

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER



DEPARTEMENT de GENIE ELECTRIQUE

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Laboratoire de Haute Tension

Mémoire de Magister

Spécialité : Génie Electrique

Option : Réseaux et Haute Tension

Présenté par

GUIA Talal

Ingénieur d'Etat en Génie Electrique (Electrotechnique) à l'ENP

Thème

COMPORTEMENT D'UN MODELE D'ISOLATEUR SOUS TENSION IMPULSIONNELLE

Soutenu publiquement ledevant le jury composé des membres :

Président:	M ^r : A. MEKHALDI	Professeur à l'ENP
Rapporteurs:	M ^r : A. BOUBAKEUR	Professeur à l'ENP
	M ^r : M.TEGUAR	Maître de conférences à l'ENP
Examineurs:	M ^r : S. BOUAZABIA	Maître de conférences à l'USTHB
	M ^r : H. MOULAI	Maître de conférences à l'USTHB
	M ^r : L. NEZLI	Dr d'Etat, Chargé de cours à l'ENP
Invité:	M ^r : M. Ghezâli	PhD, CREDEG-SONELGAZ

10, Avenue Hassen Badi, BP 182, El-Harrach, Alger, Algérie.

ملخص :

ندرس من خلال هذا العمل تصرف نموذج لعازل التوتر العالي وضع تحت تأثير عدة عوامل كهروهندسية. تتمثل هذه الأخيرة في عرض أشربة التلوث من ورق الالمنيوم, قطبية المسرى الكهربائي الفعال و الزمن بين نبضتين متتاليتين. النتائج التجريبية المحصل عليها تخص توتر الإحاطة و التيار المتسرب. و بإستعمال برنامج "طريقة العناصر المتناهية المطبقة في المغناطيسية" تطرقنا إلى تحديد الحقل الكهربائي على سطح العازل المخبري.

الكلمات المفتاحية : عازل - تلوث - حقل كهربائي - تيار متسرب - توتر نبضي - إحاطة.

Résumé:

Dans ce travail, nous étudions le comportement d'un modèle d'isolateur de haute tension soumis à divers paramètres électrogéométriques. Ces derniers consistent en la largeur de la pollution en papier aluminium, la polarité de l'électrode active et le temps entre deux impulsions successives. Les résultats d'essais concernent la tension de contournement $U_{50\%}$ et le courant de fuite. En utilisant le logiciel de la méthode des éléments finis (FEMM), nous avons déterminé le champ électrique sur la surface du modèle expérimental.

Mot clés : Isolateur – pollution – champ électrique – courant de fuite – tension impulsionnelle – contournement.

Abstract:

In this work, we study the behavior of high voltage insulator model, submitted at various electrogeometric parameters. These latter, consist in the pollution width made of aluminum paper, the active electrode polarity and the time between two successive impulses. The experimental results concern to the flashover voltage $U_{50\%}$ and the leakage current. Using the software of Finite Element Magnetism Method (FEMM), we determine the electrical field on the experimental insulator surface.

Key words: insulator – pollution – electric field – leakage current – impulse voltage – flashover.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Haute Tension du département de Génie Electrique de l'Ecole Nationale Polytechnique sous la Direction Scientifique de Monsieur **A. BOUBAKEUR**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique et Monsieur **M. TEGUAR**, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma très sincère reconnaissance pour leurs précieuses directives, leur disponibilité, leurs fructueux conseils, leur suivi constant, leur courtoisie si raffinée et leurs qualités humaines.

Je remercie également Monsieur **A. MEKHALDI**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour ses conseils combien utiles, sa grande disponibilité et ses qualités humaines. Je lui présente mes vifs remerciements d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Je remercie aussi tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, en particulier : **M^{me} D. NAMANE**, **Mr S. BOUAZABIA** et **Mr H. MOULAI**.

Enfin, J'adresse mes vifs remerciements à Messieurs **S. BOUAZABIA**, Maître de conférences à l'USTHB, **H. MOULAI**, Maître de conférences à l'USTHB, **Mr L. NEZLI**, Docteur d'Etat, Chargé de cours à l'ENP, et **M. GHEZAÏLI**, PhD au centre de recherche CREDEG-SONELGAZ, d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Sommaire

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------	----------

CHAPITRE I : POLLUTION DES ISOLATEURS DE HAUTE TENSION

I.1. INTRODUCTION	3
I.2. ISOLATEURS	3
I. 2.1. FONCTIONNEMENT ET CONSTITUTION D'UN ISOLATEUR	4
I.2.2. PRINCIPAUX TYPES D'ISOLATEURS	4
I. 2. 2. 1. Isolateurs de type rigide	4
I. 2. 2. 2. Chaîne d'isolateurs	5
I. 2. 2. 2. 1. Isolateurs à capot et tige	6
I. 2. 2. 2. 2. Isolateur à long fût	6
I.2.3. CHOIX DES ISOLATEURS	7
I.3. POLLUTION DES ISOLATEURS	7
I.3.1. FORMATION ET REPARTITION DE LA COUCHE DE POLLUTION	8
I.3.1.1. Non-uniformité longitudinale par groupe	8
I.3.1.2. Non- uniformité transversale	8
I.3.1.3. Non uniformité longitudinale périodique	9
I.3.2. SOURCES DE POLLUTION	9
I.3.2.1. Pollution naturelle	9
I.3.2.2. Pollution industrielle	10
I.3.2.2. Pollution mixte	11
I.4. CONSEQUENCES DE LA POLLUTION	11
I.5. MESURE DE LA SEVERITE D'UN SITE	15
I.5.1. Classification des sites pollués	15
I.5.2. Méthodes de mesures de la sévérité d'un site	16
I.5.2.1. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)	16
I.5.2.2. Conductance superficielle	16
I.5.2.3. Courant de fuite	17

I.6.2.4. Contrainte de contournement	17
I.6.2.5. Mesure de la pollution de l'air	17
I.6.2.6. Mesures optiques	18
I.7. METHODES D'ESSAIS SOUS POLLUTION	18
I.7.1. Essais sous pollution naturelle	18
I.7.2. Essais sous pollution artificielle	18
I.8. TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION	20
I.8.1. Allongement de la ligne de fuite	20
I.8.2. Isolateurs plats	20
I.8.3. Graissage périodique	20
I.8.4. Revêtement silicone	20
I.8.5. Les isolateurs composites	21
I.8.6. Nettoyage des isolateurs :	21
I.9. CONCLUSION	21

CHAPITRE II : PRINCIPAUX TRAVAUX SUR LE CONTOURNEMENT SOUS POLLUTION

II.1 INTRODUCTION	22
II.2. MODELES D'ISOLATEURS	22
II.2.1. Modèle de J.Danis	22
II.2.2. Modèle de M. N. Rayes et M. Zhirh	24
II.2.3. Modèle de A. Mekhaldi	25
II.2.4. Modèle de A. Mekhaldi, D. Namane, S. Bouazabia et A. Beroual	25
II.2.5. Modèle de Woodson et Mc Elroy	27
II.2.6. Modèle de Wilkins	27
II.3. CONCLUSION	28

CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE

III.1. INTRODUCTION	30
III.2. GENERATEUR D'ONDES DE CHOC DE L'ENP	30
III.2.1. Description	30
III.2.2. Tension de choc délivrée	31
III.3.DETERMINATION DE LA TENSION DISRUPTIVE MOYENNE $U_{50\%}$	32
III.4. CLASSIFICATION DES ESSAIS DE HAUTE TENSION	33

III.5. METHODE MONTEES ET DESCENTES (UP AND DOWN)	34
III.5.1. Méthode Up and Down selon Dixon et Mood	34
III.5.1.1. Détermination de $U_{50\%}$ et σ	34
III.5.1.2. Intervalle de confiance	35
III.5.2. Méthode Up and Down élargie	35
III.6. DETERMINATION DE LA TENSION $U_{0\%}$	36
III.7. CORRECTION ATMOSPHERIQUE	36
III.7.1. Influence de la densité relative de l'air	36
III.7.2. Influence de l'Humidité	37
III.8. MODE OPERATOIRE	37
III.8.1. Modèle expérimental	37
III.8.2. Préparation du modèle	38
III.8.3. Procédé d'essais	39
III.8.3.1. Mesure de la tension de contournement	39
III.8.3.2. Mesure de courant de fuite	39
III.8.3.3. Expression du courant de fuite I_0 en fonction de V_{lue}	40
III.8.4. Forme des signaux obtenus avec l'oscilloscope	42
<hr/> CHAPITRE IV : RESULTATS OBTENUS ET INTERPRETATIONS <hr/>	
IV.1. INTRODUCTIONS	44
IV.2. OBSERVATIONS	44
IV.3. DETERMINATION DE LA TENSION $U_{50\%}$	44
IV.3.1. Influence de la largeur des couches polluantes	46
IV.3.2. Influence du temps entre deux chocs	47
IV.3.3. Influence de la polarité	47
IV.4. ETUDE DU COURANT DE FUITE	49
IV.4.1. Influence de la tension appliquée	50
IV.4.2. Influence de la largeur des couches polluantes	52
IV.4.3. Influence de la polarité	53
IV.5. IMPEDANCE ELECTRIQUE	57
IV.6. CALCUL DU CHAMP ELECTRIQUE	59
IV.6.1. Répartition du champ électrique sur la plaque	60
IV.6.2. La variation du champ électrique le long de la ligne de fuite centrale	62
IV.6.3. Influence de la largeur des couches polluantes	64

IV.7. CONCLUSION	65
CONCLUSION GENERALE	67
BIBLIOGRAPHIE	69
ANNEXE	73

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Les lignes aériennes de transport et de distribution de l'énergie électrique sont exposées à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. En effet, par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut parfois survenir.

L'humidification de la couche polluante facilite en fait, la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique. Cette dernière engendre la naissance d'un courant de fuite, qui par effet joule, provoque des échauffements locaux et par la suite l'assèchement de la couche de pollution [SAI 92]. La répartition du potentiel entre électrode est alors changée. Ainsi, une partie importante de la tension appliquée se trouve rapportée sur la bande sèche engendrant, si le champ local dépasse un certain seuil, un claquage diélectrique et l'établissement d'une décharge électrique. Dans certaines conditions, cette décharge peut s'allonger jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur. Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension. Une des caractéristiques principales d'un isolateur de haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est placé.

Pendant son fonctionnement, un système d'isolation peut subir des surtensions accidentelles. Celles-ci sont d'origine atmosphérique (la foudre) ou de manœuvres (ouverture d'un disjoncteur). Cependant, comme il est difficile de reproduire ces formes d'ondes au laboratoire pour tester et dimensionner l'appareillage, on a recours, par conséquent, à des formes simples – bi exponentielle – produites par des générateurs d'impulsions types multiplicateurs de Marx [DOB 72, GUE 04].

Le présent travail porte sur l'étude de l'effet de la pollution discontinue sur le comportement d'un modèle expérimental, sous tension impulsionnelle. Le modèle de laboratoire est soumis à une répartition de la pollution discontinue reproduisant l'état de surface de l'isolateur capot et tige type 1512L installé dans la région électrique de Hassi-R'mel au Sahara Algérien [MEK 90, MEK 96]. Différentes contraintes électrogéométriques, à savoir la largeur de la pollution en papier aluminium, la polarité de l'électrode active, la tension appliquée et le temps entre deux impulsions

successives, sont appliquées au modèle de laboratoire. Notre travail comporte quatre chapitres distincts.

Nous entamons le premier chapitre par une présentation d'une synthèse bibliographique sur les isolateurs de haute tension, ainsi que les phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique. Des méthodes de mesure de la sévérité de la pollution des sites, des méthodes d'essais sous pollution naturelle et artificielle, ainsi que des techniques de lutte contre ces phénomènes y sont présentées.

Dans le deuxième chapitre, nous citons les principaux modèles ainsi que les critères et les mécanismes de propagation des décharges électriques.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude expérimentale du comportement d'un modèle de laboratoire, sur lequel nous reproduisons le même état de surface de l'isolateur 1512L exploité pendant une dizaine d'année dans la région désertique de Hassi-R'mel [MEK 90, MEK 96].

Nous analysons dans le quatrième chapitre, en fait, la tension de contournement et le courant de fuite en fonction des paramètres électrogéométriques liés à la configuration des couches polluantes.

En utilisant le logiciel FEMM (Finite Element Magnetism Method), nous déterminons la répartition du champ électrique le long du modèle expérimental.

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

Chapitre I

Pollution des Isolateurs
de Haute Tension

I.1. INTRODUCTION

L'isolateur est un matériau isolant solide, capable de résister à la contrainte électrique. Il est caractérisé par une grande impédance au passage du courant électrique. Son rôle est de séparer deux corps conducteurs, soumis à deux potentiels différents [LER 84].

Dans les réseaux de transport d'énergie électrique, l'isolement pylône-conducteur est assuré par une chaîne d'isolateurs. Chaque chaîne est caractérisée principalement par sa longueur de fuite (nombre d'éléments). Cette longueur est adéquate au niveau de tension de service.

Dans les lignes de haute tension, le dimensionnement des isolateurs est déterminé par la surtension de manœuvres [LER 84]. Dans ce cas, la tenue à la tension nominale à 50 Hz des isolateurs propres et secs est excellente. Cependant, en l'absence de surtension de foudre ou de manœuvres, de nombreux défauts sont enregistrés sur les lignes aériennes (contournement électrique, défaillance d'isolateurs, ...), particulièrement par temps humide (rosée, brouillard, pluie fine, ... etc.).

Le présent chapitre porte sur l'étude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des isolateurs sous pollution. Ce chapitre comporte deux parties. Dans la première, nous présentons l'importance des isolateurs, leur utilité et leurs principaux types, profils et matériaux. La deuxième partie est consacrée à l'étude des phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique. Les principaux paramètres associés ainsi que les méthodes de mesure et les moyens de lutte contre ce phénomène, y sont également présentés.

I.2. ISOLATEURS

Le phénomène de pollution des lignes aériennes est un sujet d'étude d'une importance primordiale. Cela provient du fait que la pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de haute tension. En effet, et suite à l'interaction entre l'air transportant des grains de poussières et l'isolateur, une couche étrangère se dépose sur les surfaces de celui-ci [ELK 70]. Une fois cette couche est humidifiée, la tension de tenue diminue considérablement et provoque des incidents très graves. Cela est dû à plusieurs facteurs dont les plus importants sont le profil de l'isolateur et la nature de l'agent polluant.

I. 2. 1. FONCTIONNEMENT ET CONSTITUTION D'UN ISOLATEUR

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes, ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage), ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe, ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure) [RIQ 98].

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement [POR TI]. Du point de vue électrique, l'isolateur est considéré comme étant deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents [POR TI]:

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

I. 2. 2. PRINCIPAUX TYPES D'ISOLATEURS

I. 2. 2. 1. Isolateurs de type rigide

Un isolateur rigide (Figure I.1) est relié au support par une ferrure fixe. Tous les isolateurs rigides normalisés sont livrés avec une douille scellée de telle façon qu'ils puissent être vissés directement sur les ferrures correspondantes. La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides [DUM TI].

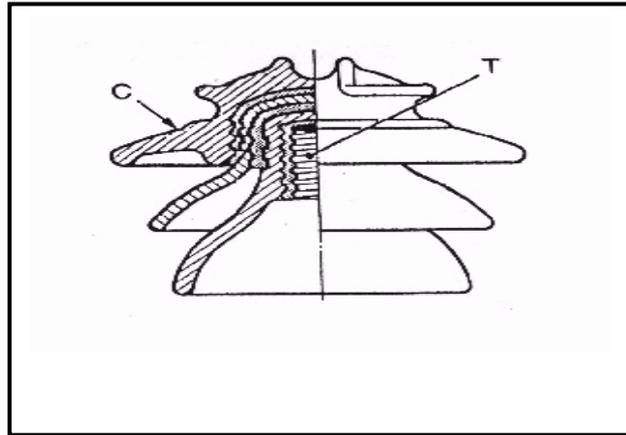


Figure I.1. Isolateur rigide en verre

I. 2. 2. 2. Chaîne d'isolateurs

Une chaîne d'isolateurs est constituée de plusieurs éléments de type capot et tige ou autres (Figure I.2). Ces éléments sont soumis principalement à des efforts de traction. Ils sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (alignement), soit horizontale (ancrage) [POR TI].

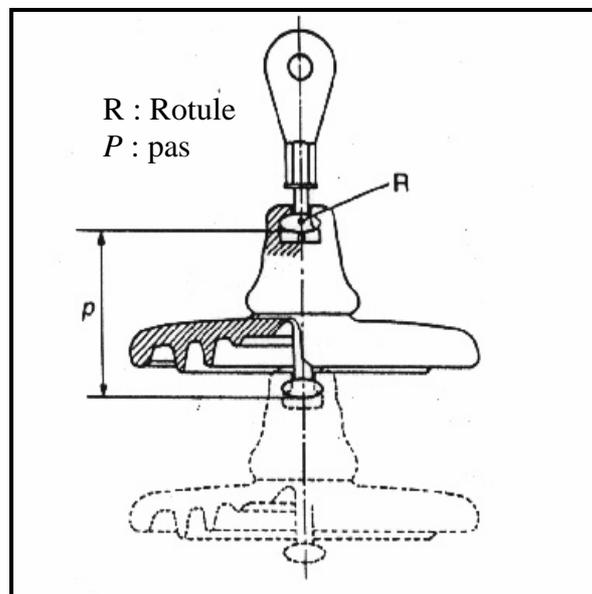


Figure I. 2. Assemblage à rotule

I. 2. 2. 2. 1. Isolateurs à capot et tige

L'isolateur capot et tige est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre (ou la porcelaine). L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille [ELK 70, AMI 98]. L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique [AMI 98]. La coupe de l'isolateur capot-tige est schématisée à la figure I.3.

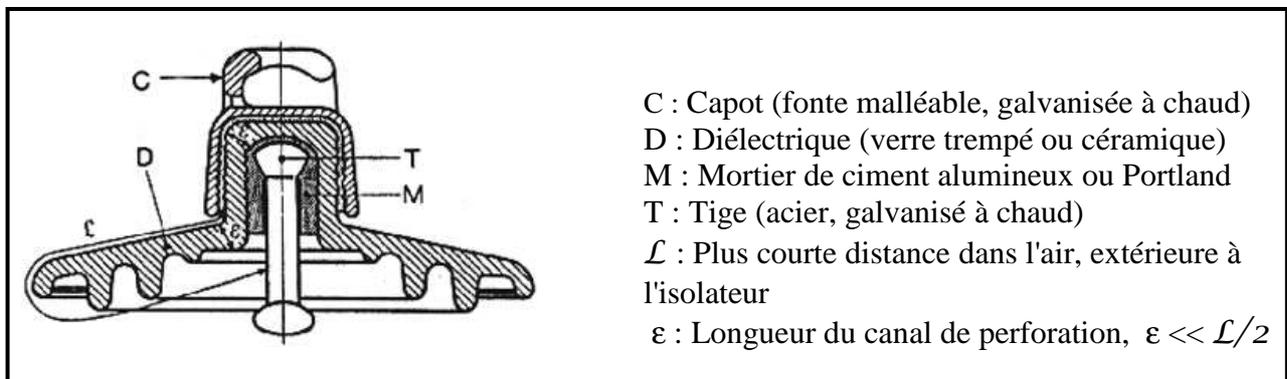


Figure I.3. Isolateur à capot et tige

I. 2. 2. 2. 2. Isolateur à long fût

Il est constitué d'un cylindre plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes (Figure I.4). A chaque extrémité est fixée une pièce métallique de liaison. Celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le cylindre, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet. De tels isolateurs peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis [POR TI].

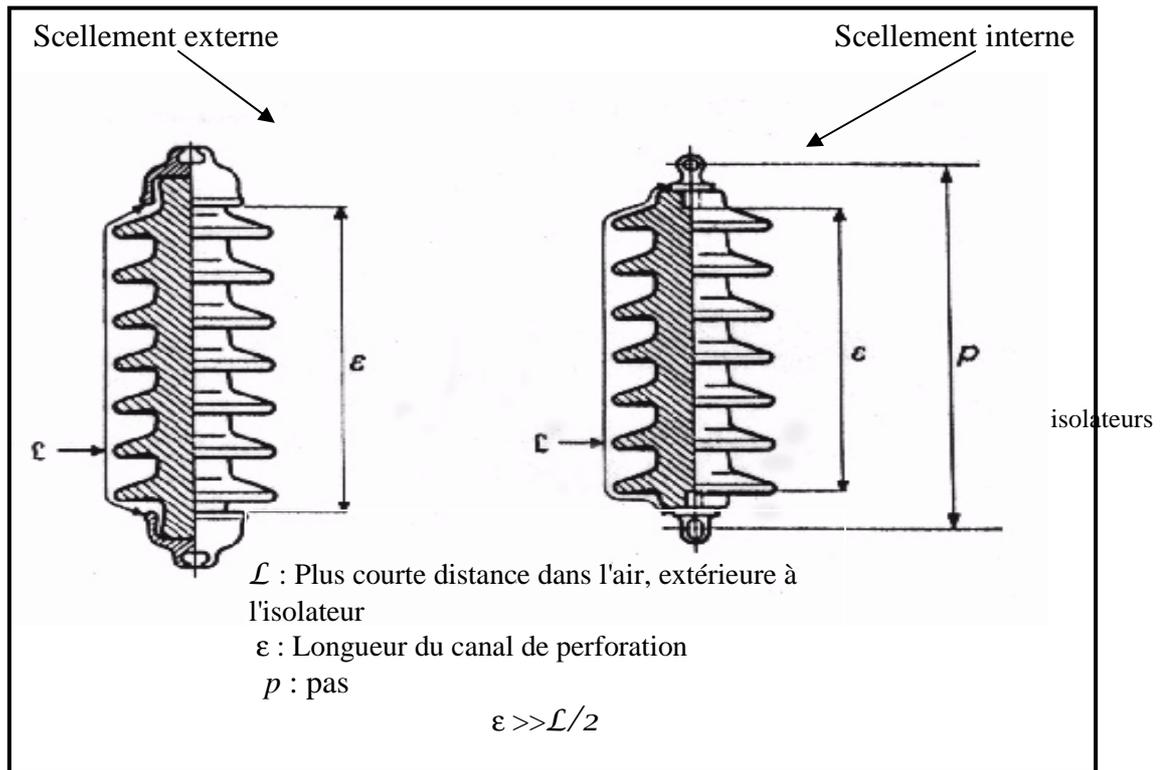


Figure I. 4. Isolateur à long fût en porcelaine

I. 2. 3. CHOIX DES ISOLATEURS

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépend la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service [AMI 98].

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

I.3. POLLUTION DES ISOLATEURS

Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident. La sévérité de la pollution d'un site peut changer. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation. Le dimensionnement initialement

correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution [CIM 90].

I.3.1. FORMATION ET REPARTITION DE LA COUCHE DE POLLUTION

La formation et la répartition de la couche de pollution sur la surface des isolateurs dépend du profil des isolateurs, de la hauteur et de la disposition (verticale, horizontale ou inclinée) des chaînes d'isolateurs par rapport au sol et du niveau de tension qui leur est appliqué.

En général, la couche de pollution se concentre sur les éléments de la chaîne d'isolateurs situés du côté du conducteur de haute tension et dans les parties les mieux protégées contre les facteurs d'auto-nettoyage (vent et forte pluie). Par conséquent, la répartition de la pollution le long des chaînes d'isolateurs est loin d'être uniforme [NEU 59]. Cette non-uniformité devient plus accentuée lorsque la longueur des chaînes d'isolateurs augmente.

La non-uniformité de la pollution peut être classée en trois catégories [STR 83]:

I.3.1.1. 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 »,
- par effet du champ électrique où la concentration de la pollution est accentuée sur les isolateurs les plus proches de la borne haute tension.

I.3.1.2. 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.

I.3.1.3. 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. Ces principales spécifications sont :

- la face inférieure de l'isolateur présente une conductivité plus grande que la face supérieure,
- la concentration de la pollution augmente de la zone périphérique vers la zone centrale,
- la pollution est plus accentuée entre les nervures.

I.3.2. SOURCES DE POLLUTION

La nature de la pollution dépend de la situation géographique et climatique. Les diverses sources de pollution les plus fréquemment observées sur les isolateurs peuvent être regroupées selon leur origine et classées comme suit :

I.3.2.1. Pollution naturelle

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

a- Pollution marine

Dans les installations en bordure de mer, les embruns portés par le vent déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel qui, à plus ou moins longue échéance, recouvre toute la surface de l'isolateur y compris les parties les mieux protégées. Cette couche de sel, humidifiée par les embruns eux même, ou par un brouillard ou simplement par condensation, devient conductrice. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche

superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance dans certaines conditions, et se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur [MEK 99].

b- Pollution désertique

Dans les régions désertiques, les fréquentes tempêtes de sables déposent progressivement sur les surfaces des isolateurs une couche de pollution contenant des sels. Une fois humidifiée, cette couche devient beaucoup plus conductrice. Un courant de fuite apparaît brusquement accompagné d'arcs partiels, dont la propagation à la surfaces de l'isolateur peut aussi conduire à un contournement total de l'isolateur [NAM 98, CEI 73].

c- Autres sources de pollution naturelle

La pluie est un phénomène naturel propice à l'humidification des isolateurs par excellence. Lorsqu'elle est intense, elle est susceptible de provoquer la désagrégation des dépôts solides. Cependant, cet auto-lavage, favorable à l'amélioration des qualités diélectriques des isolateurs, est contrarié par le phénomène de ruissellement [MEK 99].

En présence d'une pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne ou de colonne isolante. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut entraîner le contournement de la chaîne d'isolateur ; c'est le contournement sous pluie [MEK 99].

I.3.2.2. Pollution industrielle

La pollution industrielle provient des fumées évacuées à proximité de raffineries, de cimenteries, de complexes sidérurgiques ou même aux abords des centrales thermiques. Pour les régions exemptes des fumées, cette pollution peut être d'origine domestique (appareils de chauffage polluants, véhicules automobiles, ...) ou agricole (engrais). Les isolateurs se recouvrent des poussières faiblement conductrices, mais hygroscopique (absorbe l'humidité). A la présence d'une humidité intense, le sel contenu dans ces poussières abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs et le contournement peut parfois survenir [HEI 82].

I.3.2.2. Pollution mixte

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

I.4. CONSEQUENCES DE LA POLLUTION

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs provoquent une conductivité électrique superficielle. Celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. Suivant les conditions atmosphériques (pluie fine, brouillard,...), la tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur [LAM 72] :

a. Arc non localisé

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

b. Arc fixe

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

c. Contournement des isolateurs pollués

L'accumulation du dépôt est continue et n'est modifiée que par la pluie et le vent. En position verticale, le nettoyage est plus efficace sur le dessus de l'isolateur que sur le dessous, d'où un dépôt plus important sur la surface inférieure des ailettes.

Le comportement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en quatre étapes distinctes. Chacune de ces étapes a une importance sur le résultat final, donc sur la tenue ou le contournement de la chaîne isolante sous tension de service du réseau.

Etape 1 : Dépôt de la pollution

Les particules du dépôt sont apportées par le vent (l'isolateur, par sa présence, modifie le régime laminaire du vent) et se concentrent entre les nervures ou autour du capot (Figure I.5)

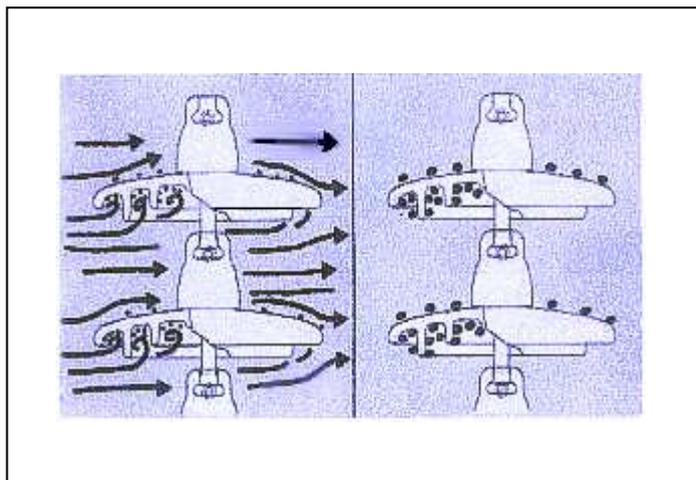


Figure I. 5. Dépôt et évolution de l'agent polluant

Les facteurs d'accumulation sont les suivants :

- la nature, le poids et la taille des particules polluantes,
- la distance de l'isolateur par rapport à la source de pollution et par rapport au sol d'où peut provenir des poussières,
- la vitesse du vent,
- l'orientation de la chaîne, et surtout la forme de l'isolateur et son aptitude à l'auto-nettoyage par les fortes pluies et vents.

