

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^{lle} SATTI Samia

Thème

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA POLLUTION DISCONTINUE SUR LE COMPORTEMENT DES ISOLATEURS : EXPERIMENTATION ET SIMULATION

Soutenu le devant la Commission d'examen composée de :

Dr Ahmed GHERBI	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 Tarek BOUKTIR	Prof. à l'Université Ferhat ABBAS de Sétif	Examineur
Dr Saâd BELKHIAT	M. C. A. à l'Université Ferhat ABBAS de Sétif	Examineur
Dr Rabah BOUDISSA	M. C. A. à l'Université A. MIRA de Bejaia	Examineur

Dédicaces

*A mes Inestimables Parents qui ont Tout Sacrifié pour que je puisse Réussir
Avec Toute mon Affection et toute ma Reconnaissance*

A mon frère RABEH qui m'a toujours encouragé

A toute la Famille

*A tout les Petits Anges de la Famille, Ranime Hadyat Elmarwla,
Alya, Oussama, Watoud Hamset Errouh*

A ma chère Amie Fatiha

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

Que je dédie ce travail

« Samia SATTA »

Remerciements

*Mes remerciements vont tout premièrement, à **DIEU** le tout puissant de m'avoir donné le courage, la patience et la force pour réaliser ce 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 et respectueuse 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'ont honoré en acceptant d'examiner ce travail.

*Je remercie M^{elle} **F. AOUBED** 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 : CONCEPT FONDAMENTAUX SUR LES ISOLATEURS

1.1 Introduction	1.1
1.2 Définitions relatives aux matériaux diélectriques	1.1
1.2.1 Rigidité diélectrique	1.1
1.2.2 Permittivité	1.1
1.2. Diélectrique :.....	1.2
1.2.4 Isolant	1.2
1.2.5 Isoler	1.2
1.2.6 Isolation.....	1.2
1.2.7 Isolement	1.2
1.2.8 Système d'isolation.....	1.3
1.2.9 Décharge disruptive.....	1.3
1.2.10 L'arc électrique.....	1.4
1.2.11 Types d'arcs.....	1.4
1.3 Les isolateurs	1.5
1.3.1 Isolateur	1.5
1.3.2 Fonctionnement et constitution d'un isolateur.....	1.5
1.3.3 Différents types d'isolateurs	1.5
1.3.4 Différents profils des isolateurs	1.7
1.3.5 Choix des isolateurs.....	1.8
1.4 Pollution des isolateurs	1.8
1.4.1 Quelques définitions concernant les isolateurs	1.9
1.4.2 Formation et répartition de la couche de pollution	1.11
1.4.3 Sources de pollution.....	1.12
1.4.4 Influence des facteurs climatiques sur des dépôts polluants	1.13
1.4.5 Le comportement des isolateurs sous pollution.....	1.14
1.4.6 Conséquences de la pollution	1.14

1.5 Conclusion	1.15
----------------------	------

CHAPITRE 2 : MODELISATION DU CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS: REVUES BIBLIOGRAPHIQUES

2.1 Introduction	2.1
2.2 Modèles de contournement.....	2.1
2.2.1 Modèle d'Obenaus.....	2.1
2.2.2 Modèle d'Alston et Zoledziowski.....	2.3
2.2.3 Modèle de Danis.....	2.4
2.2.4 Modèle de Nacke et Wilkins.....	2.6
2.2.5 Modèle de Tegar (pollution discontinue).....	2.7
2.2.6 Modèle de Dhahbi et Beroual.....	2.9
2.2.7 Modèle de Dhahbi, Beroual et Krahenbul.....	2.9
2.3 Conclusion.....	2.11

CHAPITRE 3 : Influence de la pollution sur le comportement des isolateurs

3.1 Introduction	3.1
3.2 Dispositif expérimental.....	3.1
3.2.1 Circuit d'alimentation.....	3.3
3.2.2 Circuit de mesure.....	3.3
3.3 Objet d'essai.....	3.4
3.4 Mode opératoire.....	3.5
3.4.1 Préparation des plaques.....	3.5
3.4.2 Préparation de l'isolateur réel :.....	3.5
3.4.3 Préparation de la solution polluante.....	3.5
3.5 Procédé d'essais	3.6
3.5.1 Choix des conductivités:.....	3.6
3.5.2 Techniques d'application de la pollution :.....	3.6
3.5.3 Visualisation de la décharge	3.7
3.5.4 Correction des résultats en fonction des paramètres physiques de l'air ..	3.7

3.6 Observation.....	3.8
3.7 Etude de la tension de contournement d'un isolateur	3.9
3.7.1 Plaque en verre	3.9
3.7.2 Isolateur réel en porcelaine	3.21
3.8 Conclusion	3.29

CHAPITRE 4 : DISTRIBUTION DE LA TENSION ET DU CHAMP ELECTRIQUE LE LONG DE L'ISOLATEUR SOUS CONDITION DE POLLUTION

4.1 Introduction.....	4.1
4.2 Description du logiciel.....	4.1
4.3 Etapes de la méthode des éléments finis	4.2
4.4 Géométrie et caractéristique dimensionnelle de l'isolateur.....	4.3
4.5 Identification des domaines dans le logiciel FEMLAB	4.3
4.6 Conditions aux limites.....	4.4
4.7 Visualisation des résultats et analyse	4.5
.....	
4.7.1 Cas d'une seule ailette.....	4.6
4.7.2 Cas de deux ailettes	4.7
4.7.3 Cas de quatre ailettes	4.8
4.7.4 Études de la distribution de tension dans les conditions polluée	4.9
4.8 Conclusion	4.16

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Liste des figures

Fig. 2.1 Arc électrique à la surface d'un isolateur

Fig. 2.2 Isolateur rigide

Fig. 3.1 Circuit électrique équivalent d'après Obenaus

Fig. 3.2 Modèle cylindrique

Fig. 3.3 Modèle de Danis

Fig. 3.4 Représentation schématique de la surface d'un isolateur

Fig. 3.5 Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire

Fig. 3.6 Circuit électrique équivalent de la propagation de l'arc

Fig. 3.7 Modèle d'un isolateur pollué et circuit équivalent correspondant

Fig. 4.1 Schéma électrique de mesure et de visualisation

Fig. 4.2 Equipements de mesure du laboratoire

Fig. 4.3 Plaque en verre

Fig. 3.4 Isolateur support en porcelaine

Fig. 4.5 Facteurs de correction

Fig. 4.6 Plaques d'essai

Fig. 4.7 La tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle (répartition uniforme)

Fig. 4.8 Contournement de deux surfaces isolantes séries (pollution uniforme)

Fig. 4.9 Plaques d'essai

Fig. 4.10 Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités

Fig. 4.11 Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités

Fig. 4.12 tension de contournement en fonction du rapport des conductivités

Fig. 4.13 Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités

Fig. 4.14 Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle

Fig. 4.15 Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle

Fig. 4.16 Contournement de surfaces isolantes séries polluées différemment

Fig. 4.17 Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle (pollution uniforme)

- Fig. 4.18** Contournement de l'isolateur (pollution uniforme)
- Fig. 4.19** Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités (Répartition non uniforme 12% - 12%)
- Fig. 4.20** Contournement de l'isolateur (répartition non uniforme 12% - 12%)
- Fig. 4.21** Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités (répartition non-uniforme 50% -50%)
- Fig. 4.22** Contournement de l'isolateur (répartition non uniforme 50% 50%)
- Fig. 4.23** Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités (Répartition non-uniforme 33% - 67%)
- Fig. 4.24** Contournement de l'isolateur (répartition non uniforme 33% - 67%)
- Fig. 4.25** Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle (répartition transversale)
- Fig. 4.26** Contournement de l'isolateur (répartition transversale)
- Fig. 5.1** Diagramme de différentes étapes du travail dans FEMLAB
- Fig. 5.2** Objets d'essai
- Fig. 5.3** Les conditions aux limites utilisées
- Fig. 5.4** Lignes équipotentiellles (pollution uniforme)
- Fig. 5.5** Distribution de la tension pour différentes valeurs de σ
- Fig. 5.6** Distribution du champ électrique pour différentes valeurs de σ
- Fig. 5.7** Lignes équipotentiellles (Pollution longitudinale inverse)
- Fig. 5.8** Lignes équipotentiellles (Pollution longitudinale inverse (cas non-uniforme))
- Fig. 5.9** Distribution de la tension pour différentes valeurs de σ (non uniforme)
- Fig. 5.10** Distribution du champ pour différentes valeurs de σ (non uniforme)
- Fig. 5.11** Lignes équipotentiellles (pollution transversale en inverse)
- Fig. 5.12** Distribution du champ pour différentes valeurs de σ (répartition transversale)
- Fig. 5.13** Distribution du champ pour différentes valeurs de σ (répartition transversale)
- Fig. 5.14** Conditions aux limites de l'isolateur
- Fig. 5.15** Maillage obtenu pour l'isolateur complet
- Fig. 5.16** Présentation des lignes équipotentielle
- Fig. 5.17** Distribution de la tension pour une conductivité ($\sigma = 1,5\mu\text{S}$)
- Fig. 5.18** Distribution de la tension pour les différentes valeurs de σ (uniforme)

Fig. 5.19 Distribution du champ électrique pour les différentes valeurs de σ (uniforme)

Fig. 5.20 Distribution de la tension pour les différentes valeurs de σ (uniforme)

Fig. 5.21 Distribution du champ électrique pour les différentes valeurs de σ (uniforme)

Fig. 5.22 Pollution non-uniforme (σ_1 fixe au-dessus de l'ailette et σ_2 variable en dessous de l'ailette)

Fig. 5.23 Pollution non-uniforme (σ_1 fixe pour les deux ailettes supérieures et σ_2 variable pour les deux ailettes inférieures)

Fig. 5.24 Pollution non-uniforme (σ_1 fixe pour l'ailette supérieure et σ_2 variable pour les trois ailettes inférieures)

Fig. 5.25 Distribution de la tension pour les différentes valeurs de σ (non uniforme)

Fig. 5.26 Distribution du champ électrique pour les différentes valeurs de σ (non uniforme)

Liste des tableaux

Tableau 4.1 Caractéristiques du verre

Tableau 4.2 Caractéristiques de la porcelaine

Tableau 4.3 Caractéristiques du kaolin

Tableau 4.4 Mesures obtenues

Tableau 4.4 Tableau des mesures obtenues

Tableau 5.1 Valeurs de ε_r et σ des différents domaines (cas des plaques en verre)

Tableau 5.2 Valeurs de ε_r et σ des différents domaines (cas de l'isolateur en porcelaine)

Listes des Symboles

Symboles	Signification
R	Répartition
L	Longitudinale
T	Transversale
P	Périodique
FP	Fortement Polluée
fP	faiblement Polluée
AS	Ailette Supérieure
AI	Ailette Inférieure
V_{moy}	Tension moyenne de contournement
V_c	Tension moyenne corrigée de contournement
D	Distance inter-électrodes
d	Largeur polluée
L_1	Largeur fortement polluée
L_2	Largeur faiblement polluée
l	Largeur totale
ϵ_r	Permittivité relative
σ_1	Conductivité de la couche faiblement polluée
σ_2	Conductivité de la couche fortement polluée

Chapitre 01

INTRODUCTION GENERALE

L'isolateur est un élément destiné à relier mécaniquement les conducteurs sous tension aux structures qui les supportent et assurer l'isolement électrique entre eux. Il comporte deux parties ; une partie isolante en verre ou en porcelaine ou encore en matière composite (silicone, EPDM) et des pièces métalliques ou en fibre de verre qui servent de liaison scellée sur le diélectrique.

Les principaux types d'isolateurs sont les isolateurs rigides et les isolateurs de suspension. Les premiers sont généralement reliés au support par une ferrure fixe et sont souvent utilisés dans les lignes de distribution. Quant aux isolateurs de suspension, les plus utilisés sont les isolateurs à capot et tige.

L'isolateur doit présenter de bonnes qualités mécaniques et électriques de façon à remplir son rôle pendant toute sa durée de vie.

Une quantité importante de travaux tant théoriques qu'expérimentaux a été consacrée à l'étude du contournement des isolateurs sans pour autant aboutir à l'élaboration d'un modèle pouvant tenir compte des paramètres réels caractéristiques du phénomène de pollution. Il s'agit en particulier de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes (continue ou discontinue) et de leur résistivité, des échanges thermiques, de la non-uniformité du mouillage et de l'intensité des arcs au voisinage de la surface de l'isolateur, de la formation d'arcs multiples. Aussi, la détermination de la tension de contournement d'un isolateur pollué est entachée d'une dispersion marquée, même lorsque les conditions sont en apparence contrôlées.

Afin de contourner la difficulté liée à la configuration souvent complexe de l'isolateur, des modèles simples de laboratoire ont été adoptée par un certain nombre de chercheurs. Certains modèles reflètent assez bien le comportement de l'isolateur.

Après une introduction au problème posé ainsi que quelques généralités relatives au thème, nous allons exposer à travers une recherche bibliographique quelques modèles développés dans ce domaine dans le chapitre 3. Le chapitre 4 décrira 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 ont été réalisés

dans le but de mettre en œuvre toutes les contraintes soit physiques (température, humidité...) ou techniques (puissance du générateur, matériels disponibles).

Nous présenterons les résultats obtenus des tests qui ont servi à déterminer la tension de contournement, l'effet de la couche polluante sur des plaques isolantes en verre et sur l'isolateur réel en porcelaine avec 4 ailettes.

Ainsi, la première partie est dédiée aux résultats et leur analyse concernant deux plaques en verre en série propres puis polluées avec différentes valeurs de la conductivité superficielle σ .

Quand à la deuxième, elle est réservée à la présentation des résultats et de leur analyse lorsqu'il s'agit d'un isolateur réel propre ou pollué avec différentes valeurs de σ .

Le chapitre 5 est réservé à une étude de simulation par éléments finis. L'objectif principal de cette simulation est de calculer la distribution du potentiel et du Champ électrique dans un isolateur réel en porcelaine avec 4 ailettes. Comme il était très difficile de mesurer de façon précise la distribution du potentiel, 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 pollués.

L'utilisation de logiciel basé sur la méthode des éléments finis. Leur application couvre généralement un domaine plus vaste que le problème étudié et dans certains cas, ils ne répondent pas tous aux exigences spécifiques du problème. La résolution du problème (définition des conditions initiales et conditions aux limites, maillage automatique et enfin, la visualisation des résultats (affichage des résultats sous forme de courbes, d'équipotentiels, de vecteurs, etc...)). Cette dernière solution a ainsi été retenue pour réaliser les différentes simulations dans ce partie du travail.

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

Chapitre 02

CONCEPTS FONDAMENTAUX SUR LES ISOLATEURS

2.1. Introduction

L'isolateur est un élément destiné à relier mécaniquement les conducteurs sous tension aux structures qui les supportent et assurer l'isolement électrique entre eux. Il comporte deux parties ; une partie isolante en verre ou en porcelaine ou encore en matière composite (silicone, EPDM) et une deuxième partie formée des pièces métalliques ou en fibre de verre qui servent de liaison scellée sur le diélectrique.

Les principaux types d'isolateurs sont les isolateurs rigides et les isolateurs de suspension. Les premiers sont généralement reliés au support par une ferrure fixe et sont souvent utilisés dans les lignes de distribution. Quant aux isolateurs de suspension, les plus utilisés sont les isolateurs à capot et tige, L'isolateur doit présenter de bonnes qualités mécaniques et électriques de façon à remplir son rôle pendant toute la durée de vie d'une ligne.

2.2. Définitions relatives aux matériaux diélectriques

2.2.1. Rigidité diélectrique

Avec l'apparition du courant électrique et pour satisfaire aux demandes pratiques sans cesse croissantes, il fallut étudier les propriétés de ces matériaux avec plus de précision, déterminer et caractériser leur réponse à un champ appliqué [1]. Les propriétés isolantes d'un matériau donné peuvent être décrites par sa rigidité diélectrique; c'est à dire à la valeur du champ appliqué qui donne naissance à un courant incontrôlable à travers le matériau.

2.2.2. Permittivité

Dès les premiers temps de l'électrostatique, on savait que les matériaux diélectriques permettaient d'augmenter la capacité de charge d'un condensateur [1]. Comme la rigidité diélectrique, le paramètre constante diélectrique ou permittivité fut défini pour caractériser cette propriété macroscopique du matériau.

Le but de la théorie des diélectriques est de fournir les renseignements théoriques en

exprimant les propriétés macroscopiques à partir de la structure atomique et moléculaire du matériau.

2.2.3. Diélectrique

Un diélectrique est défini comme un milieu matériel dans lequel les bandes de conduction et de valence sont séparées par une énergie supérieure à 5 eV. Le milieu matériel peut être constitué par un solide, un liquide ou un gaz [2].

2.2.4. Isolant

Un isolant est une substance ou un corps dont la conductivité est nulle, ou en pratique, très faible.

2.2.5. Isoler

L'action d'isoler est le moyen d'empêcher la conduction entre conducteurs électriques soumis à des tensions différentes.

2.2.6. Isolation

L'isolation est l'ensemble des matériaux isolants utilisés pour isoler un dispositif.

2.2.7. Isolement

L'isolement est l'ensemble des qualités acquises par un corps conducteur du fait de son isolation.

2.2.8. Système d'isolation

Un système d'isolation est constitué par des matériaux isolants ou un assemblage de matériaux isolants (isolation) à considérer, en liaison avec les parties conductrices associées.

2.2.9. Décharge disruptive

Le développement de la décharge disruptive (ou perforation diélectrique) à l'intérieur des matériaux isolants solides est lié à un ou à une association des phénomènes suivants :

Décharge intrinsèque ;

Décharge thermique ;

Décharge partielle.

2.2.10. L'arc électrique

Un arc électrique (figure 1.1) est un courant électrique visible dans un milieu isolant (gaz, air, vide ...).

Le courant d'arc est principalement dû aux électrons issus de la cathode et non pas à ceux résultant de l'ionisation de l'isolant [3, 4].

La tension d'arc n'est que de quelques dizaines de Volts.

- La foudre est un arc électrique de grandes dimensions qui permet l'écoulement des charges électriques entre les nuages ou entre les nuages et la terre.
- Les lampes à décharge utilisent les propriétés des arcs électriques pour la production de lumière (éclairage public, projecteurs, etc.).
- La soudure électrique à l'arc produit une grande quantité de chaleur localisée engendrant la fusion des matériaux, ce qui réalise des liaisons résistantes après refroidissement.
- Les fours à arc sont utilisés en métallurgie pour la fusion des métaux.
- La coupure d'un courant, obtenue par séparation de contacts, peut entraîner la production d'un arc électrique plus ou moins important, de la petite étincelle à celle du four à arc électrique. L'extinction d'un arc peut être obtenue par refroidissement ou allongement, comme par exemple dans les disjoncteurs à haute tension, ou par d'autres méthodes.



Fig. 2.1 Arc électrique à la surface d'un isolateur.

2.3. Les isolateurs

2.3.1. Isolateur

L'isolateur est un élément fait en matériau isolant de conductivité volumique très faible et présente une très grande résistivité superficielle au passage du courant [5]. Il est utilisé pour isoler les conducteurs et les pièces sous tension afin d'empêcher les courts-circuits, les pertes de courant de fuite et les charges d'électrocution.

2.3.2. Fonctionnement et constitution d'un isolateur

Les isolateurs sont des éléments indispensables au transport et à la distribution d'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents. Accrochés aux pylônes des lignes aériennes, ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateur d'alignement et d'ancrage), assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF₆) et l'isolation externe (traversées de transformateurs, extrémités de câbles) et constituent également l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres,...). Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes introduites par l'environnement [6].

2.3.3. Différents types d'isolateurs

L'utilisation des diélectriques solides est très répandue dans les lignes aériennes et les postes. On les rencontre sous ces différentes formes suivantes [7] :

2.3.3.1. Isolateurs supports

On appelle isolateurs supports, des pièces isolantes destinées à supporter, en les isolants, des éléments conducteurs autres que les lignes.

2.3.3.2. Isolateurs de traversées

Les isolateurs de traversées sont des pièces isolantes servant à faciliter le passage d'un câble ou d'un conducteur sous tension à travers un obstacle plus ou moins conducteur : mur, paroi, couvercle d'un bac (transformateur).

2.3.3.3. Isolateurs de lignes aériennes

Les conducteurs des lignes aériennes sont fixés aux supports par l'intermédiaire d'isolateurs. Ils sont, dans la majorité des cas, en porcelaine ou en verre.

Les isolateurs doivent présenter deux qualités, l'une est d'ordre électrique et l'autre est d'ordre mécanique, car ils doivent posséder une rigidité diélectrique suffisante pour tenir la tension de service d'un côté et de l'autre côté ils doivent avoir des propriétés mécaniques pour résister aux sollicitations exercées sur eux.

En pratique, on distingue deux types d'isolateurs de lignes aériennes

- **Isolateurs rigides**

Un isolateur rigide est relié au support par une ferrure fixe. Le type d'isolateur rigide utilisé en basse tension comporte une double ou une triple cloche, cela a pour but principal d'allonger la ligne de fuite, le protégeant ainsi contre l'influence du brouillard qui peut être salin sur les surfaces intérieures. Pour les lignes de haute tension, on est obligé de modifier la forme de l'isolateur pour tenir compte des sollicitations électriques et d'allonger la ligne de fuite en évasant d'avantage le corps de l'isolateur, comme il existe un autre type d'isolateur utilisé en haute tension qui est présenté dans la figure 2.2.

- **Isolateurs suspendus (éléments de chaîne)**

Ils sont utilisés pour des tensions très élevées et sont composés de plusieurs éléments. Le principal type d'isolateur suspendu est celui à capot et tige. Le nombre d'isolateurs utilisés dans une chaîne dépend surtout de la tension de service de la ligne.

2.3.4. Différents profils des isolateurs

Dans la pratique on distingue différents types de profils [8]:

a) Profil standard

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



Fig. 2.2 Isolateur rigide [7] a) utilisé en HT b) utilisé en THT

b) Profil brouillard

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

c) Profil ouvert

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

d) Profil sphérique

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

2.3.5. Choix des isolateurs

Les isolateurs sont des éléments essentiels pour la sûreté d'exploitation, la qualité et la continuité de service. Les isolateurs les mieux adaptés 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. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin, ou un événement météorologique exceptionnel peuvent changer

la sévérité de pollution d'un site, ce qui peut provoquer des incidents qui influent directement sur l'isolation, pour cela il faut prévoir une protection pour les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution [8].

2.4. Pollution des isolateurs

Le phénomène de pollution des isolateurs est un sujet d'actualité important ; car il présente un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique [8].

Une couche de pollution se forme sur les surfaces des isolateurs suite à une interaction entre l'air transportant des grains de poussières et ces dernières. Une fois cette couche est humidifiée, la tension de tenue diminue et provoque des incidents graves. Cela est dû à plusieurs facteurs dont les plus importants sont la nature de l'agent polluant, le profil de l'isolateur ainsi que les facteurs climatiques et météorologiques.

La circulation des courants de fuite sur les surfaces des isolateurs provoque un échauffement de la couche polluante conductrice, ce qui entraîne des assèchements locaux de la couche et l'apparition d'arcs partiels. Dans les conditions les plus défavorables, ces arcs peuvent se développer et provoquent ainsi le contournement total des isolateurs et la mise hors tension de l'installation.

2.4.1. Quelques définitions concernant les isolateurs

2.4.1.1. Contournement

C'est une décharge disruptive accompagnée d'étincelles se déplaçant sur l'interface d'un isolateur d'une électrode vers une autre.

2.4.1.2. Ligne de contournement

La ligne de contournement (l_c) est la distance la plus courte dans un gaz entre deux parties conductrices [8].

2.4.1.3. 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. La tension de contournement dépend :

- de la résistivité volumique moyenne de la pollution ;
- de la répartition de la couche de pollution ;
- de la longueur de l'isolateur ;
- du profil de l'isolateur.

2.4.1.4. Tension de tenue

C'est le niveau de tension le plus important, que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive.

2.4.1.5. Ligne de fuite

La ligne de fuite est la distance la plus courte le long de la surface d'un isolant entre deux parties conductrices [8].

2.4.1.6. Courant de fuite

C'est un courant de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur, son intensité devient importante lorsqu'on s'approche de la tension de contournement. Il dépend de plusieurs facteurs tels que la nature de la couche polluante et de la longueur de la ligne de fuite.

NB : Dans les conditions de forte humidité, la dissolution des sels contenus dans la couche polluante, provoque la formation d'une couche électrolytique.

2.4.1.7. 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.

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.

2.4.1.8. Ligne de fuite spécifique (L_s) d'un isolateur

La ligne de fuite d'un isolateur peut être exprimée par :

$$L_s = \frac{L}{\sqrt{3V_e}} \quad (2.1)$$

Avec :

L : Longueur totale de fuite en [mm].

V_e : Tension d'essai en [kV].

2.4.1.9. Facteur de forme d'un isolateur

Le facteur de forme est déterminé par les dimensions de l'isolateur. Pour l'estimation graphique du facteur de forme, on trace la courbe de l'inverse de la circonférence ($1/p$) en fonction de la longueur de la ligne de fuite partielle l , calculée depuis une extrémité de l'isolateur jusqu'au point considéré. Il est donné par l'aire située sous la courbe et calculé suivant la formule (2.2) [8]:

$$F = \int_0^L \frac{dl}{p(l)} \quad (2.2)$$

- l est la longueur partielle de l'isolateur considéré (m) ;
- dl élément de la ligne de fuite ;
- $p(l)$ le périmètre de l'isolateur.

2.4.2. Formation et répartition de la couche de pollution

La formation et la répartition de la couche de pollution sur la surface des isolateurs dépendent du profil des isolateurs, de la hauteur et de la disposition des chaînes d'isolateurs par rapport au sol.

En général, la couche de pollution se concentre sur les éléments de la chaîne d'isolateurs situés du côté du conducteur haute tension et dans les parties les mieux protégées contre les facteurs d'auto nettoyage (vent et pluie forte).

Par conséquent, la répartition de la pollution le long des chaînes d'isolateurs n'est pas uniforme. Cette non-uniformité devient plus accentuée lorsque la longueur des chaînes d'isolateurs augmente.

Il existe une distinction nette entre les couches formées à la surface supérieure et celles formées à la surface inférieure d'un isolateur soumis à la pollution naturelle.

La non-uniformité de la pollution peut être classée en trois catégories [9]:

2.4.2.1. La non-uniformité longitudinale 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" ;

2.4.2.2. La non-uniformité transversale

Ce type est caractérisé par des secteurs ou bandes de différentes conductivités superficielles de la couche polluante. Ces bandes sont réparties transversalement autour de la surface de chaque isolateur de la chaîne. La conductivité dans chaque secteur est la même le long de la ligne de fuite. Ce type de pollution est dû principalement à l'existence d'une direction privilégiée des vents et des pluies.

2.4.2.3. La non-uniformité longitudinale 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.

Ses principales spécifications sont :

- La conductivité de la face inférieure de l'isolateur est plus grande que celle de 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.

2.4.3. Sources de pollution

Le phénomène de pollution résulte de la simultanéité d'un dépôt et d'une humidification de celui-ci. On distingue trois types de pollution atmosphérique qui peuvent être regroupés selon leur origine et classés comme suit [10] :

2.4.3.1. Pollution naturelle

Elle dépend du climat et des facteurs météorologiques d'une région, elle provient de dépôts de poussières tels que, le sable, les débris de plantes et les embruns marins portés par le vent dans les régions côtières. On distingue plusieurs types de pollution selon la nature des dépôts:

2.4.3.2. Pollution marine

Cette pollution est causée par les embruns portés par le vent qui dépose progressivement sur les isolateurs une couche de sel qui recouvre toute sa surface.

L'humidification de cette dernière peut être effectuée soit par les embruns eux-mêmes, soit par un brouillard ou par condensation, qui devient conductrice. Des courants de fuite s'écoulent à la surface, accompagnés d'arcs électrique, court-circuitant ainsi une partie de plus en plus grande de sa surface.

2.4.3.3. Pollution désertique

Ce type de pollution est extrêmement sévère, elle est rencontrée surtout dans les régions assez éloignées de la mer (régions désertiques), due aux tempêtes de sable, qui peuvent affecter des tronçons importants du réseau. L'humidification de cette couche la rend beaucoup plus conductrice et un courant de fuite apparaît, accompagné d'arcs dont la propagation de ces derniers conduit au contournement.

2.4.3.4. Pollution industrielle

Ce genre de pollution se trouve surtout dans des zones à fortes industries, elle provient des fumées évacuées des usines industrielles, des fumées de gaz brûlés sortant des torchères pétrolières, ou qui se produisent au cours des incendies accidentels au voisinage des débouchés de gaz.

Elle peut être aussi d'origine domestique (appareil de chauffage polluant des habitations et des véhicules), ou d'origine agricole (engrais).

2.4.3.5. Pollution mixte

Elle résulte de la combinaison entre la pollution marine et industrielle, c'est la plus fréquente et la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques.

2.4.4. Influence des facteurs climatiques sur des dépôts polluants

Parmi les facteurs climatiques et météorologiques essentiels on distingue [10]:

a) Le vent

Il constitue l'agent qui assure le transport des poussières et des sels marins ainsi que la distribution des dépôts polluants formés sur les surfaces des isolateurs.

D'autre part, il peut être considéré comme un agent d'auto nettoyage dans le cas où sa vitesse est grande.

b) La température

Pour les surfaces polluées, les hautes températures ont une influence positive, car elles sèchent les dépôts et augmentent leur résistivité.

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.

c) L'humidité

Elle agit négativement sur la surface contaminée des isolateurs car elle engendre l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution, surtout pendant les premières heures du matin, notamment pendant les périodes sèches.

d) La pluie

Les fines pluies humidifient les surfaces polluées, donc favorisent l'adhérence de pollution, ce qui augmente le risque de contournement. Cependant, les fortes pluies permettent le nettoyage des surfaces polluées.

e) Le comportement des isolateurs sous pollution

Le comportement des isolateurs sous pollution est un facteur essentiel pour la conception et l'exploitation des lignes et des postes de transformations en zones polluées et quelle que soit la source de pollution, on observe toujours une formation d'une couche électrolytique due à l'humidification d'un dépôt de pollution accumulé progressivement sur la surface des isolateurs. Une pollution limite est atteinte après une certaine période d'exposition, et cela après chaque lavage par la pluie.

Cette pollution limite dépend:

- de l'intensité de pollution atmosphérique ;
- de l'adhérence des agents polluants ;

- de la fréquence de la pluie ;
- de la force du vent.

2.4.5. Conséquences de la pollution

Quel que soit la nature du dépôt de pollution accumulé progressivement sur les surfaces des isolateurs, son humidification provoque la formation d'une couche électrolytique, caractéristique du phénomène de pollution.

Selon les contraintes auxquelles l'isolateur est soumis, trois cas essentiels peuvent se présenter [10]:

a) Arc non localisé

On dit qu'un arc est non localisé, lorsque la surface d'un isolateur est amorcée par un arc et qui s'éteint rapidement pour se réamorcer à un autre endroit. Ce phénomène ne cause pas de dommages pour l'installation, malgré l'apparition de courant de fuite à la surface de l'isolateur.

b) Arc fixe

L'arc se fixe sur la surface de l'isolateur, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en s'y réamorçant au même endroit (courant alternatif). Il peut provoquer une dégradation de l'isolation par son effet thermique.

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.

2.5. Conclusion

La répartition de la couche de pollution sur l'isolateur n'est pas uniforme, cela est dû, d'après les résultats et les observations retenues sur les sites, à plusieurs facteurs naturels et artificiels.

Le phénomène de pollution résulte de diverses origines ; on peut en citer trois ; naturels,

industriels et mixtes. Quelle que soit la source de pollution, on observe toujours une formation d'une couche électrolytique due à l'humidification d'un dépôt de pollution accumulé progressivement sur la surface des isolateurs.

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

- Arc non localisé;
- Arc fixe;
- Le contournement d'une surface isolante polluée.
- Pour la détermination de la tension de contournement des isolateurs, il est important et nécessaire d'estimer le degré de sévérité de la pollution.

Chapitre 03

MODELISATION DU CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS: REVUE BIBLIOGRAPHIQUES

3.1. Introduction

Une quantité importante de travaux tant théoriques qu'expérimentaux a été consacrée à l'étude du contournement des isolateurs sans pour autant aboutir à l'élaboration d'un modèle pouvant tenir compte des paramètres réels caractéristiques du phénomène de pollution. Il s'agit en particulier de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes (continue ou discontinue) et de leur résistivité, des échanges thermiques, de la non-uniformité du mouillage et de l'intensité des arcs au voisinage de la surface de l'isolateur, de la formation d'arcs multiples,... Aussi, la détermination de la tension de contournement d'un isolateur pollué est entachée d'une dispersion marquée, même lorsque les conditions sont en apparence contrôlées.

Afin de contourner la difficulté liée à la configuration souvent complexe de l'isolateur, des modèles simples de laboratoire ont été adoptés par un certain nombre de chercheurs. Certains modèles reflètent assez bien le comportement de l'isolateur.

Dans ce chapitre, nous allons exposer quelques modèles développés dans ce domaine.

3.2. Modèles de contournement

3.2.1. Modèle d'Obenaus

Partant des observations de laboratoire sur les phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche de pollution, sous tension continue, Obenaus, dans un travail de pionnier, a essayé de donner les analyses quantitatives en utilisant un circuit électrique équivalent. Son modèle (Figure. 3.1) est constitué d'un arc de longueur x en série avec une résistance R_p représentant la résistance de la zone de pollution non encore court-circuité par l'arc [11–14].

