

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

16/96

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

APPROCHE D'UN ISOLATEUR
DE HAUTE TENSION PAR
UN MODELE DE LABORATOIRE

Proposé par :

A.MEKHALDI.
M.TEGUAR.

Etudié par :

O.FOUATHIA
S.HOUACHE

Dirigé par :

A.MEKHALDI.
M.TEGUAR.

PROMOTION

JUIN 1996.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية

MINISTÈRE 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

**APPROCHE D'UN ISOLATEUR
DE HAUTE TENSION PAR
UN MODELE DE LABORATOIRE**

Proposé par :

**A.MEKHALDI
M.TEGUAR.**

Etudé par :

**O.FOUATHIA
S.HOUACHE**

Dirigé par :

**A.MEKHALDI
M.TEGUAR.**

PROMOTION

JUIN 1996.

DEDICACES

Je dedie ce modeste travail

- *A ma très chère mère, en signe de reconnaissance, du soutien moral et matériel et ses encouragements durant mes études.*
- *A la mémoire de mon père.*
- *A tous mes frères.*
- *A toutes mes sœurs.*
- *A tous les amis que j'ai fait dans le temps et spécialement :*
 - *Mes amis d'enfance.*
 - *La promotion BAC 1991.*
 - *Les collègues de l'ENP.*
- *Enfin, à tous ceux qui ont consacré leurs vies pour la science.*

Ouahab Fouathia

DEDICACES

Je dedie ce modeste travail

- *A mes chers parents.*

auquels je dois tous les respects et toute la reconnaissance pour leurs sacrifices et compréhension qui m'ont permis de surmonter tout les obstacles que j'ai rencontré tous au long de ma vie estudiantine.
- *A mon frère et mes sœurs.*
- *A tous mes amis.*
- *A tous ceux qui me sont chers.*

Slimane houache

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer ici, notre profonde reconnaissance à messsieurs
A.MEKHALDI et M.TEGAR,
pour les conseils qu'ils n'ont cessé de nous prodiguer
et tous le temps qu'ils nous ont consacré pour l'élaboration
de ce modeste travail.

Nos remerciements vont aussi à monsieur
A.BOUBAKEUR et S.BOUZABIA
pour l'aide précieuse qui nous a permis de mener
à bien ce présent travail.

Nous tenons également à remercier,
messieurs les membres du jury
pour avoir bien voulu examiner
notre modeste travail .

Que tous ceux, qui,
de près ou de loin ont contribué à notre formation,
veuillent bien accepter ici,
l'expression de notre profonde gratitude
et nos sincères remerciements.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE:.....	1
CHAPITRE I	
MODELES DE DEVELOPPEMENT DE L'ARC ELECTRIQUE SUR DES SURFACES ISOLANTES POLLUEES.	
I.1.introduction.....	5
I.2.description qualitative du phénomène de contournement.....	6
I.3.modèles mathématiques du contournement des isolateurs sous pollution.....	7
1.3.1.Modèles en courant continu.....	9
1.3.1.1.modèles de la couche simple.....	9
1.3.1.2.modèles de propagation de l'arc.....	15
1.3.1.3.amélioration des modèles en courant continu.....	15
1.3.2.Modèles a courant alternatif.....	21
1.3.2.1.modèles théoriques.....	21
1.3.2.2.modèles expérimentaux.....	23
I.4.Vitesse de propagation de l'arc.....	25
I.5.Objet de notre travail.....	27
CHAPITRE II	
ETUDE EXPERIMENTALE	
II.1.Circuit d'essais.....	28
II.2.Préparation des modèles.....	28
II.3.Méthode d'essais.....	31
II.4.Application de la couche polluante.....	32
CHAPITRE III	
RESULTATS ET INTERPRETATIONS	
III.1.Introduction.....	35
III.2.Resultats d'essais.....	38
III.2.1.tension moyenne de contournement.....	38
III.3.2.caracteristiques.....	41
III.4.Approche par un modèle théorique.....	49
CONCLUSION GENERALE.....	53
BIBLIOGRAPHIE.....	56

LISTE DES PRINCIPAUX SYMBOLES:

- b : Largeur de l'isolateur.
 E_a : Gradient de tension de l'arc.
 E_c : Gradient de tension critique $=U_c/L$.
 E_p : Gradient de potentiel dans la couche de pollution.
 i : Courant de fuite.
 i_c : Courant de fuite critique.
 I_m : Valeur crête du courant alternatif.
 I_c : Valeur crête du courant de fuite critique.
 K_s : Paramètre associé à un modèle de vitesse de propagation de l'arc (valeur proportionnelle au rayon de l'arc).
 k : Diffusivité thermique.
 L : Longueur de la ligne de fuite d'un isolateur.
 L_1, L_2 : Distances de fuite partielles pour un isolateur à long fût.
 m : Constante.
 n : Exposant de la caractéristique statique de l'arc.
 N : Constante de la caractéristique statique de l'arc.
 N_{01} : Constante de la caractéristique statique de l'arc avant le zero du courant.
 N_{02} : Constante de la caractéristique statique de l'arc après le zero du courant.
 P_0 : Seuil de puissance pour la propagation de l'arc.
 Q : Densité lineique d'énergie de l'arc.
 r_a : Position radial de la base de l'arc.
 r_b : Rayon de la base de l'arc
 r_0 : Rayon externe du modèle d'isolateur à disque circulaire.
 r : Résistance de pollution moyenne par unité de longueur de fuite.
 r_{p1}, r_{p2} : Résistance de pollution par unité de longueur de fuite, correspondant à la tige et aux ailettes d'un isolateur à long fût.
 R : Résistance de pollution.
 $R(x)$: Résistance de pollution correspondant à une longueur d'arc x .
 U : Tension appliquée.
 U_c : Tension critique.
 v : Vitesse de propagation de l'arc.
 V : Tension appliquée.
 V_{arc} : Tension d'arc.
 V_e : Chute de tension aux électrodes.
 x : Longueur d'arc.
 x_c : Longueur d'arc critique.
 X : Longueur maximale de l'arc.
 x_p : Longueur de la couche de la couche de pollution mouillée non court-circuitée.
 ρ : Résistivité superficielle.
 γ : Conductivité de la couche de pollution.
 ω : Fréquence angulaire .
 θ : Constante de temps de l'arc.
 θ_1 : Constante de temps de l'arc avant le zero du courant.
 θ_2 : Constante de temps de l'arc après le zero du courant.

INTRODUCTION

INTRODUCTION GENERALE

L'isolement électrique des lignes aériennes et des postes du réseau de transport est réalisé en maintenant les conducteurs, et d'une manière générale les pièces sous tension, à une distance suffisante de la masse (ou des autres pièces à des tensions différentes) pour qu'il n'y ait pas de risque d'amorçage [1].

Pour concevoir d'une manière rationnelle l'isolement d'un ouvrage, il est nécessaire de posséder une connaissance suffisante, d'une part, de la tenue diélectrique des "intervalles d'air", d'autre part, du comportement des isolateurs sous diverses contraintes électriques et atmosphériques [1].

Autre fois, le comportement diélectrique des isolateurs est essentiellement apprécié par des essais sous pluie. Les ouvrages (lignes et postes) du réseau de transport installés dans les régions où règne une pollution atmosphérique notable sont sujets à des incidents graves dus aux contournements des chaînes d'isolateurs ou des colonnes isolantes polluées. Ces incidents ont pour origine des dépôts divers qui se fixent sur les surfaces isolantes et abaissent considérablement par temps de pluie ou de brouillard, leur résistivité superficielle [2].

Ces incidents montrent que la tenue sous pluie ne constitue pas dans tous les cas un critère de performances suffisant. D'autres types d'essais, et particulièrement des essais sous pollution, s'avèrent donc nécessaires, pour comprendre le processus de contournement des isolateurs pollués [1].

Les courants de fuite qui circulent alors à la surface de ces isolateurs provoquent des assèchements locaux de la couche de pollution et l'apparition de petits arcs. Dans certains cas, la conductivité de la couche polluante est telle que ces arcs se développent jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur et la mise hors service de l'ensemble de l'installation [2].

L'amélioration de la tenue des ouvrages peut être obtenue par [2],[3],[4]:

1) Des dispositions constructives appropriées:

- * surdimensionnement par l'allongement de la ligne de fuite.
- * utilisation des isolateurs spéciaux de forme plus favorable.
- * Emploi des chaînes horizontales ou inclinées, de préférence aux chaînes verticales.

2) Des mesures d'exploitation convenables:

- * nettoyage périodique des isolateurs.
- * lavage par jet d'eau des installations
- * graissage des isolateurs.

Les phénomènes d'arcs se produisant sur une surface polluée sont tellement complexes qu'il est indispensable de faire de nombreuses hypothèses simplificatrices, pour rendre possible leur représentation par un modèle mathématique [2].

Jusqu'à présent, tous les travaux visant à l'étude de la formation de la couche polluante ont été exclusivement de nature expérimentale, bien qu'il y a des modèles mathématiques, représentant un contournement engendré par la pollution, dont la nature est idéalisée.

En première étape, une étude théorique du mécanisme de contournement sous pollution a donc été effectuée en utilisant des modèles expérimentaux de formes géométriques simples (plaque plane rectangulaire ou circulaire, cylindre, ... etc) recouvertes d'un électrolyte, qui facilitent l'observation des phénomènes et l'interprétation des résultats de mesures [1].

Les résultats de cette étude ont ensuite été appliqués aux isolateurs pollués naturellement et artificiellement, et on arrive ainsi à dégager les principes essentiels à utiliser pour choisir et dimensionner convenablement les isolateurs pour régions polluées [1].

Certains états de pollution constituent donc les contraintes les plus sévères pour l'isolateur et l'étude du mécanisme du contournement dans ces conditions revêt un intérêt tout particulier [1].

PREMIER CHAPITRE

**MODELES DE DEVELOPPEMENT
DE L'ARC ELECTRIQUE SUR DES SURFACES
ISOLANTES POLLEES**

MODELES DE DEVELOPPEMENT DE L'ARC ELECTRIQUE SUR DES SURFACES ISOLANTES POLLUEES

Cette étude constitue une analyse critique des principaux modèles mathématiques élaborés antérieurement pour décrire le phénomène de contournement des isolateurs sous atmosphère polluée. Elle passe en revue des modèles s'appliquant aux arcs en régime de courant continu qui s'entretient sur des surfaces contaminées, les critères de propagation des arcs en régime de courant continu, ainsi que les modèles de réallumage des arcs dans le cas d'isolateurs contaminés soumis à des contraintes électriques alternatives. On y examine également des modèles analytiques pour la vitesse de propagation de l'arc sur des isolateurs contaminés.

1.1. INTRODUCTION:

La tension de contournement d'un isolateur dépend dans une très large mesure de "l'état de surface" de l'isolant (verre ou porcelaine). Si cette surface est polluée, c'est à dire recouverte d'un film plus ou moins conducteur, la tension de contournement peut être réduite à la moitié, voire au tiers, de la tension de contournement à sec [1].

Dans ces conditions, en effet, la couche conductrice qui pollue l'isolateur provoque d'abord, puis facilite ensuite, le développement d'un arc superficiel qui, dans certaines conditions, pourra croître jusqu'à ce que survienne le contournement total de l'isolateur.

Les recherches effectuées dans différents laboratoires à travers le monde, depuis les années soixante, pour améliorer les connaissances sur le phénomène d'arc, ont permis la mise au point de méthodes d'essais réellement représentatives des conditions de service. Cependant il faut reconnaître que ces travaux se sont contentés, pour la plupart, de décrire les phénomènes et d'établir des lois empiriques, certes très utiles

en pratique, mais sans fournir réellement d'explications précises des phénomènes physiques de base, qui restent encore mal connues[1].

Les modèles mathématiques sont idéalisés, et sont très utiles pour la rationalisation d'expériences pratiques, pour l'interprétation et la présentation des résultats d'essais . [5].

I.2 - DESCRIPTION QUALITATIVE DU PHENOMENE DE CONTOURNEMENT :

Le contournement d'une surface polluée et humidifiée est le résultat d'une évolution qui comprend quatre phases principales, schématisées sur la figure I.1. Pour simplifier la présentation, considérons le cas d'une plaque plane rectangulaire avec deux électrodes : [6], [7]

. dans une première phase, le courant de fuite s'écoule à travers l'électrolyte qui recouvre l'isolant. Il provoque un échauffement de l'électrolyte qui a pour effet d'accroître la conductivité du milieu et par suite le courant (phase 1);

. l'échauffement croissant provoque un assèchement local de la couche polluante. La zone sèche formée a tendance à s'étendre latéralement jusqu'à l'interruption complète du courant (phase 2);

. La tension se trouve reportée aux bornes de la zone sèche et des arcs locaux sont susceptibles d'amorcer. Au voisinage des racines d'un arc local la construction des lignes de courant conduit à un élargissement de la zone sèche (phase 3);

. à partir de ce stade, l'évolution de la décharge peut se faire de différentes façons:

L'arc local peut s'éteindre (phase 4); ou bien il peut se déplacer latéralement pour retrouver une position plus stable correspondante à une plus faible longueur d'arc (phase 5); ou encore il peut s'allonger jusqu'à atteindre les électrodes et provoquer ainsi le contournement. Dans ce cas, l'allongement de l'arc se fait à la surface de l'électrolyte sans formation de zone sèche (phase 6).

Les différents stades de ce phénomène ont été observés et analysés sur des modèles simplifiés d'isolateurs. Bien entendu, en pratique le phénomène s'initie et évolue en fonction de la forme des isolateurs, de l'hétérogénéité du dépôt solide, de l'humidification de telle ou telle partie plus ou moins protégée de l'isolateur. Il est aussi fréquent que plusieurs arcs naissent simultanément le long d'une chaîne ou d'une colonne isolante [6].

Enfin nous avons implicitement admis que la tension appliquée à l'isolant était constante. La tension alternative présente à cet égard une différence importante du fait de son annulation périodique. Les arcs locaux s'éteignent à chaque passage par zéro et se réamorcent d'une façon aléatoire sur les maxima de tension.

La description de principes met en évidence divers processus qu'il y a lieu de considérer pour parvenir à une meilleure compréhension du modèle: processus thermiques qui gouvernent l'assèchement de l'électrolyte et processus d'ionisation qui déterminent l'amorçage ou le réamorçage des arcs locaux ainsi que leur élongation jusqu'au contournement [6],[7].

1.3. MODELES MATHEMATIQUES DU CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS SOUS POLLUTIONS

Avant de passer à l'analyse détaillée de ces modèles, quelques observations générales s'imposent [5]:

- La tension de contournement d'un isolateur pollué est une variable statistique, même lorsque les conditions sont en apparence contrôlées.
- de nombreuses hypothèses simplificatrices sont indispensables pour rendre possible la représentation du phénomène d'arc, par un modèle mathématique simple.
- les modèles mathématiques, de nature forcément idéalisée ne devraient en aucun cas se substituer au travail expérimental.
- les deux aspects fondamentaux représentant le phénomène d'arc sur les surfaces contaminées sont:
 - * la formation de la tension en série avec une couche de pollution non court-circuitée par l'arc et présentant une longueur variable.
 - * le critère de propagation de l'arc à la surface d'un isolateur contaminé et mouillé.
- plusieurs modèles originellement développés en vue d'une formulation d'un critère pour l'existence d'un arc sous tension continue, furent très souvent employés pour tenir compte de résultats obtenus pour des tensions alternatives.

