

M0001/02A

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Handwritten signature



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Electrique
Laboratoire de Haute Tension

Handwritten signature

THÈSE DE MAGISTER

Présentée par

Ali BOUHAFS

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

THEME

**COMPORTEMENT DES SURFACES ISOLANTES
SOUS POLLUTION NON-UNIFORME.
ELABORATION D'UN ALGORITHME DE
CONTOURNEMENT.**

Soutenue le 06/03/2002 devant le jury:

MM.

A. HELLAL	Maître de Conférences, ENP	Président
A. MEKHALDI	Maître de Conférences, ENP	Rapporteur
M. TEGUAR	Chargé de Cours, ENP	Rapporteur
A. BOUBAKEUR	Professeur, ENP	Examineur
S. BOUAZABIA	Chargé de Cours, USTHB	Examineur
H. MOULAI	Docteur d'Etat, USTHB	Examineur

Année universitaire 2001 - 2002

نعرض في هذا العمل دراسة حول ظاهرة النقل الكهربائي على مساحات عازلة ملوثة، تحت توتر متناوب 50 هرتز. يضع هذا على الواجهة تأثير عرض توزع التلوث غير المنتظم على تصرف العوازل بالاعتماد على النتائج التجريبية المتعلقة بالتيار المتسرب، بطول القوس الكهربائي و بتوتر الاحاطة. خوارزمية حساب تسمح بالحصول على العوامل المميزة لتطور القوس الكهربائي حتى الاحاطة التامة لمساحة عازلة غير منتظمة التلوث، يتم اقتراحها، من اجل قياس درجة تراكم الطبقة الملوثة. مقارنة بين النتائج الحسابية والتجريبية سيتم عرضها أيضا.

كلمات مفتاحية: الاحاطة، التيار المتسرب، القوس الكهربائي.

Résumé :

Ce travail porte sur l'étude des phénomènes de conduction sur des surfaces isolantes polluées, sous tension alternative 50 Hz. Il met en évidence l'influence de la longueur ainsi que la répartition non-uniforme de la pollution sur le comportement des isolateurs. Les résultats expérimentaux concernent le courant de fuite, la longueur de la décharge électrique et la tension de contournement. Un algorithme de calcul permettant l'obtention des différents paramètres caractérisant l'évolution de l'arc électrique jusqu'au contournement total des surfaces isolantes non-uniformément polluées, sera proposé pour contrôler la sévérité des dépôts polluants. Une comparaison des résultats simulés avec ceux obtenus expérimentalement est présentée.

Mots clés: contournement, courant de fuite, arc électrique, surfaces isolantes.

Abstract:

This work is devoted to the study of the conduction phenomena on the insulating polluted surfaces Under A.C. high voltage, 50 Hz. It shows the influence of the width and the distribution of the no uniform pollution on the insulators behaviors. The experiments results concern the leakage current, the electrical discharge length and the flashover voltage. Different parameters are calculated using an algorithm to show the evolution of the electrical arc until the complete flashover of the insulating surface no uniformly polluted. This algorithm will be proposed to control the severity of the depositing pollution. A comparison between simulation and experiment results are also presented.

Key words: flashover, leakage current, electrical discharge, insulating surface.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents

A mes sœurs et frères

A toute ma famille

A tous mes amis

Ali

Remerciements

Ce travail a été réalisé au laboratoire de Haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique sous la direction de Messieurs M.TEGUAR, Chargé de Cours à l'ENP et A.MEKHALDI Maître de Conférences à L'ENP. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma très sincère reconnaissance pour leur disponibilité, leur humanisme et pour le soin apporté à la direction scientifique de ce travail de recherche.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à :

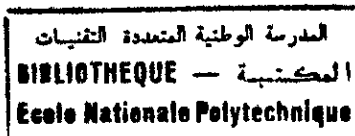
Monsieur A.HELLAL, Maître de conférences à l'ENP pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.

Monsieur A.BOUBAKEUR, Professeur à l'ENP et directeur du laboratoire, d'abord pour sa participation dans le jury, ensuite et surtout pour ces précieuses directives et conseils au cours de la réalisation de ce travail.

Monsieur S.BOUAZABIA, Chargé de Cours à l'USTHB, et Monsieur H. MOULAI, Docteur d'état à l'USTHB, pour avoir bien voulu accepter d'être membres du jury et mettre ainsi en valeur mon travail.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à tous les amis pour l'ambiance qu'ils ont su créer et les idées fructueuses que nous avons échangées.

Sommaire



Introduction générale

1

Chapitre I

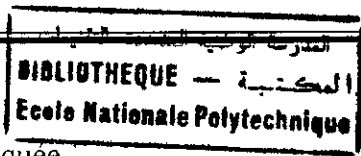
Recherche bibliographique

I.1. Introduction	4
I.2. Types de non-uniformité	4
a) La non-uniformité longitudinale par groupe	4
b) La non-uniformité transversale	4
c) La non-uniformité longitudinale périodique	5
I.3. Travaux sur isolateurs réels	5
I.4. Modèles de laboratoires	7
I.4.1. Modèle de J.Danis	7
I.4.2. Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh	9
I.4.3. Autres modèles de laboratoire	11
I.4.3.1. Modèle de D.Namane	12
I.5. Conclusion	14

Chapitre II

Etude expérimentale

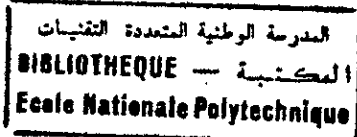
II.1. Introduction	16
II.2. Technique expérimentale	16
II.2.1. Circuit d'alimentation	16
II.2.2. Modèle expérimental	17
II.2.3. Circuit de mesures	17
II.2.3.1. Mesure de la tension appliquée	17
II.2.3.2. Mesure du courant de fuite	18
II.2.4. Mesure de la longueur d'arc	18
II.2.5. Modes opératoires	18
II.2.5.1. Préparation du modèle	18
II.2.5.2. Préparation de la solution saline	19
II.2.5.3. Procédé d'application de la couche de pollution	19
II.2.5.4. Procédé d'essai	19
II.3. Configurations de la pollution	19
II.4. Résultats et interprétations	21
II.4.1. Observations	21
a) Etapes de contournement	21
b) Evolution de l'onde du courant de fuite	23
II.4.2. Interprétation	25
II.4.2.1. Première Configuration	25



II.4.2.1.1. Etudé du Courant de fuite	25
II.4.2.1.1.1. Influence de la tension appliquée	25
II.4.2.1.1.2. Influence de la largeur de la zone fortement conductrice	28
II.4.2.1.1.3 Influence de la position des deux parties des couches polluante	29
II.4.2.1.2. Etude de la tension de contournement	31
II.4.2.1.2.1. Influence de la largeur de la partie fortement conductrice	31
II.4.2.1.2.1. Influence de la position de la partie fortement conductrice	31
II.4.2.1.3. Etude de la longueur d'arc	32
II.4.2.2. Deuxième Configuration	34
II.4.2.2.1. Etude du courant de fuite	34
II.4.2.2.1.1. Influence de la tension appliquée	34
II.4.2.2.1.2. Influence de la largeur de la partie fortement conductrice	36
II.4.2.2.1.2 Influence de la position de la partie fortement conductrice	37
II.4.2.2.2. Etude de la tension de contournement	39
II.4.2.2.2.1. Influence de la largeur de la partie fortement conductrice	39
II.4.2.2.2.2. Influence de la position des couches de pollution	39
II.4.2.2.3. Etude de la longueur de l'arc électrique	40
II.4.2.3. Etude comparative	42
II.4.2.3.1. Courant de fuite	42
II.4.2.3.2. Tension de contournement	44
II.5. Conclusion	45

Chapitre III	Modèle théorique
III.1. Introduction	47
III.2. Modélisation	47
III.2.1. Formulation du modèle	47
III.2.2. Hypothèses simplificatrices	47
III.2.3. Mise en équations	48
III.2.3.1. Détermination des résistances du circuit équivalent	52
III.3. Simulation numérique	53
III.4. Validation	55
III.4.1. Constantes caractéristiques de l'arc	56
III.4.2. Caractéristiques obtenus et interprétation	56
III.4.2.1. Caractéristiques de l'état critique	56
III.4.2.2. Tension appliquée en fonction de la longueur d'arc	58
III.4.2.3. Courant de fuite en fonction de la longueur d'arc	60
III.4.2.4. Tension appliquée en fonction du courant de fuite	62
III.4.2.5. Résistances de circuit équivalent en fonction de la longueur d'arc	64
III.4.2.6. Coefficient de sécurité en fonction du produit relatif	67
III.4.2.7. Tension appliquée en fonction de la longueur d'arc pour différentes conductivités	69

III.4.2.8. Courant de fuite en fonction de la longueur d'arc pour différentes conductivités	69
III.5. Conclusion	74
Conclusion générale	76
Bibliographie	78



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les isolateurs des lignes aériennes et les postes du réseau de transport d'énergie électrique sont sujet à différents incidents. Parmi ceux-ci, le contournement sous pollution constitue un problème sérieux de l'isolement des ouvrages de haute tension. En effet, suite à une interaction entre le vent et les poussières diverses, une couche de pollution se dépose sur la surface de l'isolateur. En présence d'humidité et selon l'ampleur de cette pollution, un courant de fuite circule sur la surface de l'isolateur, en provoquant des assèchements locaux sur cette surface. Des arcs électriques qui prennent alors naissance, peuvent se développer le long de la surface isolante jusqu'au contournement de l'isolateur et la mise hors service de l'ouvrage.

En raison de la complexité des phénomènes de décharges électriques sur des surfaces isolantes, plusieurs travaux aussi bien théoriques qu'expérimentaux, ont été entrepris en vue d'étudier leurs comportements sous pollution. Diverses contraintes ont été adoptées, à savoir, la nature du dépôt polluant [1-4], la non-uniformité de la pollution [5,6], la conductivité superficielle [6] et le profil de l'isolateur [6,7]. Ces recherches ont permis d'établir des modèles empiriques et semi-empiriques donnant des caractéristiques des décharges évoluant sur les surfaces d'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 [8-11]. Cette répartition de la pollution dépend principalement du profil de l'isolateur, du niveau de la tension appliqué et de la position de l'isolateur par rapport au conducteur haute tension [8,9,11].

Notre travail porte sur l'analyse de l'impact de la non-uniformité des couches polluante sur le comportement des surfaces isolantes sous tension alternative 50 Hz.

Dans le premier chapitre, nous présentons, les différents types de non-uniformité des couches polluantes rencontrés dans la littérature. Les principaux travaux sur des isolateurs réels ou sur des modèles de laboratoire qui lui sont associés sont également présentés.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude expérimentale. Pour cela, nous utilisons un modèle de laboratoire plan non-uniformément pollué. Ce modèle est soumis aux différentes contraintes à savoir, la tension appliquée, la répartition de la pollution non-

uniforme ainsi que la position de la couche fortement conductrice par rapport aux électrodes et sa longueur relativement à la longueur de fuite du modèle de laboratoire. Les résultats expérimentaux concernant les évolutions du courant de fuite et de la longueur de l'arc en fonction des contraintes susmentionnées sont présentés. Nous examinons, également, la variation de la tension de contournement vis à vis de la largeur et de la position de la couche fortement conductrice.

En ce qui concerne le troisième chapitre, un modèle théorique, simulant le comportement des isolateurs non-uniformément pollués, sera proposé. Cet algorithme permet d'obtenir les différents paramètres caractérisant le développement de l'arc électrique jusqu'au contournement total de la surface isolante contaminée. La validité du modèle théorique sera vérifiée en comparant les données expérimentales avec celles théoriques.

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

CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.Introduction :

La présence des couches polluantes sur les surfaces des isolateurs de haute tension, devient un problème inquiétant ces dernières années. Cette pollution ayant pour origine plusieurs sources (usines, sable, mer,...), se dépose sur les surfaces d'isolateurs, laisse circuler un courant de fuite. Des arcs électriques qui prennent alors naissance peuvent se développer le long de la ligne de fuite en produisant le contournement de l'isolateur, pouvant provoquer la destruction de cet ouvrage et sa mise hors service.

Plusieurs travaux ont été effectués pour étudier ce phénomène. Certains considèrent que la distribution de la pollution sur l'isolateur est continue. D'autres travaux, par contre, la considèrent discontinue. Des travaux récents ont abordé le problème de la non-uniformité de la couche de pollution. Ce cas fera l'objet de notre étude.

I.2.Types de non-uniformité :

A l'instar de l'étude faite par H.Streubel [12], les types de la non-uniformité peuvent être classés en trois catégories :

a) La non-uniformité longitudinale par groupe :

Elle est caractérisée par un ensemble de groupes d'isolateurs soumis à différentes conductivités 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 de champ électrique où la concentration de la pollution est accentuée sur les isolateurs les plus proches de la borne haute tension.

b) La non-uniformité transversale :

Ce type est caractérisé par des secteurs ou bandes de différentes conductivités superficielles de la couche polluante, elles sont réparties transversalement autour de la surface de chaque isolateur de la chaîne. La conductivité dans chaque secteur est la même le long de toute la longueur de la ligne de fuite.

Ce type de pollution est dû principalement à l'existence d'une direction privilégiée des vents et des pluies.

c) La non-uniformité longitudinale périodique :

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

Commentaires :

Ces types de regroupement concernent une accumulation progressive de la pollution et ne peuvent pas rendre compte de l'accumulation aléatoire de la pollution en cas de conditions atmosphériques exceptionnelles, comme l'on bien montré A.El-Arabaty et A.Nosseir [9], lorsqu'il s'agit de tempêtes de sable par exemple.

I.3.Travaux sur isolateurs réels :

R. Sundarajan et S. Gorur [7] ont appliqué leur programme de calcul pour deux types de non-uniformité qui seront les seuls à être pris en considération :

- Non-uniformité de la couche de pollution le long de la surface d'un seul isolateur.
- Non-uniformité de la couche le long de la chaîne d'isolateurs. La distribution sera fonction de la position de l'isolateur par rapport au conducteur haute tension.

L.E.Zaffanella et H.M.Schneider [13] ont effectué des essais comparatifs, faits sous pollution artificielle, entre des chaînes polluées d'une façon uniforme et des chaînes à pollution discontinue, en vue de simuler la non-uniformité longitudinale par groupe.

Ces deux auteurs ont considéré une distribution définie par le rapport (n) donné par :

$$n = \frac{DDSE(\text{surface supérieure})}{DDSE(\text{surface inférieure})} \quad n \text{ variant de } 0.1 \text{ à } 5. \quad (I.1)$$

avec :

DDSE: étant la densité du dépôt du sel de conductivité équivalent à celle de la couche polluante.

Ils ont établi la variation de la tension de contournement en fonction de la DDSE supérieure pour différents rapports n en maintenant la DDSE de la surface inférieure fixe.

- Dans tous les cas, la non-uniformité de la couche polluante conduit à une rigidité supérieure ou égale à la rigidité obtenue dans le cas de la distribution continue.
- La meilleure rigidité est obtenue pour le rapport n le plus réduit à savoir 0,1.
- Etant donné que, dans le cas de pollution naturelle, il est observé effectivement un rapport n inférieur à 1 (et ce, grâce aux propriétés d'auto-nettoyage plus élevées de la partie supérieure de l'isolateur), la tension de contournement est donc invariablement supérieure à celle de la pollution continue : celle-ci constitue donc le cas le plus défavorable selon l'auteur.

Leurs résultats montrent que la tension de contournement d'une chaîne uniformément polluée, avec la même DDSE, était de 20% inférieure à celle de la chaîne non-uniformément polluée.

Par contre, H.Streubel [12] affirme qu'il peut y avoir une diminution notable de la tension de contournement dépendant de la conductivité intrinsèque de chaque groupe et ce en utilisant la technique de calcul (programme informatique) et prenant l'exemple de deux chaînes d'isolateurs, dans le cas de non-uniformité longitudinale des couches polluantes, composées respectivement de 12 et de 25 éléments, où chaque élément est affecté d'une valeur de DDSE qui dépend de sa position par rapport au conducteur H.T. Cette valeur sera inspirée de résultats expérimentaux déjà effectués par T.C.Cheng et I.Kimoto [14,15].

Une répartition uniforme est comparée aux résultats ci-dessus : une moyenne arithmétique de toutes les DDSE de chaque élément est établie, puis l'auteur calcule le contournement équivalent si tous les éléments possédaient la même DDSE (celle-ci étant donc la moyenne calculée au préalable).

Les résultats, comparés également à quelques essais expérimentaux, ont montré que :

- Pour la chaîne de 25 isolateurs, la rigidité diélectrique correspondant à une distribution non-uniforme des couches polluantes, est légèrement plus élevée que celle correspondant à une distribution continue.

Pour celle de 12 éléments, la rigidité diélectrique est pratiquement la même dans les deux cas de distribution.

- La comparaison entre les résultats théoriques et expérimentaux, concernant la chaîne de 12 éléments, montre une assez bonne corrélation entre les deux approches.
- L'auteur semble insister surtout sur le fait que dans tous les cas de figures, la rigidité dans le cas non-uniforme est toujours supérieure ou égale à celle où la distribution est uniforme.

Notons que seuls ces deux types de non-uniformité sont considérés par presque tous les auteurs, ainsi que nous l'avons déjà constaté dans les paragraphes précédents.

I.4. Modèles de laboratoires :

Des modèles de laboratoire équivalents aux isolateurs réels ont été proposés par plusieurs chercheurs. Ils ont l'avantage de mieux observer quelques phénomènes qui ne sont pas évidents sur l'isolateur réel (arcs, effet couronne...) et permettent, en outre, la constatation des processus physiques accompagnant ces phénomènes.

I.4.1. Modèle de J.Danis [1] :

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

Dans le but de reproduire des couches similaires à celles observées sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, J.Danis a considéré plus d'une zone sèche (Figure I.1)

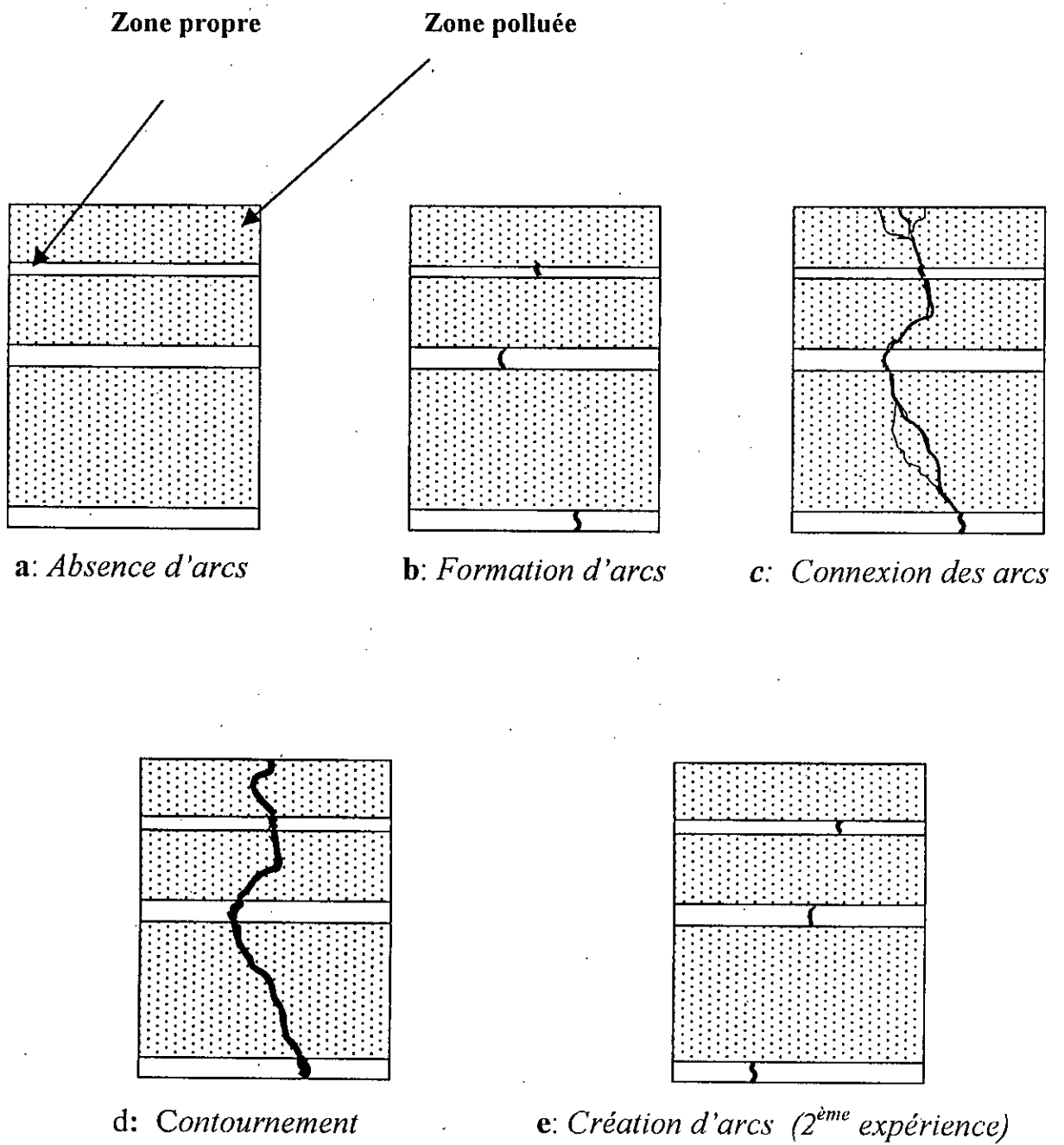


Fig.I.1 : Modèle de J.Danis

Ainsi l'auteur a abouti aux résultats suivants :

- L'arc électrique prend naissance dans les zones sèches, et se déplace vers les zones humides.
- Cet arc commence d'une façon aléatoire le long de la zone sèche, aucune position n'est privilégiée par rapport à une autre.
- Dans le cas d'une alimentation continue, l'aspect de l'arc dépend de la polarité de l'électrode qui se trouve juste à proximité de l'arc (en cas de zone humide). Il semblerait que l'anode provoque un arc en forme de simple décharge lumineuse. La cathode, par contre, provoque un arc aux multiples ramifications fines. De plus, le développement de l'arc à proximité de la cathode est plus rapide que celui à proximité de l'anode.
- Plusieurs arcs peuvent se développer en parallèle aux premiers stades du processus. Ceux-ci disparaissent, ensuite lorsque le courant augmente, un seul arc dominant persiste au cours des étapes suivantes. Celui-ci se développe donc, seul, à travers la zone humide. Dans le cas de plusieurs zones sèches, le développement de l'arc d'une zone sèche à travers la zone humide s'effectue de manière à rejoindre l'arc développé sur la zone sèche voisine.
- Le contournement se fait à travers les chemins déjà préétablis par les différents arcs de chaque zone sèche.
- Lorsque l'expérience est répétée, les positions des arcs développés sont différentes, et le contournement se fera donc à travers tout un autre chemin.

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

I.4.2. Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh [16] :

Ce modèle est constitué d'une électrode placée au-dessus d'une plaque isolante, à une distance variable s , considérée égale à la largeur de la zone sèche. Cette plaque est placée sur quatre colonnes uniformément polluées et situées à une distance $l-s$ de la terre (Figure. I.2). Une tension alternative de fréquence 50 Hz est alors appliquée au modèle.

Les auteurs se sont alors intéressés à la variation de la tension de contournement en fonction de la largeur s de la zone sèche, pour plusieurs conductivités de la pollution appliquées aux colonnes.

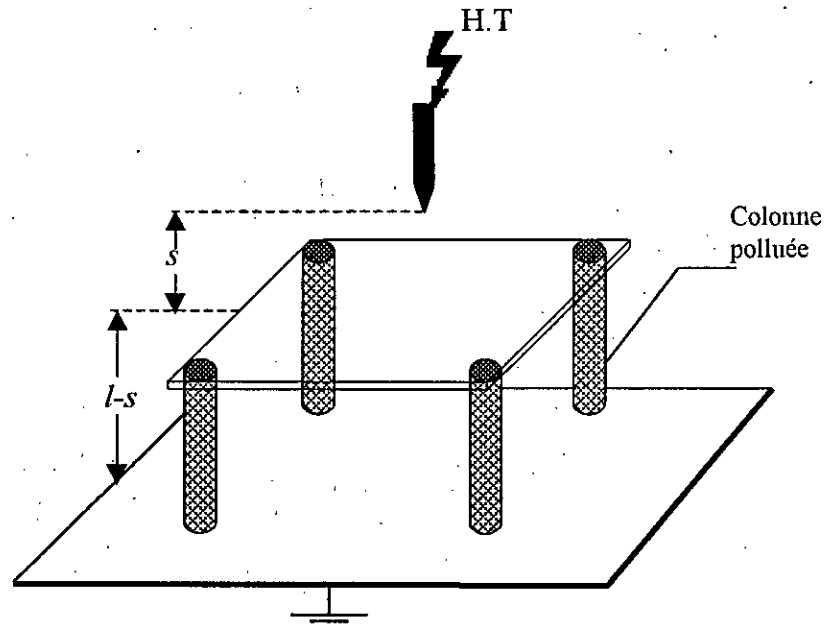


Fig.I.2 : Modèle de *M.N.Rayes* et *M.Zhirh*

Les auteurs ont donc abouti aux résultats suivants :

- La tension de contournement U_c en fonction de " s " atteint un minimum, correspondant à une largeur s_{min} qui se situe à environ 45-50% de la longueur totale, ce sont des courbes en forme de "V".
- La tension de contournement, pour une même largeur de la zone sèche, 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 $s > s_{min}$.

Les auteurs ont conclu que :

- La tension de contournement de l'isolateur dépend du rapport des largeurs des zones sèche et polluée.

- Les courbes en forme de V des tensions de contournement totales montrent que cette dernière ne représente pas la somme des contournements partiels zone sèche-zone polluée.
- 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.
- La rigidité diminue pour une plage précise de variation de la zone sèche. Cette plage devrait dépendre de la longueur critique d'arc, qui serait favorisée par des zones sèches préétablies.
- L'augmentation de la rigidité lorsque la largeur sèche préétablie devient supérieure à la largeur critique, où aucun arc stable ne peut être observé. Cette largeur critique dépendra du modèle utilisé.

I.4.3. Autres modèle de laboratoire :

Plusieurs études sur le modèle plan et rectangulaire similaire à celui considéré par P.Claverie et Y.Porcheron [17] ont été faites au niveau du laboratoire de Haute Tension de l'Ecole National Polytechnique [10;18]. Nous les évoquons brièvement afin de faire une liaison avec notre travail. Ces travaux s'intéressaient surtout à l'évolution du courant de fuite ainsi que la longueur de l'arc électrique en fonction :

De la conductivité de la couche de pollution, du rayon de l'électrode circulaire, de la distance inter-électrodes, de l'épaisseur de la couche de pollution, Et de la répartition discontinue de la couche de pollution.

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

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

I.4.3.1. Modèle de D. Namane:

Afin d'examiner le comportement des surfaces isolantes sous pollution discontinue, D.Namane [19] a proposé un modèle plan rectangulaire (Fig. I.3). Les différentes contraintes sous lesquelles est soumis son modèle de laboratoire sont: la discontinuité de la pollution en variant de manière régulière la largeur de la pollution, la position de la pollution par rapport aux électrodes ainsi que la conductivité de la couche polluante appliquée sur la plaque.

L'influence de ces contraintes sur le courant de fuite, sur la tension d'entretien de l'arc électrique et sur la tension de contournement ainsi que le processus de contournement, est alors examinée.

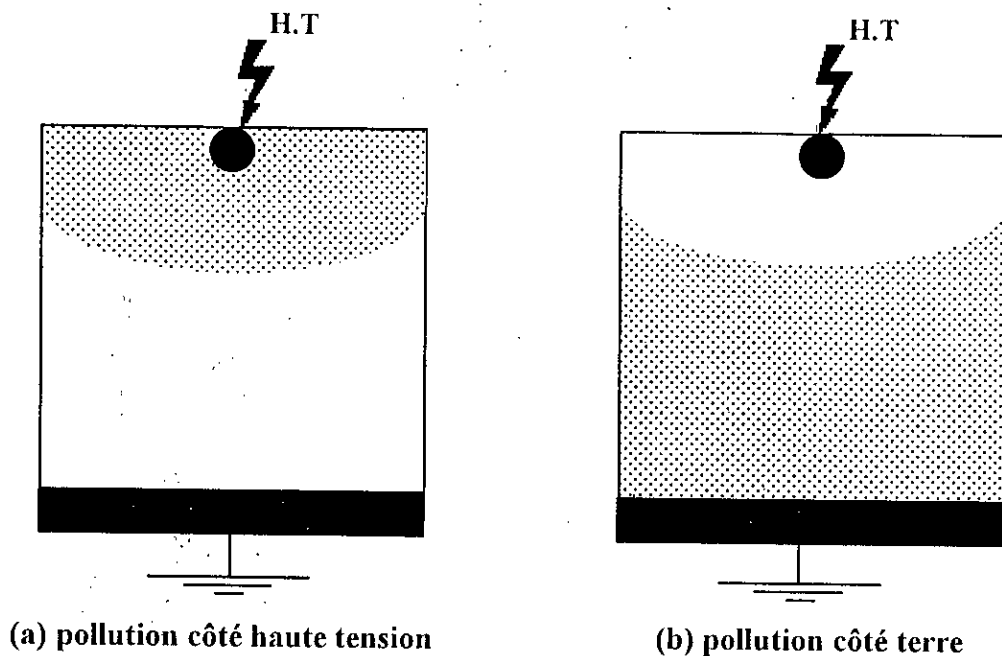


Fig.I.3 : Modèle expérimental selon D.Namane

Les principaux résultats qui ont été obtenus sont les suivants :

- ♦ Il existe un régime critique à partir duquel on obtient une hausse brutale du courant. Ce régime est caractérisé par une pollution de 90% de la surface de l'isolateur.