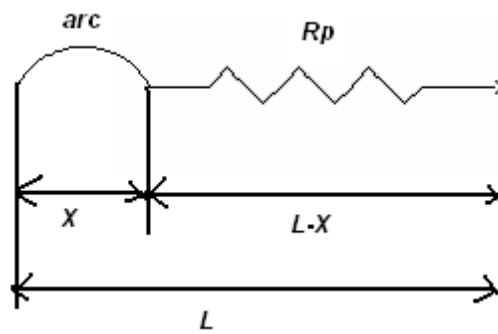


Fig. 3.1 Circuit électrique équivalent d'après Obenaus [11–14]

L'équation électrique est telle que :

$$V = V_e + V_{arc} + R_p(X)I \quad (3.1)$$

avec :

V : la tension appliquée ;

V_e : la chute de tension totale aux bornes des électrodes ;

X : longueur de l'arc ;

$R_p(X)$: la résistance de la couche polluante ;

I : le courant de fuite qui traverse la couche polluée.

V_{arc} : la tension d'arc donnée par :

$$V_{arc} = R_{arc}(X)I \quad (3.2)$$

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

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

$$E_a = \frac{V_{arc}}{X} = NI^{-n} \quad (3.3)$$

D'où l'équation:

$$V_{arc} = N \cdot X \cdot I^{-n} \quad (3.4)$$

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

$$V = V_e + N \cdot X \cdot I^{-n} + R_p(X) \cdot I \quad (3.5)$$

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

$$0,40 \leq n \leq 1 \quad \text{et} \quad 3 \leq N \leq 500$$

Il est à noter que ce modèle a été modifié par d'autres chercheurs parmi les quels :

- Neumarker [15, 16] qui suppose que la résistance par unité de longueur de la couche de pollution est uniforme;

- Rizk [17] a décrit le phénomène d'entretien de l'arc et le mécanisme de rupture diélectrique. Il a mis en évidence l'expression de la rigidité de l'espace résiduel et établi une relation entre la tension minimale U_c nécessaire à l'entretien de l'arc ;
- Rao et Gopal [18] ont constaté que l'équation de la tension donnée par Obenaus n'est valable que pour une décharge de type intermédiaire, entre la luminescence et l'arc. Dans le but de donner des explications entre les écarts des prédictions des modèles et les valeurs mesurées pendant le contournement, ils ont introduit une nouvelle équation exprimant le champ dans la colonne de la décharge.
- Comme les couches de pollution qui s'accumulent à la surface des isolateurs sont non homogènes, Obenaus et Boehme [14,16] ont considéré que la résistance superficielle d'un isolateur à long fut pollué ne peut être uniforme le long de sa ligne de fuite. Elle est plutôt équivalente à deux couches résistantes en série, de résistance linéique r_{p1} et r_{p2} correspondant respectivement à la tige et aux ailettes.

3.2.2. Modèle d'Alston et Zoledziowski

En se basant sur le fait que la résistance de la couche de pollution est uniforme par unité de longueur les auteurs [19, 20] ont pu déterminer, en appliquant une tension de quelques kV, la condition de maintien de l'arc électrique, dans le cas d'un isolateur cylindrique de longueur L (Figure 3.2) :

$$V_{CX} = (n+1)(NX)^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{r(L-X)}{n} \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (3.6)$$

X : est longueur d'arc.

A et n : les constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc.

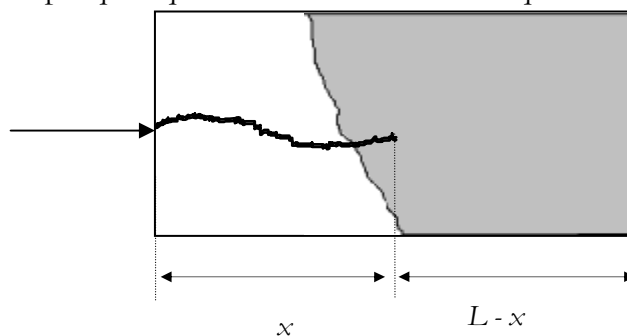


Fig. 3.2 Modèle cylindrique [19, 20]

3.2.3. Modèle de Danis

Se basant sur la reproduction de manière la plus proche possible de l'état de surface d'un isolateur en exploitation, Danis [21–23] proposa alors un modèle de forme géométrique simple (plan ou cylindre) possédant plus d'une zone sèche (Figure.3.3). La rupture des zones sèches survient alors d'une manière aléatoire. Les arcs partiels apparaissent et se déplacent de façon imprévue, car ils dépendent de plusieurs facteurs dont on ne peut pas déterminer leurs effets instantanés.

- L'arc se développe d'abord à travers la zone sèche, puis dans la zone humide (Figure 3.3.b).
- 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 (Figure 3.3.c).
- Le contournement se fait à travers les chemins déjà préétablis par les différents arcs de chaque zone sèche (Figure 3.3.d).
- Lorsque l'expérience est répétée, les positions des arcs développés sont différentes et le contournement se fera donc à travers un tout autre chemin.
- En considérant que la résistance de la couche polluante est linéaire comme pour Neumarker, une simulation numérique des observations expérimentales, utilisant des photographies à grande vitesse (3000 images/seconde), a été développée pour déterminer la tension de contournement.

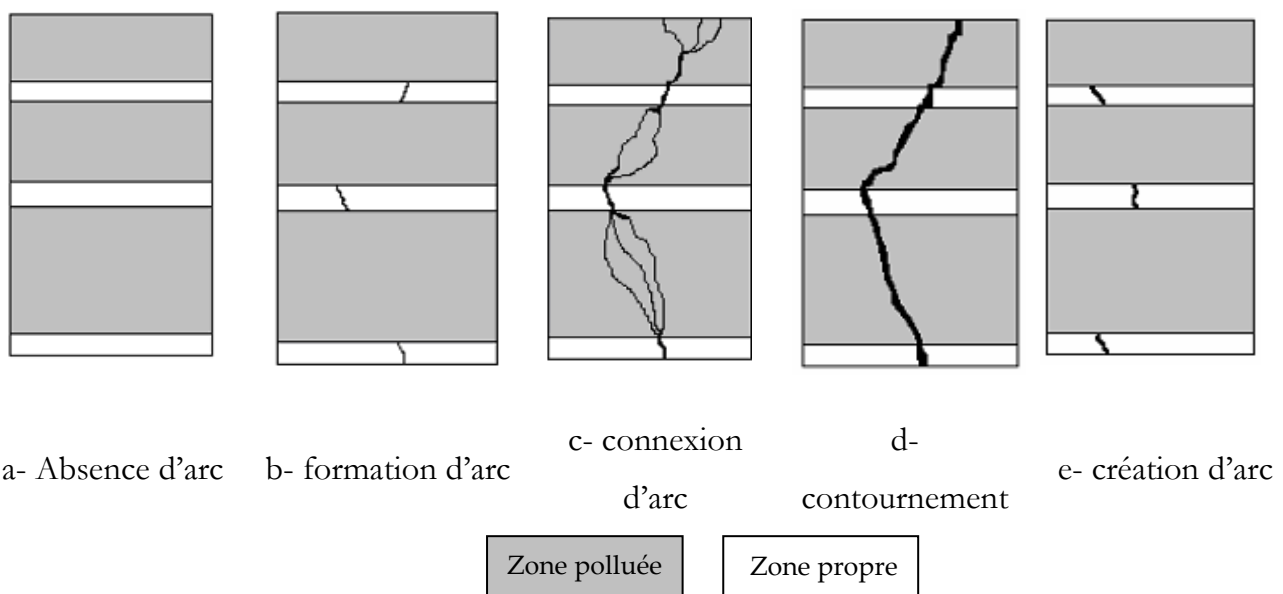


Fig. 3.3 Modèle de Danis [21–23]

L'équation qui régit le modèle sous tension continue est :

$$V = K \cdot I^{-n} + r_p (L - x)I \quad (3.7)$$

Avec : $n \leq 0,5$ et $200 \leq A \leq 400$,

r_p est la résistance linéique et L la longueur de fuite.

Le courant et la tension critiques déduits par l'auteur sont donnés par les expressions :

$$I_c = \left(\frac{K}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (3.8)$$

$$U_c = L(Kr_p)^{\frac{1}{n+1}} = KI_c^{-1} \quad (3.9)$$

3.2.4. Modèle de Nacke et Wilkins

Pour déterminer la résistance de la zone polluée, Nacke et Wilkins [24–28], considèrent que les racines de l'arc électrique prennent une forme de demi-cercles aux frontières des zones sèches (Figure 3.4). Ainsi, la résistance de la pollution se compose d'une résistance R_i (interne) propre aux deux demi-cercles, et d'une résistance R_e (externe) pour le reste de la pollution.

Pour une largeur de bande étroite ($X_p/b \geq 2/\pi$) :

$$R_i(X) = \frac{1}{\pi\gamma} \quad (3.10)$$

$$R_e(X) = rx_p + \frac{2}{\gamma\pi} \log\left(\frac{b}{2\pi r_d}\right) \quad (3.11)$$

R : est la résistance linéique de la pollution,

X_p : la longueur de la couche polluée (mouillée) dans les conditions critiques,

b : la largeur de la surface de l'isolateur,

r_d : le rayon de la base de l'arc.

Pour une bande large et pour un isolateur à ailette unique, la résistance externe est donnée par :

$$R_e(X) = \frac{2}{\pi\gamma} \left(0.68 + \ln\left(\frac{X_p}{r_d}\right) \right) \quad (3.12)$$

Pour un isolateur à ailettes multiples :

$$R_e = \frac{2}{\pi\gamma} \left(0.3 + \ln \left(\frac{X_p}{r_d} \right) \right) \quad (3.13)$$

Ainsi, la résistance de pollution totale sera :

$$R(X) = R_i(X) + R_e(X) \quad (3.14)$$

Pour la même configuration (Figure 3.4b), dans le cas d'une bande étroite, Wilkins a obtenu :

$$R(X) = r(L - X) + \frac{1}{\pi\gamma} \ln \left(\frac{b}{2\pi r_d} \right) \quad (3.15)$$

Et pour une bande large :

$$R(X) = \frac{1}{\pi\gamma} \left(\ln \left(\frac{2L}{\pi r_d} \right) - \ln \left(\tan \frac{\pi X}{L} \right) \right) \quad (3.16)$$

X : la longueur d'arc,

L : la distance totale de fuite de l'isolateur.

3.2.5. Modèle de Tegar (pollution discontinue)

L'auteur [29–36] 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 (Figure 3.5). 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

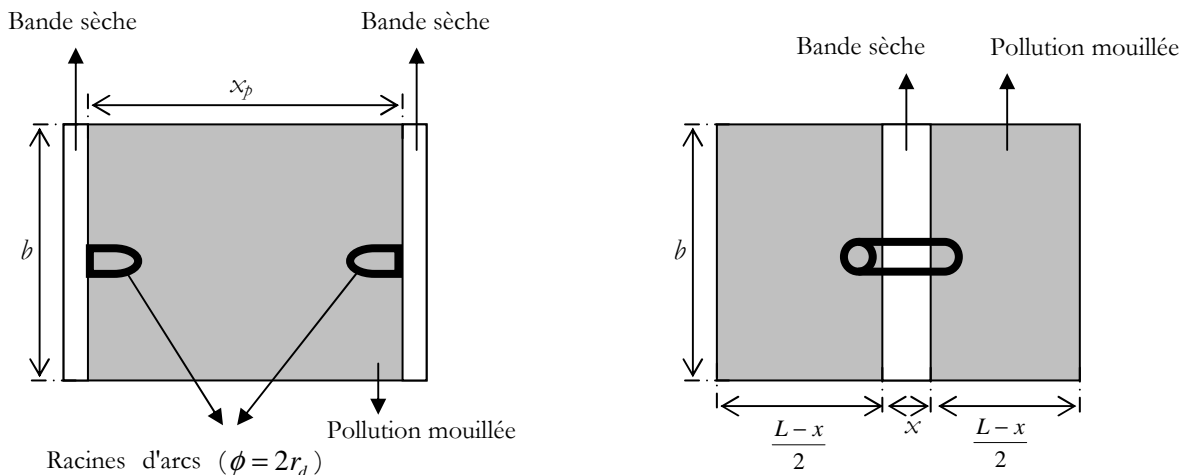


Fig. 3.4 Représentation schématique de la surface d'un isolateur

couches de la pollution discontinue sont remplacées par du papier aluminium.

La figure ci dessus représente le circuit électrique équivalent au modèle de laboratoire sous pollution discontinue. Dans ce circuit, chaque bande i ($i=1$ à 6) est constituée d'une résistance R_{0i} en parallèle avec une capacité C_{0i} . Pour chaque bande polluée i ($i=2, 4, 6$), ces circuits sont shuntés par une résistance R_{pi} représentant la couche de pollution (peinture semi-conductrice à base de graphite).

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

$$R_{pi} = R_{sp} \int_0^{L_i} \frac{dl}{b} = R_{sp} \frac{L_i}{b} = R_p f \frac{L_i}{b} \quad (3.17)$$

Avec $i=2, 4, 6$, 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 et f le facteur de forme.

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

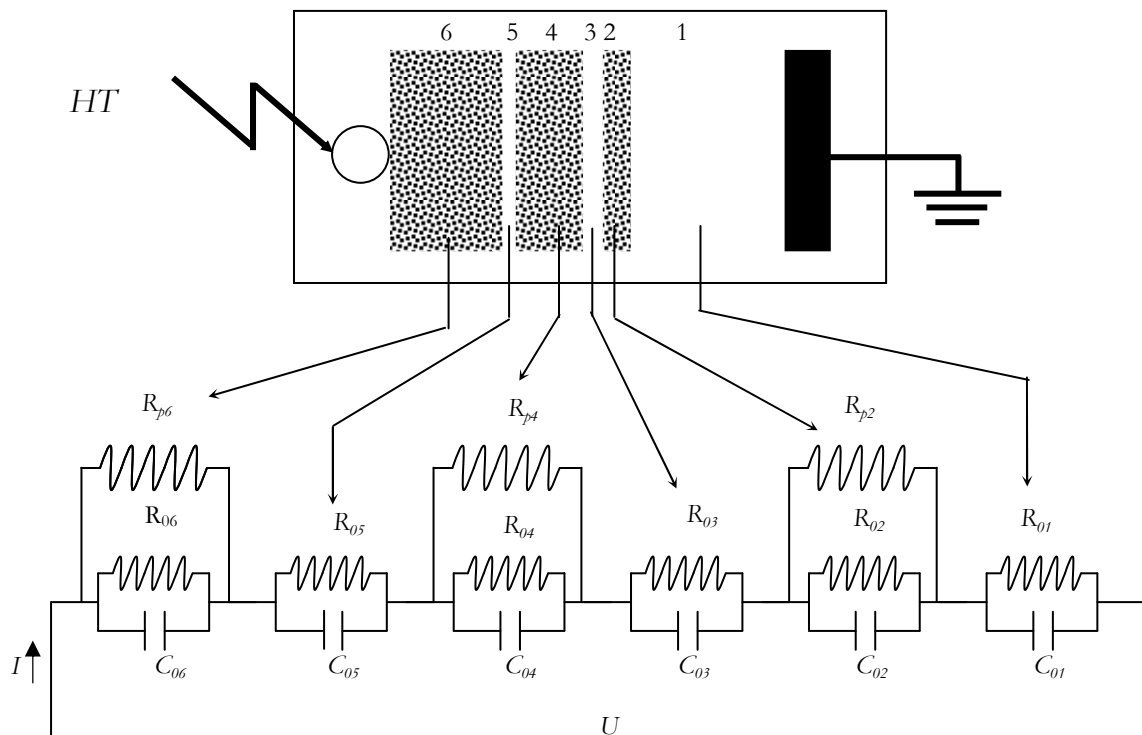


Fig. 3.5 Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire [29–36]

3.2.6. Modèle de Dhahbi et Beroual

Dans ce modèle, Dhahbi et Beroual [37, 38] considère que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme indiqué dans la figure 3.6.

R_i , C_i , L_i , et U_i sont respectivement la résistance, la capacité, l'inductance et la tension correspondant à chaque cellule nouvellement créée représentant un nouveau déplacement partiel de l'arc électrique. Ce modèle est basé sur le critère d'impédance. Pour déterminer ces paramètres (R , L , C), ces auteurs ont utilisés :

- pour calculer la variation de la résistance, l'équation de Mayr;
- pour déterminer la capacité, une approximation sphérique;
- pour l'inductance du canal de la décharge, les simplifications proposées dans.

3.2.7 Modèle de Dhahbi, Beroual et Krahenbul

Ces auteurs [39–41] ont proposés un nouveau critère analytique de propagation de la décharge en faisant intervenir l'impédance équivalente Z_{eq} d'un circuit électrique, simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite (Figure 3.7).

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

$$\frac{d|Z_{eq}|}{dx} \leq 0 \tag{3.18}$$

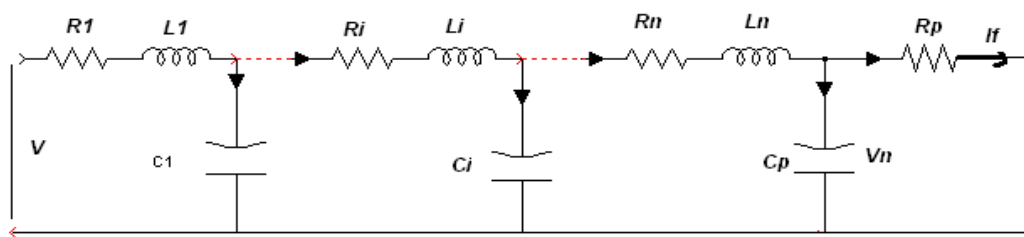


Fig. 3.6 Circuit électrique équivalent de la propagation de l'arc [43]

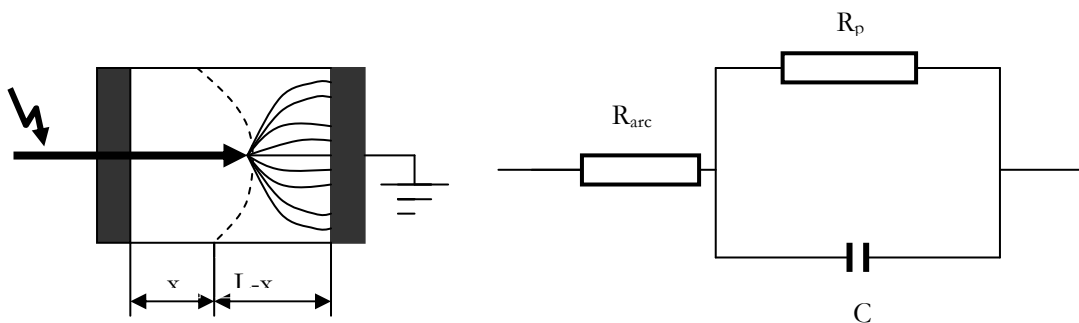


Fig. 3.7 Modèle d'un isolateur pollué et circuit équivalent correspondant [39–41]

Ces auteurs ont abouti à un critère qui est :

$$E_{arc} \geq \frac{E_p}{\sqrt{a}} \quad (3.19)$$

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

Avec ω : la pulsation, ρ_p : la résistivité de la pollution. et ϵ : la permittivité de la pollution

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une recherche bibliographique qui nous a permis d'explorer les principaux modèles, 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.

Elle nous a permis, par ailleurs, d'étudier, de nouveaux modèles dynamiques. Ces modèles sont aussi disponibles dans la littérature. Ces modèles sont, cependant, insuffisants lors du passage à l'application pratique principalement à cause des hypothèses simplificatrices rendues nécessaires par les traitements mathématiques. Il est clair que lorsqu'il s'agit de comparer les performances de divers types d'isolateurs, l'étude expérimentale constitue en définitive le meilleur garant d'un jugement objectif.

INFLUENCE DE LA POLLUTION SUR LE COMPORTEMENT DES ISOLATEURS

4.1. Introduction

Ce chapitre décrit en première phase, les techniques expérimentales utilisées pour étudier les caractéristiques des arcs électriques ainsi que leur développement sur une surface isolante non uniformément polluée. En second phase, plusieurs essais ont été réalisés dans le but de mettre en œuvre toutes les contraintes soit physiques ou techniques.

Nous présenterons les résultats obtenus des tests qui ont servi à déterminer l'effet de la couche polluante sur la tension de contournement des plaques isolantes en verre et sur un isolateur réel en porcelaine.

Ainsi, une première partie sera dédiée aux résultats et leur analyse concernant deux plaques en verre en série propres puis polluées avec différente valeur de la conductivité superficielle σ .

Quand à la deuxième, elle sera réservée à la présentation des résultats et de leur analyse lorsqu'il s'agit d'un isolateur réel propre puis pollué avec différentes valeurs de σ .

4.2. Dispositif expérimental

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:

- d'un circuit d'alimentation (transformateur 0.08 A, 135 kV);
- d'un dispositif de mesure de la tension de contournement et du courant de fuite;
- d'une cellule de test dans laquelle se trouve le modèle expérimental désiré;
- d'un système audiovisuel.

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 relié à la terre.

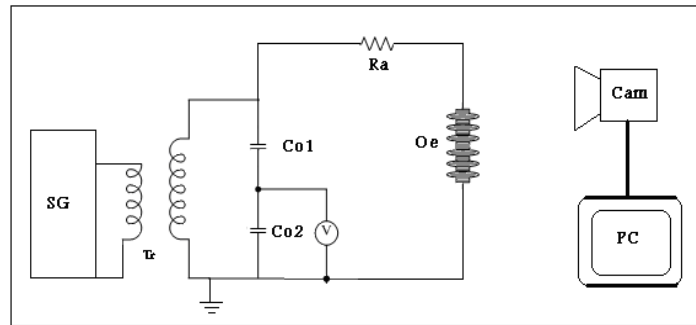


Fig. 4.1 Schéma électrique de mesure et de visualisation

Avec:

Tr : (Tr) transformateur 0.08A /135kV ; C_{01} / C_{02} : Diviseur de tension capacitif; Oe : Objet d'essai; Ra : Résistance haute tension de limitation de courant ; Cam : Caméscope ; V : Voltmètre de crête ; SG : Commande de l'alimentation du transformateur; PC : Microordinateur.

4.2.1. 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.

Les caractéristiques du transformateur sont : (0,08 A ; 135 kV ; 8 kVA)



Fig. 4.2 Equipements du montage de mesure

4.2.2. Circuit de mesure

4.2.2.1. Tension appliquée

La tension d'essai est mesurée à l'aide d'un diviseur de tension capacitif, constitué d'une capacité haute tension en série avec la capacité basse tension, résistance 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 alternatif [42].

Le voltmètre de crête (MU11) permet d'afficher la tension. Il possède les caractéristiques suivantes en alternatif :

Haute tension maximale mesurable en alternatif $U_{\text{moy}} = 700 \text{ kV}$;

Tension de mesure maximale sans diviseur $\hat{U} = 1000 \text{ V}$;

Erreur $\pm 1 \%$ de la valeur mesure;

Plage de mesure $20 \text{ V} \leq U_{\text{crete}} \leq 1000 \text{ V}$

Fréquence de la tension de mesure $20 \text{ Hz} \leq f \leq 1000 \text{ Hz}$;

4.3. Objet d'essai

Dans cette partie du travail, nous avons utilisé dans nos essais deux types d'objets : les plaques en verre et un isolateur support en porcelaine

4.3.1. Plaque en verre

La composition d'un isolant en verre (figure 4.3.a) dépend des propriétés recherchées. Il est fabriqué en fondant dans des creusets chauffés au rouge vif à une température 900°C ; un mélange de sable, de chaux et de carbonate de sodium. Le liquide, peu fluide, est coulé dans des moules en acier ayant en creux la forme des isolateurs. Chimiquement, le verre est un mélange de silicate alcalin et de calcium ou de plomb.

Les isolateurs en verre, un peu moins chers, mais plus fragiles que ceux en porcelaine, sont employés jusqu'à environ 30kV. Les propriétés du verre sont résumées dans le tableau 4.1.

Caractéristiques	Valeur
Rigidité diélectrique	50 à 100 kV/mm et 0,5 à 1 kV/mm à 400°C
Permittivité relative	5 à 8
Résistivité à 20°C	10^{10} à $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$

Tab. 4.1 Caractéristiques du verre

4.3.2. Isolateur réel en porcelaine

La porcelaine d'un isolateur (figure 4.3.b) est composée de kaolin et de quartz de première qualité. Ces deux composés sont cuits à 1400°C, puis recouverts d'émail au silicate et recuits au four pour obtenir une glaçure à chaud qui le rend imperméable à l'eau.

Les propriétés électriques et mécaniques de la porcelaine sont données dans le tableau 4.2 :

4.4. Mode opératoire

4.4.1. Préparation des plaques

Plusieurs plaques, découpées en dimensions désirées, sont bien rincées avec de l'eau du robinet puis séchées à l'aide du papier absorbant.

Les électrodes sont en aluminium, de forme rectangulaire bien arrondie à leurs extrémités de sorte à éliminer les effets de pointe. Elles reposent sur des feuilles en aluminium dont la forme épouse parfaitement la base de chacune des électrodes. Ces feuilles sont collées sur le verre avec du gas-oil.

Caractéristiques	Valeurs
Rigidité diélectrique	25 à 35 kV/mm
Permittivité relative	6 à 7
Résistivité à 20°C	$10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$
Résistance mécanique	2500 à 4000 N/mm

Tab. 4.2 Caractéristiques de la porcelaine

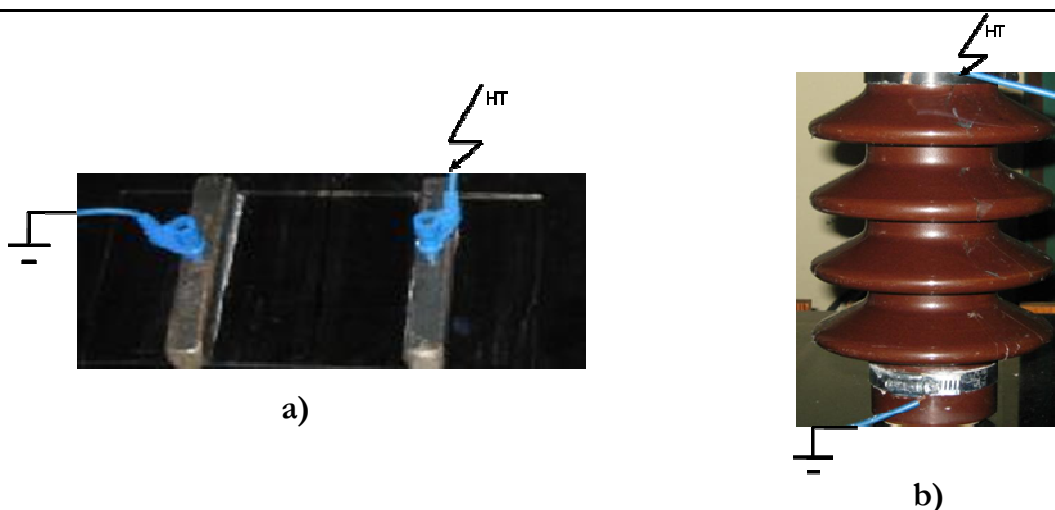


Fig. 4.3 Objets d'essai

Cette opération est réalisée de manière à ce qu'aucun espace d'air ne reste entre la plaque et les feuilles. Le tout est ensuite essuyé pour éliminer toute trace de gas-oil.

4.4.2. Préparation de l'isolateur réel

L'isolateur réel est en porcelaine avec 4 ailettes est bien rincé avec de l'eau du robinet puis séché à l'aide du papier absorbant.

Les modèles sont disposés horizontalement sur un isolateur support d'environ un mètre de hauteur pour éliminer tout risque de décharges accidentelles vers la terre.

4.4.3. Préparation de la solution polluante

La solution polluante est obtenue en mélangeant 20g de kaolin et une quantité de chlorure de sodium (NaCl) dissoute dans un litre d'eau distillée.

En agissant sur la concentration du NaCl dans le mélange, on peut avoir toutes les gammes de conductivité désirée, grâce à un conductimètre.

Les conductivités volumiques adoptées sont: (0,58; 2,5; 5; 10; 20; 24,6) (mS/cm).

Les principales caractéristiques du kaolin sont décrites dans le tableau 4.3.

Matière inerte	Composition en poids %				Granulométrie (Distribution cumulée) μm			Conductivité Volumique $\mu\text{S}/\text{cm}$
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	H ₂ O	16%	50%	84%	
Kaolin	40-50	30-40	0,3-2	7-14	0,1-0,2	0,4-1	2-10	15-200

Tab. 4.3 Caractéristiques du kaolin

4.5. Procédé d'essais

Pour chaque degré de sévérité de pollution, dix essais de tension de contournement ont été réalisés. Cette mesure nous permet de prévoir les paliers ainsi que les cas limites de la tension à appliquer pour l'enregistrement des longueurs d'arcs.

La tension de contournement retenue, pour chaque degré de pollution et pour chaque cas de configuration des échantillons, est la moyenne de dix essais.

Le procédé d'essais est structuré de la manière suivante:

4.5.1. Choix des conductivités

Les conductivités volumiques choisies pour la mesure de tension de contournement sont :

$$\sigma = 0,58 ; 2,5 ; 5 ; 10 ; 20 ; 24,6 \text{ (}\mu\text{S/cm)}.$$

4.5.2. Techniques d'application de la pollution

On applique la couche de pollution à l'aide d'une éponge en effectuant un mouvement uniforme sur la surface à polluer une seule fois et en utilisant à chaque fois la même quantité de solution polluante. Ceci afin d'assurer une bonne reproduction du phénomène durant les dix essais.

4.5.3. Visualisation de la décharge

La visualisation du phénomène de décharge électrique pouvant avoir depuis sa naissance jusqu'au claquage de l'intervalle d'air a été réalisée à l'aide d'un caméscope, relié à un microordinateur pour contrôle d'images à l'aide du logiciel Vidéo studio.

4.5.4. Correction des résultats.

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 θ_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:

$$U = \frac{K_h}{K_d} U_m \quad (4.1)$$

Avec:

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

U : tension de contournement ramenée aux conditions normales de température θ_0 , de pression P_0 et d'humidité H_0 ;

K_d : facteur de correction relatif à la température θ et à la pression P ;

$$K_d = \frac{P (273 + 20)}{100 (273 + \theta)} = \frac{2,93P}{(273 + \theta)} \quad (4.2)$$

Avec: P en kPa, et θ en $^\circ\text{C}$

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 4.4.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 lue sur l'abaque de la figure. 4.3.a est reportée sur l'abaque de la figure 4.4.b.

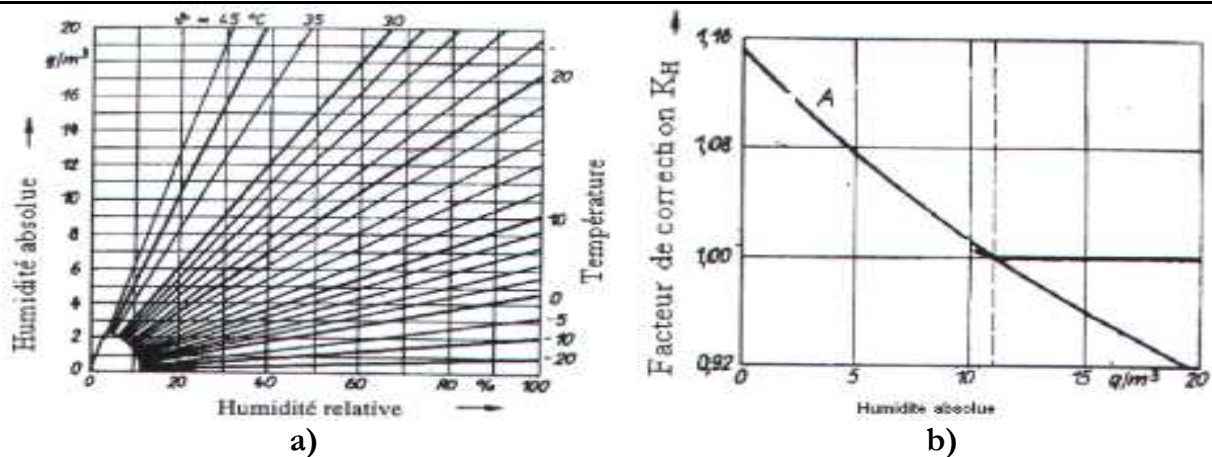


Fig. 4.4 Facteurs de correction

Sur la base de figure 4.4, on peut corriger les tensions de contournement et ainsi les ramener aux conditions normales conformément à la norme CEI 60-1 et 60-2 [43].

4.6. Observation

Pour une couche de pollution uniforme, nous avons constaté que l'apparition d'une tension de quelques kV (tension d'apparition d'arcs électriques) entre les électrodes, provoque l'apparition de plusieurs décharges parallèles des deux côtés des électrodes en investissant toute la largeur de la couche polluée.

Si le champ électrique est suffisamment grand, ces décharges commencent à se développer et progresser de telle sorte que leur nombre diminue avec leur élongation.

Les petits arcs s'éteignent pour alimenter les arcs principaux. Ces derniers deviennent plus épais et gagnent plus d'énergie à chaque fois que le champ électrique croit en amplitude.

Ces décharges progressent de nouveau et occupent des longueurs de plus en plus grandes. Dès que ces décharges électriques parallèles atteignent leur longueur critique, leur nombre se réduit à une seule décharge qui forme le court circuit (contournement).

