

D0003/99B

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE

Département d'Electrotechnique

Laboratoire de Haute Tension

المدرسة الوطنية المتعددة الفتيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

Thèse de Doctorat d'Etat

Présentée par Abdelouahab MEKHALDI

**Étude des Phénomènes de Conduction et de  
Décharge Électrique sur des Surfaces Isolantes  
Polluées sous Tension Alternative 50 Hz**

Soutenue le 29 Septembre 1999 devant la commission d'examen:

Jury

M. R. KERBACH

A. BEROUAL

A. SOUALMIA

A. BOUBAKEUR

M. NEMAMCHA

Professeur, Ecole Nationale Polytechnique - Président

Professeur, Ecole Centrale de Lyon - Rapporteur

Professeur, USTHB - Examinateur

Maître de Conférences, Ecole Nationale Polytechnique - Examinateur

Professeur, C. Universitaire de Guelma - Examinateur

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

A ma femme et mes deux petites filles adorables.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Haute Tension du Département d'Electrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger en collaboration avec le Centre de Génie Electrique de l'Ecole Centrale de Lyon sous la Direction du Professeur Abderrahmane BEROUAL que je tiens à remercier beaucoup pour tout ce qu'il a fait pour moi en me recevant d'abord au Laboratoire de Génie Electrique de l'Ecole Centrale de Lyon puis pour tout ce qu'il m'a inculqué tant sur le plan scientifique qu'humain. Il a dirigé mon travail avec rigueur et de manière très judicieuse. Pour tout cela, ainsi que pour sa sollicitude et sa convivialité mais aussi et surtout pour l'amitié qui nous lie, je lui adresse toute ma gratitude.

Mes très sincères remerciements vont également à mon ami Ahmed BOUBAKEUR, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique pour tous les conseils qu'il n'a cessé de m'apporter durant toute la période qu'a nécessité ce travail jusqu'à la dernière minute. Je n'oublierais pas de mentionner qu'il a été le premier qui m'a mis sur ce très passionnant thème de recherche. Comme je le remercie également pour avoir bien voulu être membre de jury pour ma soutenance de thèse.

J'adresse mes vifs remerciements au Professeur Rabah KHERBACHI pour sa sympathie et pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence du Jury.

Que Messieurs les Professeurs Mohamed NEMAMCHA et Achour SOUALMIA trouvent ici le témoignage de mes cordiaux remerciements d'abord pour leur participation dans le jury ensuite pour avoir bien voulu juger mon travail.

Je ne saurais terminer sans remercier mes amis Dalila NAMANE, Slimane BOUAZABIA ainsi que Madjid TEGUAR et Kader NAMANE pour m'avoir aidé, soutenu et conseillé pour l'élaboration de ce travail.

Je termine enfin par remercier d'une façon très particulière ma courageuse femme, qui grâce à elle j'ai pu traverser ces longues années de travail sans grands encombres. Je tiens à associer aussi à ce parcours, mes amis de l'Ecole Centrale de Lyon, Katiba BEDOUI, Tarek BOUMEGHOURA, Adlane ASKRI, Mireille GIRALT ainsi que notre sympathique ami Arezki BOUZOURENE.

العمل المعروض يتعلق بدراسة ظواهر النقل و الشحن الكهربائية فوق مساحات عازلة ملوثة تحت توتر متناوب 50 هرتز (Hz). هذه الدراسة تبين تأثير بعض العوامل الكهربائية هندسية مثل التنقل الكهربائي و السمك و وضعية الطبقة الملوثة و المسافة بين القطبين و نصف قطر القطب الموصول بالتوتر العالي على تصرف المساحة العازلة الملوثة. في حالة الطبقات الملوثة المتواصلة، نقتراح نموذج نظري يسمح بتقدير تيار التسرب عبر هذه الطبقات ذات تنقل كهربائي معين عوضا عن نموذج المخبر. كما نقتراح نموذج آخر في حالة الطبقات الملوثة المنقطعة يسمح بتقدير الذاتية الكاملة بين القطبين، و توتر الشرارة الكهربائية و التيار المتسرب. و من أجل مراقبة نسبة نسبة تلوث العوازل، نضع هيكل حسابي يعتمد على قياس التيار المتسرب.

#### Résumé:

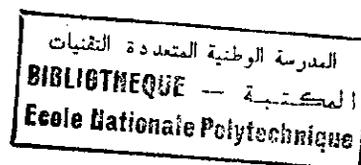
Ce travail porte sur l'étude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces polluées sous tension alternative 50 Hz. Il met en évidence l'influence d'un certain nombre de paramètres électro géométriques tels que la conductivité, l'épaisseur et la position de la couche polluante ainsi que la distance inter-électrodes et le rayon de l'électrode haute tension sur le comportement de la surface isolante polluée. Dans le cas de couches de pollution continues, un modèle théorique permettant d'évaluer le courant de fuite traversant une couche de pollution de conductivité donnée, est proposé pour simuler le modèle de laboratoire. Un autre modèle donnant l'impédance totale entre électrodes, la tension transférée sur la bande sèche et le courant de fuite a été établi pour le cas de couches de pollution discontinues. Enfin, un algorithme utilisant la mesure de courant de fuite est également proposé pour le contrôle de la sévérité des dépôts.

#### Abstract:

This work is devoted to the study of the conduction and the electrical discharge phenomena on polluted insulating surfaces under ac high voltage. It shows the influence of some electrogeometrical parameters such as the conductivity, the thickness and position of the pollution layer, the distance between the electrodes and the curvature radius of the high voltage electrode on the behaviour of polluted insulating surface. An oversimplified theoretical model based on Laplace equation is proposed for the case of continuous pollution layer. Furthermore, we establish a model giving the whole impedance between the electrodes, the transferred voltage on the dry zone and the leakage current, in the case of discontinuous pollution layer. An algorithm allowing to supervise the pollution severity of the polluted insulator is also proposed.

**Mots clés:** Courant de fuite, tension de contournement, pollution, isolateurs, haute tension, décharge électrique, conduction, surfaces isolantes, modèles.

## SOMMAIRE



## INTRODUCTION

### Chapitre 1: LE PHENOMENE DE POLLUTION DES ISOLATEURS HAUTE TENSION

1. Introduction	1
2. Pollution des isolateurs	1
2.1 Formation et répartition de la couche de pollution sur les surfaces isolantes	1
2.2 Types de pollution	
2.2.1 Pollution naturelle	2
2.2.2 Pollution industrielle	3
2.2.3 Pollution mixte	3
3. Conséquences de la pollution	4
3.1 Arc non localisé	4
3.2 Arc fixe	4
3.3 Contournement des isolateurs pollués	4
4. Sévérité de pollution d'un site	6
4.1 Méthodes de mesures de la sévérité d'un site	7
4.1.1 Densité du dépôt de sel équivalent	8
4.1.2 Conductance superficielle	8
4.1.3 Courant de fuite	8
4.1.4 Contrainte de contournement	9
4.1.5 Mesure de la pollution de l'air	9
4.1.6 Mesures optiques	10
4.1.7 Densité de dépôt non soluble	10
4.1.8 Autres méthodes	10
5. Méthodes d'essais sous pollution	10
5.1 Essais sous pollution naturelle	10
5.2 Essais sous pollution artificielle	12
5.2.1 Méthode du brouillard salin	12

5.2.2 Méthode de la couche solide	13
6. Techniques de lutte contre la pollution	14
6.1 Allongement de la ligne de fuite	14
6.2 Changement de forme des isolateurs - isolateurs plats	14
6.3 Graissage périodique	14
6.4 Revêtements silicones	15
6.5 Les isolateurs composites	15
6.6 Nettoyage des isolateurs	16
7. Conclusion	16

## Chapitre 2: PRINCIPAUX MODELES DE LA DYNAMIQUE DE L'ARC ELECTRIQUE

1. Introduction	19
2. Principaux modèles statiques de contournement	19
2.1 Modèle d'Obenaus	19
2.2 Modèle de Neumarker	21
2.3 Modèle d'Alston et Zoledziowski	21
2.4 Modèle de J. Danis	22
2.5 Modèle de la couche mixte	24
2.6 Modèle du disque circulaire	25
2.7 Modèle de Nacke et Wilkins	26
2.8 Modèle de Rizk	27
2.9 Modèle de Claverie et Porcheron	28
2.10 Modèle de Rao et Gopal	28
3. Modélisation dynamique de l'arc	29
3.1 Mécanisme de propagation	29
3.1.1 Propagation par ionisation	29
3.1.2 Propagation par force électrostatique	29
3.2 Critère de propagation de la décharge	31
3.2.1 Critère de Hampton	31
3.2.2 Critère de Hesketh	31
3.2.3 Critère de Wilkins	31

3.2.4 Critère de Anjana et Lakshminarasimha	31
3.2.5 Critère de N. Dhahbi, A. Beroual et L. Krahenbul	32
3.3 Modèles dynamiques	33
3.3.1 Modèles de Rizk	33
3.3.2 Modèle de Anjana et Lakshminarasimha	33
3.3.3 Modèle de Sundararajan et Gorur	34
3.3.4 Modèle de N. Dhahbi et A. Beroual	35
3.4 Vitesse de propagation	37
4. Paramètres d'influence	39
4.1 Influence de la polarité	39
4.2 Influence des paramètres de la source	40
4.3 Chute de potentiel	40
4.4 Temps au contournement	40
4.5 Profil de l'isolateur	41
4.6 Arcs multiples	43
4.7 Couche de pollution non uniforme	45
4.8 Formation de bandes sèches	45
Conclusion	47

### Chapitre 3: ETUDE DU CONTOURNEMENT DES COUCHES DE POLLUTION CONTINUES

1. Introduction	48
2. Techniques expérimentales	48
2.1 Circuit d'essai	49
2.1.1 Dispositif de mesure du courant de fuite	49
2.1.2 Mode opératoire	49
2.1.2.1 Dispositif expérimental	49
2.1.2.2 Préparation du modèle	50
2.1.2.3 Application de la tension d'essai	50
3. Modèle expérimental	51
4. Résultats expérimentaux	52
4.1 Forme du courant	52

4.2 Forme de l'arc	53
5. Modèle théorique et discussion	61
6. Conclusion	67

#### Chapitre 4: **ETUDE DU CONTOURNEMENT DES COUCHES DE POLLUTION DISCONTINUES**

1. Introduction	69
2. Modèle expérimental	70
2.1 Modes opératoires	70
2.2 Essais préliminaires	72
3. Résultats expérimentaux	77
3.1 Courant de fuite	77
3.2 Tension d'entretien de l'arc	82
3.3 Tension de contournement	83
3.4 Détermination de la longueur critique d'arc	85
4. Modèle et discussion	86
4.1 Détermination de l'impédance de la bande propre	86
4.2 Détermination de l'impédance de la couche polluante	89
4.3 Impédance totale entre les électrodes	93
4.4 Tension reportée sur la zone sèche	94
4.4.1 Rapport des impédances	94
4.4.2 Tension reportée $U_i$	95
5. Détermination du courant de fuite théorique à partir de l'impédance totale	96
Conclusion	103

#### Chapitre 5: **ALGORITHME DE CONTROLE DE LA SEVERITE DES COUCHES POLLUANTES**

1. Introduction	104
2. Modèle expérimental	104
3. Modèle de contournement et mise en équations	105

4. Simulation	110
5. Validation de l'algorithme	112
6. Conclusion	121
<b>CONCLUSION</b>	122
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	

## INTRODUCTION

Les lignes aériennes et les postes du réseau de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. En effet, par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut alors survenir. L'humidification de la couche polluante facilite en fait, la circulation d'un courant de fuite sur ces surfaces isolantes provoquant des échauffements locaux et par la suite l'assèchement de la couche de pollution. Ainsi, la répartition du potentiel est modifiée d'une façon significative et des arcs partiels peuvent apparaître. Ces derniers peuvent évoluer jusqu'au contournement total de l'isolateur. Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension; une des caractéristiques principales d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est placé.

De nombreux travaux, aussi bien théoriques qu'expérimentaux, ont été entrepris dans ce domaine afin de mieux comprendre ce phénomène de contournement et de se prémunir d'outils permettant le suivi de son évolution et d'éviter son apparition.

La complexité du phénomène et le grand nombre de paramètres qui le caractérisent tels que la nature du dépôt polluant [1, 2, 3, 4], la non uniformité de la pollution [5, 6], la conductivité superficielle [6] et le profil de l'isolateur [6, 7], rendent la compréhension et la maîtrise du mécanisme de contournement bien difficiles. Les résultats de ces recherches ont néanmoins permis d'établir des modèles donnant les caractéristiques des décharges évoluant sur les surfaces d'isolateurs et ce jusqu'au contournement. La plupart de ces modèles sont empiriques ou semi-empiriques. Des travaux plus récents présentent également des modèles analytiques [8, 9].

Le présent travail porte sur l'étude des phénomènes de conduction et de décharge sur des surfaces isolantes contaminées par une couche de pollution continue ou discontinue, sous haute tension alternative 50 Hz. Il comporte cinq chapitres.

Le premier chapitre traite du problème de la pollution et ses conséquences sur le transport d'énergie électrique; les principaux paramètres qui lui sont associés ainsi que les méthodes de mesure et les moyens de lutte contre ce phénomène y sont également présentés.

Dans le deuxième chapitre, nous rappellerons et discuterons les principaux modèles de contournement rencontrés dans la littérature, selon leur caractère statique ou dynamique ainsi

que les facteurs d'influence qu'ils traitent. Nous soulignerons l'aspect empirique et semi-empirique de la plupart de ces modèles.

Le troisième chapitre est consacré au cas des couches continues de pollution. Des résultats expérimentaux concernant la variation du courant de fuite et de la longueur de l'arc électrique en fonction de différents paramètres telles que la géométrie des électrodes (rayon de l'électrode active et distance inter-électrodes), la tension appliquée, la conductivité et l'épaisseur de la couche polluante y sont présentés. Un modèle basé sur l'équation de Laplace auquel nous comparons les résultats expérimentaux obtenus au laboratoire sera présenté.

Le quatrième chapitre concerne le cas des couches de pollution discontinues où des zones propres (sèches) et polluées (humidifiées) sont préétablies. L'influence de la longueur de la bande sèche et sa position par rapport aux électrodes, sur le courant de fuite et la longueur de l'arc électrique est étudiée. En se basant sur les résultats expérimentaux, nous déduisons une expression donnant l'impédance totale entre les électrodes, la tension d'entretien de l'arc électrique et le courant de fuite, quelle que soit la répartition de la couche polluante. A partir de l'expression mathématique de l'impédance équivalente de l'isolateur pollué, nous discuterons du degré de pollution.

Dans le dernier chapitre, nous développerons un algorithme de calculs permettant d'obtenir les différents paramètres caractérisant la propagation de la décharge sur des surfaces isolantes polluées jusqu'au contournement total. Nous montrons que la mesure du courant de fuite permet, en utilisant l'algorithme proposé, de déterminer le facteur de sécurité de l'isolation. Une comparaison des résultats expérimentaux avec ceux calculés à partir de l'algorithme est présentée.

**CHAPITRE 1: LE PHENOMENE DE POLLUTION DES  
ISOLATEURS HAUTE TENSION**

## 1. INTRODUCTION

La pollution constitue un sérieux problème dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de transport et de l'appareillage haute tension. En effet, les dépôts polluants qui recouvrent les surfaces isolantes peuvent engendrer une diminution considérable de la tension de tenue des isolateurs. La connaissance du degré de pollution est par conséquent une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau de l'isolement des ouvrages installés sur site, en vue de dimensionner convenablement l'isolation.

Le problème de la pollution se présente donc comme un ensemble de facteurs, tout aussi complexes les uns que les autres et pouvant provoquer par leur action commune de nombreuses perturbations dans le fonctionnement des réseaux électriques. Ils peuvent dans les cas les plus critiques, conduire au contournement des isolateurs, ce qui constitue la situation la plus grave, car conduisant à la mise hors service de la ligne.

## 2. POLLUTION DES ISOLATEURS

### 2.1 Formation et répartition de la couche de pollution sur les surfaces isolantes

L'interaction entre l'écoulement d'un air transportant de la poussière et l'obstacle que constitue les isolateurs engendre, en présence de l'humidité, la formation d'une couche de poussière sur la surface de ces isolateurs [10]. La répartition de cette couche de pollution dépend du profil des isolateurs, de la hauteur et de la disposition (verticale, horizontale ou inclinée) des chaînes d'isolateurs par rapport au sol et du niveau de la tension qui leur est appliquée. En général, la couche de pollution se concentre sur les éléments de la chaîne d'isolateurs situés du côté du conducteur de haute tension et dans les parties les mieux protégées contre les facteurs d'auto-nettoyage (vent fort, forte pluie). Par conséquent, la répartition de la pollution le long des chaînes d'isolateurs n'est pas uniforme [2]. Cette non-uniformité devient plus accentuée lorsque la longueur des chaînes augmente. La densité de ces dépôts polluants augmente lorsque la tension appliquée aux conducteurs augmente.

## 2.2 Types de pollution

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

### 2.2.1 Pollution naturelle

Ce type de pollution peut être constitué par:

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

#### a/ Pollution marine

Dans les ouvrages installés en bordure de mer, les embruns portés par le vent déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel qui, à plus ou moins longue échéance, recouvre toute la surface de l'isolateur y compris les parties les mieux protégées. Cette couche de sel humidifiée par les embruns eux mêmes, ou par un brouillard ou simplement par condensation, devient conductrice. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance dans certaines conditions, et se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur.

#### b/ Pollution désertique

En régions désertiques, les fréquentes tempêtes de sable déposent progressivement sur les isolateurs une couche de pollution contenant des sels. Humidifiée, cette couche devient beaucoup plus conductrice. Un courant de fuite apparaît brusquement accompagné d'arcs partiels dont la propagation à la surface de l'isolateur peut aussi conduire à un contournement total de l'isolateur.

#### c/ Autres types de pollution naturelle

La pluie est un phénomène naturel propice à l'humidification des isolateurs par excellence. Lorsqu'elle est intense, elle est susceptible de provoquer la désagrégation des

dépôts solides. Cependant, cet auto-lavage favorable à l'amélioration des qualités diélectriques des isolateurs est contrarié par le phénomène de ruissellement.

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

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

### 2.2.2 Pollution industrielle

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

Les isolateurs se recouvrent de poussières faiblement conductrices, mais très hygroscopiques, car elles ont tendance à absorber l'humidité de l'air. Dans les conditions de forte humidité (brouillard, pluie, condensation matinale,...), la dissolution des sels contenus dans cette poussière provoque la formation d'une couche électrolytique. Les gaz présents dans les fumées absorbées par la couche liquide, en augmentent encore la conductivité superficielle. Comme dans le cas de la pollution marine, un courant de fuite circule alors dans la couche superficielle et le contournement peut parfois survenir [11 - 15].

### 2.2.3 Pollution mixte

Les pollutions mixtes résultent de la combinaison d'une ou de plusieurs pollutions précitées. C'est la forme de pollution la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques [13, 14].

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

Il est important de remarquer que par suite du lavage périodique des dépôts par la pluie, on atteint après une période d'exploitation plus ou moins longue, une " pollution

limite” propre à chaque site, qui dépend entre autres de l’intensité de la pollution atmosphérique, de l’adhérence des poussières, de la fréquence de la pluie,...[12].

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

### **3. CONSEQUENCES DE LA POLLUTION**

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

Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l’isolateur [12] et [14 - 17].

#### **3.1 Arc non localisé**

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

#### **3.2 Arc fixe**

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

### 3.3 Contournement des isolateurs pollués

Le contournement d'un isolateur pollué est en général précédé de l'apparition brutale d'un courant de fuite accompagné de la formation d'une bande sèche et d'arcs partiels. Un arc peut se propager en surface jusqu'au contournement total de l'isolateur.

Sous une atmosphère humide et pour une tension de quelques kilovolts appliquée entre les électrodes, les principales étapes engendrant le contournement sont les suivantes:

- l'humidification (pluie, brouillard ou rosée) associée à un dépôt polluant crée une couche conductrice à la surface de l'isolateur.

- l'échauffement par effet Joule dû au courant de fuite conduit, à cause de différences de densité de courant d'un point à un autre, à l'apparition d'une zone sèche.

- une partie importante de la tension appliquée se trouve reportée sur cette bande sèche engendrant ainsi, si le champ qui en résulte est suffisant, le claquage diélectrique et l'établissement d'une décharge électrique.

- selon les conditions électriques qui se trouvent alors réunies, cette décharge va se développer jusqu'au contournement final ou s'éteindre au bout d'un certain temps.

Sous tension continue, le processus global est relativement facile à décomposer. Une fois la décharge amorcée et si les conditions électriques le permettent, elle va se développer rapidement jusqu'au contournement. Dans le cas contraire, la zone sèche va tendre à s'élargir jusqu'à ce que la tension appliquée ne puisse plus maintenir la décharge, qui va alors s'éteindre.

Sous tension alternative, le problème est plus complexe du fait des passages par zéro de l'onde de courant et pendant lesquels la décharge s'éteint. Les temps au contournement sont très variables (de quelques microsecondes à la fraction de seconde) selon les conditions électriques. Lorsque ce temps est élevé, le passage par zéro peut intervenir avant que le contournement total ne soit atteint; il faut alors que la tension appliquée soit capable de réamorcer la décharge à l'alternance suivante.

A chaque alternance, la forte densité de courant dans la couche au voisinage de la décharge, si elle est amorcée, provoque une vaporisation très rapide de l'électrolyte. Cependant, cette décharge emprunte tout ou partie du trajet précédemment ionisé et se développe vers l'électrode opposée en balayant une zone qu'elle assèche progressivement. Deux cas sont alors à considérer suivant le type de pulvérisation utilisé lors des essais:

- si la pulvérisation est arrêtée peu après l'application de la tension, lorsque l'arc aura atteint une certaine longueur et que la zone balayée sera complètement sèche, le phénomène s'arrêtera; aucun courant ne circule alors dans le circuit.

- Par contre, pour une pulvérisation continue, un régime permanent s'établit, caractérisé par des arcs radiaux tournant autour de l'électrode mise à la haute tension, en balayant une zone bien délimitée. Si à partir de ce régime, la tension est augmentée, les arcs s'allongent et la zone balayée s'étend puis se stabilise. En augmentant ainsi progressivement la tension par paliers, on atteint un état critique au-delà duquel toute nouvelle augmentation de tension provoque immédiatement le contournement total par développement d'un arc radial.

Par conséquent, le développement de l'arc électrique est essentiellement un phénomène thermique. Le problème fondamental est celui du mécanisme qui, sous tension continue, détermine l'élongation de la décharge électrique une fois qu'elle a été amorcée.

#### **4. SEVERITE DE POLLUTION D'UN SITE**

Afin de dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillances dans un site pollué, il est nécessaire de caractériser la sévérité de la pollution de ce site.

Cette sévérité est généralement caractérisée par l'intensité de précipitation, ainsi que par la conductivité des dépôts polluants. La sévérité considérée est alors exprimée en terme de salinité équivalente. En effet, on peut faire correspondre à chaque site soumis indifféremment à une pollution naturelle ou industrielle, une solution saline équivalente. Elle est également définie à partir de la conductivité superficielle des couches polluantes [18].

Afin d'évaluer l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la méthode de brouillard salin et les conditions de pollution naturelle, les niveaux de pollution sont répartis en quatre classes de sévérité [18].

##### **a/ Classe I**

Cette classe correspond à une pollution faible. Cette pollution est généralement naturelle (excepté la pollution marine) ou légèrement industrielle. Les zones soumises à une telle pollution sont des zones sans industries, à faible densité d'habitations équipées par exemple d'installations de chauffage, situées loin de la mer et/ou une altitude élevée (les régions agricoles ou montagneuses) et ne doivent en aucun cas être exposées aux vents venant de la mer. Les contournements des chaînes dans ces régions se produisent surtout en période

de brouillard ou au lever du soleil par condensation (incidents du matin). Pour ces zones, l'isolement normal convient facilement. La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium à 2,5g/l de concentration.

b/ Classe 2

La classe 2 correspond à une pollution moyenne. En général, cette pollution est naturelle (excepté la pollution marine) ou faiblement industrielle. Une telle classe comporte des zones avec des industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes ou sans industries polluantes, à densité moyenne d'habitations équipées d'installation de chauffage et situées loin de la mer. Ces zones nécessitent un isolement renforcé. En classe 2, la salinité équivalente maximale retenue est de 10g/l.

c/ Classe 3

Cette classe correspond à des zones très localisées où l'on trouve simultanément une forte pollution marine et industrielle. Il s'agit donc de zones à densité industrielle importante, de grandes villes, ou des zones proches de la mer soumises à l'action directe des embruns salins. Ces sites nécessitent un isolement important. La salinité équivalente maximale, concernant cette classe, est de 80g/l.

d/ Classe 4

La classe 4 correspond aux zones où le niveau de pollution est exceptionnel. La pollution est éventuellement naturelle, industrielle ou mixte. Cette classe comporte des zones qui sont sujettes à des fumées industrielles et à des poussières conductrices produisant des dépôts particulièrement épais et/ou des zones très proches de la côte soumises à des vents marins très forts et très polluants. Ces zones nécessitent donc un isolement exceptionnel. La salinité équivalente maximale, pour la classe 4, est de 160g/l.

Notons que certaines zones désertiques ont généralement un très fort degré de pollution. Elles sont caractérisées par l'absence de pluie pendant de très longues périodes, par une condensation régulière et par des vents violents engendrant éventuellement des tempêtes chargées de sable.

#### 4.1 Méthodes de mesures de la sévérité d'un site

Les principales méthodes qui ont été proposées pour caractériser la sévérité d'un site [17 - 19] sont:

##### 4.1.1 Densité du dépôt de sel équivalent

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

Cette méthode permet d'établir une relation avec les méthodes d'essais sous pollution artificielle. Elle présente, néanmoins, certains inconvénients tels que les fréquences de prélèvements, les fluctuations de l'humidité et l'amorçage des arcs qui ne sont pas pris en considération.

##### 4.1.2 Conductance superficielle

La conductance des isolateurs témoins, installés sur site, est obtenue à partir d'une mesure du courant de fuite en calculant le rapport  $G = I/V$ , où  $V$  est la tension d'alimentation de l'isolateur témoin (tension de service). La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance  $G$  par un facteur de forme de l'isolateur. Généralement, la tension est appliquée aux électrodes terminales, ce qui fournit la conductivité superficielle globale de l'isolateur.

Dans le cas de couches polluantes non homogènes, la conductivité superficielle locale peut être obtenue en mesurant la conductance d'une partie de la surface à l'aide d'électrodes auxiliaires. Cette méthode peut être représentative d'un type de pollution du site étudié. En général, cette méthode présente des résultats dispersés.

#### 4.1.3 Courant de fuite

La mesure du courant de fuite s'effectue en deux étapes:

##### 1/ Comptage d'impulsions

On enregistre pendant une période donnée, sur un isolateur soumis à sa tension de service, le nombre d'impulsions du courant de fuite dépassant une amplitude donnée. L'existence d'impulsions précède généralement la phase de contournement.

Pour l'enregistrement, on utilise un isolateur en service ou un isolateur témoin et un dispositif "comptage d'impulsions" permettant de compter les impulsions du courant de fuite. Cette méthode exige une aptitude au contrôle continu et permet de déterminer la longueur des isolateurs lors d'une extension de réseau sans grands frais. Cependant, elle ne fournit pas une mesure absolue de la performance des isolateurs.

##### 2/ Courant de fuite crête

On mesure la plus forte valeur de crête du courant de fuite sur un isolateur témoin soumis à sa tension de service. Ces mesures sont relativement coûteuses et doivent être effectuées pendant une période relativement longue.

Cette méthode est simple et tient compte de l'effet combiné des conditions atmosphériques et de la tension sur la couche polluante.

#### 4.1.4 Contrainte de contournement

Sur site, la contrainte de contournement peut être mesurée de différentes façons:

- l'installation de chaînes d'isolateurs de même type, mais de différentes longueurs et soumises à une tension constante. On estime les probabilités de contournement à partir des portions d'amorçages enregistrées.
- la disposition des éclateurs sur chaque chaîne afin que sa longueur effective soit augmentée jusqu'à atteindre le niveau de tenue en tension.

Ces méthodes présentent les mesures les plus directes qui puissent être faites. Les coûts élevés de ces méthodes peuvent être réduits par l'utilisation d'une ligne existante.

#### 4.1.5 Mesure de la pollution de l'air

Les mesures de pollution de l'air s'effectuent sur une période de temps donnée et permettent d'évaluer l'intensité et les caractéristiques de la pollution de l'air sur un site. Les méthodes de mesure adoptées partent du principe qu'en ce qui concerne les phénomènes de contournement, une corrélation peut être établie entre l'analyse physico-chimique de l'air sur un site et la sévérité de la pollution sur ce même site [20].

#### 4.1.6 Mesures optiques:

Le but des mesures optiques est d'évaluer l'épaisseur de la couche de pollution déposée à la surface de l'isolateur. Un dispositif à rayons laser permet à partir des rayons réfléchis (amplitude, décalage de phase, ...) de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche de pollution. La mesure de la sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche [20].

#### 4.1.7 Densité de dépôt non soluble

La densité de dépôt non soluble (DDNS) correspond à la quantité de produits polluants non solubles présents dans une couche de pollution. Elle s'exprime en  $\text{mg}/\text{cm}^2$ . Les mesures de DDSN s'accompagnent également souvent d'une analyse physico-chimique de la pollution, au terme de laquelle les sources polluantes peuvent être identifiées [20]

#### 4.1.8 Autres méthodes

Certaines méthodes utilisent des jauges permettant l'analyse de l'environnement pour la recherche de sels et de solides. Les données météorologiques habituelles (quantité de pluie, humidité relative, importance du brouillard, vitesse et direction du vent) peuvent être également utilisées ainsi que les statistiques de défauts sur les lignes d'une région donnée.

### **5. METHODES D'ESSAIS SOUS POLLUTION**

Pour comparer les performances de divers types d'isolateurs et sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution, il est nécessaire de les soumettre à des

essais. Ces essais peuvent être effectués dans les conditions naturelles (sur site) ou au Laboratoire. On distingue deux catégories de recherches sur les isolateurs pollués: les essais sous pollution naturelle et les essais sous pollution artificielle.

### 5.1 Essais sous pollution naturelle

Cette méthode consiste à installer dans différents sites pollués, des stations dans lesquelles on observe le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs ou colonnes isolantes de longueurs ou de profils différents. Les qualités respectives de ces isolateurs soumis à une même tension sont appréciées en fonction des temps au contournement ainsi qu'en se basant sur le courant de fuite ou la conductivité superficielle. On peut donc classer les isolateurs en distinguant ceux qui ont contourné de ceux qui ont tenu, par exemple, durant deux ou trois ans d'exploitation [12].

Cependant, l'inconvénient majeur de ces essais "in situ" apparaît immédiatement. La pollution est un phénomène à évolution lente, puisque dûe à une accumulation progressive de dépôts. Plusieurs années sont donc nécessaires pour pouvoir comparer valablement les performances des isolateurs essayés "in situ". Afin d'obtenir des résultats et effectuer des comparaisons plus rapidement, plus facilement et à un moindre coût, plusieurs chercheurs ont essayé de reproduire en laboratoire les conditions de pollution naturelle,

#### a/ Essais basés sur le courant de fuite

Cette méthode est basée sur la corrélation étroite existant entre la tension de contournement d'un isolateur pollué et le courant de fuite. Ce dernier peut être divisé en trois niveaux: la zone normale, la zone d'avertissement et la zone de risque [21]. Cette dernière est caractérisée par des courants de fuite pouvant engendrer le contournement. Le point spécifique correspond à la valeur maximale du courant ( $I_{max}$ ) précédant immédiatement le contournement. L'état du courant de fuite dans la zone d'avertissement est non stationnaire. Il apparaît souvent sous forme de groupes d'impulsions correspondant à l'apparition et à l'extinction d'arcs partiels. La valeur de ces impulsions de courant dans cette zone est généralement de quelques dizaines à une centaine de micro-Ampères.

