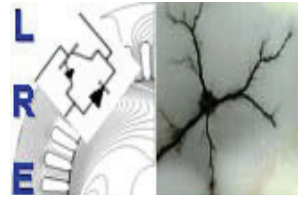




**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electrotechnique



# Mémoire de Magister

Présenté par : **M. RAHALI Hilal**

En vue de l'obtention du diplôme Magister en Electrotechnique

Option: Réseaux Electriques et Haute Tension

---

## Comportement d'un modèle d'isolateur sous différentes configurations de pollution sous tension alternative 50 Hz.

---

Soutenu publiquement le 10 Fév 2011 devant le jury composé des membres :

Président:	M <sup>r</sup> : <b>A. BOUBAKEUR</b>	Professeur à l'ENP
Rapporteur:	M <sup>r</sup> : <b>A. MEKHALDI</b>	Professeur à l'ENP
Examineurs:	M <sup>r</sup> : <b>M. TEGUAR</b>	Professeur à l'ENP
	M <sup>r</sup> : <b>R. TAHMI</b>	Maître de conférences à l'ENP
	M <sup>r</sup> : <b>L. NEZLI</b>	Maître de conférences à l'ENP

Fév. 2011

## *Remerciement*

Mes remerciements les plus vifs et chaleureux, vont à mon directeur de mémoire monsieur A.MEKHALDI, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique pour son aide, son orientation judicieuse et sa disponibilité, et pour sa constante présence au sein du laboratoire de Haute Tension.

Nous remercions Monsieur A.Boubakeur Professeur à l'Ecole Nationale pour l'intérêt qu'il a porté à notre modeste travail.

Je remercie également Monsieur M. TEGUAR, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour ses conseils combien utiles et ses qualités humaines.

Je remercie aussi tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, en particulier : Mme D. NAMANE, Mr: C. BOUZIDI et M.DOUAR.

Enfin, nous remercions les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

## ملخص:

في هذا العمل قمنا بمعالجة تأثير عامل التلوث على نموذج مخبري سطحي يمثل العازل 1512 ل على التوتر العالي يخضع إلى عدة عوامل كهربائية وهندسية. ولهذا الغرض أجريت عدة تجارب للتلوث المنتظم وغير المنتظم، نهتم من خلالها بكل من توتر الإحاطة، شدة تيار التسرب، فرق الصفحة بين التوتر و تيار التسرب وتطور عدد و طول التفريغات المتوازية. وأخيرا انهينا هذا العمل بنمذجة تجريبية لسلوك العازل المستوي وذلك بحساب شدة تيار التسرب الإمبري لتسهيل دراسة ظاهرة تلوث العوازل.

**الكلمات المفتاحية:** نموذج سطحي عازل، التلوث المنتظم، التلوث غير المنتظم، توتر الإحاطة، شدة تيار التسرب، فرق الصفحة، التفريغات المتوازية، نمذجة تجريبية.

## Résumé:

Dans ce travail, nous étudions l'effet de la pollution sur un modèle plan d'isolateur 1512 L de haute tension soumis à divers paramètres électro-géométriques. Pour cela, plusieurs essais en pollution uniforme et non-uniforme sont accomplis. En premier lieu, nous nous intéressons à la tension de contournement, à l'amplitude du courant de fuite, au déphasage courant - tension et à l'évolution du nombre et de la longueur des décharges parallèles. En deuxième lieu, nous déterminons par une modélisation empirique du comportement du modèle plan sous pollution, l'impédance et le courant de fuite empiriques pour faciliter l'étude du phénomène de pollution des isolateurs.

**Mots-clés :** modèle plan d'isolateur, Pollution uniforme, pollution non-uniforme, tension de contournement, courant de fuite, déphasage, décharges parallèles, modélisation empirique.

## Abstract:

In this work, we study the effect of pollution on a plane model of the 1512 L insulator of high voltage subjected to various electro-geometrical constraints. Many tests at High Voltage Laboratory of the ENP are carried out under uniform and non-uniform pollution in order to characterize conditions of insulating surface, by using leakage current and applied voltage waveforms. First, we study flashover voltage, leakage current magnitude, phase angle between leakage current and applied voltage and parallel discharges length and number evolution according to the applied voltage. Secondly, we determine an empirical model by calculates empirical impedance and the empirical leakage current to facilitate the study of the polluted insulators phenomenon.

**Key-words:** plan model, Uniform pollution, non-uniform pollution, flashover voltage, leakage current, phase angle, parallel discharges, modeling formulae.

# SOMMAIRE

Introduction générale -----	01
-----------------------------	----

## **CHAPITRE I : PHENOMENES DE POLLUTION DES ISOLATEURS DE HAUTE TENSION.**

I- 1 Introduction -----	03
I-2- Isolateur -----	03
I-2-1- Fonctionnement et constitution d'un isolateur -----	03
I-2-2- Principaux types d'isolateurs -----	04
I-2-3- Choix des isolateurs -----	06
I-3- L'origine de la pollution -----	06
I-4- Différents types de pollution -----	06
I-4-1- Pollution naturelle-----	07
a- Pollution marine -----	07
b- Pollution désertique -----	07
c- Autres types de pollution naturelle -----	08
I-4-2- Pollution industrielle -----	08
I-4-3- Pollution mixte -----	08
I-5- Formation et répartition de la couche de pollution -----	09
I-5-1- Non-uniformité longitudinale par groupe -----	09
I-5-2- Non-uniformité transversale -----	10
I-5-3- Non-uniformité longitudinale périodique -----	10
I-6- Travaux sous pollution artificielle -----	10
a- Non-uniformité le long de la chaîne -----	10
b- Non-uniformité le long de la surface de l'isolateur -----	11
I-7- Travaux sur modèles de laboratoires -----	14
I-7-1- Modèle de J.Danis -----	14
I-7-2- Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh -----	16
I-7-3- Modèle d'A.Mekhaldi -----	18
I-8- Conclusion -----	21

## **CHAPITRE II : TECHNIQUE EXPERIMENTALE**

II-1 Introduction -----	22
II-2- Dispositif expérimental -----	22
II-3- Objet d'essai -----	23
II-4- Préparation des solutions polluantes -----	24
II-5- Procédé d'application de la couche de pollution -----	24

II-6- Mesure de la tension de contournement à l'état sec -----	25
II-7- Mesure et visualisation des formes de la tension de contournement et courant de fuite----	25
II-7-1- Tension de contournement -----	25
II-7-2- Mesure du courant de fuite -----	26
II-8- Correction des résultats en fonction des paramètres physiques de l'air-----	26
II-9- Mesure de la longueur et du nombre de décharges parallèles -----	27
II-10- Mesure du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée-----	28
II-11- Précautions -----	28

### **CHAPITRE III : RESULTATS D'ESSAIS ET INTERPRETATIONS**

III-1- Introduction -----	29
III-2- Identification du système d'électrodes utilisé pour le modèle plan -----	30
III-3- Etude de la configuration uniforme de la couche de pollution -----	30
III-3-1- Etude de la tension de contournement -----	31
III-3-2- Etude du Courant de fuite -----	33
III-3-2-1- Relation courant de fuite- conductivité-----	33
III-3-2-2- Relation courant de fuite- tension appliquée-----	36
III-4- Etude de la configuration non uniforme de la couche de pollution -----	37
III-4-1- Etude de la tension de contournement -----	37
III-4-2- Etude du courant de fuite -----	41
III-4-2-1- Relation courant de fuite – tension appliquée -----	41
III-4-2-2- Relation courant de fuite – largeur de la couche polluante -----	46
III-4-2-3- Relation courant de fuite – position de la couche polluante -----	51
III-5- Etude des décharges parallèles -----	57
III-5-1- Relation longueur critique - conductivité-----	57
III-5-2- Relation longueur d'arc – tension appliquée -----	58
III-5-2- Relation nombre d'arcs – tension appliquée-----	60
III-6- Déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée -----	63
III-6-1- Cas sec -----	63
III-6-2- Pollution uniforme-----	63
III-6-2- Pollution non-uniforme -----	65
III-7- Conclusion -----	68

### **CHAPITRE VI : MODELISATION EMPIRIQUE**

IV-1- Introduction -----	70
IV-2- Impédance empirique -----	70
IV-2-1- Hypothèses et choix des données -----	70

IV-2-2- Impédance totale mesurée de la plaque totalement propre $Z_i$ -----	71
IV-2-3- Impédance de la couche propre d'une plaque sous pollution non uniforme -----	72
IV-2-4- Détermination de l'impédance de la couche polluée -----	75
IV-2-5- Impédance totale de la couche polluée et de la zone propre -----	79
IV-3- Courant de fuite empirique -----	80
IV-3-1- Evolution du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluée -----	81
IV-3-2- Comparaison entre le courant de fuite expérimental et le courant empirique -----	84
IV-4- Rapport d'impédance et rapport des tensions -----	87
IV-4-1- Rapport d'impédance -----	87
IV-4-2- Tension reportée -----	88
IV-5- Conclusion générale -----	91

# Introduction générale

Les isolateurs des lignes et de postes de transport d'énergie électrique sont le siège de plusieurs contraintes. Entre autres, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie [1].

En face des difficultés causées par la pollution, plusieurs méthodes de lutte sont utilisées : le lavage ou le graissage des isolateurs, par exemple. Cependant ces opérations sont très coûteuses. Par conséquent, la meilleure solution consiste à trouver l'isolateur ayant la meilleure tenue sous pollution.

En raison de la complexité des phénomènes des décharges électriques sur les surfaces isolantes polluées, plusieurs travaux aussi bien théoriques qu'expérimentaux, ont été entrepris en vue d'étudier leur comportement sous pollution. Divers paramètres ont été adoptés, à savoir, la nature du dépôt polluant [1,2], la non uniformité de la pollution [3], la conductivité superficielle de la couche polluante [4], le profil ainsi que le diamètre de l'isolateur [4,5,6]. En effet, le dépôt polluant provoque l'existence et la persistance d'un courant de fuite plus ou moins notable sur les isolateurs suivant la sévérité de la pollution du site considéré [7]. Il arrive même, lorsque le courant de fuite critique est atteint [7,8], que le contournement se produise et entraîne donc l'interruption de la ligne. Ces recherches ont permis d'établir des modèles empiriques et semi-empiriques, donnant les caractéristiques des décharges évoluant sur les surfaces des isolateurs et ce jusqu'au contournement.

Des observations sur sites ont montré que la répartition de la pollution le long des isolateurs est très peu uniforme [1, 9, 10]. Cette répartition de la pollution dépend principalement du profil de l'isolateur, de la nature ainsi que du niveau de la tension appliquée et de la position de l'isolateur par rapport au conducteur haute tension [9, 10].

Nous avons mené notre travail en utilisant un modèle de laboratoire sous tension alternative à fréquence industrielle (50Hz) :

Nous entamons le premier chapitre par une présentation d'une synthèse bibliographique sur les isolateurs de haute tension, ainsi que les phénomènes de pollution, leurs natures et répartitions.




Le deuxième chapitre est consacré à la description du dispositif expérimental, tels que les différents outils de manipulation exploités pour mener à bien les essais en laboratoire.

Le troisième chapitre est entièrement consacré à l'étude du comportement du modèle plan lorsque la pollution est uniforme avec plusieurs conductivités, et lorsque la pollution est non uniforme pour trois cas de figures. Nous présentons les résultats concernant la tension de contournement, le courant de fuite, l'évolution de la longueur et du nombre de décharges parallèles à la surface du modèle plan et le déphasage courant de fuite-tension appliquée.

Dans le quatrième chapitre, nous établissons un modèle empirique, et nous comparons les résultats de ce dernier avec les résultats expérimentaux concernant particulièrement le courant de fuite.

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



# Phénomènes de pollution des isolateurs de haute tension

## **I.1 Introduction :**

Le phénomène de pollution des isolateurs de lignes aériennes est un sujet d'étude d'une importance fondamentale. 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 [10,11]. Une fois cette couche 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.

Pour bien voir le phénomène de la pollution, nous présentons dans ce chapitre une synthèse bibliographique des divers aspects de la pollution des isolateurs. Il convient donc de connaître le fonctionnement et la constitution d'un isolateur et leurs principaux types, ainsi que l'origine des différents types de pollution. A la fin de cette dernière partie, nous présentons quelques travaux sous pollution artificielle étudiés par certains auteurs.

## **I.2 Isolateur :**

### **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) [12].

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement [13]. 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 [13]:

- 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 [14].

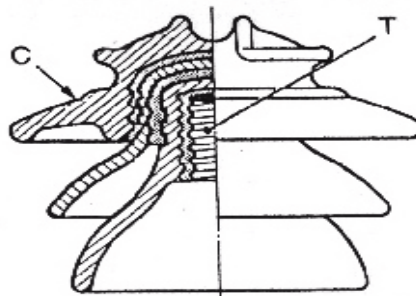


Figure I.1. Isolateur rigide en verre.

### I.2.2.2 Chaîne d'isolateurs :

Une chaîne d'isolateurs est constituée de plusieurs éléments de type capot et tige ou autres. 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) [15].

#### 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 [11, 16]. L'assemblage consiste à effectuer un scellement

du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique [16]. La coupe de l'isolateur capot-tige est schématisée à la figure I.2.

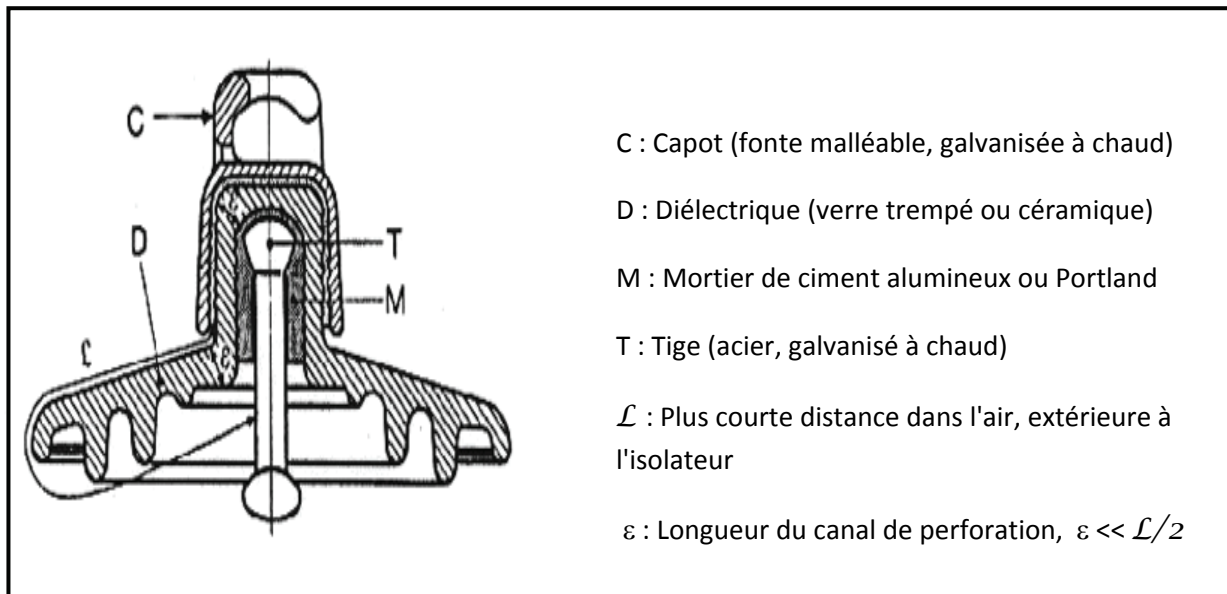


Figure I.2. Isolateur à capot et tige

#### 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.3). 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 [13].

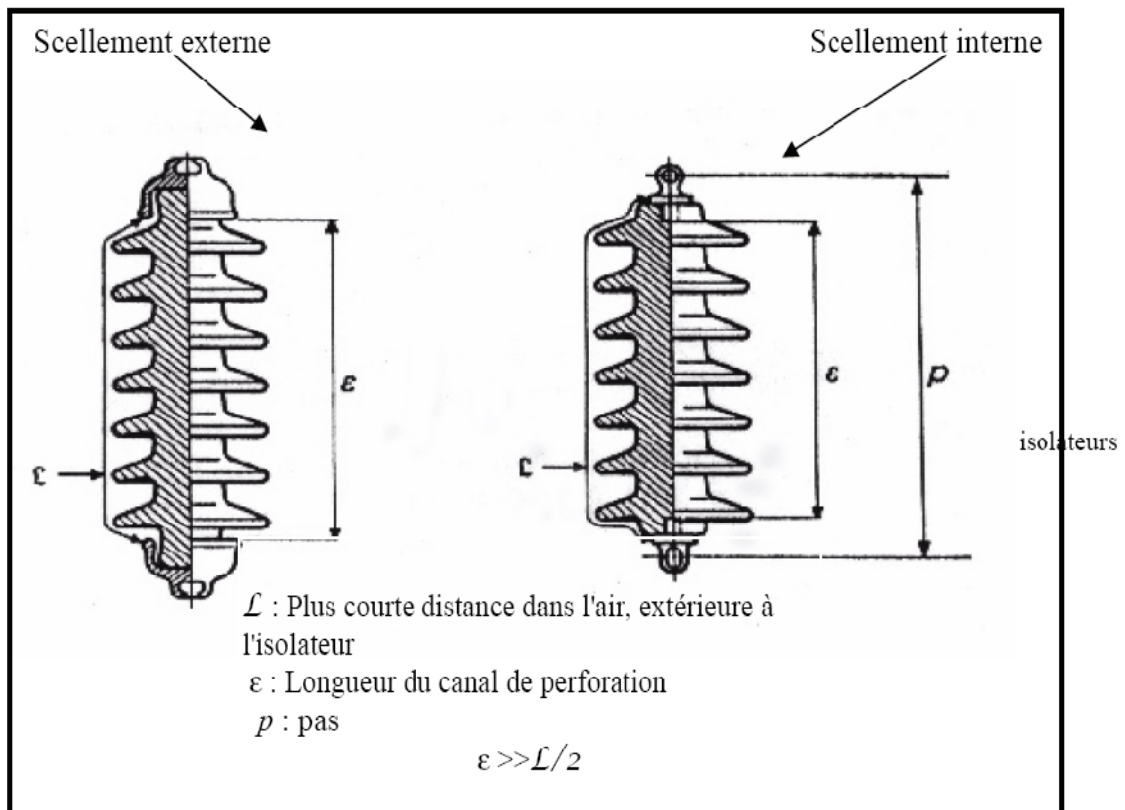


Figure I. 3. Isolateur à long fût en porcelaine

### 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 dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service [16].

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 L'origine de la pollution :

Les sources de pollution peuvent être d'origine naturelle ou artificielle [17]. En effet, dans le cas des lignes aériennes et des postes installés au bord de la mer, les embruns portés par le vent déposent sur les isolateurs une couche de sel. Lorsque cette couche est humidifiée par un brouillard, elle devient conductrice. De plus, au voisinage des usines polluantes, par exemple les usines métallurgiques ou chimiques, les isolateurs se recouvrent de particules solides infimes, faiblement conductrices mais hygroscopiques. Dans des conditions de forte humidité,

à savoir le brouillard ou la pluie, la dissolution des sels contenus dans ces particules provoque la formation d'un électrolyte. Ces deux concepts constituent les deux cas typiques de pollution où la contamination des surfaces isolantes est poussée à l'extrême. Il serait pourtant erroné de penser que les régions éloignées de la mer ou des centres industriels sont exemptées de pollution. La pollution domestique produite par les appareils de chauffage des habitations, les véhicules et la pollution agricole sont aussi omniprésents dans notre environnement [18].

#### **I.4 Différents types de pollution :**

Les principales sources de pollution, qui peuvent être rencontrées, sont la pollution naturelle, la pollution industrielle et la pollution mixte.

##### **I.4.1 Pollution naturelle :**

Ce type de pollution peut être constitué par :

- La pollution naturelle d'origine marine ;
- Les autres pollutions naturelles provenant des dépôts de poussières naturelles de sable véhiculé par les vents en régions désertiques, pluie,... etc.

##### **a) Pollution marine :**

Les installations situées en bord de mer sont exposées aux embruns portés par le vent et qui se déposent progressivement sur les isolateurs, formant une couche de pollution de sel qui devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée par le brouillard ou simplement par condensation. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance. Dans certaines conditions, ils se développent jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur [19,20].

##### **b) Pollution désertique :**

En régions désertiques, les fréquentes tempêtes de sable déposent progressivement sur les isolateurs une couche de pollution contenant des sels solubles; les couches de sable deviennent plus au moins conductrices à cause de l'existence de sels dans le sable [20,21]. Un courant de fuite apparaît brusquement accompagné d'arcs partiels, dont la propagation à la surface de l'isolateur peut aussi conduire à un contournement total de l'isolateur.

**c) Autres types de pollution naturelle :**

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

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

Il est généralement admis que la pollution est plus contraignante que la pluie, dans la mesure où la résistivité des couches polluantes est bien inférieure à celle de la pluie.

**I.4.2 Pollution industrielle :**

La pollution industrielle provient des fumées évacuées à proximité des raffineries, des cimenteries, des complexes sidérurgiques, chimiques ou même aux abords des centrales thermiques. Pour les régions exemptes de fumées, cette pollution peut être d'origine domestique (appareils de chauffage, véhicules, automobiles, ...).

Les isolateurs se recouvrent de poussières faiblement conductrices, mais très hygroscopiques, car elles ont tendance à absorber l'humidité de l'air.

Dans les conditions de forte humidité (brouillard, pluie, condensation matinale, ...), la dissolution des sels contenus dans cette poussière provoque la formation d'une couche électrolytique. Les gaz présents dans les fumées absorbés par la couche liquide, augmentent encore la conductivité superficielle. Comme dans le cas de la pollution marine, un courant de fuite circule alors dans la couche superficielle et le contournement peut survenir [1,5, 10].

**I.4.3 Pollution mixte :**

Les pollutions mixtes résultent de la combinaison d'une ou de plusieurs pollutions précitées. C'est la forme de pollution la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques [3, 16].



Par conséquent, quelle que soit la source de pollution, on observe la formation d'une couche électrolytique due à l'humidification d'un dépôt solide accumulé progressivement à la surface des isolateurs.

La nature et les caractéristiques des agents contaminants sont très variées. Généralement, ils ne provoquent pas de dégradation de la rigidité diélectrique lorsqu'ils sont secs. Cependant, l'humidification d'un dépôt solide accumulé progressivement à la surface des isolateurs, quelle que soit sa nature, provoque la formation d'une couche électrolytique, caractéristique du phénomène de pollution.

### **I.5 Formation et répartition de la couche de pollution :**

La formation et la répartition de la couche de pollution sur la surface des isolateurs dépendent du profil des isolateurs, de la hauteur et de la disposition (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 [15]. 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 [15]:

#### **I.5.1 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.5.2 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.5.3 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.6 Travaux sous pollution artificielle :**

### **a/ Non-uniformité le long de la chaîne :**

L.E.Zaffanella et H.M.Schneider [4] ont effectué des essais comparatifs sous tension continue sous pollution artificielle, entre des chaînes polluées d'une façon uniforme et des chaînes non-uniformément polluées. Leurs résultats montrent que la tension de contournement d'une chaîne polluée uniformément, avec la même DDSE (Densité du dépôt de sel équivalent), était de 20% inférieure à celle de la chaîne non-uniformément polluée.

D'autres essais [4] ont montré que la tension de contournement des chaînes non-uniformément polluées est égale à la somme de celle de chacun de ses composants. Il est ainsi possible d'additionner les tensions de contournement de chaque isolateur ou de diviser la chaîne en plusieurs parties et de calculer la tension d'amorçage de la chaîne complète par sommation.

Par contre, H.Streubel [22] affirme qu'il peut y avoir une diminution notable de la tension de contournement dépendant de la conductivité intrinsèque de chaque groupe. La tension d'alimentation dans ce cas était alternative.

En prenant le cas le plus simple correspondant à deux groupes de conductivités différentes, H.Streubel a abouti aux constatations suivantes :

- Si seulement 50 à 60% de la ligne de fuite est couverte par la conductivité la plus élevée, la tension de contournement chutera à une valeur proche de celle correspondante à la ligne de fuite complètement polluée par la conductivité la plus élevée.
- Quand 80 à 85% de la ligne de fuite est couverte par des couches de conductivité élevée, la tension de contournement diminue à une valeur plus faible par rapport à une distribution uniforme de la pollution faite par cette conductivité.
- La tension de contournement totale est toujours inférieure à la somme des tensions de contournement des groupes séparés. Cette diminution dépendra, du pourcentage en longueur et du rapport des conductivités.

Ce comportement de la tension de contournement, confirmé par des essais au laboratoire, est expliqué selon l'auteur [22], par l'hypothèse que la tension de contournement totale est composée par la tension de contournement de la partie avec la conductivité faible et la chute de tension aux bornes de l'autre partie qui présente une conductivité plus grande. En effet, la tension aux bornes de la partie ayant la conductivité la plus faible est autant élevée que la tension de contournement exigée.

#### **b/ Non-uniformité le long de la surface de l'isolateur :**

L'auteur H.Streubel [22] a tenté d'étudier l'effet d'une pollution non-uniforme appliquée à un isolateur à long fut. Ses travaux ont conduit aux résultats et remarques suivantes :

- Si en maintenant la conductivité de la face supérieure de l'ailette  $\sigma_0$  constante, et en faisant varier la conductivité de la face inférieure et le corps de l'isolateur  $\sigma_u$  ( $\sigma_0 / \sigma_u < 1$ ), la tension de contournement aura une valeur maximale correspondant à un rapport de conductivité  $\sigma_0 / \sigma_u$  proche de 1 (0.63) d'après ses expériences. Ce rapport désigne en particulier la répartition uniforme.

- En faisant augmenter la conductivité de la face supérieure  $\sigma_0$  et en gardant la conductivité de la face inférieure et du corps  $\sigma_u$  constante, on remarque une nette décroissance de la tension de contournement à partir du point  $\sigma_0/\sigma_u=1$ .
- La tension de contournement tend vers une valeur limite quand la conductivité d'une portion de la ligne de fuite tend vers l'infinie et correspond ainsi à la tension de contournement de la partie avec la faible conductivité.

L'interprétation donnée à ce comportement est que la partie avec la conductivité faible se court-circuite avant la partie avec la grande conductivité (en raison de la tension rapportée à ses bornes). Si la partie avec la faible conductivité est court-circuitée, l'autre partie se comporte donc comme une faible résistance en série avec l'arc, ce qui constitue un cas favorable au contournement.

Par ailleurs, S.Djafri et R.Boudissa [23], ont effectué des essais de pollution artificielle sur des isolateurs à ailettes. La pollution dans ce cas est réalisée en portant simultanément à l'aide d'un pinceau des solutions de conductivités différentes en plusieurs endroits judicieusement choisis sur la surface de l'isolateur. Deux variantes de non-uniformité ont été étudiées. La première consiste à polluer fortement le tronc ainsi que la face supérieure des ailettes pendant que la face inférieure de celle-ci est faiblement polluée. La seconde consiste à polluer fortement les ailettes et faiblement le tronc.

Les principaux résultats et remarques de S.Djafri et R.Boudissa sont [23] :

- Les essais effectués sur l'isolateur dans les conditions de pollution non-uniforme ont conduit à une diminution sensible de la tension linéique de contournement par rapport à celle mesurée sur ce même isolateur uniformément pollué. De plus, cette diminution est croissante en fonction du degré de la non-uniformité ( $\sigma_{sp1}/\sigma_{sp2}$ ) de la couche de pollution.
- Pour une valeur plus grande du rapport  $\sigma_{sp1}/\sigma_{sp2}$ , par exemple 60, la tension linéique subie une baisse de presque 25% de la tension mesurée pour un même courant en pollution uniforme.

Les phénomènes de décharge observés au laboratoire pendant les essais ont montré une différence dans le comportement de l'arc électrique par rapport à celui observé sur le même isolateur lors des essais effectués sous pollution uniforme. En effet, au lieu de se propager le

long de la ligne de fuite de l'isolateur, l'arc s'écarte de la surface de celui-ci pour court-circuiter finalement une partie ou la totalité du tronçon situé entre le tronc et la face inférieure de l'ailette (Figure I.4).

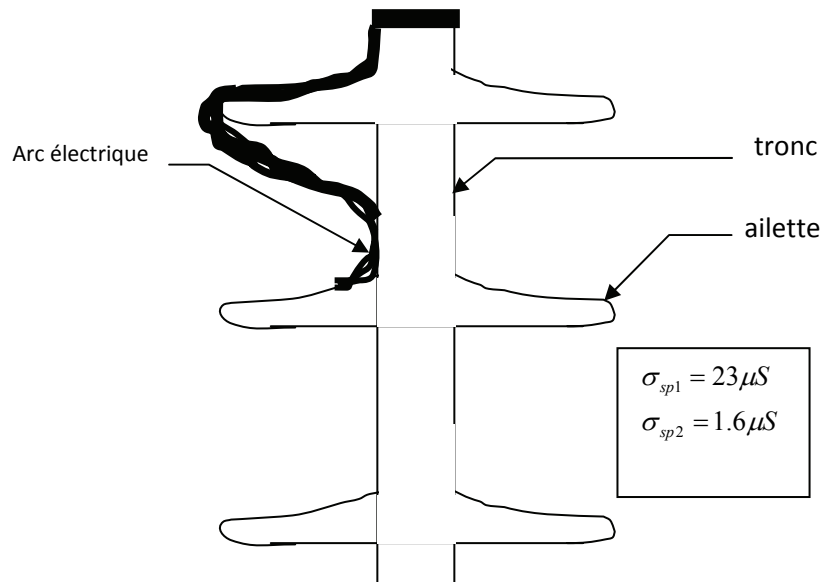


Figure I.4: Raccourcissement d'arc sous ailettes

Cependant, dans ce travail, Les auteurs n'ont pas pris en considération le fait qu'en pratique, la face inférieure de l'isolateur est la plus touchée par la pollution. Néanmoins, ils ont pu mettre en évidence un résultat très intéressant se rapportant au fait que la non-uniformité de la pollution engendre un raccourcissement de l'arc électrique, et donc une diminution de la tension de contournement.

Une autre étude a été faite par L.E.Zaffanella et H.M.Schneider [4] portant sur la non-uniformité le long de la surface de l'isolateur, ils ont suivi les procédures suivantes :

Initialement, la DDSE de la face inférieure est maintenue constante ( $0,03 \text{ mg/cm}^2$ ), la face supérieure est polluée de manière à varier le rapport N donné par :

$$N = \frac{DDSE (\text{côté dessus})}{DDSE (\text{côté dessous})} \quad (I.1)$$

Par la suite, une deuxième valeur de la DDSE ( $0,15 \text{ mg/cm}^2$ ) de la face inférieure est adoptée et on procède de la même manière pour obtenir également des rapports dans la même plage de variation, celle-ci allant de  $N = 0.05$  à 1.

Les résultats donnés en pourcentage de la tension d'amorçage pour  $N=1$  (pollution continue) ont conduit à la formule empirique suivante :

$$U_c(\%) = 100 \left( \frac{U_c(N)}{U_c(1)} \right) = 100(1-k \cdot \log(N)) \quad (I.2)$$

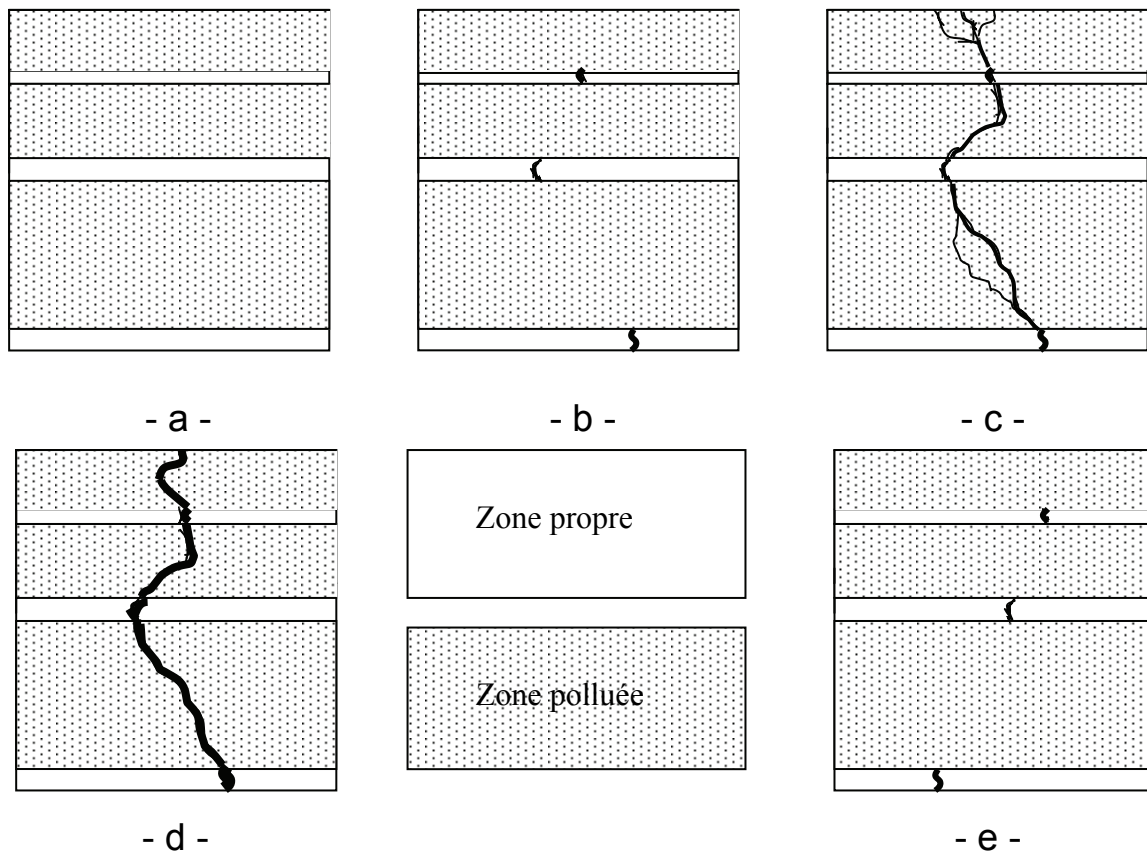
Avec  $k$ , désignant une constante dépendant de la DDSE côté dessous ainsi que du type d'isolateur étudié. Une valeur moyenne ( $k=0,38$ ) a été déterminée à partir de la caractéristique  $k$  en fonction de la DDSE côté dessous (pour différents types d'isolateurs).

## **I.7 Travaux sur modèles de laboratoires :**

Dans ce paragraphe, nous présentons quelques travaux effectués sur des modèles de laboratoires. Ceux ci ont l'avantage de mieux observer les phénomènes électriques (arc, contournement, courant de fuite) et de mieux comprendre le processus physique accompagnant ces phénomènes par l'établissement d'équations simples illustrant le modèle en question.

### **I.7.1 Modèle de J.Danis:**

La discontinuité de la couche de pollution peut être considérée comme une non-uniformité de cette couche, puisque les zones sèches ont une conductivité différente de celle des zones polluées. Pour étudier ce cas, *Danis* a pris en considération un modèle simple constitué d'une plaque isolante, munie de deux électrodes identiques, rectangulaires et placées aux deux extrémités de la plaque (Figure I.5) [24].



- a** : absence d'arcs  
**b** : formation d'arcs  
**c** : connexion des arcs  
**d** : le contournement  
**e** : création d'arcs (2<sup>ème</sup> expérience)

Figure I.5: Modèle de J. Danis

Des zones sèches sont préétablies sur le modèle, à différents endroits de la plaque, afin d'étudier les différentes étapes de développement de l'arc électrique précédant le contournement :

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

- L'arc peut se développer à n'importe quelle position le long de la zone sèche et aucune position n'est donc privilégiée par rapport à une autre.

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 luminescente. 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.

- Plusieurs arcs peuvent se développer en parallèle aux premiers stades du processus. Ceux-ci disparaissent ensuite lorsque le courant augmente et 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 suivant un tout autre chemin.

A partir de ces observations et remarques, J.Danis a conclu que le phénomène de rupture des zones sèches est aléatoire. Comme la tension de contournement dépend de la rupture de ces zones sèches, celle-ci possède également le même caractère aléatoire.

### **I.7.2 Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh :**

Le modèle est constitué d'une électrode de 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 I.6) [25].

En faisant varier la longueur des colonnes, et en relevant les tensions de contournement correspondantes, les auteurs font les remarques suivantes :



L'allure des courbes représentant la variation de la tension de contournement en fonction de la distance  $S$  est en forme de V, et 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 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  $S > S_{\min}$ .

L'auteur conclut que :

Le contournement de l'isolateur sous tension 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 de la zone polluée.

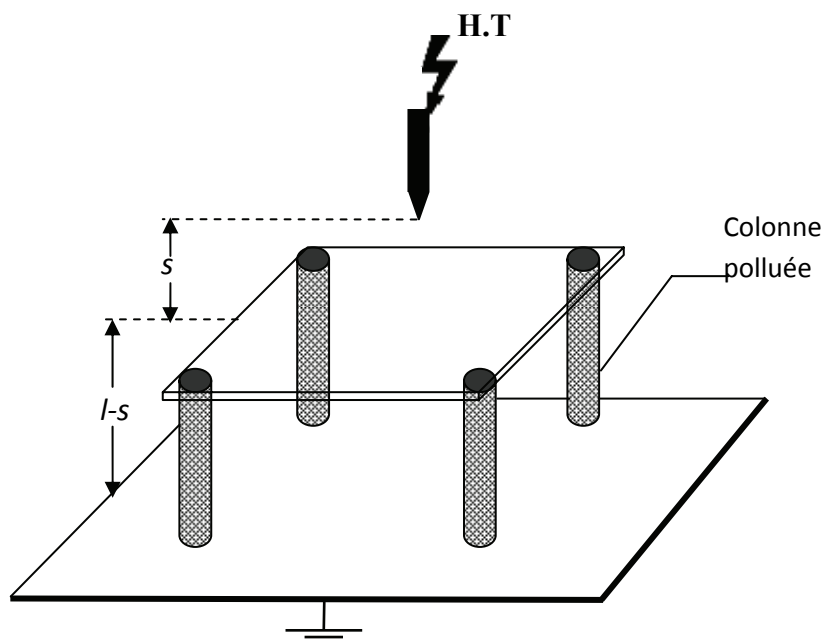


Figure I.6: Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh.

### I.7.3 Modèle de A. Mekhaldi :

Parmi les travaux effectués sur le modèle de Claverie et Porcheron [26], une étude approfondie a été faite par A. Mekhaldi [20] concernant l'effet de la discontinuité de la pollution sur le comportement de la surface isolante du modèle, ainsi que l'influence de l'endroit d'établissement de la couche de pollution par rapport aux électrodes. Pour cela, pour une tension donnée, l'auteur fait varier la largeur de la couche de pollution de  $0.1L$  à  $L$  ( $L$  étant la longueur de fuite totale égale à  $39.5$  cm), en relevant le courant de fuite correspondant (figure I.7).

A travers ses observations et remarques sur le courant de fuite et la tension de contournement, l'auteur a conclu que :

- 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 influe sur le 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 pour les conductivités utilisées.
- Il existe une longueur critique de la zone sèche à partir de laquelle on ne peut plus maintenir un arc stable. Cette longueur, évaluée au tiers de la longueur de la plaque, diffère considérablement de la longueur critique d'arc obtenue par Claverie et Porcheron dans le cas de pollution continue [27].
- La longueur critique de la zone sèche est toutefois indépendante de la conductivité.

