

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

Genie Electrique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Corrélation entre modèle
continu et discontinu d'un
isolateur pollué.*

Proposé par :

A. BOUBAKEUR
A. MEKHALDI

Etudié par :

A. LAOUFI
S. RANDI

Dirigé par

A. BOUBAKEUR
A. MEKHALDI

PROMOTION
Juin 1995

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	4
INTRODUCTION GENERALE.....	5
CHAPITRE I SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	8
I-1 Introduction.....	8
I-2 Définitions.....	9
I-2-1 Isolateur.....	9
I-2-2 Fonctionnement et construction d'un isolateur.....	9
I-2-3 Types d'isolateur.....	10
I-3 Pollution des isolateurs.....	10
I-3-1 Formation et répartition de la couche polluante.....	10
I-3-2 Type de pollution	11
I-3-3 Influence de facteurs atmosphériques.....	11
I-4 Sévérité de pollution d'un site.....	11
I-5 Contournement des isolateurs pollués.....	12
I-6 Processus de contournement sous pollution.....	14
I-7 Méthodes d'essais.....	15
CHAPITRE II MODELES MATHEMATIQUES.....	16
II-1 Introduction.....	16
II-2 Modèle à courant continu.....	16
II-2-1 Modèles simples.....	16
II-2-2 Amélioration des modèles à courant continu... ..	21
II-2-2-1 Modèle de la couche mixte.....	21
II-2-2-2 Modèle du disque circulaire.....	23
II-3 Modèle à courant alternatif.....	23
II-3-1 Modèle théorique.....	24
II-3-2 Modèles expérimentaux.....	24
II-4 Conclusion.....	26

**CHAPITRE III ETUDE PAR SIMULATION NUMERIQUE BASEE SUR LE MODELE
 DE GUAN ZHICHENG ET ZHANG RENYU.....27**

III-1	Introduction.....	27
III-2	Formulation mathématique du modèle.....	27
III-2-1	Présentation du modèle.....	28
III-2-2	Equation du modèle.....	28
III-2-3	Paramètres de l'arc et conductivité effective.....	29
III-2-4	Résistance de la couche de pollution.....	29
III-2-5	Equations mathématiques du modèle.....	30
III-3	Interprétation des résultats.....	32
III-4	Conclusion.....	39

CHAPITRE IV ETUDE EXPERIMENTALE.....40

IV-1	Introduction.....	40
IV-2	Circuit d'essai.....	41
IV-3	Mode opératoire.....	42
IV-3-1	Dispositif expérimental.....	42
IV-3-2	Réalisation du modèle.....	42
IV-3-3	Application de la couche de pollution..... et de la tension.....	42 44
IV-4	Interprétation.....	45
VI-4-1	Caractéristiques tension-courant.....	45
VI-4-2	Caractéristiques courant-longueur d'arc.....	45
VI-4-3	Caractéristiques tension-longueur d'arc.....	45
VI-4-4	Tension de contournement.....	45
VI-5	Conclusion.....	55

**CHAPITRE V APPLICATION DE LA METHODE DES E.I.F POUR LA
 MODELISATION DES PHENOMENES DE CONDUCTION SURFACIQUE
 SUR UN MODELE PLAN D'ISOLATEUR POLLUE.....56**

V-1	Methode des équations intégrales de frontières.....	56
V-1-1	Introduction.....	56
V-1-2	Principe de la méthode.....	57

V-2	Formulation intégrale globale.....	57
V-3	Formulation tiré de l'identité de GREEN.....	59
V-4	Modelisation des phenomenes de conduction surfacique.....	62
	V-4-1 Equations du champ.....	62
	V-4-2 Conditions d'interfaces.....	64
V-5	Application de la methode des e.i.f sur un modèle plan d'isolateur pollué en 2D.....	65
	V-5-1 Conditions d'interfaces.....	66
	V-5-2 récapitulation.....	67
V-6	Discretisation numerique et programmation.....	68
	V-6-1 Discretisation en éléments quadratiques.....	68
	V-6-2 Discretisation en éléments constants.....	70
	V-6-3 Etapes de programmation.....	72
V-7	Résultats de calcul.....	75
V-8	Conclusion.....	76
CONCLUSION GENERALE		77
BIBLIOGRAPHIE		78

RESUME

L'étude de la pollution des isolateurs nécessite une bonne compréhension des phénomènes physiques.

Notre travail consiste en une contribution à L'étude expérimentale que développe le laboratoire de haute tension de l'ENP sur la pollution des isolateurs, et l'application de la méthode des e.i.f sur un modèle plan d'isolateur pollué.

Dans le chapitre 1, nous présentons les phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique.

Le chapitre 2, porte sur les principaux modèles mathématiques décrivant les phénomènes de développement d'un arc électrique .Nous avons fait une simulation numérique pour obtenir les différentes caractéristiques ceci fait l'objet du chapitre 3.

Dans le chapitre 4, nous exposons les résultats de L'étude expérimentale.

Enfin le chapitre 5, est consacré à l'application de la M.E.I.F sur un modèle plan d'isolateur pollué.

INTRODUCTION GENERALE

Les isolateurs des lignes et des postes du réseau de transport de l'énergie électrique sont le siège à des dépôts de pollution, les type de pollution sont divers et dépendent surtout de la localisation géographique des isolateurs; les particules de solide et les poussières de sable dans les régions industrielles ou désertiques, le pollen et les engrais dans les régions agricoles, dans les régions urbaines, ce sont les fumées des appareils de chauffage et des véhicules automobiles qui engendrent la pollution, pour les régions côtières ce sont principalement les embruns marins qui couvrent les isolateurs, ainsi aucune région n'est donc exempte de pollution [2]. Lorsqu'il y a humidification de la couche polluante par pluie ou brouillard ou rosée, il y a formation d'un film électriquement conducteur; qui permet la circulation d'un courant de fuite à la surface de l'isolateur, l'effet thermique de celui-ci engendre des assèchement locaux. La tension appliquée initialement se trouve donc reportée aux bornes des zones sèches. La répartition du potentiel à la surface de l'isolateur n'est plus une répartition électrostatique, des arcs sont susceptibles de s'amorcer. Ces arcs peuvent s'allonger jusqu', au contournement et la mise hors service de l'installation . On outre, les amorçages d'arcs peuvent engendrer par effet thermique des dégradations de la matière isolante. En face des difficultés engendrées par la pollution, plusieurs méthodes de lutte sont utilisées: le lavage ou le graissage des isolateurs par exemple, cependant ces opérations sont couteuses et économiquement injustifiables; par conséquent la meilleur solution consiste à dimensionner à priori un isolement qui permet en regard de la pollution d'assurer une bonne tenue.

Dans ce cadre plusieurs modèles mathématiques ont été développés, en vue de formuler un critère d'établissement d'un arc électrique sous pollution, tous basés sur le modèle d'Obenaus qui consiste à mettre en série un arc électrique de longueur X avec une résistance $R(X)$ simulant la couche de pollution; toutefois le traitement mathématique de ces différents modèles nécessite l'introduction de plusieurs simplifications (géométrie simple unidimensionnel, répartition uniforme de la couche polluante, conductivité constante, ...etc), au détriment d'une modélisation rigoureuse des phénomènes physiques entourant le processus de pollution des isolateurs, ainsi ne permettent-ils que de dégager les grandes lignes du comportement d'un isolateur sous pollution, et ils nous donnent seulement une idée quantitative sur les différentes grandeurs caractérisant l'évolution d'un arc électrique sur une surface isolante polluée. Lorsqu'il s'agit d'évaluer les performances des isolateurs sous pollution les essais sont indispensables.

Les premiers essais dit sur site, consistent en l'installation des isolateurs dans différentes régions où règne une pollution notable, et d'observer leur comportement, on peut par exemple comparer le temps au bout duquel les contournements surviennent, ou comparer les courants de fuite...Cependant la durée relativement longue que nécessite ces essais est le principal inconvénient.

On s'est donc orienté vers les essais au laboratoire qui sont basées sur la simulation de la couche de pollution par des solutions disposées sur l'isolateur et dont la conductivité électrique est réglée par la quantité de sel (NaCl). Le but de ces essais consiste par exemple à trouver une relation entre la conductivité et la tension de contournement ou entre la largeur de la couche polluante et le courant de fuite, comme les essais sur site les essais au laboratoire posent des problèmes: reproductibilité de la couche polluante, durée et coût.

La simulation numérique est une alternative intéressante aux essais ou tout au moins un moyen complémentaire, intéressant par sa souplesse et sa rapidité.

La simulation numérique nécessite une bonne compréhension du phénomène physique, ce qui conduit à un modèle mathématique juste. L'objet de notre étude par simulation basée sur un modèle plan, consiste à réaliser un programme de calcul du potentiel basé sur la méthode des équations intégrales de frontière.

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1-INTRODUCTION:

Le phénomène de pollution des lignes aériennes constitue un sujet d'étude d'une importance primordiale. Cela provient du fait que la pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de haute tension. En effet, à la suite d'une interaction entre l'air transportant des grains de poussière et l'isolateur une couche étrangère se dépose sur les surfaces de celui-ci[1]. En présence d'humidité cette couche diminue considérablement la tension de tenue et provoque très souvent des incidents très graves. Cette diminution de la tension de tenue dépend de plusieurs facteurs dont les plus importants sont le profil de l'isolateur et la nature de l'agent polluant.

En général une étude sur site nécessiter un temps relativement long ,trois ans environ[2]. C'est pour cela que plusieurs modèles de laboratoire ont été proposés en vue de simuler convenablement les conditions naturelles d'exploitation.

I-2-DEFINITIONS:

I-2-1-ISOLATEUR:

L'isolateur est un matériau isolant solide présentant une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle. Il est utilisé pour isoler les conducteurs ou les pièces sous tension afin d'empêcher les court-circuits, les pertes de courant, et les dangers d'électrocution.

Les conducteurs de lignes sont suspendus aux pylônes par des isolateurs qui travaillent donc en traction [3]. Ils sont soit en céramique soit en verre trempé et parfois en polymères.

I-2-2-FONCTIONNEMENT ET CONSTITUTION D'UN ISOLATEUR:

Les isolateurs assurent une fonction mécanique par l'intermédiaire d'une ferrure fixée à la céramique par scellement ou assemblage. Du point de vue électrique l'isolateur est considéré comme deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones qui constituent trois isolations en parallèle ayant des comportements différents, qui sont les suivantes:-

- L'intervalle d'air.
- La céramique.
- L'interface air-céramique.

- C'est cette dernière qui zone détermine la tension de contournement notamment sans l'influence de la pollution. La distance curviligne mesurée le long de la génératrice est dite ligne de fuite.

I-2-3: TYPES D'ISOLATEURS:

On distingue trois types:-

-type capot et tige (ou suspendu): La tête assumant l'isolation interne est scellée avec du ciment entre un capot (scellement externe) et une tige (scellement interne). L'assiette ou jupe assure l'isolation externe, c'est le type le plus répandu dans le monde pour les lignes de haute tension [3].

-type long fût: Les scellements sont du type externe, le corps de la céramique est plus fragile aux chocs mécaniques.

-type à scellement interne: Isolateur de ligne en porcelaine de conception relativement récente, le spirlec est constitué d'un fût plein muni d'ailettes hélicoïdales. Il répond aux exigences d'imperforabilité et d'auto-nettoyage.

I-3-POLLUTION DES ISOLATEURS:

I-3-1-FORMATION ET REPARTITION DE LA COUCHE POLLUANTE:

La répartition de la couche de pollution dépend du profil de l'isolateur, de la position de la chaîne par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée) et du niveau de tension auquel est soumis cet isolateur. Elle se concentre généralement sur les éléments de la chaîne d'isolateurs situés du côté haute tension, dans les parties les mieux protégées contre les facteurs d'auto-nettoyage (vent fort-pluie). La densité de pollution augmente en fonction de l'augmentation de l'angle d'inclinaison de la face inférieure des jupes [4].

Il faut cependant noter que pour n'importe quel type d'isolateur, la densité de pollution sur la face inférieure est beaucoup plus grande que sur la face supérieure [4]. La répartition non uniforme de la pollution [4], [5]; et l'absence de symétrie circulaire, ne sont pas seulement dus à la façon dont les particules de poussières se déposent sur la surface mais aussi

a la direction des vents, [4], [5], [12].

I-3-2:TYPE DE POLLUTION:

La pollution peut être naturelle artificielle ou mixte (combinée).

- La pollution naturelle, provient du brouillard salin dans les régions côtières, et des grains de sable dans les régions désertiques.

- La pollution industrielle est généralement engendrée par l'évacuation des fumées des usines (raffinerie, cimenterie, minerais, ... etc). La pollution mixte englobe les deux types. On la rencontre par exemple dans les régions côtières à proximité des usines. Ce dernier type est le plus nocif pour les isolateurs.

I-3-3-INFLUENCE DE FACTEURS ATMOSPHERIQUES:

Il est admis par tout le monde que l'humidification de la surface des isolateurs favorise le contournement sous pollution cependant l'humidification peut être due soit à la pluie soit au phénomène de condensation engendré par l'écart de température entre le jour et la nuit. En effet la température des isolateurs peut aux premières heures du matin être inférieure à celle de l'air ambiant. Ce phénomène a été confirmé par LESCH [1]. Le vent a une influence très complexe un vent de très grande vitesse est le seul facteur d'auto-nettoyage en absence d'une pluie forte, par contre un vent de faible vitesse favorise la disposition de la couche de pollution.

I-4-SEVERITE DE POLLUTION D'UN SITE:

Le dimensionnement de l'isolation de type extérieur pose un certain nombre de problèmes, l'un des plus importants est la détermination de la sévérité de pollution pour un site donné [6].

Cette sévérité est généralement caractérisée par

l'intensité de précipitation de la pollution, ainsi que la conductivité des dépôts polluants[7].

Elle peut être déterminée pratiquement par deux méthodes, une dite directe et l'autre dite indirecte. La première consiste en la mesure de la conductivité superficielle, et la seconde consiste à l'analyse de la quantité de dépôts et dans la mesure de la conductivité des composants solides. D'après R. KOSZTALUK[6]; la détermination de la probabilité correspondant aux paramètres de pollution peut être considérée comme un critère caractérisant la sévérité de pollution d'un site.

Toutefois il existe d'autres méthodes qui sont:-

- Comptage des impulsions du courant de fuite.
- Courant de fuite le plus élevé.
- Contraste d'amorçage.

Des études antérieures ont démontrées que la sévérité peut être déterminée à partir de la conductivité superficielle des couches polluantes et c'est ce qui est généralement adopté[9]. En vue de faire un dimensionnement optimal il est nécessaire d'établir une carte de pollution.

I-5 CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS POLLUES:

I-5-1 DEFINITIONS:

a/-tension de contournement:

La tension de contournement est par définition le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les électrodes. Pour un isolateur pollué elle dépend d'une façon générale de [10];-

- La résistivité volumique moyenne de la pollution.
- la répartition de la couche de pollution.

- profil et diamètre de l'isolateur

Elle est pratiquement proportionnelle à la longueur de la chaîne d'isolateur pourvu que cette dernière soit inférieure à une certaine valeur (10 m environ).

b/-Courant de fuite:

Le courant de fuite est un courant de faible amplitude [7] circulant à travers les dépôts polluants. Il est donc à caractère électrolytique, donc ce courant est du type résistif. Il devient important lorsqu'on s'approche de la tension de contournement. Il dépend en outre de plusieurs facteurs, à savoir la nature de la couche de pollution et la longueur de la ligne de fuite [5].

c/-Courant de fuite critique:

Le courant de fuite critique " I_{cr} ", représente la valeur du courant minimale nécessaire pour provoquer un contournement par pollution sur un isolateur à une tension donnée. Il est indépendant du procédé d'essai ainsi que de la forme de l'isolateur. Le seul facteur dont dépend " I_{cr} " sous une tension donnée est la ligne de fuite, c'est à dire la contrainte spécifique exprimée en KV/cm [12]. Sa valeur est obtenue dans la dernière demi-période précédant le contournement [11].

d/-Longueur d'arc critique:

C'est la longueur " X_c " de l'arc électrique maximale qui peut encore s'éteindre. Autrement dit, pour une tension donnée, si l'arc atteint cette valeur il est probable que le contournement ne se produise pas encore ; mais dès que $X > X_c$ nous avons le contournement.

D'après M.P VERMA [12], les relevés photographiques de plusieurs chercheurs et les calculs fait par NASSER [7], la longueur d'arc critique est égale à 57% de la longueur de la ligne de fuite, d'après ISSEL [7], cette valeur est de 59% de la ligne de fuite totale de l'isolateur, CLAVERIE et PORCHERON [11], approchent cette valeur à 2/3 de la longueur de

fuite de l'isolateur.