Par contre, pour une couche de pollution non uniforme (deux conductivités différentes), la naissance des arcs commence par la couche la moins conductrice ensuite la plus conductrice, et le phénomène de développement de la décharge électrique reste le même que celui décrit en pollution uniforme.

4.7. Etude de la tension de contournement d'un isolateur

4.7.1. Cas des plaques en verre

Pour observer l'effet de la conductivité de la pollution sur la tension de contournement des isolateurs, des essais ont été effectués sur des plaques en verre (figure 4.5), on fait varier la conductivité de la pollution par l'ajout de NaCl à une solution de 20 g de Kaolin.

4.7.1.1. Effet des largeurs polluées

La période de travail s'est étalée entre le 15 mai 2009 et 17 juin 2009. Pour chaque degré de pollution de l'isolateur 10 tests ont été effectués. La tension moyenne de contournement est obtenue en faisant la moyenne des valeurs des 10 essais.

Exemple de mesure

Pollution uniforme (Tableau 4.4) :

Les mesures ont été effectués le 24/05/2009 à 14^{H00mn}, les conditions atmosphériques sont les suivantes : $T = 26\text{ C}^\circ$; $P = 1015\text{ Pa}$; $H_r = 43\%$

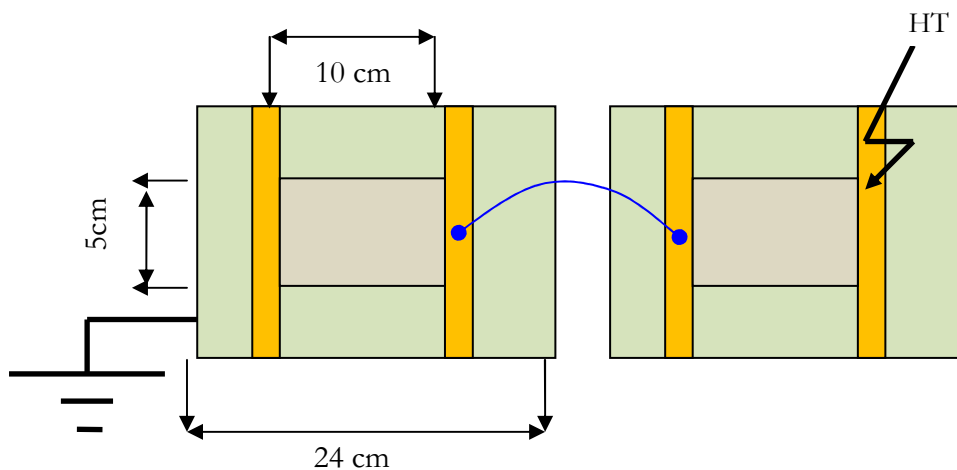


Fig. 4.5 Disposition des plaques d'essai pour le cas de pollution uniforme

Surface polluée (D= 10 cm ; d =10 cm)

	$\sigma=0 \mu\text{S}$	$\sigma=1,5 \mu\text{S}$	$\sigma=3 \mu\text{S}$	$\sigma=4 \mu\text{S}$	$\sigma=5 \mu\text{S}$	$\sigma=8 \mu\text{S}$	$\sigma=11,5 \mu\text{S}$	$\sigma=14 \mu\text{S}$
1	131,0	50,8	62,6	48,4	49,3	55,1	48,6	52,5
2	130,0	61,0	60,4	49,1	57,0	47,9	51,5	50,9
3	128,0	56,3	65,0	51,6	53,9	54,5	55,6	55,6
4	126,0	58,4	59,2	53,2	52,9	50,9	42,9	52,1
5	128,0	73,3	58,9	46,7	50,8	52,1	51,4	50,5
6	130,0	77,7	61,2	49,4	52,4	57,6	48,6	52,8
7	129,0	62,0	62,9	50,7	47,2	54,6	55,4	46,5
8	125,0	66,3	63,9	55,7	51,1	55,2	46,0	46,5
9	125,0	68,8	64,8	54,4	54,4	53,1	53,0	45,6
10	126,0	78,8	54,9	53,2	46,9	47,9	54,2	58,6
V_{moy}	127,8	57,55	61,38	51,24	51,59	52,89	50,72	51,16
V_c	130,38	58,90	54,6	52,26	52,62	52,94	51,73	52,18

Tableau 4.4 Tableau des mesures obtenues (les valeurs sont en kV)

Application sur la première colonne du tableau :

$$V_{\text{moy}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \Rightarrow$$

$$V_{\text{moy}} = \frac{131 + 130 + 128 + 126 + 128 + 130 + 129 + 125 + 125 + 126}{10}$$

$$V_{\text{moy}} = 127,8 \text{ kV}$$

En utilisant les formules de correction suscrites et les abaques de la figure 4.4, on retrouve

$$V_c = \frac{K_h}{K_d} V_{\text{moy}}$$

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

$$K_h = 0,98$$

$$V_c = \frac{0,98}{0,01} 127,8 = 130,38 \text{ kV}$$

Tous les autres résultats ont été corrigés de la même manière et sont résumés dans le tableau 4.5.

σ (μS)	0	1,5	3	4	5	8	11,5	14
U_c (d=10cm)	130,38	58,9	54,6	52,26	52,62	52,94	51,73	52,18
σ (μS)	0	1,5	3	4	5	8	11,5	
U_c (d=5cm)	130,38	76,21	65,17	60,7	56,83	54,02	53,7	

Tableau 4.5 Mesures obtenues

Le figure 4.6 donne l'allure de la tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle de la couche électrolytique recouvrant la surface de l'isolateur.

Une analyse des résultats de la figure 4.6 indique que la tension de contournement diminue avec la croissance de la conductivité de la pollution ainsi qu'avec l'augmentation de l'espace pollué

La croissance de la largeur de la surface polluée engendre une augmentation du nombre d'arcs progressant le long de celle-ci avec une distance entre décharges variable en fonction de l'élongation et du nombre d'arcs électriques. On peut dire dans notre cas que la largeur efficace pour qu'un arc électrique se développe est estimée à 5cm.

Pour chacune des deux couches de pollution uniforme, nous avons constaté que l'apparition d'une tension de quelques kV (tension d'apparition d'arcs électriques) entre les électrodes, provoque l'apparition de plusieurs décharges parallèles des deux cotés des électrodes en investissant toute la largeur de la couche polluée (figure 4.7).

Si le champ électrique est suffisamment grand, ces décharges commencent à se développer et progresser de telle sorte que leur nombre diminue avec leur élongation.

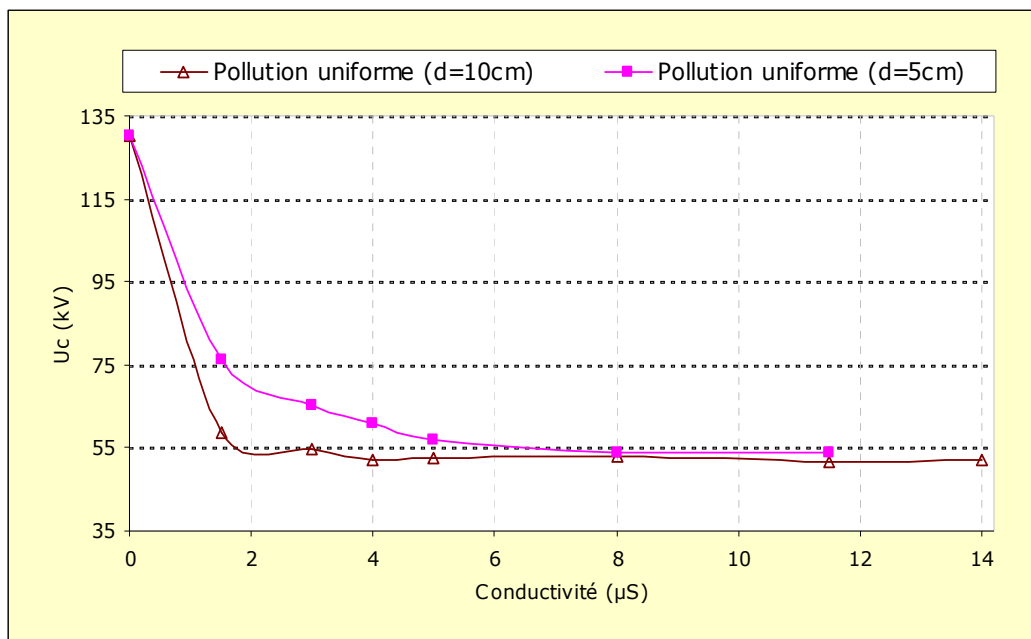
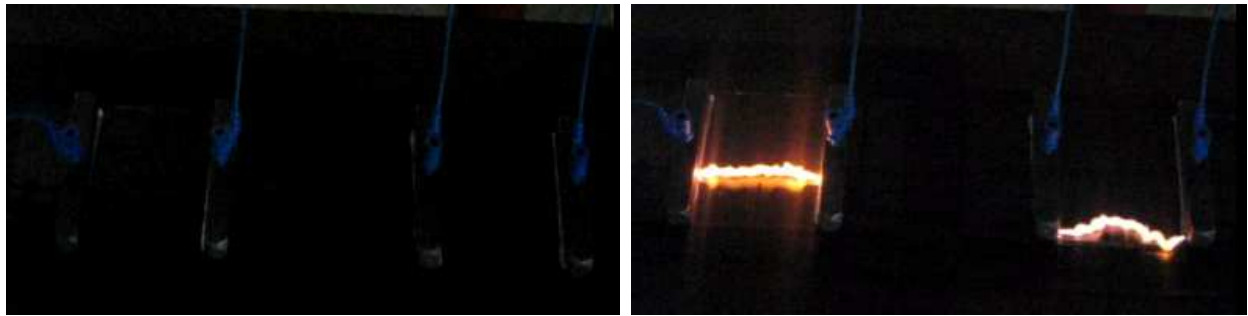
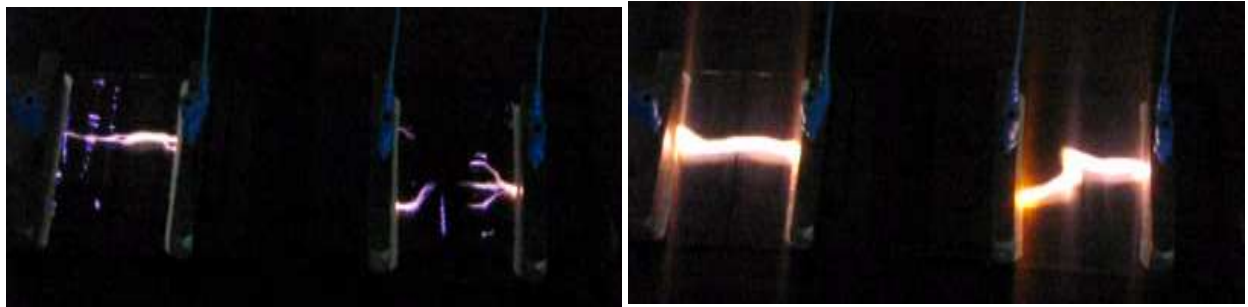
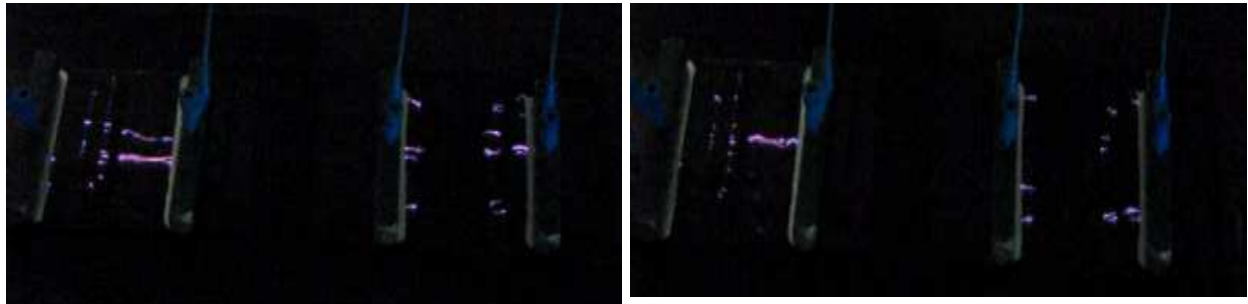


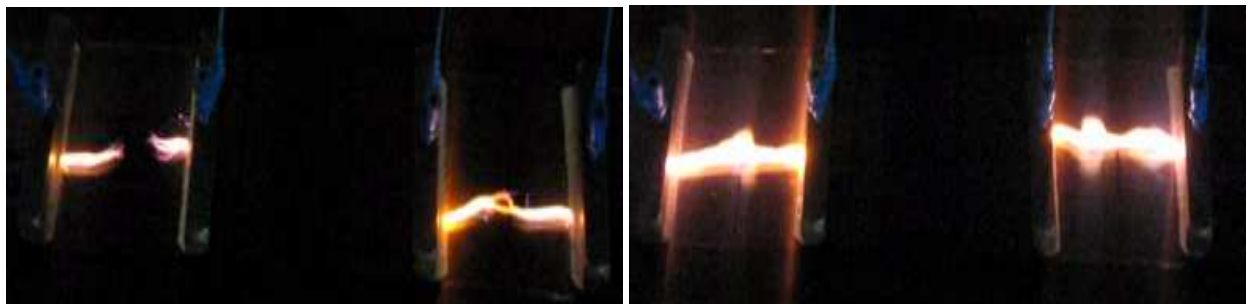
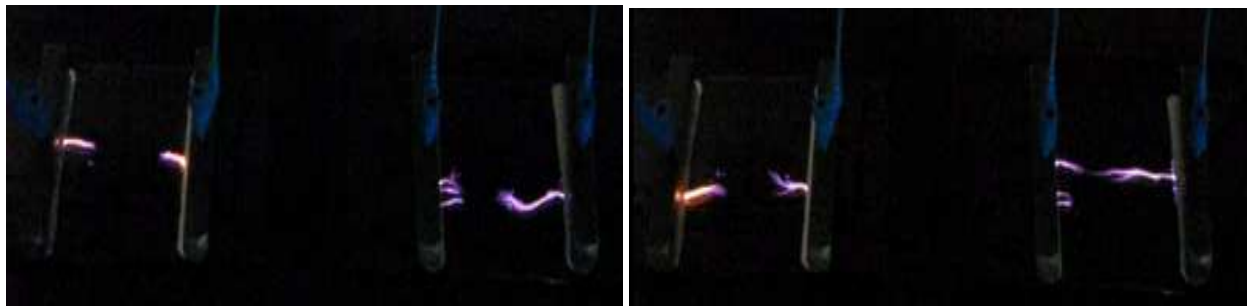
Fig. 4.6. La tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle (répartition uniforme)



$D=10\text{ cm}$; $d=10\text{ cm}$; $\sigma=0\text{ }\mu\text{S}$ (Surface propre)



$D=10\text{ cm}$; $d=10\text{ cm}$; $\sigma=1.5\text{ }\mu\text{S}$



$D=10\text{ cm}$; $d=5\text{ cm}$; $\sigma=3\text{ }\mu\text{S}$

Fig. 4.7 Contournement de deux surfaces isolantes séries (pollution uniforme)

Les petits arcs s'éteignent pour alimenter les arcs principaux. Ces derniers deviennent plus épais et gagnent plus d'énergie à chaque fois que le champ électrique croît en amplitude. Ces décharges progressent de nouveau et occupent des largeurs de plus en plus grandes.

Des que ces décharges électriques parallèles atteignent leur longueur critique, leur nombre se réduit à une seule décharge qui forme le court-circuit (contournement) (figure 4.7).

Afin de mettre en évidence l'influence de la largeur et de la conductivité de la surface polluée sur la tension de contournement et de déterminer l'évolution de cette tension vis à vis des dimensions et les conductivités des deux surfaces polluées, Des séries d'essais ont été effectuées. Les échantillons utilisés dans cette investigation sont des plaques en verre disposées comme montré dans la figure 4.8.

4.7.1.2. Effet du rapport des conductivités

a) 1^{ère} série de test : Répartition longitudinale périodique

Pour une distance inter-électrodes fixe ($D= 10\text{cm}$), on fait varier la conductivité σ_2 en maintenant σ_1 constante égale à $11,5 \mu\text{S}$ et on enregistre la tension de contournement affichée par le voltmètre de crête (MU11). Les résultats obtenus sont montrés dans la figure 4.9. Une analyse de ces résultats indique que la tension de contournement diminue avec la croissance du rapport des conductivités de la pollution jusqu'à environ 0,15 puis garde une valeur plus ou moins constante pour les autres rapports. L'explication que l'on peut apporter à ces constatations est qu'une plus grande conductivité semble avoir un effet direct en augmentant la vitesse de propagation des arcs (streamers) et provoquer le contournement à des niveaux plus bas.

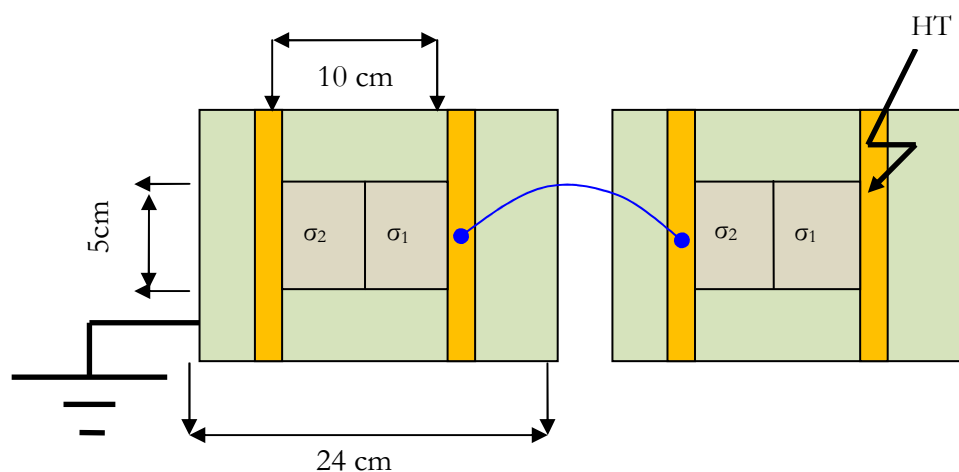
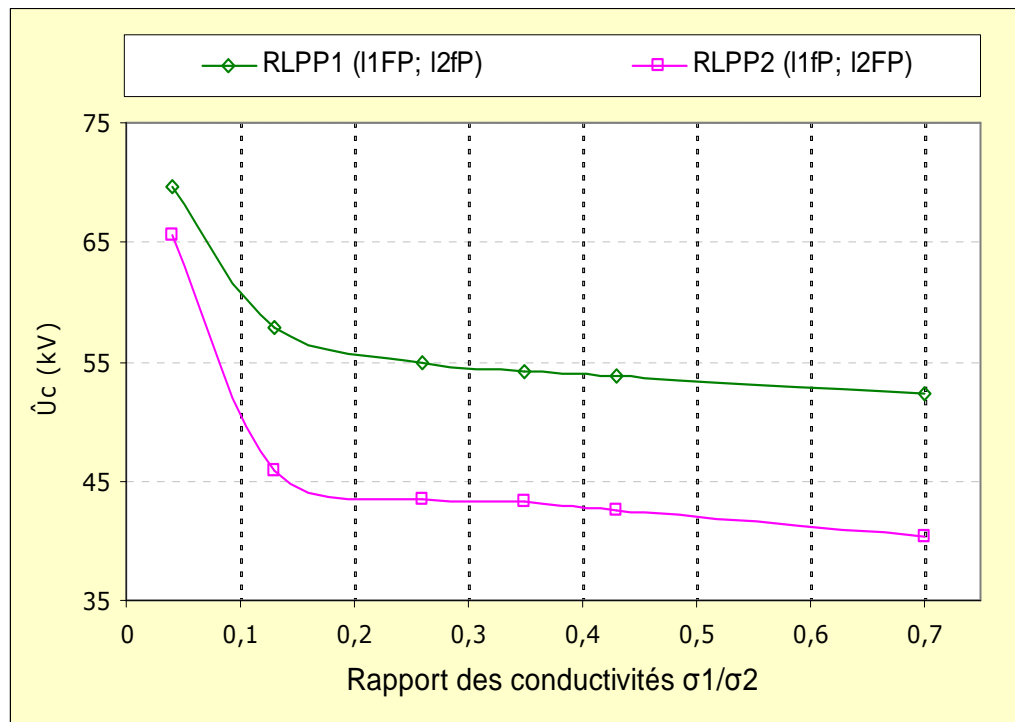


Fig. 4.8 Disposition des plaques d'essai pour le cas périodique et non périodique



RLP: Répartition longitudinale périodique (FP: fortement polluée; fP: faiblement polluée)

Fig. 4. 9 Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités

Le développement d'arcs dans ce cas est illustré dans la figure 4.10 pour les différents cas étudiés. De même que précédemment, on constate que des petits arcs apparaissent en début du phénomène puis s'éteignent pour alimenter les arcs principaux qui progressent de nouveau et occupent des largeurs de plus en plus grandes.

b) 2^{ème} série de test : Répartition longitudinale non périodique

Dans un souci de comprendre mieux l'effet de la pollution, une seconde série de test a été entamée. Elle consiste à faire varier la conductivité σ_2 en maintenant σ_1 constante ($11,5 \mu\text{S}$) pour une distance inter-électrodes fixe ($D= 10\text{cm}$). On enregistre la tension de contournement affichée par le voltmètre de crête (MU11). L'évolution de la tension moyenne de contournement dans ce cas en fonction de la conductivité est montré dans la figure 4.11 où on peut toujours voir que cette tension diminue jusqu'à une certaine valeur puis garde une valeur plus ou moins constante même si la conductivité augmente. Le suivi du développement d'arc par la camera est montré dans la figure 4.12.

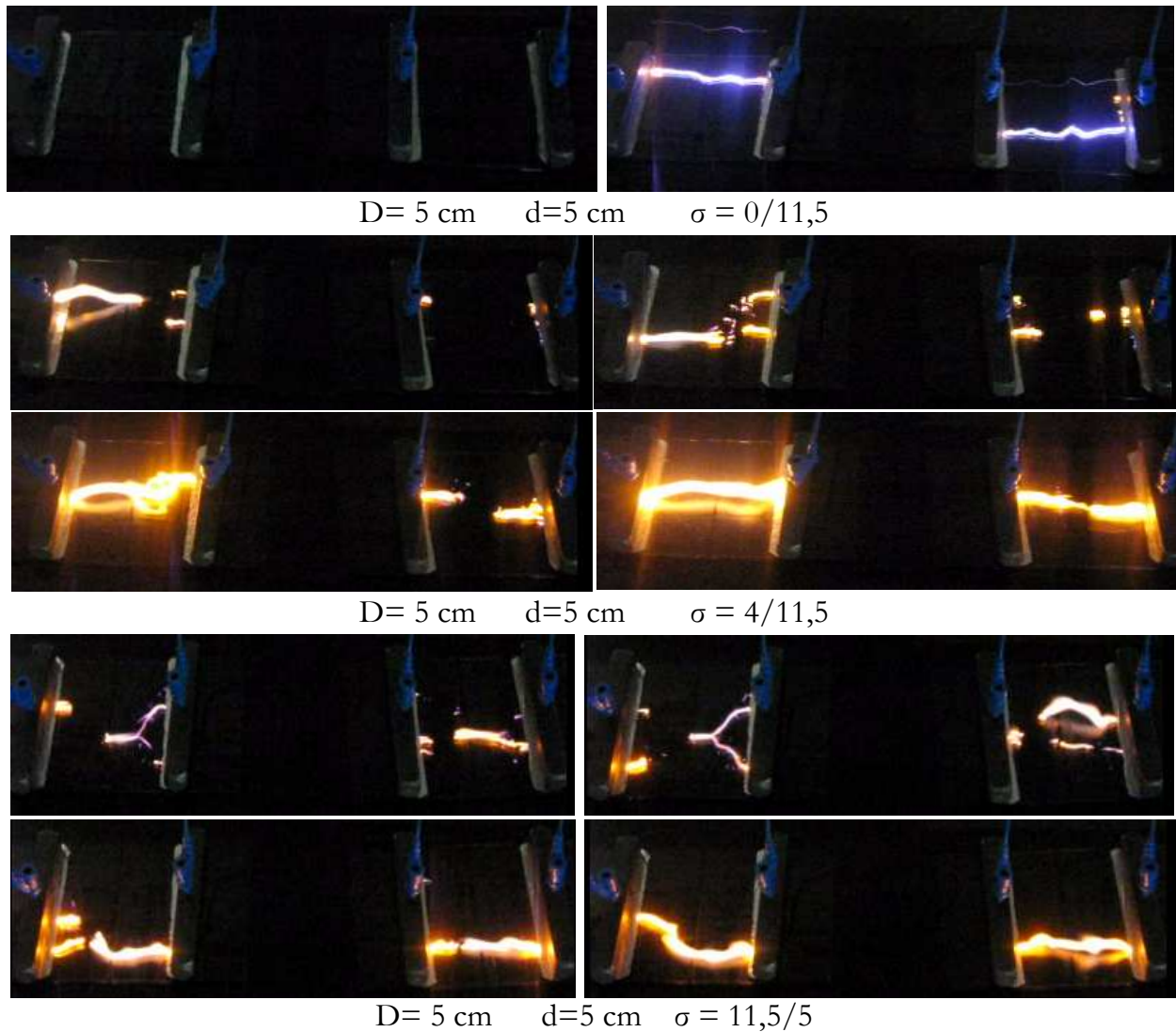


Fig. 4.10 Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités

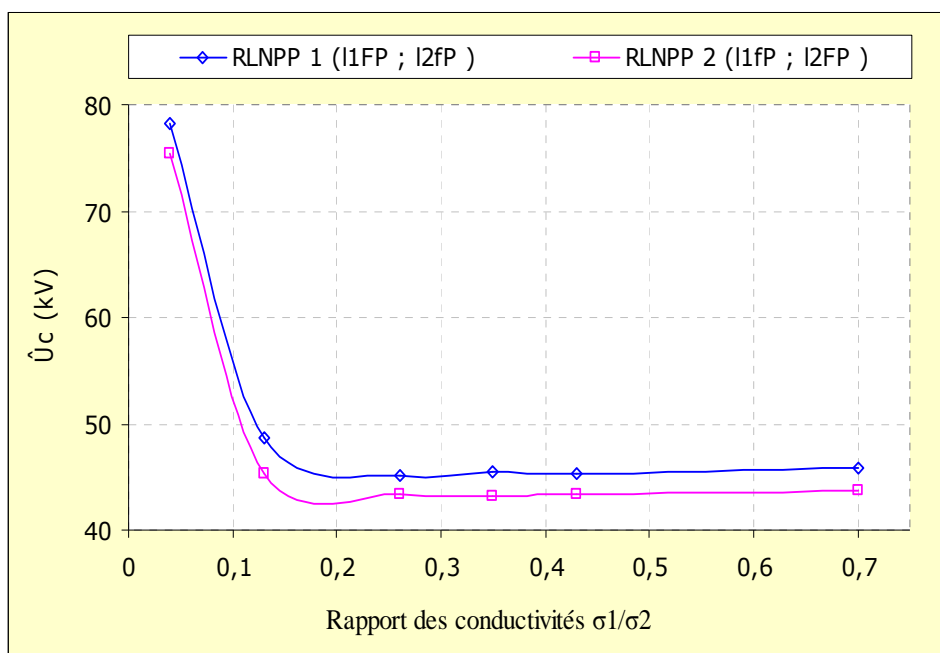
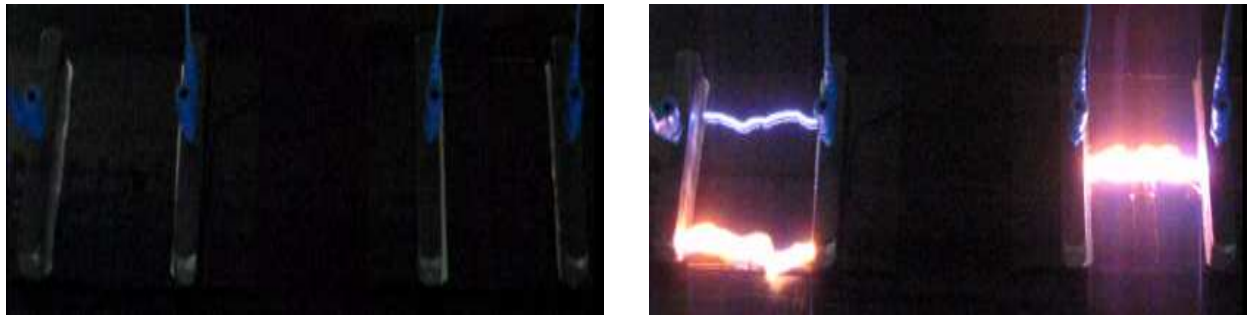
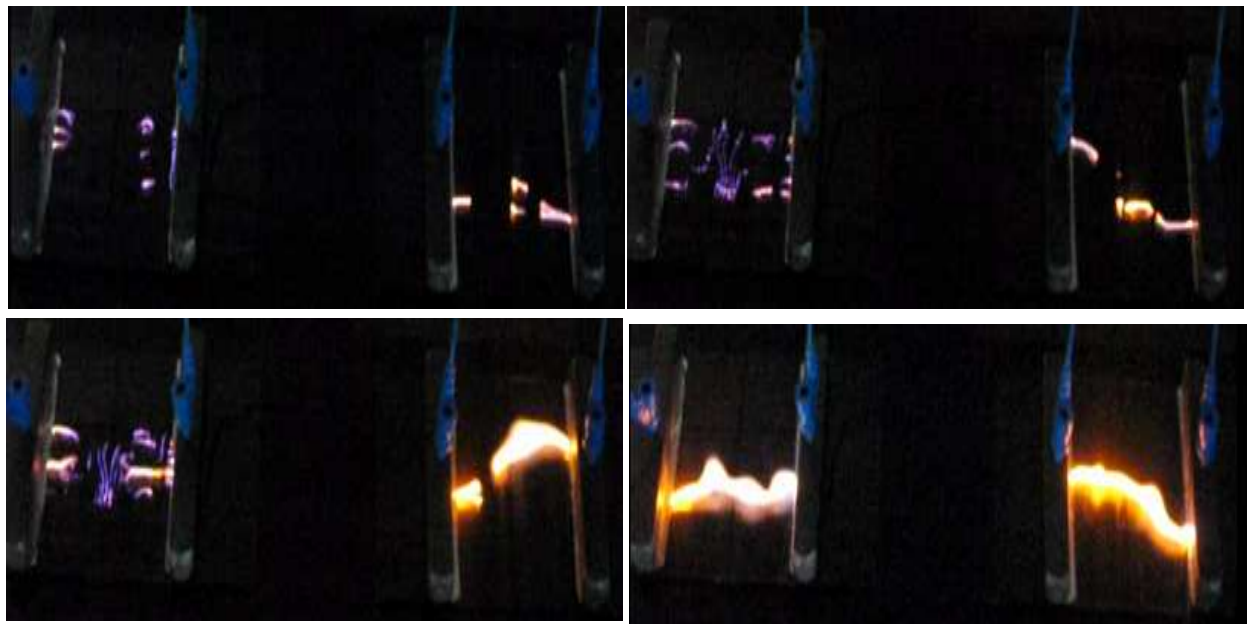


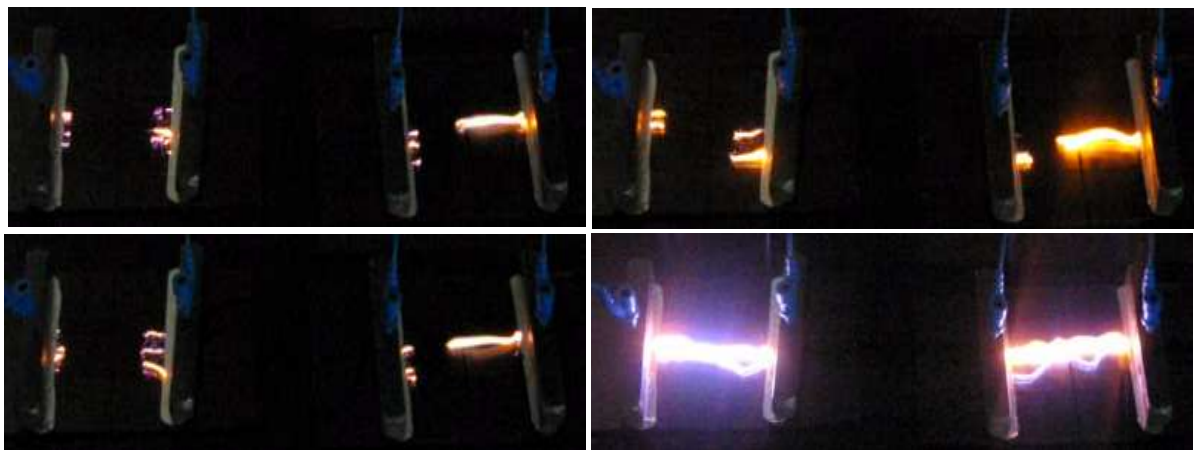
Fig. 4.11 Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités



D= 10 cm d=5 cm $\sigma = 11,5/0$



D= 10 cm d=5 cm $\sigma = 11,5/5$



D= 10 cm d=5 cm $\sigma = 8 /11,5$

Fig. 4. 12 Développement de l'arc contournement pour différent cas

c) 3^{ème} série de test : Répartition transversale et longitudinale transversale périodique

Les couches de pollution sont appliquées comme le montre la figure 4.13. Dans ce cas on fait varier la conductivité σ_2 en maintenant σ_1 constante ($11,5 \mu\text{S}$) pour une distance inter-électrodes fixe ($D= 10\text{cm}$). On enregistre la tension de contournement affichée par le voltmètre de crête (MU11). Les résultats de mesures sont montrés dans les figures 4.14 et 4.15. Par la même occasion nous présentons dans la figure 4.16 le développement d'arc obtenu. L'explication que l'on peut apporter pour expliquer les points minium 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 minium. Les tensions les plus faibles donc les plus dangereuses sont obtenues en pollution uniforme.