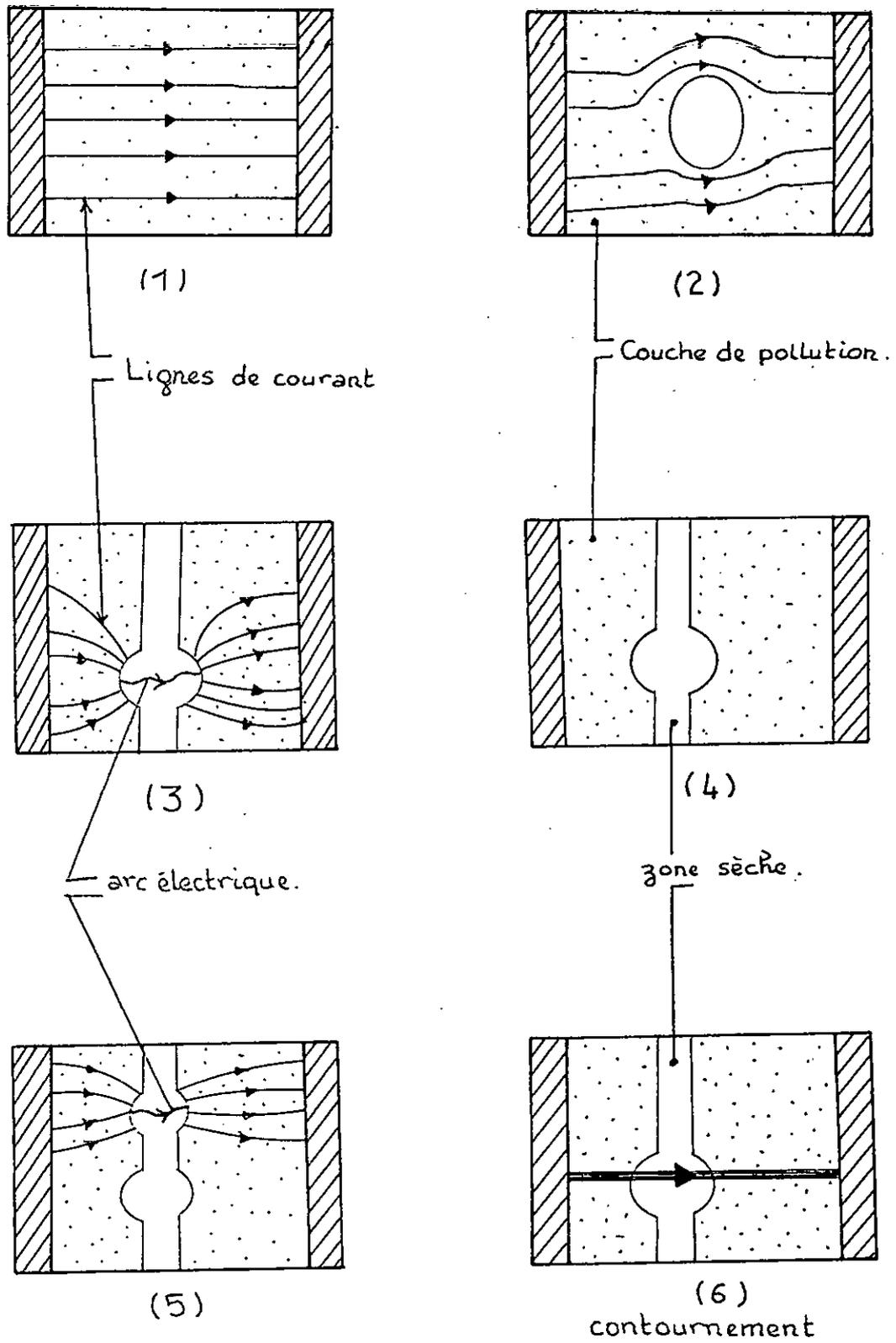


Fig. I.1.- Etapes successives du contournement d'une couche polluante.

En effet, les principaux modèles développés pour l'étude de propagation de l'arc électrique sur la surface d'un isolateur pollué, sont les suivants:

I. 3.1. MODELES EN COURANT CONTINU :

Plusieurs modèles ont été proposés en vue d'étudier le développement d'arc en courant continu, qui s'entretient sur des surfaces polluées [3].

I. 3.1.1. Modèles de la couche simple:

De nombreux auteurs ont imaginé de reproduire le phénomène de contournement sur des modèles simplifiés d'isolateurs afin de pouvoir le décrire par des équations simples [7], parmi ces auteurs:

- OBENAU [8]:

Il a proposé le premier modèle électrique en 1958, pour faire des analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces contaminées.

Ce modèle a été établi pour une tension d'alimentation continue et décrit un fonctionnement statique de l'arc, (figure 1.2). Il est constitué d'une décharge de longueur x en série avec une résistance $R(x)$ représentant la couche de pollution humide [5].

L'équation électrique de base est la suivante:

$$V = V_e + V_{arc} + R(x)I \dots \dots \dots (I.1)$$

avec:

$$V_e = V_a + V_k \dots \dots \dots (I.2)$$

V_a : chute de tension à l'anode.

V_k : chute de tension à la cathode.

La décharge est caractérisée par le champ électrique longitudinal E_a qui y règne, il peut être mis sous la forme:

$$E_a = \frac{U_{arc}}{x} = N l^{-N} \dots \dots \dots (I.3)$$

N et n sont des constantes.

En résumé:

$$V = V_c + xN i^{-N} + R(x)i \dots \dots \dots (I.4)$$

La tension d'entretien de l'arc a pour expression:

$$V_{arc} = \frac{xN}{i^n} \dots \dots \dots (I.5)$$

Le courant critique est donné par:

$$i_{\alpha} = \frac{n}{n+1} \frac{V}{R(\alpha)} \dots \dots \dots (I.6)$$

La longueur critique de l'arc est donnée par:

$$x_c = \frac{n^n}{(n+1)^{n+1}} \frac{1}{N} \frac{V^{n+1}}{R^n(x)} \dots \dots \dots (I.7)$$

La tension minimale nécessaire pour entretenir un arc de longueur x a pour expression:

$$V_{\alpha} = (n+1)(n^{-n} \cdot N \cdot x \cdot R^n(x))^{\frac{1}{n+1}} \dots \dots \dots (I.8)$$

Plusieurs travaux ont montré que [5]:

$$0.45 \leq n \leq 1.30 \leq N \leq 200.$$

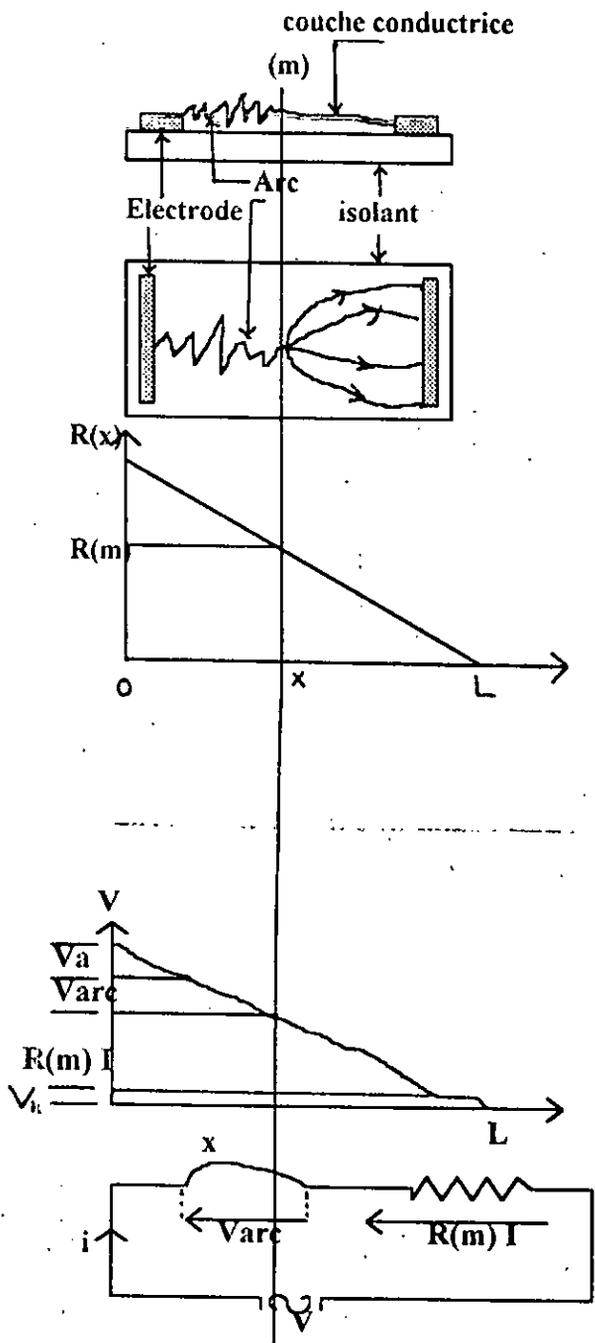


Fig.1.2. Circuit électrique utilisé pour l'étude du développement de l'arc[7].

- NEUMRKER [9]:

A partir du modèle d'Obénaus, ce chercheur a fait l'hypothèse supplémentaire d'une résistance de pollution uniforme par unité de longueur de fuite, soit:

$$R(x) = r(L-x) \dots\dots\dots (1.9)$$

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

Ainsi la tension minimale nécessaire pour entretenir l'arc est liée, en fait, aux paramètres fondamentaux par l'expression suivante :

$$\frac{Nn}{r} \left(\frac{V_{cx}}{(1+n)NL} \right)^{\frac{n}{n+1}} = \left(\frac{x}{L} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{x}{L} \right)^{\frac{n+1}{n}} \dots (I.10)$$

La tension critique peut s'écrire:

$$V_c = L(Nn^n)^{\frac{1}{n+1}} \dots \dots \dots (I.11)$$

La longueur critique de l'arc est donnée par:

$$x_c = \frac{1}{n+1} L \dots \dots \dots (I.12)$$

Le courant critique i_c a été défini par Neumârker comme étant égal à:

$$i_c = \left(\frac{N}{r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \dots \dots \dots (I.13)$$

Il est intéressant de noter que le courant critique ainsi obtenu est indépendant de la distance de fuite [5].

- ALSTON et ZOLEDZLOWSKI [10]:

En tenant compte de l'hypothèse de Neumârker (relation (I. 9)) et en négligeant la chute de tensin cumulée aux électrodes, qui est de l'ordre de 600 V [5], Alston et Zoledziowski ont trouvé pour un isolateur cylindrique de longueur "L", (Fig. I3) que la tension minimale nécessaire pour entretenir un arc est telle que [3]:

$$V_{cx} = (n+1) \left(Nx \right)^{\frac{1}{n+1}} \left(r \frac{L-x}{n} \right)^{\frac{n}{n+1}} \dots (I.14)$$

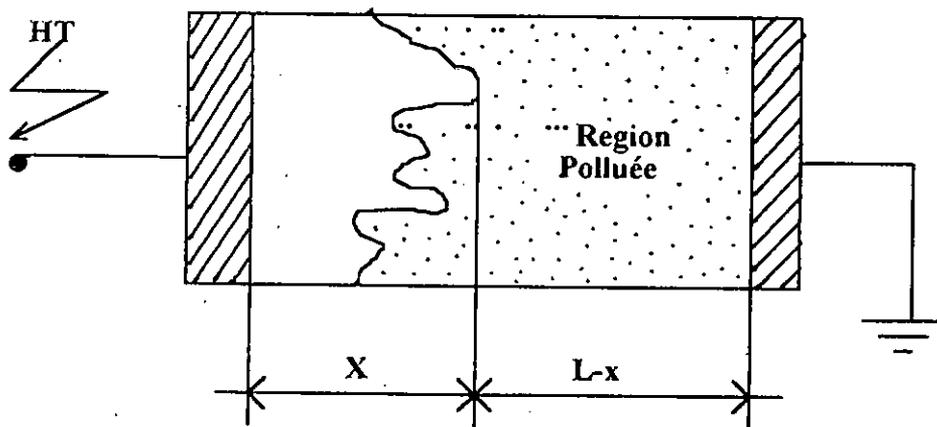


Fig. I. 3. Modèle cylindrique utilisée par Alston et Zoledziowski [10].

Ils ont proposé un schéma (Fig. I. 4) qui illustre le concept de tension critique, d'où ils ont tiré la conclusion suivante:

Lorsque la tension de maintien de l'arc V_{cx} est inférieure à la tension critique V_c , il y a deux cas:

- 1) $x < x_s$: l'arc pouvait se développer jusqu'à ce que $x = x_s$ mais pas d'avantage.
- 2) $x > x_s$: tout accroissement de x aurait pour effet de réduire V_{cx} , et celui-ci pourrait se développer jusqu'au contournement.

Les résultats de ce modèle coïncident bien avec ceux obtenus par Neumärker [9].

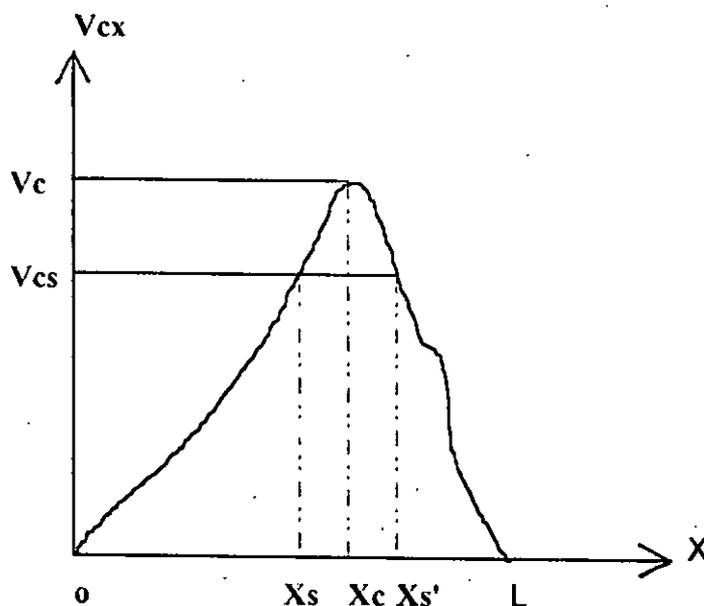


Fig. I. 4. Dépendance de la tension critique nécessaire au maintien d'un arc en régime continu sur la longueur d'arc selon Alston et Zoledziowski [10].

- J. DANIS [11]:

Il a utilisé un modèle de forme géométrique simple (plaque ou cylindre) possédant plus d'une zone sèche (Fig. I. 5.a).

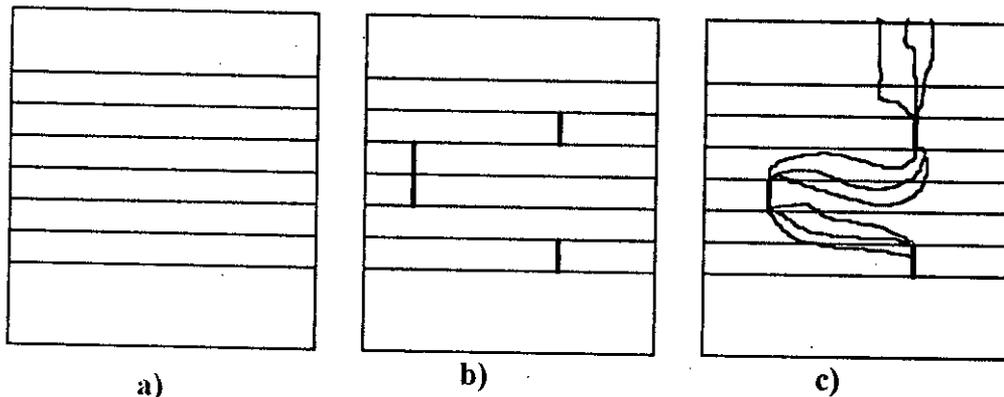


Fig.I.5-Modèle de J.DANIS

La rupture des zones sèches survient d'une manière aléatoire (Fig. I.5.b). L'endroit des arcs partiels, la forme et le mouvement des racines des arcs sur une surface polluée (Fig. I.5.c) sont déterminés par plusieurs facteurs qui les affectent et dont on ne peut déterminer les effets instantanés. Par conséquent, le comportement macroscopique de ces arcs a une nature stochastique [6].