I-6-PROCESSUS DE CONTOURNEMENT SOUS POLLUTION:

On peut décrire qualitativement le processus de contournement sous pollution comme suit [12],[13]:

- phase a: L'isolateur se recouvre d'une couche de pollution constituée de sels solubles et d'acides ou de bases diluées, si la pollution se dépose sous forme d'une couche électrolytique liquide les phases (c) à (f) peuvent avoir lieu rapidement sinon un processus d'humidification phase (b) est nécessaire.
- phase b: La surface de l'isolateur est humidifiée soit complètement soit partiellement (par du brouillard, de la bruine, rosée...), si bien que la couche polluante devient conductrice. Une pluie violente ne simplifie pas les choses elle peut nettoyer l'isolateur et augmenter ainsi sa tenue, comme elle peut engendrer un contournement par ruissellement.
- phase c: Un courant de fuite apparaît et son effet thermique sèche les zones polluées.
- phase d: Le séchage ne peut être uniforme, ainsi l'écoulement du courant peut être interrompu par des zones sèches.
- phase e: La tension appliquée aux zones sèches provoque un claquage dans l'air, les zones sont court-circuitées par des arcs électriques en série avec la résistance de la couche polluante.
- phase f: Si la résistance de la partie non séchée est assez faible les arcs qui court-circuitent les zones sèches peuvent brûler continuellement et s'éteindre le long de l'isolateur finalement celui-ci se trouve court-circuité et un défaut s'établit à la masse.

CHAPITRE II

MODELES MATEMATIQUES

**CHAPITRE II
MODELES MATHÉMATIQUE****II-INTRODUCTION:**

En vue de formuler un critère d'établissement de l'arc sous tension continue, plusieurs modèles ont été développés. Ils sont très souvent employés pour interpréter des résultats obtenus pour des tensions alternatives. Pour la représentation du contournement engendré par la pollution, les modèles considérés doivent être traité différemment dans le cas du continu et celui du courant alternatif.

Les deux aspects fondamentaux représentant le phénomène d'arc sur les surfaces contaminés sont:

- La formulation de la tension nécessaire au maintien d'un arc partiel en série avec une couche de pollution non court-circuitée par l'arc.

- Le critère de propagation de l'arc sur la surface d'un isolateur contaminé et mouillé.

II.2. MODELES A COURANT CONTINU:**II.2.1. Modèles simples:**

Obenaus [14] fût le premier à proposer le modèle de base, qui consiste en une électrode sous haute tension à partir de laquelle s'allonge un arc de longueur x en série avec une résistance $R(x)$ équivalente à la couche de pollution (fig.2.1).

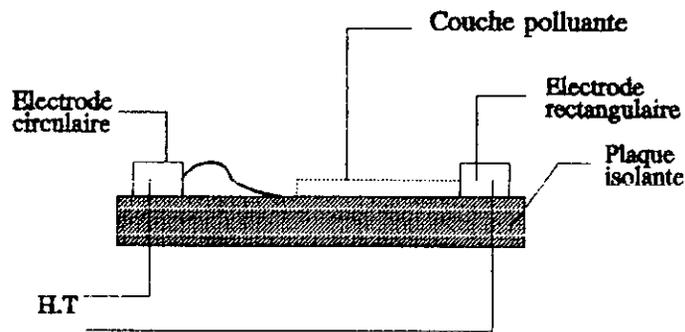


Fig. 2.1:Modèle rectangulaire

Electriquement nous avons le circuit équivalent suivant:

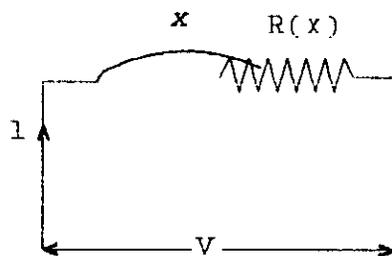


Fig. 2.1: Circuit électrique équivalent

En appliquant la loi d'Ohm on obtient:

$$V = V_{\text{arc}} + V_e + R(x) i \tag{2.1}$$

ou encore:

$$V = kXi^{-n} + V_e + R(x) i \tag{2.2}$$

où V_e est la chute de tension cumulée aux électrodes. Elle est indépendante du courant de fuite i et dépend essentiellement de

la forme géométrique des électrodes [15] .

k , n sont des constantes empiriques qui dépendent de l'arc.

Selon Obenaus [14] , la tension nécessaire pour maintenir un arc de longueur x est donnée par:

$$U_{cx} = \frac{n+1}{n^{\frac{n+1}{n}}} [kX R(x)]^{\frac{1}{n+1}} \quad (2.3)$$

A partir du modèle de base d'Obenaus, Neumarker[15] a fait l'hypothèse supplémentaire d'une résistance de pollution uniforme par unité de longueur de fuite, soit:

$$R(x) = r(L-x) \quad (2.4)$$

où L et r représentent respectivement la longueur de la ligne de fuite total et la résistance moyenne par unité de longueur.

Ainsi il obtient la relation exprimant la tension nécessaire pour entretenir un arc de longueur x en série avec la couche de pollution.

$$\frac{k n}{r} \left(\frac{V_{cx}}{(n+1) k L} \right)^{\frac{n}{n+1}} = \left(\frac{X}{L} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{X}{L} \right)^{\frac{n+1}{n}} \quad (2.5)$$

le courant critique est donné par:

$$I_c = \left(\frac{X}{L} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (2.6)$$

En prenant aussi l'hypothèse simplificatrice de Neumarker, et en négligent la chute de tension cumulée aux électrodes (elle est de l'ordre de 600 V), Alston et Zoledowski [16] ont trouvé

Jusqu'à maintenant nous avons supposé que la couche de pollution est continue. Danis [17], et en vue d'approcher l'isolateur réel, à fait l'étude pour un modèle contenant plus d'une zone de pollution avec des zones sèches intermédiaires (Fig.2.4). La rupture de ces zones survient d'une manière aléatoire .Elle dépend de plusieurs facteurs dont on ne peut considérer l'effet simultanément. On a un phénomène de rupture est à caractère stochastique et la tension de contournement est

donc une variable aléatoire possédant une fonction de distribution.

Pour une résistance de la couche polluante linéaire, l'équation régissant le circuit est donnée par:

$$V = ki^{-n} + \rho(L-X)i \quad (2.9)$$

où ρ étant la résistance spécifique, $n > 0.5$ et $200 < k < 400$.
La tension critique est alors:

$$V_c = L(k\rho)^{\frac{1}{n+1}} = LI_c \rho_c = kI_c^{-n} \quad (2.10)$$

où ρ_c est la résistance spécifique critique et I_c le courant de fuite critique maximal.

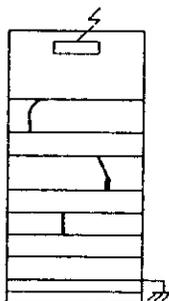


Fig. 2.4: Modèle plan selon Danis.

A partir des modèles précédents nous pouvons dire:-

- Tous les modèles sont régis par l'équation de base de la forme:

$$V = V_0 + AXi^{-n} + R(x)i \quad (2.11)$$

Cette équation lie trois variables: la tension

d'alimentation, le courant de fuite et la longueur de l'arc. Elle décrit donc le fonctionnement statique de la décharge et a pour conséquence immédiate que pour une longueur donnée de la zone sèche, donc de l'arc, il existe une tension limite au-dessus de laquelle aucun courant de fuite ne circule.

-Toutefois si la tension appliquée au système est supérieure à U_a , il existe deux points de fonctionnement possible. Sont ils stables simultanément ?.

Pour répondre à cette question, il faut connaître le phénomène physique responsable de l'allongement de la décharge. A l'heure actuelle ce processus n'a pas encore été éclairci [15]. Cependant Hesketh [18],[19], assez naturellement, a proposé d'admettre que la décharge s'allonge si $dI/dx > 0$ pour U constant. Plusieurs résultats expérimentaux ont validé cette condition, Donc bien qu'imposée a priori, elle recouvre donc très probablement le mécanisme physique de l'extension de la décharge. Par contre Hampton [20] a proposé que l'arc ne se propage que si le gradient de la tension de décharge E_a est inférieur au gradient de la tension de la couche polluante en série E_p ($E_a < E_p$). Nacke et Wilkins [21],[22] suggèrent que les arcs se déplacent vers la position où le taux d'énergie dépensée est maximum, cependant la raison fondamentale de propagation de l'arc n'est pas claire jusqu'à maintenant.

II.2.2. AMELIORATION DES MODELE A COURANT CONTINU:

En vue de simplifier les calculs, plusieurs hypothèses ont été introduites, justifiées tantôt mathématiquement tantôt expérimentalement.

II.2.2.1. Modèle de la couche mixte:

Ce modèle a été proposé par Obenaus et Boehme [23]. Il correspond à un isolateur long fût pour lequel on suppose un circuit électrique équivalent semblable à celui du modèle simple. La couche de pollution est divisée en deux couches résistantes en série, de résistance linéique r_1 et r_2 , et qui correspondent respectivement aux fût et aux ailettes (Fig. 2.5). En outre ils ont décomposé la longueur total de fuite en deux distances partielles

L_1 et L_2 .

En appliquant le critère de Hampton [20] ,ils trouvent la relation donnant le gradient de contournement critique :

$$\frac{V_c}{L} = 0.8\sqrt{k\sqrt{r_1}} \quad (2.12)$$

avec $k=80$ VA/cm

Si on applique le critère de Hesketh [18] on obtient:

$$\frac{V_c}{L} = 0.8(Lri) \quad (2.13)$$

où r est la résistance linéique sur les longueurs partielles de fuite L_1 et L_2 .

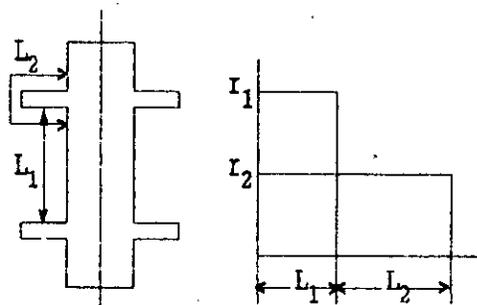


Fig. 2.5: Modèle selon Obenaus et Boehme

Il faut noter que les modèles précédents décrivent le phénomène de décharge en phase stable, pour un modèle unidimensionnel. Cependant Rahal et Huraux [24] ont proposé quand à eux un modèle permettant à la fois:

- de prévoir la stabilité ou l'instabilité de la décharge.
- de faire une approche en bidimensionnel en réalisant toutes les corrections possibles.

Ainsi le modèle proposé est représenté sur la figure 2.6

L'application du critère de Hampton, leurs a permis de constater une divergence entre les résultats de calculs et ceux obtenus expérimentalement.

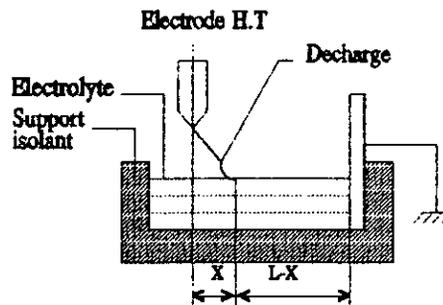


Fig .2.6:Modèle de laboratoire d'après Rahal et Huriaux

II.2.2.2. Modèle du disque circulaire:

Woodson et Mc Elroy [25] ont essayé de reproduire, d'une façon idéale, la surface d'un isolateur par une configuration géométrique circulaire (Fig.2.7).

La résistance superficielle de l'agent polluant, en se basant sur certaines hypothèses, peut s'écrire sous la forme suivante:

$$R(x) = \frac{C}{\gamma} (r_0 - r_a)^m \quad (2.14)$$

où r_0 est le rayon de l'électrode externe.

γ la conductivité superficielle du polluant.

r_a la position de départ de l'arc.

la constante $c=1.4$ a été déterminée expérimentalement pour une résistance de pollution $R(x)=1.6 \cdot 10^{-2} \Omega$ et m une constante.

Ce modèle n'a pas donné des résultats satisfaisants. Ils ont imputé cela à la non uniformité de la couche de pollution.

II.3. MODELES A COURANT ALTERNATIF:

Les modèles à courant alternatif développées, à fin d'étudier un contournement engendré par la pollution des isolateurs peuvent être classés en deux catégories:

- modèles théoriques.
- modèles expérimentaux.

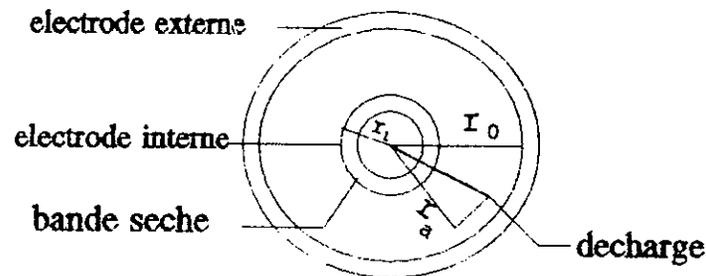


Fig. 2.7:Modèle du disque

II.3.1. Modèle théorique:

En courant alternatif, l'arc s'éteint deux fois par période, soit 100 fois par seconde chaque fois que le courant s'annule. Le réallumage de l'arc se fait par rupture énergétique ou rupture diélectrique [26].

La rupture énergétique se produit immédiatement après l'annulation du courant, quand l'espace où se maintient l'arc résiduel ne parvient plus à dissiper l'énergie injectée dans le plasma. Ce type de rupture s'accompagne d'une augmentation très rapide de la tension de rétablissement. Lorsque la valeur instantanée de cette dernière dépasse la rigidité électrique, la rupture électrique aura lieu. Donc nous pouvons dire qu'il existe deux modèles de réallumage:

- modèle par rupture énergétique [27] [28] [29].
- modèle par rupture diélectrique [30].

II.3.2. Modèles expérimentaux:

Hurley et Limbourn [31] ont fondé leur modèle sur une relation empirique (2.15) donnant la tension minimale nécessaire pour entretenir un arc électrique de longueur x dans un intervalle d'air entre deux tiges, en série avec une résistance R .

$$V_{cx} = C^{ce} X^{\frac{2}{3}} R^{\frac{1}{3}} \quad (2.15)$$

La tension critique de contournement d'une plaque isolante recouverte d'une couche polluante uniforme est liée à la longueur d'arc minimale L_a par la relation :

$$V_c = C^{ce} r^{\frac{1}{3}} L_a L^{\frac{1}{3}} \quad (2.16)$$

où r est la résistance moyenne de pollution par unité de longueur de ligne de fuite et L la longueur totale de la ligne de fuite.

Claverie et Porcheron [11] ont utilisé aussi un modèle plan recouvert d'une couche continue de pollution (fig.2.8).

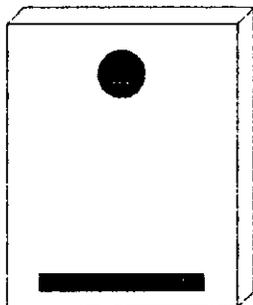


Fig. 2.8:Modèle plan

Dans leurs modèle, ces hauteurs prennent un arc de longueur x en série avec une résistance $R(x)$. L'écriture de la loi d'Ohm donne

$$V = \frac{100X}{\sqrt{I}} + R(x) i \quad (2.17)$$

En plus de cette équation, ils associent le critère de réamorçage d'arc donné par:

La tension de contournement s'obtient en supposant que ces

$$V_{cx} = \frac{800X}{\sqrt{I}} \quad (2.18)$$

deux courbes sont tangentes, ce qui se ramène à chercher la valeur de x_c telle que :

$$\frac{d(x^2R(x))}{dx} = 0 \quad (2.19)$$

La valeur x_c qui vérifie cette équation représente la longueur d'arc critique. C'est la plus grande longueur d'arc observable en régime permanent. A partir de cette longueur critique, on a la valeur V_c et le courant I_c de contournement qui sont données par les relations :

$$V_c = 90 (X_c^2 R(X_c))^{1/3} \quad (2.20)$$

et

$$I_c = \left(\frac{700X_c}{R(X_c)} \right)^{2/3} \quad (2.21)$$

II.3.3 CONCLUSION:

Les modèles présentés dans cette étude s'avèrent insuffisants lors du passage à l'application pratique. Toutefois ils permettent de donner une vue quantitative sur le comportement des isolateurs sous pollution.

La différence rencontrée très souvent entre les résultats calculés à partir des équations mathématiques correspondant à ces modèles et ceux obtenus expérimentalement proviennent sans doute de la négligence de plusieurs facteurs dans la modélisation des isolateurs pollués.

Une modélisation rigoureuse nécessite d'une part, la prise en considération de ces facteurs, et d'autre part, une bonne compréhension du phénomène physique entourant le processus de propagation de l'arc électrique sur la surface d'un isolateur pollué.

CHAPITRE III

**ETUDE PAR SIMULATION NUMERIQUE
BASEE SUR LE MODELE
DE
GUAN ZHICHENG ET ZHANG RENYU**

CHAPITRE III
ETUDE PAR SIMULATION
NUMERIQUE BASEE SUR LE MODELE
DE
GUAN ZHICHENG & ZHANG RENYU

III-1-INTRODUCTION:

Les modèles présentés dans le chapitre précédent ne prennent pas en considération plusieurs paramètres ayant une grande importance.

En réalité les isolateurs ont une forme géométrique assez complexe, et ne peuvent être converties en un modèle rectangulaire, car ce dernier ne prend pas en considération l'effet de la géométrie complexe, aussi que celle de l'état statique de l'arc dans le calcul de la tension de contournement.

Ainsi et afin de faire des estimations préliminaires des contraintes critiques, il faut déterminer avec exactitude les caractéristiques V-I de l'arc sous tension continue et alternative.

En vue de faire une étude quantitative, nous avons fait une étude par simulation numérique basée sur le modèle physico-mathématique de Guan Zhicheng [32].

III.2.FORMULATION MATHEMATIQUE DU MODELE :

III.2.1. Présentation du modèle:

Le modèle plan considéré dans cette étude est constitué d'une surface isolante plane polluée et partiellement contournée (Fig.3.1).