Étape 2 : Humidification de la pollution

Le brouillard, la condensation de la petite pluie modifient graduellement et pratiquement sans délavage la surface de l'isolateur pollué. Ces conditions correspondent à des conditions dites critiques. Les sels contenus dans le dépôt se dissolvent et créent un électrolyte conducteur sur la surface de l'isolateur. Un courant de fuite prend alors naissance dès qu'un film conducteur se forme sur la surface de l'isolateur (Figure I.6).

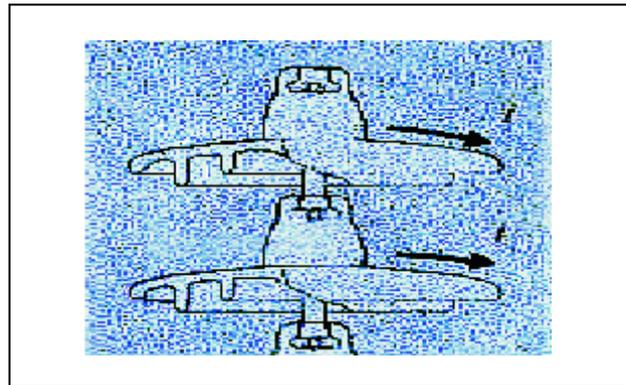


Figure I.6. Humidification du dépôt polluant et création d'un courant de fuite

Pendant le cycle d'humidification, le courant de fuite augmente jusqu'à une valeur maximale, puis diminue s'il y a séchage. Le niveau de courant de fuite dépend du temps, de la nature et de la quantité des sels solubles et insolubles. Ces derniers maintiennent par absorption une certaine quantité d'eau à la surface de l'isolateur, entretenant ainsi l'humidification du dépôt.

Étape 3 : Développement des zones sèches et apparition d'arcs

La densité du courant de fuite est beaucoup plus importante près des ferrures de l'isolateur. Par effet Joule, la température s'élève, l'eau s'évapore et le dépôt devient moins conducteur. Le courant est alors très réduit en amplitude par la présence d'une «bande sèche».

La répartition de potentiel sur l'isolateur est modifiée par cette bande sèche, car la plus grande portion du potentiel électrique se trouve reportée aux bornes de cette bande sèche. Si la largeur de cette dernière est insuffisante pour supporter le potentiel correspondant, un arc se crée (Figure I.7).

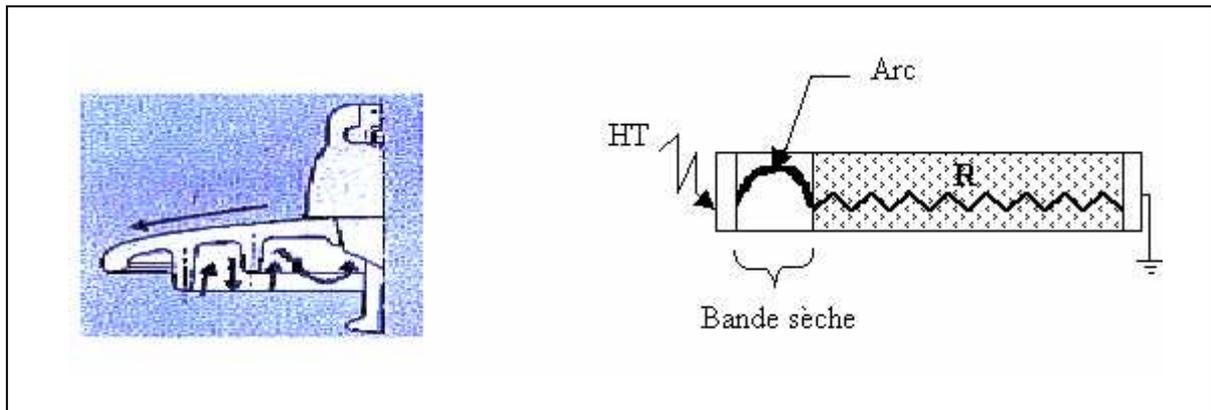


Figure I.7. Arc et bande sèche

Etape 4 : Comportement des arcs

La résistance du dépôt humidifié R, en série avec l'arc, limite le courant et la longueur de l'arc (Figure I.7). Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra, la bande sèche s'humidifiera à nouveau et le mécanisme se répétera encore. Tant que le courant de fuite n'excède pas ce que l'on appelle «courant critique » correspondant à une «longueur critique » de l'arc, cette situation reste stable (Figure I.8). Dans le cas contraire, le contournement de l'isolateur peut survenir.

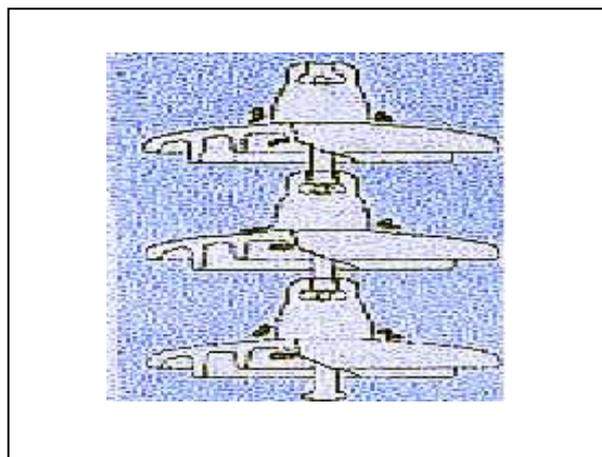


Figure I. 8. Régime d'arcs sous pollution

I.5. MESURE DE LA SEVERITE D'UN SITE

Afin de dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillance dans un site pollué, il est nécessaire de caractériser la sévérité de pollution de ce site. La sévérité est généralement caractérisée par l'intensité de précipitation, ainsi que par la conductivité des dépôts polluants [BUP 76].

Si la résistivité de la pollution humidifiée est suffisamment faible et que le courant de fuite augmente jusqu'au point de dépasser le seuil du courant critique, la longueur de l'arc s'allonge rapidement et court-circuite l'isolateur. Cette situation doit être bien sûr évitée, pour maintenir la qualité du service.

I.5.1. Classification des sites pollués

Afin d'évaluer l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la méthode de brouillard salin et les conditions de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été proposées [HEI 82] :

a- Classe 1

Cette classe correspond à une pollution faible. Cette pollution est généralement naturelle (sauf marine) ou légèrement industrielle. La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium à 2,5 g/l de concentration.

b- Classe 2

La classe 2 correspond à une pollution moyenne. En général, cette pollution est naturelle (sauf marine) ou faiblement industrielle. En classe 2, la sévérité équivalente maximale retenue est de 10 g/l.

c- Classe 3

Cette classe correspond à des zones très localisées où l'on trouve simultanément une forte pollution marine et industrielle. Il s'agit donc de zones à densité industrielle importante, de grandes villes ou de zones proches de la mer soumises à l'action directe des embruns. Ces

sites nécessitent un isolement important. La salinité équivalente maximale, concernant cette classe, est de 80 g/l.

d- Classe 4

La classe 4 correspond aux zones où le niveau de pollution est exceptionnel. La pollution est éventuellement naturelle ou mixte. La salinité équivalente maximale pour la classe 4 est de 160 g/l.

I.5.2. Méthodes de mesures de la sévérité d'un site

Les principales méthodes proposées pour caractériser la sévérité d'un site sont [LAM 72, CEI 73, CIG 79, BOU 78] :

I.5.2.1. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)

La densité du dépôt de sel équivalent est le dépôt équivalent exprimé en mg de NaCl/cm² de la surface d'un isolateur, ayant une conductivité équivalente égale à un dépôt polluant réel dissous dans la même quantité de solution.

Des échantillons de sel sont prélevés à la surface d'un isolateur témoin, en utilisant un matériau absorbant (coton, ...) et de l'eau distillée. Le dépôt est ensuite dissout dans une quantité de solution connue. La conductivité de la solution obtenue ainsi que les caractéristiques de l'isolateur permettent de déterminer la salinité équivalente. Les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante, afin d'obtenir les niveaux entre les périodes de lavage naturel [BOU 78].

I.5.2.2. Conductance superficielle

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance σ par un facteur de forme de l'isolateur. Généralement, la tension est appliquée aux électrodes terminales, ce qui fournit la conductivité superficielle globale de l'isolateur [LAM 72, TEG 93].

Ainsi, la mesure de la conductance superficielle est une méthode satisfaisante pour évaluer la sévérité de la pollution d'un site. Elle peut être représentative d'un type de site étudié, mais en général, elle présente des résultats dispersés [MEZ 02].

I.5.2.3. Courant de fuite

Par comptage d'impulsions, on enregistre pendant une période donnée, sur un isolateur soumis à sa tension de service, le nombre d'impulsions du courant de fuite dépassant une amplitude fixée à l'avance. L'existence d'impulsions précède généralement la phase de contournement. Pour l'enregistrement, on utilise un isolateur en service ou un isolateur témoin et un dispositif permettant de compter les impulsions du courant de fuite [LAM 72].

On mesure, par la suite, la plus forte valeur de crête du courant de fuite. On utilise des isolateurs témoins et une station de mesure fiable et nécessitant un minimum d'entretien. Les mesures devant être effectuées pendant une période relativement longue [LAM 72, CIG 79].

I.6.2.4. Contrainte de contournement

La contrainte de contournement d'un isolateur est la tension de contournement divisée par la longueur totale de l'isolateur. Sur site, la contrainte de contournement peut être mesurée de différentes façons [CIG 79].

- ❖ Installation de chaînes d'isolateurs de même type, mais de différentes longueurs, et soumises à une tension constante. On estime les probabilités de contournement à partir des proportions d'amorçage enregistrées.
- ❖ Une autre méthode consiste à disposer des fusibles sur chaque chaîne, afin que la chaîne accroisse sa longueur effective jusqu'à atteindre le niveau de tenue en tension.

I.6.2.5. Mesure de la pollution de l'air

Les mesures de pollution de l'air s'effectuent sur une période de temps donnée et permettent d'évaluer l'intensité et les caractéristiques de la pollution de l'air sur un site. Les méthodes de mesure adoptées partent du principe qu'en ce qui concerne les phénomènes de contournement, une corrélation peut être établie entre l'analyse physico-chimique de l'air dans un site et la sévérité de la pollution de même site [LAM 72, TEG 93].

I.6.2.6. Mesures optiques

Le but des mesures optiques est d'évaluer l'épaisseur de la couche de pollution déposée à la surface de l'isolateur. Un dispositif à rayons lasers permet à partir des rayons réfléchis (amplitude, décalage de phase, ...etc.), de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche de pollution. La mesure de la sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche [LAM 72, TEG 93].

I.7. METHODES D'ESSAIS SOUS POLLUTION

Pour comparer les performances de divers types d'isolateurs et sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution, il est nécessaire de les soumettre à des essais. Ces derniers peuvent être effectués dans les conditions naturelles (sur site) ou au laboratoire. On distingue deux catégories de recherches sur les isolateurs pollués : les essais sous pollution naturelle et les essais sous pollution artificielle [TEG 93, LAM 78].

I.7.1. Essais sous pollution naturelle

Ils consistent à installer, dans les différents sites pollués, des stations dans lesquelles on observe le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs de longueurs ou de profils différents. Les qualités respectives de ces isolateurs, placés sous la même tension, sont appréciées en fonction des temps au contournement [BOU 88].

On peut classer les isolateurs en distinguant ceux qui ont contourné de ceux qui ont tenu, durant deux ou trois ans d'exposition, par exemple.

Ces essais ont l'avantage de tenir compte de l'effet de toutes les contraintes, dans toutes leurs complexités sur un site donné [TEG 93]. L'inconvénient majeur de ces essais est qu'ils nécessitent plusieurs années, pour pouvoir étudier valablement les performances des isolateurs.

I.7.2. Essais sous pollution artificielle

Ils consistent à reproduire en laboratoire les conditions de la pollution naturelle. Ils sont aujourd'hui largement utilisés et ont l'avantage d'être rapides. Les méthodes d'essais qui

demeurent actuellement normalisées sont les méthodes de la couche solide, la méthode du brouillard salin et la méthodes de la pollution liquide.

a- Méthode de la couche solide

Dans ces méthodes, la surface isolante est recouverte par pulvérisation d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte. La conductivité de cette suspension est réglée par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium.

Si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérité est défini par la densité de dépôt de sel en mg/cm^2 .

Par ailleurs, si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini par la conductivité de la couche polluante.

Certains chercheurs ont utilisé une couche semi-conductrice comme agent polluant [TEG 03].

b- Méthode du brouillard salin

La solution saline utilisée dans la méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière insoluble. Dans cette méthode, l'isolateur soumis à la tension d'essai, est placé dans un brouillard salin dont le taux de salinité définit la sévérité.

D'après la classification des sites pollués, les valeurs de salinités appliquées sont choisies selon une progression allant de 2.5 à $160 \text{ kg}/\text{m}^3$ [HEI 82].

c- Méthode de pollution liquide

Cette méthode s'apparente à la méthode du brouillard propre dans la mesure où un mélange liquide est appliqué sur l'isolateur avant l'essai. Cependant, dans ce cas la pollution n'est pas séchée avant l'essai. Elle est constituée d'eau, de craie et de méthylcellulose ou de kaolin. Comme pour la méthode de la couche solide la conductivité est ajustée par addition de chlorure de sodium.

Après quelques minutes d'égouttage, la tension d'essai est appliquée à l'isolateur sans humidification supplémentaire.

I.8. TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION

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

I.8.1. Allongement de la ligne de fuite

Cette méthode permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux techniques sont utilisées :

- ❖ Le changement de type d'isolateur (pour rallonger la ligne de fuite) : c'est une technique très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- ❖ L'utilisation de prolonger de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [LAM 78].

I.8.2. Isolateurs plats

Les isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'autonettoient très bien sous l'effet du vent [CIM 78].

I.8.3. Graissage périodique

Par mesure économique, seuls les isolateurs de postes sont concernés. On utilise des graisses silicones. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs [LAM 78, CIM 90].

I.8.4. Revêtement silicone

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Ce revêtement protège les isolateurs et améliore leurs tenues sous pollution.

I.8.5. Les isolateurs composites

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

I.8.6. Nettoyage des isolateurs

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

I.9. CONCLUSION

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

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

Le fait de disposer d'une méthode de pollution artificielle permet de n'effectuer l'expérimentation (sur site) que sur un seul type d'isolateurs et éventuellement à un niveau de tension différent que celui prévu, ce qui constitue déjà un avantage considérable.

Afin d'être en mesure de fournir rapidement des renseignements concernant l'isolement nécessaire, il serait préférable de disposer d'une carte de sévérité des principaux sites pollués. On propose de les classer en quatre catégories de sévérité auxquelles correspondent des longueurs minimales de lignes de fuite à respecter pour les isolateurs en services dans ces sites.

Chapitre II

Principaux Travaux sur
le Contournement sous
Pollution

II.1 INTRODUCTION

Ayant pour origine plusieurs sources, la présence des couches polluantes sur les surfaces des isolateurs de haute tension, devient un problème inquiétant ces dernières années. Pour cela, plusieurs travaux ont été effectués pour étudier ce phénomène. Certains travaux [MEK 99, BOU 02] considèrent que la distribution de la pollution sur l'isolateur est continue. D'autres, par contre, la considèrent discontinue [DAN 83]. Des travaux récents [MEK 99, NAM 98, BOU 02, TEG 03] ont abordé le problème de la non-uniformité de la couche de pollution.

II.2. MODELES D'ISOLATEURS

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 [DAN 83, POR TI, ALS 63, WOO 70, WIL 69]. Si quelques modèles reflètent assez bien le comportement de l'isolateur, d'autres par contre, en restent assez éloignés [ALS 63, WOO 70].

II.2.1. Modèle de J.Danis [DAN 83]

Ce modèle est constitué d'une plaque de verre isolante, de forme géométrique simple, munie de deux électrodes rectangulaires identiques et placées aux deux extrémités de la plaque (Figure II.1).

Dans le but de reproduire des couches similaires à celles observées sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, J.Danis a considéré plus d'une zone sèche (Figure II.1). Ainsi l'auteur a abouti aux résultats suivants :

- ❖ L'arc électrique prend naissance dans les zones sèches et se déplace vers les zones humides. Cet arc commence d'une façon aléatoire le long de la zone sèche et aucune position n'est privilégiée par rapport à une autre.
- ❖ Dans le cas d'une alimentation continue, l'aspect de l'arc dépend de la polarité de l'électrode qui se trouve juste à proximité de l'arc (en cas de zone humide). Il semblerait que l'anode provoque un arc en forme de simple décharge lumineuse. La cathode, par contre, provoque un arc aux multiples ramifications fines. De plus, le développement de l'arc à proximité de la cathode est plus rapide que celui à proximité de l'anode.

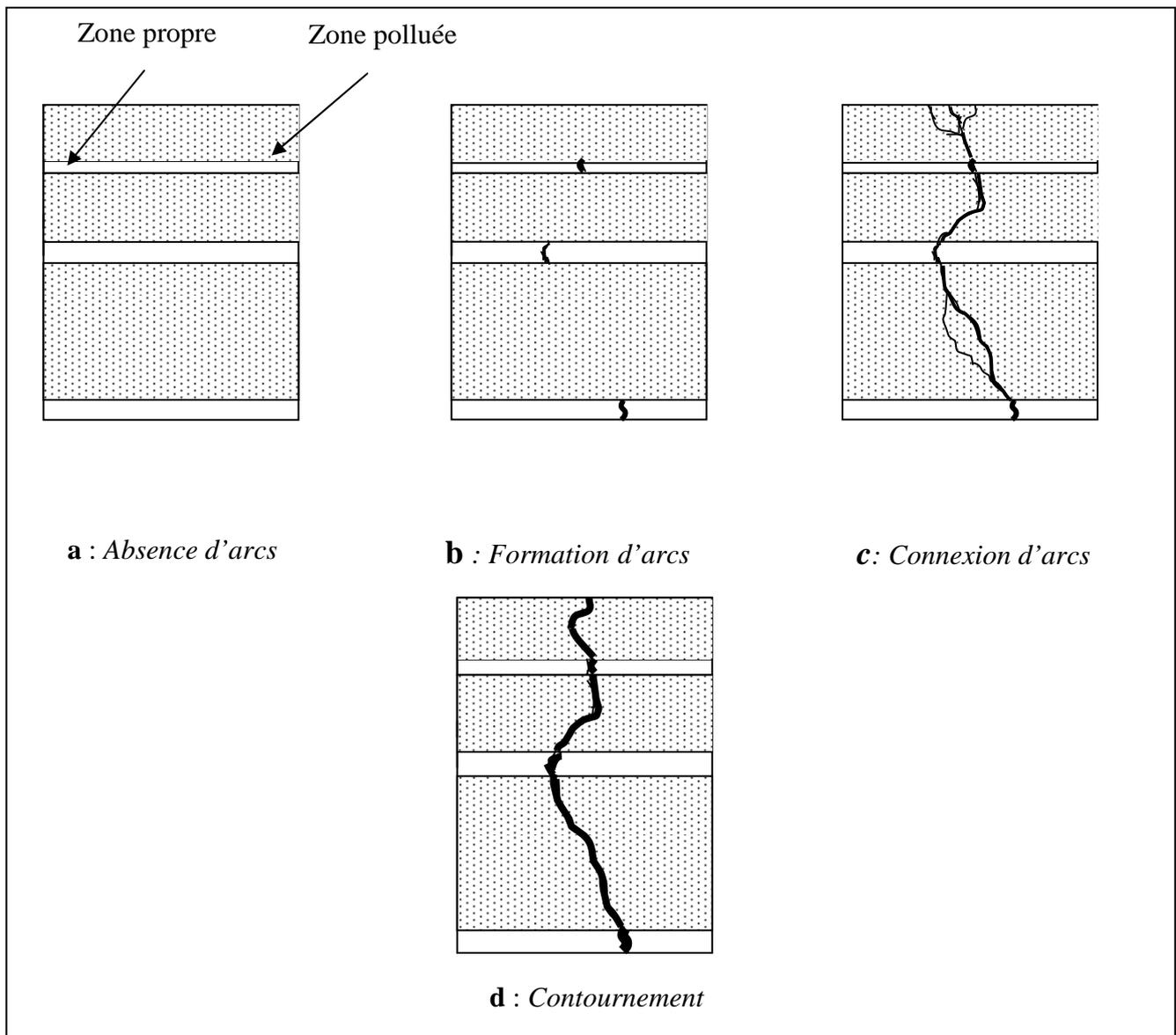


Figure II.1. Modèle de J. Danis

- ❖ Plusieurs arcs peuvent se développer en parallèle aux premiers stades du processus. Plusieurs arcs disparaissent, lorsque le courant augmente, de manière à ce qu'un seul arc dominant persiste au cours des étapes suivantes. Celui-ci se développe donc, seul, à travers la zone humide. Dans le cas de plusieurs zones sèches, le développement de l'arc d'une zone sèche à travers la zone humide s'effectue de manière à rejoindre l'arc développé sur la zone sèche voisine.
- ❖ Le contournement se fait à travers les chemins déjà préétablis par les différents arcs de chaque zone sèche.

- ❖ Lorsque l'expérience est répétée, les positions des arcs développés sont différentes et le contournement se fera donc à travers tout un autre chemin, qui n'est pas toujours le moins court.

A travers ces considérations, l'auteur conclura que la rupture des zones sèches survient d'une manière aléatoire. Comme la tension de contournement dépend de la rupture de ces zones sèches, celle-ci possède également le même caractère, c'est à dire obéit aux lois statistiques.

II.2.2. Modèle de M. N. Rayes et M. Zhirh [RAY 91]

Le modèle est constitué d'une électrode pointue mise à la borne haute tension, placée au-dessus d'une plaque isolante, à une distance s , considérée égale à la largeur de la zone sèche. La plaque isolante est placée sur quatre colonnes uniformément polluées, de longueur $l-s$, égale à la distance séparant cette plaque de la terre (Figure II.2).

En variant la longueur des colonnes et en relevant la tension de contournement correspondante, les auteurs remarquent que :

- L'allure des courbes représentant la variation de la tension de contournement en fonction de s est en forme de V. Le minimum correspond à une largeur s_{min} située à environ 45 – 50 % de la longueur l .
- Pour une même largeur de la zone sèche, la tension de contournement diminue avec l'augmentation de la conductivité des couches polluantes.
- La tension de contournement de l'ensemble zone sèche-zone polluée semble être confondue avec celle de la zone polluée lorsque $s < s_{min}$, et avec celle de la zone sèche pour $s > s_{min}$.

Les auteurs ont conclu que :

- Le contournement de l'isolateur, sous tension alternative à fréquence 50 Hz, dépend du rapport des largeurs des zones sèches et polluées.
- Les courbes en V obtenues ont montré que le contournement total ne représente pas la somme des contournements partiels des zones sèches et zones polluées.
- Le contournement total correspond à un des contournements partiels considérés, suivant le rapport entre les largeurs de la zone sèche et celles de la zone polluée.

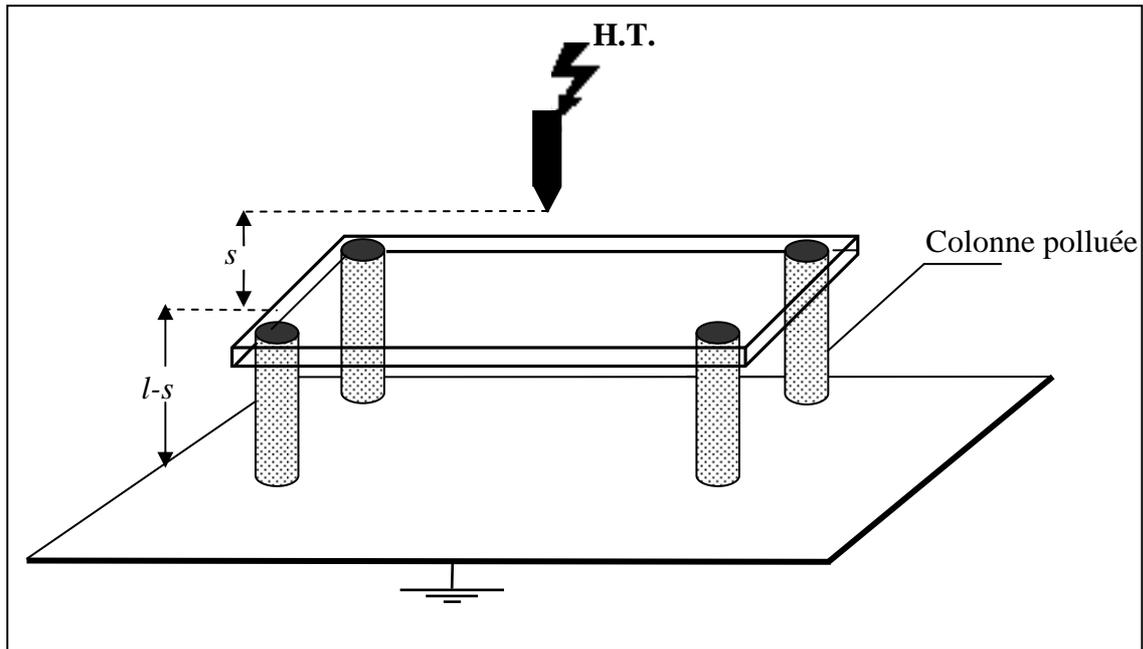


Figure II. 2. Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh

II.2.3. Modèle de A. Mekhaldi [MEK 99]

A. Mekhaldi a utilisé un modèle plan et rectangulaire similaire à celui considéré par P.Claverie et Y.Porcheron [POR TI]. Il s'intéresse surtout à l'évolution du courant de fuite ainsi que la longueur de l'arc électrique en fonction de la conductivité de la couche de pollution, du rayon de l'électrode de haute tension, de la distance inter-électrodes, de l'épaisseur de la couche de pollution et de la répartition discontinue de la couche de pollution.

A partir de ces études, les résultats tirés sont les suivants :

- Le courant de fuite et la largeur de l'arc diminuent avec la distance inter-électrodes, augmentent avec le rayon de l'électrode circulaire, augmentent avec la conductivité et augmentent aussi avec l'épaisseur de la couche de pollution.

II.2.4. Modèle de A. Mekhaldi, D. Namane, S. Bouazabia et A. Beroual

Ces auteurs ont étudié l'influence de la répartition discontinue de la couche de pollution sur le comportement d'un modèle plan de laboratoire [MEK 99-a].

Ce modèle est soumis à des différentes contraintes bien définies, à savoir la discontinuité de la pollution en variant de manière régulière la largeur de la pollution de 0 à L (L étant la longueur de fuite totale, égale à 40 cm), la position de la pollution, ainsi que la conductivité de la couche polluante.

En effet, deux configurations de la pollution ont été considérées, à savoir, la pollution côté électrode circulaire de haute tension et la pollution côté électrode rectangulaire de terre (Figure II.3).