- ◆ Le courant de fuite est toujours plus élevé lorsque la couche polluante est du côté de l'électrode rectangulaire, mise à la terre. Ceci est dû au phénomène de la conduction dans la zone sèche et à l'effet de couronne. En effet, lorsque la zone sèche est de côté haute tension, le rayon de courbure de l'électrode circulaire provoque un champ électrique, vraisemblablement plus intense que celui de l'électrode rectangulaire, par conséquent, on obtient une augmentation du courant de fuite.
- ◆ La position de la couche polluante vue des électrodes a peu d'influence sur la tension d'entretien de l'arc.
- ◆ 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 d'arc à partir de laquelle on ne peut plus maintenir un arc stable. Cette longueur est évaluée au tiers de la longueur totale de la plaque isolante et diffère considérablement de la longueur critique d'arc obtenue par Claverie et Porcheron dans le cas d'une pollution continue. Cette longueur, est toutefois indépendante de la conductivité de la couche polluante.
- ◆ Il existe une conductivité limite, selon l'auteur, à partir de laquelle, en cas de zones sèches préétablies, la couche polluante peut être considérée comme court-circuitée. Cette conductivité est comprise entre 500 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

L'auteur a proposé un modèle théorique, décrivant l'isolateur en pollution discontinue. Ce modèle est basé sur le calcul de deux impédances équivalentes à la zone sèche et celle polluée.

Une bonne corrélation a été constatée entre les résultats expérimentaux et le modèle empirique tant que la zone sèche garde les mêmes propriétés d'isolement. Au-delà, le modèle théorique montre ses limites et ne convient plus puisque celui-ci ne tient pas compte de la variation de l'impédance de la zone sèche avec la tension reportée à ses bornes.

I.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mené une recherche bibliographique qui nous a permis d'explorer les différents résultats de plusieurs chercheurs portant sur le dépôt non-uniforme de la couche de pollution sur les surfaces isolantes. Les recherches sont faites sur des isolateurs réels ainsi que sur des modèles de laboratoire.

- La non-uniformité du dépôt polluant dépend généralement des facteurs d'auto-nettoyage, du profil de l'isolateur ainsi que de la position de cet isolateur par rapport au conducteur haute tension.
- La pollution augmente sensiblement de la zone périphérique vers la zone centrale de l'isolateur.
- Pour une chaîne d'isolateurs, la densité de la pollution est plus accentuée dans les éléments les plus proches au conducteur haute tension.
- les isolateurs soumis à une non-uniformité longitudinale ont une rigidité supérieure par rapport à la rigidité obtenue dans le cas d'une répartition uniforme de faible conductivité.
- Le contournement totale correspond à un des contournements partiels considérés, suivant le rapport entre les largeurs de la zone sèche et la zone polluée.
- La caractéristique donnant la tension de contournement en fonction de la largeur de la bande sèche ou polluée présente un minimum.
- Le courant de fuite augmente avec la tension appliquée et avec la largeur de la zone polluée. En outre, la position de cette dernière, par rapport aux électrodes, a une légère influence sur le courant de fuite.

CHAPITRE II

ETUDE EXPERIMENTALE

II.1. Introduction :

La répartition de la pollution sur les isolateurs de haute tension est souvent non-uniforme à cause des profils des isolateurs, du vent, ... A cet effet, nous nous intéressons dans notre étude expérimentale à étudier l'impact de ce type de pollution sur les phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des surfaces isolantes. En considérant deux couches de pollution de conductivité différente, nous analysons l'effet de la largeur des deux parties constitutives de la couche de pollution ainsi que leur position par rapport aux électrodes sur la tension de contournement ainsi que sur le courant de fuite et la longueur de l'arc électrique.

II.2. Technique expérimentale :

La figure (II.1) représente le dispositif expérimental du laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique. Il est constitué d'un circuit d'alimentation à fréquence industrielle (50 Hz), d'un modèle expérimental (objet d'essai), et d'un dispositif de mesure.

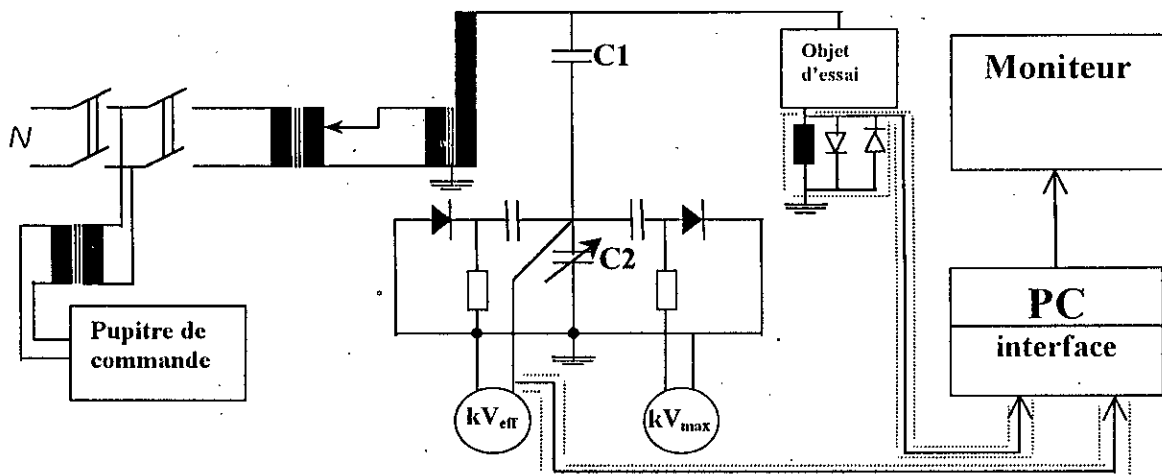


Fig.II.1 :- Dispositif expérimental

II.2.1. Circuit d'alimentation :

Il est constitué d'un transformateur d'essai 0,5/300 kV, 50kVA, 50Hz, dont le primaire est relié à un transformateur de réglage permettant d'ajuster la tension à la valeur désirée.

II.2.2. Modèle expérimental :

Le modèle expérimental est constitué d'une plaque en verre ayant la propriété de résister à la chaleur due à l'arc électrique. Les dimensions de cette plaque sont de $(500 \times 500 \times 6)$ mm³. Celle-ci est munie de deux électrodes planes, l'une circulaire de rayon 25 mm mise à la haute tension et l'autre rectangulaire de dimensions (300×40) mm² mise à la terre. Ces électrodes sont réalisées avec du papier aluminium dont l'épaisseur est de $3 \mu\text{m}$ (fig. II.2). Les dimensions des électrodes et la distance inter-électrodes L (400 mm) sont gardées constantes durant tous les essais.

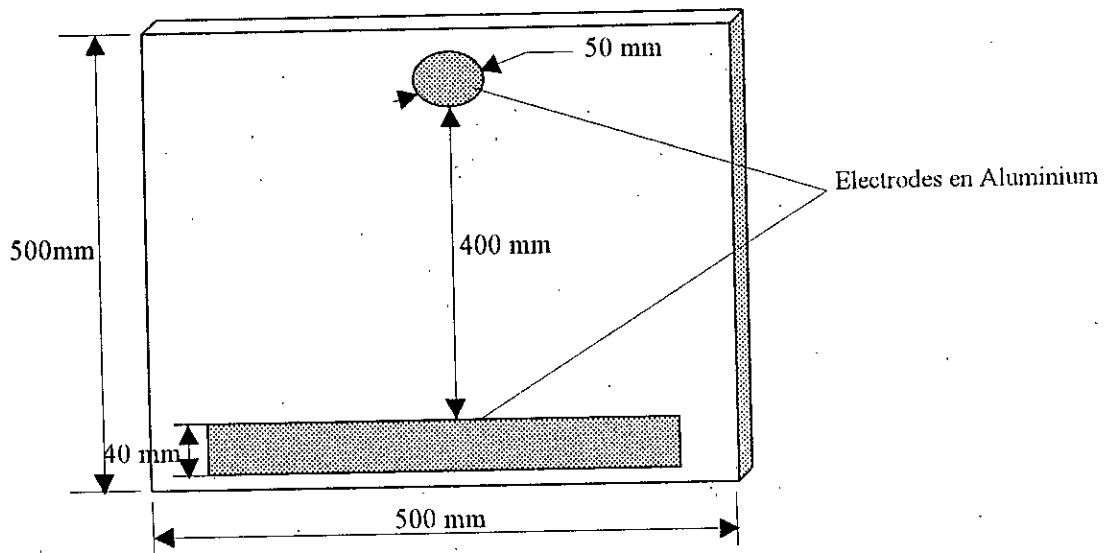


Fig. II.2 : - *Modèle expérimental*

II.2.3. Circuit de mesure :

II.2.3.1. Mesure de la tension appliquée :

La tension d'essai est mesurée à l'aide d'un diviseur de tension capacitif, relié au secondaire du transformateur d'essai. Ce diviseur est constitué d'une capacité haute tension C_1 de 400 pF, en série avec un ensemble de capacités basses tensions, permettant de réduire de 1/1000 la tension réelle (U_{C1}).

La lecture de la tension, ($U_{luc} = U_{C1}/1000$), peut être relevée à partir :

- ◆ D'un galvanomètre à spot lumineux permettant la lecture de la valeur de crête de la tension.

- ◆ D'un voltmètre électrostatique à spot lumineux pour la lecture de la valeur efficace de la tension.
- ◆ D'une sonde pour capter l'onde de la tension appliquée. Cette sonde est rapportée à l'aide d'un câble coaxial, sur une interface analogique/numérique.

II.2.3.2. Mesure du courant de fuite :

La mesure du courant de fuite s'effectue par l'intermédiaire de l'onde de la tension captée aux bornes d'une résistance de 100Ω connectée entre l'électrode rectangulaire et la terre. Cette onde est acquise également à l'aide d'un câble coaxial, et ramenée vers la même interface.

Pour atténuer l'influence des parasites dans le signal du courant recueilli, la résistance est introduite dans une boîte métallique mise à la terre, formant ainsi un écran électrique.

II.2.4. Mesure de la longueur d'arc :

La mesure de la longueur de l'arc se développant le long de la surface isolante polluée est effectuée à l'aide d'un appareil photographique numérique. Ce dernier permet l'enregistrement des séquences vidéo de 15 secondes.

II.2.5. Modes opératoires :

II.2.5.1. Préparation du modèle :

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

Le modèle est disposé horizontalement sur trois colonnes isolantes, elles-mêmes posées sur un support en bois. Le modèle se trouve ainsi placé à environ un mètre du sol, et à une distance suffisamment grande du transformateur d'essai de manière à éviter tout phénomène parasite dû au sol et aux bobinages du transformateur.

II.2.5.2. Préparation de la solution saline :

Le dépôt polluant est obtenu à partir d'un mélange d'eau distillée et de chlorure de sodium. La variation du degré de pollution est obtenue en variant la concentration du sel dans l'eau. Ainsi, nous fixons la conductivité de la solution à la valeur désirée grâce à un conductimètre. Cette solution est réajustée avant chaque essai afin de garder les mêmes caractéristiques de la solution. Les conductivités qui ont été adoptées sont $420 \mu\text{S/cm}$ et $42 \mu\text{S/cm}$.

II.2.5.3. Procédé d'application de la couche de pollution :

Dans cette étude, nous considérons que la pollution est constituée de deux couches. Celles-ci ont des conductivités différentes. Le dépôt polluant est obtenu par pulvérisation uniforme sur chaque partie séparément. Pour éviter le mélange des conductivités, nous avons utilisé lors de la pulvérisation, une plaque de verre, avec laquelle nous couvrons une zone pour pulvériser l'autre. Pour assurer une bonne uniformité et une bonne reproductibilité des couches polluantes, nous avons gardé, durant tous les essais, la même méthode de pulvérisation. En effet, pour chaque côté de la plaque, le nombre de pulvérisations ainsi que la distance et la position par rapport au modèle ont été maintenues.

II.2.5.4. Procédé d'essai :

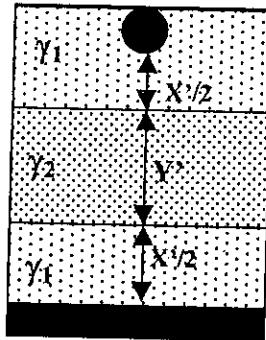
Après la préparation de l'objet d'essai, nous procédons à la mesure de la tension de contournement pour les différentes largeurs de la zone la plus conductrice. Cette mesure nous permet de prévoir les paliers de tension à appliquer pour l'enregistrement du courant de fuite et la détermination de la longueur d'arc à l'aide d'une caméra numérique. La tension d'essai est appliquée de manière croissante (2kV/s), jusqu'au niveau de tension désiré. En suite, nous relevons le signal du courant de fuite à l'aide de l'interface numérique et cela pour les différentes largeurs considérées. L'onde du courant de fuite est enregistrée cinq fois pour chaque palier de tension, afin de déterminer sa valeur moyenne de crête.

II.3. Configurations de la pollution :

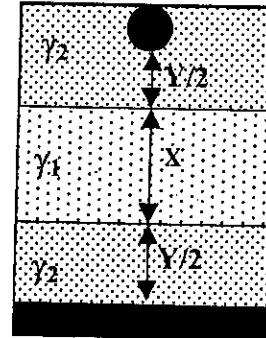
Deux configurations de la pollution sont considérées. Nous adoptons, également, deux types de pulvérisation pour chaque configuration.

Pour la première configuration, trois couches de pollution (solutions salines) ont été appliquées. Les couches qui se situent près des électrodes sont identiques (même

conductivités et dimensions). Par contre, celle au milieu possède une conductivité différente. Dans un premier cas, la couche fortement conductrice se situe des deux côtés de la plaque isolante, contrairement, au second cas où cette couche est appliquée au milieu. (Fig.II.3)



a :- première disposition



b :- deuxième disposition

Fig.II.3 : Dispositions des couches polluantes sur la plaque isolante pour la première configuration

Où :

Y : la largeur de la partie fortement conductrice située des deux cotés de la plaque.

Y' : la largeur de la partie fortement conductrice située au milieu de la plaque.

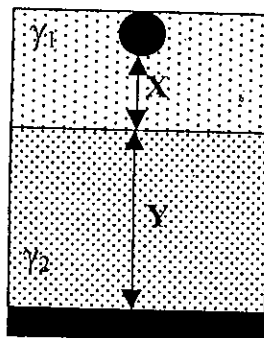
X : la largeur de la partie la moins conductrice au milieu de la plaque.

X' : la largeur de la partie la moins conductrice des deux cotés de la plaque isolante.

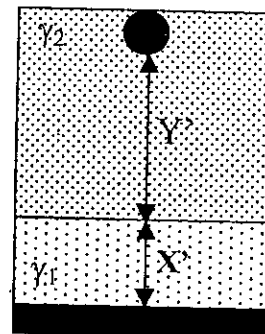
γ_1 : conductivité de la zone faiblement conductrice ($42 \mu\text{S/cm}$).

γ_2 : conductivité de la zone fortement conductrice ($420 \mu\text{S/cm}$).

Concernant la deuxième configuration, nous considérons deux milieux de conductivités différentes. La couche fortement conductrice est totalement établie du côté terre, pour le premier type de pulvérisation de la solution saline, et du côté haute tension, pour le seconde type (Fig.II.4).



c :- Première disposition



d :- Deuxième disposition

Fig.II.4:- Dispositions des couches polluantes sur la plaque isolante pour la deuxième configuration

où :

Y : la largeur de la partie fortement conductrice située du côté terre.

Y' : La largeur de la partie fortement conductrice située du côté haute tension.

X : la largeur de la partie la moins conductrice située du côté haute tension

X' : la largeur de la partie la moins conductrice située du côté terre.

γ_1 : conductivité de la zone faiblement conductrice ($42 \mu\text{S/cm}$).

γ_2 : conductivité de la zone fortement conductrice ($420 \mu\text{S/cm}$).

A partir des figures (II.3) et (II.4), nous constatons que les deux configurations sont similaires car les largeurs des deux couches de pollution sont préservées.

Dans ce qui suit, nous présentons, en premier lieu, les résultats expérimentaux pour chaque configuration séparément. Une étude comparative entre les deux configurations est ensuite examinée.

Ainsi, nous allons étudier l'influence de plusieurs paramètres à savoir la position des deux parties de la couche par rapport aux électrodes et la largeur de la partie la plus conductrice sur le courant de fuite pour différents niveaux de tension. La tension de contournement sera aussi étudiée.

II.4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

II.4.1. Observations :

a) Etapes de contournement :

Pour une couche de pollution uniforme, nous avons constaté que l'application d'une tension de quelques kilovolts entre les électrodes, engendre un courant de fuite. Ce courant croît à mesure que l'électrolyte s'échauffe. Au bout de quelques périodes, l'échauffement par effet joule est tel que, dans les régions à plus forte densité de courant (autour de l'électrode active), le liquide est vaporisé et une zone sèche apparaît. Une partie importante de la tension appliquée se trouve reportée sur cette bande sèche engendrant, si le champ qui en résulte est suffisant, le claquage diélectrique et l'établissement de nombreuses décharges radiales entourant l'électrode active (Fig. II.5). La forte densité du courant au voisinage des têtes des décharges, provoque une évaporation très rapide du liquide. Si, à partir de ce régime, la tension est augmentée, les arcs s'allongent dans la direction de l'électrode opposée (Fig. II.6). En augmentant d'avantage la tension par paliers, nous atteignons un état critique au-delà duquel toute nouvelle augmentation de la tension provoque immédiatement le contournement par développement d'un arc radial (Fig.II.7).

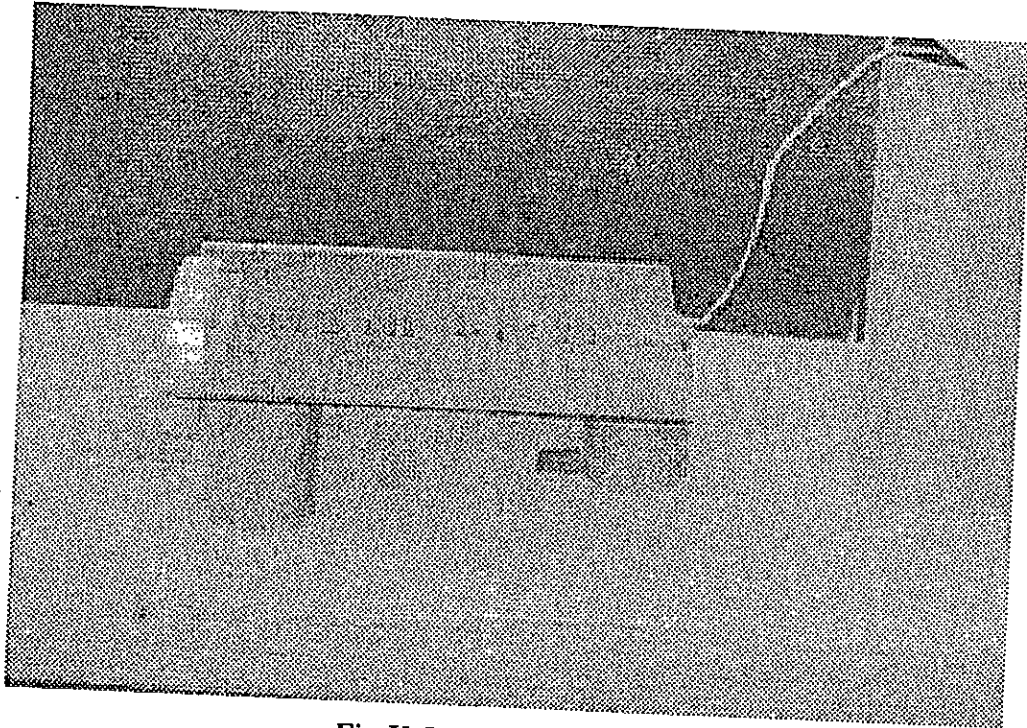


Fig.II.5 : Initiation d'arc

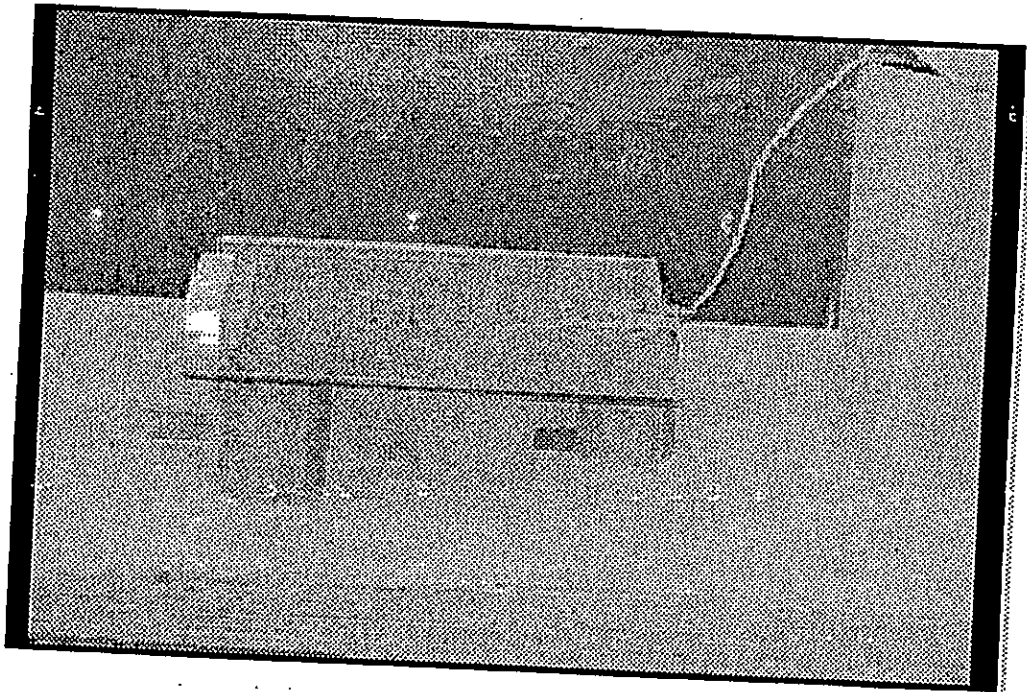


Fig.II.6 : développement d'arc.

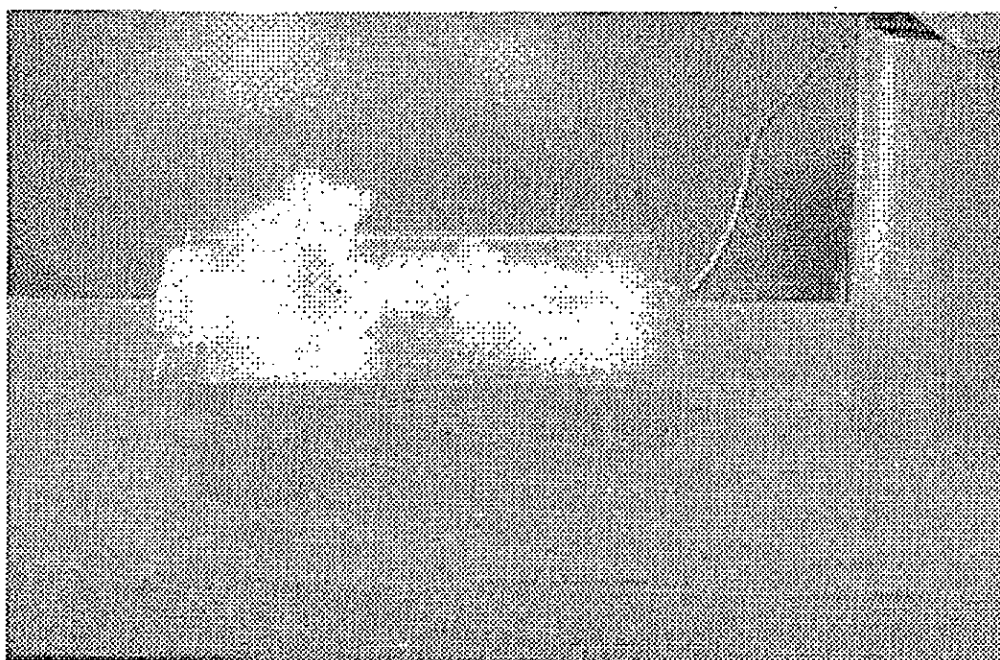


Fig. II.7. : Contournement total.

b) Evolution de l'onde du courant de fuite :

Quand la tension est augmentée graduellement jusqu'au contournement, l'évolution du signal du courant de fuite se fait à travers quatre étapes :

1. Pour les faibles tensions d'alimentation (< 15 kV), le courant de fuite est pseudo-sinusoïdal (Fig.II.8). A partir d'un certain seuil estimé à 20 kV, et sous l'effet couronne, chaque alternance de l'onde courant prend la forme d'un M distordu (Fig.II.9).
2. Dès l'initiation des premières luminosités autour de l'électrode haute tension et à partir de 26 kV, nous constatons la génération d'impulsions d'amplitudes limitées (Fig. II.10).
3. Pour des tensions supérieures; les distorsions ainsi que les amplitudes des impulsions deviennent importantes (Fig. II.11).
4. Le contournement ; le courant n'est constitué que par impulsions d'amplitudes variables.

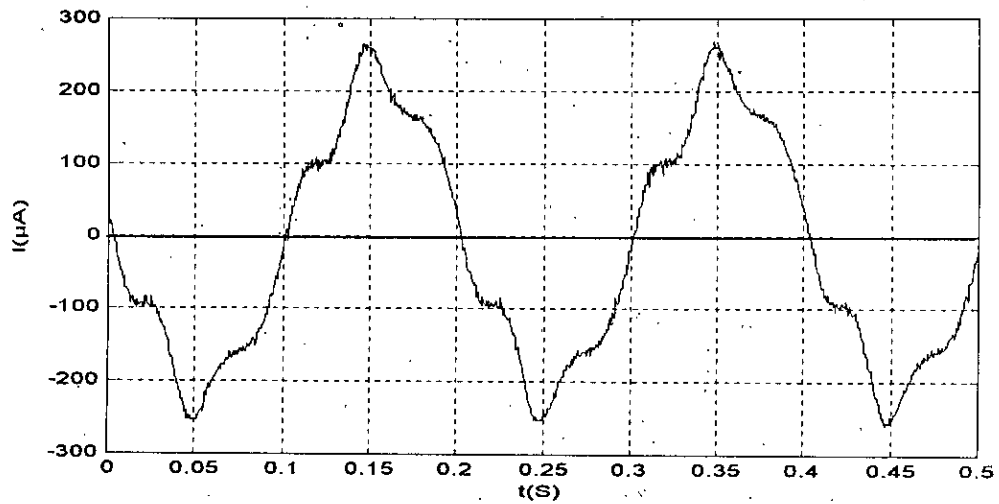


Fig.II.8 : Signal du courant de fuite pour 15 kV

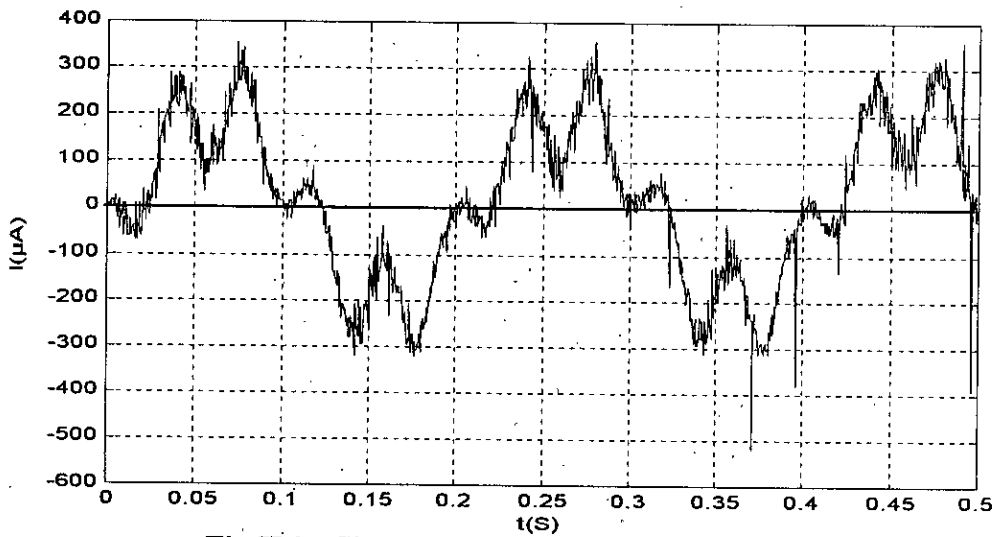


Fig.II.9 : Signal du courant de fuite pour 20 kV

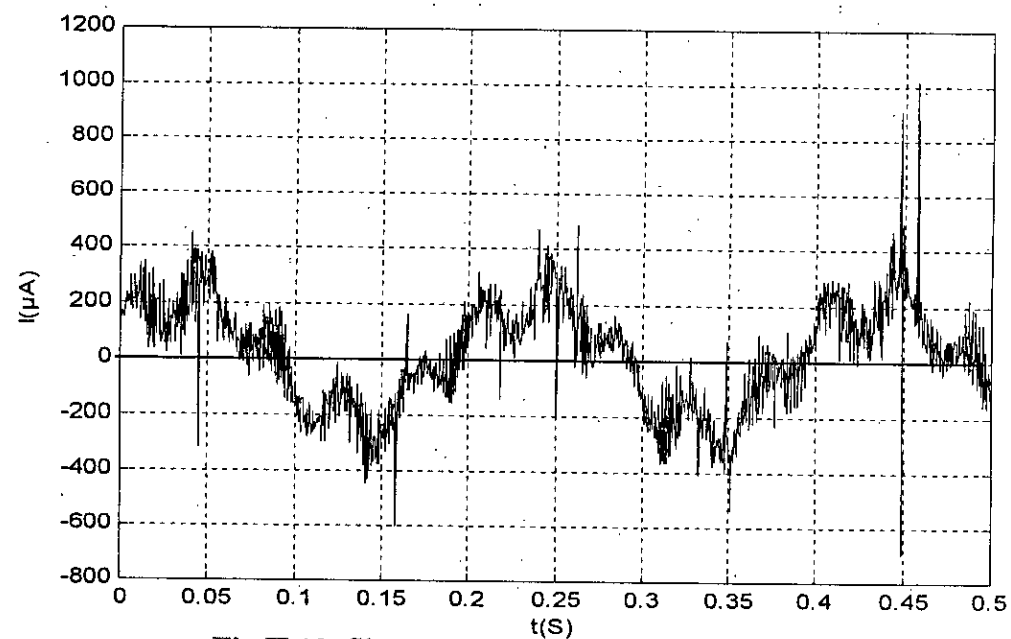


Fig.II.10. Signal du courant de fuite pour 26 kV

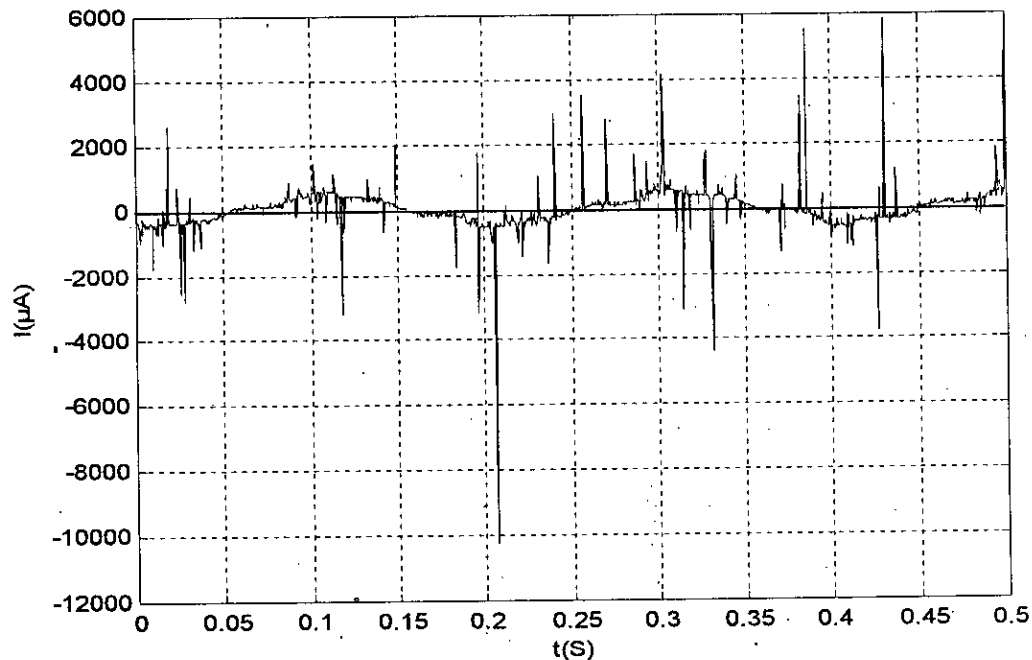


Fig.II.11 : Signal du courant de fuite pour 34 kV

II.4.2. Interprétations :

II.4.2.1. Première Configuration :

II.4.2.1.1. Etude du Courant de fuite :

II.4.2.1.1.1. Influence de la tension appliquée :

Les courbes de la figure (II.12) et (II.13) présentent les variations du courant de fuite en fonction de la tension d'alimentation pour les différentes largeurs de la zone fortement conductrice ($\gamma_2 = 420 \mu\text{S/cm}$). Pour les deux dispositions considérées, nous remarquons que pour toutes les largeurs de la partie la plus conductrice ainsi que sa position par rapport aux deux électrodes, le courant de fuite augmente avec la tension appliquée. Cependant cette augmentation est relativement faible pour des tensions qui ne dépassent pas un certain seuil estimé à 15 kV. Par contre, pour des tensions supérieures à 15 kV, l'accroissement du courant de fuite devient très sensible. Ceci est dû au fait que, l'application d'une tension élevée provoque l'apparition de l'effet couronne, suivie par la génération d'arcs à la surface de l'isolateur. Ainsi le courant de fuite augmente rapidement.