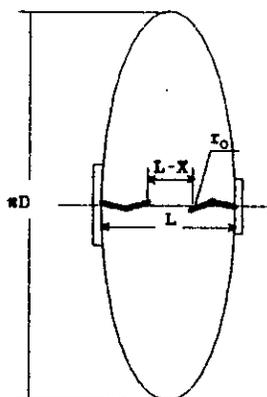


Fig (3.1) :Modèle plan considéré dans l'étude.

La surface de l'isolateur réel doit être égale à la surface du modèle.

où L est la longueur de la ligne de fuite.

πD la circonférence.

x la longueur d'arc.

Il faut cependant noter que l'arc électrique est assimilé à une électrode circulaire de rayon r_0 .

III.2.2. Equation du circuit:

L'équation du circuit est la même que celle présentée au paravant.

$$V = V_{arc} + R(x) i \quad (3.1)$$

III.2.3. Paramètres de l'arc et conductivité surfacique effective:

Le processus de contournement peut être décrit par un modèle qui consiste en un arc local en série avec la résistance de la couche polluante. En vue d'une analyse quantitative du contournement, la caractéristique de l'arc local et la conductivité surfacique doivent être décrites correctement. Cependant la caractéristique statique a été mesurée expérimentalement avec exactitude [32].

$$V_{\text{arc}} = \begin{cases} 138XI^{-0.69} & \text{en DC} \\ 140XI^{-0.67} & \text{en AC} \end{cases} \quad (3.2)$$

Où U_{arc} est la tension d'arc [V], I le courant d'arc [A] et X la longueur de l'arc [cm].

Il faut aussi bien noter que la conductivité surfacique change par effets thermiques lorsque l'arc électrique évolue. Ce qui est important à considérer dans les calculs c'est la conductivité surfacique au moment critique, qui est dite aussi conductivité surfacique effective δ_e est donnée par Guan Zhicheng [33]:

$$\delta_e = 1.25\delta \quad (3.3)$$

où δ_e est la conductivité au moment critique .

δ la conductivité surfacique mesurée avec la méthode ordinaire avant les essais.

III.2.4. Résistance de la couche de pollution:

En assimilant les racines de l'arc à deux électrodes circulaires de rayon r_0 , ils calculent la résistance de la couche de pollution:

R. Wilkins [35] à obtenu la relation entre r_0 et I:

$$R(x) = \frac{1}{\pi \delta_c} \ln \frac{L-X}{\delta_0} \quad (3.4)$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{I}{1.45 \pi}} \quad (3.5)$$

III.2.5. Equations mathématiques du modèle:

L'équation usuelle est donnée par:

$$V = AXI^{-n} + R(x) I \quad (3.6)$$

Si on suppose que la longueur d'arc est constante, en prenant $dV/dI=0$, nous obtenons la tension minimale nécessaire pour maintenir un arc de longueur x , ainsi que le courant circulant. Nous aboutissons ainsi théoriquement aux deux caractéristiques $I=F(x)$ et $V=F(x)$ qui sont relativement importantes.

$$(3.6) \rightarrow I_m = \left(\frac{nAX}{R(x)} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (3.7)$$

Le remplacement de cette dernière équation dans l'équation (3.6) donne:

$$V_m = \left(1 + \frac{1}{n}\right) (nAX)^{\frac{1}{1+n}} R(x)^{\frac{n}{n+1}} \quad (3.8)$$

En prenant:

$$\frac{dV_m}{dx} = 0 \quad (3.9)$$

On obtient l'expression:

$$R(x) = -nX \frac{dR(x)}{dx} \quad (3.10)$$

La résolution numérique de l'équation (3.10) donne la valeur de X_c , longueur d'arc critique. En substituant dans les formules précédentes on obtient directement le courant et la tension critiques qui sont données par les expressions suivantes:

$$I_c = \left(\frac{nAX_c}{R(x_c)} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (3.11)$$

et

$$V_c = \left(1 + \frac{1}{n}\right) (nX_c A)^{\frac{1}{1+n}} R(X_c)^{\frac{n}{n+1}} \quad (3.12)$$

En alternatif, il faut prendre en considération la condition de rétablissement de l'arc électrique après le passage du courant par zéro. La condition de rétablissement est plus importante que la condition de reallumage.

En utilisant la condition de rétablissement:

$$V = 531 \frac{L}{I} \quad (3.13)$$

et en exploitant le résultat de l'équation (III.10) avec $n=0.67$, on aura:

$$AX_c I_c^{-n} + R(X_c) I_c = 531 \frac{L}{I_c} \quad (3.14)$$

A partir de la résolution de cette équation pour l'obtention de I_c , nous arrivons à:

$$V_c = 1050 \frac{X_c}{I_c} \quad (3.15)$$

Les équations précédentes ont été transformée en équations différentielles ce qui permet une résolution compatible avec le

logiciel SIMNON. les paramètres pris en compte sont les memes que ceux de l'étude expérimentale ($l=13$ cm) .L'introduction des conditions aux limites(pour un courant nul la longueur de l'arc est nulle), nous permet l'obtention des resultats.

A partir de ces équations nous obtenons les caractéristiques $U=F(x)$ et $I=F(x)$ pour différentes conductivités surfaciques, ainsi que la tension de contournement et le courant critique en fonction de la conductivité.

III.3. INTERPRETATION DES RESULTATS:

Pour ce qui concerne la tension d'entretien d'un arc de longueur x nous constatons qu'elle augmente si la conductivité diminue. Pour une conductivité donnée la caractéristique $U(x)$ à une forme logarithmique, et cela pour le modèle tension continue et tension alternative fig(3.2), fig(3.7).

L'allure de ces courbes et en parfaite concordance avec les résultats expérimentaux antérieures [34].

Pour le courant de fuite qui est nécessaire pour entretenir un arc électrique de longueur X , nous pouvons dire qu'il diminue si la conductivité diminue ce qui est logique, par contre pour une même conductivité la caractéristique $I(x)$ est croissante fig(3.3), fig(3.4), fig(3.8), fig(3.9) ce qui indique que plus la longueur de l'arc augmente plus le courant de fuite est important. L'allure ressemble beaucoup à celle obtenue par les études expérimentales antérieures effectuées au niveau du laboratoire [34].

Nous avons obtenus la caractéristique la plus importante, tension de contournement en fonction de la conductivité. Nous pouvons dire que pour une longueur de fuite donnée, la tension de contournement diminue si la conductivité augmente. Ainsi nous pouvons voir aux figures 3.13 et 3.14 que la tension de

contournement augmente avec la longueur de la ligne de fuite. Ces courbes nous donnent une idée quantitative sur la tension de contournement à l'état propre sans couche de pollution.

Aussi nous déterminons les deux modèles les caractéristiques tension-courant leur allure est logarithmique. Pour une tension donnée si la conductivité augmente le courant de fuite augmente fig(3.5), fig(3.6), fig(3.10), fig(3.11).

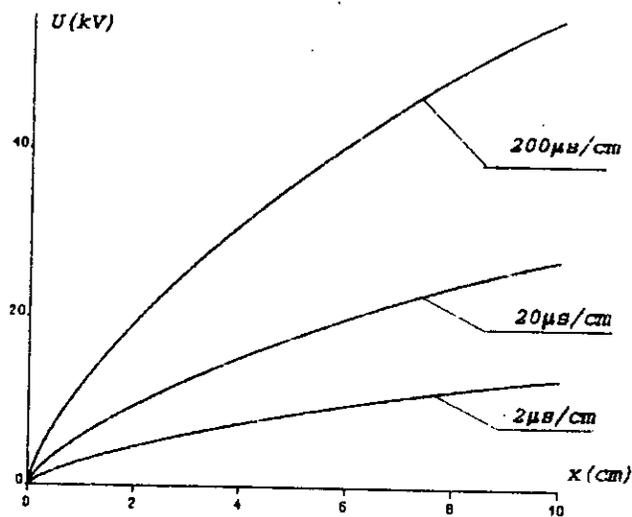


Fig 3.2. Tension d'entretien d'un arc de longueur x en continue

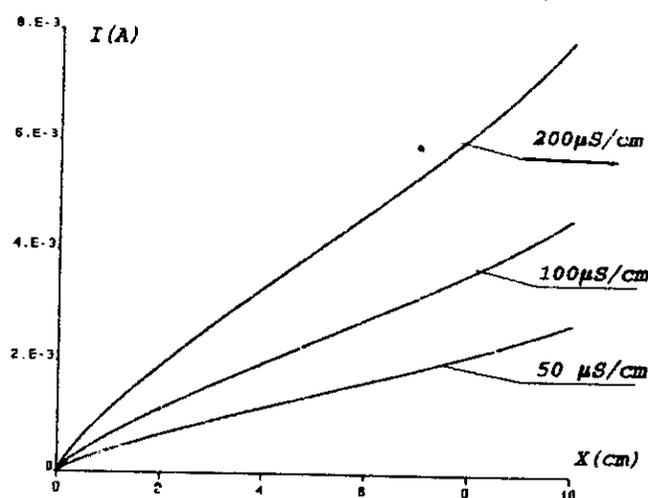


Fig.3.3. Courant nécessaire pour maintenir un arc de longueur x en continue

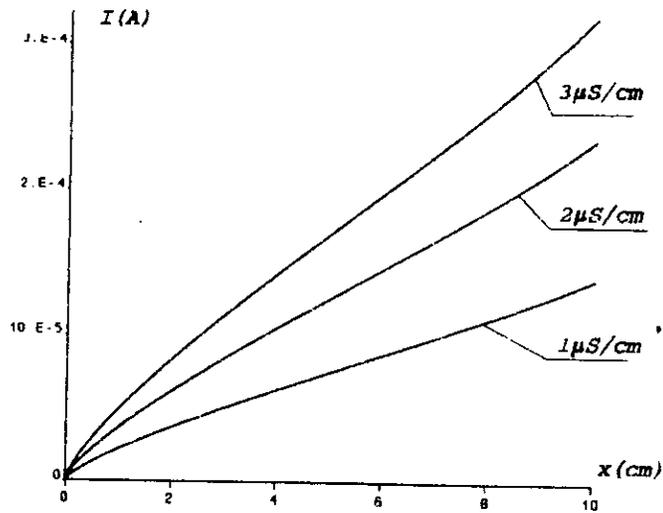


Fig.3.4.courant nécessaire pour maintenir un arc de longueur x pour des faibles conductivités

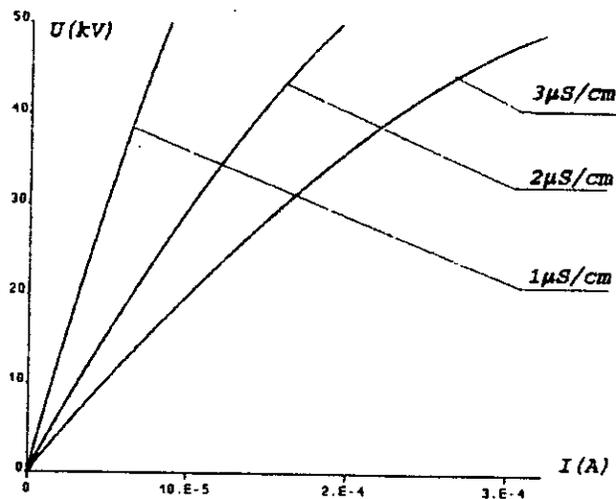


Fig.3.5.Caractéristique tension-courant de fuite

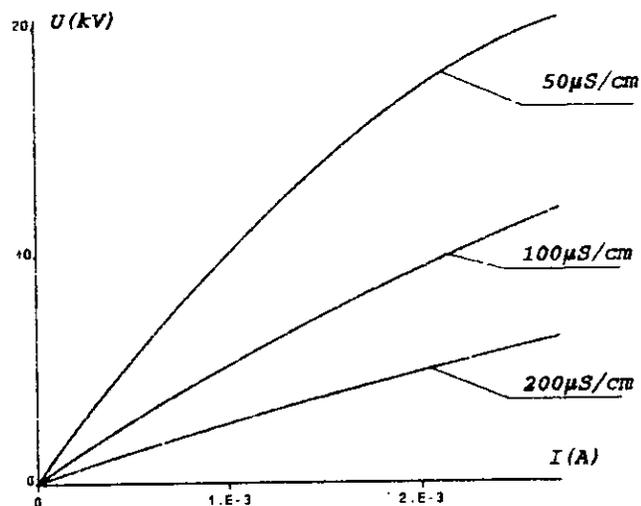


Fig.3.6. Caractéristique tension -courant de fuite pour de fortes valeurs de la conductivité

