\sigma_1$  fixe pour l'ailette supérieures et  $\sigma_2$  variable pour les trois ailettes inférieures)

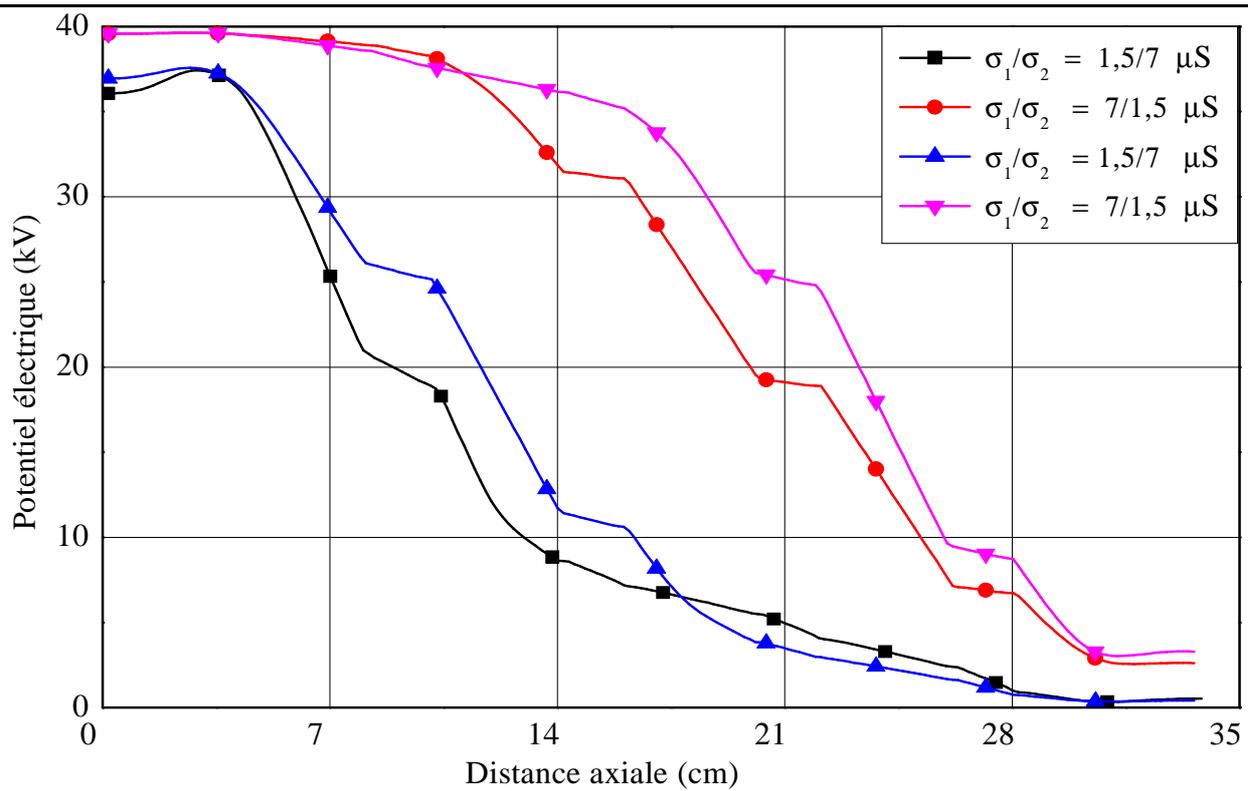


$\sigma_1 = 7\mu\text{S}, \sigma_2 = 1,5 \mu\text{S}$

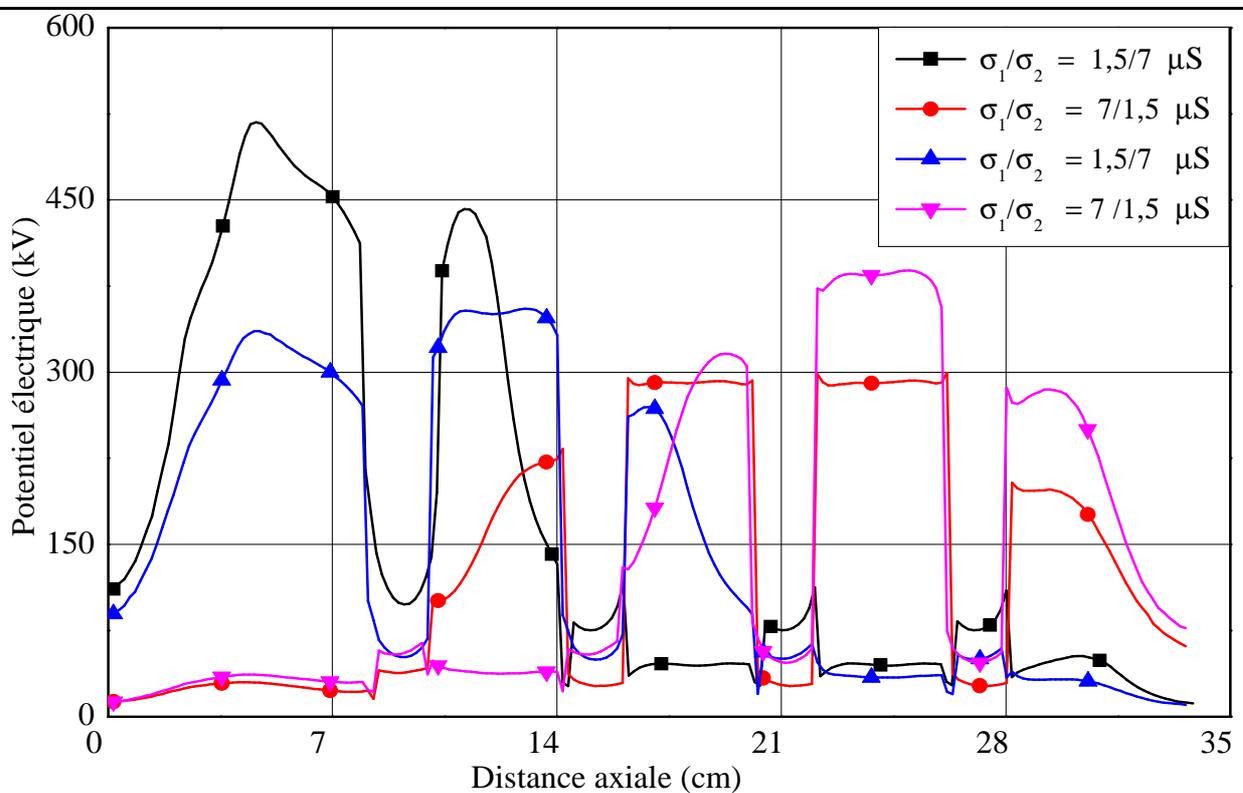


$\sigma_1 = 1,5\mu\text{S}, \sigma_2 = 7 \mu\text{S}$

**Fig. 4.15** Pollution non-uniforme ( $\sigma_1$  fixe pour les deux ailettes supérieures et  $\sigma_2$  variable pour les deux ailettes inférieures)



**Fig. 4.17** Distribution de la tension pour les différentes valeurs de  $\sigma$  (non-uniforme)



**Fig. 4.18** Distribution du champ électrique pour les différentes valeurs de  $\sigma$  (non-uniforme)

#### **4.7. Conclusion**

L'objectif fondamental de ce chapitre était l'étude de la distribution de tension le long des isolateurs silicone parafoudres sous des conditions de pollution. Nous nous sommes intéressés essentiellement à l'influence de la formation de la bande sèche ; D'après ces résultats nous remarquons l'augmentations de la conductivité de la couche polluée que favorise la distribution non uniforme de la tension le long de la surface d'un isolateur en silicone.

## CIRCUIT EQUIVALENT DE L'ISOLATEUR SOUS CONDITION DE POLLUTION

### 5.1. Introduction

Dans ce chapitre ; nous présenterons Le circuit équivalent complet développé pour la simulation des performances de l'isolateur en silicone sous pollution, les détails de modélisation de ces différentes parties, enfin nous terminerons ce chapitre par la présentation des résultats de simulation et interprétations.

### 5.2. Modélisation de l'isolateur

Un modèle électrique a été développé pour représenter le comportement de l'isolateur sous pollution. La figure 5.1 présente l'idée fondamentale derrière la modélisation des éléments de l'isolateur. L'isolateur est divisé en plusieurs parties égales et chacune de ces parties est représentée par un circuit RC parallèle tout en introduisant la capacité contre terre. Le circuit équivalent complet ainsi développé dans le cas sans pollution est illustré sur la figure 5.2

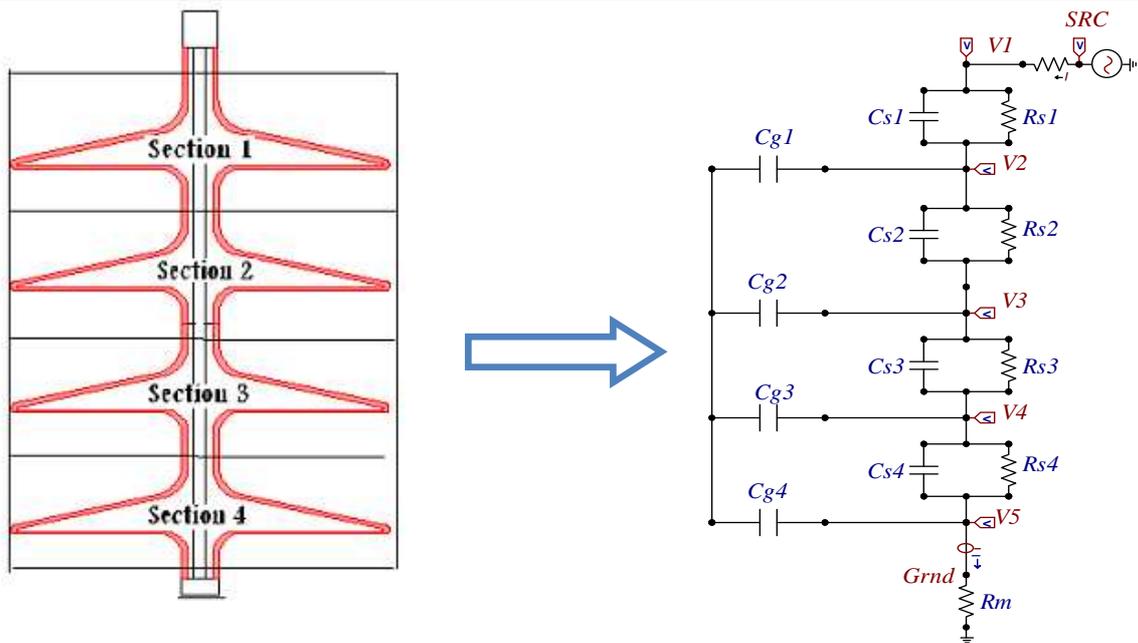
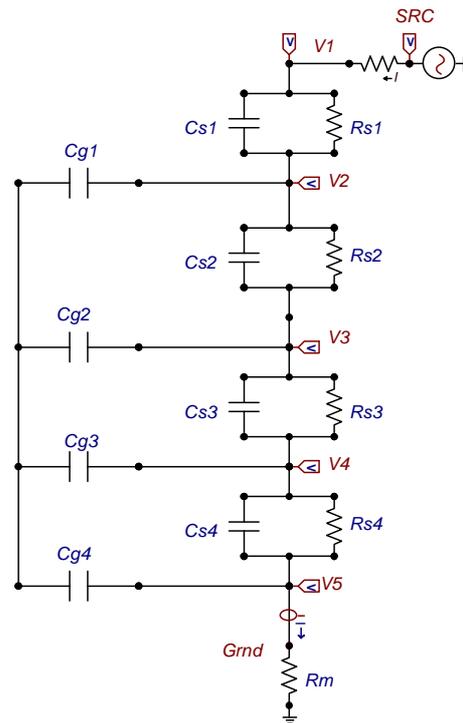


Fig. 5.1 Principe de la modélisation



**Fig. 5.2** Circuit équivalent complet de l'isolateur propre

### 5.3. Calcul des paramètres électriques du circuit

Comme il a été mentionné auparavant, l'isolateur est divisé en quatre sections de longueur égales. Chacune d'elles est composée d'une capacité  $C_s$  parallèlement connectée à une résistance  $R_s$  (figure 5.2). Ce circuit (R-C parallèle) représente la surface isolante [50]. De plus une capacité horizontale est rajoutée dans le but de prendre en considération le corps de l'isolateur en fibre de verre.