Ainsi le courant de fuite permet d'une part, la prévention contre les endommagements pouvant affecter les isolateurs, et d'autre part, le choix des types d'isolateurs destinés à servir dans les sites pollués.

## b/ Essais basés sur la conductivité superficielle

D'après la recommandation de la CEI-60 [22], la résistivité superficielle d'une surface isolante peut être déterminée par la mesure de la résistivité de fuite entre deux électrodes en métal. La conductivité superficielle est prise égale à l'inverse de la résistance de fuite, multipliée par un facteur dépendant de la forme géométrique de l'isolateur [23]. La mesure de la conductivité superficielle peut se faire également à l'aide d'une sonde comme par exemple suggérée par la norme polonaise PN71E/04405 [24] (Fig. 1.1).

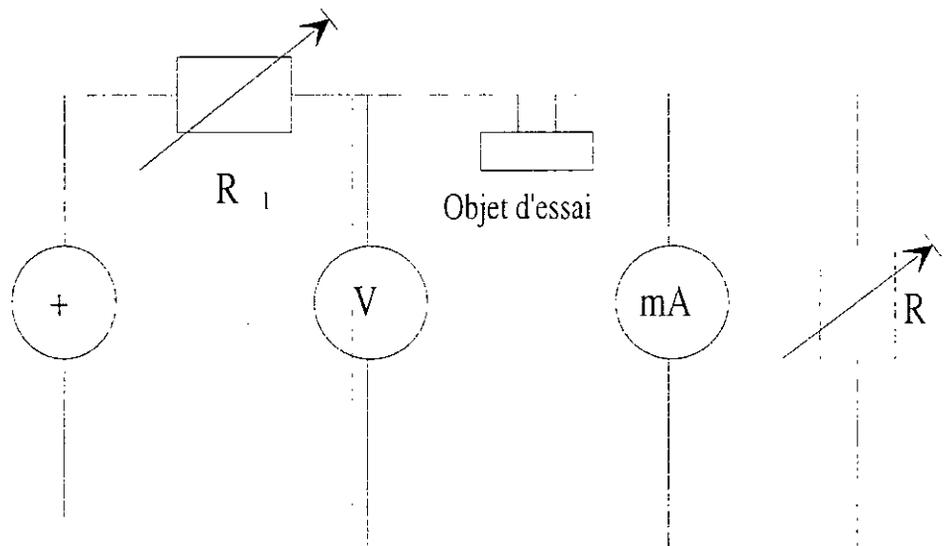


Fig.1.1: Schéma de circuit de mesure de la conductivité superficielle de l'isolateur pollué selon la norme polonaise PN71E/04405.

## 5.2 Essais sous pollution artificielle

En créant artificiellement en laboratoire une pollution, les chercheurs ont tenté de pallier à l'inconvénient majeur des essais in situ, qui est leur durée.

Cependant, la mise au point de ces méthodes artificielles s'est effectuée progressivement et de façon empirique faute de connaissances précises sur les conditions réelles déterminant le contournement.

Afin de valider ces essais artificiels, il a été nécessaire de comparer les isolateurs essayés en laboratoire à ceux observés sous pollution naturelle par critère de mérite, et qui sont:

- la tension de contournement ou la sévérité maximale de la pollution artificielle que l'isolateur peut supporter sans défaillances pour les essais en laboratoire.

- le temps au bout duquel l'isolateur a contourné pour les essais sur site.

Les méthodes d'essais qui demeurent actuellement normalisées sont la méthode du brouillard salin et les méthodes de la couche solide [22].

### 5.2.1 Méthode du brouillard salin

La solution saline utilisée dans la méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière insoluble. Elle est également valable pour représenter de nombreux dépôts de pollution industrielle ayant une couche de pollution relativement mince [12, 13, 15, 25, et 26]. Dans cette méthode, l'isolateur soumis à la tension d'essais, est placé dans un brouillard salin dont le taux de salinité définit la sévérité de l'essai. Ce taux peut être caractérisé soit par le poids de sel contenu dans un litre d'eau en g/l, soit par la mesure de la résistivité, ou de la densité de la solution saline [22]. Selon la classification des sites pollués, les valeurs de salinité appliquée sont choisies selon une progression allant de 2,5 à 160 kg/m<sup>3</sup> [18].

### 5.2.2 Méthode de la couche solide

Cette méthode consiste en l'application d'une couche à la surface de l'isolateur. Elle simule mieux les dépôts de pollution industrielle tels que les cendres de carburant et le ciment. Ce type de couches peut contenir des quantités d'eau relativement importante [12, 13, 27, 28 et 29].

Cette couche est composée d'un matériau solide contenant des ingrédients ioniques. Elle devient conductrice par humidification. Le "Kieselghur" (terre à diatomée) est souvent choisi comme matériau solide, et le chlorure de sodium comme ingrédient ionique. Le brouillard produit par un générateur de vapeur est recommandé comme moyen d'humidification. Cette technique "Kieselghur-brouillard de vapeur" est en accord avec les spécifications de la CEI [22]. Dans certains cas, la couche solide est composée d'une peinture semi-conductrice [30].

La méthode du brouillard salin permet d'obtenir, par rapport aux méthodes de la couche solide, une bonne reproductibilité des essais; elle est d'une grande facilité de mise en

oeuvre. Cette méthode est la seule qui assure, au cours de l'essai, un renouvellement de la couche polluante.

La validation de cette méthode a été vérifiée dans un certain nombre de régions côtières. On a également trouvé une corrélation satisfaisante avec les résultats dans les conditions naturelles de pollution industrielle [12, 13, 15 et 25].

## 6. TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION

Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident. La sévérité de la pollution d'un site peut changer. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation. Le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant, et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre ces nouvelles sources de pollution. Différentes méthodes sont utilisées.

### 6.1 Allongement de la ligne de fuite

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

- le changement de type d'isolateurs (pour rallonger la ligne de fuite): c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- l'utilisation de prolongateur de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [31].

### 6.2 Changement de forme des isolateurs - isolateurs plats

Tandis que les deux précédentes méthodes conduisent à allonger la ligne de fuite des isolateurs, l'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminuer. En effet, ces isolateurs sans nervure ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto-nettoient très bien sous l'effet du vent [15]. Ils sont principalement utilisés dans les pays désertiques soumis à des tempêtes de sable où la principale source d'humidification est la condensation. C'est le cas dans les régions sahariennes.

### 6.3 Graissage périodique

Par mesure économique, seuls les isolateurs de postes sont concernés. On utilise des graisses silicones, et on parle alors de "siliconage" des isolateurs. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs [6, 15]. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement comprise entre 1 et 4 ans [15]. Pour juger de l'opportunité de renouveler la graisse, une méthode de contrôle de la pollution des graisses a été mise au point par la société Electricité De France (EDF) [6]. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de regraissage est pénible, longue et coûteuse. Elle nécessite par ailleurs une interruption de service.

### 6.4 Revêtements silicones

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc siliconé qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Comme pour la graisse, grâce à ses propriétés hydrophobes, ce revêtement protège les isolateurs et améliore leur tenue sous pollution. Par contre, la longévité est en général nettement supérieure à celle des graisses. Dans certains postes de compagnies américaines, des revêtements ont été appliqués pendant plus de dix ans. Cette technique est relativement ancienne, et tend aujourd'hui à se développer grâce à la mise sur le marché de produits plus performants.

### 6.5 Les isolateurs composites

Les isolateurs composites sont apparus au début des années 70. Ils sont constitués d'un noyau en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Ces isolateurs présentent, entre autres, l'avantage d'une grande légèreté allée à une grande résistance mécanique que lui confère le noyau. Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères.

Cependant, ces isolateurs revêtus d'un polymère voient leurs caractéristiques changer au cours du temps; ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service.

Les isolateurs composites sont aujourd'hui de plus en plus utilisés sur les réseaux de transport et de distribution (en particulier en Amérique du nord). En France. (EDF) la première installation date de 1981; en 1990, plus de 2000 isolateurs composites étaient en service [6].

#### 6.6 Nettoyage des isolateurs

- Le nettoyage manuel (essuyage à sec de l'isolateur) ou le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde et en particulier dans les postes. Comme ces méthodes sont pratiquées hors tension, les interruptions de service, parfois assez longues, qu'elles entraînent posent des problèmes majeurs. Aussi tend-on à en limiter autant que possible l'usage.

- Un lavage sous tension des isolateurs permet d'éviter ces coupures. Dans son principe, ce type de lavage permet de « garder propre » l'isolateur. c'est à dire que la fréquence de lavage est déterminée de façon à éviter l'accumulation des dépôts de polluants à la surface des isolateurs. Le lavage sous tension est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau de lavage, le processus de lavage et les distances de sécurité, et ce afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage [6].

- Le nettoyage des isolateurs à l'aide d'un abrasif pulvérisé sous pression est une technique utilisée dans certains pays (Amérique du nord en particulier). Cette technique permet le nettoyage d'isolateurs recouverts de pollution très adhérente (ciment par exemple), et peut être utilisée pour dégraisser les isolateurs [6].

Malgré la relative simplicité de ces dispositifs, le lavage sous tension de la totalité d'un poste reste cependant une opération coûteuse. Il importe donc de réaliser ce lavage au moment le plus approprié.

#### 7. CONCLUSION:

La connaissance du degré de pollution est une condition indispensable permettant de dimensionner convenablement l'isolation extérieure. En effet, lorsqu'un ouvrage doit être construit en zone polluée, il est certain que la meilleure définition de l'isolement sera obtenue en déterminant la salinité équivalente du site par une expérimentation aussi longue que possible dans ce même site.

Le fait de disposer d'une méthode de pollution artificielle permet de n'effectuer l'expérimentation (dans le site) que sur un seul type d'isolateurs et éventuellement à un niveau de tension différent de celui prévu, ce qui constitue déjà un avantage considérable. Il n'en demeure pas moins que trois années minimum sont nécessaires pour déterminer la sévérité d'un site.

Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (graissage, lavage, nouveaux type d'isolateurs, revêtements hydrophobes), permettent de disposer aujourd'hui de solutions curatives adaptées à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants sur le réseau.

Afin d'être en mesure de fournir rapidement des renseignements concernant l'isolement nécessaire, il serait utile de disposer d'une "carte de sévérité" des principaux sites pollués.

Les difficultés rencontrées encore aujourd'hui pour arriver à une bonne maîtrise de la tenue sous pollution des isolateurs montrent que des efforts en matière de recherche restent indispensables.

La mise au point de modèles plus performants est donc nécessaire. Elle passe par une analyse approfondie des processus physiques qui conduisent au contournement: dynamique de développement de l'arc de contournement, répartition du dépôt de polluants à la surface des isolateurs, processus d'humidification de la pollution.

## **CHAPITRE 2: PRINCIPAUX MODELES DE LA DYNAMIQUE DE L'ARC ELECTRIQUE**

## 1. INTRODUCTION

De nombreux travaux ont été menés depuis une cinquantaine d'années pour comprendre les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs pollués et se prémunir d'outils permettant la prédiction de ce phénomène, et donc d'éviter la mise hors service du système. Les résultats de ces recherches ont permis d'établir des modèles donnant les caractéristiques des décharges évoluant sur les surfaces d'isolateurs et ce jusqu'au contournement. La plupart de ces modèles sont empiriques ou semi-empiriques. Actuellement, des modèles analytiques sont également proposés [8, 9].

Cette importante quantité de travaux tant théoriques qu'expérimentaux consacrée à ce phénomène n'a pas permis pour autant d'aboutir à l'élaboration d'un modèle pouvant tenir compte simultanément de tous les paramètres réels caractéristiques du phénomène de pollution. Il s'agit en particulier de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes (continue ou discontinue) et de leur résistivité, des échanges thermiques, de la non uniformité du mouillage et de l'intensité des arcs au voisinage de la surface des isolateurs, ... Ainsi, la détermination de la tension de contournement d'un isolateur pollué est entachée d'une dispersion marquée, même lorsque les conditions sont en apparence contrôlées.

La décharge ne peut être générée que si le champ électrique au niveau des électrodes (et donc la tension appliquée) dépasse une certaine valeur dite « de seuil » (respectivement tension d'amorçage). Cette décharge ne peut évoluer que si certaines conditions sont réunies.

Partant d'une analyse graphique, Flazi [32] a montré que les conditions critiques d'élongation de la décharge sont différentes des conditions critiques de contournement; les premières sont déterminées par la satisfaction du critère de propagation juste en avant de la décharge, les deuxièmes sont déterminées lorsque ce critère est satisfait tout au long de la propagation.

On parle de réallumage de l'arc lorsqu'il s'agit de courant alternatif. Dans ce cas, l'arc est interrompu à la fin de chaque alternance puis réapparaît quelques instants plus tard lorsque la tension est suffisante pour provoquer le réamorçage de la décharge. Ce réamorçage correspond, en fait à une augmentation brutale de la conductivité du canal de la décharge qui demeurerait partiellement ionisé après extinction de la décharge précédente [33, 34]. Par conséquent, ce réamorçage ne s'effectuera et la décharge ne pourra s'allonger que sous certaines conditions.

Le contournement est l'ultime étape liée à la génération d'une décharge disruptive à la surface de l'isolateur.

Dans ce qui va suivre, nous allons exposer ces différents modèles en utilisant les mêmes notations pour chaque grandeur.

## 2. PRINCIPAUX MODELES STATIQUES DE CONTOURNEMENT

### 2.1 Modèle d'Obenaus

C'est Obenaus [2] qui, dans un travail de pionnier, est à l'origine des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur des surfaces isolantes polluées sous tension continue. Partant d'un circuit équivalent (Fig.2.1), il en a déduit la tension d'arc:

$$V_{arc} = \frac{XN}{I^n} \quad (2.1)$$

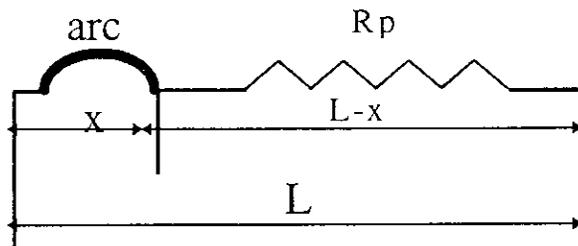


Fig. 2.1: Circuit électrique équivalent du modèle d'Obenaus [2].

L représente la longueur de fuite totale.

En effet, en appliquant la loi d'ohm, l'équation électrique s'écrit comme suit :

$$V = V_e + V_{arc} + R_p(X) \cdot I$$

avec :

V : la tension appliquée.

$V_e$  : la chute de tension totale aux bornes des électrodes; elle dépend des conditions expérimentales.

$R_p(X)$  : la résistance de la couche polluée.

$V_{arc}$  : tension d'arc telle que:

$$V_{arc} = R_{arc} \cdot X \cdot I$$

$R_{arc}$  : Résistance d'arc / unité de longueur.

X : longueur d'arc.

I : le courant qui traverse la couche polluée.

La décharge est caractérisée par la présence d'un champ électrique longitudinal  $E_a$  :

$$E_a = V_{arc} / X = N \cdot I^n$$

D'où l'équation :

$$V_{arc} = N \cdot X \cdot I^n$$

avec N et n, les constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc.

Ainsi, on obtient l'équation de la tension totale appliquée au système:

$$V = V_e + N \cdot X \cdot I^n + R_p(X) \cdot I$$

Les valeurs des paramètres n et N dépendent du milieu dans lequel s'amorce la décharge. Elles varient selon les auteurs [5, 28] et [35 - 40]. De façon générale:

$$0,40 < n < 1$$

et

$$3 < N < 500$$

A partir de mesures expérimentales sur un canal d'électrolyte, Ghosh et *al* [41] ont proposé de prendre des valeurs différentes pour les constantes N et n caractérisant l'équation de la décharge selon la nature de l'électrolyte utilisé. Les résultats de leurs mesures sont données dans le tableau 2.1.

Electrolyte	N	n
NaCl	360	0,59
CaCl <sub>2</sub>	461	0,42
FeCl <sub>3</sub>	270	0,66
CuSO <sub>4</sub>	450	0,49

Tableau 2.1

## 2.2 Modèle de Neumarker

A partir du modèle d'Obenaus, Neumarker [42] a introduit une hypothèse supplémentaire qui est celle d'une résistance de pollution uniforme par unité de longueur de fuite, soit:

$$R_p(X) = r_p(L - X) \quad (2.2)$$

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

En introduisant cette expression dans le modèle d'Obenaus, la tension  $V$  aux bornes de l'isolateur sera:

$$V = V_{arc} + r_p(L - X)I \quad (2.3)$$

ou encore

$$V + \frac{NX}{I^n} + r_p(L - X)I$$

Ainsi, Neumarker déduit le courant et la longueur d'arc critiques:

$$I_c = \left( \frac{NX}{I^n} \right)^{1/n+1} \quad (2.4)$$

et

$$X_c = \frac{L}{n+1} \quad (2.5)$$

d'où l'expression de la tension critique de contournement:

$$V_c = N^{1/n+1} r_p^{n/n+1} L \quad (2.6)$$

## 2.3 Modèle d'Alston et Zoledziowski

En tenant compte de l'hypothèse de Neumarker et pour une tension d'application dépassant quelques kilovolts, Alston et Zoledziowski [5] ont déterminé la condition de maintien de l'arc électrique dans le cas d'un isolateur cylindrique de longueur  $L$  (Fig.2.2):

$$U_{cx} = (n+1)(N.X)^{1/n+1} \left( r \cdot \frac{L-X}{n} \right)^{n/n+1} \quad (2.7)$$

avec

$X$  : longueur d'arc.

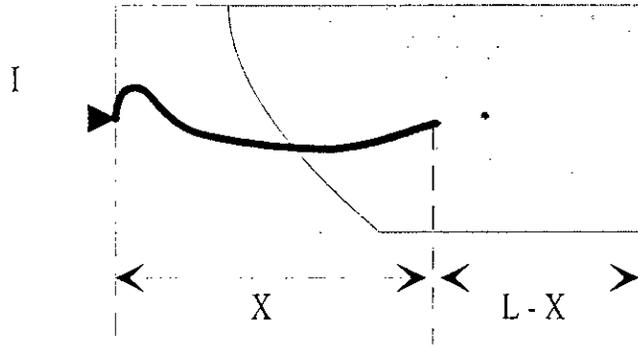


Fig. 2.2: Modèle cylindrique utilisé par ALSTON et ZOLEDZIOWSKI [3]

#### 2.4 Modèle de J. Danis

Afin de reproduire des couches similaires à celles observées sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, J.Danis [1] a utilisé un modèle de forme géométrique simple (plaque ou cylindre) possédant plus d'une zone sèche (Fig.2.3.a). La rupture des zones sèches survient alors d'une manière aléatoire (Fig.2.3.b). Le lieu d'apparition des arcs partiels, la forme et le mouvement des racines des arcs sur une surface polluée (Fig.2.3.c) dépendent ainsi de plusieurs facteurs dont on ne peut déterminer les effets instantanés. Par conséquent, le comportement macroscopique de ces arcs a une nature stochastique. La tension de contournement est donc une variable aléatoire et a une fonction de distribution. Une simulation numérique des observations expérimentales, utilisant des photographies à grande vitesse (3000 images / seconde), a été utilisée pour déterminer cette tension.

En considérant que la résistance de la couche polluante est linéaire, l'équation qui régit ce modèle est:

$$V = kI^{-n} + r_p(L - X)I \quad (2.8)$$

avec  $n \leq 0,5$

$$200 \leq N \leq 400$$

$r_p$  est la résistance linéique.

Les grandeurs critiques déduites par l'auteur sont données par les expressions:

$$I_c = \left( \frac{k}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (2.9)$$

et

$$V_c = L(kr_p)^{\frac{1}{n+1}} = kI_c^{-n} \quad (2.10)$$



### 2.5 Modèle de la couche mixte

Pour une couche de pollution mixte, dans le cas d'un isolateur à long fût. Obenaus et Boehme [40] 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 indiqué sur la figure 2.4. En décomposant la distance totale de fuite en deux distances partielles  $L_1$  et  $L_2$  respectivement et en appliquant le critère de Hampton [28], ils ont déduit la relation ci-dessous donnant le gradient de contournement critique (en faisant certaines hypothèses et en choisissant l'exposant  $n = 1$ ).

$$\frac{V_c}{L} = 0,8\sqrt{k}\sqrt{r_l} \quad (2.11)$$

où la constante  $k = 80 \text{ VA/cm}$

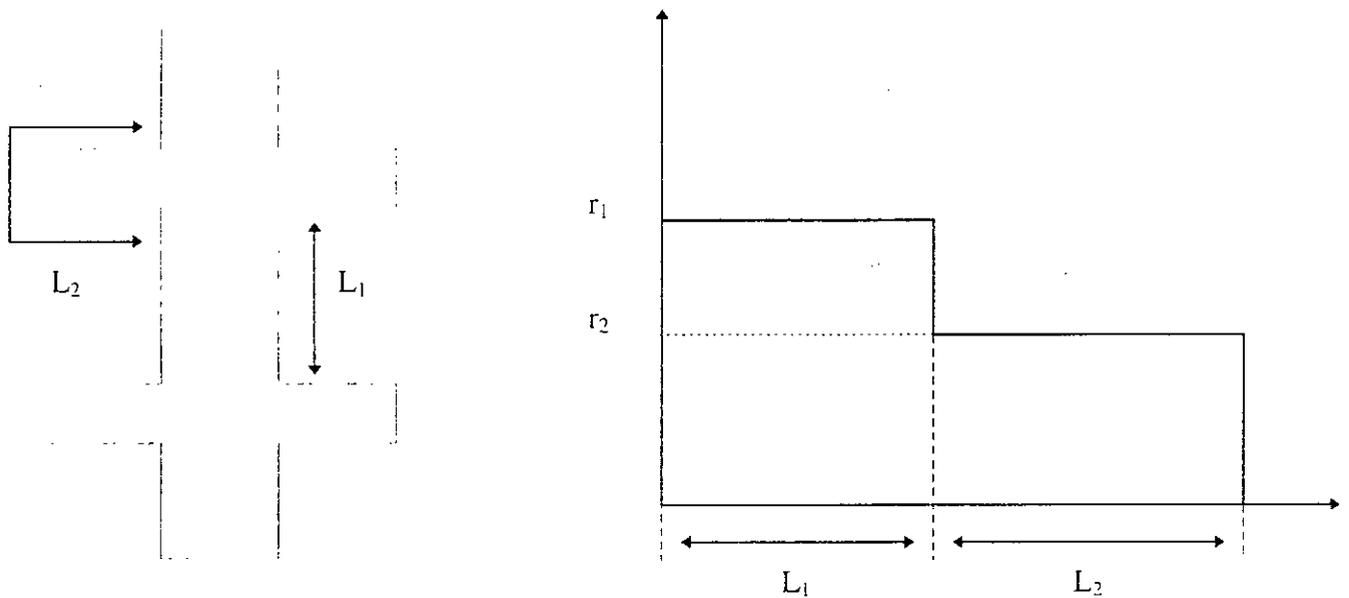


Fig 2-4 : Modèle d'un isolateur a long fût et distribution de la résistance de pollution selon BOHEME et OBENNAUS [40].

En appliquant le critère d'Hesketh [43], l'expression précédente devient:

$$\frac{V_c}{L} = 0,8(Lr_p I) \quad (2.12)$$

où  $r_p$  est la résistance linéique sur une longueur partielle de fuite  $L_1$  ou  $L_2$ .

## 2.6 Modèle du disque circulaire

Woodson et McElroy [44] ont essayé de reproduire, d'une façon idéale, la surface d'un isolateur en utilisant une configuration géométrique circulaire (Fig.2.5).

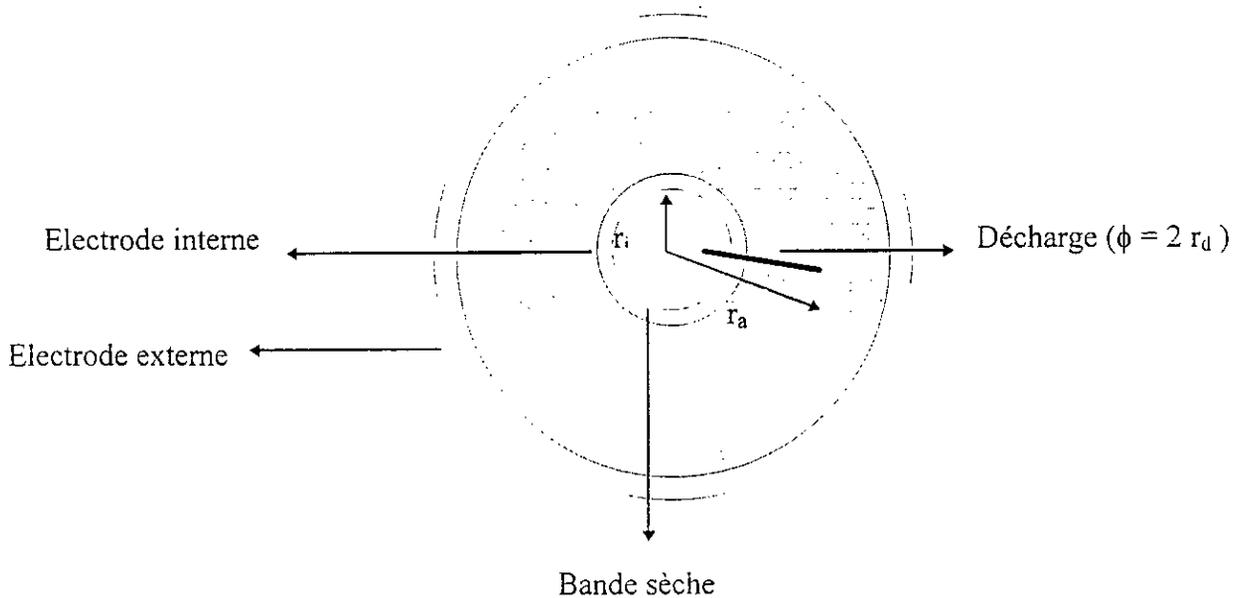


Fig. 2.5: Modèle de disque circulaire selon WOODSON et MC.ELROY [44].

La résistivité superficielle du polluant, en se basant sur certaines hypothèses, peut s'écrire sous la forme suivante:

$$R(X) = \frac{C}{\gamma} (r_o - r_a)^m \quad (2.13)$$

où  $r_o$  est le rayon de l'électrode externe,  $\gamma$  la conductivité superficielle du polluant,  $r_a$  la longueur initiale de l'arc, et  $C$  une constante déterminée expérimentalement pour une résistance de pollution  $R(X) = 1,6 \cdot 10^{-2} \Omega$  et  $m$  une constante:  $C = 1,4$ .

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

## 2.7 Modèle de Nacke et Wilkins

Nacke et Wilkins [35, 45, 46] proposent de considérer que les points à la base de l'arc forment des demi-cercles aux limites des bandes sèches (Fig.2.6.a). Ainsi la résistance de pollution se compose de deux termes: une résistance interne  $R_i(X)$  propre aux deux demi-cercles, et une résistance externe  $R_e(X)$  pour le reste.

Pour une largeur de bande étroite ( $X_p/b \geq 2/\pi$ ):

$$R_i(X) = \frac{1}{\pi\gamma} \quad (2.14)$$

et

$$R_e(X) = rX_p + \frac{2}{\pi\gamma} \text{Log}\left(\frac{b}{2\pi r_d}\right) \quad (2.15)$$

où

$r = X_p/b$  est la résistance linéique de la pollution.

$X_p$  est la longueur de la couche polluée (mouillée) dans les conditions critiques.

$b$  est la largeur de la surface de l'isolateur.

$r_d$  est le rayon de la base de l'arc.

Pour une bande large et pour un isolateur à ailette unique, la résistance externe est donnée par:

$$R_e(X) = \frac{2}{\pi\gamma} \left[ 0,68 + \text{Ln}\left(\frac{X_p}{r_d}\right) \right] \quad (2.16)$$

Pour un isolateur à ailettes multiples:

$$R_e(X) = \frac{2}{\pi\gamma} \left[ 0,3 + \text{Ln}\left(\frac{X_p}{r_d}\right) \right] \quad (2.17)$$

Ainsi, la résistance de pollution totale sera:

$$R(X) = R_i(X) + R_e(X) \quad (2.18)$$

Pour la même configuration (Fig.2.6.b), dans le cas d'une bande étroite, Wilkins [35] a obtenu:

$$R(X) = r(L - X) + \frac{1}{\pi\gamma} \text{Ln}\left(\frac{b}{2\pi r_d}\right) \quad (2.19)$$

et pour une bande large:

$$R(X) = \frac{1}{\pi\gamma} \left[ \text{Ln} \left( \frac{2L}{\pi r_d} \right) - \text{Ln} \left( \tan \frac{\pi X}{L} \right) \right] \quad (2.20)$$

où X est la longueur d'arc et L la distance totale de fuite de l'isolateur.

Le désaccord existant entre les essais à courant continu et ceux à courant alternatif leur a permis d'introduire un facteur de conductivité.

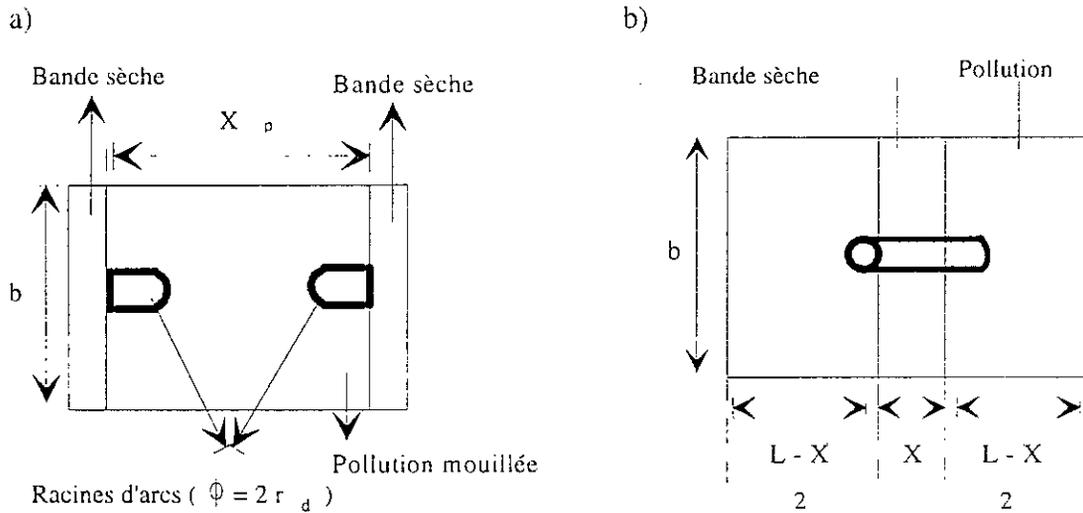


Fig. 2.6: Représentation schématique de la surface d'un isolateur et des pointes de base de l'arc utilisé pour le calcul de la résistance de pollution selon: (a) Nacke [45, 46], (b) Wilkins [35].