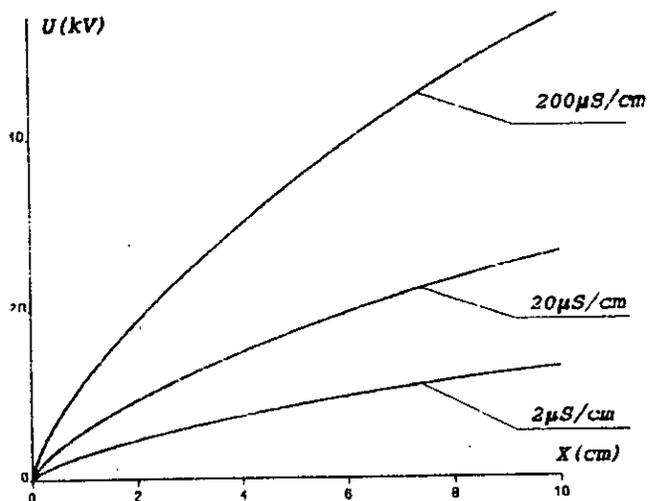


Fig.3.7. Tension nécessaire pour maintenir un arc de longueur x en alternatif

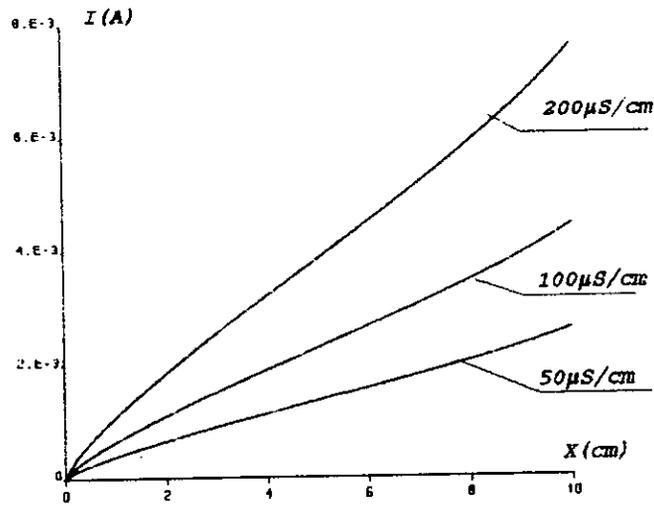


Fig.3.8.Courant nécessaire pour maintenir un arc de longueur x en alternatif

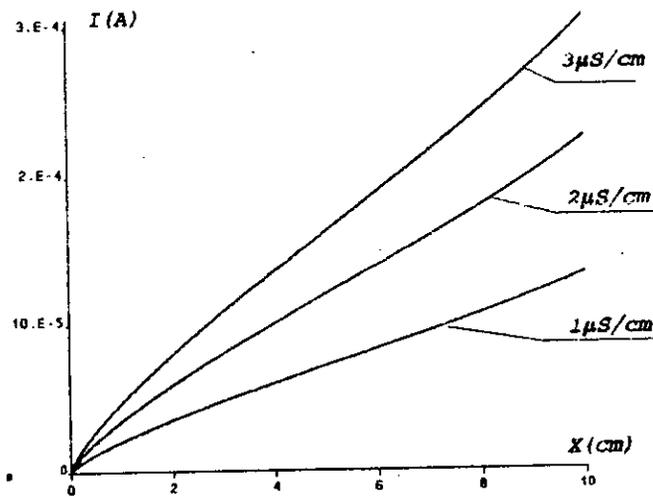


Fig.3.9.Courant nécessaire pour maintenir un arc de longueur x

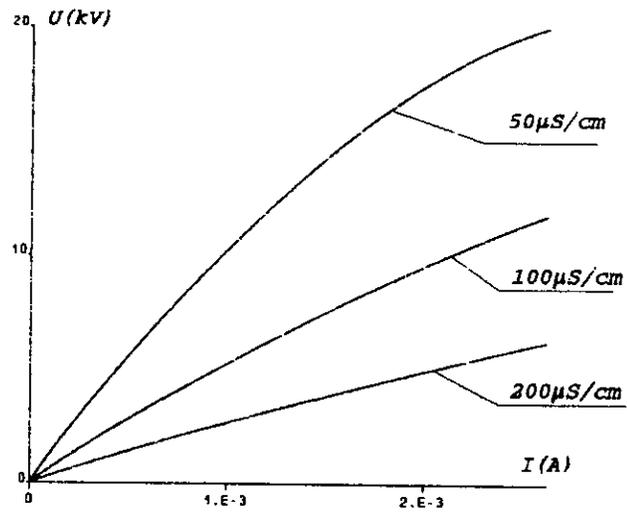


Fig.3.10. Caractéristique tension-courant pour de faibles conductivités

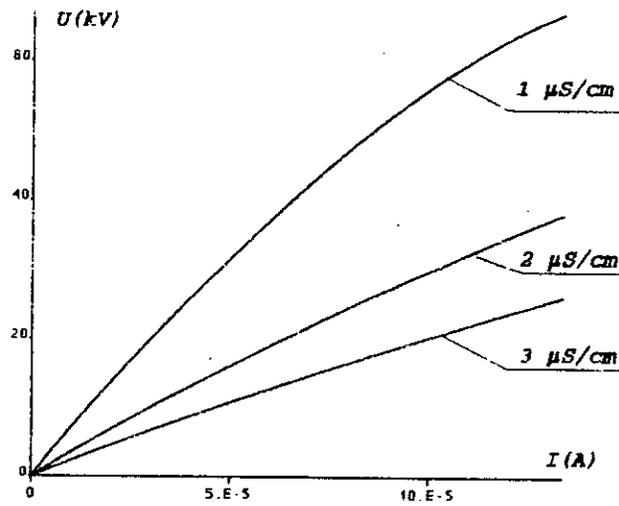


Fig.3.11. Caractéristique tension-courant de fuite pour de faibles conductivités

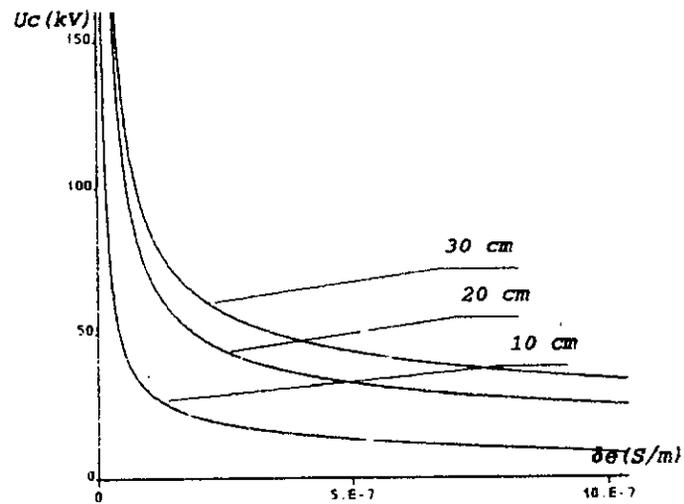


Fig.3.13. Tension de contournement en fonction de la conductivité en continue

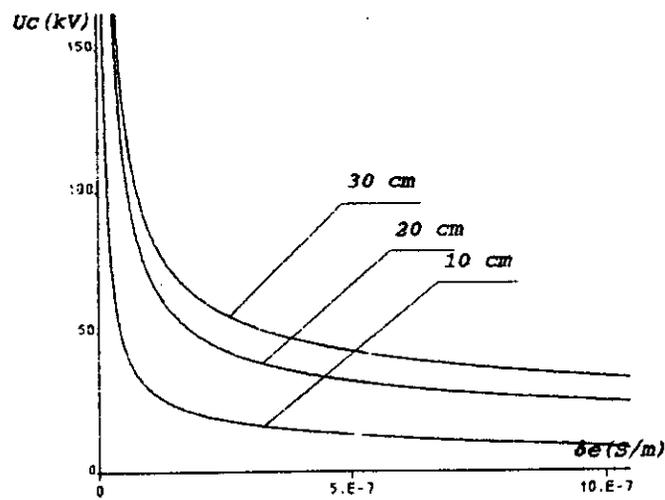


Fig.3.13. Tension de contournement en fonction de la conductivité en alternatif

III.4. CONCLUSION:

Nous pouvons dire que l'étude par simulation numérique nous fournit sans doute une idée quantitative sur les contraintes critiques sous pollution, ainsi par exemple nous constatons l'augmentation de la ligne de fuite augmente la rigidité de l'isolateur. L'allure des courbes est en parfaite concordance avec les résultats expérimentaux ce qui démontre la validité du modèle de Guan Zhicheng et Zhang Renyu .

CHAPITRE IV

ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE IV ETUDE EXPERIMENTALE

VI-1-INTRODUCTION:

Dans ce chapitre nous allons exposer les résultats de l'étude expérimentale que nous avons effectuée en utilisant le modèle de CALAVERIE et PORCHERON [11]. Dès le début notre but été de voir l'influence du mode de disposition de la couche de pollution sur les différentes caractéristiques. Nous avons considéré trois façons différentes d'appliquer la couche de pollution:-

1-Couche de pollution continue

2-Couche de pollution discontinue recouvrant seulement une partie de la plaque et ayant une frontière commune avec l'une des électrodes.

3-Couche de pollution discontinue n'ayant aucune frontière commune avec les électrodes

VI-2-CIRCUIT D'ESSAI:

Le circuit d'essai considéré comprend:-

- 1-Interrupteur d'alimentation générale.
- 2-Pupitre de commande.
- 3-Transformateur d'isolement.
- 4-Transformateur de réglage 220/500 V (50 kVA).
- 5-Transformateur d'essai 500/300 kV (50kVA).
- 6-Diviseur de tension capacitif.
- 7-Objet d'essai.
- 8-Pupitre de commande.

VI-2-1-CIRCUIT DE MESURE:

Afin de mesurer le courant de fuite, une résistance de 100 Ω a été insérée dans le retour vers la terre fig(3-1). Le courant est relevé au bornes de la résistance à l'aide d'un oscilloscope. Afin d'éviter l'influence du champ électrique qui pourrait introduire des parasites dans le signal recueilli, la résistance a été introduite dans une boîte métallique mise à la terre.

-La mesure de la tension appliquée se fait à l'aide d'un diviseur capacitif avec voltmètre de crête fig(4-1).

-Afin de mesurer la longueur de l'arc électrique nous avons utilisé un appareil photographique(photographie statique). Pour cela nous avons aussi utilisé une chambre noire dont dispose le laboratoire.

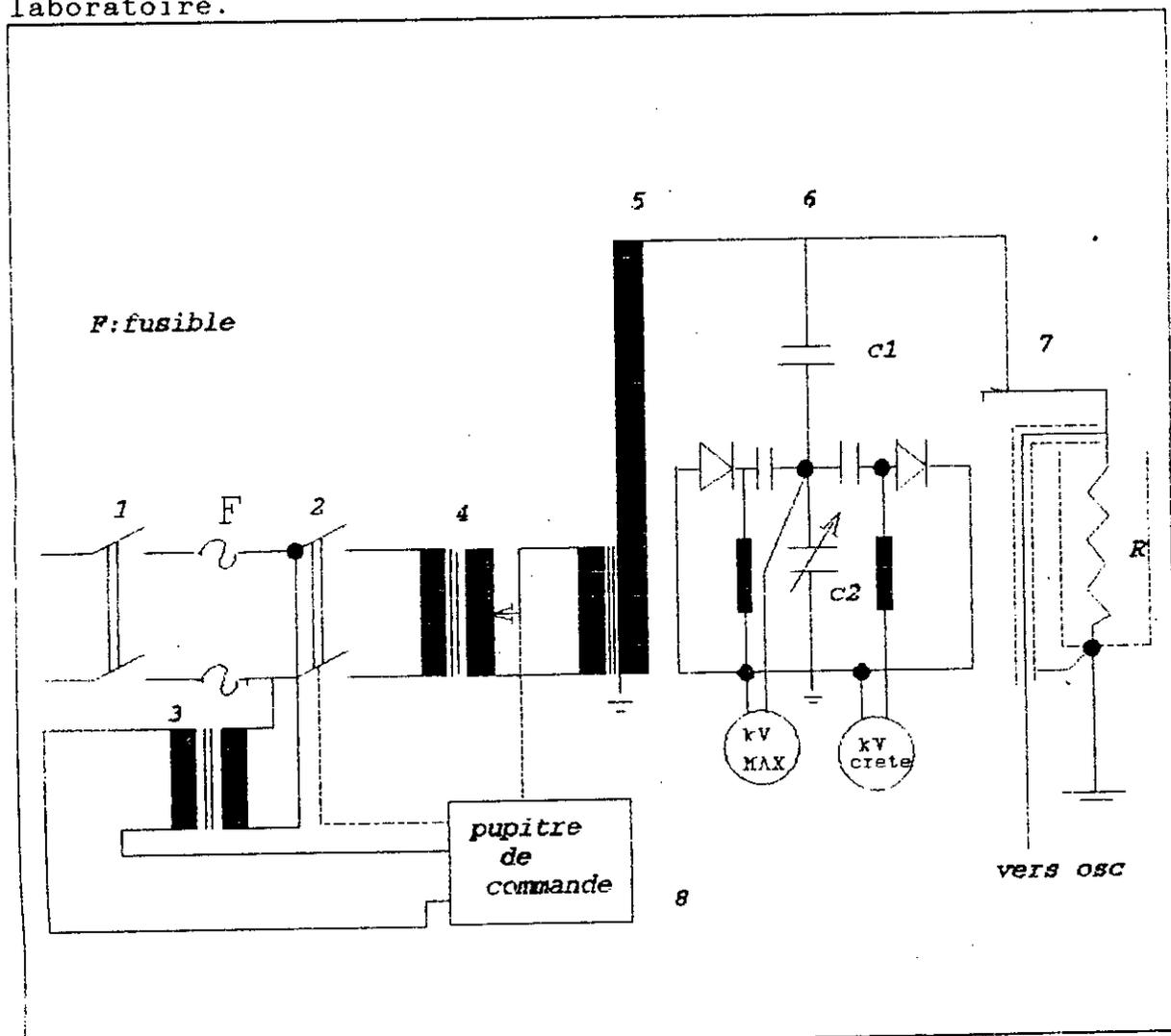


FIG.4.1.Schéma du circuit d'essai.

VI-3-MODE OPERATOIRE:

VI-3-1-DISPOSITIF EXPERIMENTAL:

Le dispositif expérimental que nous avons considéré est semblable à celui de CLAVERIE ET PORCHERON [11], il est constitué d'une plaque rectangulaire isolante en EPDM de faible épaisseur ayant la propriété de résister aux hautes températures qui peuvent être engendrées par le contournement, évitant ainsi une éventuelle explosion ou fissuration (cas du verre). Cette plaque a été munie de deux électrodes planes de très faibles épaisseurs, une circulaire mise à la haute tension l'autre plane mise à la terre fig(4-2).

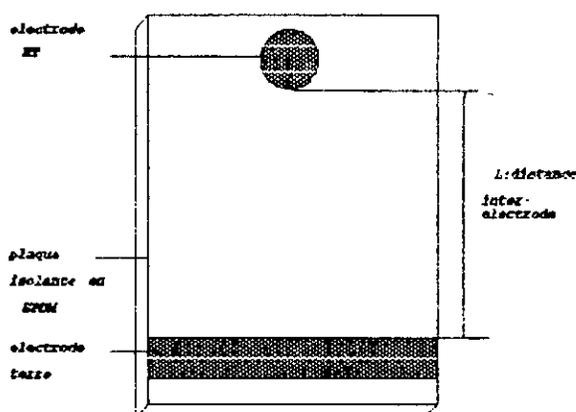


Fig.4.2. Modèle plan considéré

VI-3-2-REALISATION DU MODELE:

La plaque isolante doit être initialement bien lavée, puis imbibée d'une façon uniforme en (gas-oil) dans les endroits d'emplacement des électrodes, qui sont en papier aluminium. Cette opération doit être faite de manière à ce qu'aucun espace d'air ne reste entre la plaque et les électrodes. Par la suite on essuie la plaque avec du coton imbibé d'alcool pour éliminer toutes les traces de gas-oil sur la surface isolante. Le modèle est disposé horizontalement sur un support en bois, placé à une hauteur d'un mètre environ au dessus du sol.

VI-3-3-APPLICATION DE LA COUCHE DE POLLUTION ET DE LA TENSION:

a-APPLICATION DE LA COUCHE DE POLLUTION:

Nous avons envisagé dans notre étude, trois façons différentes d'appliquer la couche de pollution sur la surface de la plaque isolante.

1-Couche de pollution discontinue ayant une seule frontière commune avec une des électrodes (fig(4-3-a)).

2-Couche de pollution discontinue: la couche polluante est intermédiaire et ne possède aucune frontière commune avec les électrodes (fig(4-3-b)).

3-Couche de pollution continue: Dans ce cas toute la surface de la plaque isolante est contaminée d'une couche de pollution (fig(4-3-c)).

- Afin de simuler la couche de pollution nous avons utilisé une solution électrolytique saline de conductivité donnée.

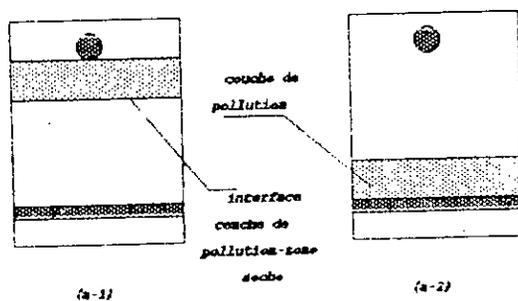


Fig.4.3.a.Couche de pollution ayant une seule frontière avec une des électrodes

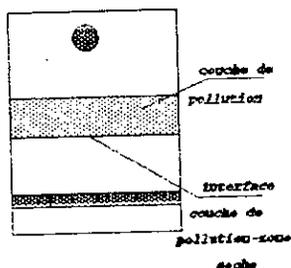


Fig.4.3.b.Couche de pollution intermédiaire

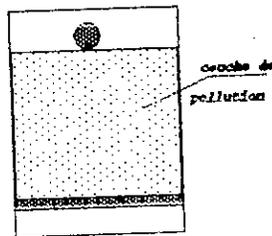


Fig.4.3.c.Couche de pollution continue

b-APPLICATION DE LA TENSION:

Nous avons appliqué une tension par paliers de valeur maximale constante pendant une durée suffisante pour la maintien d'une longueur d'arc permanente (régime stable). Nous avons considéré cinq paliers différents (9-12-15-18-21 kV). Pour chaque palier nous relevons la valeur du courant de fuite, et la longueur de l'arc électrique, permettant d'obtenir les différentes caractéristiques $V(X)$, $V(I)$. Cette méthode nous donne ainsi les caractéristiques les plus utilisées dans les modèles présentés dans les chapitres précédents.

VI-4-INTERPRETATIONS:

Nous avons considéré une longueur de la ligne de fuite égale à 13 cm, la conductivité étant égale à $12 \mu\text{S}/\text{cm}$. Nous changeons uniquement la largeur de la couche de pollution.

VI-4-1-CARACTERISTIQUES TENSION-COURANT $V(I)$:

D'une manière générale l'augmentation du niveau de tension engendre l'augmentation du courant de fuite et l'allongement de l'arc électrique.

-Pour un niveau de tension donné, l'élargissement de la couche de pollution engendre l'augmentation du courant de fuite surtout quand cette dernière est disposée du côté haute tension (fig(4-3-a-1)), par contre quand elle est du côté terre (fig(4-3-a-2)), nous avons remarqué que pour une tension donnée l'élargissement de la couche polluante engendre une diminution du courant de fuite.

-Pour une largeur de la couche polluante supérieure à 8cm

disposée de deux côtés différents (haute tension-terre), nous constatons que le courant de fuite est plus fort quand elle est disposée du côté de la haute tension. Par contre quand la largeur de la couche est inférieure à 8cm, la variation du courant est aléatoire.

- Si la couche de pollution est intermédiaire (fig(4-3-b)), le courant de fuite est plus faible que dans les deux cas précédents pour une même largeur de la couche de pollution.

VI-4-2-CARACTERISTIQUE COURANT-LONGUEUR D'ARC:

-L'augmentation du courant de fuite est accompagné de l'allongement de l'arc électrique.

-pour une longueur de la couche de pollution donnée et pour un même courant de fuite, la longueur de l'arc est plus importante lorsque la couche de pollution est du côté terre (fig(4-3-a-2)).

VI-4-3- CARACTERISTIQUE TENSION-LONGUEUR D'ARC:

L'augmentation du niveau de tension engendre l'allongement de l'arc électrique. Toutefois les caractéristiques $V(X)$ ont une allure logarithmique.

-Pour une tension donnée, nous constatons que l'élargissement de la couche de pollution engendre une diminution de la longueur de l'arc.

-Pour un même niveau de tension, et une même largeur de la couche de pollution, mais disposée de deux côtés différents (côté haute tension-côté terre), nous avons remarqué que l'arc électrique est plus important quand la couche polluante est du côté terre.

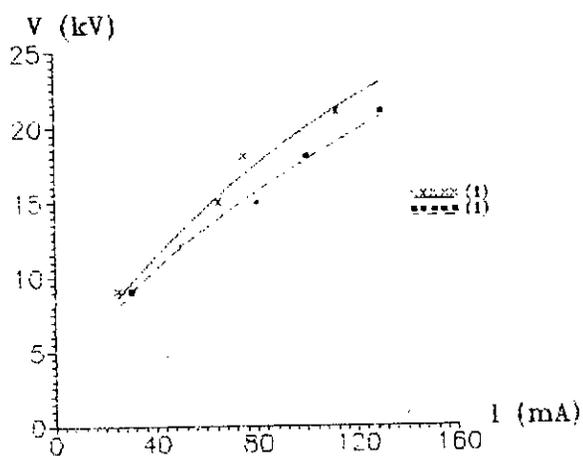
-Pour une tension donnée, nous constatons que l'élargissement de la couche de pollution diminue la longueur de l'arc, mais cette diminution est plus importante lorsque la couche est du côté haute tension (fig(4-3-a-1)).