La tension de contournement est donc une variable aléatoire. Une simulation numérique des données, relevées à l'aide de photographies à grande vitesse (3000 images/ seconde), a été utilisée pour calculer cette dernière.

Si on considère que la résistance de la couche polluante est linéaire, l'équation qui régit ce modèle est:

$$V = N i^{-n} + \rho(L-x)i \dots \dots \dots (I.15)$$

où ρ étant la résistance spécifique, $n \geq 0.5$ et $200 \leq N \leq 400$.

Cette équation n'est plus valable lorsque l'élongation de l'arc est très rapide [11].

1.3.1.2. CRITERES DE PROPAGATION DE L'ARC:

- HAMPTON [12]: (modèle cylindrique).

A l'issue des essais de contournement effectués sur une colonne d'eau uniforme, Hampton a conclu que la condition nécessaire pour que se produise le contournement est que le gradient de tension dans la colonne d'eau dépasse celui de l'arc, qui peut s'écrire:

$$E_a < E_p \dots\dots\dots (I. 16).$$

- HESKETCH [13]:

Il a généralisé le critère de Hampton en formulant l'hypothèse que l'arc en série avec la couche de pollution mouillée se modifie automatiquement de façon à rendre maximal le courant qu'il tire de la source d'alimentation.

On peut donc réécrire le critère de contournement sous la forme suivante :

$$di/dx > 0 \dots\dots\dots (I.17)$$

- WILKINS et AL-BAGHDADI [14]:

Ces deux auteurs ont développé le critère de Hesketch, en montrant que si l'arc se développe par ionisation progressive à partir de sa base, l'effet de la couche mouillée de chantage durant le processus de transition, conduit à un accroissement du courant critique, prenant la forme suivante [5]:

$$i_c = (n)^{\frac{1}{n+1}} \left(1 + \frac{1}{n}\right) \left(\frac{N}{r}\right)^{n+1} \dots\dots\dots (I.18)$$

1.3.1.3. AMELIORATION DES MODELES EN COURANT CONTINU

Plusieurs tentatives ont été faites en vue d'améliorer les modèles précédents. Elles visaient à permettre d'utiliser les modèles continus pour expliquer, les résultats d'essais de contournement en courant alternatif.

I.3.1.3.1. Modèle de la couche mixte:

Pour une couche de pollution mixte; cas d'un isolateur à long fût, Obenaus et Boehme[14] ont considéré que celle-ci est équivalente à deux couches résistantes en série, de résistance linéique r_1 et r_2 , et correspondant respectivement à la tige et aux ailettes comme le montre la figure (I.6). En outre, ils ont décomposé la longueur totale de fuite en deux distances partielles L_1 et L_2 respectivement.

L'application du critère de Hampton (relation I.16), leur a permis de déduire la relation ci-dessous donnant le gardien de contournement critique

$$\frac{V_c}{L} = 0.8 \sqrt{N \cdot r} \dots \dots \dots (I.19)$$

pour $N = 80$ VA/cm, le modèle concorde bien avec les résultats d'essais obtenus en régime alternatif pour les couches polluantes de faible résistivité [5].

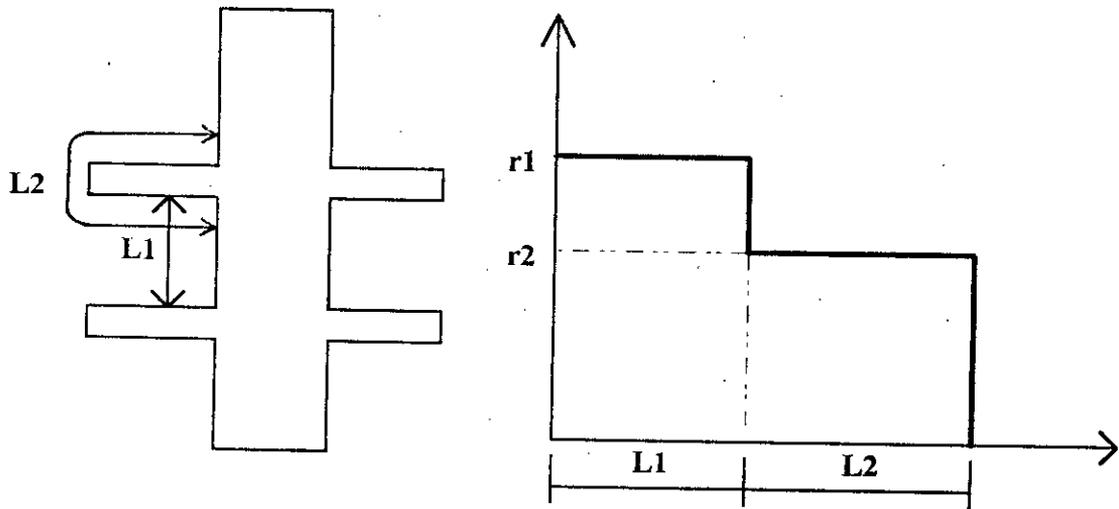


Fig. I.6. Modèle d'un isolateur à long fût et distribution de la résistance de pollution selon Boehme et Obénaus [14].

En appliquant le critère de Hesketh, l'expression précédente devient [3]:

$$\frac{V_c}{L} = 0.8(L \cdot r \cdot i) \dots \dots \dots (I.20)$$

où r étant la résistance linéaire sur une longueur partielle de fuite L_1 ou L_2 .

Cependant Rahal et Huraux [15] ont proposé un modèle (Fig. 1.7), dont le schéma électrique équivalent est le même que celui donné au paravant (Fig. 1.2).

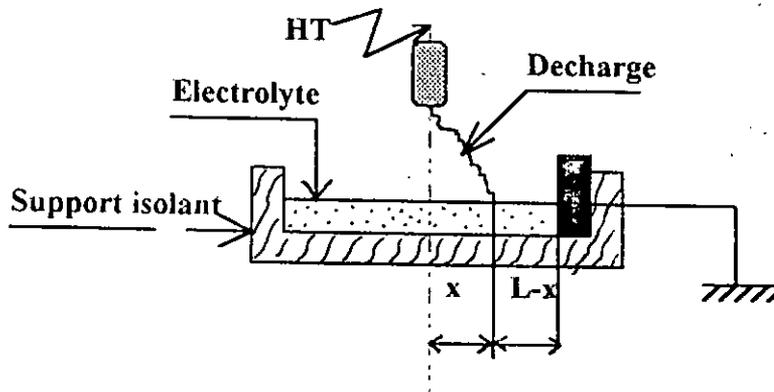


Fig. 1.7. Modèle de laboratoire d'après Rahal et Huraux [1].

L'application du critère de Hampton leur a permis de constater une divergence entre les valeurs mesurées et celles calculées. Ce désaccord peut être interprété par l'existence d'une perturbation qui peut, à priori, être engendrée par trois phénomènes:

- élévation locale de température due à la décharge.
- construction des lignes de courant dans l'électrolyte au voisinage de la décharge.
- existence éventuelle d'une charge d'espace dans l'électrolyte, dans cette même zone de construction.

Ils ont constaté, en outre l'existence d'une force électrostatique quelle que soit la tension appliquée. Quand les conditions critiques sont satisfaisantes, cette force peut tirer la décharge pendant le processus de propagation.

Cependant le mécanisme microscopique de l'action de cette force reste jusqu'à maintenant mal connu [15].

1.3.1.3.2. Modèle du disque circulaire:

Woodson et McElroy [16] ont essayé de reproduire, d'une façon idéale, la surface d'un isolateur par une configuration géométrique circulaire (Fig. 1.8).

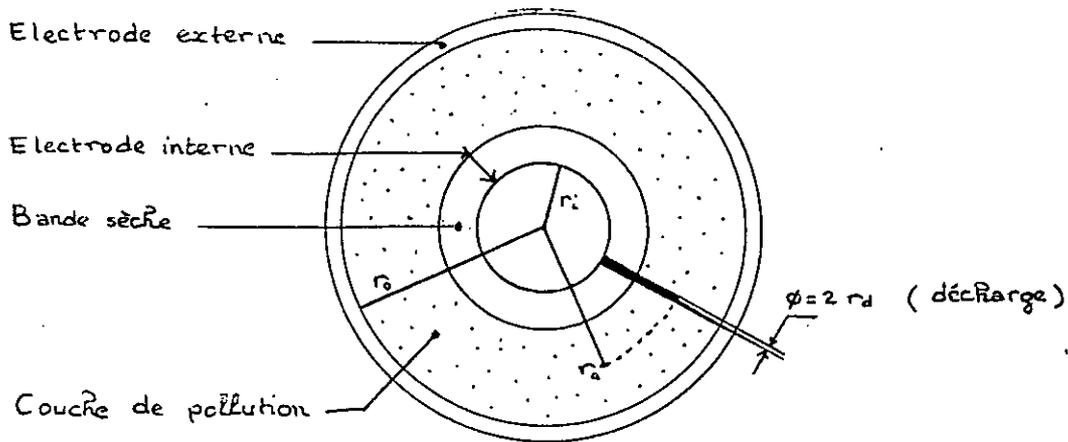


Fig.1.8.-Modèle de disque circulaire selon Woodson & Mc Elroy[16]

La résistance superficielle de la couche de pollution humide, pour n'importe quelle position(r_a) du point de départ de l'arc de rayon r_d , peut s'exprimer par une fonction de la forme:

$$R(x) = 1/\gamma f(r_d, r_a, r_0) \dots\dots\dots(1.21)$$

où r_0 est le rayon de l'électrode externe et γ est la conductivité superficielle du polluant.

Si l'on néglige la dépendance de la fonction f vis-à-vis du rayon de l'arc r_d , on obtient une expression encore plus simple ayant la forme:

$$R(x) = \frac{Const}{\gamma} (r_0 - r_a)^m \dots\dots\dots(1.22)$$

La constante a été ensuite déterminée expérimentalement pour $R(x) = 1.6 \cdot 10^{-2} \Omega$ et la valeur obtenue était 1.4.

Woodson et McElroy ont utilisé avec assez peu de succès le modèle continu, avec $n = 0.8$ et $N = 200$ comme valeurs pour les paramètres de la caractéristique statique de l'arc, afin de donner une interprétation à des résultats d'essai de contournement en régime alternatif [5].

Ils ont imputé l'absence de concordance entre la théorie et l'expérience à la non-uniformité de la conductivité superficielle sur l'isolateur [5].

I.3.1.3.3. Concentration du courant au niveau des points formant la base de l'arc:

Näcke [17], a proposé l'hypothèse que les points formant la base de l'arc forment des demi-cercles aux limites des bandes sèches (Fig. I.9.a). Il a divisé la résistance de pollution en deux termes.

Une résistance interne $R_i(x)$ propre aux deux demi-cercles, et une résistance externe $R_e(x)$ pour le reste. Dans le cas de la résistance interne, le résultat de Näcke pourrait s'écrire sous la forme:

$$R_i(x) = \frac{1}{\pi \gamma} \dots \dots \dots (I.23)$$

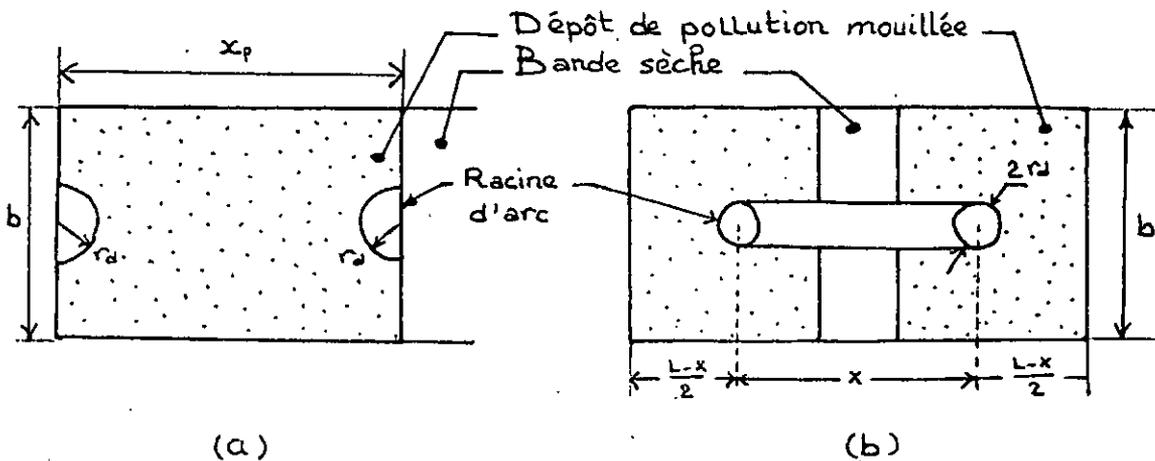


Fig.I.9. - Schémas pour le calcul de la résistance de pollution selon: (a) Näcke [17], (b) Wilkins [18].

La forme de l'expression traduisant la résistance $R_e(x)$ dépend de la largeur de la bande[5]:

* pour une largeur de bande étroite :

$$\frac{x_p}{b} \geq \frac{2}{\pi} \Rightarrow R_e(x) = r \cdot x_p + \frac{2}{\pi \gamma} \ln\left(\frac{b}{2\pi r_d}\right) \quad (I.24)$$

où $r = xp/b$ est la résistance linéaire de la pollution.

xp est la longueur de la couche polluée (mouillée) dans les conditions critiques

b largeur de la surface de l'isolateur.

rd est le rayon de base de l'arc.

* pour une bande large, Nâcke a obtenu deux expressions, l'une pour des isolateurs à une seule ailette, et l'autre pour des isolateurs à ailettes multiples.

- pour un isolateur à ailette unique.

$$R_e(x) = \frac{2}{\pi\gamma} \left[0.68 + \ln\left(\frac{xp}{rd}\right) \right] \quad (1.25)$$

- pour un isolateur à ailettes multiples: pour chacune des ailettes.

$$R_e(x) = \frac{2}{\pi\gamma} \left[0.30 + \ln\left(\frac{xp}{rd}\right) \right] \quad (1.26)$$

La résistance de pollution totale est:

$$R(x) = R_i(x) + R_e(x) \quad (1.27)$$

Wilkins [18] a obtenu pour le même modèle (Fig. 1.9.b)

* dans le cas de la bande étroite:

$$R(x) = r(L-x) + \frac{1}{\pi\gamma} \ln\left(\frac{b}{2\pi rd}\right) \quad (1.28)$$

* dans le cas d'une bande large:

$$R(x) = \frac{1}{\pi\gamma} \left[\ln\left(\frac{2L}{\pi rd}\right) - \ln\left(\tan\left(\frac{\pi x}{L}\right)\right) \right] \quad (1.29)$$

où x est la longueur de l'arc, et L est la distance totale de fuite de l'isolateur.

Nâcke et Wilkins ont introduit des facteurs de températures importants pour faire baisser la résistivité de la couche de pollution et obtenir à partir du modèle continu,

une tension de contournement qui concorde de façon acceptable avec les résultats des essais alternatifs [5].

I.3.2 Modèle à courant alternatif:

Les modèles à courant alternatif développés, afin d'étudier un contournement engendré par la pollution des isolateurs, peuvent être classés en deux catégories: Modèles théoriques et Modèles expérimentaux. chacune de ces deux catégories a ses propres caractéristiques [4].