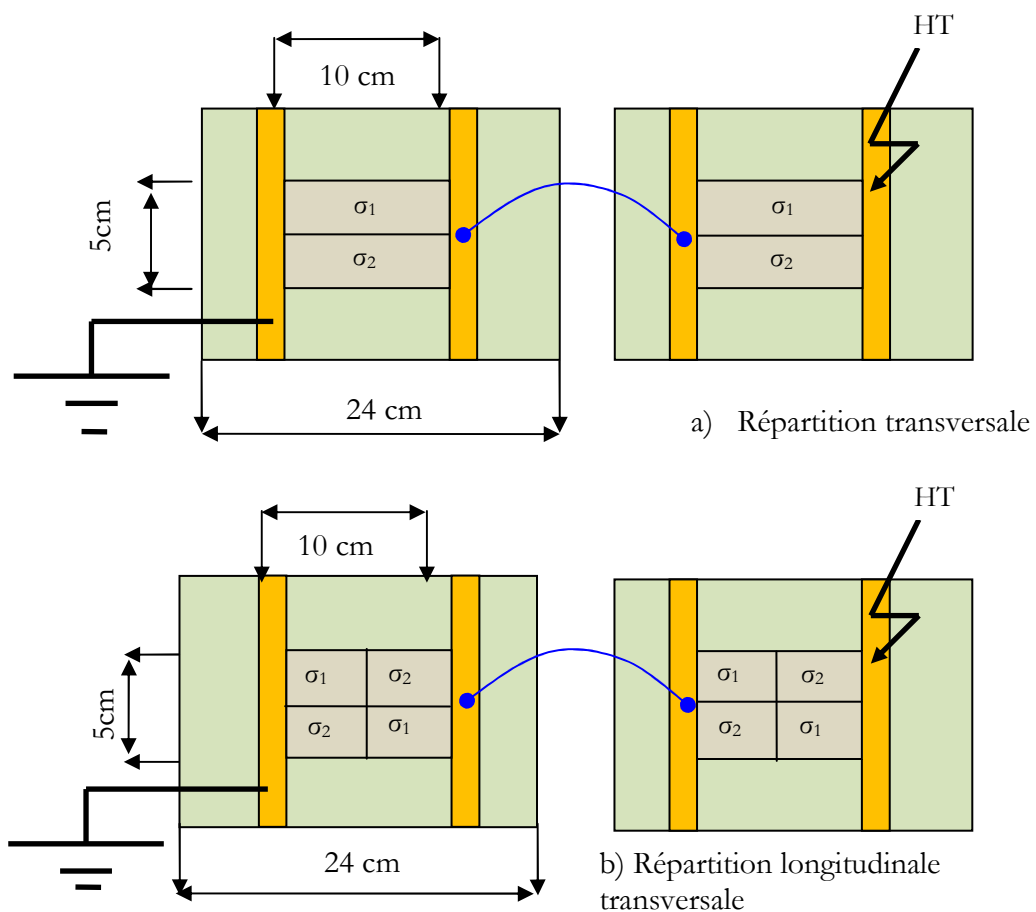
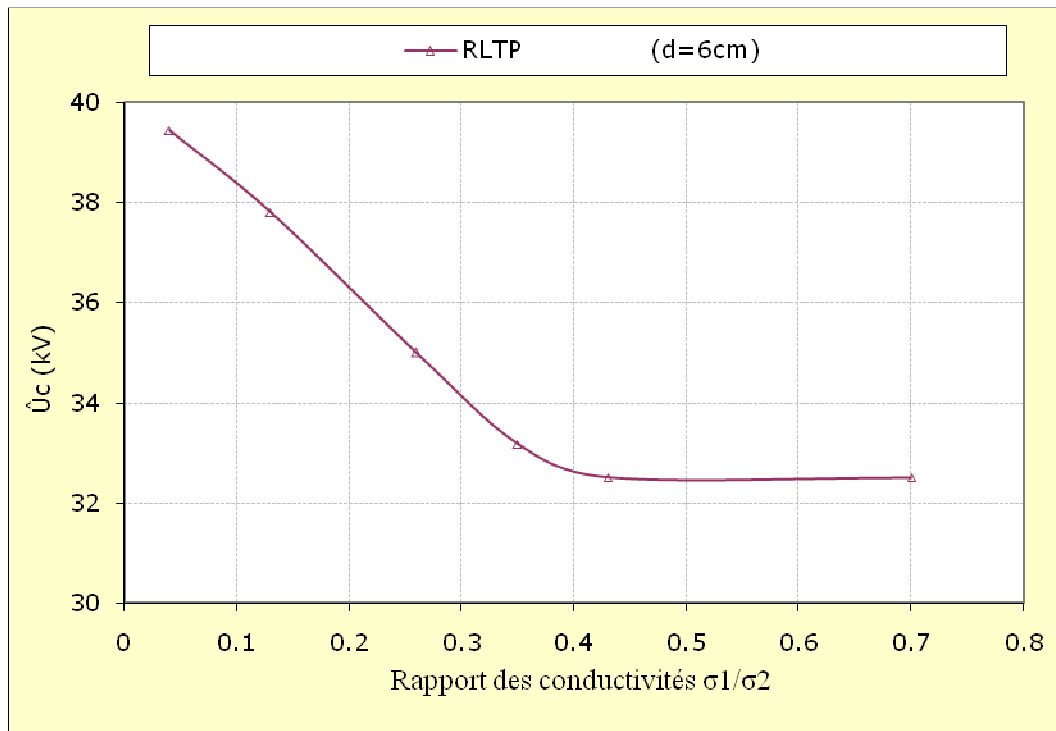


Fig. 4.13 Disposition des plaques pour la 3^{ème} série d'essai



(RLTP: Répartition longitudinale périodique transversale)

Fig. 4.14 Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités

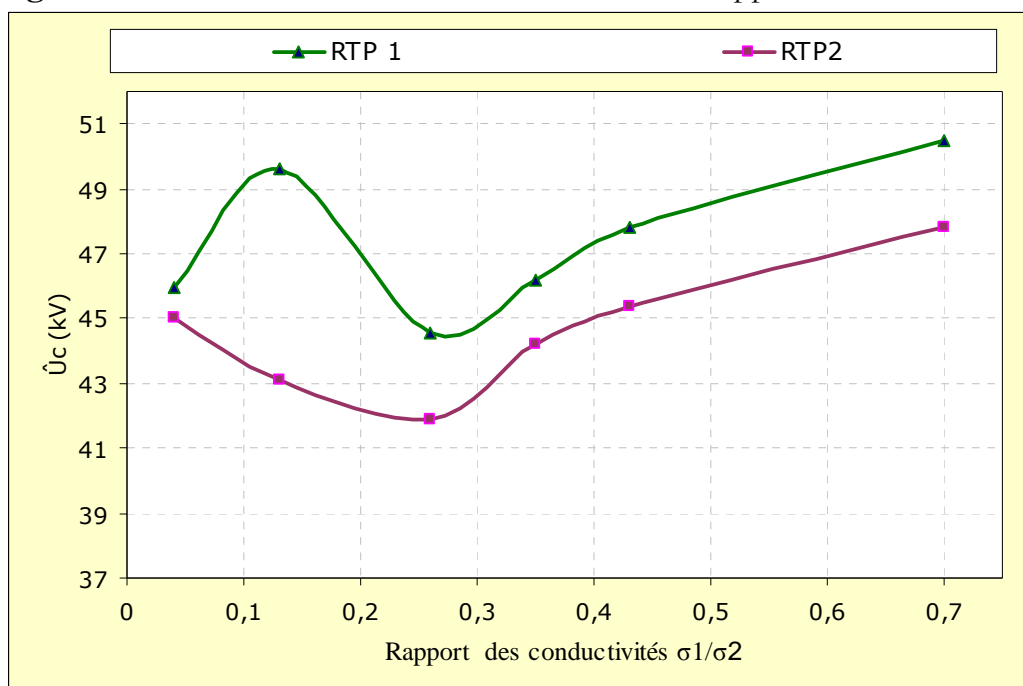


Fig. 4.15 Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités

Cette différence est due à la forte conductivité équivalente de la couche de pollution en cas de distribution uniforme, cette dernière favorise le contournement à des niveaux de tension plus faible, l'isolateur est plus rigide en pollution non-uniforme.

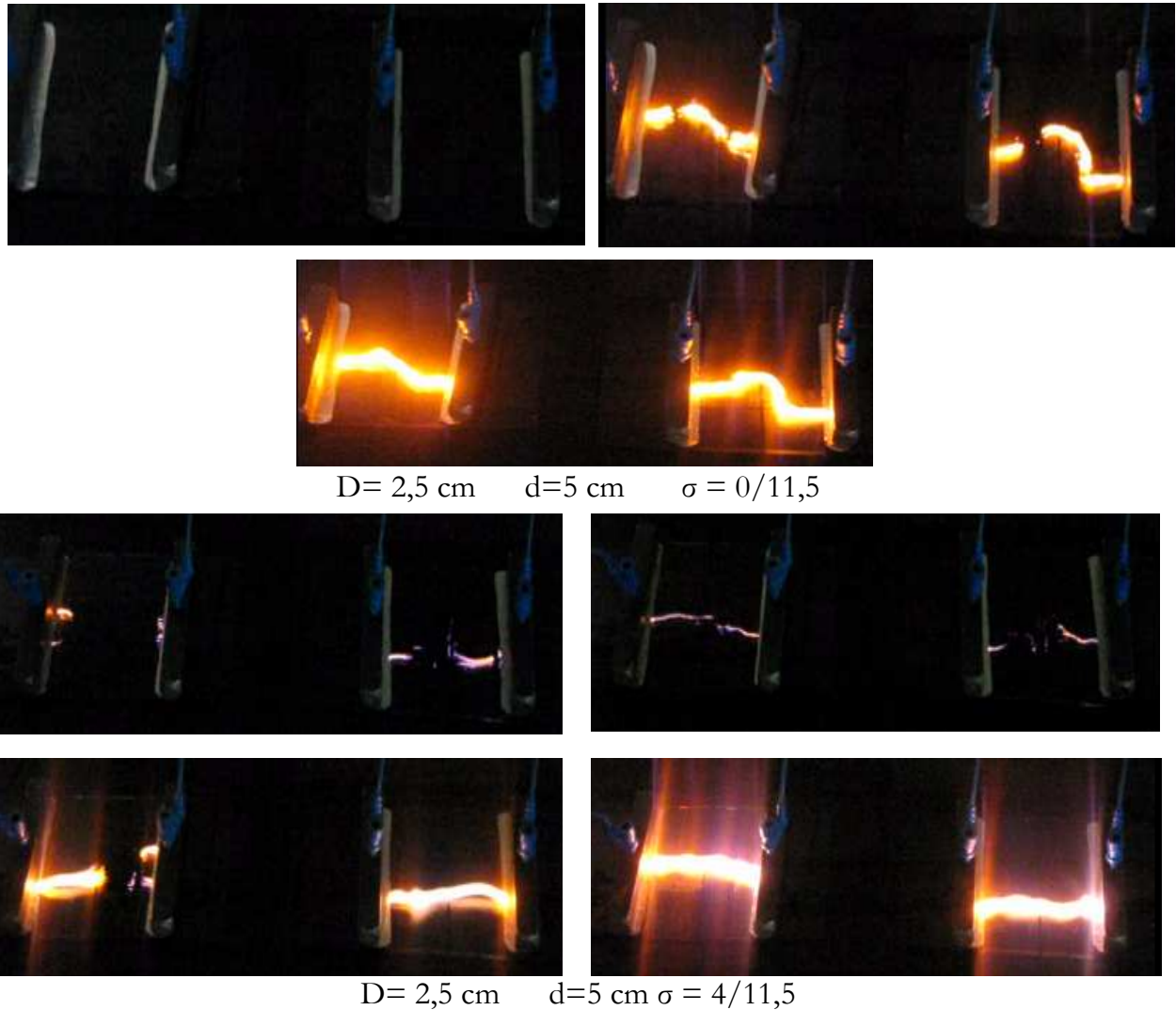


Fig. 4.16 Contournement de surfaces isolantes séries polluées différemment

4.7.2. Cas de l'isolateur en porcelaine

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

Dans les paragraphes qui suivent nous allons exposer quelques séries d'essais en explicitant les remarques et les observations obtenus.

4.7.2.1. Première série d'essai: pollution uniforme

Pour observer l'effet de la conductivité de la pollution uniforme sur la tension de contournement des isolateurs des essais ont été effectués sur un isolateur en porcelaine en faisant varier la conductivité σ . Les résultats obtenus sont montrés dans la figure 4.17 où l'on présente la variation de la valeur moyenne de la tension de contournement en fonction de

la conductivité superficielle de la couche polluante.

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 augmenter la vitesse de propagation des streamers et provoquer le contournement. 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. Dans la figure 4.18 on présente l'évolution de l'arc de contournement pour le cas propre et le cas pollué.

4.7.3. Deuxième série d'essai : pollution non-uniforme

Dans un premier temps on a fixe la conductivité $\sigma_1=11,5\mu\text{S}$ et on a fait varier σ_2 . Dans cette série on utilise la répartition longitudinale périodique (R.L.P). La figure 4.19 représente l'allure de la tension de contournement en fonction du rapport des conductivités.

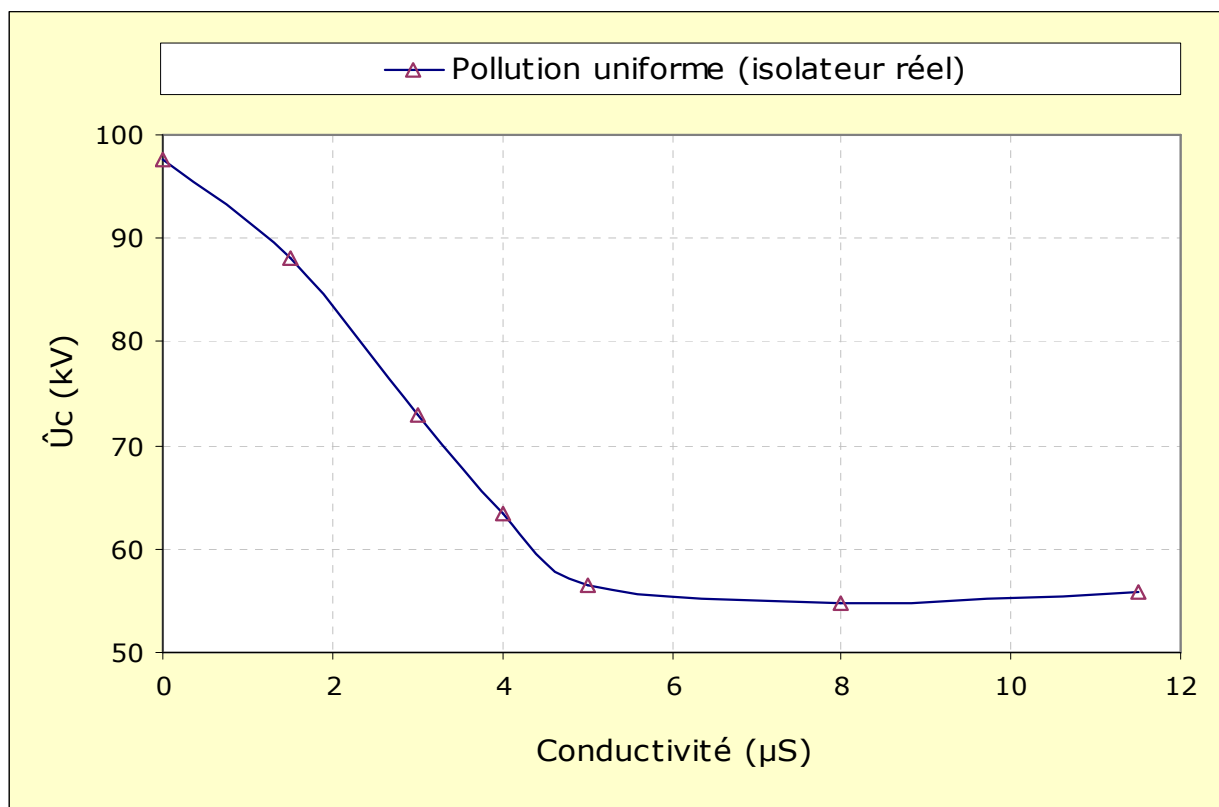
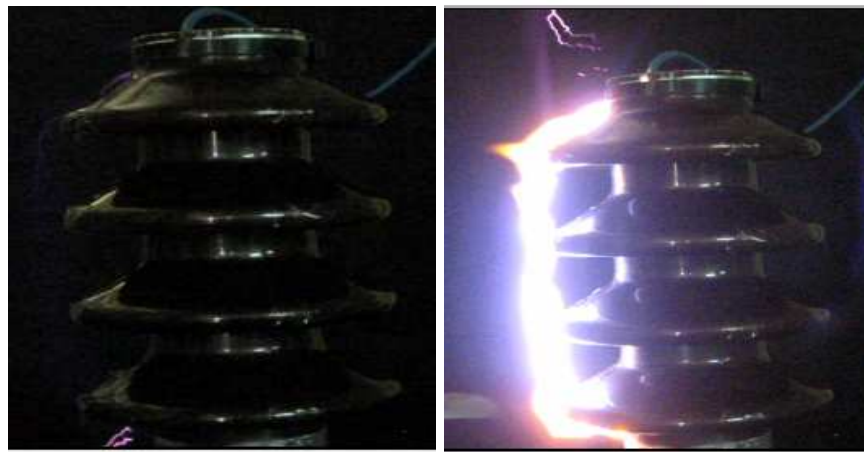
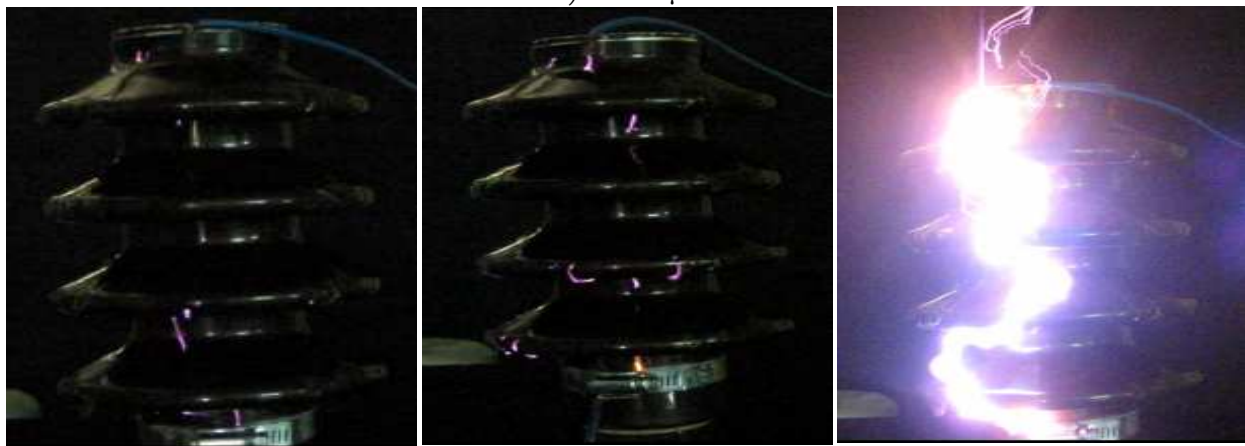


Fig. 4.17 Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle

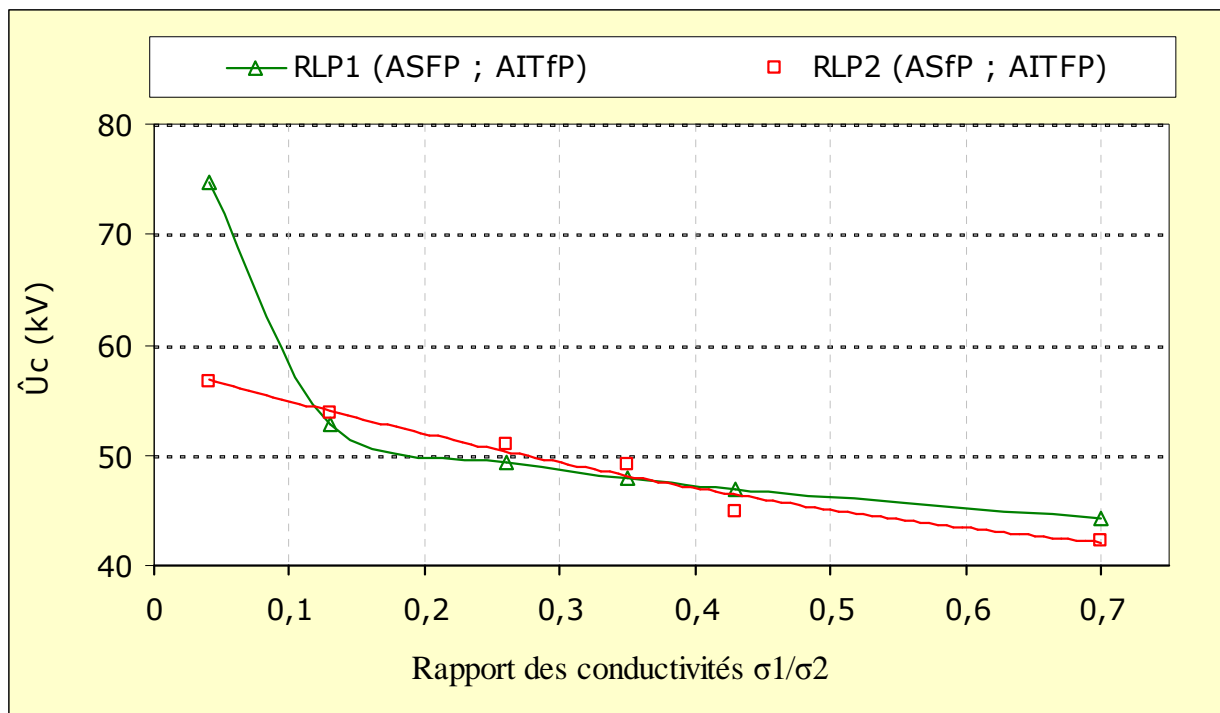


a) $\sigma = 0 \mu S$



b) $\sigma = 3 \mu S$

Fig. 4.18 Contournement de l'isolateur (pollution uniforme)



RLP: Répartition longitudinale périodique (ASFP : ailette supérieure fortement polluée; AITfP: ailette inférieure faiblement polluée)

Fig. 4.19 Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités (12% - 12%)

et la figure 4.20 montre les étapes de développement de l'arc. On remarque d'après ces résultats que la tension de contournement diminue rapidement jusqu'à un rapport des conductivités égal à 0,15 après quoi la courbe devient plus ou moins stable malgré l'augmentation de ce rapport.

L'isolateur 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 un niveau à partir duquel l'augmentation de la conductivité.

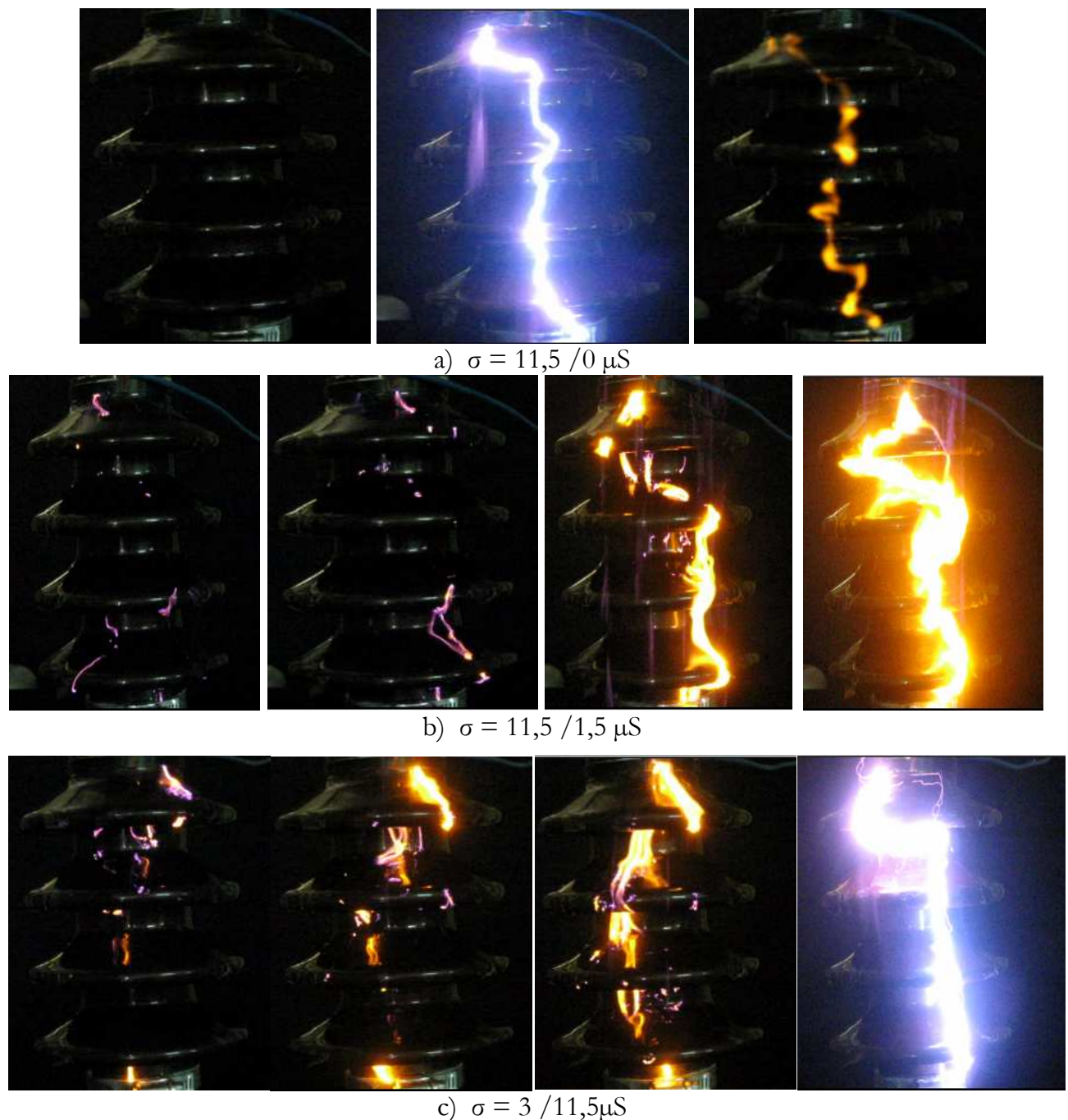


Fig. 4.20 Contournement de l'isolateur (répartition non uniforme 12% - 12%)

La figure 4.21 montre les résultats obtenus pour une pollution 50%-50%. On constate que lorsque l'isolateur est fortement pollué sur le coté terre et faiblement sur le côté HT, la décharge commence à se développer sur le coté terre, puis sur les côtés après les avoir asséchés partiellement. Les deux arcs électriques partiels finissent par rencontrer une fois la longueur critique de l'arc résultant est atteinte.

La figure 4.23 donne 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 $0,1 < \sigma_1/\sigma_2 < 0,15$. La figure 4.24 donne les étapes du développement de l'arc correspondant.

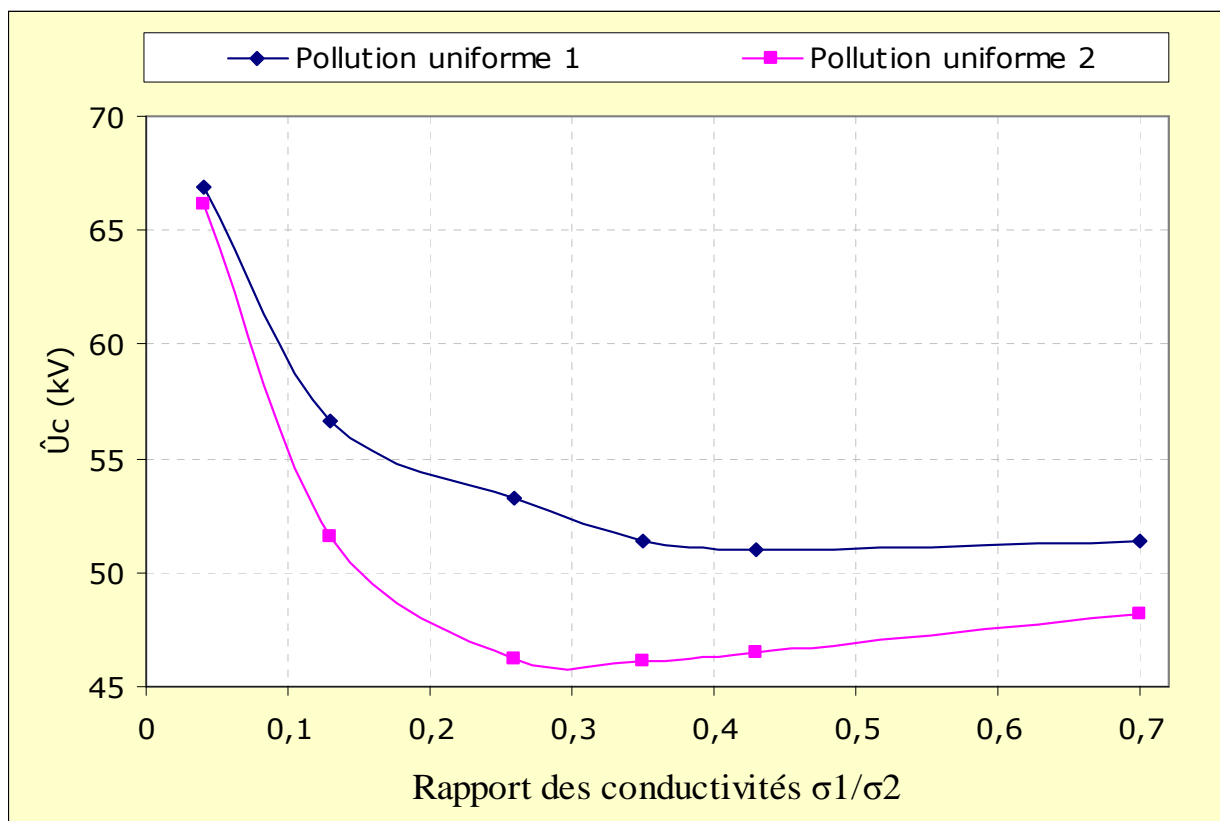
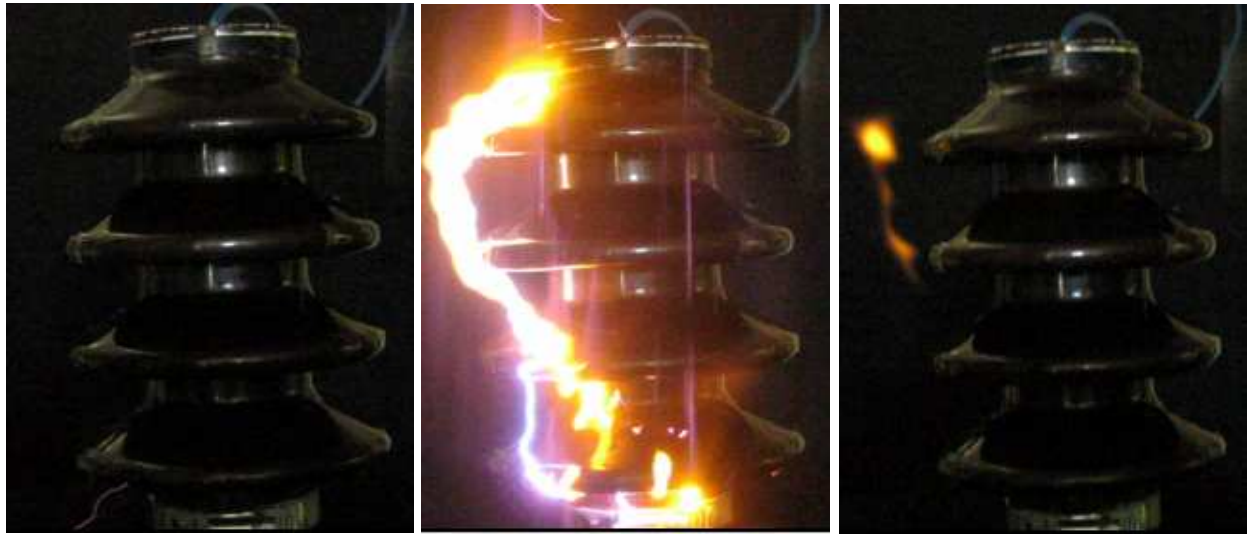
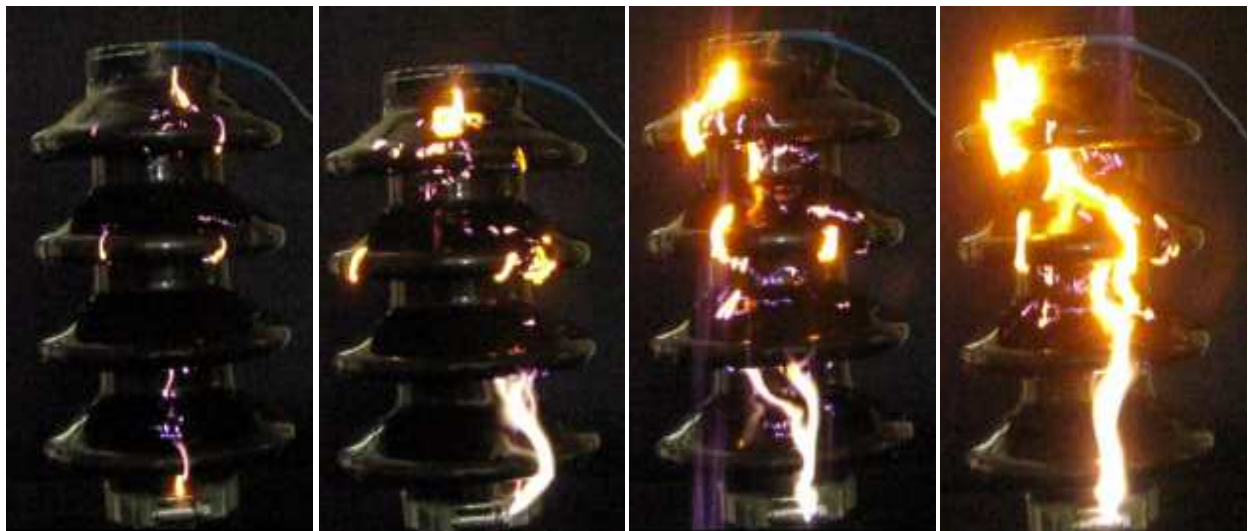