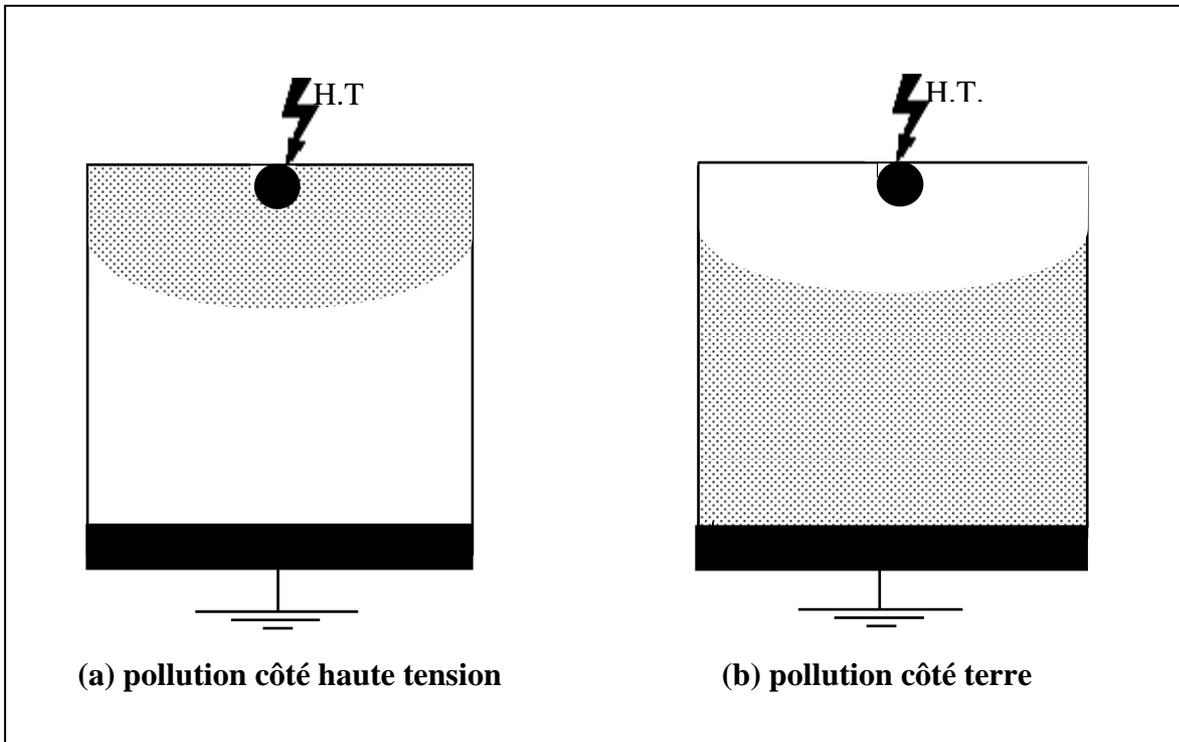


Figure II. 3. Modèle de A. Mekhaldi, D. Namane, S. Bouazabia et A. Beroual

Les principales conclusions tirées sont :

- Il existe un régime critique à partir duquel on obtient une hausse brutale du courant. Ce régime est atteint pour les grandes largeurs de la couche polluante, lorsque la tension et/ou la conductivité sont élevées.
- Le courant de fuite est toujours plus élevé lorsque la couche polluante est du côté de l'électrode rectangulaire, mise à la terre.
- La conductivité favorise la circulation du courant de fuite, surtout lorsque la couche de pollution est établie côté terre.
- La position de la pollution n'a apparemment pas d'influence sur la tension de contournement.
- Il existe une longueur critique de la zone sèche à partir de laquelle aucun arc stable ne se propage. Cette longueur, évaluée au tiers de la longueur de la ligne de fuite

totale, diffère considérablement de la longueur critique d'arc obtenue par P. Claverie et Y. Porcheron [CLA 73] dans le cas de pollution continue.

- La longueur critique de la zone sèche est toutefois indépendante de la conductivité.

II.2.5. Modèle de Woodson et Mc Elroy

En utilisant une configuration géométrique circulaire, Woodson et McElroy [WOO 70] ont essayé de reproduire d'une façon idéale, la surface d'un isolateur (Figure II.4).

Ce modèle n'a pas donné de résultats satisfaisants. Cela a été imputé à la non-uniformité de la résistivité superficielle de l'isolateur.

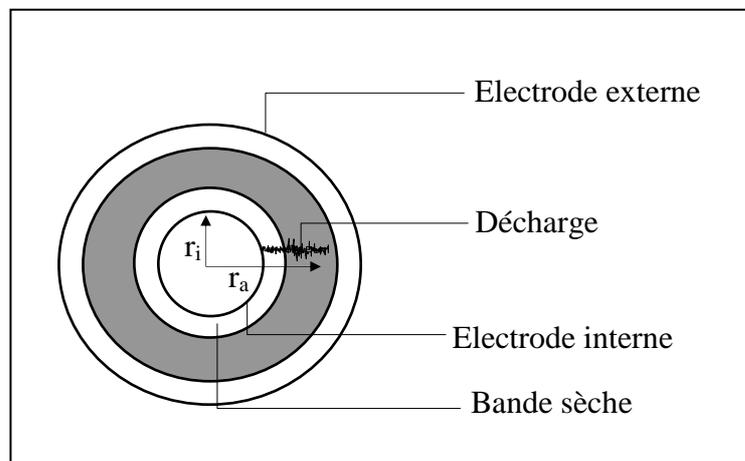


Figure II. 4 Modèle de Woodson et McElroy

II.2.6. Modèle de Wilkins

Certains chercheurs [BOU 88] ont utilisé ce modèle pour développer des critères de propagation des décharges électriques, est constitué d'une électrode mise sous tension et située au-dessus d'un bac rempli d'eau additionnée de sel, permettant de simuler la zone polluée. La zone sèche étant considérée comme étant l'espace compris entre l'électrode et l'eau (Figure II.6). Ce modèle a été utilisé pour étudier le critère de propagation de l'arc [HUR 75].

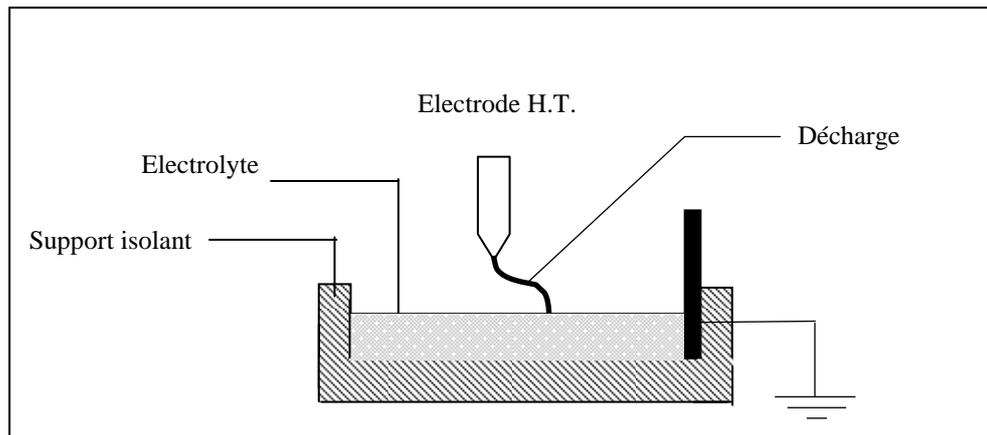


Figure II. 6. Modèle de Wilkins

II.3. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons mené une recherche bibliographique qui nous a permis d'explorer les différents résultats de plusieurs chercheurs portant sur la non-uniformité de la pollution le long d'une surface isolante.

Un fait très important qui ressort de cette synthèse est l'intégralité des résultats obtenus par les auteurs [CEI 73, SUN 97, SWI 99] :

- La non-uniformité de la couche polluante le long de la surface d'un isolateur, peut être la cause de certains phénomènes complexes conduisant au contournement (création d'arcs multiples [NAM 98]).
- La longueur de la zone sèche est indépendante de la conductivité.
- Les méthodes d'essais sous pollution artificielle permettent d'étudier séparément les paramètres spécifiant le contournement sous pollution.
- Tous les modèles de laboratoire cités précédemment ont permis par la simplicité de leur configuration, d'examiner aisément l'influence de nombreux paramètres sur le comportement de l'isolateur à savoir le courant de fuite, la tension de contournement, la tension d'entretien de l'arc, etc [NAM 98, MEK 94].
- La surface supérieure de l'isolateur, tant qu'elle est exposée aux facteurs d'auto nettoyage, porte une pollution moins accentuée que celle de la surface inférieure.
- La pollution augmente sensiblement de la zone périphérique vers la zone centrale de l'isolateur.

- La non-uniformité de la pollution le long d'une chaîne d'isolateurs est due principalement à la position des isolateurs et à la tension appliquée
- La rigidité diélectrique d'un isolateur est liée d'une part au rapport entre les conductivités des parties de la couche polluante et d'autre part, au rapport de leurs portions de la longueur de fuite.

Chapitre III

Etude Expérimentale

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons l'équipement de la station d'essais de choc. Nous présentons aussi les différents types d'essais et explicitons certaines méthodes utilisées en technique de la haute tension.

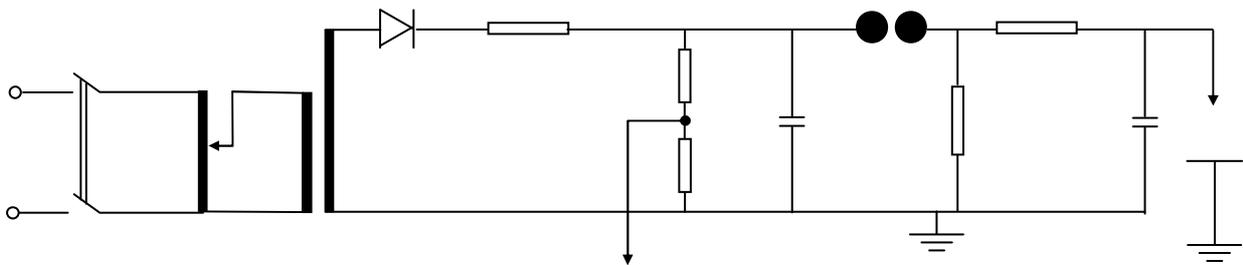
Nous nous sommes intéressés à la variation de la tension $U_{50\%}$ (la tension disruptive moyenne) et le courant de fuite en fonction de la largeur de la pollution en papier aluminium, polarité de l'électrode active, le temps entre deux impulsions successives et le niveau de la tension appliquée.

III.2. GENERATION D'ONDES DE CHOC DE L'ENP

III.2.1. Description

Le générateur de choc est de type Marx [DOB 72] ayant les caractéristiques suivantes :

- Nombre d'étages = 8
- Tension nominale = 600 kV (tension de charge nominale par étage égale à 75 kV)
- Energie = 4 kJ



Avec :

T.R : transformateur de réglage

T.H.T : Transformateur de haute tension

D : Redresseur

Rc : Résistance de charge.

Rs : Résistance série équivalente $((8 \times 10) + 150) \Omega$

R_p : Résistance parallèle équivalente $8 \times 430 \Omega$

C_1 : Condensateur de choc 22.5nF

C_2 : Condensateur de charge 2nF

La tension continue destinée à la charge du générateur de choc est fournie par un redresseur D de tension monophasé. Une résistance (R_c) destinée à limiter le courant de charge à une valeur admissible est placée en série avec le redresseur. Ce dernier est alimenté par un transformateur de haute tension ($T.H.T$). La charge des condensateurs de choc s'effectue à travers des résistances R_c .

Au cours de la charge des condensateurs, la tension aux bornes des éclateurs à sphères augmente. Lorsque les éclateurs s'amorcent, chaque condensateur se décharge à travers les résistances R_s, R_p . La tension générée appliquée à l'objet d'essais est égale à la tension aux bornes d'un étage multipliée par le nombre d'étages qui est égal à 8 dans notre cas.

III.2.2. Tension de choc délivrée

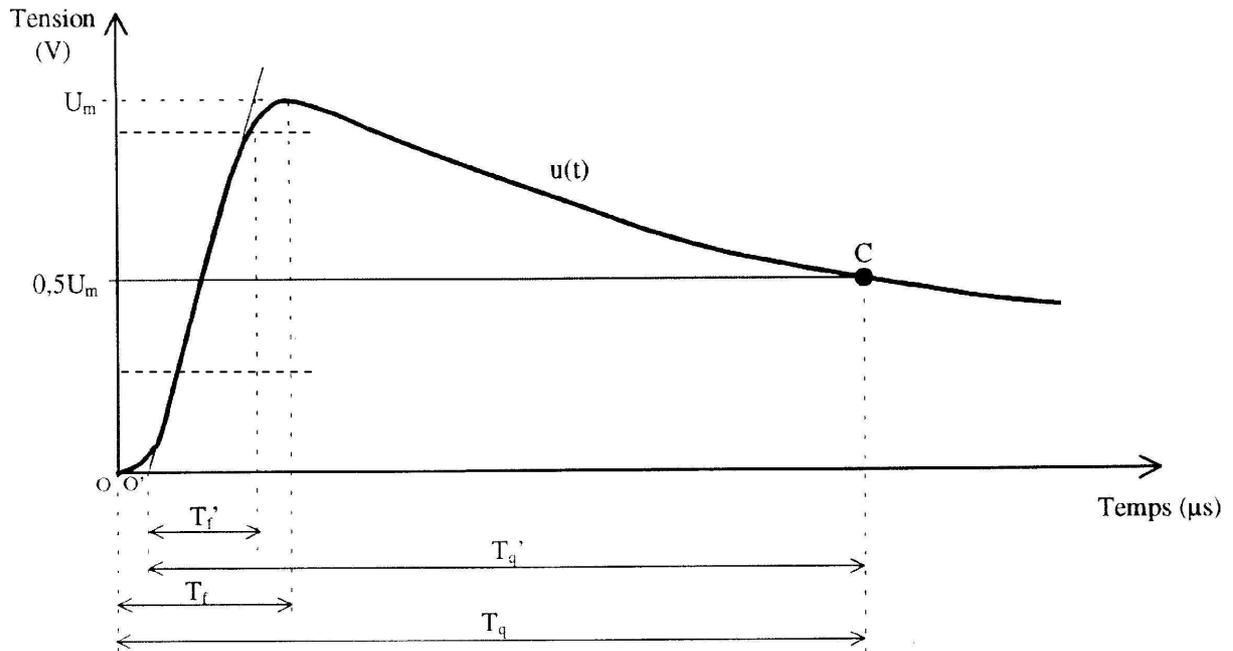
La tension délivrée par le générateur de choc, simulant les surtensions d'origine atmosphérique, est une impulsion unipolaire bi-exponentielle dont la forme est normalisée conformément aux recommandations de la CEI 60. L'onde délivrée est définie par les paramètres suivants:

- ❖ La constante de temps de front τ_f
- ❖ La constante de temps de mi-amplitude τ_q
- ❖ L'amplitude maximum U_m

La forme de tension générée par le générateur de choc répond à l'équation suivante:

$$U(t) = U_m[\exp(-t/\tau_q) - \exp(-t/\tau_f)] \quad (\text{III.1})$$

La CEI donne l'onde de forme normalisée dite « choc $1,2/50 \mu\text{s}$ » comme l'onde la plus adoptée pour les essais en choc de foudre. La durée conventionnelle de front T_f' de cette onde est de $1.2 \mu\text{s}$ et la durée conventionnelle de mi-amplitude T_q' est de $50 \mu\text{s}$. En effet le choc de $1,2/50 \mu\text{s}$ simule assez bien la forme de l'onde de tension de foudre [GAR 94].



O : Origine de la tension de choc

O' : origine conventionnelle de la tension de choc

T_f : durée de front

T_f' : durée conventionnelle de front

T_q : durée de mi-amplitude

T_q' : durée conventionnelle de mi-amplitude

III.3. DETERMINATION DE LA TENSION DISRUPTIVE MOYENNE

$U_{50\%}$

La tension $U_{50\%}$ de décharge disruptive est la tension pour laquelle on obtient une probabilité de décharge $P(U) = 0.5$. Dans le cadre de notre travail cette tension a été déterminée par la méthode Up and Down et calculée d'après la formule de Dixon et Mood [DIX 48]. Les valeurs mesurées ont été ramenées aux conditions normales de température et de pression selon la norme [CEI 89].

III.4. CLASSIFICATION DES ESSAIS DE HAUTE TENSION [BOU ST]

❖ Classe 1

Les essais de cette classe concernent l'application "n" fois d'un même niveau de tension (palier), puis la détermination des fréquences de décharge disruptive.

Les formes de tension sont : U_{choc} , U_{continue} et $U_{\text{alternative}}$ [CEI 73, CEI 76, CEI 77].

A chaque niveau de tension d'essai correspondra une probabilité de décharge variant de 0% à 100%. Pour la détermination de la tension moyenne $U_{50\%}$ et de l'écart type σ , nous reportons les valeurs de tension avec leur probabilité respective sur une échelle gauss-arithmétique. Dans le cas d'une régression linéaire, la distribution est normale et nous avons les résultats suivants [BOU ST]:

$$U_{\text{moy}} = U_{50\%} \quad \{P(U) = 0.50 \}$$

$$\sigma = \frac{U_{84\%} - U_{16\%}}{2}$$

❖ Classe 2

Dans ce cas, la tension est augmentée progressivement jusqu'à la disruption. L'essai est répété "n" fois.

Les formes de tension sont : U_{continue} et $U_{\text{alternative}}$ [BOU ST].

$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n U_k$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (U_k - U_{\text{moy}})^2$$

❖ Classe 3 [BOU ST]

Dans ce dernier cas, nous procédons à l'application multiple de plusieurs niveaux de tension, dépendant chacun du niveau précédent.

On choisit un niveau de tension U_i proche de $U_{50\%}$ et on fixe un $\Delta U \approx 0,05 U_i$.

- Si pour le niveau de tension U_i on a une décharge, l'essai suivant s'effectuera à la tension : $U_{i-1} = U_i - \Delta U$

- Si pour le niveau de tension U_i on a une tenue, l'essai suivant s'effectuera à la tension : $U_{i+1} = U_i + \Delta U$

A chaque niveau de tension U_i , correspondra un nombre d'applications n_i . La tension moyenne est définie par l'expression :

$$U_{\text{moy}} = U_{50\%} = \frac{\left(\sum n_i U_i\right)}{\sum n_i}$$

III.5. METHODE MONTEES ET DESCENTES (UP AND DOWN)

Dans le cas où la probabilité de décharge suit la loi normale, il est préférable d'utiliser la méthode Up and Down, pour déterminer des niveaux de tension de différentes probabilités de décharge.

III.5.1. Méthode Up and Down selon Dixon et Mood [DIX 48]

III.5.1.1. Détermination de $U_{50\%}$ et σ

Nous commençons les essais à un niveau de tension U_0 , relativement faible. Le prochain niveau de tension sera :

$$U_1 = U_0 + \Delta U \text{ dans le cas où il y a tenue à } U_0$$

$$U_1 = U_0 - \Delta U \text{ dans le cas où il y a rupture à } U_0$$

Le choix du niveau de tension suivant se fera de la même manière que pour U_1 .

On obtient ainsi :

$$U_{50\%} = U_0 + \Delta U (A/N \pm 0.5)$$

$$\text{et } s = 1,62 \Delta U (C + 0.029)$$

Avec : + : dans le cas où l'on choisit les n_i tenue

- : dans le cas où l'on choisit les n_i rupture

$$A = \sum (i \cdot n_i); (i = 0 \text{ pour le plus le plus faible niveau de tension}).$$

$$B = \sum (i^2 \cdot n_i);$$

$$N = \sum n_i;$$

$$C = (N \cdot B - A^2) / N^2$$

n_i : nombre de ruptures (ou tenue) pour le niveau U_i

III.5.1.2. Intervalle de confiance [BOU ST]

$$U_{moy} = U_{50\%} \pm 1,96 \cdot \sigma_u$$

$$\sigma_{moy} = s \pm 1,96 \cdot \sigma_s$$

avec : $\sigma_u = s \cdot G / \sqrt{N}$ et $\sigma_s = s \cdot H / \sqrt{N}$

H et G sont déterminés graphiquement. Pour une bonne précision, il faudrait choisir ΔU proche de σ .

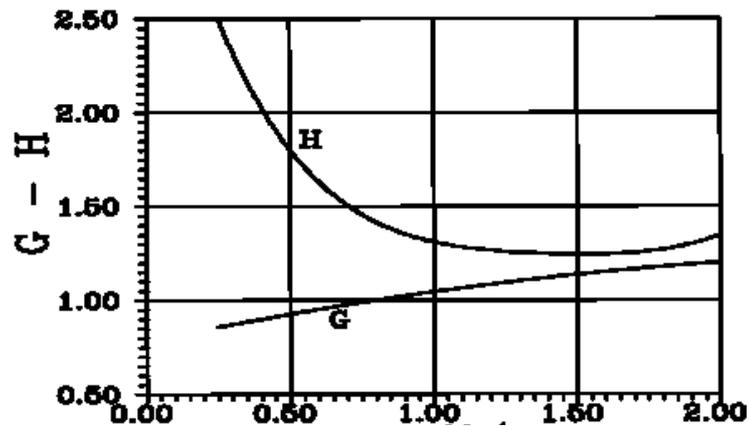


Figure III.3. Variation de H et G en fonction de $(\Delta U / \sigma)$

III.5.2. Méthode Up and Down élargie

Cette méthode, établie par Carrara et Dellara [CAR 72], permet la détermination de niveaux de tension à différentes probabilités de décharge. La probabilité qu'au moins un choc sur "m", d'amplitude U engendre une décharge disruptive s'écrit:

$$P_m(U) = 1 - [1 - P_1(U)]^m$$

- Si $P_1(U) = 50\%$ alors $P_4(U) = 93,8\%$
- Si $P_4(U) = 50\%$ alors $P_1(U) = 15,9\% \approx 16\%$

Ainsi pour déterminer l'écart type, il faut d'abord déterminer $U_{50\%}$ ($P_1=50\%$), puis $U_{16\%}$ ($P_1(U)=16\%$). Sachant que la loi est normale, l'écart type sera :

$$s = U_{50\%} - U_{16\%}$$

Pour déterminer $U_{16\%}$, on appliquera la même méthode que pour la détermination de $U_{50\%}$, mais avec 4 applications par niveau de tension. La série de 4 chocs par palier, peut être interrompue dès qu'il y a rupture.

III.6. DETERMINATION DE LA TENSION $U_{0\%}$

La tension $U_{0\%}$ c'est la tension pour laquelle on est sûr qu'il n'y a pas une disruption d'isolation entre les deux électrodes du système à étudier. Pour déterminer cette tension, la méthode des paliers multiples constants a été appliquée. Elle consiste à appliquer trois paliers de tension différents avec application de 20 chocs par palier. Le temps entre deux chocs successifs est de l'ordre de 30 secondes. Plus le nombre de paliers appliqué est grand plus l'interpolation des points sera meilleure et donc une bonne précision lors de l'extrapolation pour déterminer $U_{0\%}$. En effet, cette dernière correspond à la fréquence de décharge de 0.1% sur une échelle gauss-arithmétique.

Les fréquences de décharge en fonction des tensions d'essais trouvées sont généralement distribuées selon une régression linéaire sur une échelle gauss-arithmétique. Ceci correspond à ce qu'ont obtenu d'autres auteurs [BEL 94, BOU 02-a, CHO 99, RAT 93]. La distribution normale a été donc vérifiée et admise dans notre présente étude.

III.7. CORRECTION ATMOSPHERIQUE

III.7.1. Influence de la densité relative de l'air

On sait que la température et la pression, en modifiant la densité du gaz, influent sur la rigidité diélectrique de l'air. Dans la CEI 60, on trouve la notion de densité relative qui est définie comme étant le rapport de la densité de l'air dans les conditions de pressions P et de température T , à la densité de l'air dans les conditions atmosphériques de référence dites normales, c'est à dire:

- ❖ Température ambiante $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ❖ Pression atmosphérique $P_0 = 1013\text{ mbar}$ (= 760 mmHg)

$$\partial = 0.289 \frac{P}{273 + T} \quad (\text{III.2})$$

La pression P est en mbar et la température T en °C.

Cette équation (III.2) est utilisée pour convertir la tension de décharge U mesurée dans les conditions atmosphériques d'essais (température T et pression P) à la valeur U_0 qui aurait été obtenue dans les conditions normales (T_0 et P_0) citées ci-dessus.

$$U_0 = \frac{U}{(\partial)^n} \quad n \leq 1 \quad (\text{III.3})$$

L'exposant n dépend de la forme d'onde, de la longueur d'intervalle et de la position des électrodes.

III.7.2. Influence de l'Humidité

La tension d'amorçage est particulièrement moins sensible à la variation de l'humidité dans le cas des ondes rapides ou très rapides. C'est le cas pour les chocs de foudre [DOB 72]. Ainsi, nous ne tiendrons pas compte de ce facteur. Durant nos essais l'humidité relative variait entre 75% et 80%.

III.8. MODE OPERATOIRE

La plupart des travaux considèrent des modèles expérimentaux de géométrie simple et rarement le profil d'un isolateur réel [CLA 73, MEK 94, MEK 90, NAM 98, TEG 93]. Cependant, si ces modèles équivalents ne reflètent pas exactement le comportement des isolateurs réels, ils permettent, par contre, une meilleure visualisation du phénomène de décharge électrique.

III.8.1. Modèle expérimental

Le modèle expérimental que nous avons utilisé est semblable à celui de P. Claverie et Y. Porcheron [CLA 73]. Il est constitué d'une plaque de verre (500x500x6 mm) ayant la propriété de résister à la chaleur due aux décharges électriques. Cette plaque est munie de deux électrodes en papier aluminium. La première est circulaire de rayon $r=25$ mm mise à la borne haute tension et la seconde rectangulaire (400x50 mm) mise à la terre. Le modèle de laboratoire est soumis à une répartition discontinue de la pollution reproduisant l'état critique

de surface de l'isolateur capot et tige type 1512L, prélevé de la région de Hassi R'mel [MEK 99, TEG 03] (Figure. III.4). La distance inter-électrodes du modèle expérimental ($d=292$ mm) correspond à la ligne de fuite de l'isolateur réel. Les dimensions longitudinales des bandes propres et polluées sont données dans le tableau III.1. Afin de simuler une pollution parfaitement conductrice, les couches polluantes sont réalisées avec du papier aluminium.

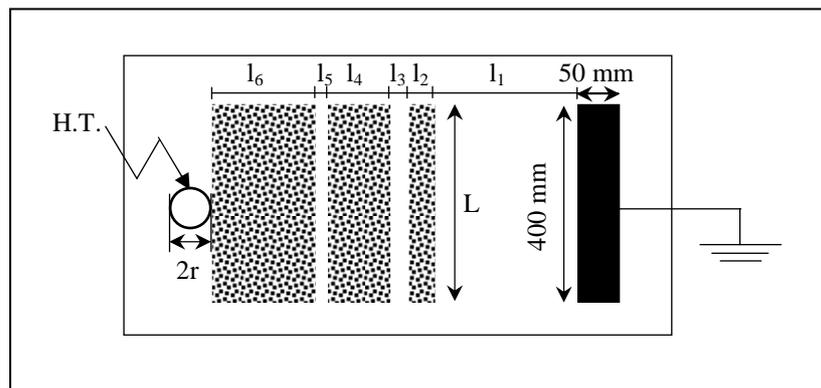


Figure III.4. Modèle expérimental

	Bande i	Longueur l_i (mm)	Pourcentage par rapport à la longueur de fuite (%)	
Bande propre équivalent	1	106	36.30	42.12
	3	13	4.45	
	5	04	1.37	
Bande polluée équivalente	2	30	10.27	57.88
	4	52	17.81	
	6	87	29.80	

Tableau III.1. Dimensions longitudinales des zones propres et polluées

III.8.2. Préparation du modèle

Avant chaque essai, la plaque isolante est bien nettoyée, puis imbibée de gaz oïl dans les endroits d'emplacement des électrodes en aluminium, de manière à ce qu'aucun espace d'air ne reste entre la plaque et les électrodes. La plaque est ensuite essuyée avec de coton imbibé d'alcool isopropylique pour éliminer toute trace de gaz oïl sur la plaque isolante. Le

modèle est disposé horizontalement sur quatre colonnes isolantes, elles-mêmes posées sur un support en bois. Le modèle se trouve ainsi placé à environ un mètre du sol et à une distance suffisamment grande du transformateur d'essais (deux mètres environ) [CEI 89].

III.8.3. Procédé d'essais

III.8.3.1. Mesure de la tension de contournement

Avant chaque essai, nous nettoyons toutes les zones propres avec du coton imbibé d'alcool isopropylique pour éliminer les traces partiellement frottées par le passage de l'arc électrique.

La mesure de la tension de contournement a été effectuée pour les deux polarités (positive et négative) en variant la largeur de la couche polluante de 0 (plaque propre) à 40 cm. En effet les largeurs que nous avons adoptées sont les suivantes : 1, 2, 4, 6, 8, 16, 24, 32 et 40 cm.

Dans le but d'opérer avec un minimum d'erreurs dans les mesures, nous avons procédé à plusieurs essais préliminaires. Etant donné la difficulté de pouvoir reproduire exactement le même état des couches en papier aluminium, nous avons gardé, pour un même niveau de tension, la même plaque.

III.8.3.2. Mesure du courant de fuite

La mesure du courant de fuite à été effectuées à l'aide d'un dispositif constitué par deux résistances et un amplificateur opérationnel de type UA741, comme le montre la Figure III.5.

Afin de recueillir totalement le signal du courant nous avons utilisés un adaptateur à l'entrée de l'oscilloscope (TEKTRONIX TDS 340A 100MH).