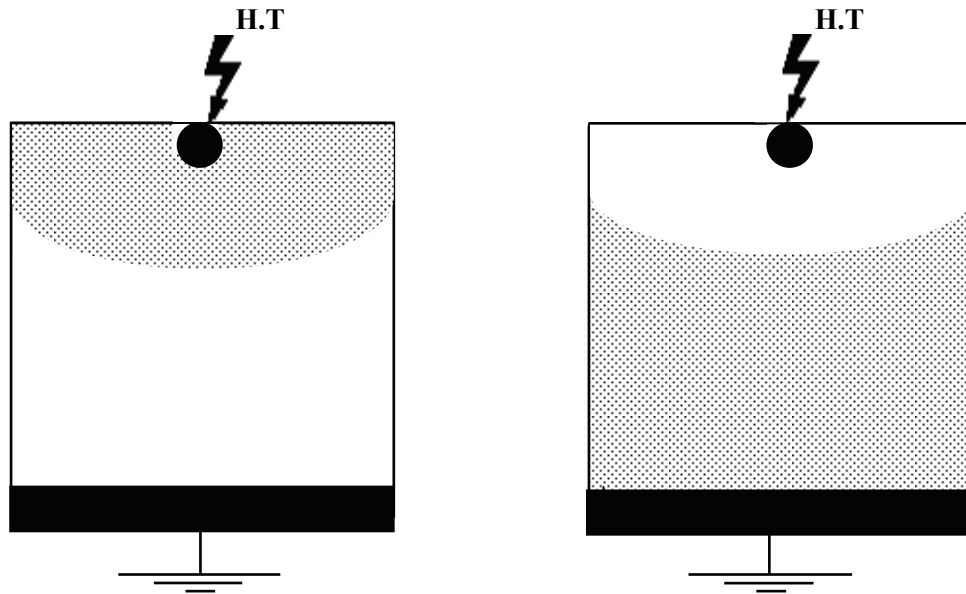


Figure I.7: Les deux modes de pollutions

Afin d'estimer quantitativement la tension reportée sur la zone sèche en la comparant avec la tension aux bornes des électrodes, A. Mekhaldi [28] a proposé un modèle empirique simple, qui a donné en effet de très bons résultats en régime linéaire. Pour cela, l'auteur a commencé d'abord par déterminer l'impédance équivalente entre les deux électrodes, celle-ci est la somme de deux impédances :

1. Impédance empirique de la zone sèche proposé par l'auteur donnée par :

$$Z_{0e}(y) = Z_{0e}(y') = Z_0(y=0) \cdot \left( \frac{l-y}{l} \right)^{0.42} \quad (\text{I.3})$$

Avec :

$Z_{0e}$  : impédance empirique de la zone sèche en fonction de la largeur de la couche polluée.

$Z_0(y=0)$  : impédance totale mesurée de la plaque propre lorsqu'il n'y a pas de pollution. Celle-ci a été évaluée à :  $4,24 \cdot 10^8 \Omega$ .

$L$  : distance inter-électrodes = 40 cm.

$y$  (ou  $y'$ ) : Largeur de la pollution en cm (côté terre ou côté haute tension).

2. Impédance de la pollution, en s'inspirant du modèle de A.Mékhaldi et S.Bouazabia donnée par [29] :

Pour le cas de la pollution coté haute tension :

$$R(y) = \frac{1}{e\gamma\alpha} \text{Log}\left(\frac{y+a}{a}\right) = \frac{k}{\gamma} \cdot \text{Log}\left(\frac{y+a}{a}\right) \quad (\text{I.4})$$

Pour le cas de la pollution coté terre:

$$R(y') = \frac{k}{\gamma} \cdot \text{Log}\left(\frac{a+l}{a+l-y'}\right) \quad (\text{I.5})$$

$e$  : épaisseur moyenne de parcours du courant.

$\gamma$  : conductivité de la couche de pollution.

$\alpha$  : angle utile de parcours du courant.

Le paramètre  $k=1/e \cdot \alpha$  : est déterminé à partir des caractéristiques expérimentales par la valeur :  $8,26 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-1}$ .

Enfin, L'impédance totale entre électrodes est donnée donc par :

Pour le cas de la pollution coté haute tension :

$$Z_t(y) = Z_0 \cdot \left(\frac{l-y}{l}\right)^{0.42} + \frac{k}{\gamma} \cdot \text{Log}\left(\frac{y+a}{a}\right) \quad (\text{I.6})$$

Pour le cas de la pollution coté terre:

$$Z_t(y') = Z_0 \cdot \left(\frac{l-y'}{l}\right)^{0.42} + \frac{k}{\gamma} \cdot \text{Log}\left(\frac{a+l}{a+l-y'}\right) \quad (\text{I.7})$$

En comparant les résultats du modèle empirique avec ceux de l'expérimentation, l'auteur a remarqué une similitude en régime linéaire. Mais, pour un régime critique où l'impédance apparente de la zone sèche est modifiée, le modèle empirique ne convient plus.

## **I.8 Conclusion :**

- La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension.
- L'amorçage à la surface d'un isolateur pollué dépend de plusieurs paramètres. Pour représenter les conditions naturelles qui provoquent l'amorçage sous pollution, plusieurs techniques d'essais au laboratoire ont été mises en œuvre.
- La méthode d'essai sous pollution artificielle est largement utilisée. Elle consiste à reproduire au laboratoire les conditions de la pollution naturelle, ainsi qu'elle possède l'avantage d'être rapide.
- Les diverses méthodes proposées sont, pour la plupart, basées sur la détermination expérimentale de la conductivité superficielle de la couche polluante.



# Technique expérimentale

## II.1 Introduction :

Ce chapitre décrit les techniques expérimentales utilisées pour étudier le comportement du modèle plan de l'isolateur 1512L utilisé par SONELGAZ dans le cas de la pollution uniforme et de la pollution non-uniforme.

Les essais réalisés au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique, concernent :

Pour la pollution uniforme : l'évolution de la tension de contournement et le courant de fuite à partir de différents paramètres (tension appliquée, conductivité de la couche polluante), ainsi que l'évolution des décharges parallèles à la surface du modèle plan.

Pour la pollution non-uniforme : Pour une conductivité donnée, l'étude de l'influence de la largeur et de l'emplacement de la couche de pollution sur la tension de contournement et le courant de fuite pour plusieurs niveaux de tension appliqués.

## II.2 Dispositif expérimental :

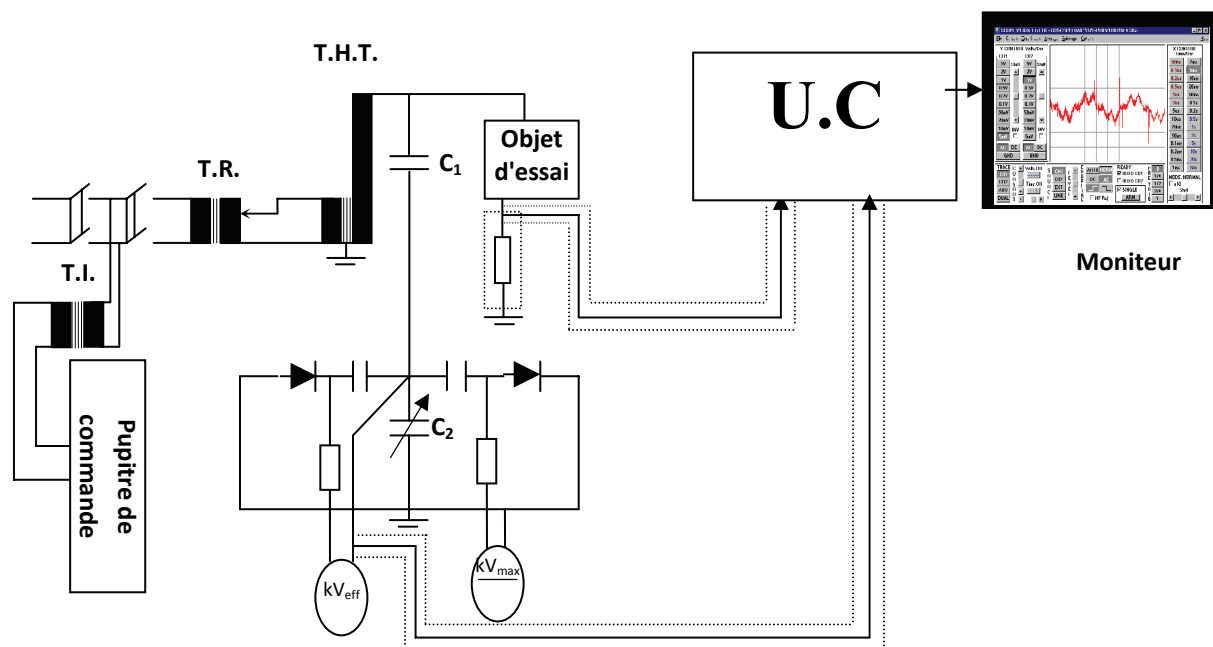


Figure II.1 : Dispositif expérimental.

La station d'essai à fréquence industrielle du Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique est de marque " HAEFELY ". Cette station contient les équipements suivants :

- Un transformateur d'essai : 500V/300 kV, 50 kVA.
- Un transformateur de réglage : 220/ (0 à 500), 50 kVA.
- Un diviseur capacitif de tension alimenté par la tension secondaire du transformateur d'essai et délivre une tension réduite aux bornes des voltmètres installés sur le pupitre de commande. Il est formé d'une capacité de haute tension  $C_1=400$  pF en série avec une capacité basse tension  $C_2$  variable, ce qui permet d'obtenir les calibres de mesures : 75kV, 150 kV et 300 kV.
- Un pupitre de commande où on trouve les appareils de mesure permettant la lecture du courant au secondaire du transformateur de réglage ainsi que des tensions de crête et efficace au secondaire du transformateur d'essai.
- Des appareils annexes de mesure et de protection.
- Un oscilloscope numérique de fréquence d'échantillonnage de 500 MHz "TEKTRONIX".

### II.3 Objet d'essai :

Le modèle plan (figure II.2) simule l'isolateur 1512 L.

Le modèle est constitué par une plaque en verre de 50 cm x 50 cm et de 5 mm d'épaisseur sur laquelle sont posées deux électrodes, l'une de terre et l'autre de haute tension.

Les deux électrodes sont posées sur deux bandes conductrices en aluminium qui sont découpées (500 x 30 mm<sup>2</sup>), la découpe des électrodes, à partir d'un film d'aluminium, est effectuée à l'aide d'un cutter, de telle sorte à ne pas avoir des pointes sur les faces des électrodes. La surface de la plaque de verre est lavée à l'eau de robinet, puis à l'eau distillée. Nous passons du gasoil sur les zones où les électrodes vont être placées, les électrodes sont collées une par une de façon à ne pas laisser de bulles d'air entre le verre et l'électrode. Nous passons un coton avec du gasoil sur l'électrode en même temps que nous la plaçons, puis nous nettoyons ces mêmes endroits avec de l'alcool pour supprimer toute trace de gasoil ou de



poussière. Après ces différentes étapes, nous pulvérisons la solution polluante suivant le mode décrit ci-dessous.



Figure II.2 : Modèle plan étudié

#### **II.4 Préparation des solutions polluantes :**

La solution polluante est obtenue à partir d'un mélange d'eau distillée et de chlorure de sodium (NaCl). La variation du degré de pollution est obtenue en variant la concentration de sel dans l'eau distillée. Nous avons ainsi fixé la conductivité de la solution à la valeur désirée grâce à un conductimètre, afin d'obtenir les conductivités volumiques suivantes : 0.01 mS/cm, 0.19 mS/cm, 0.71 mS/cm, 1.2 mS/cm et 10.1 mS/cm. Le choix de ces conductivités est fait pour avoir une bonne visibilité concernant l'élongation des décharges parallèles et aussi pour une bonne étude de la tension de contournement et du courant de fuite pour le cas de la pollution uniforme.

#### **II.5 Procédé d'application de la couche de pollution :**

Le dépôt de pollution est obtenu tout d'abord par pulvérisation uniforme de la solution sur tout le modèle. Pour assurer une bonne uniformité, et une bonne reproductibilité de la couche polluante, nous avons gardé, durant tous les essais, la même méthode de pulvérisation (même nombre de pulvérisations de chaque côté de la plaque et à la même distance).

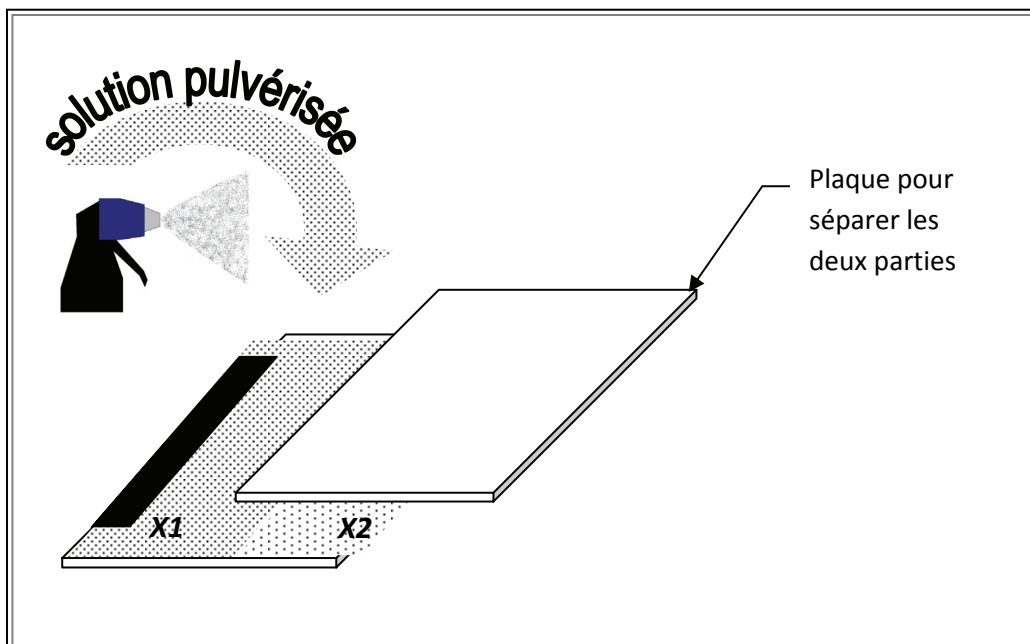


Figure II.3 : Procédé d'application de la pollution

## II.6 Mesure de la tension de contournement à l'état sec :

Le modèle d'isolateur est soumis à cinq essais de contournement à l'état sec, et la tension de contournement sera égale à la valeur moyenne des cinq valeurs obtenues. Les valeurs trouvées seront corrigées conformément à la norme CEI 60060-1[30].

## II.7 Mesure et visualisation des formes de la tension de contournement et courant de fuite :

### II.7.1 Tension de contournement :

La mesure de la tension de contournement a été effectuée pour chaque configuration à l'aide d'un voltmètre électrostatique. Cette mesure permet non seulement de déterminer l'impact de la configuration du modèle sur la tension de contournement, mais aussi de déterminer les paliers de tension (<40% de la tension de contournement) à appliquer pour l'enregistrement du courant de fuite.

La mesure de la tension de contournement du système a été effectuée pour les cinq conductivités choisies (0.01, 0.19, 0.71, 1.2 et 10.1 mS/cm) pour la configuration de la couche polluante uniforme.

Pour le cas de la pollution non-uniforme, notre choix s'est porté sur la conductivité volumique de 1.2 mS/cm qui nous a permis de mieux suivre l'évolution de la forme d'onde du courant de fuite à la surface du modèle plan et pour cinq largeurs de la couche polluante (5cm, 10cm, 15cm, 20cm et 25cm).

### II.7.2 Mesure du courant de fuite :

La mesure du courant de fuite est effectuée à l'aide d'un oscilloscope à mémoire, relié à une résistance de mesure de 1kΩ.

Pour éviter l'influence des parasites dans le signal recueilli, la résistance est introduite dans une boîte métallique mise à la terre, formant ainsi un écran. Ce dispositif permet également de visualiser simultanément le signal de la tension et celui du courant sur l'oscilloscope, afin de relever le facteur de puissance correspondant. La protection de l'oscilloscope est assurée par un éclateur mis en parallèle avec deux diodes rapides montées parallèlement en tête bêche. Un ordinateur sert à l'acquisition des données de la tension appliquée et du courant de fuite qui traverse la surface du modèle.

### II.8 Correction des résultats en fonction des paramètres physiques de l'air :

Les paramètres physiques de l'air influent d'une manière directe sur les mesures effectuées, telles que la tension de contournement, le courant de fuite et la propagation des arcs sur la surface de l'isolateur. En effet, nous avons remarqué une différence entre les résultats d'un même essai, ce qui exige, de tout ramener aux conditions normales de la température, de la pression et de l'humidité ( $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $P_0=100 \text{ k Pa}$ ,  $H_0=11\text{g/m}^3$ ). Conformément à la norme CEI 60060-1[30].

#### II.8.1 Correction de la tension de contournement

La tension de contournement dans les conditions normales est donnée par l'équation suivante :

$$U_{c0} = \frac{K_H}{K_d} U_c$$

Avec  $K_H$  : facteur de correction relatif à la température et la pression. Après la transformation de l'humidité relative à l'humidité absolue et en fonction de la température, la valeur de  $K_H$  est déduite à partir des abaques représentés en figure (II.3) ;

$K_d$  : facteur de correction relatif à l'humidité ;

$U_{C0}$  : tension de contournement à la température  $\theta$  et à la pression  $P$  et humidité  $H$  ;

$U_C$  : tension de contournement à la température  $\theta_0$  et à la pression  $P_0$  et l'humidité  $H_0$  ;

$$K_d = \frac{P}{100} \left[ \frac{273+20}{273+\theta} \right] = 2.93 \frac{P}{273+\theta} \quad , \quad P \text{ en (kPa) et } \theta \text{ en } (^\circ\text{C})$$

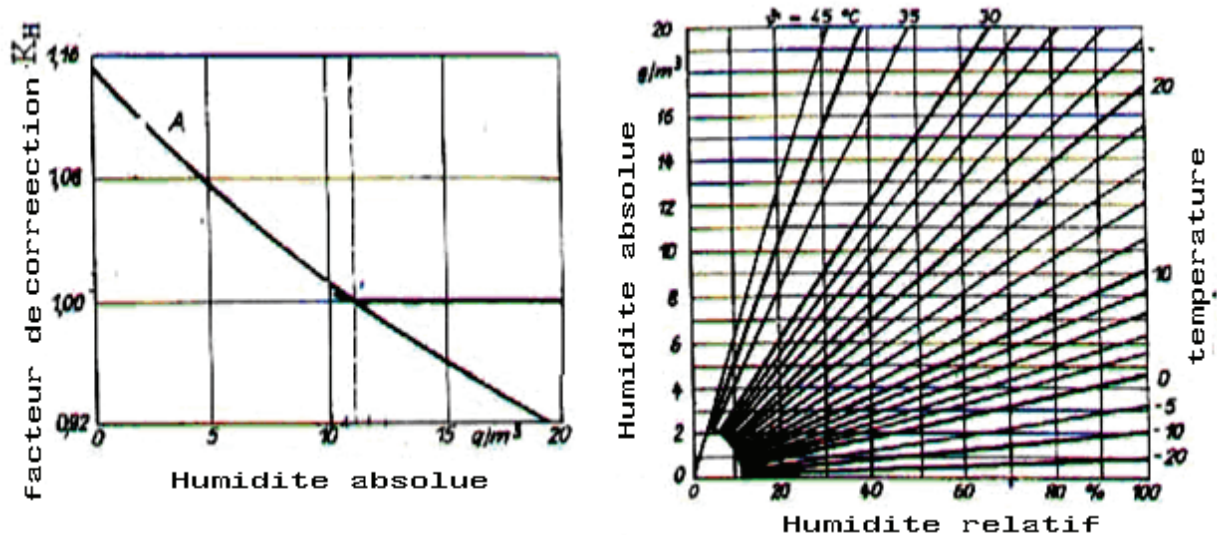


Fig (II.4) : facteur de correction  $K_H$

En utilisant la figure (II.4), on peut corriger les tensions de contournement, en les ramenant aux conditions normales conformément à la norme CEI 60600-1[30].

## II.9 Mesure de la longueur et du nombre de décharges parallèles :

Pour le cas uniforme, la mesure de la longueur des décharges parallèles qui se développent sur la surface du modèle plan pollué est réalisée à l'aide d'un caméscope numérique qui permet de les visualiser en fonction de la tension appliquée. Le calcul du nombre des décharges parallèles a été effectué pour le côté de l'électrode mise à la terre et pour le côté de l'électrode sous tension. La mesure de la longueur critique de la décharge est faite pour chaque conductivité. Le traitement des séquences filmées est assuré par le logiciel

de traitement d'image KM Player qui nous permet de suivre l'évolution des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée sur le plan pollué.

### **II.10 Mesure du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée :**

La mesure du déphasage courant de fuite-tension appliquée est déterminée à l'aide de la transformée de Fourier discrète basée sur la FFT, grâce à un programme MATLAB.

Le déphasage est défini comme étant la différence entre le spectre de la phase du courant de fuite et celui de la tension appliquée à la fréquence du fondamental, en convertissant les enregistrements des signaux de domaine temporel en d'autres de domaine fréquentiel. D'autre part, le déphasage représente la différence entre les spectres de phase du courant et de la tension à la fréquence du fondamental ou alors la différence de phase entre les signaux de leurs fondamentaux enregistrés dans le domaine temporel.

Cette mesure est effectuée pour le cas de la pollution uniforme et pour les différentes configurations concernant la pollution non-uniforme. Le calcul a pour objectif de déterminer l'état de surface de l'isolateur et de comprendre l'effet des phénomènes physiques (assèchement et évaporation) qui sont engendrés par l'occurrence des décharges parallèles à la surface du modèle plan. Cette mesure peut être considérée comme un outil de diagnostic des changements apportés à l'état de surface en variant les conductivités ainsi que les niveaux de tension sur le modèle plan de l'isolateur 1512 L .

### **II.11 Précautions :**

Pour obtenir de bons résultats pour les essais de haute tension sur les isolateurs il faut prendre plusieurs précautions :

- La pulvérisation de la couche polluante doit être homogène.
- Il faut bien nettoyer le pulvérisateur avant chaque essai pour ne pas modifier la conductivité de la solution saline.
- Afin de ne pas changer la conductivité de la couche polluante, la surface de l'isolateur doit être propre et sèche avant la pulvérisation.
- Protéger l'isolateur contre tout contact mécanique afin de ne pas modifier la couche polluante.



# Résultats d'essais et interprétations

### III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous examinons l'effet de la pollution sur le modèle plan de l'isolateur 1512 L. De nombreux essais ont été effectués pour étudier les deux cas de configurations de pollution, uniforme et non-uniforme.

Cas de la pollution uniforme:

Nous mesurons la tension de contournement pour les différentes valeurs de la conductivité de la couche polluante (0,01; 0,19 ; 0,71 ; 1,2 et 10,1 mS/cm). Nous nous intéressons en particulier à l'évolution du courant de fuite en fonction de la conductivité et de la tension appliquée. Le courant de fuite est un des paramètres essentiels pour le contrôle de l'état de surface de l'isolateur.

Cas de la pollution non –uniforme :

Nous mesurons d'abord la tension de contournement pour différentes largeurs de la couche polluée, puis on s'intéressera à l'évolution du courant de fuite, en considérant une seule et même conductivité pour les trois configurations de la position de pollution suivantes :

- Couche polluée du côté de l'électrode haute tension.
- Couche polluée du côté de l'électrode mise à la terre.
- Couche polluée au centre du modèle plan.

Par ailleurs, nous s'intéresserons à l'influence de la tension appliquée et de la conductivité de la couche polluante sur le nombre et la longueur maximale des décharges parallèles apparaissant sur le modèle plan. Quand à la longueur critique, juste avant le contournement, celle-ci a été mesurée pour les différentes conductivités.

Finalement, nous étudions le déphasage entre le fondamental du courant de fuite et celui de la tension appliquée pour aussi bien le cas de la pollution uniforme que pour les cas des configurations de la pollution non-uniforme.

L'étude du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée peut être très intéressante pour la compréhension du comportement du circuit équivalent de l'isolateur [31].

### III.2 Identification du système d'électrodes utilisé pour le modèle plan :

Afin d'identifier le système d'électrodes utilisé par notre modèle plan de l'isolateur 1512 L, nous avons procédé à des essais de contournement pour les distances inter-électrodes  $d_1=22$  cm qui correspond à la distance de contournement à sec et  $d_2 = 29,2$  cm qui correspond à la distance de fuite sous des conditions de pollution par humidification.

Les valeurs de tension de contournement des deux distances sont présentées dans le tableau III.1

Essai		1	2	3	4	La valeur moyenne
Tension de contournement (kV <sub>eff</sub> )	d <sub>1</sub>	94	93	92	93	93
	d <sub>2</sub>	120	121	122	120	120.75

Tableau III.1 : Essais de contournement pour le cas sec et pollué du modèle plan.

Le système d'électrodes pointe-pointe est celui qui semble s'approcher le plus du modèle plan étudié. L'expression de la tension de contournement pour un système d'électrodes pointe-pointe est :

$$U_c = 3,16 d + 14 \quad [\text{kV}_{\text{eff}}] \quad (\text{III.1})$$

d: distance inter-électrode.

$U_c$ : tension de contournement.

Nous trouvons d'après la formule (III.1) que la tension de contournement est de 83.52 kV<sub>eff</sub> (avec une erreur égale 10,19%) pour  $d_1$  et de 106,27 kV<sub>eff</sub> (avec une erreur égale 11,99%) pour  $d_2$ . Ces valeurs sont relativement proches des résultats obtenus expérimentalement.

### III.3 Etude de la configuration uniforme de la couche de pollution :

Plusieurs auteurs établissent que la rigidité la plus médiocre correspond à une répartition uniforme de la pollution [4], et d'autres évaluent ce cas critique à une répartition discontinue précise de la pollution, celle-ci correspondrait à une largeur critique de la zone sèche où la rigidité est la plus faible [25,8]. Dans ce qui suit, nous nous intéressons d'abord au cas de la couche continue où l'isolateur est complètement pollué.



### III.3.1 Etude de la tension de contournement :

La tension de contournement est un paramètre essentiel pour l'isolateur car il permet d'identifier le système formé par les électrodes (pointe-pointe, plan-plan,.....) et donc de définir la rigidité diélectrique du système formé par les électrodes.

Nous nous sommes intéressés à analyser la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité. Cinq conductivités extrêmes ont été utilisées pour les essais de contournement. Des séries d'essais en été effectués dans ce sens, les résultats d'essais pour les différentes conductivités sont présentés dans le tableau III.2:

<b>conductivité</b>	<b>Tension de contournement (kV)</b>
<b>10 (<math>\mu\text{S/cm}</math>)</b>	<i>53.25</i>
<b>190 (<math>\mu\text{S/cm}</math>)</b>	<i>39.25</i>
<b>710 (<math>\mu\text{S/cm}</math>)</b>	<i>34.75</i>
<b>1.2 (mS/cm)</b>	<i>34.75</i>
<b>10.1 (mS/cm)</b>	<i>30.25</i>

Tableau III.2 : Les valeurs moyennes de la tension en fonction des conductivités.

Les valeurs de tensions indiquées sur le tableau III.2 sont la moyenne de 5 valeurs [29].

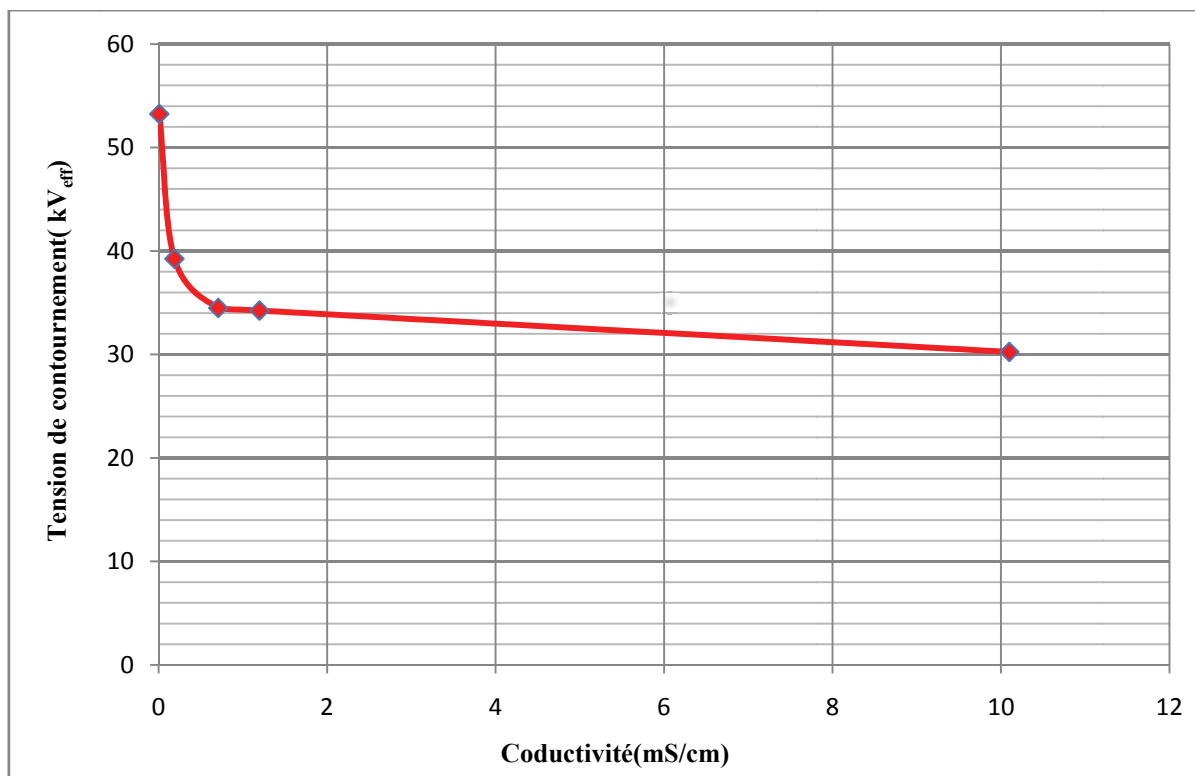


Figure III.1 : La tension de contournement en fonction de la conductivité.

D'après la figure III.1 nous remarquons que la tension de contournement diminue de manière non-linéaire en fonction de la conductivité.

Nous observons une nette diminution de la tension à partir de la conductivité 0.01 mS/cm jusqu'à la valeur de 0.71 mS/cm puis nous obtenons une stabilisation à partir de la conductivité 1.2 mS/cm. Cette observation est en accord avec plusieurs travaux de recherches [19, 32, 8].

Nous constatons également qu'à partir d'un certain niveau de tension, a lieu une évaporation progressive de la couche de pollution, qui augmente avec la conductivité. Cette évaporation peut être expliquée par l'augmentation de la densité de courant à la surface du plan générant un dégagement de chaleur important par effet joule. Ceci peut s'expliquer à cause de la diminution de l'impédance équivalente qui est inversement avec l'augmentation de la conductivité. Ces observations sont en accord avec plusieurs travaux de recherches [33, 34, 35].

### III.3.2 Etude du Courant de fuite :

#### III.3.2.1 Relation courant de fuite- conductivité:

Nous présentons sur les graphes (III.2, III.3 et III.4) les variations du courant de fuite en fonction de la conductivité et dans le graphe (III.5) la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités de la couche polluante. Pour cela, nous utilisons cinq conductivités différentes de la couche polluante 0,01; 0,19 ; 0,71 ; 1,2 et 10,1 mS/cm, en appliquant cinq niveaux de tension 3 ; 6 ; 9 ; 12 et 15 kV.

Nous constatons que la conductivité influe sur le courant de fuite, de façon que le courant croisse avec l'augmentation de la conductivité de la pollution.

D'après les figures (III.2 à III.5), nous remarquons que le courant de fuite augmente en fonction de la tension appliquée pour toutes les conductivités. En effet lorsque la conductivité est faible (0.1, 0.19, 0.71 mS/cm), le courant de fuite augmente de manière progressive et ne dépasse pas la valeur de 2000  $\mu$ A pour les faibles valeurs de la tension appliquée, car l'impédance totale vue entre les électrodes reste importante et cela malgré la présence des décharges parallèles à la surface de l'isolateur pour les grandes valeurs de la tension (jusqu'à 15 kV<sub>eff</sub>).

Pour les conductivités 1,2 mS/cm et 10.1 mS/cm, le comportement des décharges électriques diffère des conductivités précédentes. En réalité, l'amplitude maximale du courant de fuite se démarque brutalement pour ces deux conductivités (jusqu'à 8000  $\mu$ A). Cette activité permanente des décharges électriques provient du champ électrique très élevé dans la triple jonction air-isolant-électrolyte qui favorise leur initiation pour de très faibles niveaux de tension (à partir de 3kV<sub>eff</sub> pour notre cas) et par conséquent participe à l'augmentation de l'amplitude du courant de fuite car l'impédance équivalente du milieu est faible.

De manière générale, l'augmentation du courant de fuite en fonction de la conductivité pourrait s'expliquer par :

- La diminution de l'impédance équivalente vue entre les électrodes.
- L'augmentation du champ électrique surtout pour les niveaux de tension élevée, qui provoquent l'ionisation de la couche polluée.

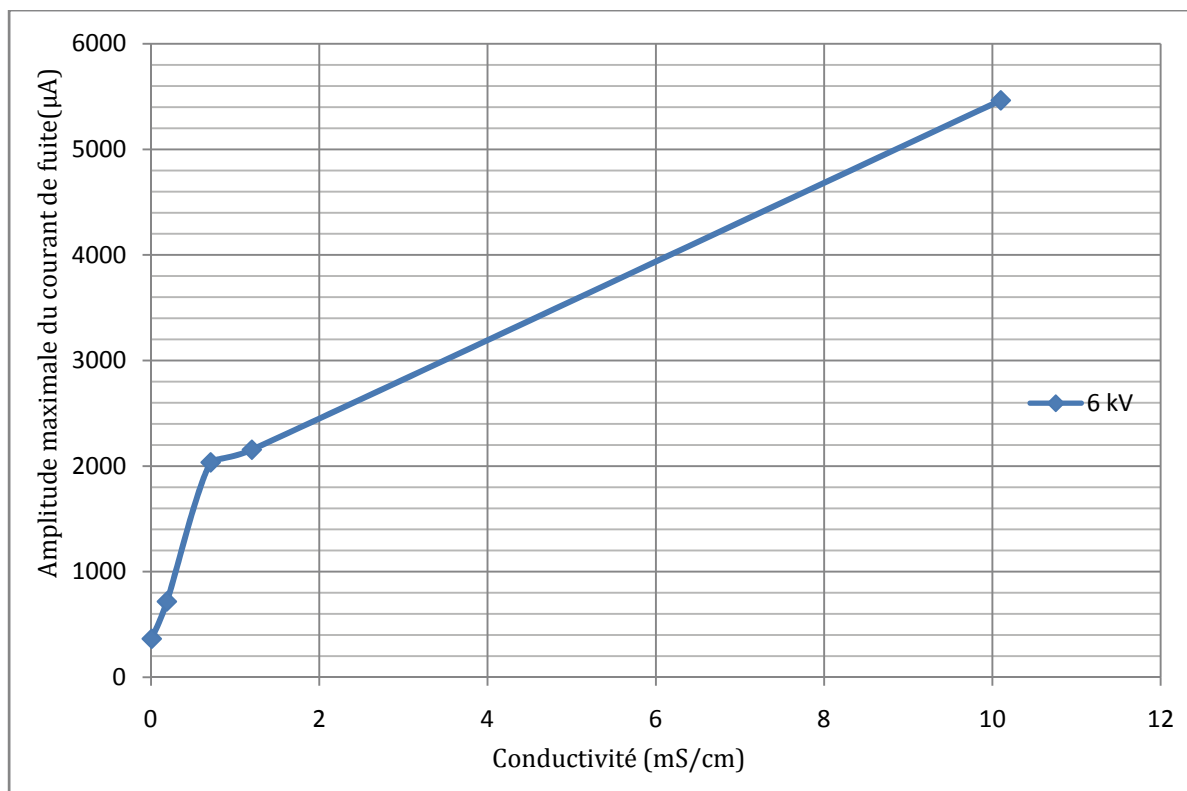


Figure III.2 : Variation de l’amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la conductivité pour la tension appliquée de 6 kV.

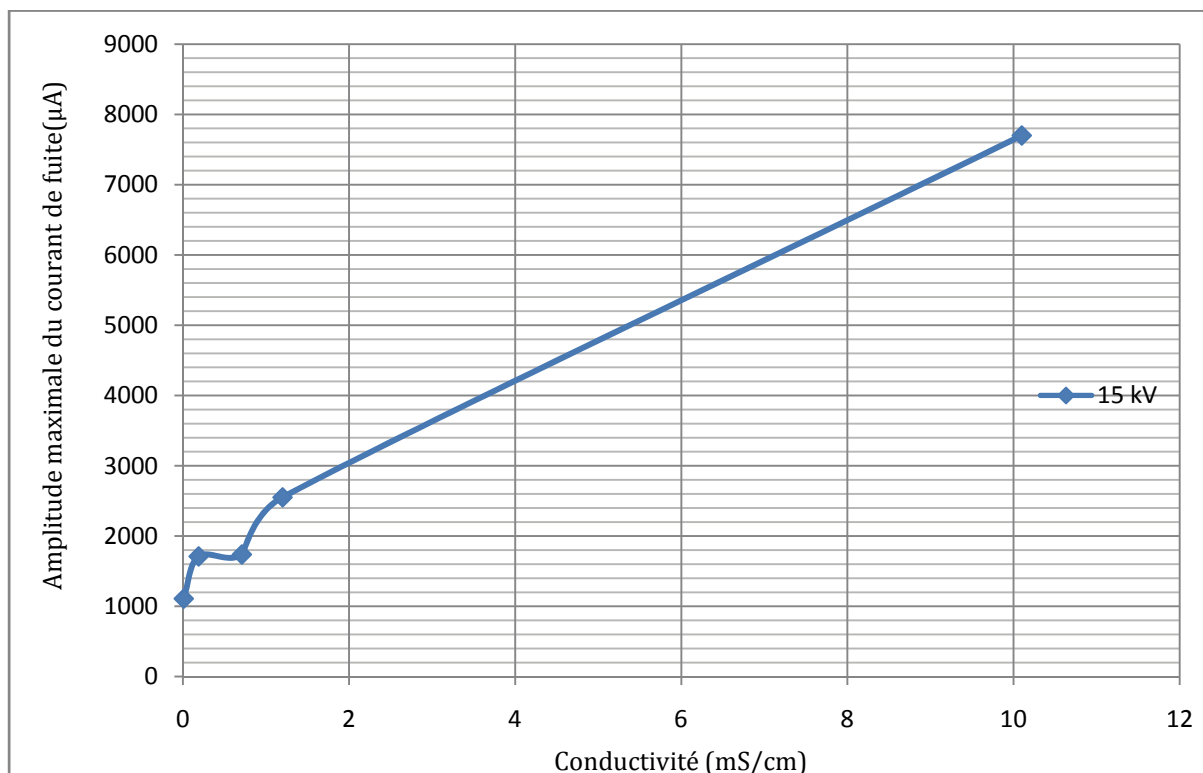


Figure III.3: Variation de l’amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la conductivité pour la tension appliquée de 15kV.