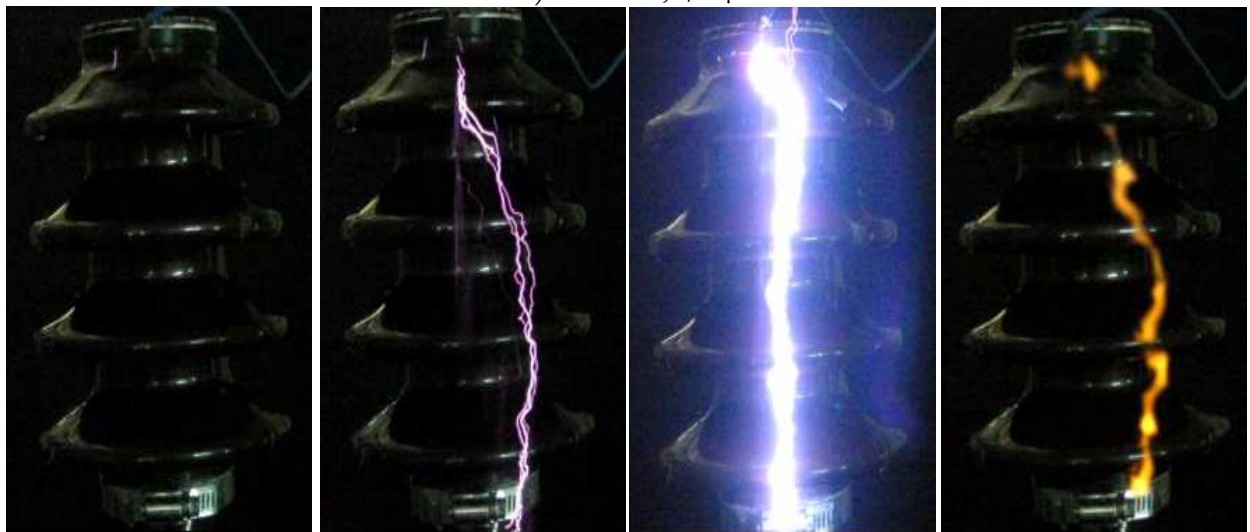
Fig. 4.21 Tension de contournement en fonction du rapport des conductivités (50% -50%)



a) $\sigma = 0/11,5\mu\text{S}$



b) $\sigma = 11,5/3\mu\text{S}$



c) $\sigma = 1,5 / 11,5\mu\text{S}$

Fig. 4.22 Contournement de l'isolateur (50%-50%)

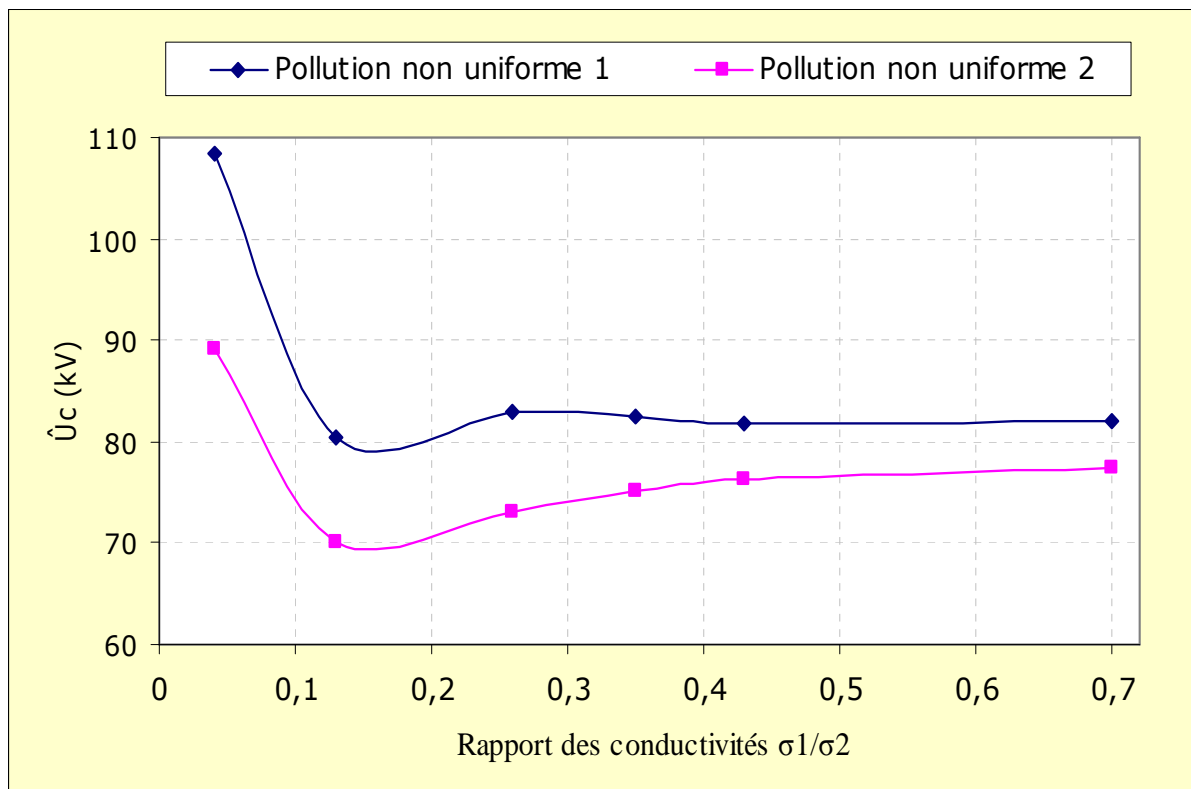
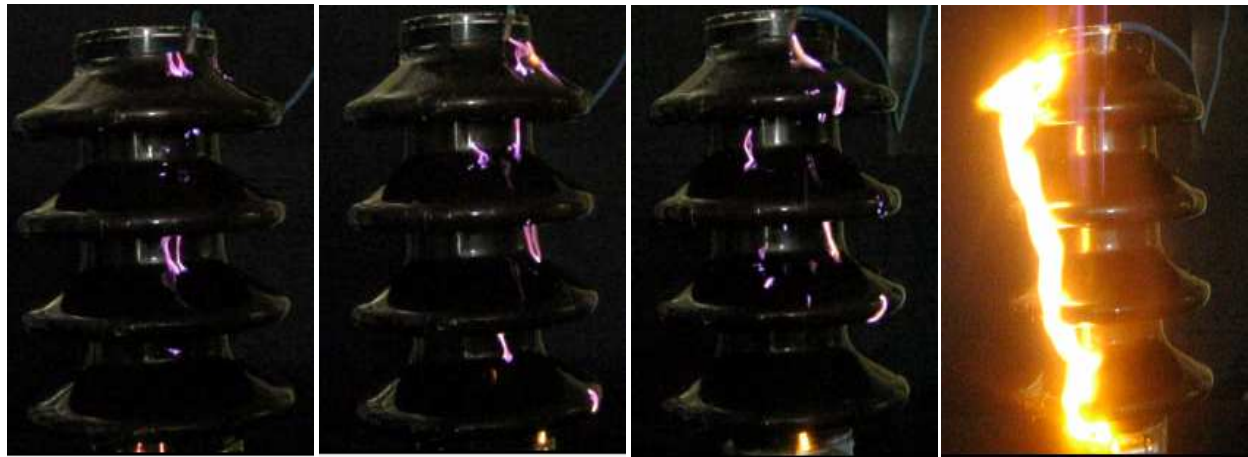
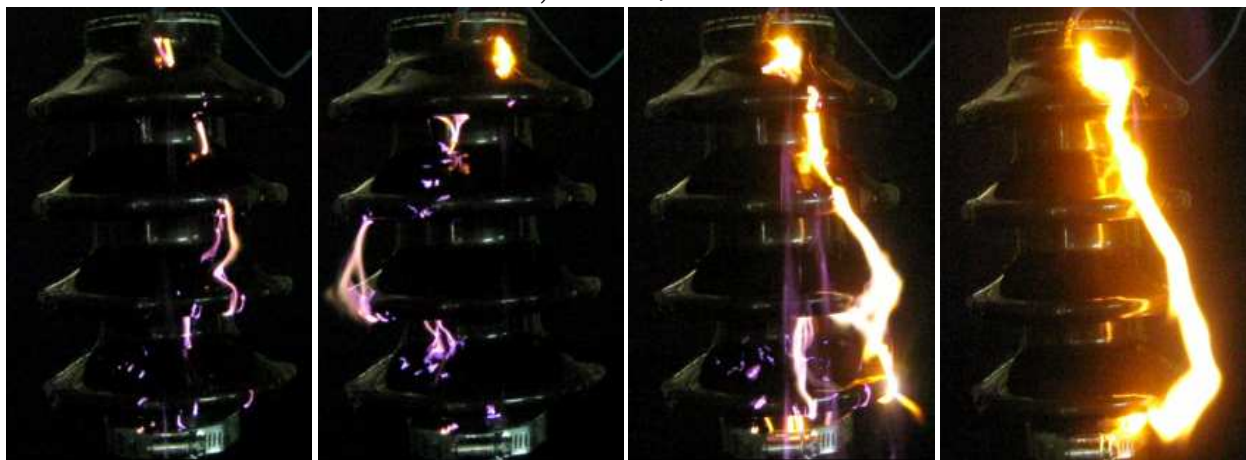
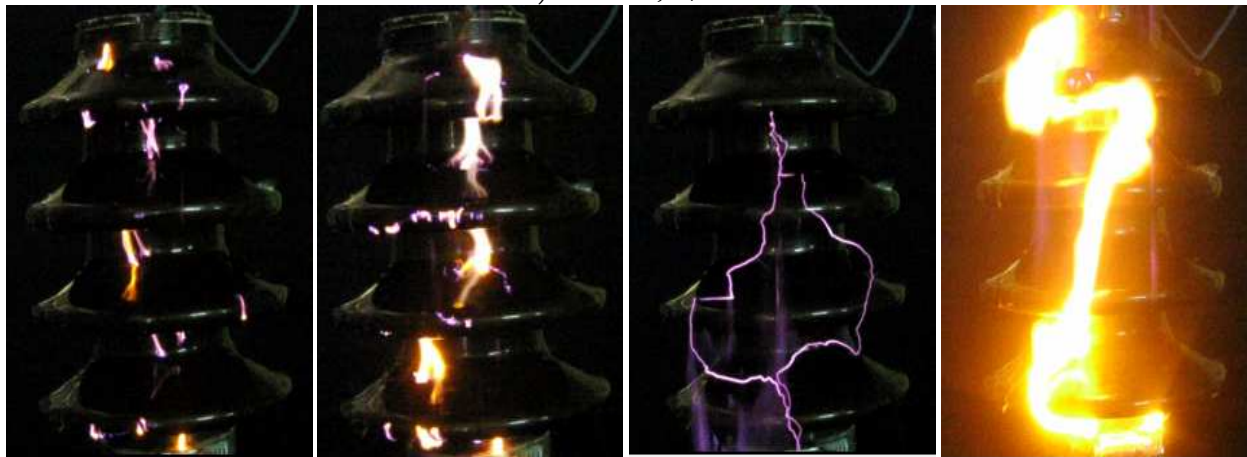


Fig. 4.23 tension de contournement en fonction du rapport des conductivités (33% - 66%)

Dans la figure (4.25) on utilise la répartition transversale périodique. On remarque que la tension de contournement décroît suivant une allure pratiquement hyperbolique avec l'augmentation du rapport des conductivités de la pollution indépendamment de la surface polluée. La rigidité diélectrique diminue au fur et à mesure que les conductivités de faces polluées de celle-ci augmentent. Le système est moins rigide lorsque toutes les faces de l'isolateur sont polluées. Le maximum de la tension de contournement est obtenu lorsque la surface de l'isolateur sur la face de l'électrode HT est polluée quel que soit le degré de pollution de l'isolateur. le développement de l'arc dans ce cas est montré dans la figure 4.26.

a) $\sigma = 11,5 / 0$ b) $\sigma = 11,5 / 3$ c) $\sigma = 11,5 / 5$ **Fig. 4.24** Contournement de l'isolateur (33% - 66%)

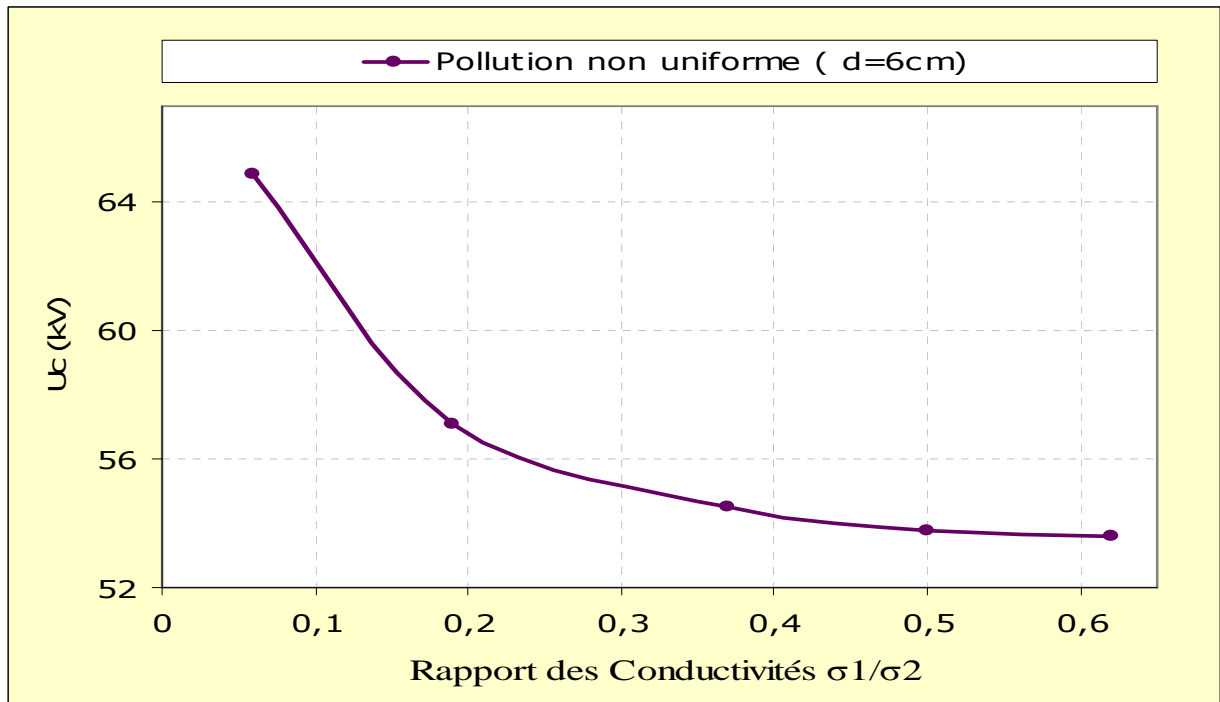
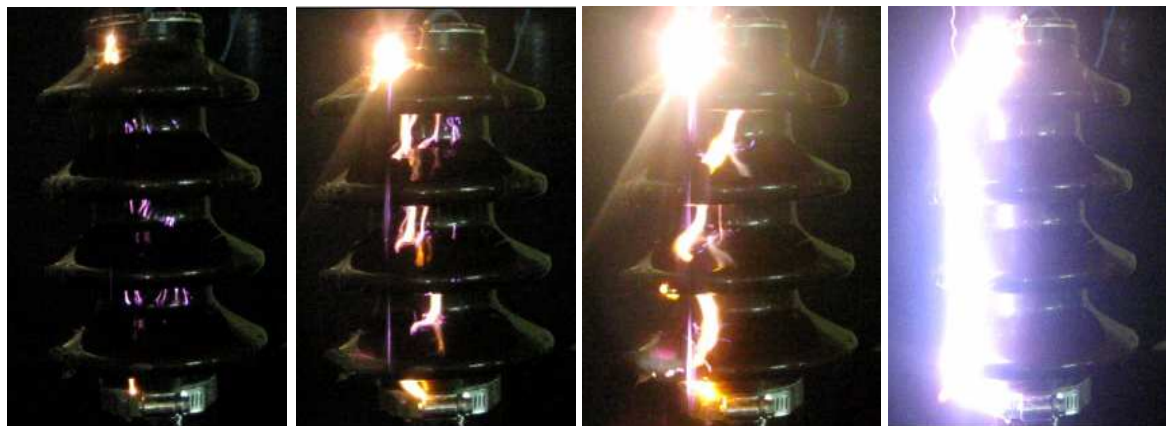
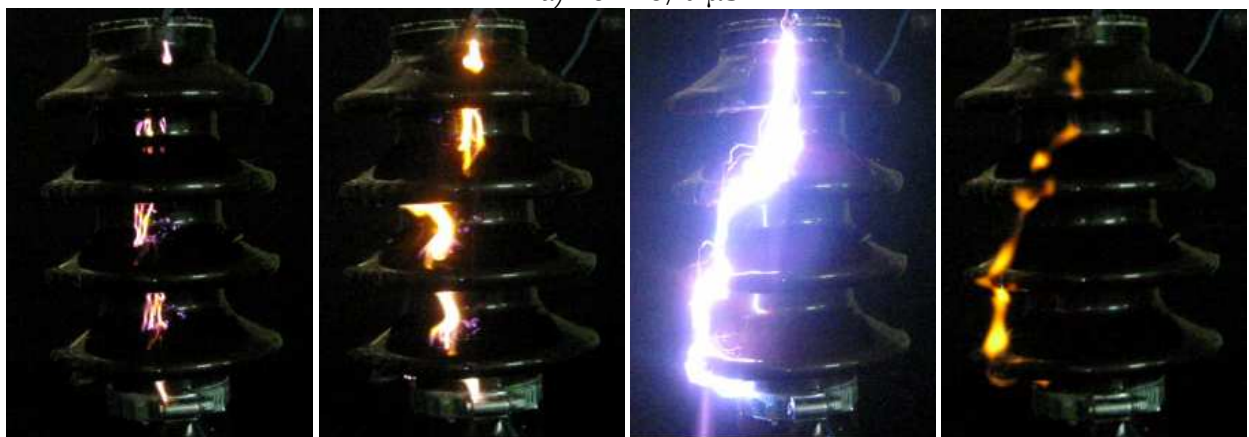


Fig. 4.25 Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle (répartition transversale)



a) $\sigma = 8/0 \mu S$



b) $\sigma = 8/3 \mu S$

Fig. 4.26 Contournement de l'isolateur (répartition transversale)

4.8. Conclusion

Il résulte de cette étude que la tension de contournement des isolateurs électriques est très influencée par le mode de répartition de la pollution et la largeur occupée par celle-ci. La rigidité diélectrique de l'isolateur est plus faible en pollution uniforme que celle obtenue en pollution non-uniforme.

Les tensions de contournement les plus faibles donc les plus dangereuses sont enregistrées en pollution uniforme, bien que cette dernière soit loin de l'être à cause du vent, de la pluie et du champ électrique.

Par contre le nombre d'arcs électriques parallèles croît avec l'accroissement de la largeur polluée. Ce dernier est limité par le courant délivré par la source ce qui nous a imposé de limiter la largeur de la surface polluée, la conductivité de la pollution et la distance inter électrodes.

Chapitre 05

DISTRIBUTION DE LA TENSION ET DU CHAMP ELECTRIQUE LE LONG DE L'ISOLATEUR SOUS CONDITION DE POLLUTION

5.1. Introduction

L'objectif principal de cette simulation est de calculer la distribution du potentiel et du champ électrique dans un isolateur réel en porcelaine avec 4 ailettes. A cet effet la méthode des éléments finis est choisie car elle est jugée la mieux adaptée au problème posé.

Dans le présent travail le logiciel FEMLAB version 3.4 sera utilisé dans toutes les simulations présentées. Son application couvre généralement un domaine plus vaste que le problème étudié et dans certains cas, il ne répond pas à toutes les exigences spécifiques désirées.

5.2. Description du logiciel

La méthode des éléments finis (MEF) est une technique d'analyse numérique utilisée pour obtenir les solutions approximatives de la distribution de tension et du champ électrique pour un grand nombre de problèmes. Le besoin des méthodes numériques résulte du fait que la plupart des solutions analytiques des problèmes pratiques de la technologie n'existent pas. Tandis que les équations et les conditions limites pour ces problèmes peuvent habituellement être écrites.

L'idée d'élément fini est de diviser le problème en un grand nombre de région, chacune avec une géométrie simple par exemple, triangle. Dans la méthode des éléments finis, l'espace d'intérêt est divisé en un nombre suffisant de petites régions (élément), dans les quelles des fonctions approximatives (habituellement des polynômes) sont employées pour représenter la grandeur inconnue [44–47].

La limitation sur le nombre d'équations qui pourraient être résolues a posé dans les premiers temps une restriction grave à l'analyse. Mais le développement des calculateurs numériques (ordinateur) a rendu possible la solution des systèmes de grand ordre. La méthode des éléments finis présente des avantages et des inconvénients. Parmi les avantages, on peut citer le traitement des géométries complexes ainsi que celui du grand nombre de modèles

mathématiques.

Pour les inconvénients, il y a lieu de signaler la complexité de mise en œuvre, le temps important nécessaire à l'exécution des données qui commence à disparaître avec le développement des techniques de programmation et la vitesse de plus en plus importante du matériel informatique [48, 49].

5.3. Etapes de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis peut être résumée par 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 (MEF) pour la conception et l'optimisation des composants électromagnétiques, comme le Femlab, Slim, Flux2D, Flux3D et Femm.

Dans la suite de ce travail, nous avons utilisé le FEMLAB version 3.4. Les étapes de calcul peuvent être résumées comme montré dans la figure 5.1 [48, 49]

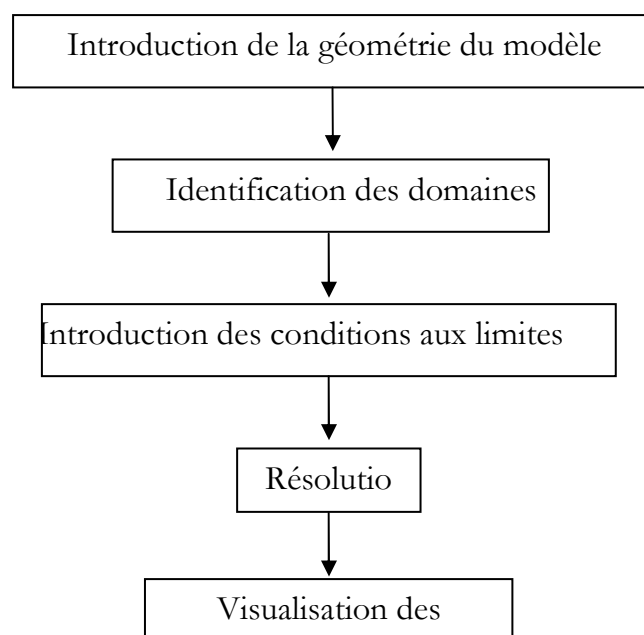


Fig. 5.1 Diagramme de différentes étapes de la méthode des éléments finis (FEMLAB)

5.4. Géométrie et caractéristiques dimensionnelles des isolateurs

Dans la présente simulation deux cas ont été considérés. Le premier cas concerne les simulations réalisées sur deux plaques en verre de forme rectangulaires (figure 5.2.a) dont les dimensions sont les suivantes : (longueur $D=24\text{cm}$, largeur $d=14\text{cm}$). Le second cas est un isolateur en porcelaine dont la taille totale est de 460mm environ. Le diamètre intérieur est de 70mm et celui des ailettes est de 138mm (figure 5.2.b) [42].

5.5. Résultats de simulations et discussion : Cas des plaques en verre

Les différents domaines du modèle étudié dans FEMLAB ont été identifiés en introduisant la constante diélectrique relative ϵ_r et la conductivité σ .

Les valeurs ϵ_r et σ des différents domaines de notre système sont résumés dans le tableau 5.1.

Domaine	Constante diélectrique relative ϵ_r	Conductivité σ
Electrodes	1	1.10^{20}
Le verre	4,6	110^{-14}
Air	1,0	1,0

Tableau 5.1. Valeurs de ϵ_r et σ des différents domaines (cas des plaques en verre)

La figure 5.3 représente les conditions aux limites, pour le cas étudié, nous avons pris comme conditions aux limites pour l'électrode HT un potentiel de 15 kV et celui de l'électrode de masse un potentiel 0 kV ou encore on peut choisir 'Terre' dans le logiciel.

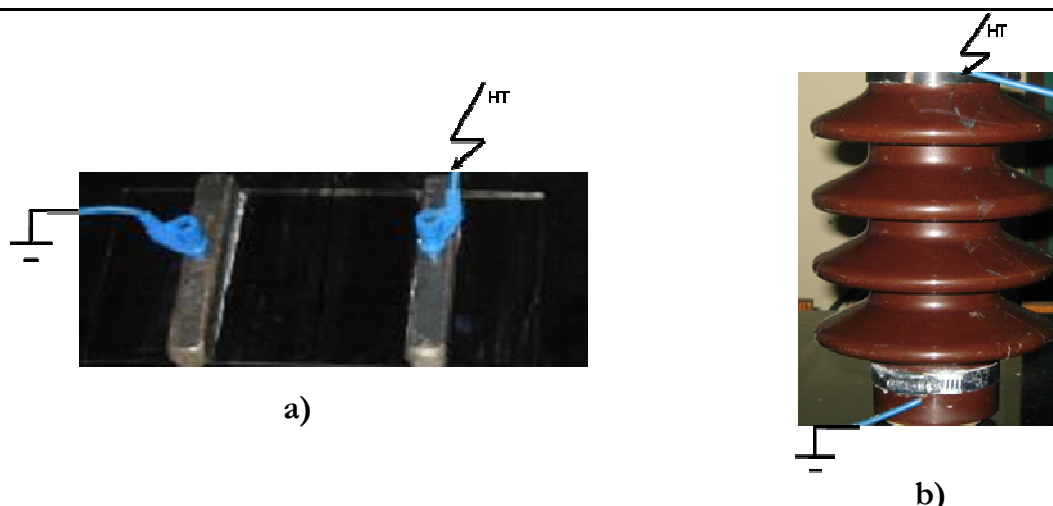


Fig. 5.2 Objets utilisés pour la simulation

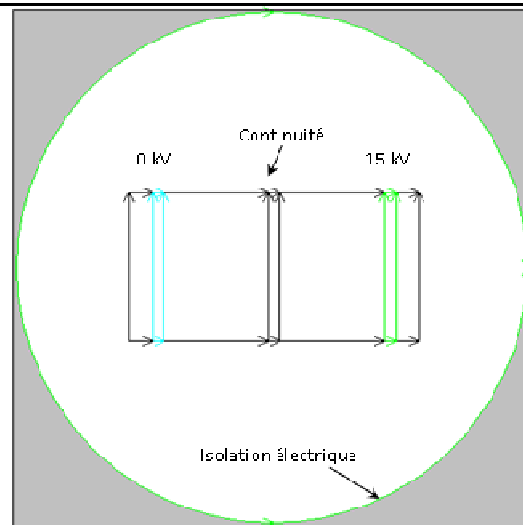


Fig. 4 .3 Les conditions aux limites utilisées

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 est aussi introduit pour but de comparaison.