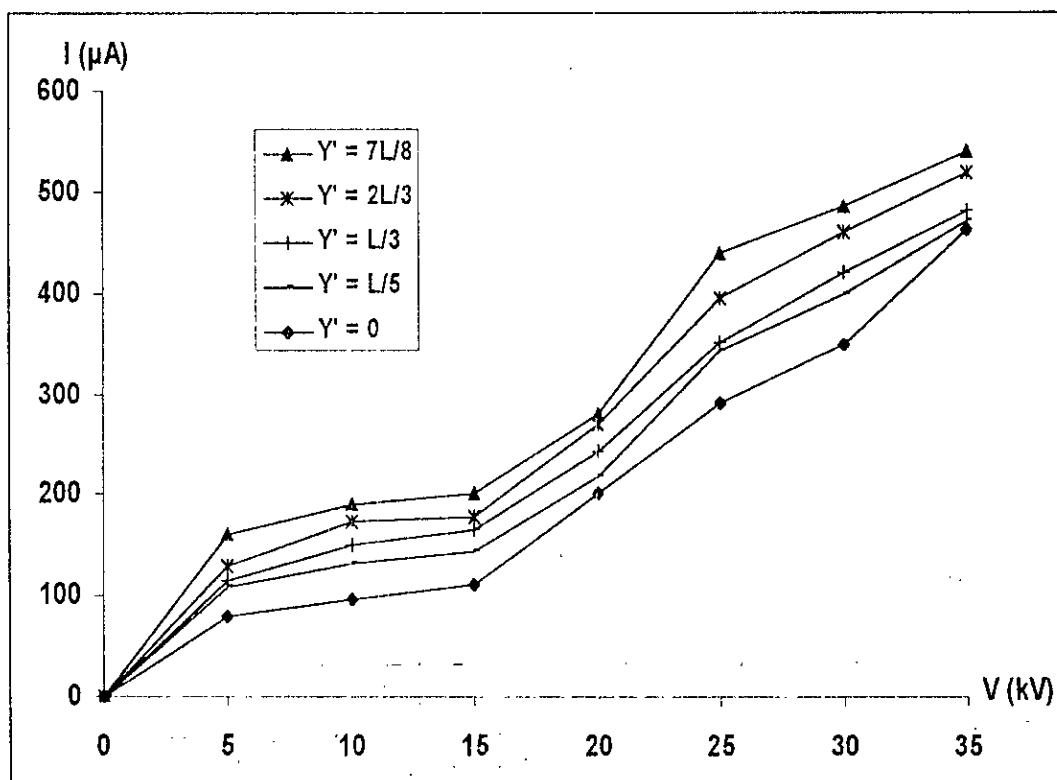
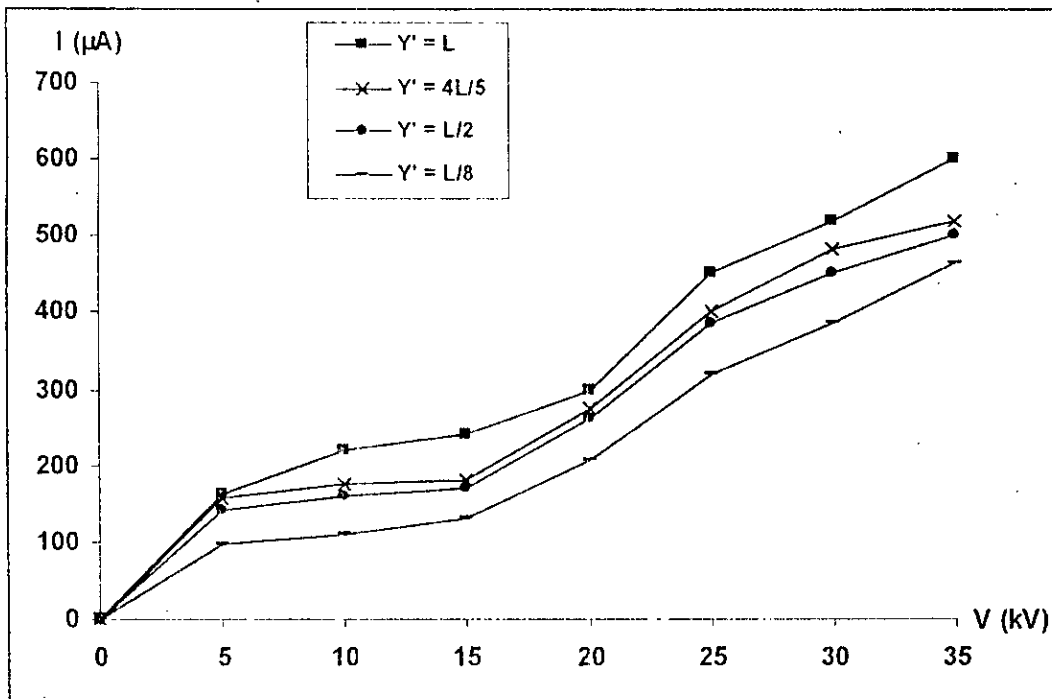


Fig.II.12. Courant de fuite – Tension appliquée concernant la première disposition

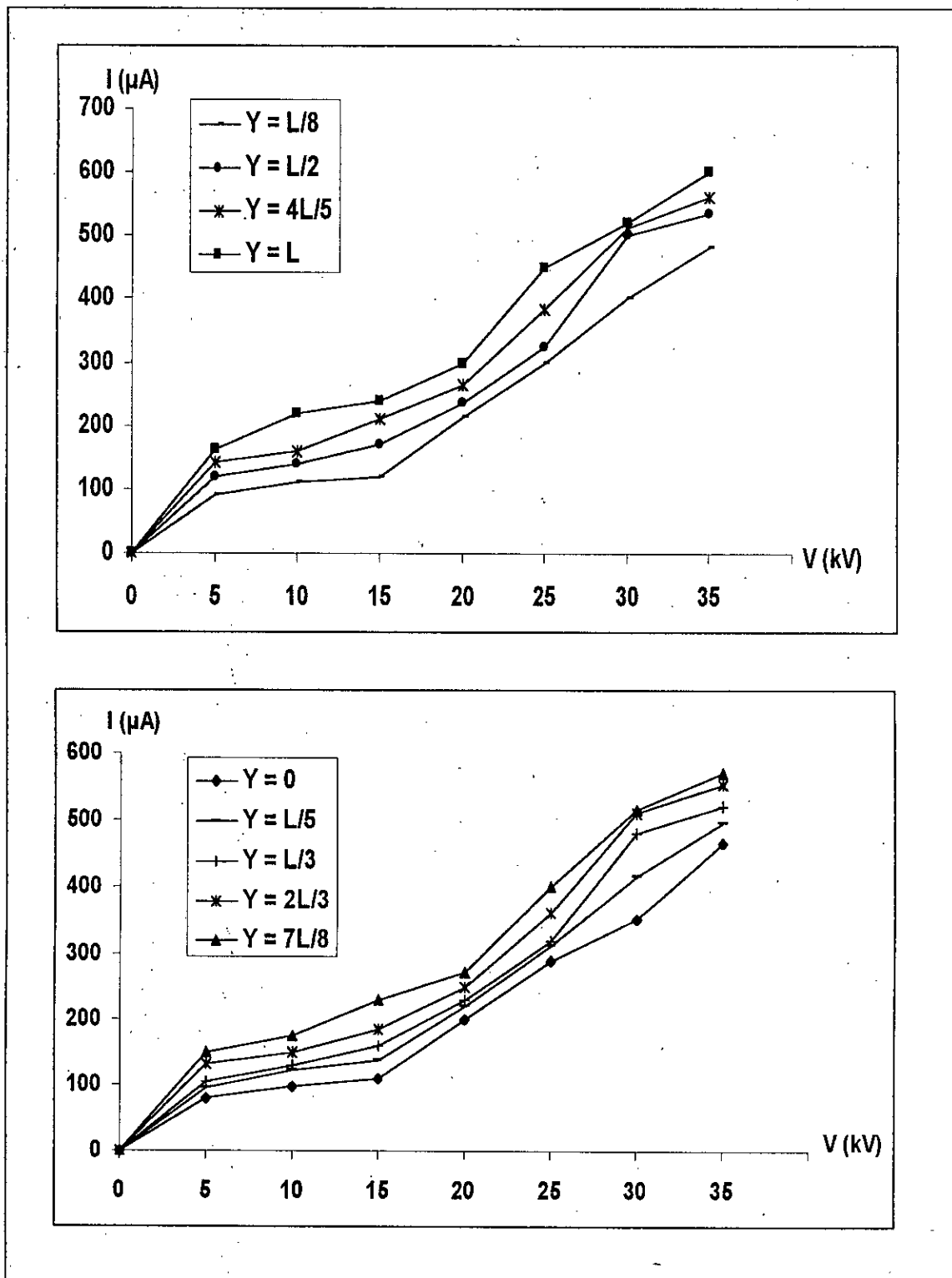


Fig.II.13 : Courant de fuite – Tension appliquée concernant la deuxième disposition

II.4.2.1.1.2. Influence de la largeur de la zone fortement conductrice :

Les figures (II.14) et (II.15) illustrent les évolutions du courant de fuite, pour chaque niveau de tension, appliquée en fonction de la largeur de la partie la plus conductrice de la couche polluante, et ce pour les deux dispositions présentées précédemment. Dans les limites des tensions adoptées, nous remarquons une légère augmentation du courant de fuite en fonction de la largeur de la partie fortement conductrice. Etant donné que l'élargissement de la couche la plus conductrice engendre la diminution de l'impédance totale du modèle ; le courant de fuite augmente.

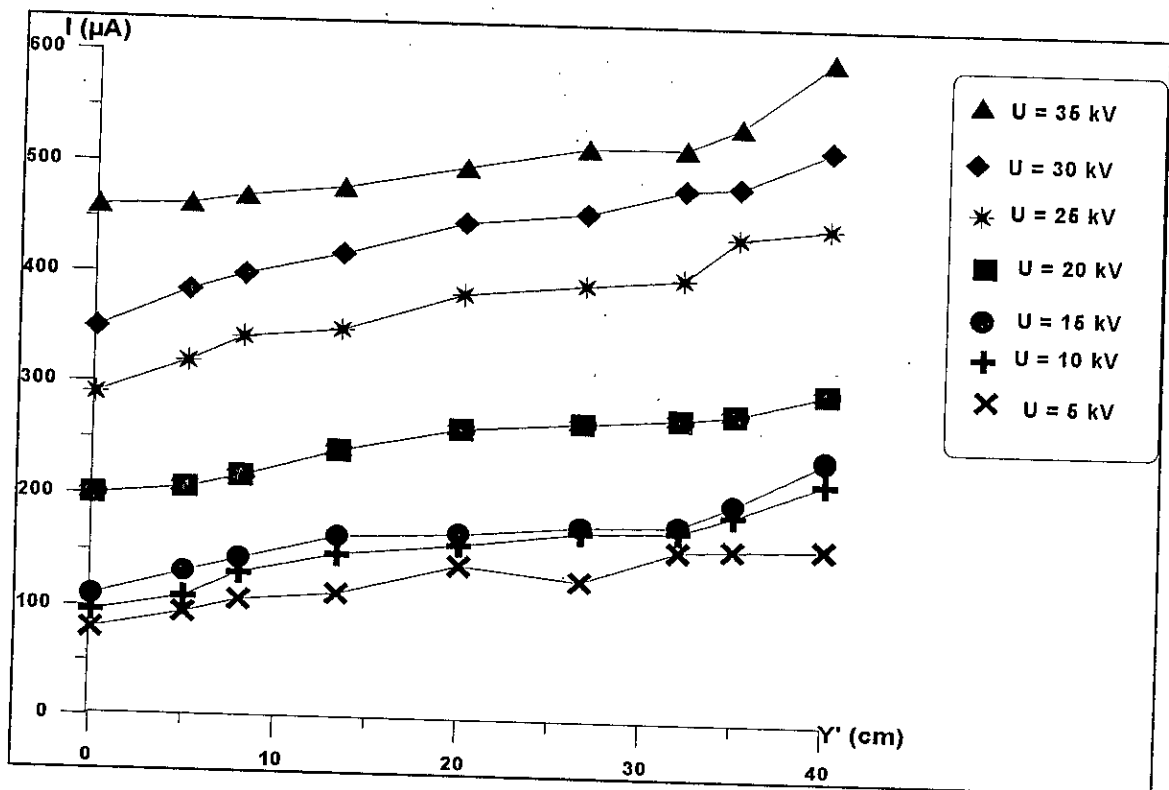


Fig.II.14 : Courant de fuite – Largeur de la couche fortement conductrice pour la première disposition

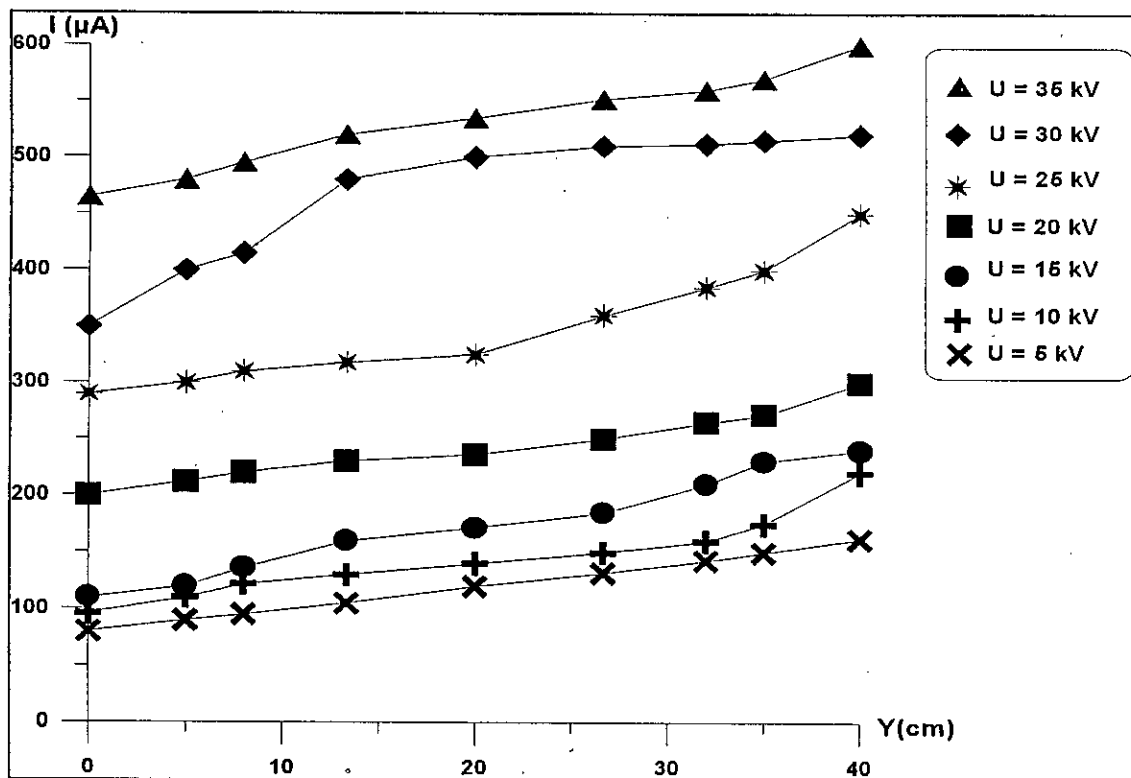


Fig.II.15 : Courant de fuite – Largeur de la couche fortement conductrice pour la deuxième disposition

II.4.2.1.1.3 Influence de la position des deux parties des couches polluantes :

A la lumière des résultats obtenus et présentés sur la figure (II.16), nous allons examiner les variations du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour les mêmes largeurs de la partie la plus conductrice, et ceci pour les deux dispositions considérées.

Ces courbes montrent que pour les niveaux de tension inférieurs à 30kV, les courants de fuite ont approximativement les mêmes amplitudes quelle que soit la position de la partie la plus conductrice. En effet, la position de la partie ayant la plus grande conductivité n'a pratiquement pas d'influence sur l'évolution du courant de fuite pour cette gamme de tension appliquée. Cependant, et à partir de 30 kV, nous remarquons un léger dépassement dans le cas où la partie la plus conductrice se situe au milieu. Ceci s'explique par le fait que le champ électrique est intense, ce qui provoque l'assèchement de cette partie, conduisant à l'apparition rapide de l'effet couronne et la création des arcs électriques, ce qui fait augmenter intensément le courant de fuite.

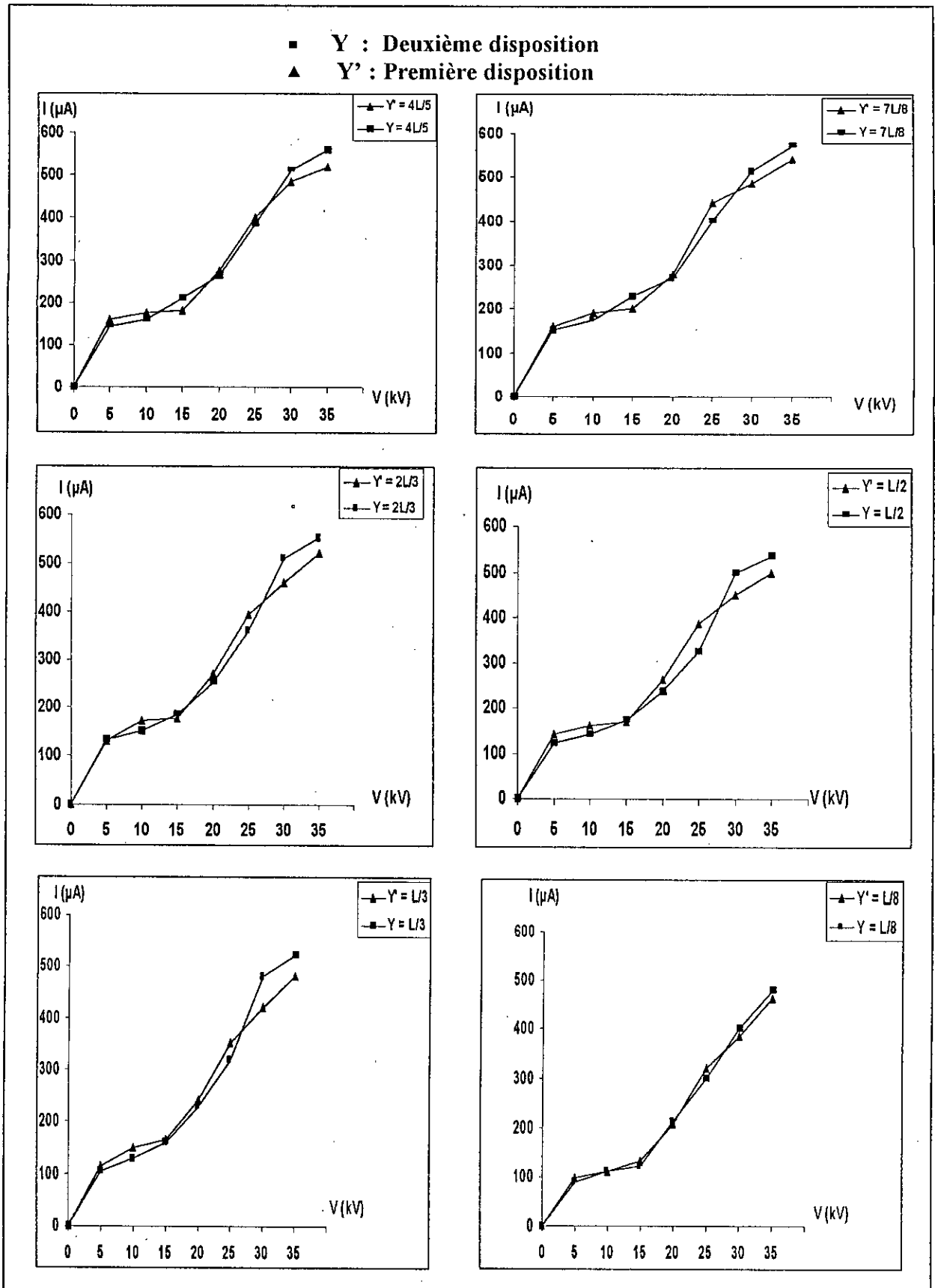


Fig.II.16 : Courant de fuite – Tension appliquée

II.4.2.1.2. Etude de la tension de contournement :

Les variations de la tension de contournement en fonction de la largeur et de la position de la partie fortement conductrice sont présentées sur la figure (II.17).

II.4.2.1.2.1. Influence de la largeur de la partie fortement conductrice :

Nous constatons, dans les deux cas, que la tension de contournement diminue avec la croissance de la largeur de la partie la plus conductrice de la couche polluante. Ce résultat est prévisible, car l'augmentation de la largeur de la partie la plus conductrice provoque la diminution de l'impédance équivalente totale vue des électrodes ainsi la tenue diélectrique du système se dégrade de plus en plus.

II.4.2.1.2.1. Influence de la position de la partie fortement conductrice :

Pour une même largeur de la couche la plus conductrice, la tension de contournement est légèrement supérieure lorsque cette couche est située au milieu de la plaque isolante. Ce qui veut dire que le système avec cette disposition de la pollution est plus rigide, car la plus grande portion de la tension appliquée se trouve reportée aux bornes de la partie de la couche présentant la plus faible conductivité. Or, la division de cette portion de la tension appliquée, dans la première disposition, engendre l'augmentation de la rigidité du système. Ainsi, les isolateurs sont plus rigides lorsque les zones les moins conductrices sont réparties que lorsqu'elles sont adjacentes. Cette constatation a été prouvée par d'autres chercheurs [20].

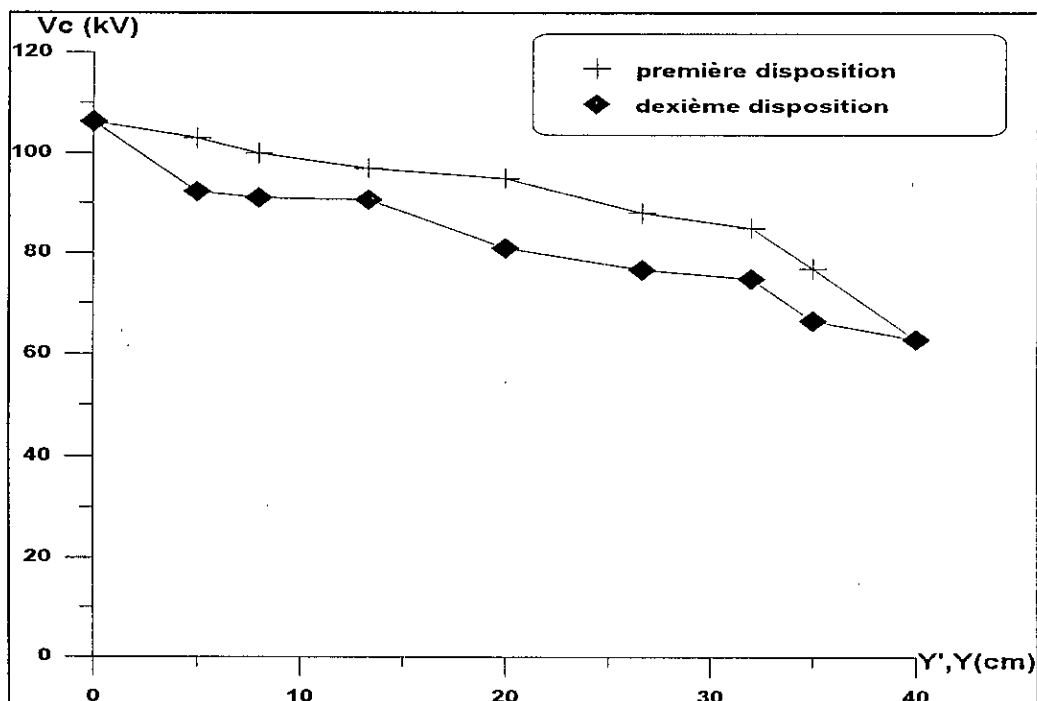


Fig.II.17 : Tension de contournement – Largeur de la couche fortement conductrice

II.4.2.1.3. Etude de la longueur d'arc :

Les allures de la longueur d'arc en fonction de la tension appliquée sont présentées sur les courbes des figures (II.18) et (II.19). De même que le courant de fuite, l'augmentation de la tension appliquée provoque l'allongement de l'arc électrique. Cela s'explique par l'apport d'énergie, résultant de l'augmentation de la tension.