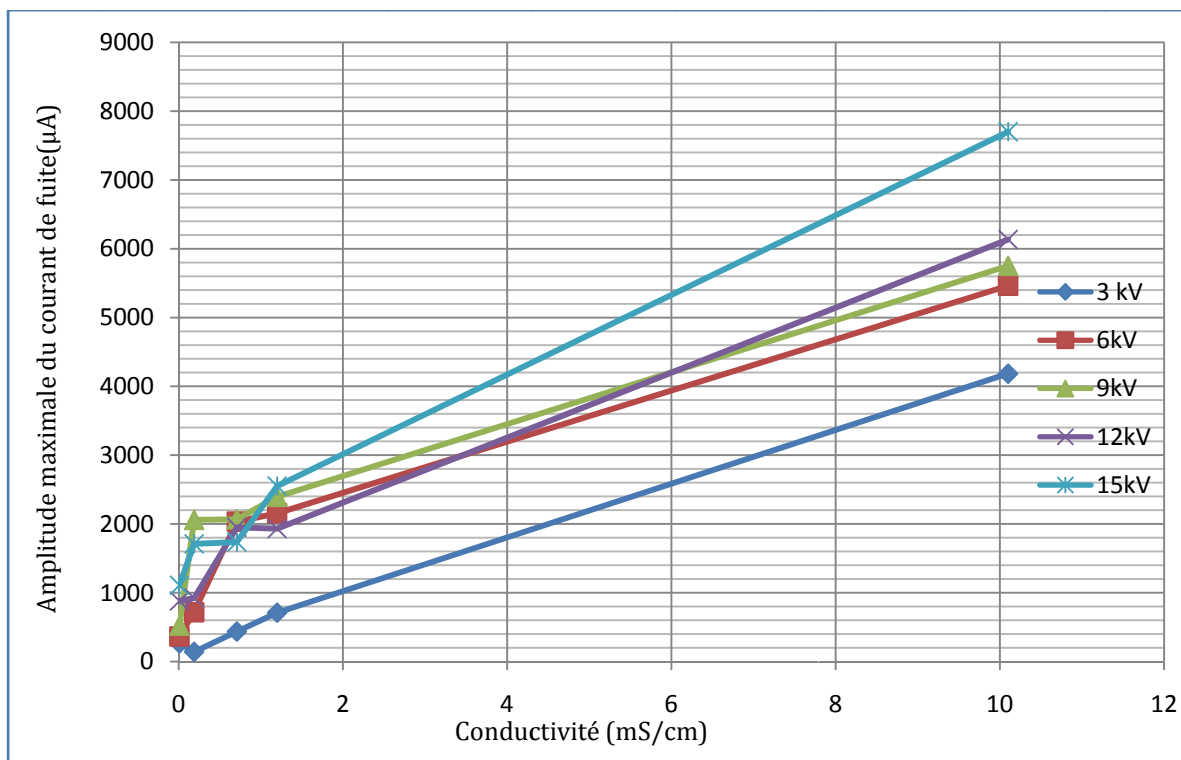


Figure III.4: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la conductivité pour différentes valeurs de la tension appliquée.

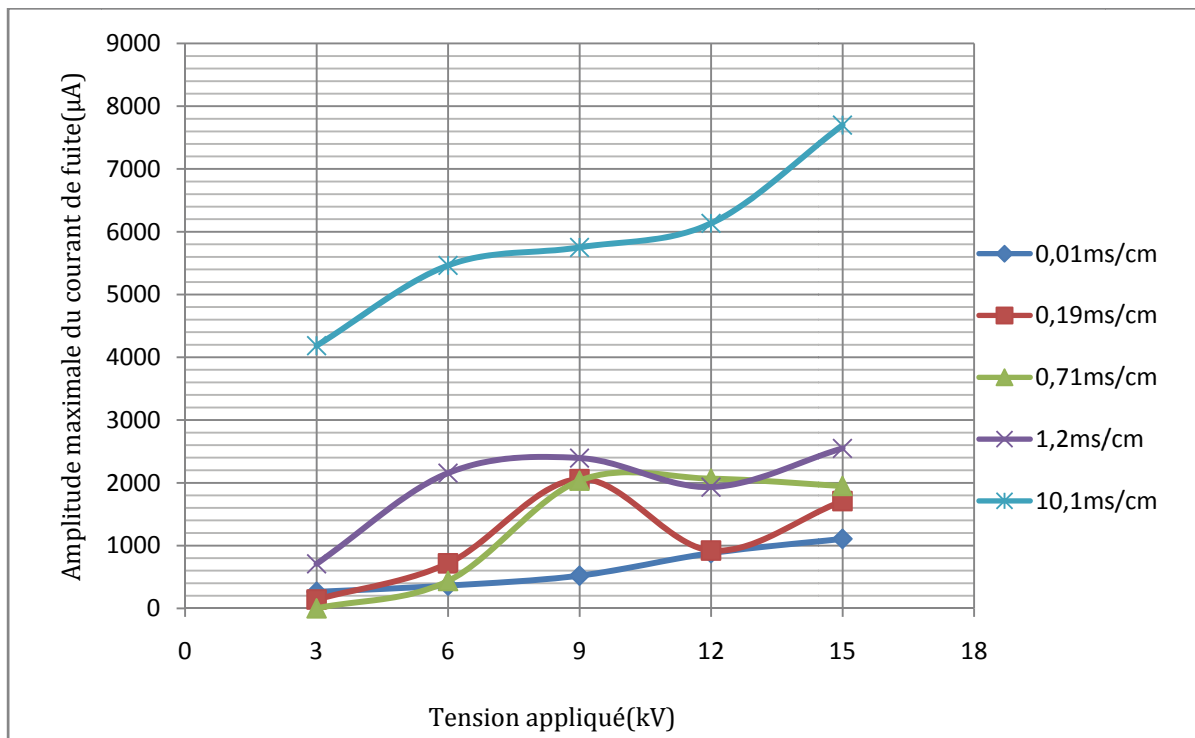


Figure III.5: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs de la conductivité.

### III.3.2.2 Relation courant de fuite- tension appliquée :

D'après la figure IV.6, nous remarquons que le courant de fuite augmente en fonction de la tension appliquée de manière non-linéaire pour toutes les conductivités.

Pour la conductivité 0.01  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , le courant de fuite augmente de manière progressive car il n'y pas eu d'assèchement important et cela malgré la présence des décharges parallèles à la surface de l'isolateur (à partir de 20 kVeff).

Pour les conductivités 0.19, 0.71 et 1.2  $\text{mS}/\text{cm}$ , nous remarquons une baisse de l'amplitude maximale du courant de fuite à partir de la tension 9 kVeff. Cette baisse est très remarquable pour la conductivité 1.2  $\text{mS}/\text{cm}$  à cause d'un assèchement beaucoup plus important de la surface isolante (signe d'activité de décharges très développées). Cette baisse peut être expliquée par le temps d'application de la tension ( 30 secondes ) pendant lequel l'eau présente à la surface se vaporise petit à petit par effet joule menant à une augmentation de l'impédance équivalente de l'isolateur, ce qui participe à l'augmentation de la rigidité diélectrique du modèle. Ainsi la valeur du champ électrique dans ces zones sèches n'engendrer pas des décharges électriques, ce qui réduit de manière importante le courant de fuite (de 2000  $\mu\text{A}$  jusqu'au 1000 $\mu\text{A}$ ).

Pour la conductivité 10.1  $\text{mS}/\text{cm}$ , le comportement des décharges électriques diffère des conductivités précédentes. En réalité, l'amplitude maximale du courant de fuite est la plus élevée.

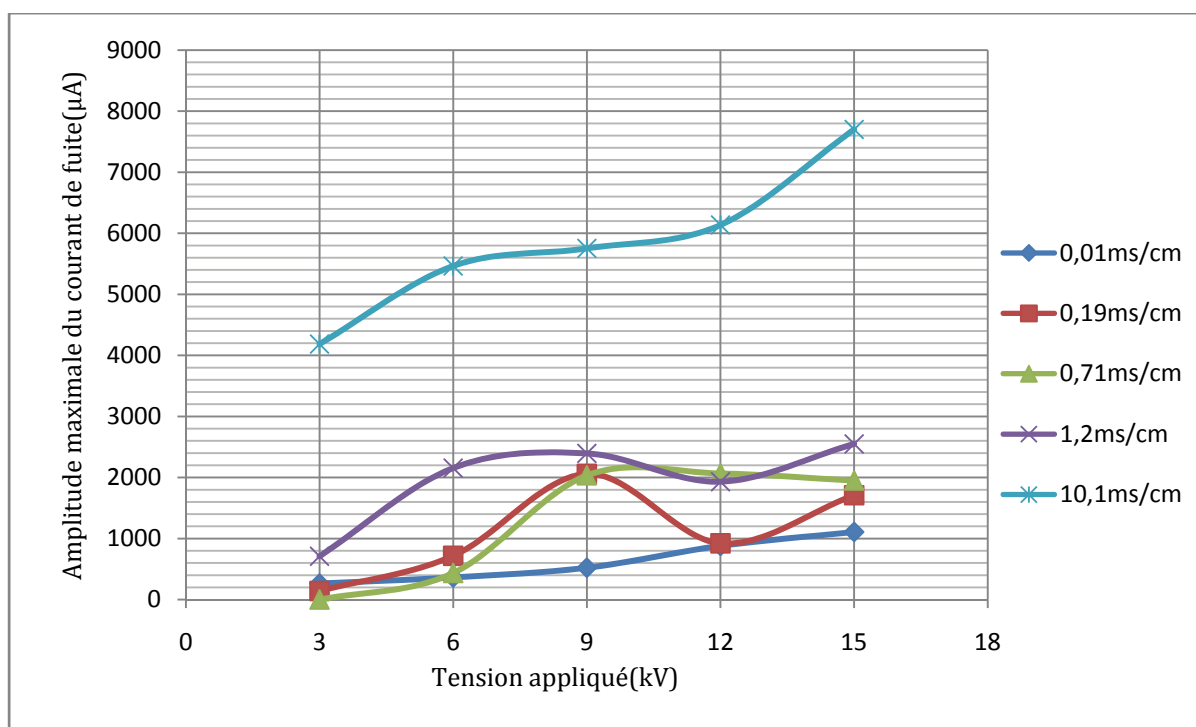


Figure III.6: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs de la conductivité.

### III.4 Etude de la configuration non uniforme de la couche de pollution :

#### III.4.1 Etude de la tension de contournement :

Les observations de laboratoire montrent que le contournement se produit directement sans apparition au préalable de décharges préliminaires dues à l'effet de couronne quand la largeur totale de la couche propre dépasse la valeur critique à partir de laquelle aucune décharge stable ne se propage [36, 37, 38]. Avec l'augmentation de la tension appliquée et la largeur de la couche polluée, 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.

Pour une distance inter électrode ( $d=29,2$  cm) et pour la valeur de la conductivité ( $\sigma=1.2$  mS/cm), on fait varier la largeur de la surface polluée ( $X$ ) pour les trois configurations (cotés haute tension, coté terre et partie centrale). On enregistre la tension de contournement affichée par le voltmètre de crête. On exécute le même essai 5 fois en respectant les mesures de la norme CEI60060-1 [30].

### III.4.1.1 Relation tension de contournement - largeur et position de la couche polluée :

Cinq largeurs de la couche polluante ont été utilisées pour les essais de contournement 5, 10, 15, 20, 25 cm (17,12, 34,24, 51,36, 68,49 et 85,61% de la longueur totale de fuite) avec une seule conductivité 1.2 ms/cm. Nous étudions l'influence de la largeur ainsi que l'emplacement de la couche polluée sur la tension de contournement de la plaque en verre.

Les résultats obtenus pour les essais concernant la pollution côté HT, terre et centrale sont donnés au tableau III.3 :

Côté pollué		HT	terre	centrale
		Valeur Moyenne	Valeur Moyenne	Valeur Moyenne
Tension de contournement ( $kV_{eff}$ )	5 cm	104.25	105	123.25
	10 cm	88.25	88.5	106
	15 cm	68.25	72	85.75
	20 cm	52.25	52.5	61.25
	25 cm	39.5	42.5	43.5

Tableau III.3 : Tension de contournement pour la pollution non-uniforme du côté haute tension, côté terre et couche centrale en fonction de la largeur de la couche polluante.

D'après les courbes (figure III.7 à III.10), nous remarquons que la tension de contournement varie de manière presque linéaire et diminuée en fonction de l'augmentation du rapport de la couche polluée sur la longueur de fuite totale, que se soit du côté HT ou du côté terre ou de couche centrale, puisque la pollution augmentant fortement la conductivité superficielle des isolateurs, diminue alors leur tenue diélectrique. Ce phénomène a été observé par d'autres auteurs [8, 19, 20, 33].

Nous constatons également que les tensions de contournement pour le côté terre sont légèrement plus élevées que celles du côté HT et cela pour les rapports 0.51 et 0.85 qui correspondent aux couches 15 et 25 cm. Ceci signifie que le modèle plan étudié est un peu



plus rigide dans le cas de la pollution côté terre pour les largeurs des couches de pollution 15 et 25 cm.

Certains chercheurs [28] ont montré que pour d'autres configurations de pollution non-uniforme, la valeur du ratio entre l'impédance de la couche polluée et celle de la couche sèche du côté terre est effectivement plus petite que celle pour le côté HT.

Pour les autres largeurs de la couche polluée (5, 10 et 20cm), nous n'observons pratiquement pas d'influence de la position, résultat auquel on ne s'attendait pas d'autant plus que nous avons observé un comportement différent de la plaque [8, 33].

Pour la couche centrale (subissant deux bandes sèches au lieu d'une seule pour les deux autres cas), nous obtenons un écart relativement plus important par rapport aux deux autres cotés de pollution (HT et terre) pour les largeurs de la couche polluée ( $X=5, 10, 15$  et 20cm). Il faut noter que pour les faibles largeurs de pollution, la création des arcs autour des deux extrémités sèches de la couche centrale est plus difficile par rapport à un seul coté sec, donc le modèle correspondant à cette configuration est presque identique au cas sec (pas de pollution) quand la largeur de la couche polluante n'est pas importante.

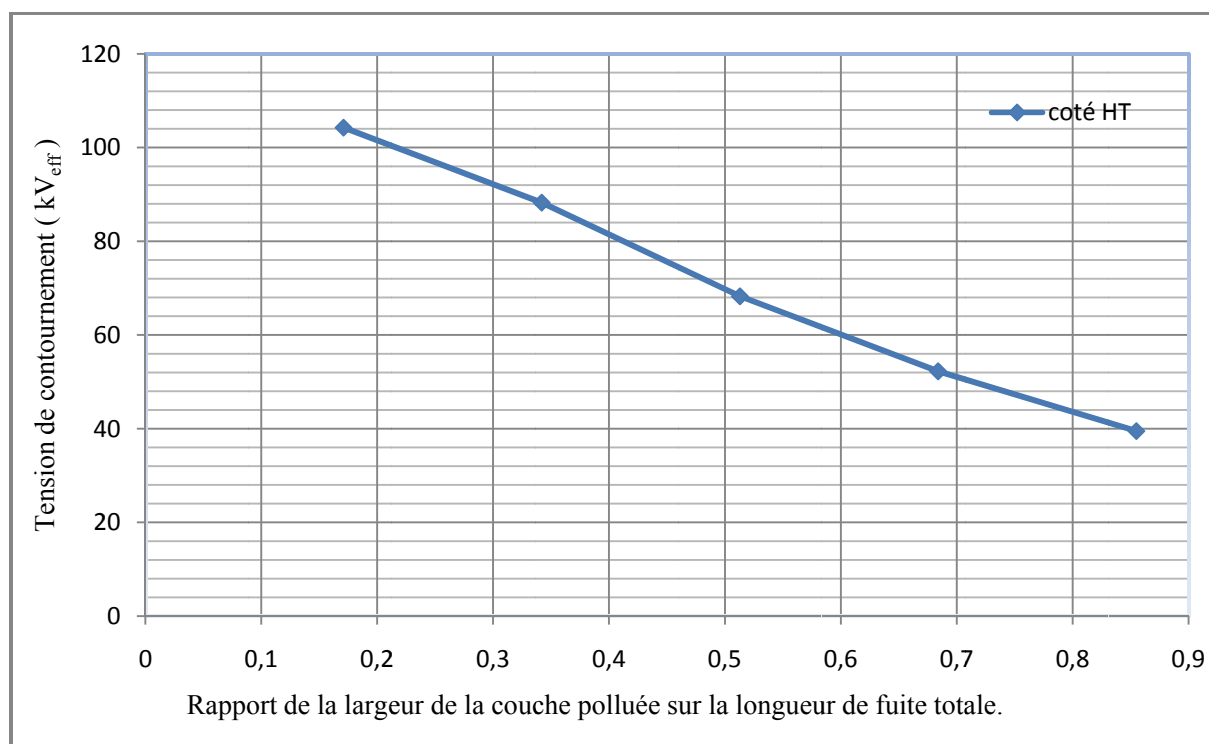


Figure III.7 : Tension de contournement en fonction du rapport de la largeur de la couche polluée sur la longueur de fuite totale pour le côté HT.

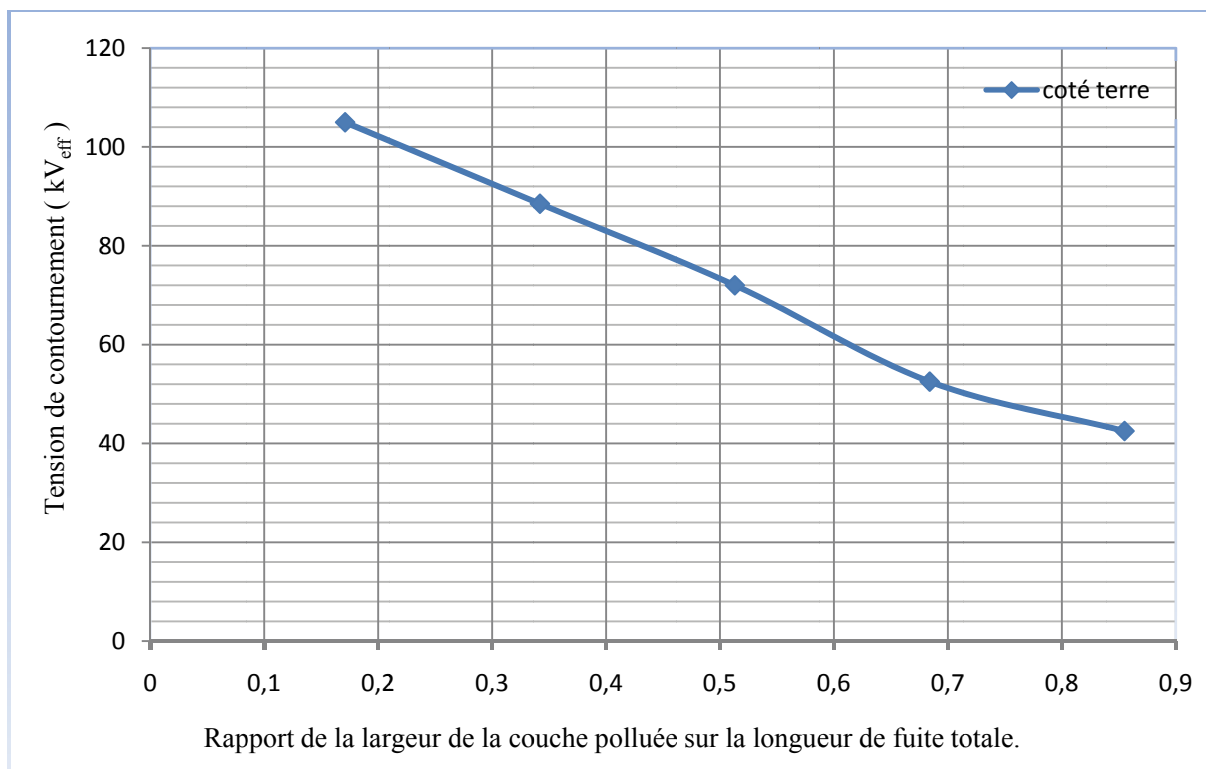


Figure III.8 : Tension de contournement en fonction du rapport de la largeur de la couche polluée sur la longueur de fuite totale pour le côté terre.

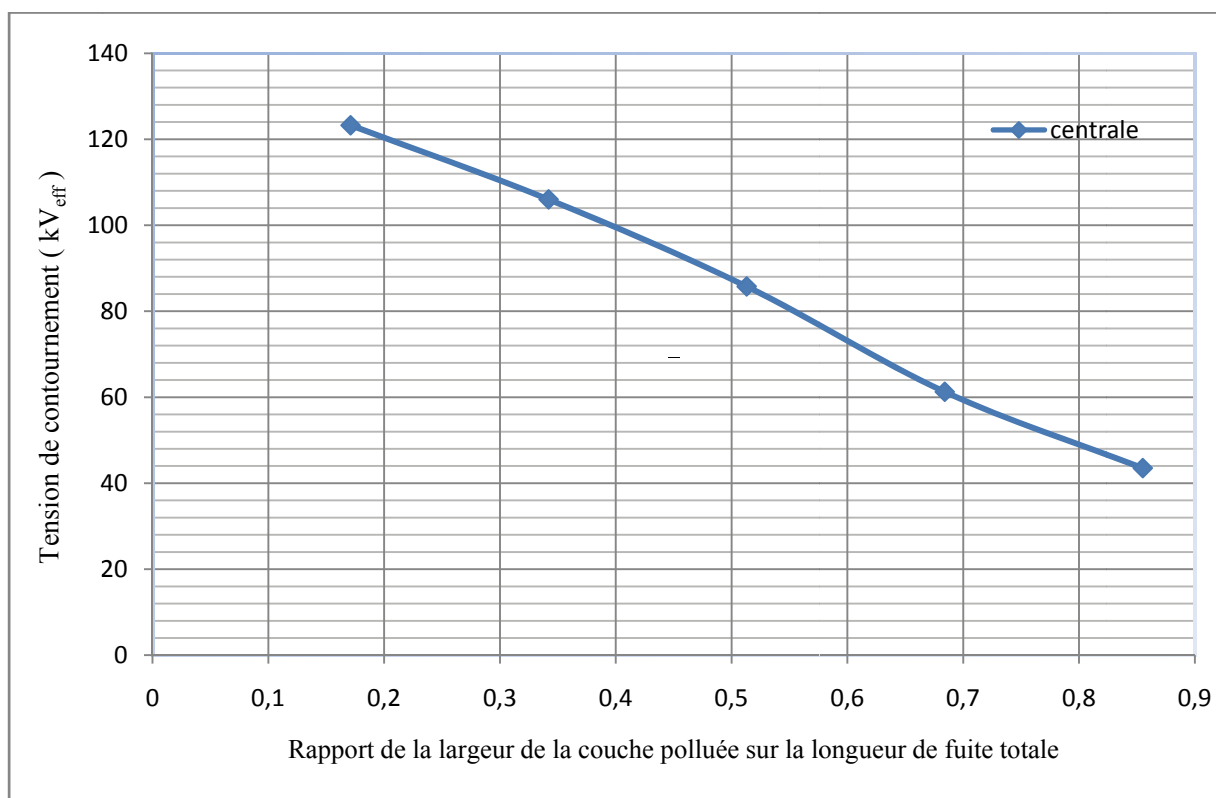


Figure III.9 : Tension de contournement en fonction du rapport de la largeur de la couche polluée sur la longueur de fuite totale pour la couche centrale.

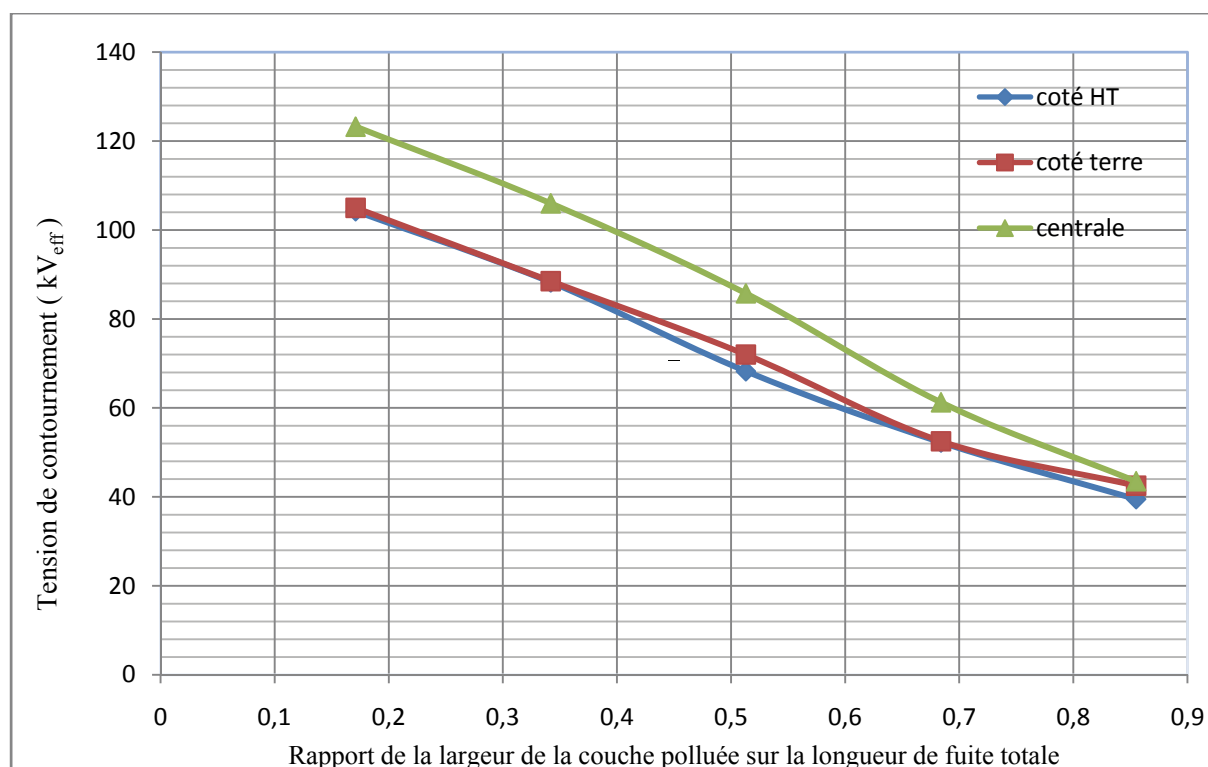


Figure III.10 : Tension de contournement en fonction du rapport de la largeur de la couche polluée sur la longueur de fuite totale pour les trois configurations de pollution.

### III-4-2 Etude du courant de fuite :

Pour déterminer les caractéristiques du modèle plan, nous avons mesuré et visualisé le courant de fuite pour différents paliers de tensions. Nous mettrons en évidence l'influence, la tension appliquée et la largeur de la couche polluée ainsi leur emplacement rapport aux électrodes.

#### III-4-2-1 Relation courant de fuite – tension appliquée :

Les figures III.11 à III.18 donnent l'évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour les différentes positions et largeurs de la couche polluée.

Pour les cas possibles de configurations et les dispositions considérées, les caractéristiques donnant la variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée montrent que, pour toutes les largeurs de la couche polluée ainsi que sa position par rapport aux électrodes, l'amplitude du courant de fuite augmente avec la tension appliquée (Figures III.11 à III.18).

Les courbes présentent une partie linéaire de pente donnée et une autre non linéaire.

Pour des tensions appliquées inférieures à 15 kV, la pente de la courbe courant - tension reste assez stable pour les faibles valeurs de la couche de pollution ( $X=5$ ,  $X=10$  et  $X=15$  cm). Le système semble suivre donc une loi ohmique où l'impédance totale pour une largeur donnée ne dépend pas de la tension appliquée, ce qui est logique si on néglige les phénomènes de conduction de la zone sèche.

Par contre pour des tensions supérieures, l'accroissement du courant de fuite est très sensible, le système perd donc largement son caractère ohmique. Cette configuration est bien illustrée sur les figures (III.11 à III.13), par exemple pour la largeur critique de 25 cm, pollution côté haute tension, côté terre et centrale. Cette largeur critique est observée pour une tension supérieure à 21 kV. Ceci est dû au fait que l'application d'une tension élevée provoque l'augmentation du nombre d'arcs apparaissant sur la plaque, ou de leur intensité, donc l'air compris entre l'électrode et la couche perd son caractère isolant.

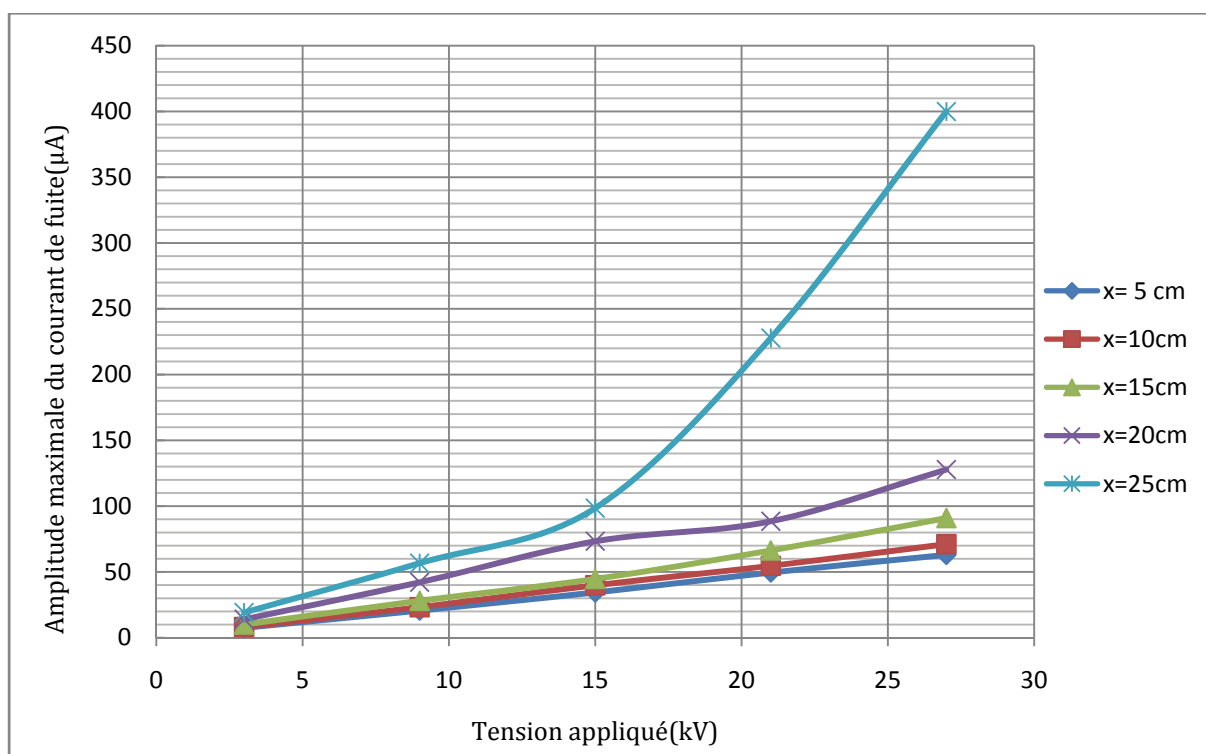


Figure III.11: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes largeurs de la couche polluée coté haute tension.

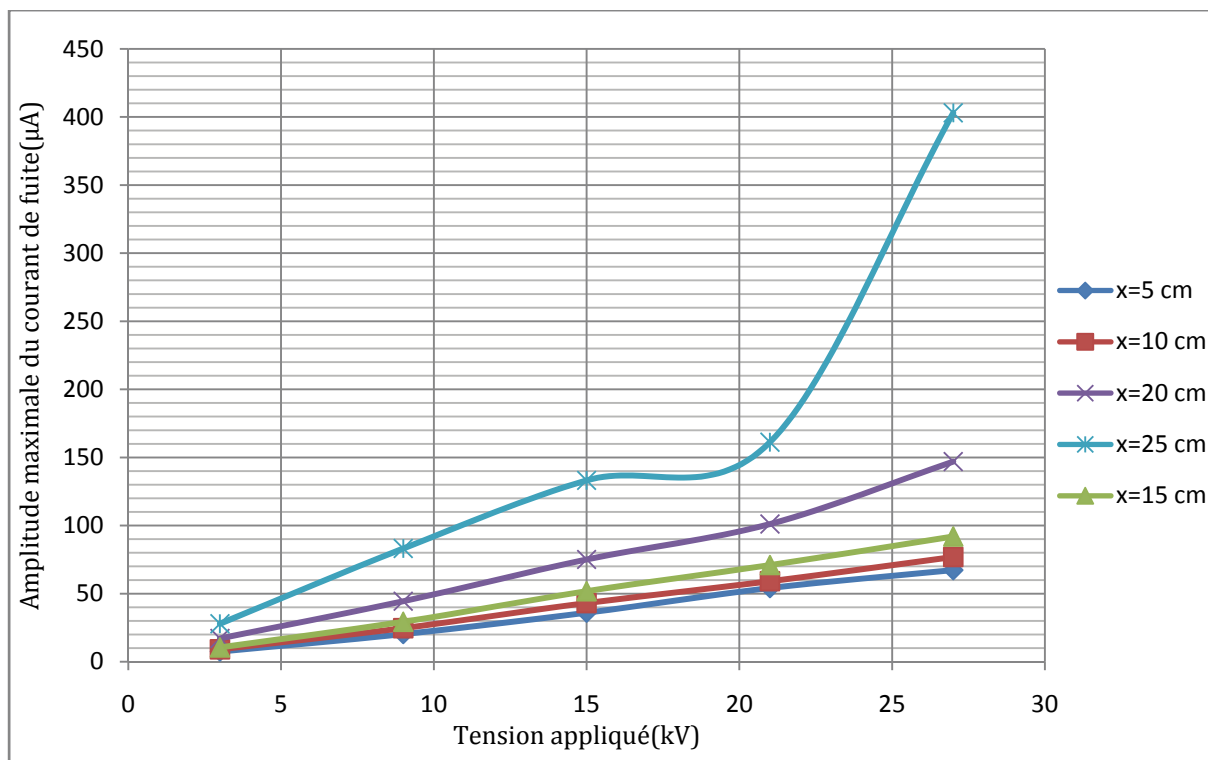


Figure III.12: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes largeurs de la couche polluée coté terre.

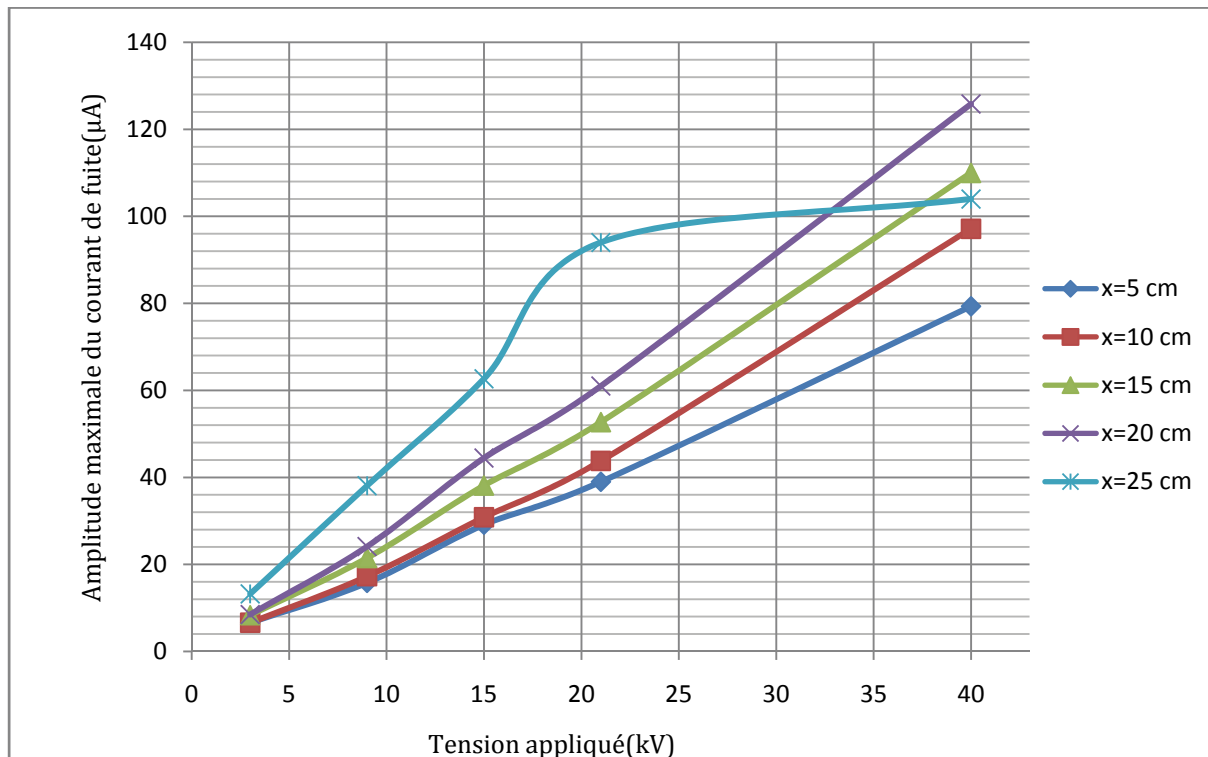


Figure III.13 : Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes largeur de la couche polluée centrale.

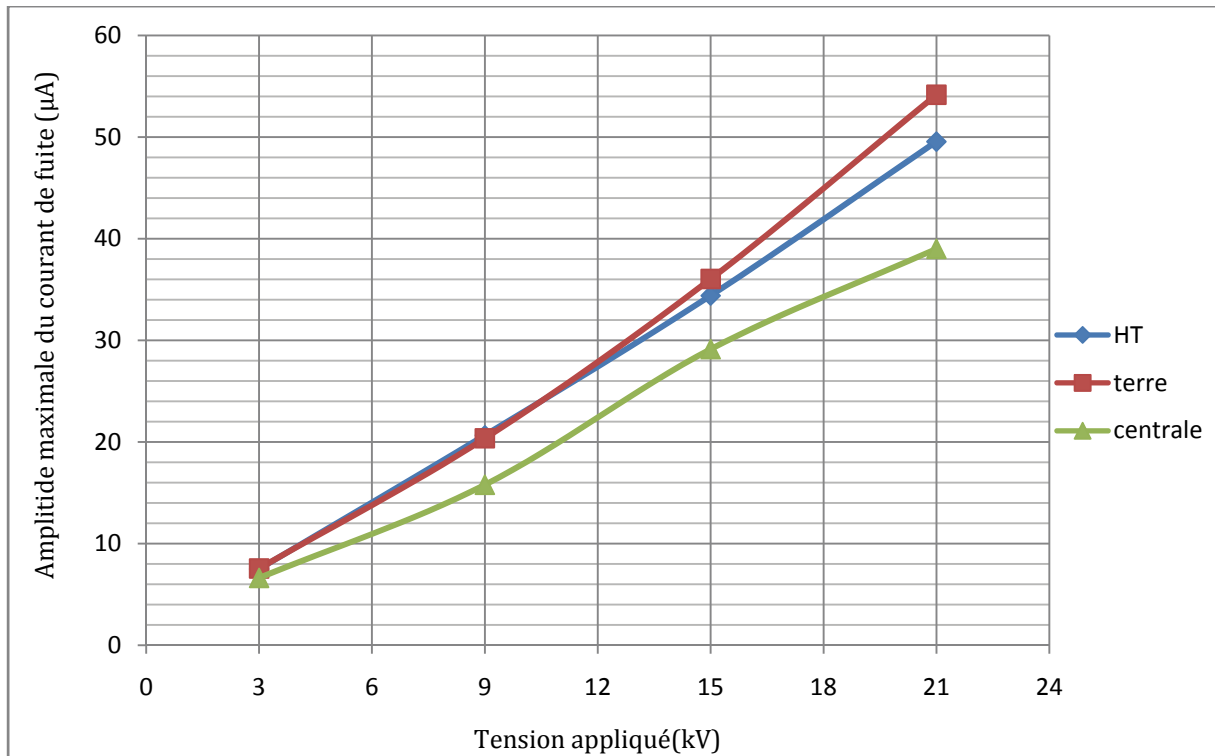


Figure III.14: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour une couche polluée de 5 cm.