I.3.2.1. Modèles théoriques:

En courant alternatif, l'arc s'éteint deux fois par période à chaque fois que le courant s'annule. Le réallumage de l'arc à la suite de l'annulation du courant se fait en deux phases [5].

(1) - rupture de l'équilibre énergétique:

Il y a rupture énergétique lorsque l'espace où se maintient l'arc résiduel ne parvient plus à dissiper l'énergie injectée dans la décharge. Ce type de rupture se produit immédiatement après l'annulation du courant et s'accompagne d'une croissance très rapide de la tension de rétablissement.

(2) - rupture diélectrique:

Elle intervient, après que l'espace résiduel a perdu sa résistivité électrique, c'est à dire dès lors qu'on peut le traiter comme un gaz chaud [5]. Cette deuxième phase de réallumage se produit donc lorsque la valeur instantanée de la tension de rétablissement dépasse la rigidité diélectrique de l'air [5].

I.3.2.1.1. Modèle par rupture énergétique:

En se basant sur l'équation de Mayr [19], pour un courant sinusoïdal, Maikopar [20] a obtenu la relation suivante:

$$\frac{R_m(x)}{R_0(x)} = \frac{2\omega^2\theta^2}{1+2\omega^2\theta^2} \quad (I.30)$$

où R_m est la résistance d'arc résiduel, au passage du courant par son maximum.

R_0 est la résistance d'arc résiduel, au passage du courant par zero.

θ est la constante de temps de l'arc de l'équation de Mayr.

ω est la pulsation de la tension d'alimentation.

Pour la constante de temps θ , l'arc dynamique présente une perte de puissance constante N_0 , de la caractéristique statique de Mayr ($N = N_0$ et $n = 1$), Maikopar a choisi deux ensembles de valeurs:

(θ_1, N_{01}) pour la période précédant l'annulation du courant.

(θ_2, N_{02}) pour la période lui faisant suite.

Comme Browne [21], Maikopar a obtenu la condition critique suivante pour la rupture énergétique:

$$V_{\alpha}^2 = D \cdot N_{02} \cdot R_m(x) \cdot x \quad (I.31)$$

où D est une constante représentant la diffusivité thermique, x la longueur de l'arc, N_{02} la puissance linéique pour la période suivant l'annulation du courant, et V_{α} la tension critique nécessaire pour l'entretien d'un arc de courant crête I .

Ainsi, la tension critique est liée au courant crête par la relation suivante:

$$V_{\alpha} = \frac{xN_{02}}{I} \sqrt{\frac{(1+4\omega^2\theta_1^2)(1+4\omega^2\theta_2^2)}{(2\omega^2\theta_1^2)(2\omega^2\theta_2^2)}} \quad (I.32)$$

1.3.2.1.2. Modèle par rupture diélectrique:

Le modèle le plus représentatif est celui de Risk [22] qui suppose que la conductance électrique de l'arc résiduel, au moment de l'annulation du courant, est négligeable dans le cas d'un arc en série avec une résistance de pollution uniforme.

Risk a obtenu la relation suivante:

$$\frac{V_{\alpha}}{L} = \frac{x}{L} E_{da} f(I_m) = \frac{xN}{Li^n} + (1 - \frac{x}{L})r I_m \quad (I.33)$$

où L est la longueur de la ligne de fuite totale de l'isolateur.

- n et N sont des constantes de la caractéristique statique.
 Eda est le gradient disruptif à la température ambiante.
 r est la résistance linéique moyenne de la couche de pollution.
 Im est la valeur crête du courant alternatif.

A partir des graphiques donnant V_c en fonction de X/L pour différentes valeurs de r, la tension minimale V_c nécessaire pour entretenir un arc prend la forme suivante:

$$\frac{V_c}{L} = 23 r^{0.4} \frac{V_{PEAK}}{cm} \quad (I.34)$$

I.3.2.2. Modèles expérimentaux:

Ces modèles ne sont pas liées à un mécanisme physique particulier d'entretien d'arc alternatif (rupture énergétique et diélectrique), ils sont établis exclusivement à partir des résultats expérimentaux.

* Hurley et Limbourn [23], ont fondé leur modèle sur une relation empirique donnant la tension minimale nécessaire pour l'entretien d'un arc alternatif dans un espace entre deux tiges, de longueur x, en série avec une résistance R(x) cette expression est la suivante:

$$V_c = Const \cdot x^{2/3} R(x)^{1/3} \quad (I.35)$$

La tension critique de contournement a la forme suivante:

$$V_c = Const \cdot \left(\frac{L \cdot L_a}{r} \right)^{1/3} \quad (I.36)$$

où L est la longueur minimale de l'arc.

* Claverie et Porcheron [2], ont trouvé pour un modèle plan recouvert d'une couche continue de pollution (Fig. I.10) l'expression empirique, donnant la tension d'entretien d'un arc de longueur x, pour un courant de fuite i, qui est la suivante:

$$V_c = \frac{800 x}{\sqrt{i}} \quad (I.37)$$

La tension de contournement a la forme suivante:

$$V_c = 90(x_c^2 \cdot R(x))^{1/3} \quad (I.38)$$

où $R(x)$ s'exprime par une relation de la forme:

$$r(x) = \rho \cdot F(x) \quad (I.39)$$

où ρ est la résistivité superficielle de la couche de pollution. $F(x)$ est la fonction de répartition de la couche polluante x_c est la longueur critique de l'arc, qui est racine de l'équation:

$$\frac{d}{dx}[x^2 F(x)] = 0 \quad (I.40)$$

Claverie et Porcheron ont trouvé pour un modèle linéaire, les résultats suivants:

$$x_c = \frac{2}{3} L \quad (I.41)$$

pour la longueur critique de l'arc. et :

$$V_c = 47.6 \cdot r^{1/3} \cdot L \quad (I.42)$$

pour la tension critique de contournement.

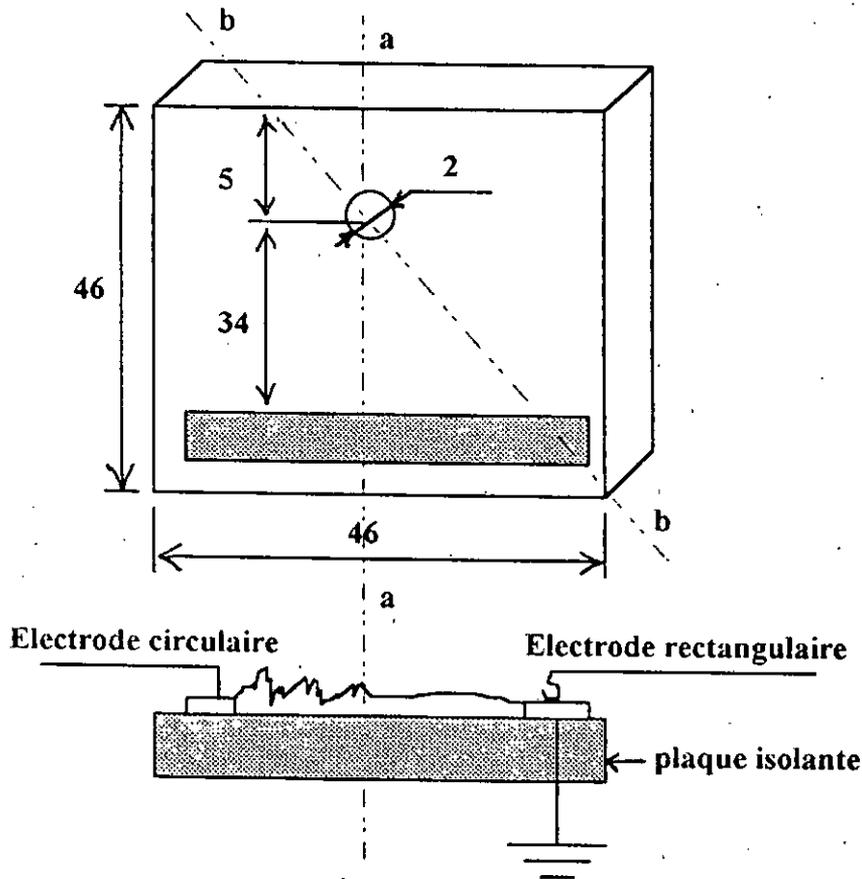


Fig.1.10 Modèle plan selon CLAVERIE et PORCHERON [2].

1.4. VITESSE DE PROPAGATION DE L'ARC:

Etant donné le peu de connaissance précises que nous avons du mécanisme de propagation de l'arc, et de la complexité du phénomène, il y a quelques chercheurs qui ont entamé ce problème dans leurs publications, parmi ces auteurs on a:

* Boehme et Obenaus [14] ont abordé de façon indirecte ce problème en faisant l'hypothèse que dans un circuit continu l'arc se déplace de façon à maximiser le taux de variation du courant par rapport au temps [5].

$$di/dt = \text{Max} \tag{1.43}$$

Ils ont obtenu une relation qui permet de calculer la vitesse de propagation de l'arc (dx / dt) pour n'importe quelle valeur du courant i et du temps t , cette relation est:

$$x N / i^2 = r(L-x) \tag{1.44}$$

* El-Baghdadi [24] a pu établir la formule empirique, qui relie la vitesse de propagation de l'arc au courant i , et à la résistance de pollution r , qui s'écrit:

$$v = 1.54 \cdot 10^{-4} \cdot r^{2.5} (i^4 - i_c^4) \quad [cm / s] \quad (I.45)$$

* Quant à lui Tominaga [25] a fait les hypothèses suivantes:

- La propagation de l'arc résulte de phénomènes de séchage et de rupture se succédant au sein de la couche électrolytique.

- L'effet de séchage intervient dans une zone de longueur égale au rayon de l'arc rd .

- La vitesse de séchage est proportionnelle à l'accroissement de température.

Il a déduit que:

$$v = k [\sigma E^2 - P_0] \quad (I.46)$$

où: k : est un paramètre proportionnel au rayon de l'arc rd .

r : est la conductivité volumique de la couche de pollution.

E : est le champ électrique au voisinage de la naissance de l'arc.

P_0 : étant la densité de puissance minimale, que la croissance de l'arc exige.

* Jolly, Cheng et Otten [26] ont étudié la croissance des arcs à la surface d'un canal d'électrolyte, en faisant l'hypothèse que l'énergie absorbée pour la création d'une nouvelle longueur d'arc et compensée par l'abaissement du potentiel des électrodes à la surface de l'eau, ainsi la vitesse de propagation de l'arc peut s'exprimer par [5]:

$$v = \frac{V_e \cdot i}{Q} \quad (I.47)$$

où: V_e : est la chute de tension aux électrodes.

et Q : est la densité d'énergie linéique de l'arc.

* Huraux et Rahal [1] ont développé le critère de "Hampton" par les hypothèses suivantes:

- le comportement de la décharge est contrôlé par la racine de cette dernière, que ce soit dans les conditions de stabilité ou de propagation.

- la vitesse de propagation de l'arc est proportionnelle à la différence des gradients dans l'électrolyte et dans la colonne de décharge.

d'où ils ont tiré la relation suivante:

$$\frac{dx}{dt} = \mu(E_p - E_a) \quad (I.48)$$

- où E_p : est le gradient dans l'électrolyte.
 E_a : est le gradient dans la décharge.
 μ : est la mobilité.

I.5. OBJET DE NOTRE TRAVAIL:

Au vu des difficultés considérables que présentent les essais sur site, nous avons cherché à reproduire en laboratoire les conditions de la pollution naturelle. Lors du développement de la décharge sur un isolateur contaminé, le lieu, la forme et le mouvement des arcs partiels sont déterminés par plusieurs facteurs.

Or ces facteurs sont dépendants entre eux donc il est impossible de déterminer l'effet instantané de tous ces facteurs, par voie de conséquence le comportement macroscopique de ces arcs a une nature aléatoire, même si toutes les conditions sont en apparence contrôlées[5].

Dans notre étude et afin d'étudier en laboratoire les processus d'apparition et de développement des arcs à fréquence industrielle, nous nous sommes intéressés à faire une approche de l'isolateur réel normalisé <<1512 L>> sous pollution, par un modèle de laboratoire à configuration géométrique simple modèle plan, modèle circulaire, et le modèle cylindrique.

Et faire ensuite une comparaison entre les résultats des différents modèles, pour en déduire le modèle le plus représentatif pour ce type d'isolateur.

DEUXIEME CHAPITRE

ETUDE EXPERIMENTALE

ETUDE EXPERIMENTALE

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la partie expérimentale de notre sujet. Nous y présenterons le circuit d'essais et de mesure, la préparation des modèles expérimentaux, ainsi qu'au mode opératoire.

II - 1 Circuit d'essais:

Pour la mesure du courant de fuite nous avons inséré une résistance de 100Ω , dans le retour de terre. La tension aux bornes de la résistance est recueillie aux bornes d'un oscilloscope à mémoire à l'aide d'un câble coaxial. Afin d'éviter l'influence du champ électrique sur la résistance de mesure, celle-ci a été mise dans une boîte métallique mise à la terre et formant ainsi un écran.

L'équipement actuel de la station d'essais à fréquence industrielle de l'ENP de marque HEAFLY comprend (*Fig. II.1*):

- 1 - Interrupteur de commande.
- 2 - Contacteur de commande.
- 3 - Transformateur de réglage.
- 4 - Transformateur d'isolement.
- 5 - Transformateur d'essais: 0.5 kv / 300 kv (50 kv)
- 6 - Objet d'essai.
- 7 - Pupitre de commande.

Le circuit est représenté dans la figure . 1

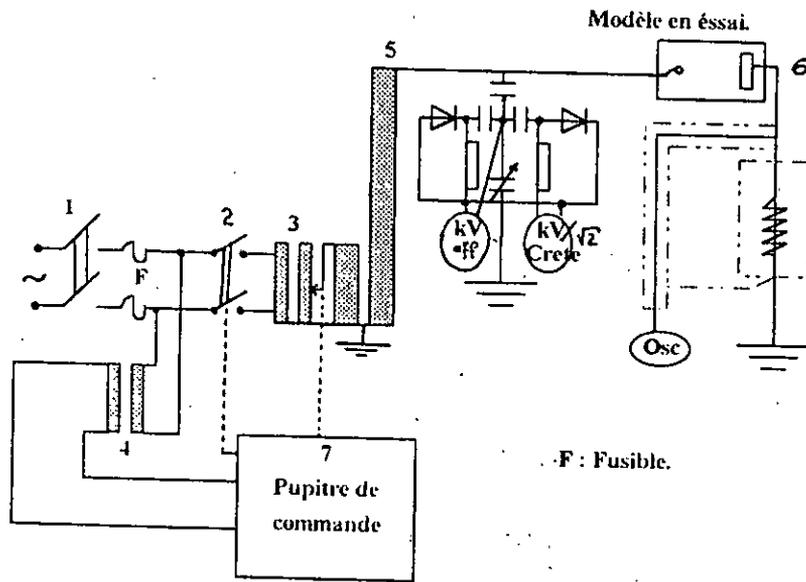


Fig. II.1 Circuit d'essai.

II - 2 Préparation des modèles:

Dans le but d'étudier l'approche d'un isolateur réel par des modèles en laboratoire, nous nous sommes basés principalement sur trois modèles: modèle rectangulaire, modèle cylindrique et modèle circulaire.

Le modèle rectangulaire est constitué par une plaque rectangulaire de verre (50 * 50) cm² et de 6 mm d'épaisseur ayant deux électrodes, l'une rectangulaire reliée à la terre, l'autre circulaire reliée à la haute tension (Fig. II.2.a).

Le modèle cylindrique est un tube en P.V.C (poly-chlorure de vinyle) de 20 cm de diamètre.