## 2.8 Modèle de Rizk

A partir d'une analyse théorique, Rizk [9] a décrit le phénomène d'entretien de l'arc par le mécanisme de la rupture diélectrique. Il a mis en évidence l'expression de la rigidité diélectrique de l'espace résiduel et établi une relation entre la tension minimale  $U_c$  (tension de contournement minimale) nécessaire à l'entretien de l'arc, la résistance de pollution linéique  $r_p$  et la longueur de fuite L de la forme:

$$\frac{U_c}{L} = 23r_p^{0.4} \quad (2.21)$$

### 2.9 Modèle de Claverie et Porcheron

Plusieurs modèles expérimentaux ont été proposés pour le cas d'une tension alternative. Le plus connu est celui de Claverie et Porcheron [36, 37]. Ces auteurs ont montré que pour un modèle d'isolateur plan (Fig. 2.7) la tension d'arc est de la forme:

$$V_{arc} = \frac{100X}{\sqrt{I}} \quad (2.22)$$

et la tension minimale d'entretien de l'arc  $U_{cx}$  est:

$$U_{cx} = \frac{800X}{\sqrt{I}} \quad (2.23)$$

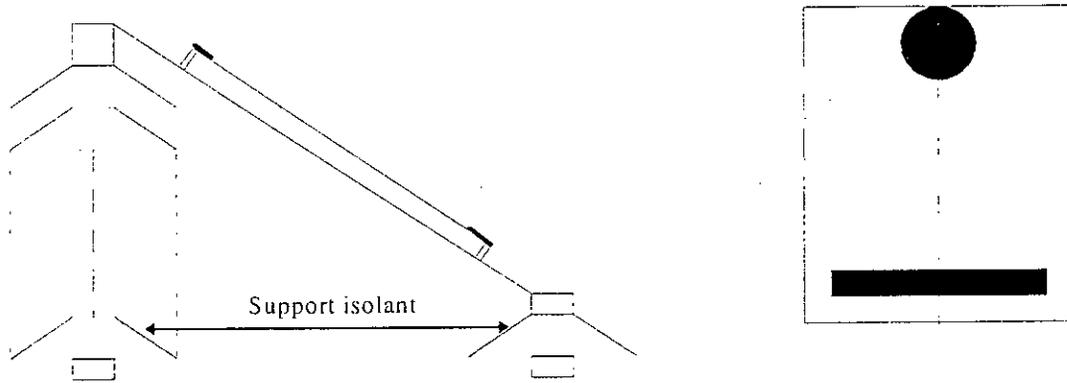


Fig. 2.7: Montage expérimental pour le modèle de Claverie et Porcheron [36, 37].

### 2.10 Modèle de Rao et Gopal

D'après Rao et Gopal [47], l'équation de la tension de type  $V_{arc} = \frac{XN}{I^n}$  n'est valable que pour une décharge de type intermédiaire entre la luminescence et l'arc [48]; elle peut être contestée lorsque la décharge se réamorçait périodiquement. Ainsi ces auteurs ont essayé d'expliquer les écarts entre les prédictions des modèles et les valeurs mesurées pendant le contournement, en introduisant une nouvelle équation exprimant le champ dans la colonne de la décharge du type:

$$U = \alpha + (\beta + X)v \left( \ln \frac{I}{\delta} \right)^{-3} \quad (2.24)$$

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\nu$ , et  $\delta$  sont des constantes qui dépendent de la nature des électrodes entre lesquelles se développe la décharge. Cette équation a été établie à partir du modèle de S. Gopal *et al* [44]. Elle exprime la caractéristique  $U(I,X)$  d'un arc de faible intensité se propageant dans l'atmosphère.

### 3. MODELISATION DYNAMIQUE DE L'ARC

Alors que plusieurs paramètres évoluent dans le temps, l'étude du phénomène de contournement a été souvent effectuée en utilisant des modèles statiques. Afin de se rapprocher le plus possible de la réalité et parer à cet handicap, de nouveaux modèles, tenant compte de la variation dans le temps de certains paramètres, ont été proposés. Ainsi, des lois physiques sont utilisées pour établir des critères de propagation de la décharge et pour étudier la dynamique de cette décharge (en particulier la vitesse).

#### 3.1 Mécanisme de propagation

##### 3.1.1 Propagation par ionisation

Wilkins et Al Baghdadi [49] ont proposé un mécanisme d'élongation basé sur l'ionisation et le déplacement discontinu de la tête de la décharge. Selon Wilkins [35], la probabilité d'ionisation dans la région précédant l'avant tête de la décharge est grande, étant donné que la température ainsi que le potentiel sont élevés dans cette région.

Si l'ionisation est suffisante, alors il y a circulation d'un courant électrique. La conductivité du nouveau trajet du courant va augmenter avec celui-ci, tandis que celle du trajet précédent dans l'électrolyte reste constante. Par conséquent, le courant total change progressivement de trajet, entraînant ainsi une élongation  $\delta$  de la décharge.

Wilkins parle d'ionisation, de passage de courant et de l'existence d'un champ à la tête de la décharge sans évoquer le claquage de l'air. Sous le nom d'ionisation, il considère en réalité une rupture diélectrique progressive.

##### 3.1.2 Propagation par force électrostatique

A partir des observations faites sur un canal d'électrolyte, Rahal [38] a essayé de mettre en évidence l'existence d'une force électrostatique s'exerçant sur la décharge, responsable du déplacement de l'arc. Il a démontré que du point de vue électrique

macroscopique, cette force était due à la dissymétrie de la distribution du potentiel, elle même causée par le passage du courant dans le liquide couvrant la surface isolante. Cette force va provoquer la courbure de la décharge vers l'électrode de masse (Fig. 2.8). Une fois les conditions critiques satisfaites, la décharge se déplacera alors vers l'électrode de masse.

D'après l'auteur, l'existence de cette force implique en effet, que l'on considère la décharge comme un élément de circuit doué d'une certaine auto-consistance macroscopique et susceptible de s'étirer de façon plus ou moins élastique. En plus, Rahal a constaté l'existence de cette force électrostatique quelle que soit la tension appliquée. Néanmoins, le mécanisme microscopique de l'action de cette force reste jusqu'à maintenant mal connue.

Dans une analyse critique des différents mécanismes de propagation de la décharge présents dans la littérature, Flazi [32] ne pouvant pas identifier un phénomène élémentaire de rupture diélectrique d'un intervalle gazeux sur le trajet du contournement, au sens de la physique de la décharge, a du se ramener à une approche plus globale du phénomène, à savoir le mécanisme de la propagation par ionisation progressive. Ainsi, il a déduit que l'augmentation du degré d'ionisation à l'intérieur de la décharge et le démarrage des processus d'ionisation devant celle-ci, sont les facteurs responsables de l'allongement et du changement que subit la décharge, dans ses aspects et ses états dynamiques.

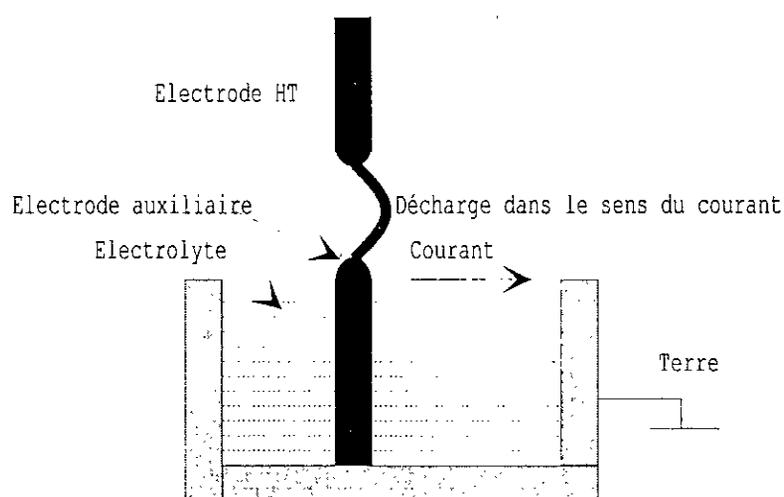


Fig. 2.8: Courbure de la décharge dans la direction de l'écoulement du courant mettant en évidence l'existence d'une force [38].

### 3.2 Critère de propagation de la décharge

Les principaux critères de propagation rencontrés dans la littérature, ont été établis sur la base de conditions faisant intervenir soit le champ électrique, soit le courant, soit la puissance soit l'énergie fournie par la source ou encore les impédances.

#### 3.2.1 Critère de Hampton

Partant de résultats expérimentaux, Hampton [28] a déterminé les conditions critiques de propagation de l'arc. En remplaçant la couche de pollution en série avec l'arc par une colonne d'eau uniforme présentant une résistance linéique constante, il a pu établir que la condition nécessaire pour que le contournement se produise, est que le champ  $E_p$  dans la colonne d'eau dépasse le champ à l'intérieur de l'arc  $E_a$  :

$$E_a < E_p \quad (2.25)$$

#### 3.2.2 Critère de Hesketh

En supposant que l'arc en série avec la couche de pollution mouillée se modifie de façon à rendre maximal le courant qu'il tire de la source d'alimentation, Hesketh [43] a établi un critère de propagation de l'arc, exprimé par la relation:

$$\frac{dI}{dX} \geq 0 \quad (2.26)$$

I étant le courant d'arc.

#### 3.2.3 Critère de Wilkins

En considérant qu'un système se place dans la configuration qui lui permet de dissiper le maximum d'énergie, Wilkins [35] a généralisé la condition énoncée par Hesketh et établi un critère de propagation utilisant la puissance P fournie par la source:

$$\frac{dP}{dX} \geq 0 \quad (2.27)$$

Pour Wilkins, le mouvement de la décharge se produit lorsque la puissance P augmente avec l'élongation de la décharge. Lorsque la tension appliquée au système est constante, le critère de Wilkins se réduit à la condition établie par Hesketh.

### 3.2.4 Critère de Anjana et Lakshminarasimha

En assimilant l'arc à une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, Anjana et Lakshminarasimha [50] ont établi une condition nécessaire à la propagation de l'arc, basée sur des considérations énergétiques: l'énergie totale fournie  $W_{totale}$  doit être supérieure ou égale à l'énergie  $W_{th}$  nécessaire pour maintenir l'arc à sa température:

$$W_{totale} \geq W_{th} \quad (2.28)$$

### 3.2.5 Critère de N. Dhahbi, A. Beroual et L. Krahenbul

N. Dhahbi et al [8] proposent un nouveau critère analytique de propagation de la décharge faisant intervenir l'impédance équivalente d'un circuit électrique (Fig.2.9) simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite.

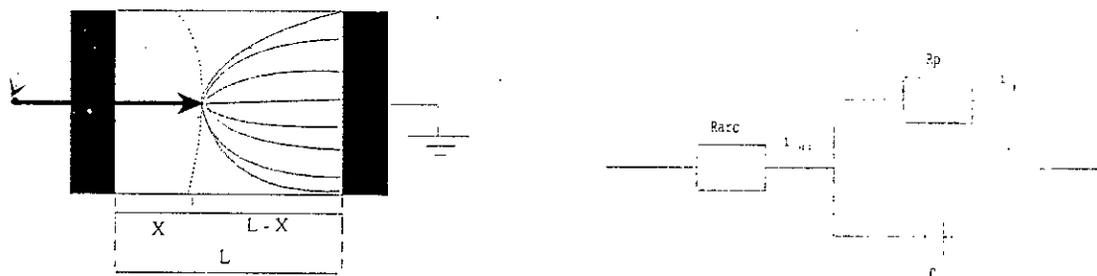


Fig. 2.9 : Modèle d'isolateur pollué et circuit équivalent correspondant

En utilisant comme condition nécessaire à la propagation de l'arc  $\frac{d|Z_{eq}|}{dX} \leq 0$ , les auteurs aboutissent au fait que le critère de Hampton [28] n'était pas suffisant. En effet, en plus de ce critère, les auteurs trouvent un autre critère tel que:  $E_{arc} \geq \frac{E_p}{\sqrt{a}}$  (sous tension continue  $a = 1$ , car  $a = 1 + \omega^2 \rho_p \epsilon^2$ ).

### 3.3 Modèles dynamiques

#### 3.3.1 Modèles de Rizk

Pour caractériser la dynamique de l'arc pour le cas continu, Rizk et Nguyen [51] ont considéré une résistance d'arc qui varie selon l'équation de Mayr [52]:

$$\frac{dr_a}{dt} = \frac{r_a}{\tau} - \frac{r_a^2 I^{n+1}}{\tau N} \quad (2.29)$$

avec  $\tau = 100 \mu\text{s}$ , constante de temps de l'arc

$$n = 0,8 \quad \text{et} \quad N = 60.$$

La température de l'électrolyte est calculée à partir du bilan des énergies qui prend en compte les pertes d'énergie due à l'évaporation, la convection et la condensation:

$$\delta C_p h \frac{dT}{dt} = \frac{R_p(X)i^2}{S(X)} - \delta H \frac{dh_v}{dt} - \left( H_c + \delta C_p \frac{dh_w}{dt} \right) (T - T_a) \quad (2.30)$$

où  $h$  est l'épaisseur de la couche de pollution,  $\delta$  la masse volumique de l'électrolyte,  $H$  l'enthalpie (2260 J/g),  $H_c$  le coefficient de transfert de la chaleur par convection ( $250 \mu\text{w}/\text{cm}^2/^\circ\text{C}$ ),  $C_p$  la chaleur spécifique sous pression constante,  $T_a$  la température ambiante et  $S(X)$  la surface de l'électrolyte non contournée.

Dans ce modèle, pour une durée d'impulsion de courant inférieure à 1 s, l'augmentation de l'épaisseur de l'électrolyte par humidification ( $h_w$ ) est négligeable devant sa diminution par évaporation ( $h_v$ ). Cette dernière peut être calculée pour une température de  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  à partir de l'équation:

$$\frac{dh_v}{dt} = \left[ \frac{R_p i^2 / S(X) - H_c (T - T_a)}{\delta [H + C_p (T - T_a)]} \right] \quad (2.31)$$

Pour calculer la vitesse de propagation, Rizk et Nguyen [51] ont adopté l'expression empirique établie par Al Baghdadi [49] et que Rizk a justifié auparavant par son analyse dimensionnelle [53]. Les résultats expérimentaux ont montré que ce modèle reproduit correctement l'influence de la résistance de protection placée en série avec l'électrode haute tension.

#### 3.3.2 Modèle de Anjana et Lakshminarasimha

Anjana et Lakshminarasimha [50] ont proposé un modèle dynamique basé sur l'équation de Mayr [52] et sur le modèle statique d'Obenaus [2]. Ils ont supposé que

l'isolateur est divisé en un certain nombre de bandes formant des anneaux symétriques par rapport à l'axe de l'isolateur et que l'arc est une colonne de gaz en équilibre thermodynamique dont l'énergie est donnée par:

$$W_{th} = \frac{3}{2} kTM \quad (2.32)$$

où T est la température de l'arc, M le nombre de particules neutres dans l'arc et k la constante de Boltzmann.

Pour la propagation de l'arc, Anjana et Lakshminarasimha [50] proposent un modèle, selon lequel l'arc ne se déplace que si son énergie totale  $W_t$  est supérieure ou égale à l'énergie  $W_{th}$  nécessaire pour maintenir l'arc à sa température.  $W_t$  est donnée par l'expression suivante:

$$W_t = (E_{arc} I_{arc} - P_0) \Delta t \quad (2.33)$$

$E_{arc}$  étant le gradient dans l'arc,  $P_0$  les pertes par unité de longueur considérées comme constantes; cette valeur est fonction des pertes par conduction et des pertes par rayonnement. La température de l'arc et la température ambiante sont supposées constantes et égales respectivement à 3000 °K et 300 °K.

Si la condition de propagation n'est pas satisfaite, la tension est incrémentée de  $\Delta V_s$  et le programme est repris depuis le début. Par contre, si la condition est satisfaite, la vitesse de propagation de l'arc est calculée par:

$$v = \mu E_{arc} \quad (2.34)$$

où  $\mu$  est la mobilité de l'arc.

Grâce au pas de temps  $\Delta t$  on déduit la variation de la longueur d'arc  $dX$  ( $dX = v\Delta t$ ).

Si la nouvelle valeur de la longueur d'arc  $X + dX$  atteint la dernière bande, il y a contournement, sinon le temps est incrémenté de  $\Delta t$  et les calculs sont repris depuis le début.

### 3.3.3 Modèle de Sundararajan et Gorur

Sundararajan et Gorur [54] ont proposé un modèle dynamique qui ressemble au modèle précédent sauf qu'ils ont adopté pour le critère de propagation, celui de Hampton ( $E_{arc} < E_p$ ) pour le cas continu.

En ce qui concerne le gradient de tension dans la couche de pollution, ces auteurs utilisent l'expression:

$$E_p = N^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (2.35)$$

où  $r_p$  représente la résistance de pollution linéique,  $N = 63$  et  $n = 0,5$ . Notons que la valeur de  $E_p$  utilisée par Sundararajan et Gorur est en fait la contrainte critique  $E_c = N^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}}$  établie par Neumarker [42].

Pour le cas alternatif, Sundararajan et Gorur [54] utilisent le même modèle en y remplaçant le critère de propagation de l'arc par la condition de réallumage établie par Rizk [9] ( $V = 23r_p^{0,4}$ ).

### 3.3.4 Modèle de N. Dhahbi et A. Beroual

Dans ce modèle, Dhahbi et A. Beroual [55] considèrent que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme indiqué à la figure 2.10 .

$R_i$  ,  $C_i$  ,  $L_i$  et  $V_i$  sont respectivement la résistance, la capacité, l'inductance et la tension correspondant à chaque cellule nouvellement créée représentant un nouveau déplacement partiel de l'arc. La résistance  $R_p$  représente la résistance de la couche de pollution.

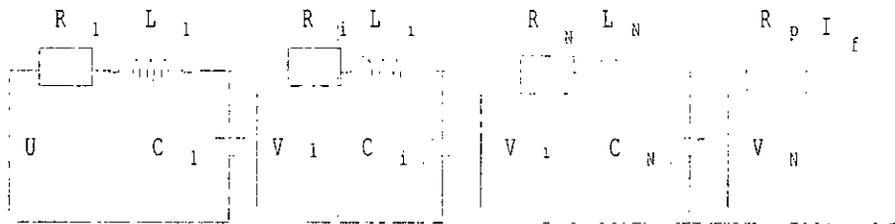


Fig. 2.10 : Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge de N. Dhahbi et al

Pour décrire la propagation de l'arc, ce modèle utilise comme caractéristique fondamentale le critère d'impédance. Ainsi, les auteurs ont trouvé que les effets de l'inductance du canal de la décharge peuvent être négligés. La forme d'onde de la tension appliquée a une influence directe sur les caractéristiques de contournement de l'isolateur pollué.

Le programme présenté à la figure 2.11 permet soit de calculer la tension de contournement critique, le temps au contournement et la vitesse de propagation, soit de suivre l'évolution de certains paramètres caractéristiques de l'arc (courant d'arc, vitesse de propagation, chute de tension dans l'arc, tension à la tête de l'arc et charge injectée dans l'intervalle inter-électrodes), pour une tension donnée pendant un intervalle de temps fixé à l'avance. A cet organigramme, sont rajoutés des modules et des tests propres à chaque type de tension appliquée.

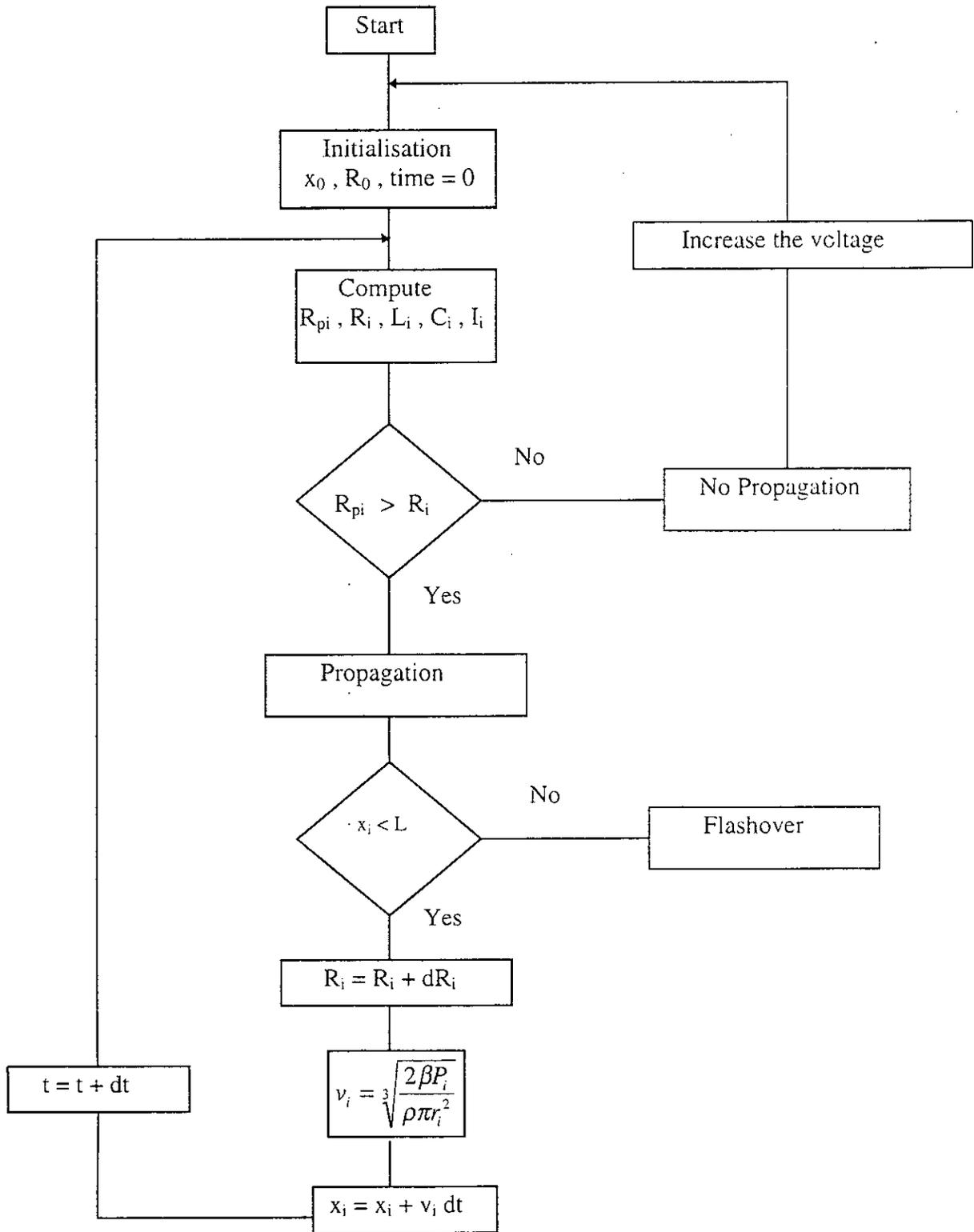


Fig.2.11 : Organigramme du modèle dynamique de N. Dhahbi et al

### 3.4 Vitesse de propagation

De nombreux mécanismes ont été proposés pour expliquer la propagation de la décharge sur les surfaces isolantes polluées, mais il existe peu de relations permettant d'évaluer la vitesse de propagation de la décharge.

En faisant l'hypothèse que l'allongement de la décharge est lié à la puissance  $P$  disponible à la naissance de la décharge et à l'énergie nécessaire pour l'obtenir, Zoledziowski [5, 56] a établi la relation suivante:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{U^2}{\sigma r_p^2 (L - X)^2 Q} \quad (2.36)$$

où  $\sigma$  désigne la conductance de la décharge,  $Q$  la densité d'énergie linéique de la décharge,  $X$  la longueur et  $r_p$  la résistance de pollution.

Matsuo *et al* [57] abordent de façon directe l'étude de la variation de la vitesse de propagation. En utilisant des fibres optiques placées sur le chemin de la décharge à des distances données les unes des autres et en mesurant les intervalles de temps entre les signaux lumineux détectés par les fibres optiques, ils déduisent la vitesse moyenne de propagation de la décharge.

A l'aide d'une caméra ultra rapide, Al Baghdadi [49] a pu établir une relation empirique donnant la vitesse:

$$v = 1,54 \cdot 10^{-4} r_p^{2,5} (i^4 - i_c^4) \text{ cm / s} \quad (2.37)$$

où  $I_c$  est le courant critique en A et  $r_p$  la résistance linéique de pollution en  $\Omega/\text{cm}$ .

Rizk [9] a trouvé que cette formule concorde avec son analyse dimensionnelle [53] et l'a utilisée dans son modèle dynamique [51].

Aussi, Rahal [58] suppose que le déplacement de la décharge est gouverné par les ions qui sont extraits et que la vitesse moyenne de ces ions est proportionnelle au champ  $E_{pr}$  existant à la racine de l'arc. De plus, une force de rappel provenant de la colonne de la décharge,

s'exerce sur ces ions. Le champ total s'exerçant sur les ions est alors égal à la différence entre  $E_{pr}$  et  $E_{arc}$ , et la vitesse aura pour expression:

$$v = \frac{dx}{dt} = \mu(E_{pr} - E_{arc}) \quad (2.38)$$

où  $\mu$  désigne la mobilité des électrons dans l'arc.

D'après Rahal, le champ peut être exprimé par:

$$E_{pr} = \frac{I\rho}{2ae} \left[ \frac{sh\left(\frac{2\pi r_d}{a}\right)}{ch\left(\frac{2\pi r_d}{a}\right)} + 1 \right] \quad (2.39)$$

où  $e$ ,  $a$ ,  $I$ ,  $\rho$  et  $r_d$  sont respectivement la profondeur de la couche d'électrolyte, la largeur du canal contenant la couche de pollution, le courant de la décharge, la résistivité de l'électrolyte et le rayon de la décharge.

En se basant sur le fait que pendant la propagation de l'arc, l'énergie totale  $W_t$  est dépensée sous différentes formes [59, 60], et qu'une partie de cette énergie est transférée au canal d'arc sous forme d'énergie cinétique  $W_c$ , lui permettant ainsi de s'allonger d'une distance  $dX$ , N. Dhahbi et A. Beroual [61] aboutissent à l'expression suivante de la vitesse de propagation de la décharge:

$$v(t) = \sqrt{\frac{2\beta P(t)}{\rho\pi r^2}} \quad (2.40)$$

$\beta$  est tel que:  $0 < \beta < 1$

et

$$W_c = \beta W_t.$$

$r$  est le rayon de l'arc,  $\rho$  la masse volumique du gaz et  $P(t)$  la puissance instantanée injectée dans l'intervalle.

La vitesse donnée par ce modèle est trouvée supérieure à celle donnée par ailleurs ( $v = \mu E_{arc}$ ), même en prenant des mobilités relativement grandes (de l'ordre de  $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ). Cependant, l'augmentation de la vitesse de propagation avec la longueur et le courant de la décharge donnée par ce modèle trouve confirmation dans les observations rapportées dans la littérature [9, 38, 58, 71], ce qui n'est pas le cas avec l'expression de la vitesse en fonction de la mobilité

( $v = \mu E_{arc}$ ) où celle-ci diminue avec l'augmentation de la longueur de la décharge vu que le champ  $E_{arc}$  diminue lorsque le courant augmente.

#### 4. Paramètres d'influence

##### 4.1 Influence de la polarité

Les modèles classiques de contournement en tension continue, ne font pas la différence entre les polarités. De ce fait, ces modèles n'expliquent pas les résultats expérimentaux rapportés par un certain nombre de chercheurs [58, 62, 63], selon lesquels les tensions critiques en polarité négative sont environ 2/3 des tensions critiques en polarité positive.

Wilkins et Al Baghdadi [49] ont remarqué que pour des valeurs de résistances grandes, les tensions négatives donnent des courants critiques légèrement inférieurs à ceux des tensions positives. Ceci peut être expliqué par leur théorie de l'élongation par ionisation. Dans le cas des tensions négatives, on a un gradient de tension sur la tête de la décharge plus important dû à la charge d'espace, favorisant plus l'ionisation, et donc un courant critique inférieur à celui d'une tension positive appliquée.

Dans une étude plus poussée, Renyu et Zhicheng [64] ont montré que l'influence de la polarité est liée au profil de l'isolateur. Si l'objet est symétrique, il n'y a aucune différence entre les polarités. Par contre, pour un isolateur simple et lisse, un arc négatif est plus stable qu'un arc positif. Ce dernier peut glisser hors de la surface de l'isolateur ou bien s'éteindre facilement.

De même, pour expliquer les valeurs plus faibles de la tension trouvées en polarité négative, certains auteurs [58, 62, 63] ont évoqué le rôle de la "pulvérisation cathodique". En polarité positive, une pulvérisation de gouttelettes d'eau dans la colonne de la décharge peut avoir lieu et modifier ainsi à la fois les gradients de tension dans celle-ci et l'atmosphère dans laquelle se développe la décharge. En polarité négative, la pulvérisation n'ayant pas lieu, la décharge se propagera dans l'air sec.

#### 4.2 Influence des paramètres de la source

A partir des résultats des simulations et des expériences, Rizk [51] a montré qu'une chute de tension maximale aux électrodes est incapable toute seule d'expliquer l'erreur sur la tension critique due aux paramètres de la source. Il a montré que l'erreur de mesure de la tension critique due aux paramètres tests de la source peut être déterminée par un rapport adimensionnel de deux charges, l'une caractérisant la capacité de sortie de la source, et l'autre l'isolateur test et la sévérité de pollution.

Le taux d'ondulation requis peut être exprimé en terme d'un des rapports adimensionnels de la charge et s'il est adopté, il peut constituer le critère de dimensionnement de la capacité d'entrée de la source contrôlée.

Pissalto [62] a analysé l'influence de la source d'un point de vue électrique et montré que cette dernière joue un rôle important dans la propagation de la décharge.

#### 4.3 Chute de potentiel

Grâce à des mesures, Wilkins [35] a établi que la somme des chutes de tension à la cathode et à l'anode, pour des arcs établis entre des électrodes électrolytiques, était de 840 V.

Un modèle théorique de calcul de la chute de potentiel cathodique a été proposé par Chen et Nour [65]. Ce modèle établi pour le cas des décharges luminescentes sur certaines surfaces métalliques est basé sur l'équation de Poisson et sur le mécanisme d'avalanche de Townsend. Les résultats numériques obtenus concordent avec les mesures expérimentales; ce qui a permis à ces auteurs de conclure que la valeur de 800 V pour la chute de potentiel est raisonnable. D'après Rizk [9], en dehors des conditions où le niveau de potentiel est extrêmement élevé et où des arcs multiples brûlent en série, on peut en principe négliger les chutes de potentiel aux électrodes.

#### 4.4 Temps au contournement

On appelle temps au contournement, le temps qui s'écoule entre l'instant d'amorçage de la décharge et l'instant où son pied atteint l'électrode basse tension. Dans le cas d'une

tension alternative, ce temps est précédé d'un temps  $t_0$  plus grand qu'une demi-période pendant lequel la décharge s'éteint et se réallume plusieurs fois avant de contourner la surface de l'isolateur. Ce temps  $t_0$  est appelé temps de retard, il correspond à la durée pendant laquelle le milieu où brûle la décharge, perd ses propriétés isolantes. Dans une étude expérimentale de mesure du champ électrique dans l'arc en fonction du temps, Swift [66] a observé la dépendance du temps au contournement avec la nature de mouillage de l'isolateur. Ghosh et Chatterjee [39, 41] ont montré que le temps au contournement décroît avec l'augmentation de la tension appliquée et dépend de la nature chimique du polluant. Ils ont trouvé que pour chaque électrolyte, il y a une valeur particulière de la tension appliquée pour laquelle un contournement se produit au bout de 1 ms et que toute augmentation de la tension n'a pas d'effet remarquable sur le temps au contournement.

Matsuoka *et al* [67] ont montré également que le temps au contournement dépend de la nature chimique du polluant. Ils ont aussi émis l'hypothèse sans la démontrer qu'il existe une corrélation entre la variation temporelle des caractéristiques de la résistance de la pollution et le temps au contournement.

En étudiant l'influence de la tension appliquée sur le temps de contournement d'un canal d'électrolyte en tension continue, Pollentes [68] a observé qu'à résistivité d'électrolyte constante, les temps de contournement moyens sont d'autant plus élevés que l'on se rapproche de la valeur de la tension critique de contournement. Il a aussi constaté qu'en polarité négative, les temps de contournement sont supérieurs à ceux obtenus en polarité positive, à résistivité égale et à niveau de surtension égal. Ces tendances ont été également observées par Peyrène [63].

#### 4.5 Profil de l'isolateur

Pour assurer sa fonction, le profil de l'isolateur doit satisfaire les conditions suivantes:

- une longueur de fuite maximum
- un nombre optimum de nervures (pour une taille donnée de l'isolateur) qui permet d'avoir une tension de contournement plus élevée.
- une géométrie de l'isolateur permettant le nettoyage naturel de l'isolateur par le vent ou par la pluie.