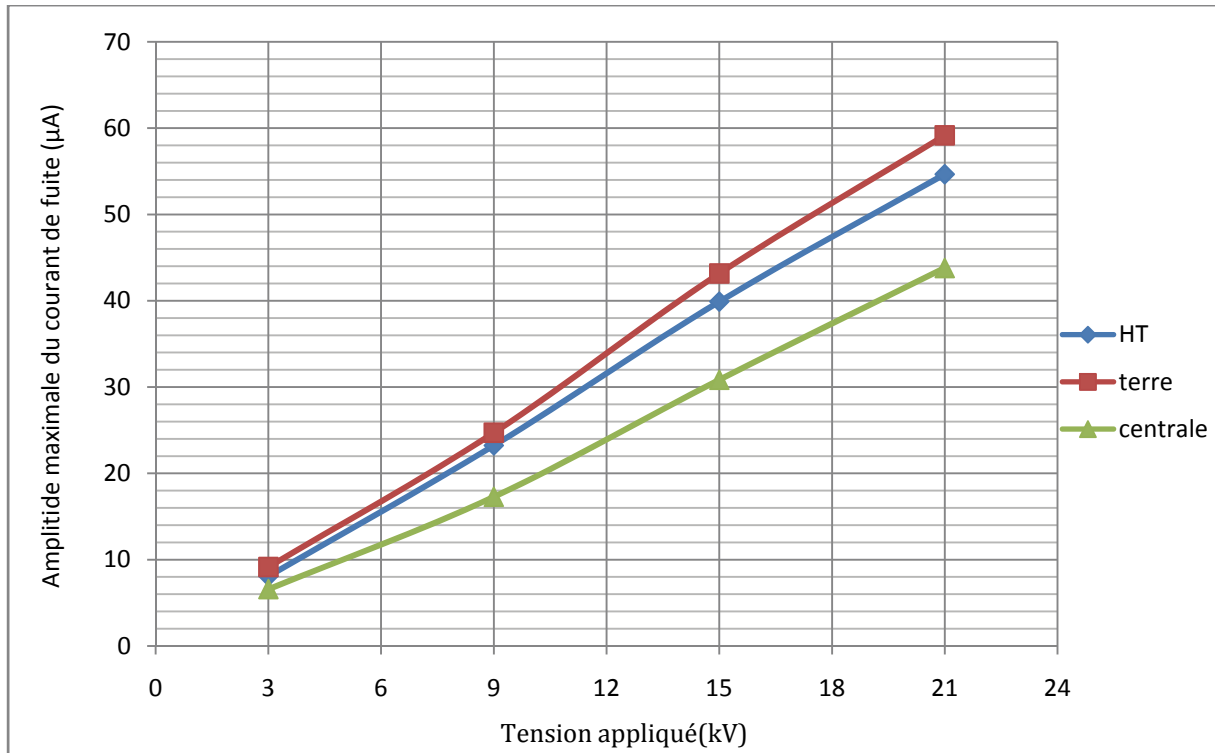


Figure III.15: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour une couche polluée de 10 cm.

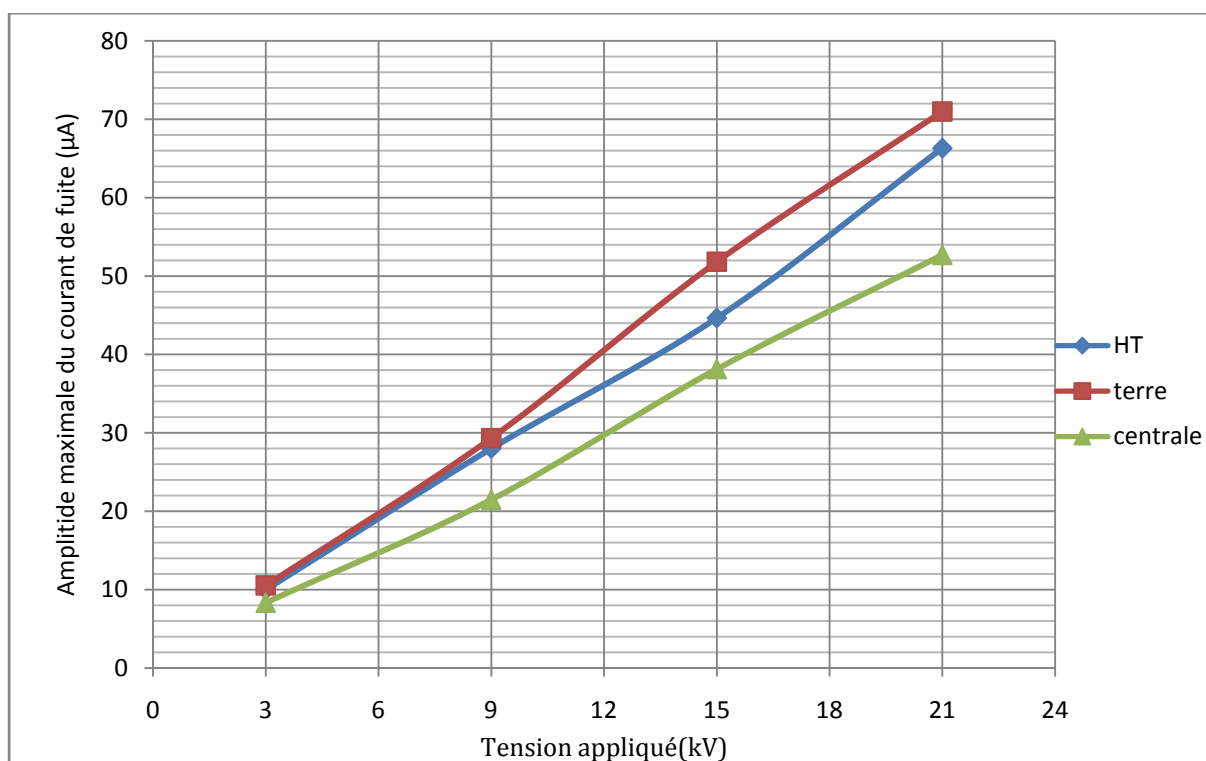


Figure III.16: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour une couche polluée de 15 cm.

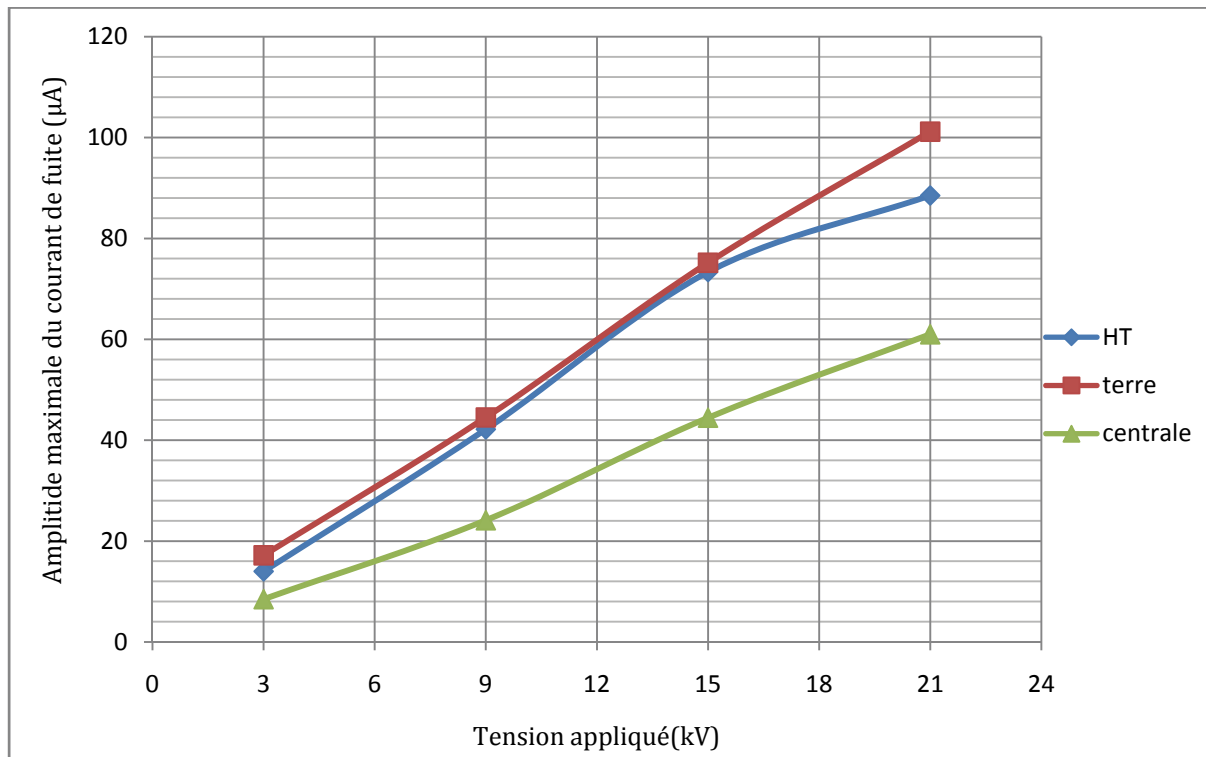


Figure III.17: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour une couche polluée de 20 cm.

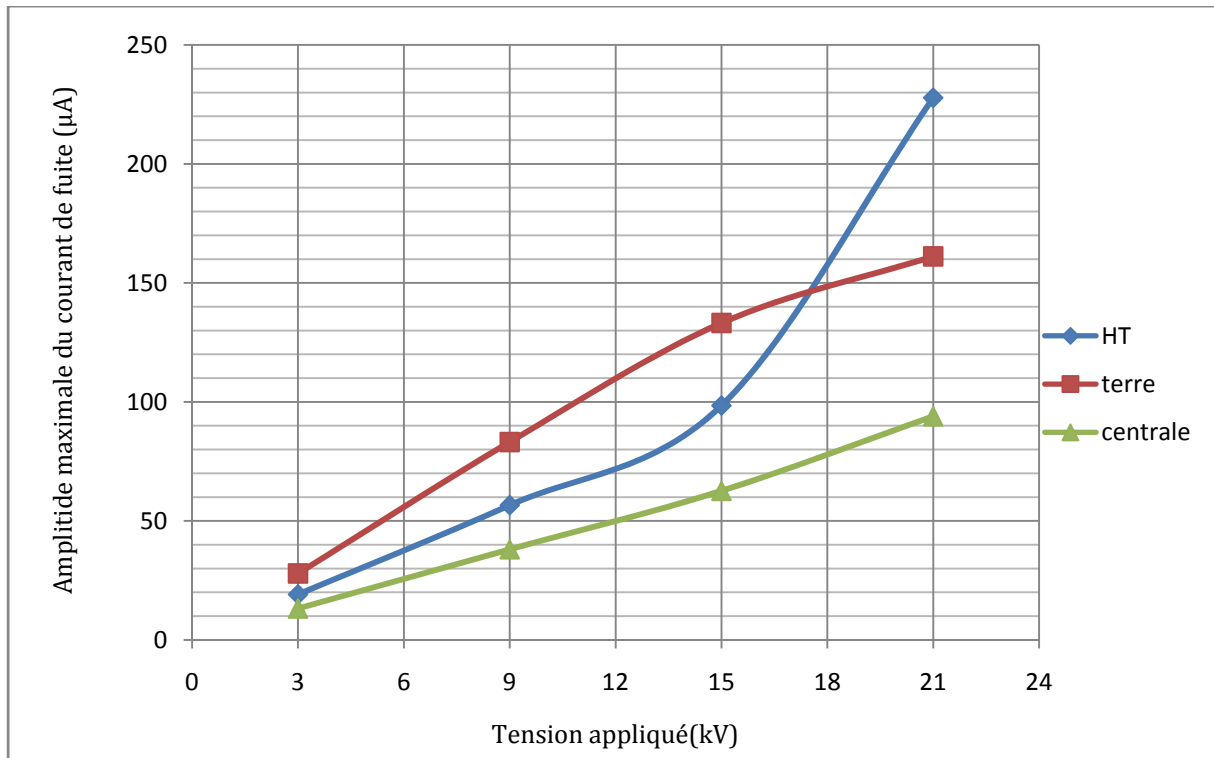


Figure III.18: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour une couche polluée de 25 cm.

### III.4.2.2 Relation courant de fuite – largeur de la couche polluante:

Les figures (III.20 à III.26) montrent l'évolution de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante. L'augmentation de l'amplitude du courant de fuite peut être expliquée par la réduction significative de l'impédance totale équivalente du milieu proportionnellement à l'élargissement de la couche polluée, et ce pour chaque niveau de tension et pour les trois configurations.

Les caractéristiques courant de fuite-largeur de la couche polluée montrent que toutes les courbes ont une allure croissante, on peut la partitionner en trois parties :

- La première partie est représentée par une courbe presque linéaire de pente faible pour une largeur de couche inférieure à une limite ( $17.39\% < X/L < 51\%$ ) quelque soit la tension appliquée et la position de la couche de pollution (côté terre, côté haute tension ou couche centrale).

Nous notons également que, pour les faibles tensions, à partir d'une certaine largeur de pollution, le courant augmente assez brutalement.



- La deuxième partie est représentée par un « coude ». Ce coude exprime en effet le passage de la couche partiellement polluée (donc comportant une zone sèche à impédance élevée) à la couche entièrement polluée où la résistance devient très faible et engendre donc un courant nettement plus élevé.
- Une croissance brutale du courant est représentée par la troisième partie. Cette augmentation est liée à l'élargissement de la couche polluée (couche polluée > 61%) et à l'augmentation du niveau de la tension appliquée. Cette amplitude présente un maximum pour un niveau de tension égal à 27 kVeff et pour 85,6 % de la distance inter-électrode de la couche polluée, qui représente le cas le plus favorable à la formation de l'arc électrique (Figure III.19).

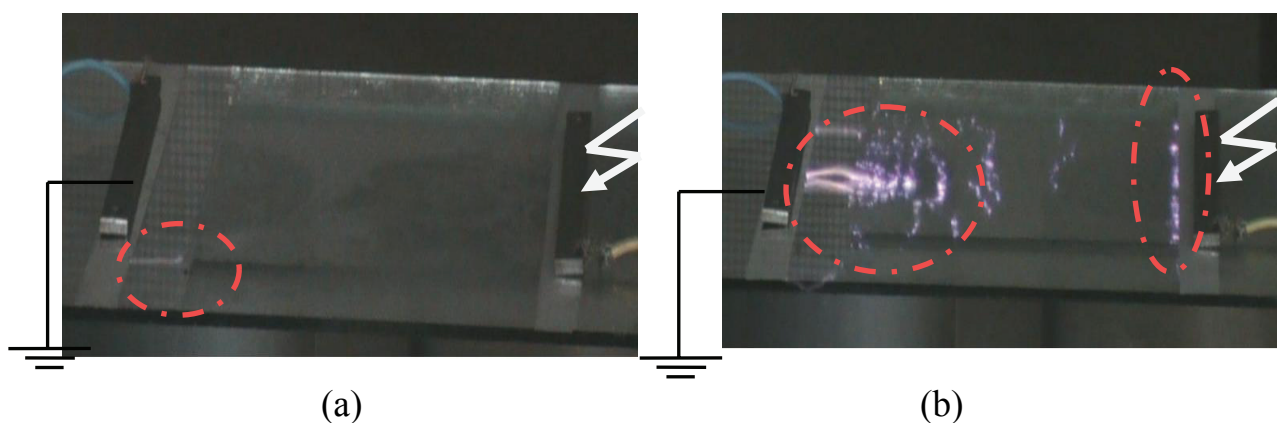


Figure III.19: Comportement de l'isolateur plan pour une largeur de 25 cm de la couche polluée du côté HT : (a) niveau 21 kVeff, (b) niveau 27 kVeff.

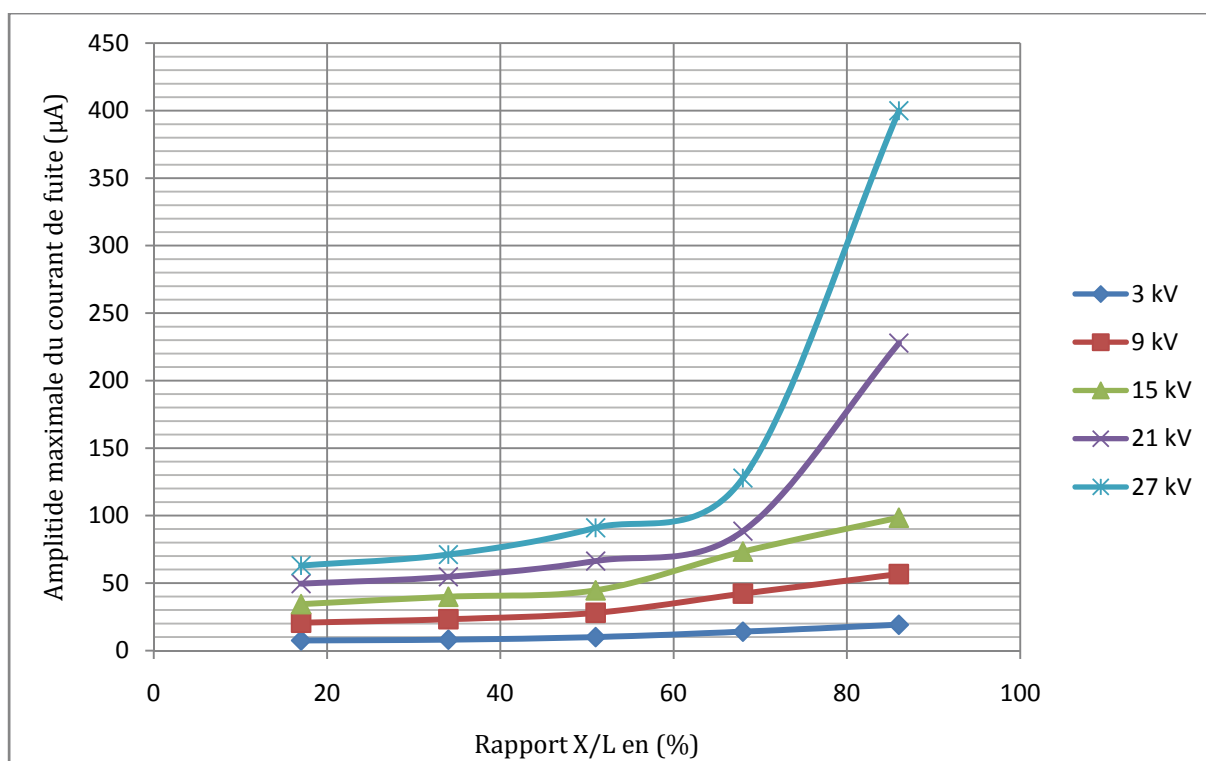


Figure III.20: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction du rapport X/L pour différentes valeurs de la tension appliquée (couche polluée coté haute tension).

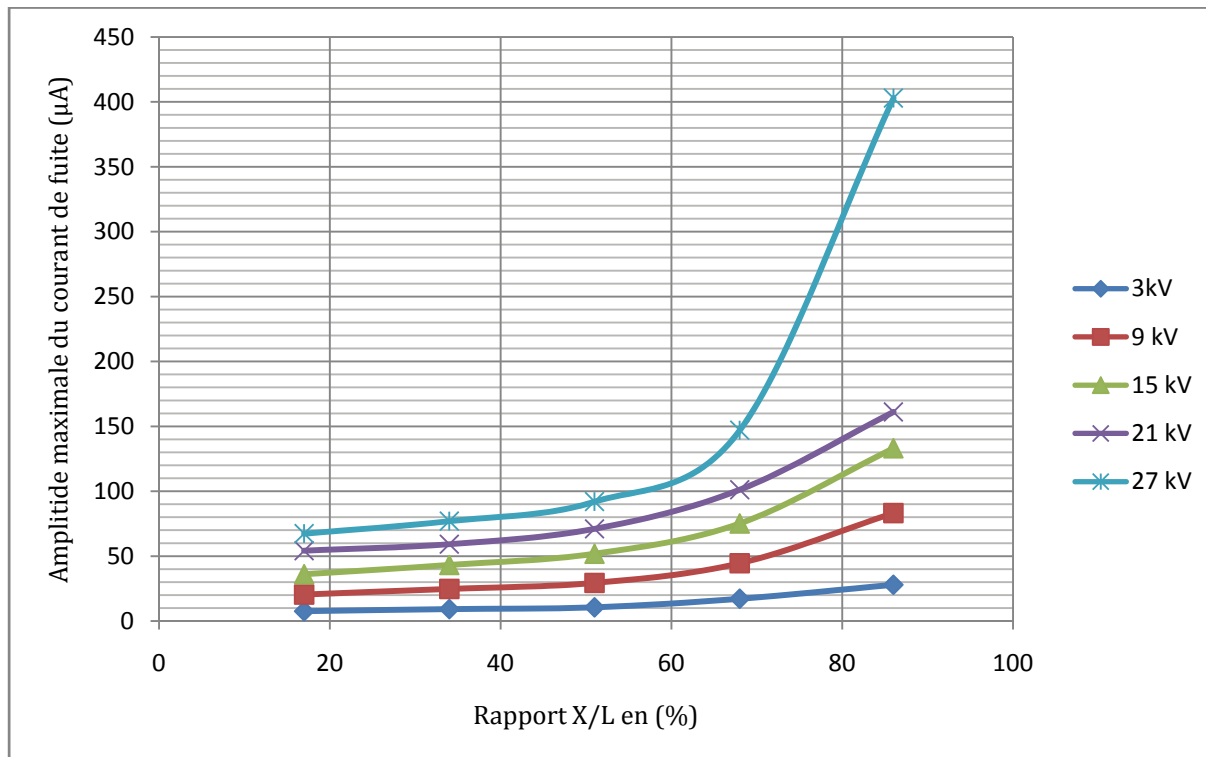


Figure III.21: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction du rapport X/L pour différentes valeurs de la tension appliquée (couche polluée coté terre).

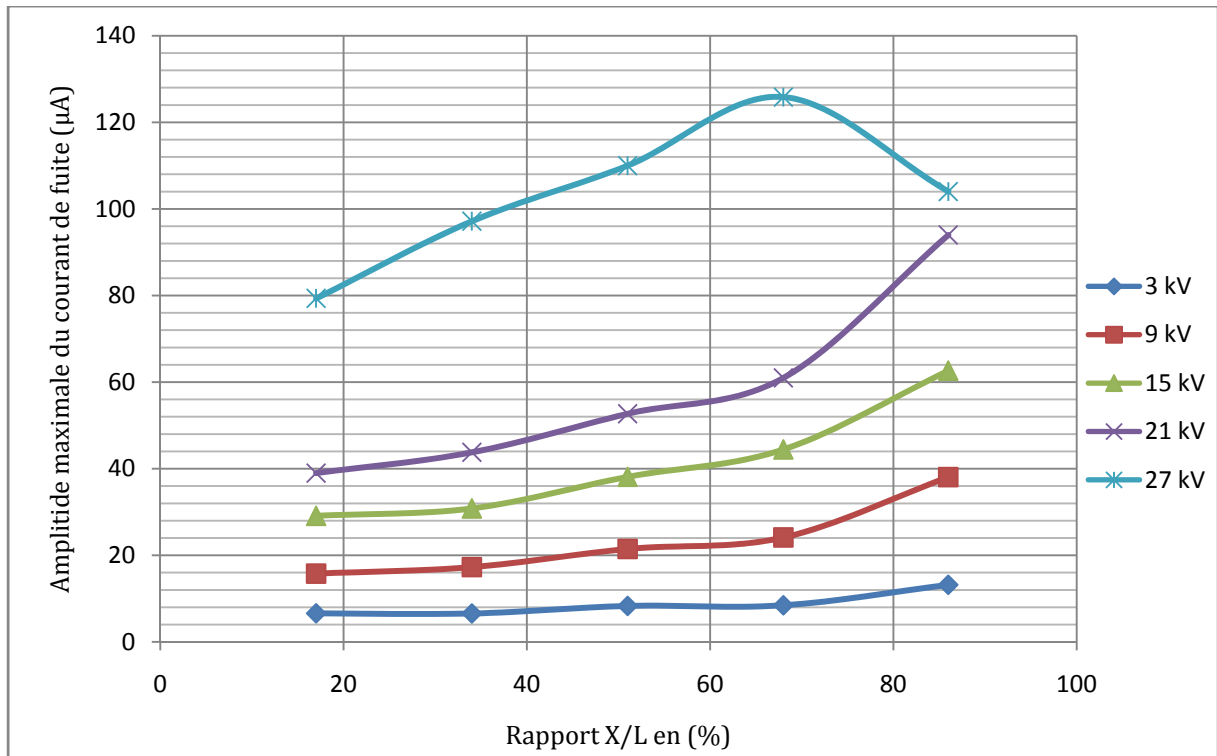


Figure III.22: Variation de l’amplitude maximale du courant de fuite en fonction du rapport X/L pour différentes valeurs de la tension appliquée (couche polluée centrale).

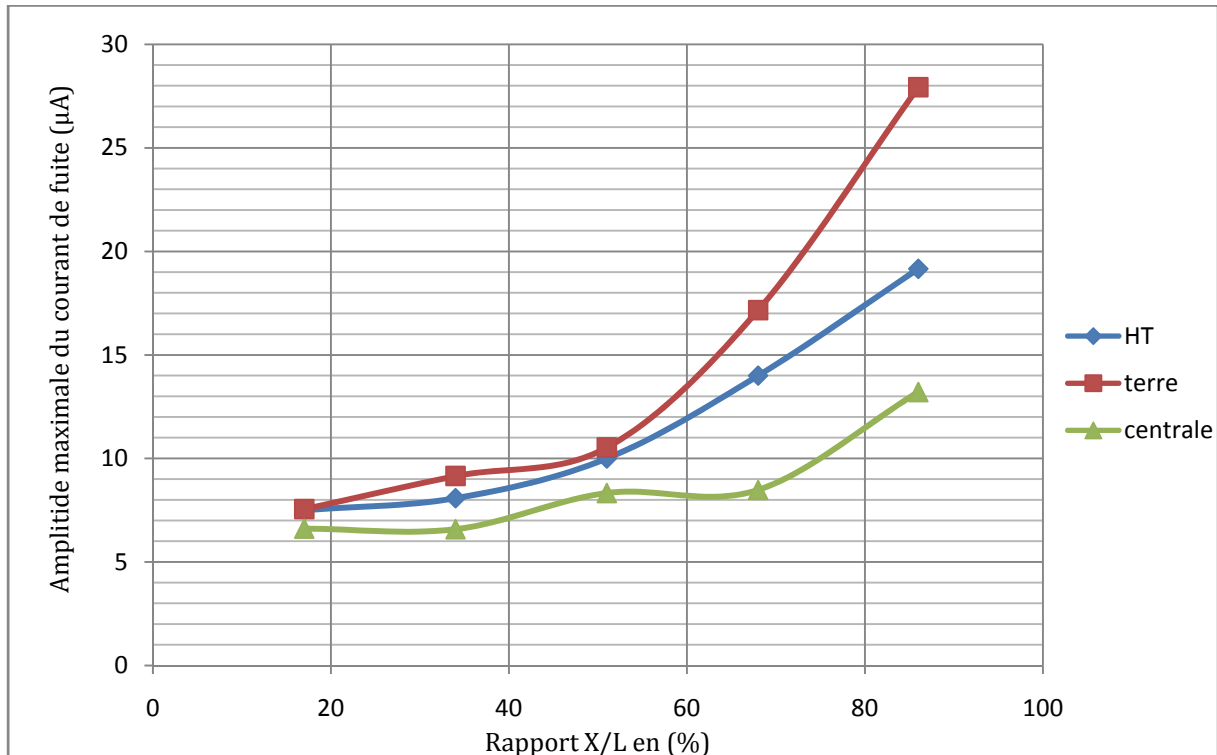


Figure III.23: Variation de l’amplitude maximale du courant de fuite en fonction du rapport X/L pour différentes configurations de la couche polluée (tension appliquée 3kV).

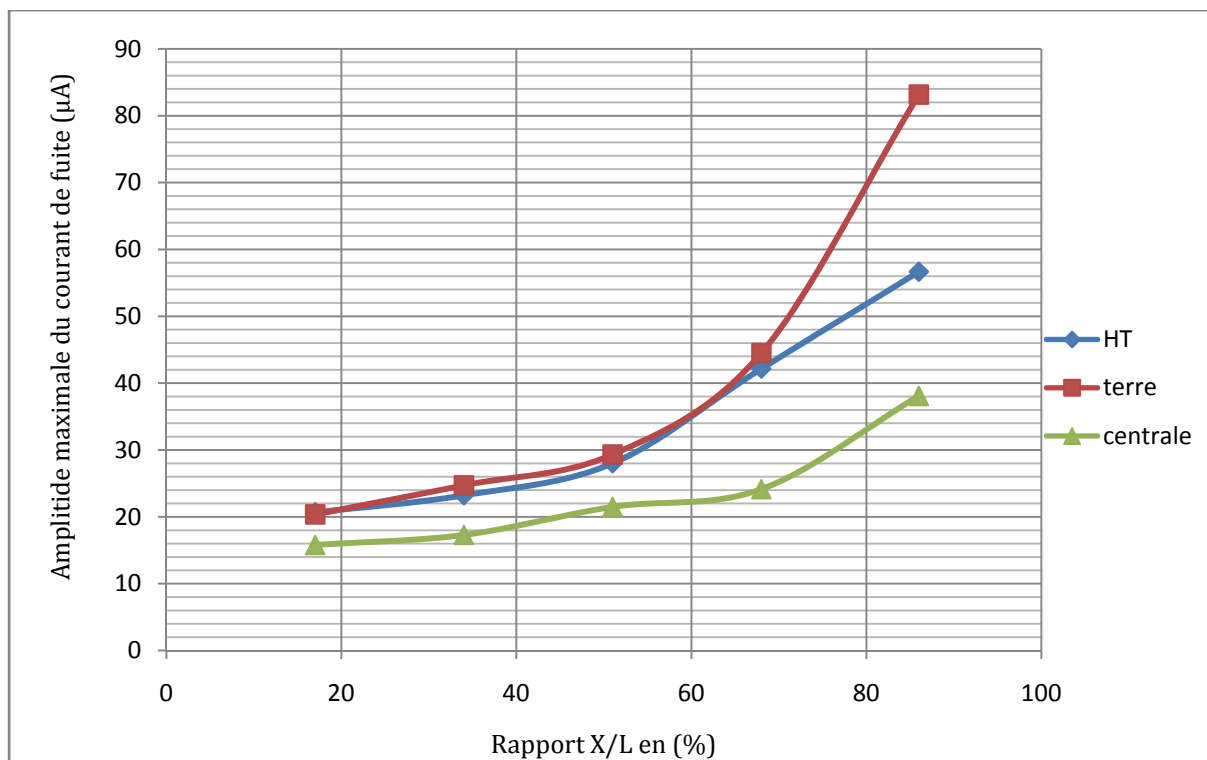


Figure III.24: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction du rapport X/L pour différentes configurations de la couche polluée (tension appliquée 9kV).

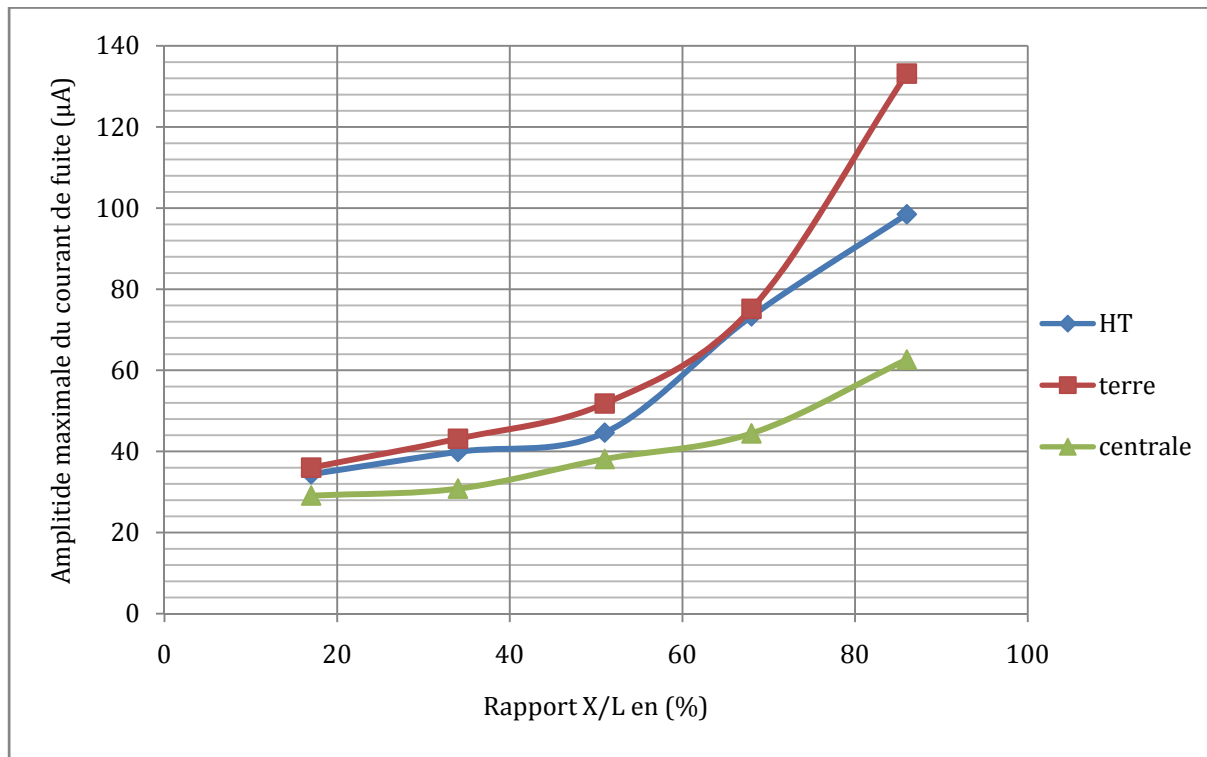


Figure III.25: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction du rapport X/L pour différentes configurations de la couche polluée (tension appliquée 15kV).

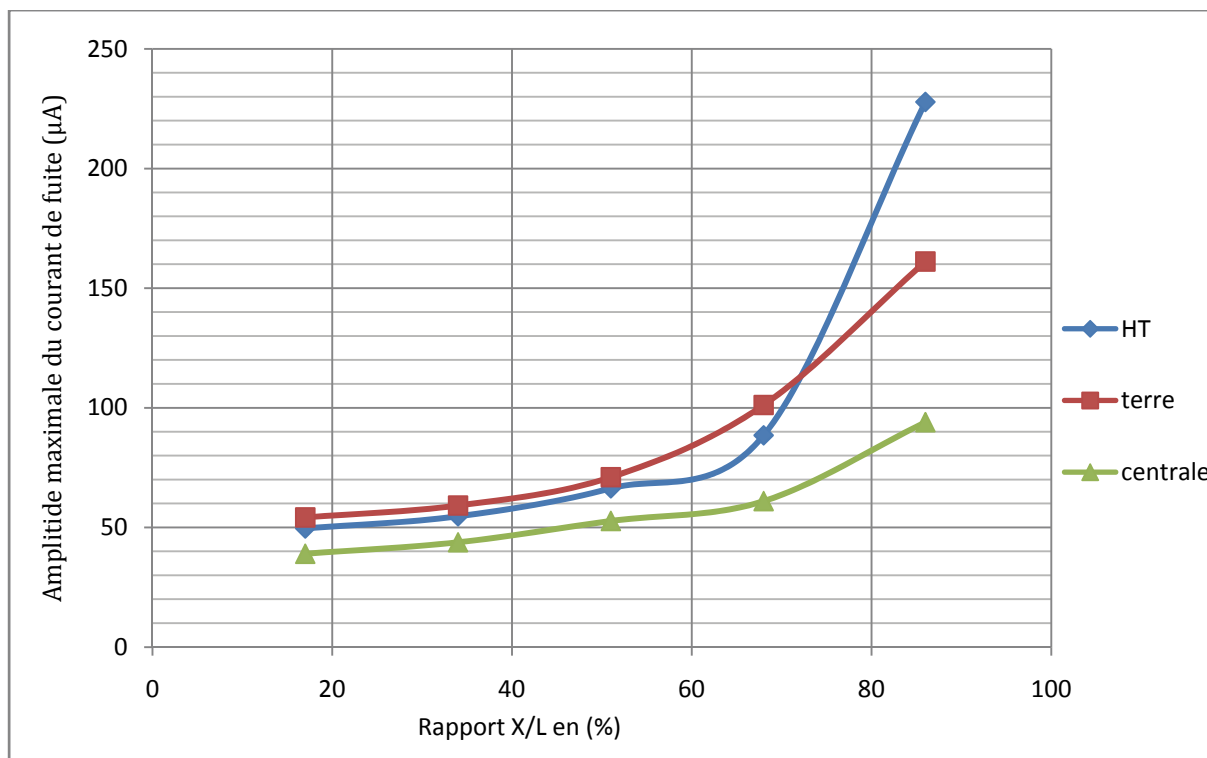


Figure III.26: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction du rapport X/L pour différentes configurations de la couche polluée (tension appliquée 21kV).

### III.4.2.3 Relation courant de fuite – position de la couche polluante :

Afin de mettre en évidence l'influence de l'emplacement de la couche polluée, plusieurs essais ont été effectués pour plusieurs niveaux de tensions et plusieurs largeurs de la couche polluée. Nous représentons les données sur les graphes (III.27 à III.35).

Les expériences effectuées nous montrent que pour les faibles valeurs de la tension appliquée (3 et 9kV), la position de la couche n'influe pas sur le courant de fuite et cela pour les faibles largeurs de la couche polluée (Figures III-27 à III.30).

Ce résultat montre que la position de la couche de pollution n'a pas d'influence sur le courant de fuite tant que la tension n'a pas atteint une limite correspondant probablement à la tension disruptive de l'interface air-verre pour la largeur sèche considérée.

C'est pourquoi pour les niveaux de tension plus élevés on remarque une large différence d'amplitude du courant de fuite, nous observons alors un courant beaucoup plus élevé lorsque la pollution est établie côté terre.

On constate que l'amplitude du courant est plus intense pour le côté terre par rapport aux autres configurations quand la largeur de la zone polluée est plus grande. Ceci pourrait s'expliquer par une plus grande probabilité de phénomènes de conduction de la zone sèche, par effet couronne et arcs, lorsque la couche polluante est du côté haute tension et de couche centrale [8, 39].

Certains chercheurs [28] ont montré que pour d'autres configurations de pollution non-uniforme, la valeur du ratio entre l'impédance de la couche polluée et celle de la couche sèche du côté terre est effectivement plus petite que celle pour le côté HT.

L'augmentation subite du courant de fuite pour une largeur de 25 cm et à partir de la tension de 21 kVeff, est causée par les décharges parallèles qui court-circuitent les intervalles d'air existant entre les extrémités de la couche polluée et chaque électrode, et diminue visiblement l'impédance équivalente du modèle.