Les électrodes sont fixées comme le montre la (figure II.2.b).

Le modèle circulaire est une plaque de verre de 1m de diamètre, les électrodes de haute tension et de terre sont des cercles de diamètre respectivement: r , R (Fig. II.2.c).

Les modèles doivent être initialement bien lavés, puis imbibés d'une façon uniforme en "Gaz-Oil" dans les endroits d'emplacement des électrodes. Celles-ci sont en papier d'aluminum. Cette opération se fait de manière à ce qu'aucun espace d'air ne reste entre la plaque et les électrodes. Par la suite nous essuyons la plaque avec du coton imbibé d'alcool isopropylique pour éliminer toute trace de Gaz-Oil sur la surface isolante.

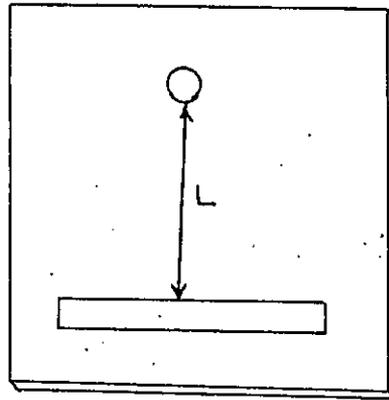


Fig. II. a. - modèle rectangulaire.

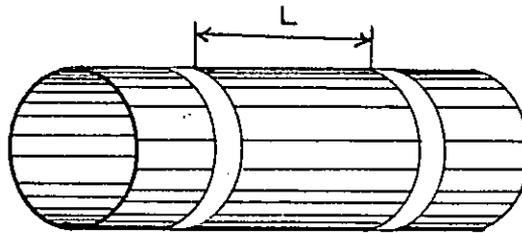


Fig. II. b. - modèle cylindrique.

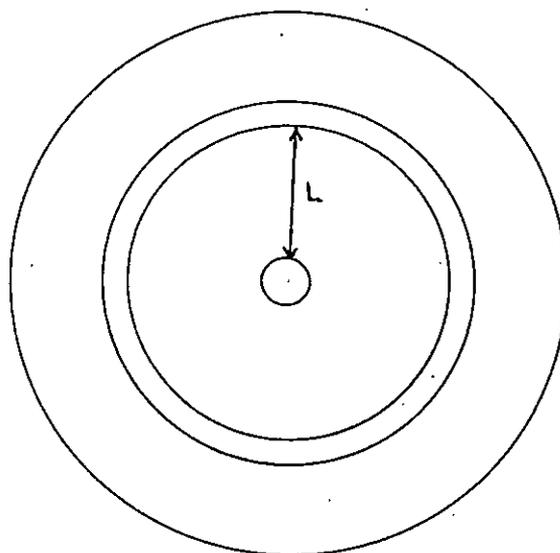


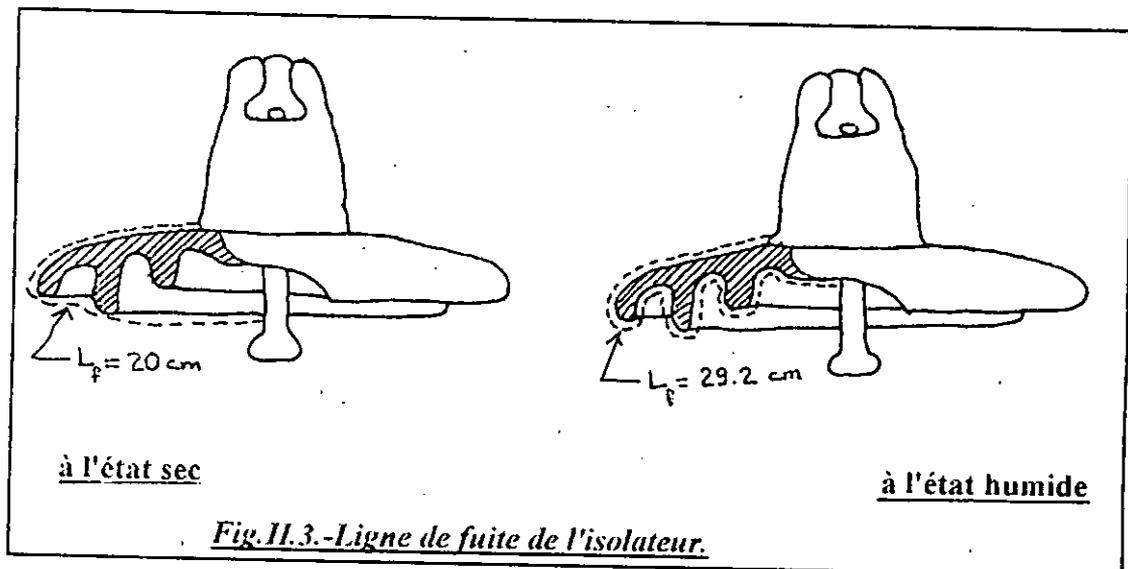
Fig. II. c. - modèle circulaire.

II - 3 - Méthode d'essais:

Les mêmes essais ont été effectués pour les différents modèles. Nous avons commencé d'abord par évaluer la tension de contournement dans chaque cas (dix essais). Ceci a été fait dans les deux cas de figure: cas propre et sec et cas humide. La valeur de contournement considéré représente la valeur moyenne obtenue.

Connaissant cette dernière, nous avons repris les essais en augmentant la tension par échelon, jusqu'à une valeur nettement inférieure à la tension de contournement moyenne.

Pour chaque niveau de tension nous enregistrerons la longueur de l'arc et la valeur du courant de fuite correspondante. Nous avons constaté qu'à l'état sec et propre l'arc électrique ne suit pas la ligne de fuite effective de l'isolateur



Généralement l'arc électrique à l'état sec fait approximativement un parcours de 20 cm de longueur. A l'état humide l'arc suit la couche de pollution donc une longueur de fuite plus importante $L_f = 29.2$ cm (Fig. II.3), qui représente la longueur de fuite de l'isolateur réel.

Pour les différents modèles que nous avons utilisés, les deux longueurs de fuite : [$L_f = 29.2$ cm ; $L_f = 20.0$ cm] ont été considérées.

II - 4 - Application de la couche polluante:

La couche polluante continue est obtenue par pulvérisation d'eau distillée de toute la région interélectrodes. La conductivité de cette couche est: $\gamma = 10.6 \mu\text{s/cm}$. Pour assurer une bonne uniformité de la couche polluante nous avons gardé durant tous les essais la même méthode de pulvérisation.

A défaut d'une caméra ultra-rapide, pour l'enregistrement du développement de l'arc électrique, nous avons utilisé un appareil photographique classique en position *B*. Le modèle expérimental est placé dans une chambre noire, représentée à la (figure II. 4).

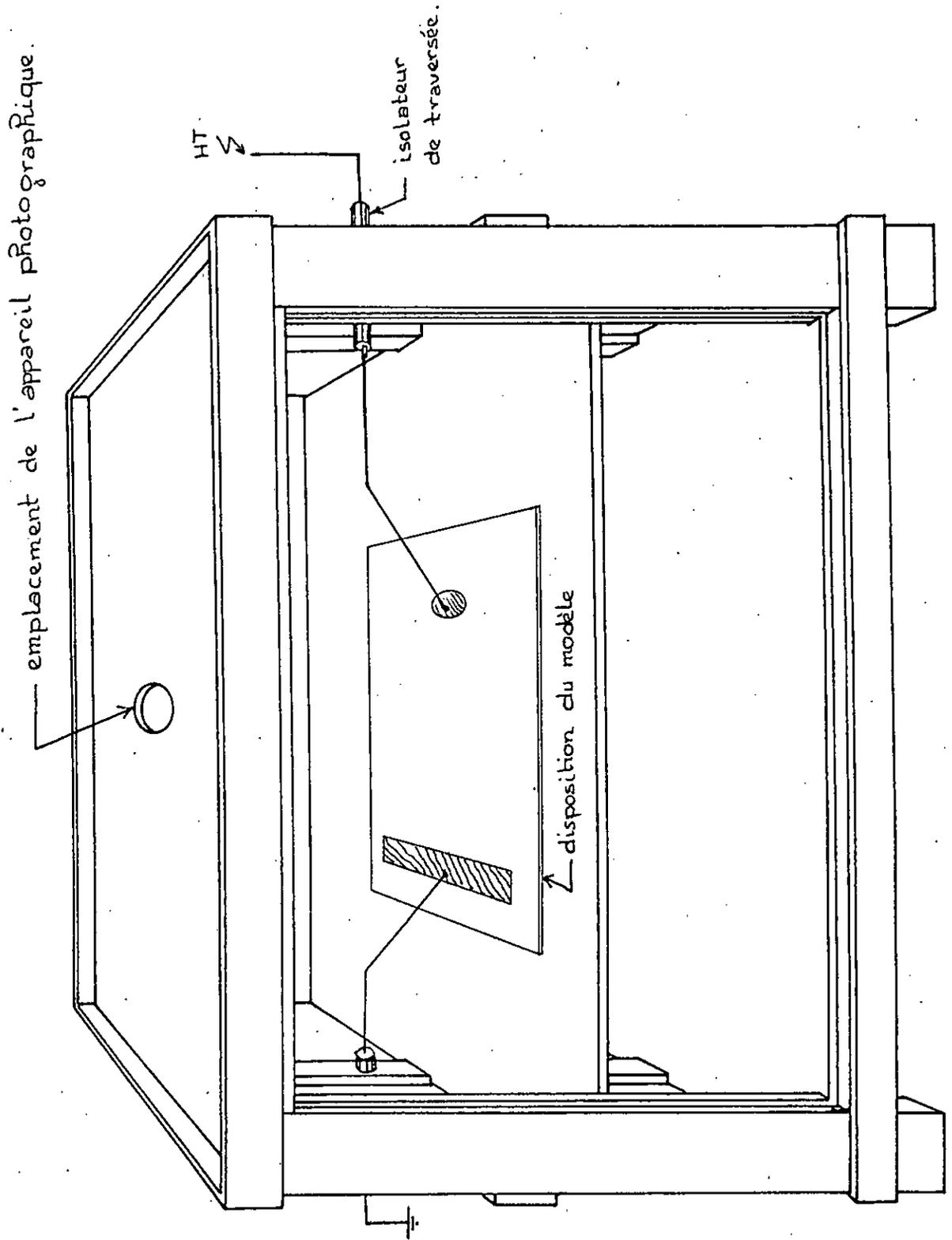


Fig. II.4. - Chambre noire.

TROISIEME CHAPITRE

**RESULTATS
ET INTERPRETATION**

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1. INTRODUCTION :

Nous avons effectué nos essais en utilisant les trois modèles de laboratoire (plan, cylindrique, circulaire) , ainsi qu'un isolateur reel (1512L). Ces essais nous permettent de faire une approche entre l'isolateur reel et les trois modèles de laboratoire.

Observations :

Nous avons constaté que l'application d'une tension de quelques kilovolts entre les électrodes, engendre un courant de conduction sinusoïdal qui croît à mesure que l'électrolyte s'échauffe. Au bout de quelques périodes, l'échauffement est tel que, dans les régions à plus forte densité de courant, autour de l'électrode actif le liquide est vaporisé et une étroite zone sèche apparaît (*Figure.III.1*).

Dés lors, la tension entre l'électrode et le bord de la zone sèche étant à peu près égale à la tension totale appliquée entre les électrodes. Un claquage diélectrique se produit, et un arc s'établit (*Figure.III.2*). Le courant dans le circuit cesse d'être sinusoïdal dès cet instant pour n'être plus constitué que d'impulsions de niveaux variables (Fig.III.3). La forte densité de courant dans la couche au voisinage de la racine d'arc, provoque une évaporation très rapide du liquide. Cette racine tend à se déplacer en direction de l'électrode opposée.

L'arc se réamorçait à chaque alternance, en empruntant tout ou partie du trajet précédemment ionisé, s'allonge en balayant une zone à peu près circulaire qu'il assèche progressivement dans le cas du modèle plan et circulaire; ou se déplace latéralement pour retrouver une position plus stable, avec une dégradation de la surface de l'isolateur pollué (en PVC) dans le cas du modèle cylindrique.

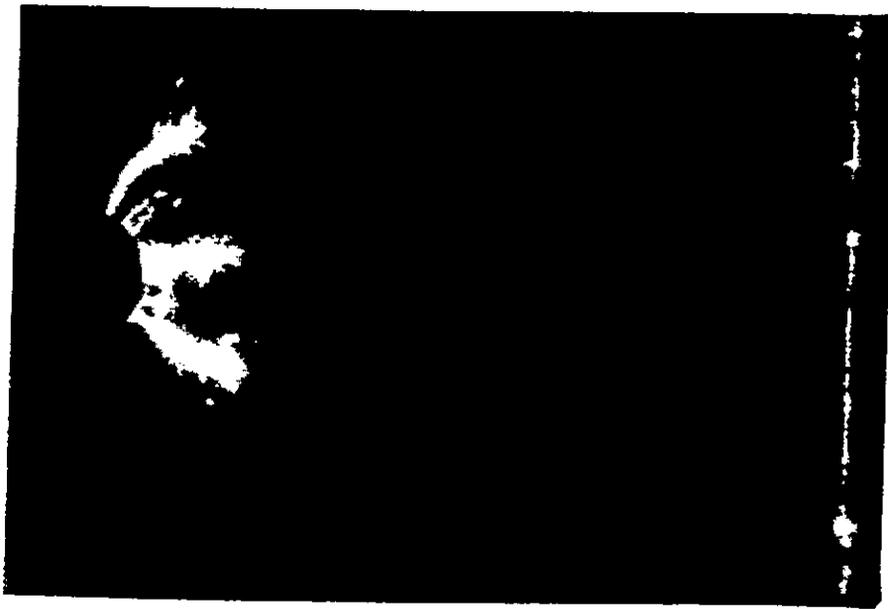


Fig.III.1. - Apparition des zones sèches .

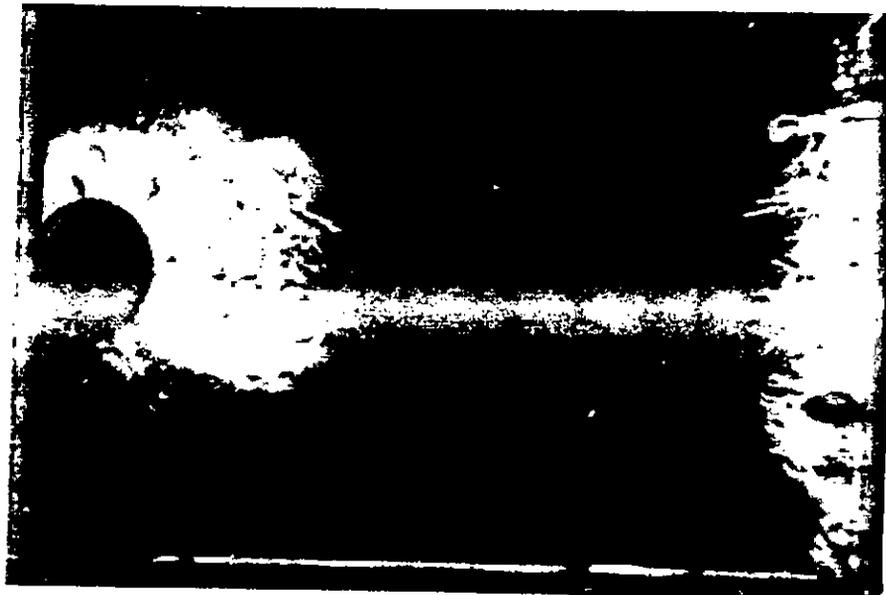


Fig.III.2. - Développement des arcs partiels.