La méthode des éléments finis a été employée via le logiciel COMSOL Multiphysics pour calculer les distributions de tension et du champ à la surface d'isolateur en silicone. Les valeurs du champ électrique calculées sont employées pour obtenir l'énergie électrique emmagasinée dans les différentes parties de l'isolateur. Ces valeurs d'énergies combinées avec les potentiels calculés permettent la détermination des diverses capacités du circuit équivalent développé dans le cadre de ce travail (Figure 5.2). Ce circuit a été ensuite implanté dans l'ATP-EMTP pour déterminer les différentes tensions et le courant fuite circulants à la surface de l'isolateur.

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 suivant [51] :

$$C = \frac{Q}{V} \quad (5.1)$$

$$Q = C.V \quad (5.2)$$

$V$  : tension entre conducteurs et  $Q$  : charge des conducteurs positifs et négatifs.

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

$$W_e = \frac{Q^2}{2C} \quad (5.3)$$

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

$$W_e = \int_{\Omega} D.E dV \quad (5.4)$$

Ainsi la capacité peut être obtenue à partir :

$$C = \frac{Q^2}{2W_e} \quad (5.5)$$

En combinant l'équation (5.2) dans l'équation (5.5) on obtient la formule (5.6) utilisée pour calculer les valeurs des capacités des l'isolateur en polymère:

$$C = \frac{2W_e}{V^2} \quad (6.6)$$

Pour calculer la résistance unitaire de l'isolateur il faut faire une assimilation d'un isolateur à un cylindre. 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,  $L$  comme montre la figure 5.3.

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

$$L = \frac{S}{\pi\phi} \quad (5.7)$$

D'autre part, la résistance du cylindre équivalent est :

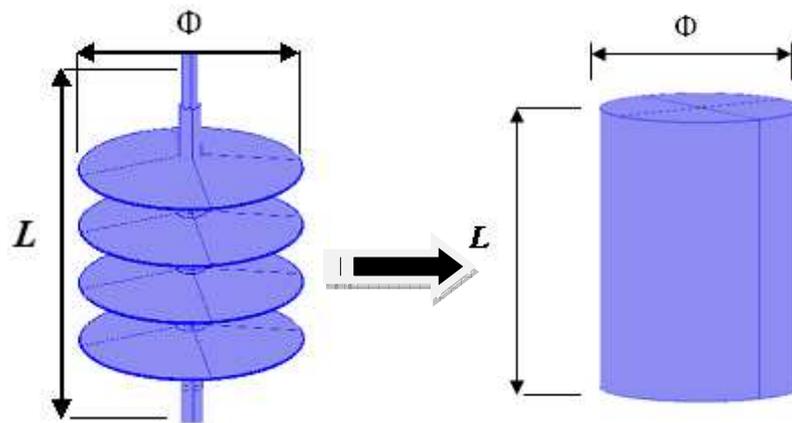
$$R = \rho \frac{L}{\pi\phi} \quad (5.8)$$

$R$  : La résistance électrique de l'isolant

$\rho$  : La résistivité électrique e l'isolant en Silicone

$L$  : la longueur de fuite de l'isolateur

$\phi$  : Le diamètre de l'isolateur



**Fig. 5.3** Assimilation théorique d'un isolateur à un cylindre

Les résultats obtenues en se basant sur la formule (5.6) et à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics sont résumées dans le tableau 5.1.

Pour le calcul de la résistance pour chacune des sections on a :

$$R_{si} = \rho \frac{L}{\pi \phi} = 7,710^5 M\Omega$$

<b>Tableau 5.1</b> Valeurs des capacités obtenus par la MEF (cas propre)			
Sections de l'isolateur	La tension des sections	L'énergie électrique emmagasinée	Les valeurs des capacités pF
Section 1	7511,91	$8,90 \cdot 10^{-5}$	$C_{s1}=3,150$
	6072,91	$5,16 \cdot 10^{-6}$	$C_{g1}=0,279$
Section 2	5535,71	$5,29 \cdot 10^{-6}$	$C_{s2}=0,345$
	3209,66	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$C_{g2}=0,258$
Section 3	4793,87	$2,73 \cdot 10^{-6}$	$C_{s3}=0,237$
	2568,00	$7,65 \cdot 10^{-7}$	$C_{g3}=0,232$
section 4	4217,76	$7,40 \cdot 10^{-5}$	$C_{s4}=8,300$
	2311,21	$2,15 \cdot 10^{-5}$	$C_{g4}=8,000$

### 5.3.1. Modélisation de la couche de pollution

Les données qui caractérisent le domaine de l'enveloppe en polymère sont représentées dans le tableau 5.2. La couche de pollution a pu être représentée par une résistance non-linéaire parallèle avec un condensateur linéaire. Le condensateur représente la capacité parasite dans l'enveloppe. Sa valeur n'est pas influencée par les conditions humides ou sèches, les valeurs de la capacité de chaque section dans la couche polluée ont été obtenues en utilisant le même concept basé sur la MEF. Le programme utilisé pour

calculer la résistance ( $R_s$ ) et la capacité ( $C_s$ ) de chaque section de la couche de pollution à l'état humide est présenté dans l'annexe A1. Il est à noter que la répartition de pollution à l'état humide est considéré uniforme. Les résultats obtenus dans ce cas sont représentés dans le tableau 5.3.

<b>Tableau 5.2</b> Données de l'enveloppe en polymère	
données	valeur
$\epsilon_0$	$8,854 \times 10^{-12}$
$\epsilon_{rP}$	12,1
$r_{1P}$	3,2
$r_{2P}$	16,55

<b>Tableau 5.3</b> Valeurs de la résistance et de la capacité obtenus par la MEF (cas pollué)			
Sections	Longueur (cm)	Résistance (M $\Omega$ )	Capacité (Cs) ( $\mu$ F)
Section 1	22,4	3,083	$4,3 \cdot 10^{-5}$
Section 2	22,3	3,416	$6,4 \cdot 10^{-5}$
Section 3	22,3	3,594	$1,73 \cdot 10^{-4}$
section 4	22,5	8,001	$1,41 \cdot 10^{-3}$

La valeur de la résistance non-linéaire de la couche de pollution devient faible à l'état humide. Elle augmente à fur à mesure que la température dans l'isolateur en polymère augmente jusqu'à ce que la surface polluée soit totalement séchée.

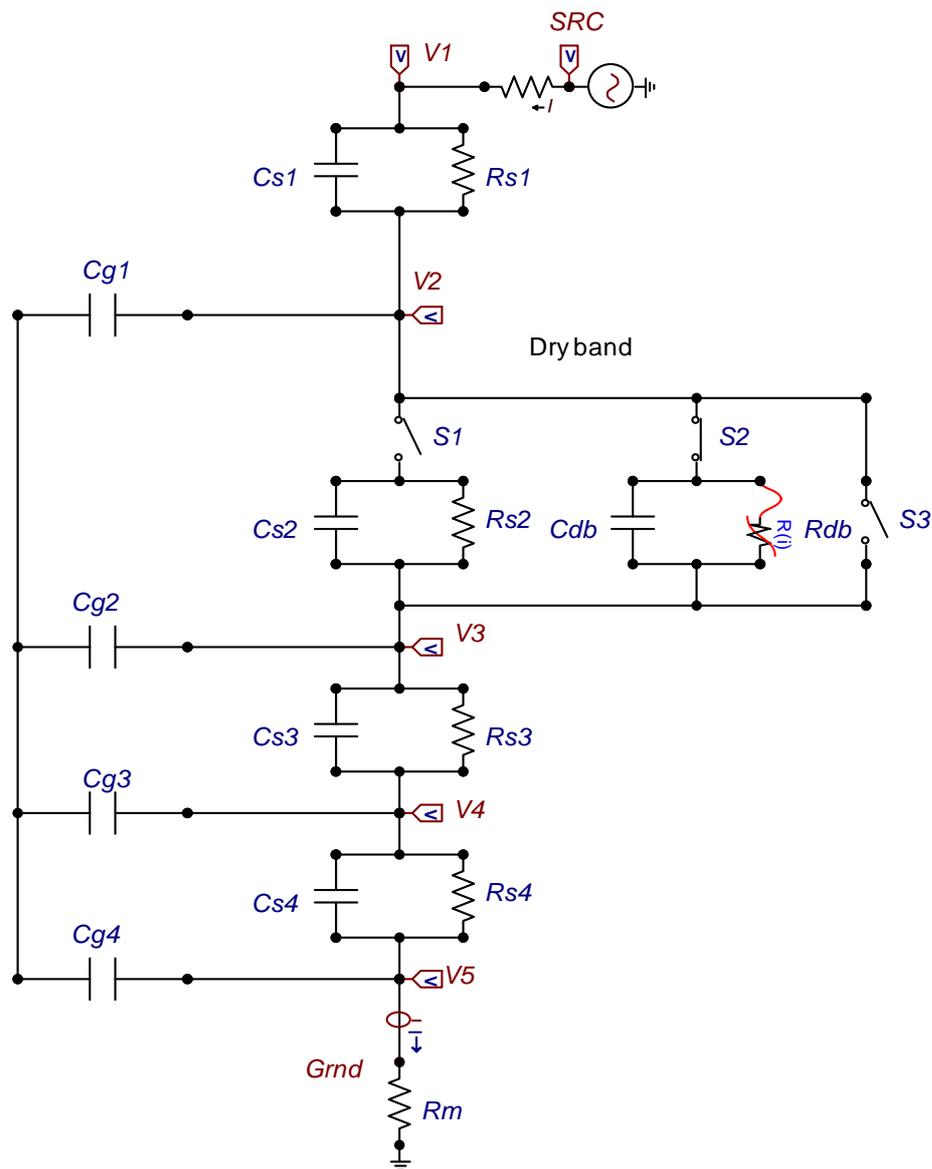
Dans cette simulation, la résistance de la couche polluée est représentée par deux résistances spécifiques pour les sections sèches et humides (Fig. 5.4). Dans le but de prendre en compte l'apparition des bandes sèches suite aux assèchements locaux et par suite la création de l'arc aux bornes de ces bandes un modèle basé sur le concept de Neumarker (chapitre 3) est développé dans lequel la résistance non-linéaire de la bande sèche prend la forme,

$$R_{db} = A \cdot I^{-(n+1)} \cdot X \quad (5.10)$$

La partie humide sera donc :

$$R_H = \frac{r_P(L - X)}{L} \quad (5.11)$$

Ce modèle est implanté dans l'EMTP puis introduit dans le circuit équivalent montré dans la figure 5.4. La variation de la largeur de la bande sèche est laissée à l'utilisateur ainsi que la position de cette bande sur la surface de l'isolateur. De plus on peut facilement faire varier le nombre de bandes sèches simulant ainsi le cas observé expérimentalement.