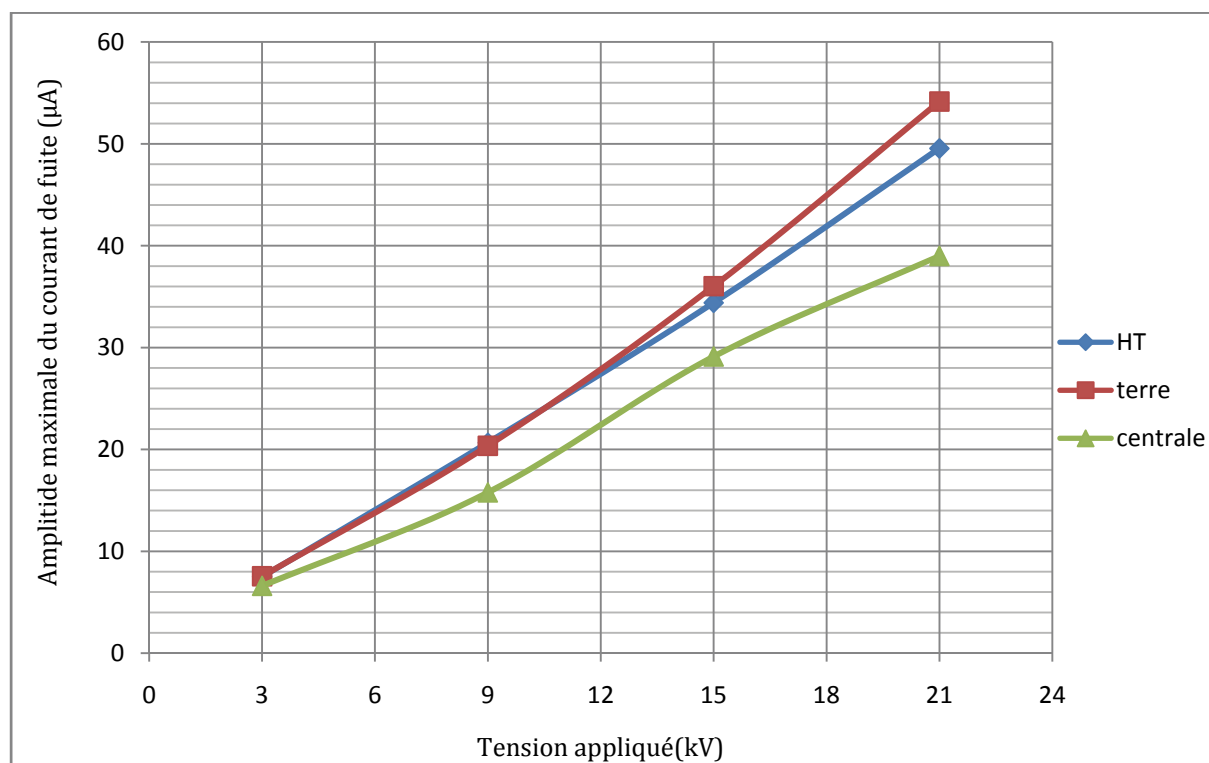


Figure III.27: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour les trois configurations de la couche polluée (largeur de la couche polluée 5 cm)

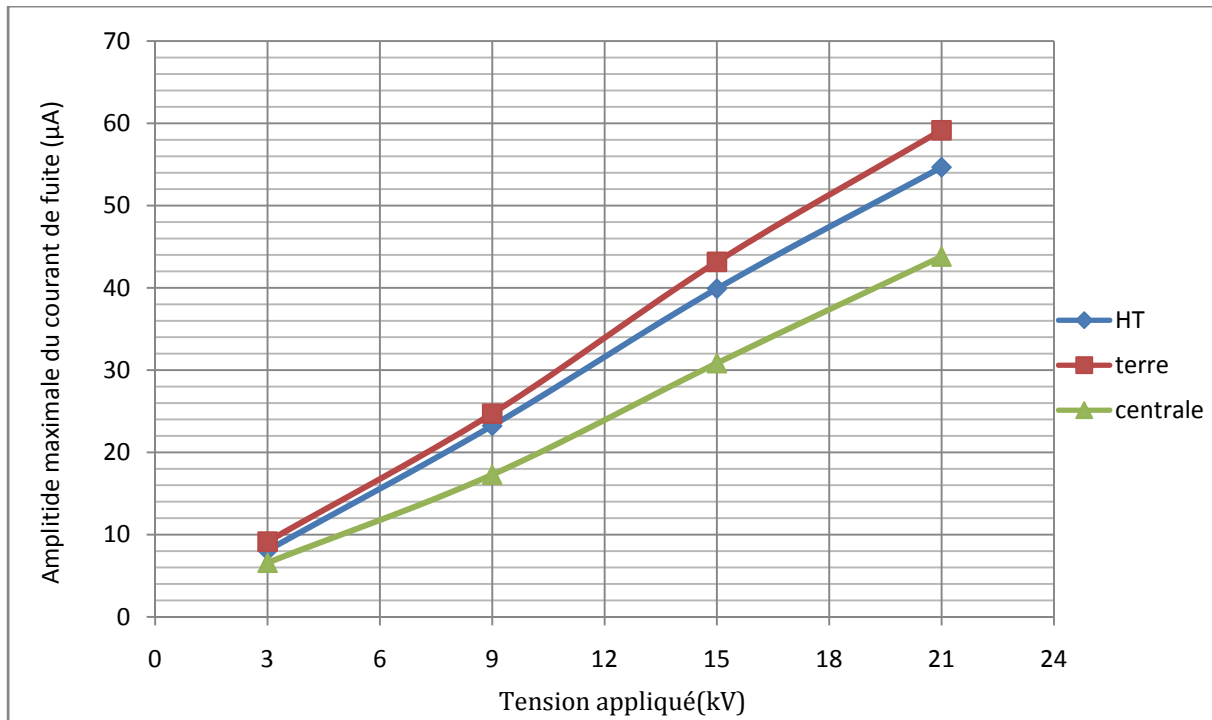


Figure III.28: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour les trois configurations de la couche polluée (largeur de la couche polluée 10 cm)

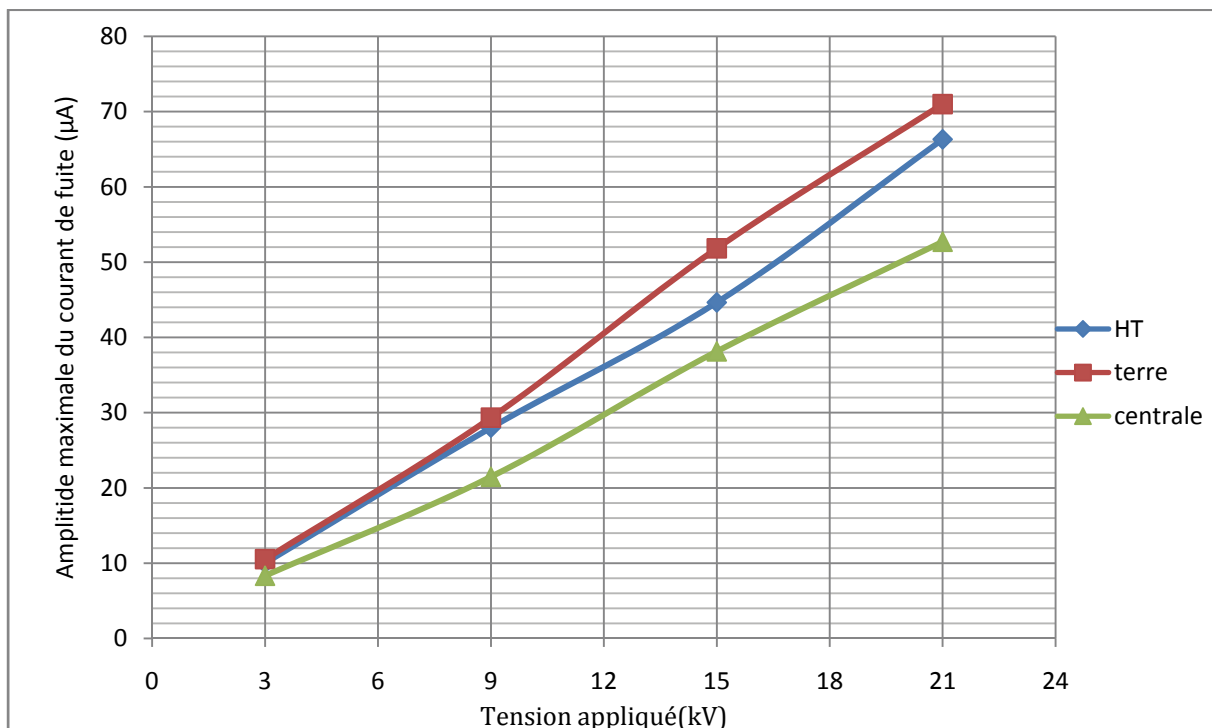


Figure III.29: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour les trois configurations de la couche polluée (largeur de la couche polluée 15 cm)

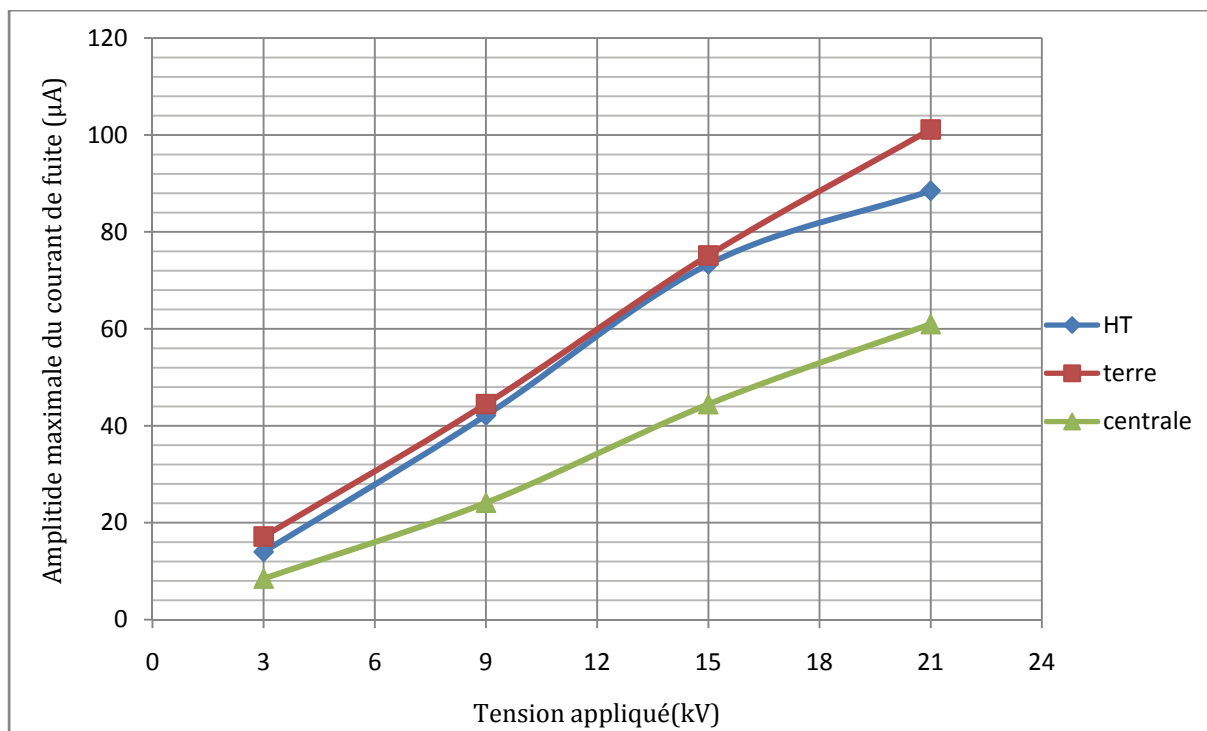


Figure III.30: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour les trois configurations de la couche polluée (largeur de la couche polluée 20 cm)

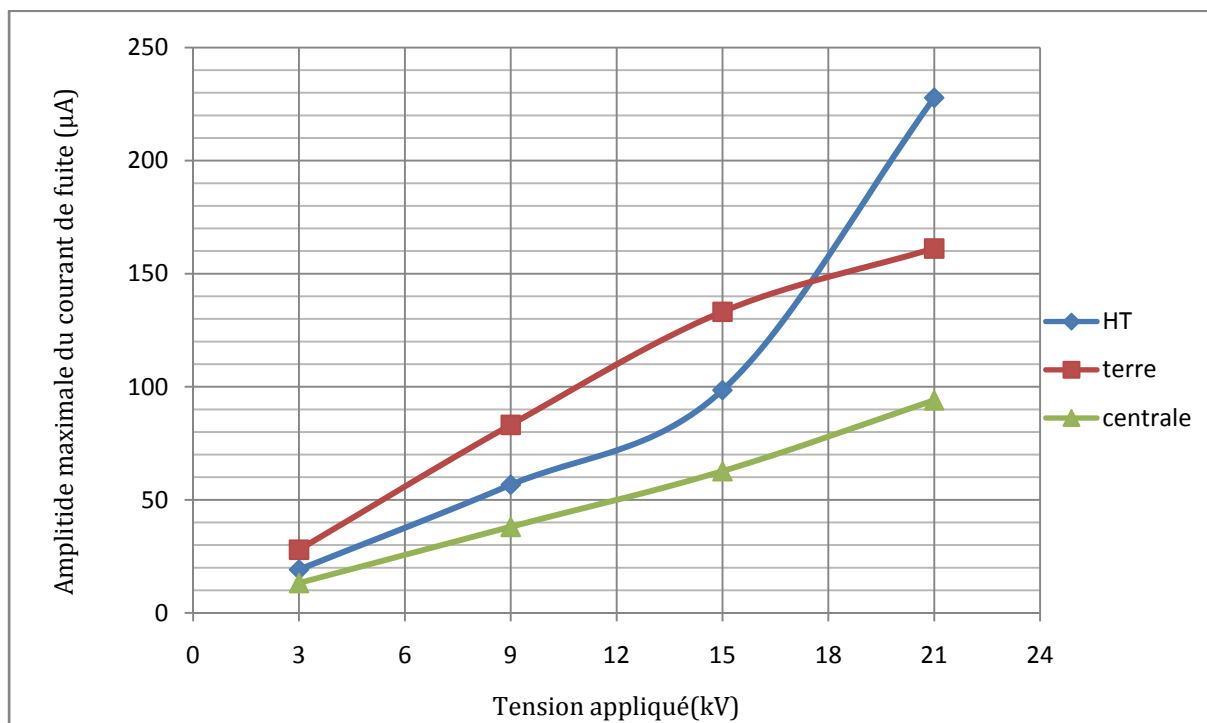


Figure III.31: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour les trois configurations de la couche polluée (largeur de la couche polluée 25 cm)



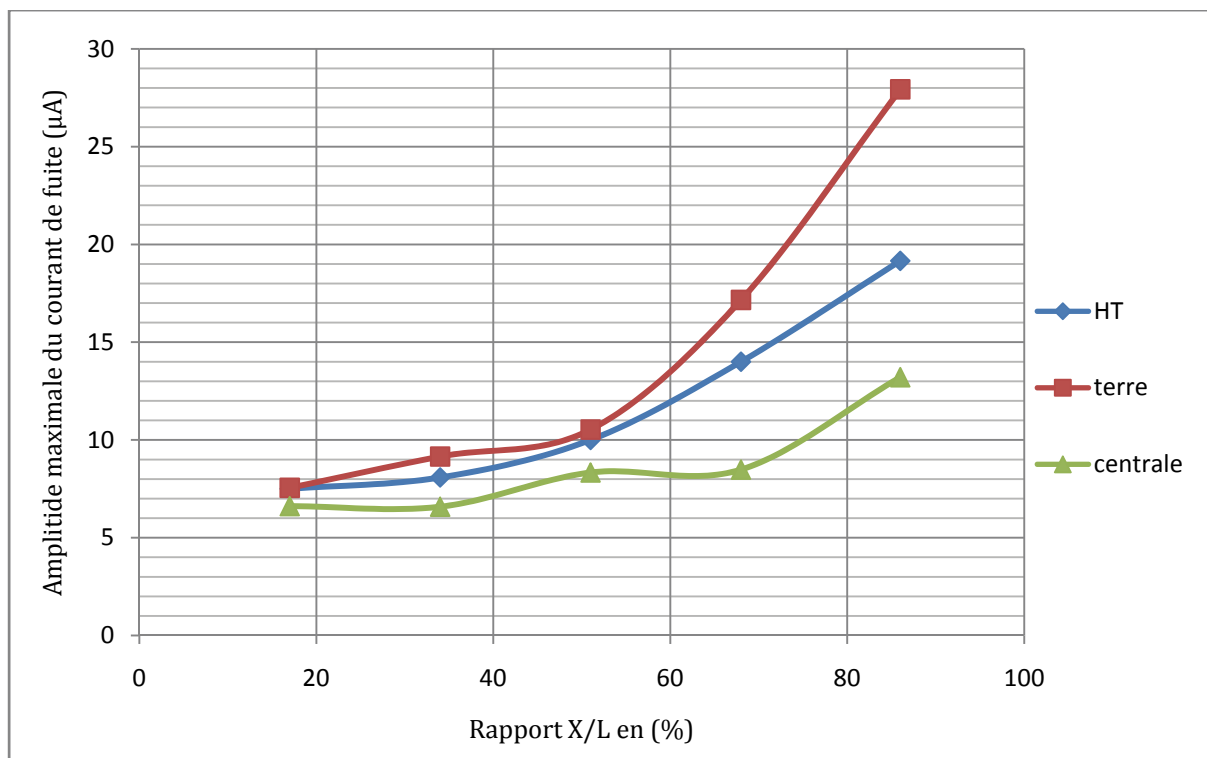


Figure III.32: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction du rapport X/L pour les trois configurations de la couche polluée (tension appliquée 3kV).

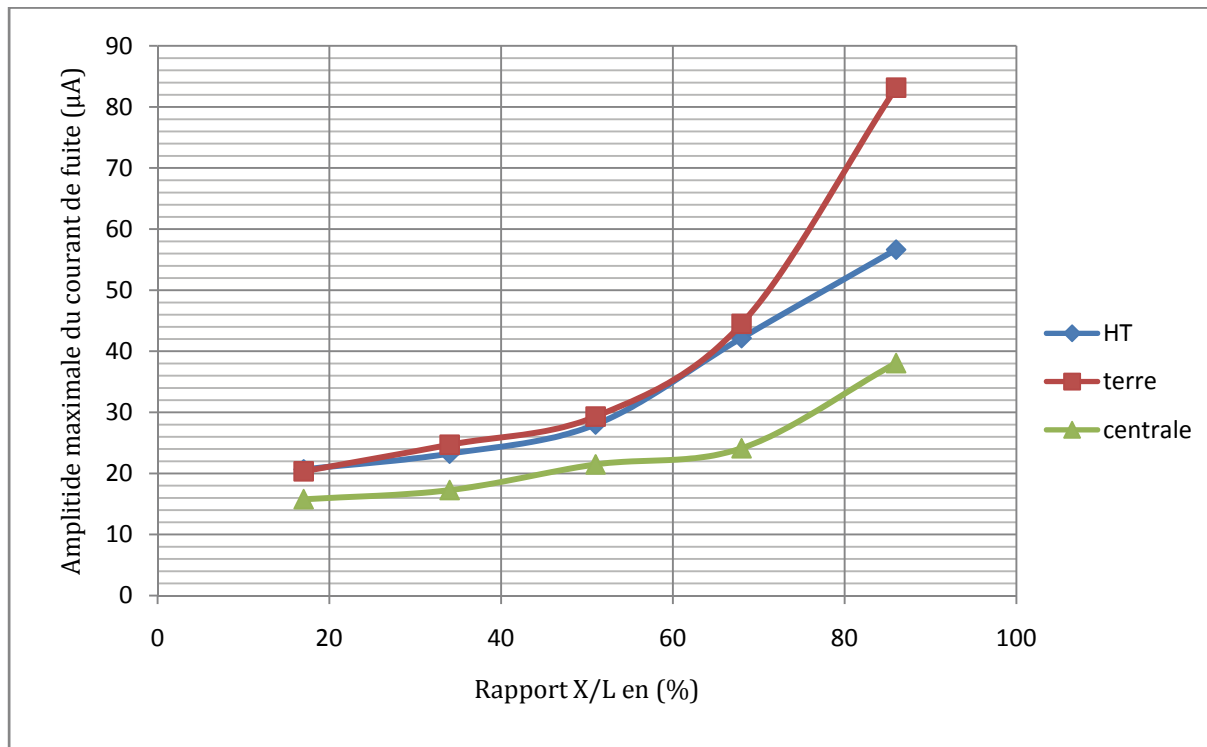


Figure III.33: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction du rapport X/L pour les trois configurations de la couche polluée (tension appliquée 9kV).

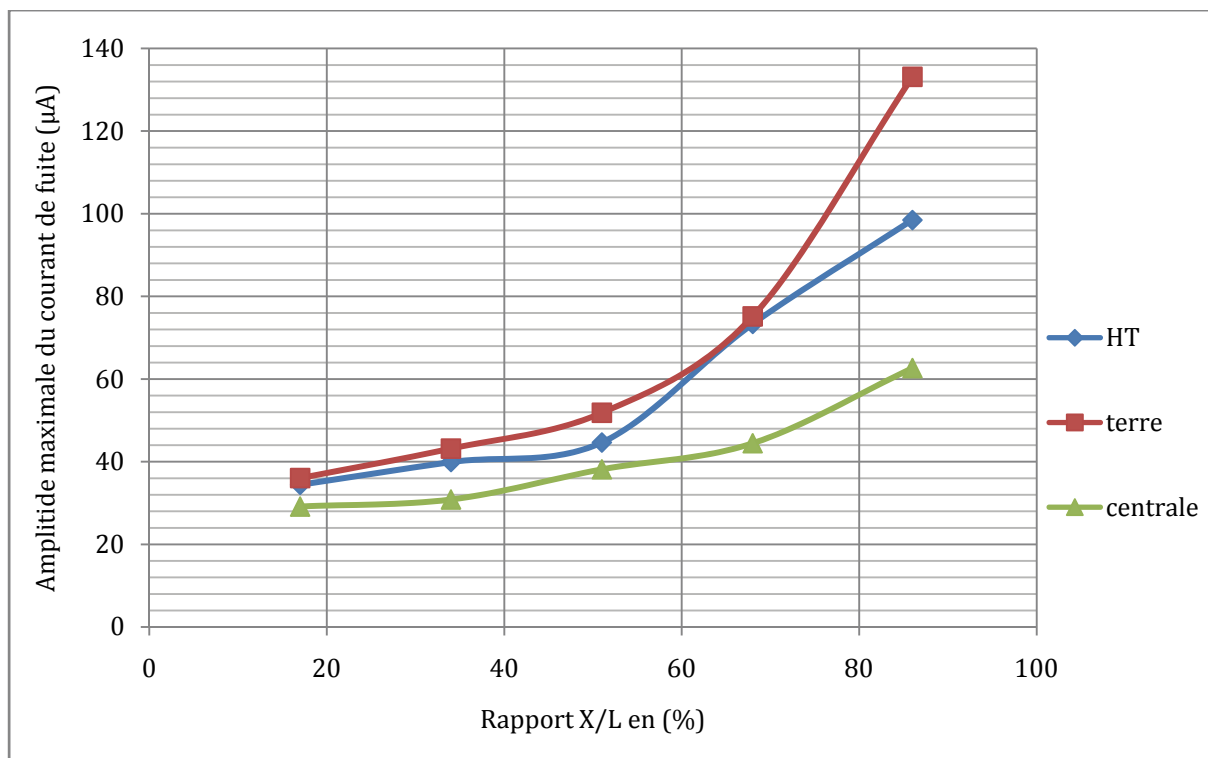


Figure III.34: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction du rapport X/L pour les trois configurations de la couche polluée (tension appliquée 15kV).

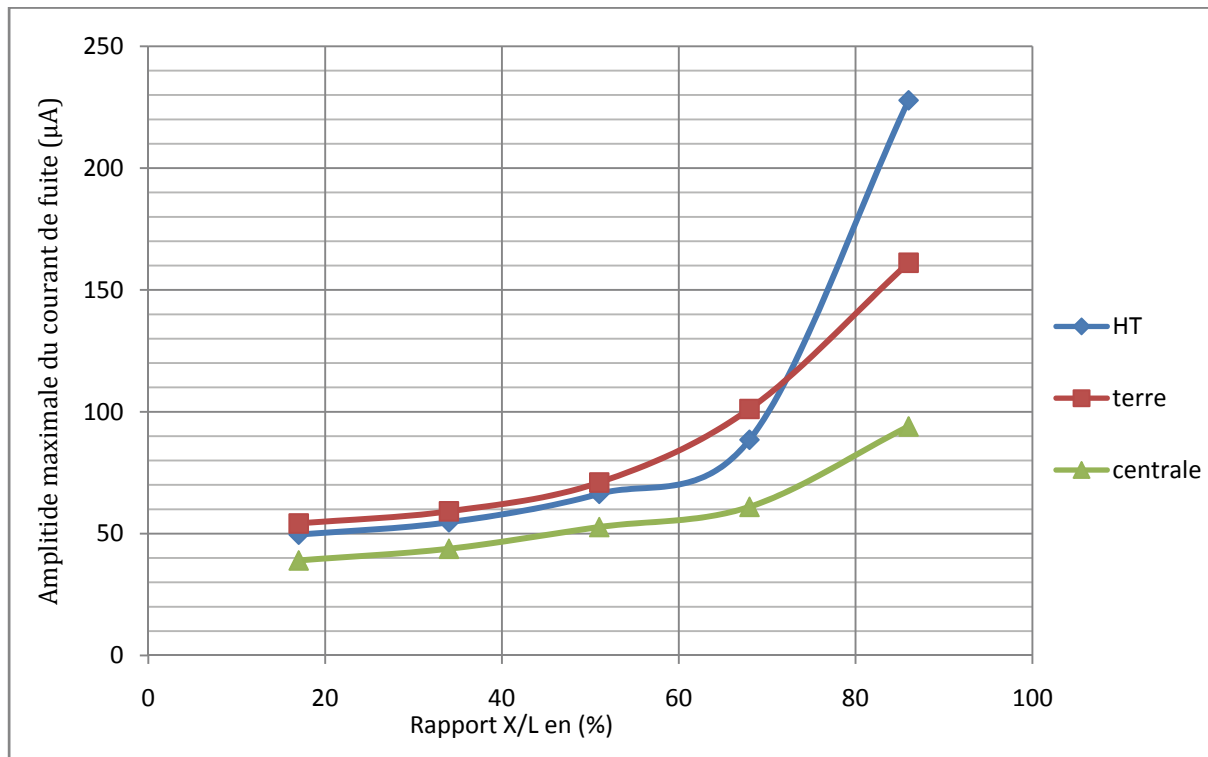


Figure III.35: Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction du rapport X/L pour les trois configurations de la couche polluée (tension appliquée 21kV).

### III.5 Etude des décharges parallèles :

Dans cette partie, nous nous intéressons à la longueur critique de l'arc juste avant le contournement ainsi qu'à leur nombre en fonction de la tension appliquée, une fois du côté haute tension et une fois du côté terre.

#### III.5.1 Relation longueur critique - conductivité:

D'après la figure III.36, nous remarquons que la longueur critique maximale de la décharge parallèle est de 36 % de la longueur de fuite totale pour la plus faible conductivité 0,01mS/cm et de 31,8 % pour la conductivité 0,19 mS/cm. Pour les grandes conductivités, la longueur critique de la décharge parallèle est de 23,9% pour 1,2 mS/cm et 21,4% pour 10,1 mS/cm de la longueur de fuite totale.

Ceci nous amène à dire que la longueur critique de la décharge diminue de manière non-linéaire avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante qui est due à la diminution de l'effet résistif de l'isolateur. Cette diminution est causée par l'apparition d'arcs sur toute la surface polluée qui favorise pour les faibles tensions, la création d'un canal ionisé le long duquel progressera la décharge finale. L'apparition des arcs peut être interprétée par une baisse considérable de l'impédance équivalente de l'isolateur polluée qui favorise la création des zones sèches.

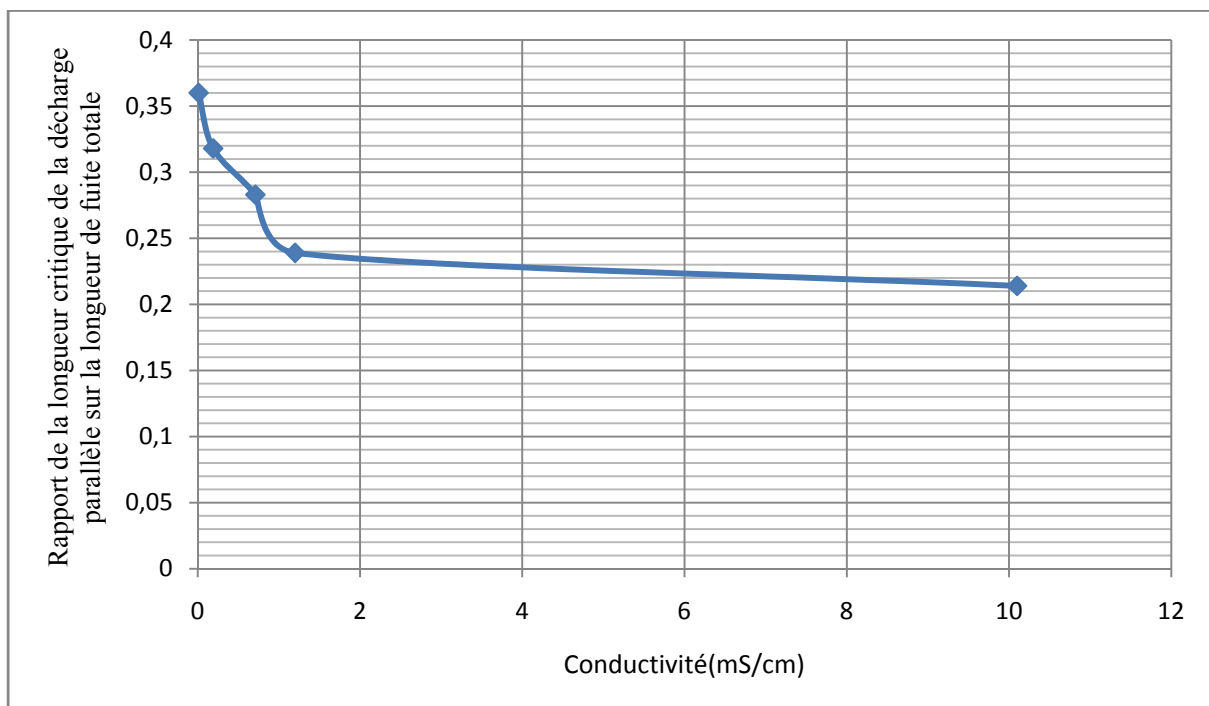


Figure III.36 : Longueur critique de la décharge parallèle pour chaque conductivité.

### III.5.2 Relation longueur d'arc – tension appliquée:

Les figures (III.37 à III.40) illustrent la variation du rapport de la longueur maximale de la décharge parallèle sur la longueur de fuite totale en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités.

Nous constatons que l'application d'une tension de quelques kilovolts entre les électrodes pour une couche de pollution uniforme, provoque l'apparition des décharges parallèles. D'après les figures (III.37 à III.40), nous observons une augmentation régulière de la longueur d'arc en fonction de la tension appliquée. Ce résultat était prévisible puisque lorsqu'on augmente la tension on obtient un assèchement important de la couche polluée, la tension reportée sur la zone sèche doit être suffisamment élevée et les arcs s'éteignent pour alimenter l'arc principal qui croît jusqu'à provoquer le court-circuit total. En effet, l'augmentation de la tension engendre la croissance de l'énergie électrique apparaissant dans l'arc, ce qui provoque son allongement [9].

Nous constatons la même allure pour les deux configurations (côté terre et côté haute tension).

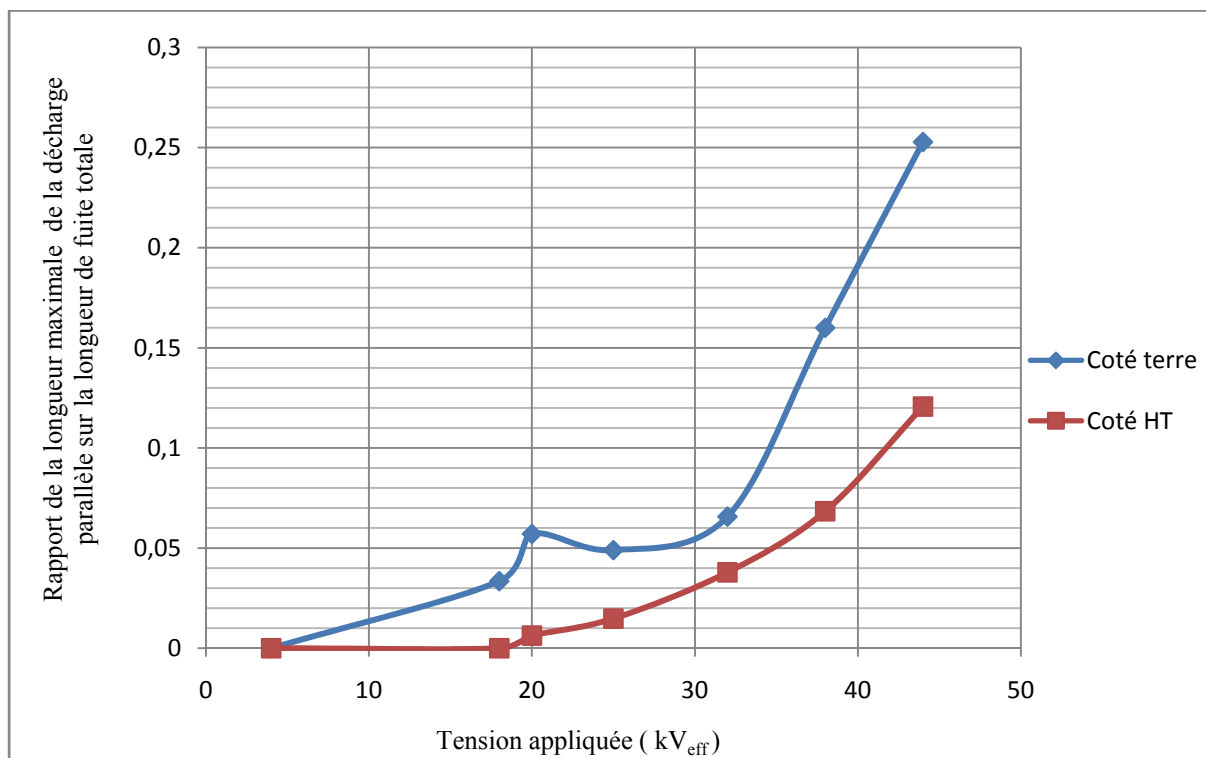


Figure III.37 : Rapport de la longueur maximale de la décharge parallèle sur la longueur de fuite totale en fonction de la tension appliquée, pour coté HT et terre ( $\sigma=10\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

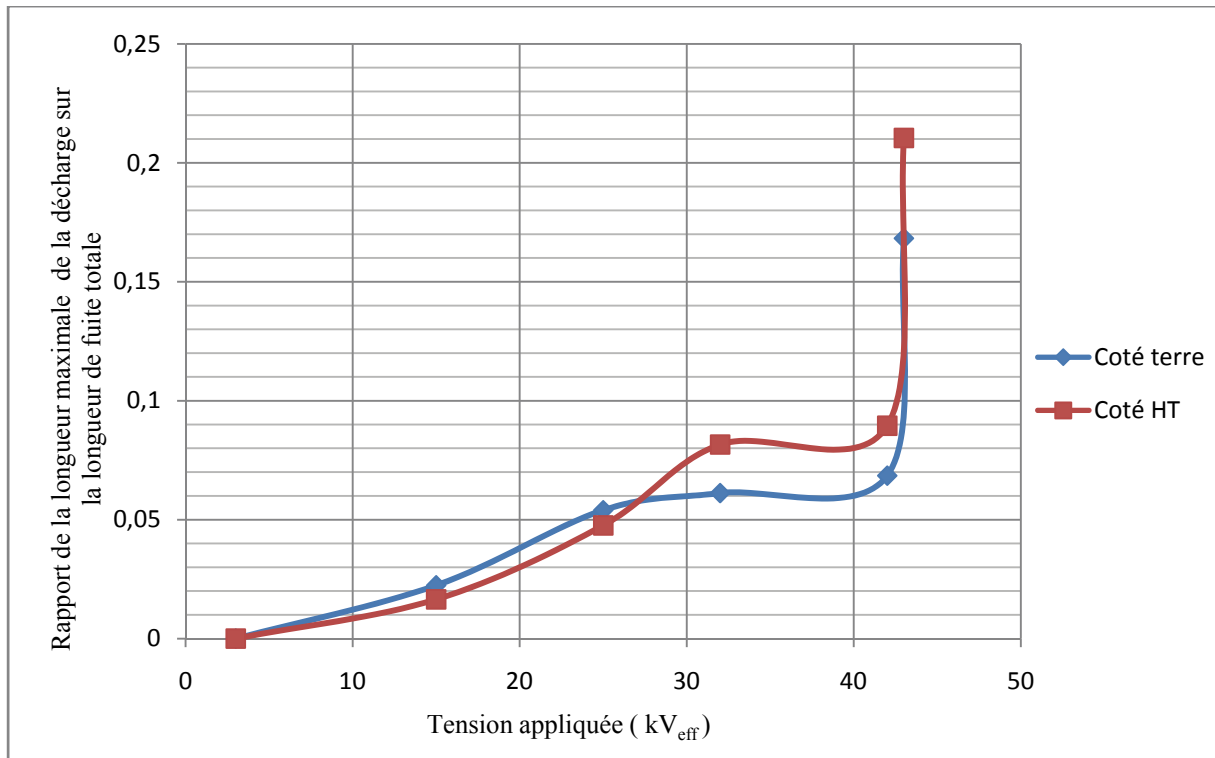


Figure III.38 : Rapport de la longueur maximale de la décharge parallèle sur la longueur de fuite totale en fonction de la tension appliquée, pour coté HT et terre ( $\sigma=190\mu\text{S/cm}$ ).

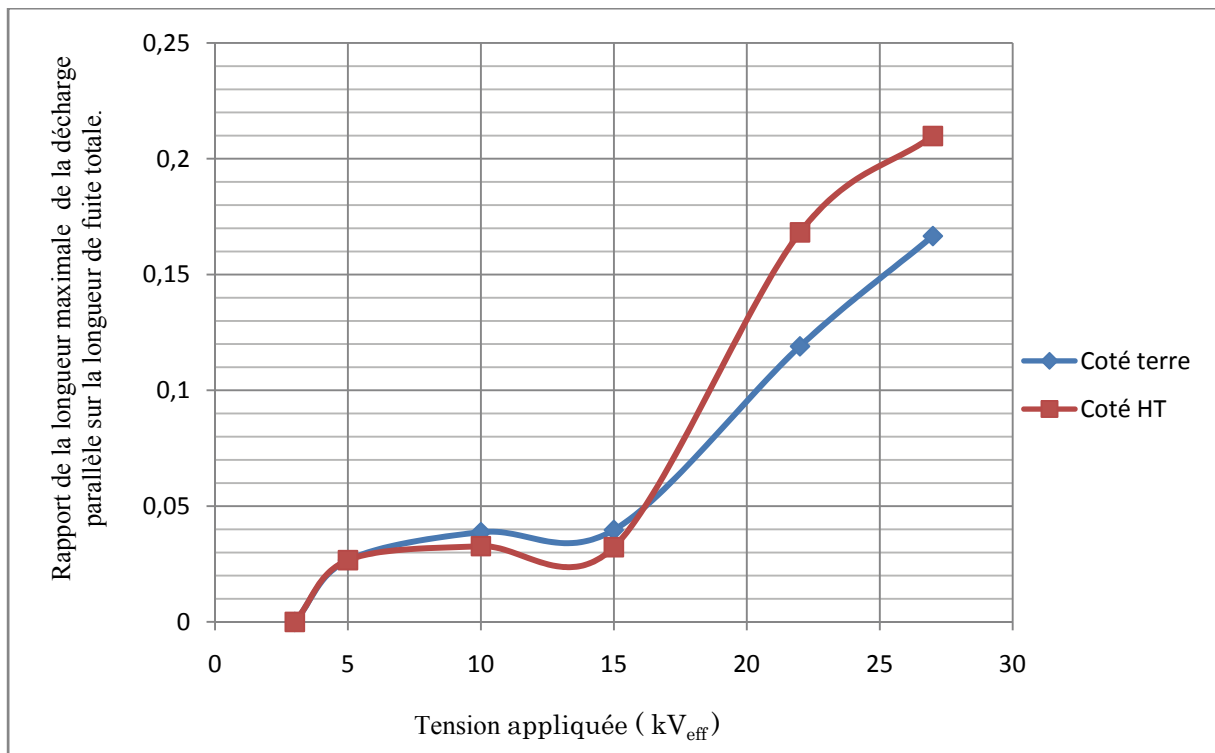


Figure III.39 : Rapport de la longueur maximale de la décharge parallèle sur la longueur de fuite totale en fonction de la tension appliquée, pour coté HT et terre ( $\sigma=710\mu\text{S/cm}$ ).