- des diamètres de l'isolateur différents assurant une contamination non uniforme et donc des tensions de contournement plus élevées.

Pour tenir compte des deux premières conditions, Chen et Nour [69] ont défini un paramètre  $\xi$  qui caractérise l'efficacité de la longueur de fuite. Ils ont démontré que pour le cas d'une symétrie cylindrique, ce paramètre est généralement fonction de la largeur de la rainure  $w$ , sa hauteur  $d$  et la distance  $r$  qui sépare la rainure et l'axe de symétrie de l'isolateur (Fig. 2.12).

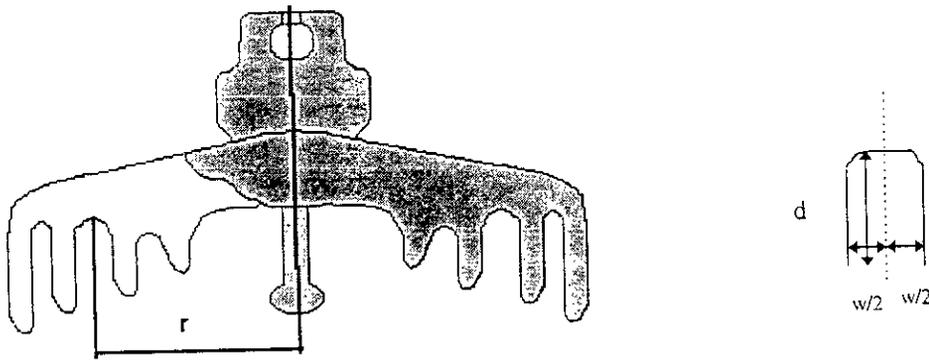


Fig.2.12: Exemple de profil réel d'un isolateur.

A partir de mesures expérimentales, ils ont déduit une relation empirique de la forme:

$$\xi = 1 - \exp\left[\frac{-kw}{d}\right] \quad (2.40)$$

où  $k$  dépend uniquement du niveau de contamination. La longueur de fuite effective sera donc:

$$L_{\text{eff}} = \xi L \quad (2.41)$$

Pour différentes formes d'isolateurs, Claverie et Porcheron [36, 37] ont donné des courbes de variation de  $R_p/\rho$  en fonction de la longueur de l'isolateur et ont déduit une fonction  $F(X)$  telle que:

$$R_p = \rho F(X)$$

$F(X)$  est appelée fonction de répartition de la couche de pollution,  $R_p$  et  $\rho$  sont respectivement la résistance et la résistivité de la couche polluante.

En Pollution artificielle, et en faisant des mesures en alternatif et en continu pour une large variété de forme des isolateurs, Renyu et Zhicheng [64] ont montré que la forme de l'isolateur a plus d'influence sur la performance de l'isolateur en continu qu'en alternatif.

L'influence du profil de l'isolateur sur la tension de contournement a été aussi soulignée par Sundararajan *et* Gorur [70].

#### 4.6 Arcs multiples

Les observations montrent que pendant la propagation de l'arc, d'autres décharges peuvent également s'amorcer. Par conséquent, la source doit fournir plus de courant pour maintenir ces arcs additionnels aux conditions critiques; la tension doit être aussi plus grande que celle d'un arc singulier.

Rizk [51] considère qu'il existe  $m$  arcs en série et  $m_d$  bandes sèches. Au début, le nombre d'arcs est égal au nombre de bandes sèches et au fur et à mesure que les arcs avancent sur le chemin de fuite, leur nombre se réduit graduellement de telle façon qu'au contournement, il n'y aura qu'un seul arc. Durant le processus de propagation, Rizk suppose qu'en parcourant une distance  $\Delta x$ , le nombre d'arcs se réduit de  $\Delta m$  proportionnellement à  $m$  et à  $\Delta x$ ; une fois l'équation différentielle résolue, il obtient la relation suivante:

$$m = m_d^{1-x/l} \quad (2.42)$$

Le nombre  $m_d$  de bandes sèches est supposé égal à 2 par disque d'isolateur. Le nombre d'arcs en série rentre dans le calcul de la chute de tension et dans le calcul de la vitesse de propagation [51]. Ce modèle est basé sur celui d'Obenaus [2]. Ainsi, la tension aux bornes de l'isolateur sera:

$$U = V_{arc} + R_p(X)I + mV_e \quad (2.43)$$

où  $V_e$  est la chute de tension accumulée à l'anode et à la cathode.

Ce problème a été aussi traité par Chen *et* Nour [69] en supposant qu'il existe  $m$  décharges simultanées. En partant du modèle d'Obenaus, ils considèrent que le courant qui circule dans la couche de pollution est la somme des courants dans chaque décharge. La recherche des conditions critiques par rapport au leader (c'est à dire la décharge la plus avancée), les a conduit à des résultats plus proches des mesures que ceux du modèle sans l'hypothèse d'arcs multiples.

Le schéma du modèle multi-arcs est donné à la figure 2.13. L'équation qui décrit le modèle du circuit équivalent est dans ce cas [69]:

$$V = NI_m^{-n} X_m + r(L - X_m) \sum_{k=1}^m I_k + V_e \quad (2.44)$$

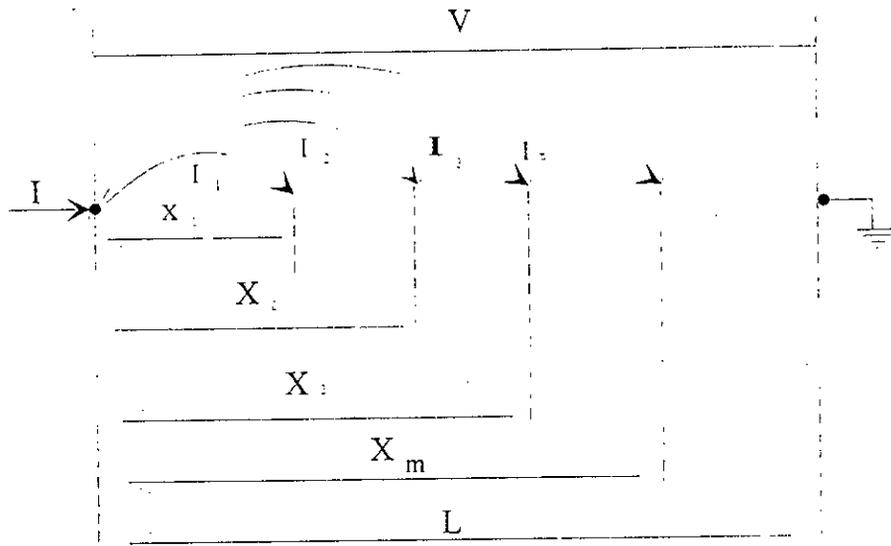


Fig. 2.13: Modèle multi-arcs [69].

Ce modèle est un modèle statique qui conduit, en partant des expressions de la tension et du courant critiques de Wilkins, aux conditions critiques de contournement, lequel aura lieu si:

$$\frac{dV}{dI_m} = 0$$

et

$$\frac{dV}{dx_m} = 0$$

(2.45)

Le modèle multi-arcs de Chen et Nour [69] a été adapté par Zmajkovic [71], qui partant du principe de la propagation de la décharge par amorçage des ramifications successives de la colonne principale de la décharge, suppose que la ramification de la décharge la plus avancée vers l'électrode de masse est de nature différente de celles qui précèdent. La décharge est donc décrite par l'équation de Reider [72] (modèle de Rao et Gopal), alors que les précédentes sont décrites par le modèle de Cheng et Nour [69].

Pour une décharge de  $m$  ramifications, les équations du modèle sont les suivantes:

$$V = \alpha + (\beta + X_m) \gamma \left( \ln \frac{I_m}{\delta} \right)^{-3} + r_p (L - X_m) \sum_{k=1}^m I_k + V_e \quad (2.46)$$

où  $I_k$  est le courant dans la branche  $k$  et  $X_m$  la longueur de la branche  $m$ .

L'expression (2.46) représente la chute de tension dans la dernière branche de la décharge. La relation entre la dernière branche  $m$  et l'avant dernière branche  $m-1$  est décrite comme suit:

$$\alpha + (\beta + X_m) \gamma \left( \ln \frac{I_m}{\delta} \right)^{-3} = NI_{m-1}^{-n} X_{m-1} + r_p (X_m - X_{m-1}) \sum_{k=1}^{m-1} I_k \quad (2.47)$$

Les autres branches sont décrites par l'équation suivante:

$$N_{j+1}^{-n} X_{j+1} = NI_j^{-n} X_j + r_p (X_{j+1} - X_j) \sum_{k=1}^j I_k \quad (2.48)$$

où  $j = 1, 2 \dots m-2$

#### 4.7 Couche de pollution non uniforme

La couche de pollution qui se dépose sur l'isolateur est loin d'être uniforme. Cependant, on ignore la forme ou la nature de cette non-linéarité car c'est un phénomène très aléatoire dans la nature. Les travaux effectués antérieurement, montrent que le cas de pollution uniforme semble être plus critique d'où la justification de l'hypothèse d'une pollution uniforme pour simplifier les calculs. Ce problème a été traité par plusieurs chercheurs qui généralement attribuent des résistivité différentes à chaque zone de l'isolateur.

Pour tenir compte de la non uniformité de la couche de pollution dans leur modèle, Sundararajan et Gorur [7] ont partagé le profil de l'isolateur en plusieurs zones et ont attribué un ESDD (dépôt de densité de sel équivalent) différent pour chaque zone. Ils ont trouvé que la tension de contournement dans ce cas est légèrement supérieure à celle correspondant à une pollution uniforme dont le ESDD est le même sur toute la surface de l'isolateur.

En utilisant le même principe, Anjana et Lakshminarasimha [50] ont aboutit aux mêmes conclusions.

A partir des expériences en pollution artificielle, Matsuoka *et al* [73] ont trouvé que le degré de non uniformité des couches polluantes est étroitement lié aux caractéristiques de la résistance surfacique et à leur variation en fonction du temps.

#### 4.8 Formation de bandes sèches

Le problème de la formation de bandes sèches a été traité par différents chercheurs [74 - 76]. Gellert et Rasmussen [76] ont modélisé la formation de bandes sèches par éléments finis

en considérant la relation entre la formation de la buée, la tension et la distribution de la température dans la couche de pollution. Cette relation peut être décrite par trois équations aux dérivées partielles couplées:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \Delta(D\Delta C) + v - fT \quad (2.49)$$

pour la distribution de la buée,

$$\Delta(\sigma\Delta V) = 0 \quad (2.50)$$

pour la distribution de la tension,

$$C_p\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \Delta(K\Delta T) + (\Delta V)^2\sigma \quad (2.51)$$

pour la distribution de la température,

où

$C$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) est la quantité de la buée par unité de volume de dépôt polluant,

$D$  ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) est le coefficient de diffusion,

$v$  ( $\text{g}/\text{cm}^3\text{s}$ ) est la vitesse de mouillage,

$f$  ( $\text{g}/\text{cm}^3\text{°C}$ ) est la fonction d'évaporation,

$\sigma$  ( $1/\Omega\text{cm}$ ) est la conductivité,

$C_p$  ( $\text{J}/\text{g}^\circ\text{C}$ ) est la chaleur spécifique à pression constante,

$\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) est la densité,  $K$  ( $\text{W}/\text{cm}^\circ\text{C}$ ) est le coefficient de transfert par conduction,

$t$  est le temps.

Les équations ont été établies en considérant que:

- la pénétration de l'eau d'un élément de volume à un autre se fait par diffusion et l'influence de la gravitation est négligée, le mouillage et l'évaporation ont lieu sur la surface mais sont supposés à travers la couche (acceptable lorsque la couche est fine).

- la tension appliquée et la conductivité déterminent le courant de fuite;

- la tension doit être de préférence alternative et la capacité au voisinage est négligée;

- la chaleur développée indique les températures locales dans la couche de pollution: elle est supposée indépendante de la surface de l'isolateur.

En utilisant en plus des conditions aux limites bien définies, Gellert et Rasmussen [76] ont trouvé une concordance qualitative avec les résultats expérimentaux. Cependant, beaucoup de travail reste à faire pour bien exploiter ce modèle.

## **Conclusion**

Alors que plusieurs paramètres évoluent dans le temps, l'étude du phénomène de contournement a été souvent effectuée en utilisant des modèles statiques. Ils traitent le phénomène de contournement sous un aspect global en lui associant un critère d'extension. Ces derniers se basent tous sur le modèle statique d'Obenaus et sur le modèle de Mayr pour le comportement dynamique de l'arc. Cependant, ils ne donnent aucune explication sur le mécanisme physique de la propagation de la décharge

Afin de se rapprocher le plus possible de la réalité et parer à cet handicap, de nouveaux modèles, tenant compte de la variation dans le temps de certains paramètres, ont été développés plus récemment.

**CHAPITRE 3: ETUDE DU CONTOURNEMENT DES  
COUCHES DE POLLUTION CONTINUES**

## 1. INTRODUCTION

Différents modèles ont été proposés dans la littérature. La plupart de ces modèles considèrent des géométries simples et rarement le profil réel de l'isolateur. Dans ces modèles, les formes complexes des isolateurs sont représentées par des rectangles équivalents et la ligne de fuite de l'isolateur par la distance inter-électrodes. Cependant, si le modèle rectangulaire équivalent ne reflète pas exactement le comportement d'un isolateur réel, particulièrement les effets de son profil complexe, il permet par contre, une meilleure visualisation du phénomène des décharges électriques, et un gain considérable du facteur temps que nécessitent ce genre d'investigations sur isolateurs réels sur site.

En parallèle avec les essais sur ce genre de modèles de laboratoire simples, divers modèles théoriques permettant l'analyse des mêmes phénomènes d'arcs ont été proposés [28, 35, 37]. Ils consistent généralement en une surface isolante plane, polluée et partiellement contournée par un arc. Cette surface est équivalente à un circuit constitué par une décharge de longueur  $x$  en série avec une résistance  $R_p$  représentant la couche de pollution humidifiée et parcourue par un courant de fuite  $i$ .

De ces investigations, il apparaît que le courant de fuite représente un paramètre très significatif du comportement de l'isolateur. L'amplitude de ce courant nous permet d'apprécier le degré de dégradation du système isolant [77 - 80].

Dans ce chapitre, nous présentons des résultats expérimentaux concernant la variation du courant de fuite en fonction de différents paramètres électrogéométriques tels que le rayon de l'électrode active, la distance inter-électrodes, la tension appliquée, la conductivité et l'épaisseur de la couche polluante. Un modèle plan de laboratoire muni de deux électrodes, l'une circulaire reliée à la borne haute tension, l'autre rectangulaire mise à la terre, a été utilisé. Les résultats expérimentaux sont comparés par la suite à ceux obtenus en utilisant un modèle théorique que nous proposons. Ce dernier est basé sur la résolution de l'équation de Laplace en assimilant notre modèle de Laboratoire à un système de deux électrodes cylindriques concentriques.

## 2. TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Les essais effectués consistent à visualiser et à mesurer le courant de fuite et la longueur de l'arc électrique correspondante pour chaque essai et pour toutes les configurations de pollution considérées.

## 2.1 Circuit d'essai

L'équipement de la station d'essai à fréquence industrielle, comprend un transformateur d'essai 0.5/300 kV (50 kVA), un diviseur de tension capacitif 400 pF et l'objet d'essai.

### 2.1.1 Dispositif de mesure du courant de fuite

Le courant de fuite est déduit de la mesure de la tension aux bornes d'une résistance non inductive de 100  $\Omega$  insérée dans le retour à la terre. La tension est relevée aux bornes d'un oscilloscope à mémoire de bande passante 20 MHz. La protection de ce dernier est assurée par deux diodes rapides montées parallèlement en tête bêche.

La mesure de la longueur de l'arc électrique se développant sur la surface isolante polluée est effectuée à l'aide de photographies statiques (position B), l'ensemble se trouvant dans une chambre noire.

Notons qu'il est très important de limiter au maximum l'effet de l'inductance série du circuit L, essentiellement localisée dans la connexion de masse, étant donné sa taille. Pour cela, nous nous sommes attachés à réduire autant que possible L en utilisant des connexions courtes. La détermination exacte de L reste pratiquement impossible, mais nous constatons dans ces conditions, l'absence d'oscillations dans le circuit de mesure, ce qui indique un taux d'amortissement élevé et une composante inductive faible.

### 2.1.2 Mode opératoire

#### 2.1.2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif que nous avons considéré est semblable à celui utilisé par plusieurs auteurs [5, 12]. Il est constitué d'une plaque isolante (verre, EPDM, Bakélite...) munie de deux électrodes, l'une circulaire reliée à la borne haute tension, l'autre rectangulaire mise à la terre (Fig.3.1).

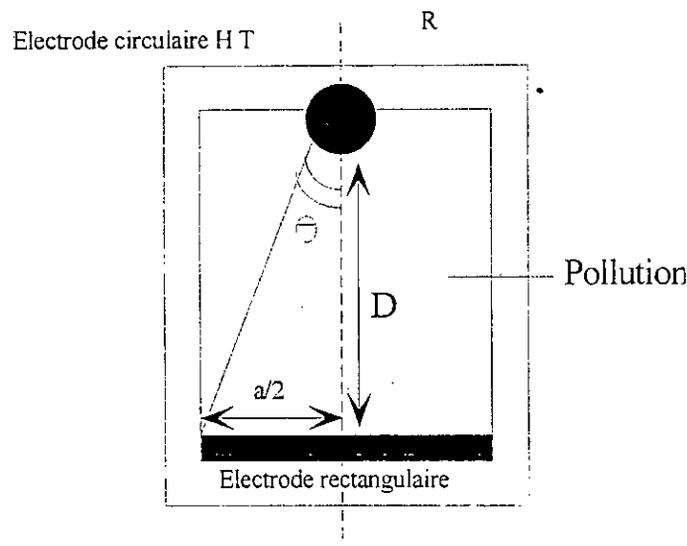


Fig. 3.1: Dispositif expérimental de laboratoire utilisé

### 2.1.2.2 Préparation du modèle

La plaque isolante doit être initialement bien lavée, puis imbibée d'une façon uniforme de gas-oil dans les endroits d'emplacement des électrodes 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, nous essuyons la surface isolante avec du coton imbibé d'alcool isopropylique pour éliminer toute trace de gas-oil. La couche polluante déposée sur toute la surface inter-électrodes est un mélange eau distillée-sel, dont les proportions sont déterminées selon la conductivité désirée. Pour l'étude de l'influence de l'épaisseur de la couche polluante sur le contournement de ces surfaces isolantes polluées, la couche polluante est réalisée en déposant du sable sur la surface de la plaque, d'une façon uniforme et selon l'épaisseur désirée. Par la suite, nous procédons à l'humidification de cette couche par pulvérisation d'eau distillée jusqu'à sa saturation.

Le modèle est disposé horizontalement sur un support en bois, placé à une hauteur d'un mètre environ au dessus du sol, l'ensemble dans une chambre noire.

### 2.1.3.3 Application de la tension d'essai

La tension est appliquée par paliers constants pendant une durée suffisante pour le maintien d'une longueur d'arc permanente. Cinq à dix niveaux de tension, selon les cas, ont

été considérés pour chaque essai. Pour chaque palier de tension, nous relevons la valeur maximale du courant de fuite et la longueur d'arc correspondante.

Le passage d'un niveau de tension à un autre supérieur (commutation entre deux niveaux de tension), étant effectué par le passage par zéro de la tension pour éviter les transitoires en sortie du transformateur.

La première opération que nous effectuons, avant chaque série d'essais correspondant à une configuration donnée du modèle, consiste à évaluer sa tension de contournement  $V_c$ , l'oscilloscope étant hors circuit. Nous effectuons au moins dix essais pour chaque cas de figure considéré afin d'obtenir la valeur moyenne de la tension de contournement. Ceci nous permet, entre autres, de considérer lors des essais des niveaux de tension inférieurs à la valeur critique.

Les difficultés rencontrées proviennent essentiellement de la rapidité des événements à enregistrer, et surtout de l'aspect aléatoire de leur apparition (problème de la synchronisation des mesures).

### 3. MODELE EXPERIMENTAL

Les essais ont été effectués sur deux types de modèles de laboratoire:

1. Le premier est constitué par une plaque carrée en éthylène-propylène-diène-monomère (EPDM) de 25 cm de côté. Deux électrodes en aluminium d'épaisseur de 3  $\mu\text{m}$  ont été utilisées. La première est circulaire de rayon variable et la seconde est rectangulaire (Fig. 3.1). L'électrode circulaire est reliée à la borne haute tension, et l'électrode rectangulaire à la terre. La conductivité de la couche de pollution recouvrant la surface isolante entre les deux électrodes varie entre 5  $\mu\text{S/cm}$  et 160  $\mu\text{S/cm}$ ; cette conductivité est contrôlée avant chaque essai grâce à un conductimètre.

Les essais ont été effectués en deux étapes: (1) la tension appliquée varie de 2 à 9 kV par palier de 2 kV et la conductivité de la couche polluante entre 5 et 33  $\mu\text{S/cm}$ ; et (2) la tension appliquée varie de 9 à 21 kV par palier de 3 kV avec une conductivité de la couche polluante égale à 160  $\mu\text{S/cm}$ .

2. Le deuxième modèle expérimental est constitué d'une plaque de verre carrée de 500x250x6 mm. Ce modèle sera utilisé pour l'étude de l'influence de l'épaisseur de la couche polluante sur le courant de fuite, la longueur de l'arc électrique et la tension de contournement. Deux

valeurs de distances inter-électrodes  $L_f$  sont utilisées: 292 mm et 360 mm. Dans ce cas, la couche de pollution recouvrant la surface isolante est, comme mentionné ci-dessus, constituée par du sable et humidifiée par de l'eau distillée jusqu'à saturation. La conductivité du sable utilisé est de  $12 \mu\text{S}/\text{cm}$ . L'épaisseur de la couche polluante varie de 1 à 4 mm.

#### 4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

##### 4.1 Forme du courant

La forme du courant de fuite apparaît avec une distorsion comme on le voit sur la photographie 1. Cette distorsion commence à apparaître dès l'initiation des premières luminosités autour de l'électrode haute tension. En effet, pour les faibles niveaux de tension caractérisés par la non génération d'arcs, la forme du courant de fuite observée est parfaitement sinusoïdale. Dès le début d'apparition des premiers arcs, nous remarquons des "impulsions" au niveau des valeurs de crête du signal du courant de fuite (Photo. 2). Le nombre et la longueur de ces impulsions va en augmentant lorsque la tension appliquée augmente.

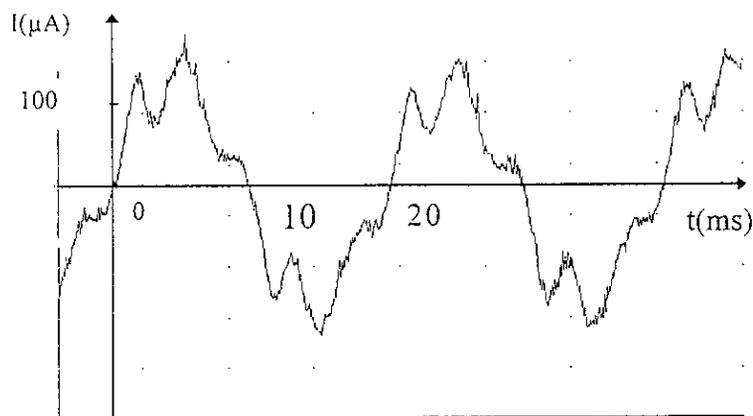


Photo.1: Forme du courant de fuite

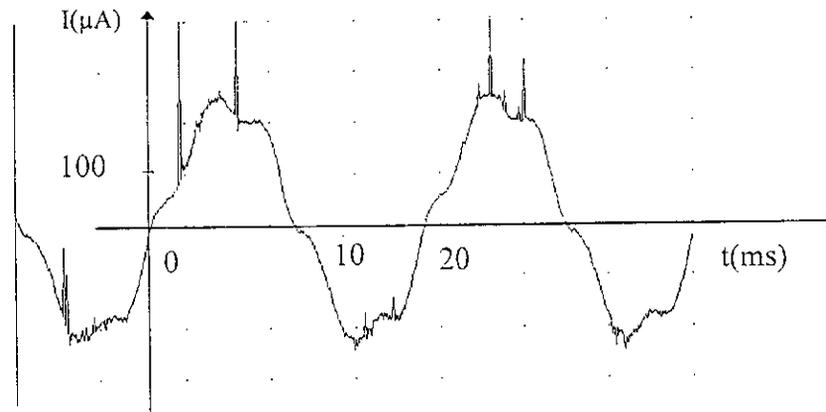


Photo 2: Forme du courant de fuite avec initiation d'arcs

#### 4.2 Forme de l'arc

Les arcs prennent toujours naissance autour de l'électrode circulaire (Photo. 3) aux environs de 10 kV. En augmentant la tension, la longueur de ces arcs s'allonge sur toute la périphérie de la même électrode (Photo. 4) avec quasiment la même longueur jusqu'au contournement total suivant un chemin préférentiel (Photo. 5) qui n'est pas toujours le plus court.

D'autre part, dans le cas de la plaque carrée en EPDM, l'amplitude du courant de fuite  $I_f$  décroît quand la distance inter-électrodes augmente (Fig. 3.2, 3.3). Les figures 3.2 - 3.5 donnent la variation de  $I_f$  en fonction des paramètres géométriques du modèle, la distance inter-électrodes et le rayon de courbure de l'électrode haute tension, pour différents niveaux de la tension appliquée et de conductivité de la couche polluante.  $I_f$  croît également avec l'augmentation du rayon de courbure de l'électrode circulaire et de la conductivité de la couche (Fig. 3.6, 3.7). Par ailleurs, pour une distance inter-électrodes donnée, le courant de fuite augmente avec la tension appliquée et/ou l'épaisseur de la couche polluante (Fig. 3.8). Nous remarquons également que la longueur de l'arc augmente avec l'augmentation de la tension (Fig. 3.9) et décroît quand la distance inter-électrodes augmente. D'une façon similaire, lorsque la tension appliquée augmente, la longueur de l'arc électrique augmente quelle que soit l'épaisseur de la couche polluante (Fig. 3.10). Ceci est valable pour les deux distances inter-électrodes considérées.

Par ailleurs, pour un niveau de tension donné, la longueur de l'arc augmente avec l'épaisseur de la couche (Fig. 3.10). De même, pour une épaisseur de la couche polluante donnée, la longueur de l'arc est plus grande lorsque la distance inter-électrodes est plus faible.

Lorsque les arcs sont initiés autour de l'électrode circulaire haute tension, leur forme et leur luminosité sont quasiment identiques pour les deux modèles expérimentaux considérés. Pour une tension suffisamment élevée, le canal de décharge apparaît à une certaine distance à travers le chemin le moins résistant pour atteindre par la suite l'électrode rectangulaire provoquant ainsi le contournement total. Par ailleurs, pour des niveaux de tension assez importants, nous observons des arcs de faibles longueurs au niveau de l'électrode rectangulaire, particulièrement lorsque l'épaisseur de la couche polluante est importante (c'est à dire pour 3 et 4 mm d'épaisseur).

Pour une distance inter-électrodes donnée, la longueur d'arc augmente avec l'augmentation du courant de fuite et/ou l'épaisseur de la couche polluante (Fig. 3.11). C'est pourquoi le contrôle des dépôts polluants (épaisseur et conductivité) constitue un moyen pour s'assurer du bon fonctionnement des systèmes électroénergétiques [78].