VI-4-4-TENSION DE CONTOURNEMENT:

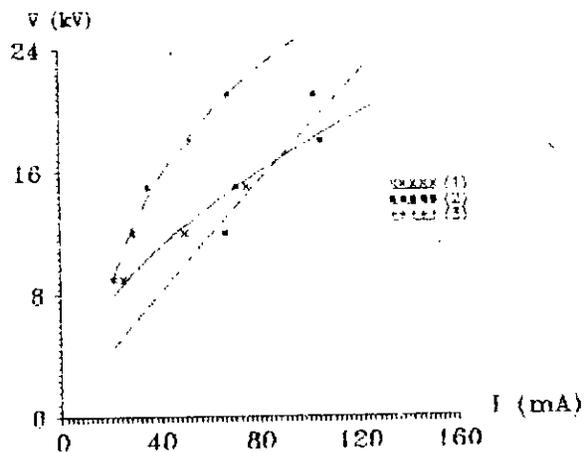
A partir des essais que nous avons effectué pour les tensions de contournement nous pouvons dire que:-

-L'augmentation de la largeur de la couche polluante engendre une diminution de la tension de contournement.

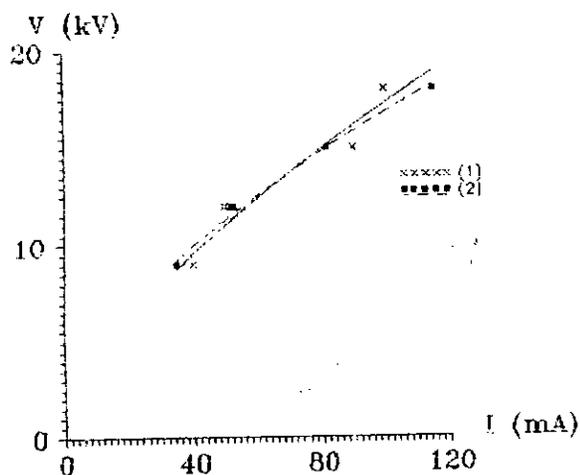
-Pour une même largeur L_x de la couche polluante la tension de contournement la plus faible correspond à une couche continue.



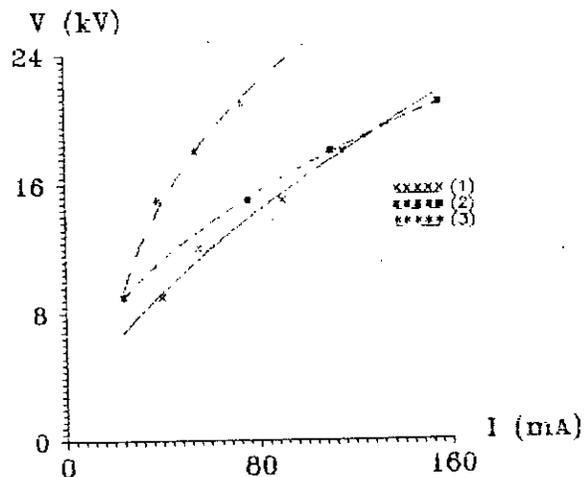
L=1 cm



L=2 cm



L=3 cm



L=4 cm

Fig. 4.4:Caracteristiques tension-courant de fuite pour différentes largeurs de la couche de pollution
 (1):Couche de pollution du coté H-T.
 (2):Couche de pollution du coté terre.
 (3):Couche de pollution intermédiaire.

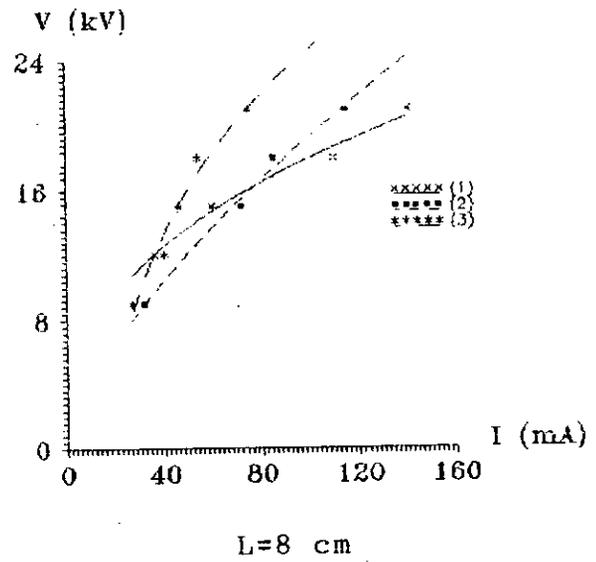
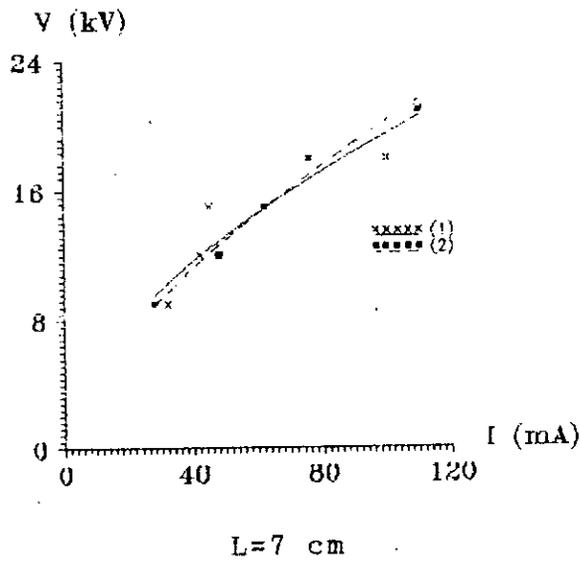
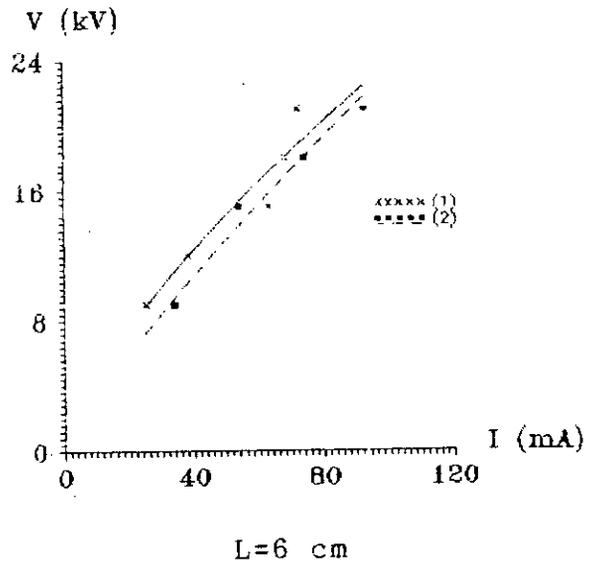
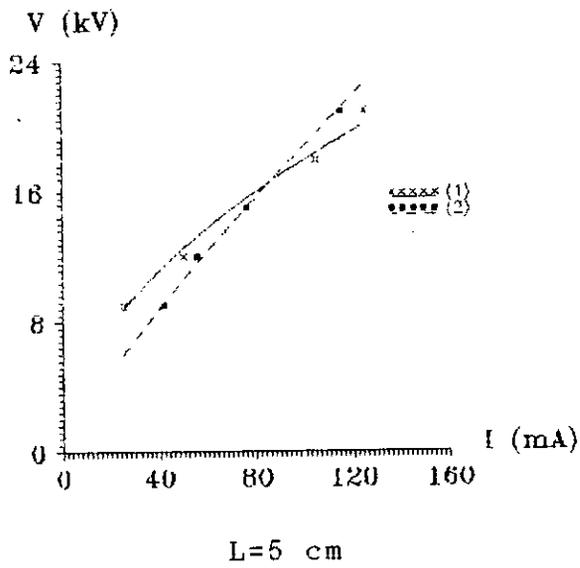
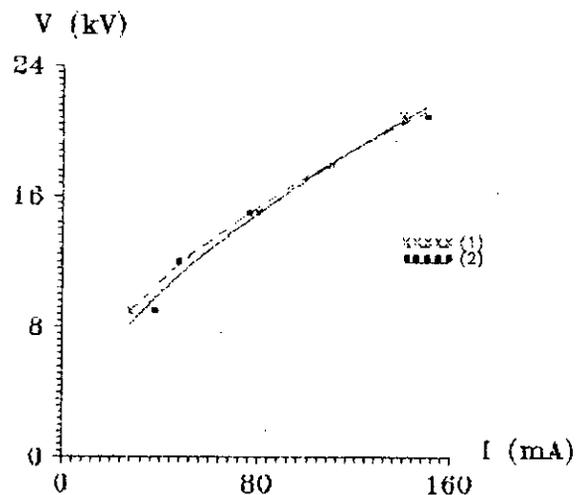
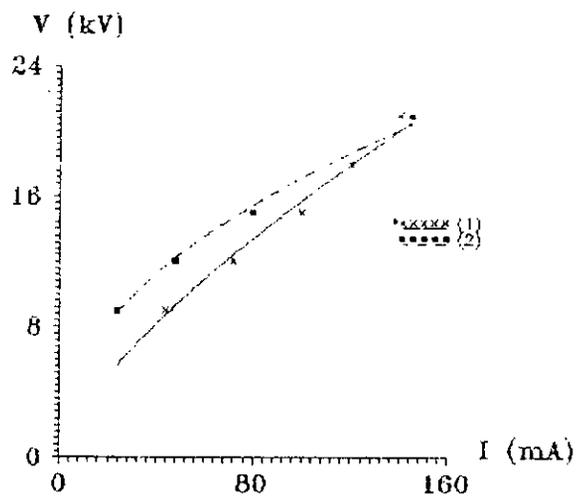


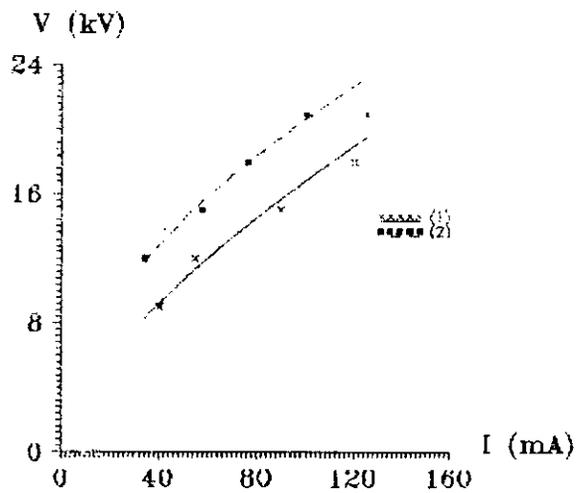
Fig. 4.4: Suite



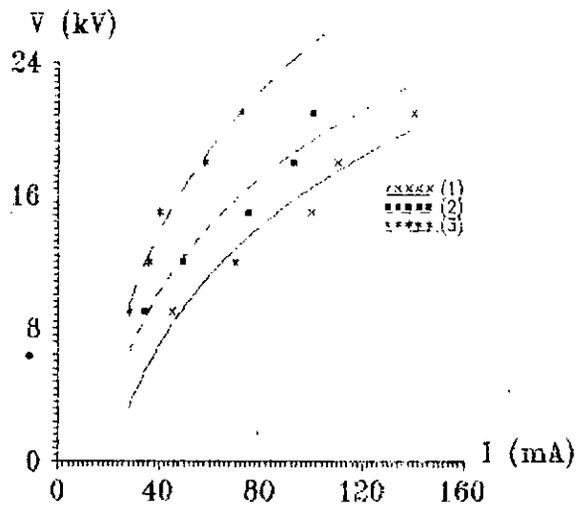
L=9 cm



L=10 cm



L=11 cm



L=12 cm

Fig. 4.4: Suite

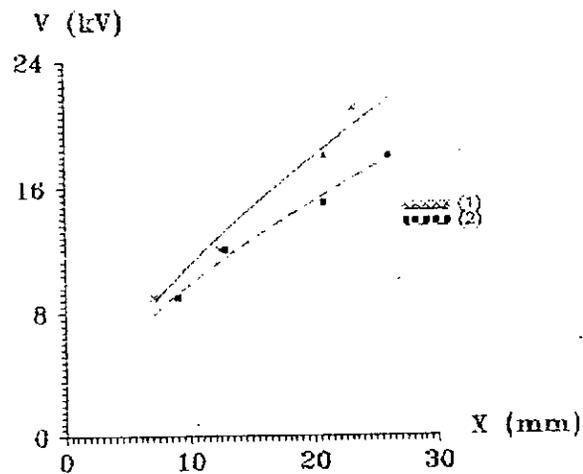
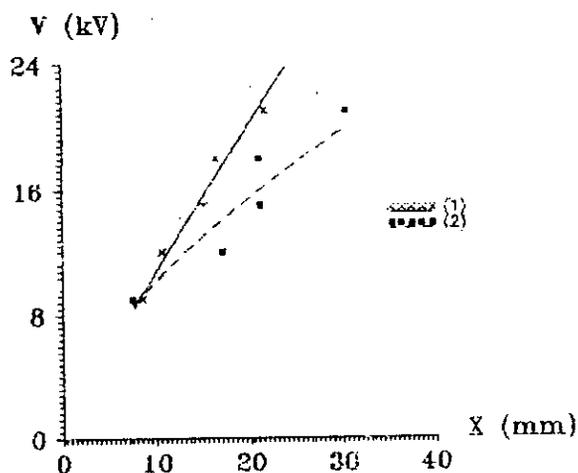
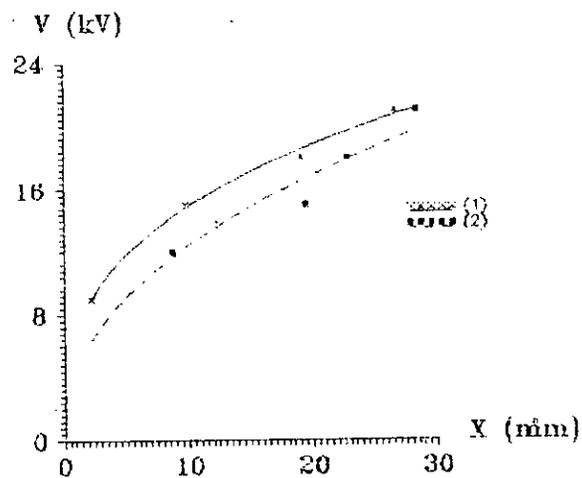
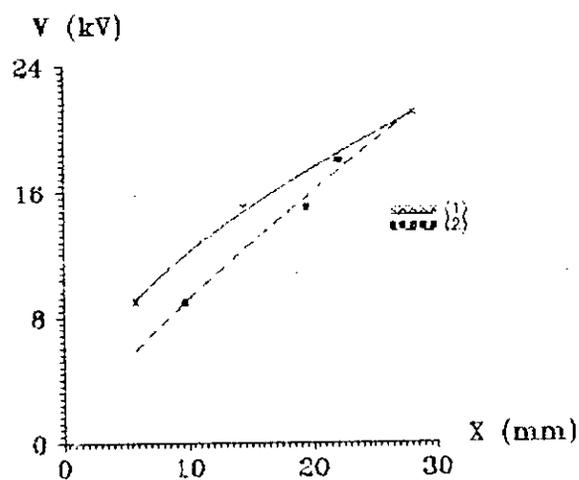
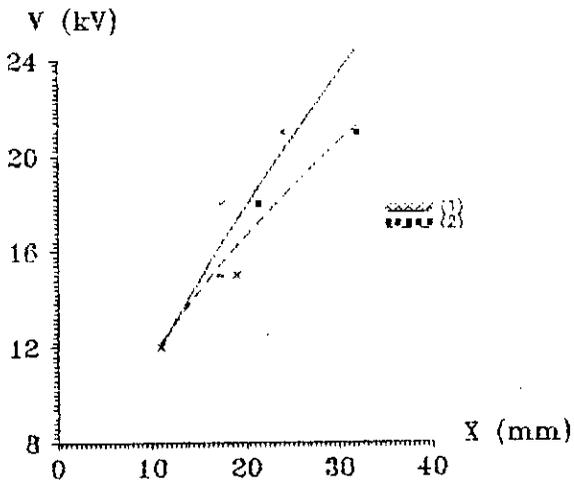
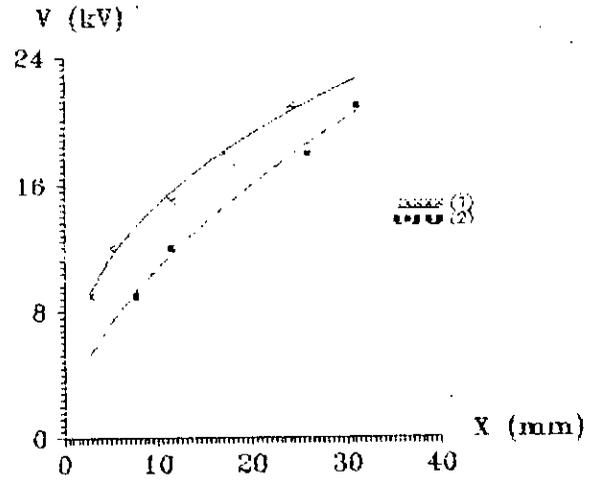


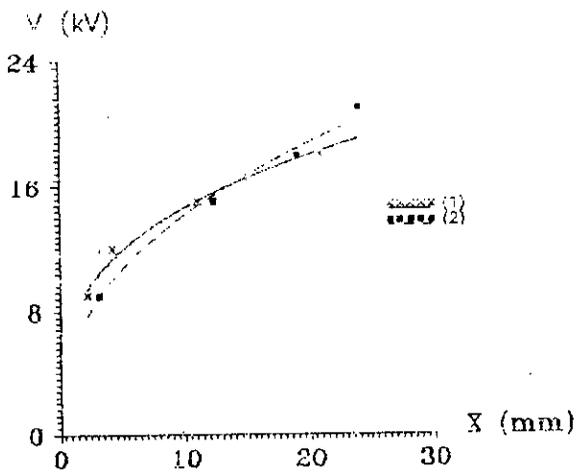
Fig. 4.5:Caracteristiques tension-longueur d'arc pour différentes largeurs de la couche de pollution.
 (1):Couche de pollution du coté H-T.
 (2):Couche de pollution du coté terre.