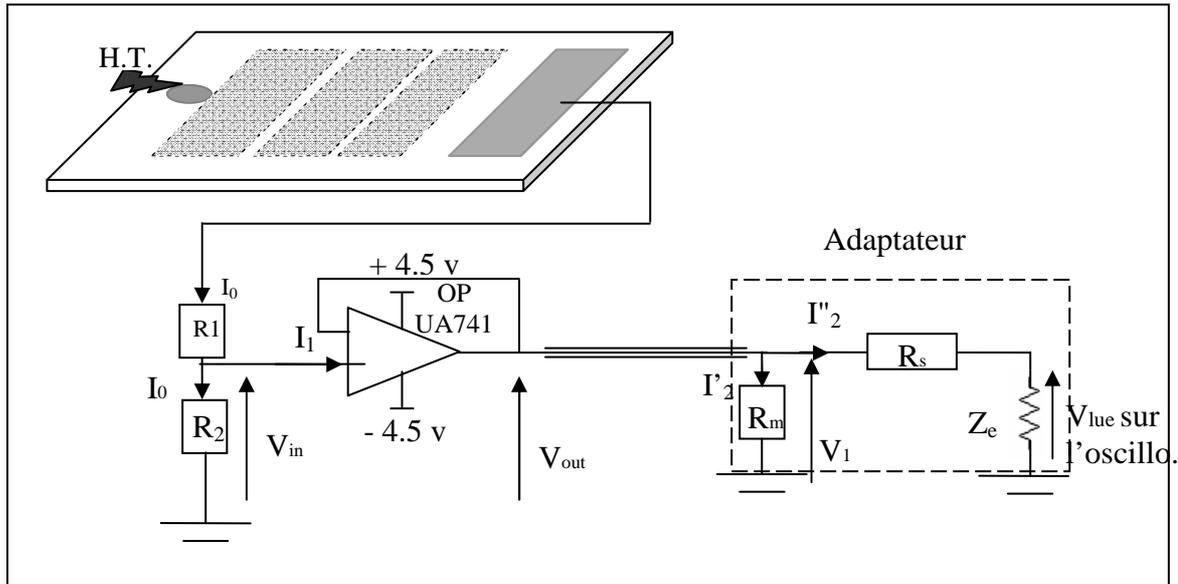


Figure III.5. Circuit de mesure du courant de fuite

Avec

$Z_0 = Z_c + R_s$: impédance d'entrée du dispositif de mesure,

Z_c : impédance d'entrée de l'oscilloscope,

R_s : résistance de protection,

R_m : résistance d'adaptation du câble de mesure,

R_1 : résistance pour diviser la tension d'entrée,

R_2 : résistance pour mesurer l'image du courant de fuite.

III.8.3.3 Expression du courant de fuite I_0 en fonction de V_{lue}

Le courant I_0 peut être donné en fonction de V_{in} et R_2 par :

$$I_0 = \frac{V_{in}}{R_2} \tag{III.4}$$

Par ailleurs, le courant I_1 est nul car l'impédance d'entrée de l'amplificateur opérationnel est très grande, ce qui nous permet d'avoir les égalités suivantes:

$$V_{in} = V_{out} \text{ et } V_1 = V_{out} \tag{III.5}$$

$$\text{En effet } V_{in} = V_1 \tag{III.6}$$

$$\text{Et } V_1 = R_2 I_0. \tag{III.7}$$

Ce qui nous permet d'avoir la relation entre le courant de fuite et le signal capté suivante:

$$\Rightarrow I_0 = \frac{V_1}{R_2} \quad (\text{III.8})$$

Les valeurs des composantes d'antenne (R_1 , R_2) sont choisies de façon est-ce que la constante de temps d'antenne soit plus petite que celle du signal d'entrée, pour pouvoir le capter. Afin assurer la transmission totale de signal vers l'oscilloscope. Nous avons choisi :

$$R_2 = 100\Omega, R_m = 6.6k\Omega, R_s = 4.5M\Omega, Z_e = 1M\Omega.$$

En se basant sur ces valeurs, nous avons :

$$I_0 = \frac{1}{100} V_1 \text{ [A]} \quad (\text{III.9})$$

Par ailleurs,

$$\frac{V_1}{R_s + Z_e} = \frac{V_{lue}}{Z_e} \Rightarrow V_1 = \frac{R_s + Z_e}{Z_e} V_{lue} ; V_{lue} : \text{la tension lue sur l'oscilloscope} \quad (\text{III.10})$$

Comme $V_{in} = V_1$:

$$V_{in} = \frac{R_s + Z_e}{Z_e} V_{lue} = 5.5 V_{lue}$$

Selon les relations (III.9) et (III.10) :

$I_0(t) = 0.01 \times 5.5 V_{lue}(t) \text{ [A]}$

III.8.4. Forme des signaux obtenus avec l'oscilloscope

Pour une largeur de la pollution et une polarité de l'électrode active données, nous avons enregistré le signal du courant de fuite pour différents niveaux de tension appliquée à savoir $0.5U_{0\%}$, $0.6U_{0\%}$, $0.7U_{0\%}$ et $0.8U_{0\%}$ ($U_{0\%}$ c'est la tension pour laquelle on est sur qu'il n'y a pas une disruption entre les deux électrodes de chaque configuration à étudier).

Pour tracer le courant de fuite en fonction des paramètres auxquels est soumis le modèle expérimental, nous nous sommes intéressés à la valeur moyenne de crête de six signaux recueillis.

Les figures (III.6 et III.7) présentent les signaux du courant de fuite obtenus dans le cas d'une plaque polluée, pour une largeur des couches de pollution de 1 cm et pour les deux polarités. Notons que l'axe des abscisses représente l'axe de temps et l'axe des ordonnées représente la tension du signal capté. Les échelles sont données en bas du graphe. Par ailleurs, l'oscilloscope nous permet une lecture directe de la valeur du pic.

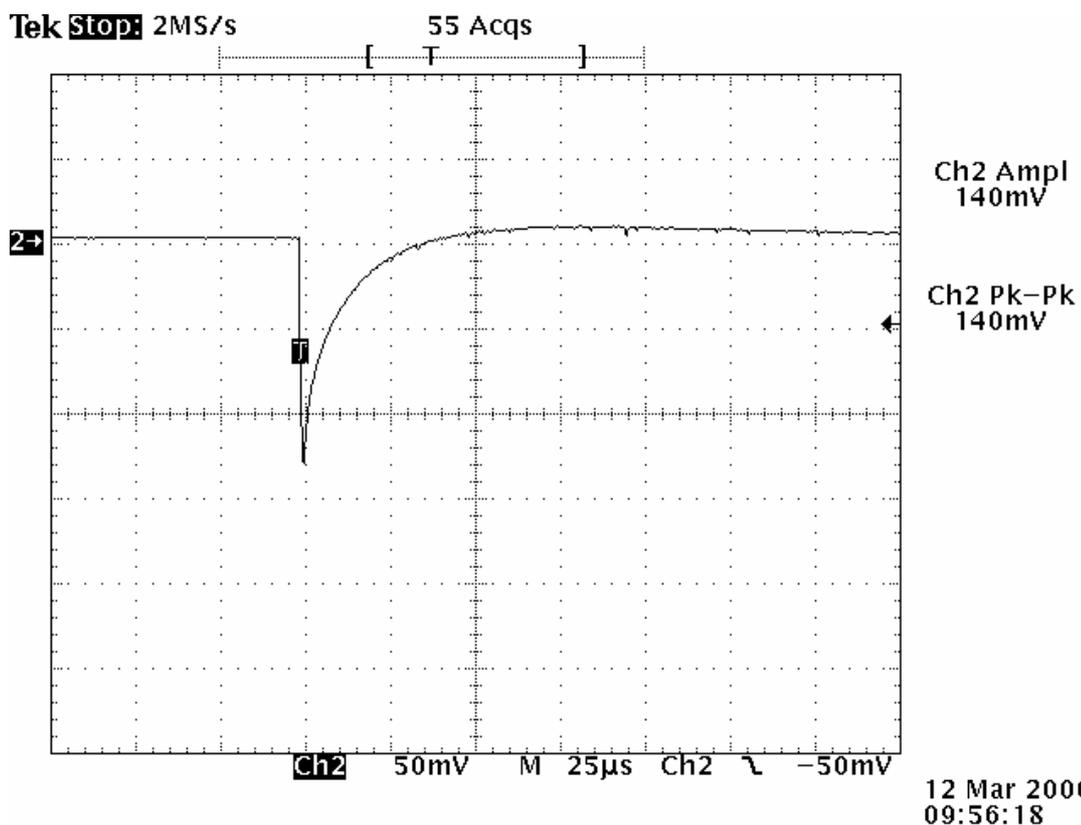


Figure III.6. Forme d'onde en polarité négative donner pour la largeur de pollution 1 cm

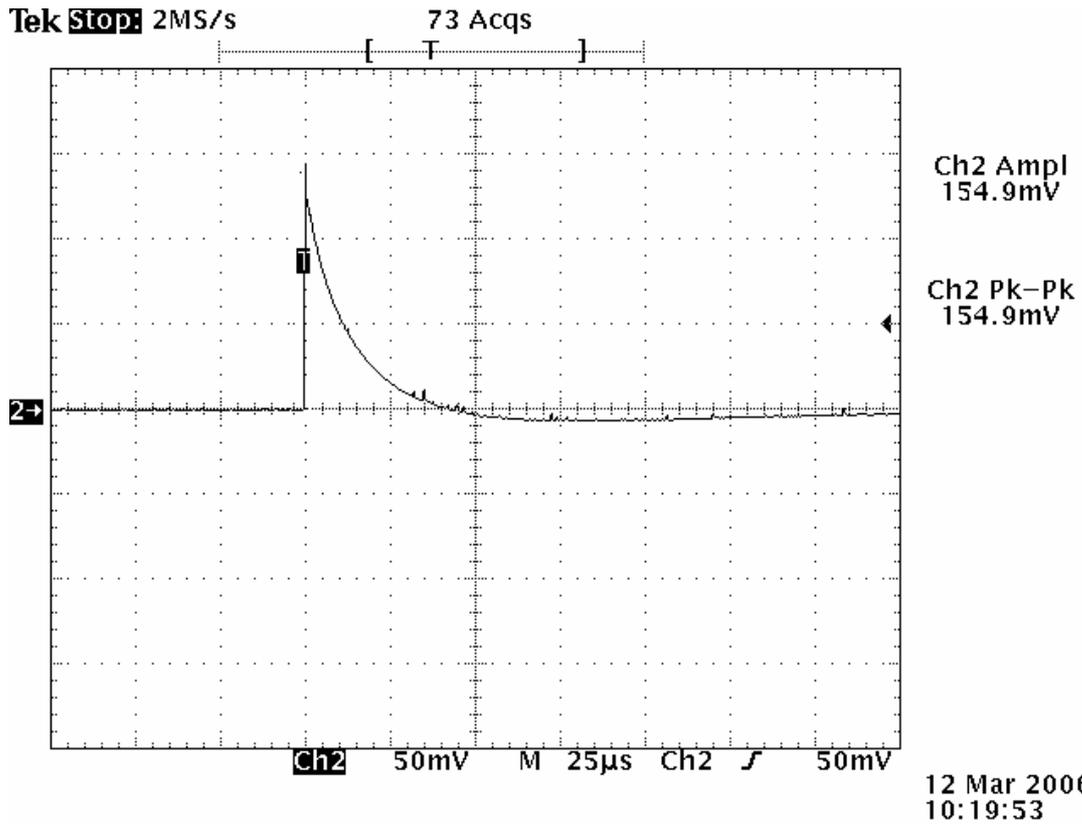


Figure III.7 forme d'onde en polarité positive donner pour la largeur de pollution de 1 cm

Chapitre IV

Résultats Obtenus
et
Interprétations

IV.1. INTRODUCTION

Dans le but de déterminer l'influence de la discontinuité de la couche polluante sur le comportement des isolateurs, nous avons effectué de nombreux essais sur un modèle plan de laboratoire. Ce modèle, qui s'inspire de celui de P.Claverie et Y.Porcheron [CLA 73], est soumis à des contraintes électrogéométriques. Nous nous sommes intéressés à la variation de la tension $U_{50\%}$ (la tension disruptive moyenne), le courant de fuite et l'impédance électrique en fonction de la largeur de la pollution en papier aluminium, polarité de l'électrode active, le temps entre deux impulsions successives et le niveau de la tension appliquée.

IV.2. OBSERVATIONS

Les observations de laboratoire montrent que le contournement se produit directement sans apparition au préalable de décharge. A cause de l'effet couronne, l'initiation des premières luminosités commence autour de l'électrode haute tension à environ 20 kV. Avec l'augmentation de la tension appliquée, ces luminosités deviennent intenses. A partir d'un certain seuil représentant la tension critique, une décharge électrique rapide court-circuite brutalement la distance inter-électrodes, provoquant ainsi le contournement total de la surface isolante.

Ce phénomène, caractérisé par la non-génération d'arcs partiels, est dû à la fois à la nature de la pollution utilisée et surtout au fait que la longueur totale de la bande propre équivalente (représentant la somme des différentes bandes propres partielles) dépasse la valeur critique à partir de laquelle aucune décharge stable ne se propage [BOU 01, TEG 01.a, TEG 00, TEG 01.b]. Cette longueur critique a été estimée dans une étude antérieure [NAM 98] dans le cas d'une tension alternative, au tiers (33 %) de la ligne de fuite totale. Dans notre cas, la longueur de la bande propre équivalente représente 42.12 % de la distance inter-électrodes.

IV.3. DETERMINATION DE LA TENSION $U_{50\%}$

La tension $U_{50\%}$ est la tension pour laquelle nous obtenons une disruption de l'intervalle de l'air entre les deux électrodes du système à étudier avec une probabilité $P(U)=0.5$. Pour cela, nous avons utilisé les deux méthodes suivantes :

♦ **La méthode des paliers multiples constants** : Qui consiste à appliquer plusieurs paliers différents de tension. Nous effectuons 20 chocs par palier. Le temps entre deux chocs successifs est de l'ordre de 30 secondes. Plus le nombre de paliers à appliquer est grand, plus la précision est bonne. Les caractéristiques probabilité-tension d'essais sont tracées sur une échelle Gausso-arithmétique.

♦ **La méthode montée et descente (Up and Down)** : La présente méthode s'applique lorsque la probabilité de décharge suit une loi normale (soit une droite sur une échelle Gausso-arithmétique). Elle consiste à appliquer 50 niveaux de tension, en commençant par un niveau de tension U_0 relativement faible, qui sera augmenté de ΔU s'il y a tenue à U_0 ou diminué de ΔU s'il y a rupture électrique. Dans cette méthode, différents temps entre deux impulsions successives ont été adoptés.

La figure (IV.1) illustre la variation de la probabilité en fonction de la tension appliquée obtenue dans le cas d'une plaque propre. Cette figure permet en fait, la détermination de $U_{50\%}$ correspondant à la fréquence de décharge de 50%. Les fréquences de décharge en fonction des tensions d'essais correspondantes sont généralement distribuées selon une régression linéaire sur une échelle Gausso-arithmétique. Ainsi, nous déterminons la tension $U_{50\%}$ pour les largeurs de pollutions et les polarités considérées.

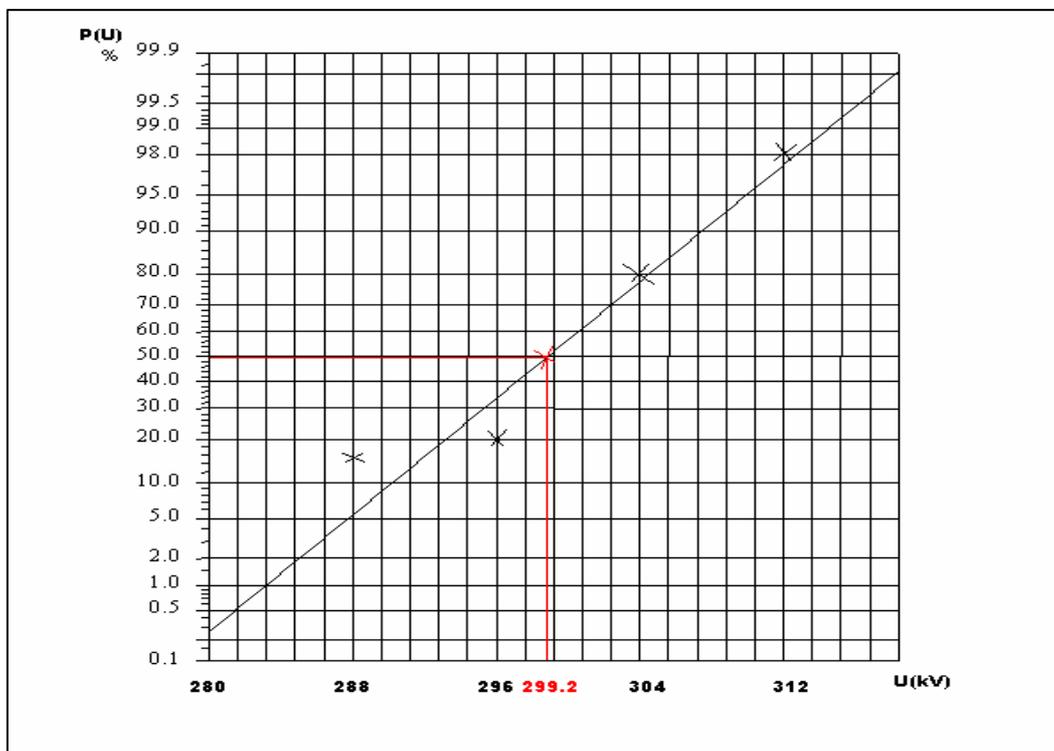


Figure IV.1. Détermination de $U_{50\%}$ pour une plaque propre (polarité négative)

IV.3.1. Influence de la largeur des couches polluantes

Aux figures (IV.2 et IV.3), nous présentons la variation de la tension $U_{50\%}$ en fonction de la largeur de la pollution, pour différent temps entre deux chocs et pour les deux polarités. Nous constatons qu'avec l'augmentation de la largeur de la pollution, la tension $U_{50\%}$ décroît rapidement pour les largeurs comprises entre 0 et 4 cm, augmente légèrement entre 4 et 8 cm, puis elle reste pratiquement invariante ailleurs.

Nous expliquons la chute brusque de la tension $U_{50\%}$, par le fait que ces couches polluantes en papier aluminium se comportent comme étant des électrodes flottantes de faibles largeurs, engendrant ainsi la diminution de la rigidité diélectrique du système isolant.

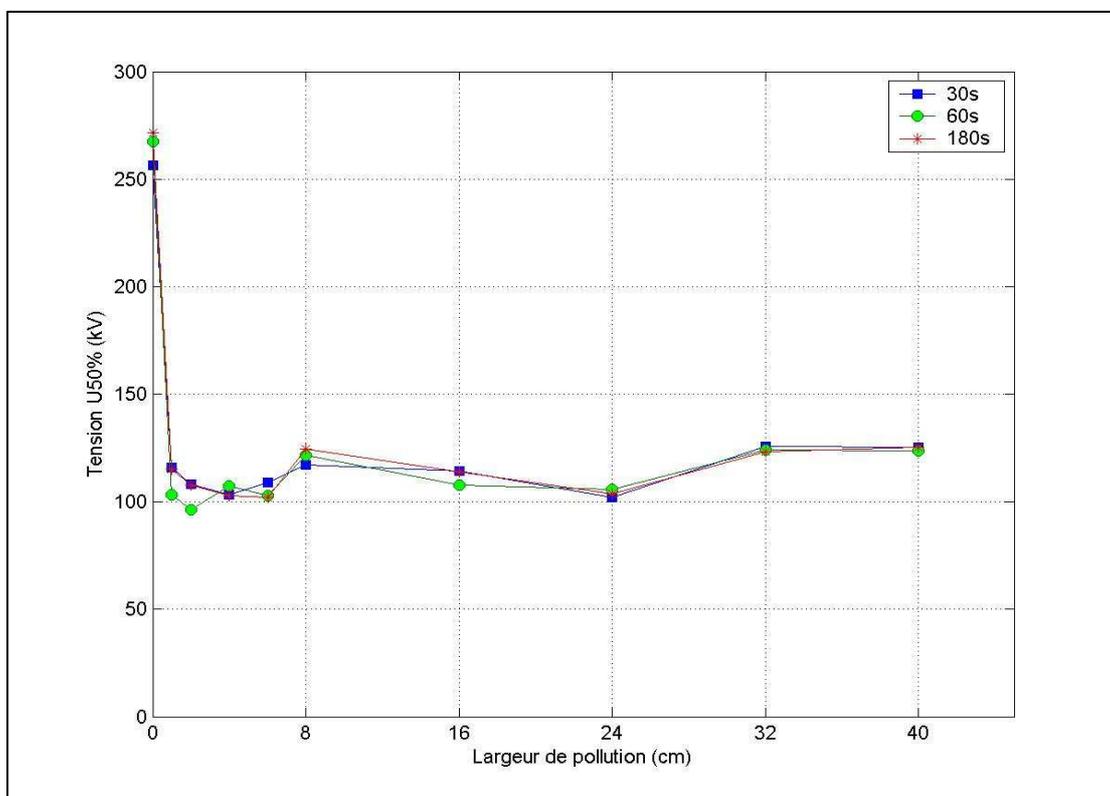


Figure.IV.2. Tension $U_{50\%}$ en fonction de la largeur de la pollution, pour une polarité positive

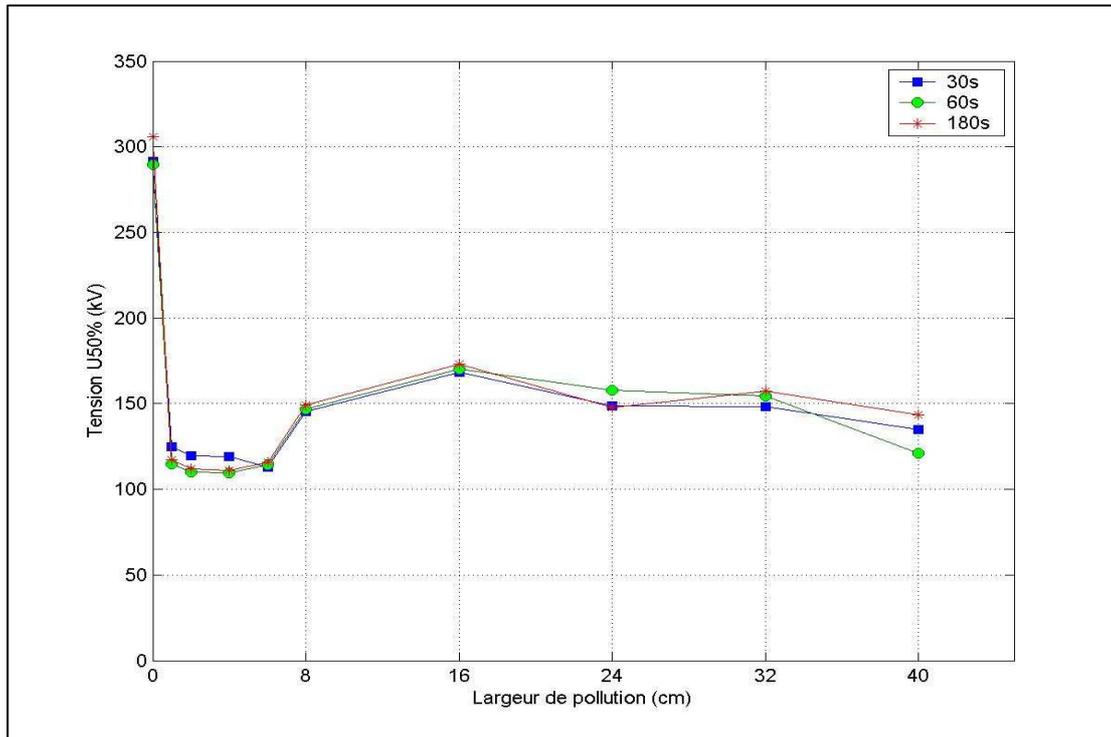


Figure IV.3. Tension $U_{50\%}$ en fonction de la largeur de la pollution, pour une polarité négative

IV.3.2. Influence du temps entre deux chocs

Pour une même largeur de pollution et une même polarité, les figures (IV.2 et IV.3) montrent que la tension $U_{50\%}$ reste invariante en fonction du temps entre deux chocs. En effet, ce dernier n'a pratiquement pas d'effet sur la tension $U_{50\%}$.

IV.3.3. Influence de la polarité

La polarité de l'électrode active joue un rôle non négligeable dans le comportement des isolateurs. Certains chercheurs [LER 84] ont montré que les tenues en polarité positive constituent la contrainte la plus sévère pour les réseaux électriques à très haute tension.

D'autres auteurs, par contre, ont obtenu des résultats contraires concernant la tenue de certains types d'isolateurs [ZAF 86]. Des travaux relatifs à la pollution par dépôts de glace ont confirmé également que la polarité négative constitue le cas le plus critique [LER 84].

Concernant nos essais, les figures (IV.4 à IV.6) montrent, que pour une même largeur des couches en papier aluminium inférieure à 40 cm, la tension $U_{50\%}$ est plus élevée dans le cas d'une polarité négative, et ce quel que soit le temps entre deux chocs. Cependant, pour la

largeur le plus élevée (40 cm) des couches polluantes, les tensions obtenues pour les deux polarités sont, en général, proches.