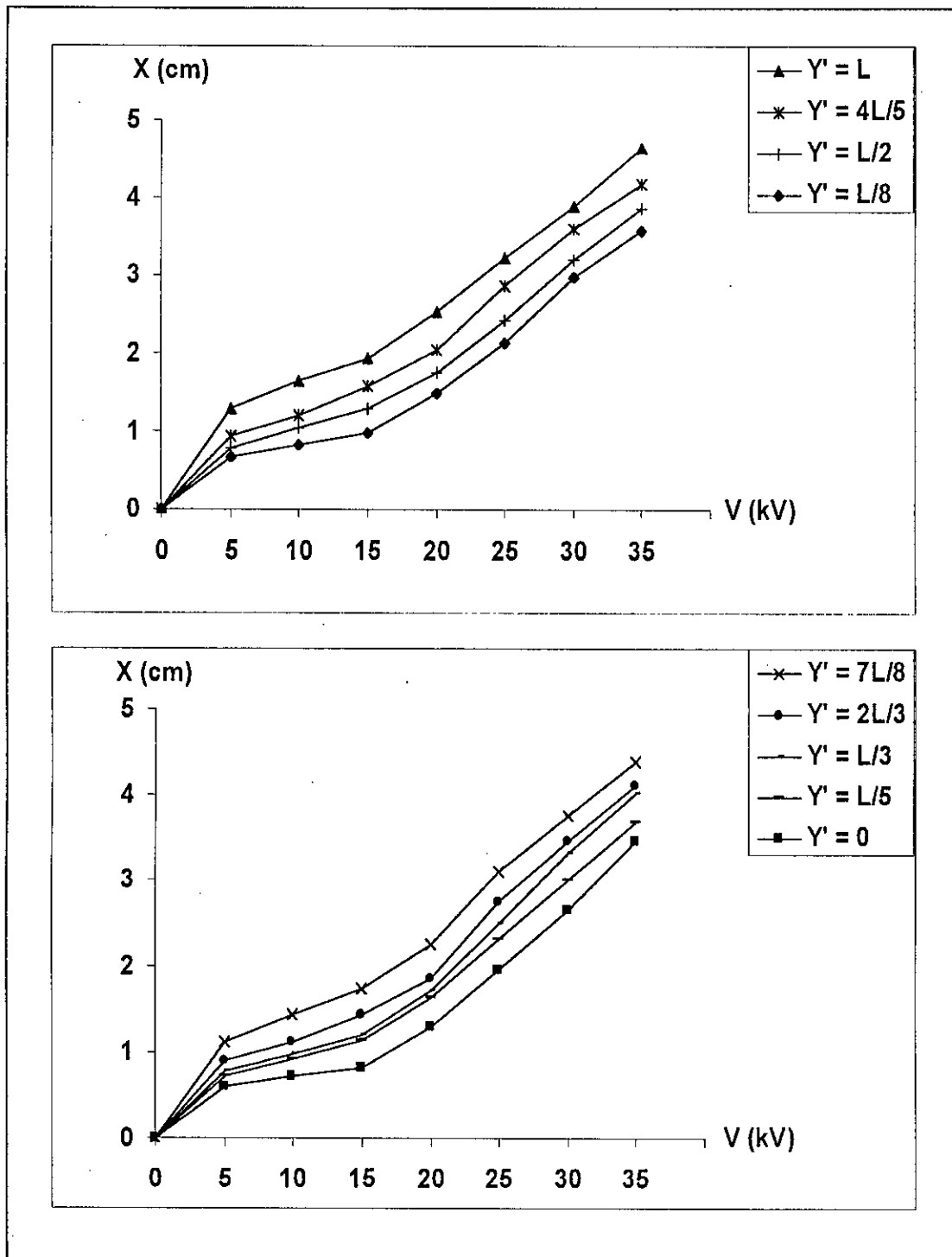


Fig.II.18 : Longueur d'arc – Tension appliquée pour la première disposition

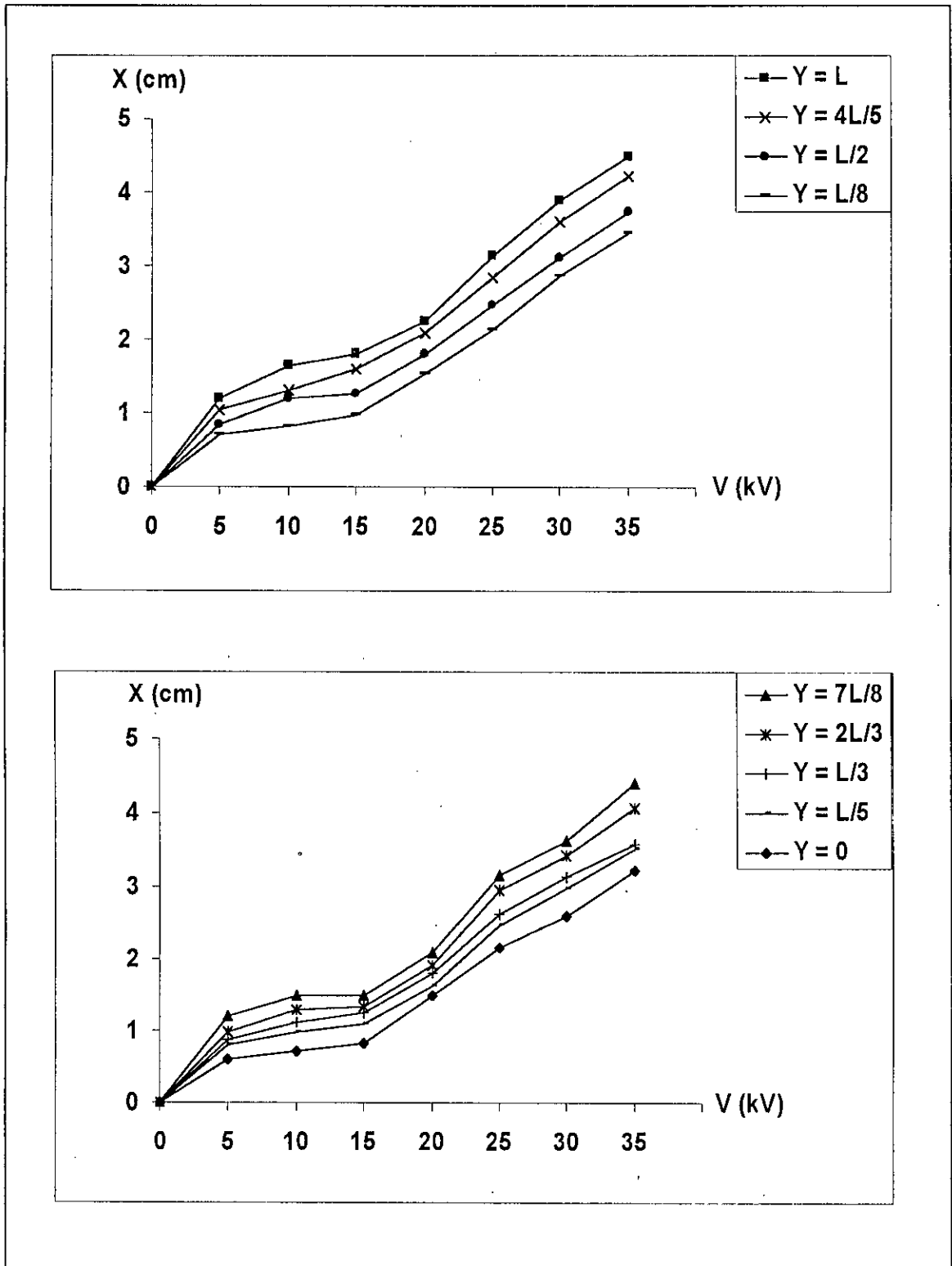


Fig.II.19 : Longueur d'arc – Tension appliquée pour la deuxième disposition

II.4.2.2. Deuxième Configuration :

II.4.2.2.1. Etude du courant de fuite :

II.4.2.2.1.1. Influence de la tension appliquée :

Les caractéristiques donnant le courant de fuite en fonction de la tension appliquée sont présentés sur les figures (II.20) et (II.21).

Nous remarquons, pour les deux dispositions, que le courant de fuite augmente avec la tension appliquée. C'est la même constatation qui a été faite lors de la première configuration.

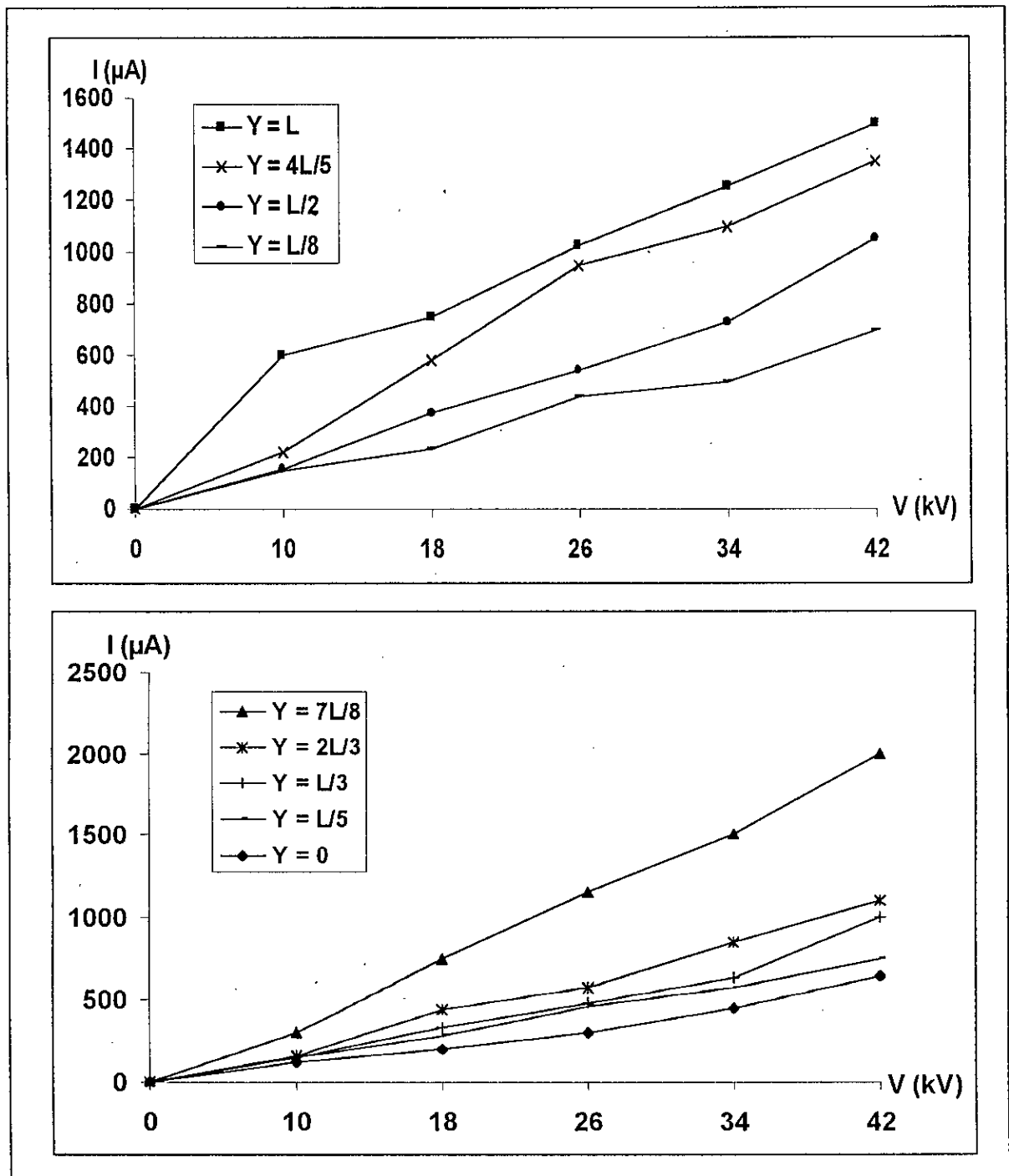


Fig.II.20 : Courant de fuite – Tension appliquée pour la première disposition

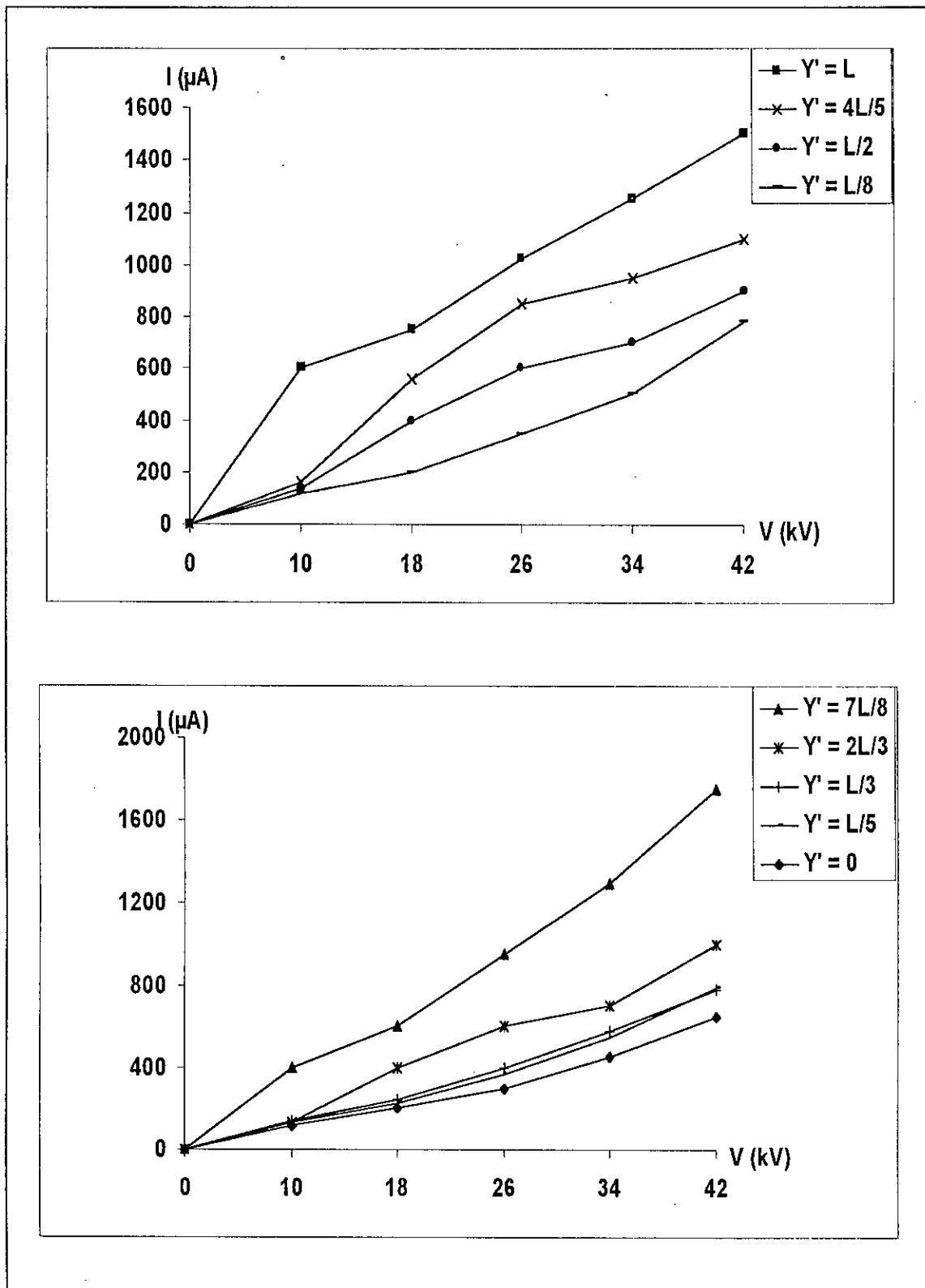


Fig.II.21 : Courant de fuite – Tension appliquée pour la deuxième disposition

II.4.2.2.1.2. Influence de la largeur de la partie fortement conductrice :

Les figures (II.22) et (II.23) représentent les variations du courant de fuite en fonction de la largeur de la partie la plus conductrice de la couche polluante, et ce pour les différents niveaux de tension qui ont été choisis

Pour des niveaux de tension inférieurs à un certain seuil estimé à 18 kV pour la première disposition et à 26 kV pour la deuxième, les caractéristiques du courant de fuite en fonction de la tension appliquée montrent que, quelle que soit la largeur de la partie la plus conductrice, le courant de fuite augmente avec la tension d'essais. Cependant, pour des tensions supérieures, ces courbes présentent un maximum lorsque la largeur de la couche la plus conductrice atteint 35 cm. Ce phénomène est observé pour les deux dispositions de la couche polluante. Ce maximum correspondrait à la position la plus favorable à la formation rapide des arcs électriques.

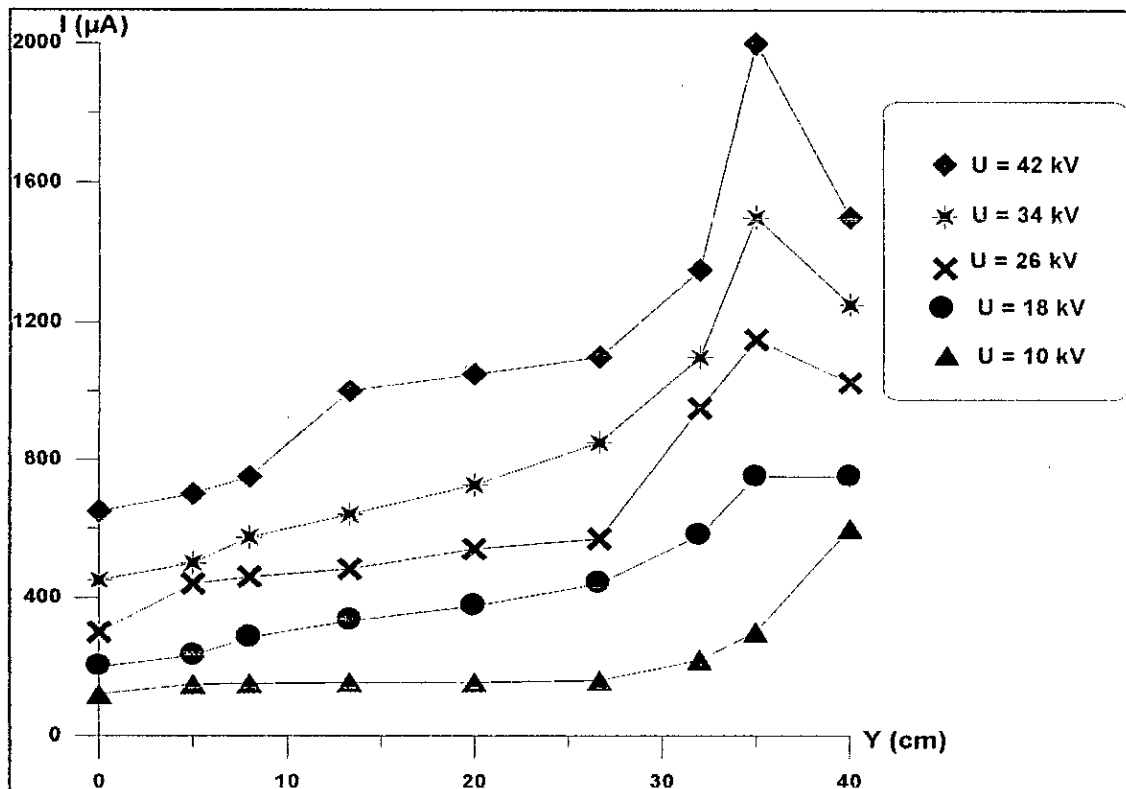


Fig.II.22 : Courant de fuite – Largeur de la partie fortement conductrice pour la première disposition

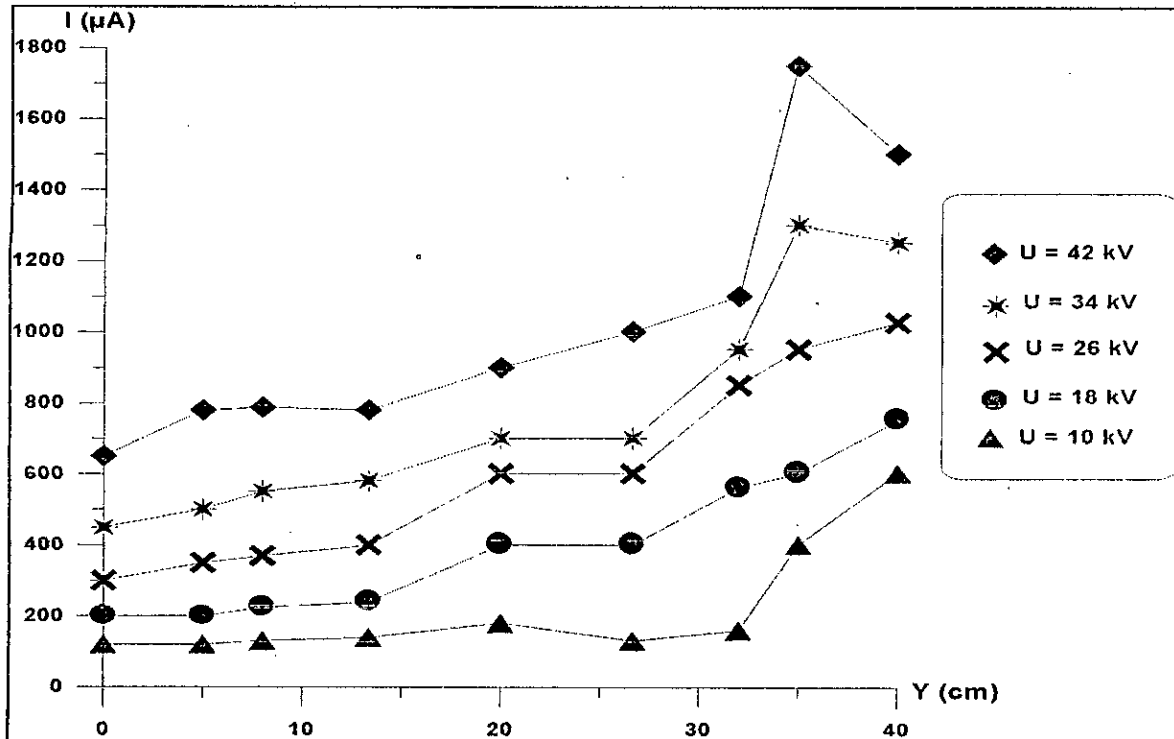


Fig.II.23 : Courant de fuite –Largeur de la partie fortement conductrice pour la deuxième disposition

II.4.2.2.1.2 Influence de la position de la partie fortement conductrice :

Les résultats représentant l'évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour les deux positions considérées de la partie fortement conductrice de la couche polluante sont présentés dans la figure (II.24).

Pour les deux dispositions de la pollution considérées, ces courbes sont très proches pour les faibles niveaux de tension. Pour des niveaux de tension élevés, le courant de fuite correspondant au cas de la pollution la plus conductrice côté terre est plus important que celui correspondant au cas de la même couche située du côté haute tension. Ainsi, la présence d'une pollution de grande conductivité au voisinage de l'électrode terre conduit à un courant de fuite plus grand. Cela est dû principalement à l'apparition des phénomènes d'ionisation de l'air. En effet, à cause de sa forme (rayon de courbure), l'électrode circulaire provoque un champ électrique plus intense que celui de l'électrode rectangulaire. D'autre part, et en présence d'une couche faiblement polluée, la plus grande portion de la tension appliquée se trouve reportée à ses bornes. Le champ résultant provoque l'assèchement de cette couche et donc une forte ionisation de l'air et la création rapide de l'arc électrique. L'arc créé dans cette couche favorisera de plus l'augmentation du courant de fuite.

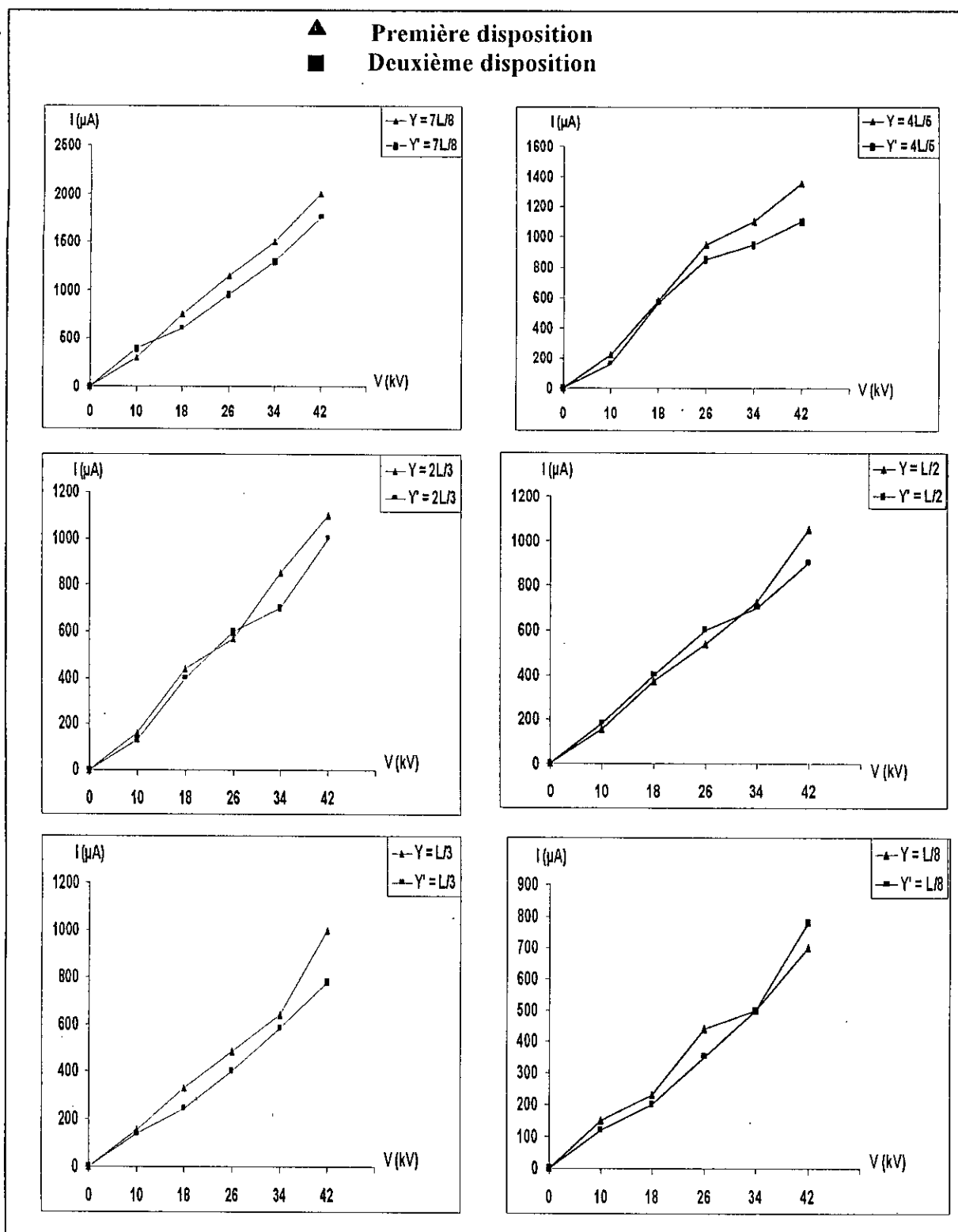


Fig.II.24 : Courant de fuite – Tension appliquée

II.4.2.2.2. Etude de la tension de contournement :

II.4.2.2.2.1. Influence de la largeur de la partie fortement conductrice :

Les principaux résultats qui illustrent les variations de la tension de contournement en fonction de la largeur de la partie la plus conductrice sont présentés à la figure (II.25).

Pour les deux dispositions de la pollution, cette figure montre qu'en augmentant la largeur de la partie fortement conductrice, la tension de contournement, en premier lieu, diminue. Ce résultat est prévisible, puisque l'allongement de la partie la plus conductrice engendre la diminution de l'impédance totale vue des électrodes concernant le modèle de laboratoire, ainsi la tenue diélectrique des surfaces isolantes polluées diminue avec. Nous remarquons, par la suite, quand la largeur de la partie la plus conductrice atteint sept huitième de la longueur de fuite totale du modèle, que la tension de contournement augmente de nouveau. En effet, cette caractéristique présente un minimum. Ce dernier, observé par d'autres chercheurs [10,19,21,22], correspondrait au cas le plus favorable à la formation rapide des arcs électrique et donc un contournement plus probable.

II.4.2.2.2.2. Influence de la position des couches de pollution

Comme le montre la figure (II.25), la tension de contournement est pratiquement insensible à la position des deux zones polluées relativement aux électrodes. Cette constatation a été déjà prouvée par d'autres chercheurs également [10, 19].

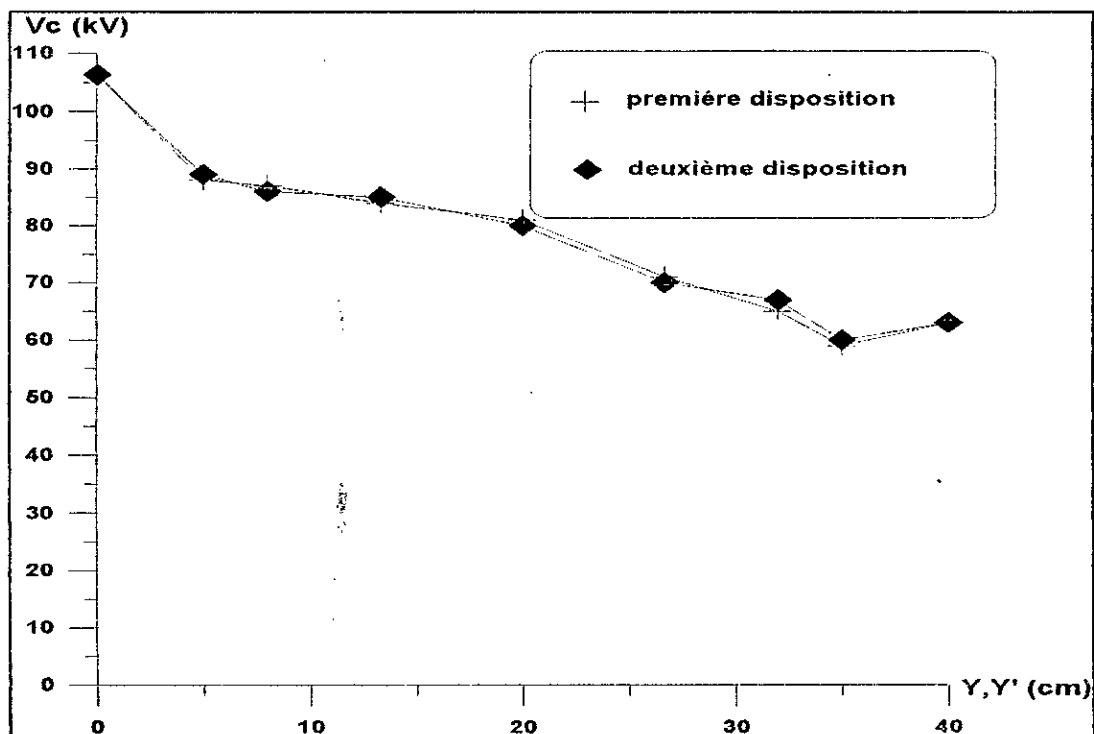


Fig.II.25 : Tension de contournement – largeur de la partie fortement conductrice

II.4.2.2.3. Etude de la longueur de l'arc électrique :

Les variations de la longueur de l'arc électrique en fonction de la tension appliquée sont présentées sur les figures (II.26) et (II.27). Comme prévue, nous constatons que la longueur de l'arc augmente avec la tension appliquée. En outre, comme pour le courant de fuite, pour la même tension la première disposition a la longueur d'arc légèrement supérieure que l'autre.