**Fig. 5.4** Circuit équivalent complet de l'isolateur pollué avec bandes sèches

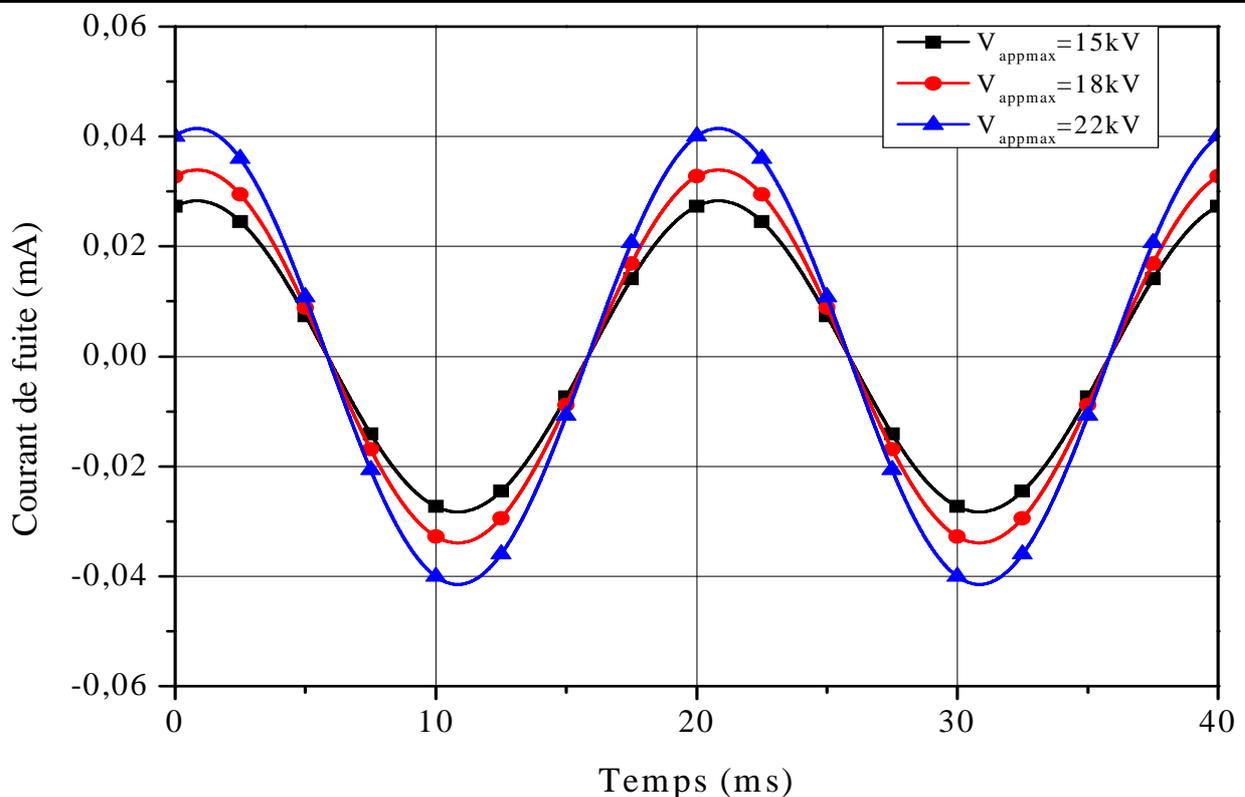
## 5.4. Résultats de simulation et interprétations

### 5.4.1. Performance du l'isolateur à l'état propre

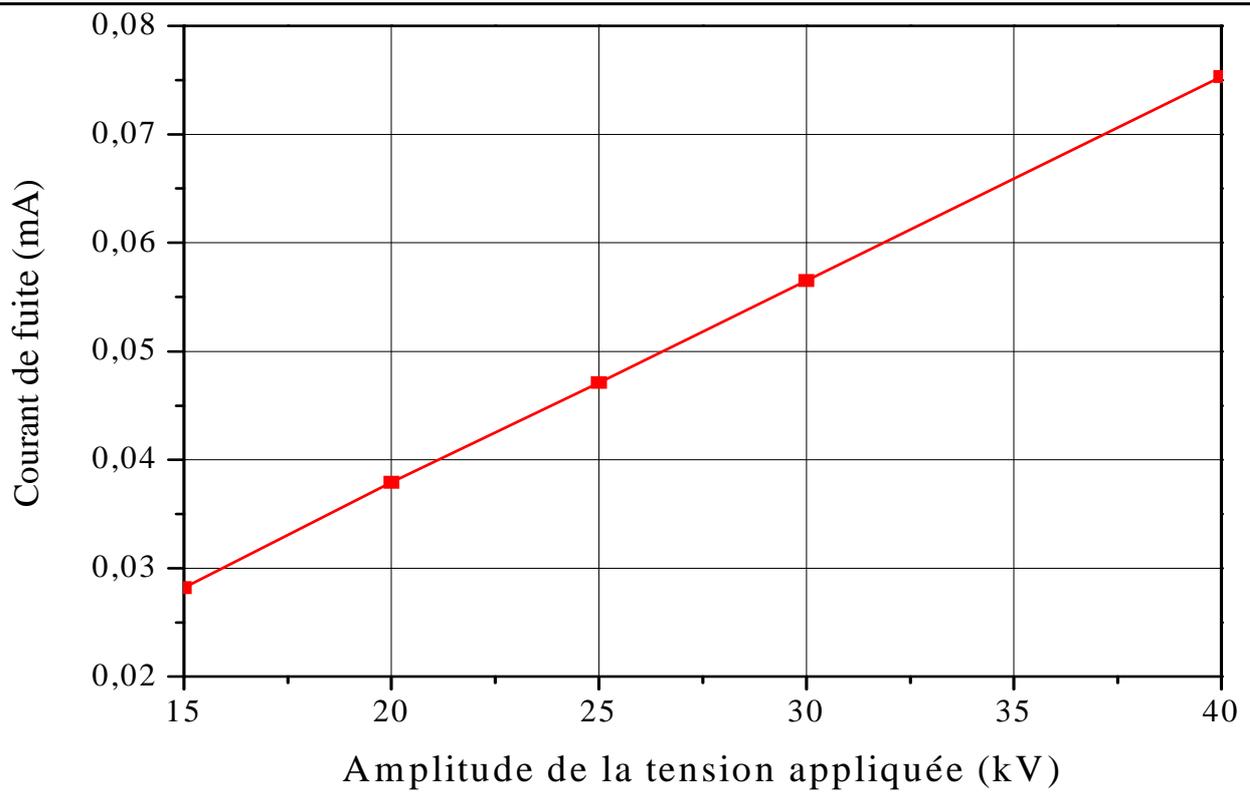
Les valeurs des différents éléments du circuit équivalent obtenues dans le cas d'une surface propre sont introduites dans le circuit équivalent. Dans le but de voir l'effet de l'amplitude de la tension appliquée, des simulations sont répétées pour trois valeurs de cette dernière. La figure 5.7 illustrent les résultats obtenus de cette investigation où l'on montre les formes d'ondes du courant de fuite pour des amplitudes de 15, 18 et 22kV. On peut clairement voir que le courant de fuite augmente au faire à mesure que la tension d'alimentation augmente.

Nous présentons dans la figure 5.8 la variation de la valeur maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée.

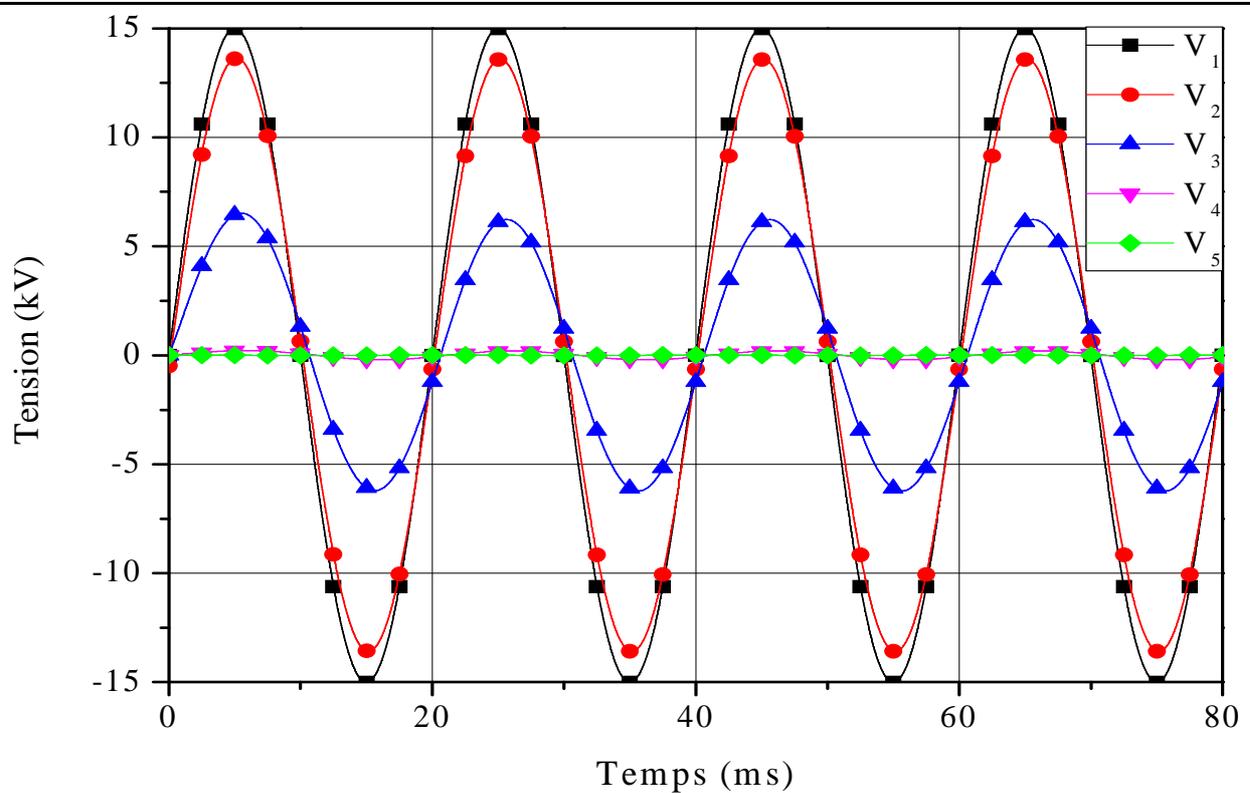
Il ressort de ces résultats, que le courant de fuite augmente avec l'augmentation de la tension appliquée. Cette augmentation est linéaire. Toutefois ces valeurs restent faibles à cause de l'impédance équivalente élevée du milieu. La figure 5.9 montre les formes d'onde de la tension en différents points de la surface de l'isolateur et la figure 5.10 montre la répartition de la tension maximale le long de l'isolateur propre.



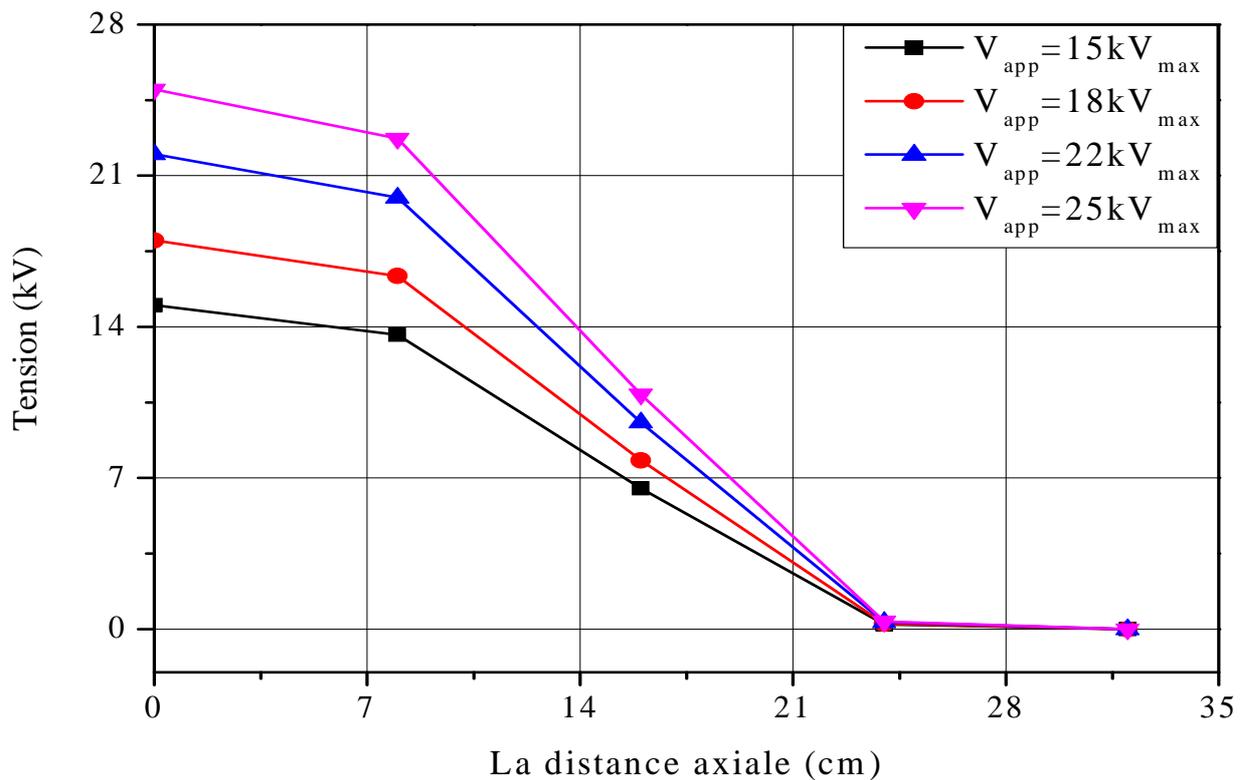
**Fig. 5.7** Formes d'ondes simulées du courant de fuite pour le cas d'un isolateur propre