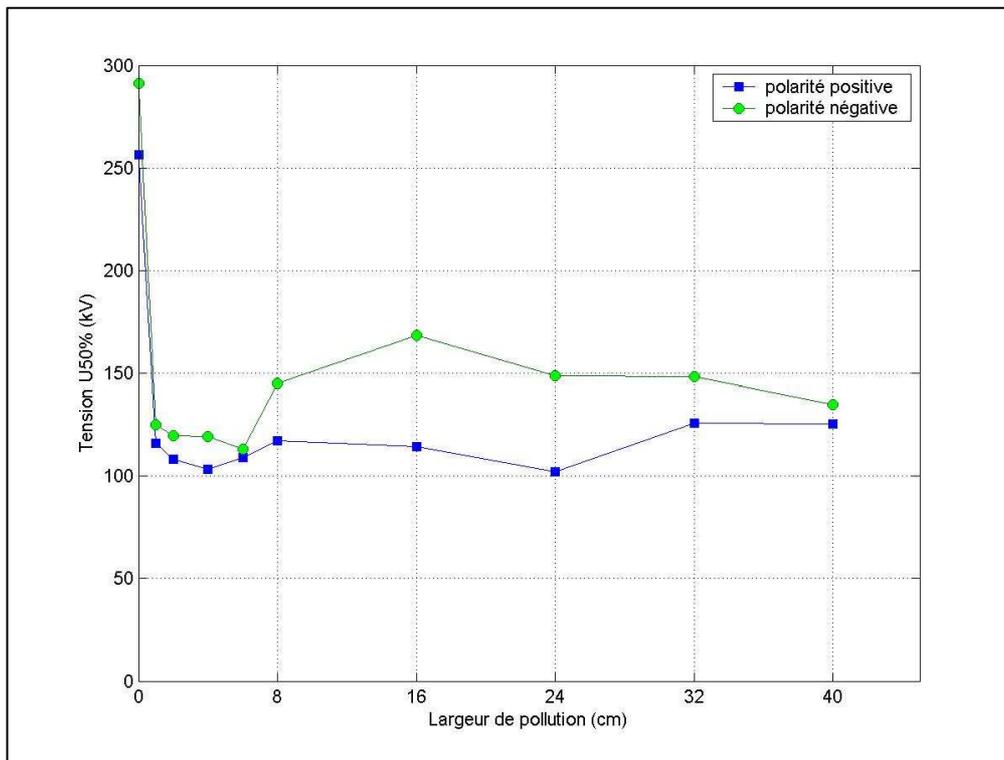


Figure IV.4. Tension $U_{50\%}$ en fonction de la largeur de la pollution, pour 30s entre deux chocs

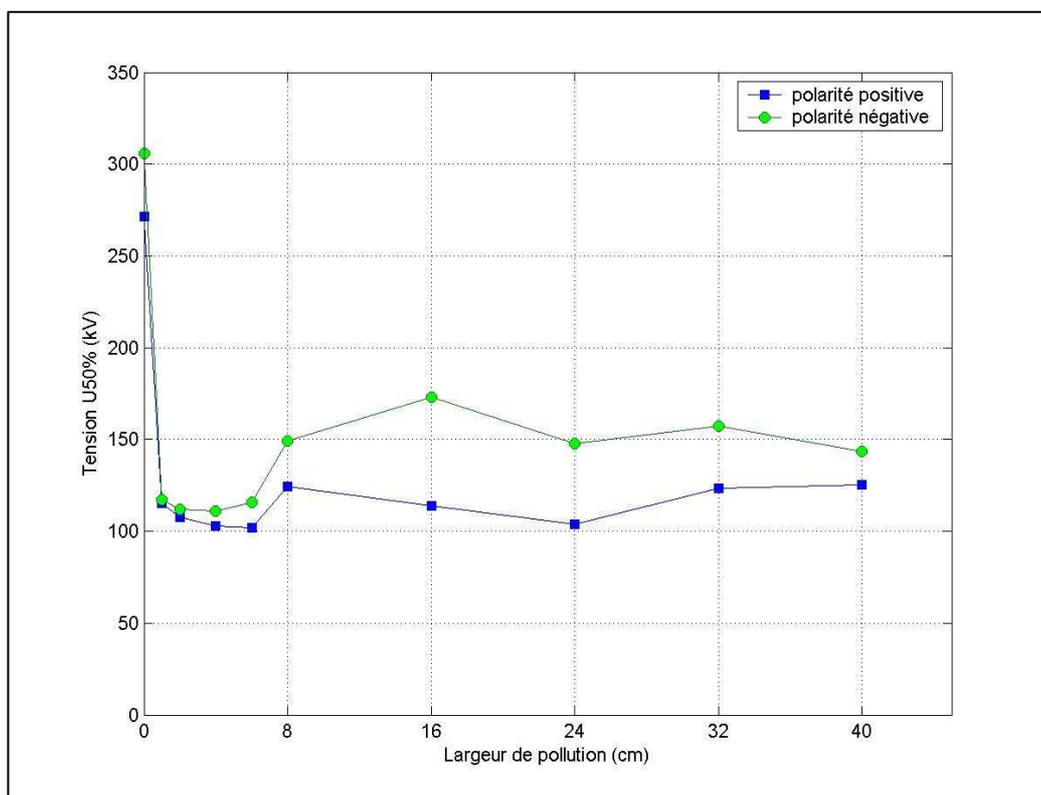


Figure IV.5. Tension $U_{50\%}$ en fonction de la largeur de la pollution, pour 60s entre deux chocs

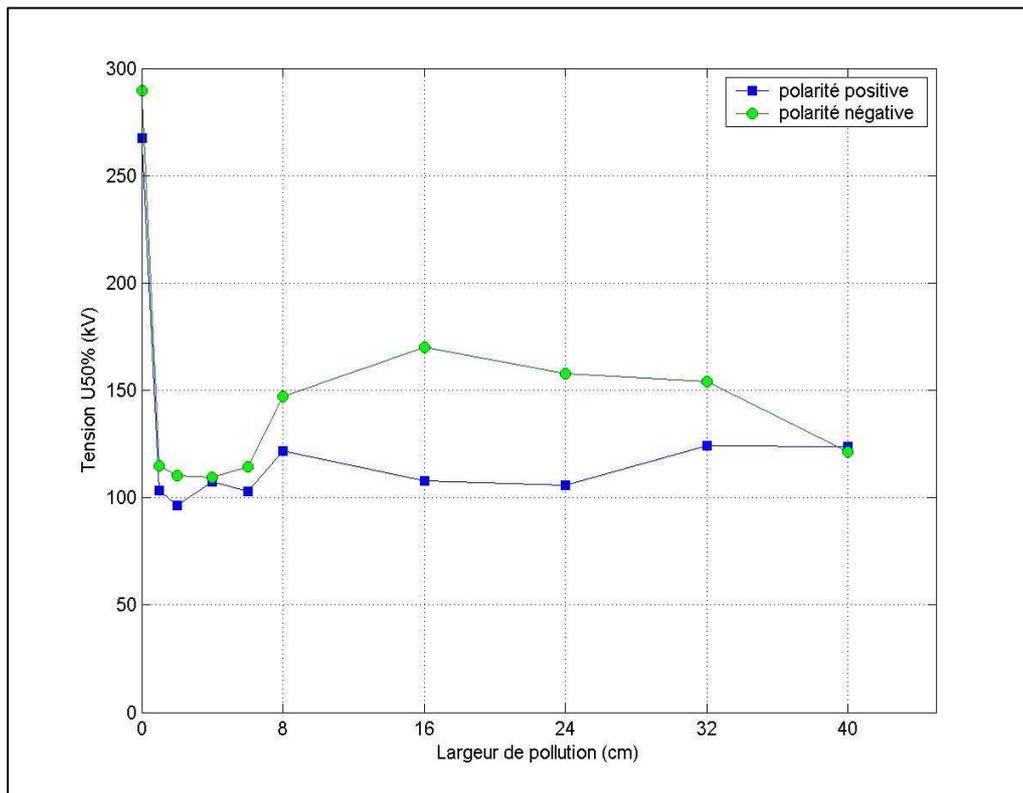


Figure IV.6. Tension $U_{50\%}$ en fonction de la largeur de la pollution, pour 180s entre deux chocs

IV.4. ETUDE DU COURANT DE FUITE

En ce qui concerne le courant de fuite, nous nous sommes intéressés à la valeur de crête (représentant la moyenne arithmétique de six valeurs de crête) obtenue pour les niveaux de tension suivants: $0.5U_{0\%}$, $0.6U_{0\%}$, $0.7U_{0\%}$ et $0.8U_{0\%}$.

Les caractéristiques donnant la probabilité de décharge en fonction de la tension permettent la détermination de la tension de tenue $U_{0\%}$ pour chaque largeur de pollution et polarité choisie, sont présentées en annexe. Nous avons considéré $U_{0\%}$ comme étant la tension ayant une probabilité de décharge égale à 0,1 % sur l'échelle gaussienne-arithmétique.

IV.4.1. Influence de la tension appliquée

Les caractéristiques donnant le courant de fuite en fonction de la tension appliquée sont présentés sur les figures (IV.7 et IV.8)

Pour toutes les configurations de la pollution et pour les deux polarités, nous constatons que le courant de fuite augmente avec la tension appliquée.

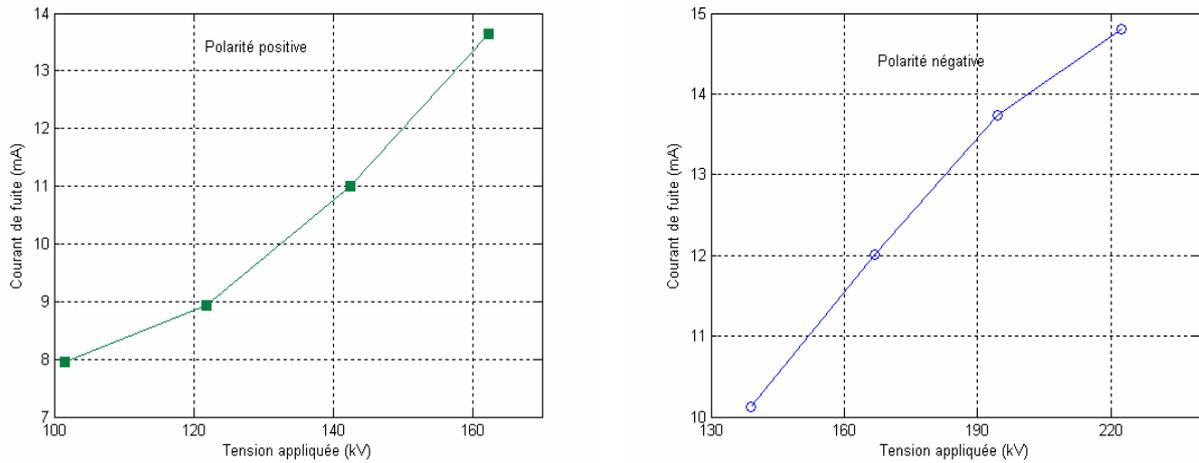


Figure IV.7. Courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour le cas d'une plaque propre.

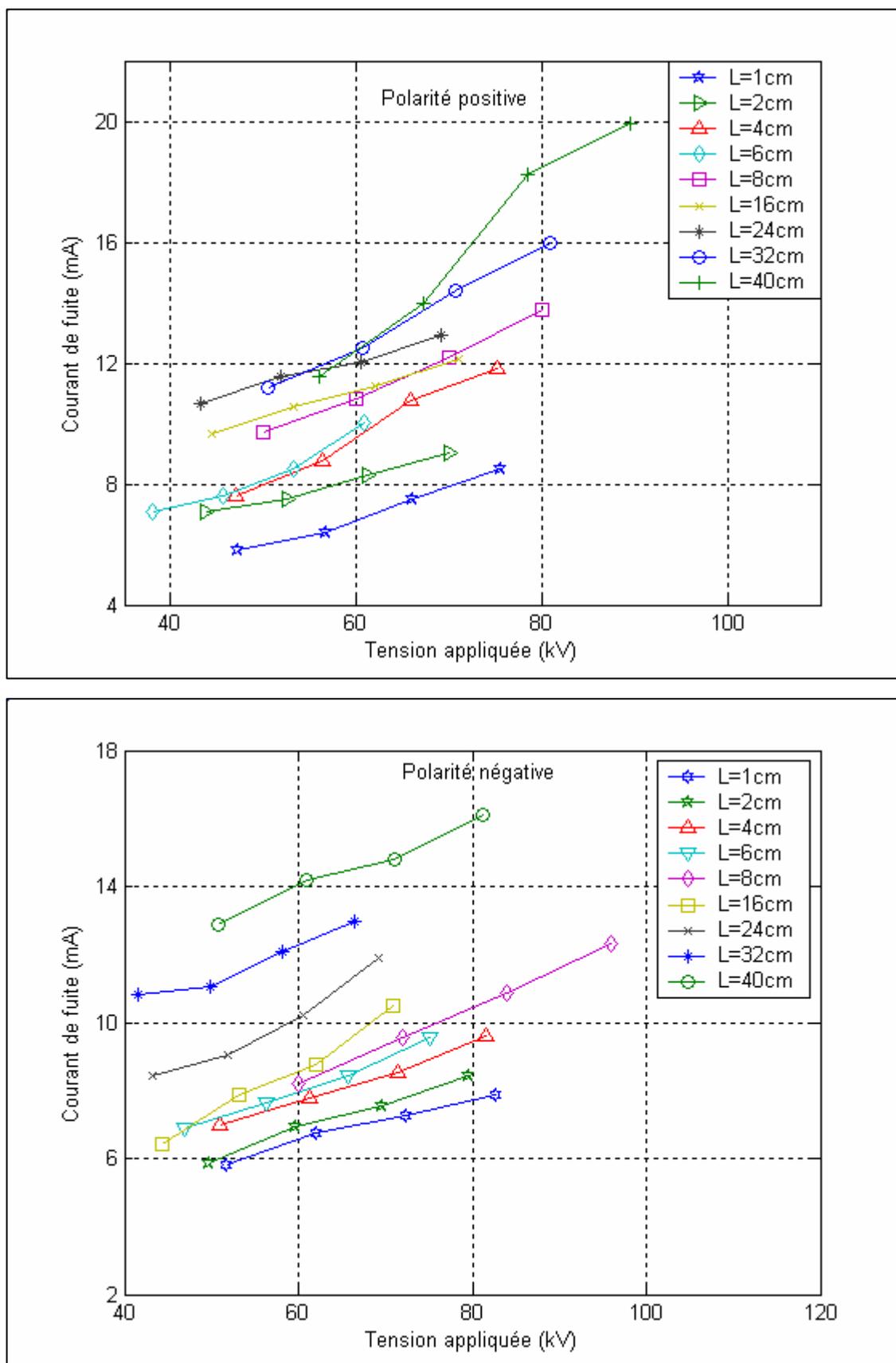


Figure IV.8. Courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour le cas d'une plaque polluée

IV.4.2. Influence de la largeur des couches polluantes

Pour les niveaux de tension adoptés et les deux polarités, les variations du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante sont présentées sur les figures (IV.9 et IV.10)

Avec l'augmentation de la largeur de la pollution, nous constatons, dans tous les cas, que le courant de fuite diminue brusquement pour des largeurs variant de 0 à 1 cm, atteint un minimum à 1 cm et augmente par la suite.

A partir de 24 cm, l'accroissement du courant est accentué. Cette augmentation brutale du courant de fuite s'explique par l'affaiblissement de l'impédance totale entre électrodes.

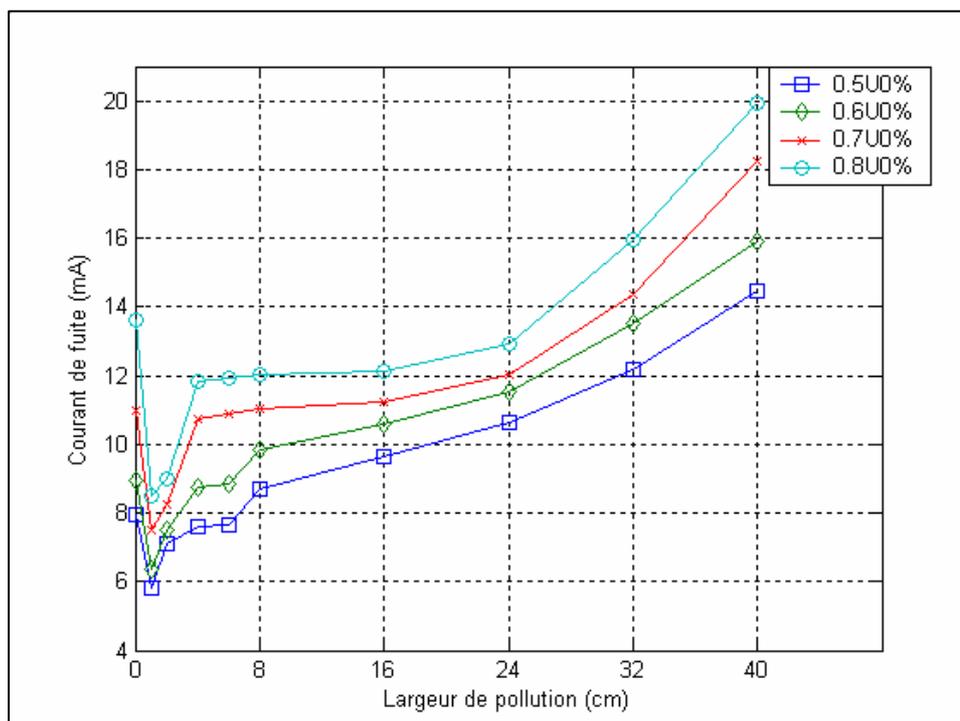


Figure IV.9. Courant de fuite en fonction de la largeur de pollution, pour différents niveaux de tension et en polarité positive

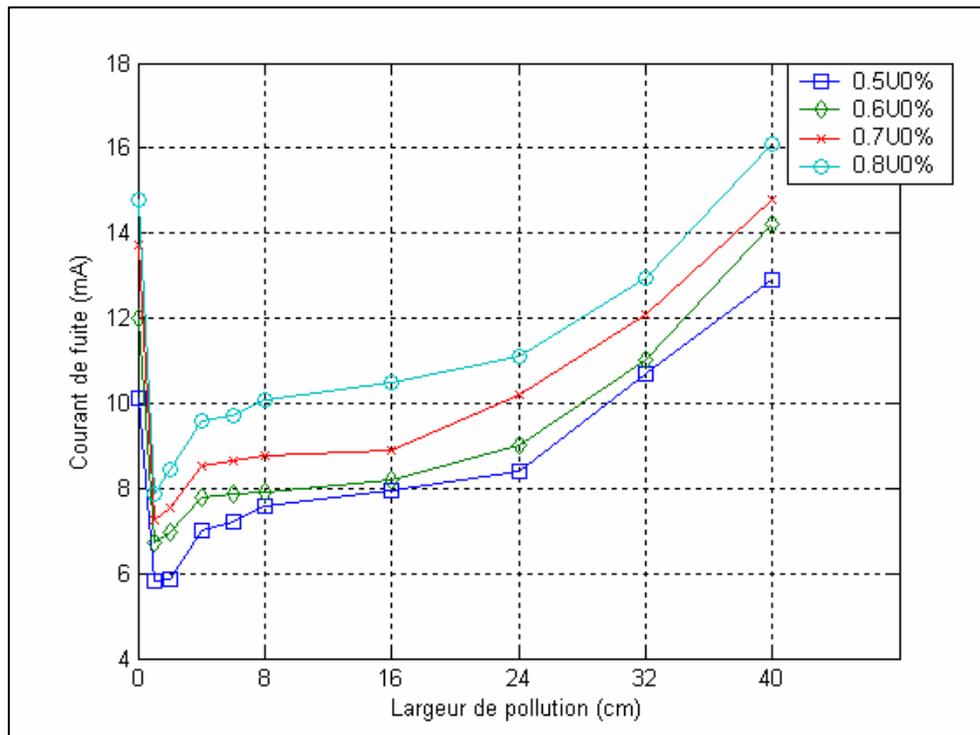


Figure IV.10. Courant de fuite en fonction de la largeur de pollution, pour différents niveaux de tension et en polarité négative.

IV.4.3. Influence de la polarité

Pour étudier l'influence de la polarité sur le courant de fuite, nous avons tracé le courant de fuite en fonction de la largeur de la couche de pollution (Figures IV.11 à IV.14) et aussi en fonction de la tension appliquée (Figures IV.15 et IV.16), pour les deux polarités.

Ces caractéristiques montrent que le courant de fuite obtenu dans le cas d'une polarité positive est plus important que celui obtenu dans le cas d'une polarité négative.

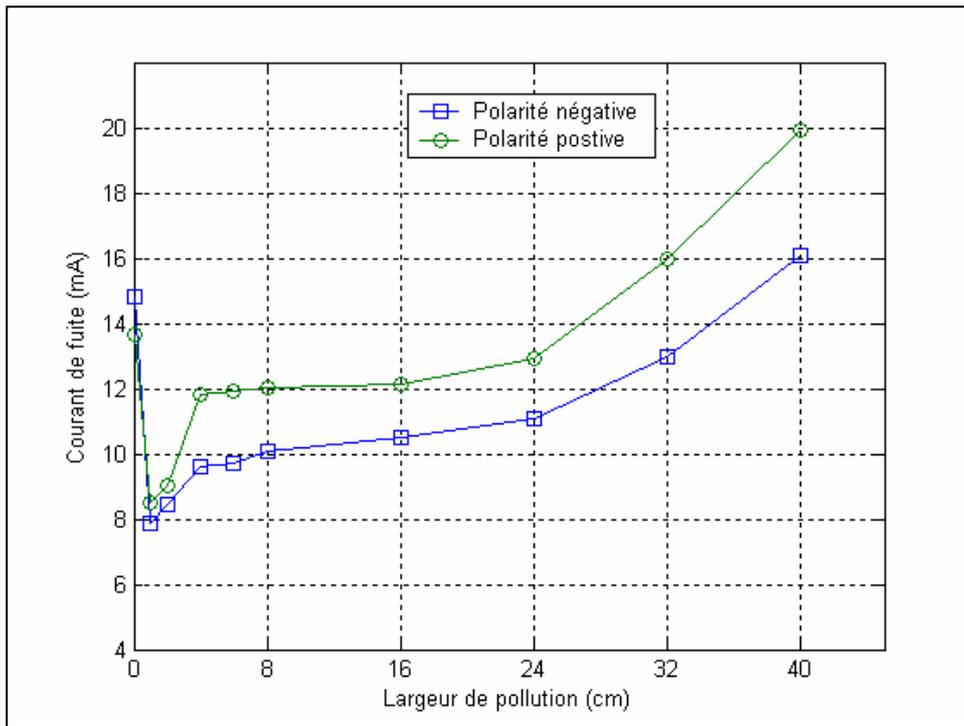


Figure IV.11. Courant de fuite en fonction de la largeur de pollution, pour niveaux de tension $0.5U_{0\%}$

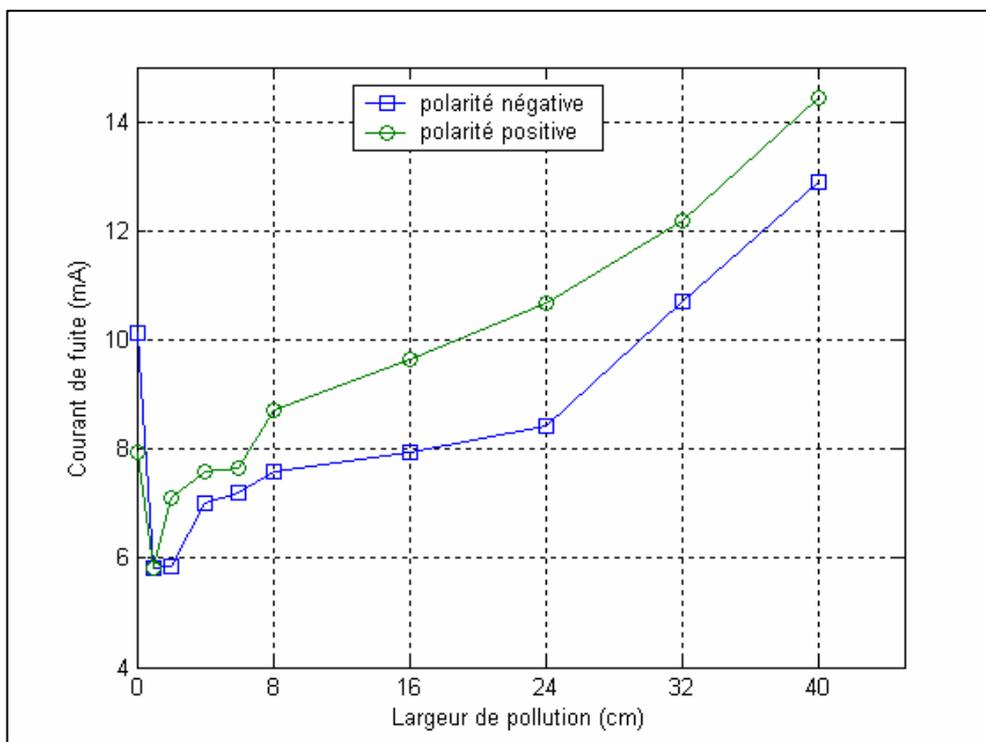


Figure IV.12. Courant de fuite en fonction de la largeur de pollution, pour niveaux de tension $0.6U_{0\%}$

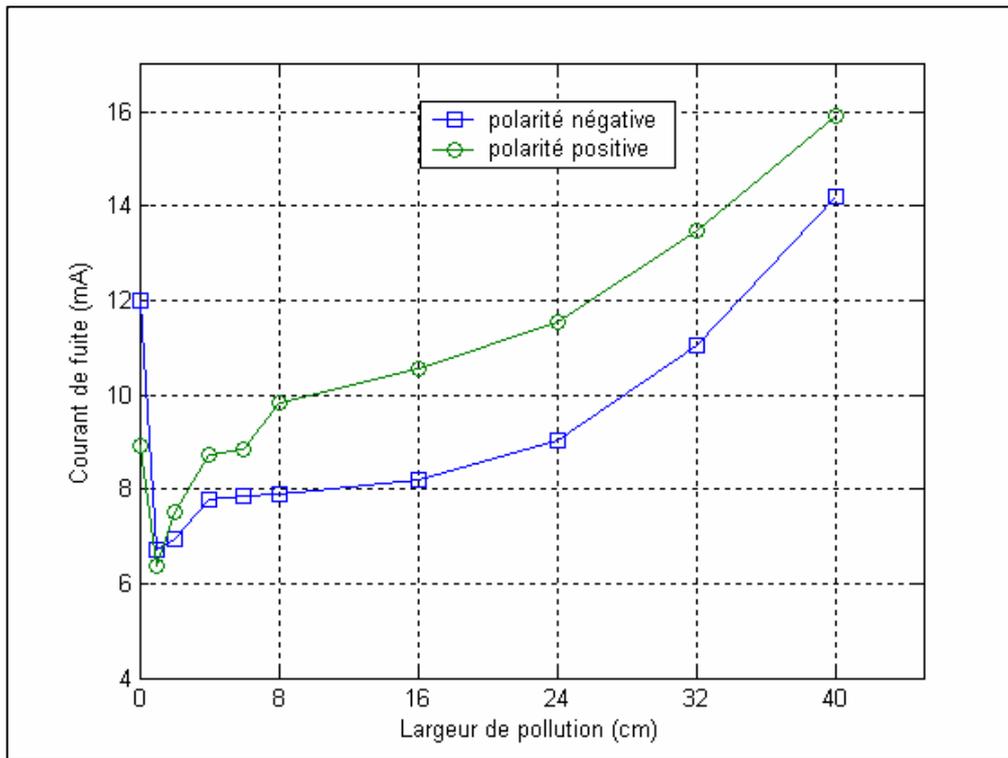


Figure IV.13. Courant de fuite en fonction de la largeur de pollution, pour niveaux de tension $0.7U_{0\%}$

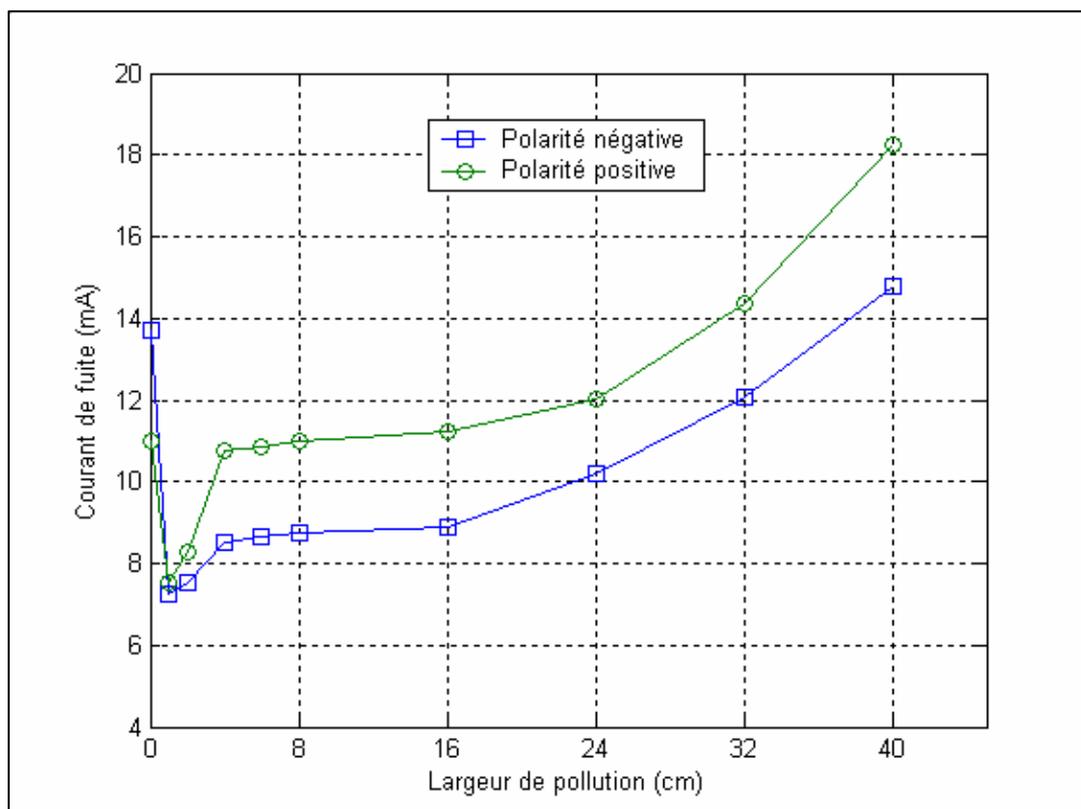
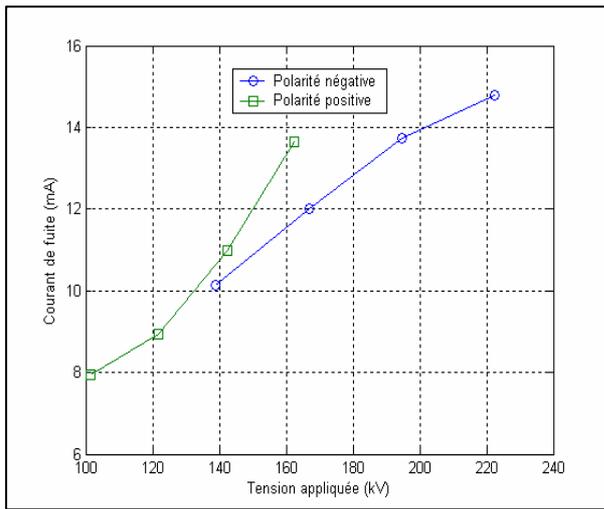
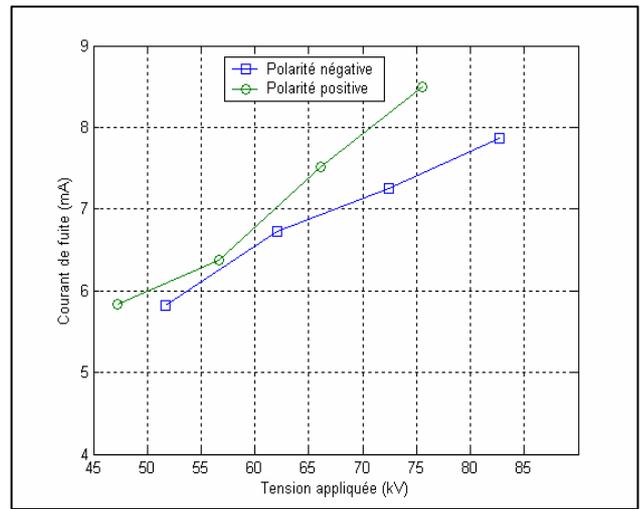