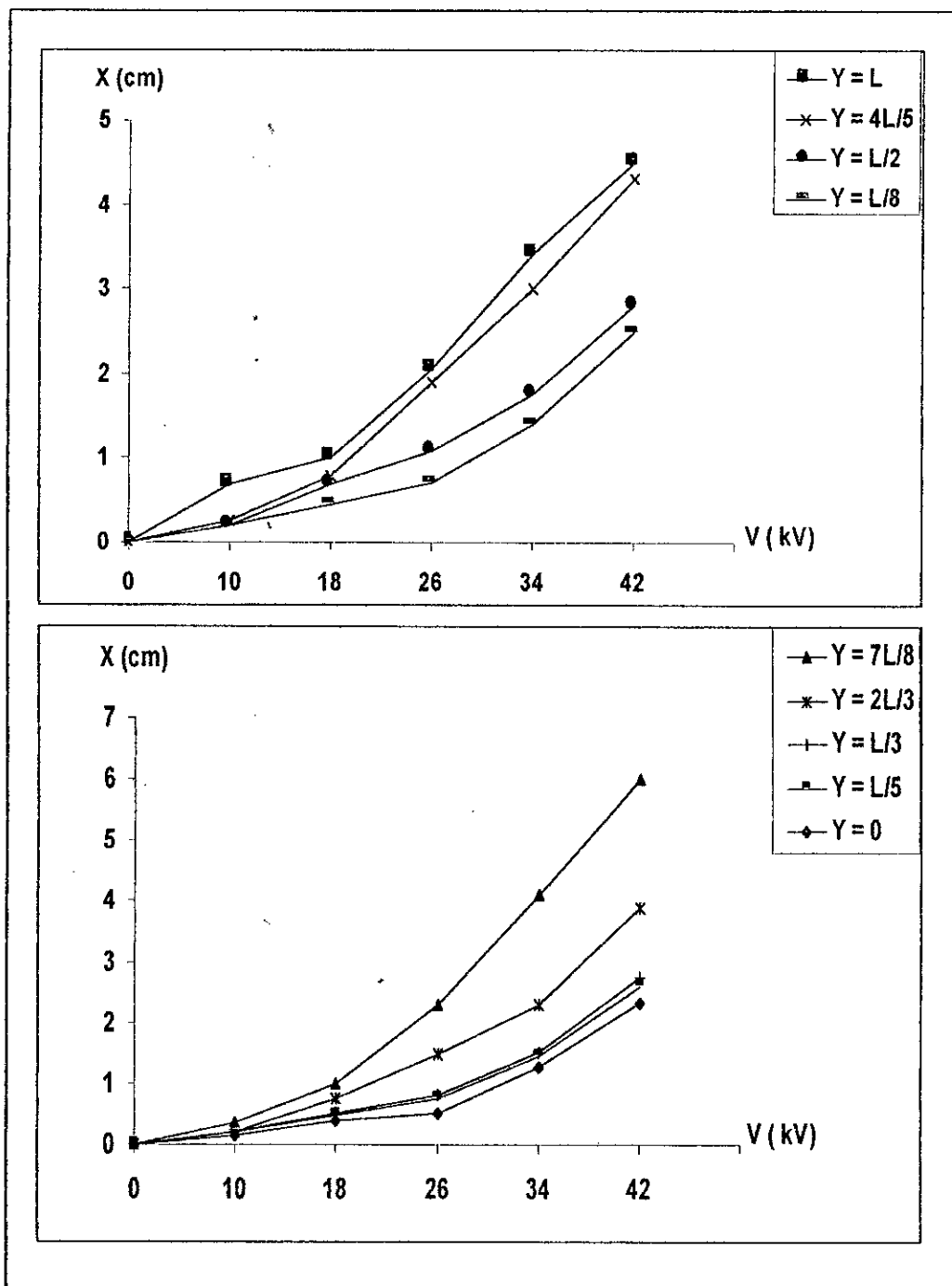


Fig.26 : Longueur d'arc – Tension appliquée pour la première disposition

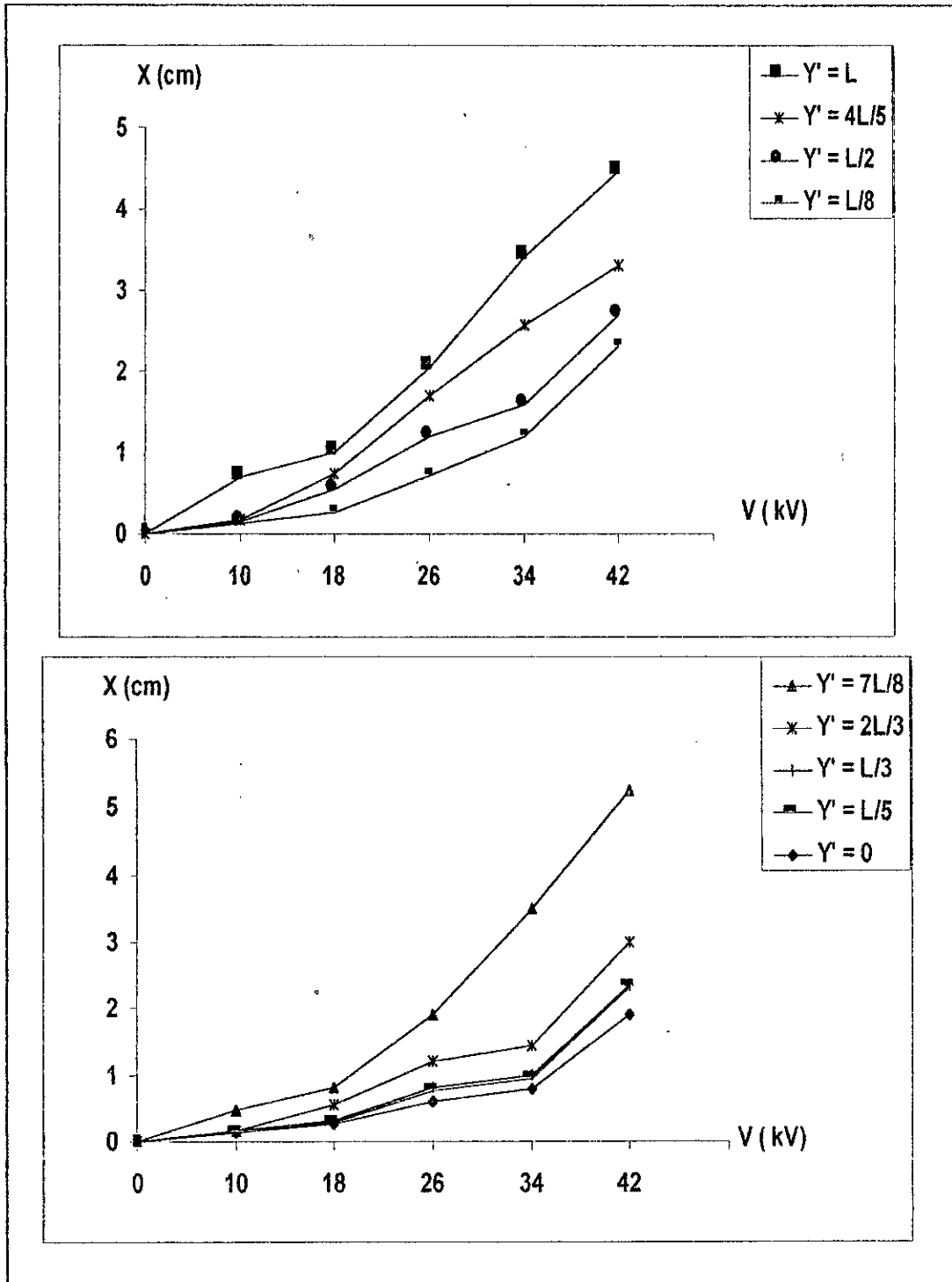


Fig.27 : Longueur d'arc – Tension appliquée pour la deuxième disposition

II.4.2.3. Etude comparative :

Pour une meilleure exploitation des résultats expérimentaux obtenus, nous avons jugé utile de faire l'étude comparative entre les deux configurations de pollution considérées. Nous nous sommes intéressés aux dispositions présentant une faible rigidité (figure II.28).

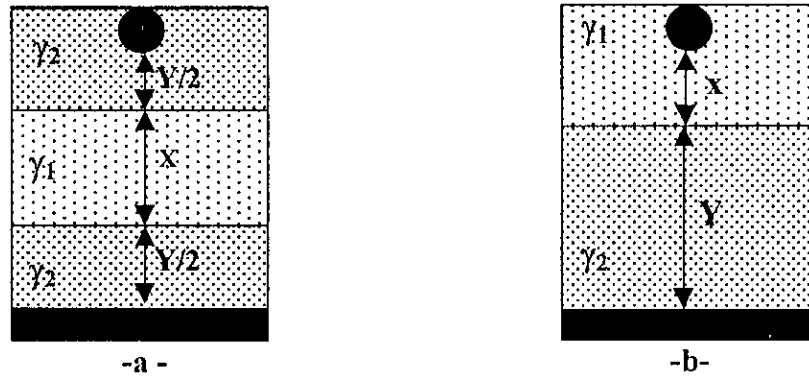


Fig.II.28 : Configurations à comparer

II.4.2.3.1. Courant de fuite :

La figure (II.29), représente les évolutions du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour les deux configurations.

Nous constatons sur toutes les figures, que pour des niveaux de tension faibles (< 10 kV), les courants de fuite sont proches. Cependant, pour les tensions assez élevées, le courant de fuite de la configuration -b- devient supérieur à celui obtenu pour l'autre configuration. Ceci est peut être dû au phénomène d'ionisation, au voisinage de l'électrode circulaire pour la configuration -b-, qui provoque l'apparition rapide des arcs partiels. Ces derniers favorisent l'augmentation du courant de fuite.

Nous constatons également, pour les deux configurations, qu'à chaque fois que la largeur de la partie fortement conductrice diminue, les courants de fuite deviennent plus proches. Ceci est prévisible, car en diminuant la largeur de la partie fortement conductrice, les caractéristiques des deux configurations se ressemblent de plus en plus.

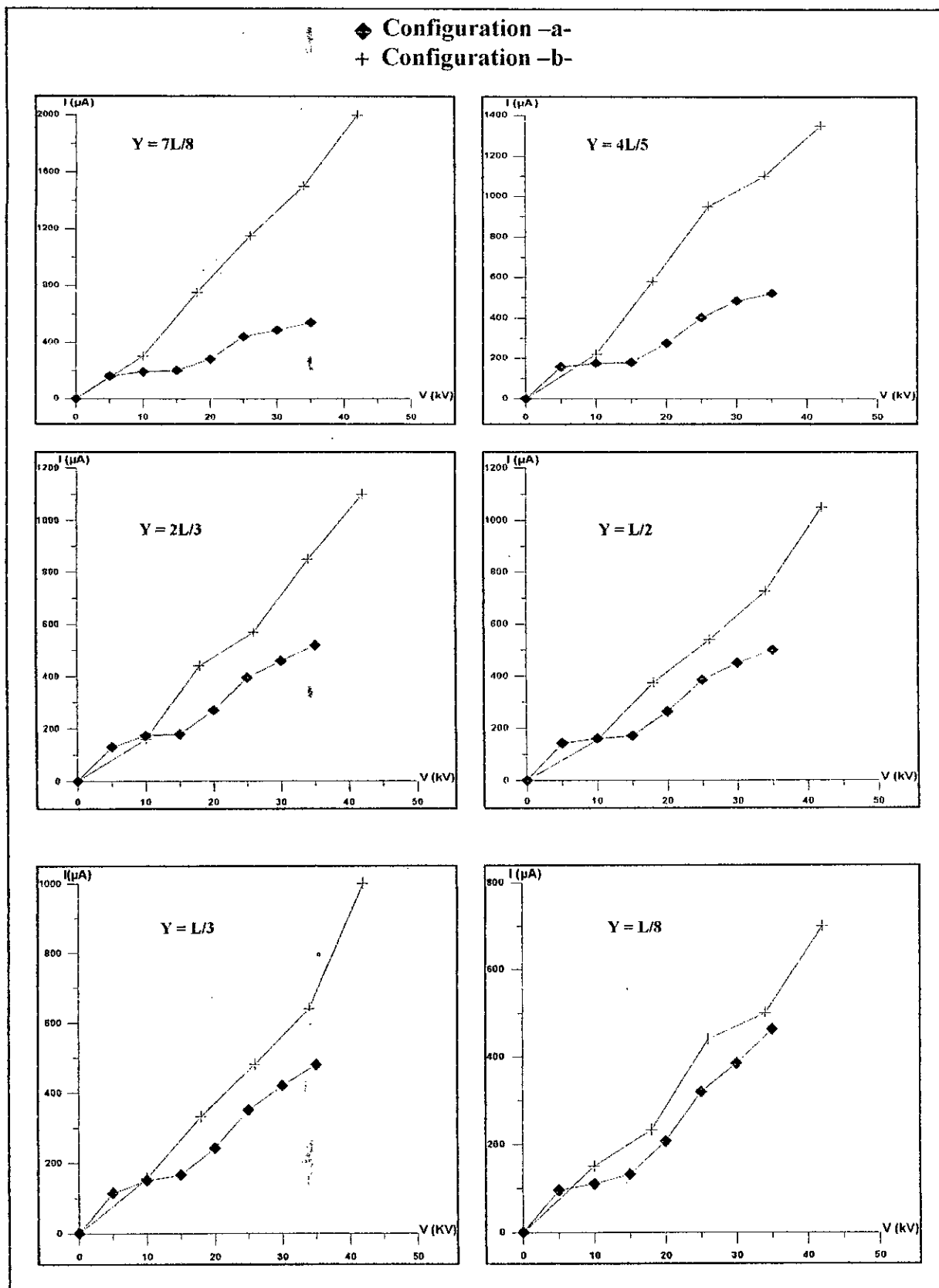


Fig.II.29 : Courant de fuite – Tension appliquée.

II.4.2.3.2. Tension de contournement :

Les caractéristiques concernant la tension de contournement en fonction de la largeur de la partie fortement conductrice de la couche polluante sont présentées à la figure (II.30).

Les valeurs des tensions de contournement relevées pour les deux configurations, montrent que la première configuration (-a-) présente une rigidité légèrement plus grande que celle correspondant à la configuration -b-. Ceci est dû à l'effet couronne et au phénomène d'ionisation de l'air à proximité de l'électrode circulaire. En effet, la position de la couche la plus conductrice a peu d'influence sur le contournement des surfaces isolantes soumises à ce genre de configurations de la pollution.

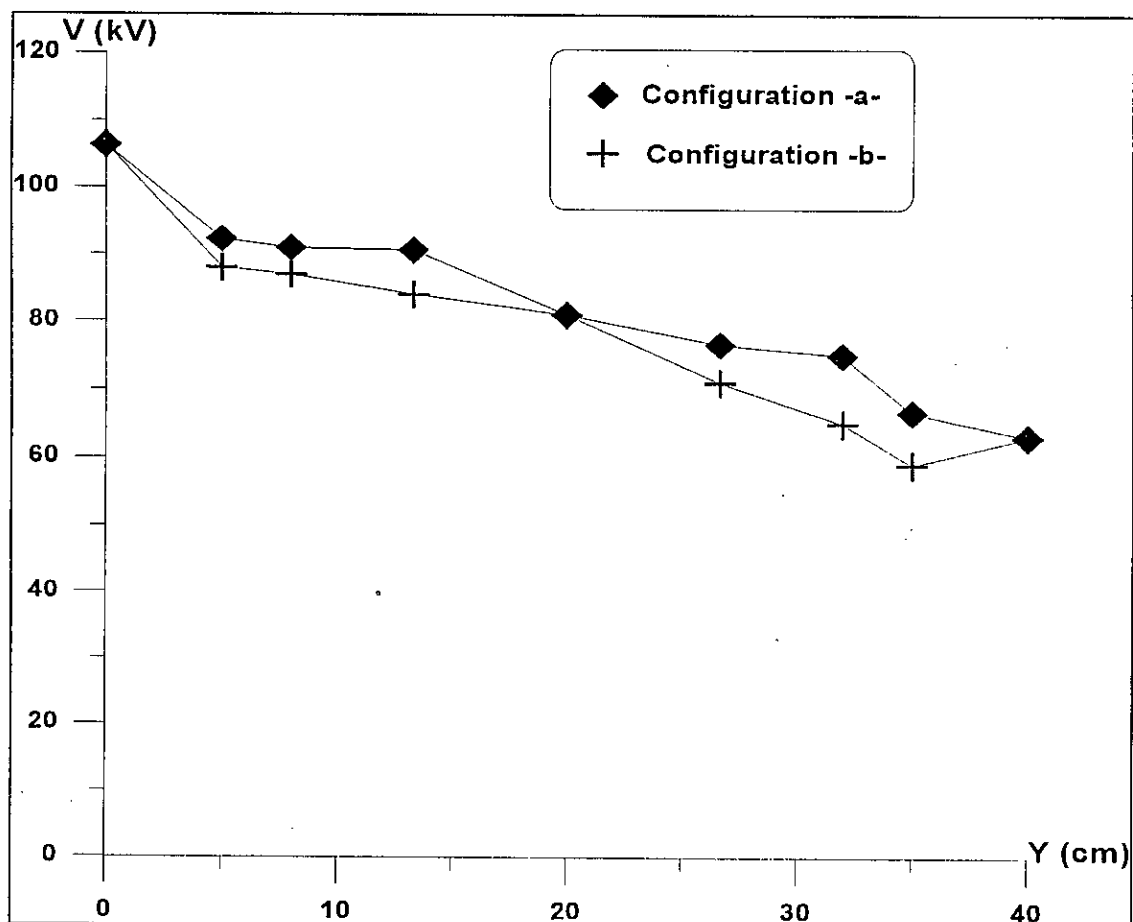


Fig.II.30 : Tension de contournement – Largeur de la partie fortement conductrice

II.5. Conclusion :

Les travaux expérimentaux que nous avons entrepris avaient pour objectif principal d'illustrer le comportement d'une surface isolante plane, non-uniformément polluée, lorsqu'une tension alternative lui est appliquée. Afin d'examiner cela, nous avons étudié l'influence de la tension d'alimentation et la répartition non-uniforme de la pollution sur l'évolution du courant de fuite et la longueur de l'arc électrique. Comme nous avons étudié l'influence de cette répartition sur la tension de contournement.

Dans tous les cas considérés, le courant de fuite et la longueur de l'arc électrique augmentent avec la tension d'alimentation et avec la largeur de la partie fortement conductrice de la couche de pollution.

Les positions des différentes zones de conductivités par rapport aux électrodes sur la plaque isolante, influent énormément sur l'évolution du courant de fuite ainsi que sur la longueur de l'arc électrique.

La configuration qui favorise la circulation de courant de fuite est celle où la partie fortement conductrice est située totalement du côté du conducteur lié à la terre.

Contrairement à ce qui a été remarqué pour le courant de fuite, les positions de différentes couches de pollution non-uniforme ont peu d'influence sur la tension de contournement. En outre, cette tension diminue avec l'augmentation de la largeur de la partie fortement conductrice. Notons que pour la deuxième configuration, nous remarquons toutefois une légère augmentation de cette tension à partir de la longueur 35 cm de la partie fortement conductrice.

CHAPITRE III

MODELE THEORIQUE

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons un modèle mathématique permettant d'obtenir certaines caractéristiques concernant le comportement des surfaces isolantes non-uniformément polluées. Pour valider notre modèle théorique, les résultats simulés seront comparés à ceux obtenus expérimentalement.

Comme caractéristique principale, notre modèle est capable de surveiller la sévérité de pollution des isolateurs en se basant simplement sur la mesure du courant de fuite. Cette caractéristique permet l'intervention à temps pour éviter les dégâts engendrés par les contournements sous pollution.

III.2. Modélisation :

III.2.1. Formulation du modèle :

Dans le but d'analyser les phénomènes d'arcs se produisant sur des surfaces isolantes contaminées par une pollution non-uniforme, nous élaborons un algorithme basé sur celui déjà proposé par A.Mekhaldi, M.Teguar et A.Beroual [23]. Par rapport à ce dernier, notre modèle théorique prend en compte la non-uniformité le long de la surface isolante. Les résultats obtenus par simulation en utilisant cet algorithme sont comparés à ceux obtenus expérimentalement. Ceux-ci concernent les essais effectués dans le cas de la première disposition de la deuxième configuration.

III.2.2. Hypothèses simplificatrices :

Les phénomènes de contournement sous pollution sont tellement complexes qu'il est indispensable de faire de nombreuses hypothèses simplificatrices pour rendre possible leur représentation au moyen d'un modèle mathématique. La complexité de ces phénomènes a pour origine de nombreux facteurs, à savoir la variabilité de la résistivité superficielle découlant essentiellement de l'existence d'échanges thermiques entre la couche conductrice et l'espace ambiant, la formation d'arcs multiples, etc...

Les différentes hypothèses adoptées dans notre étude sont les suivantes :

- Les couches de pollution sont représentées pour des résistances.
- Il existe un seul arc dominant parmi tous les arcs multiples qui apparaissent sur la surface polluante.
- La résistance d'isolement surfacique est relativement faible par rapport à celle linéique.

- L'arc se développe le long de l'axe perpendiculaire à l'électrode rectangulaire $\alpha \alpha'$ (Figure.III.1).
- Pour chaque zone de la pollution, la conductivité appropriée est la même en tous points.

III.2.3. Mise en équations :

Pour la configuration choisie, nous considérons que le modèle de laboratoire est partiellement contourné par un arc de longueur X et pollué par une couche continue de pollution constituée de deux parties de conductivités différentes γ_1 et γ_2 avec $\gamma_1 < \gamma_2$ (Figure III.1),

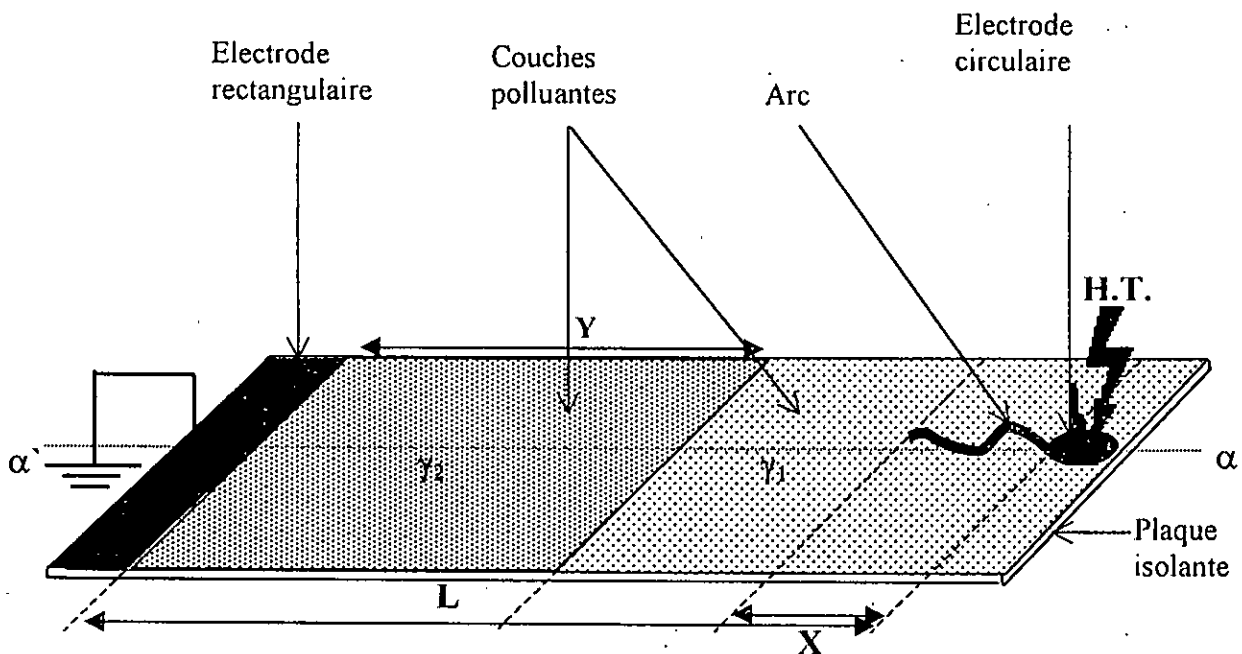


Fig.III.1 :- Modèle expérimental.

En augmentant la tension d'alimentation, nous considérons, dans une première étape, que l'arc électrique s'initie dans la partie de la couche de pollution la moins conductrice et progresse d'abord dans cette zone, jusqu'à la court-circuiter. Par la suite, il pénètre dans la deuxième couche avant de provoquer le contournement de toute la plaque isolante.

Ainsi, le modèle de laboratoire proposé peut être représenté par un circuit électrique équivalent, constitué d'un arc dont la tension à ces bornes est V_{arc} en série avec deux résistances $R_{p1}(X)$ et $R_{p2}(X)$ représentant les portions des deux couches polluantes non

court-circuitées par la décharge électrique. Nous obtenons ainsi le circuit électrique équivalent représenté par la figure (Fig.III.2) :

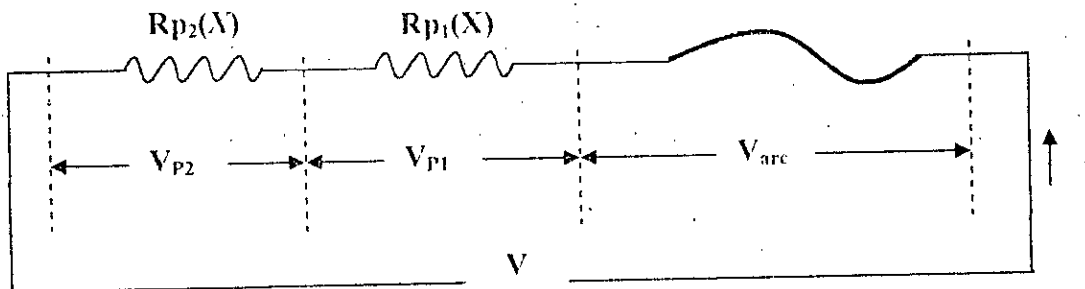


Fig.III.2 : - Circuit électrique équivalent.

Avec :

V_{arc} : la tension de l'arc électrique.

V_{P1} : la tension aux bornes de la partie de la couche de conductivité γ_1 .

V_{P2} : la tension aux bornes de la partie de la couche de conductivité γ_2 .

i : le courant de fuite qui traverse les résistances équivalentes aux deux couches.

V : la tension appliquée à la plaque isolante.

En négligeant la chute de tension aux électrodes, l'équation électrique de ce circuit sera donnée par :

$$V = V_{arc} + V_{P1} + V_{P2} \quad (III.1)$$

Les résistances $R_{P1}(x)$ et $R_{P2}(x)$ équivalentes des deux parties de la couche polluante dépendent de la position, de la longueur et de la direction de l'arc, ainsi que des caractéristiques, des conductivités et des largeurs des deux zones polluées.

En remplaçant chaque terme dans l'équation (III.1) par son équivalent, nous trouvons :

$$V = V_{arc} + R_{P1}(x)i + R_{P2}(x)i \quad (III.2)$$

Selon B.F.Hampton [24], l'expression approximative de la tension d'arc V_{arc} est donnée par l'expression empirique suivante :

$$V_{arc} = \frac{Ax}{i^n} \quad (III.3)$$

où A et n sont des constantes empiriques caractérisant l'état statique de l'arc électrique. Elles dépendent du milieu dans lequel s'amorce la décharge.

De façon générale : $0,40 < n < 1$ et $3 < A < 500$, [27].

Par ailleurs, selon certaines considérations basées sur des études relatives à la densité ionique dans le canal ionisé [28], la condition de réamorçage de l'arc, après chaque alternance établie par P.Claverie et Y.Porcheron [17] est :

$$V \geq \frac{Kx}{i^n} \quad (III.4)$$

Où K et n sont les constantes caractéristiques pouvant être déterminées à partir de la mesure du courant de fuite et de la longueur de l'arc électrique pour différentes tensions d'essais.

La relation limite entre la tension appliquée V, le courant maximal de fuite I et la longueur maximale d'arc X est par conséquent.

$$VI^n = KX \quad (III.5)$$

Cette relation est valable quelles que soient les conductivités et la répartition de la couche polluante.

Ainsi l'équation (III.2) devient :

$$V = \frac{AX}{i^n} + R_{p1}(X)i + R_{p2}(X)i \quad (III.6)$$

Eliminant le courant entre les équations (III.5) et (III.6), nous trouverons la relation suivante :

$$V = \frac{K}{(K-A)^{\frac{n}{n+1}}} \left\{ X^{\frac{1}{n}} [R_{p1}(X) + R_{p2}(X)] \right\}^{\frac{n}{n+1}} \quad (III.7)$$

Cette dernière expression présente un maximum V_c dit tension critique, qui apparaît comme la tension qui ne saurait être dépassée sans que le contournement ne se produise. L'expression de cette tension est la suivante :

$$V_c = \frac{K}{(K - A)^{\frac{n}{n+1}}} \left\{ X_c^n [R_{p1}(X_c) + R_{p2}(X_c)] \right\}^{\frac{n}{n+1}} \quad (III.8)$$

Il est clair que la tension critique est obtenue pour une certaine longueur (X_c) de la décharge électrique appelée longueur critique. Cette dernière représente la racine de :

$$\frac{dV}{dX} = 0 \quad (III.9)$$

A partir des équations (III.5) et (III.9) nous déduisons le courant de fuite maximal critique comme suit :

$$I_c = \left[\frac{KX_c}{V_c} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (III.10)$$

Nous définissons le coefficient de sécurité par le rapport de la tension appliquée V correspondant au degré de pollution actuel de l'isolement considéré à la tension critique V_c :

$$C_s = \frac{V}{V_c} = \frac{\left\{ X^n [R_{p1}(X) + R_{p2}(X)] \right\}^{\frac{n}{n+1}}}{\left\{ X_c^n [R_{p1}(X_c) + R_{p2}(X_c)] \right\}^{\frac{n}{n+1}}} \quad (III.11)$$

Nous définissons également, le produit P comme étant :

$$P = VI^n = KX \quad (III.12)$$

Par suite, le produit critique est tel que :

$$P_c = V_c I_c^n = KX_c \quad (III.13)$$

A partir de ces deux dernières expressions, le produit relatif représente la longueur d'arc relative puisque :

$$\frac{P}{P_c} = \frac{VI^n}{V_c I_c^n} = \frac{X}{X_c} \quad (\text{III.14})$$

III.2.3.1. Détermination des résistances du circuit équivalent :

En premier lieu, nous avons procédé à la détermination de la somme des résistances caractérisant le circuit équivalent, à partir des valeurs du courant de fuite et de la tension d'alimentation. En effet, les équations (III.5) et (III.6) permettent d'écrire :

$$R_{r1}(x) + R_{r2}(x) = \frac{K - \Lambda V}{K I} \quad (\text{III.15})$$

L'expérimentation a montré que l'arc électrique s'initie dans la couche faiblement conductrice. Cette dernière sera court-circuitée entièrement quand la longueur de l'arc dépasse la longueur de cette couche. Dans ces conditions, la relation précédente permet, en fait, de déterminer la résistance partielle de la couche restante. Par contre, et au moment où l'arc s'allonge uniquement dans la zone faiblement conductrice, la résistance de celle fortement conductrice demeure constante. La valeur de cette dernière en fonction de sa largeur est donnée par :

$$R_{r2}(Y_i) = R_{r2}(L) \cdot \frac{Y_i}{L} \quad (\text{III.16})$$

Y_i est la largeur de la couche fortement conductrice dans le cas considéré.