**Fig.5.8** Variations du courant de fuite en fonction de l'amplitude de la tension appliquée



**Fig. 5.9** Formes d'ondes simulées des tensions en différents points de la surface de l'isolateur propre



**Fig. 5.10 Répartition de la tension maximale en différents points de l'isolateur propre**

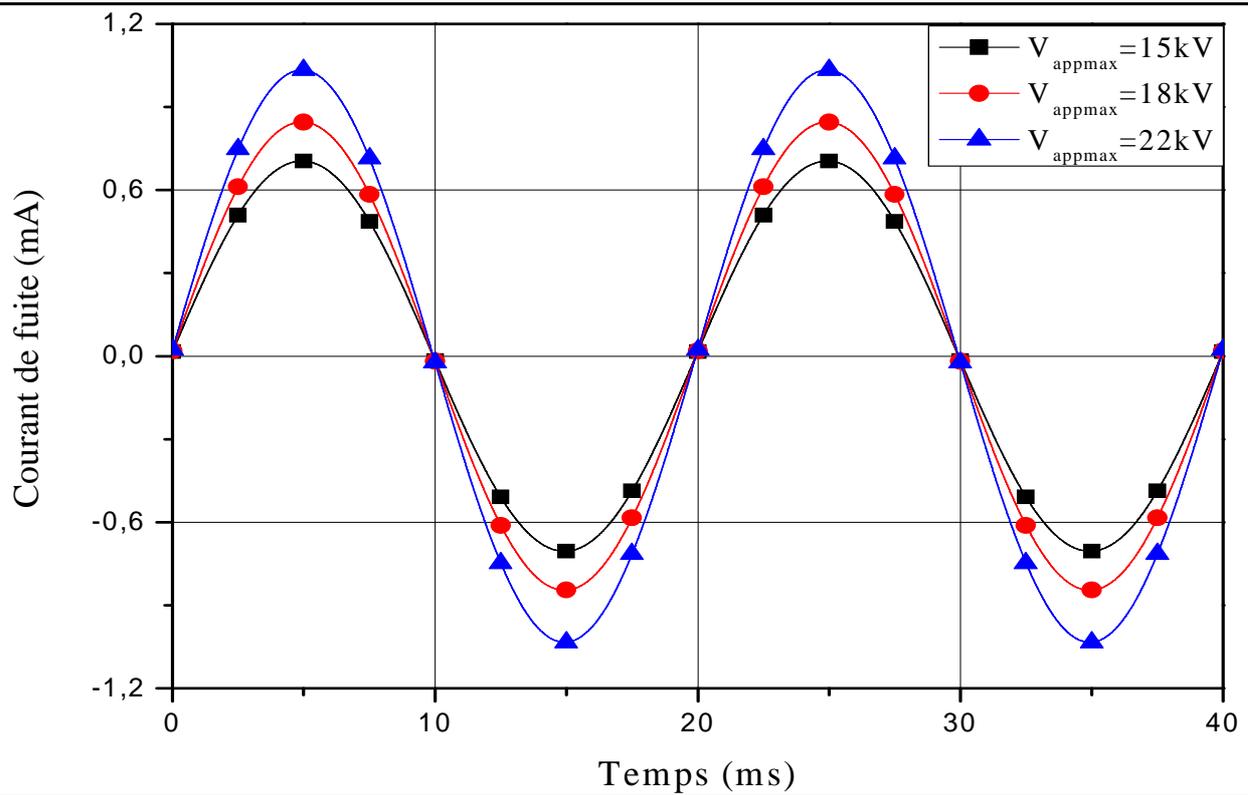
## 5.4.2. Performance du l'isolateur sous pollution

### 5.4.2.1. Cas de l'état humide

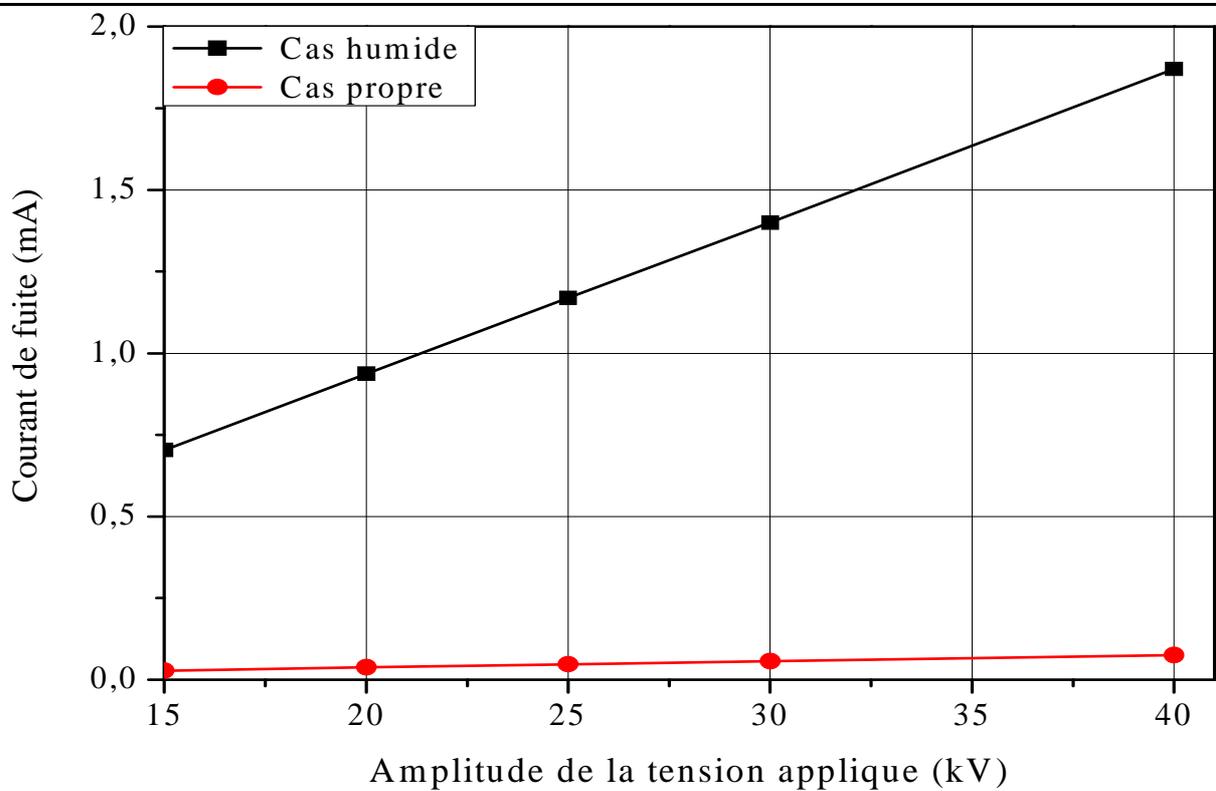
En introduisant les valeurs obtenues dans le logiciel ATP-EMTP et en simulant le cas pour les tensions d'alimentation ayant pour valeurs maximales 15, 18 et 22kV. La figure 5.11 montre les résultats obtenus. Comme on peut le voir :

- d'une part le courant de fuite est plus importants au fur est à mesure que la tension augmente
- de l'autre part il est plus important que le cas propre ceci est évident puisque la surfaces polluée humide offre une résistance plus faible que celle du cas propre.

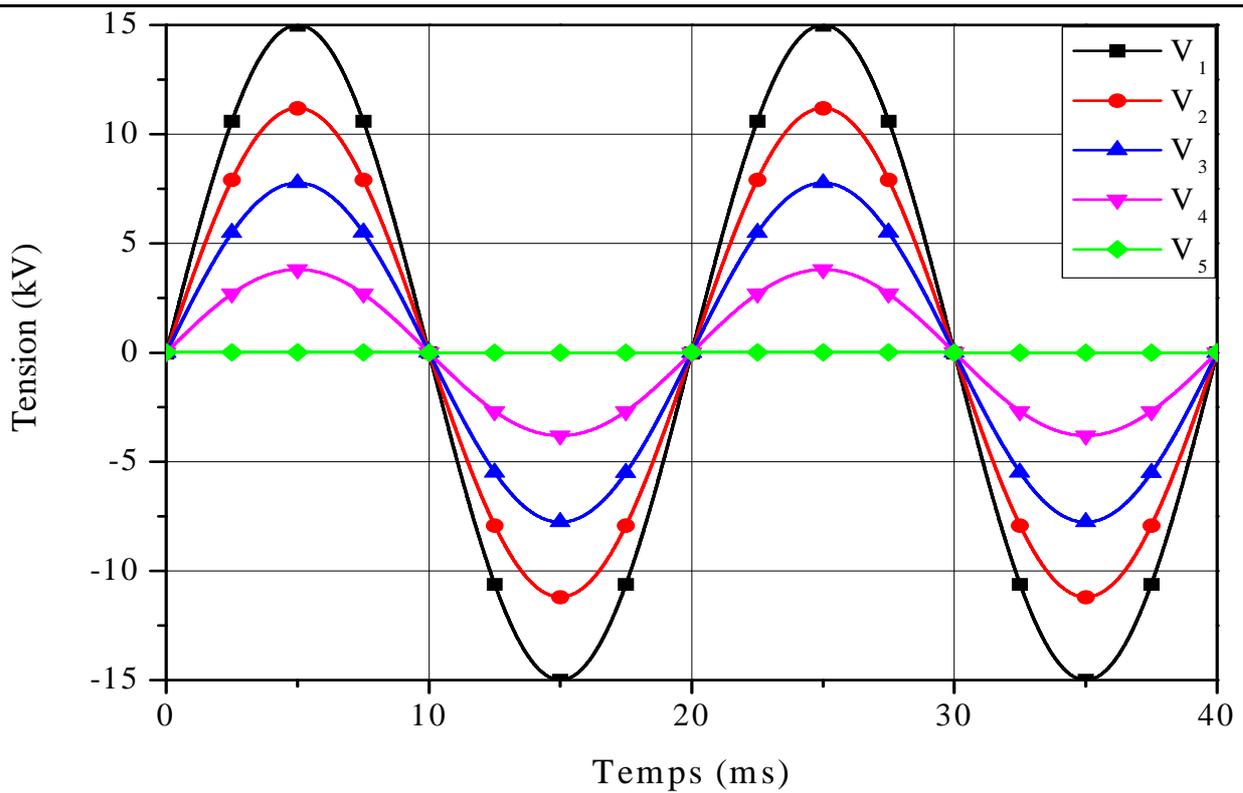
Ceci est bien clair en examinant la figure 5.12 où l'on montre une comparaison entre le cas propre et pollué humide. La figure 5.13 montre les formes d'onde de la tension en différents points de la surface de l'isolateur et la figure 5.14 montre la répartition de la tension maximale le long de l'isolateur propre.



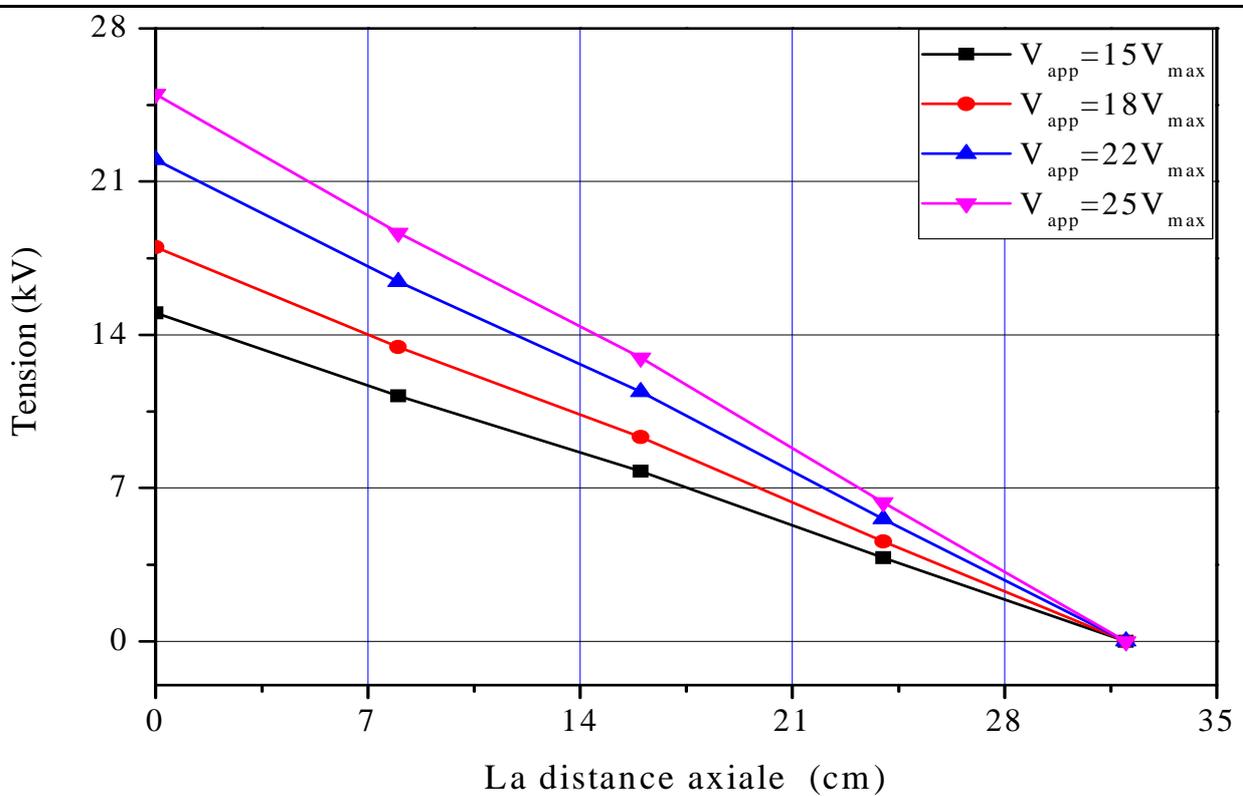
**Fig. 5.11** Formes d'onde du courant de fuite simulées sous les conditions humide.