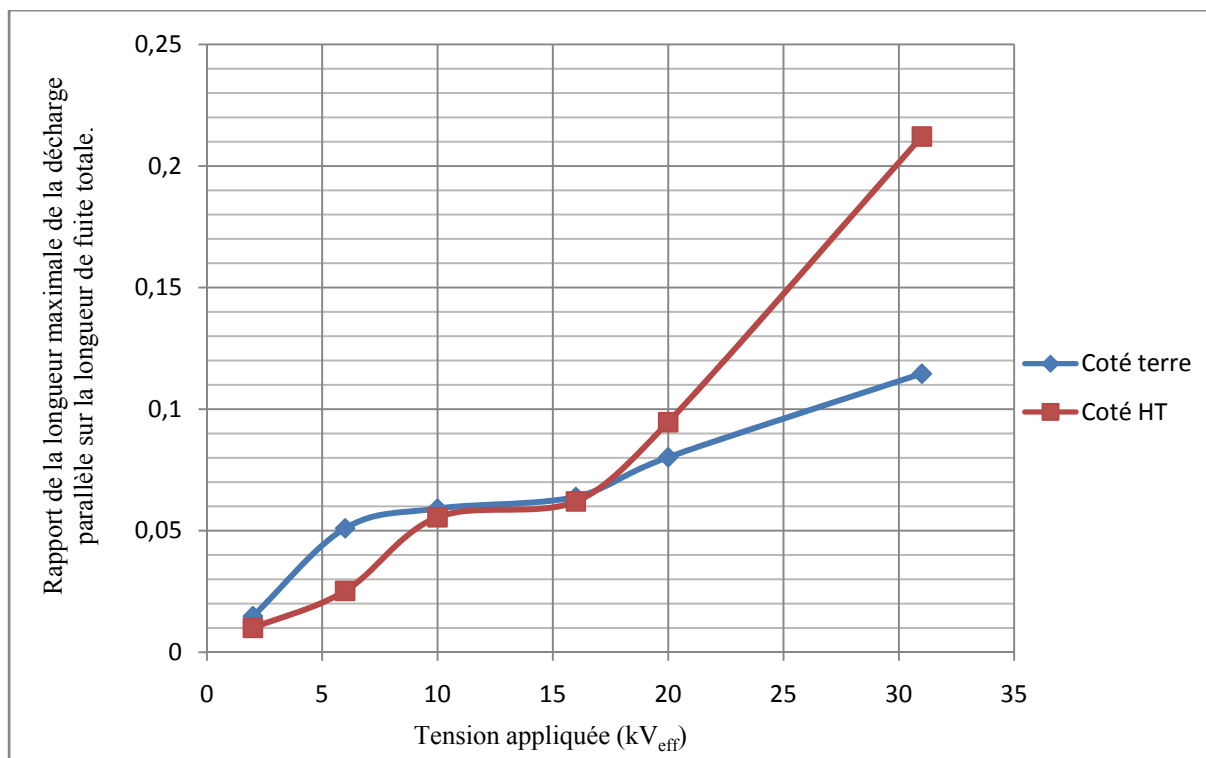
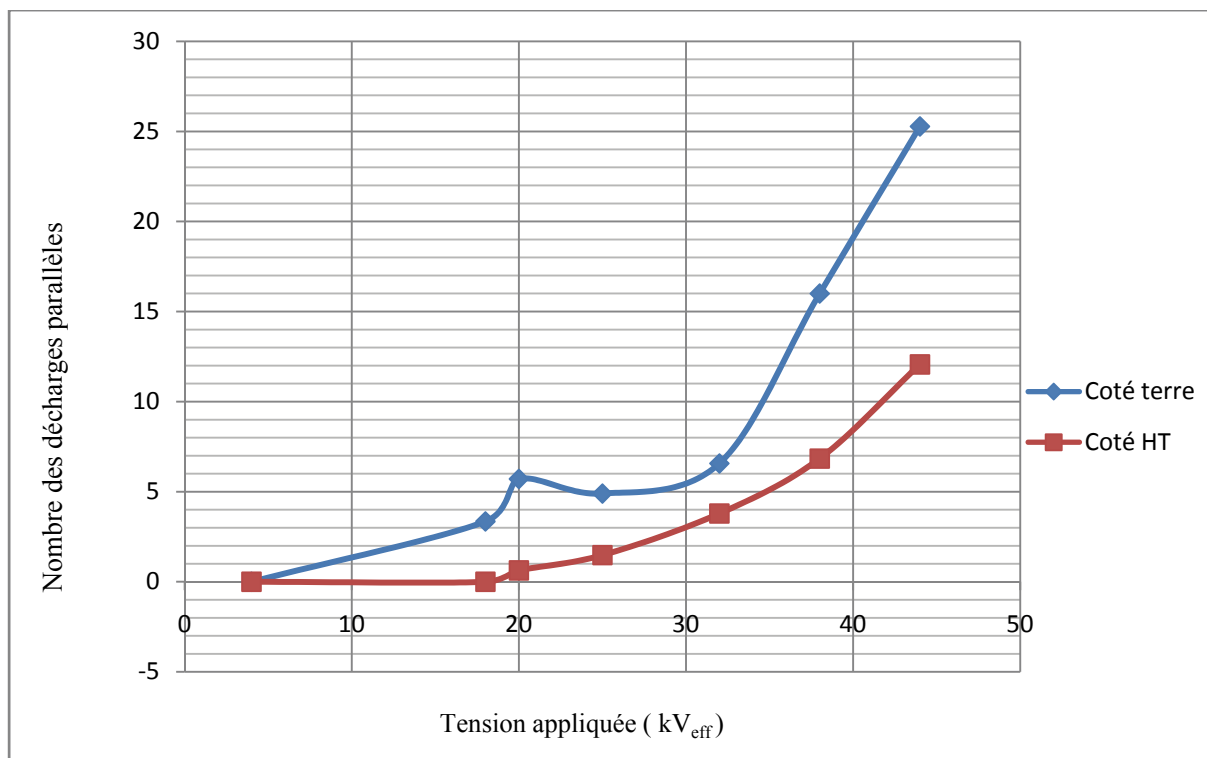


Figure III.40 : Rapport de la longueur maximale de la décharge parallèle sur la longueur de fuite totale en fonction de la tension appliquée, pour coté HT et terre ( $\sigma=1200\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

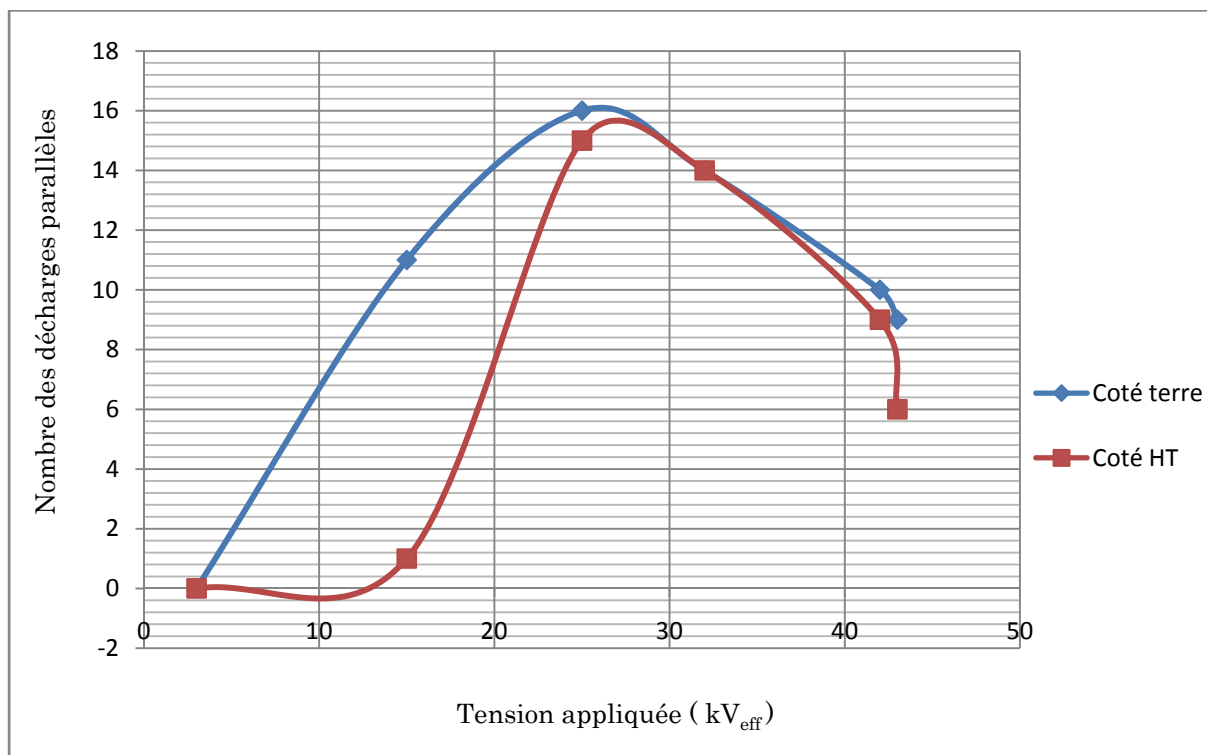
### III.5.3 Relation nombre d'arcs – tension appliquée:

Les figures (III.41 à III.44) donnent l'allure du nombre de décharges parallèles en fonction de la tension appliquée pour les deux cotés de pollution.

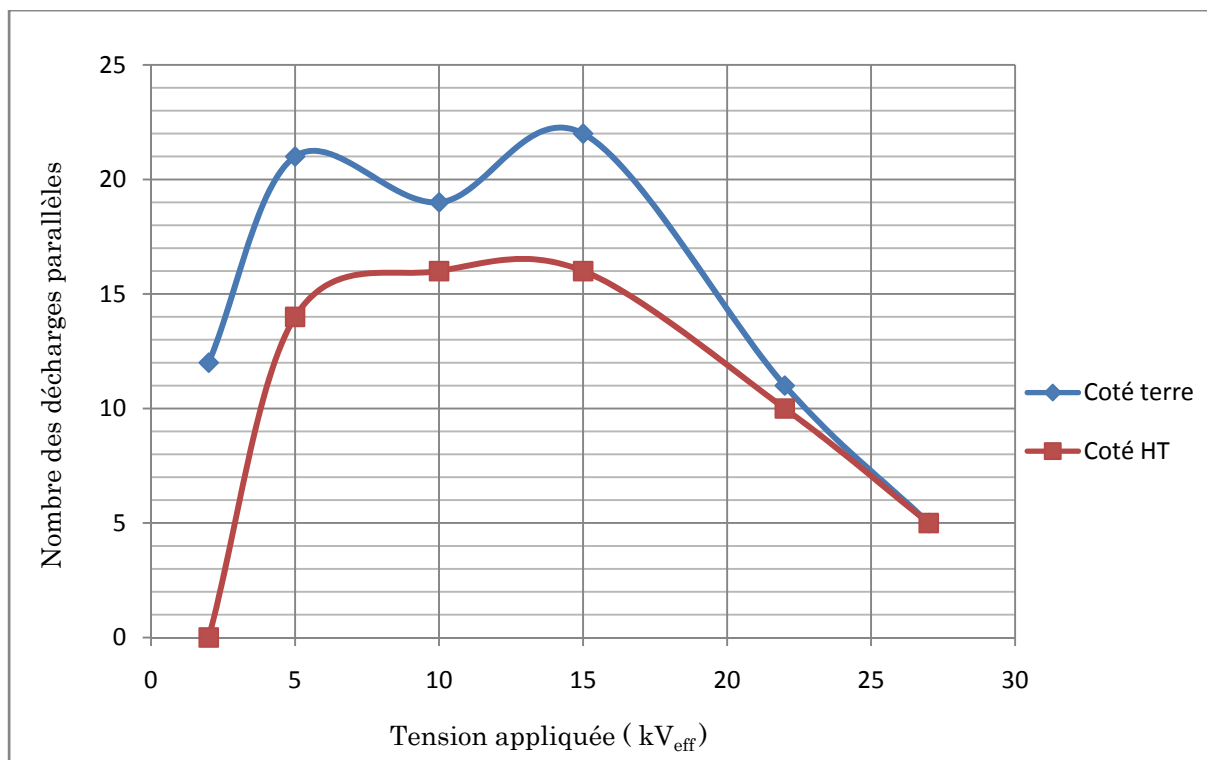
Le nombre de décharges progressant sur la surface isolante augmente avec l'augmentation de la tension appliquée, puis leur nombre diminue petit à petit par la suite et les arcs s'éteignent pour alimenter l'arc principal. Celui-ci devient de plus en plus épais avec l'augmentation du champ électrique et s'allonge jusqu'à atteindre sa longueur critique qui forme la décharge de contournement de l'isolateur.



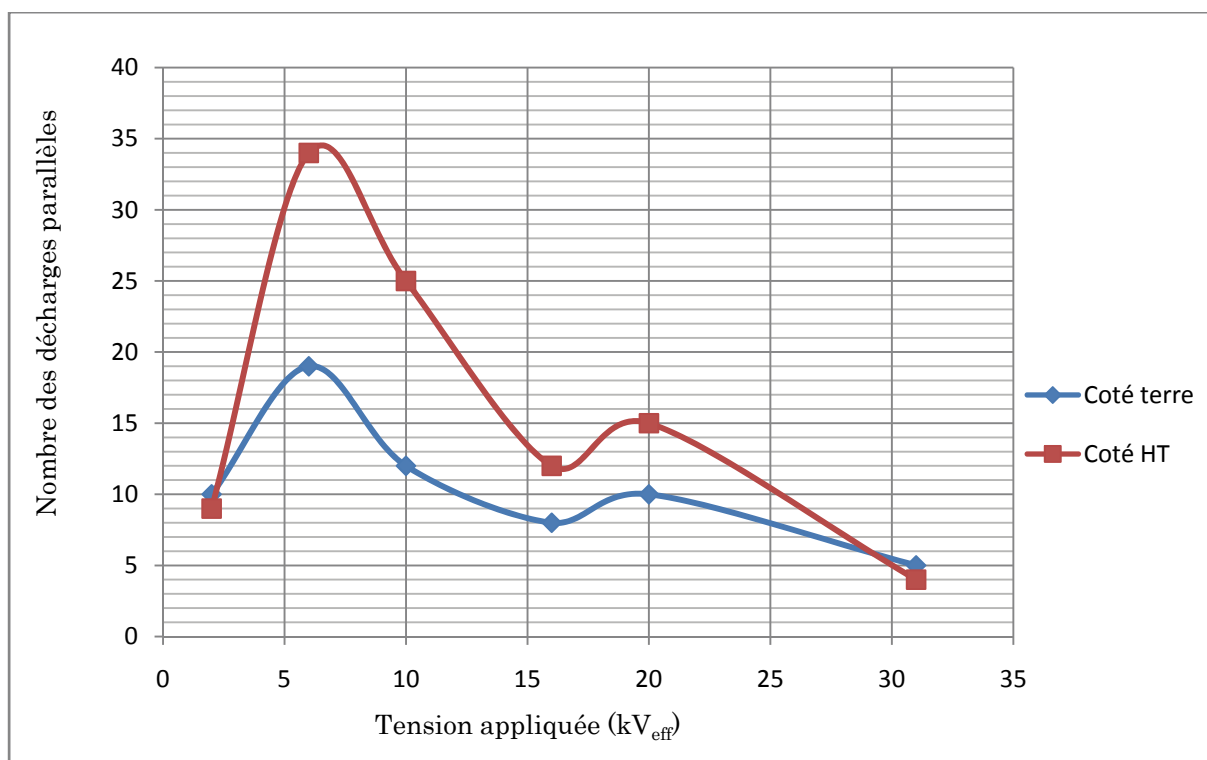
Figures III 41: Nombre des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée ( $\sigma=10\mu\text{S/cm}$ ).



Figures III 42: Nombre des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée ( $\sigma=190\mu\text{S/cm}$ ).



Figures III 43: Nombre des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée ( $\sigma=710\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



Figures III 44: Nombre des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée ( $\sigma=1200\mu\text{S}/\text{cm}$ ).



### III.6 Déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée :

Dans cette partie, l'analyse du déphasage va nous permettre de comprendre l'attitude adoptée par le circuit équivalent de l'isolateur et cela pour différentes répartitions de la pollution à la surface du modèle plan.

#### III.6.1 Cas sec :

Nous remarquons que le déphasage courant-tension augmente pour les faibles niveaux de tensions ( $< 24 \text{ kV}_{\text{eff}}$ ) indiquant que le comportement de l'isolateur est pratiquement capacitif avec un léger effet résistif. Cependant, la valeur du déphasage diminue pour un niveau de tension de  $53 \text{ kV}_{\text{eff}}$  qui nous montre que, pour les grands niveaux de tension, l'effet résistif a tendance à augmenter par rapport à l'effet capacitif. Cela est peut être du à l'augmentation de la température de la plaque qui favorise l'agitation thermique des électrons à la surface du plan et par suite fait augmenter l'effet résistif de l'isolateur plan.

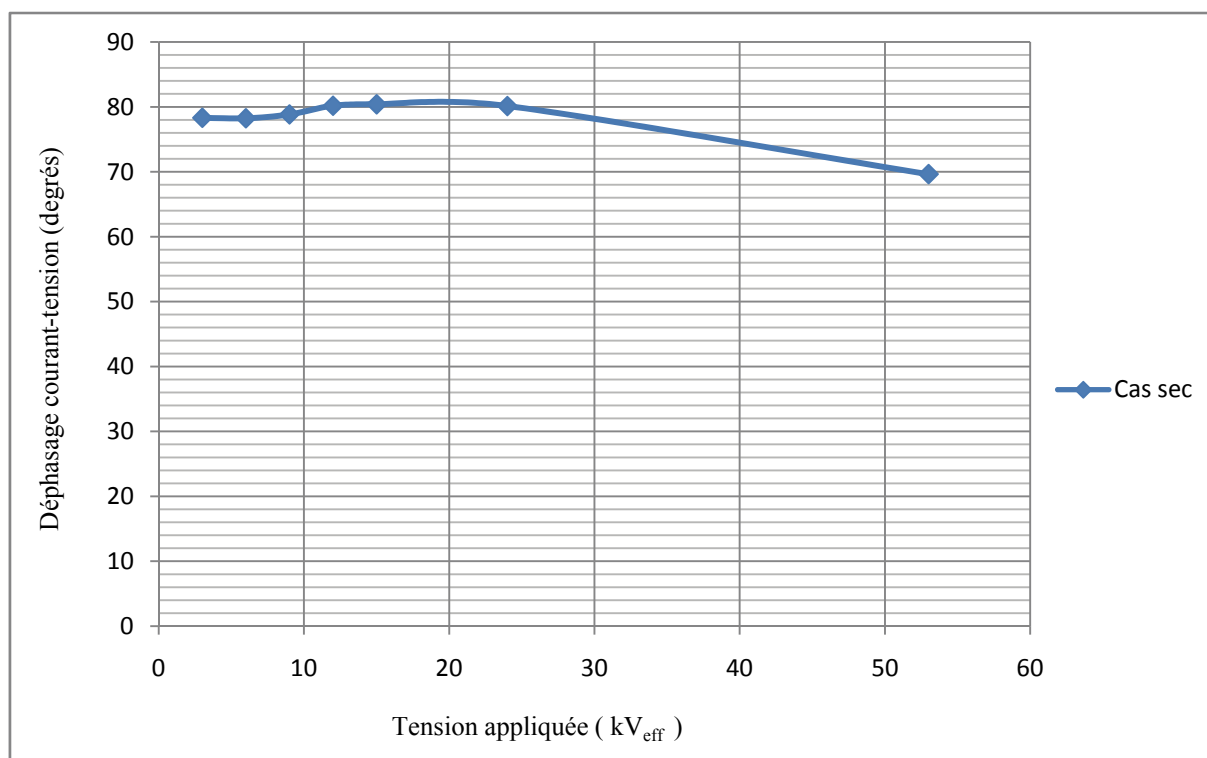


Figure III.45 : Evolution du déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée pour le cas sec.

#### III.6.2 Pollution uniforme:

La variation du déphasage courant-tension en fonction des différentes conductivités est représentée sur la figure III.46.

D'après la figure III.46, nous remarquons que le déphasage courant tension a tendance à diminuer avec l'augmentation de la conductivité du milieu et cela pour 0,01 mS/cm, 0,19 mS/cm et 0,71 mS/cm quelle que soit la tension appliquée. Ceci nous indique que le comportement de l'isolateur est en grande partie résistif avec un très léger effet capacitif. Pour la conductivité 1,2 mS/cm, nous constatons qu'il y a une augmentation du déphasage courant-tension à partir de la tension 9 kV<sub>eff</sub> mais qui reste inférieur à celui obtenu pour la conductivité 0,01  $\mu$ S/cm.

Cette augmentation du déphasage est justifiée par l'assèchement de certaines zones du plan qui ont pour effet d'augmenter l'effet capacitif de l'isolateur.

Pour la conductivité 10,1 mS/cm, nous constatons que la valeur du déphasage courant-tension est plus importante par rapport aux autres conductivités. Ceci montre qu'à partir de la tension 3 kV<sub>eff</sub>, l'activité des décharges est déjà importante, causant l'augmentation des zones sèches sous l'effet de l'augmentation de la température. Cette activité prend de l'ampleur avec l'augmentation de la tension appliquée créant d'avantage de zones sèches qui font augmenter l'effet capacitif et donc diminuer l'effet résistif de la couche polluée.

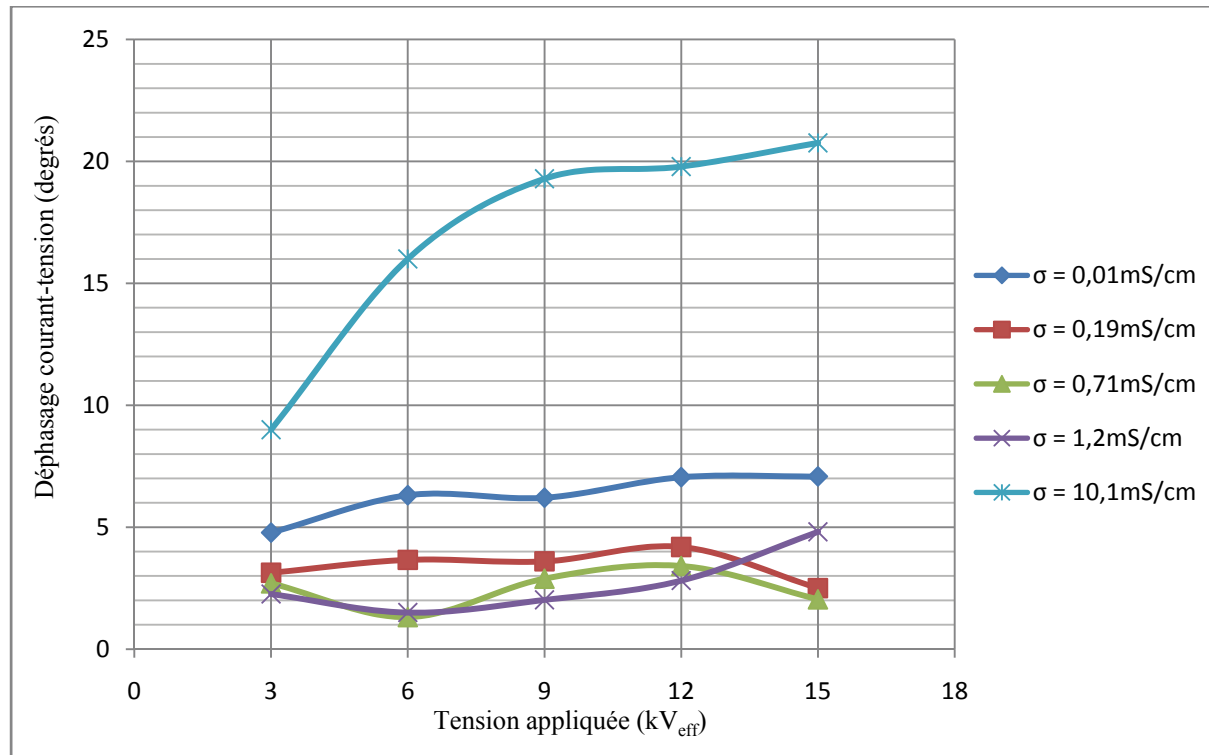


Figure III.46 : Variation du déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités.

### **III.6.3 Pollution non-uniforme :**

#### **III.6.3.1 Couche polluée du côté haute tension :**

Nous remarquons que pour tous les niveaux de tension appliqués, le déphasage diminue avec l'augmentation de la largeur de la couche polluée ; ceci montre que le comportement de l'isolateur est d'avantage résistif que capacitif avec l'augmentation de cette largeur.

Pour les couches polluées 5, 10 et 15 cm, la tension appliquée n'a aucune influence sur le déphasage courant-tension qui a une valeur comprise entre  $76^\circ$  et  $80^\circ$ , ce qui indique que l'isolateur se comporte de façon hautement capacitive avec un léger effet résistif.

Pour une largeur de la couche polluée supérieure à 15 cm, le déphasage courant-tension a tendance à diminuer en fonction de l'augmentation de la tension appliquée ce qui donne un comportement plus résistif de l'isolateur.

Nous constatons aussi que le déphasage courant-tension est le plus faible pour les couches 20 et 25 cm et les tensions 21 et 27 kVeff, ce qui indique un comportement hautement résistif justifié par l'apparition des décharges parallèles qui ont tendance à court-circuiter les intervalles d'air provoquant la diminution de l'effet capacitif de l'isolateur, ce qui n'est pas le cas pour la pollution uniforme.

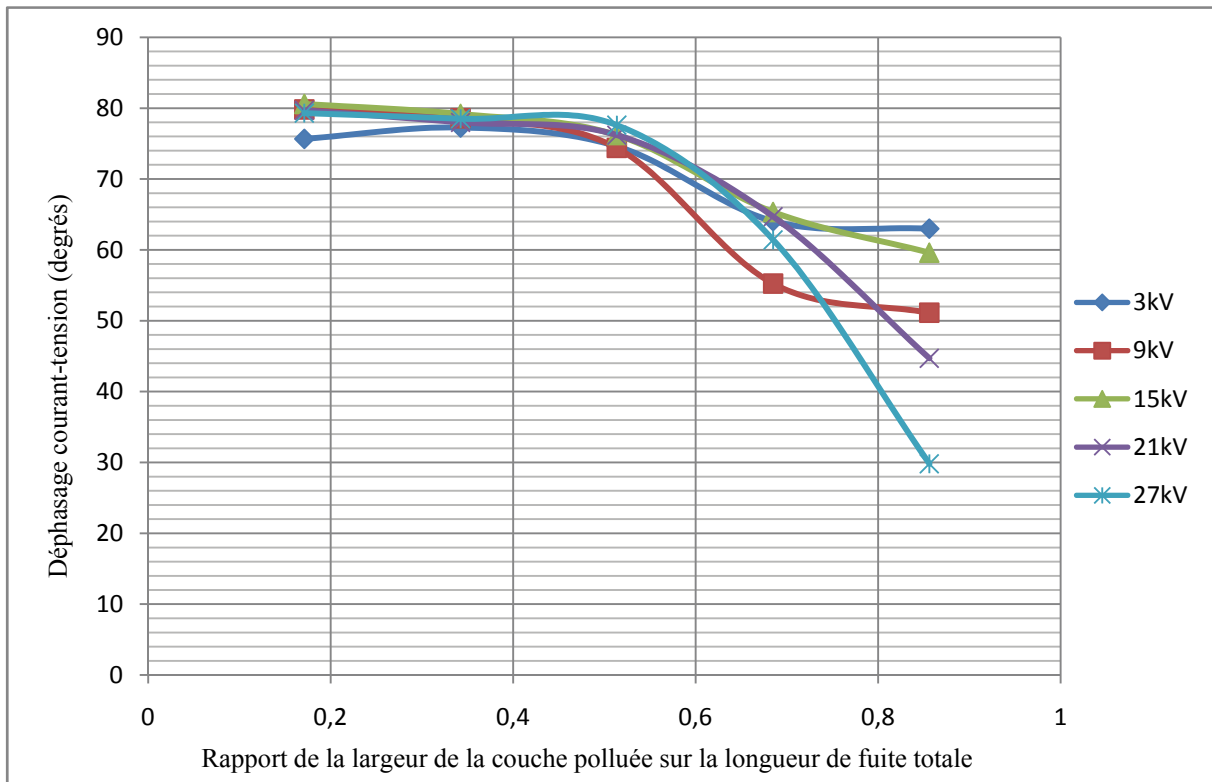


Figure III.47 : Variation du déphasage courant-tension en fonction du rapport de la largeur de la couche polluée sur la longueur de fuite totale pour différentes tensions appliquées, pour la pollution coté haute tension (la conductivité utilisée 1,2 mS/cm ).

### III.6.3.2 Couche polluée du côté terre :

Les résultats obtenus pour cette configuration montrent de la même manière, que le déphasage courant-tension diminue en fonction de l'augmentation de la largeur de la couche polluée ; le déphasage diminue également avec l'augmentation de la tension appliquée qui apparaît clairement à partir de la couche 15 cm. Toutefois, cette valeur du déphasage reste inférieure par rapport à la pollution du côté HT, ce qui signifie que l'isolateur est beaucoup plus résistif dans le cas où la pollution est du côté terre.

L'occurrence des décharges parallèles pour la couche 25 cm et un niveau de tension de 27 kVeff cause une baisse remarquable du déphasage qui montre encore une fois que les décharges augmentent l'effet résistif de l'isolateur et diminuent son effet capacitif.

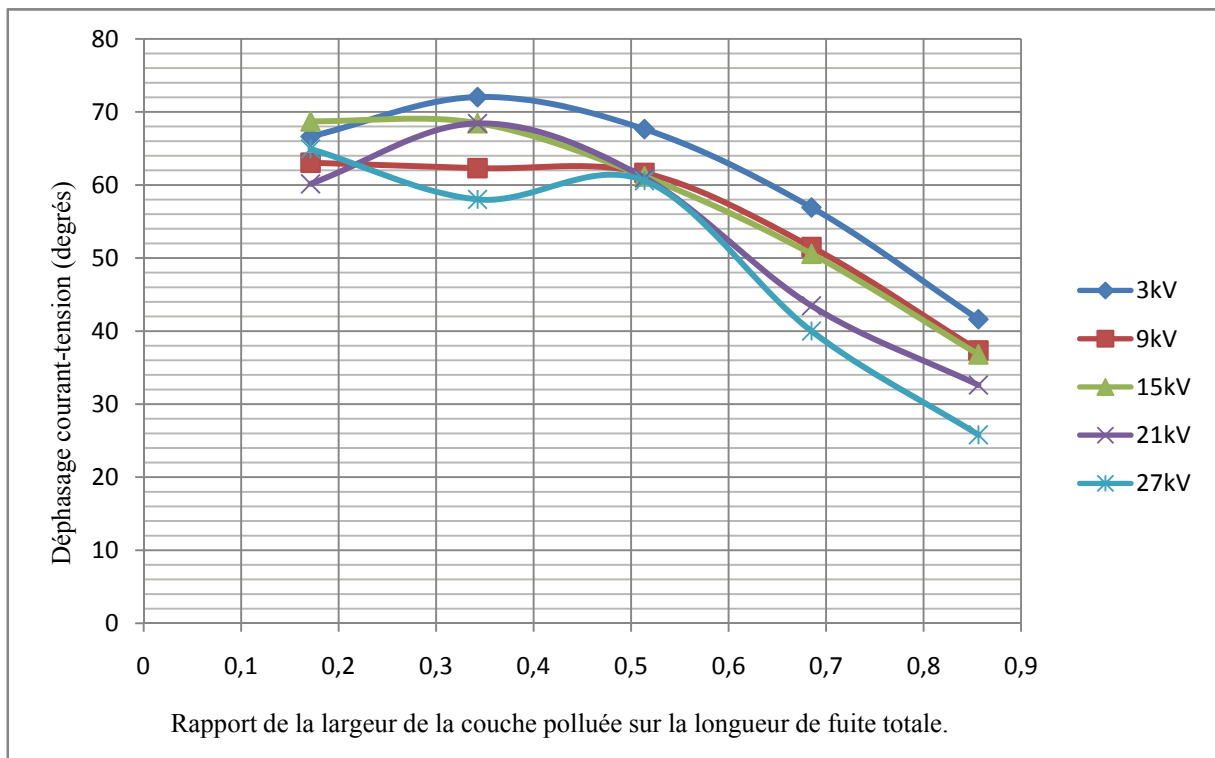


Figure III.48 : Variation du déphasage courant-tension en fonction du rapport de la largeur de la couche polluée sur la longueur de fuite totale pour différentes tensions appliquées, pour la pollution du côté terre (la conductivité utilisée 1,2 mS/cm ).

### III.6.3.3 Couche centrale polluée :

Pour ce cas, le déphasage courant-tension diminue avec l'augmentation de la largeur de la couche centrale polluée qui nous indique une augmentation de l'effet résistif par rapport à l'effet capacitif.

Pour des niveaux de tensions inférieures ou égales à 21 kVeff, l'augmentation de la tension appliquée n'a pratiquement pas d'effet sur le déphasage courant-tension.

Pour le niveau de tension 40 kVeff, la valeur du déphasage diminue considérablement à cause de l'agitation thermique qui augmente l'effet résistif par rapport à l'effet capacitif du modèle plan.

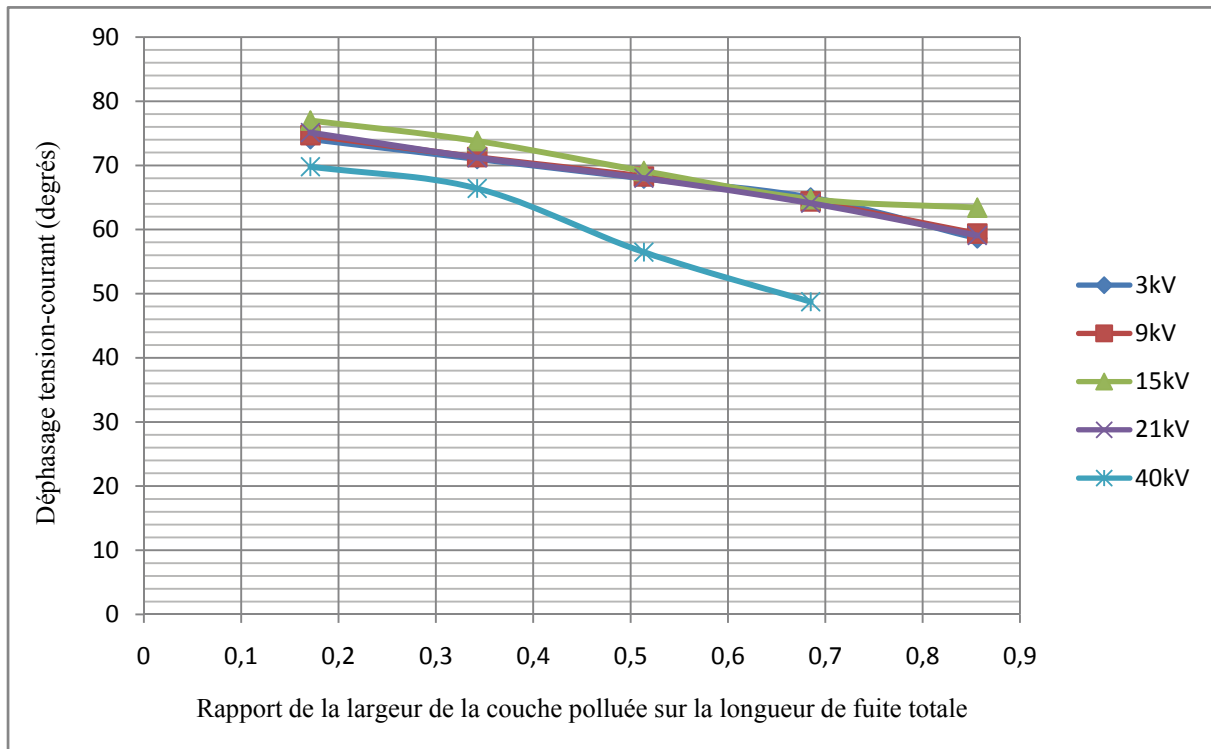


Figure III.49 : Variation du déphasage courant-tension en fonction du rapport de la largeur de la couche polluée sur la longueur de fuite totale pour différentes tensions appliquées pour la pollution centrale (la conductivité utilisée 1,2 mS/cm ).

### III.7 Conclusion :

Nous concluons d'après notre étude que la tension de contournement diminue en fonction de deux paramètres principaux et qui sont :

- La conductivité du milieu qui fait varier la tension de contournement de manière non-linéaire.
- L'augmentation de la largeur de la couche de pollution ainsi que son emplacement fait aussi varier la tension de contournement de manière presque linéaire.

L'analyse du courant de fuite nous permet de conclure que :

- l'amplitude du courant de fuite augmente en fonction de la tension appliquée et de la conductivité du milieu.
- L'augmentation de la largeur de la couche polluée amplifie la valeur du courant de fuite que ce soit pour le cas de la pollution du côté HT, terre ou pour le cas de la couche centrale.

- Nous avons néanmoins observé que la position a peu, ou pas, d'influence sur le courant de fuite pour les cotés haute tension et terre.

Nous concluons que le modèle plan est plus rigide dans le cas où la couche centrale est polluée avec une conductivité volumique de 1,2 mS/cm pour des rapports de la couche polluée sur la longueur de fuite totale, inférieurs ou égaux à 68%. La tension de contournement présente aussi un minimum lorsque 85,6 % de la distance inter-électrode est polluée pour les trois cas de la pollution non-uniforme.

Nous observons une augmentation de la longueur d'arc en fonction de la tension appliquée, cette augmentation est due à la diminution du nombre d'arcs qui alimentent l'arc principale.

L'étude du déphasage courant de fuite-tension appliquée montre pour le cas sec que le modèle plan est caractérisé par un effet capacitif dominant et un faible effet résistif pour des tensions inférieures à 24 kV<sub>eff</sub>.

Pour la pollution uniforme, la valeur du déphasage diminue avec l'augmentation de la conductivité du milieu qui indique que l'isolateur a un comportement de plus en plus résistif. Pour les grandes conductivités (1,2 et 10,1 mS/cm) l'occurrence des décharges parallèles crée des zones sèches qui augmentent l'effet capacitif de l'isolateur. Cette augmentation est plus remarquable avec l'accroissement du niveau de la tension appliquée.

Pour la pollution non-uniforme, l'augmentation de la largeur de la couche polluée pour tous les emplacements de cette couche réduit l'effet capacitif et augmente l'effet résistif de l'isolateur.

La diminution du déphasage courant-tension est moins accentuée dans le cas d'une pollution au centre du plan, ce qui montre un comportement hautement capacitif du modèle et donc une rigidité diélectrique plus grande comparativement aux pollutions coté HT et coté terre. Le cas de la pollution du côté terre représente un cas critique car ce modèle est le moins rigide compte tenu de la faible valeur de son impédance totale équivalente.



# Modélisation empirique



## **IV-1-Introduction :**

Pour pouvoir évaluer la sévérité de pollution de l'isolateur, nous nous basons sur le courant de fuite circulant à travers la couche polluante recouvrant cet isolateur. Pour cela, la détermination de l'expression empirique de l'impédance de l'isolateur pollué est nécessaire pour le calcul du courant de fuite.

D'après la configuration du rapport des impédances couche polluée - couche propre, il nous a paru intéressant d'évaluer, d'une manière tout à fait empirique, les impédances apparentes vues des électrodes en introduisant d'une part les valeurs expérimentales et en adoptant d'autre part des hypothèses simplificatrices pour introduire un modèle empirique simple.

Dans ce qui suit, nous déterminons l'impédance d'un isolateur dont la pollution qui le recouvre est non- uniforme. Nous déterminons d'abord la relation donnant les impédances des deux bandes sèche et humidifiée en fonction de leur largeur, et par la suite nous déduisons l'impédance totale de l'isolateur. La détermination de cette impédance nous permet de calculer les autres paramètres (tension reportée, courant de fuite) [8, 28,40, 41].

L'intérêt de ce procédé est d'identifier l'isolant, afin de prévoir le comportement de ce dernier.

## **IV-2 Impédance empirique :**

### **IV-2-1 Hypothèses et choix des données :**

- Nous pouvons considérer l'impédance de la couche de pollution comme une résistance pure [8, 20, 42,43], en se basant sur le fait que le courant dans une telle configuration est résistif.
- La valeur de l'impédance de la surface propre ne dépend pas de la position de la couche de pollution. Cette hypothèse découle directement des résultats montrant que la position n'a pas d'influence sur le courant de fuite lorsque la tension est faible (3 kV) [8].
- Nous considérerons la distribution de la pollution parfaitement uniforme, de même répartition sur toute la surface polluée.

- On choisit une conductivité assez élevée (1,2mS/cm), pour considérer que l'impédance de la couche polluante est négligeable devant celle de la zone sèche.
- On choisit le niveau le plus faible de la tension appliquée (3 kV), afin d'éviter le régime non linéaire (régime critique) provoqué par les tensions élevées.