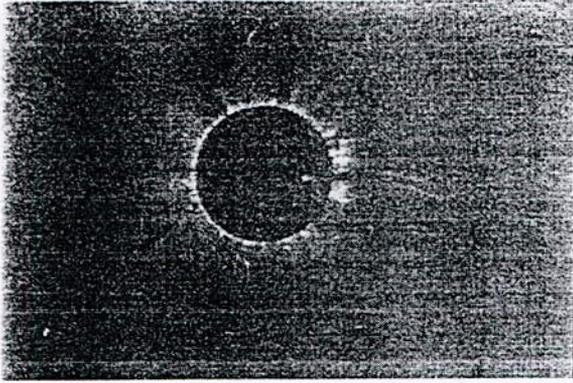


Photo. 3: Initiation de l'arc

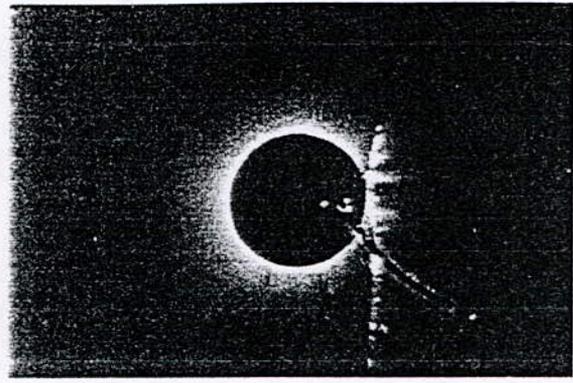


Photo. 4: Développement de l'arc

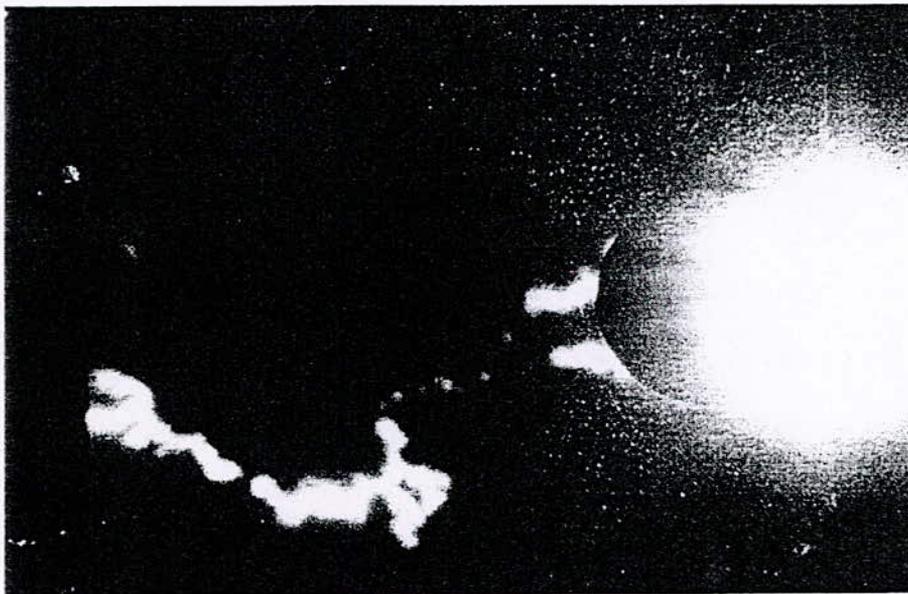


Photo. 5: Contournement total

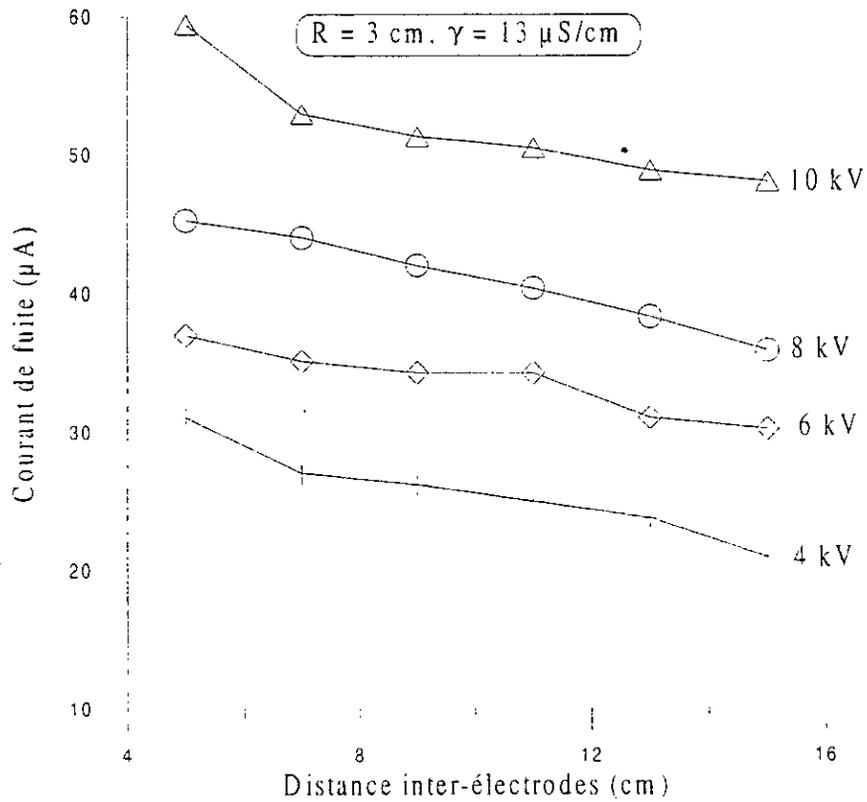


Fig. 3.2: Courant de fuite - distance inter-électrodes

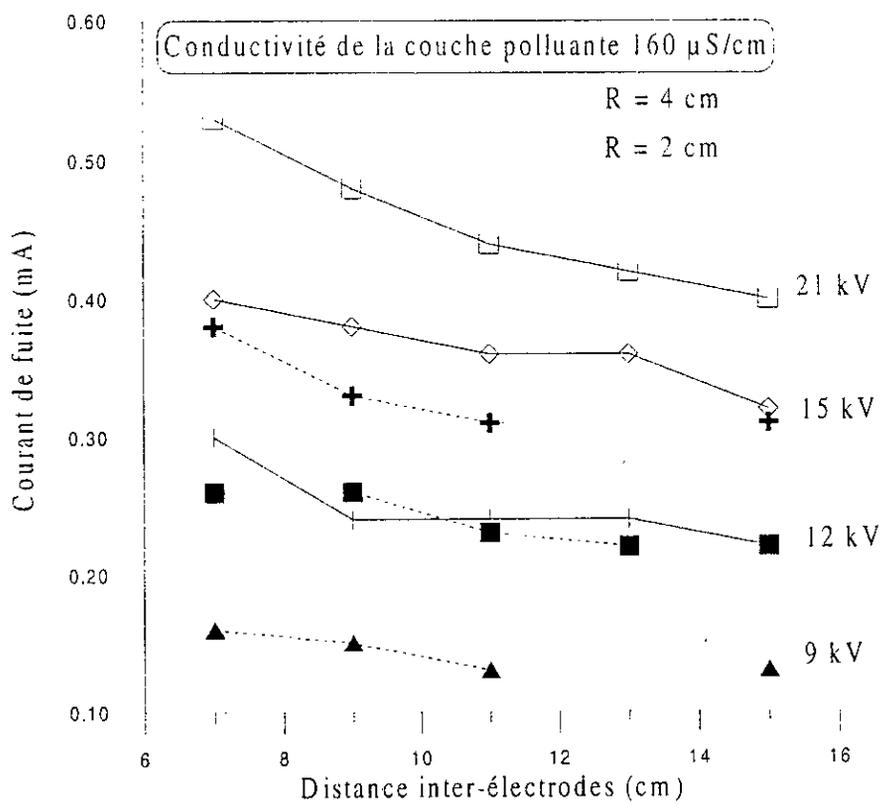


Fig. 3.3: Courant de fuite - distance inter-électrodes

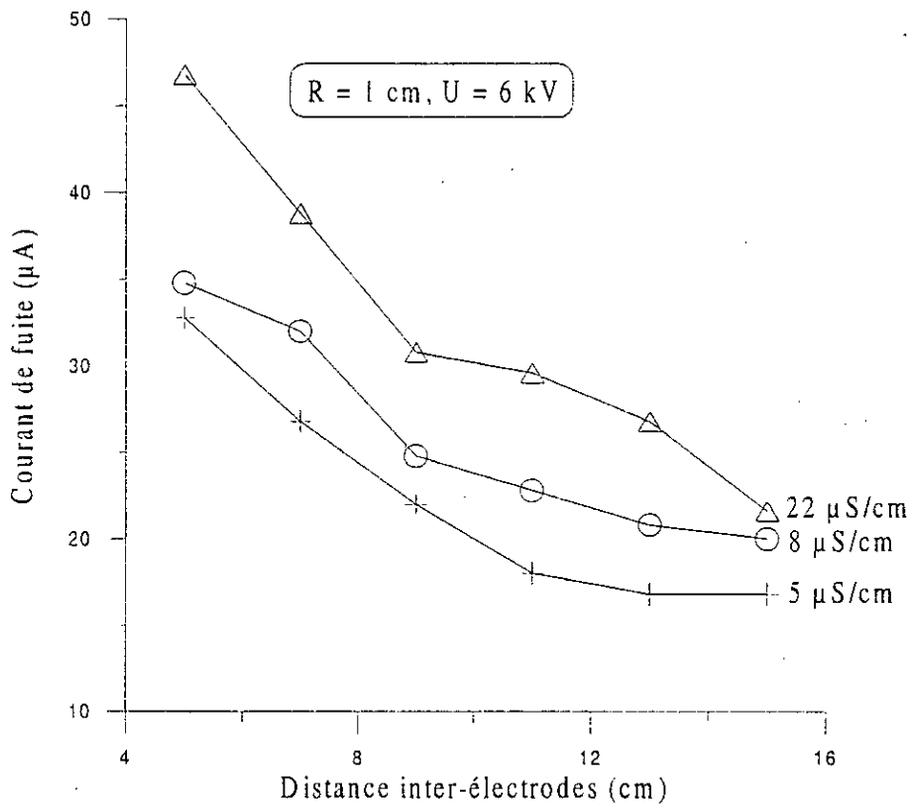


Fig. 3.4: Courant de fuite - distance inter-électrodes

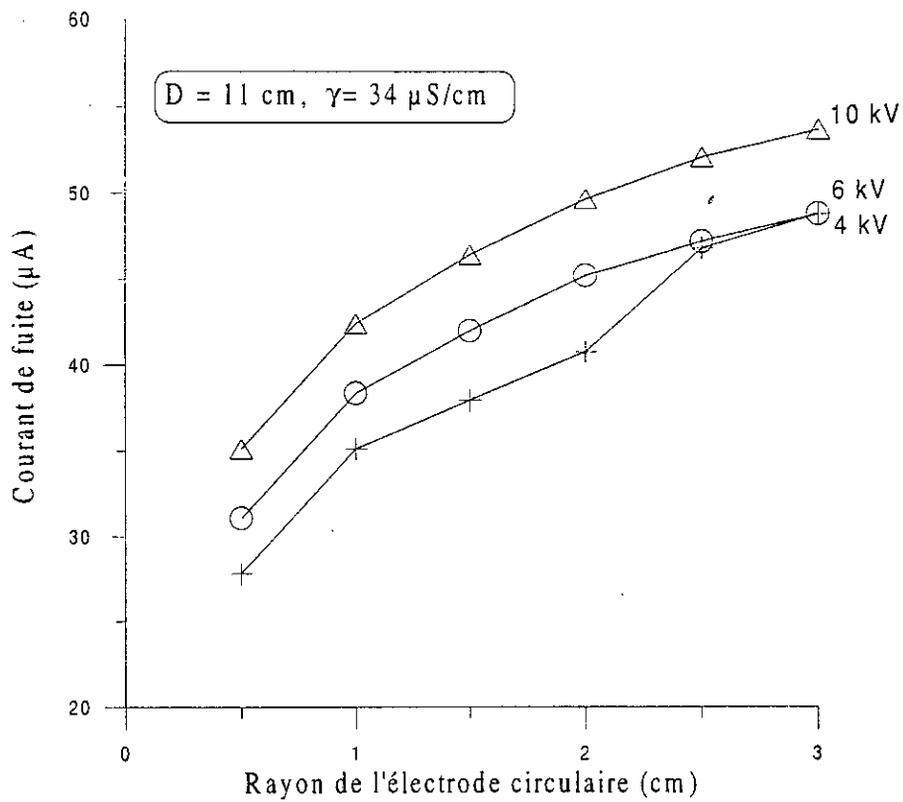


Fig. 3.5: Courant de fuite - Rayon de l'électrode circulaire haute tension

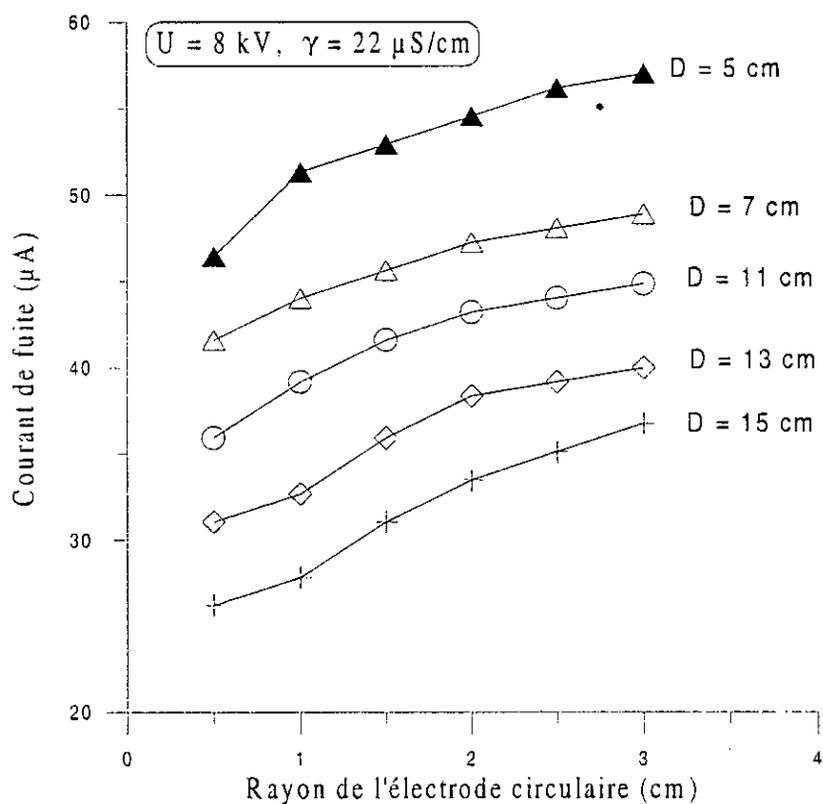


Fig. 3.6: Courant de fuite - Rayon de l'électrode circulaire haute tension

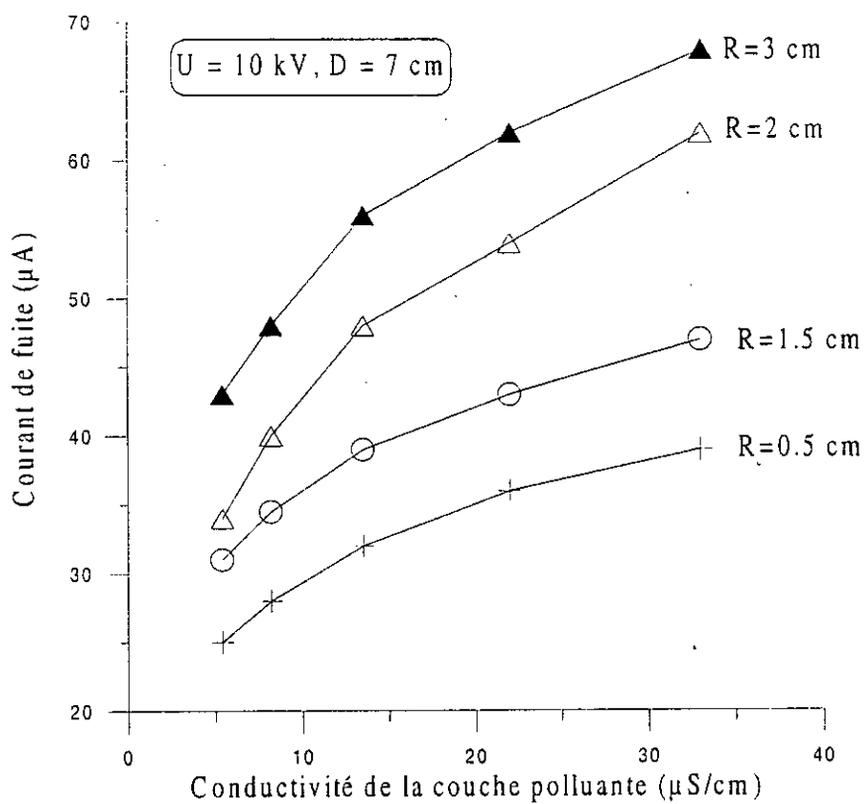


Fig. 3.7: Courant de fuite - conductivité de la couche polluante

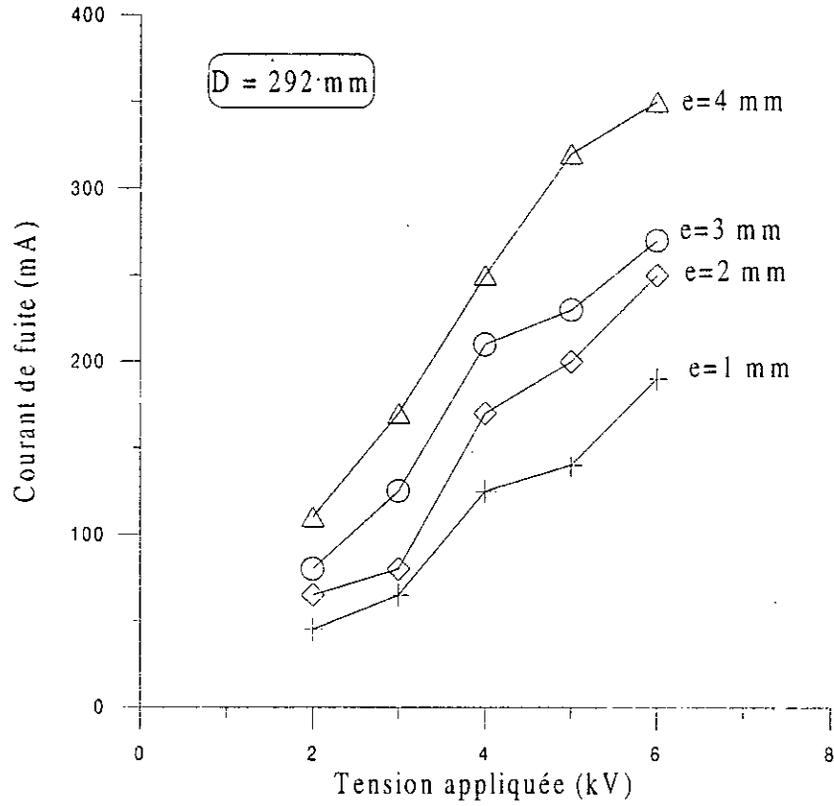


Fig. 3.8: Courant de fuite - tension appliquée

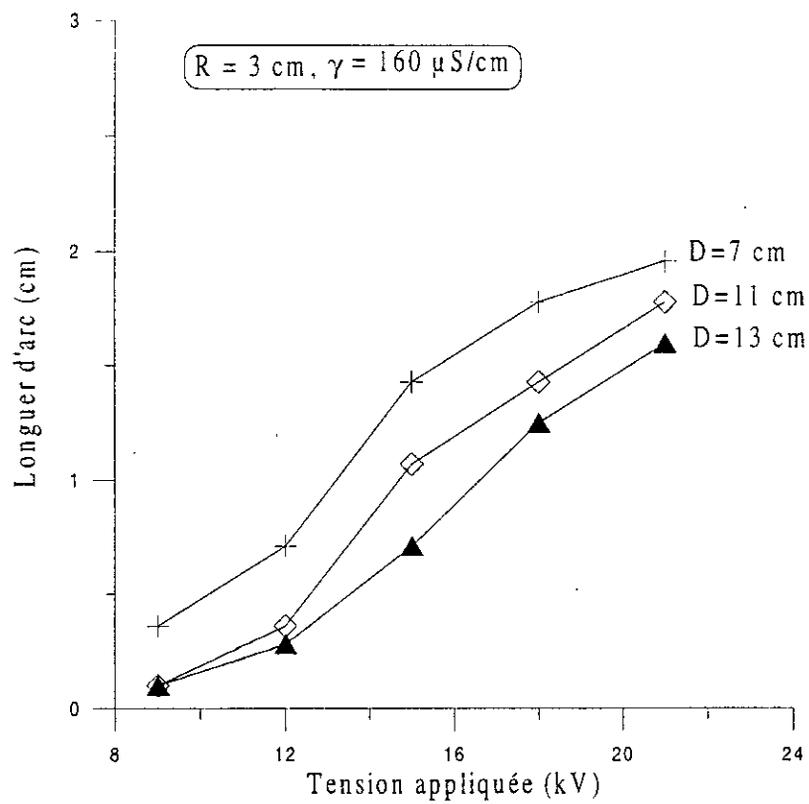


Fig. 3.9: Longueur d'arc - rayon de l'électrode circulaire haute tension

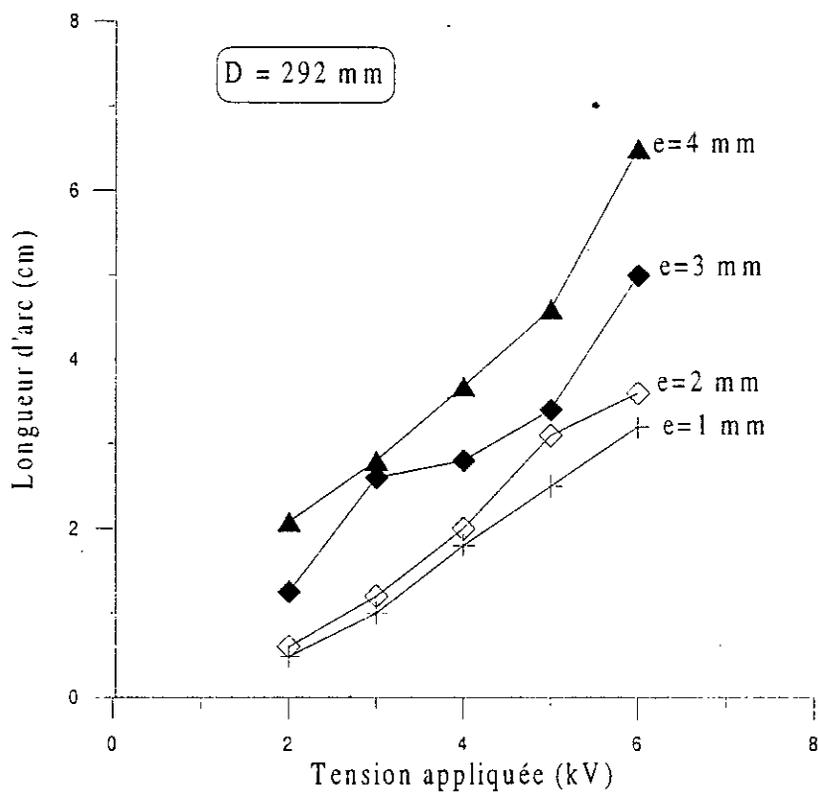


Fig. 3.10: Longueur d'arc - tension appliquée

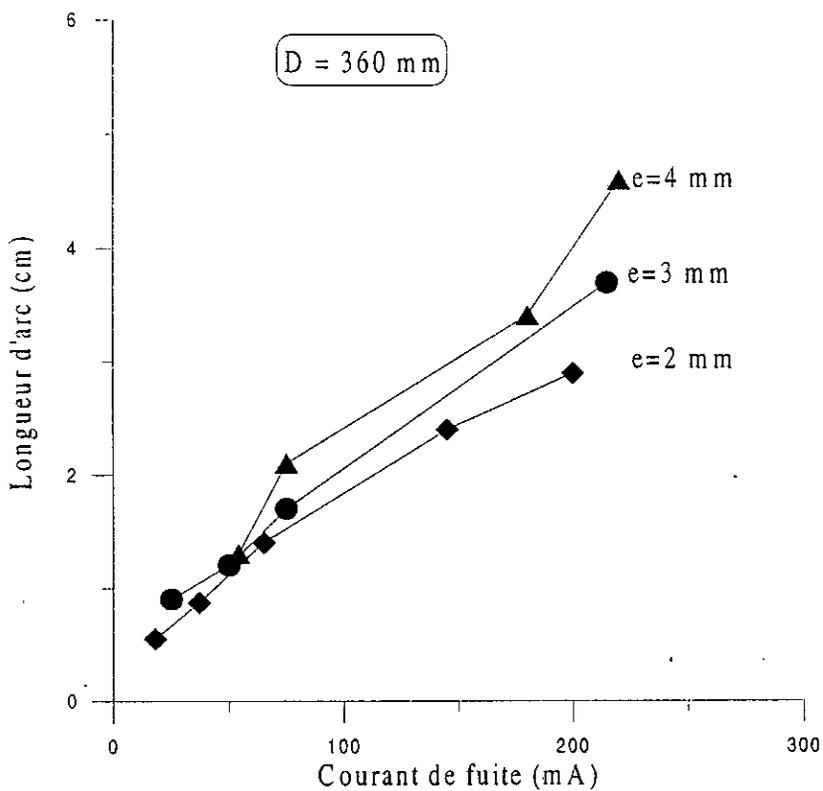


Fig. 3.11: Longueur d'arc - courant de fuite

## 5. MODELE THEORIQUE ET DISCUSSION

Le courant de fuite traversant une couche de pollution de conductivité  $\gamma$  est constitué de deux composantes: (1) la composante capacitive  $I_c$  et (2) la composante de conduction  $I_R$ . Pour estimer ces deux composantes, la connaissance du champ électrique est nécessaire. Pour cela, nous assimilons notre modèle de Laboratoire à un modèle théorique à deux électrodes cylindriques concentriques de rayons respectifs  $R$  et  $R+D$  (Fig. 3.12). De plus, nous considérons que l'arc apparaît d'abord autour de l'électrode circulaire haute tension de rayon  $R$ , et se propage vers l'autre électrode à une distance de  $R+D$ . En considérant l'arc électrique comme un canal conducteur [77, 78], nous pouvons écrire les conditions aux limites suivantes concernant le potentiel électrique:

$$V(R+X) = U \text{ et } V(R+D) = 0$$

Par ailleurs, si nous considérons que la charge d'espace est négligeable, notre modèle sera décrit par l'équation de Laplace:

$$\Delta V = 0$$

ou en coordonnées cylindriques:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dV(r)}{dr} \right) = 0 \quad (3.1)$$

La résolution de cette équation nous donne:

$$V(r) = \frac{\ln\left(\frac{R+D}{r}\right)}{\ln\left(\frac{R+D}{R+X}\right)} U \quad (3.2)$$

D'où le champ électrique:

$$E(r) = -\frac{U}{r \ln\left(\frac{R+D}{R+X}\right)} \quad (3.3)$$

Par conséquent, la composante capacitive du courant ( $I_c$ ) sera

$$I_c = 2\pi\epsilon\epsilon\omega \frac{U}{\ln\left(\frac{R+D}{R+X}\right)} \quad (3.4)$$

où R est le rayon de l'électrode circulaire; D la distance inter-électrodes; X la longueur de l'arc; e l'épaisseur de la couche polluante;  $\omega$  fréquence de la tension; U la valeur maximum de la tension appliquée.

Pour le calcul du courant  $I_R$ , nous considérons qu'il n'apparaît que dans la zone d'influence entre électrodes, définie par l'angle  $\theta$  comme indiqué par la figure 3.12. Ainsi

$$I_R = \gamma e \frac{U}{\ln\left(\frac{R+D}{R+X}\right)} \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{a}{2(R+D)}\right) \quad (3.5)$$

Où a est la longueur de l'électrode rectangulaire et  $\gamma$  est la conductivité de la couche polluante.

Le rapport entre les deux composantes est:

$$\frac{I_R}{I_c} = \left(\frac{\gamma}{2\pi\epsilon\epsilon\omega}\right) \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{a}{2(R+D)}\right) \quad (3.6)$$

Notons que le courant capacitif ( $\sim 10^{-10}$  A) donné par l'équation (3.4) est  $10^4$  fois moins important que le courant mesuré ( $10^{-6}$  A) pour nos paramètres expérimentaux. Par conséquent,  $I_c$  peut être considéré comme négligeable.

L'équation (3.5) met en évidence les différents paramètres qui interviennent dans la dégradation d'un isolateur pollué. Il ressort de cette équation que le courant croît avec la tension appliquée et/ou la conductivité de l'agent polluant et/ou son épaisseur comme observé expérimentalement (Figs. 3.4, 3.5, 3.8). Ces remarques sont vérifiables en pratique car une isolation est plus facilement dégradable si la tension appliquée est élevée et/ou la couche polluante est importante et/ou cette couche est conductrice. Toutefois, les facteurs géométriques (distance inter-électrodes, rayon de courbure de l'électrode active) influent sur la dégradation mais d'une manière moins importante que les premiers facteurs cités (tension appliquée, conductivité et épaisseur de la couche polluante).

La comparaison des résultats obtenus expérimentalement avec ceux calculés par l'expression (5) du modèle théorique (Figs. 3.13, 3.14), confirment bien la validité du modèle établi pour les faibles tensions. Dans ce cas, la différence entre les valeurs obtenues ne dépasse pas 12%. Par contre, cette différence augmente (environ 40%) pour les niveaux de tensions

élevés proches de 21 kV. Ce qui est justifié par le fait qu'à ce niveau de tension, l'arc ne se développe plus autour de l'électrode circulaire, mais plutôt sur une ligne préférentielle (Photo.5).

En tenant compte de l'influence de l'épaisseur de la couche polluante, et en comparant les deux composantes du courant de fuite (c'est à dire, le courant de conduction et le courant capacitif), pour les mêmes conditions expérimentales (c'est à dire les mêmes valeurs des paramètres que ceux utilisés lors des essais), il résulte que le courant est aussi dominé par la composante de conduction, la composante capacitive étant négligeable. Selon l'équation (5), le courant  $I_R$  est proportionnel à l'épaisseur de la couche polluante. Pour deux épaisseurs de même conductivité, le rapport entre les deux courants est quasiment égal à celui des épaisseurs correspondantes:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{e_1}{e_2} \quad (7)$$

Ceci est en bonne concordance avec les résultats expérimentaux obtenus (Fig. 3.15).

Il ressort également de l'équation (5), que le courant augmente quand la longueur de l'arc augmente et/ou la distance inter-électrodes décroît.

Par conséquent, l'utilisation d'un tel modèle théorique simple permet d'avoir une idée sur la variation de la longueur de l'arc en mesurant simplement le courant de fuite pour une configuration expérimentale donnée. Ceci peut constituer un moyen efficace pour prévenir d'éventuels contournements d'isolateurs.

Notons que les courants calculés et ceux mesurés sont du même ordre de grandeur (Figs. 3.16 -3.18). Plus l'épaisseur de la couche polluante est importante et plus les tensions appliquées sont faibles, plus les courants expérimentaux et théoriques sont proches.

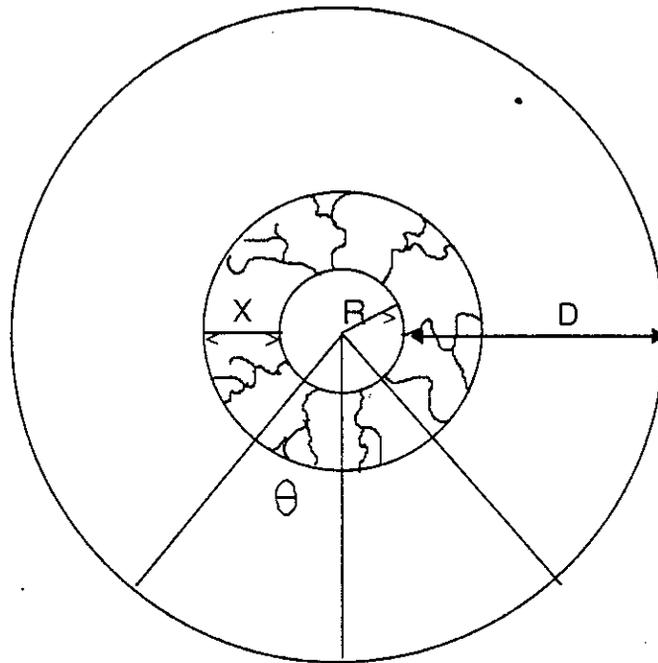


Fig. 3.12: Modèle théorique

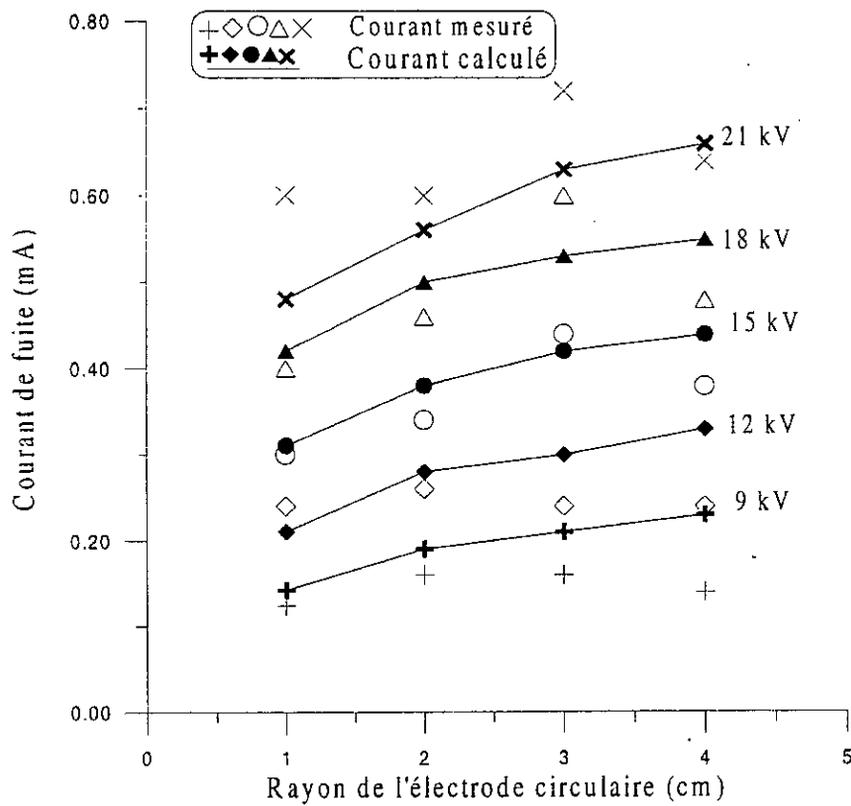


Fig. 3.13: Courant de fuite - Rayon de l'électrode circulaire.

Distance inter-électrodes  $D = 9$  cm, conductivité  $\gamma = 160 \mu\text{S/cm}$ .