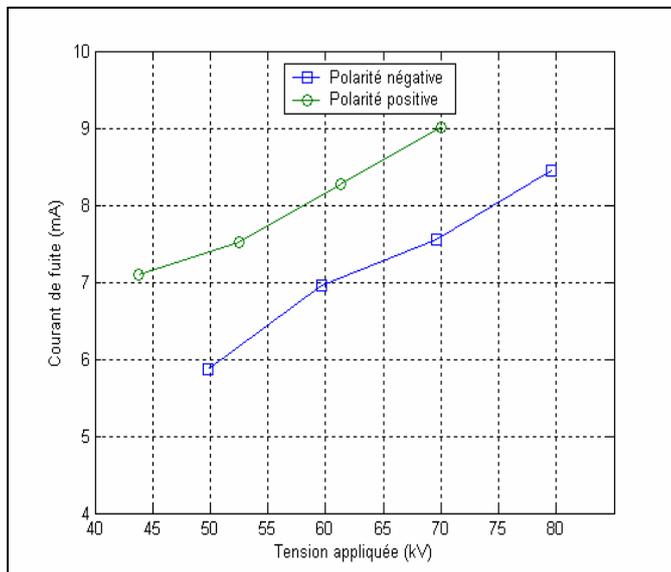
Figure IV.14. Courant de fuite en fonction de la largeur de pollution, pour niveaux de tension $0.8U_{0\%}$



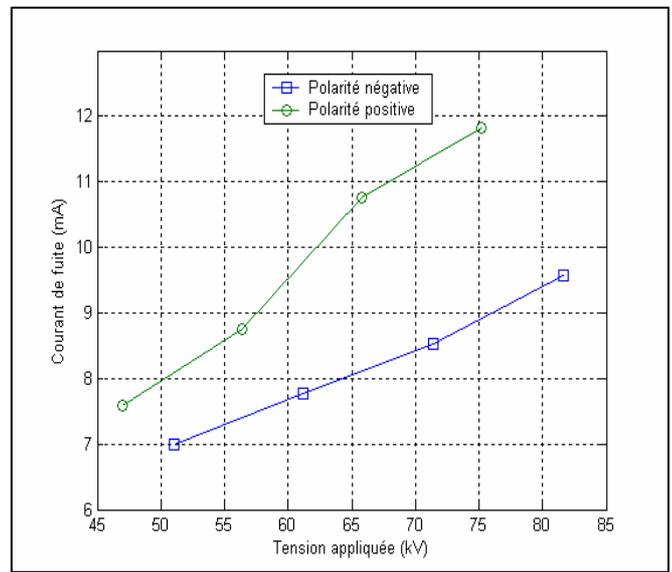
(a) plaque propre



(b) L=1cm

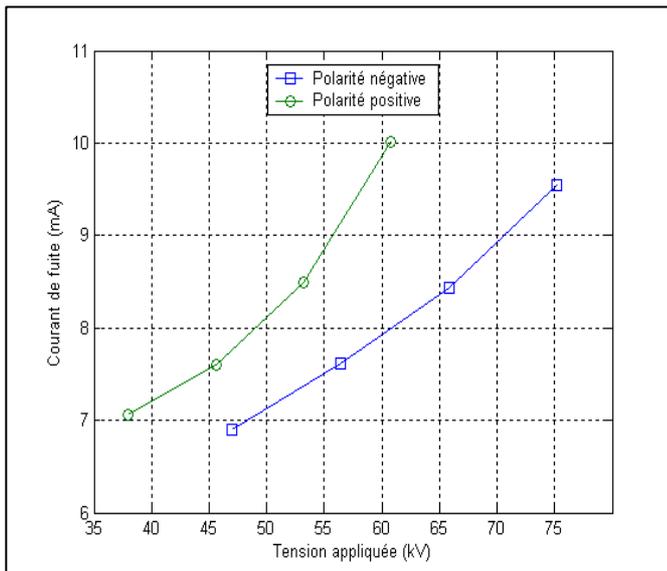


(c) L=2cm

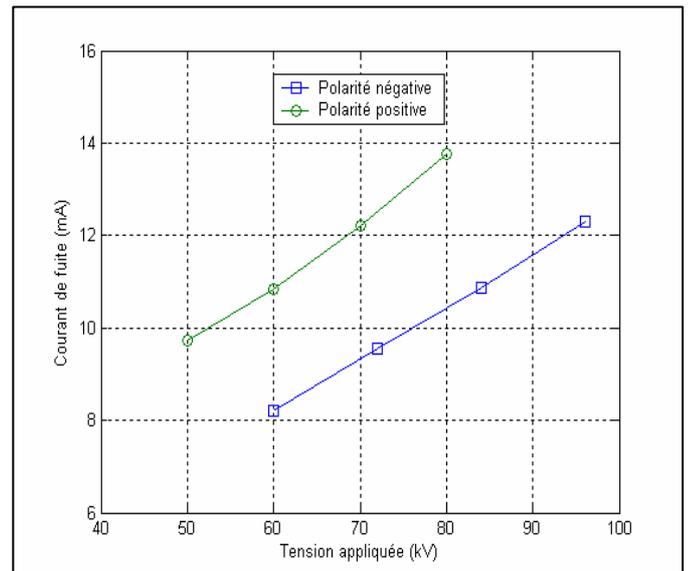


(d) L=4cm

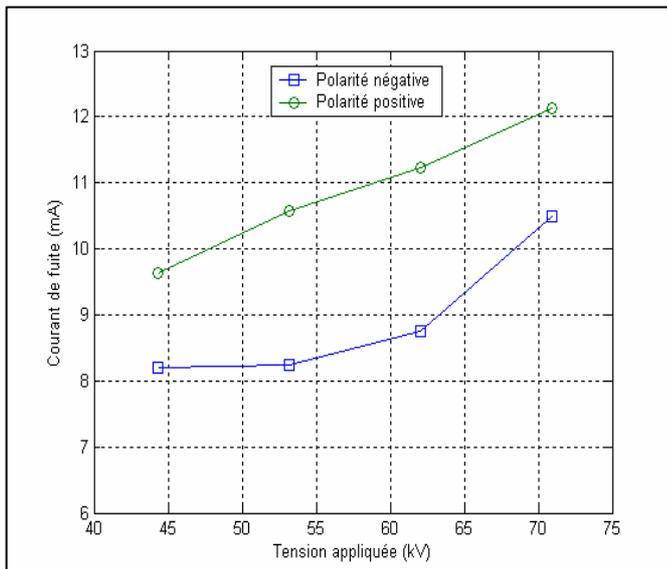
Figure IV.15. Courant de fuite en fonction de la tension appliquée



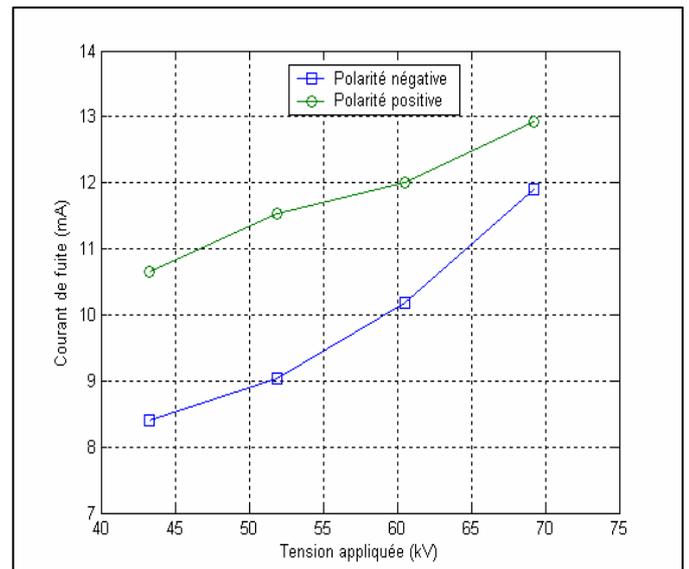
(a) L=6cm.



(b) L=8cm.



(c) L=16cm



(d) L=24cm

Figure IV.16. Courant de fuite en fonction de la tension appliquée

IV.5. IMPEDANCE ELECTRIQUE

Étant donné que l'amplitude du courant de fuite augmente quasi-linéairement avec la tension appliquée, nous pouvons déterminer, dans les limites des tensions utilisées, l'impédance électrique équivalente à partir de la pente des caractéristiques donnant la tension appliquée U en fonction de l'amplitude du courant de fuite I , car $Z=U/I$.

Sur la figure (IV.17), nous présentons l'impédance équivalente vue des électrodes en fonction de largeur de la couche polluante.

Pour une polarité donnée, nous constatons qu'avec l'augmentation de la largeur de la pollution, l'impédance électrique totale entre électrodes diminue rapidement pour des largeurs comprises entre 0 et 8 cm et lentement ailleurs.

D'autre part, l'impédance équivalente pour la polarité négative est supérieure à celle obtenue dans le cas d'une polarité positive, pour les largeurs inférieures à 32 cm.

Ces caractéristiques montrent, par ailleurs, que la polarité n'a pratiquement pas d'effet sur l'impédance équivalente pour les largeurs dépassant 32 cm.

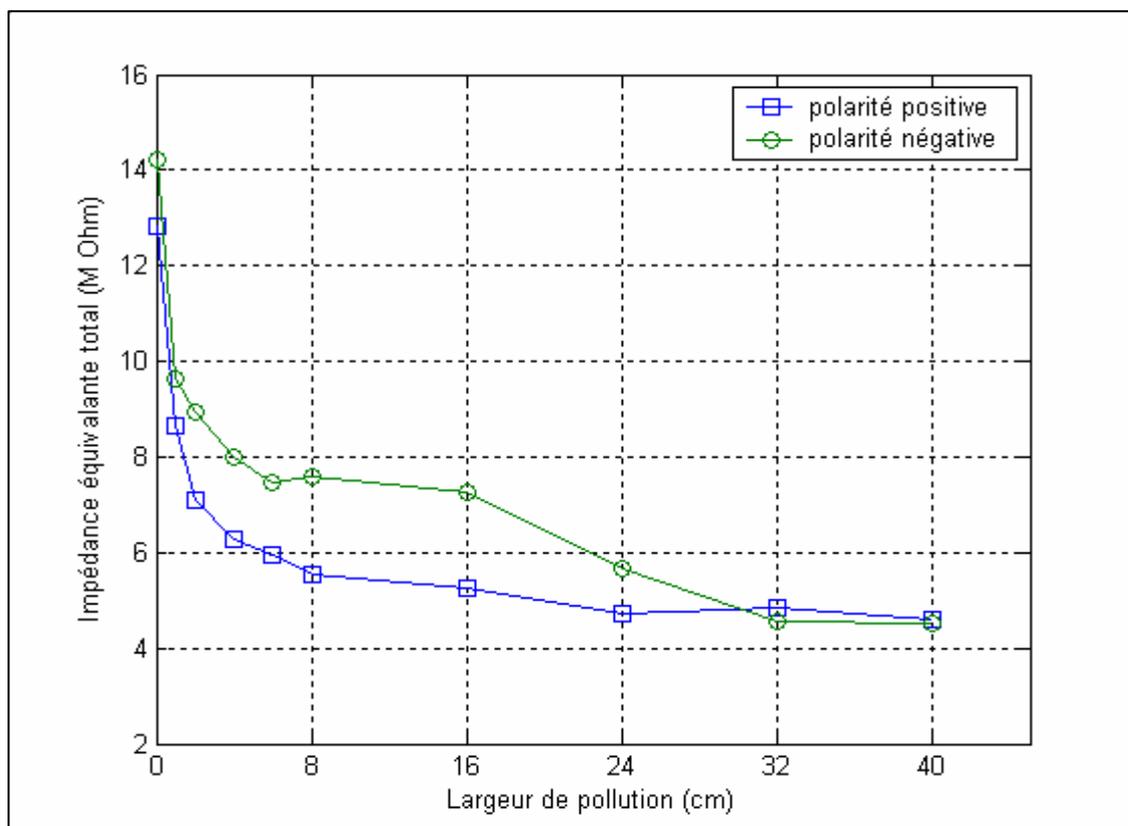


Figure IV.17. Impédance entre électrodes en fonction de la largeur de la pollution

IV.6. CALCUL DU CHAMP ELECTRIQUE

Afin de calculer le champ électrique, nous avons utilisé le logiciel FEMM (Finite Element Magnetism Method) [MEE 03]. Ce dernier est une suite des programmes permettant de donner la répartition du champ électrique E et la densité du flux électrique D en deux dimensions. Il y a deux conditions que ces quantités doivent obéir.

La première relation est l'application du théorème de Gauss, qui indique que le flux total du champ électrique sortant d'une surface fermée est égale à la somme des charges intérieures :

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{IV.1})$$

ρ : la densité de charge qui égale 0 dans notre cas.

La seconde est l'application du théorème d'Ampère :

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (\text{IV.2})$$

La densité du flux électrique et l'intensité du champ électrique sont également liées par la relation suivante :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{IV.3})$$

ε : la permittivité électrique.

Pour simplifier le calcul du champ électrique qui satisfait ces conditions, FEMM utilise la dérivée du potentiel V qui est défini par la relation champ-potentiel :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad (\text{IV.4})$$

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

Pour cela, nous avons introduit, dans ce logiciel, notre modèle avec toutes ses spécifications (formes des électrodes, nature et dimensions de la pollution, permittivité des différents milieux, conditions aux limites, ...). Ainsi, nous avons fixé la tension appliquée à l'électrode active de 1 unité en polarité négative pour les deux cas (plaque propre et plaque polluée).

IV.6.1. Répartition du champ électrique sur la plaque

Dans le cas de la plaque propre (figure IV.18), le champ électrique est intense près de l'électrode active. Il diminue au fur et à mesure qu'on se dirige vers l'électrode de terre.

Les figures (IV.19 et IV.20) nous montrent l'influence de la largeur de la pollution sur le champ électrique, pour même niveau de tension appliquée. Il ressort de ces caractéristiques les remarques suivantes :

- Vu qu'elles sont en contact, l'électrode active et la zone 6 forment un même milieu conducteur.
- Le champ électrique est important dans les zones propres ainsi que au près de l'électrode active.
- Le champ électrique est pratiquement nul à l'intérieur des deux électrodes et à l'intérieur des couches en papier aluminium.

Le champ est relativement faible dans la zone propre 5, vu sa faible dimension longitudinale. Dans la zone propre 1, le champ électrique diminue en allant de la couche polluante 2 vers l'électrode de terre.

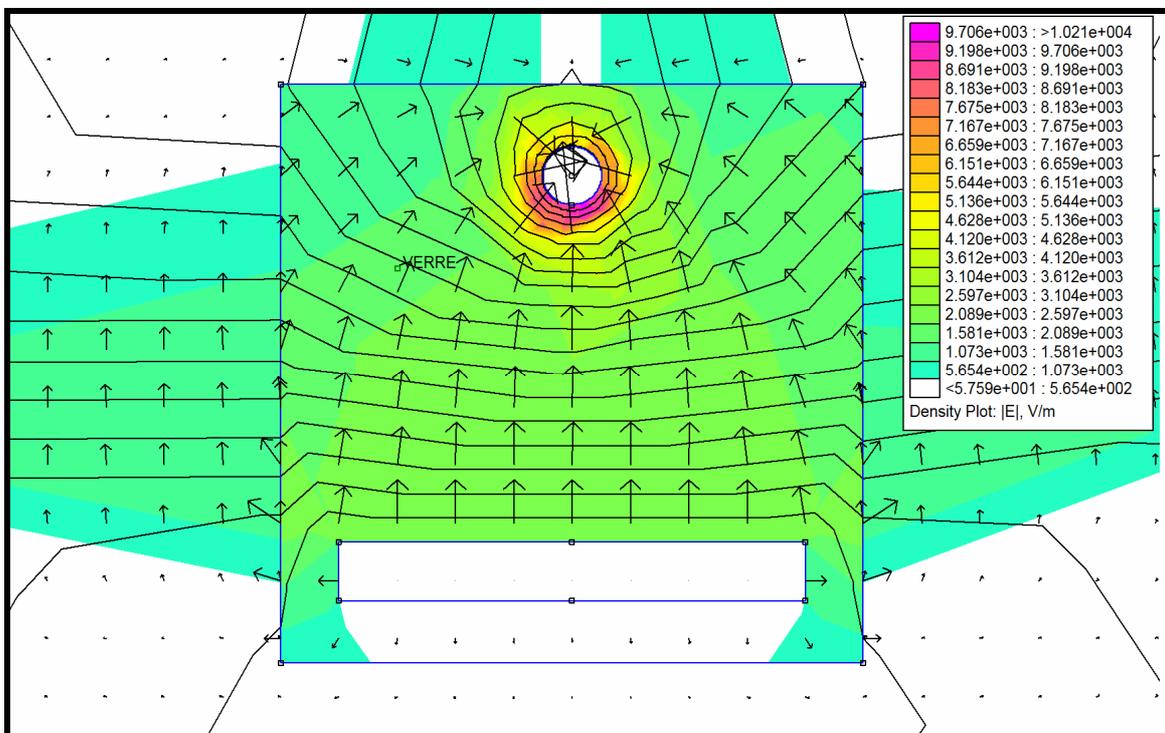


Figure IV.18. Répartition du champ électrique dans le cas de la plaque propre

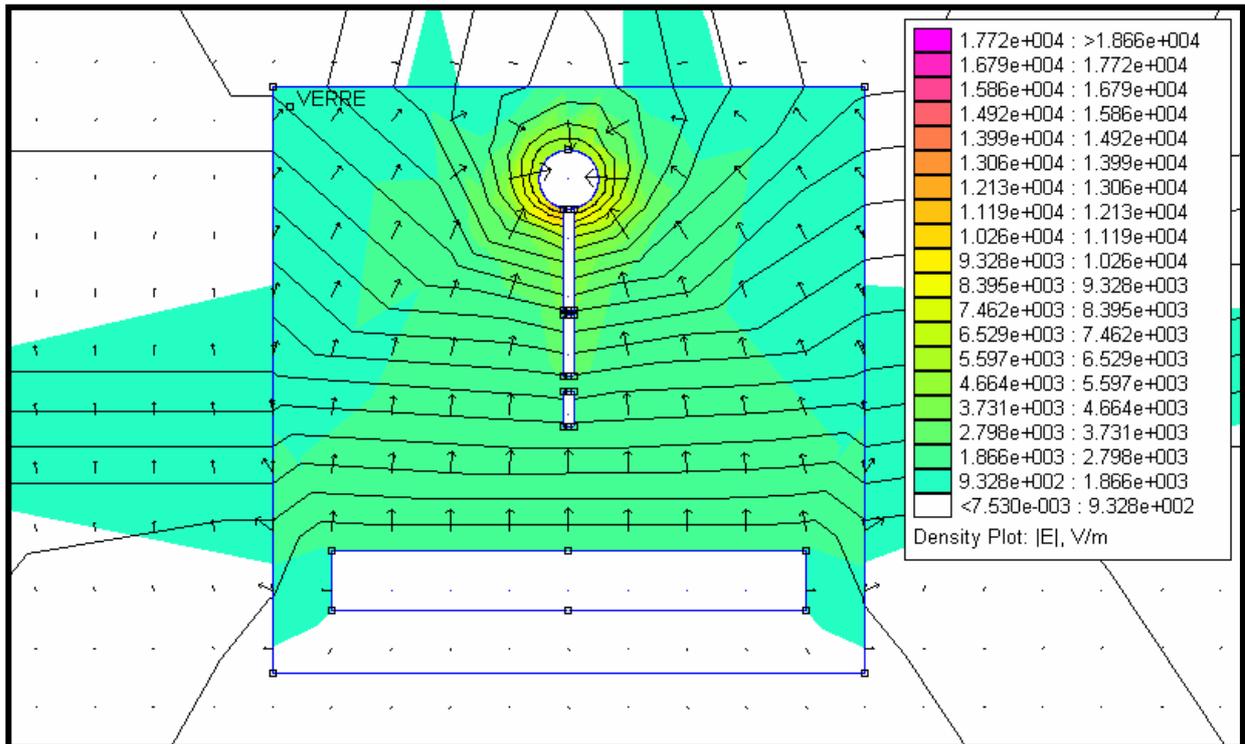


Figure IV.19. Répartition du champ électrique pour une largeur de la pollution de 1 cm

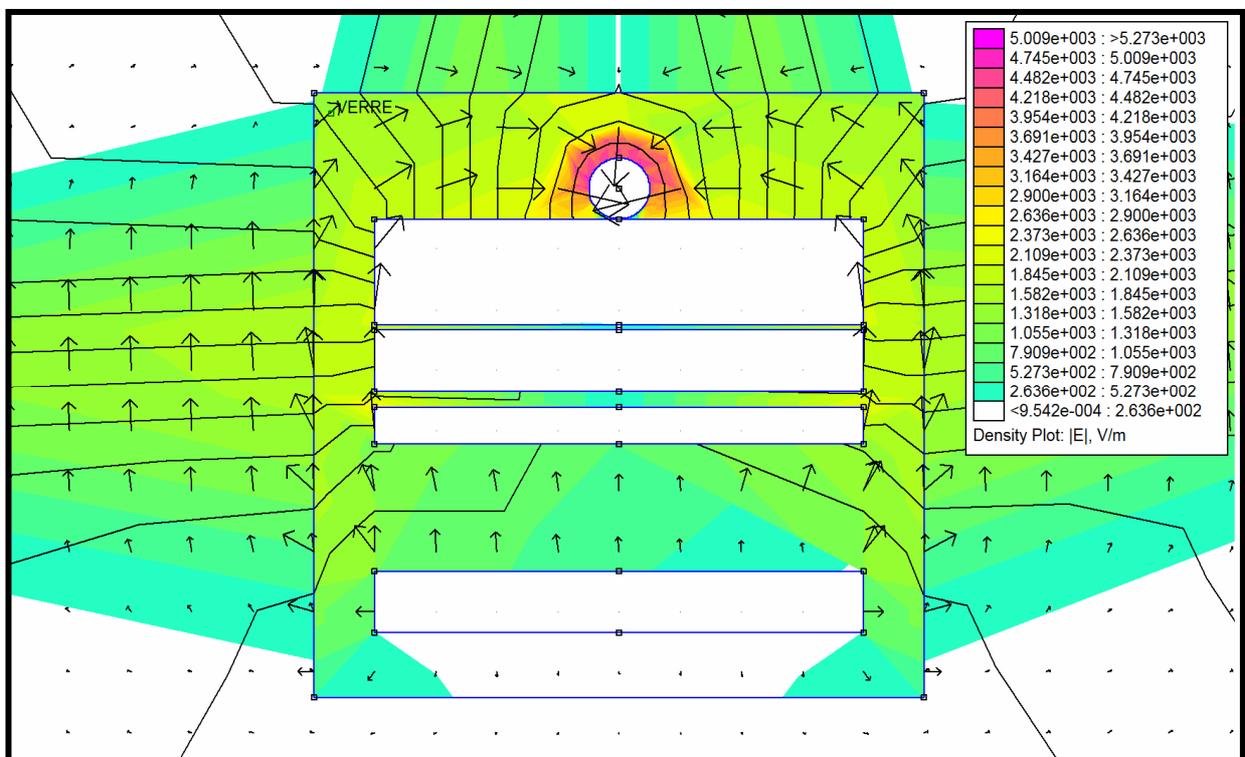


Figure IV.20. Répartition du champ électrique pour une largeur de la pollution de 40 cm

IV.6.2. La variation du champ électrique le long de la ligne de fuite centrale

Nous nous sommes, principalement, intéressés à l'étude de la variation du champ électrique le long de la ligne de fuite centrale en fonction de la largeur de la couche de pollution, (ligne discontinue sur la Figure IV.21).

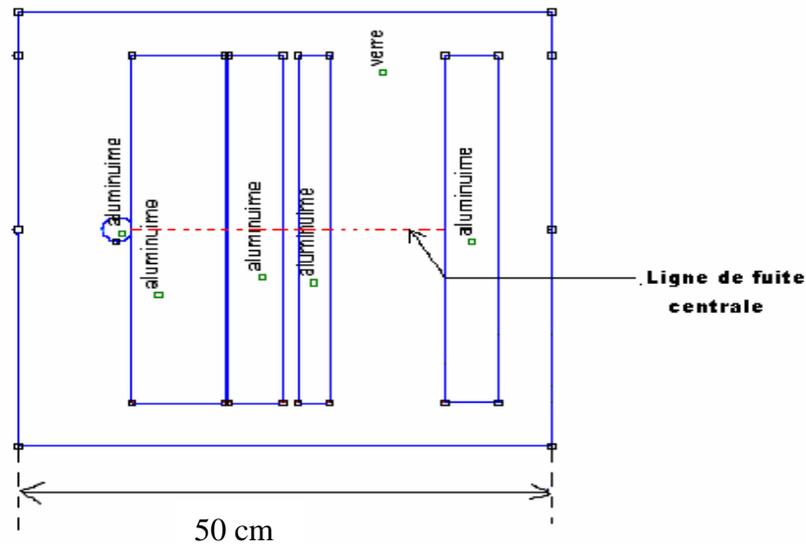


Figure IV.21. Ligne de fuite pour la détermination de la variation du champ électrique

Les figures (IV.22 à IV.24) présentent la variation du champ électrique le long de la ligne de fuite centrale pour la tension égale à 1 unité et dans le cas d'une plaque propre (Figure IV.22), le champ électrique atteint sa valeur maximale à l'extrémité de l'électrode de haute tension, et diminue rapidement pour les distances inférieures à 10 cm de l'électrode active, puis lentement avant son annulation au premier contact avec l'électrode de masse.

Dans le cas des plaques polluées (Figure IV.23 et IV.24), le champ électrique est intense le long des zones propres 3 et 5 et il est de plus intense dans la zone propre 1, atteint une valeur maximale puis diminue en allant de la première couche polluante vers l'électrode de masse où il s'annule.