**Fig.5.12** Variations du courant de fuite en fonction de la tension appliquée



**Fig. 5.13** Formes d'ondes simulées des tensions en différents points de la surface de l'isolateur pollué.

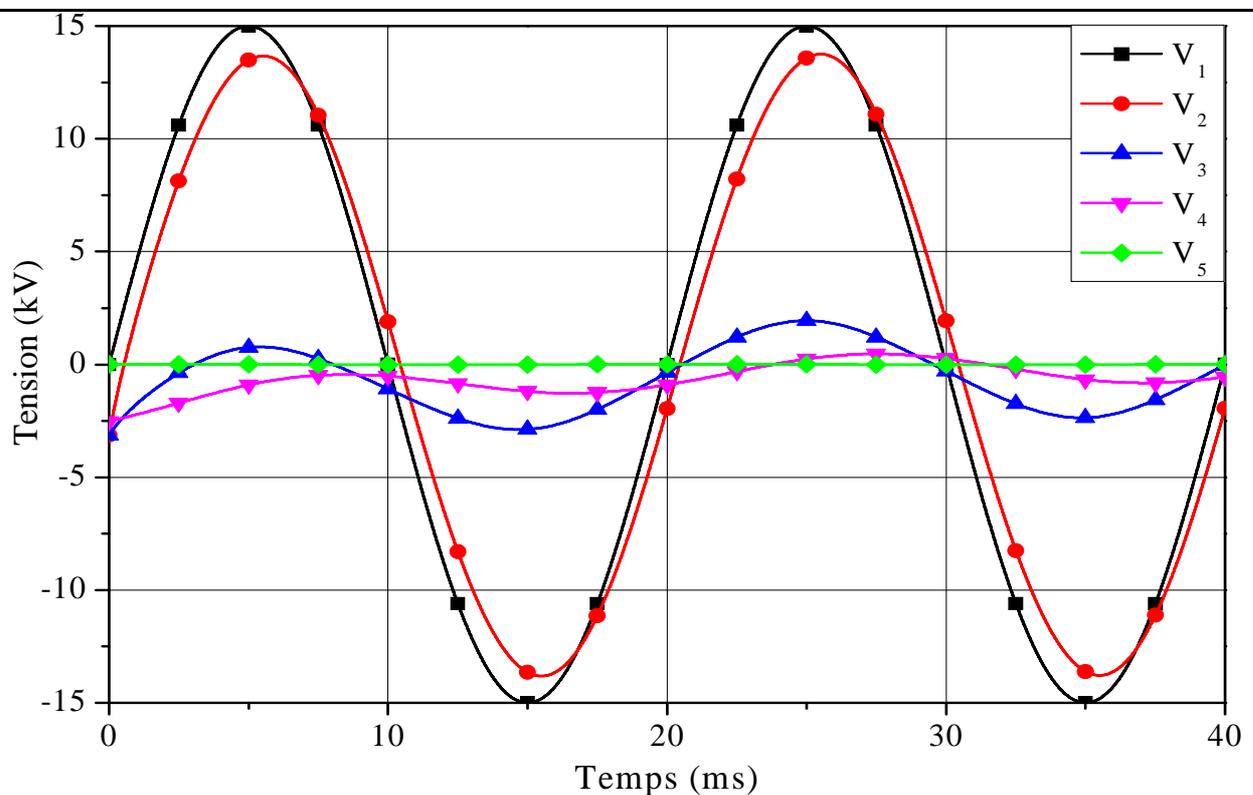


**Fig. 5.14** Répartition de la tension maximale en différents points de l'isolateur pollué.

### 5.4.2.2. Cas de la bande sèche

Comme il a été mentionné (chapitre 3), la section est représentée par deux résistances série (figure 5.4). En raison du grand nombre de résultats que l'on peut avoir par simulation nous ne présentons là que quelques exemples. Le premier, dont les résultats sont montrés dans la figure 5.15, concerne les formes d'ondes des tensions en différents points de la surface de l'isolateur pour une tension appliquée sinusoïdale ayant une amplitude de 15kV et pour une largeur de la bande sèche égale à 1cm. Comme on peut le voir les tensions se répartissent d'une manière non-linéaire et sont déphasées l'une de l'autre.

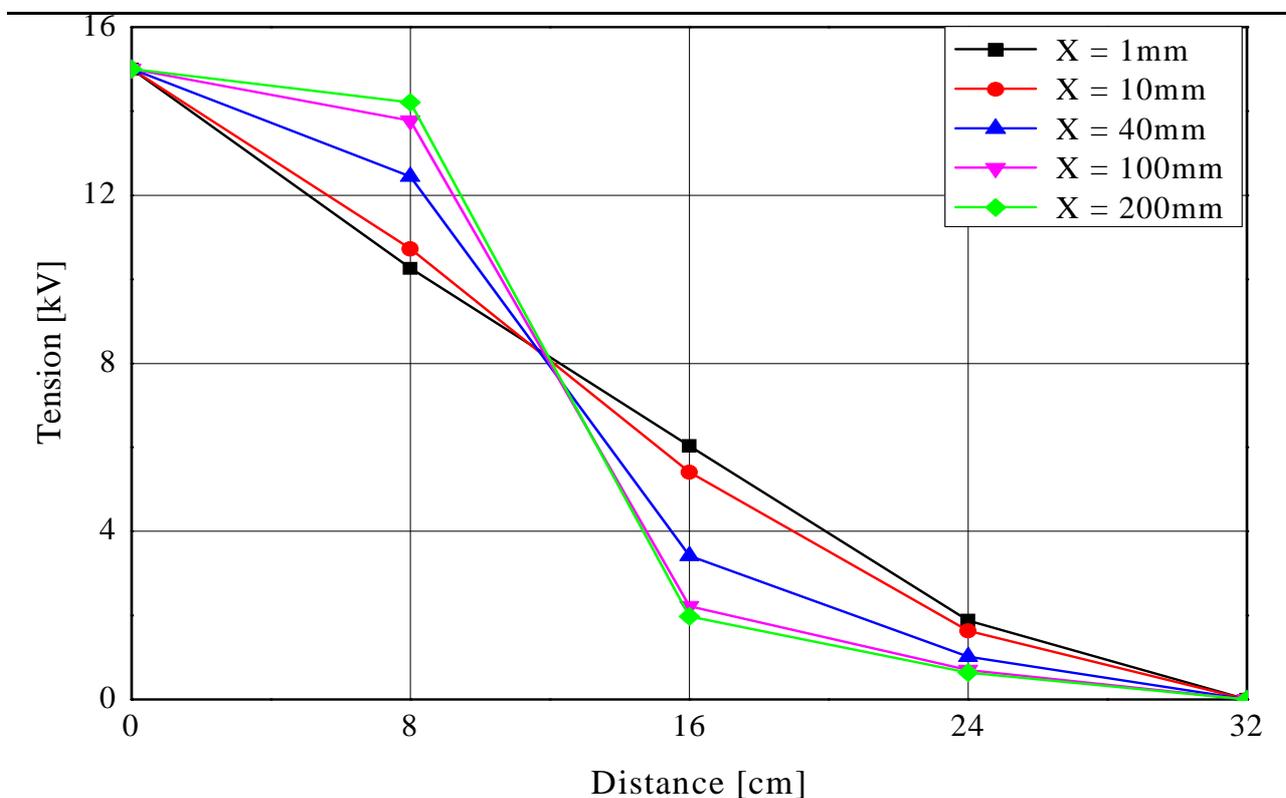
Dans le but d'étudier l'effet de la variation de la largeur de la bande sèche sur le fonctionnement de l'isolateur, une simulation avec diverses valeurs (1mm, 1cm, 4cm, 10cm et 20cm) a été faite. Les résultats obtenus sont montrés dans les figures 5.16 à 5.19. Dans la figure 5.16 on présente la variation des tensions maximales en différents points de la surface de l'isolateur pour les différentes valeurs de la largeur de la bande sèche utilisées.



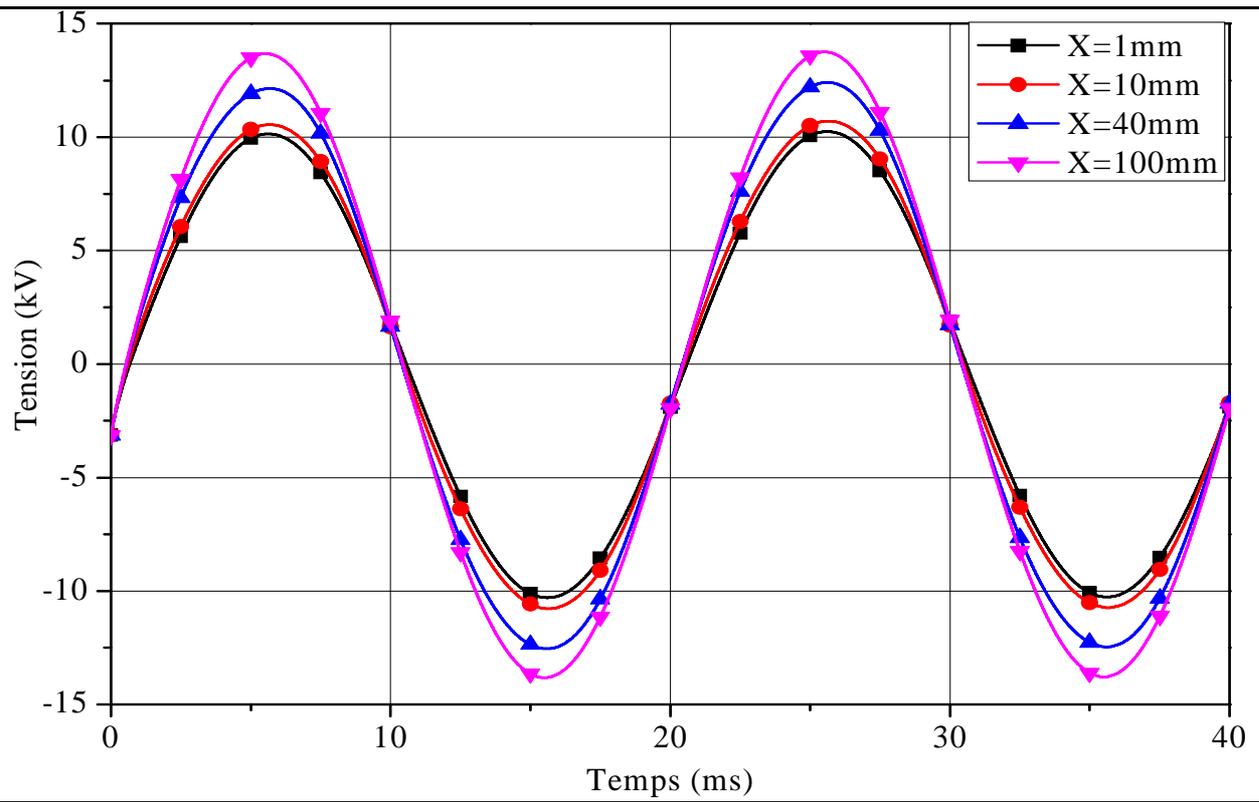
**Fig. 5.15** Formes d'onde de tension pour différents points de l'isolateur

De cette figure on peut voir que plus large est la bande sèche plus concentrée est la tension sur la borne haute tension. Donc la partie proche de la bande devient plus contraignée laissant dire que presque toute la tension d'alimentation est appliquée à la bande sèche ce qui est en accord avec le constat expérimental dans la littérature et avec la figure 5.17.