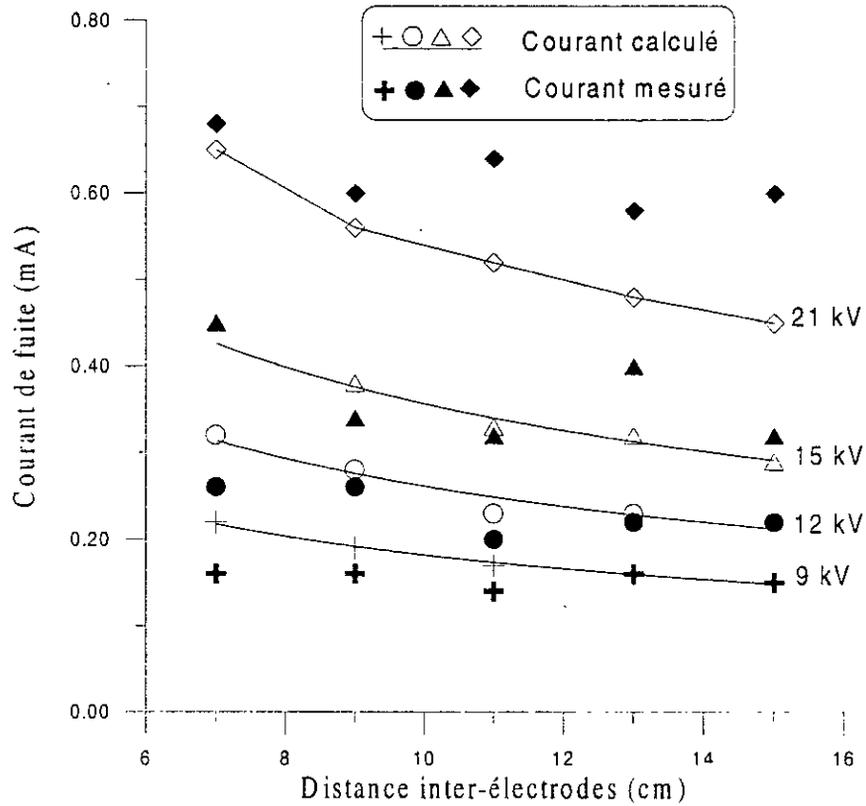


Fig. 3.14: Courant de fuite - distance inter-électrodes, rayon de l'électrode circulaire  $R = 2$  cm, conductivité  $\gamma = 160 \mu\text{S/cm}$

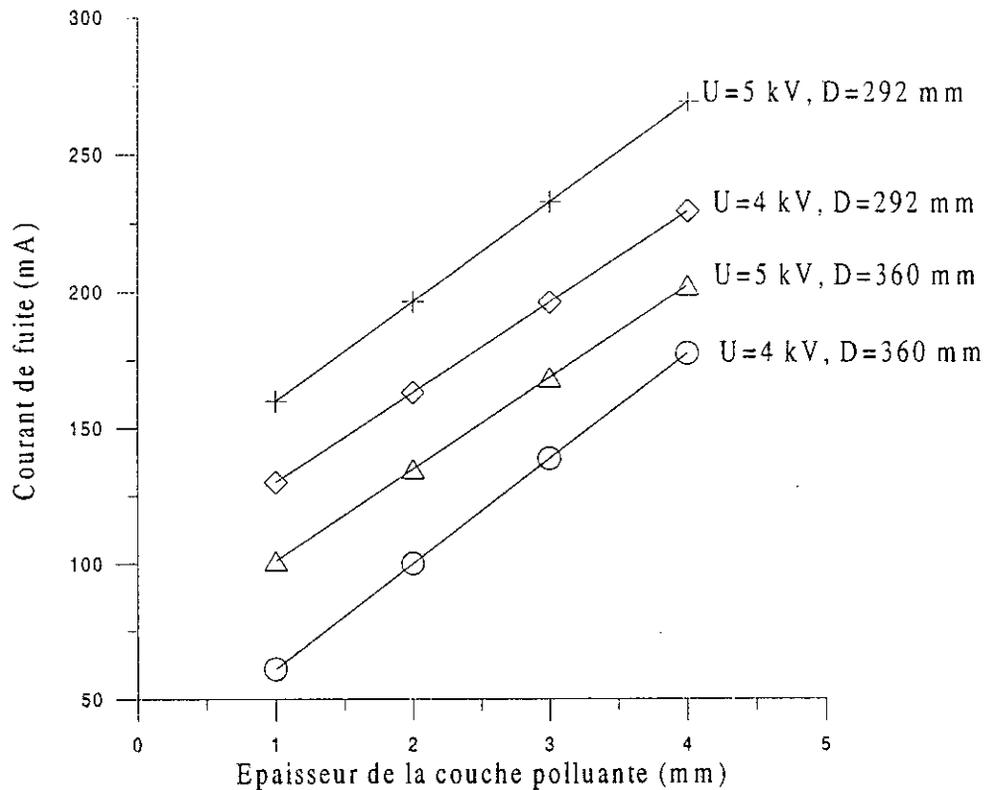


Fig. 3.15: Courant de fuite - épaisseur de la couche polluante pour différents niveaux de tension appliquée et distances inter-électrodes

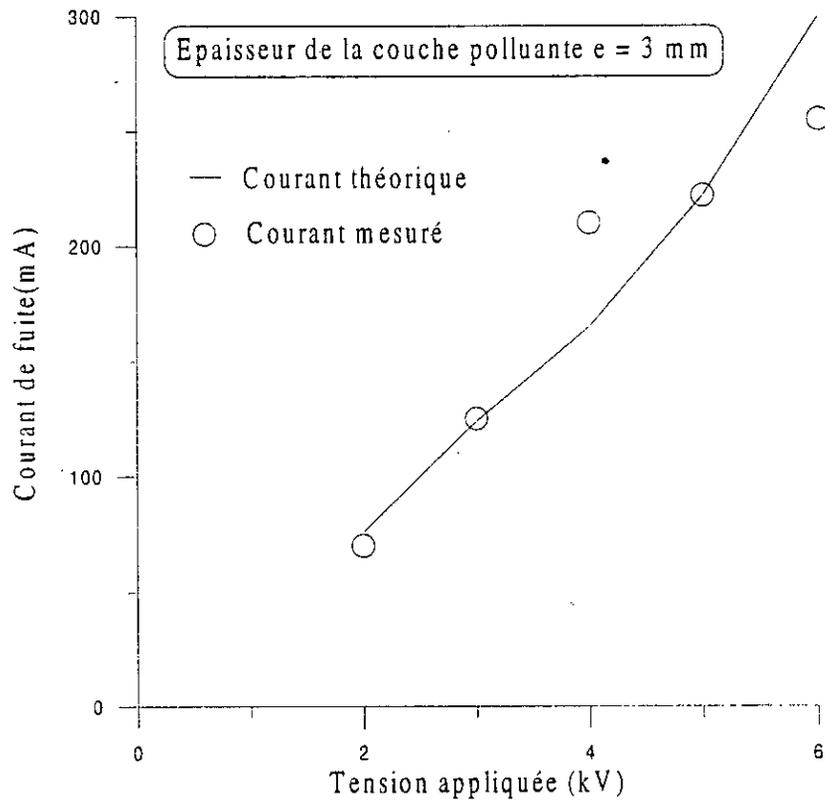


Fig. 3.16: Courant de fuite - tension appliquée

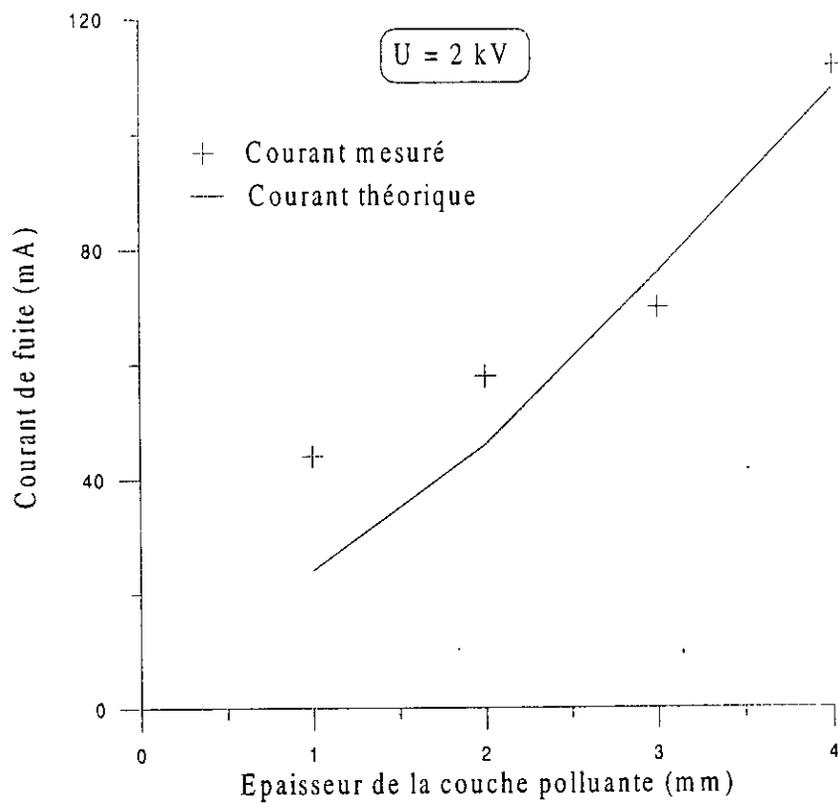


Fig. 3.17: Courant de fuite - épaisseur de la couche polluante

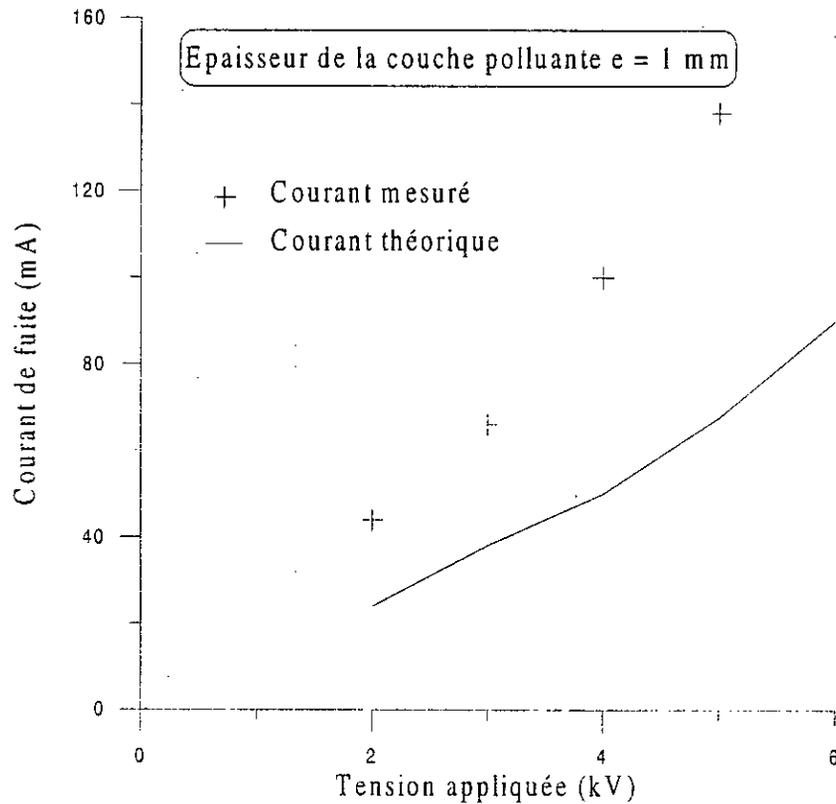


Fig. 3.18: Courant de fuite - tension appliquée

## 6. CONCLUSION:

Cette étude montre que le courant de fuite circulant à travers les surfaces isolantes polluées est essentiellement un courant de conduction.

Pour de faibles niveaux de tension, une bonne corrélation a été observée entre le modèle expérimental et le modèle théorique proposé. Cependant, pour des niveaux de tension élevés, proches de 21 kV, cette hypothèse ne peut plus être considérée et notre système ne peut plus être considéré comme un système cylindrique à deux électrodes concentriques. Il tend plutôt vers un système pointe-plan.

Les épaisseurs des couches polluantes jouent un rôle important dans l'augmentation du courant de fuite et l'allongement de l'arc jusqu'au contournement total de l'isolateur pollué, lorsque les conditions critiques sont atteintes. Plus l'épaisseur de la couche polluante est importante plus le courant de fuite est élevé et plus la longueur de l'arc est grande.

Le modèle théorique que nous avons développé constitue un outil permettant d'estimer le courant de fuite à travers la surface de l'isolateur pollué et la longueur de l'arc correspondant.

CHAPITRE 4: ETUDE DU CONTOURNEMENT DES  
COUCHES DE POLLUTION DISCONTINUES

## 1 INTRODUCTION

La répartition de la couche de pollution sur les isolateurs haute tension est souvent discontinue (non uniforme) à cause des profils des isolateurs, du vent et de la pluie. De nombreuses études aussi bien expérimentales que théoriques ont porté sur ce sujet [73 - 76]. Ainsi, différents modèles permettant l'analyse du développement de l'arc et différents critères de contournement basés sur des circuits électriques sont proposés [81 - 83]. En utilisant un circuit électrique équivalent d'une section élémentaire d'un isolateur de traversée et de l'impédance correspondante, Rizk [82] établit un modèle mathématique donnant les conditions nécessaires et suffisantes pour le contournement sous tension continue d'un isolateur de traversée contaminé par une humidification discontinue. En se basant sur un circuit électrique équivalent d'impédance, Dhahbi *et al* [8] établissent un critère analytique permettant d'analyser la propagation de l'arc jusqu'au contournement.

Par conséquent, la connaissance de l'impédance d'un isolateur donné, avec différentes configurations des dépôts polluants (continues ou discontinues, humidifiées ou sèches) est d'une grande importance vu qu'elle nous informe sur l'état de l'isolateur et donc sur son degré de pollution.

- Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'influence de la discontinuité de la couche polluante sur le comportement des isolateurs haute tension. En considérant des couches de pollution constituées de bandes propres (sèches) et humides (polluées), nous analysons l'effet de la longueur de chaque bande et sa position par rapport aux électrodes sur le contournement total de l'isolateur ainsi que sur le courant de fuite et la longueur de l'arc électrique.

Par ailleurs, en se basant sur nos résultats expérimentaux, nous proposons un modèle permettant d'évaluer l'impédance entre les électrodes, la tension transférée sur la bande sèche et le courant de fuite correspondant.

## 2 MODELE EXPERIMENTAL

Le modèle expérimental est similaire à celui déjà utilisé dans le cas de la couche continue; il est constitué d'une plaque de (50x50x0,6) cm en verre munie de deux électrodes planes, l'une circulaire de rayon 2,5 cm et l'autre rectangulaire de (50x5) cm de cotés. Ces électrodes sont en film d'aluminium d'épaisseur 3µm. La distance inter-électrodes L est fixée à 40 cm.

### 2.1 Modes opératoires

La même démarche et les mêmes précautions ont été prises que précédemment quant à la préparation du modèle.

Par ailleurs, la solution polluante est obtenue à partir d'un mélange d'eau distillée et de chlorure de sodium. La variation du degré de pollution est obtenue en variant la concentration de sel dans l'eau. Quatre conductivités ont été choisies : 26, 50, 500 et 2000 µS/cm.

#### a) Procédure d'application de la couche de pollution

Le dépôt de pollution est obtenu par pulvérisation de la solution sur tout le modèle. Pour assurer une bonne uniformité, et une bonne reproductibilité de la couche polluante, nous avons gardé, durant tous les essais, la même méthode de pulvérisation (même nombre de pulvérisations de chaque côté de la plaque et à la même distance). Ainsi, le premier essai est effectué pour un dépôt de pollution continu. Par la suite, la plaque est partiellement nettoyée de manière à obtenir une répartition discontinue. Afin de mieux simuler la régularité de la répartition de la pollution, nous avons procédé à une distribution circulaire autour de l'électrode sous haute tension (électrode circulaire). Cette distribution deviendra linéaire au fur et à mesure que l'on s'approche de l'électrode mise à terre (électrode rectangulaire) (Fig. 4.1).

Finalement, la plaque est nettoyée au fur et à mesure soit à partir de l'électrode terre (variations de x, y), soit à partir de l'électrode haute tension (variations de x', y'). La longueur de la zone polluée (ou propre) est variée de 0,1L à L, avec un pas de 0,1L (Fig.4.1).

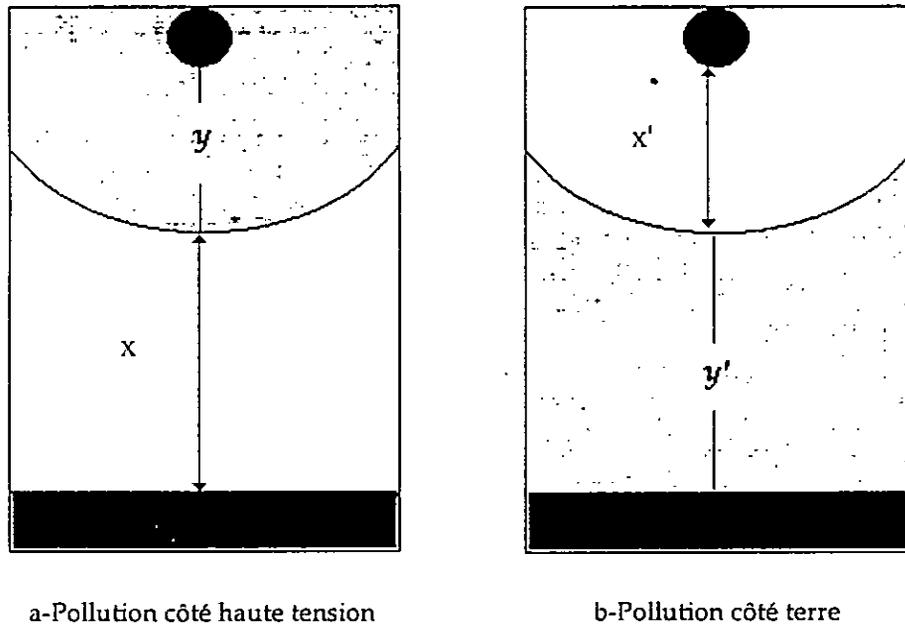


Fig. 4.1- Modèle expérimental

b) Courant de fuite

En appliquant un niveau de tension donné aux bornes de la plaque recouverte d'un dépôt polluant, nous relevons le courant de fuite correspondant à chaque longueur de pollution, à chaque conductivité et à chaque position du dépôt polluant.

c) Tension d'entretien de l'arc

Afin de déterminer la tension minimum d'entretien de l'arc électrique, nous imposons au modèle une longueur sèche donnée, soit autour de l'électrode terre (variation de  $x$ ), ou bien autour de l'électrode haute tension (variation de  $x'$ ). Pour chaque configuration, nous augmentons progressivement la tension d'essai jusqu'au contournement de la zone sèche, dont nous relevons la tension correspondante. Ce procédé a été utilisé pour les conductivités 50, 500 et 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , et pour les deux positions de la couche polluante. Etant donné le caractère dispersif de la tension d'entretien de l'arc, une valeur moyenne est alors calculée à partir de cinq essais.

#### d) Tension de contournement

La mesure de la tension de contournement du système a été effectuée pour deux conductivités extrêmes (50 et 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) et pour les deux configurations de la couche polluante. Elle représente la moyenne de dix mesures pour chaque longueur de la couche polluante.

#### 2.2 Essais préliminaires

En général, une mesure se fait en 5 à 15 secondes suivant la valeur de la tension. Afin de s'assurer que ces temps de mesure n'engendrent pas d'erreurs sur la mesure du courant de fuite, nous soumettons l'objet d'essais à un niveau de tension donné pendant une durée déterminée puis nous relevons le courant de fuite le long de cette période.

Dans le cas de la couche continue, les résultats obtenus nous ont permis d'observer une très faible diminution du courant de fuite après 3 mn d'application et pour les grandes valeurs de la tension (Fig. 4.2.a). Ceci s'explique par un assèchement plus important lorsque la tension est élevée.

Les mêmes essais ont été effectués sur une plaque propre ( $y = y' = 0$ ) (Fig. 4.2.b). Les résultats obtenus montrent que le courant, pour un même niveau de tension, est stable. On peut donc considérer que l'impédance équivalente, vue des électrodes, est indépendante du temps d'application de la tension dans l'intervalle de temps considéré.

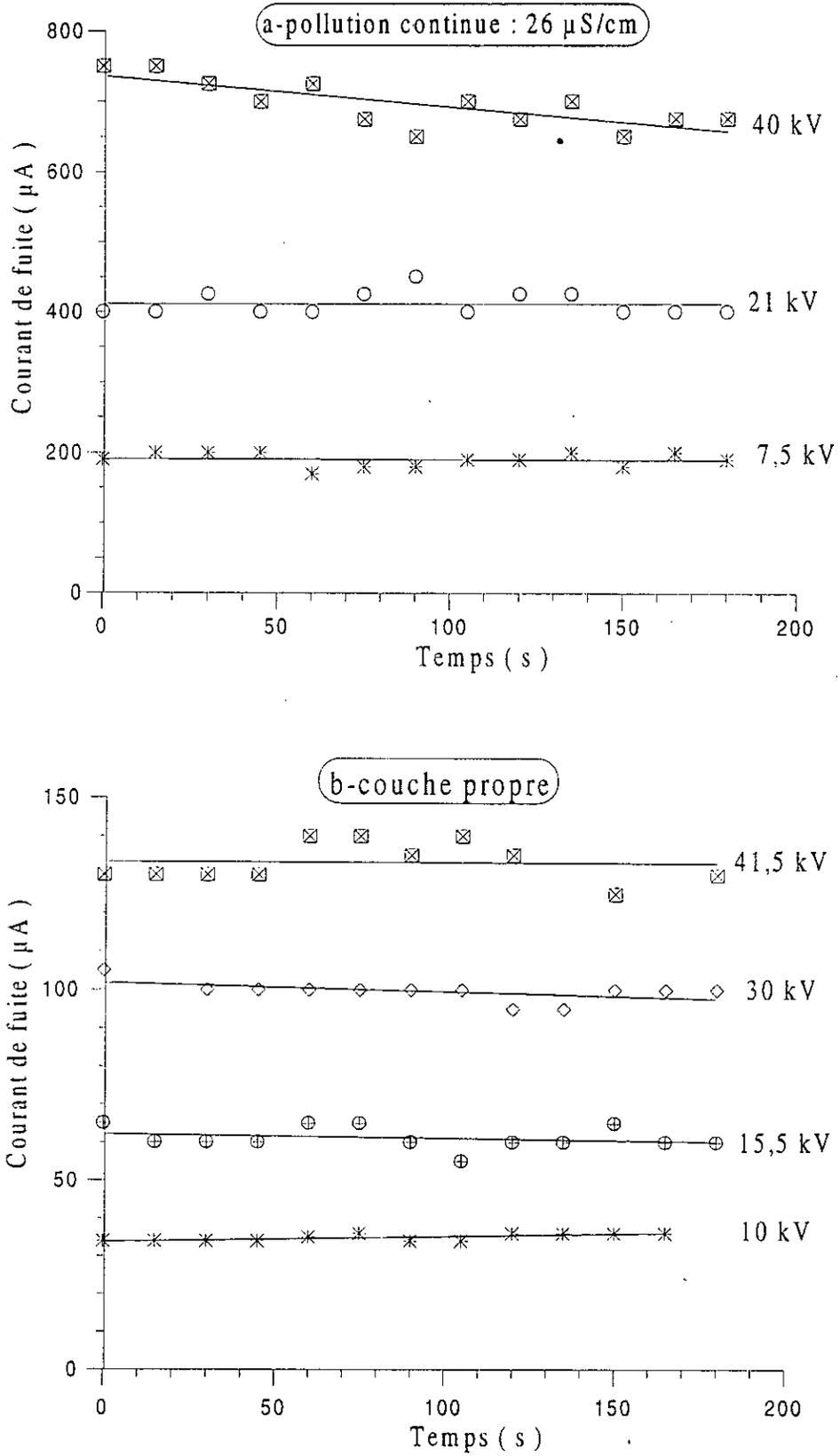


Fig. 4.2 : Courant de fuite - temps d'application de la tension

a-Essais sur la plaque propre

Les essais effectués pour plusieurs niveaux de tension montrent que:

- le courant, du fait du nombre trop important d'harmoniques, ne permet pas d'évaluer aisément le déphasage entre la tension appliquée et le courant de fuite. Nous observons toutefois un déphasage largement inférieur à  $90^0$ , indiquant que l'impédance équivalente à la surface propre possède un caractère actif important (photo1).
- l'amplitude du courant croît d'une manière parfaitement linéaire en fonction de la tension (Fig. 4.3), ce qui permet de déterminer l'impédance équivalente  $Z_0$  de la plaque propre dans les limites des tensions utilisées:  $Z_0 = 4,24.10^8 \Omega$ .

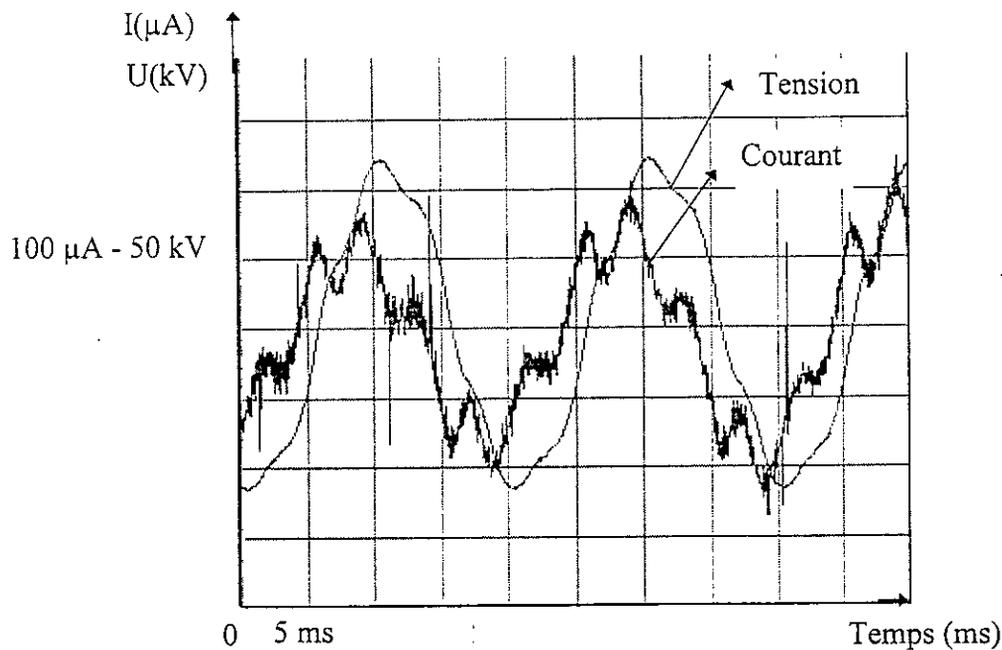


Photo 1: Caractéristique courant - tension en fonction du temps dans le cas où la surface de la plaque est propre

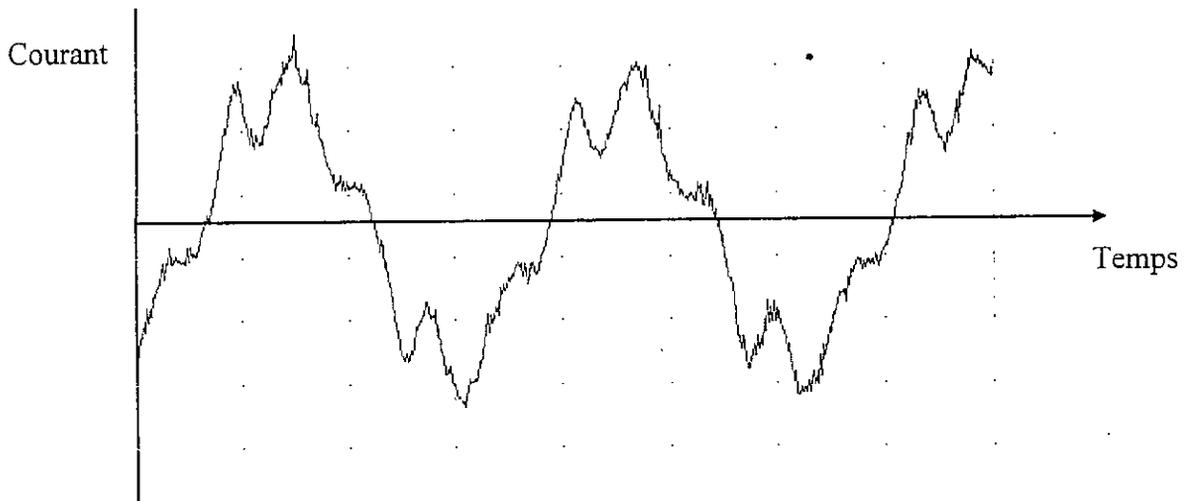


Photo 2: Exemple de signal d'un courant de fuite

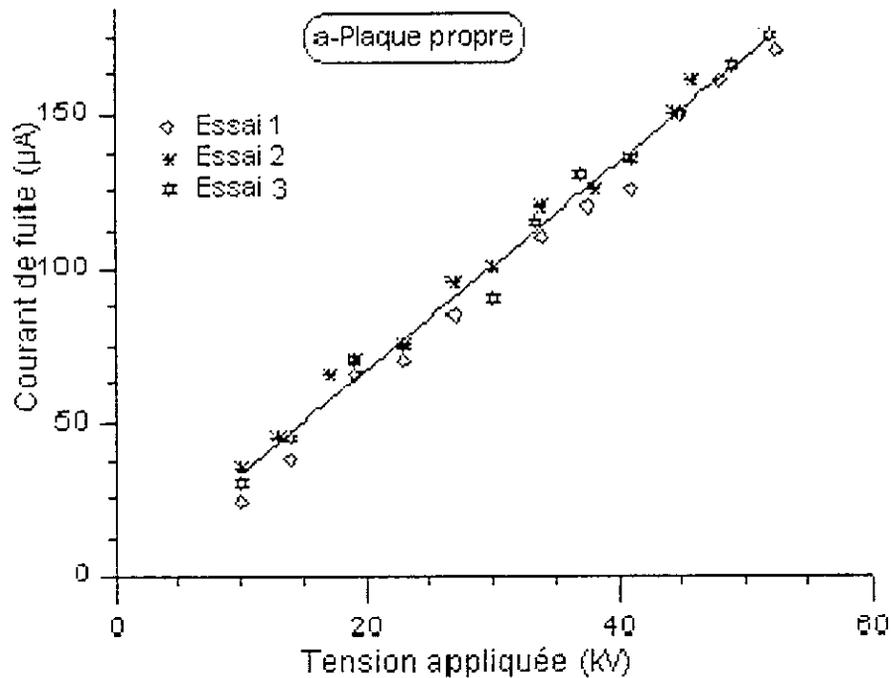


Fig. 4.3: Courant de fuite - tension appliquée

Ainsi, nous remarquons que, contrairement à ce qui est parfois admis, la surface du verre ne présente pas forcément un caractère capacitif. Certains auteurs [86] considèrent la surface du verre comme une résistance et situent sa valeur entre  $10^6$  et  $10^{13} \Omega/\text{cm}$ . Nos électrodes étant distantes de 40 cm, nous sommes bien dans l'intervalle déterminé par ces auteurs. Notons que la

valeur trouvée ( $Z_0$ ), et le déphasage observé dépendent probablement de la nature et de la qualité du verre que nous avons utilisé.

En réalité, nous pensons que la contribution capacitive de l'isolateur, étroitement liée à la fréquence du réseau, est beaucoup plus importante dans les cas suivants :

- cas de régimes transitoires lorsqu'on applique une tension continue ou alternative. Ce cas de figure a été souligné par certains chercheurs [21, 84, 88] ; cette contribution sera négligeable une fois le régime permanent atteint.
- cas d'essais aux ondes de chocs, où le mouvement, très rapide, des électrons est associé à une fréquence beaucoup plus élevée que la fréquence industrielle (environ 1000 fois plus élevée).

Etant donné que les essais ont été effectués à fréquence industrielle (50Hz), la contribution capacitive de l'isolateur utilisé est relativement faible.

#### b-Essais avec une plaque entièrement polluée

Ces essais ont pour but d'évaluer l'impédance équivalente vue des électrodes dans le cas de pollution totale (couche continue).

Pour une conductivité de  $26 \mu\text{S/cm}$ , nous remarquons que le courant comporte également des harmoniques et présente un caractère résistif, le déphasage observé étant nul. Ce cas a été traité dans le chapitre précédent et établi également dans un travail antérieur [77, 78].