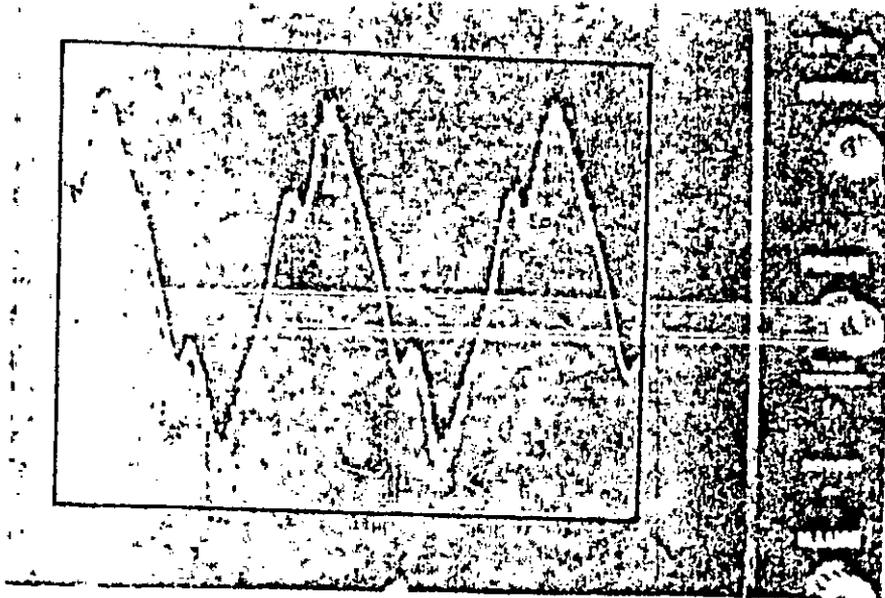


Fig.III.3. - Courant de fuite.

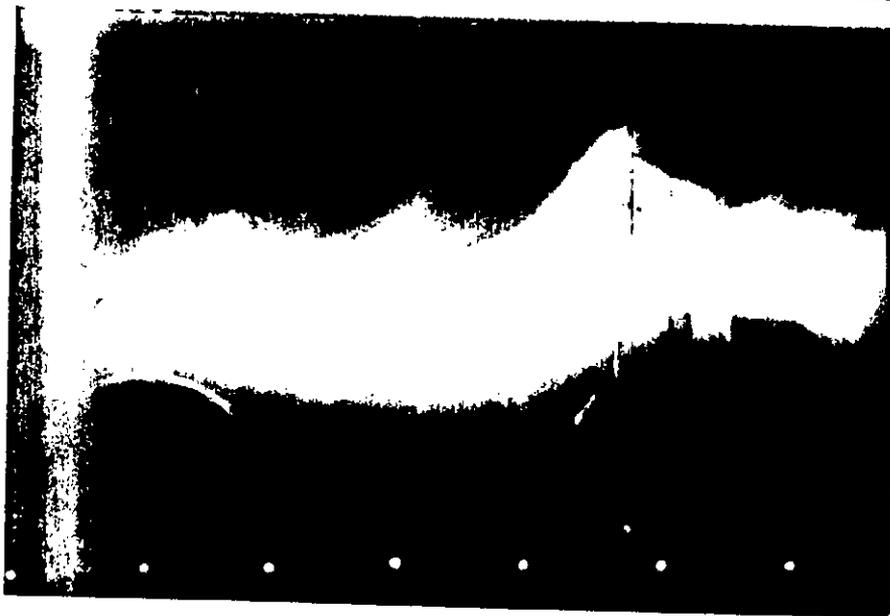


Fig.III.4. - Contournement total.

Cette dégradation est due à l'effet thermique accompagnant le phénomène d'arc électrique. Si à partir du régime stable précédant, la tension est augmentée de quelques kilovolts, les arcs partiels s'allongent, la zone balayée s'étend, puis s'établit à nouveau.

En augmentant ainsi la tension par échelon, on atteint un état critique au-delà duquel, toute augmentation de tension provoque immédiatement le contournement par développement brusque d'un arc partiel (*Figure.III.4*).

III.2 : RESULTATS D'ESSAIS

Les principaux résultats expérimentaux que nous avons obtenu, en utilisant tout au long des essais la même conductivité de la couche polluante [$\gamma = 10.6 \mu S/cm$], sont présentés dans ce qui suit :

III.2.1 : La tension moyenne de contournement :

Au vu de la nature aléatoire du phénomène de contournement nous avons effectué plusieurs mesures de la tension de contournement pour apprécier la valeur moyenne V_{cmoy} , pour chaque état de surface considérée (sec, propre et humidifiée).

A)- Etat sec et propre :

Les mesures sont présentées dans les tableaux suivant :

* Distance entre-électrodes ($L = 29.2 \text{ cm}$).

ISOLATEUR	Réel	Plan	Circulaire	Cylindrique
V_{cmoy} [kVeff]	70	102	94	96

Tableau .III.1.- V_{cmoy} à l'état sec et propre ($L = 29,2 \text{ cm}$)

** Distances entre-électrodes : ($L = 20.0 \text{ cm}$).

MODELE	Plan	Circulaire	Cylindrique
V_{cmoy} [kVeff]	72	70	74

Tableau .III.2.- V_{cmoy} à l'état sec et propre ($L = 20 \text{ cm}$)

B)- Etat humidifié :

* Distance entre-électrodes : ($L=29.2$ cm).

ISOLATEUR	Réel	Olan	Circulaire	Cylindrique
Vcmoy [kVeff]	48	51	61	43

Tableau .III.3.- Vcmoy à l'état humidifié ($L = 29,2$ cm)

** Distance entre-électrodes ($L=20$ cm).

ISOLATEUR	Plan	Circulaire	Cylindrique
Vcmoy [kVeff]	42	51	70

Tableau .III.4.- Vcmoy à l'état humidifié ($L = 20$ cm)

III.2.2 : CORRELATION ENTRE COURANT DE FUITE, TENSION DE CONTOURNEMENT ET LONGUEUR D'ARC :

Les résultats d'essais sont présentés dans les tableaux (.III.5) et (.III.6) à partir desquels nous avons tracé les caractéristiques : $i(V)$, $x(V)$, $i(x)$ pour chaque modèle.

* Distance entre-électrodes ($L=29.2$ cm) :

Isolateur V[kVeff]	Réel	Plan		Circulaire		Cylindrique	
	I [mA]	I [mA]	X [cm]	I [mA]	X [mA]	I [mA]	X [cm]
5	/	/	/	/	/	0,09	/
10	0,9	0,12	1,58	0,19	/	0,11	0,24
15	1,35	0,49	4,45	0,42	0,80	0,19	/
20	2,60	2,00	9,52	0,65	0,95	0,22	1,70
25	4,00	3,50	10,48	1,00	1,00	0,30	2,19
30	4,40	4,20		1,40	1,22	/	/

Tableau .III.5.- Valeurs de V, I, X pour ($L = 29,2$ cm)

**** Distance entre-électrodes : (L= 20.0 cm) :**

Modèle	Plan		Circulaire		Cylindrique	
	V[kVeff]	I[mA]	X[cm]	I[mA]	X[cm]	I[mA]
5	0,11	/	0,04	1,22	/	/
10	0,18	/	0,35	/	0,14	0,70
15	0,44	/	0,58	1,95	0,16	2,03
20	0,63	/	0,95	3,66	0,95	10,48
25	2,50	0,49	1,80	6,10	1,48	11,02
30	4,60	2,44	/	/	2,20	11,71

Tableau .III.6.- Valeurs de V, I, X pour (L = 20 cm)

III.3.DISCUSSIONS :

III.3.1 Tension de contournement :

Quelque soit le modèle considéré, nous remarquons que V_c -moy pour (L=20 cm) est nettement plus inférieure à V_c -moy pour (L=29.2 cm), Donc la tension de contournement diminue lorsque la ligne de fuite totale de l'isolateur diminue.

*** Distance entre-électrodes (L=29.2):**

A partir des tableaux (III.1) et (III.3), nous pouvons constater que la tension moyenne de contournement à l'état sec et propre, pour les modèles circulaires est la plus proches de l'isolateur réel. Cependant, à l'état humidifié, c'est le modèle plan qui est le plus proche de l'isolateur réel.

**** Distances entre-électrodes (L=20.0 cm) :**

V_c -moy pour les trois modèles (Tableau III.2) à l'état propre et sec, sont très proches de V_c -moy à l'état propre et sec de l'isolateur réel (L=29.2 cm) (Tableau III.1). Cela est dû au fait que lorsque l'isolateur est propre et sec, l'arc électrique suit le trajet le plus court dans l'air qui est d'environ 20.0 cm, ce qui le rapproche à un modèle expérimental ayant 20.0 cm comme longueur de fuite totale.

le trajet le plus court dans l'air qui est d'environ 20.0 cm, ce qui le rapproche à un modele experimental ayant 20.0 cm comme longueur de fuite totale.

En général, la tension de contournement moyenne à l'état humidifiée est approximativement égale à la moitié de celle de l'état propre et sec, quelque soit la longueur de la ligne de fuite ($L=29.2$ cm ou $L=20.0$ cm).

III.3.2 : CARRACTERISTIQUES :

A)-Caractéristique courant-tension $I(V)$: [Fig.III.5]

Ces caractéristiques montrent que l'augmentation de la tension entraîne l'augmentation du courant de fuite, quelque soit le modèle considéré. Pour les niveaux tension (5÷10) kV, les caractéristiques $I(V)$ pour les trois modèles se rapprochent, alors qu'elles divergent pour des niveaux de tension plus élevés.

Pour ce dernier cas, plus intéressant, nous remarquons que le modèle plan se rapproche mieux de l'isolateur réel par rapport aux autres modèles étudiés qui représentent des courants de fuite plus faibles pour un même niveau de tension.

B)-Caractéristique courant-longueur $I(X)$: [Fig.III.6]

Pour ces caractéristiques, nous remarquons que toute augmentation du courant de fuite provoque un allongement de l'arc électrique. Aussi, pour une même valeur du courant de fuite, la longueur de l'arc électrique dans le cas du modèle circulaire est plus faible que dans le modèle plan et cylindrique.

C)- Caractéristique longueur d'arc-tension $X(V)$: [Fig III.7]

Nous constatons pour ces caractéristiques que toute augmentation de la tension provoque une augmentation de la longueur d'arc. Les caractéristiques $x(V)$ pour les trois modèles se rapprochent pour les bas niveaux de tension, et divergent pour des niveaux de tension élevés.

Le modèle circulaire présente un arc de longueur plus importante que le modèle cylindrique, pour des niveaux de tension inférieurs à 15 kV, mais pour des niveaux de tension supérieurs à 15 kV, la longueur de l'arc du modèle circulaire est plus faible que celle du modèle cylindrique.

Au vu de ces caractéristiques, nous pouvons dire que le modèle plan est celui qui se rapproche le plus du modèle réel utilisé (1512L). Ceci en se basant uniquement sur les caractéristiques $I(V)$. En effet, le développement de l'arc électrique sur l'isolateur réel, dont le profil est le plus complexes, n'a pas pu être enregistré lors de nos essais. Néanmoins, des travaux antérieurs [33],[34] justifient ce résultat.

Par ailleurs, nous constatons que le développement de l'arc électrique est plus favorable dans le cas du modèle plan [*Figure.III.7*].

Enfin, pour la longueur de la ligne de fuite ($L=20.0$ cm), les caractéristiques $I(X)$ et $x(V)$ [*Figure.III.8,9*] ne concordent pas rigoureusement avec les caractéristiques obtenues pour ($L=29.2$ cm), car le modèle plan n'a pas donné des bonnes résultats obtenus pour ($L=20.0$ cm), ceci peut être expliqué par le fait qu'on ne peut pas reproduire manuellement la même pulvérisation avec exactitude pour chaque longueur de fuite.

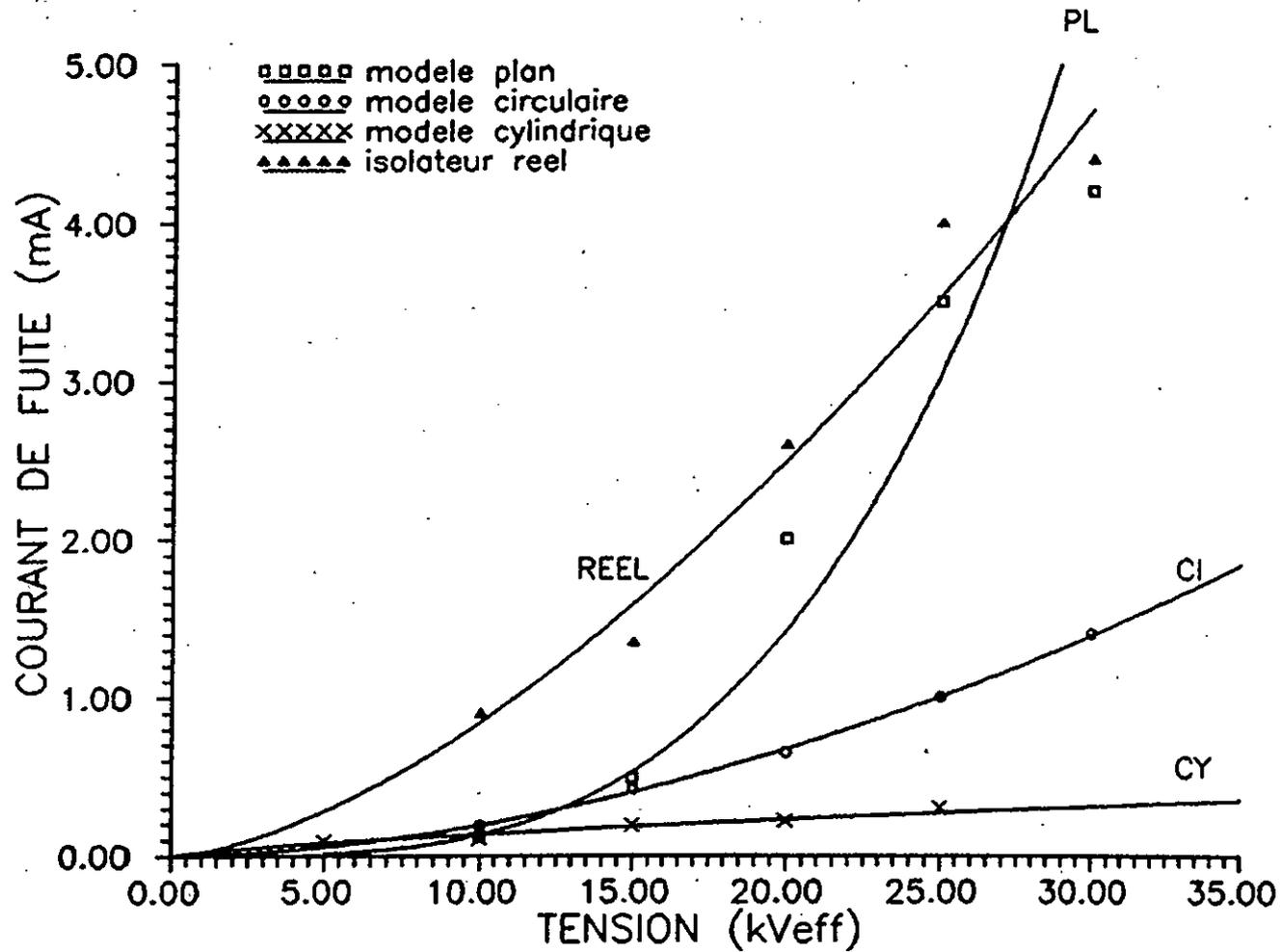


Fig.III.5.— Variation du courant de fuite en fonction de la tension pour les trois modeles (L=29.2 cm).