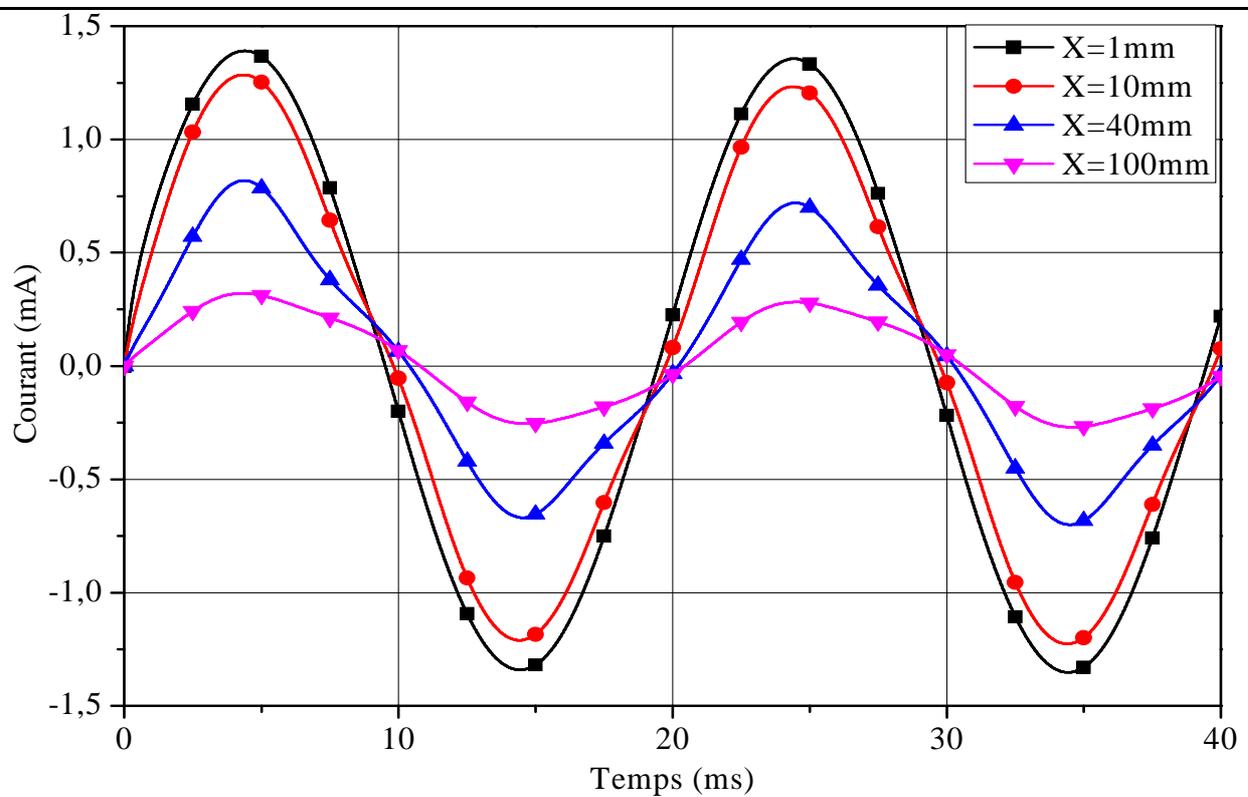
Dans la figure 5.18 et 5.19 on présente les formes d'onde de la tension de la bande sèche pour différentes valeurs de sa largeur et le courant à travers sa résistance respectivement. Les résultats de simulation prouvent que la chute de tension à travers la bande sèche est proportionnelle à sa largeur. Ceci signifie que plus large est la bande sèche plus grande est la tension à ses bornes. En outre, la présence de la bande sèche a comme conséquence une différence de phase entre la tension à ses bornes et la tension d'alimentation (Fig. 5.17). Ainsi la résistance qui représente la section de la bande sèche devient plus grande pour les grandes largeurs de bande sèche ce qui a conduit à des courants plus faibles montrés dans la figure 5.18. Le courant de fuite totale avec celui traversant la bande sèche pour les largeurs 4cm et 10cm sont montrés dans la figure 5.19



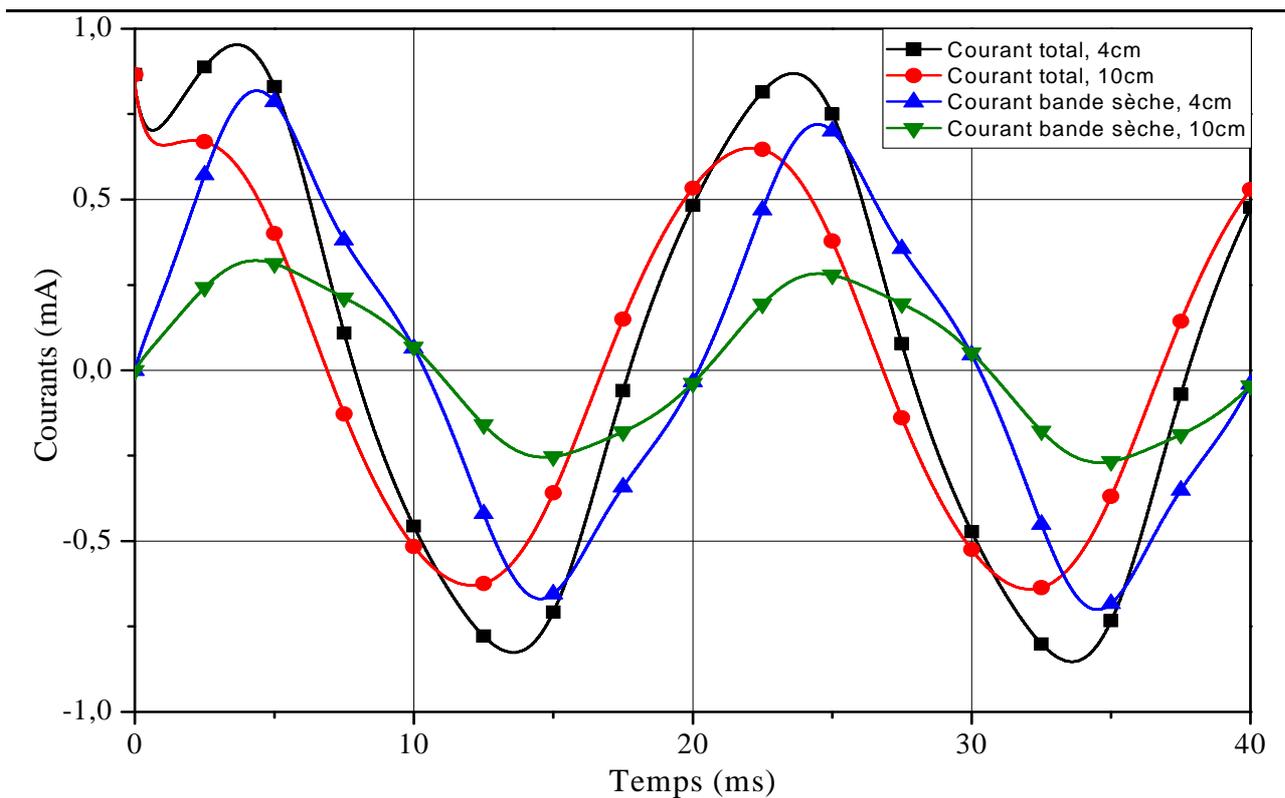
**Fig. 5.16 Répartition de la tension pour plusieurs largeurs de la bande sèche**



**Fig. 5.17** Formes de la tension de la bande sèche pour plusieurs valeurs de sa largeur



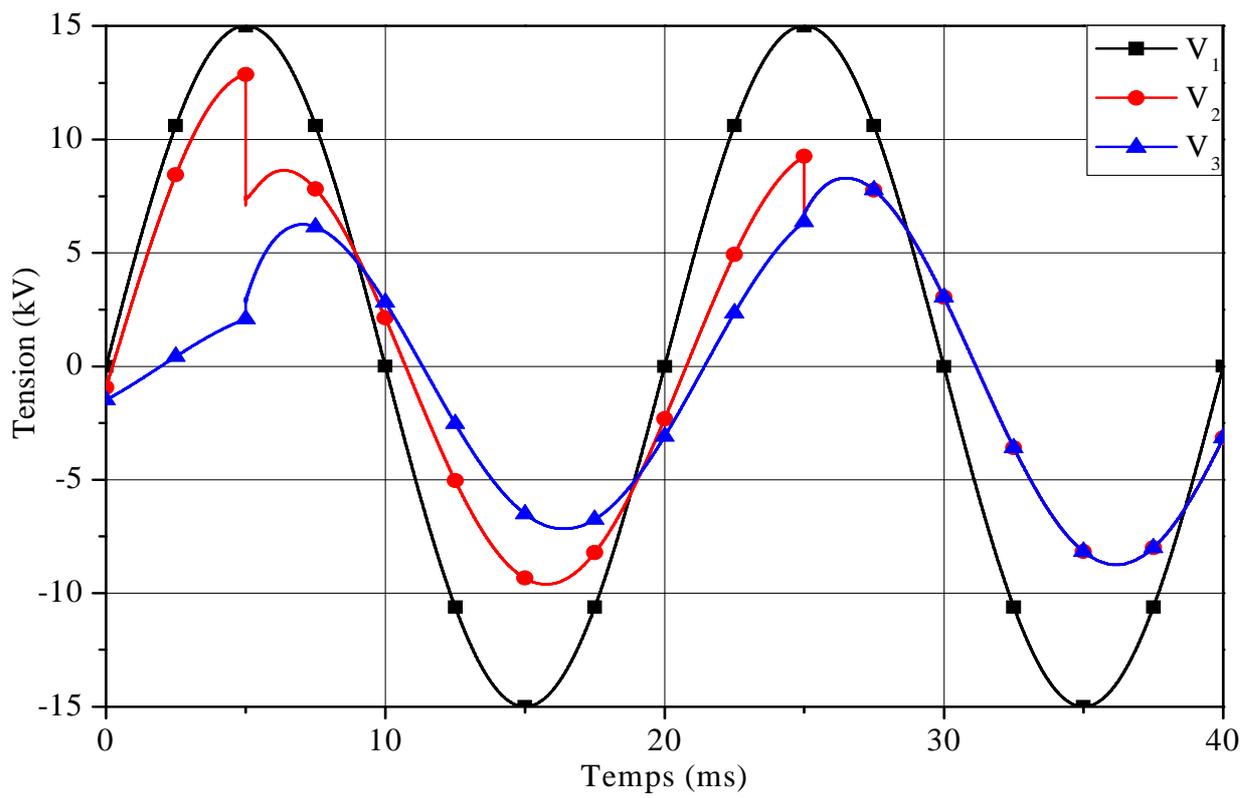
**Fig. 5.18** Formes du courant de la bande sèche pour plusieurs valeurs de sa largeur