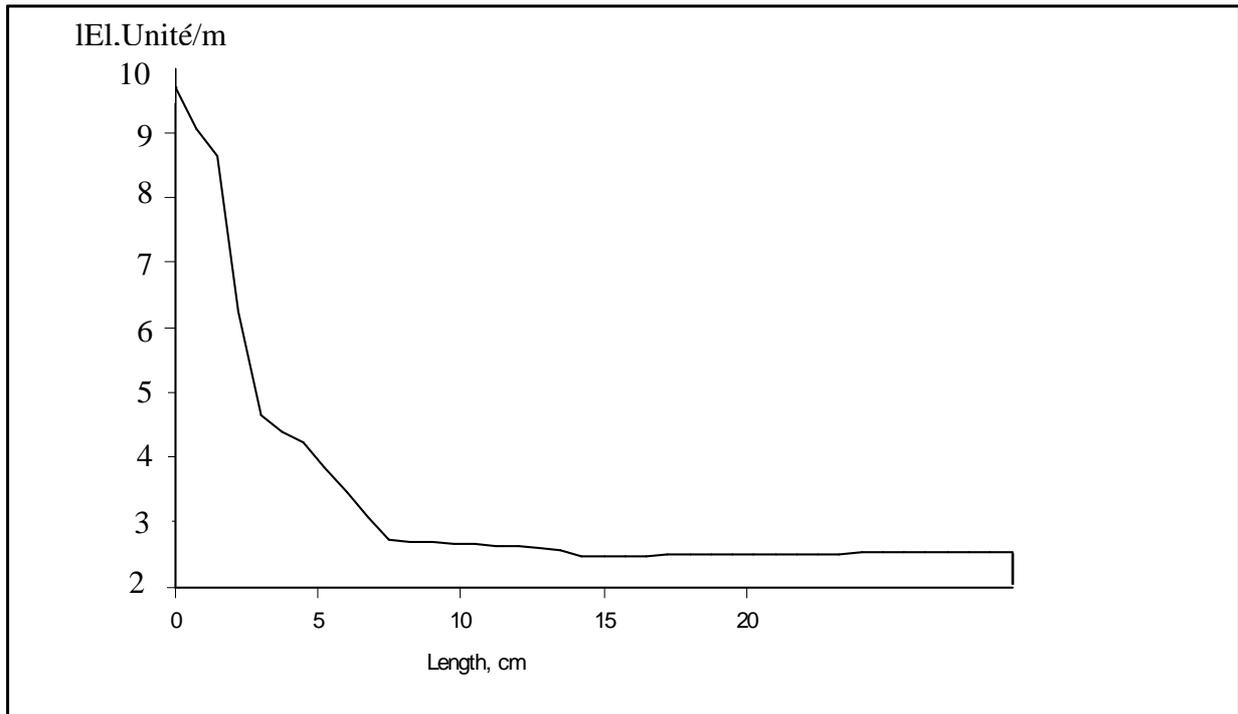


Figure IV.22. Variation du champ électrique le long de la ligne de fuite centrale, dans le cas d'une plaque propre

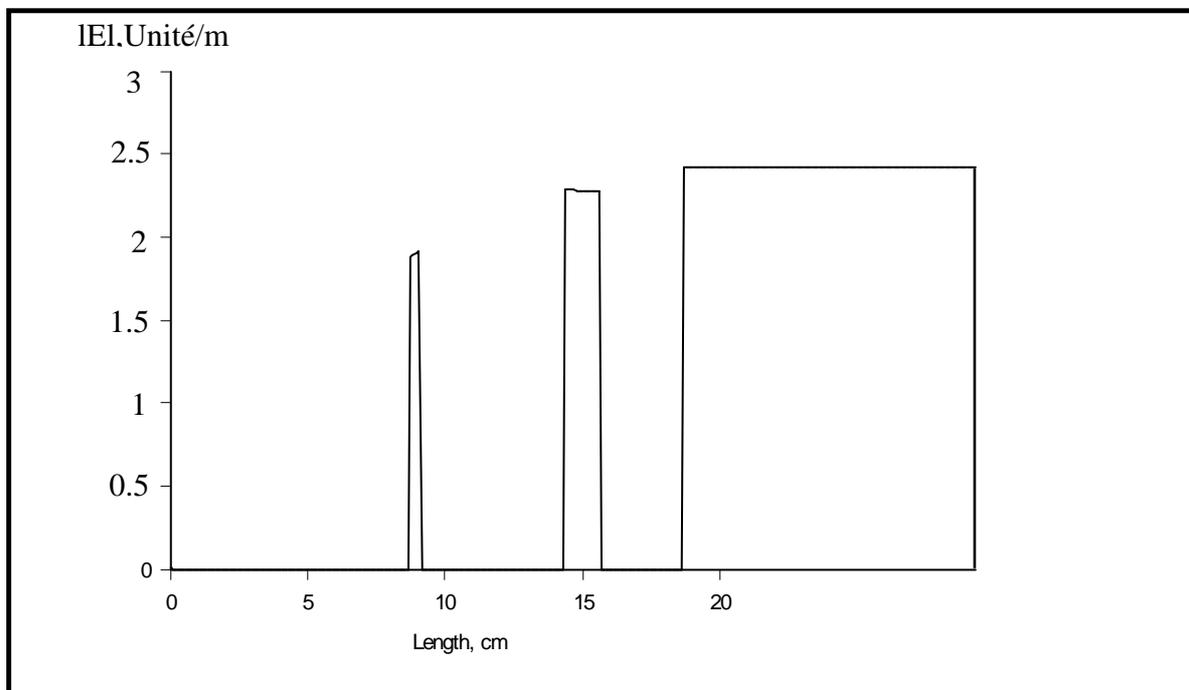


Figure IV.23. Variation du champ électrique le long de la ligne de fuite centrale, largeur de la pollution L=1 cm

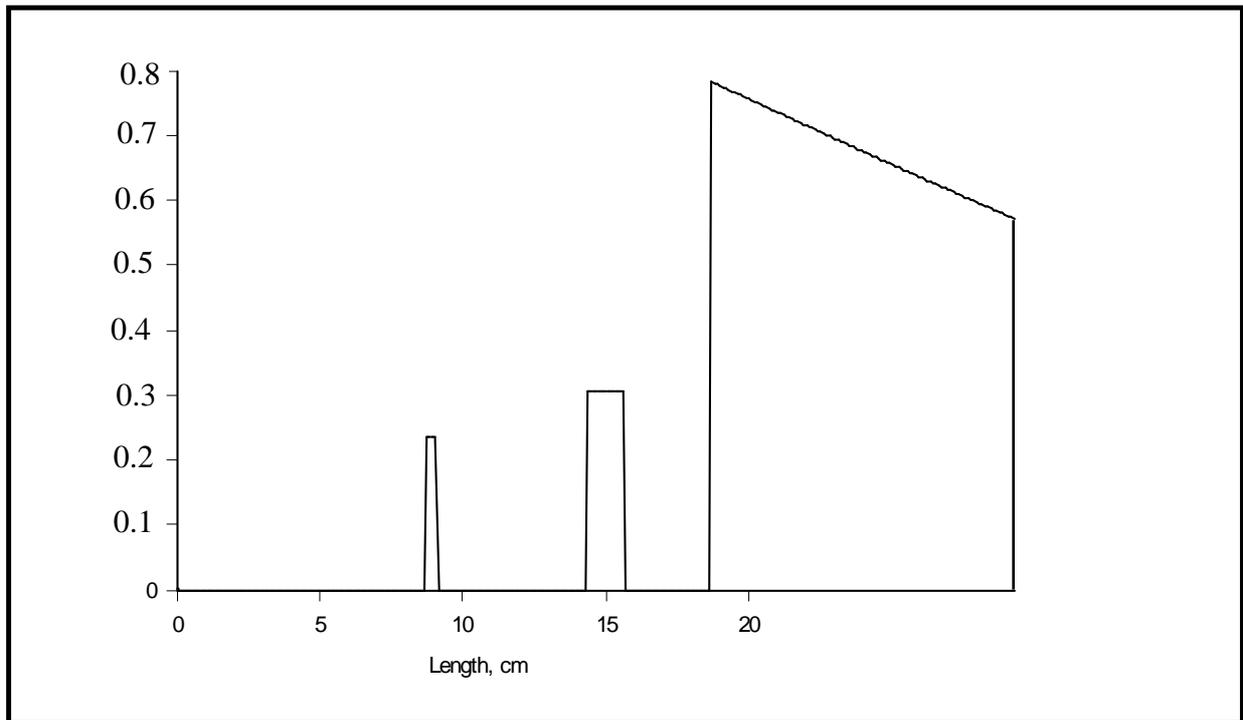


Figure IV.24. Variation du champ électrique le long de la ligne de fuite centrale, largeur de la pollution $L=40$ cm

IV.6.3. Influence de la largeur des couches polluantes

Pour étudier l'influence de la largeur des couches polluantes sur la variation du champ électrique, nous avons tracé le champ électrique maximal dans les zones propres le long de la ligne de fuite en fonction de la largeur de la couche de pollution (Figure IV.25).

Pour une zone propre donnée, nous constatons qu'avec l'augmentation de la largeur de la pollution, le champ électrique maximal le long de la ligne de fuite centrale diminue rapidement pour des largeurs comprises entre 1 et 4 cm et lentement ailleurs.

D'autre part, le champ électrique maximal pour la zone propre 1 est supérieur à ce obtenu dans les zones propres 3 et 5.

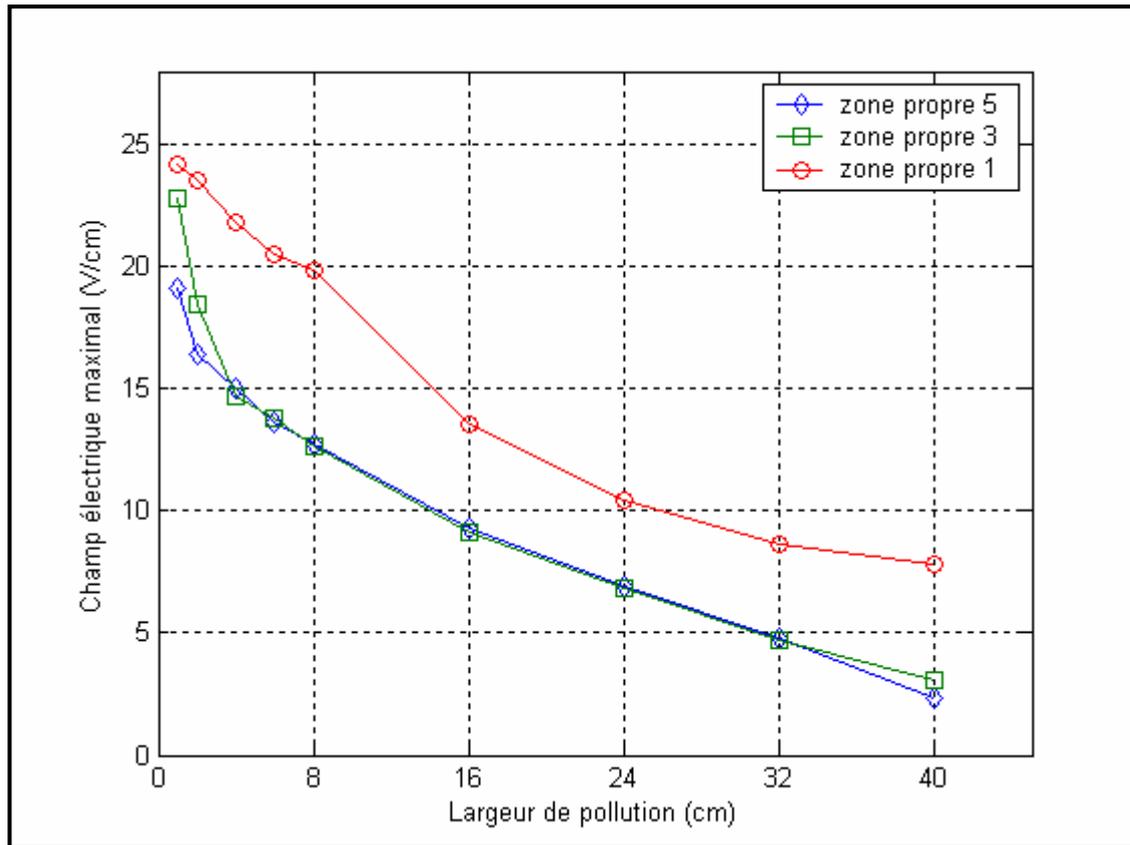


Figure IV.25. Variation du champ électrique maximal le long de la ligne de fuite centrale en fonction de la largeur de la pollution

IV.7. CONCLUSION

Il ressort de notre étude expérimentale les conclusions suivantes :

Dans le cas d'une distribution normale, la méthode Up and Down est préférable à la méthode des paliers multiples constants, pour la détermination de la tension $U_{50\%}$ de décharge disruptive aux chocs .

- ◆ En fonction de la largeur de pollution, la tension $U_{50\%}$ diminue rapidement pour les faibles largeurs de pollution, augmente légèrement puis tend vers une valeur pratiquement constante.
- ◆ Le temps entre impulsions n'a pratiquement pas d'effet sur la tension $U_{50\%}$.
- ◆ La tension $U_{50\%}$ est plus élevée dans le cas d'une polarité négative, pour les largeurs des couches polluantes inférieures ou égales à 32 cm. Pour 40 cm les résultats sont très proches pour les deux polarités.
- ◆ L'amplitude du courant de fuite augmente avec la tension appliquée.

- ◆ En fonction de la largeur de la couche polluante, le courant de fuite diminue brusquement pour des largeurs variant de 0 à 1 cm, atteint un minimum et augmente par la suite.
- ◆ Le courant de fuite est plus important dans le cas d'une polarité positive.
- ◆ Avec l'augmentation de la largeur de la pollution, l'impédance électrique équivalente diminue rapidement dans l'intervalle 0 - 8 cm et lentement ailleurs.
- ◆ En général, l'impédance électrique équivalente est plus importante en polarité négative.
- ◆ Pour le cas d'une plaque propre, le champ électrique atteint sa valeur maximale à l'extrémité de l'électrode de haute tension, et diminue rapidement pour les distances inférieures à 10 cm de l'électrode active, puis lentement jusqu'à son annulation au premier contact avec l'électrode de masse.
- ◆ Dans le cas des plaques polluées, le champ électrique est intense le long des zones propres 3 et 5.
- ◆ Le champ électrique est de plus intense dans la zone propre 1, atteint une valeur maximale puis diminue en allant de la première couche polluante vers l'électrode de masse où il s'annule.
- ◆ le champ électrique maximal le long de la ligne de fuite centrale diminue avec l'augmentation de la largeur de pollution.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Cette étude nous a permis de déterminer la tension $U_{50\%}$, le courant de fuite et l'impédance électrique équivalente vue des électrodes. Les contraintes appliquées au modèle expérimental sont la largeur de la pollution en papier aluminium, la polarité de l'électrode active, la tension appliquée et le temps entre deux impulsions successives.

Pour les configurations adoptées, nous avons abouti aux résultats suivants :

- ◆ A cause de la nature de l'agent polluant utilisé et de la dimension longitudinale de la bande propre équivalente relativement à la distance inter-électrode, le contournement se produit directement sans décharges électriques partielles.
- ◆ L'augmentation de la largeur de pollution engendre la diminution de la tension $U_{50\%}$. D'autre part, le temps entre deux impulsions successives n'a pratiquement pas d'influence sur la tension $U_{50\%}$. Selon les valeurs obtenues, nous constatons que le système est plus rigide dans le cas d'une polarité négative
- ◆ La valeur de la crête du courant de fuite augmente avec la tension appliquée. En fonction de la largeur de la couche polluante, elle diminue pour atteindre un minimum, ensuite elle augmente avec la largeur de la pollution. En outre, il existe une limite pour cette largeur à partir de laquelle le courant de fuite croît rapidement.
- ◆ Par ailleurs, les courants de fuite enregistrés en polarité positive sont plus importants qu'en polarité négative.
- ◆ L'augmentation de la largeur de la couche polluante engendre une diminution d'impédance électrique vue des électrodes. En général, cette impédance est plus importante en polarité négative.
- ◆ Dans le cas des plaques polluées, le champ électrique est intense le long des zones propres 3 et 5. Il est de plus intense dans la zone propre 1, atteint une valeur maximale puis diminue en allant de la première couche polluante vers l'électrode de masse où il s'annule.

- ◆ le champ électrique maximal le long de la ligne de fuite centrale diminue avec l'augmentation de la largeur de pollution. D'autre part, le champ électrique maximal pour la zone propre 1 est supérieur à ce obtenu dans les zones propre 3 et 5.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [ALS 63] **L. LALSTON, S. ZOLEDZIOWSKI**, « Growth of discharges on polluted insulators », IEEE, Trans. PAS, Vol. 110, N° 7, pp. 1260–1266, Juillet 1963.
- [AMI 98] **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.
- [BEL 94] **R. BELAICHA**, « zone d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre mauvaise conductrice », Thèse de magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 1994.
- [BOU 01] **A. BOUBAKEUR, M. TEGUAR, A. ABIMOULOUD et 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.
- [BOU 02] **A. BOUHAFS**, « Comportement des surfaces isolantes sous pollution non-uniforme. Elaboration d'un algorithme de contournement », Thèse de Magistère, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Fev 2002.
- [BOU 02-a] **A. BOUBAKEUR, A. RAHMANI et H. BROURI**, « Model of an Horizontal Lightning Conductor in the Case of Earth Discontinuity », UPEC'2002, Stafford, UK, pp 832-835, Sept. 2002.
- [BOU 78] **A. BOUBAKEUR**, « Essais d'isolateurs pollués dans les conditions naturelles », rapport interne, I. W. N, politeknika WARSZAWKA, Varsovie 1978.
- [BOU 88] **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.
- [BOU ST] **A. BOUBAKEUR, A. OUABDESSELAM**, « Statistiques appliquées aux essais de Haute Tension ». Rapport interne, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 1991
- [CAR 72] **G. CARRARA, L. DELLARA**, ELECTRA, CIGRE, groupe de travail du comité d'étude, N°23, pp. 159-175, Paris, 1972.
- [CEI 73] **CEI 60**, « Technique des essais à M.T, définitions et prescriptions générales aux essais », Première édition 1973.
- [CEI 76] **CEI 60**, « Techniques d'essais de Haute Tension ». (60-03), 1976.
- [CEI 77] **CEI 60**, « Techniques d'essais de Haute Tension ». (60-04), 1977.
- [CEI 89] **CEI 60-1**, « Techniques des essais à haute tension », Définitions et Prescriptions Générales relatives aux Essais, Deuxième Edition, 1989.
- [CHO 99] **A. CHOUCYOU**, « Détermination des zones d'attraction d'un paratonnerre vertical dans le cas d'une terre discontinue », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 1999.
- [CIG 79] **CIGRE**, groupe de travail du comité d'étude, N°33, « Mesure de la sévérité de pollution des sites et application au dimensionnement des isolateurs pour les réseaux à courant alternatif », ELECTRA, N° 64, mai 1979.

- [CIM 78] **A. CIMADOR, M. COJAN, P. HAUTEFEUILLE et M. MOREAU**, « Méthodes de dimensionnement des isolateurs de Lignes Aériennes en régions polluées », CIGRE, Rapport 33-04, Paris, France, 1978.
- [CIM 90] **A. CIMADOR, S. VITET**, « La pollution des isolateurs », EDF-Epure, N°. 27, Juillet 1990.
- [CLA 73] **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, Mars 1973.
- [DAN 83] **J. DANIS**, « A stochastic pollution flashover model », 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 - 12, Septembre 5 - 9, Athènes, Grèce, 1983.
- [DIX 48] **W. J. DIXON, A. M. MOOD**, « Journal of America Statistic Association ». Vol.43, pp.109-126, 1948.
- [DOB 72] **M. DOBARZIC**, « Station d'essais de choc de laboratoire haute tension », Thèse de docteur ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, juin 1972.
- [DUM TI] **D. DUMORA**, « Matériaux isolants céramiques en électrotechnique », Technique de l'ingénieur D275.
- [ELK 70] **M. A. B. EL KOSHAIRY, F. A. M. RIZK**, « Comportement des Isolateurs des Lignes de Transport à Très Haute Tension dans les Conditions de Pollution Désertiques », CIGRE, Rapport 33 - 05, Paris, 1970.
- [GAR 94] **C. GARY**, « La foudre : Des mythologies antiques à la recherche moderne », Masson, Paris, 1994.
- [GUE 04] **Y. GUEHRAR**, « 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.
- [GUE 96] **M. GUENFOUD, D. MIDA**, « Influence de la largeur des écrans isolants sur l'amorçage des intervalles d'air, pointe - plan ». Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, juin 1996.
- [HEI 82] **W. HEISE, G.F, LUXA, G. REVRERY et M. P. VERMA**, « Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide », CIGRE, Rapport 33-09, Paris. France, 1982.
- [HEL 96] **S. HELIS, A. MEDDOUR**, « Etude du contournement d'un isolateur pollué », Projet de Fin d'Etude, Laboratoire Haute Tension, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Septembre 1996.
- [HUR 75] **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.
- [KOS 70] **M. A. B. EL KOSHAIRY, F. A. M. RIZK**, « Comportement des isolateurs des lignes de transport à très haute tension dans les conditions de pollution désertiques », CIGRE, Rapport 33 - 05, Paris, 1970.
- [KRI 98] **M. KRINS, H. BORSI ET E. GOCKENBACH**, « Impact Of Carbon Particles On The Impulse Flashover Behavior Of Different Solid / liquid Interfaces In A Non-Uniform Field », Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials, in conjunction with 1998 Asian International Conference on Dielectrics and Electrical Insulation and the 30th Symposium on Electrical Insulating Materials, Toyohashi, Japan, Sept. 27-30, 1998.

- [LAM 72] **P. J. LAMBETH, H. AUXEL et M. P. VERMA**, « Méthode de mesure de la sévérité de la pollution compte tenu de son influence sur le comportement des isolateurs à haute tension », *Electra* N°. 20, pp 95-100, Janvier 1972.
- [LAM 78] **C. H. A. ELY, P. J. LAMBETH, J. S. T. LOOMS et D. A. SWIFT, C.E.G.B** « Contournement des polymères humides et pollués l'ailette BOOSTER », CIGRE, Rapport 15 - 02, Paris, France, 1978.
- [LER 84] **G.LEROY et all**, « Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions », Edition Ayrolles, Paris, France, 1984.
- [MEE 03] **D. MEEKER**, « Méthode des élément finis FEMM », *AIAA*, New York, 2000, 380 pp., 2003.
- [MEK 90] **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.
- [MEK 94] **A. MEKHALDI, S. BOUZABIA**, « Etude de courant de fuite sur les isolateurs pollués » Spécial Issue of AJOT, Proceedings of 2nd CEA Alger, Nov. 29-30 / vol 1, Algérie, 1994.
- [MEK 96] **A. MEKHALDI, M.TEGUAR et A.BEROUAL**, « Algorithm for pollution flashover calculations », *Archives of Electrical Engineering*, Vol. XLV, No. 4, pp. 385-397, 1996.
- [MEK 99] **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.
- [MEK 99-a] **A. MEKHLADI, D. NAMANE, S. BOUAZABIA et A. BEROUAL**, « Flashover of discontinuous pollution layer on high voltage insulators », *IEEE, Trans, ou Dielectrics and electric insul.* vol. 6, N° 6 pp 900-906, Dec, 1999.
- [MEZ 02] **A. MEZIANE, Y THAMINY**, « Modélisation dynamique du phénomène de contournement des isolateurs pollués sous tension continue ». Projet de fin d'étude, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 2002.
- [NAM 98] **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, Algérie, Algérie, Février 1998.
- [NEU 59] **G. NEUMÄRKER**, « Verschmutzungszustand und Kriechweg », *Monatsber. d. Deut. Akad, Wiss., Berlin*, vol.1, pp.352 – 359, 1959.
- [POR TI] **Y. PORCHERON**, « Lignes aériennes : Matériels entrant dans la constitution d'une ligne aérienne », *Technique de l'ingénieur D4425*.
- [PUB 76] **PUBLICATION IEC 71-2**, « Insulation Coordination, Application Guide », Seconde Edition, 1976.
- [RAT 93] **S. RATAOIN**, « contribution à la caractéristique du rayonnement électromagnétique de foudre et à sa modélisation en vue couplage sur les câble » N 93-41, pp : 94-115, 1993.
- [RAY 91] **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.
- [RIQ 98] **G. RIQUEL, E. SPAN GENBERG**, « De la céramique au synthétique », *EDF-Epure*, N° 58, Avril 1998.

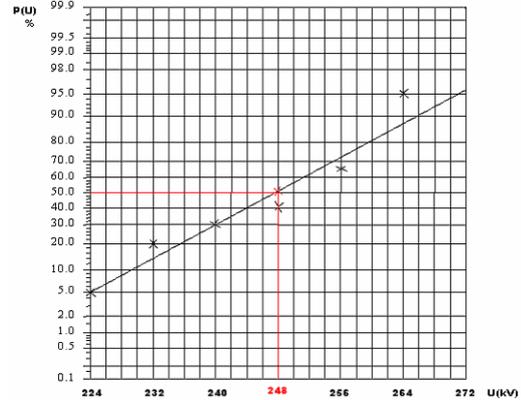
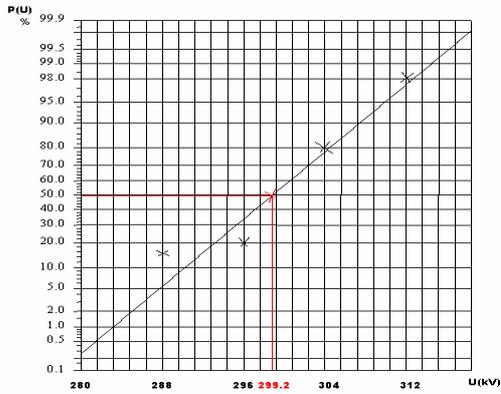
- [SAI 92] **J.Y. SAISON**, « Etude du phénomène d'humidification des dépôts naturels et artificiels de pollution sur des isolateurs électriques », Thèse de Doctorat Es Sciences, Université de Strasbourg, France, 1992.
- [STR 83] **H. STREUBEL**, « The influence of non-uniform contamination on the flashover voltage of insulators » 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46-10, Athens, Greece, 5-9 September 1983.
- [SUN 97] **R. SUNDARARAJAN, R. S. GORUR**, « Role of non soluble contaminants on the flashover voltage of porcelain insulators », IEEE Trans. On Dielect. & Elec. Insul. Vol.3, No2, April 1997.
- [SWI 99] **D. A. SWIFT**, « AC disc insulators: accumulation of pollution within and around the pin pavity », 7e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport44-22, Dresde, Allemagne, 26-30 Août 1991.
- [TAI 02] **W. TAIBI, K. ABDELI**, « Modèle d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz ». Projet de Fin d'Etude, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, Alger, Algérie, Juin 2002.
- [TEG 00] **M. TEGUAR, A.ABIMOULOUD, A.MEKHALDI et 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, Victoria, British Columbia, Canada, October 15-18, 2000.
- [TEG 01.a] **M. TEGUAR, A. MEKHALDI et 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.
- [TEG 01.b] **M. TEGUAR, A. ABIMOULOUD, A. MEKHALDI et 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.
- [TEG 03] **M. TEGUAR**, « Modélisations d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électrogéométriques ». Thèses de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie, Algérie, 2003.
- [TEG 93] **M. TEGUAR**, « Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie, Algérie, Juillet 1993.
- [WIL 69] **R. WILKINS**, « Flashover voltage of high voltage insulators with Unite en Surface pollution films », Proc. IEE, 116, No3, MARS 1969.
- [WOO 70] **H. H. WOODSON, A. J. MCELROY**, « Insulators with contaminated surfaces part II: modelling of discharge mechanisms », IEEE Trans., Vol. Pas-89, N°. 8, pp. 858-867, November- December 1970.
- [ZAF 86] **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.

Annexe

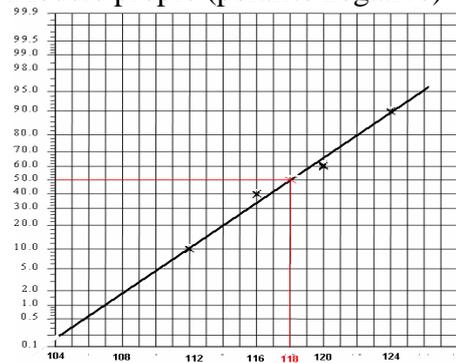
ANNEXE

I. Détermination de la tension $U_{50\%}$ (kV), σ

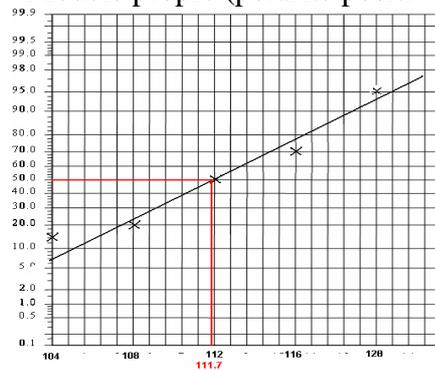
I.1.méthode des paliers multiples constants



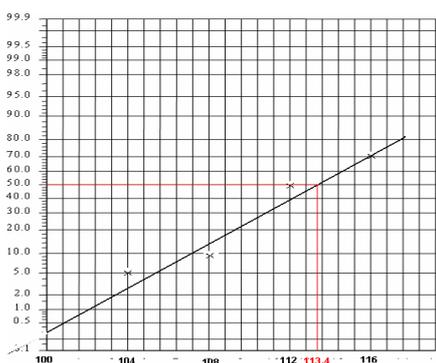
Modèle propre (polarité négative)



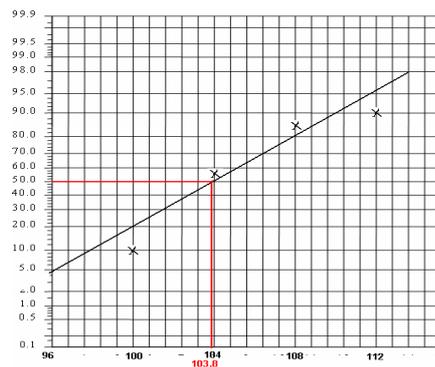
Modèle propre (polarité positive)



L=1cm (polarité négative)



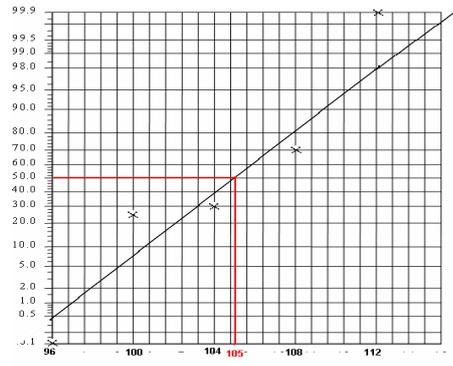
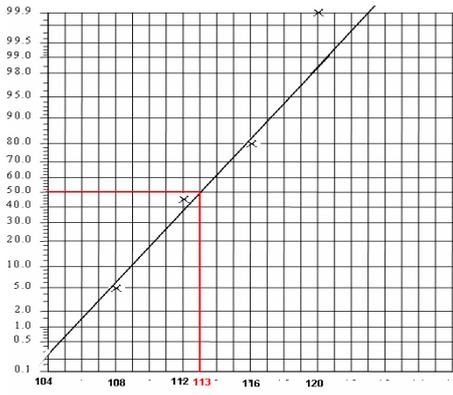
L=1cm (polarité positive)



L=2cm (polarité négative)

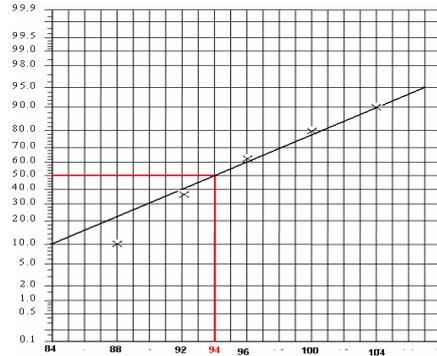
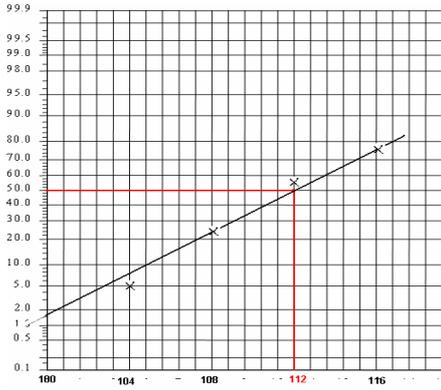
L=2cm (polarité positive)

Figure 1. Détermination des tensions $U_{50\%}$ et $U_{0\%}$, pour des différentes largeurs de pollution et les deux polarité.