5.5.1. Premier cas

Dans cette première investigation une couche uniforme de pollution de différentes conductivités est déposée sur la surface des plaques de verre. Une fois que tous les paramètres de ce modèle de calcul sont donnés et les conditions aux limites spécifiées on lance l'exécution du logiciel pour résoudre les équations différentielles régissant le phénomène. Les lignes équipotentielles obtenues dans cette investigation sont montrés dans la figure 5.5. On peut voir une nette différence entre le cas pollué et le cas sans pollution introduit pour but de comparaison par contre l'épaisseur de la couche de pollution semble ne pas avoir d'effet sur les équipotentielles. De plus il faut noter 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 sauf bien sur pour le cas sans pollution ou les valeurs nulles sont obtenues dès que l'on se rapproche de l'électrode du milieu

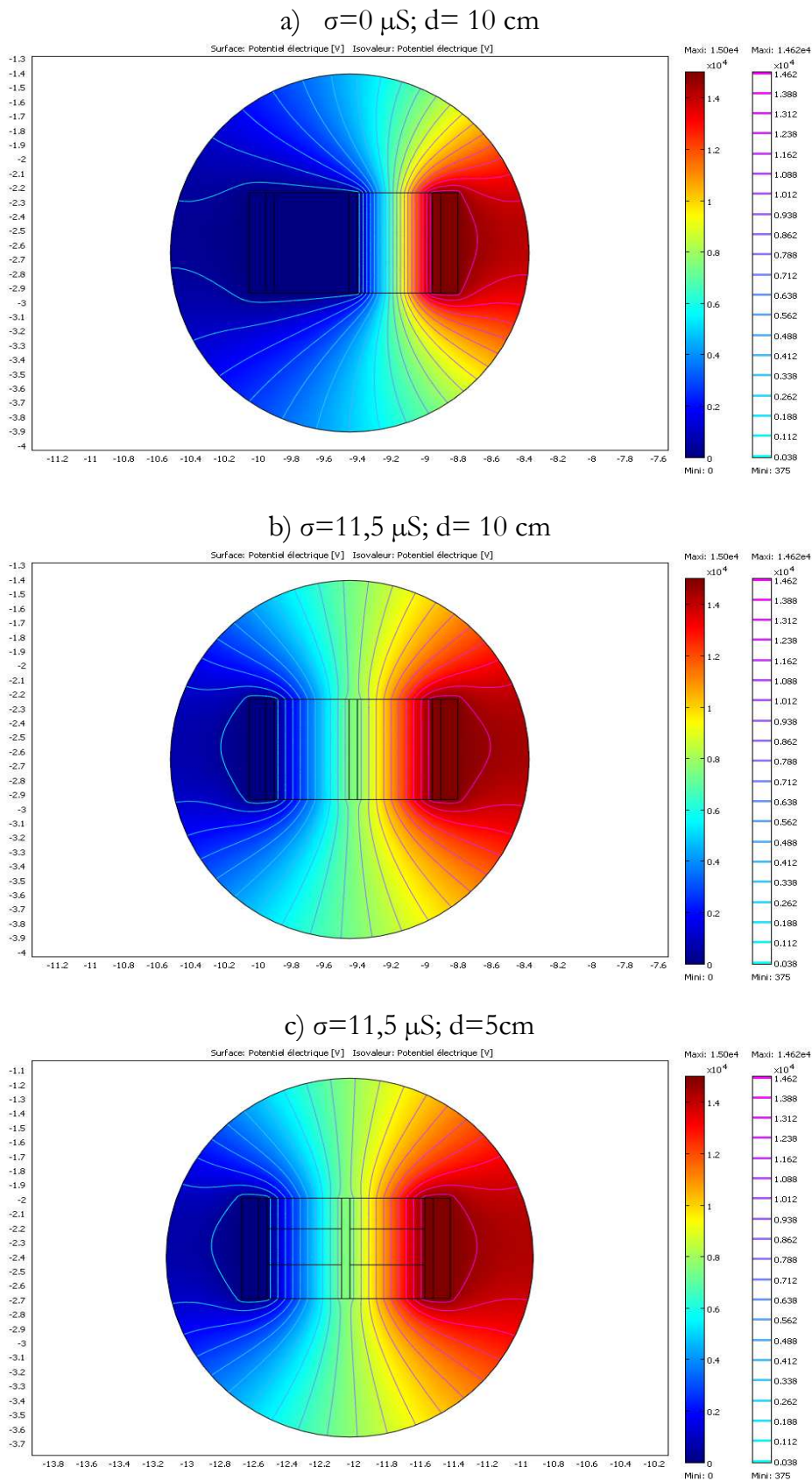


Fig. 5.4 Lignes équipotentielles (pollution uniforme)

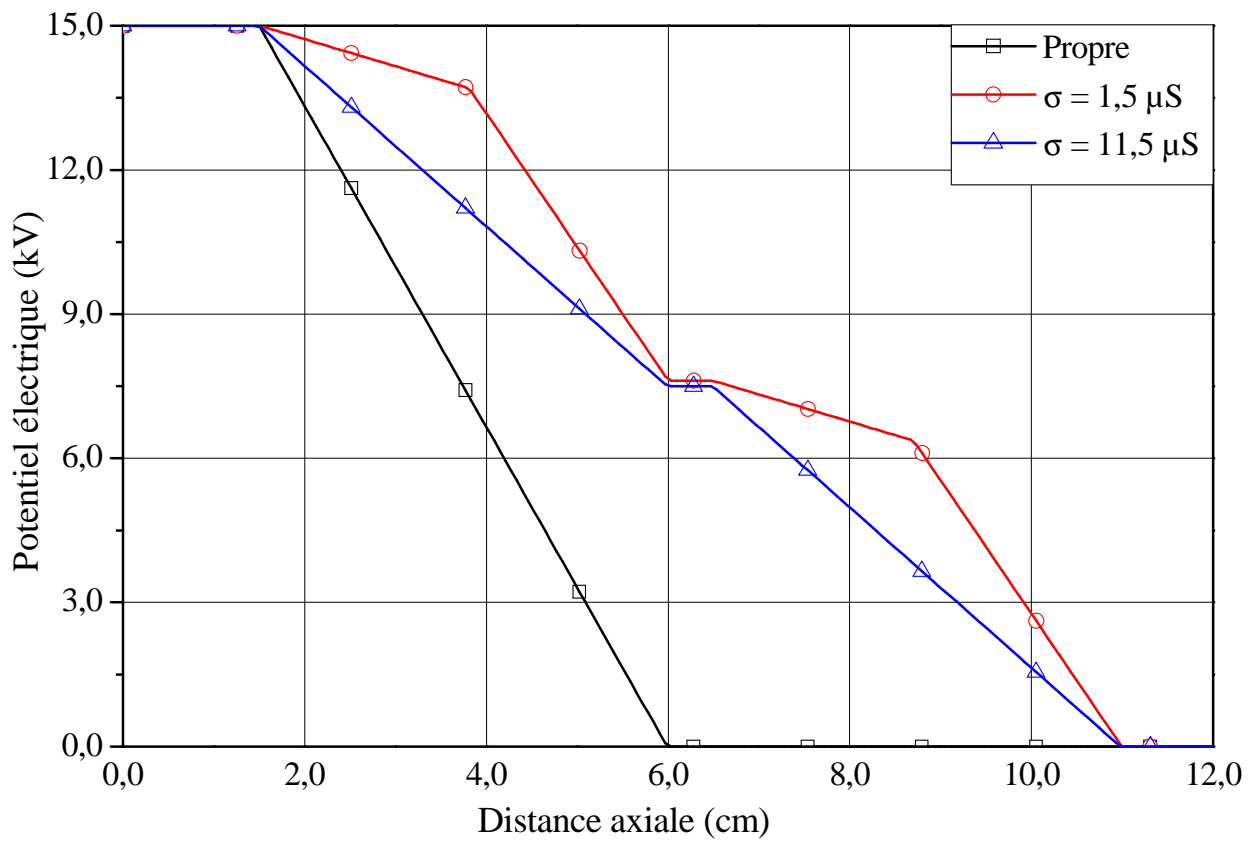


Fig. 5.5 Distribution de la tension pour différentes valeurs de σ

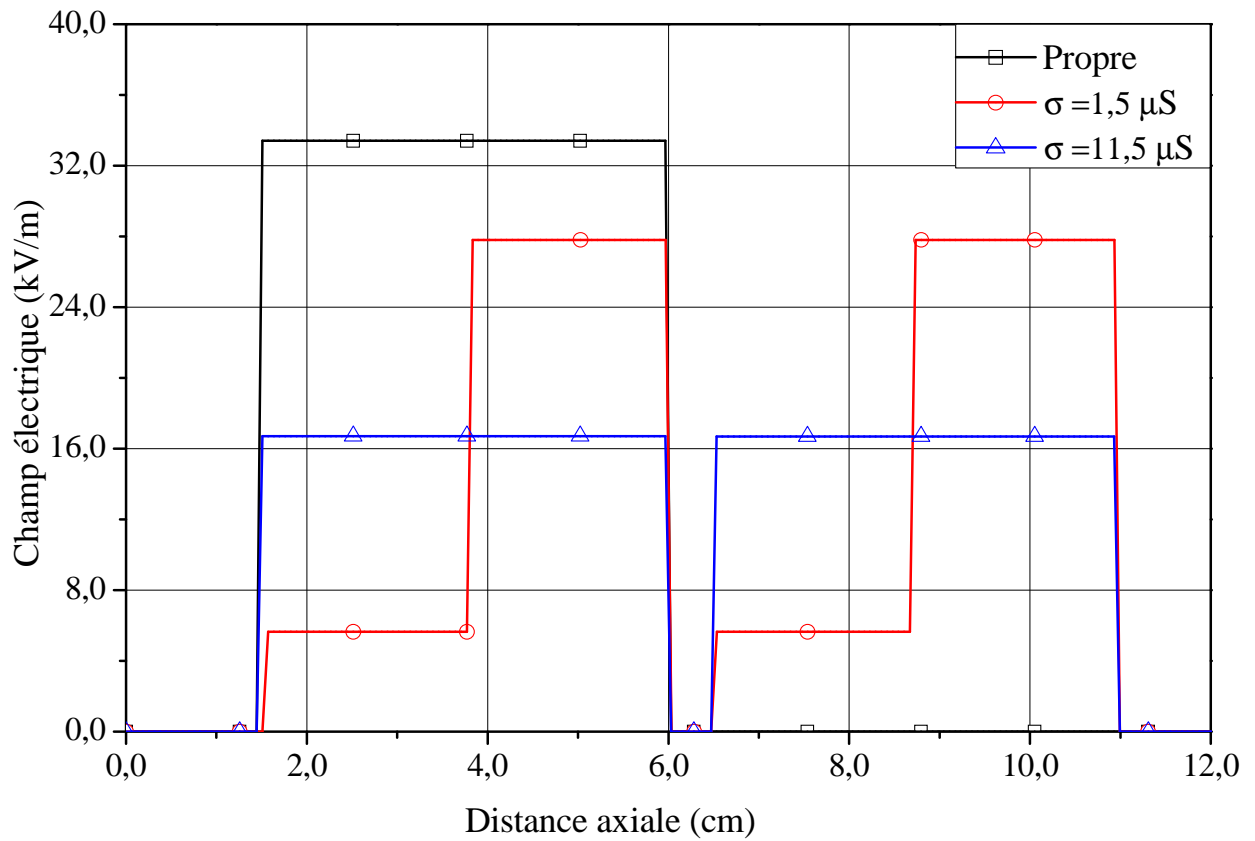


Fig. 5.6 Distribution du champ électrique pour différentes valeurs de σ

Nous notons que le champ électrique a atteint sa valeur maximale près de l'électrode haute tension. Cette valeur augmente près de l'électrode de la masse pour mettre à zéro.

En revanche il y a des sommets pendant variation du champ, ils correspondent aux fins des ailettes ou épaisseur est très petite.

5.5.2. Deuxième cas

Afin de comprendre mieux, une deuxième série de simulations a été entamée. Elle consiste à une distribution de pollution non uniforme, on fixe la conductivité $\sigma_2 = 11,5\mu\text{S}$ et on varie σ_1 avec différents valeurs puis on inverse le cas en fixant σ_1 et en faisant varier σ_2 . Les résultats sont montrés dans les figures 5.7 pour le cas ($\sigma_1/\sigma_2=0/11,5 \mu\text{S}$; $\sigma_1/\sigma_2=11,5/0 \mu\text{S}$) et dans la figure 5.8 dans le cas ($\sigma_1/\sigma_2=4/11,5 \mu\text{S}$; $\sigma_1/\sigma_2=11,5/4 \mu\text{S}$) respectivement.

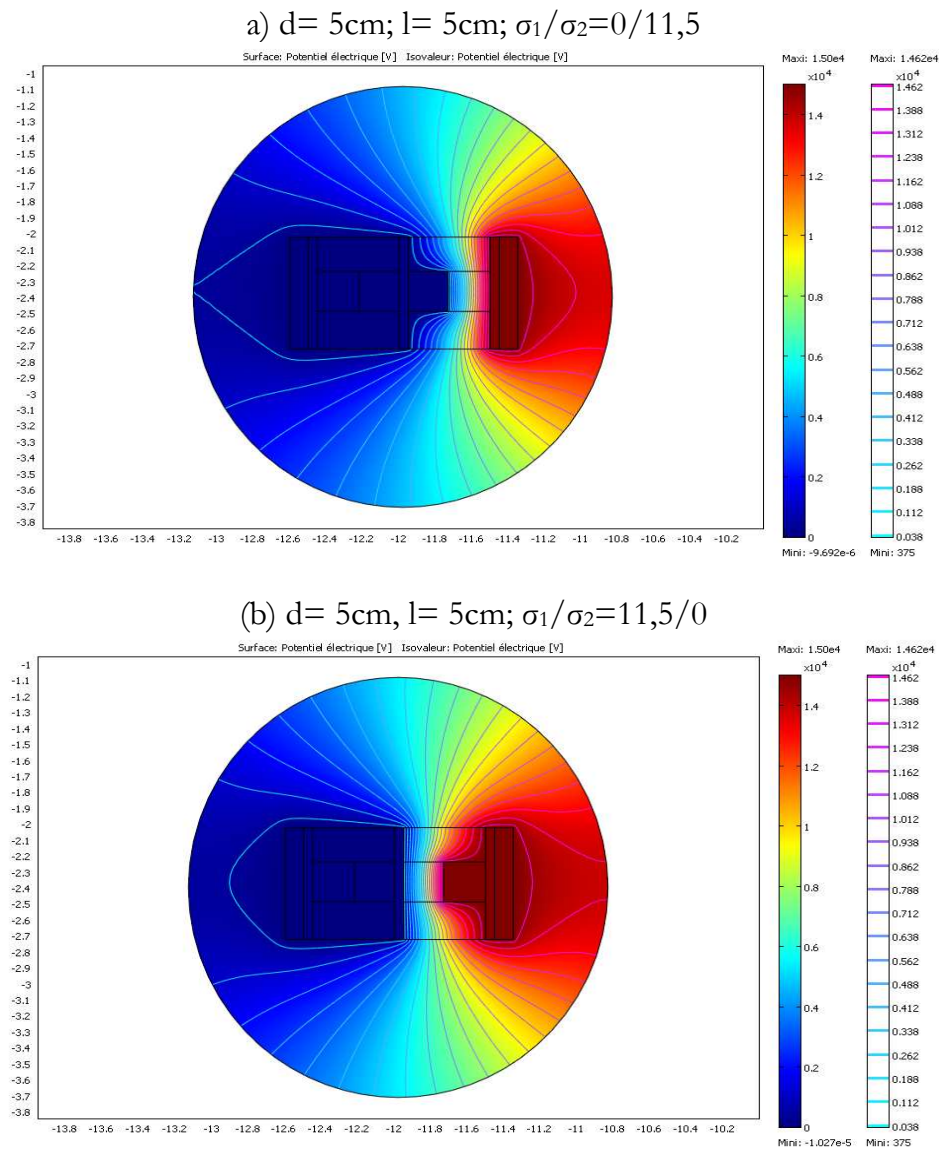


Fig. 5.7 Lignes équipotentielles (Pollution longitudinale inverse)

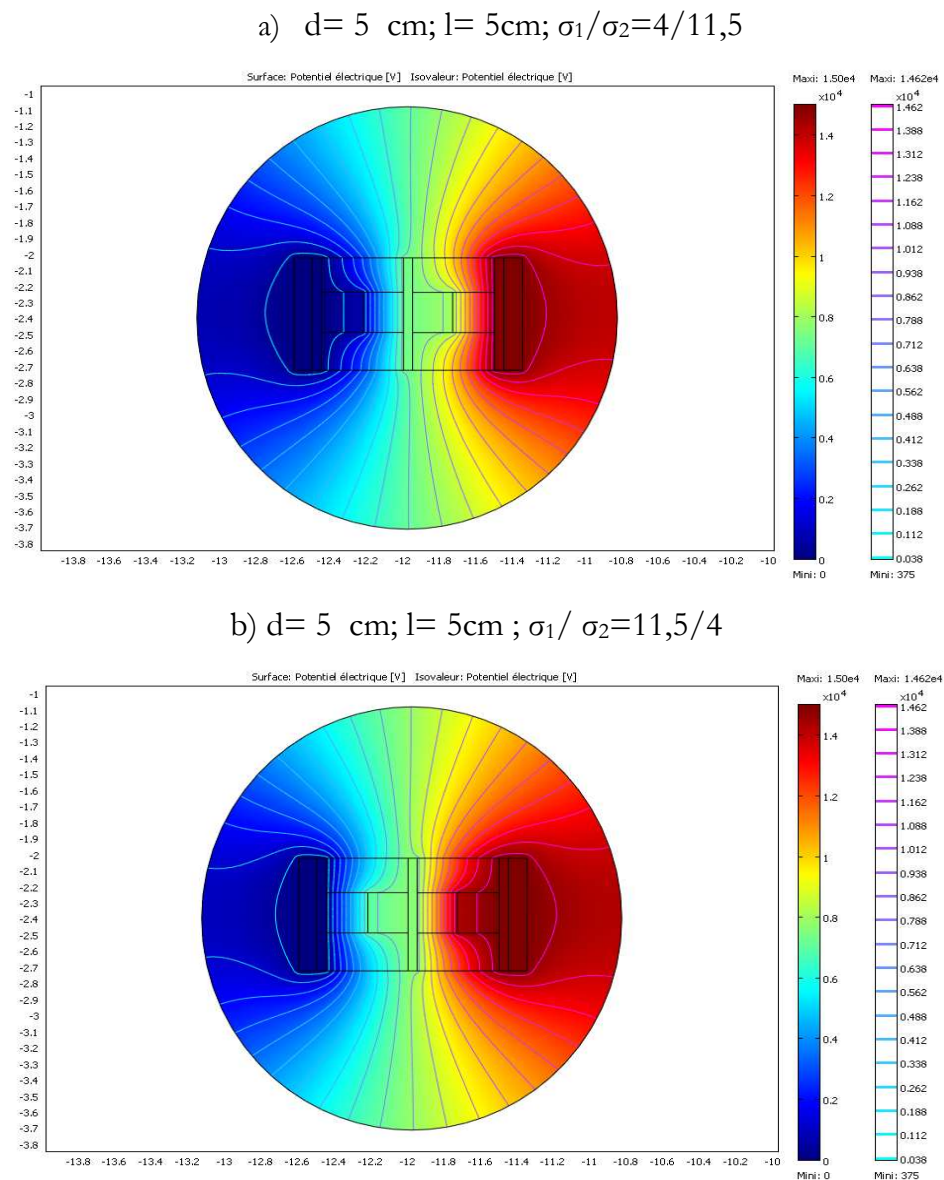


Fig. 5.8 Lignes équipotentielles (Pollution longitudinale inverse (non-uniforme))

Les résultats obtenus montrent que la distribution de tension n'est pas uniforme (figure 5.9) pour un dépôt polluant sur la surface de l'isolateur. 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 répartition du champ électrique est illustrée dans la figure 5.10.

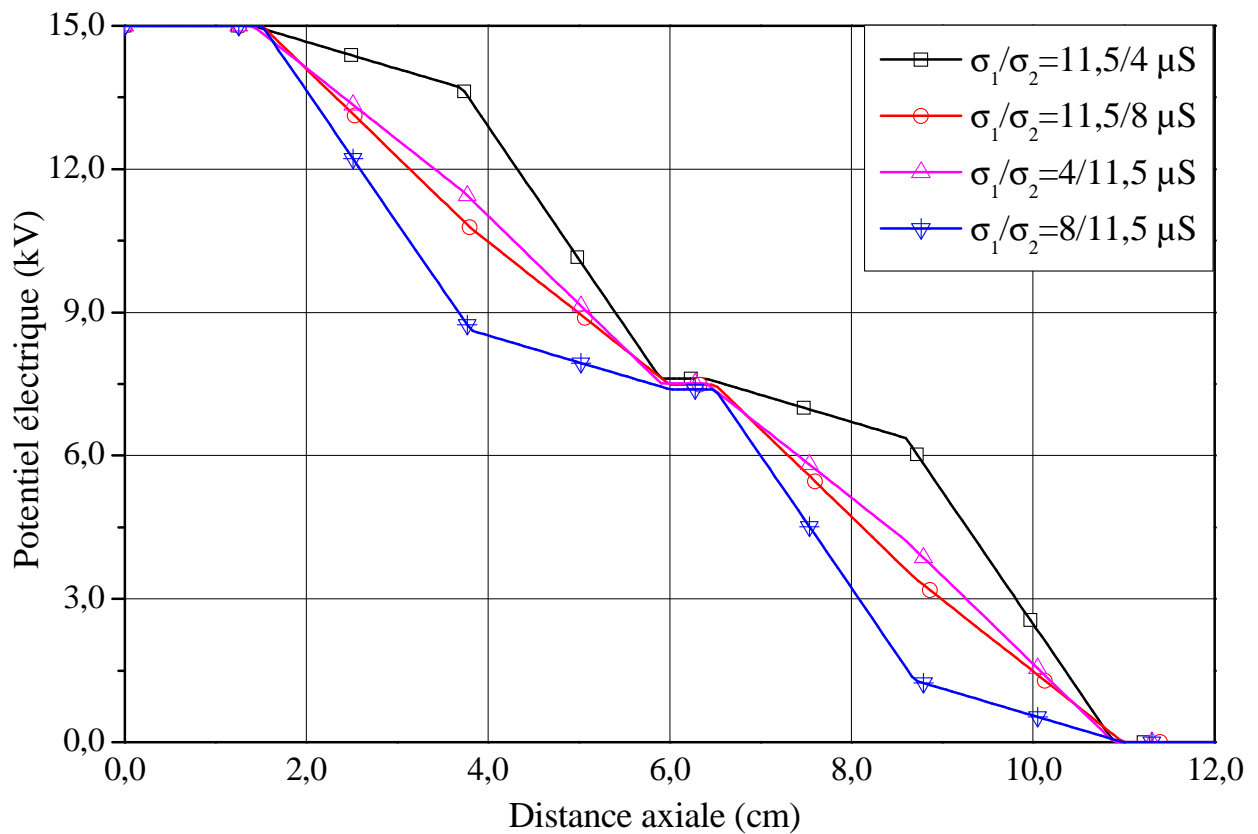


Fig. 5.9 Distribution de la tension pour différentes valeurs de σ (non uniforme)

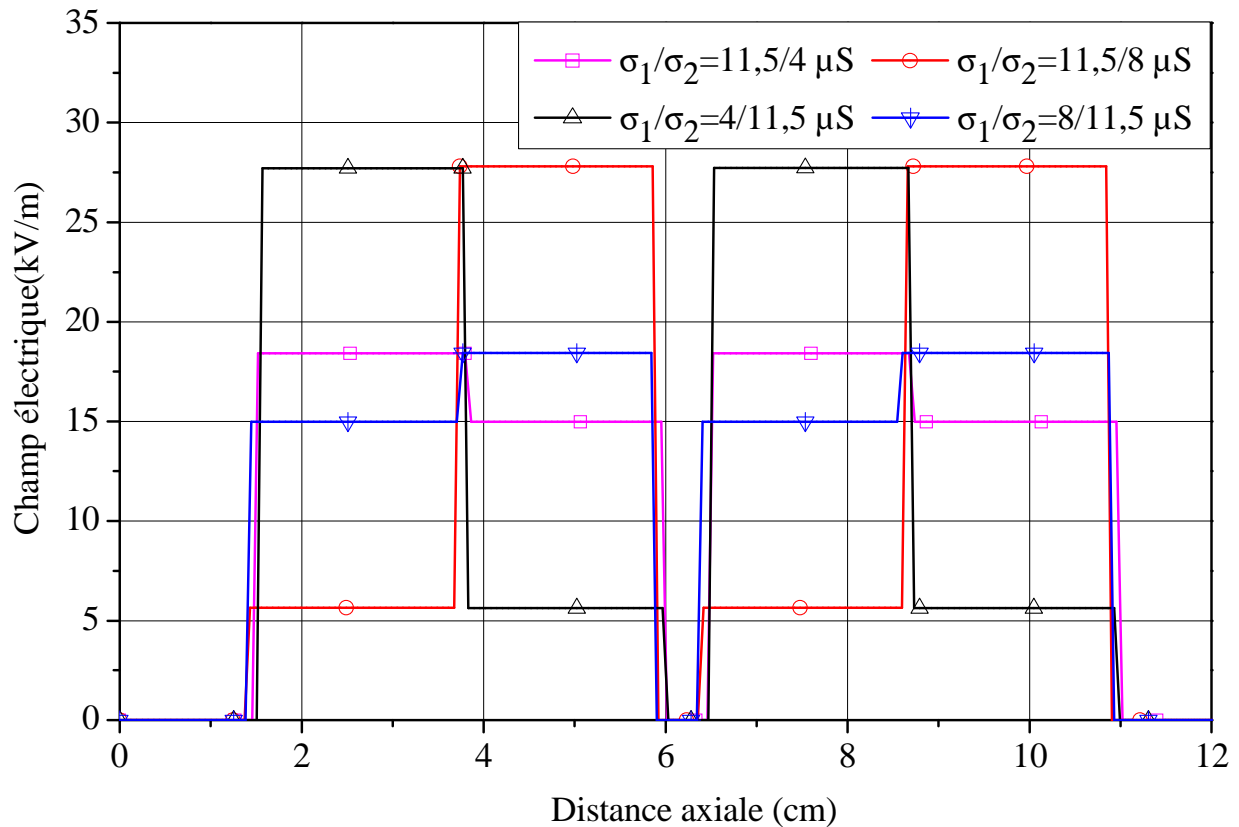


Fig. 5.10 Distribution du champ pour différentes valeurs de σ (non uniforme)

5.5.3. Troisième cas

Une dernière série de simulation a été entamée. Elle consiste à réaliser une distribution de pollution non-uniforme, on fixe $\sigma_2 = 11.5\mu\text{S}$ et on varie σ_1 avec différents valeur

Les résultats sont montrés dans les figures 5.11 et 5.12 où on présente la distribution de potentiel obtenue

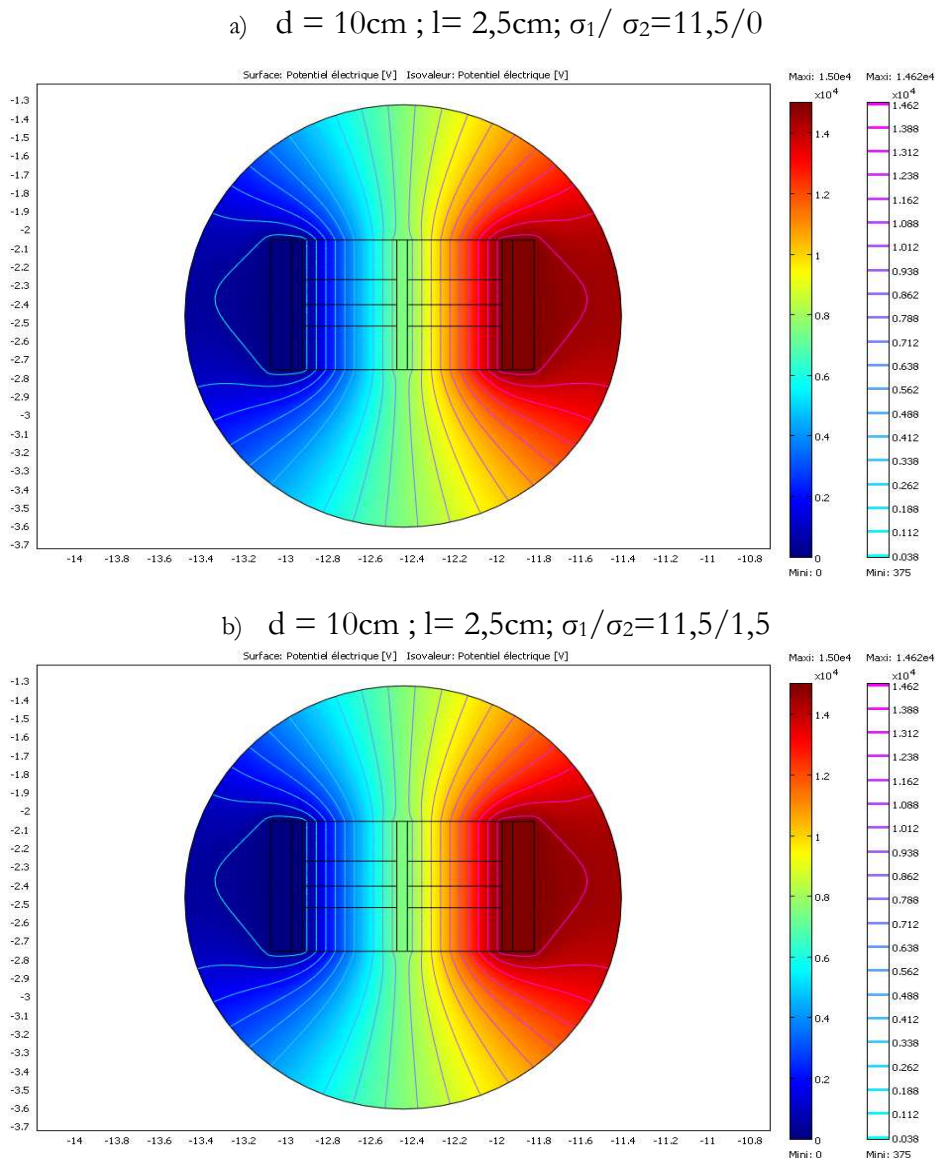


Fig. 5.11 Lignes équipotentiellles (pollution transversale en inverse)

Les résultats obtenus montrent que la distribution de tension n'est pas uniforme pour un dépôt polluant sur la surface de l'isolateur. 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 fig.5.12 montre la distribution de la tension pour les différentes valeurs de σ

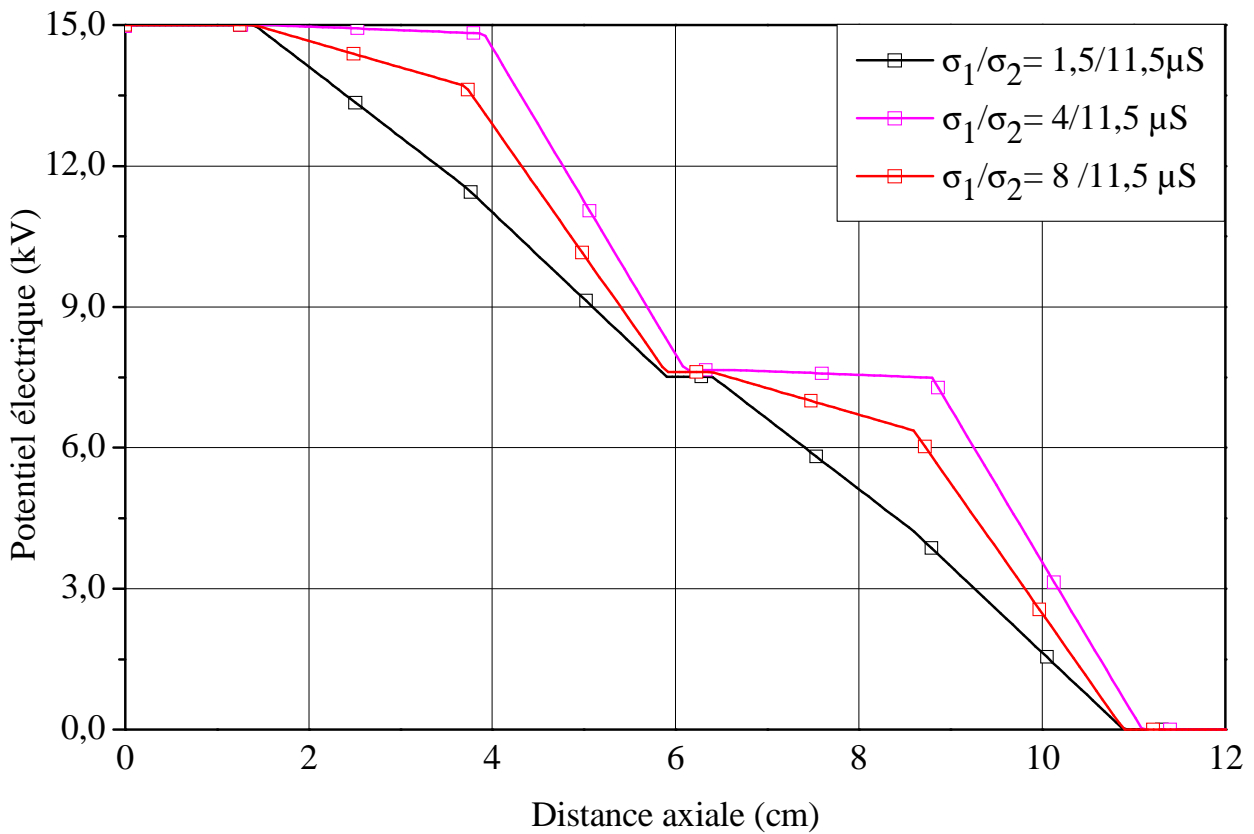


Fig. 5.12 Distribution du potentiel électrique pour différentes valeurs de σ (répartition transversale)

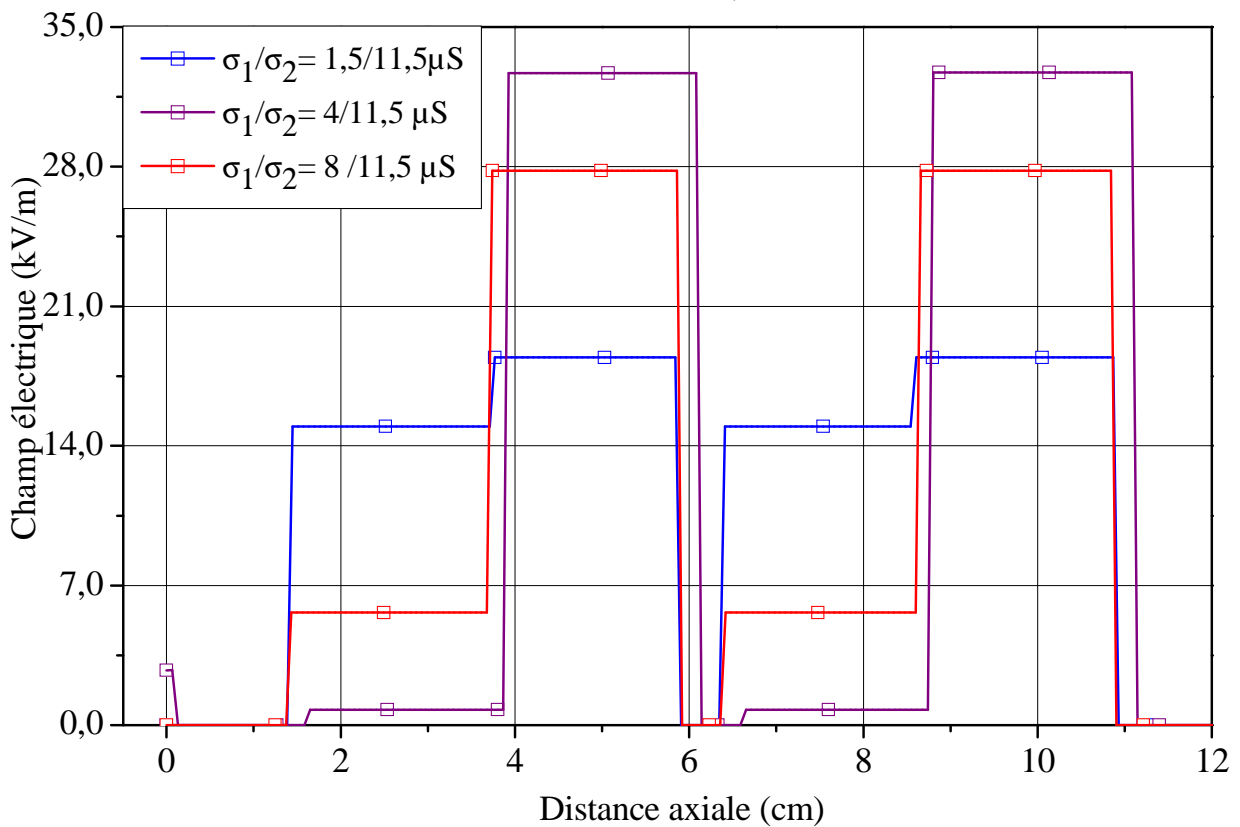


Fig. 5.13 Distribution du champ pour différentes valeurs de σ (répartition transversale)

5.6. Résultats de simulations et discussion : Cas de l'isolateur en porcelaine

5.6.1. Études de la distribution de tension dans les conditions propres

Les différents domaines du modèle étudié dans FEMLAB ont été identifiés en introduisant la constante diélectrique relative ϵ_r et la conductivité σ . Les valeurs ϵ_r et σ des différents domaines de notre système sont résumés dans le tableau 5.2.

Domaine	Constante diélectrique relative ϵ_r	Conductivité σ
Electrodes	1,0	1.10^{20}
Porcelaine	6,0	0,044
Air	1,0	1,0

Tableau 5.2. Valeurs de ϵ_r et σ des différents domaines (cas de l'isolateur en porcelaine)

La figure 5.14 représente les conditions aux limites, pour le cas étudié, nous avons pris comme conditions aux limites pour l'électrode HT un potentiel de 40 kV et celui de l'électrode de masse un potentiel de 0 kV ou encore on peut choisir 'Terre' dans le logiciel.