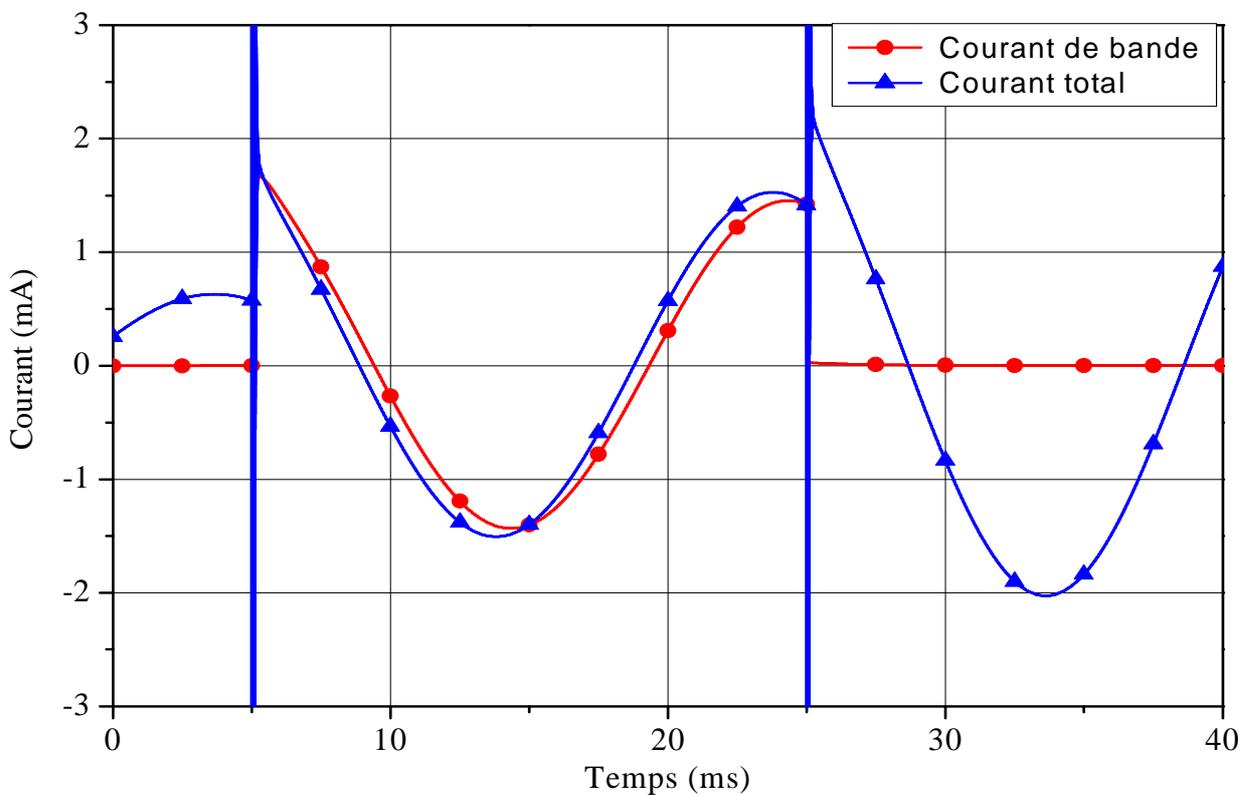
**Fig. 5.19** Formes du courant de la bande sèche pour plusieurs valeurs de sa largeur

### 5.5. Décharge à travers la bande sèche

La simulation de la décharge sur la bande sèche est réalisée en ouvrant premièrement l'interrupteur  $S_1$  au même temps en fermant l'interrupteur  $S_2$  (qui était ouvert au commencement) à 5ms. Le fonctionnement de ces deux interrupteurs simule la formation d'une bande sèche. Puis, après un temps de 20ms par exemple, en fermant l'interrupteur  $S_3$  pour une courte durée de 15ms pour simuler une décharge à travers la bande sèche. Comme il peut être observé sur la figure 5.20, les formes d'ondes de la tension aux bornes de la bande sont accompagnées par chute de tension et des pics de courants comme montrés dans les figure 5.21 et 5.20.



**Fig. 5.20** Variations la tension du cas de contournement de la bande sèche



**Fig. 5.21** Variations du courant de fuite du cas de contournement de la bande sèche

### **5.6. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons pu développer un circuit équivalent pour l'isolateur qui peut être utilisé pour les cas sans et avec pollution moyennant l'introduction des modèles des résistances non-linéaire de la bande sèche. Ses paramètres ont été identifiés en se basant sur l'approche élément finis. Par ailleurs un modèle de la bande sèche basé sur le modèle de neumarker est introduit dans le circuit conduisant ainsi à la prise en considération du caractère non linéaire de la résistance de bande sèche. 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.

---

## CONCLUSION GENERALE

---

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.

Après avoir examiné les concepts fondamentaux et les informations d'ordre générales sur les isolateurs et le phénomène de pollution ainsi que l'influence du milieu extérieur sur la vie des isolateurs, nous avons mené une recherche bibliographique qui nous a permis d'explorer les principaux modèles statiques et dynamiques, ainsi que de citer certains mécanismes et critères de propagation de la décharge sous tensions continue, alternative.

La plupart des modèles traitent le problème de manière statique et reposent sur un modèle proposé par Obenaus. Ils traitent le phénomène de contournement sous un aspect global en lui associant des critères d'extension se basant soit sur le champ électrique, soit sur l'énergie ou encore la puissance dissipée. Les principaux critères de propagation rencontrés dans la littérature ont été établis sur la base de conditions faisant intervenir soit l'impédance vue des électrodes, soit le courant, soit le champ électrique, soit la puissance ou encore l'énergie fournie par la source.

Dans un travail d'expérimentation réalisé au laboratoire Haute tension de l'université de Bejaia, beaucoup d'essais sous différentes conditions de pollution ont été réalisés. Il résulte de cette étude que la rigidité diélectrique de l'isolateur est plus faible en tension continue, la répartition de la pollution a donné une rigidité diélectrique plus faible que celle obtenue en pollution non uniforme

La tension de contournement diminue de manière non linéaire. Pour des conductivités relativement élevées, la tension de contournement est légèrement affectée par l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution, pour les différentes conductivités utilisées.

La partie réservée à la simulation avait pour but principal l'étude de la distribution de tension le long de l'isolateur silicone sous des conditions de pollution. Nous nous sommes intéressés essentiellement à l'influence de la formation de la bande sèche. Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation de la conductivité de la couche polluée favorise la distribution non-uniforme de la tension le long de la surface de l'isolateur en silicone. De plus nous avons pu développer un circuit équivalent pour l'isolateur sous conditions de pollution. Ses paramètres ont été identifiés en se basant sur l'approche élément finis. Par ailleurs un modèle de la bande sèche basé sur le modèle de neumarker est introduit dans le circuit conduisant ainsi à la prise en considération du caractère non linéaire de la résistance de bande sèche. 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. D'autre part la représentation en tridimensionnels des isolateurs est un autre point que nous recommandons pour prendre d'autres facteurs en considération afin de contourner tous les problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques haute tension lié à cet équipement fondamental.

# Annexe A

Cas sans formation de la bande sèche.

```
fem.sdim = {'r','z'};
% identification de la géométrie du problème
fem.geom=geomcsg(fem);
% conditions limites
bnd.V0 = {0, 0, 0, 40000, 0};
bnd.type = {'ax','cont','n0','V','V0'};
% coefficients EDP
equ.sigma = {1, 1e-14, 1e-12};
equ.epsilonr = {1, 4.6, 12.1};
% constants
fem.const={...
    'Ls' = 0.889,
    'n' = 0.6};
% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);
% Extend mesh
fem.xmesh=meshextend(fem);
% Solve problem
fem.sol=femstatic(fem, ...
% Plot solution
postplot(fem, ...
    'contdata',{'V','cont','internal','unit','V'}, ...
    'contlevels',20, ...
    'contlabel','off', ...
    'contmap','cool(1024)', ...
    'title','Isovaleur: Potentiel électrique [V]', ...
I1=postint(fem,'V',... 'dl', 35, ... 'edim',1); postint(fem,'V',... 'dl', 10, 'edim',1); postint(fem,'V', ... 'dl', 31...
'edim',1);postint(fem,'V', ... 'dl', 8,...'edim',1);postint(fem,'V', ... 'dl', 27, ...'edim',1);Postint(fem,'V', ... 'dl', 6,
...'edim',1);postint(fem,'V', .. 'dl', 21, ..'edim',1);postint(fem,'V', ... 'dl', 4,... 'edim',1);
% Integration des subdomains
I2=postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
    'dl',[12]);
```

```

    postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
        'dl',[6]);
    postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
        'dl',[11]);
    postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
        'dl',[5]);
    postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
        'dl',[10]);
    postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
        'dl',[4]);
    postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
        'dl',[9]);
    postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
        'dl',[3]);
    Wes=    postint(fem,'(We)*2*pi*r*.....
        ...'edim', 2, .....
        'dl',[28]);
    I3=postint(fem,'2*pi*r*(normJ_emqv2)', ...
        'dl',[32]);
        postint(fem,'2*pi*r*(normJ_emqv2)', ...
            'dl',[30,31]);
        postint(fem,'2*pi*r*(normJ_emqv2)', ...
            'dl',[29]);
        postint(fem,'2*pi*r*(normJ_emqv2)', ...
            'dl',[28]);
    n=fem.const{8};
    Ls=fem.const{6};
    Rsp=1/(0.000105);
    Va=max(fem.sol.u)-min(fem.sol.u);
    gs=1/n;
    Ll=[0.022; 0.0221; 0.0223; 0.0225];
    for j=1:4
        We(j)=I2(j);
        Vs(j)=I1(j);
        Cs(j)=2*We(j)/[Vs(j)*Vs(j)];
        Cpol=2*Wes/(Va^2);
        Rpol=Va/(I3-100*pi*Va*Cpol);
    end

```

$R_s = L_l * (R_{pol} / L_s);$

$C_{pol1} = L_l * (1 / (C_{pol} * L_s));$

end

Cs

Rs

## Annexe B

Cas avec formation de la bande sèche.

```
fem.sdim = {'r','z'};
```

```
% identification de la géométrie du problème
```

```
fem.geom=geomcsg(fem);
```

```
% conditions limites
```

```
bnd.V0 = {0, 0, 0, 40000, 0};
```

```
bnd.type = {'ax','cont','n0','V','V0'};
```

```
% coefficients EDP
```

```
equ.sigma = {0.000105,1,0.02,1e20,'((45*0.01)^1.11)/((V+1)^2.8)',1e-14};
```

```
equ.epsilonr = {1000,1,3.9,1,1,4.6};
```

```
% constants
```

```
fem.const={...
```

```
    'Ls' = 0.889,
```

```
    'X',  Bs,...
```

```
    'A',  70,...
```

```
    'n',  0.6};
```

```
% Multiphysics
```

```
fem=multiphysics(fem);
```

```
% Extend mesh
```

```
fem.xmesh=meshextend(fem);
```

```
% Solve problem
```

```
fem.sol=femstatic(fem, ...
```

```
% Plot solution
```

```
postplot(fem, ...
```

```
    'contdata',{'V','cont','internal','unit','V'}, ...
```

```
    'contlevels',20, ...
```

```
    'contlabel','off', ...
```

```
    'contmap','cool(1024)', ...
```

```
    'title','Isovaleur: Potentiel électrique [V]', ...
```

```
I1=postint(fem,'V',... 'dl', 35, ... 'edim',1); postint(fem,'V',... 'dl', 10, 'edim',1); postint(fem,'V', ... 'dl', 31...
```

```
'edim',1);postint(fem,'V', ... 'dl', 8,...'edim',1);postint(fem,'V', ... 'dl', 27, ...'edim',1);Postint(fem,'V', ... 'dl', 6,
```

```
...'edim',1);postint(fem,'V', .. 'dl', 21, ..'edim',1);postint(fem,'V', ... 'dl', 4,... 'edim',1);
```

```
% Integration des subdomains
```

```

I2=postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
    'dl',[12]);
postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
    'dl',[6]);
postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
    'dl',[11]);
postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
    'dl',[5]);
postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
    'dl',[10]);
postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
    'dl',[4]);
postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
    'dl',[9]);
postint(fem,'2*pi*r*(We_emqv)', ...
    'dl',[3]);
Wes= postint(fem,'(We)*2*pi*r*.....
    ...'edim', 2, .....
    'dl',[28]);
I3=postint(fem,'2*pi*r*(normJ_emqv2)', ...
    'dl',[32]);
postint(fem,'2*pi*r*(normJ_emqv2)', ...
    'dl',[30,31]);
postint(fem,'2*pi*r*(normJ_emqv2)', ...
    'dl',[29]);
postint(fem,'2*pi*r*(normJ_emqv2)', ...
    'dl',[28]);
I4=postint(fem,'Vz','edim', 1,'dl',[31],'intorder',4) ;

    'Ls' = 0.889,
    'X', Bs,...
    'A', 70,...
    'n', 0.6};
Rsp=1/(0.000105);
Va=max(fem.sol.u)-min(fem.sol.u);
gs=1/n;
Ll=[0.022; 0.0221; 0.0223; 0.0225];
for j=1:4

```

```
We(j)=I2(j);  
Vs(j)=I1(j);  
Cs(j)=2*We(j)/[Vs(j)*Vs(j)];  
Cpol=2*Wes/(Va^2);  
Rbs=((I4)^m)*((A*X)^gs);  
Rpol=Va/(13-100*pi*Va*Cpol);  
Rs=Ll*(Rpol/Ls);  
Cpol1=Ll*(1/(Cpol*Ls));  
end  
Cs  
Rs
```