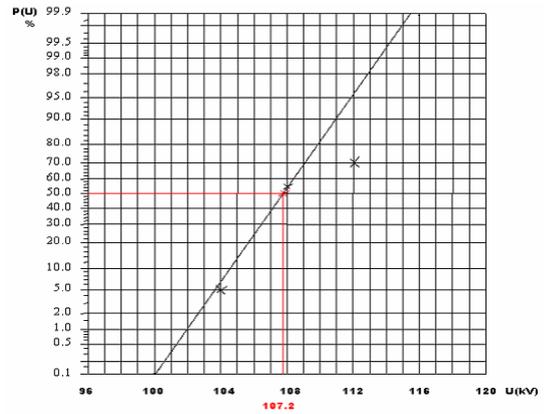
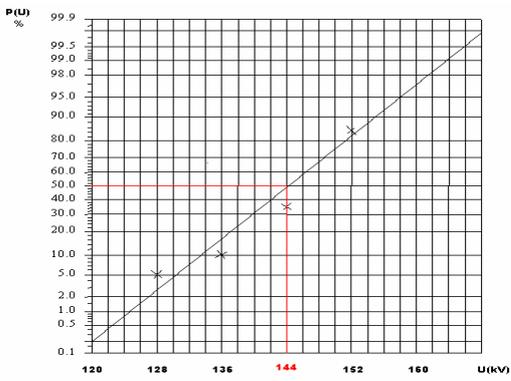
L=4cm (polarité négative)

L=4cm (polarité positive)



L=6cm (polarité négative)

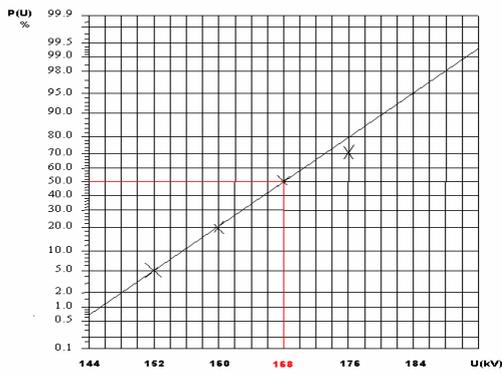
L=6cm (polarité positive)



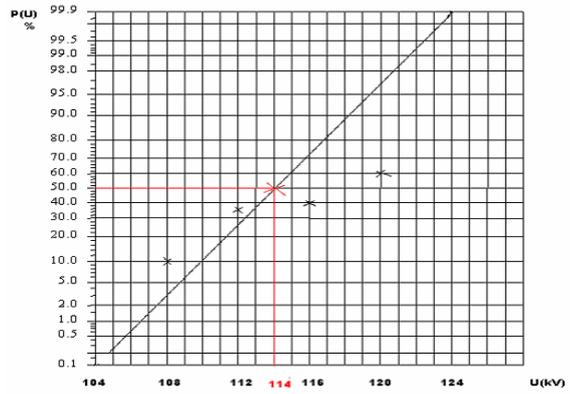
L=8cm (polarité négative)

L=8cm (polarité positive)

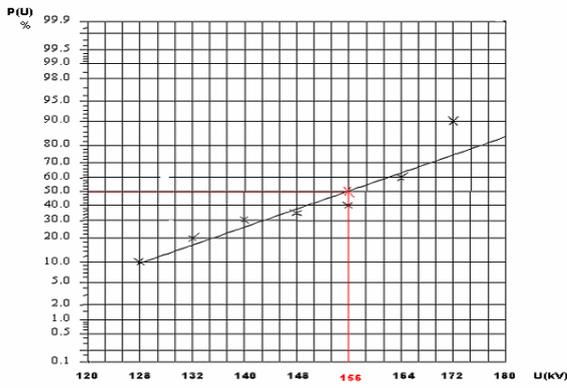
Figure 2. Détermination des tensions $U_{50\%}$ et $U_{0\%}$, pour des différentes largeurs de pollution et les deux polarité.



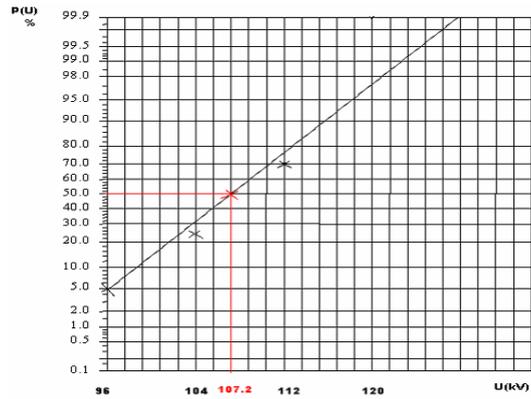
L=16cm (polarité négative)



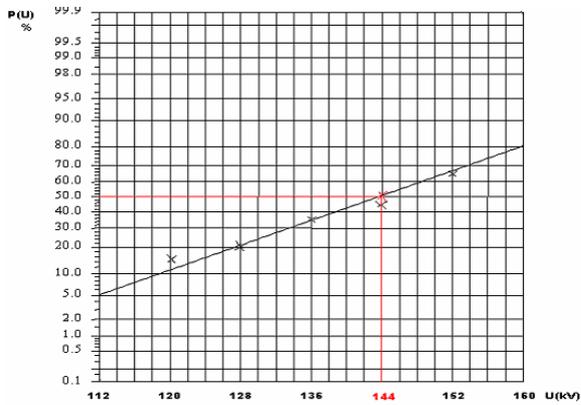
L=16cm (polarité positive)



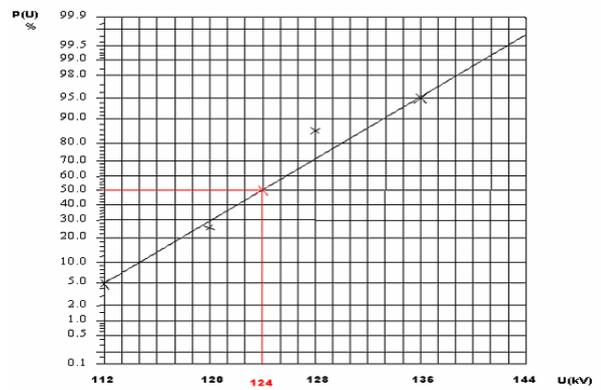
L=24cm (polarité négative)



L=24cm (polarité positive)

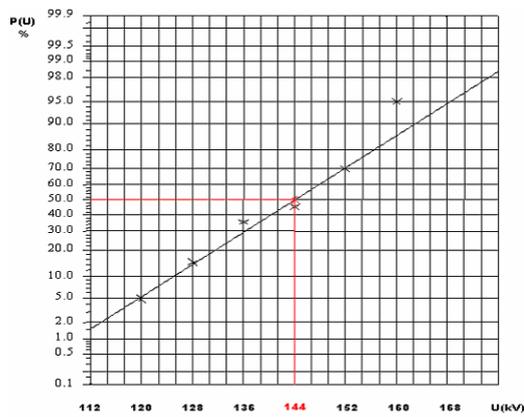


L=32cm (polarité négative)

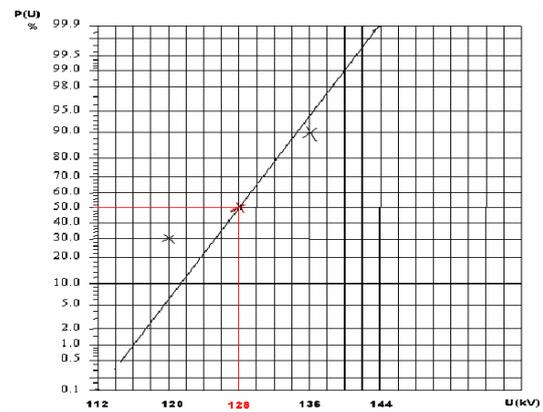


L=32cm (polarité positive)

Figure 3. Détermination des tensions $U_{50\%}$ et $U_{0\%}$, pour des différentes largeurs de pollution et les deux polarité.



L=40cm (polarité négative)



L=40cm (polarité positive)

Figure 4. Détermination des tensions $U_{50\%}$ et $U_{0\%}$, pour des différentes largeurs de pollution et les deux polarité.

I.1.1.polarité positive

Largeurs de la pollution (cm)	0	1	2	4	6	8	16	24	32	40
$U_{50\%}$ (kV)	248	112	104	104	96	107.2	114	107.2	124	128
$U_{0\%}$ (kV)	203	94.4	87.5	94	76	100	88.7	86.5	101	112
σ (kV)	17.8	4	4	8	8	4	8	8	8	8

I.1.2.polarité négative

Largeurs de la pollution (cm)	0	1	2	4	6	8	16	24	32	40
$U_{50\%}$ (kV)	299.2	118	113.4	113	112	144	168	160	148	144
$U_{0\%}$ (kV)	278	104.4	99.5	102	94	120	100	85	83	101.5
σ (kV)	8	4	4	4	4	8	8	24	24	16

I.2.méthode Up and Down

Largeurs (cm)	Polarité positive			Polarité négative		
	30s	60s	180s	30s	60s	180s
0	256,4	267,6	271,5	291,33	289,44	306
1	115.98	103.3	115.3	125.1	115	117
2	108.32	96.56	107.76	119.8	110.2	112
4	103.52	107.36	102.83	119.28	109.68	111.13
6	108.96	102.88	101.92	113.07	114.36	115.88
8	117,2	121,7	124,6	145,23	147,04	149
16	114,4	108	114	168,48	170,15	172,96
24	101,92	105,6	103,66	148,96	157,6	148
32	126	124,33	123,33	148,48	154,24	157,12
40	125,6	124	125,28	134,72	121,28	143,68

II. Forme d'ondes obtenues par l'oscilloscope

II.1. Ondes négatives

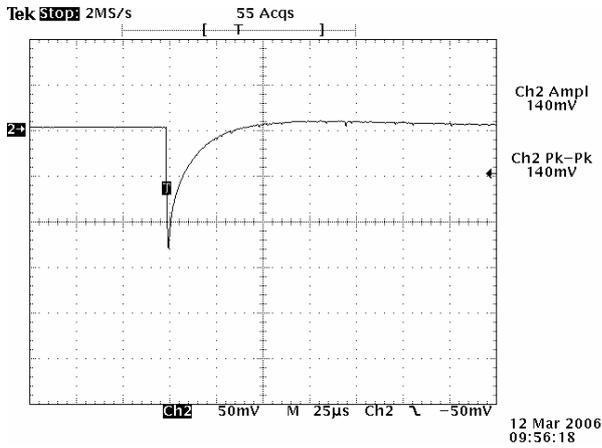


Figure 5. $L=1\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$

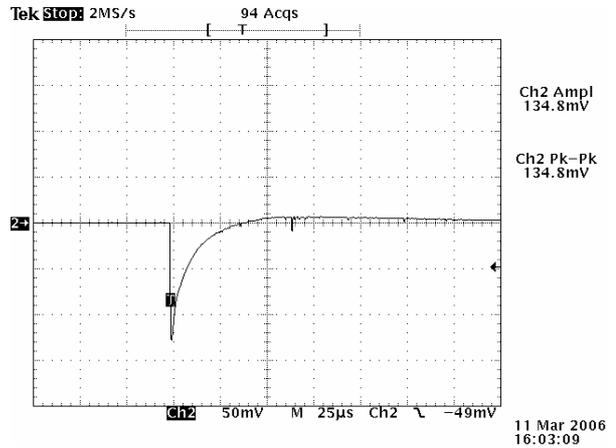


Figure 6. $L=2\text{cm}$, $U=0.7U_{0\%}$

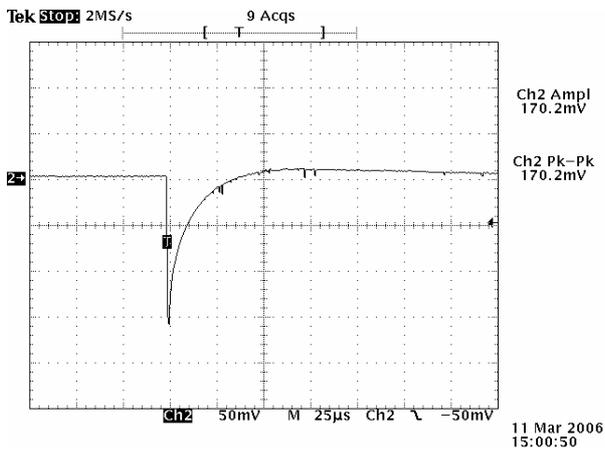


Figure 7. $L=4\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$

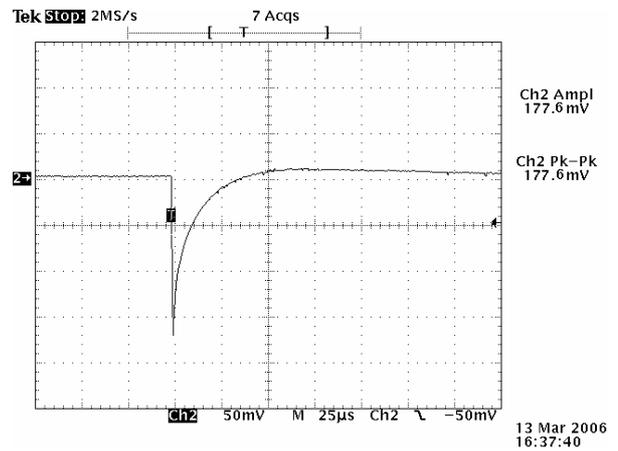


Figure 8. $L=6\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$

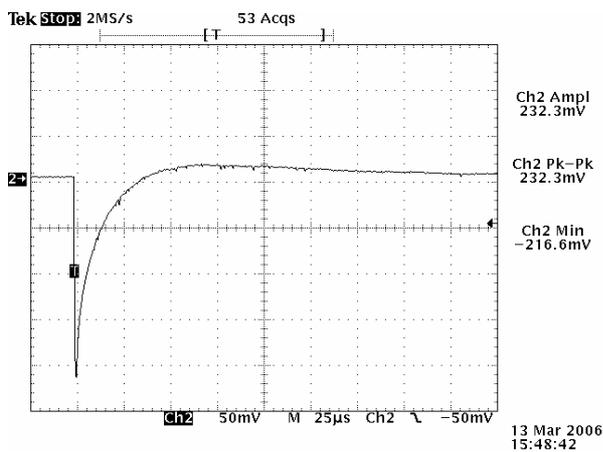


Figure 9. $L=8\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$

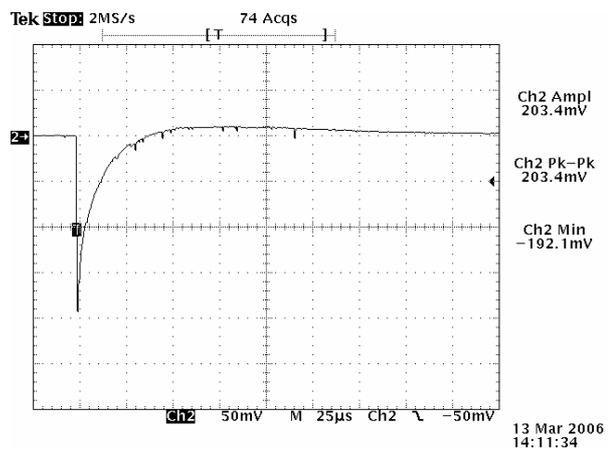


Figure 10. $L=16\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$

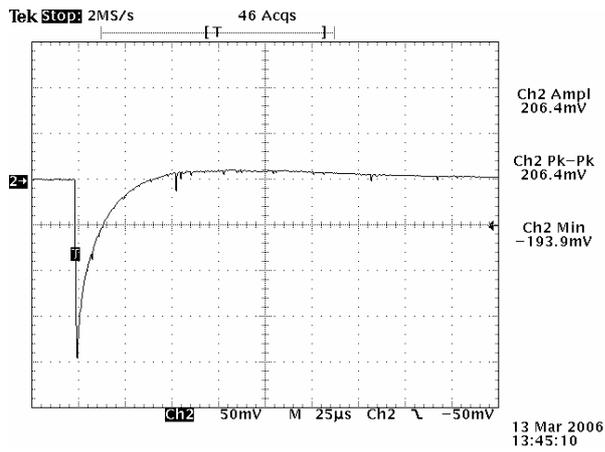


Figure 11. $L=24\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$

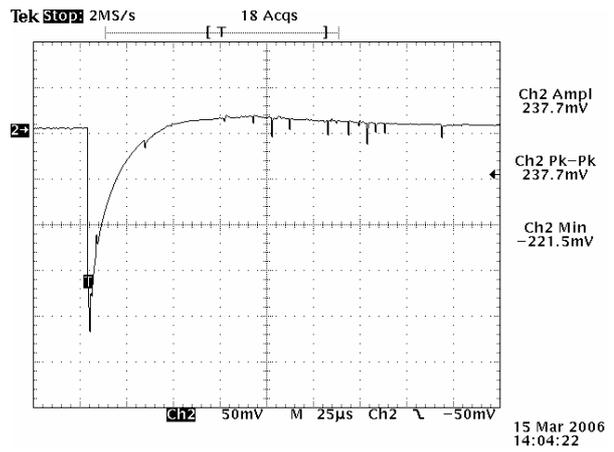


Figure 12. $L=32\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$

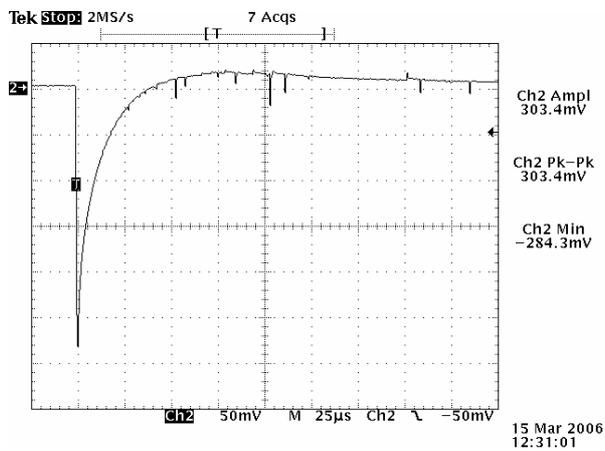


Figure 13. $L=40\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$

II.2. Onde positive

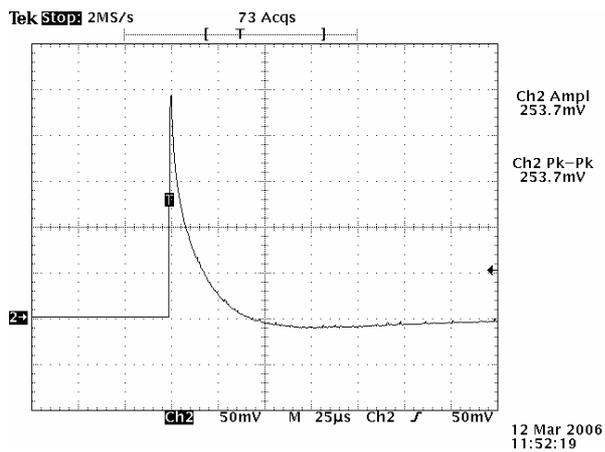


Figure 14. Modèle propre, $U=0.8U_{0\%}$

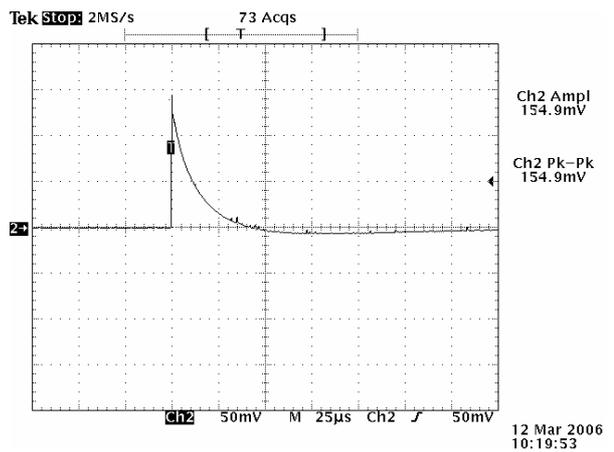


Figure 15. $L=1\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$

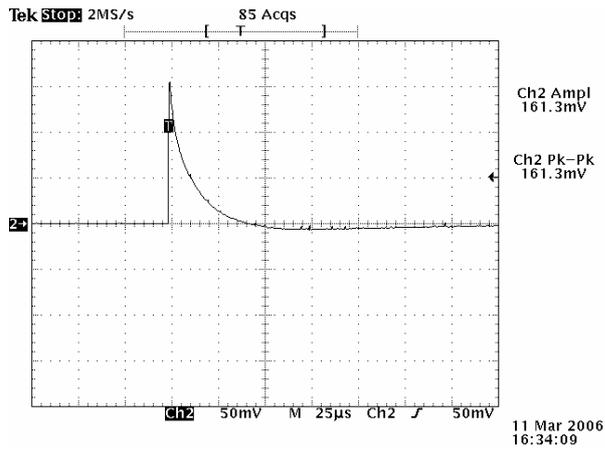


Figure 16. $L=2\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$

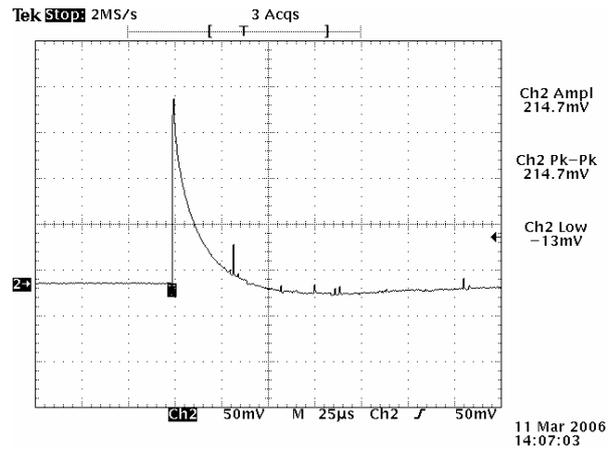


Figure 17. $L=4\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$

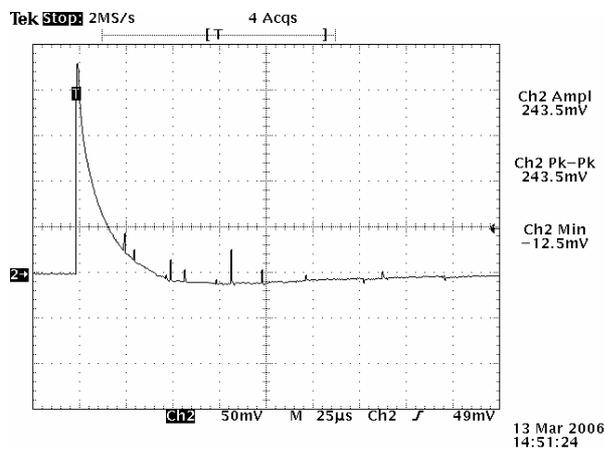


Figure 18. $L=8\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$

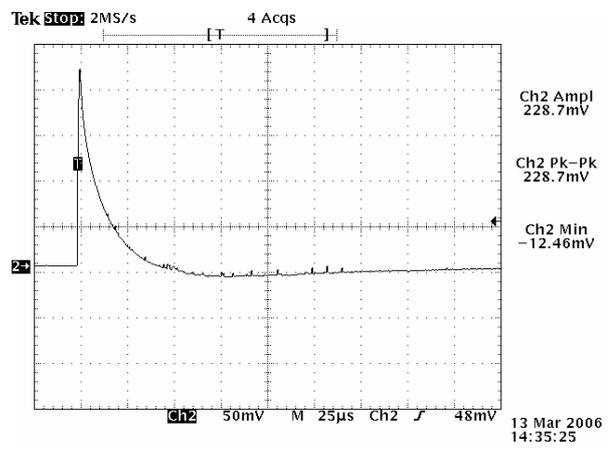


Figure 19. $L=16\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$

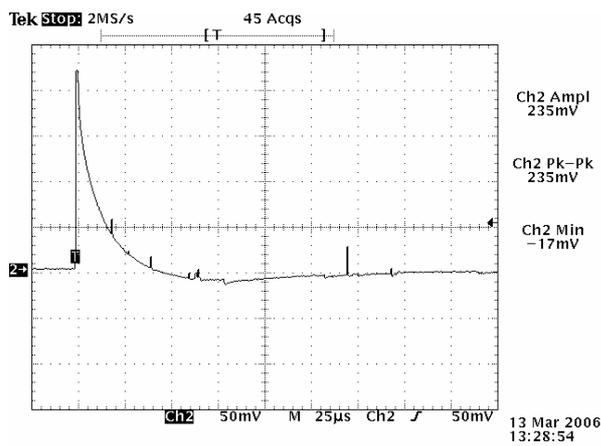


Figure 20. $L=24\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$

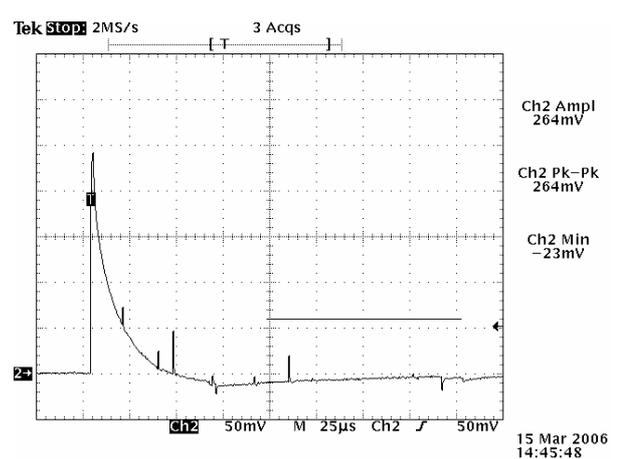


Figure 21. $L=32\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$

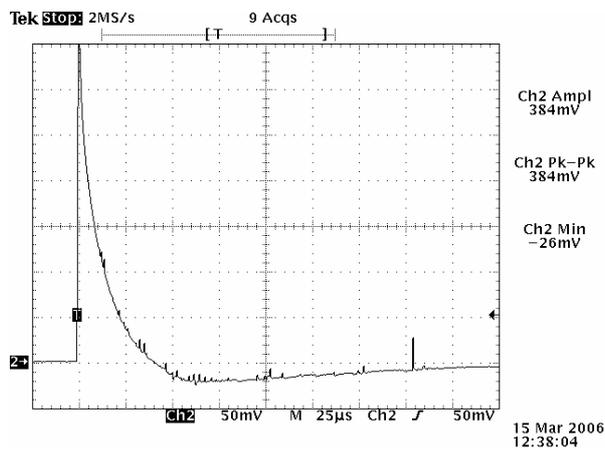


Figure 22. $L=40\text{cm}$, $U=0.8U_{0\%}$