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 seront utilisées. Le cas sans pollution est aussi introduit pour but de comparaison.

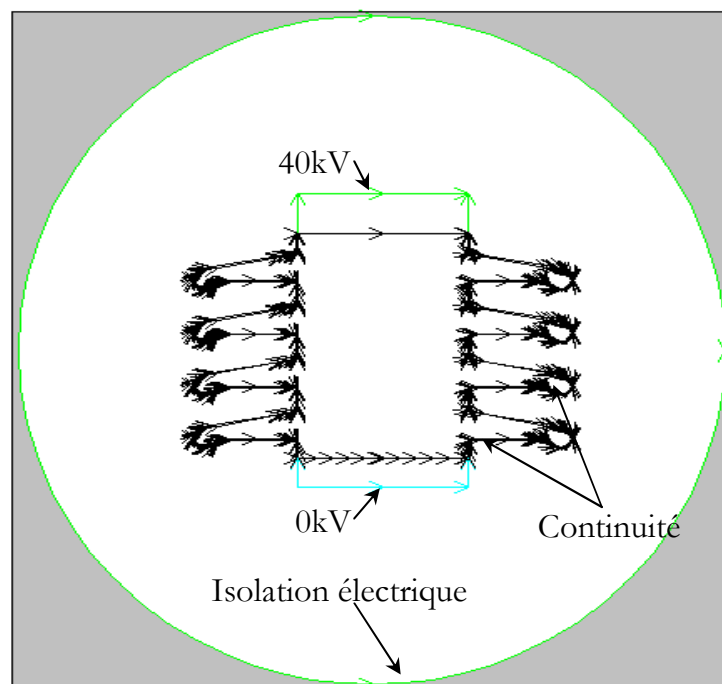


Fig. 5.14 Conditions aux limites de l'isolateur

La figure 5.15 montre le maillage obtenu pour un isolateur propre et la figure 5.16 montre les résultats de simulation pour les lignes équipotentielles. 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

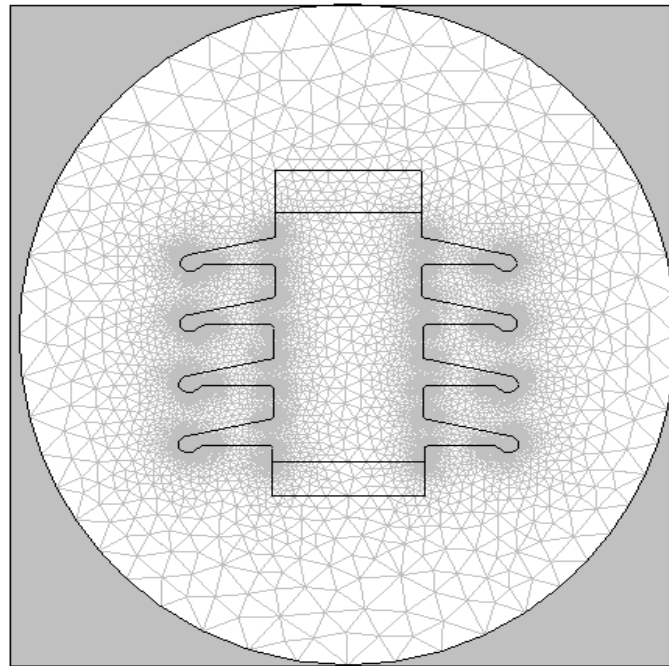


Fig. 5.15 Maillage obtenu pour l'isolateur complet

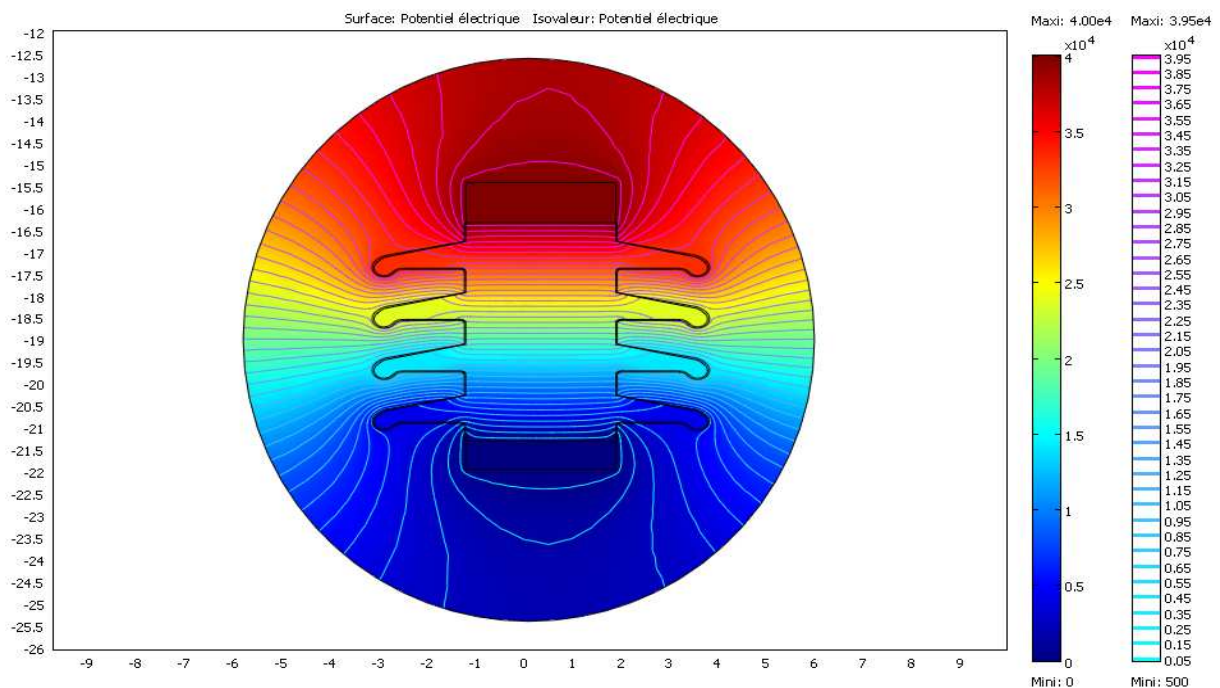


Fig. 5.16 Présentation des lignes équipotentielles

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

5.6.2.1. Première investigation

Dans cette première investigation une couche de pollution uniforme ayant une conductivité égale à $1,5\mu\text{S}$ est appliquée à la surface de l'isolateur. Les résultats sont montrés dans les figures 5.17 et 5.18. Dans la figure 5.17 on présente la distribution des lignes équipotentielles où peut remarquer qu'un changement minime en comparaison avec le cas sans pollution (figure 5.16). Cette différence est plus clair en examinant les courbes des la figure 5.18 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 contrait 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 5.19.

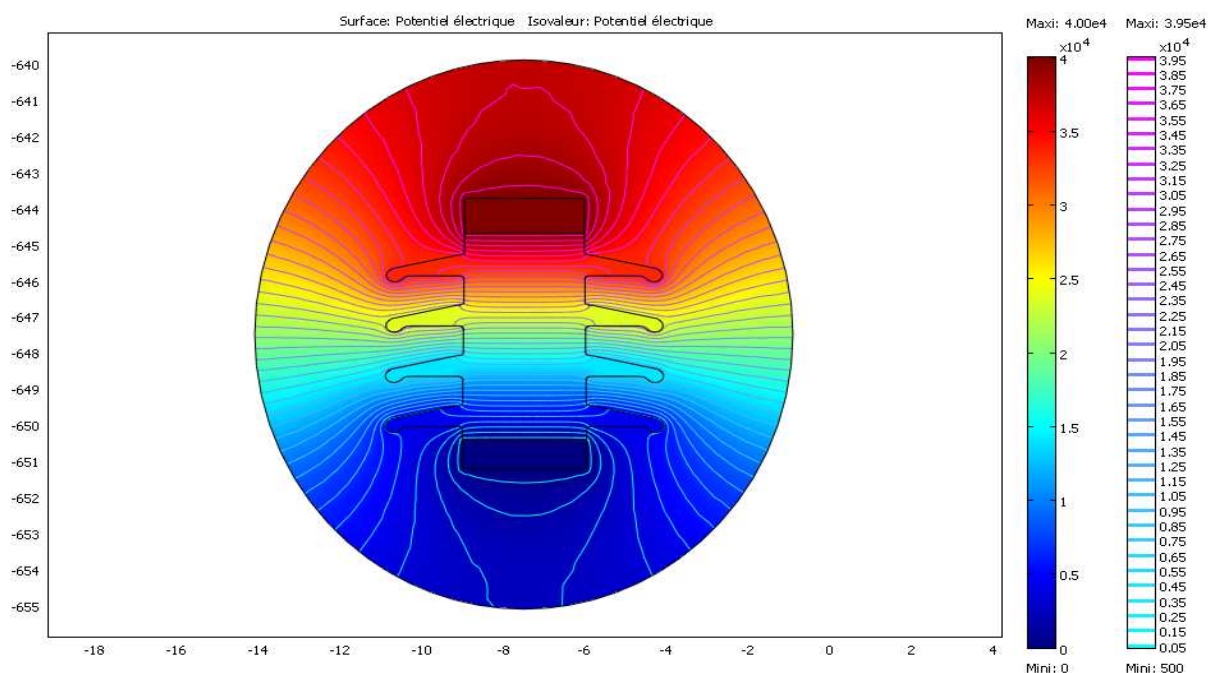


Fig. 5.17 Distribution de la tension pour une conductivité ($\sigma = 1,5\mu\text{S}$)

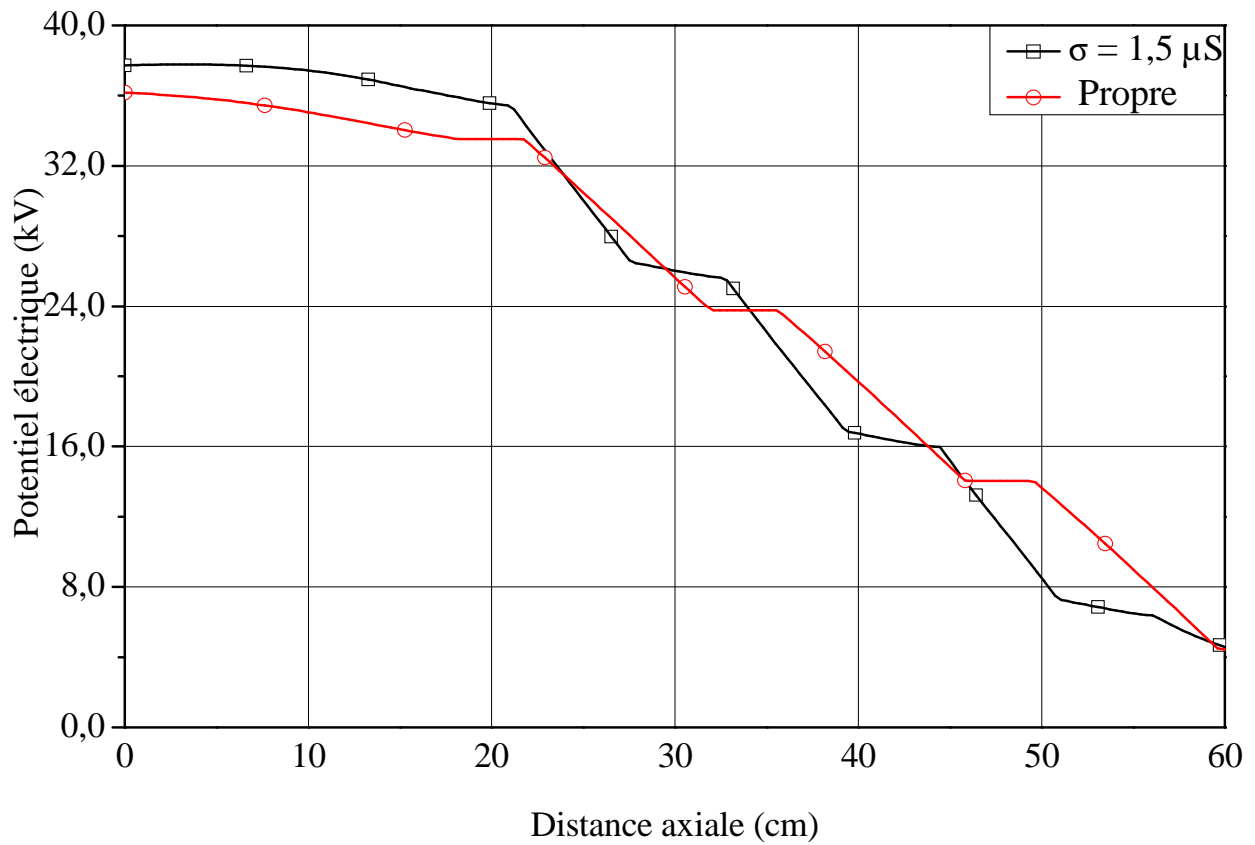


Fig.5.18 Distribution de la tension pour les différentes valeurs de σ (uniforme)

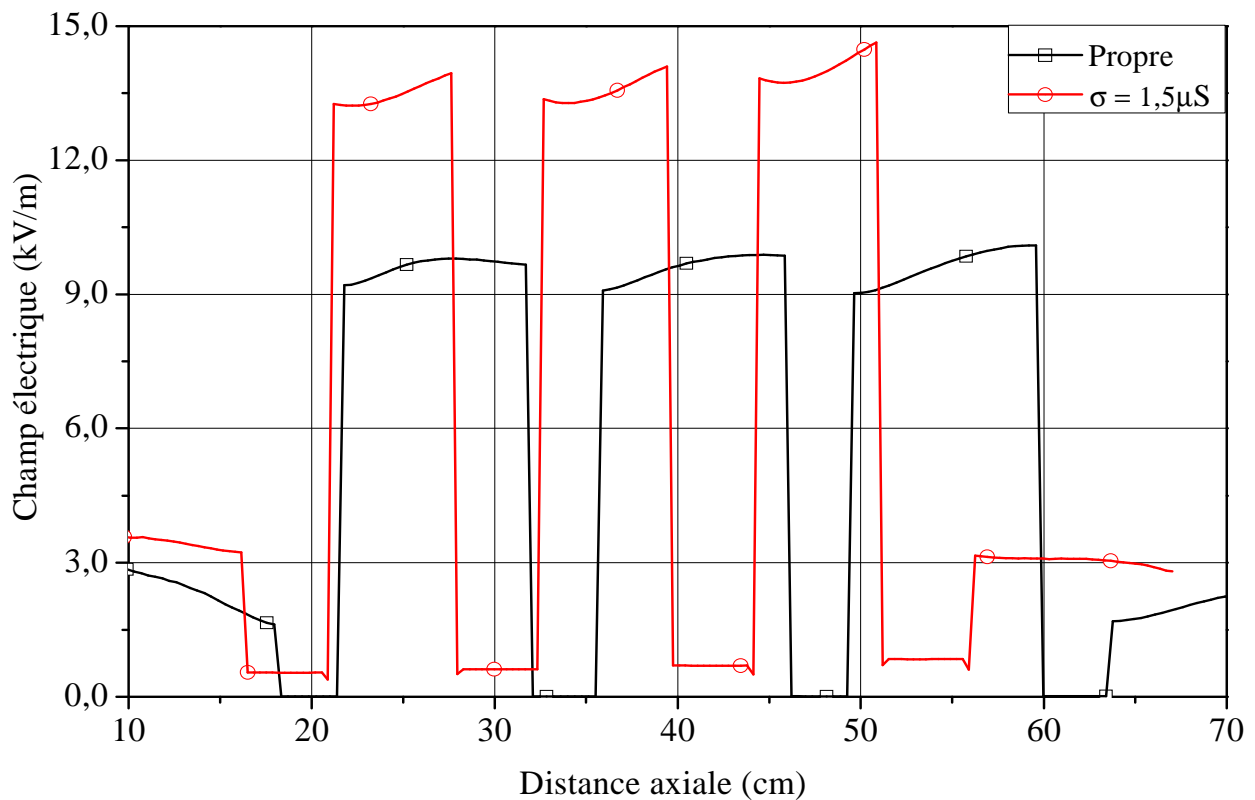


Fig.5.19 Distribution du champ électrique pour les différentes valeurs de σ (uniforme)

Pour mieux élucider l'effet de la conductivité. Les simulations sont répétées pour plusieurs valeurs et les résultats sont montrés dans la fig. 5.20 pour la distribution de la tension et la fig.5.21 pour la distribution du champ électrique. Il est clair que la variation de la conductivité conduit à des répartitions non-uniformes. Le champ électrique présente des sommets pendant sa variation, ils correspondent aux fins des ailettes.

5.6.2.2. *Deuxième investigation*

Dans le but de comprendre mieux l'effet de la couche de pollution, une deuxième série de simulation a été entamée. Elle consiste réaliser une distribution non-uniforme de la couche de pollution en fixant la valeur de la conductivité sur la face supérieure de l'ailette à $\sigma_1 = 11,5\mu\text{S}$ et en faisant varier celle de la face inférieure σ_2 . Les résultats dans ce cas sont montrés dans les figures 5.22 où on présente la distribution des lignes équipotentiels. Les résultats obtenus montrent que la distribution de tension n'est pas uniforme pour un dépôt polluant sur la surface de l'isolateur. 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.

D'autres cas de couche de pollution non-uniforme ont été aussi étudiés il s'agit du cas de pollution 50%-50% où les deux ailettes supérieures ont une conductivité notée σ_1 que l'on fixe à $11,5 \mu\text{S}$ et celle des deux ailettes inférieures notée σ_2 que l'on fixe à $0 \mu\text{S}$ puis à $3\mu\text{S}$. Les résultats de cette investigation sont montrés dans la figure 5.23 et montrent, de la même manière que la pollution affecte la distribution du potentiel. Le dernier cas que l'on présente est le cas d'une couche de pollution répartie en 33%-67% c'est dire une couche de pollution de valeur égale à $11,5 \mu\text{S}$ fixe est appliquée sur l'ailette supérieure et une autre de valeurs 0 puis $5\mu\text{S}$ est appliquée sur les trois ailettes inférieure. La distribution du potentiel obtenue dans ce cas est montrée dans la figure 5.24. La distribution axiale du potentiel et du champ électrique pour les cas de couche de pollution sont représentées dans les figure 5.25 et 5.26 respectivement. En examinant ces courbes on peut facilement voir une nette influence de la conductivité de la couche de pollution ainsi que que la manière avec laquelle cette couche se répartie sur la surface de l'isolateur. On peut aussi voir que le champ électrique présente des sommets correspondant aux ailettes.

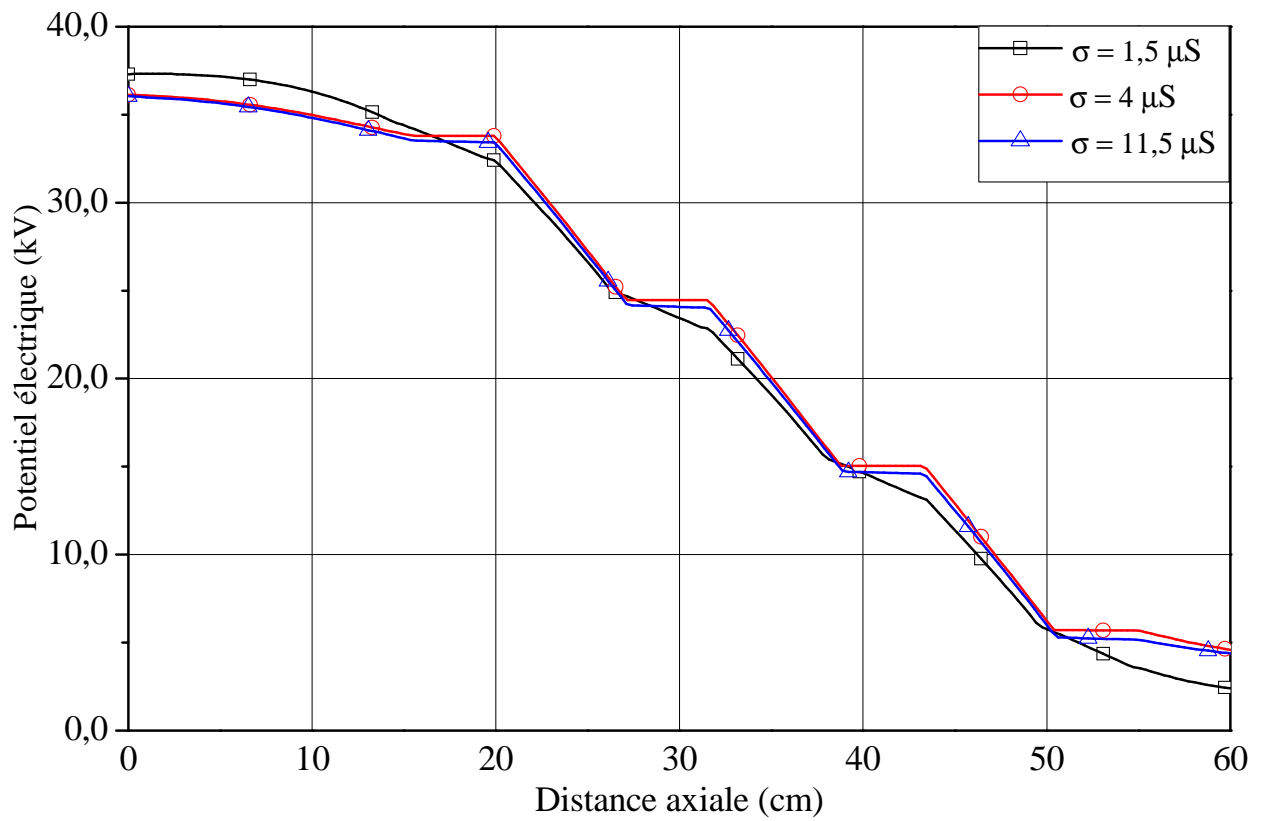


Fig.5.20 Distribution de la tension pour les différentes valeurs de σ (uniforme)

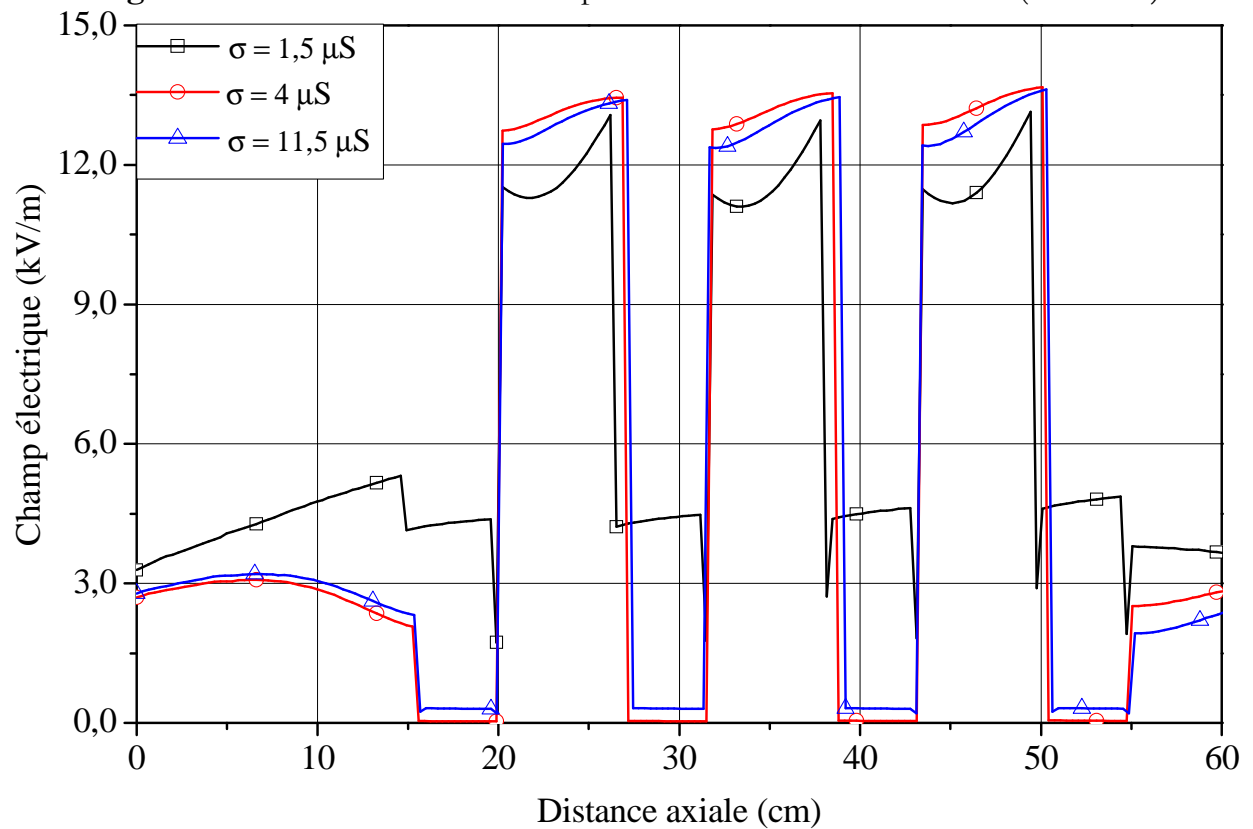


Fig.5.21 Distribution du champ électrique pour les différentes valeurs de σ (uniforme)

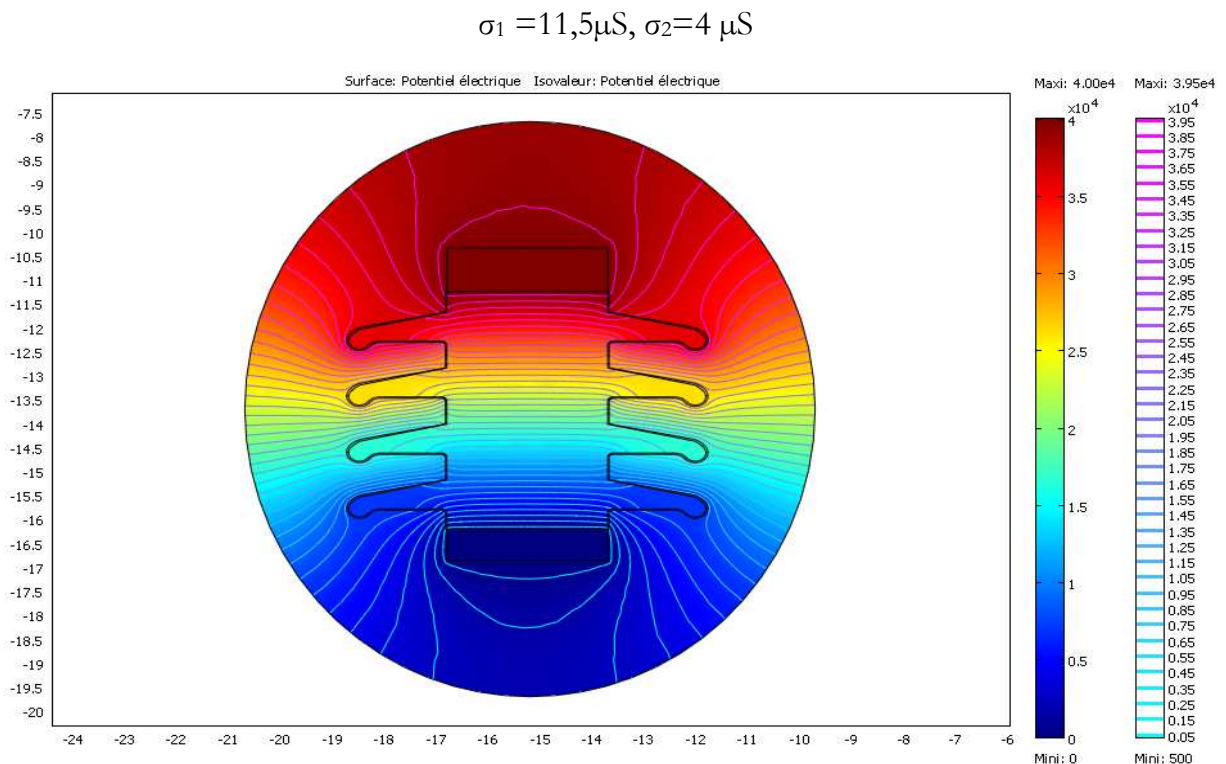
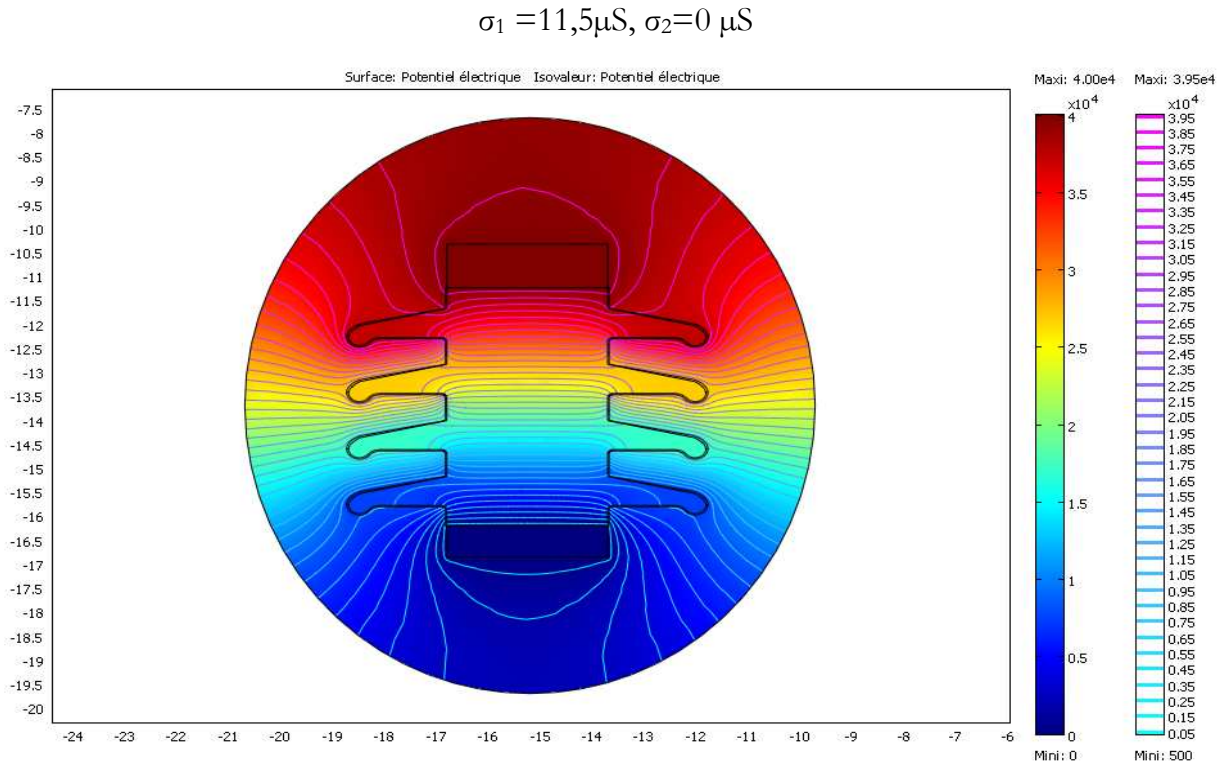
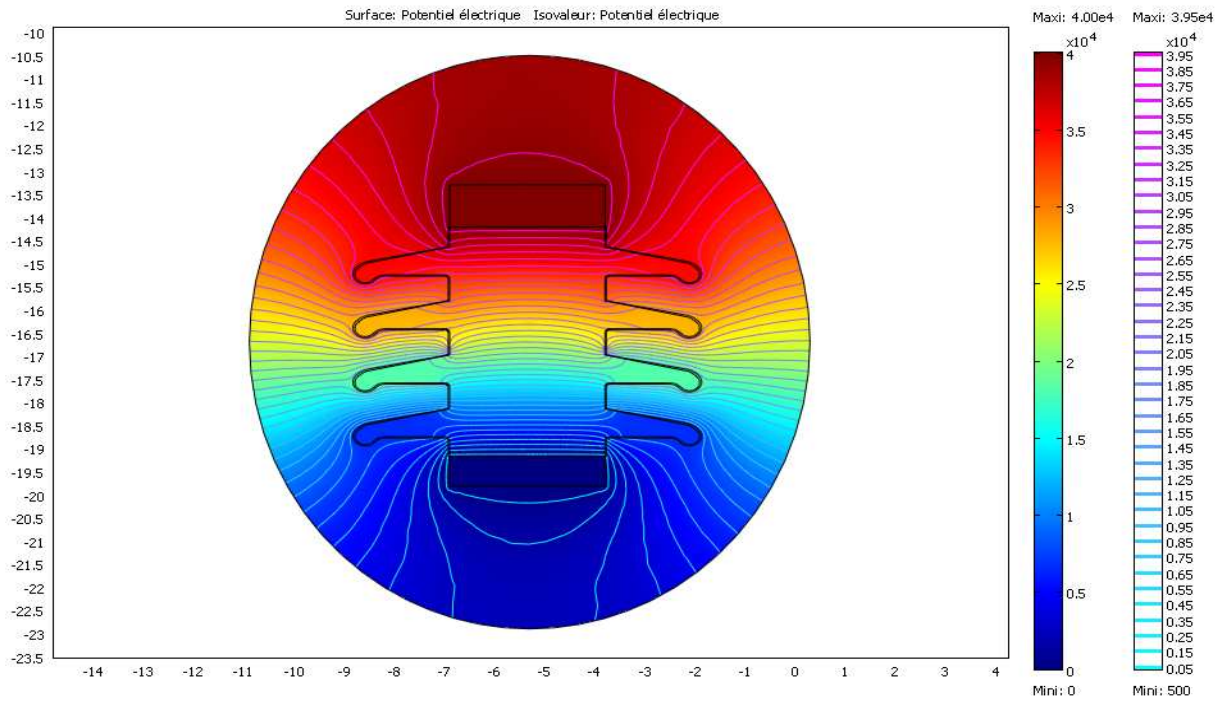