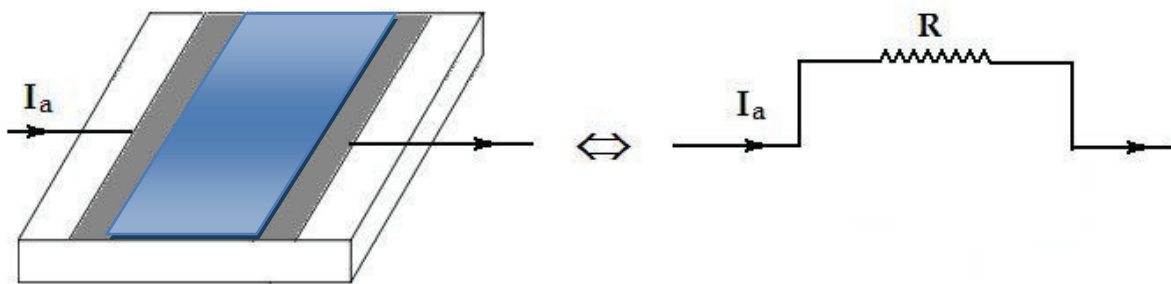


Figure IV.1 : Impédance de la couche de pollution considérée comme une résistance pure.

#### IV-2-2 Impédance totale mesurée de la plaque totalement propre $Z_i$ :

Dans ce cas, nous déduisons la valeur de l'impédance de la plaque lorsqu'elle est en état propre. Nous analysons les caractéristiques expérimentales courant-tension relatives aux essais dans le cas sec afin d'étudier le comportement de la plaque propre en l'absence de la pollution.

L'amplitude du courant de fuite croît d'une manière linéaire en fonction de la tension (figure IV.2), ce qui nous a permis de déterminer l'impédance équivalente  $Z_i$  de la plaque propre dans les limites des tensions utilisées.

Ainsi, nous constatons que contrairement à ce qui est parfois admis, la surface du verre ne présente pas forcément un caractère capacitif. Certains auteurs, d'ailleurs, considérant la surface du verre comme une résistance où sa valeur est située entre  $10^6$  et  $10^{13} \Omega / \text{cm}$ . On peut alors expliquer que la contribution capacitive de l'isolateur utilisé soit relativement faible [8,28].

Le rapport  $I/U$  illustre l'admittance (et donc l'inverse d'une impédance) apparente du système, qui reste pratiquement constante pour les différents niveaux de tensions appliqués.

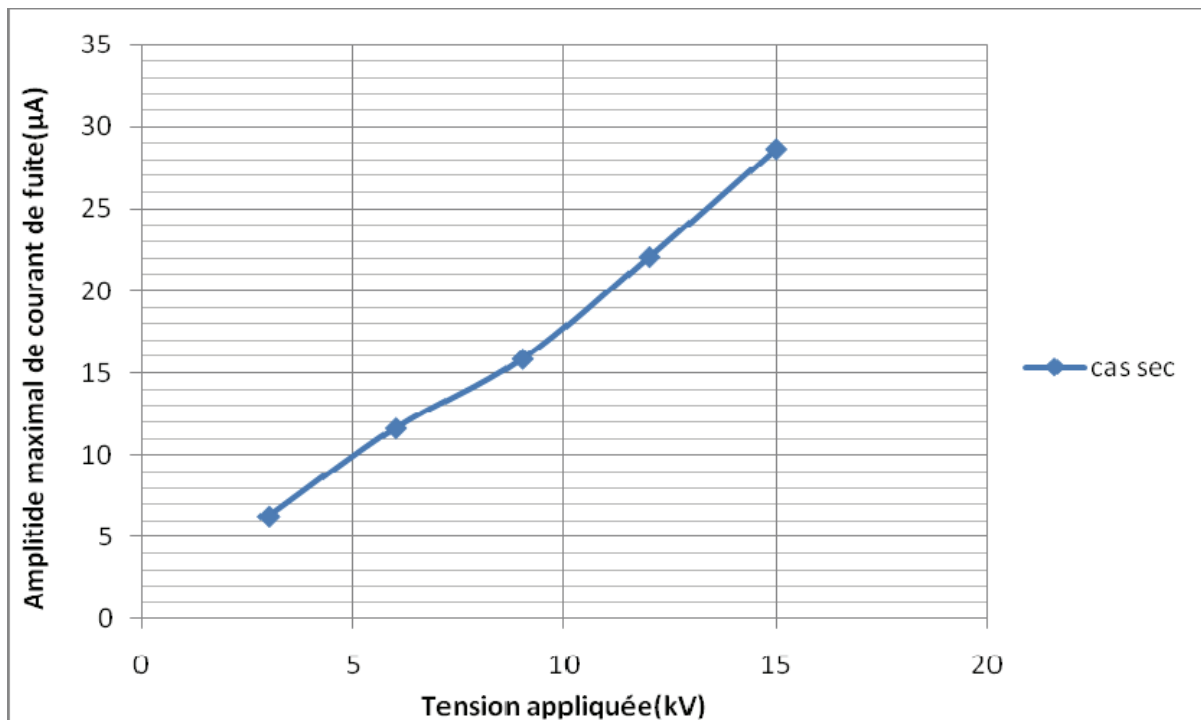


Figure IV.2 : Variation de l'amplitude du courant de fuite pour différents niveaux de tension appliqués. Cas sec.

Nous avons choisi le niveau le plus faible de la tension appliquée (3 kV) pour éviter le régime non- linéaire (régime critique) provoqué par les tensions élevées. Donc d'après la formule :

$$Z_i = U/I$$

On trouve :

$$Z_i = 4,81 \times 10^8 \Omega$$

#### IV-2-3 Impédance de la couche propre d'une plaque sous pollution non uniforme $Z_c$ :

En analysant les caractéristiques expérimentales courant-tension (fig. IV.2), nous pouvons déduire l'impédance moyenne  $Z_c$  de la couche propre en fonction de la largeur de la couche polluante pour les trois configurations considérées : pollution côté haute tension, pollution côté terre et pollution centrale.

On choisit la formule d'équation correspondante en fonction de la quantité (L-x) pour obtenir toujours une variation de la valeur de l'impédance pour différentes valeurs de la largeur de la couche polluante. Pour cela, on propose l'équation suivante (cette formule est utilisée par d'autres chercheurs [8, 20, 28]).

$$Z_c(X) = Z_i \left[ \frac{(L-X)}{L} \right]^N \quad (\text{IV.1})$$

Avec :

$Z_c(X)$  : Impédance empirique de la couche propre en fonction de la largeur de la couche polluée.

$Z_i$  : Impédance mesurée de la plaque totalement propre, lorsqu'il n'y a pas de pollution. Celle-ci a été évaluée à :  $Z_i = 4,81 \times 10^8 \Omega$  (voir partie IV.2.2).

$L$  : Distance inter-électrodes = 29,2 cm (modèle 1512 L).

$X$  : Largeur de la couche de pollution en cm.

$N$  : Exposant empirique dont la valeur déterminée à partir du graphe de la variation de l'impédance expérimentale en fonction de la largeur de la couche polluante pour une conductivité et tension appliquée données.

D'après la figure IV.3, nous déterminons la constante  $N$ , de telle façon à obtenir la courbe la plus proche possible des résultats expérimentaux, c'est-à-dire celle donnée par la formule(IV.1).

Tension appliquée (3kV)	0 cm	X=5cm	10 cm	15cm	20 cm	25 cm
Courant de fuite ( $\mu\text{A}$ )	6,23	7,5	8,08	10	14	19,16

Tableau 1 : Variation courant de fuite - largeur de la couche polluante pour une valeur de tension appliquée de 3kV.

Donc :

Tension appliquée (3kV)	0 cm	X=5cm	10 cm	15cm	20 cm	25 cm
Impédance apparente(M $\Omega$ )	481	400	370	300	214	156

Tableau 2 : Variation de l'impédance apparente-largeur de la couche polluante pour une valeur de tension appliquée de 3kV.

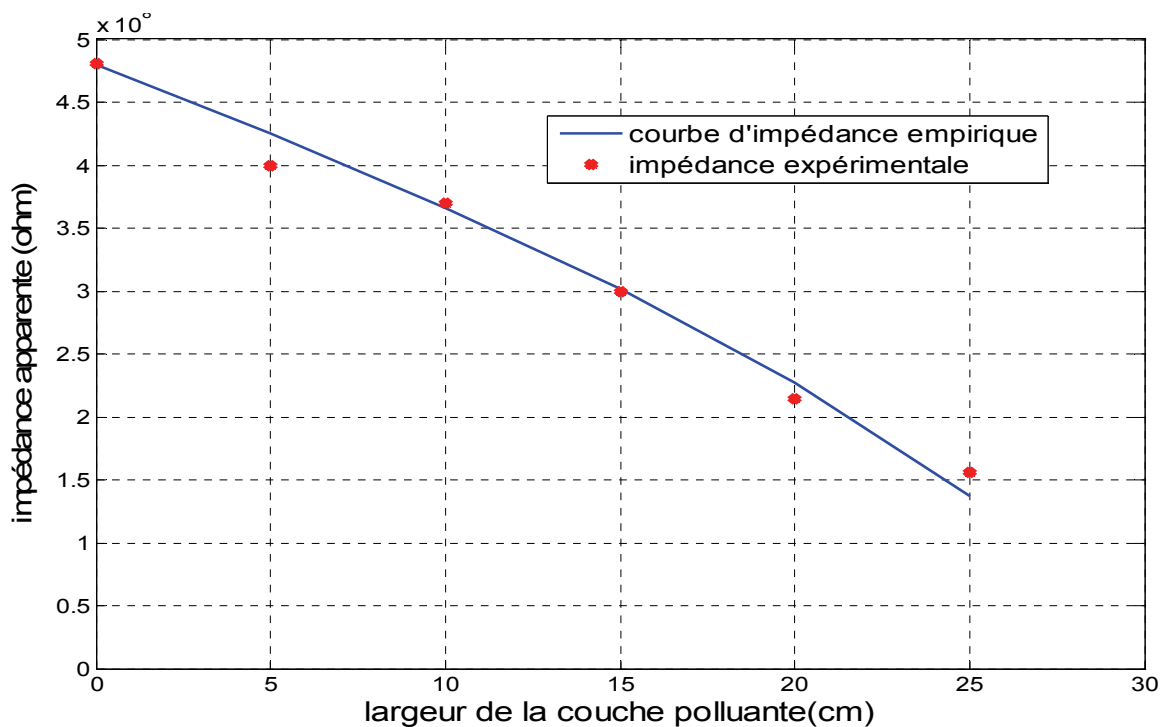


Figure IV.3 : Impédance expérimentale et empirique de la zone sèche d'une plaque partiellement polluée en fonction de la largeur de la couche polluée.

La valeur de  $N$ , dans ce cas, est égale à 0,647.

D'où :

$$Z_c(X) = Z_i \left[ \frac{(L - X)}{L} \right]^{0,647}$$

- **Détermination de l'erreur entre les valeurs expérimentales et empiriques:**

On calcule l'erreur correspondante à partir des graphes de la figure IV.1 et on la représente sur la figure suivante (IV.4), selon la formule (IV.2):

$$e(\%) = 100(Z_c - Z_i)/Z_i \quad (IV.2)$$

D'après la figure IV.4 on remarque que l'erreur sur l'impédance est maximale ( $e \geq 12\%$ ) lorsque la largeur de la couche polluée est maximale en dépassant les 80% de la distance totale inter - électrode. [8, 28].

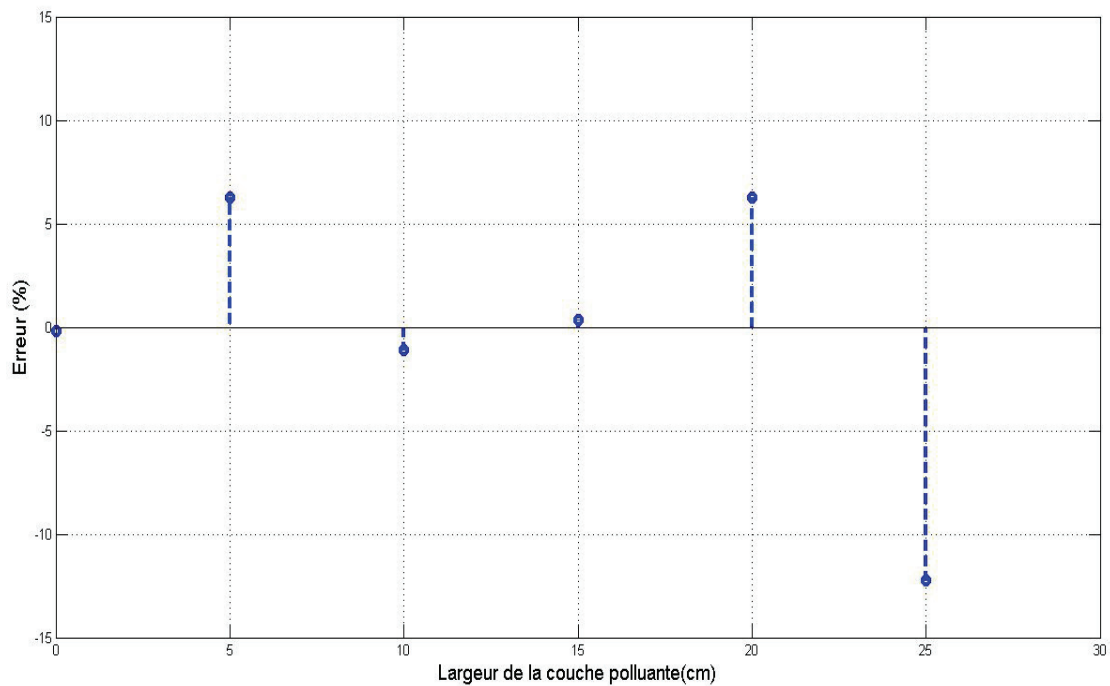


Figure IV.4 Erreur relative sur la zone sèche en fonction de la largeur de la couche polluante.

#### IV-2-4 Détermination de l'impédance de la couche polluée R:

En se basant sur le fait que le courant dans une telle configuration (c'est à dire couche polluée) est plutôt résistif [42,43], nous pouvons considérer l'impédance de la couche de pollution comme une résistance R. Ainsi, en considérant une répartition linéaire de la pollution, de même répartition sur toute la surface polluée, ceci afin de faciliter les calculs. La résistance est de façon générale donnée par l'équation (IV.3):

$$R = \rho \frac{l}{s} = \frac{1}{\sigma} \times \frac{l}{s} \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

$R$  : La Résistance.

$\rho$  : La Résistivité de la couche de pollution.

$l$  : La largeur de la couche de pollution.

$\sigma$  : Conductivité de la couche de pollution.

$s$  : Surface de la section considérée.

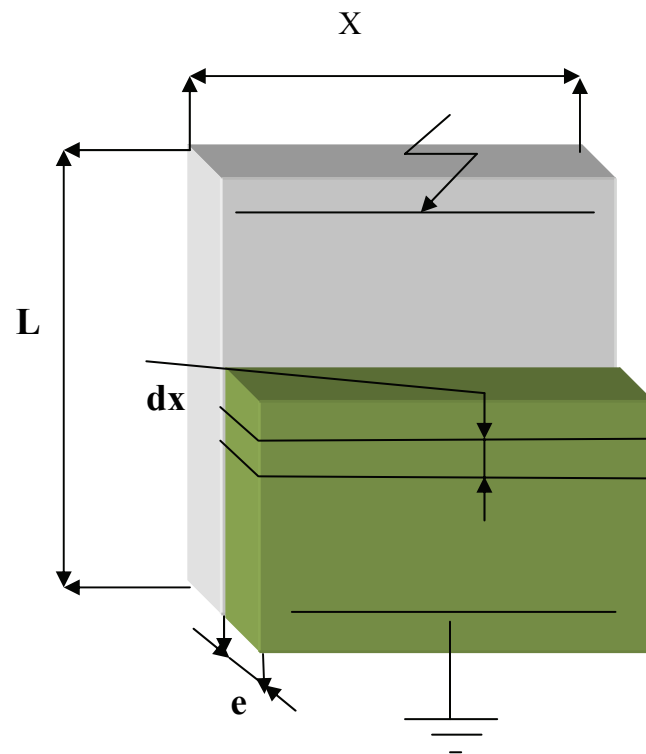


Figure IV.5 : Représentation d'une coupe verticale du modèle.

D'après le cas de notre modèle, on peut déduire d'après la figure IV.5 et la formule IV.3 la variation élémentaire  $dR$  de la résistance en fonction de la largeur  $dx$  de pollution:

$$dR = \frac{1}{\sigma} \times \frac{dx}{e \times L} \quad (\text{IV.4})$$

$e$  : Epaisseur moyenne de parcours du courant.

On applique cette équation (IV.4) pour les trois cas de pollutions: pollution côté haute tension, pollution côté terre et pollution centrale.

- **Pollution coté haute tension :**

Pour la pollution coté haute tension, d'après la configuration présentée à la figure (IV.6),

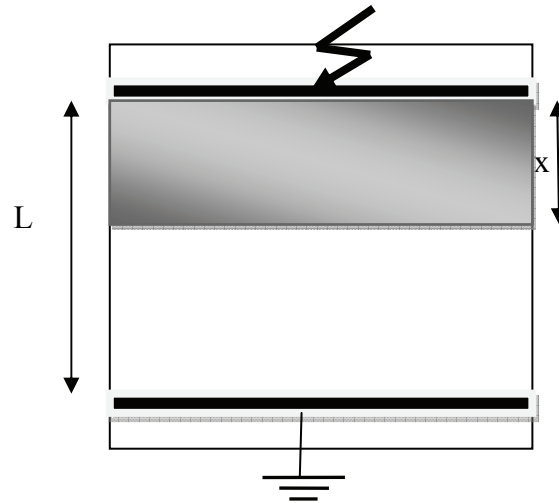


Figure IV.6 : représentation du modèle avec les limites de la couche de pollution.

L'équation IV.4 devient 
$$\int dR = \int_0^x \frac{1}{\sigma} \times \frac{dx}{e \times L} \quad (\text{IV.5})$$

Donc :

$$R(x) = \frac{1}{e} \times \left( \frac{x}{\sigma \cdot L} \right) \quad (\text{IV.6})$$

- **Détermination de la constante  $K=1/e$  :**

$K$  est une constante déduite à partir des expériences. En effet, nous pouvons l'obtenir à partir d'essais de la configuration uniforme de pollution ( $K=1/e$ ).

- Nous avons choisi les essais de conductivité :  $10 \mu\text{S/cm}$ , pour éviter le régime critique imposé par les grandes conductivités.
- Nous remarquons que le courant comporte également des harmoniques et présente un caractère résistif. Ce résultat a d'ailleurs été établi par nombre d'auteurs [8, 44].



Nous représentons la courbe caractéristique courant-tension de la conductivité considérée (Figure IV.7).

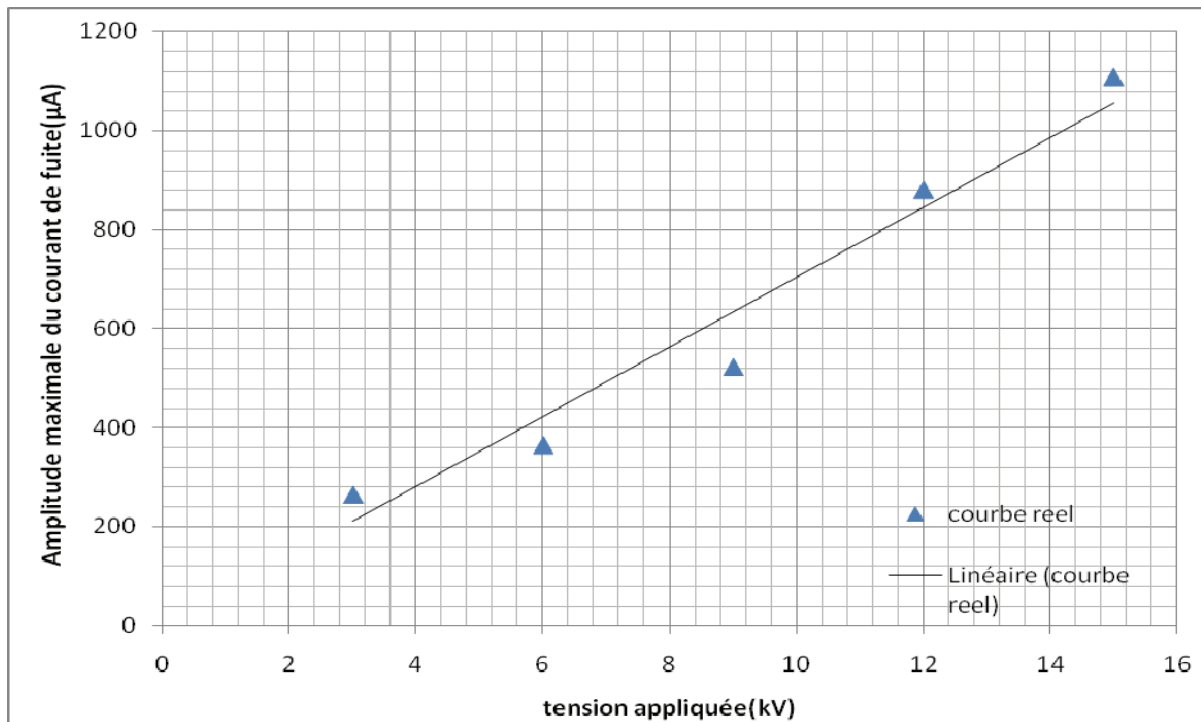


Figure IV.7 : Caractéristique courant-tension appliquée pour la conductivité de  $10\mu\text{S}/\text{cm}$ .

On a :

- Pour  $\sigma = 10 \mu\text{S}/\text{cm} \rightarrow R_{10}(L=x) = 14 \text{ M}\Omega$ .

$R_{10}$  : La résistance de la plaque totalement polluée pour une conductivité de  $10\mu\text{S}/\text{cm}$ .

On a alors :

$$R(X) = \left( \frac{K}{\sigma \cdot L} \right) X$$

Pour une conductivité  $\sigma$  donnée :

$$R_{\sigma}(x=L) = R_{10}(x=L) \cdot (10/\sigma) = 140 \cdot 10^6 / \sigma [\Omega]; \text{ s } [\mu\text{S}/\text{cm}].$$

D'où :

$$K = 140 \cdot 10^6 [\Omega \cdot (\mu\text{S}/\text{cm})]$$

- **Pollution coté terre et couche centrale:**

Pour la pollution cotée terre et couche centrale, d'après les configurations présentés sur les figures suivantes :

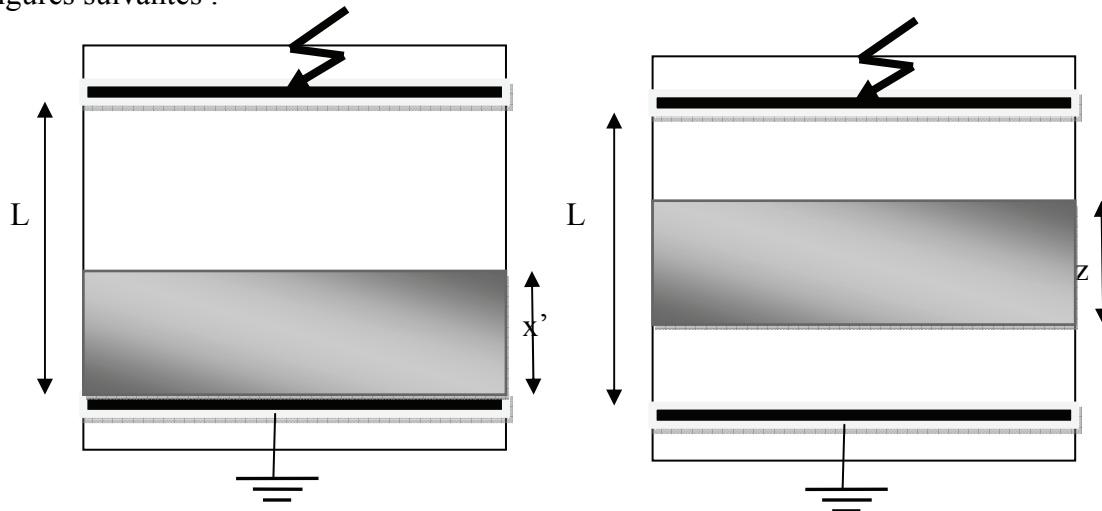


Figure IV.8 : représentation du modèle avec les limites de pollution (coté terre et couche centrale).

L'équation IV.4 devient :

$$\int dR = \int_{L-x'}^L \frac{1}{\sigma} \times \frac{dx}{e \times L} \quad \text{Coté terre}$$

$$\int dR = \int_{\frac{1}{2}(L-z)}^{\frac{1}{2}(L+z)} \frac{1}{\sigma} \times \frac{dx}{e \times L} \quad \text{Couche centrale}$$

Donc : pour les trois configurations, on a la même formule.

#### IV.2.5 Impédance totale de la couche polluée et de la zone propre $Z_T$ :

L'impédance totale vue des électrodes est considérée comme étant le résultat de l'impédance de la zone propre en série avec l'impédance de la zone polluée [28]. Donc, sachant que l'impédance de la couche propre et la résistance de la couche polluée sont en série entre les électrodes, en prenant la somme des deux impédances et suivant la première hypothèse, nous obtenons l'impédance totale  $Z_T$ :

$$Z_T(x) = R(x) + Z_C(x)$$

Donc :

$$Z_T(X) = \frac{K}{\sigma.L} X + Z_i \left[ \frac{(L - X)}{L} \right]^{0,647} \quad (\text{IV.5})$$

### IV.3 Courant de fuite empirique:

Une des méthodes utilisées pour le contrôle du degré de pollution d'un isolateur est la mesure de courant de fuite : celui-ci dépend de l'impédance globale apparente de l'isolateur,

Selon nos essais, nous observons que le modèle se comporte de deux façons différentes à cause des contraintes appliquées, d'où deux comportements distincts du modèle [8]:

- régime ohmique, lorsque les conditions de pollution sont encore non critiques
- régime non linéaire, n'obéissant plus à la loi d'Ohm.

Pour déterminer la valeur du courant de fuite théorique, il suffit d'écrire :

$$U = Z_T . I \Rightarrow I = U / Z_T$$

$$\text{Tel que: } Z_T(X) = \frac{K}{\sigma.L} X + Z_i \left[ \frac{(L - X)}{L} \right]^{0,647} \quad (\text{IV.5})$$

D'ou:

$$I(X) = \frac{U}{\frac{K}{\sigma.L} X + Z_i \left[ \frac{(L - X)}{L} \right]^{0,647}} \quad (\text{IV.6})$$

Avec :

$$K=140.10^6 [\Omega. (\mu\text{S/cm})]$$

$$\sigma = [10, 190, 1200, 10100] ; (\mu\text{S/cm})$$

$$L = 29,2 \text{ cm}$$

$$Z_i = 4,81 \times 10^8 \Omega.$$

$$X = [0, 5, 10, 15, 20, 25] ; (\text{cm})$$

### IV.3.1 Evolution du courant de fuite empirique en fonction de la largeur de la couche polluée :

Nous donnons les graphes (IV.10 à IV.13) représentant la variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluée, avec quatre conductivités (10, 190, 1200, 10100  $\mu\text{S/cm}$ ), et cinq niveaux de tension appliquée (3, 9, 15, 21, 27kV).

D'après les résultats obtenus, l'amplitude du courant de fuite augmente en fonction de la largeur de la couche polluée et du niveau de tension appliqué. Cette amplitude présente un maximum pour un niveau de tension égal à 27 kV et pour 85,6 % de la distance inter-électrode polluée, qui représente le cas le plus favorable à la formation de l'arc électrique. L'augmentation de l'amplitude du courant de fuite peut être expliquée par la réduction significative de l'impédance totale équivalente du milieu proportionnellement à l'élargissement de la couche polluée.

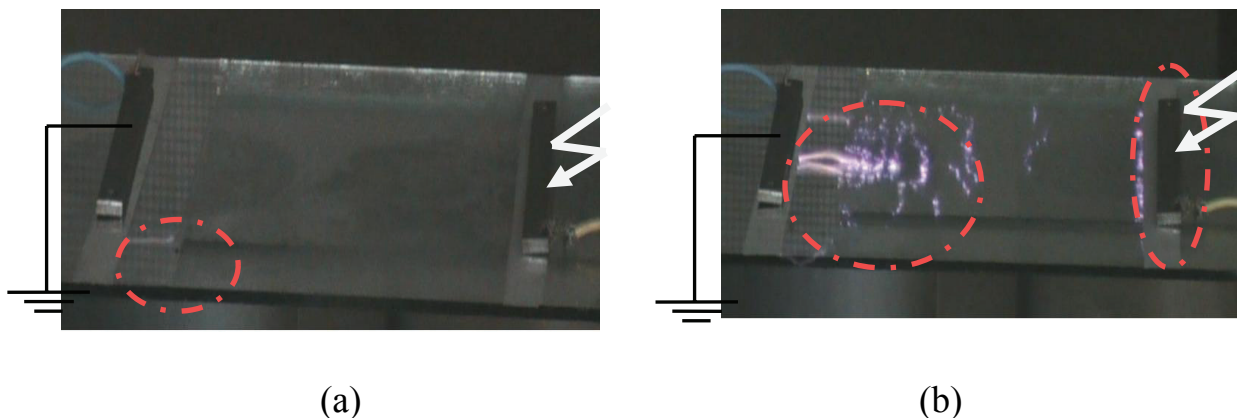


Figure IV.9: Comportement de l'isolateur plan pour une largeur de 25 cm de la couche polluée du côté HT : (a) niveau 21 kVeff, (b) niveau 27 kVeff.

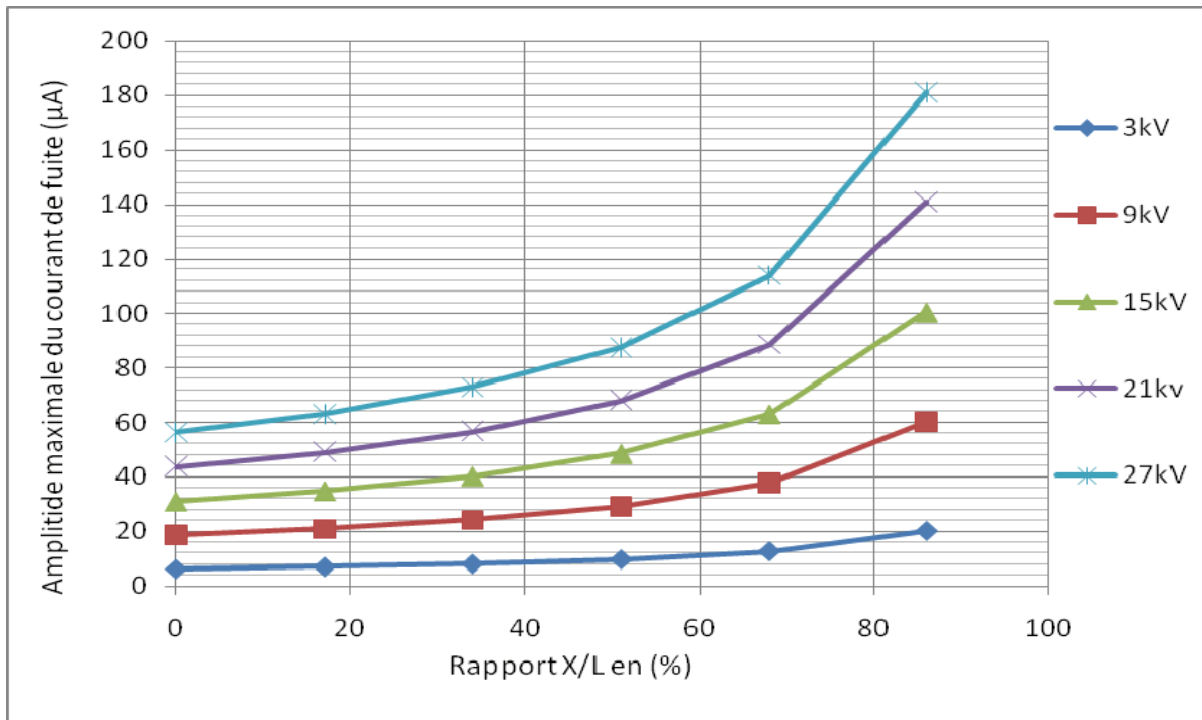


Figure IV.10 : Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite empirique en fonction du rapport X/L pour différentes valeurs de la tension appliquée ( $\sigma=10 \mu\text{S/cm}$ ).

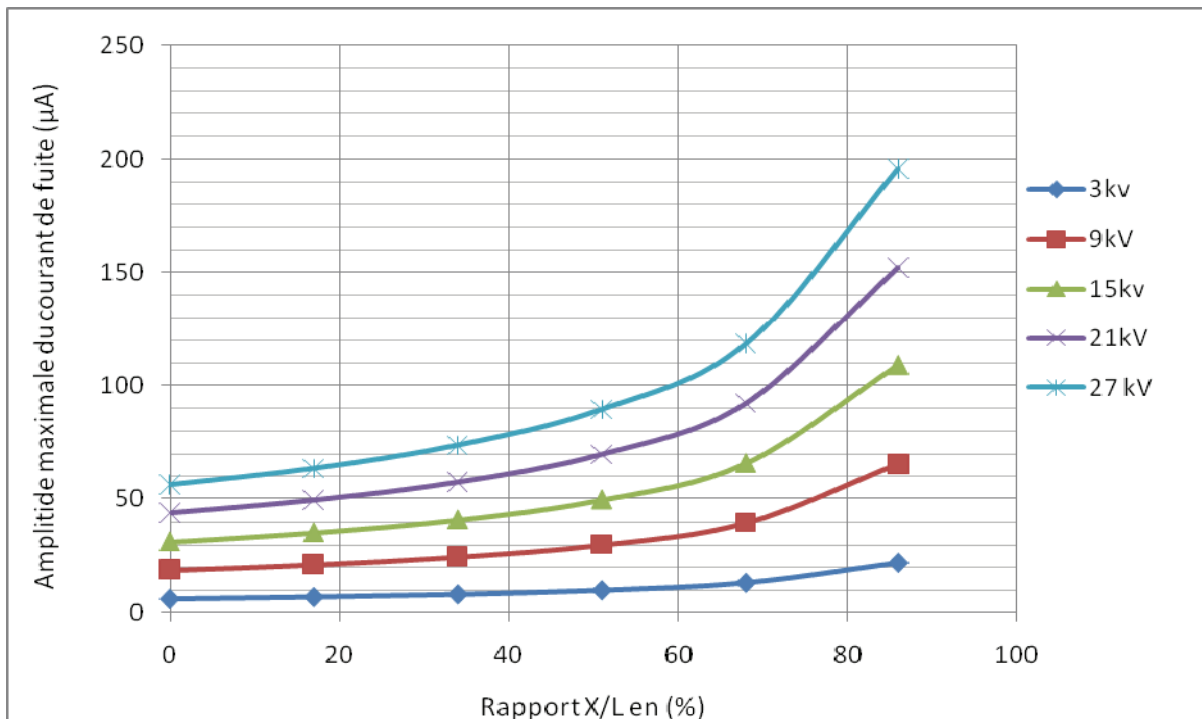


Figure IV.11 : Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite empirique en fonction du rapport X/L pour différentes valeurs de la tension appliquée ( $\sigma=190 \mu\text{S/cm}$ ).

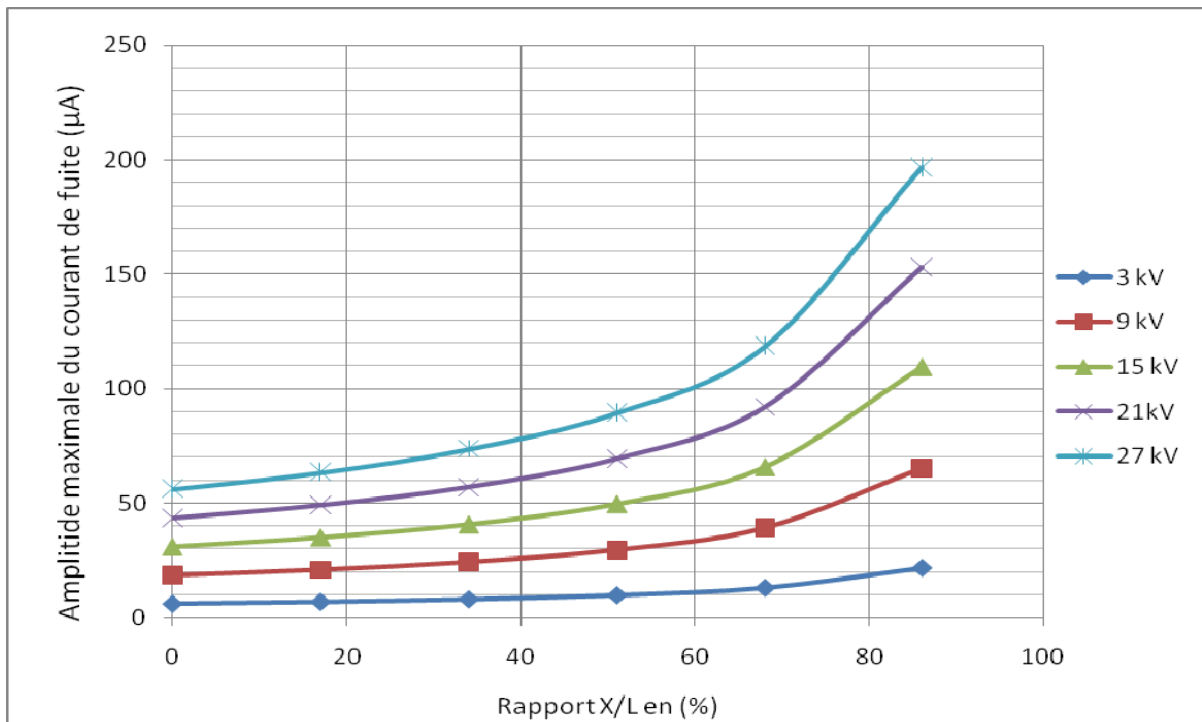


Figure IV.12 : Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite empirique en fonction du rapport X/L pour différentes valeurs de la tension appliquée ( $\sigma=1200 \mu\text{S/cm}$ ).

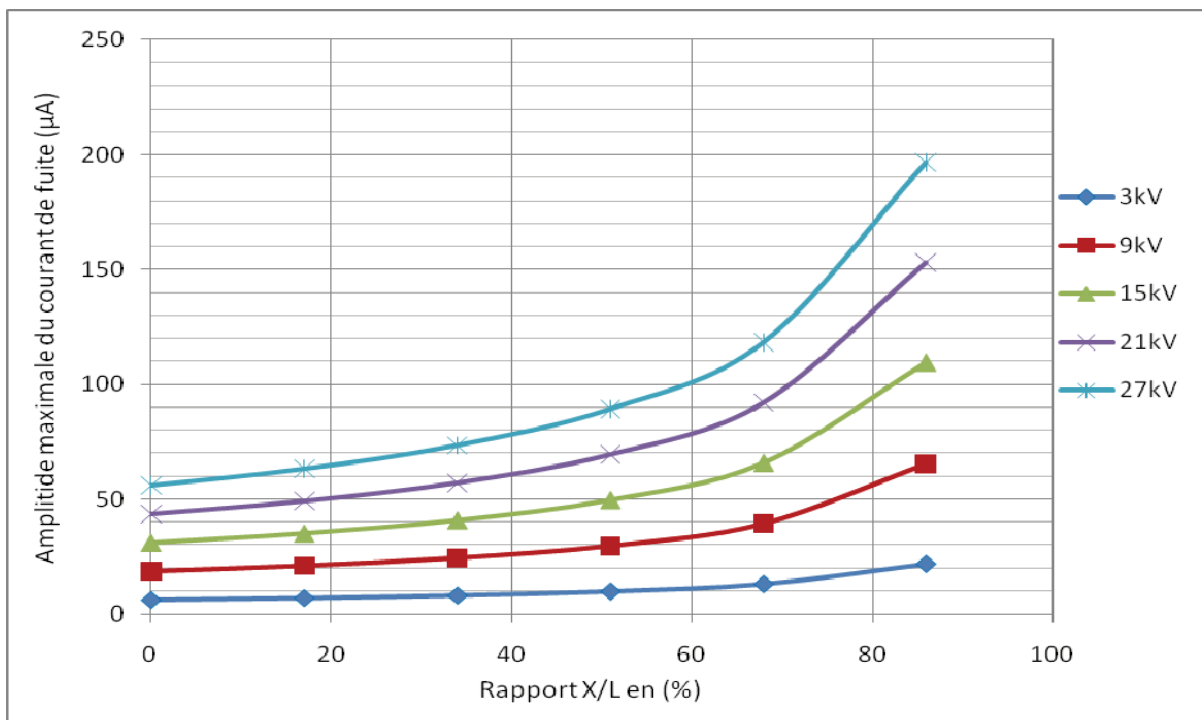


Figure IV.13 : Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite empirique en fonction du rapport X/L pour différentes valeurs de la tension appliquée ( $\sigma=10100 \mu\text{S/cm}$ ).