Cependant, si nous avons une reproductibilité quasi parfaite des résultats dans le cas de la plaque propre, il n'en est pas de même pour la plaque polluée par une couche continue. Nous avons essayé de reproduire autant que possible la répartition des gouttelettes mais il est bien évident que la reproductibilité est plus délicate dans le cas de la couche continue, la pulvérisation étant manuelle. C'est pourquoi deux courbes extrêmes sont présentées sur la caractéristique courant-tension (Fig. 4.4). Ainsi, pour une conductivité  $26 \mu\text{S/cm}$  nous obtenons une impédance (qui est en fait une résistance)  $R_{26}$  comprise entre  $0,5$  et  $1,3 \cdot 10^8 \Omega$ .

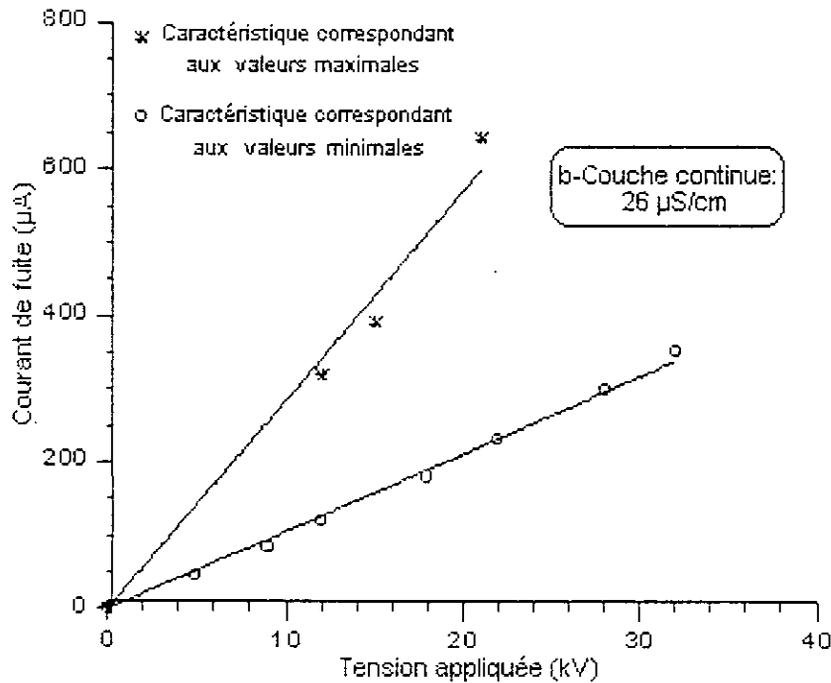


Fig. 4.4: Courant de fuite - tension appliquée

### 3 RESULTATS EXPERIMENTAUX

#### 3.1 Courant de fuite

Comme nous l'avons déjà mentionné ci-dessus, le courant est un courant de conduction puisqu'il est parfaitement en phase avec la tension appliquée dans le cas où la plaque isolante est complètement humidifiée (couche continue); il augmente linéairement avec la tension [77, 78].

Dans le cas où la surface isolante est complètement propre, nous observons que le courant est en avance par rapport à la tension et que le déphasage est approximativement égal à  $36^\circ$ . Le courant de fuite augmente aussi linéairement avec la tension (Fig. 4.3).

En considérant deux conductivités différentes de la couche polluante, 50 et 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , nous remarquons que le courant augmente avec la longueur de la couche polluante et/ou la tension appliquée, quelle que soit la position de la couche polluante (Fig. 4.5, 4.6). Cependant, cette augmentation est faible sauf dans les cas des tensions élevées et des longueurs de couches

polluantes importantes (supérieures au 2/3 de la longueur totale de fuite). En effet, même pour les faibles tensions, à partir d'une certaine longueur de pollution, le courant augmente assez brutalement, les courbes présentant un "coude". Ce dernier exprime le passage de la couche faiblement polluée (donc comportant une zone sèche à impédance élevée) à la couche entièrement polluée où la résistance devient très faible et le courant nettement plus élevé. Cette croissance brutale du courant a pu être mesurée pour les conductivités de 26 et 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Cependant, nous remarquons, pour les tensions élevées ( $> 24 \text{ kV}$ ), une augmentation brutale du courant, même dans le cas des couches faiblement polluées.

La variation du courant de fuite en fonction des différents paramètres considérés (conductivité et position de la couche polluante par rapport aux électrodes, sa longueur ainsi que le niveau de tension appliqué), montre qu'il existe une longueur "limite" de la couche polluante à partir de laquelle le courant croît brutalement même lorsque la plaque est faiblement polluée. Cette limite dépend de la tension appliquée, de la conductivité ainsi que de la position de la couche de pollution. Nous pouvons expliquer ceci par le fait qu'aux tensions peu élevées, lorsqu'une zone sèche est établie autour d'une des électrodes, le courant est nettement plus faible par rapport au courant obtenu dans le cas d'une couche pleine. Ceci est tout à fait plausible à partir du moment où la zone sèche possède une impédance linéique beaucoup plus élevée que celle de la zone polluée.

Aux tensions plus élevées, l'établissement d'une zone propre de 0,1 L ou plus provoque soit (1) un effet couronne intense, donc un affaiblissement de l'impédance de la zone sèche et une élévation du courant, soit (2) un arc électrique court-circuitant la zone sèche, et un courant encore plus élevé.

Les caractéristiques du courant de fuite en fonction de la longueur de la couche polluante sont très proches pour les faibles niveaux de tension ( $< 24 \text{ kV}$ ) et ce pour les deux positions de la couche polluante ( $y$  et  $y'$ ) par rapport aux électrodes. Pour les niveaux de tension élevés, le courant de fuite  $I(y')$  correspondant au cas de la pollution coté terre est plus important que celui correspondant au cas de la pollution coté haute tension  $I(y)$ . Cette différence devient plus accentuée quand la longueur de la couche polluante augmente.

Plus la conductivité et la longueur de la couche polluante augmentent, plus le courant de fuite augmente (Fig. 4.7, 4.8 et 4.9). Nous pouvons remarquer aussi l'influence de la position de

la couche polluante par rapport aux électrodes comme mentionné ci-dessus, particulièrement dans le cas de longueurs de pollution importantes [85, 86].

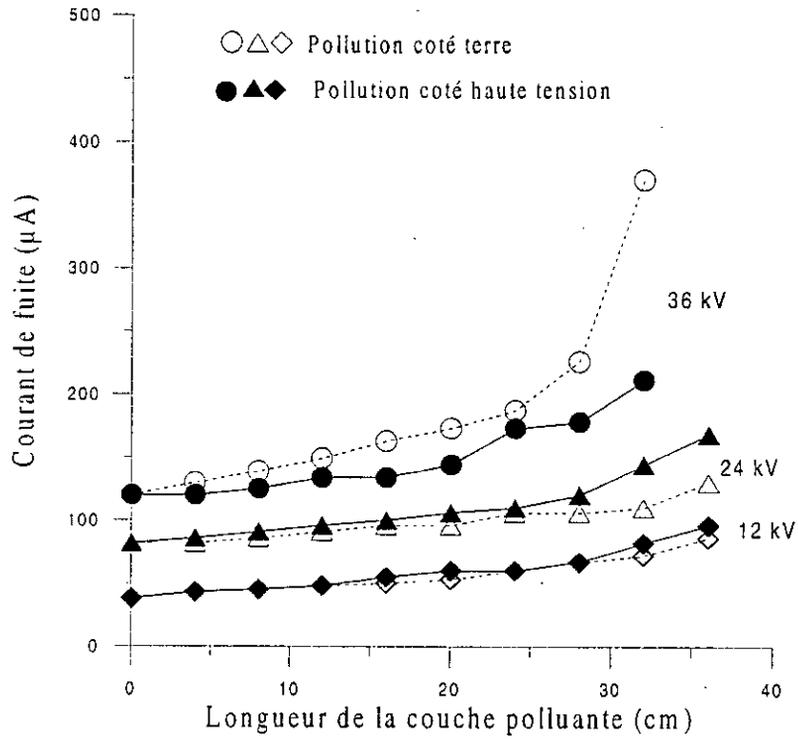


Fig. 4.5: Courant de fuite en fonction de la longueur de la couche polluante,  $\gamma = 50 \mu\text{S}/\text{cm}$

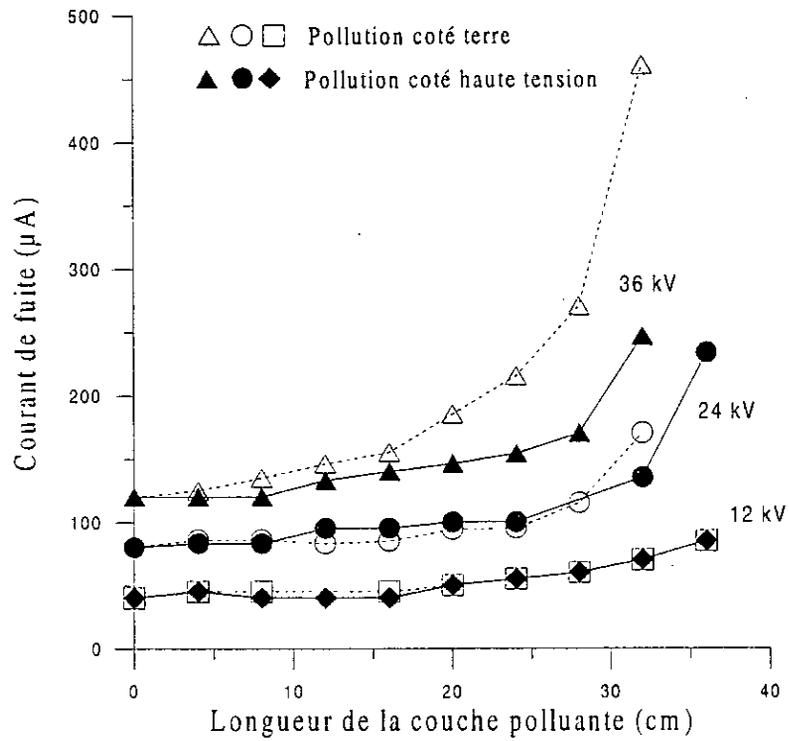


Fig. 4.6: Courant de fuite en fonction de la longueur de la couche polluante,  $\gamma = 500 \mu S/cm$

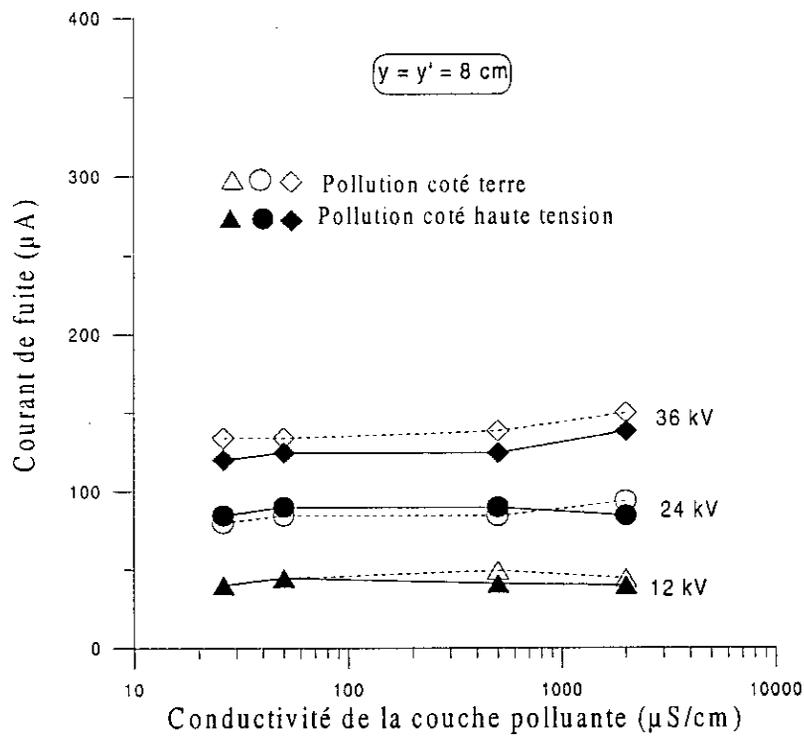


Fig.4.7: Courant de fuite - conductivité de la couche polluante de longueur  $y = y' = 8 \text{ cm}$

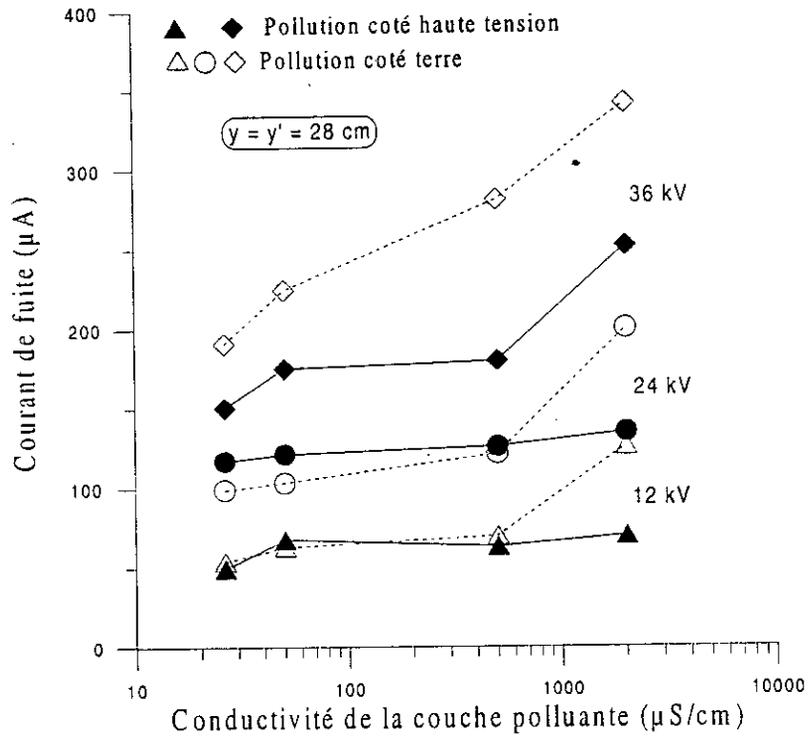


Fig.4.8: Courant de fuite - conductivité de la couche polluante de longueur  $y = y' = 28$  cm

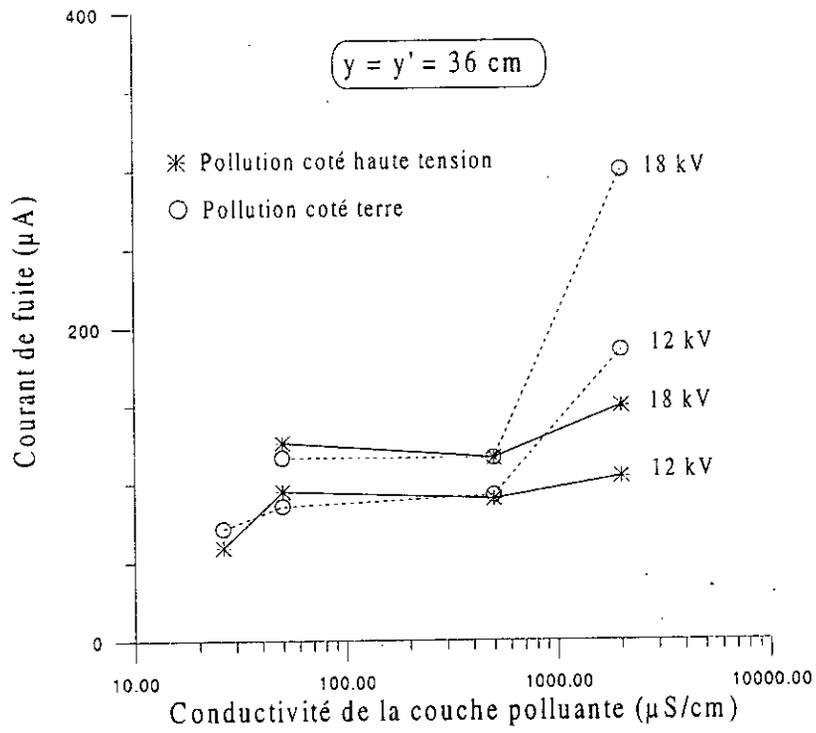


Fig. 4.9: Courant de fuite - conductivité de la couche polluante

## 3.2 Tension d'entretien de l'arc

La tension correspondant à une longueur d'arc donnée  $x$  ou  $x'$  ( initié à partir de l'électrode haute tension et de l'électrode terre respectivement) est approximativement la même pour les deux positions de la couche polluante par rapport aux électrodes quelle que soit la conductivité de la couche polluante. La figure 4.10 donne la variation de la longueur d'arc avec la tension appliquée pour deux conductivités: 50 et 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Nous observons une augmentation régulière de la longueur d'arc avec la tension appliquée [87]. Notons que, dans le cas de la zone sèche coté haute tension, nous observons d'abord un effet couronne intense en augmentant la tension, puis l'apparition brutale d'un arc court-circuitant la zone sèche. Dans le cas de la zone sèche coté terre, l'augmentation de la tension génère d'abord une multitude d'arcs au niveau de l'électrode haute tension avant le contournement de la zone sèche. Nous retrouvons également les mêmes phénomènes que ceux observés sur une surface isolante totalement propre et celle où elle est complètement humidifiée.

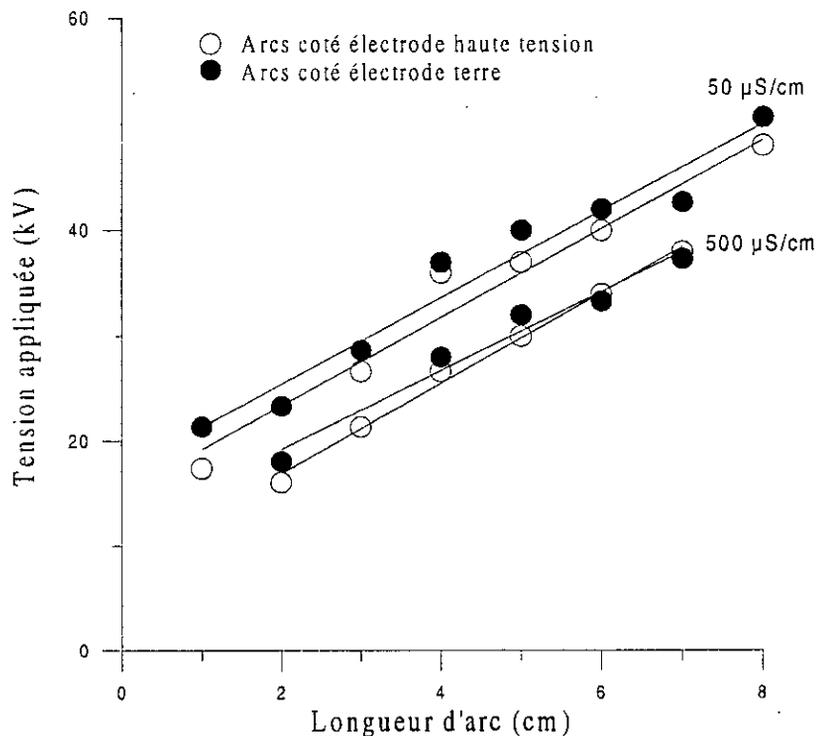


Fig.4.10: Tension appliquée - longueur d'arc

Les résultats présentés à la figure 4.11 montrent l'évolution de la tension d'arcs en fonction de la conductivité pour trois longueurs fixes de l'arc (2, 4 et 6 cm). On observe que l'arc côté terre se développe pour une tension plus élevée à partir de conductivités élevées (entre 500 et 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Ceci montre que les arcs indésirables créés côté haute tension, lorsqu'une zone sèche est établie coté terre, ne contribuent plus à diminuer l'impédance de la pollution, celle-ci étant déjà très faible lorsque la conductivité est élevée. Nous pensons que c'est pour cette raison que nous n'observons pas les mêmes phénomènes que pour les conductivités plus faibles.

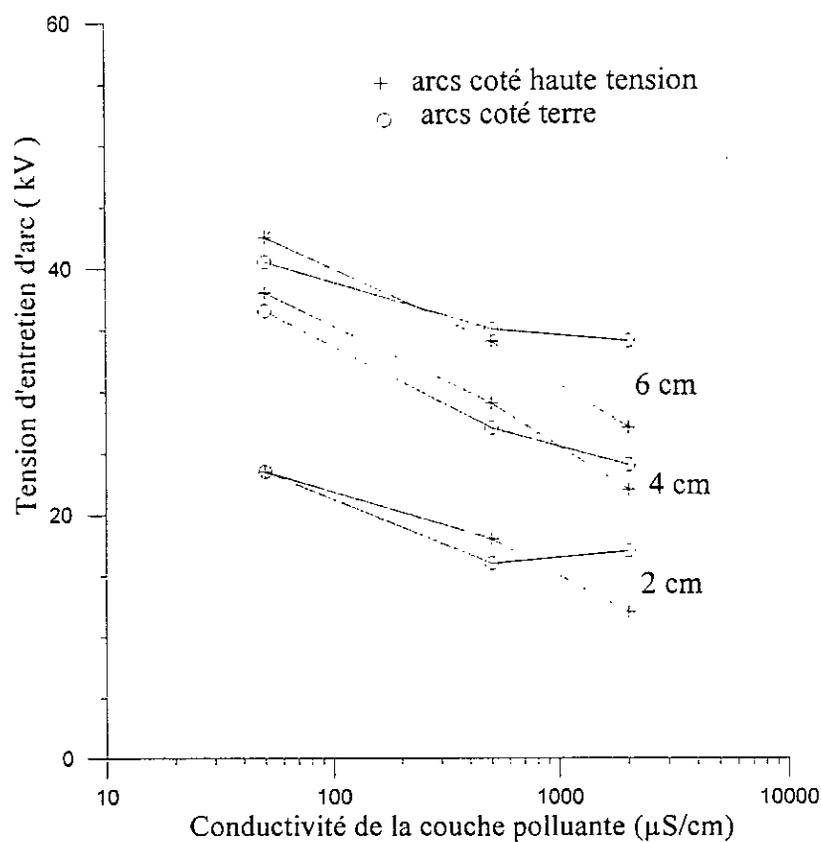


Fig. 4.11: Tension d'entretien d'arc - conductivité

### 3.3 Tension de contournement

Deux conductivités extrêmes ont été utilisées pour les essais de contournement. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 4.12. L'analyse de ces courbes montrent une nette

diminution de la tension de contournement avec la longueur de la pollution. Ce résultat est prévisible puisque la pollution augmente fortement la conductivité superficielle des isolateurs et donc diminue leur tenue diélectrique. Nous observons toutefois une légère augmentation à partir de la longueur de pollution la plus élevée pour la conductivité  $50 \mu\text{S/cm}$  à savoir  $y=y'=36 \text{ cm}$ , soit 90% de la longueur totale. Ce phénomène (courbes présentant un minimum) a été observé par de nombreux auteurs [ 82, 88] à des longueurs différentes de la couche polluée selon la nature des contraintes appliquées. Ce minimum correspondrait à la position la plus favorable à la formation rapide car l'établissement de zones sèches favorise la formation de l'arc [90] et donc conduit au contournement le plus probable. Ce phénomène a été observé pour les deux positions de la couche polluée. Même pour les autres longueurs de pollution, nous n'observons pratiquement pas d'influence de la position, résultat auquel on ne s'attendait pas d'autant plus que nous avons observé un comportement différent de la plaque au fur et à mesure que nous élevions la tension pour les deux positions.

En effet pour la pollution côté terre (zone sèche coté haute tension) et pour la conductivité  $50 \mu\text{S/cm}$ , nous avons tout d'abord observé le court-circuit de la zone sèche, puis le contournement sans création importante d'arc côté terre. Par contre pour la pollution côté haute tension (donc zone sèche côté terre), le court-circuit de la zone sèche était accompagné par la création d'arcs côté haute tension avant le contournement total. Ce phénomène, analogue à celui observé lors des essais d'arcs, s'est également reproduit pour la conductivité  $2000 \mu\text{S/cm}$  avec tout de même une création beaucoup plus importante d'arcs côté terre lorsque la zone sèche est du côté haute tension.

Cependant, il faut noter que pour les faibles longueurs de pollution, il n'y a pas de création d'arcs au niveau de l'électrode autour de laquelle une longueur sèche a été établie; le contournement se produit "directement" sans étape intermédiaire (court-circuit de la zone sèche etc.). Ceci est bien sûr logique étant donné l'existence de longueurs critiques d'arc à partir desquelles le contournement devient inévitable.

Notons également que l'augmentation de la conductivité se traduit bien par une diminution de la rigidité diélectrique.

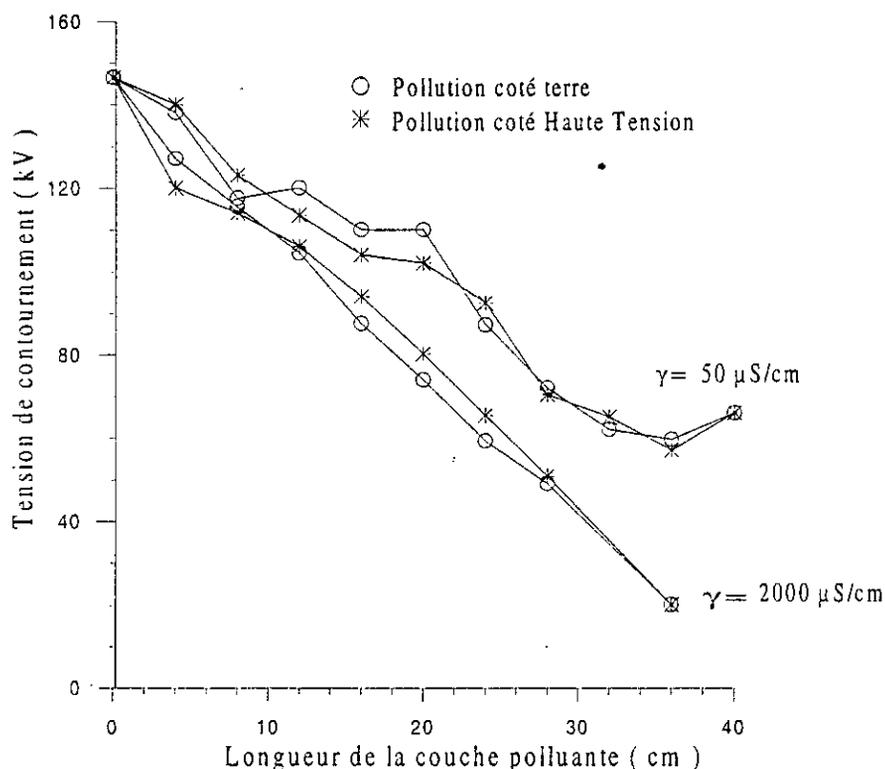


Fig. 4.12: Tension de contournement - longueur de la couche polluante

### 3.4 Détermination de la longueur critique d'arc

Plusieurs auteurs [16, 36, 37] ont observé qu'il existait une longueur critique d'arc à partir de laquelle le contournement devient inévitable. Dans le cadre de notre travail nous avons voulu connaître la longueur critique correspondant à notre modèle. C'est pourquoi nous avons, lors des essais d'arcs et de contournements, noté à chaque fois la longueur d'arc à partir de laquelle le contournement est "direct" c'est à dire qu'il n'y a pas d'arcs précédant le contournement.

Cette longueur a été évaluée à 12 cm, soit environ le tiers de la longueur totale de la plaque. Ce résultat, indépendant de la position et de la conductivité, a été observé durant tous les essais que nous avons effectués. Cette valeur est très différente de celle rapportée par les divers auteurs [16, 36, 37]. Ceci peut s'expliquer par le choix du modèle et du mode d'application de la pollution. En effet, les auteurs ayant trouvé une longueur critique de  $2L/3$  (voir chapitre 1), ont considéré une répartition continue de la couche polluante. L'établissement de zones sèches dans le cas de notre modèle, exprimant la non-uniformité de la pollution, favorise probablement davantage la génération de l'arc électrique et change donc le mécanisme de contournement.

La valeur critique de la longueur d'arc ne dépend pas de la conductivité; ceci est en accord avec les résultats des différents travaux rapportés dans la littérature [16, 36, 37].

#### 4 MODELE ET DISCUSSION

Comme il a été déjà mentionné, l'impédance du circuit électrique équivalent décrivant l'isolateur pollué constitue un moyen important pour estimer la sévérité de pollution et prévoir le contournement. Dans ce qui suit, nous déterminons l'impédance d'un isolateur dont la pollution est discontinue (non-uniforme), c'est à dire constituée par des bandes sèches et humidifiées, dans le cas de variations linéaires des caractéristiques courant-tension (c'est à dire pour des niveaux de tension relativement bas). Nous déterminons d'abord la relation donnant les impédances des deux bandes sèches et humidifiées en fonction de leur longueur et par la suite nous déduisons l'impédance totale de l'isolateur [91, 92].

##### 4.1 Détermination de l'impédance de la bande propre

En analysant les caractéristiques expérimentales courant-tension, nous pouvons déduire l'impédance moyenne  $Z_0$  en fonction de la longueur de la couche polluante pour les deux configurations considérées: pollution coté haute tension et pollution coté terre (Fig. 4.13 ).  $Z_0$  ( $y$  ou  $y'$ ) peut être approchée par l'expression suivante:

$$Z_{0c}(y) = [Z_0(y=0)] \left[ \frac{(L-y)}{L} \right]^{0.42}$$

(1)

et

$$Z_{0c}(y') = [Z_0(y'=0)] \left[ \frac{(L-y')}{L} \right]^{0.42}$$

où  $Z_{0c}$  est l'impédance de la bande sèche en fonction de la longueur de la couche polluante;  $Z_0(y=0)$  est l'impédance mesurée de la surface isolante complètement propre; elle est égale à

$4.10^8 \Omega$ .  $L$  est la longueur de fuite totale (soit 40 cm),  $y$  et  $y'$  les longueurs de la couche polluante en cm (coté haute tension et coté terre respectivement).

Les deux valeurs extrêmes de l'impédance donnée par cette expression sont bien cohérentes, en effet:

$$y = y' = 0 \Rightarrow Z = Z_0$$

et

$$y = y' = L \Rightarrow Z = 0$$

L'erreur sur l'impédance est faible ( $< 4\%$ ) pour des longueurs de la couche polluante inférieures à  $0.8 L$  (Fig. 4.14). Pour des longueurs plus grandes, cette erreur reste raisonnable; elle peut atteindre  $16\%$  pour  $0.9 L$ .