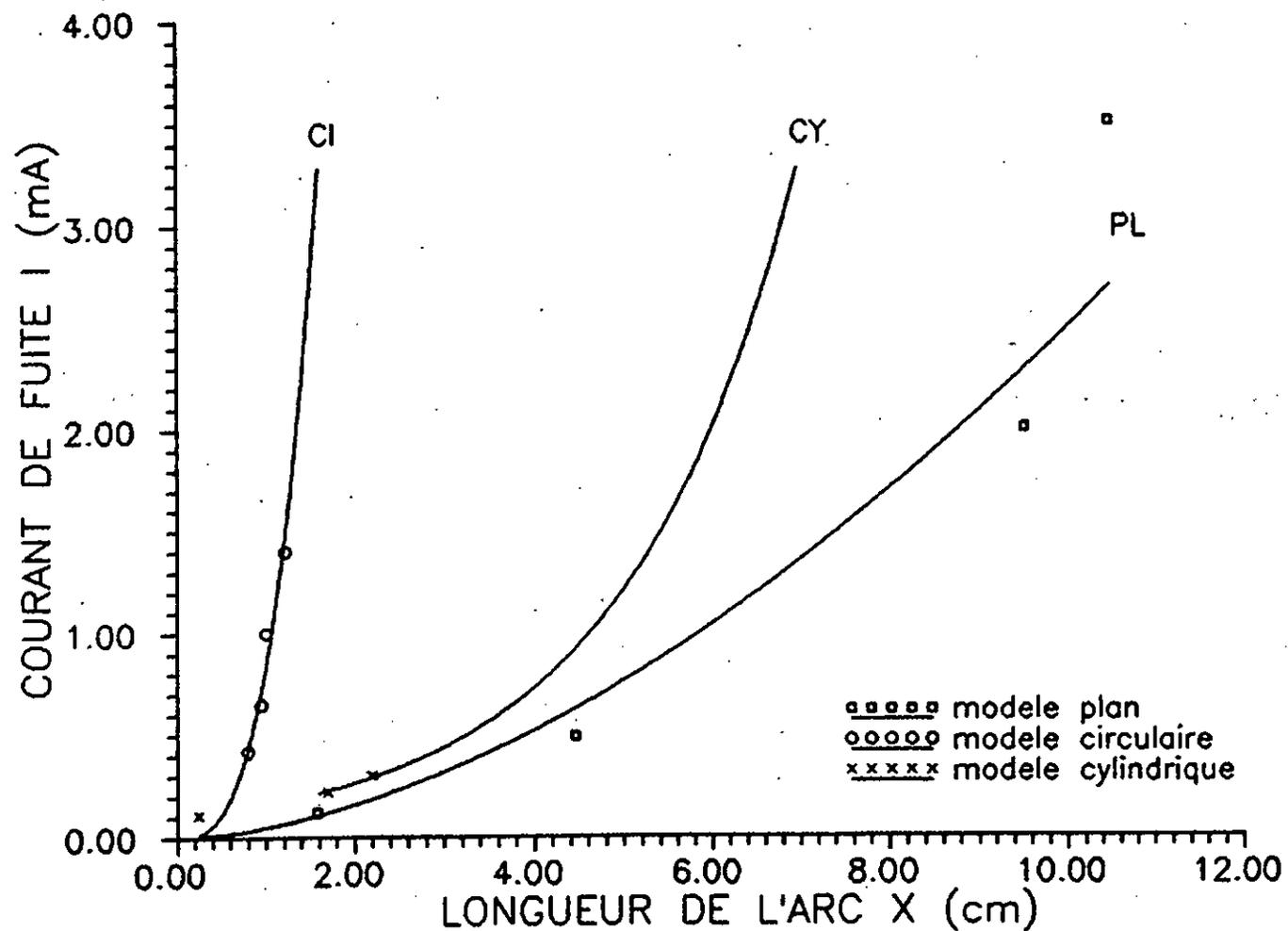


Fig.III.6.— Variation du courant de fuite en fonction de la longueur d'arc pour les trois modeles ($L=29.2$ cm).

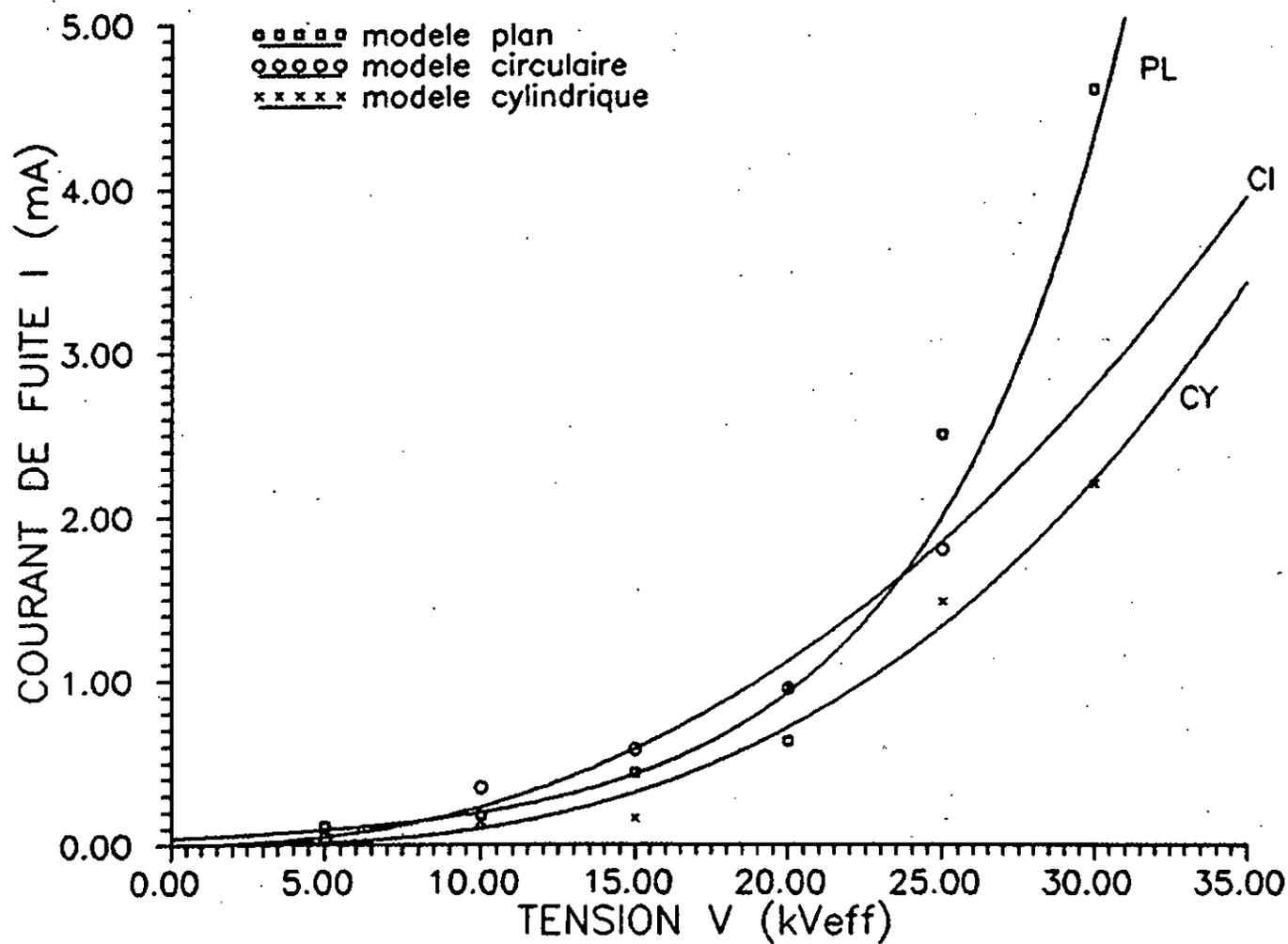


Fig.III.8.- Variation du courant de fuite en fonction de la tension pour les trois modeles ($L=20$ cm).

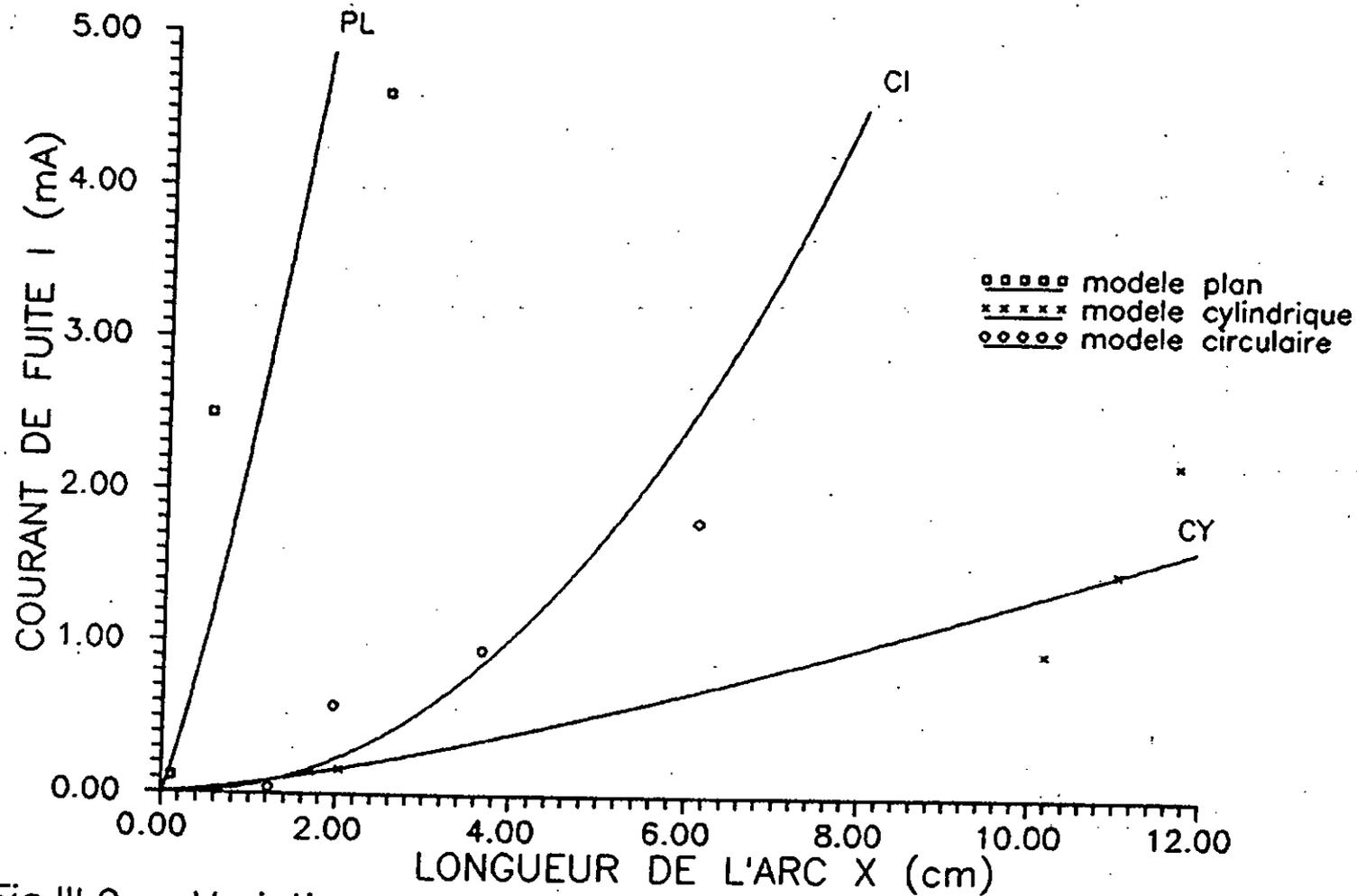


Fig.III.9. — Variation du courant de fuite en fonction de la longueur de l'arc pour les trois modeles ($L=20$ cm).

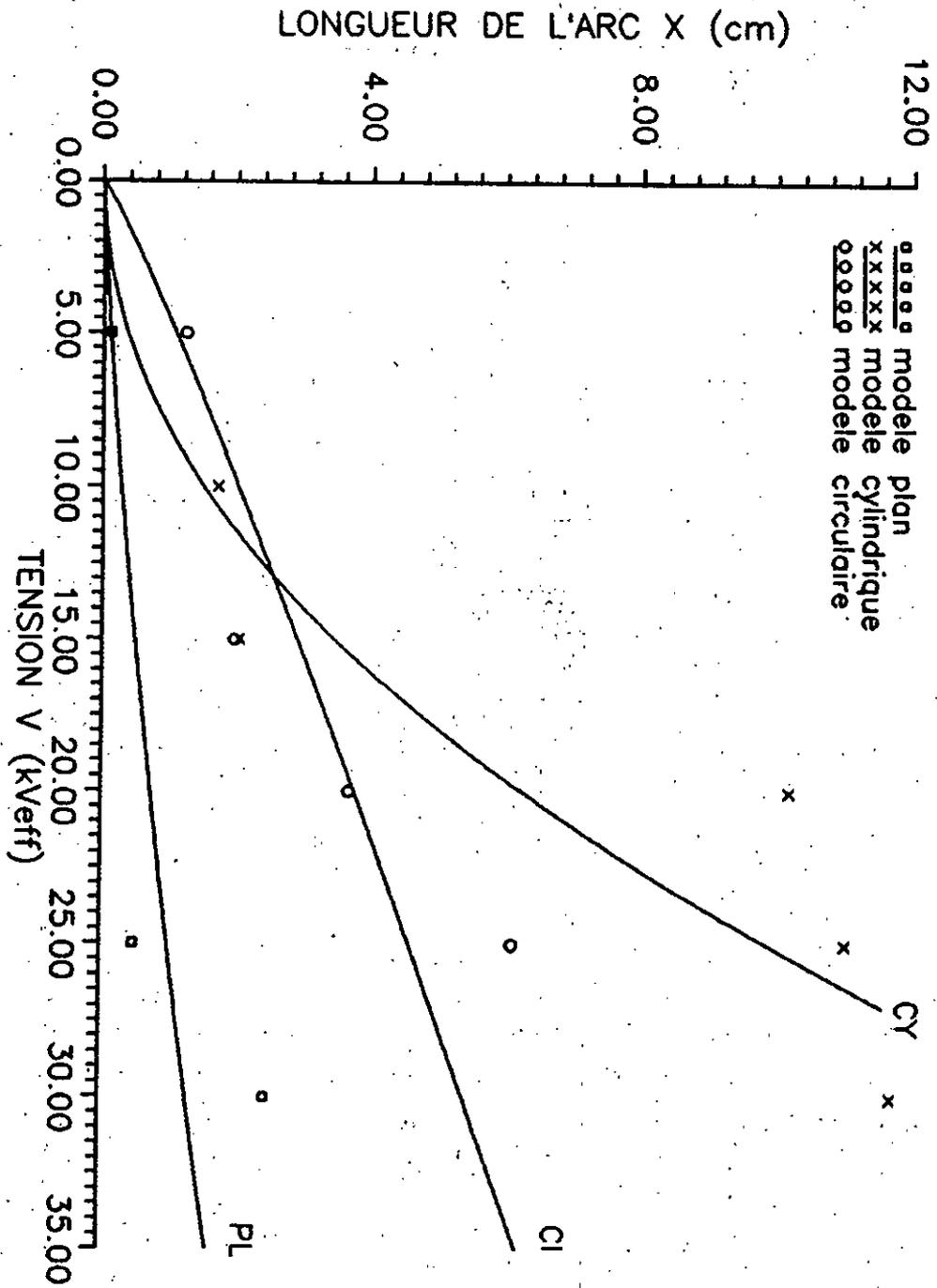


Fig. III.10. — Variation de la longueur de l'arc en fonction de la tension pour les trois modes (L=20 cm).