$R_{r2}(L)$ représente la valeur de la résistance lorsque la largeur de la zone fortement conductrice est égale à la ligne de fuite totale (en cas de pollution continue) en l'absence d'arcs partiels. En effet, cette valeur est obtenue expérimentalement à partir des valeurs du courant de fuite et celles de la tension appliquée suivant une expression analogue à celle de (III.15)

Le fait de supposer que chaque zone de la couche de pollution possède une conductivité constante et la même le long de sa surface, nous pouvons exprimer les résistances partielles de la couche polluante par :

$$R_{pi}(x) = \frac{l}{\gamma_i} F_{pi}(x) \quad i = 1,2 \quad (\text{III.17})$$

Les fonctions $F_{pi}(x)$ ($i = 1,2$) dépendent à la fois des caractéristiques géométriques de la surface isolante, de la répartition de la pollution et de la direction de l'arc le long de cette surface.

γ_i ($i = 1,2$) sont respectivement les conductivités de la première et de la deuxième zone de la pollution.

En remplaçant les valeurs des résistances dans l'équation (III.7), nous avons :

$$V = \frac{K}{(K-A)^{\frac{n}{n+1}}} \left[X^n \left(\frac{F_1(X)}{\gamma_1} + \frac{F_2(X)}{\gamma_2} \right) \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{III.18})$$

En fixant l'une des conductivités, cette dernière expression permet d'évaluer la tension appliquée pour différentes valeurs de la deuxième conductivité puisque les fonctions $F_i(x)$ ($i = 1,2$) demeurent inchangées.

III.3. Simulation numérique :

Afin d'étudier le développement des décharges électriques sur des surfaces non-uniformément polluées, notre modèle est basé sur le calcul des résistances caractéristiques du circuit électrique équivalent correspondants aux deux parties de la couche polluante $R_{p1}(x)$ et $R_{p2}(x)$.

Les essais expérimentaux, nous permettent de mesurer le courant de fuite et la longueur de l'arc électrique, pour les différentes largeurs des deux parties de la couche polluante, en appliquant différents niveaux de tension appliquée.

En utilisant le logiciel MATLAB, et à partir de ces valeurs expérimentales, nous déterminons les constantes caractéristiques statiques K et n relatives aux arcs électriques, pour les largeurs considérées des parties de la couche polluante.

En se basant sur les résultats expérimentaux, nous déduisons les valeurs des résistances du circuit équivalent $R_{p1}(x)$ et $R_{p2}(x)$ correspondantes aux deux parties de la couche polluée, en fonction de la longueur d'arc x , selon les équations (III.15)-et (III.16).

Suivant les valeurs des deux résistances $R_{p1}(X)$ et $R_{p2}(X)$ et la longueur d'arc X , nous pouvons déterminer à l'aide d'une méthode approximative (moindre carré par exemple), les coefficients de $R_{pi}(x)$ ($i = 1,2$) permettant la formation d'un polynôme simple et linéaire propre à chaque résistance, tels que :

$$R_{p1}(x) = c_1 + c_2 \cdot X + \dots + c_m \cdot X^{m-1} \quad (\text{III. 19})$$

$$R_{p2}(x) = d_1 + d_2 \cdot X + \dots + d_m \cdot X^{m-1} \quad (\text{III. 20})$$

Où c_j et d_j sont respectivement les coefficients des polynômes caractérisant les résistances $R_{p1}(x)$ et $R_{p2}(x)$, j varie de 1 à m . X appartient à l'intervalle $[0, L]$, le degré $(m-1)$ des polynômes considérés varie progressivement de 1 à $(m-1)$ jusqu'à avoir la plus faible erreur possible. Cette erreur consiste en les valeurs absolues de la différence entre les valeurs des fonctions réelles et celles approximatives.

Une fois les deux polynômes sont définis, nous pouvons déduire la longueur maximale que peut atteindre l'arc électrique X_c . Cette longueur est la racine de l'équation (III.9).

Introduisant la valeur de X_c dans les expressions (III.8) et (III.10), nous trouverons respectivement la tension critique V_c et le courant de fuite critique I_c .

Connaissant les conductivités des deux parties de la couche polluante et à partir des valeurs des résistances correspondantes à ces deux parties, nous pouvons déduire les fonctions de distribution du dépôt polluant de chaque partie $F_i(x)$ ($i = 1,2$). Ceci en utilisant les relations (III.17) et (III.18).

Ainsi, en possession des valeurs des fonctions de distribution des deux parties, et en fixant la conductivité d'une des deux zones de la couche polluante, nous pouvons déduire l'évolution du courant de fuite et de la tension appliquée au modèle expérimental correspondant à des longueurs d'arc considérées pour différentes conductivités de l'autre zone.

Enfin nous sommes en mesure de déterminer tous les paramètres permettant de tracer toutes les caractéristiques voulues.

Les principales étapes caractérisant notre algorithme sont :

1. Détermination des constantes caractéristiques K et n , pour chaque largeur de la zone la plus conductrice à partir des valeurs expérimentales du courant de fuite, de la longueur d'arc, et de la tension appliquée.

La constante A étant comprise entre 2 et 200 [24]. Nous l'avons choisi égale à 80. Cette valeur permet une meilleure concordance entre les résultats théoriques et ceux expérimentaux.

2. Calcul des deux résistances caractéristiques du circuit équivalent $R_{P1}(x)$ et $R_{P2}(x)$ pour chaque valeur de x en utilisant les relations (III. 15) et (III. 16).
3. Détermination des coefficients c_j et d_j correspondant respectivement aux polynômes des résistances $R_{P1}(x)$ et $R_{P2}(x)$, à partir des valeurs de ces résistances et des longueurs d'arc x, à l'aide d'une méthode itérative. Le choix du degré de chaque polynôme correspond à l'erreur maximale 10^{-6} .
4. Formulation des polynômes simples et linéaires selon les relations (III.19) et (III.20).
5. Calcul de la longueur critique X_C et de l'arc électrique critique, en utilisant l'équation (III.9).
6. Dédution des valeurs de la tension critique V_C et du courant de fuite critique I_C , selon les équations respectives (III.8) et (III.10).
7. Détermination des coefficients de sécurité C_s , en utilisant l'équation (III.11).
8. Détermination du produit P et du produit critique P_c , à partir des équations (III.12).
9. Calcul des produits relatifs par l'équation (III.13).
10. Détermination des fonctions $F_1(x)$ et $F_2(x)$ caractérisant la répartition des deux zones constituantes de la couche de pollution, en utilisant les équations (III.17) et (III.18).
11. Détermination du courant de fuite et de la tension d'alimentation pour différentes conductivités.
12. Exploitation des résultats.

III.4. Validation :

En premier lieu, nous déterminons les constantes caractéristiques K et n, à partir des valeurs expérimentales du courant de fuite, de la longueur de l'arc et de la tension d'alimentation, et ce pour différentes largeurs de la partie fortement conductrice. En sachant que nous avons opté pour la première disposition de la deuxième configuration (Fig.III.3). En injectant toutes ces valeurs dans le programme élaboré ; nous avons pu tracer les

différentes courbes caractérisant le comportement de la surface isolante sous pollution (Fig.III.3).

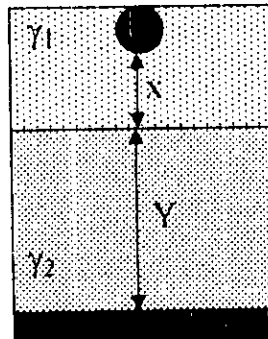


Fig.III.3 : Modèle expérimental utilisé

Nous commençons par comparer certaines caractéristiques à celles obtenues expérimentalement à savoir la tension d'alimentation en fonction de la longueur d'arc et le courant de fuite en fonction de la longueur d'arc, et ce pour les différentes valeurs de la largeur de la couche la plus conductrice. Nous procédons par la suite, à la détermination, à l'aide de l'algorithme élaboré, et pour chaque largeur Y , des paramètres permettant de tracer d'autres caractéristiques supplémentaires, telles que, la tension d'alimentation en fonction du courant de fuite pour différentes conductivités de la pollution, les résistances des deux couches de pollution en fonction de la longueur d'arc, le coefficient de sécurité en fonction du produit relatif, la tension et le courant de fuite en fonction de la longueur d'arc pour différentes conductivités,... etc.

III.4.1. Constantes caractéristiques de l'arc :

En effet, pour chaque cas de largeur de la couche fortement conductrice, nous avons déterminé les valeurs des paramètres k et n , qui sont présentées dans le tableau suivant :

Y	4L/5	L/2	L/3	L/8
k	87.85	234.12	146.16	166.87
n	0.73	0.60	0.66	0.64

Tableau 1 : Constantes caractéristiques de l'arc

III.4.2. Caractéristiques obtenues et interprétations :

III.4.2.1 Caractéristiques de l'état critique :

Les tensions et les courants critiques sont présentés sur les figures (III.4 et III.5). Nous constatons, qu'il y a une bonne corrélation entre les valeurs des tensions expérimentales

et celles simulées, ce qui justifie la validité de notre modèle théorique. En ce qui concerne le courant critique, il est bien entendu difficile à mesurer expérimentalement.

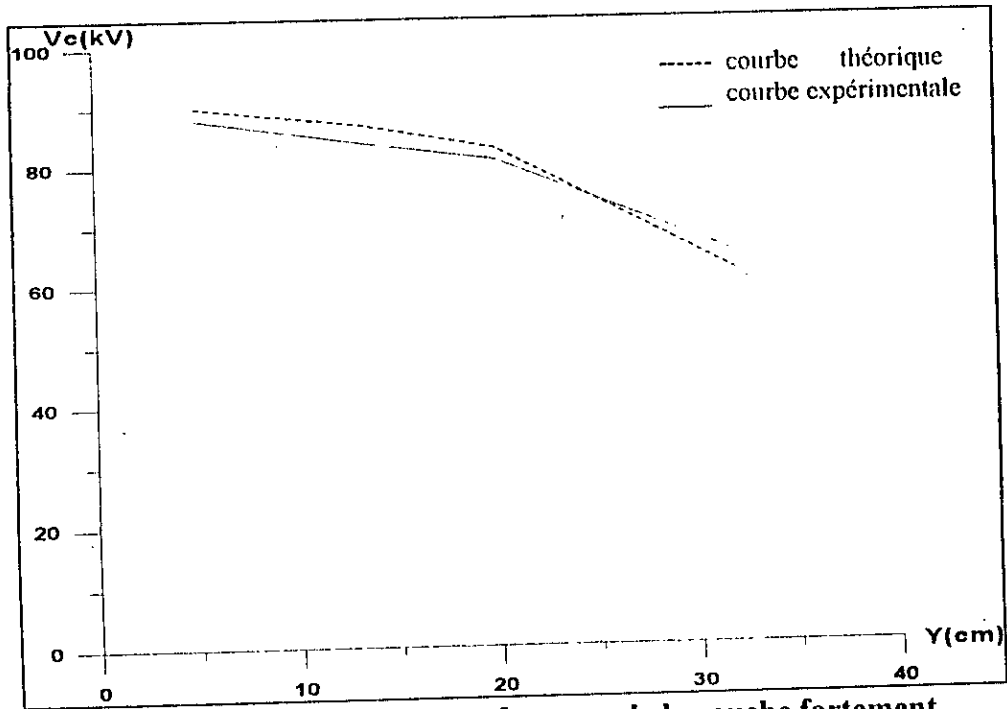


Fig.III.4. : Tension critique – Largeur de la couche fortement conductrice

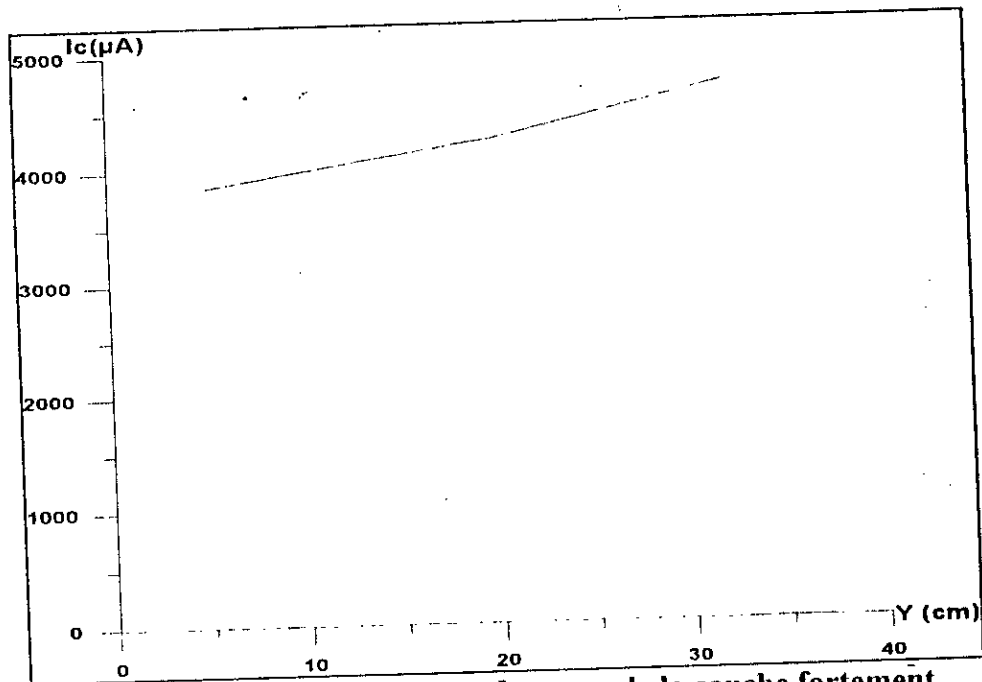


Fig.III.5 : Courant critique – Largeur de la couche fortement conductrice

III.4.2.2. Tension appliquée en fonction de la longueur d'arc :

Les courbes de variation de la tension appliquée en fonction de la longueur d'arc sont présentées aux figures (III.6)et (III.7). Nous constatons une assez bonne corrélation entre les points expérimentaux et ceux théoriques. Cette concordance justifie la validité du programme élaboré.

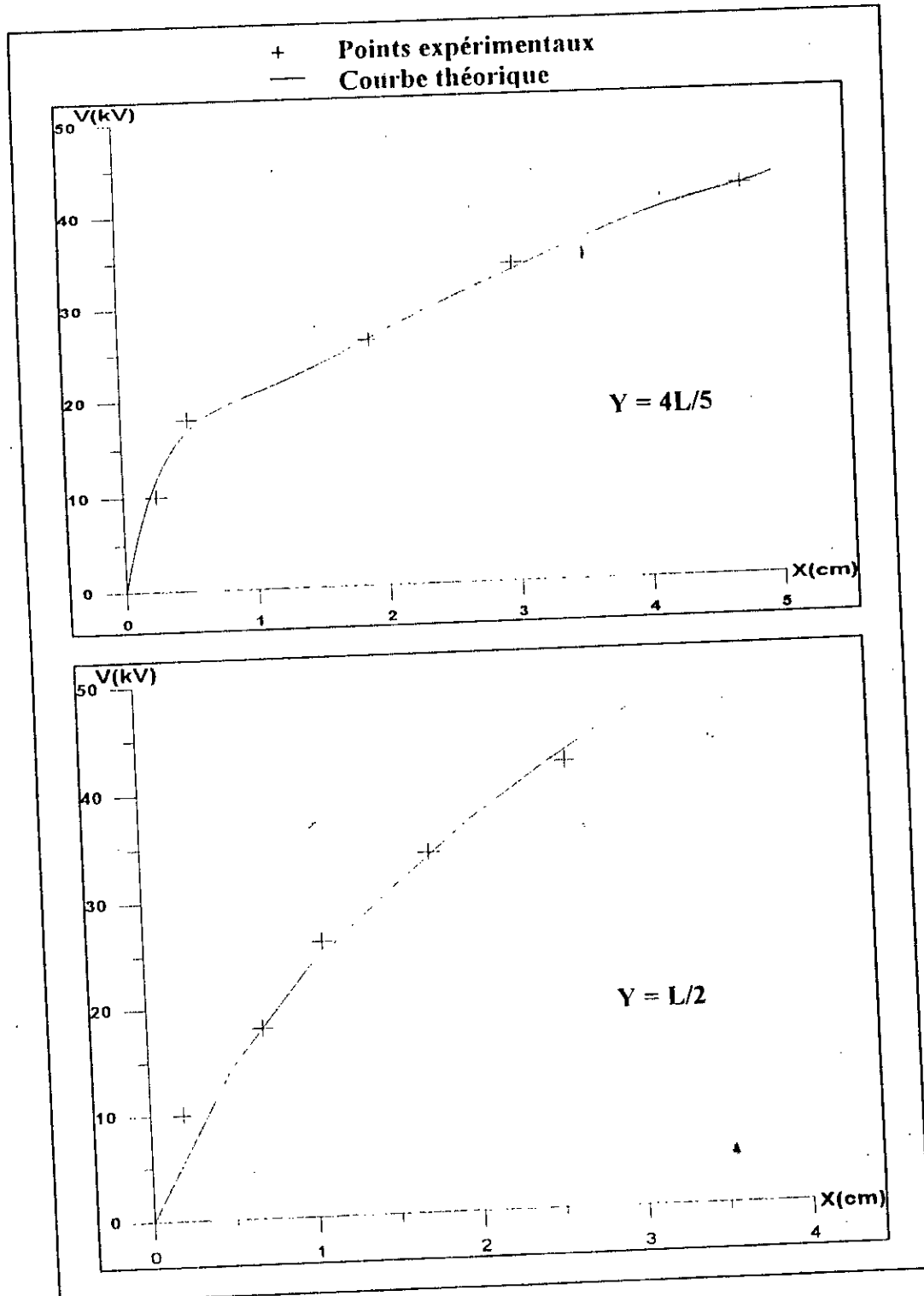


Fig.III.6 : Tension appliquée – longueur d'arc

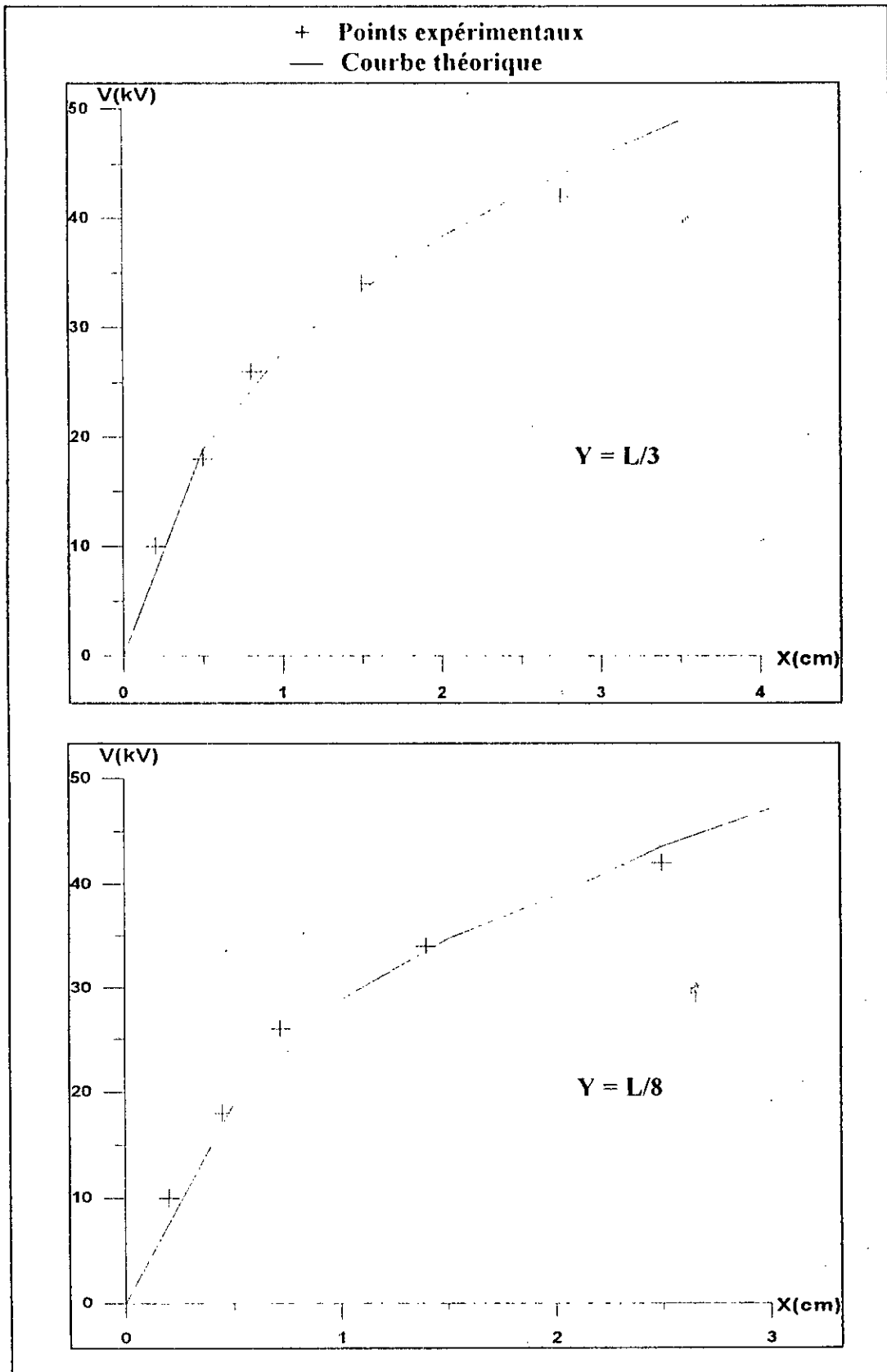


Fig.III.7 : Tension appliquée – Longueur d'arc

III.4.2.3. Courant de fuite en fonction de la longueur d'arc :

Les caractéristiques donnant le courant de fuite en fonction de la longueur d'arc, pour différentes largeurs de la partie fortement conductrice de la couche polluante, sont présentées sur les figures (III.8) et (III.9). De même que pour la tension appliquée, nous constatons une assez bonne concordance entre les points expérimentaux et les courbes théoriques du courant de fuite en fonction de la longueur d'arc.

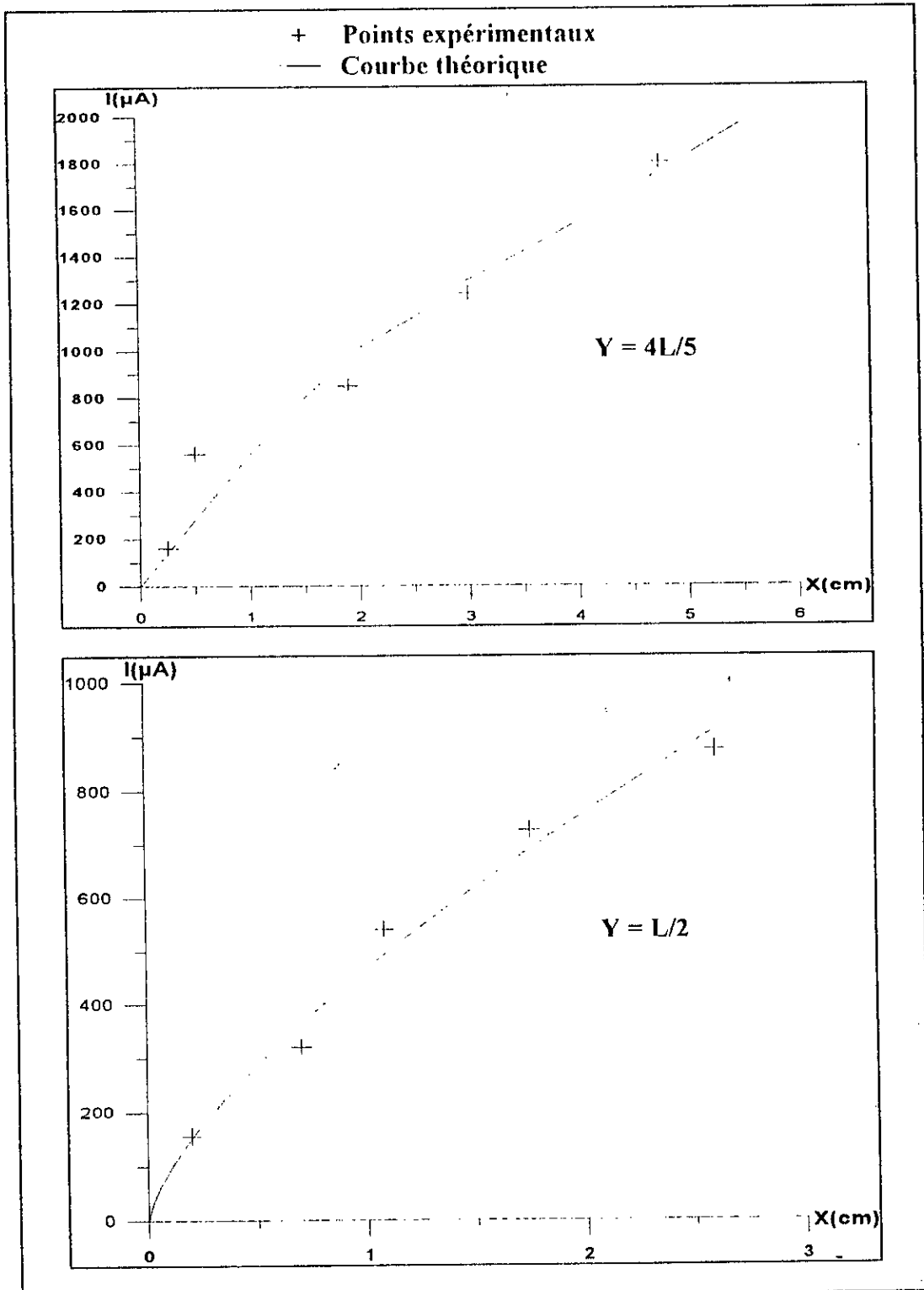


Fig.III.8 : Courant de fuite – longueur d'arc

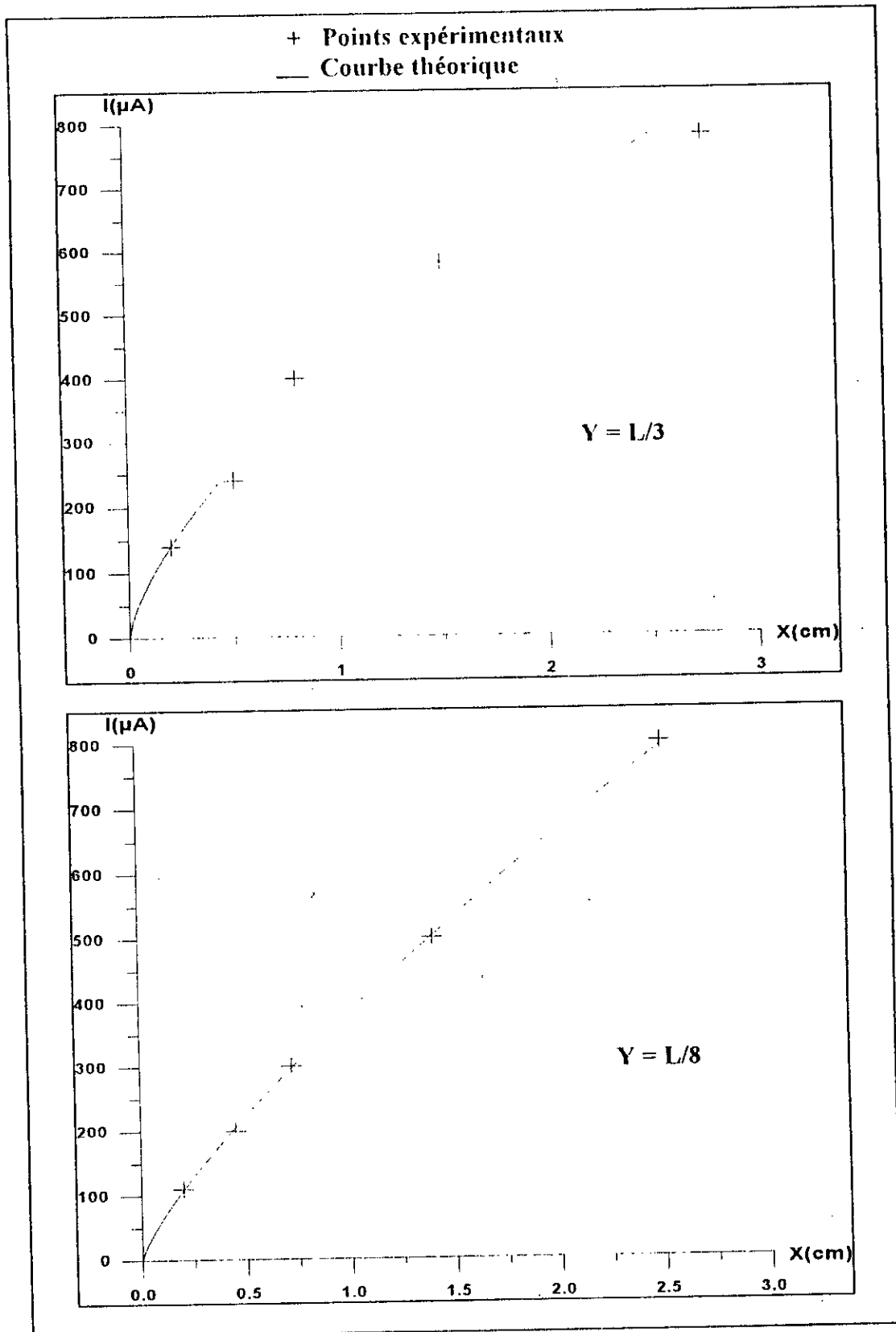


Fig.III.9 : Courant de fuite – longueur d'arc

III.4.2.4. Tension appliquée en fonction du courant de fuite :

Les résultats obtenus grâce au modèle théorique, et illustrés dans les figures (III.10) et (III.11), montrent que le courant de fuite augmente avec la tension appliquée. Ces résultats concordent parfaitement avec les essais expérimentaux.