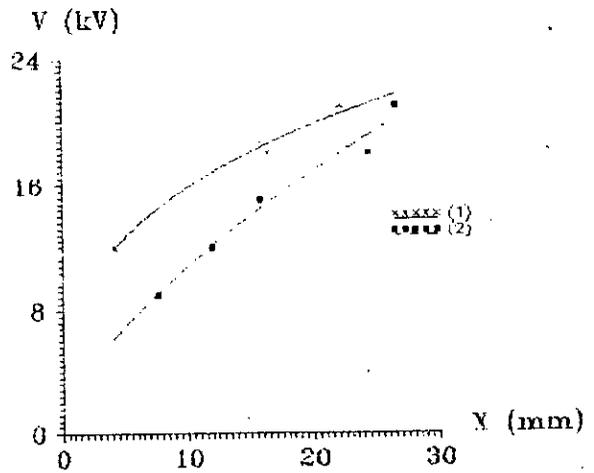
L=9 cm



L=10 cm

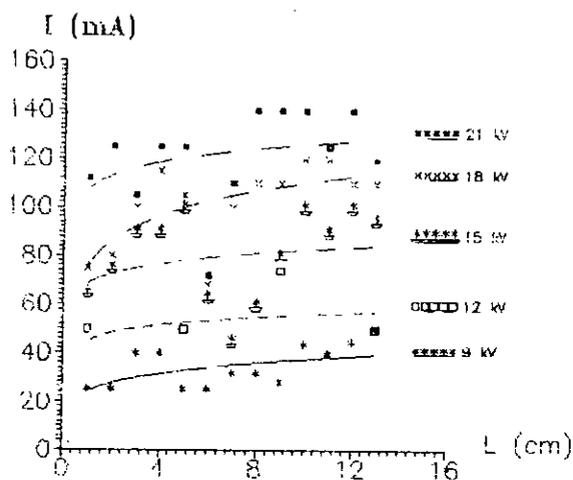


L=11 cm

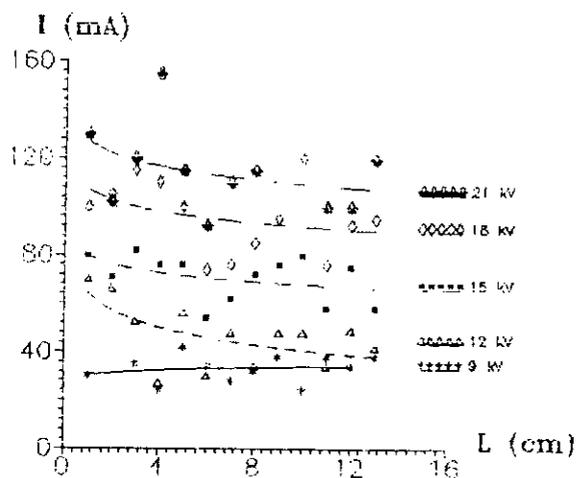


L=12 cm

Fig. 4.5: Suite

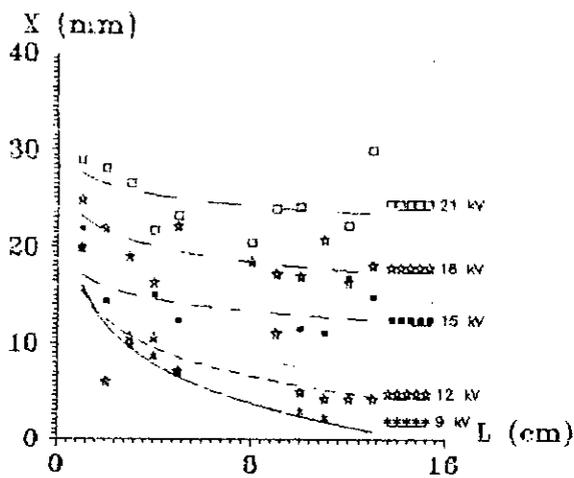


(a)

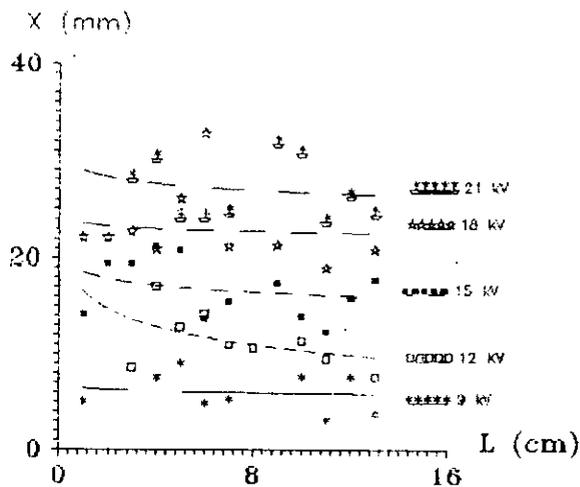


(b)

Fig. 5.6: Courant de fuite en fonction de la largeur de la couche de pollution.



(a)

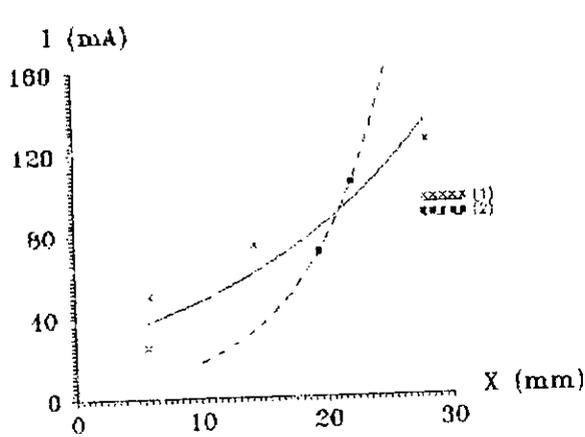


(b)

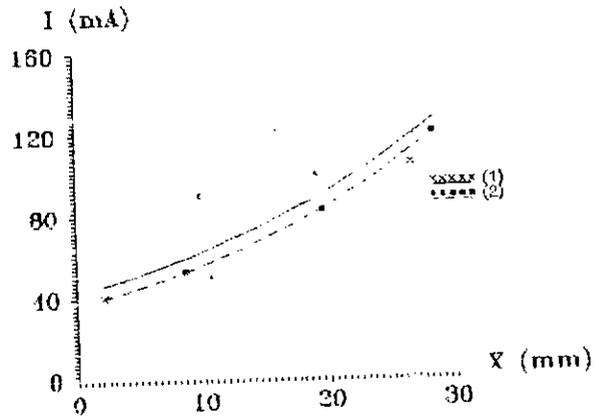
Fig. 4.7: Longueur d'arc en fonction de la largeur de la couche de pollution.

(a): couche de pollution du côté H-T.

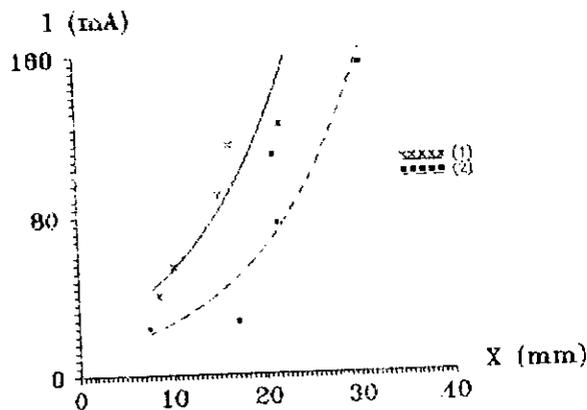
(b): couche de pollution du côté terre.



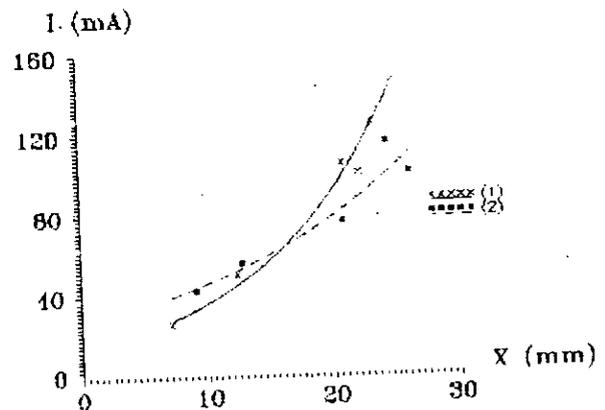
L=2 cm



L=3 cm

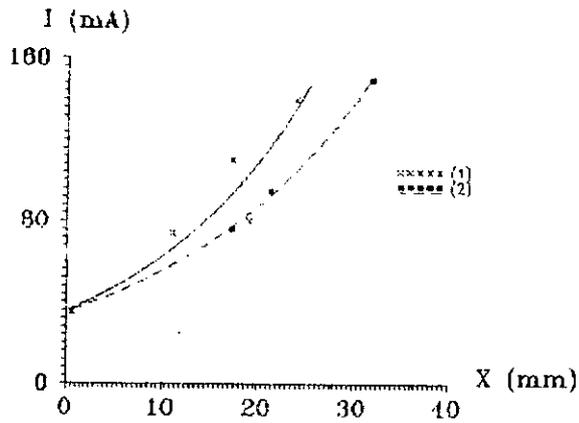


L=4 cm

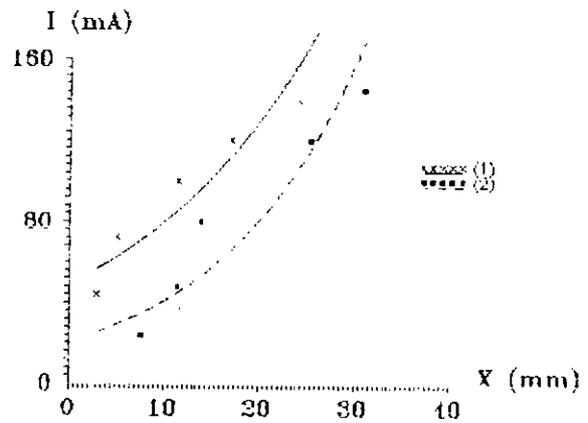


L=5 cm

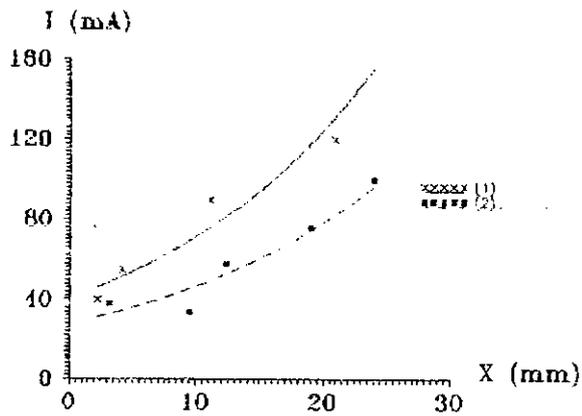
Fig.4.8: Caractéristique courant de fuite-longueur d'arc pour différentes largeurs de la couche de pollution.
 (1):couche de pollution du côté H-T.
 (2):Couche de pollution du côté terre.



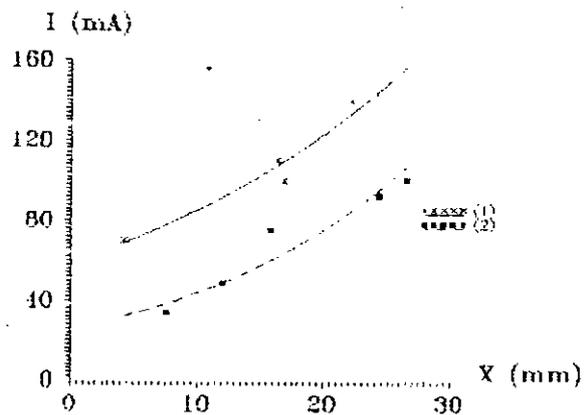
L=9 cm



L=10 cm



L=11 cm



L=12 cm

Fig.4.8: Suite

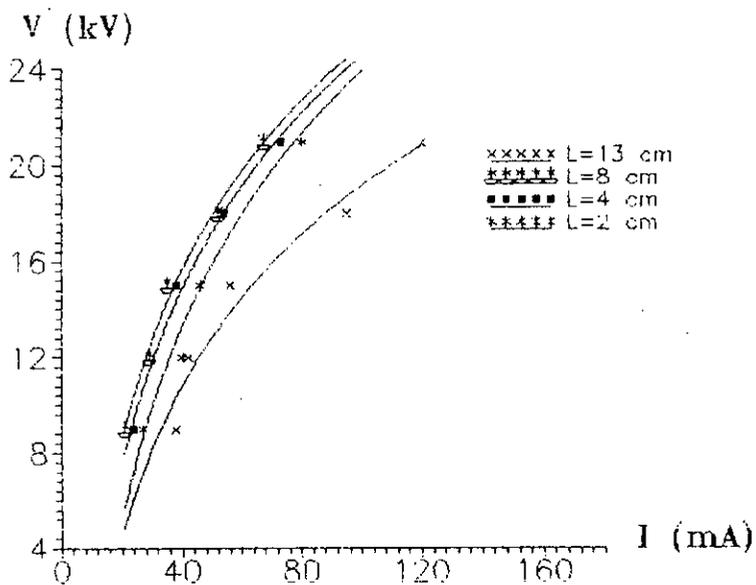


Fig.4.9:Tension en fonction du courant de fuite.
Couches intermédiaires.

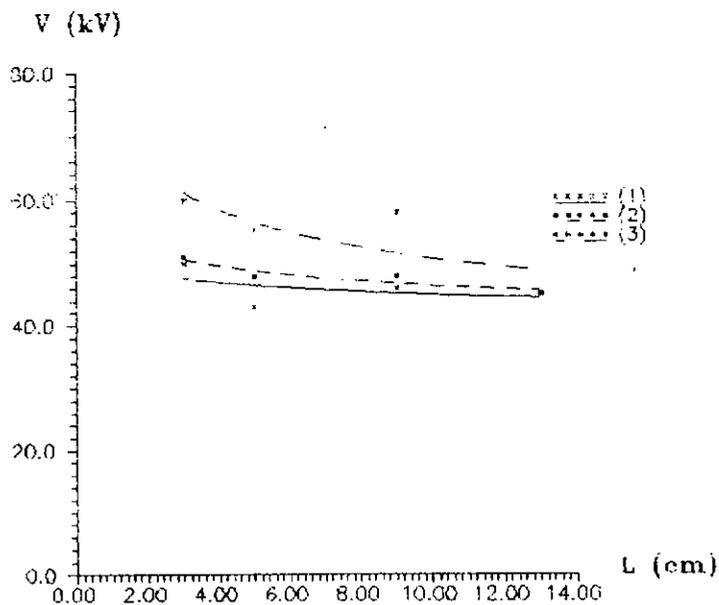


Fig. 4.10:Tension de contournement en fonction de la
largeur de la couche de pollution.
(1):Couche de pollution du coté H-T;
(2):Couche de pollution du coté terre.
(3):Couche de pollution intermédiaire.

VI-5-CONCLUSION:

A partir de cette étude expérimentale nous pouvons dire que:-

-L'arc électrique ne se développe pas au niveau des interfaces couche de pollution-zone sèche.

-Quand il y a discontinuité de la couche polluante l'arc électrique se propage dans l'air, par contre quand la couche est continue l'arc se propage le long de la zone polluée.

-L'arc électrique évolue à partir des deux électrodes ce fait a été déjà observé par plusieurs chercheurs [32].

-Au niveau de l'électrode circulaire l'arc électrique prend naissance de tous les côtés et évolué d'une manière radiale.

CHAPITRE V

APPLICATION DE LA METHODE DES
E.I.F
POUR
LA MODELISATION DES PHENOMENES
DE CONDUCTION SURFACIQUE SUR
UN MODELE PLAN D'ISOLATEUR POLLUE

APPLICATION DE LA METHODE DES
E.I.F
POUR
LA MODELISATION DES
PHENOMENES DE CONDUCTION
SURFACTIQUE SUR
UN MODELE PLAN D'ISOLATEUR
POLLUE

V-1-METHODE DES EQUATIONS INTEGRALES DE FRONTIERES:

V-1-1-INTRODUCTION:

La méthode des équations intégrales de frontières (é.i.f) est une technique de résolution des équations différentielles aux dérivées partielles utilisant le théorème de GREEN, elle est particulièrement efficace pour résoudre l'équation de LAPLACE associée à des conditions aux limites(CAL), dans un volume V limitée par une surface S.L'application de la méthode des é.i.f dans les sciences de l'ingénieur a été développée durant les années 60 et 70.

En 1963 M.A.JASWON a développé une technique de numérique pour le calcul des intégrales présentant une singularité. Elle a été appliquée pour résoudre les problèmes liés au potentiel en 2 dimension.