Fig. 5.22 Pollution non-uniforme (σ_1 fixe au-dessus de l'ailette et σ_2 variable en dessous de l'ailette)

a) $\sigma_1=11,5\mu\text{S}, \sigma_2=0 \mu\text{S}$



b) $\sigma_1=11,5\mu\text{S}, \sigma_2=3 \mu\text{S}$

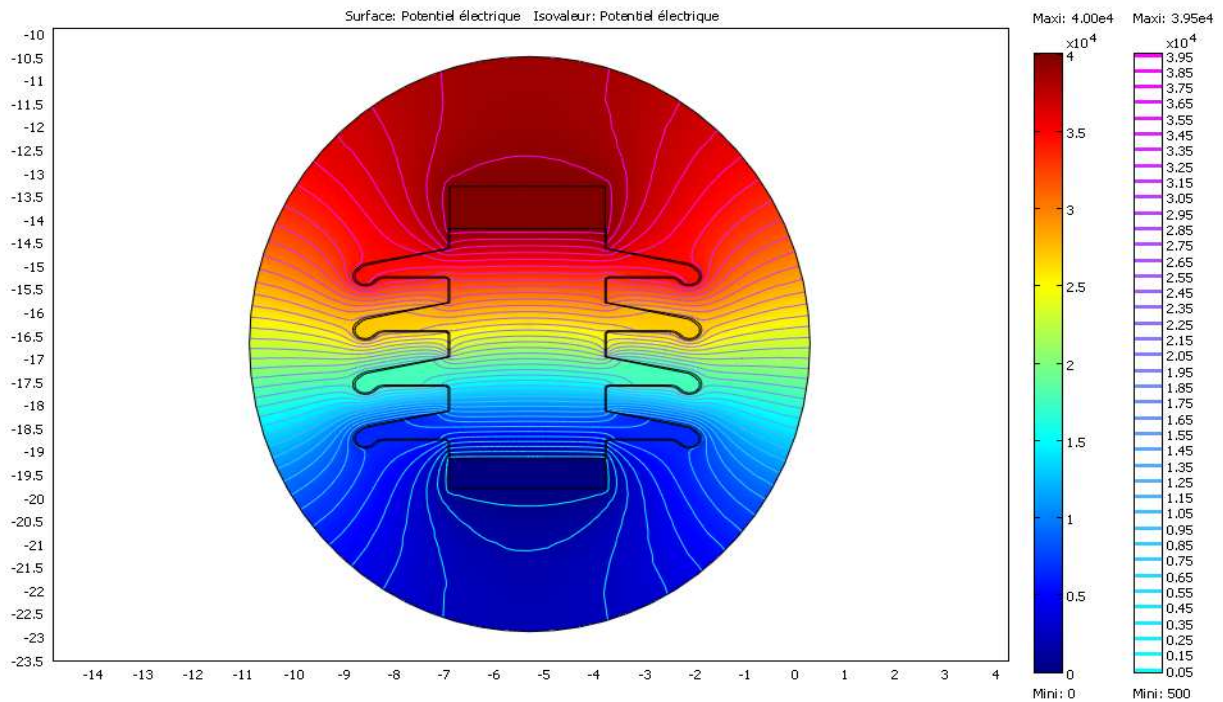
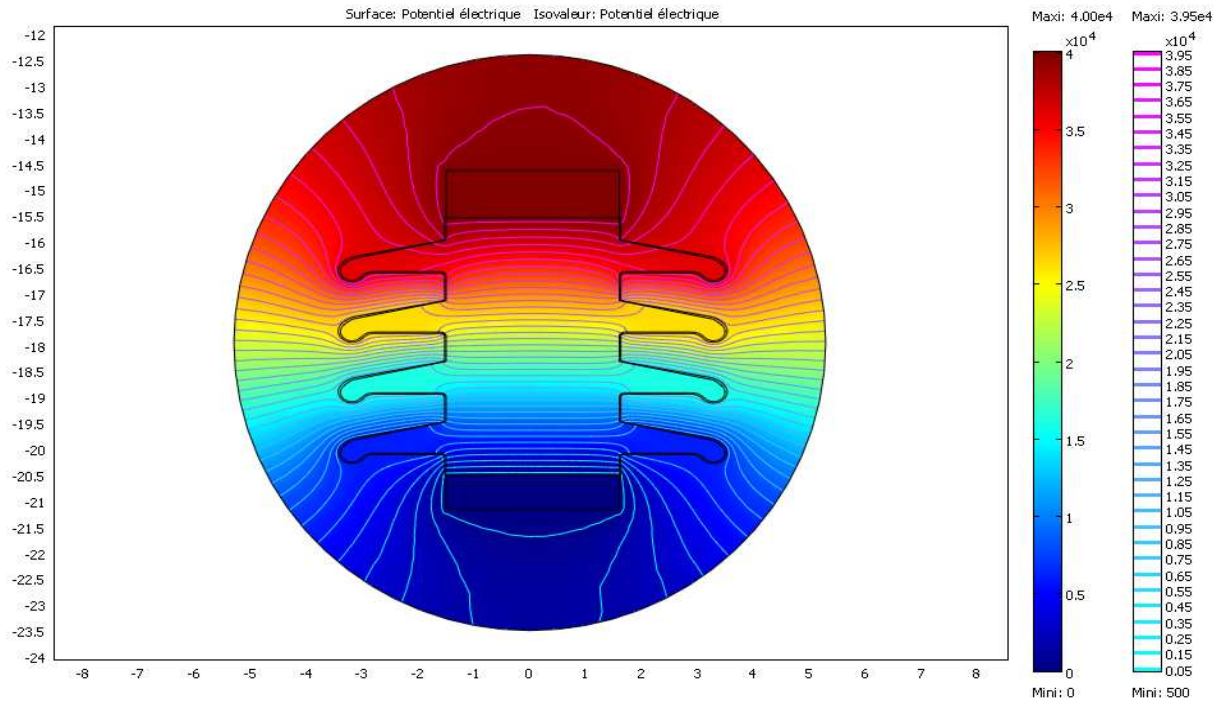


Fig. 5.23 Pollution non-uniforme (σ_1 fixe pour les deux ailettes supérieures et σ_2 variable pour les deux ailettes inférieures)

a) $\sigma_1=11,5\mu\text{S}$, $\sigma_2=0\mu\text{S}$



b) $\sigma_1=11,5\mu\text{S}$, $\sigma_2=5\mu\text{S}$

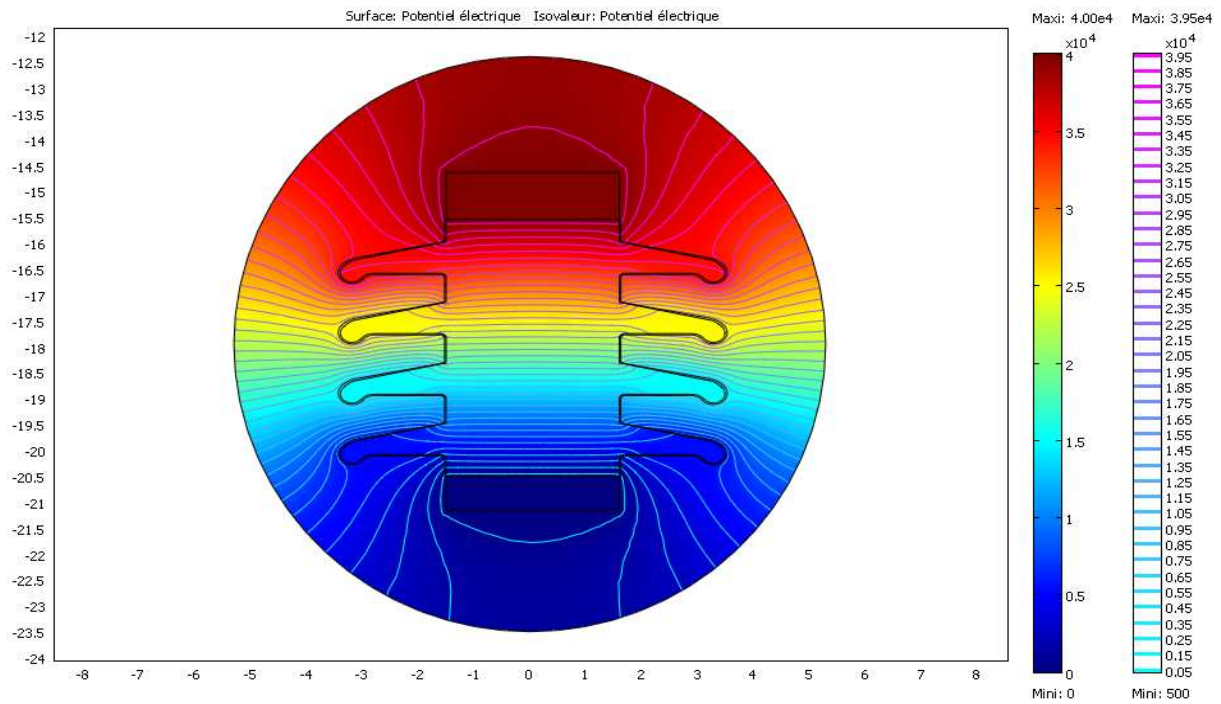


Fig. 5.24 Pollution non-uniforme (σ_1 fixe pour l'ailette supérieure et σ_2 variable pour les trois ailettes inférieures)

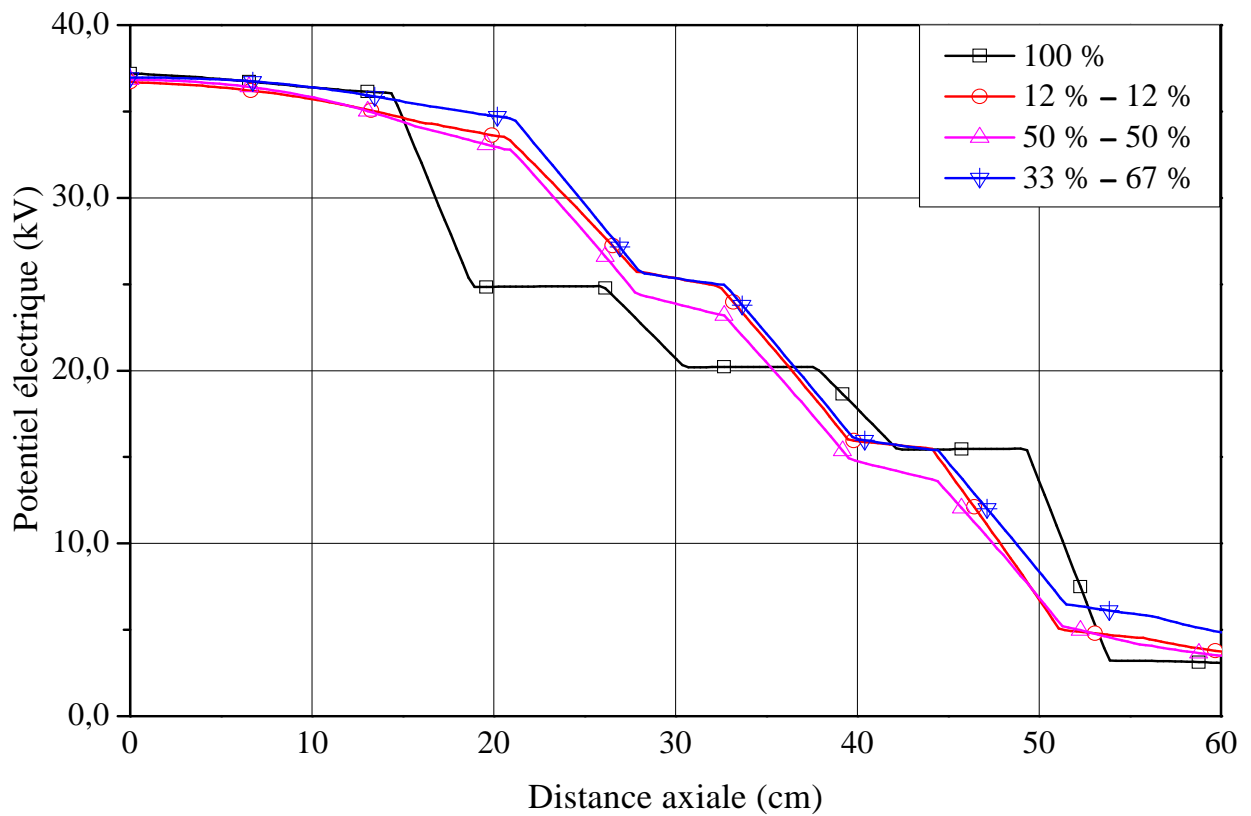


Fig.5.25 Distribution de la tension pour les différentes valeurs de σ (non uniforme)

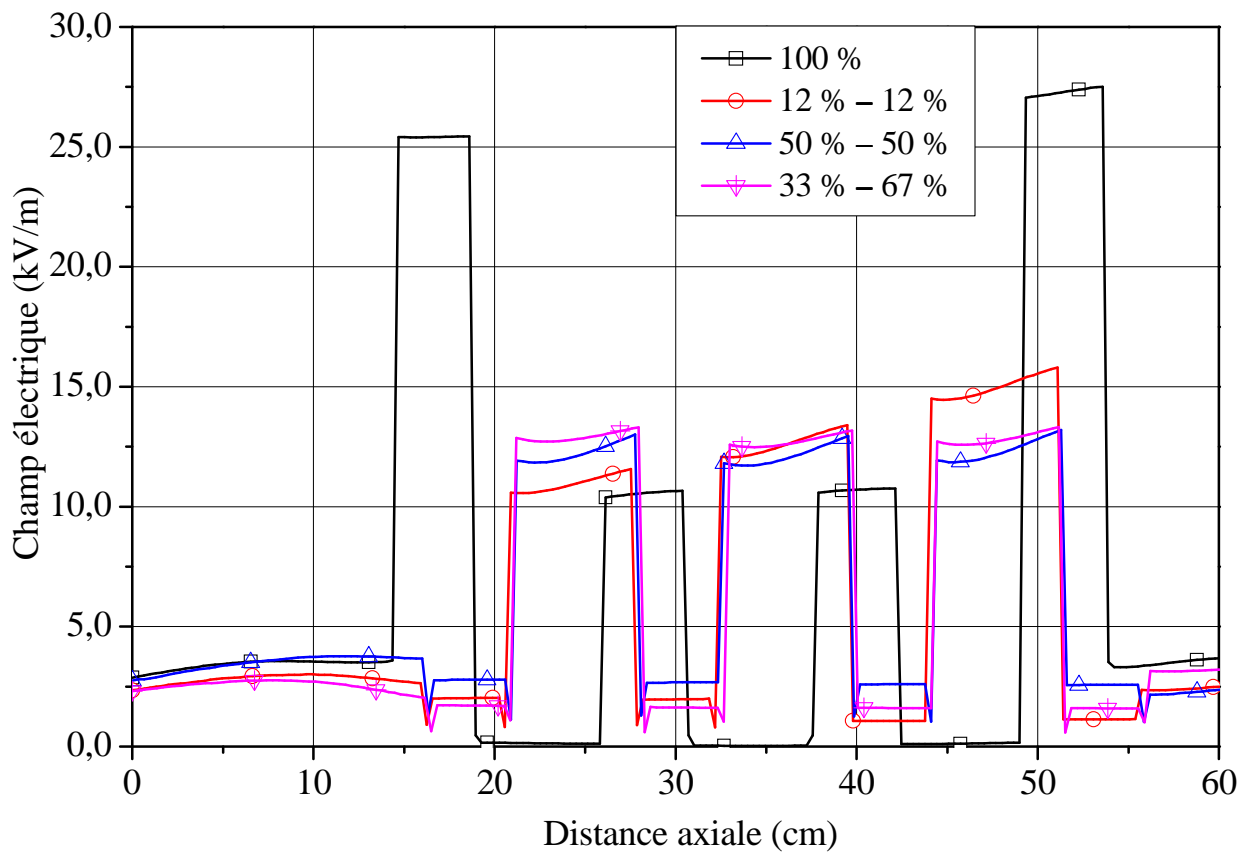


Fig. 5.26 Distribution du champ électrique pour les différentes valeurs de σ (non uniforme)

5.7. Conclusion

Dans cette partie du travail et dans le but de comprendre mieux l'effet de la couche de pollution une série de cas de distribution de la couche de pollution et pour plusieurs valeurs de la conductivité a été faite. La méthode des éléments finis nous a permis de faire une description surfacique de l'isolateur malgré la forme complexe de ce dernier. La méthode présente en plus d'autres avantages importants par rapport aux différentes méthodes existantes du point de vue du nombre d'inconnues mis en jeu, de la prise en compte des domaines infinis. Cette méthode, s'est avérée être donc un bon choix.

Les résultats obtenus montrent que la distribution de tension n'est pas uniforme pour un dépôt polluant sur la surface de l'isolateur. De plus on a remarqué 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 champ électrique devient elle aussi non-uniforme. On a pu aussi voir que le champ électrique présente des sommets correspondant aux ailettes.

Chapitre 06

CONCLUSION GENERALE

La répartition de la couche de pollution sur l'isolateur n'est pas uniforme, cela est dû, d'après les résultats et les observations retenues sur les sites, à plusieurs facteurs naturels et artificiels.

Le phénomène de pollution résulte de diverses origines ; on peut en citer trois ; naturels, industriels et mixtes. Quelle que soit la source de pollution, on observe toujours une formation d'une couche électrolytique due à l'humidification d'un dépôt de pollution accumulé progressivement sur la surface des isolateurs. Selon les contraintes auxquelles l'isolateur est soumis, trois cas essentiels peuvent se présenter :

- Arc non localisé;
- Arc fixe;
- Le contournement d'une surface isolante polluée.

Pour la détermination de la tension de contournement des isolateurs, il est important et nécessaire d'estimer le degré de sévérité de la pollution.

Dans le 3^{ème} chapitre, nous avons mené une recherche bibliographique qui nous a permis d'explorer les principaux modèles, 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.

Dans le but, d'étudier l'évolution temporelle de certains paramètres liés au phénomène de contournement, de nouveaux modèles dynamiques furent établis. Eux aussi basés sur le modèle statique d'Obenaus ainsi que sur l'équation de Mayr.

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.

Ces modèles sont, cependant, insuffisants lors du passage à l'application pratique principalement à cause des hypothèses simplificatrices rendues nécessaires par les traitements mathématiques. Il est clair que lorsqu'il s'agit de comparer les performances de

divers types d'isolateurs, l'étude expérimentale constitue en définitive le meilleur garant d'un jugement objectif.

Il résulte la partie expérimentale que la tension de contournement des isolateurs électriques est très influencée par le mode de répartition de la pollution (uniforme, non uniforme), la largeur occupée par celle-ci. La rigidité diélectrique de l'isolateur est plus faible en pollution uniforme que celle obtenue en pollution non uniforme.

Les tensions de contournement les plus faibles donc les plus dangereuses sont enregistrées en pollution uniforme, bien que cette dernière soit loin d'être uniforme car, le vent, la pluie et le champ électrique donne une répartition non uniforme de la pollution.

Par contre le nombre d'arcs électriques parallèle croit avec l'accroissement de la largeur polluée, ce dernier est limité par le courant délivré par la source ce qui nous a imposé de limiter la largeur de la surface polluée, la conductivité de la pollution et la distance inter électrodes.

Dans la dernière partie du travail et dans le but de comprendre mieux l'effet de la couche de pollution une série de cas de distribution de la couche de pollution et pour plusieurs valeurs de la conductivité a été faite. La méthode des éléments finis nous a permis de faire une description surfacique de l'isolateur malgré la forme complexe de ce dernier. La méthode présente en plus d'autres avantages importants par rapport aux différentes méthodes existantes du point de vue du nombre d'inconnues mis en jeu, de la prise en compte des domaines infinis. Cette méthode, s'est avérée être donc un bon choix.

Les résultats obtenus montrent que la distribution de tension n'est pas uniforme pour un dépôt polluant sur la surface de l'isolateur. De plus on a remarqué 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 champ électrique devient elle aussi non-uniforme. On a pu aussi voir que le champ électrique présente des sommets correspondant aux ailettes.

Références Bibliographiques

- [1]. G. Leroy, C. Gary, « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions », Edition Eyrolles ;, Paris, France, 1984.
- [2]. 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
- [3]. M. Chafiq, « Comportement électrique des isolateurs standards IEEE recouverts de glace » Thèse de doctorat, Université du Québec, Novembre 1995
- [4]. R. Coello, B. Aladenize : "Les diélectriques", livre, Edition Hermès, Paris.1986
- [5]. A. Cimador, S. Vitet, « La pollution des isolateurs », EDF-Epure, No. 27, Juillet 1990.
- [6]. L.E. Zaffanella, H.M. Schneider, J.H. Dunlap, « Performances des Isolateurs Pollués pour les Lignes de haute tension », CIGRE, Rapport 33-05, 1986, Paris, France.1996.
- [7]. Y. Porcheron, « lignes aériennes: matériels entrant dans la constitution d'une Ligne aérienne », technique de l'ingénieur , D4425.
- [8]. F. Amidi, K. Ouerdane, 'Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30kV en régions littorales', projet de fin d'études, département d'électrotechnique, université des sciences et technologies houari boumediene, bab Ezzouar, juin 1998.
- [9]. M. El koshairy, F. Rizk, « Comportement des isolateurs des lignes de transport à très haute tension dans les conditions de pollution désertiques », CIGRE, rapport 33.05, Paris, 1970.
- [10]. F. Amidi, k. Ouerdane, « Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30kV en régions littorales », Projet de Fin d'Etude, Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, juin 1998.
- [11]. P. S. Ghosh, N. Chatterjee, "Polluted Insulator Flashover Model for AC Voltage", IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul., vol. 2, N°. 1, pp. 128-136, February 1995.
- [12]. H. Streubel, « The influence of non-uniform contamination on the flashover voltage of insulators » 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46-10,5-9, Athens, Greece. September 1983
- [13]. F. Obenaus, "Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge", Deutsche Elektrotechnik, Vol. 4, pp. 135 - 136, 1958
- [14]. N. Dhabbi - 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.
- [15]. 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.

-
- [16]. G. Neumärker, "Verschmutzungs Zustand und Kriechweg", Monatsber. d. Deut. Akad, Wiss., Berlin, Vol. 1, pp.352 - 359, 1959
- [17]. S. Bouazabia, T. Chikhaoui, « Méthodes d'essais sur des isolateurs pollués dans les conditions désertiques », Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 1988.
- [18]. P.Claverie, Y.Porcheron, « Les phénomènes de pollution des isolateurs et l'isolement des ouvrages en régions polluées », RGE, Tome 82, No. 3, pp. 166-194, Paris, France. 1973
- [19]. L. L.Alston, S. Zoledziowski, « Growth of discharges on polluted insulators », IEEE, Trans. PAS, Vol. 110, N°. 7, pp. 1260–1266, Juillet 1963.
- [20]. W. Taibi, K. Abdeli, « Modèle d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz », Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, Alger, Algérie. Juin 2002
- [21]. J. Danis, « A stochastic pollution flashover model », 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 - 12, Septembre 5 – 9, Athènes, Grèce. 1983
- [22]. Y. Guehrrar, « Elaboration d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative ou impulsionnelle », Mémoire de Magistère, Laboratoire Haute tension, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2004
- [23]. W. Heise, G.F. luxa, G.Revrery, M. P. Verma, « Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide », CIGRE, Rapport 33-09, Paris. France, 1982.
- [24]. S. Helis, A. Meddour, « Etude du contournement d'un isolateur pollué », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique , Septembre 1996.
- [25]. C. Huraux, A. M. Rahal, « Le contournement des Isolateurs de haute tension approche à l'aide d'un modèle de laboratoire », RGE, Tome 84, N°. 6, pp. 425 - 429, Juin 1975.
- [26]. D. Namane, « Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateur de haute tension, sous la fréquence 50Hz », Thèse de Magister Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Février 1998.
- [27]. M. N. Rayes, M. Zhirh, « Investigation about flashover performance of insulators under uniform and non uniform contamination », 7e International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 43-08, Dresde, Allemagne, 26-30 Août 1991.
- [28]. R. Wilkins, « Flashover voltage of high voltage insulators with Unite en Surface pollution films », Proc. IEE, 116, No3, MARS 1969.
- [29]. H. H. Woodson, A.J. McElroy, « Insulators with contaminated surfaces part II: modelling of discharge mechanisms », IEEE Trans., Vol. Pas-89, N°. 8. p. 858-867, November- December 1970
- [30]. A.Boubakeur, M.Teguar, A.Abimouloud, A.Mekhaldi, « Simulation expérimentale sous tension alternative 50 Hz du comportement d'un isolateur de haute tension naturellement pollue »,
-

Quatrième Conférence Régionale des Comités CIGRE dans les Pays Arabes, Vol 2, pp. 271-278, 19-21, Tripoli, Libye. Mars 2001

- [31]. A.Mekhaldi, « Modèle de contournement d'isolateurs pollués dans les conditions désertiques du Sahara Algérien », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 1990.
- [32]. 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.
- [33]. M. Tegar, A. Abimouloud, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, « Influence of discontinuous pollution width on the surface conduction frequency characteristics of the leakage current », 2000 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 211-214, October 15-18, Victoria, British Columbia, Canada, 2000.
- [34]. M. Tegar, « Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées », Thèse de Magister Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juillet 1993.
- [35]. M. Tegar, A. Mekhaldi, A. Boubakeur, « Conduction phenomenon on HV Insulators with Discontinuous Pollution under ac Voltage », International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials, APTADM'2001, Special Issue of *Przegląd Elektryczny*, edited by Polish Electrical Society, pp. 267-270 Wroclaw, Poland. September 17-19, 2001,
- [36]. M. Tegar, A. Abimouloud, A. Mekhaldi, A. Boubakeur, « Effect of discontinuous pollution layer conductivity on the flashover and leakage current characteristics », CIGRE Symposium, Behaviour of Electrical Equipment and Components in Tropical Environment, Report No. 200-02, Cairns, Australia. September 3-7, 2001
- [37]. A.Mekhaldi, M.Tegar, A.Beroual, « Algorithm for pollution flashover calculations », *Archives of Electrical Engineering*, Vol. XLV, No. 4, pp. 385-397, 1997
- [38]. G. Zhicheng, Z. Renyu, "Calculation of dc and ac Flashover Voltage of Polluted Insulators", *IEEE Trans. Elect. Insul.*, Vol. 25, pp.723-729, 1990.
- [39]. 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.
- [40]. N. Dhahbi, Megriche, A. Beroual, L. Krahenbuhl, "A New Proposal Model for Polluted Insulators Flashover", *Journal of Physics D: Applied Physics*, (30), N° 5, pp. 889 - 894, March 1997. Asenjo, N. O. Morales, "Low Frequency Complex Fields in Polluted Insulators", *IEEE Trans. Elect. Insul.* Vol. 17, No3, pp. 262-268, June 1982.
- [41]. M. Hara, L.C. Phan, 'leakage current and flashover performance of iced insulators', *IEEE transaction on power apparatus & systems*, vol. PAS-98, no. 3, pp. 849-859, May/June 1979.
- [42]. 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

-
- [43]. CEI 60 - 1, « Techniques des essais à haute tension », Définitions et Prescriptions Générales relatives aux Essais, Deuxième Edition, 1989.
- [44]. 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.2004
- [45]. G. Dhatt, G. Touzout «une présentation de la méthode des élément finis» Maloine s.a éditeur Paris 1984.
- [46]. 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.
- [47]. F. Tighilt « Contribution à l'étude de la distribution de tension dans les parafoudres ZnO» mémoire de magister en électrotechnique université F. Abbas.Setif. 2008
- [48]. F. Zedam, A. Bouchoucha, « étude comparative de la distribution de potentiel électrique dans l'isolateur chaîne par voie numérique et expérimental », mémoire d'ingénieur, , université FERHAT ABASS de Sétif. promotion 2001
- [49]. S. Bessedik, "Modélisation des isolateurs pollués des lignes haute tension", Mémoire de magister, 2008.
- [50]. Ch. Volât, "Modélisation physique et numérique par la méthode des éléments finis de frontière de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur standard de poste 735 kV recouvert de glace", thèse de doctorat, Université du Québec, Juin 2002
- [51]. K. Nassour, M. Brahami, A. Gourbi, M. Miloudi, Modeling of potential and electric field distribution around a snow-covered post insulator using finite element method", 7ème Conférence nationale sur la haute tension, pp 193-196, Sidi Bel Abbès, 2008
- [52]. H. Hadi, S. Flazi, A. Taieb Brahim, "Distribution de potentiel au voisinage d'un isolateur réel en présence d'une bande sèche", USTO, Algérie. ICEL2000
- [53]. R. Sundararajan, R.S Gorur, "Computer Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Condition", IEEE Trans.on Diel, Elect. Insul, Vol. 2, N° 1, pp. 121-127, February1995.
- [54]. K. J. Binns, P. J. Lawrenson, "Analysis and Computation of Electric and Magnetic Field Problems", 2nd ed, Pergamon Press, London, 1973
- [55]. E. Asenjo S, N. Morales O., A. Valdenegro E, "Solution of Low Frequency Complex Fields in Polluted Insulators by Means of the Finite Element Method", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. 4, No. 1, pp. 10-16, February 1997.
- [56]. A. Cimador, M. Cojan, P. Hautefeuille , M. Moreau, « Méthodes de dimensionnement des isolateurs de lignes aériennes en régions polluées »CIGRE, rapport 33.04, Paris, France, 1978.
- [57]. C. Volat, « Calcul du potentiel et du champ électrique le long des surfaces de glace recouvrant un isolateur H.T. et dans les intervalles d'air entre celles-ci». Thèse de doctorat, UQAC, 2002.
-

-
- [58]. H. El-kishky, R.S. Gorur, ‘Electric potential and field computation along AC HV insulators », IEEE Trans, on dielectrics and electrical insulation, vol. 1, no. 6, pp. 982-988, Dec 1994.
- [59]. T. Mlsaki, H. Tsuboi “Computation of 3-dimensional eddy current problems by using boundary element method”, IEEE Trans, on magnetics, vol. Mag-21, pp. 2227- 2230, no. 6, November 1985.
- [60]. T.H. Fawi, Y.A. Safar, “Boundary methods for the analysis and design of high-voltage insulators”, computer methods in applied mechanics and engineering, pp. 134-369, 1987

ملخص:

يهتم هذا العمل بدراسة تأثير الانتشار العدم المتوازن لطبقة التلوث على سطح العوازل الخزفية ذات التوتر العالي ، لهذا الغرض أجرينا سلسلة من التجارب على العوازل الخزفية وعينات زجاجية على شكل مستطيل بقياسات هندسية مختلفة من اجل مقارنة النتائج بمخبر التوتر العالي بجامعة بجاية وتضمنت هذه السلسلة قياس توتر الإحاطة وانتشار القوس الكهربائي، ثم باستعمال برنامج العناصر المتناهية تطرقنا إلي توزيع التوتر وتحديد الحقل الكهربائي على سطح العازل نضيف وملوث بنفس الشروط التي طبقناها في المخبر. قمنا، من خلال هذه المذكرة، بعرض ومناقشة النتائج المحصل عليها في هذه الدراسة

كلمات مفتاحية :

العوازل الخزفية، تيار التسرب، التلوث، توتر الإحاطة، ناقلية، المحاكات، FEMLAB، عينات زجاجية، تجارب، قياسات، فطيات عالية،

Résumé :

Ce travail s'est intéressé à l'étude de l'influence de la non-uniformité de la distribution de la pollution sur les performances des isolateurs en porcelaine, Pour ce faire, nous avons effectué une série d'essais sur un isolateur en porcelaine et des plaques en verre pour la comparaison entre eux, au niveau du Laboratoire de Haute Tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia. Les essais concernent la tension de contournement et le développement d'arc. Puis en utilisant le logiciel de la méthode des éléments finis (Femlab), nous avons déterminé la distribution du potentiel et du Champ électrique le long d'isolateur en porcelaine propre puis sous les mêmes conditions de pollution quand nous avons appliqué au laboratoire. Nous avons montré et discuter, à travers ce mémoire, les résultats obtenus de cette investigation.

Mots Clés :

isolateur en porcelaine, courant de fuite, pollution, contournement, conductivité, simulation, FEMLAB, plaques en verre, expérimentation, mesures, haute tension

Abstract:

The aim of this work is to study and analyse the effect of non-uniformity pollution distribution on the performance high voltage porcelain insulators. For this purpose, a set of experimental tests on porcelain insulator and on glass surfaces are carried out in the High voltage Laboratory of the university Abderrahmane Mira of Bejaia. The tests have concerned the flashover voltage and the development of the electric arc. Using Finite element method via Femlab package, potential and electric Field distribution along insulator were determined under the same pollution conditions as those done in the HV laboratory. Obtained results were presented and discussed

Key Words:

Porcelain insulator, leakage current, pollution, flashover, conductivity, simulation, FEMLAB, glass, experimentation, measurement, haute tension.