### IV.3.2 Comparaison entre le courant de fuite expérimental et le courant empirique déterminé à partir de l'impédance calculée :

Les figures IV.14 à IV.16 représentent la variation du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante. Celles-ci ont été tracées pour plusieurs paliers de tension appliquée, et pour la valeur de la conductivité de 1,2mS/cm.

L'analyse de ces courbes montre que le modèle empirique est proche du modèle expérimental.

- D'après la figure IV.14, nous remarquons que les courbes sont presque confondues pour les faibles niveaux de tension 3 et 9 kV, malgré que la valeur de la conductivité est élevée ( $\sigma=1,2$  mS/cm).

Lorsque la tension est plus élevée (15 et 21 kV), on aura une courbe divisée en deux parties : l'une confondue avec une partie de la courbe expérimentale quand la largeur de la couche polluée ne dépasse pas 70 % de la longueur de fuite totale.

L'autre diverge de la deuxième partie de la courbe expérimentale, à partir d'une largeur déterminée de pollution (pour des largeurs  $X/L > 70\%$  de la longueur de fuite totale). Cette dernière est évaluée aux environs de 75% de la largeur totale pour le niveau 15 kV et de 67% pour le niveau 21 kV.

L'écart entre les deux valeurs de courant de fuite atteint 10  $\mu$ A (donc 10 %) pour le niveau de tension 15 kV, et dépasse 70  $\mu$ A (donc dépasse à 46 %) pour un niveau de tension de 21kV (Figure IV.14). Cette différence dans la valeur du courant de fuite est due à un assèchement beaucoup plus important de la surface isolante (pour les essais expérimentaux) lorsque la tension appliquée est élevée.

- Pour la pollution côté terre et pour les mêmes niveaux de tension, les courbes sont également très proches pour tous les niveaux de tension (Figure IV.15) avec une petite différence par rapport au côté haute tension à partir de la deuxième partie de la courbe  $I=f(X/L)$ , qui diverge avant d'atteindre les 50% de la largeur totale de fuite (Figure IV.15). L'écart du courant de fuite n'est pas grand ( $<20$   $\mu$ A). Cette différence est peut être due à l'impédance du milieu qui serait un peu plus faible du côté terre que du côté HT.

- L'analyse de la courbe de la couche centrale (figure IV.16) montre une différence remarquable entre la pollution du côté haute tension et côté terre d'une part, et le cas de la pollution de la couche centrale. Nous constatons, pour le cas de la couche centrale, que la courbe empirique est plus éloignée de la courbe expérimentale (pour les mêmes niveaux de tension). Cette différence est peut être due à l'emplacement de la couche polluante où due à l'impédance du milieu qui serait un peu plus faible que pour le côté terre et le côté haute tension.

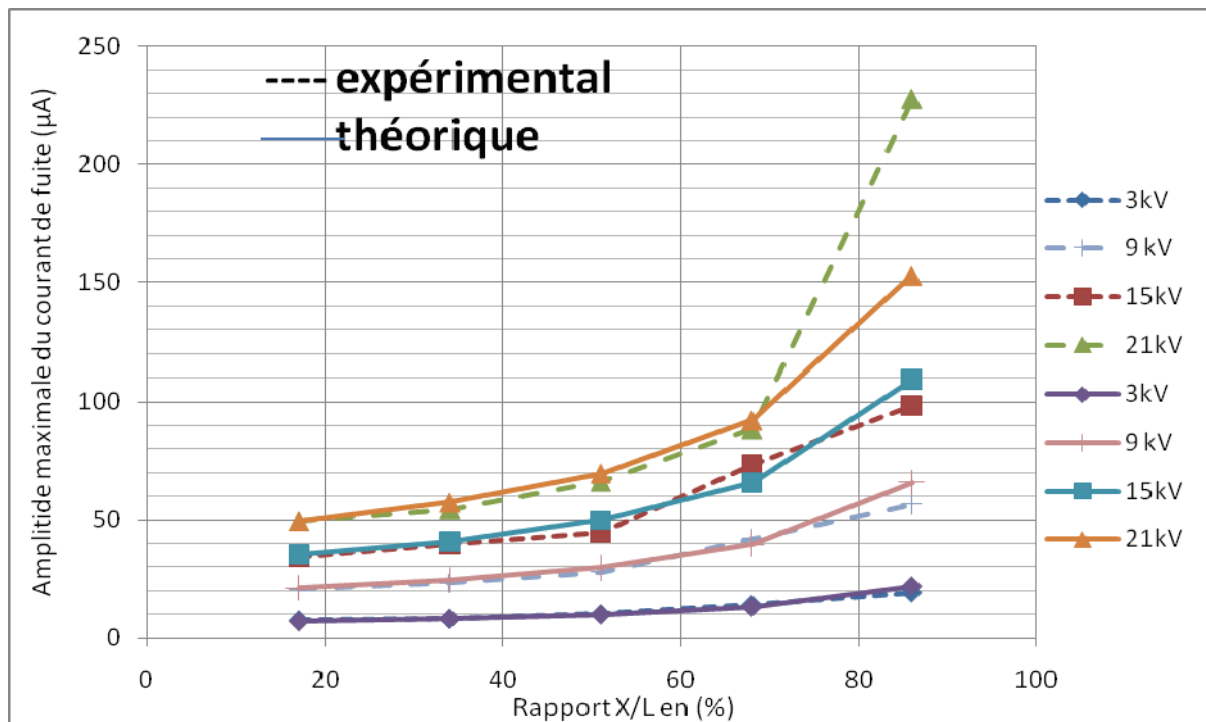


Figure IV.14 : Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite empirique et expérimentale en fonction du rapport X/L pour différentes valeurs de la tension appliquée (coté haute tension).



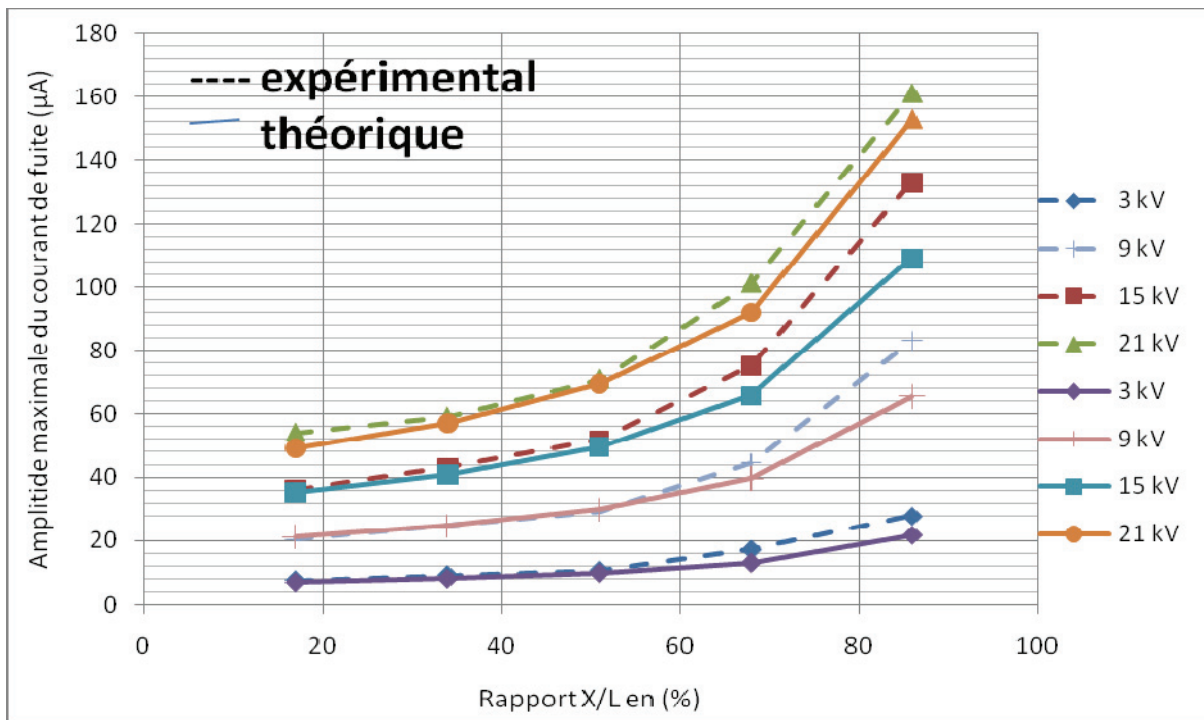


Figure IV.15 : Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite empirique et expérimentale en fonction du rapport X/L pour différentes valeurs de la tension appliquée (coté terre).

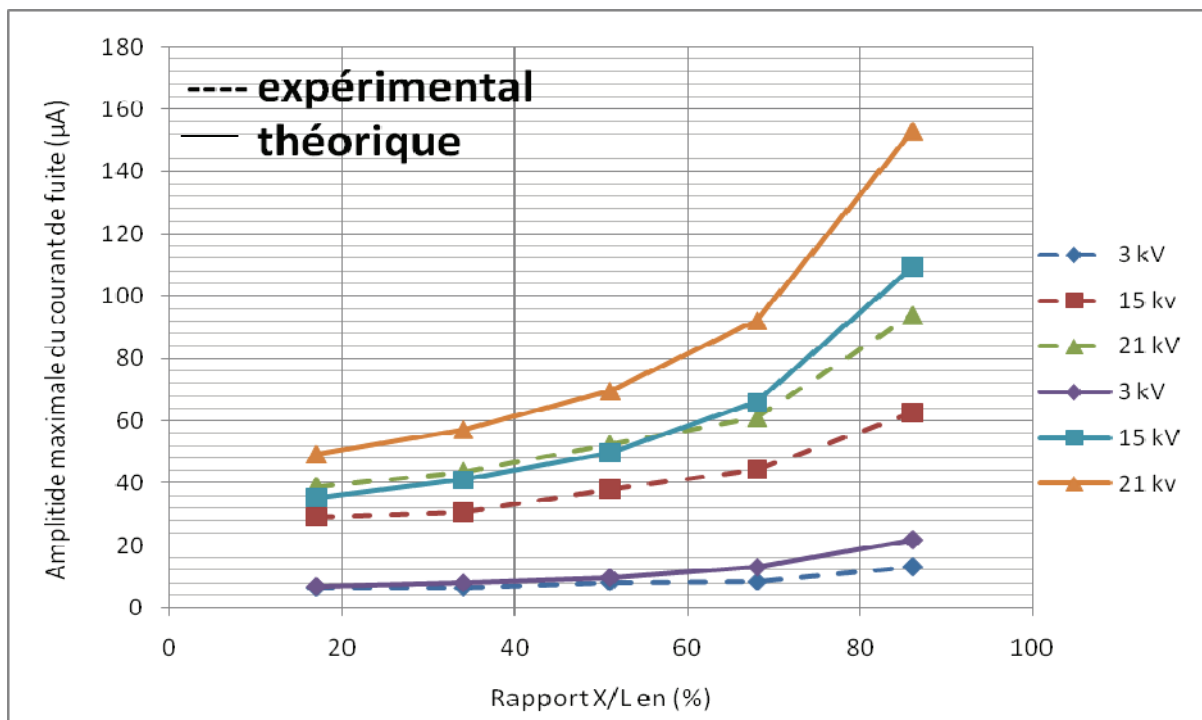


Figure IV.16 : Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite empirique et expérimentale en fonction du rapport X/L pour différentes valeurs de la tension appliquée (couche centrale).

## IV.4 Rapport d'impédance et rapport des tensions:

### IV.4.1 Rapport d'impédance :

Nous représentons aux figures IV.17 et IV.18 les valeurs du rapport  $h$  tel que  $h(x)=R(x)/Z_C(x)$  (impédance de la couche polluée sur l'impédance de la surface propre) pour mieux illustrer les résultats obtenus ci-dessus.

Ces courbes nous permettent de mieux imaginer l'importance relative de la couche de pollution par rapport à la zone sèche lorsque la conductivité augmente, et lorsque la largeur de la couche polluée augmente.

Pour chaque largeur de la pollution, lorsque la conductivité superficielle augmente, le rapport  $h(x)=R(x)/Z_C(x)$  diminue brusquement, et nous remarquons que le rapport des impédances devient (théoriquement) presque nul pour la conductivité 10100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Pour une conductivité superficielle donnée, nous constatons que l'augmentation de la largeur de la pollution engendre une augmentation du rapport impédance de la couche polluée sur l'impédance de la surface propre entre électrodes.

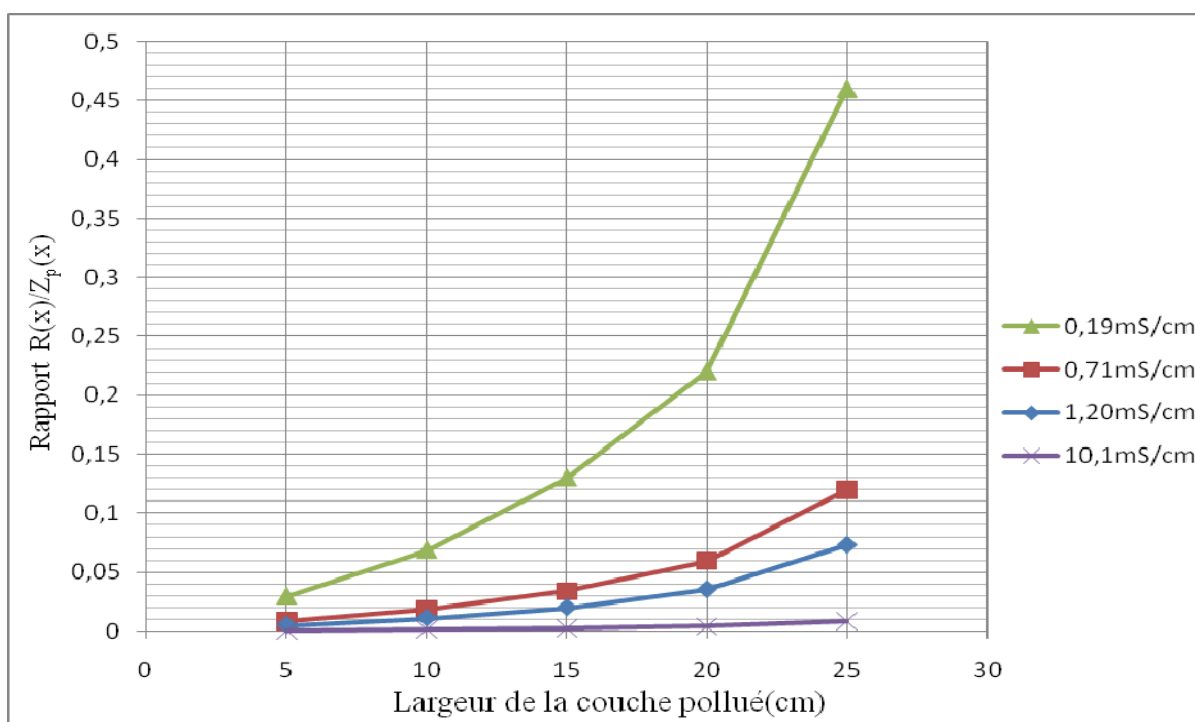


Figure IV.17 : Rapport des impédances couche polluée sur couche propre en fonction de la largeur de la couche polluante pour trois conductivités.

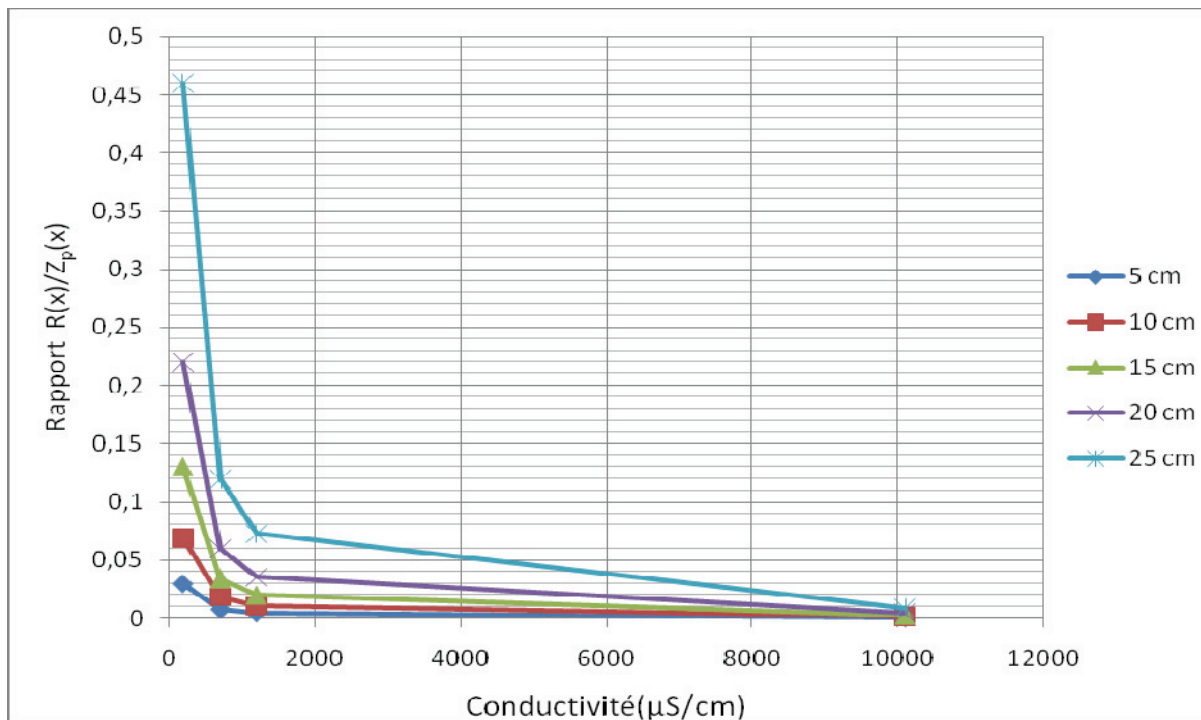


Figure IV.18: Rapport des impédances couche polluée sur couche propre en fonction de la conductivité pour différents largeurs de la couche polluante.

#### IV.4.2 Tension reportée :

Nous représentons à la figure IV.19 la variation du rapport tension reportée (sur la zone sèche) sur la tension totale appliquée en fonction de la largeur de la couche polluante :

$$\frac{U_r}{U} = \frac{1}{1 + \frac{R(x)}{Z(x)}}$$

$U_r$  : La tension reportée (sur la zone sèche).

$U$  : La tension totale appliquée.

D'après la figure IV.19, nous remarquons que le rapport  $U_r / U$  varie de 0,54 jusqu'à 1.

Pour une conductivité très élevée de 10,1 mS/cm, on constate que le rapport  $U_r / U$  est presque égale à 1, cela implique que la tension appliquée se trouve reportée aux bornes de la zone sèche, et cela est valable pour n'importe quelle largeur de la couche polluée. Autrement dit, la valeur de l'impédance de la couche polluante, dans ce cas, est très faible ( $R(x)$  presque négligeable devant  $Z(x)$ ), ceci contribue au phénomène de la conduction de la zone sèche.

Pour des conductivités plus faibles, on remarque que le rapport diminue, à cause de l'augmentation de l'impédance de la couche polluante (qui n'est plus négligeable devant  $Z(x)$ ).

Ce résultat, théorique, a été bien observé lors des essais pour les grandes largeurs de pollution.

Les essais d'arcs nous ont permis de constater l'influence de la conductivité sur la tension disruptive de la zone sèche [8, 38]. Il apparaît en effet clairement que la tension d'arc était nettement plus élevée pour une faible conductivité ( $10 \mu\text{S/cm}$ ). Ceci montre que l'impédance de la pollution à cette conductivité n'est pas négligeable et donc conduit à une chute de tension appréciable à ses bornes [8, 28].

La figure IV.20 montre bien qu'à partir de la plus grande conductivité ( $10,1\text{mS/cm}$ ) et surtout pour la petite largeur de la couche polluante on a le phénomène de la conduction à la zone sèche.

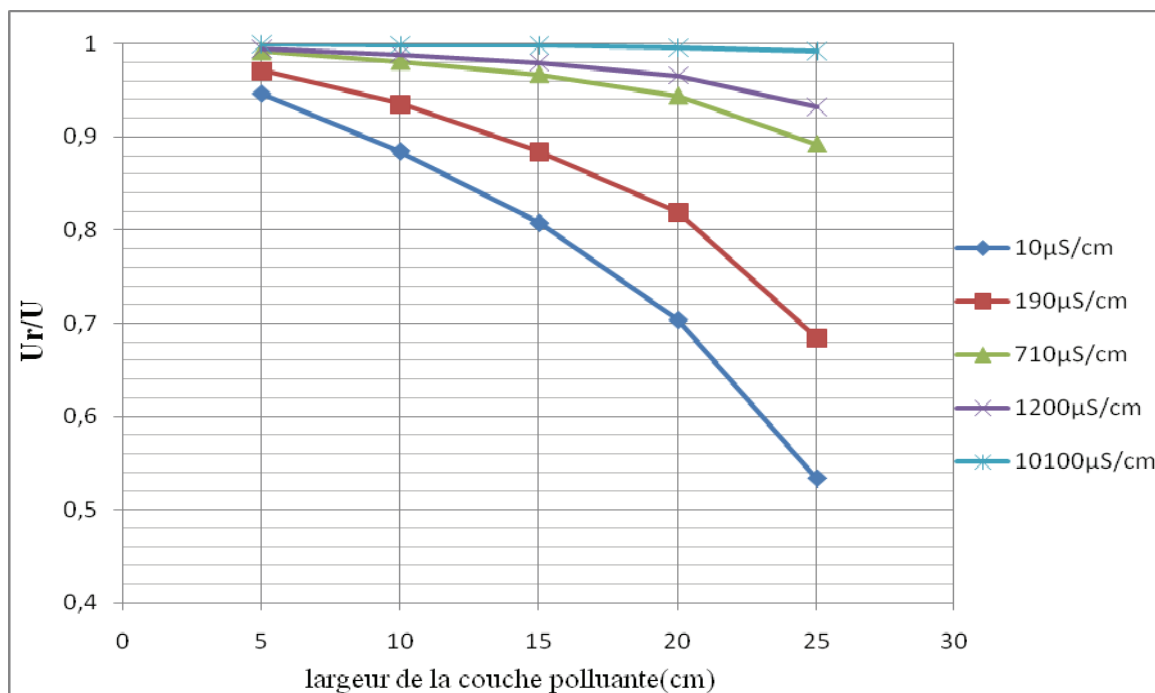


Figure IV.19 : Rapport : tension reportée/tension totale appliquée en fonction de la largeur de la couche polluante, pour différentes valeurs de la conductivité.

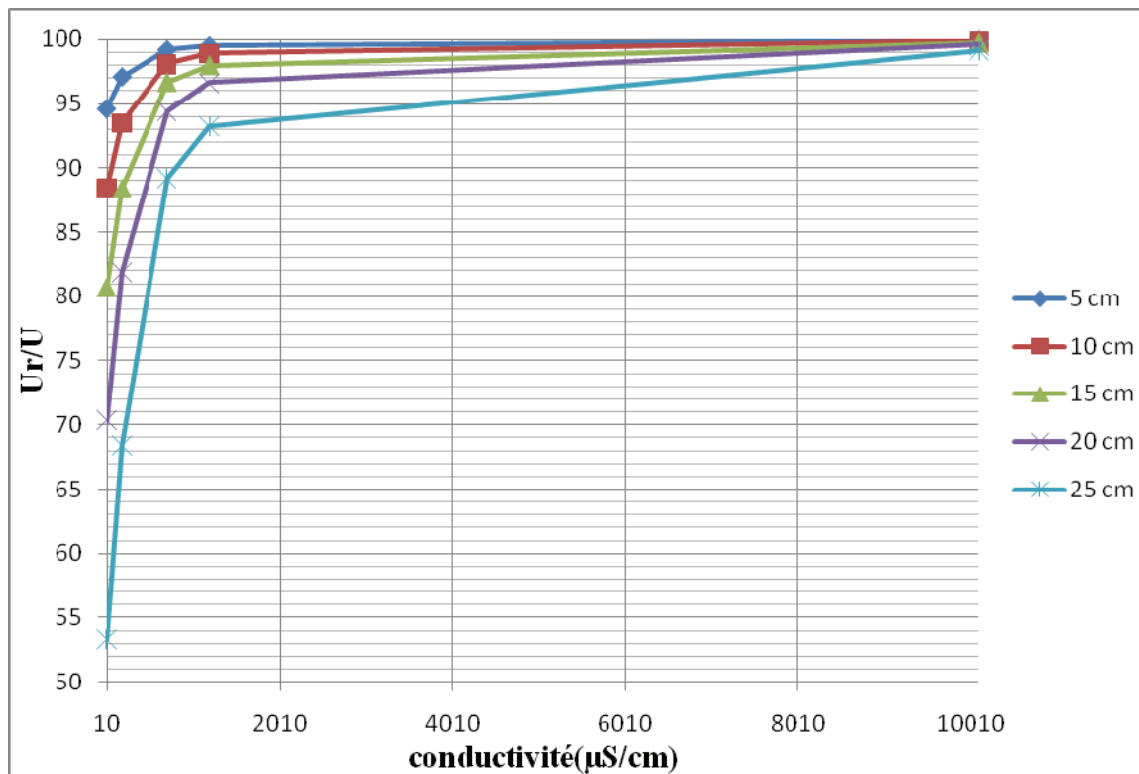


Figure IV.20 Rapport : tension reportée/tension totale appliquée en fonction de la conductivité, pour différents valeurs de la largeur de la couche polluante.

#### IV.5 Conclusion :

L'étude théorique basée sur le modèle d'impédances a montré une bonne corrélation entre les valeurs théoriques et expérimentales. L'écart est de 0 à 23% pour les quatre conductivités. Cet écart peut être justifié par le fait que le modèle théorique diverge quand nous avons atteint l'état critique; le régime devient non linéaire, n'obéissant plus à la loi d'Ohm.

On constate, pour les plus grandes valeurs de conductivité (dans notre modèle 10,1mS/cm) que la valeur de l'impédance de la couche polluante est très faible. Donc contribue au phénomène de la conduction de la zone sèche. Par contre, nous obtenons une chute de tension non négligeable aux bornes de la couche polluée aux faibles conductivités.



# Conclusion générale

Les études aussi bien théoriques qu'expérimentales du processus de contournement sont motivées par le nombre de contournements d'isolateurs pollués survenus sur les lignes hautes tension.

Dans ce présent travail, nous avons examiné le comportement des isolateurs uniformément et non uniformément pollués. Le but serait évidemment de dimensionner les isolateurs exposés à divers degrés de pollution.

Dans l'étude bibliographique, nous présentons les différents travaux qui ont été réalisés dans le domaine de la pollution des isolateurs (connaître le fonctionnement et la constitution d'un isolateur et leurs principaux types, ainsi que l'origine de la pollution, puis connaître les différents types de pollution et finalement nous présentons quelques travaux de laboratoire sous pollution artificielle).

Les travaux expérimentaux que nous avons entrepris avaient pour principal objectif de voir le comportement d'une surface isolante plane, uniformément et non-uniformément polluée, lorsqu'une tension alternative lui est appliquée. Afin d'interpréter cela, nous avons tenté d'expliquer l'allure du courant de fuite, et de voir l'influence de la répartition de pollution sur l'évolution du courant de fuite, et sur la tension de contournement.

L'étude de la tension de contournement :

La configuration uniforme de pollution révèle que le modèle perd de sa rigidité diélectrique quand la conductivité volumique du milieu augmente.

Pour la configuration non-uniforme de pollution, la tension de contournement diminue avec l'élargissement de la largeur de la couche polluée. Cette tension présente un minimum lorsque 85,6% de la distance inter-électrode est conductrice.

Le modèle est plus rigide lorsque la couche de pollution est située au centre de la plaque isolante (conductivité volumique 1.2 mS/cm).

L'étude du courant de fuite montre que son amplitude maximale croît avec l'augmentation de la conductivité du milieu, l'agrandissement de la largeur de la couche polluée et l'augmentation de la tension appliquée. L'amorçage d'une décharge parallèle couche conductrice- électrode (terre ou HT) est réalisé pour des tensions élevées (27 kVeff

pour la pollution du côté HT, terre et pour la pollution au centre). Cet amorçage fait augmenter de manière exponentielle l'amplitude maximale du courant de fuite.

Nous observons une augmentation régulière de la longueur d'arc en fonction de la tension appliquée, puis diminue sensiblement pour alimenter l'arc principale, donc le nombre de ce dernier doit diminuer.

L'étude du déphasage courant de fuite-tension appliquée montre pour le cas sec que le modèle plan est caractérisé par un effet capacitif dominant et un faible effet résistif pour des tensions inférieures à 24 kVeff.

Pour la pollution uniforme, la valeur du déphasage diminue avec l'augmentation de la conductivité du milieu qui indique que l'isolateur a un effet purement résistif. Pour les grandes conductivités (1,2 et 10,1 mS/cm) l'occurrence des décharges parallèles créent des zones sèches qui augmentent l'effet capacitif de l'isolateur. Cette augmentation est plus remarquable avec l'accroissement du niveau de tension appliqué.

Pour la pollution non-uniforme, l'augmentation de la largeur de la couche polluée pour tous les emplacements réduit l'effet capacitif et augmente l'effet résistif de l'isolateur. L'effet résistif est amplifié par le court-circuit des intervalles d'air entre la couche polluée et les électrodes pour une tension de 27 kVeff et une largeur de la couche de 25 cm pour les trois configurations.

Finalement en ce qui concerne la modélisation empirique, on constate qu'il ya une bonne corrélation entre les valeurs théoriques et expérimentales.

Plusieurs points pourraient être étudiés et développés au niveau de notre Laboratoire. Il s'agit, en particulier, de voir l'influence de la nature et la répartition de l'agent polluant, l'étude par simulation d'autres paramètres tels que la longueur critique de l'arc, la distribution du champ électrique le long de la ligne de fuite, l'énergie de la décharge etc...





# Bibliographie

- [1] A. MEKHALDI, «Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique», Thèse de magister, ENP, Juin 1990.
- [2] H. ZHANG AND R. HACHAM, «Electrical surface resistance hydrophobicity and diffusion phenomena in PVC», IEEE, Trans. on elect. insul., Vol.6, N°1, pp. 73-83, February 1999.
- [3] L.L. ALSTON, S. ZOLEDZIOWSKI, «Growth of discharges on polluted insulators», IEEE, Trans. PAS, Vol. 110 N°7, July 1963.
- [4] L.E. ZAFFANELLA, H.M. SCNEIDER, J.H. DUNLAP. «Performance des isolateurs pollués pour lignes CCHT», CIGRE, rapport 33-05, 1986.
- [5] R. SUNDARARAJAN, R. S. GORUR, « Role of non soluble contaminants on the flashover voltage of porcelain insulator», IEEE, Trans. on diel. and elect. Insul, Vol. 3 N°2, pp.121-127, April 1997.
- [6] R. MATSUOKA, S. ITO, K. SOKANISHI, K. NAITO, «Flashover on contaminated insulators with different diameters», IEEE, Trans. On elect. Insul., Vol. 26 N°6, December 1991.
- [7] A.CIMADOR, M.COJAN, P.HAUTEFEUILLE, M.MOREAU, «Méthodes de dimensionnement des isolateurs de lignes aériennes en régions polluées» CIGRE, rapport 33-04, 1978.
- [8] D.NAMANE, «Effet de la Discontinuité de la Couche de Pollution sur le Comportement d'Isolateur Haute Tension, sous la Fréquence 50Hz», Thèse de Magister ENP, février 1998.
- [9] J. KELLER-JACOBSEN, AA. PEDERSEN, JK. RASMUSSEN, A. HENRIKSEN C. LINDQVIST, S. SMEDSFELT, «Essais au laboratoire et en plein air pour dimensionner correctement les isolateurs exposés à la pollution saline », CIGRE, Rapport 33-11, 1978.
- [10] A. EL-ARABATY, A. NOSSEIR, S. EL-DEBEIKY, E. NASSER, A. EL-SARKY, «Choix d'isolateurs utilisables dans des ambiances polluées et notamment dans les régions désertiques», CIGRE, Rapport 33-11, 1980.

- [11] M. A.B. EL KOSHARE, F. A. M RIZK, « comportement des isolateurs des lignes de transport a très Haute tension dans les conditions de pollution désertique», CIGRE, rapport 33-05, Paris, 1970.
- [12] G. RIQUEL, E. SPAN GENBERG, «De la céramique au synthétique », EDF-Epure, N° 58, Avril 1998.
- [13] Y. PORCHERON, « Lignes aériennes : Matériels entrant dans la constitution d'une ligne aérienne », Technique de l'ingénieur D4425.
- [14] D. DUMORA, « Matériaux isolants céramiques en électrotechnique », Technique de l'ingénieur D275.
- [15] GUIA TALAL, « comportement d'un modèle d'isolateur sous tension impulsionnelle» Thèse de magister, département d'électrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2008.
- [16] 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.
- [17] S.M. FIKKE, J.E.HANSEN, L.ROLFSENG, «Long Range Transported Pollution and Conductivity of Atmospheric Ice on Insulators» IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No. 3, pp. 1311-1321, July 1993.
- [18] B.AHMED SEDDIK, M.AMOKRANE« Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur par technique d'ondelettes et modélisation», PFE, ENP Juin 2008.
- [19] M. TEGUAR, «Modélisation d'Isolateur Soumis à Divers Paramètres Electromagnétique» Thèse de doctorat, département d'électrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2004.
- [20] A. MEKHALDI, «Etude Des Paramètres de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolateurs Polluées sous tension alternative 50Hz », Thèse de doctorat d'état, département d'électrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 1999.

- [21] Z.SAHLI, «Etude de la Non Uniformité de la Pollution sur les Caractéristiques de Contournement des isolateurs Réels sous Tension Continue», Thèse de Magister, Département d'électrotechnique, Université Abederrahmane Mira de Bédjaia.
- [22] H.STREUBEL, «The Influence of Nonuniform Contamination on the Flashover Voltage of Insulators», 4e International Symposium on High Voltage Engineering, rapport 46-10, Athènes, 5-9 Septembre 1983.
- [23] S. DJAFRAI, R. BOUDISSA. « Influence de la Répartition de la Pollution sur l'influence de la Ligne de Fuite d'Isolateur à Ailettes», Deuxième Conférence Nationale sur la Haute Tension, Tizi-Ouzou 17-19 novembre 1997.
- [24] J.DANIS, «A Stochastic Pollution Flashover Model», 4e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport 46-12, Athènes, 5-9 Sept. 1983.
- [25] 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;
- [26] P.CLAVERIE, Y.PORCHERON, «How to Choose Insulators for Polluted Areas», IEEE Trans.PAS, vol.92, No3, pp. 1121-1131, Mai-Juin 1973.
- [27] R.LOUNIS, «comportement d'une surface isolante dans le cas d'une pollution non-uniforme», PFE, ENP Juin 2000.
- [28] A.MEKHALDI, D.NAMANE, S.BOUAZABIA, A.BÉROUAL, «Flashover of Discontinuous Pollution Layer on HV Insulators », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.6, No.6, pp.900-906, 1999.
- [29] A. MEKHALDI, S. BOUZABIA, «Etude de Courant de Fuite sur les Isolateurs Pollués», Special Issue of AJOT, Proceedings of 2<sup>nd</sup> CEA Alger, Nov. 29-30 1994/ vol.1.
- [30] CEI 60060-1, «Technique des essais à haute tension : définitions et prescriptions générales relatives aux essais», Deuxième édition, 1989.
- [31] S.CHANDRASEKAR, C.KALAIVANAN, A.CAVALLINI, G.C.MONTANARI, « Investigations on Leakage Current and Phase Angle Characteristics of Porcelain and Polymeric Insulator under Contaminated Conditions », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 2, April 2009.

- [32] M.DOUAR, M.BOUZIDI, «Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur pollué à l'aide des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée », PFE, ENP Juin 2009.
- [33] A. BOUZEROURA, «Etude du développement des décharges électriques parallèles sur une surface isolante polluée sous tension continue», Thèse de magister, Université A.Mira Bejaia, Déc.2006.
- [34] M.TEGUAR, A.MEKHALDI, A.BOUBAKEUR, « Flashover and Leakage Current on Insulator model Under Non Uniform Pollution », 6<sup>ème</sup> Conférence Nationale sur la Haute Tension Taghit/Béchar, 5,6 et 7 Novembre 2007.
- [35] M. FARSANEH, X.CHENG, J.ZHANG, « The Influence of the Applied Voltage on the Atmospheric Ice Deposited on Insulating Surfaces », IEEE, ISEI, Montréal, Canada, June 1996.
- [36] A.BOUBAKEUR, M.TEGUAR, A.ABIMOULOU, A.MEKHALDI, « Simulation Expérimentale sous Tension Alternative 50 Hz du Comportement d'un Isolateur de Haute Tension Naturellement Pollué », Quatrième Conférence Régionale des Comités CIGRE dans les Pays Arabes, Vol. 2, pp. 271-278, 19-21 Mars 2001, Tripoli, Libye.
- [37] M.TEGUAR, A.ABIMOULOU, A.MEKHALDI, A.BOUBAKEUR, « Influence of Discontinuous Pollution Width on the Surface Conduction. Frequency Characteristics of the Leakage Current», 2000 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 211-214, October 15-18, 2000, Victoria, British Columbia, Canada.
- [38] M.TEGUAR, A.ABIMOULOU, A.MEKHALDI, A.BOUBAKEUR, « Effect of Discontinuous Pollution Layer Conductivity on the Flashover and Leakage Current Characteristics », CIGRE Symposium, Behaviour of Electrical Equipment and Components in Tropical Environment, Report No. 200-02, September 3-7, 2001, Cairns, Australia.
- [39] S. GUERFI, «Influence de la non uniformité de la pollution sur la tension de contournement des surfaces isolantes contaminées sous tension continue», these de magister, Université A. Mira de Béjaia.
- [40] A.MEKHALDI, D. NAMANE,S. BOUAZABIA, A. BEROUAL, « mperical model of high voltage insulator under non uniform pollution» ,11<sup>th</sup> international symposium of high voltage, London, UK, 1999.

- [41] R. TIMGHELLETTE, «effet d'une interface air-isolant sur le contournement et courant de fuite apparent à la fréquence industrielle», mémoire de magister, ENP, Déc. 2007.
- [42] A.MEKHALDI, S. BOUAZABIA. «Conduction phenomena on polluted insulating surfaces under AC high voltages», 9<sup>th</sup> international symposium of high voltage, paper N°3174, Graz, Autriche, 1995.
- [43] A.MEKHALDI, S. BOUAZABIA, A. BEROUAL. «Electric arc inception and propagation phenomena on polluted insulating surfaces under high voltage», Archives of electrical Engineering, Vol. XL VII, N° 3, pp. 255-269, 1998.
- [44] R.MOUMENI, A.BAHOUS, «Modélisation dynamique de l'arc électrique sur des isolateurs pollués de haute tension», PFE, ENP Septembre 1996.