En 1979 J.DAFFE et R.G.OLSON ont utilisé la formulation axisymétrique de la méthode des é.i.f basée sur le théorème de GREEN pour résoudre l'équation de LAPLACE en électrostatique.

En 1984 S.KAGAMI et I.FUKAI ont appliqué la méthode des é.i.f au problème du guide d'ondes électromagnétiques discontinues.

V-1-2-PRINCIPE DE LA METHODE:

La méthode des é.i.f peut être formulée de plusieurs manières, toutefois et d'une façon générale nous pouvons dire que l'équation physique est transformée en une équation intégrale, en utilisant les techniques des éléments finis. Cette intégrale est discrétisée sur les frontières (contour 2D, surface 3D), les variables sur les frontières sont ensuite approchées par des fonctions d'interpolation. Notre présentation a été pensée pour la résolution des problèmes du potentiel en électrostatique, ainsi que ceux de conduction surfacique. C'est pour cela que nous allons présenter deux formulations une dite globale, et l'autre basée sur l'identité de GREEN [1].

V-2-FORMULATION INTEGRALE GLOBALE:

Le potentiel d'un dipôle électrique est donné par:

$$V = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \vec{P} \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) \quad (5.1)$$

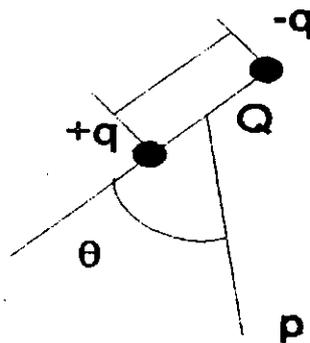


Fig 5.1. Dipôle électrique

La polarisation des diélectriques est équivalente à une distribution surfacique de dipôles qui influent globalement sur tous l'espace. Ainsi le potentiel en un point P de l'espace est donné par:

Avec $\phi(V)$ potentiel dû à la polarisation.

$$V(P) = V_o(P) + \phi(V) \quad (5.2)$$

$$\phi(V) = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \int_v \vec{P} \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dv \quad (5.3)$$

ou $V_o(P)$ est le potentiel induit par une source extérieure en absence du diélectrique, Un conducteur ne peut être introduit que par le terme V_o :

$$V_o(P) = \int_{s_{con}} G \sigma_s ds \quad (5.4)$$

où σ_s représente la densité de charge surfacique sur le conducteur .

L'équation (5.2) devient:

$$V(P) = V_o(P) + \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \int_v \vec{P} \cdot \nabla (1/r) dv$$

En intégrant par parties le second terme et en appliquant le théorème de la divergence on obtient avec les hypothèses d'homogénéité et d'isotropie du diélectrique χ est supposée constante, nous obtenons:

$$\begin{aligned} \phi(V) &= -\frac{\chi}{4\pi\epsilon_o} \int_v \nabla(V) \cdot \nabla(1/r) dv \\ &= -\frac{\chi}{4\pi} \int_v (\nabla \cdot (V \nabla(1/r)) - V \nabla^2(1/r)) dv \\ &= -\frac{\chi}{4\pi} \int_s V \nabla(1/r) \cdot \vec{n} ds - \frac{\Omega_P(V) \chi(P)}{4\pi} V(P) \end{aligned} \quad (5.5)$$

L'équation (5.2) devient:

$$V(P) \cdot \left(1 + \frac{\Omega_P(V)}{4\pi} \chi(P)\right) = V_0(P) - \chi(V) \int_{\text{diel}} V(Q) \frac{dG_P(Q)}{dn} ds \quad (5.6)$$

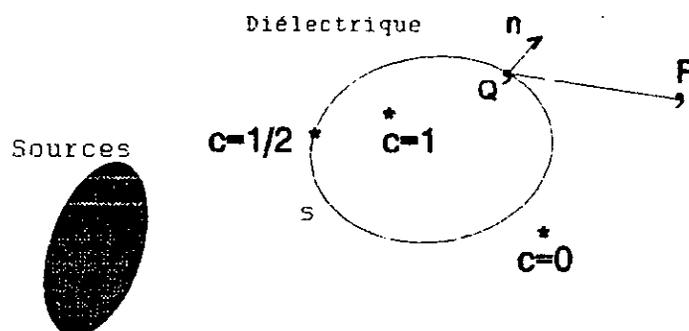


Fig (5.2): Illustration de l'équation (5.6)

ou $\Omega_P(V)$ est l'angle solide sous lequel le point P voit le volume diélectrique.

-REMARQUE:

La formulation que nous venons de présenter est particulièrement adaptée à l'électrostatique. Elle permet d'introduire des conditions aux limites sous forme de surfaces équipotentielles [1].

V-3-FORMULATION TIRÉE DE L'IDENTITÉ DE GREEN:

Nous ne nous étendrons pas sur les démonstrations amplement décrites par ailleurs. Cette formulation consiste en un premier temps à considérer chaque milieu diélectrique séparément, mais en choisissant grâce à l'identité de GREEN des distributions de charges et de dipôles de telle façon qu'elles coïncident avec les conditions aux limites. Ensuite, on utilise cette concordance pour

assembler les différents milieux en respectant les conditions d'interfaces.

Le théorème de GREEN appliquée à un champ scalaire V nous permet d'écrire:

$$cV(P) = -\int_V G_P \nabla^2 V dv - \int_S \left(V \frac{\partial G}{\partial n} - \frac{\partial V}{\partial n} G_P \right) ds \quad (5.6)$$

Si V est une fonction harmonique on obtient:

$$cV(P) = - \int_S \left(V \frac{\partial G}{\partial n} - \frac{\partial V}{\partial n} G_P \right) ds \quad (5.7)$$

$$G_P = \frac{1}{4\pi PQ} \quad \text{EN 3D} \quad (5.8)$$

$$G_P = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{PQ} \quad \text{EN 3D} \quad (5.9)$$

Avec G la fonction de GREEN

c le coefficient angulaire vérifie:-

$$4\pi c = \Omega_P(v) \quad (5.10)$$

$$c = \begin{cases} 0 & \text{si } P \text{ est en dehors du volume.} \\ 1/2 & \text{si } P \text{ sur la surface.} \\ 1 & \text{si } p \text{ appartient à } v. \end{cases}$$

-Il est important de noter qu'une surface fermée divise l'espace en deux volumes v_1 et v_2 . Si les fonctions V et G sont régulières à l'infini le théorème de GREEN s'applique. Ainsi l'é.i.f basée sur l'identité de GREEN permet de résoudre les

problèmes extérieures en considérant la normale dirigée vers l'intérieur de v_1 .

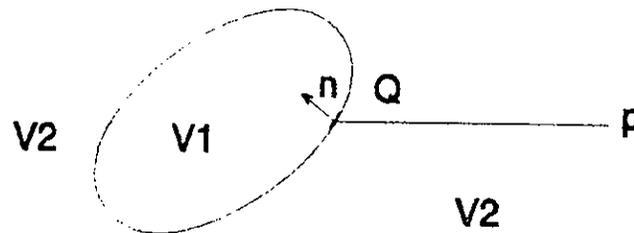


Fig 5.3. Application de théoreme de GREEN pour un problème extérieur

V-3-1-INTERPRETATION PHYSIQUE DU THEOREME DE GREEN:

Le potentiel en tout point intérieur à une région v_1 limitée par une surface fermée régulière S s'écrit:

$$cV(P) = -\int_{v_1} G_p \nabla^2 V dv - \int_S \left(V \frac{\partial G}{\partial n} - \frac{\partial V}{\partial n} G_p \right) ds \quad (5.11)$$

Les intégrales de surfaces représentent évidemment la contribution de toutes les charges extérieures. On remarque cependant que le premier terme de ces intégrales peut être interprété comme le potentiel dû à une couche double sur S et dont la densité est:

$$\tau = \epsilon_0 \epsilon_r V \quad (5.12)$$

Tandis que la seconde intégrale de surface est équivalente

au potentiel d'une couche simple de charges distribuées sur S, avec une densité ;

$$\omega = \epsilon \frac{\partial V}{\partial n} \quad (5.13)$$

Ainsi le theoreme de GREEN est une illustration du phénomène d'influence a distance. Il faut enfin noter que pour chaque point pris séparément ces equations expriment le potentiel en fonction des CAL.

V-4-MODELISATION DES PHENOMENES DE CONDUCTION SURFACIQUE:

V-4-1-LES EQUATIONS DU CHAMP:

La tenue diélectrique des matériaux isolant est tributaire de la répartition du champ et du potentiel à leurs surfaces. Les phénomènes de conduction surfaciques sont décrits par des equations physiques qui dérivent du modèle macroscopique établi il y a environ un siècle par MAXWELL , toutefois il faut noter que la répartition du potentiel en présence d'une pollution est différente d'une répartition électrostatique.

nous supposons que:

-Les matériaux isolants sont linaires électriquement (condition necessaire de l'application de la méthode des e.i.f), possédant une résistivité volumique infinie et une densité volumique de charge d'espace nulle. Ainsi on négligé la distribution de charges due à la polarisation.

-Les couches de pollution sont de très faible épaisseur.

-La tension appliquée à l'isolateur est alternative sinusoïdale de fréquence industrielle.

En n'importe quel point de l'espace les grandeurs électriques caractérisées par E et D, et les grandeurs

magnétiques caractérisées par H et B sont liés par :-

$$\nabla \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5.14)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (5.15)$$

$$\nabla \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J} \quad (5.16)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (5.17)$$

En outre et en se mettant dans les hypothèses ci-dessus on a :-

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (5.18)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (5.19)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (5.20)$$

Pour les couches minces nous avons :-

$$\vec{J}_s = \sigma_s \vec{E}_t \quad (5.21)$$

Dans les équipements de haute tension le champ magnétique est faible et donc l'équation (5.14) devient

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (5.22)$$

Cette dernière nous permet d'écrire que :-

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (5.26)$$

Pour une couche de pollution mince le champ tangentiel est donne par :-

$$\vec{E}_t = -\nabla_s V \quad (5.24)$$

En substituant cette équation dans (5.15) on obtient:-

$$\nabla_s \cdot (-\epsilon \nabla V) = \rho \quad (5.24)'$$

C'est l'équation qui gouverne la répartition du potentiel dans un milieu de permittivité ϵ et de densité volumique ρ . Avec les hypothèses considérées nous obtenons l'équation de LAPLACE:-

$$\nabla^2 V = 0 \quad (5.25)$$

V-4-2-CONDITIONS D'INTERFACES:

Nous avons à résoudre l'équation de LAPLACE en considérant deux régions limitées par deux types d'interfaces.

V-4-2-1-INTERFACE CONDUCTEUR-ISOLANT:

Nous avons la continuité du potentiel ; la valeur du potentiel du côté de l'air V_1 qui doit être égale à la valeur du potentiel du côté de l'isolant solide V_2 .

-Dans le cas des électrodes sous tensions ou liés à la terre V_2 est connue.

-Dans le cas des conducteurs à potentiel flottant V_2 fait partie des inconnues.

V-4-2-2-INTERFACE ISOLANT-ISOLANT:

Lorsque, on passe d'un milieu isolant à un autre les grandeurs électriques doivent satisfaire les deux conditions suivantes:-

-La valeur du potentiel du côté de l'isolant solide est égale à la valeur du potentiel du côté air.

-Pour la seconde condition nous sommes en présence des phénomènes de conceptions surfaciques en utilisant la procédure développée dans [37], on obtient pour l'interface pollue:-

$$\nabla \partial_s \cdot (-\sigma_s \nabla v) + j\omega \epsilon_0 (\epsilon_{r1} \frac{\partial v}{\partial n1} + \epsilon_{r2} \frac{\partial v}{\partial n2}) = 0 \quad (5.26)$$

Lorsque l'interface est propre nous avons la condition classique qui gouverne l'électrostatique:-

$$(\epsilon_{r1} \frac{\partial v}{\partial n1} + \epsilon_{r2} \frac{\partial v}{\partial n2}) = 0 \quad (5.27)$$

Ainsi la recherche de la répartition du potentiel se ramene alors à la résolution d'un problème bidimensionnel sur une géométrie 3D.

V-5-APPLICATION DE LA METHODE DES E.I.F SUR UN MODELE PLAN D'ISOLATEUR POLLUE EN 2D:

En vue de faire une modélisation mathématique juste, une compréhension des phénomènes inhérent à la conduction surfacique s'impose alors. Le modèle plan considéré est représenté à la fig(5.4).

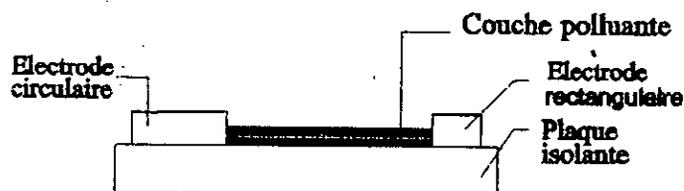


Fig 5.4. Modèle plan considéré

Le domaine d'étude comporte deux régions .

Région 1: L'air de permittivité relative ϵ_{r1}

Région 2: Forme de l'isolant solide de permittivité relative ϵ_{r2}

La frontière entre les deux régions comporte deux types d'interfaces:-

-Interface propre.

-Interface pollue de conductivité surfacique σ_s .
L'écriture des équations intégrales de frontières donne pour l'air:-

$$cV = - \int_{\Gamma_1} \left(V \frac{\partial G}{\partial n_1} - G \frac{\partial V}{\partial n_1} \right) d\Gamma \quad (5.28)$$

Pour l'isolant solide:

$$cV = - \int_{\Gamma_1} \left(V \frac{\partial G}{\partial n_2} - G \frac{\partial V}{\partial n_2} \right) d\Gamma \quad (5.29)$$

n_1 et n_2 sont les normales extérieures des régions 1 et 2.
V-5-1-CONDITIONS D'INTERFACES:

Les solutions de ces équations s'obtiennent en utilisant des conditions d'interfaces et des conditions aux limites.

V-5-1-1-INTERFACE CLASSIQUE:

Nous avons égalité du potentiel vu des deux régions.

$$V_1 = V_2$$

Continuité de la composante normale du déplacement électrique D , donc nous avons trois inconnues : $V, \delta V / \delta n_1, \delta V / \delta n_2$, les deux dernières ne sont pas continues à travers les interfaces. En suivant la manière proposée dans [38] pour réduire le nombre de variable, et en choisissant pour une interface diélectrique - diélectrique la région de plus faible conductivité comme région de référence les équations intégrales dans les deux régions deviennent:-

$$cV = - \int_{\Gamma_1} \left(V \frac{\partial G}{\partial n} - \frac{1}{\epsilon_{r1}} G \Psi_1 \right) d\Gamma \quad (5.30)$$

$$cV = - \int_{\Gamma_1} \left(V \frac{\partial G}{\partial n} - \frac{1}{\epsilon_{r2}} G \Psi_2 \right) d\Gamma \quad (5.31)$$

V-5-1-2-INTERFACE POLLUE:

Pour un interface pollué on à :

$$\nabla \cdot (-\delta_s \nabla_s V) + j\omega \epsilon_0 (\psi_1 + \psi_2) = 0 \quad (5.32)$$

En utilisant la technique proposée dans [37] par exemple, on pose :

$$\psi_1 + \psi_2 = \theta \quad (5.33)$$

L'équation (5.32) devient :

$$\nabla \cdot (\delta_s \nabla_s V) + j\omega \epsilon_0 \theta = 0 \quad (5.32)'$$

L'équation (5.32)' n'est pas compatible avec une résolution utilisant la méthode des e.i.f., elle doit donc être transformée en une équation intégrale, en utilisant la méthode des résidus pondérés.

$$\int_{\Gamma} \delta_s \nabla \omega \nabla_s V d\Gamma - [\delta_s \omega \frac{\partial V}{\partial \tau}]_a + j\omega \epsilon_0 \int_{\Gamma} \omega \theta d\Gamma = 0 \quad (3.34)$$

A: point de contact entre la couche de pollution et l'électrode haute tension.

V-5-2-RECAPITULATION:

Nous pouvons nous résumer comme suit:

* Pour un point appartenant à l'interface classique deux variables inconnues sont V et ψ .
ainsi:

$$CV = - \int_{\Gamma_1} (V \frac{\partial G}{\partial n} - \frac{1}{\epsilon_{r_1}} G \psi_1) d\Gamma \quad (5.35)$$

* Pour un point appartenant à l'interface pollué trois variables sont inconnues V, ψ, θ :

$$CV = - \int_{\Gamma_2} \left(V \frac{\partial G}{\partial n} + \frac{1}{\epsilon_{r_2}} G \psi - \frac{1}{\epsilon_{r_2}} G \theta \right) d\Gamma \quad (5.36)$$

* Les condition d'interface pollué sont:

$$\int_{\Gamma} \delta_s \nabla \omega \nabla V d\Gamma - [\delta_s \omega \frac{\partial V}{\partial \tau}]_a + j \omega \epsilon_o \int_{\Gamma} \omega \theta d\Gamma = 0 \quad (5.37)$$

V-6-DISCRETISATION NUMERIQUE ET PROGRAMMATION:

La discrétisation des équations intégrales de frontière fait appel aux techniques numériques d'éléments finis [39]. Les grandeurs géométriques et physiques sont approximées sur chaque élément fini défini par l'abscisse curviligne (coordonnées locales) $u \in [-1, +1]$, à l'aide de fonctions poids, dans notre étude nous avons envisagé deux techniques de discrétisation que nous allons présenter séparément.