En coordonnées cylindriques nous avons :

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dV(r)}{dr} \right) = 0 \dots \dots \dots (III.4)$$

La résolution de cette équation nous donne :

$$V(r) = \frac{\ln\left(\frac{R+D}{r}\right)}{\ln\left(\frac{R+D}{R+X}\right)} U \dots \dots \dots (III.5)$$

D'où l'expression du champ électrique :

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{R+D}{R+X}\right)} \dots \dots \dots (III.6)$$

La densité du courant est donnée par la loi d'Ohm :

$$J = \gamma E \dots \dots \dots (III.7)$$

$$|J| = \gamma \frac{U}{r \ln\left(\frac{R+D}{R+X}\right)} \dots \dots \dots (III.8)$$

où :

γ : est la conductivité de la couche polluante.

x : est la longueur de l'arc électrique.

r : est la distance radiale.

Pour calculer le courant de fuite, on considère qu'il apparait uniquement dans la zone définie par l'angle θ (Fig III.11) entre les deux électrodes, ce qui nous permet d'écrire :

$$I = \gamma \frac{U \cdot e}{\ln\left(\frac{R+D}{R+X}\right)} \cdot \text{tg}^{-1}\left(\frac{a}{2(R+D)}\right) \dots \dots \dots (III.9)$$

où :

a : est la longueur de l'électrode rectangulaire.

D : Distance entre les électrodes.

U : La valeur maximale de la tension appliquée.

e : est l'épaisseur de la couche polluante.

L'équation (III.9) est très significative, elle tient compte des différents paramètres intervenant dans le phénomène de la pollution des isolateurs. Effectivement, le courant augmente avec la tension appliquée, la pollution et l'épaisseur de la couche polluante.

Ces remarques ont été vérifiées expérimentalement [27], [28].

Les facteurs géométriques (distance inter-électrodes) influent sur la dégradation de la qualité de l'isolation, mais leurs effets sont moins importants que les autres paramètres prés-cités.

Pour une longueur de fuite $L=29.2$ cm, on trouve pour chaque couple la valeur (U, X) , une expression qui détermine la répartition du champ électrique à la surface polluée (tableau III.8).

U [kVeff]	X [cm]	E (r) [kVeff / cm]
10	1,58	4,44 / r
15	4,45	9,27 / r
20	9,52	19,7 / r
25	10,48	26,81 / r

Tableau III.8.- Distribution du champ électrique

Les courbes $E(r)$ pour U et X fixes, sont des hyperboles, qui ont pour équation :

$$E(r) = k / r$$

où k est une constante qui augmente avec l'augmentation de la longueur de l'arc X et du niveau de tension appliqué U (Fig.III.12).

Nous avons calculé la valeur du champ électrique à la racine de l'arc, c'est à dire pour $r = R+X$, d'où nous avons obtenu la courbe $E(R+X)$ représentée sur la figure III.13.

Nous avons constaté que la valeur du champ électrique augmente au fur et à mesure que l'arc se propage, jusqu'à ce que la longueur de l'arc X atteigne une valeur critique X_c pour laquelle, le champ électrique est tellement important pour créer des conditions favorables pour l'amorçage brusque de l'intervalle d'air qui sépare la racine de l'arc et l'électrode de mise à la terre, et le contournement total est ainsi établi.

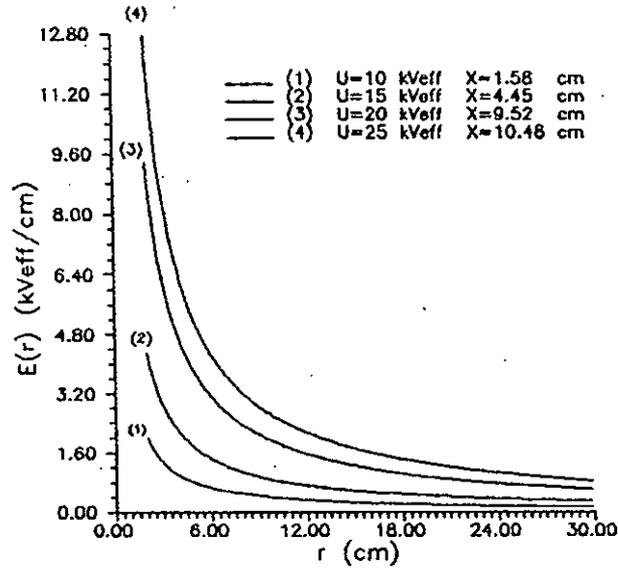


Fig.III.12.- Repartition du champ en fonction de r pour le modele theorique ($L=29.2$ cm) avec U et X fixes.

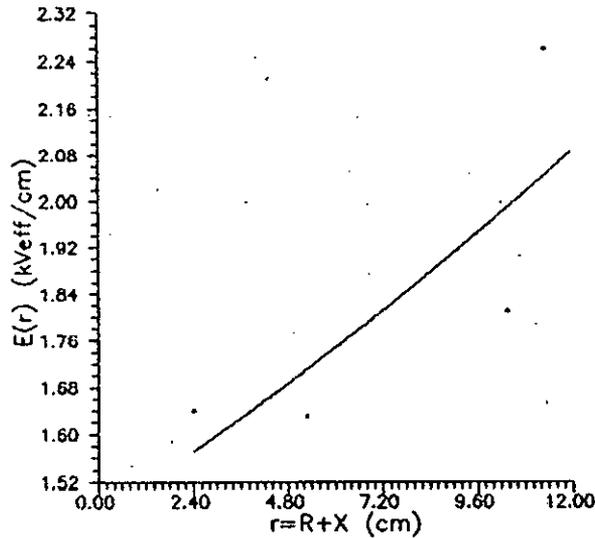


Fig.III.13.-Variation du champ electrique en fonction de la longueur de l'arc pour ($L=29.2\text{cm}$).

*CONCLUSION
GENERALE*

CONCLUSION GENERALE

A l'issue de notre travail, on peut conclure :

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances sur les méthodes de mesure et de protection en haute tension en général, et en particulier celles concernant la mesure du courant de fuite sur les surfaces isolantes polluées. Les facteurs climatiques influent d'une manière intensive sur le comportement des isolateurs.

Le développement de l'arc électrique dépend du profil de l'isolateur, et de la répartition de l'agent polluant sur la surface de l'isolateur.

La génération de l'arc électrique sur les isolateurs pollués est la conséquence du courant du à la nature conductrice de la couche polluante. Les résultats obtenus nous ont prouvé la fiabilité du circuit de mesure réalisé.

Malgré les difficultés rencontrés, nous avons obtenu des résultats qui concordent plus ou moins avec ceux déjà trouvés par différents chercheurs et présentés au premier chapitre.

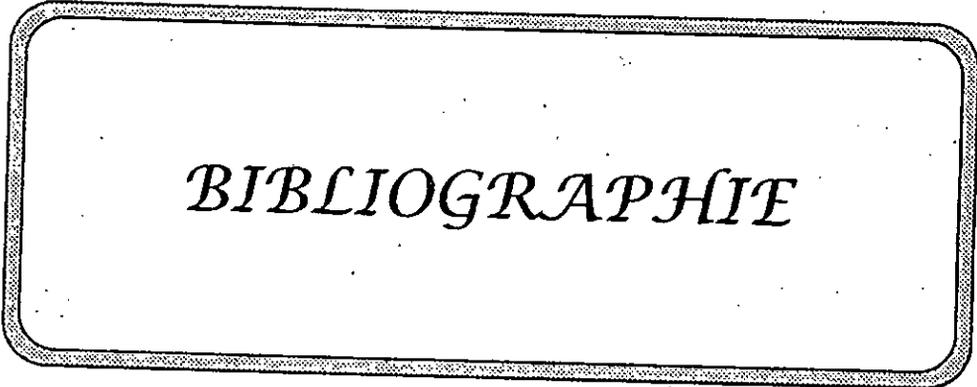
Parmi les trois modèles étudiés, nous pouvons dire que le modèle plan est celui qui se rapproche le plus de l'isolateur réel utilisé, (1512L). Ceci en se basant uniquement sur les caractéristiques $I(V)$ des travaux antérieurs justifie ce résultat.

Par ailleurs, Nous constatons que le développement de l'arc électrique est plus favorable dans le modèle plan.

A partir d'une approche par un modèle théorique, Nous avons constaté que la valeur du champ électrique à la racine de l'arc augmente au fur et à mesure que l'arc se propage, ce qui explique l'existence d'une longueur critique de l'arc X_c , pour laquelle les conditions sont favorables au contournement total.

Enfin, Nous espérons que cette étude du développement de l'arc électrique sur une surface isolante polluée, soit plus améliorée dans l'avenir. Pour cela, nous souhaitons que des études soient réalisées sur différents types d'isolateurs, et avec la méthode du brouillard salin.

Pour ceci, nous suggerons un matériel supplémentaire au laboratoire de haute tension de l'ENP (cabinet de pollution, camera rapide,...etc)qui corresponderaient au mieux aux besoins de ces études, et aux exigences des normes de la C.E.I .



BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE:

- [01]- C.Hurax, A.M. Rahal. - "Le contournement des isolateurs haute tension approché à l'aide d'un modèle de laboratoire", RGE, Tome 84, N°6, Juin 1975, p. 423-429.
- [02]- P. Claverie, Y. Porcheron. - "Les phénomènes de pollution des isolateurs et isolement des ouvrages en régions polluées", RGE, Tome 82, N°3, Mars 1973, p 166-194.
- [03]- M. TEGUAR. - "Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées". Thèse de Magistère, ENP, 1993.
- [04]- A. Mekhaldi. - "Modèle de contournement d'isolateurs pollués dans des conditions désertiques du sahara Algérien", Thèse de Magistère, Département de Génie Electrique, ENP, Juin 1990.
- [05]- F.A.M. Risk. - "Méthodes mathématiques du contournement des isolateurs sous pollution", Electra, N°78, Octobre 1981, p.77-103.
- [06]- A. Cimador, S. Vitet. - "La pollution des isolateurs". E.D.F, Bultin de la direction des études et recheches, serie B. p. 27-39.
- [07]- G. Le Roy, C. Gray, B. Hutzler, J. Lalot, C. Dubanton. - "Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions", Eyrolles, Paris, 1984, p.267-319.
- [08]- F. Obenaus. - "Fremdschitüberschlag und kriechweglänge", Deutsche Elektrotechnik, vol. 4, 1958, p. 135-136.
- [09]- G. Neumaier. - "Verschmutzungszustand und Kriechweglänge", Monatsber. d. Deut. Akad, Wiss., Berlin, Vol. 1. 1959, p 352-359.
- [10]- L.L. Alston, S. Zoledziowski. - "Growth of discharges on polluted insultation", IEEE Trans., Vol. PAS - 110, N° 7, Juillet 1963, p. 1260-1266.
- [11]- J. DANIS. - "A stocastic pollution flashover modd", Forth International Symposium on High Voltage. Engeneering, Athens, Greece, September 1983, rapport N° 46-12.
- [12]- B.F. Hampton. - "Flashover Mechanism of polluted Insultation", Proc. IEE, Vol. 11, N°5, Juillet 1964, p. 985-990.
- [13]- S. Hesketh. - "General criterion for the Prediction of Pollution Flashover", Proc. IEE, Vol. 118, N°12, Décembre 1971, p. 1886-1892.
- [14]- H. Boehme, F. Obénaus. - "Essai de contournement sur des isolateurs pollués en labortoire et en lieu de service du point de vue de la conception d'un modèle d'amorçage pour courant rampant", CIGRE, 1966, N°407.

Bibliographie

- [15]- A.M. Rahal, C. Huraux. -"Flashover of high voltage insulators", IEEE. Trans., Vol. Pas - 98, N°6, November-December 1979, p. 1589-1592.
- [16]- H.H. Woodson, A. J. Mc Elroy. -"Insulators with contaminated surfaces part II: Modeling of discharge mechanisms", IEEE Trans. , Vol. Pas - 89, N°8, November - December 1970, p. 1858 - 1867.
- [17]- H. Nücke. -"Stabilität der fremschichtentladungen und théories des fremschichtüberschlags", ETZ-A, N°3, Mars 1969, p. 457-465.
- [19]- O. Mayr. -"Beitrag zur theorie der statischen und der dynamischen litchbogens", Arch. f. Elektrotechnik, Vol. 37, 1943, p. 588-608.
- [20]- A.S. Maikopar. -"The open small current arc", Elektichestvo, N°2, 1965, p. 22-25.
- [21]- 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.
- [22]- F.A.M. Risk. -"Analysis of diélectric recovery with reference to try zone arc on polluted insulators", IEEE conf. p., N° 71C 134 PWR, Winter Power Meeting, New York, 1971.
- [23]- J.J. Hurley, G.J. Limbourn. -"Correlation of service performance of insulators and lighting arresters under polluter conditions with test results with a view to examing the validity of present criteria for insulator selection and testing" CIGRE, sc. 33, Septembre 1969.
- [24]- A. AL-Baghdadi. -"The mechanism of flashover of polluted insulators", Thèse de doctorat, University of Manchester, 1970, p. 67.
- [25]- A. Tominaga. -"Characteristics of Power - Frequency Flashover on contaminated surfaces infog", Elect. Eng. in Japan, Vol. 88, N°12, 1968, p. 59-59.
- [26]- D.C. Jolly et al. -"Dynamic theory of discharge Growth over contaminated Insulator surfaces", IEEE Conf. Paper, N° C74068-3, winter Power Meeting, New York, 1974.
- [27] A.Mikhaldi et S.Bouzabia.- "Conduction phenomena on polluted insuling surfaces under AC high voltage." 9th ISH report 3174 , AURTRIA ,28 aout -1 septembre 1995.
- [28] S.BOUZABIA et A.MIKHALDI . - "Etude des courants de fuite sur les isolants pollués."-CEA 94 , Alger 94.
- [29] J.DANIS .-" A stochastic pollution flashover model."4th ISH , report 46-12, Athena 1983.
- [30] A.CIMADOR et S.VITET .-" La pollution des isolateurs"-CIGRE, rapport 33-04,1978.

Bibliographie

[31] G.ZHICHENG et Z.RENYU.-" Calculation of a DC and AC flashover, voltage of polluted insulators. ", IEEE, Vol 25, N°04, pp.723-729, 1990.

[32] R.SUNDABARAJAN et R.S.GORUR-"Dynamic arc modeling of pollution flushover of insulators under DC voltage"-,IEEE, Vol28, N°02, pp.209-218,1993.

[33] M.MIKHANET et A.NOUAR -"Etude du developpement d'un arc electrique sur une surface isolante contaminée par la pollution desertique"-PFE, ENP, Juin 87.

[34] D.OULD et AMER -"Etude de developpement d'un arc electrique sur des isolateurs pollués dans les conditions naturelles desertiques."-PFE,ENP, Juin 1987.

ERRATA

page	Ligne	remplacer l'expression :	par l'expression :
7	28	La formation de la tension en série ...	La formulation de la tension minimale nécessaire au maintien d'un arc partiel en série ...
11	2	- NEUMRKER [9]:	- NEUMARKER [9]:
17	8 10	- construction des lignes de courant ... - ... zone de construction.	- constriction des lignes de courant ... - ... zone de constriction.
26	14	... de la naissance de l'arc de la naissance de l'arc ...
31	5	La valeur de contournement ...	La valeur de la tension de contournement ...
38	4	s'établit à nouveau.	se stabilise à nouveau.