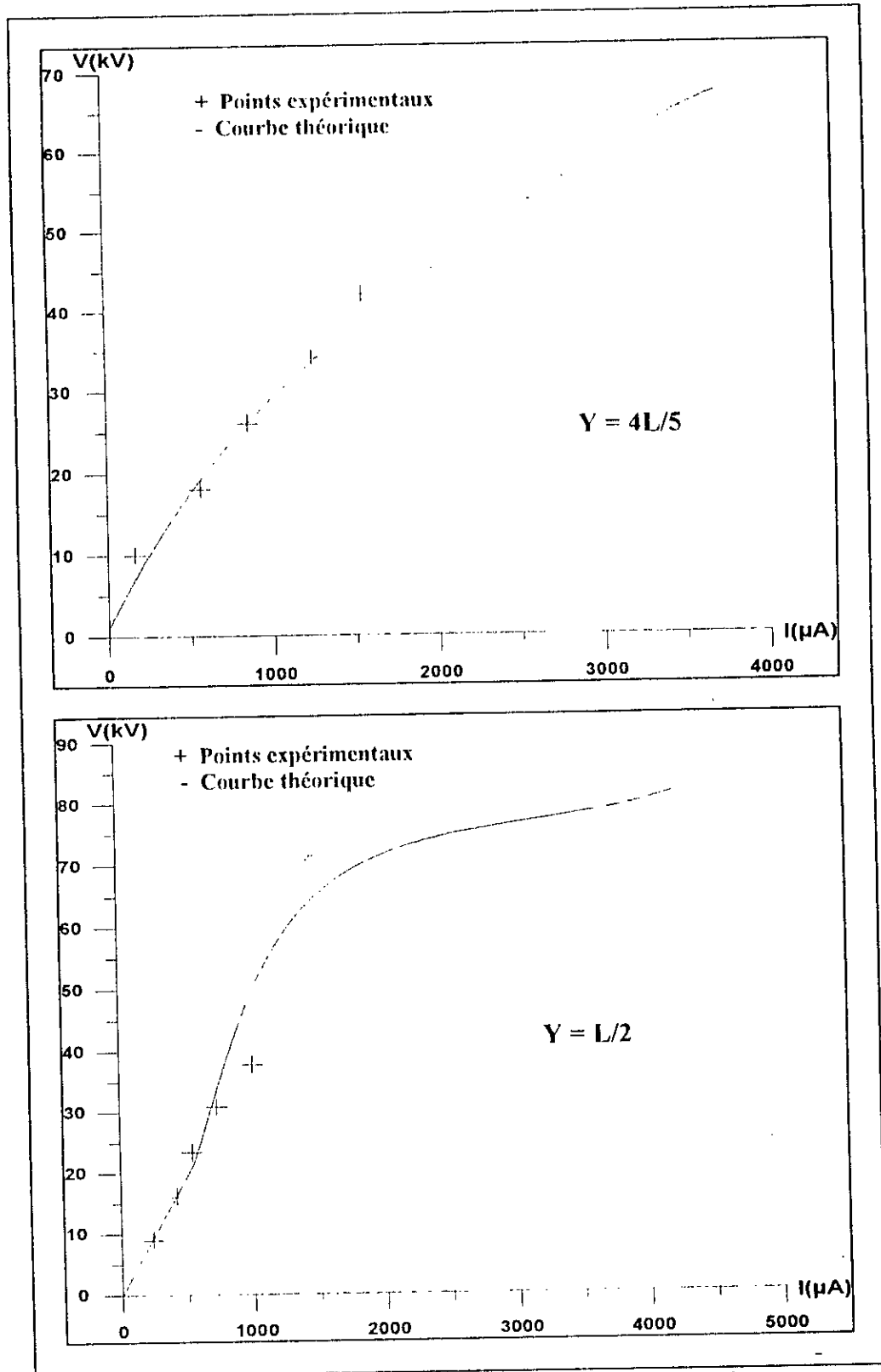


Fig.III.10 : Tension appliquée – Courant de fuite

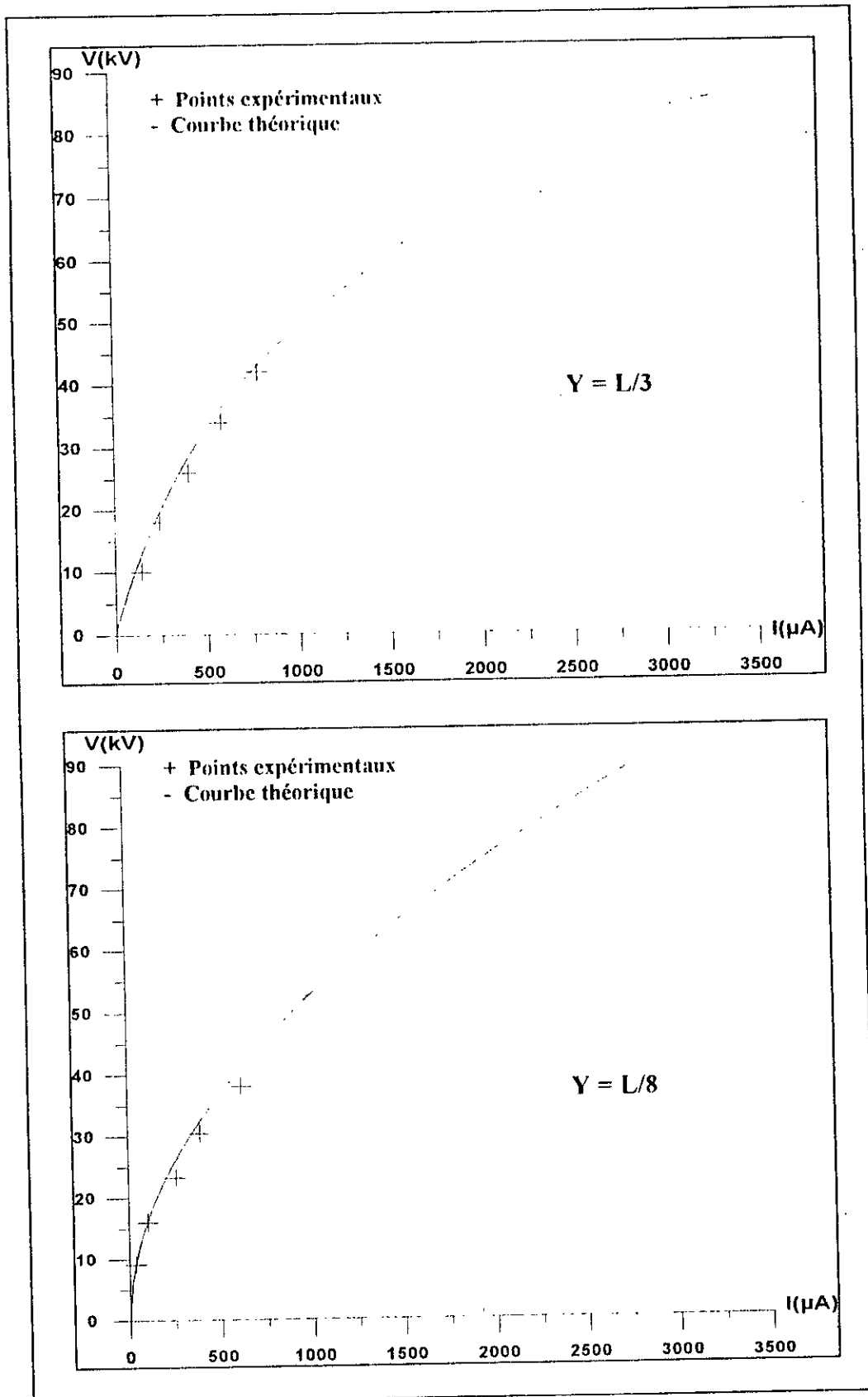


Fig.III.11 : Tension appliquée -- Courant de fuite

III.4.2.5. Résistances du circuit équivalent en fonction de la longueur d'arc :

Les résistances du circuit équivalent en fonction de la longueur de l'arc électrique sont représentées dans les figures (III.12 et III.13). Nous remarquons que dans tous les cas considérés, la résistance totale équivalente représente la somme des résistances partielles des couches polluantes, et diminue en fonction de la longueur d'arc. Ceci s'explique facilement par le fait que chaque fois que l'arc progresse le long de la plaque isolante polluée, il court-circuite une partie de la couche de pollution, par conséquent, la résistance totale équivalente diminue.

Tout comme la résistance totale, celle de la couche faiblement conductrice diminue avec l'allongement de l'arc électrique. Quand la longueur de l'arc atteint ou dépasse la longueur de cette couche, sa résistance s'annule (cas de $Y = 4L/5$).

Concernant la résistance partielle de la couche fortement conductrice nous constatons que tant que l'arc électrique ne pénètre pas dans cette couche, sa résistance R_{P2} reste constante (il s'agit des cas $L/2$, $L/3$, $L/8$). Par contre, si l'arc pénètre dans cette couche, la résistance correspondante décroît avec la progression de cet arc. Ce dernier cas correspond à $Y = 4L/5$.

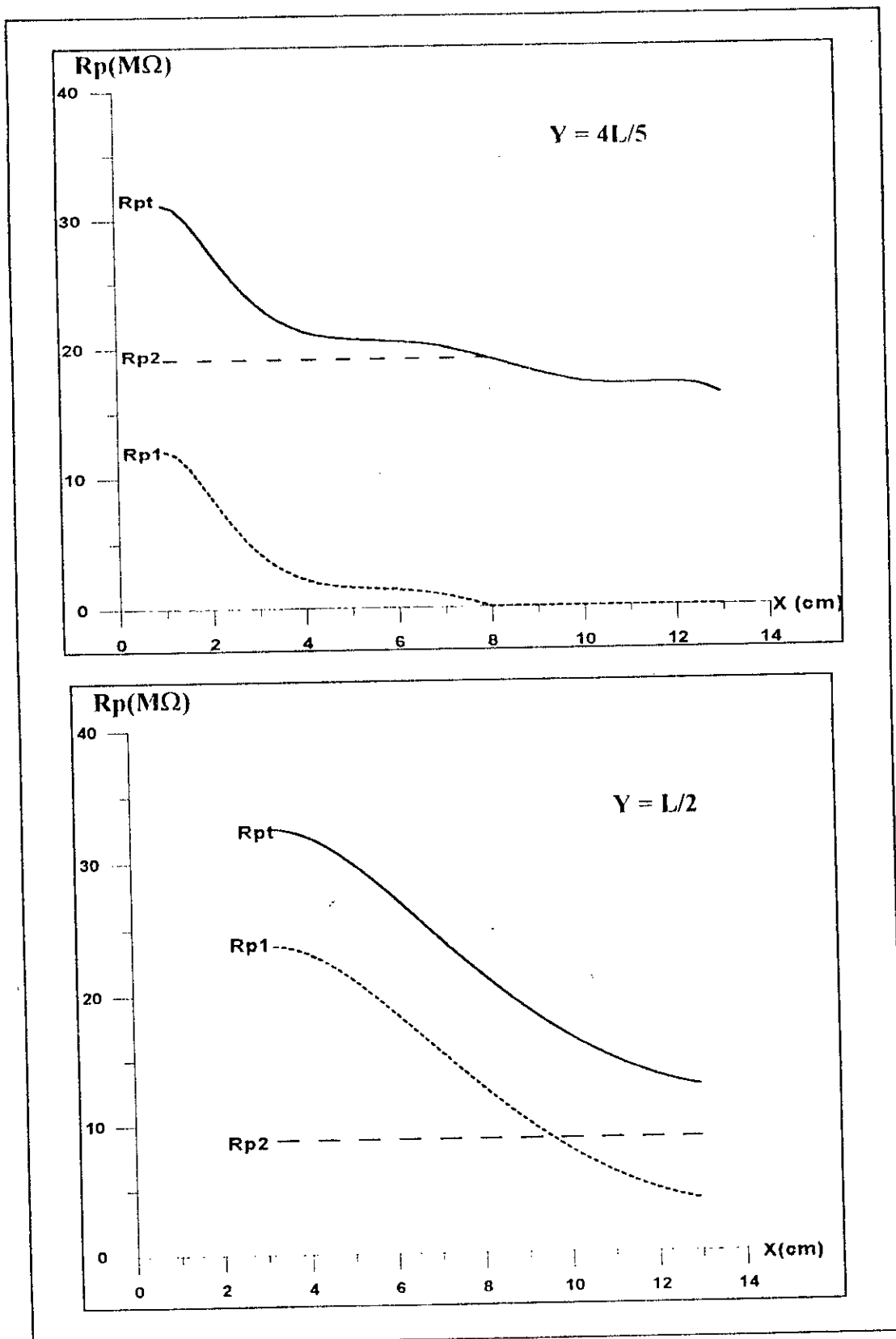


Fig.III.12 : Résistance équivalente – Longueur d'arc

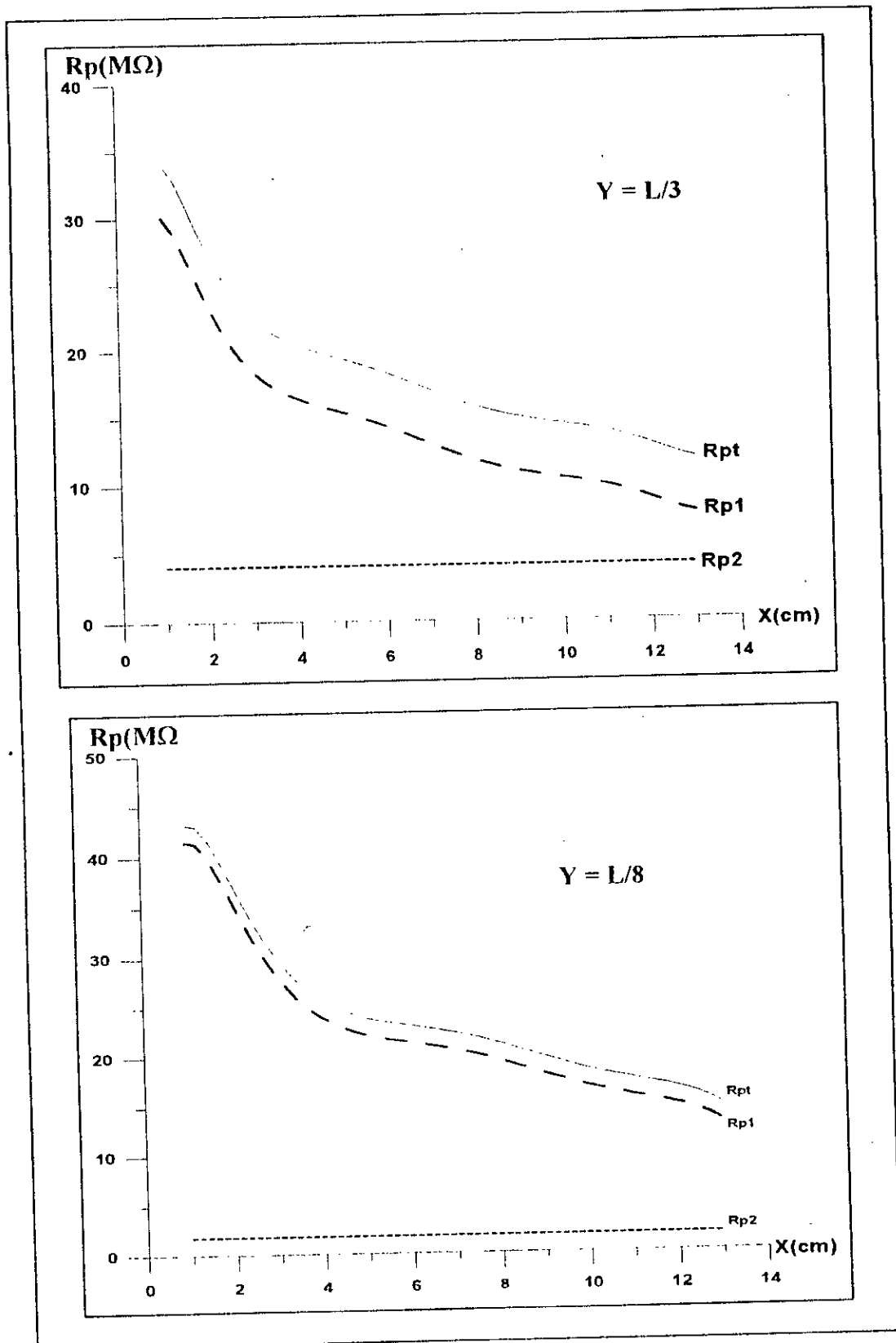


Fig.III.13 : Résistance équivalente – Longueur d'arc

III.4.2.6. Coefficient de sécurité en fonction du produit relatif :

La caractéristique de coefficient de sécurité en fonction du produit relatif (égale à la longueur relative de l'arc) est présentée par les figures (III.14 , III.15 et III.16) . Nous remarquons que le coefficient de sécurité augmente progressivement avec ce produit relatif. Cela s'explique par le fait que la longueur de l'arc augmente avec l'augmentation de la tension appliquée jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur critique, rendant ainsi le rapport $\frac{P}{P_c}$

(soit, $\frac{X}{X_c}$) égale à un.

Pour surveiller le degré de pollution des isolateurs, cette caractéristique peut être utilisée comme suit :

Pour un isolateur témoin, cette caractéristique sera déterminée par des essais au laboratoire, on mesurera le courant de fuite, la longueur de l'arc, et ce en augmentant la tension appliquée progressivement jusqu'au contournement.

En mesurant en permanence le courant de fuite d'un isolateur identique à celui essayé au laboratoire et se reportant simplement à la caractéristique précédente, il sera possible à tout moment de connaître la marge de sécurité ; sans qu'il soit nécessaire de connaître le degré de pollution de l'isolateur.

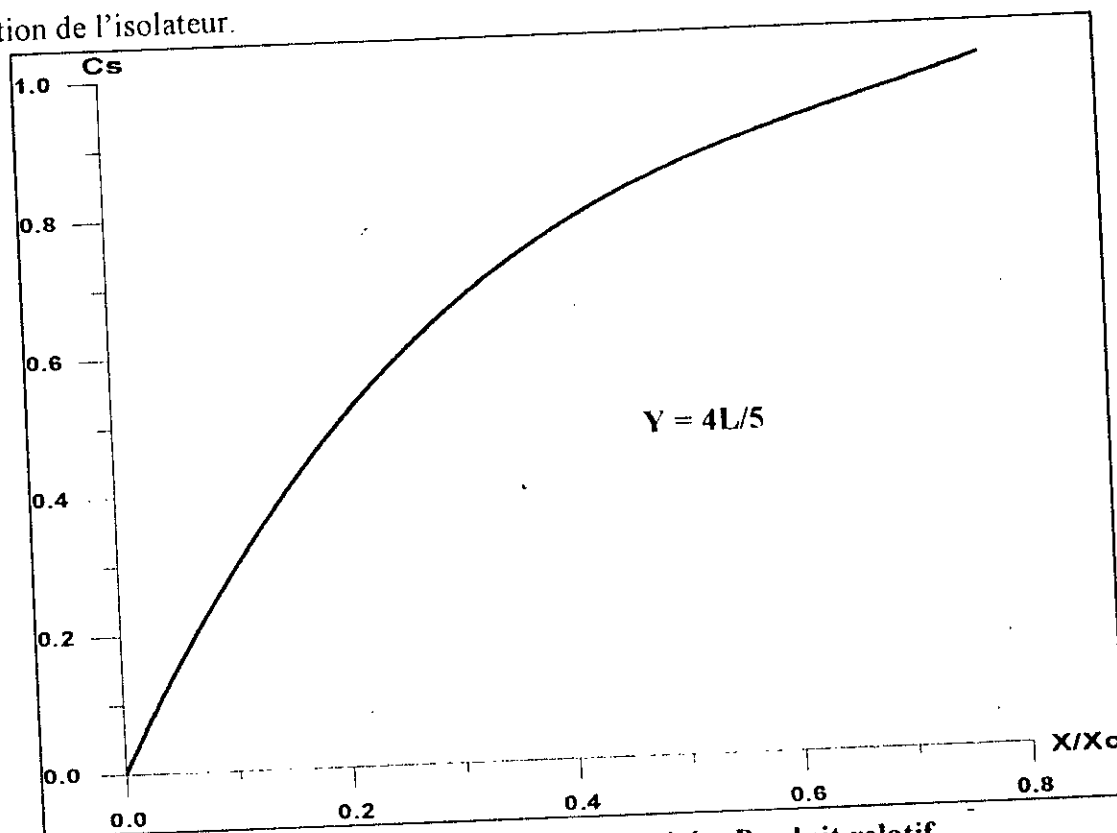


Fig. III.14 : Coefficient de sécurité – Produit relatif

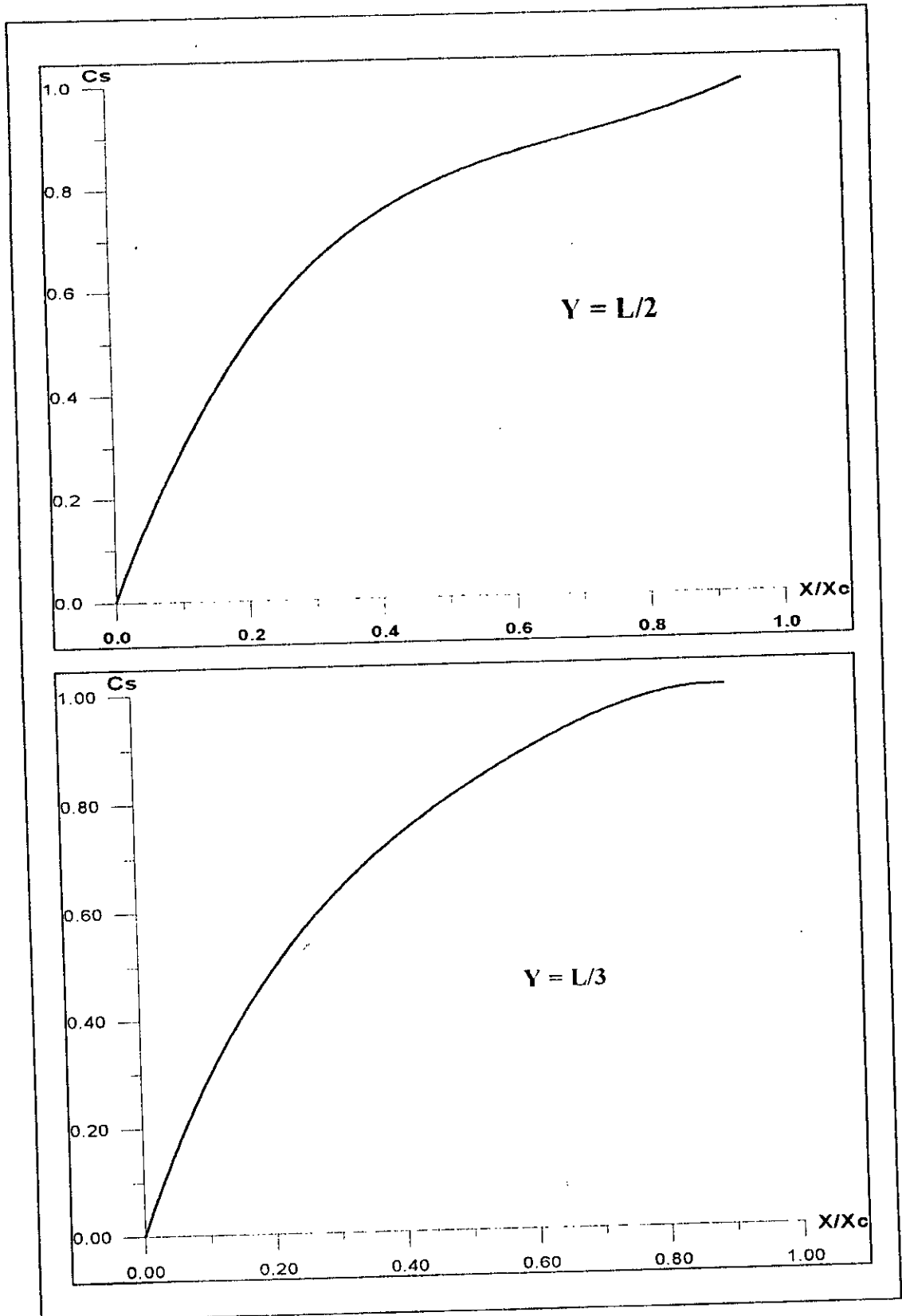


Fig. III.15 : Coefficient de sécurité – Produit relatif

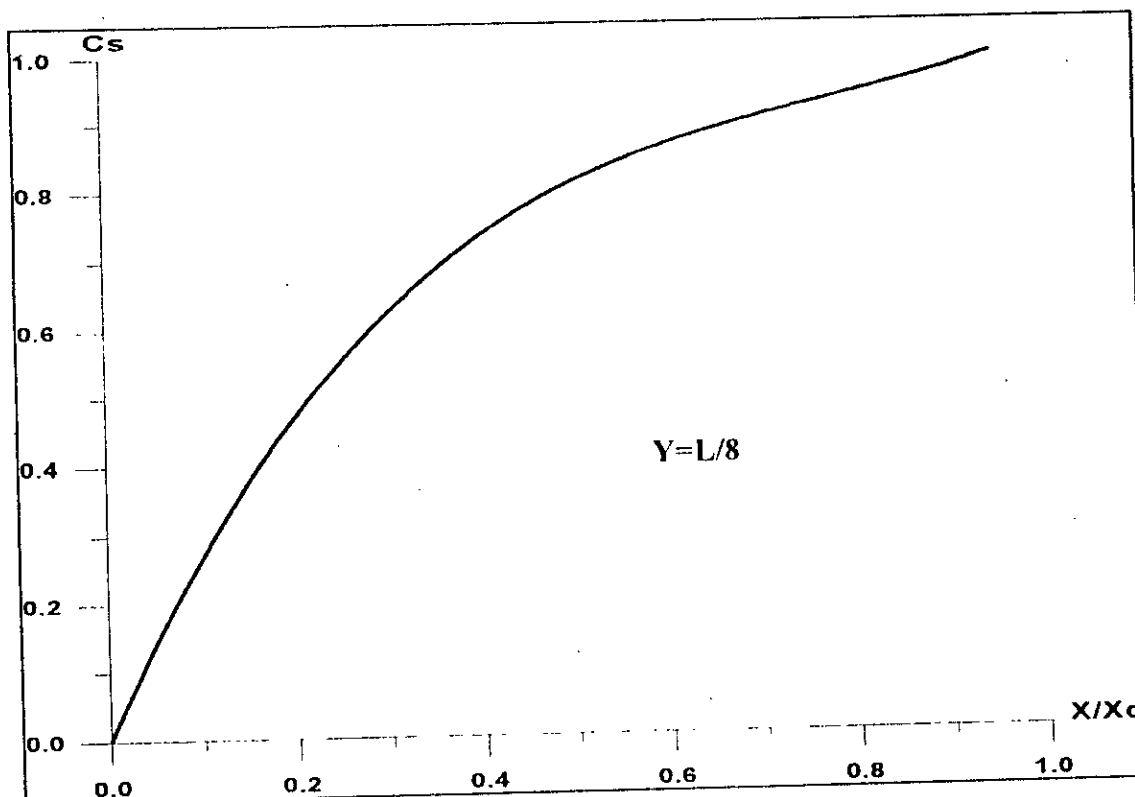


Fig.III.16 : Coefficient de sécurité – Produit relatif

III.4.2.7. Tension appliquée en fonction de la longueur d'arc pour différentes conductivités :

En utilisant notre modèle théorique, nous avons déduit, pour différentes conductivités de la couche fortement conductrice, les variations de la tension appliquée en fonction de la longueur d'arc, et ce pour les différents cas de largeurs de la partie la plus conductrice de la couche polluante. Les résultats ainsi obtenus sont représentés sur les figures (III.17 et III.18). Les conductivités γ_2 que nous avons choisi sont : $300\mu\text{S/cm}$, $200\mu\text{S/cm}$, $100\mu\text{S/cm}$. La conductivité γ_1 est maintenue constante ($42\mu\text{S/cm}$).

A partir de ces caractéristiques, nous constatons que toute augmentation de la conductivité γ_2 (en maintenant $\gamma_1 = 42 \mu\text{S/cm}$), pour une même longueur de la décharge, engendre la diminution de la tension.

III.4.2.8. Courant de fuite en fonction de la longueur d'arc pour différentes conductivités :

Les figures (III.19 et III.20) illustrent l'évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour différentes conductivités de la partie la plus conductrice. Ces caractéristiques montrent que la diminution de la conductivité γ_2 considérée, pour une longueur donnée de l'arc électrique, provoque la diminution du courant de fuite.