V-6-1-DISCRETISATION EN ELEMENTS QUADRATIQUES:

Les grandeurs physiques et géométriques sont approchées par des fonctions poids paraboliques:-

$$\begin{cases} X(u) = \sum_i X_i P_i(u) \\ Y(u) = \sum_i Y_i P_i(u) \end{cases} \quad (5.38)$$

$$\begin{cases} V(u) = \sum_i V_i P_i(u) \\ \Psi(u) = \sum_i \Psi_i P_i(u) \end{cases} \quad (5.39)$$

Avec toujours pour l'ordre deux:

$$\begin{cases} P_1(u) = \frac{1}{2}u(u-1) \\ P_2(u) = 1-u^2 \quad u \in [-1, +1] \\ P_3(u) = \frac{1}{2}u(u+1) \end{cases} \quad (5.40)$$

Ainsi nous avons :

$$\begin{cases} V(P_i) = V_i \\ \Psi_i(P_i) = \Psi_i \end{cases} \quad (5.41)$$

Les équations intégrales deviennent alors:-

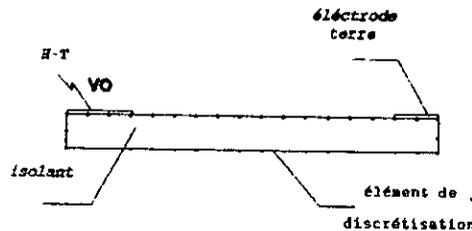
$$cV_i = \sum_k (a_{ki}V_k - \frac{1}{\varepsilon_{r1}} b_{ki}\Psi_k) \quad (5.42)$$

$$cV_i = \sum_k (a_{ki}V_k - \frac{1}{\varepsilon_{r2}} b_{ki}\Psi_k - \frac{1}{\varepsilon_{r2}} b_{ki}\theta_k) \quad (5.43)$$

les noyaux d'intégration s'écrivent:-

$J(u)$: Jacobien du changement de variables.

$$\begin{cases} a_{ki} = \int_{-1}^1 P_i(u) \frac{\partial G(u)}{\partial n} J(u) du \\ b_{ki} = \int_{-1}^1 P_i(u) G(u) J(u) du \end{cases} \quad (5.44)$$



Fig(5.5): Discretisation du modèle

-Les noyaux d'intégration présentent une singularité lorsque (PQ) s'annule, toutefois les intégrales sont convergentes. Le traitement de singularité ainsi que le calcul des intégrales se fait par des méthodes numériques.

-Pour l'équation de l'interface pollué, nous pouvons utiliser plusieurs fonctions de pondération [40], la méthode de GALAKRINE est la plus utilisée pour résoudre les problèmes liés au potentiel. La fonction de pondération discrétisée s'écrit:-

$$W = \sum_I P_I \delta V_I \quad (5.45)$$

L'équation de l'interface pollué discrétisée devient alors:-

$$I_k = \sum \delta V_I \left[\int_{-1}^1 -\sigma_s V_{ki} (\nabla P_i)^2 J(u) \right] du + [P_{ik} V_{ik} \sum_I \frac{\partial P_{ik}}{\partial n}]_{-1}^1 + j\omega \left[\int_{-1}^1 P_i \sum_I P_{ik} \Theta_{ik} J(u) \right] \quad (5.46)$$

L'assemblage de ces équations donne le système matricielle globale à résoudre.

V-6-2-DESCRETISATION EN ELEMENTS CONSTANTS:

Cette méthode consiste à considérer chaque grandeur physique comme étant constantes sur chaque élément de

discrétisation, l'équation de l'interface polluée pour notre modèle est alors:

$$\nabla^2 V + \frac{j\omega\epsilon_0}{\sigma_s} \theta = 0 \quad (5.47)$$

On transforme cette équation en une équation intégrale

$$\int_{\Gamma} \left(V \nabla^2 - \frac{j\omega\epsilon_0}{\sigma_s} \right) d\Gamma + \left[\frac{dV}{dX_a} G \right]_a^o - \left[V \frac{dG}{dX_a} \right]_a^o = 0$$

$$\int_{\Gamma} \left(V \nabla^2 G - \frac{j\omega\epsilon_0}{\sigma_s} \right) d\Gamma + M = 0 \quad (5.48)$$

La constante M est calculée numériquement en écrivant l'équation (5.48) au point (a), la discrétisation de cette équation donne:-

$$V_i - \frac{j\omega\epsilon_0}{\sigma_s} \sum_{k=1}^{no} \theta_k \int_{\Gamma_k} G_{ki} d\Gamma_k + M = 0 \quad (5.49)$$

$K=1, no$

no: nombre d'éléments sur l'interface polluée. Sous forme matricielle on obtient:-

$$[V] = j[G'] [\theta] + [M] \quad (5.50)$$

[G']: Matrice déduite de la matrice [G].

[M]: Vecteur constant.

-Les équations intégrales écrites dans les différentes régions deviennent:-

-pour l'air:

$$cV = - \int_{\Gamma} \left(V \frac{\partial G}{\partial n} - \frac{1}{\epsilon_{r1}} G \Psi \right) d\Gamma \quad (5.51)$$

discrétisée elle devient:-

$$cV_i + \sum_{k=1}^n V_k \int_{\Gamma_k} \frac{\partial G_{ki}}{\partial n} d\Gamma_k = - \frac{1}{\epsilon_{r1}} \sum_{k=1}^n \Psi_k \int_{\Gamma_k} G_{ki} d\Gamma_k \quad (5.52)$$

sous forme matricielle on a:-

$$[G] [V] = \frac{1}{\epsilon_{r1}} [H] [\Psi] \quad (5.52')$$

-Pour l'isolant solide:-

$$cV = - \int_{\Gamma} \left(V \frac{\partial G}{\partial n} + \frac{1}{\epsilon_{r2}} G \Psi - \frac{1}{\epsilon_{r2}} G \Theta \right) d\Gamma \quad (5.53)$$

discrétisée elle s'écrit:-

$$cV_i + \sum_{k=1}^n V_k \int_{\Gamma_k} \frac{\partial G_{ki}}{\partial n} d\Gamma_k = - \frac{1}{\epsilon_{r2}} \sum_{k=1}^n \Psi_k \int_{\Gamma_k} G_{ki} d\Gamma_k + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \sum_{k=1}^{no} \Theta_k \int_{\Gamma_k} G_{ki} d\Gamma_k \quad (5.54)$$

sous forme matricielle on a:-

$$[G] [V] = \frac{1}{\epsilon_{r2}} [H] [\Psi] - \frac{1}{\epsilon_{r2}} [G] [\Theta] \quad (5.55)$$

L'assemblage des équations linéaire (5.50), (5.52') et (5.55) sous forme d'un système $[A][X]=[B]$ donne la solution. Le calcul des noyaux d'intégration se fait de la même manière que précédemment [41].

V-6-3-ETAPES DE PROGRAMMATION:

Les principales étapes de programmation sont les suivantes fig(5.6):-

- ETAPE 1: Ecriture des données géométriques du système étudié, ainsi que les conditions aux limites aux noeuds de discrétisation.
- ETAPE 2: Calcul des sous matrices constituant la matrice globale, avec le traitement des singularités et l'introduction des conditions aux limites pour l'obtention du système final.
- ETAPE 3: Résolution du système avec la méthode de Gauss test pivot.
- ETAPE 4: Ecriture des résultats.

L'assemblage de ces différentes équations donne le système linéaire à résoudre. La matrice est non symétrique, la structure globale du système avant l'introduction des conditions aux limites est:-

$$\begin{bmatrix} H1 & G1 & 0 \\ H & G & -G \\ H2 & 0 & G2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \Psi \\ \Theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

H1, G1: Sous matrices obtenues après la discrétisation des équations dans l'air.

H, G: Sous matrices obtenues après la discrétisation des équations dans l'isolant.

H2, G2: Sous matrices obtenues après la discrétisation des équations dans la couche de pollution. Après l'introduction des conditions aux limites on obtient le système à résoudre.

V-8-CONCLUSION:

Nous avons présenté dans ce chapitre la méthode des e.i.f l'application de cette technique de calcul aux phénomènes de conceptions surfaciques, nous conduit à introduire l'équation de l'interface pollué sous forme d'équation intégrale en utilisant la méthode des résidus pondérés. Nous espérons au moins que nous avons lancé le coup de départ pour l'établissement d'un programme général de calcul du champ électrostatique au niveau du laboratoire de haute tension en se basant sur cette méthode.

CONCLUSION GENERALE

Les phénomènes entourant la pollution des isolateurs sont assez complexes, une modélisation mathématique rigoureuse ne peut découler que d'une bonne compréhension du phénomène physique. L'étude par simulation basée sur un modèle mathématique nous a permis d'avoir une idée quantitative sur les différentes grandeurs caractérisant l'évolution d'un arc électrique sur des surfaces isolantes polluées. L'étude expérimentale qui reste toujours indispensable nous conduit à dire que la répartition de la couche de pollution et son mode de disposition influent considérablement sur la tenue des isolateurs, par exemple le modèle plan avec une couche intermédiaire est le plus rigide.

Les résultats obtenus par simulation lors de l'application de la méthode des équations intégrales de frontières sur un modèle plan d'isolateur pollué, sont valables pour les faibles valeurs de la conductivité; d'ors et déjà nous suggérons pour faire une étude plus fiable de prendre une géométrie 3D, ceci est imposé par la présence la couche de pollution.

Dans notre modèle de pollution nous avons supposé que la conductivité été constante, or elle dépend en réaliste de plusieurs facteurs l'un des plus important est la courant de fuite. La prise en considération de cette dépendance , fera l'objet d'une étude plus exacte et donnera des résultats appréciables.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] EL KOSAIRY M.A.B, RIZK F.A.M: "Comportement des isolateurs des lignes de transport á très haute tension dans des conditions de pollution desertique" - CIGRE, Paris, France, Rapport 33-05.
- [2] LEROY.G, GARY.C, HUTZLER.B, LATOT.J et DUBATON.C: "Les propriétés diélectriques de l'air et très hautes tensions". EYROLLES, 1984.
- [3] Techniques de l'ingénieur D 275.
- [4] EL-ARABATY.A, NOSSEIR.A, EL-BEIKY.S, NASSER.E, EL-SAKY.A "Choix d'isolateurs utilisables dans des ambiances et notamment dans des régions desertiques" CIGRE, Paris, France Rapport 33-11.1980.
- [5] EL-KOSAIRY M.A.B, EL- SHARKAOUTI.E, AWAD.M.M, ZARZOURA.H.E.M, KHALIFA.M.M et NOSSEIR.A" Performance de chaines d'isolateurs haute tension soumises à la pollution du desert"-CIGRE, Paris, France, Rapport 33-09, 1982.
- [6] CIGRE groupe de travail du comité d'étude 33-"Mesure de la severité de pollution des sites et applications au dimensionnement des isolateurs pour les réseaux à courant alternatif". Electra 64, Mai 1979.
- [7] A.MEKHALDI-"Modèle de contournement d'isolateurs pollués dans des conditions desrtiques du sahara Alérien"-Thèse de Magister.Département de génie électrique.Laboratoire de haute tension.Ecole nationale polytechnique, Juin 1990.
- [8] KOSZTALUK.A, KUCHARSKI.R -"Mesure de pollution, essais d'isolateurs pollués, choix des isolateurs", CIGRE, Paris, France Rapport 33-07, 1978.
- [9] Publication IEC 71-2 " Insulation coordination , application

- guide", Second édition, 1976.
- [10] CIMADOR.A, COJAN.M, HAUTEFEUILLE.P, MOREAU.M "Méthode de dimensionnement des isolateurs des lignes aériennes en régions polluées" CIGRE, Paris, France, Rapport 33-04, 1987.
- [11] PORCHERON.Y, CLAVERIE.P "How to choose insulators for polluted areas", IEEE, Tran PAS, Vol 92 N 3, 1973.
- [12] HEISE.W, VERMA.M.P, NIKLASCH.H, LIPKEN.H, SCHREIBER.H, LUXA.G.F "Critères de contournement par pollution et ses applications pour le dimensionnement et le contrôle de l'isolation" CIGRE, Paris, France, Rapport 33-09, 1978.
- [13] CLAVERIE.P, PORCHERON.Y " Les phénomènes de pollution des isolateurs et l'isolement des ouvrages en régions polluées" RGE. Tome 82. Mars 1973, p 166-194.
- [14] F.Obénaus. - "Fremdschichtüberschlag und kriechweg-länge", Deutsche Elektrotechnik, Vol.4, 1958, p.135-136.
- [15] G.Newmarker. - "Verschmutzungs zustand und kriechweg", Monaster, d. Deut. Akad. wiss, Berlin, Vol.1, 1959, p.352-359.
- [16] L.B.Alston, S.Zoledsiowski. - "Growth of discharges on polluted insulation", IEEE Trans., Vol.PAS-110, N° 7, Juillet 1963, p.1260-1266.
- [17] J.Danis. - "A stochastic pollution flashover model", Forth International Symposium on High Voltage Engineering, Athens, Greece, September 1983, rapport N° 46-12.
- [18] S.Hesketh. - "General criterion for the prediction of pollution flashover", Proc. IEE, Vol.114, N° 4, 1967, p.531-532.
- [19] A.Remuli. - "The mechanism of flashover of polluted insulation", Ph.D. Thesis, University of Strathehyde, 1967.

- [20] SAFERNA.J, KOSZTALUK.R " Essais d'isolateurs sur des stands de pollution naturelle", CIGRE 1972, Rapport 33-03.
- [21] H.Nacke.-"Lichtbogen festigkeit und kriechstrom festigkeit von isolier stoffen", Dissertation, University of Berlin-Charlottenburg, 1962.
- [22] R.Wilkins.-"Flashover voltage of high voltage insulators with uniform surface films", Proc. IEE, Vol.116, N^o.3, Mars 1969, p.457-465.
- [23] H.Boehme, F.Obénaus.-"Essais de contournement sur des isolateurs pollués en laboratoire et en lieu de service du point de vue de la conception d'un modèle d'amorçage pour courant rampant", CIGRE, 1966, N^o.407.
- [24] A.M.Rahal, C.Huroux.-"Flashover of high voltage insulators", IEEE Trans., Vol.Pas-98, N^o.6, November-December 1979, p.2223-2231.
- [25] H.H.Woodson, A.J.McElroy.-"Insulators with contaminated surfaces part II: modeling of discharge mechanisms", IEEE Trans., Vol.Pas-89, N^o.8, November-December 1970, p.1858-1867.
- [26] F.A.M.Rizk.-"Méthodes mathématiques du contournement des isolateurs sous pollution", Electra N^o.78, Octobre 1981, p.71-103.
- [27] O.Mayr.-"Beitrag zur theorie der statischen und der dynamischen lichtbogens", Arch. f. Elektrotechnik, Vol.37, 1943, p.588-608.
- [28] A.S.Maikopar.-"The open small current arc", Elektrichestvo, N^o.2, 1905, p.22-25.
- [29] T.E.Browne Jr.-"A study of arc behavior near current zero by means of mathematical models", AIEE Trans., Vol.67, 1948, p.141-153.

- [30] F.A.M.Rizk.-"Analysis of dielectric recovery with reference to dry zone arc on polluted insulators", IEEE conf. p., N^o.71C 134 PWR, Winter Power Meeting, New York, January-February 1971.
- [31] J.J.Hurley, G.J.Limbours.-"Correlation of service performance of insulators and lighting arresters under polluted conditions with test results with a view to examining the validity of present criteria for insulator selection and testing", CIGRE, sc. 33, September 1969.
- [32] ZHIGHENG.G, RENYU.Z "Calculation of dc and ac flashover voltage of polluted insulators", IEEE Trans,Elect,INS,Vol 25 1990,P 723-729.
- [33] ZHICHENG.G, " The theoritical analysis and experimental study of criteria for flashover of polluted insulators under dc and ac voltages", Ph.d Thesis,Tsinghua.University,1984.
- [34] TEGUAR.M " Etude mathématique du developpement des décharges électrique sur des isolateurs installés en régions polluées".Thèse de magister.De'partement de génie électrique, laboratoire de haute tension.Ecole nationale polytechnique,Alger,1993.
- [35] ZHICHENG.G, RENYU.Z " Analysis of the flashover criterion of polluted insulators under ac volage".Journal of Tsinghina university, vol 26 pp30-39,1986.
- [36] KRAHENBUL.L " La méthode des équations intégrales de frontières pour la résolution des problèmes du potentiel en électrotechnique et sa formulation axisymétrique".Thèse de docteur-ingénieur ,Lyon,1983.
- [37] RASOLONJANAHARY.J.L.T " Modélisation par la méthode des équations intégrales de frontières de phénomènes de conduction surfacique sur les isolateurs pollués".Thèse de docteur-ingénieur,Lyon,1992.

- [38] ANCELLE.B: " Emploi de la méthode des équations intégrales de frontières et la mise en oeuvre de sa conception assistée par ordinateur dans la calcul des systèmes électrotechniques".Thèse d'état,Grenoble,1979.
- [39] KRANHENBUL.L, NICOLAS.A " Méthode des équations intégrales de frontières,developpements de techniques et sa formulation axisymétrique",RGE,3/85,P222-226,Mars 1985.
- [40] DHATT.G,TOUZOT.G " Une présentation de la méthode des éléments finis",Maloire,Paris,1981.
- [41] BREBBIA.C.A , J.DOMINGUEZ " Boundary élément,an introductory course" Computation mechanics publication,U.S.A ,1991.