## *Références Bibliographiques*

---

---

- [1] J.Y. Saison, «Etude du phénomène d'humidification des dépôts naturels et artificiels de pollution sur des isolateurs électriques », Thèse de Doctorat Es Sciences, Université de Strasbourg, France, 1992.
- [2] G. 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 2007.
- [3] S. Tounsi, F. Chikh "Influence du Sol sur le Comportement d'un Modèle d'Isolateur sous Tension" Mémoire du projet de fin d'études laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger. Juin 2008
- [4] D.Dumora, "Matériaux isolants cramiques en électrotechnique", Techniques de l'ingénieur D275-1975.
- [5] M. Slama « contribution a l'étude de l'influence de la non uniformité de la pollution basée sur la méthode de la D.D.S.E pour le dimensionnement des isolateurs des lignes THT a courant alternatif » .mémoire de magister ; promotion 2002, université Mohamed Boudiaf, Oran.
- [6] R. Coello, B. Aladenize : "Les diélectriques", livre, Edition Hermès, Paris.1986
- [7] [http://www.hydroquebec.com/terminologie/chroniques/chro\\_isolateur.html](http://www.hydroquebec.com/terminologie/chroniques/chro_isolateur.html).
- [8] R. Bouzeroura « Etude du développement d'arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue », Mémoire de magister, promotion 2009, Université de Bejaia
- [9] Y. Porcheron, « Lignes aériennes : Matériels entrant dans la constitution d'une ligne aérienne », Technique de l'ingénieur D4425.
- [10] B. Hammoum, A. Kerbouche "Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien" Mémoire du projet de fin d'études laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger. Juin 2007
- [11] X. Ducouret " lignes aériennes : matériels" techniques de l'ingénieur D4423
- [12] A. Bouarouri R. Ladjal "Comportement et Caractérisation Electriques d'un Modèle

- 
- d'Isolateur sous Tension Alternative" Mémoire du projet de fin d'études laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger. Juin 2006
- [13] N. Khairoun, E. Abderrahmane, D. Zellouta "Essais sur isolateurs pollues et modélisation" Mémoire du projet de fin d'études laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger. Juin 2007/2008
- [14] A. S. Bouhadjar, M. Amokrane Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur par technique d'ondelettes et modélisation Mémoire du projet de fin d'études laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger. Juin 2008
- [15] Z. Sahli," Etude de la Non Uniformité de la Pollution sur les Caractéristiques de Contournement des isolateurs Réels sous Tension Continue', Thèse de Magister, Département d'électrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Bédjaia.
- [16] L. L.Alston, S. Zoledziowski, « Growth of discharges on polluted insulators », IEEE, Trans. PAS, Vol. 110, N°. 7, pp. 1260–1266, Juillet 1963.
- [17] M. Ben alia « modélisation d'un isolateur naturellement pollue sous tension impulsionnelle utilisant des circuits électriques Equivalents » mémoire de magister en génie électrique 2008, laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger.
- [18] H. Streubel, « The influence of non-uniform contamination on the flashover voltage of insulators » 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46-10, Athens, Greece, 5-9 September 1983.
- [19] 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.
- [20] A. Mekhaldi, « Etude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz », Thèses de Doctorat, ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Septembre 1999
- [21] "Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés a courant alternatif ", norme internationale CEI507, Deuxième édition ,1991
- [22] A. Camidor, M. Cojan, P. Hautefeuille, M. Morceau "Méthodes de dimensionnement des isolateurs de lignes aériennes en régions polluées " CIGRE, Rapport 33-04,1978
- [23] P. J. Lambeth, H. Auxel et M. P. Verma, « Méthode de mesure de la sévérité de la
-

- 
- pollution compte tenu de son influence sur le comportement des isolateurs à haute tension », *Electra* N°. 20, pp 95-100, Janvier 1972.
- [24] W. Heise , G.F , luxa , G.Revrery , M. P. Verma, " Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide " CIGRE , rapport 33-09 1972.
- [25] 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.
- [26] A. Cimador, S. Vitet, " La Pollution des Isolateurs" , EDF-Epure, No . 27, Juillet 1990.
- [27] Y. Guehrrar "Elaboration d'un Modèle Dynamique de Contournement d'un Isolateur Pollué sous Tensions Alternative et Impulsionnelle " Mémoire de Magister laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger. Juin 2007/2008
- [28] F. Obenaus, "*Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge*", *Deutsche Elektrotechnik*, Vol. 4, pp. 135 - 136, 1958.
- [29] R.Sundararajan, R.S.Gorur, " Role of Non Soluble Contaminants on the Flashover Voltage of Porcelain Insulators", *IEEE Trans. On Dielect. & Elec.Insul.* Vol.3, No2, April 1997.
- [30] N. Dhahbi, "Modélisation Dynamique des Décharges sur les Surfaces d'Isolateurs Pollués sous Différentes Formes de Tensions: Elaboration d'un Critère Analytique de Propagation", Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, France, 1998.
- [31] G. Neumärker , "*Verschmutzungs Zustand und Kriechweg*", *Monatsber. d. Deut. Akad, Wiss.*, Berlin, Vol. 1, pp.352 - 359, 1959.
- [32] X. Chen, "Modeling of Electrical Arc on Polluted Ice Surfaces", Thèse Ph. D, Ecole Polytechnique de Montréal, février 2000.
- [33] S. DIAMPENI KIMBAKALA « modélisation dynamique des décharges se propageant sur des surfaces isolantes polluées avec des pots discontinus sous différentes formes de tension » Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, France, 2007.
- [34] F. Rizk, "*Mayhemical Modeles for Pollution Reignition*", *Electra*, Vol. 78, pp. 71 - 103, 1981.
- [35] L. L.Alston, S. Zoledziowski, « Growth of discharges on polluted insulators », *IEEE, Trans. PAS*, Vol. 110, N°. 7, pp. 1260–1266, Juillet 1963.
-

- 
- [36] H. Matsuo, T. Fujishima and K. Hatase " Relation between leakage impedance and equivalent salt deposit density on an insulator under a saltwater spray" IEEE Trqns. On Elect., Vol. 6, nr. 1, pp 117-121, February 1999.
- [37] J. Danis, "*A Stochastic Pollution Flashover Model*", 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 - 12, Septembre 5 - 9, 1983, Athènes, Grèce.
- [38] M. Tegar, "*Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Électriques sur des Isolateurs Installés en Régions Polluées*", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Juillet 1993.
- [39] P. Claverie and Y. Porcheron, "*How to Choose Insulators for polluted Areas*", IEEE Trans. PAS, Vol. 92, N° 3, pp. 1121 - 1131, 1973.
- [40] P. Claverie, "*Predetermination of the Behaviour of Polluted Insulators*", IEEE Trans. PAS, Vol. 90, N° 4, pp. 1902 - 1908, Juillet 1971.
- [41] M.Tegar. "*Modélisations d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro-géométriques*", Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Avril 2003
- [42] CEI 60 - 1, "Techniques des Essais à Haute Tension", Définitions et Prescriptions Générales Relatives aux Essais, Deuxième Edition, 1989.
- [43] N. Dhahbi - Megriche, A. Beroual and L. Krahenbuhl, "*A New Proposal Model for Polluted Insulators Flashover*", Journal of Physics D: Applied Physics, (30), N° 5, pp. 889 - 894, March 1997.
- [44] B. F. Hampton, "Flashover Mechanism of Polluted Insulation", Proc. IEE, Vol. 111, nr .5, pp. 985-990, May 1964.
- [45] N. Dhahbi - Megriche, Beroual, "Flashover Dynamic Model of Polluted Insulators Under AC Voltage", IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul. Vol. 7, N° 2, pp. 283 - 289, April 2000.
- [46] CEI60 2
- [47] S. Tarek, A. Benbicha « modélisation de quelques composantes électromagnétiques par la
-

- 
- méthode des éléments finis» mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique université F.ABBAS.SETIF.
- [48] G. Dhatt, G Touzout «une présentation de la méthode des élément finis» Maloine s.a éditeur Paris 1984.
- [49] F .Tighilt « Contribution à l'étude de la distribution de tension dans les parafoudres ZnO» mémoire de magister en électrotechnique2008 université F.ABBAS.SETIF.
- [50] A. Haddad. « Attenuation and limitation of transient overvoltages on transmission systems» School of electrical, Electronic and System Engineering, University of Wales Cardiff, UK, PhD December 1990.
- [51] R. 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

**ملخص:** يعرض هذا العمل دراسة ظاهرة تلوث عوازل شبكة التوتر العالي و لهذا الغرض أجرينا سلسلة من التجارب على العوازل المطاطية بمختبر التوتر العالي بجامعة عبد الرحمن ميرة ببجاية وتضمنت هذه السلسلة قياس توتر الإحاطة وانتشار القوس الكهربائي و باستعمال برنامج العناصر المنتهية (FEMLAB 3.4) تطرقنا إلى توزيع التوتر وتحديد الحقل الكهربائي على سطح العازل المخبري في حالتين الأولى العازل نظيف والثانية العازل ملوث وذلك باستعمال عدة قيم للناقلية. النتائج المحصل عليها في برنامج العناصر المنتهية سمحت لنا بالتعرف على مكونات الشبكة الكهربائية المماثلة للعوازل المطاطية وفي الأخير قمنا بإدخال الشبكة الكهربائية الخاصة بالعوازل في البرنامج الخاص بالظواهر العابرة (EMTP) والنتائج المحصل عليها من خلال (EMTP) سمحت لنا بدراسة سلوك العوازل المطاطية في المناطق الملوثة.

كلمات مفتاحية : العوازل المطاطية، التلوث، توتر الإحاطة، ناقلية، المحاكات، FEM، COMSOL Multiphysics، ATP-EMTP، قياسات، فطيات عالية.

Résumé : Dans ce travail, nous nous proposons d'étudier le phénomène de pollution des isolateurs haute tension à isolation synthétique. Pour cela, nous avons effectué une série d'essais sur un isolateur en silicone au laboratoire haute tension de l'université de Béjaia. Les essais concernent la tension de contournement et le développement de l'arc électrique à la surface de l'isolateur en absence et en présence de la couche de pollution qu'elle soit uniforme ou non et cela pour différentes conductivités. En utilisant la méthode numérique des éléments finis, le modèle géométrique de l'isolateur a été implanté dans le logiciel COMSOL Multiphysics 3.4 et la distribution du potentiel et du champ électrique le long de cet isolateur est obtenus en tenant compte de la pollution.

Ainsi un circuit équivalent formé de capacité et de résistance, qui tient compte des propriétés de l'isolateur a été dérivé et ses paramètres identifiés. Sous les conditions de pollution humide, les couches déposées sur l'enveloppe de l'isolateur deviendront conductrices et auront comme conséquence une redistribution de la tension. Le circuit équivalent a été implanté dans l'ATP/EMTP et des résultats satisfaisants ont été obtenus.

Les résultats obtenus par les mesures et la simulation nous ont permis de contribuer à l'étude du comportement de l'isolateur dans les zones polluées.

Mots Clés : isolateur synthétique, pollution, contournement, conductivité, simulation, ATP-EMTP, MEF, COMSOL Multiphysics , mesures, haute tension

Abstract: In this work, we intend to study the phenomenon of HV polymeric insulators pollution. For this, we did a set of tests on a silicone insulator, in High voltage Laboratory of Bejaia university. The tests concern the flashover voltage and the development of the electric arc on the surface of the insulator in absence and in presence of a layer of pollution. For different conductivities, The pollution layer could be uniform. Using the numeric finite element method, the geometric model of the insulator has been implanted in COMSOL Multiphysics 3.4 software. The potential distribution and the electric Field along this insulator is obtained with and without pollution.

From this stage an (R-C) equivalent network, that take into account the properties of the insulator has been derived and its parameters identified. Under the conditions of humid pollution, the layers deposited on the envelope of the insulator will become drivers and will have like consequence a voltage redistribution.

The equivalent network has been implanted in the ATP/EMTP and satisfactory results have been obtained.

The obtained results by the measurements and the simulation allowed us to contribute to the study of the insulator behavior in the polluted zones.

Key Words: polymeric insulator, pollution, flashover, conductivity, simulation, ATP-EMTP, FEM, COMSOL Multiphysics, measurement, High Voltage.