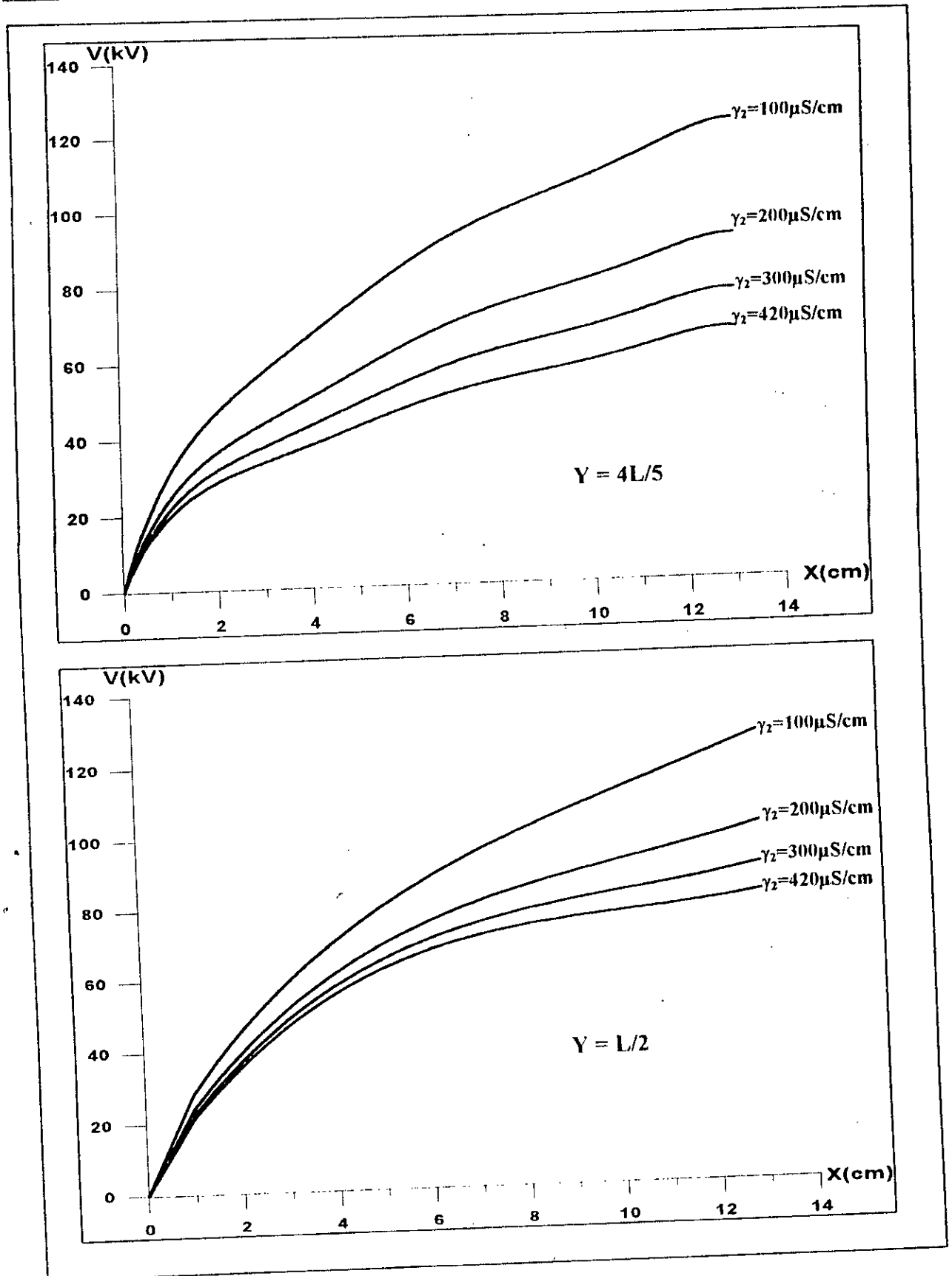


Fig.III.17 : Tension appliquée – Longueur d'arc
 Pour différentes conductivités de la partie fortement conductrice

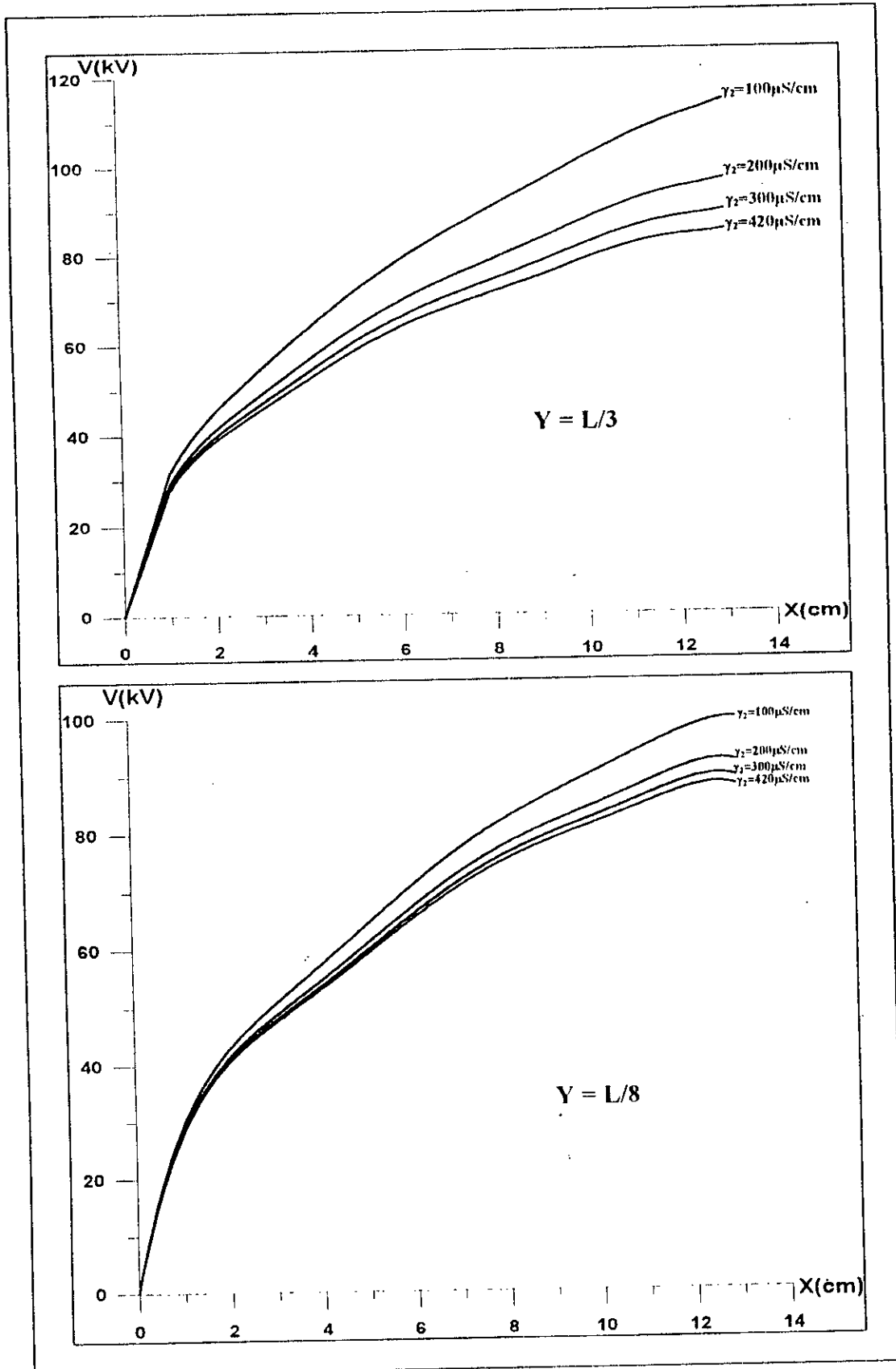


Fig.III.18 : Tension appliquée – Longueur d'arc
 Pour différentes conductivités de la partie fortement conductrice

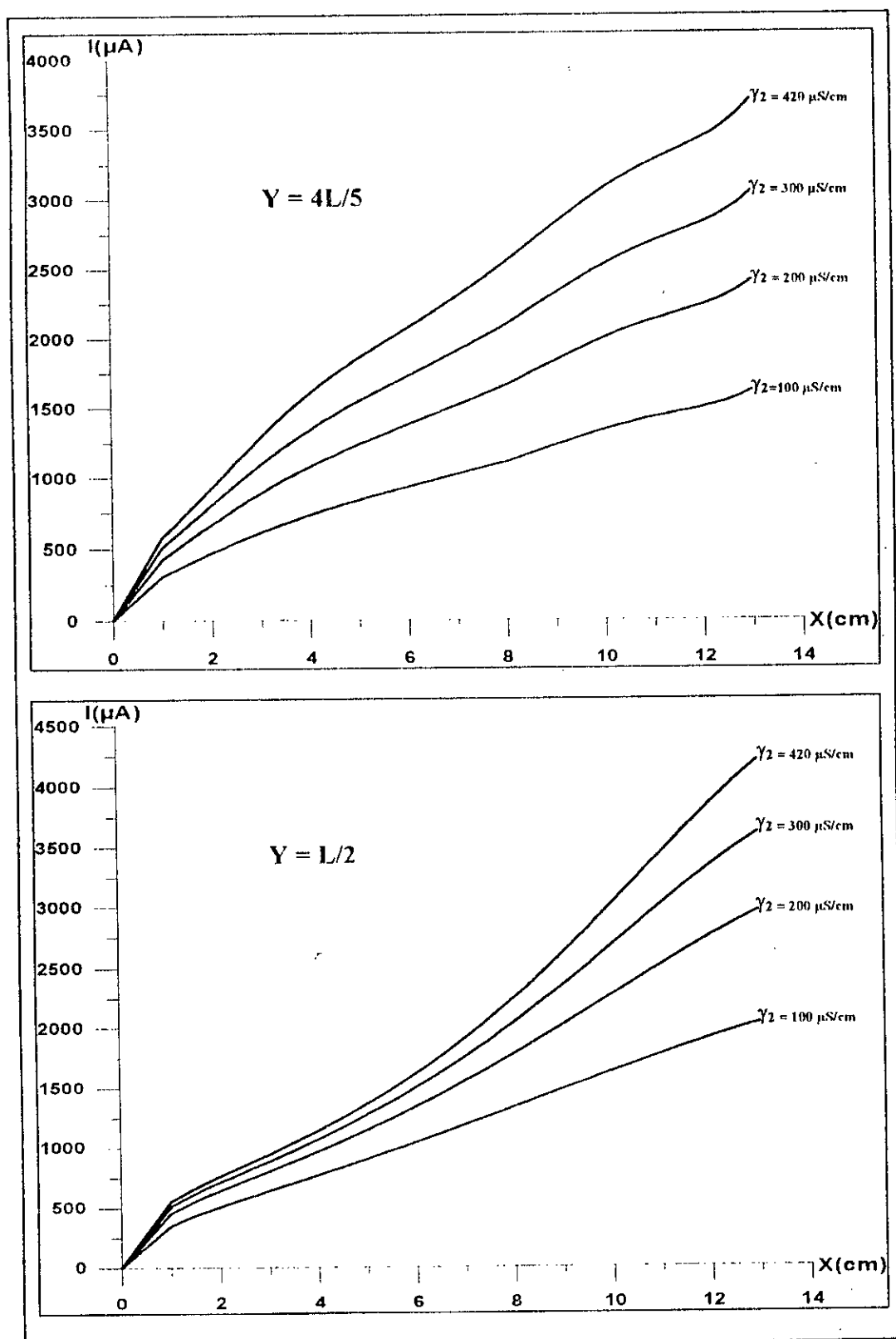


Fig.III.19 : Courant de fuite – Longueur d’arc
 Pour différentes conductivités de la partie fortement conductrice

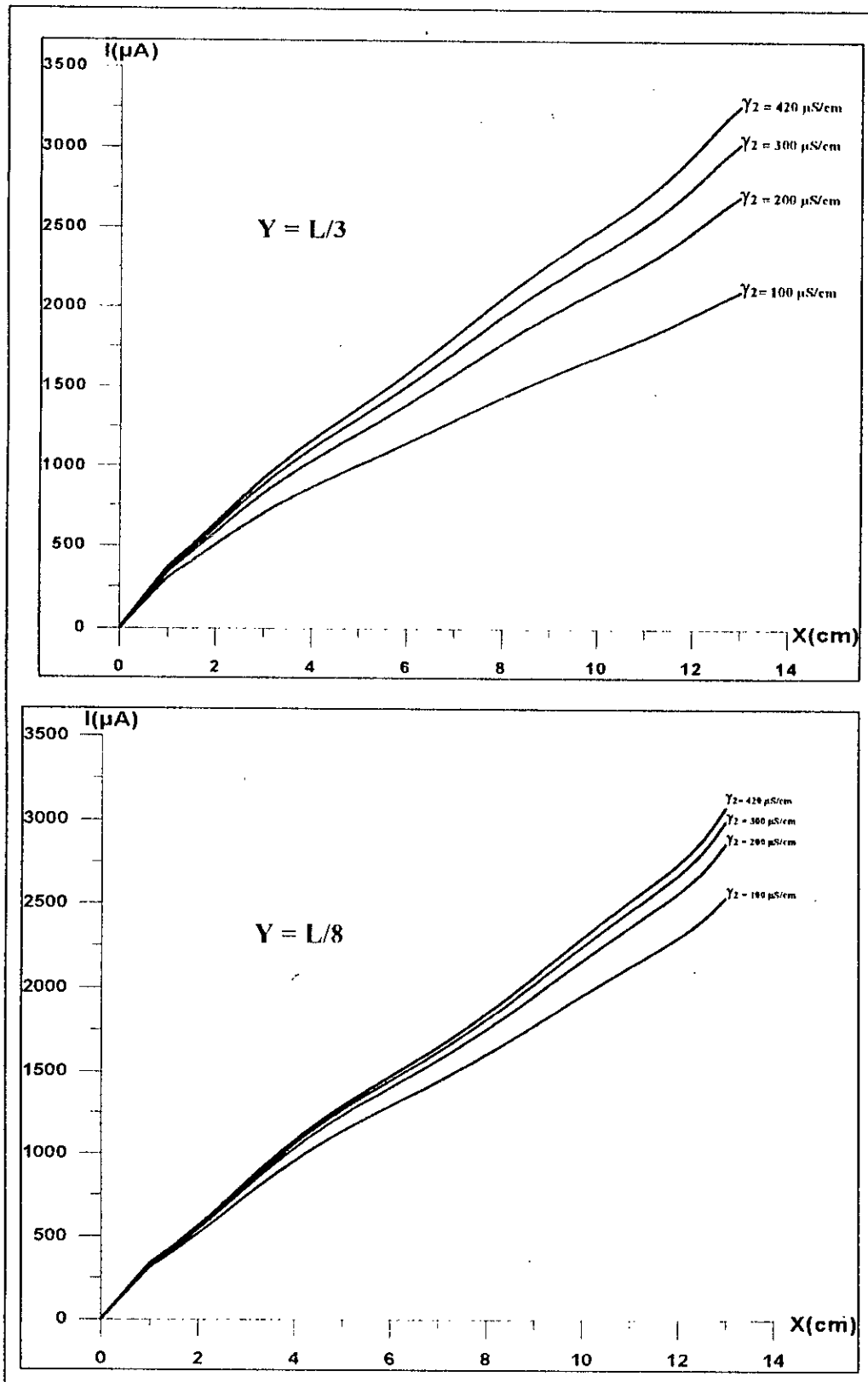


Fig.III.20 : Courant de fuite – Longueur d’arc
 Pour différentes conductivités de la partie fortement conductrice

III.5. Conclusion :

Nous avons élaboré, dans ce chapitre, un algorithme permettant d'obtenir certaines caractéristiques décrivant le comportement des surfaces isolantes non-uniformément polluées, à savoir, la tension d'alimentation en fonction du courant de fuite pour différentes conductivités de la pollution, les résistances des deux couches de pollution en fonction de la longueur d'arc, le coefficient de sécurité en fonction des produits relatifs, la tension et le courant pour différentes conductivités, ...etc. En se basant sur l'exploitation de la mesure du courant de fuite, il est possible d'évaluer le coefficient de sécurité, représentant le facteur de sécurité. La caractéristique coefficient de sécurité en fonction de la longueur relative de l'arc électrique s'avère très importante car elle peut servir comme moyen de surveillance du degré de pollution. En outre, le fait que les courbes théoriques soient proches de celles expérimentales confirme la validité de notre algorithme.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Dans ce présent travail, nous avons examiné le comportement des isolateurs non-uniformément pollués, afin mieux comprendre ce phénomène et donc de mieux le cerner. Le but étant évidemment de pouvoir prévenir les courts-circuits pouvant endommager les installations électriques.

Nous avons entrepris, dans l'étude bibliographique, les différents travaux qui ont été faits dans le domaine de la pollution non-uniforme. Cette étude nous a permis la détermination des paramètres causant la non-uniformité des isolateurs, ainsi que le comportement de ces isolateurs vis à vis d'une telle répartition.

Dans le but de déterminer les différentes caractéristiques de l'isolateur non-uniformément pollué, nous avons effectué des travaux expérimentaux sur un modèle plan inspiré de celui de P.Claverie et Y.Porcheron. Pour les configurations adoptées, nous avons abouti aux résultats suivants :

- Dans tous les cas étudiés, les tensions de contournement sont proches quelle que soit la configuration étudiée. Néanmoins, le système de la première disposition de la première configuration est légèrement plus rigide par rapport aux autres cas, car il présente des tensions de contournement légèrement supérieures.
- Concernant la deuxième configuration, le contournement présente un minimum, dans le cas où la largeur de la couche fortement conductrice de l'isolateur est égale à 90% de la distance inter-électrodes.
- Dans tous les cas, les courants de fuite ainsi que la longueur de l'arc augmentent aussi bien avec la tension appliquée qu'avec la largeur de la couche fortement conductrice.
- Contrairement à la tension de contournement, les configurations des couches de pollution influent sur le comportement du courant de fuite, ceci s'illustre dans le cas de la deuxième configuration où le courant de fuite est plus important que celui de la première.

En utilisant les caractéristiques expérimentales, nous avons mis au point un modèle permettant de simuler le comportement des isolateurs non-uniformément pollués. Les résultats obtenus concordent avec ceux obtenus expérimentalement, validant ainsi notre modèle mathématique. Grâce à ce dernier, nous avons obtenu d'autres caractéristiques décrivant le comportement des surfaces isolantes non-uniformément polluées, à savoir les évolutions du courant de fuite et de la tension appliquée en fonction de la longueur de l'arc électrique, le courant de fuite et la tension critiques en fonction de la largeur de la couche fortement conductrice, les courants de fuite et les tensions en fonction de la longueur de l'arc et ce pour différentes conductivités, les résistances équivalentes en fonction de la longueur d'arc, le coefficient de sécurité en fonction du produit relatif. Cette dernière caractéristique nous permet de surveiller le degré de pollution des isolateurs, et d'éviter ainsi le contournement final qui peut être préjudiciable pour les installations électriques.

Enfin, nous souhaitons que cette étude soit poursuivie en étudiant, à titre d'exemple, l'effet de l'épaisseur de la couche de pollution ainsi que l'effet capacitif dans le modèle théorique en prenant en considération plusieurs arcs multiples se formant sur la surface isolante.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.DANIS, "A Stochastic Pollution Flashover Model", 4^e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport 46-12, Athènes, 5-9 Sept. 1983.
- [2] F.OBENAU, "Fremdschichtüberschlag Und Kriechweglänge", *Deutsche Elektrotechnik*, vol. 4, 1958.
- [3] ZHANG RENYU, ZHU DEHENG, ZHANG BINGYUAN, "The Effect of Arc Bridging Between Sheds on the Flashover Performance of Polluted Stab Type Support Insulators", 4^e International Symposium On High Voltage Engineering, rapport 46-05, Athènes, 5-9 Septembre 1983.
- [4] 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.
- [5] L.L.LALSTON, S.ZOLEDZIOWSKI, "Growth of Discharges on Polluted Insulators" *IEEE Trans.PAS*, Vol.110, No7, Juillet 1963.
- [6] A.CIMADOR, S.VITET, "La Pollution des Isolateurs", *EDF-Epure N°27 Juillet 1990*.
- [7] R.SUNDARARAJAN, R.S.GORUR, "Role of Non Soluble Contaminants on the Flashover Voltage of Porcelain Insulators" *IEEE Trans. On Dielect. & Elec. Insul.* Vol.3, No2, April 1997.
- [8] J.KELLER-JACOBSEN, AA.PEDERSEN, J.K.RASMUSSEN, A.HENRIKSEN, C.LINDQVIST, S.SMEDSFELT "Essais au Laboratoire et en Plein Air pour Dimensionner Correctement les Isolateurs Exposés A La Pollution Saline", *CIGRE*, rapport 33-11, 1978.
- [9] A.EL-ARABATY, A.NOSSEIR, S.EL-DEBEIKY, E.NASSER, A.EL-SARKY, "Choix d'Isolateurs Utilisables dans des Ambiances Polluées et Notamment dans des Régions désertiques.", *CIGRE*, Rapport 33-11, 1980.
- [10] A.MEKHALDI, "Etude du Développement d'un Arc Électrique sur des Surfaces Isolantes Contaminées par la Pollution Désertique", *Thèse De Magister, ENP, Juin 1990*.
- [11] D.A.SWIFT, "AC Disc Insulators: Accumulation of Pollution Within and Around the Pin Cavity", 7^e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport 44-22, Dresde, Allemagne, 26-30 Août 1991.
- [12] H.STREUBEL "The Influence of Nonuniform Contamination on the Flashover Voltage of Insulators" 4^e International Symposium On High Voltage Engineering, rapport 46-10, Athènes, 5-9 Septembre 1983.
- [13] L.E.ZAFFANELLA, H.M.SCNEIDER, J.H.DUNLAP. "Performances des Isolateurs Pollués pour Lignes CCHT", *CIGRE*, rapport 33-05, 1986.
- [14] T.C.CHENG, C.T.WU, A.RODRIGUEZ-PENZ, "Contamination flashover of HVDC insulateurs", Table 3-13, final report, prepared for electric power research institute (EPRI), EL-2016, Aug. 1981.
- [15] I.KIMOTO, T.FUJIMURA, K.NAITO, "Performance of insulators for direct current transmission line under polluted condition", *IEEE, Trans. PAS*, Vol.92,



- [16] M.N.RAYES, M.ZHIRH, "Investigation about Flashover Performance of Insulators under Uniform and Non Uniform Contamination", *7^e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport 43-08, Dresde, Allemagne, 26-30 Août 1991.*
- [17] P.CLAVERIE, Y.PORCHERON, "How to Choose Insulators for Polluted Areas", *IEEE Trans.PAS, vol.92,N^o3, Mai-Juin 1973.*
- [18] A.MEKHALDI, S.BOUAZABIA, "Conduction Phenomena on polluted insulating surface Under AC High Voltages", *7^e international symposium on high voltage engineering, rapport 3174, Autriche, 28 Août -1e Septembre 1995.*
- [19] 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.*
- [20] G. le roy, C.Gary " les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions", Edition Eyrolles, Paris 1984.
- [21] F.A.M. RIZK, I.KAMEL, "Modelling of HVDC wall Bushing flashover in Non Uniform Rain". *IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 6, N^o 4, pp. 1650 – 1662, 1991.*
- [22] M. FARZANEH, "Effects of the thickness of Ice and Voltage Polarity on flashover Voltage of Ice – Covered High Voltage Insulators", *7th International symposium of high Voltage Engineering, Paper N^o 43 – 10, Dresden, Germany, 26 – 30 August 1991.*
- [23] A. MEKHALDI, M. TEGUAR, A. BEROUAL, "Algorithm for Pollution Flashover Calculations" *Archives of Electrical Engineering, Vol. XLV, N^o4, pp. 385 – 397, 1996.*
- [24] B.F.HAMPTON. "Flashover mechanism of polluted insulation", *Proc. IEE, Vol.111, N^o.5, May 1964, p. 985- 990.*
- [25] A. BOUBAKEUR, "Essais d'Isolateurs Pollués dans les Conditions Naturelles" *Rapport Interne, I.W.N Politechnika Warszawska, Varsovie 1978.*
- [26] R.SUNDARARAJAN, R.S.GORUR, "Dynamic Arc Modeling of Pollution Flashover of Insulators Under dc Voltage", *IEEE Trans.On Elec.Insul.Vol.28, No2, April 1993.*
- [27] A.MEKHALDI, "Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternatives 50Hz", *Thèse De Doctorat d'Etat, ENP, Septembre 1999.*
- [28] H.Edels, S.Y.Ettinger.- "Arc Interruption and Thermal Reignition" *Proc. Inst. Elect. Engrs, 1962, Tome-109, A, p.89.*
- [29] A.EL-ARABATY, A.NOSSEIR, S.EL-DEBEIKY, A.EL-AWADY, E.NASSER, A.EL-SARKY "Effects of Insulator Shape, Dimensions and Material on its Flashover Characteristics" *4^e International Symposium On High Voltage Engineering, rapport 46-04, Athènes, 5-9 Septembre 1983.*
- [30] R.KOSZTALUK, W.CZALAK, R. KUCHARSKI, "Mesure de Pollution, Essais d'Isolateurs Pollués, Choix des Isolateurs", *CIGRE, rapport n^o33-07-1978.*
- [31] HE.PEI-ZHONG, XU.CHENG-DONG "Résultats d'Essais et de Recherches Sur des Isolateurs Naturellement Pollués et leur Application à la Conception de l'Isolation d'un Réseau en Régions Polluées" *CIGRE, Rapport 33-07, 1982.*



- [32] P.J.LAMBETH, J.S.T.LOOMS, M.SFORZINI, C.MALAGUTI, Y.PORCHERON, P.CLAVERIE, "Recherche Internationale sur la Pollution", *CIGRE, rapport n°33-02-1970*.
- [33] M.P.VERMA, H.NIKLASCH, W.HEISE, H.LIPKEN, H.SCHREIBER, G.F.LUXA, "Critère de Contournement par Pollution et ses Applications pour le Dimensionnement et le Contrôle de l'Isolation" *CIGRE, rapport 33-09, 1978*.
- [34] M.KHALIFA, M.ABOU-SEADA, H.EL-GHAZALY, "Laboratory Simulation of Desert Pollution Flashover of High Voltage Insulators", *4^e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport 46-03, Athènes, 5-9 Septembre 1983*.
- [35] A.CIMADOR, M.COJAN, P.HAUTEFEUILLE, M.MOREAU, "Méthode de Dimensionnement des Isolateurs des Ligne Aeriennes en Régions Polluées", *CIGRE, rapport n°33-04-1978*.
- [36] F.A.M.RIZK, "Modèles Mathématiques du Contournement des Isolateurs sous Pollution", *Electra N°78 Octobre 1981*.
- [37] N.DHAHBI-MEGRICHE, A.BEROUAL, L.KRAHENBUHL, "A New Proposal Model for Polluted Insulators Flashover", *Journal of Physics D: Applied Physics, (30), N° 5, March 1997*.
- [38] P.S.GHOSH, N.CHATTERJEE "Arc Propagation over Electrolytic Surfaces Under Frequency Voltage" *IEEE Trans. On Dielect. & Elec. Insul. Vol.3, No4, August 1996*.
- [39] M.TEGUAR, "Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Électriques sur des Isolateurs Installés en Régions Polluées", *Thèse de Magister ENP, Février 1993*.
- [40] M.BARNEA, P.URSU, "Pollution et Protection de l'Atmosphère", *Edition Eyrolles, Paris 1974*.
- [41] CEI 60-1, "Techniques des Essais A Haute Tension", *Définitions Et Prescriptions Générales Relatives Aux Essais, Deuxième Édition 1989-11*.
- [42] A.DJOUADI, H.MELOUK, "Problème de la Pollution Marine des Isolateurs de Haute Tension En Algérie", *PFE, ENP 1975*.
- [43] R.G.HOULGATE, P.J.LAMBETH, W.J.ROBERTS, " Performances des Isolateurs en Milieu Maritime en Très Haute et Ultra Haute Tension" *CIGRE, Rapport 33-01, 1982*.
- [44] V.M.RUTSKY, "Prediction of Discharge Characteristics of External High-Voltage Insulation Near Industrial Enterprises, Polluting the Atmosphere", *9^e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport 3247 , Autriche, 28 Août-1^e Septembre 1995*.
- [45] M.DOBARZIK, "Formes de Décharges Glissantes sous Tension de Choc 1,2/50 μ S sur Les Surfaces de Diélectriques Solides Polluées par le Sable du Sahara", *Thèse De Docteur-Ingénieur, Enp, Alger, Juin 1975*.
- [46] L.CHOUGUI, R.BELAICHA, "Contribution à l'Étude de la Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région d'Arzew", *PFE, ENP Janvier 1983*.

- [47] J.P.HOLTZHAUSEN, O.C.T.POTGIETER, J.M.SMITH, "The One Site Leakage Current Performance of Insulators of Various Designs and Materials as a Function of Water Data", *7^e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport 44-22, Dresden, Allemagne, 26-30 Août 1991.*
- [48] J.DANIS, J.SCHNÖRCH " Continuous Measurement Method of the Site Pollution Severity and its Use for Insulator Dimensioning", *CIGRE 122-05 Symposium 22-81 Stockholm 1981.*
- [49] G.RIQUEL, E.SPANGENBERG, " De la Céramique au Synthétique, les Isolateurs Font Peau Neuve", *EDF-Epure N°58-Avril 1998.*
- [50] CEI 71-2, "Coordination de l'isolement", *Guide d'application, Deuxième Édition 1976.*
- [51] D.DUMORA, L.PARGAMIN, R.PARRAUD, "Expérience des Isolateurs en Verre Trempe sous Pollution Naturelle en Zone Desertique", *SEDIVER Journées Technniques, Alger 16,17 Fevrier 1999.*
- [52] O.FOUATHIA, S.HOUACHE, "Approche d'un Isolateur de Haute Tension par un Modèle de Laboratoire", *PFE, ENP Juin 1996.*
- [53] C.HURAU, A.M.RAHAL, "Le Contournement des Isolateurs Haute Tension : Approche à l'Aide d'un Modèle de Laboratoire", *RGE, Juin 1975.*
- [54] H.H.WOODSON, A.J.MC-ELROY, "Insulators With Contaminated Surface, Part II, Modeling of Discharge Mechanisms", *IEEE, Trans.PAS, Vol.89, No8, Nov-Dec 1970.*
- [55] J.P.HOLTZHAUSEN, "The Relationship Between the Parameters Affecting the AC pollution Performance of a Cylindrical Insulator", *9^e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport 3233, Autriche, 28 Août -1^e Septembre 1995.*
- [56] R.WILKINS, "Flashover Voltage Of High Voltage Insulators With Uniform Surface Pollution Films", *Proc. IEE, 116, No3, Mars 1969.*
- [57] R.TAMARANTE, A.TAIR, "Mesure de Courant de Fuite sur les Diélectriques Pollués", *PFE, ENP juin 1993.*
- [58] A.LAOUFI, S.RANDI, "Corrélation entre Modèle Continu et Discontinu d'un Isolateur Pollué", *PFE, ENP Juin 1995.*
- [59] S.HELIS, A.MEDDOUR, "Etude du Contournement d'un Isolateur Pollué", *PFE, ENP Septembre 1996.*
- [60] M.T.FELLAH, M.DRIBINE, "Etude de l'Influence de l'Épaisseur de La Couche Polluante sur le Contournement des Isolateurs Pollués". *PFE, ENP Juin 1996.*
- [61] C.H.A.ELY, P.J.LAMBETH, J.S.T.LOOMS, D.A.SWIFT, "Contournement des Polymères Humides et Pollués : l'Ailette BOOSTER" *CIGRE, Rapport 15-02, 1978.*
- [62] A. LECHEB, " Visualisation et Traitement de Signal du Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée", *PFE, ENP Juin 1999.*