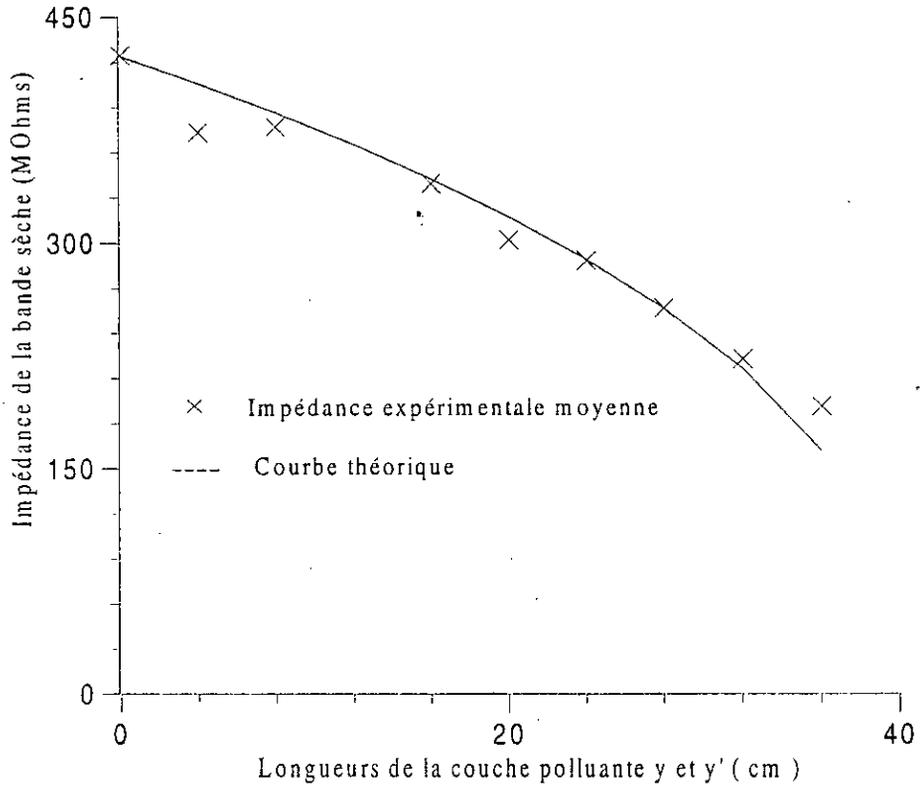


Fig. 4.13: Impédance théorique et expérimentale de la zone sèche - longueur de pollution

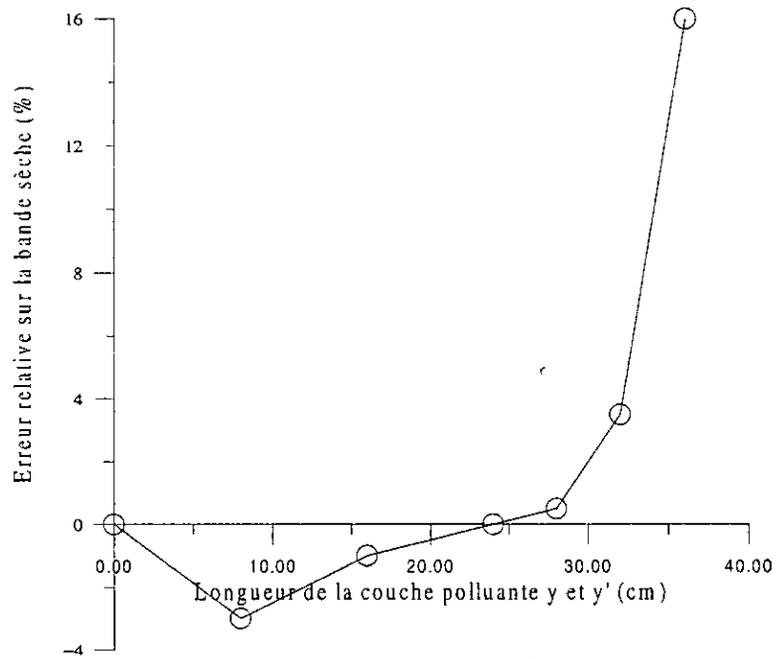


Fig. 4.14: Erreur relative sur la zone sèche - longueur de la couche polluante

## 4.2 Détermination de l'impédance de la couche polluante

En se basant sur le fait que le courant dans une telle configuration (c'est à dire couche polluée) est plutôt résistif [77, 78], nous pouvons considérer l'impédance de la couche polluée comme une résistance R. Ainsi, en considérant une répartition circulaire de la pollution et en utilisant une approximation cylindrique, il vient:

$$dR = \left( \frac{1}{ey\gamma\alpha} \right) dy \quad (2)$$

dR est la variation élémentaire de la résistance R correspondant à une longueur élémentaire dy de la couche polluante; e et  $\gamma$  sont respectivement l'épaisseur moyenne et la conductivité de la couche polluante;  $\alpha$  est l'angle utile et y (ou y') la longueur de la couche polluante.

$K = \frac{1}{e\alpha}$  est une constante déduite à partir des expériences.

Selon la configuration de la pollution, deux cas sont à considérer:

a) Pollution côté haute tension:

Dans ce cas, l'intégration de l'équation (2) se fait entre a et a+y (Fig. 4.15a), a étant le rayon de l'électrode circulaire (2.5 cm).

On obtient alors :

$$R(y) = \left( \frac{1}{e\gamma\alpha} \right) \text{Log} \left( \frac{y+a}{a} \right) = \left( \frac{K}{\gamma} \right) \text{Log} \left( \frac{y+a}{a} \right) \quad (3)$$

b) Pollution côté terre

Dans ce cas, l'intégration de l'expression (2) se fait dans l'intervalle complémentaire (Fig. 4.15.b), à savoir entre  $a+L$  et  $a+L-y'$ . D'où:

$$R(y') = \frac{K}{\gamma} \text{Log} \left( \frac{a+L}{a+L-y'} \right) \quad (4)$$

$K$  peut être obtenu aussi bien à partir des paramètres géométriques  $e$  et  $\alpha$ , qu'à partir des caractéristiques courant-tension. Dans ce cas, nous utilisons une valeur moyenne de  $R$  donnée par la pente des caractéristiques courant-tension durant les essais pour une surface isolante complètement polluée avec une conductivité de la couche égale à  $26 \mu\text{S/cm}$ .

Ainsi, pour une conductivité  $\gamma = 26 \mu\text{S/cm} \Rightarrow R_{26\text{moy}}(y=L) = 9 \cdot 10^7 \Omega$ .

Par conséquent, pour une conductivité  $\gamma$  donnée, nous avons:

$$R_{\gamma\text{moy}}(y=L) = R_{26\text{moy}}(y=L) \left( \frac{26}{\gamma} \right) = \frac{2,34 \cdot 10^9}{\gamma} \Omega$$

et

$$K = \left( \frac{2,34 \cdot 10^9}{\text{Log} \left( \frac{a+L}{a} \right)} \right) = 8,26 \cdot 10^8 \Omega$$

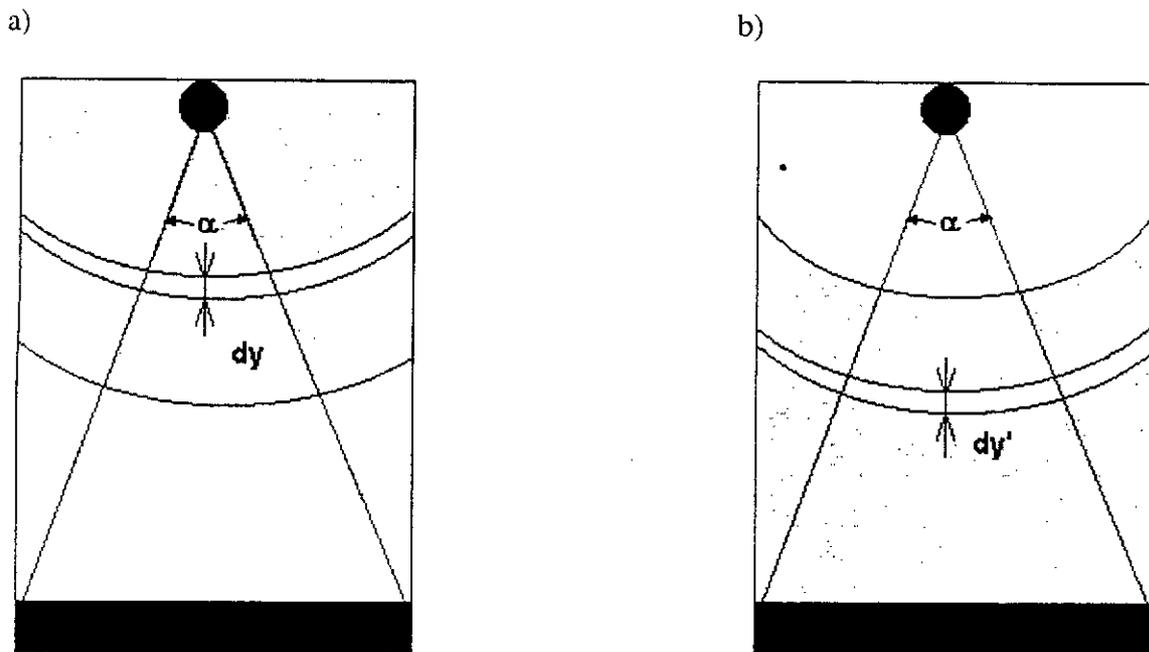


Fig. 4.15: Modèle expérimental: (a) avec pollution côté haute tension et (b) avec pollution côté terre.

Nous avons représenté les deux familles de courbes, pollution côté haute tension et pollution côté terre, (respectivement Fig. 4.16a et 4.16b) pour les trois conductivités 26, 50 et 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (la résistance à 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  est pratiquement confondue avec celle de 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Celles-ci montrent qu'il existe une différence entre les deux configurations, l'impédance de la pollution côté terre présentant une augmentation moins "rapide" que celle côté haute tension. Cela signifierait que nous devrions obtenir un courant légèrement plus élevé côté terre. Cependant, comme nous verrons plus loin, pour les conductivités élevées, cette impédance devient si faible devant celle de la zone sèche que sa valeur n'influe plus sur l'impédance totale de la plaque.

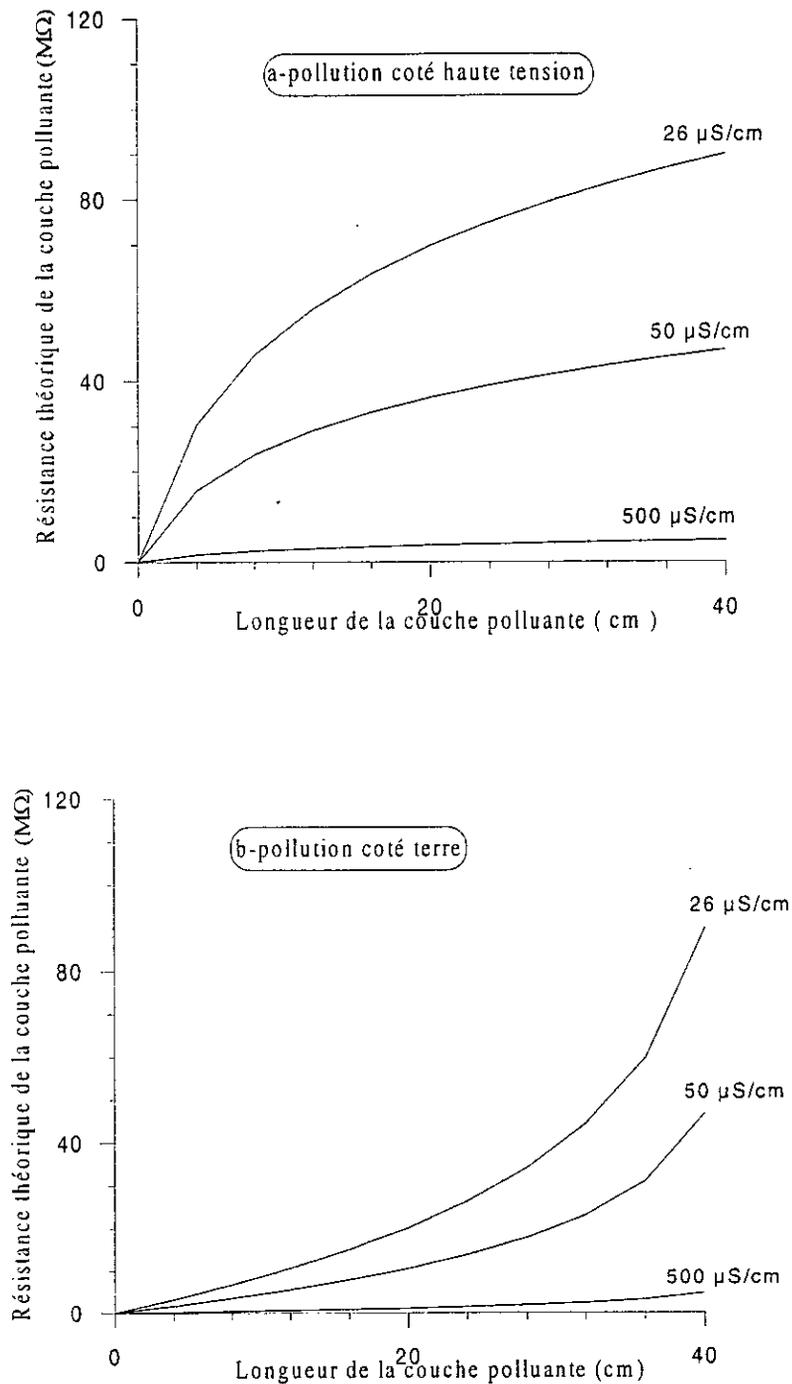


Fig.4.16: Résistance théorique de la pollution - longueur de la couche polluante  
 (a) couche de pollution coté haute tension  
 (b) couche de pollution coté terre.

### 4.3 Impédance totale entre les électrodes

Sachant que l'impédance de la couche propre et la résistance de la couche polluée sont en série entre les électrodes, en prenant la somme des deux impédances, nous obtenons l'impédance totale  $Z_t$  telle que:

Pour la pollution côté haute tension

$$Z_t(y) = Z_{0c}(y) + R(y)$$

ou

$$Z_t(y) = [Z_0(0)] \left[ \frac{(L-y)}{L} \right]^{0.42} + \left( \frac{K}{\gamma} \right) \text{Log} \left[ \frac{(a+y)}{a} \right] \quad (5)$$

et pour la pollution côté terre

$$Z_t(y') = Z_{0c}(y') + R(y')$$

ou

$$Z_t(y') = [Z_0(0)] \left[ \frac{(L-y')}{L} \right]^{0.42} + \left( \frac{K}{\gamma} \right) \text{Log} \left[ \frac{(a+L)}{(a+L-y')} \right] \quad (6)$$

4.4 Tension reportée sur la zone sèche

4.4.1 Rapport des impédances

Le rapport  $g$  entre la résistance de la couche polluée et l'impédance de la couche propre ( $g(y)=R(y)/Z_{0c}$  et  $g(y')=R(y')/Z_{0c}$ ) pourrait constituer un moyen permettant d'évaluer la sévérité de la pollution. Plus la sévérité de la pollution est importante plus  $g$  est faible. La figure 4.17 donne la variation de  $g$  pour les deux configurations de la pollution. Nous observons que  $g$  est pratiquement nul pour des couches de pollution dont les conductivités sont grandes ( $> 500 \mu\text{S/cm}$ ) quelle que soit la position de la couche polluante. Ce rapport augmente quand cette conductivité diminue, et plus particulièrement quand la couche de pollution est du côté de l'électrode haute tension. Le cas le plus critique est celui correspondant à la pollution du côté terre avec des conductivités élevées confirmant bien les résultats expérimentaux.

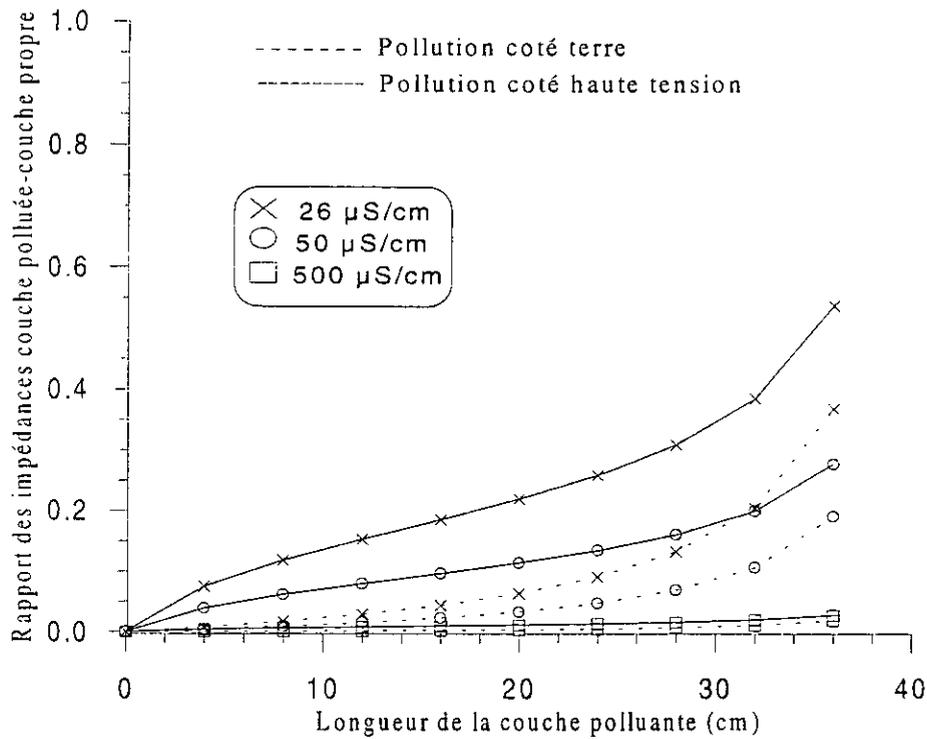


Fig. 4.17: Rapport des impédances couche de pollution - zone sèche en fonction de la longueur de la couche polluante

4.4.2 Tension reportée  $U_t$ 

Le rapport de la tension  $U_t$  reportée sur la bande sèche sur la tension totale  $U$  appliquée en fonction de la longueur de la pollution peut être exprimé par:

$$U_t(y) = \frac{U}{(1 + g(y))} \quad \text{et} \quad U_t(y') = \frac{U}{(1 + g(y'))}$$

Pour bien apprécier l'influence de la couche polluante par rapport à la bande sèche, nous avons représenté le rapport  $u$  entre  $U_t$  ( $y$  et  $y'$ ) et la tension totale appliquée  $U$  (Fig. 4.18). Nous observons que pour des conductivités supérieures à  $500 \mu\text{S/cm}$ , toute la tension  $U$  est appliquée aux bornes de la bande sèche quelle que soit la longueur de la couche polluée ( $u \sim 1$ ). Pour de faibles conductivités, par exemple  $26$  et  $50 \mu\text{S/cm}$ , l'impédance de la couche polluante a une influence significative sur le rapport  $u = U_t/U$ . Pour des conductivités élevées variant de  $500$  à  $2000 \mu\text{S/cm}$ , les valeurs du courant de fuite déduites du modèle sont très voisines (Fig. 4.19) alors que les valeurs expérimentales montrent une certaine différence (Fig. 4.8). Ceci est dû au fait que le modèle ne prend pas en considération la chute de tension aux bornes de la couche de pollution qui n'est pas négligeable en pratique par rapport à la tension appliquée pour de telles conductivités ( $500$  à  $2000 \mu\text{S/cm}$ ). Par conséquent, la répartition du potentiel au niveau de la bande sèche n'est pas uniforme, comme rapporté par Rizk [84].

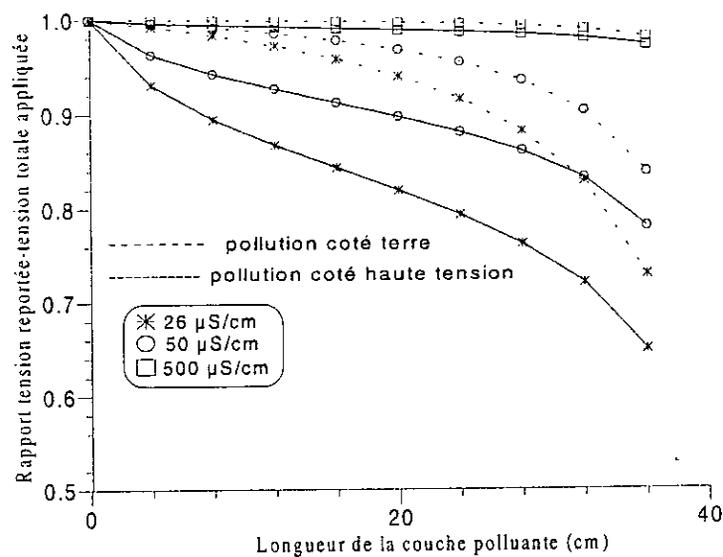


Fig. 4.18: Rapport de la tension reportée sur la tension totale appliquée en fonction de la longueur de la couche polluante.

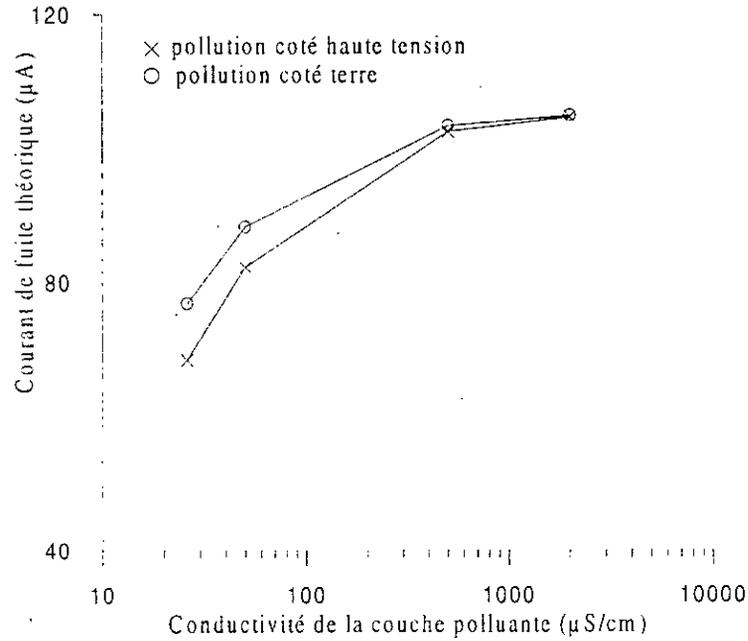


Fig. 4.19: Courant de fuite théorique en fonction de la conductivité de la couche polluante, tension appliquée  $U = 24 \text{ kV}$ ; longueur de la couche polluante  $y = y' = 36 \text{ cm}$ .

### 5. Détermination du courant de fuite théorique à partir de l'impédance totale

Les observations faites lors des essais nous ont permis de remarquer qu'il existe deux comportements distincts du modèle selon le niveau de la contrainte appliquée. Il s'agit d'un régime ohmique, lorsque les conditions de pollution sont encore non critique et d'un régime non linéaire, n'obéissant plus à la loi d'ohm. Celui-ci ne permet pas d'évaluer d'une manière simple l'impédance de la couche propre, celle-ci "supportant" la tension la plus élevée et donc perdant forcément son caractère ohmique; les caractéristiques  $U(I)$  présentées dans la partie expérimentale illustrent parfaitement ce phénomène.

Les figures 4.20 à 4.23 représentent la variation du courant de fuite en fonction de la longueur de la pollution. Celles-ci ont été tracées pour trois niveaux de tension et pour les quatre conductivités à savoir 26, 50, 500 et 2000  $\mu\text{S/cm}$ .

Afin de mieux observer l'évolution du courant de fuite  $I_f$  avec la longueur de la couche de pollution, nous avons représenté la variation de  $I_f$  pour une longueur allant de 0 à L pour les conductivités 26 et 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . puis de 0 à 0,9L pour 500 et 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (c'est à dire nous avons repris les mêmes variations que pour les essais expérimentaux).

L'analyse de ces courbes montre que le modèle proposé est d'autant plus proche du modèle expérimental que :

- \* la pollution est établie côté haute tension
- \* le niveau de tension n'est pas trop élevé
- \* la longueur de la pollution n'est pas critique

C'est ainsi que les courbes sont pratiquement confondues pour les niveaux 12 et 24 kV lorsque la pollution est établie coté haute tension même pour la conductivité la plus c'est à dire 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Figs. 4.20a - 4.23a).

Pour la pollution côté terre et pour les mêmes niveaux de tension, les courbes sont également très proches pour toutes les conductivités sauf pour la conductivité 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  où les courbes divergent à partir d'une longueur déterminée de pollution. Cette dernière est évaluée aux environs de 20 cm pour 12 kV (autour de 50% de la longueur totale) et de 16 cm ( 40% de la longueur totale) pour 24 kV.

Lorsque la tension atteint 36 kV, le modèle ne convient plus à partir d'une longueur spécifique à chaque conductivité et aux deux positions de la pollution. Cette longueur "critique" est d'autant plus élevée que :

- \* la conductivité est faible; pour 26 et 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , cette longueur est supérieur à 80% de la longueur totale.
- \* la pollution est côté haute tension; même pour la conductivité la plus élevée, la longueur critique reste quand même importante, supérieure à 70% de la longueur totale.

Le modèle proposé reflète assez bien le comportement de la plaque, sous réserve de ne pas atteindre les régimes de conduction de la zone propre, régimes associés aux tensions élevées

et/ou conductivités élevées. Ceci est logique étant donné que le modèle empirique ne tient pas compte de la diminution de l'impédance de la zone sèche lorsque le régime critique est atteint. Ce régime, non linéaire a été largement commenté dans la partie expérimentale.

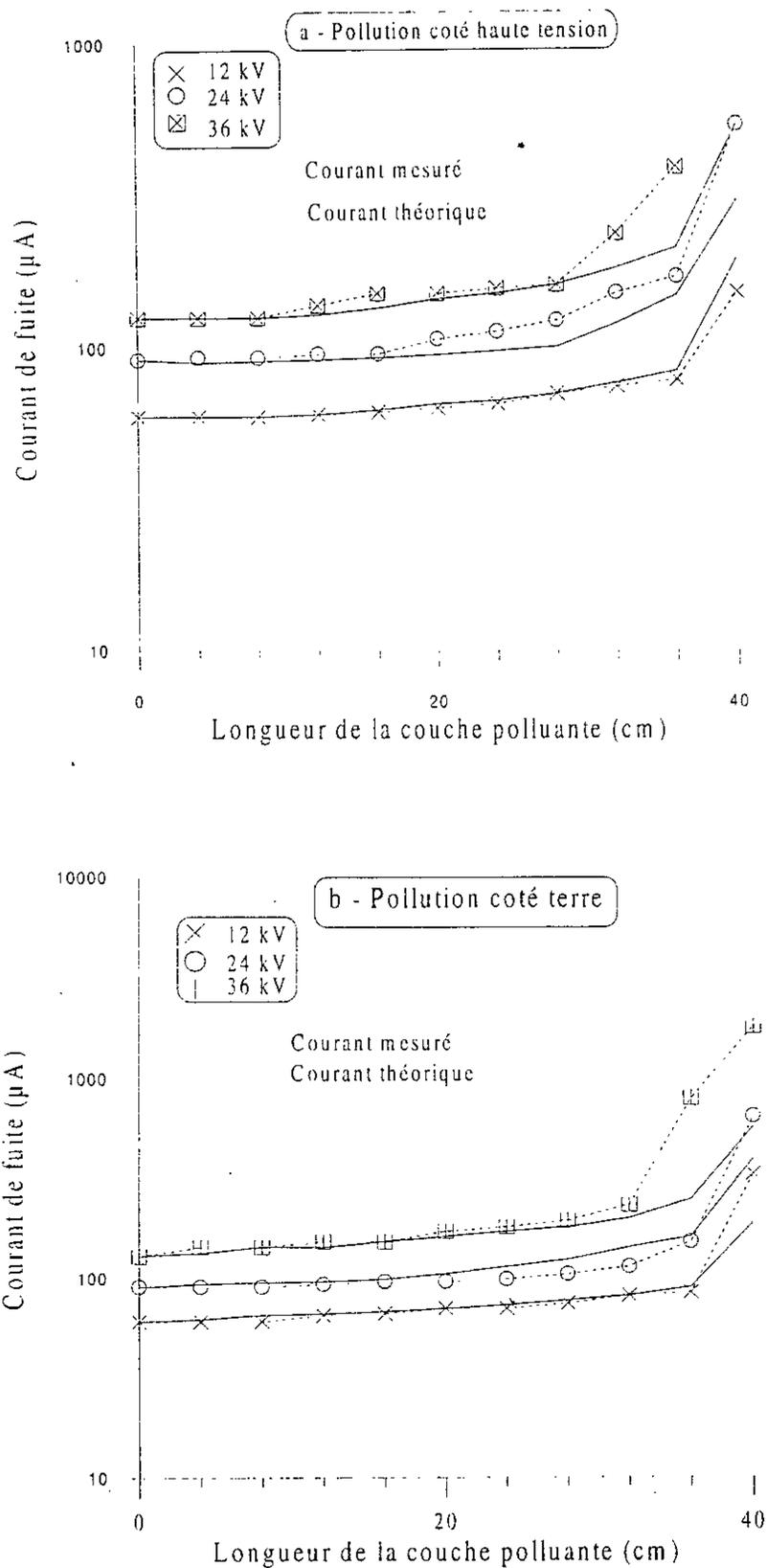


Fig. 4.20 : Courant de fuite - longueur de la couche polluante ( $\gamma$  26  $\mu$ S/cm)

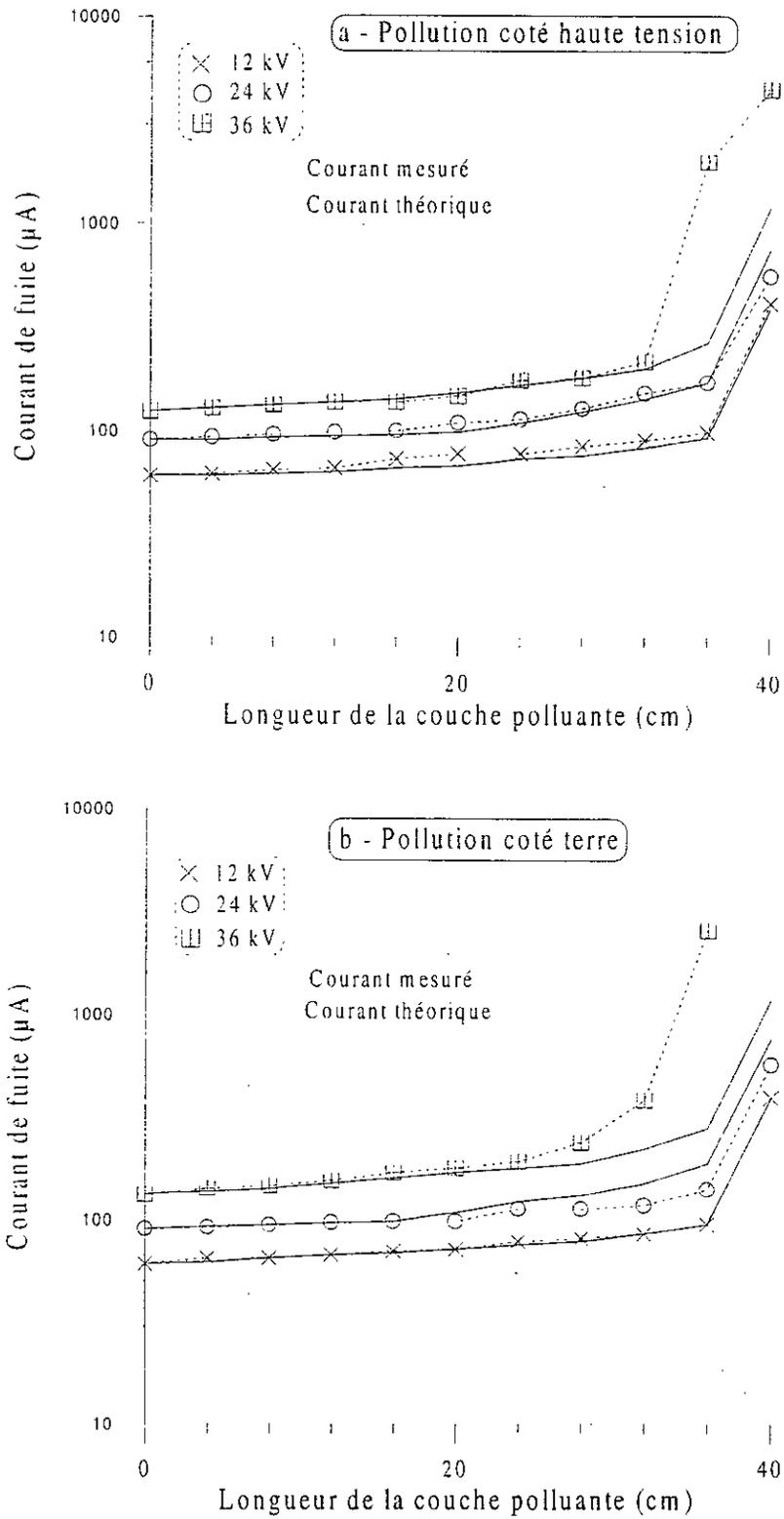


Fig. 4.21 : Courant de fuite - longueur de la couche polluante  
( $\gamma = 50 \mu\text{S/cm}$ )

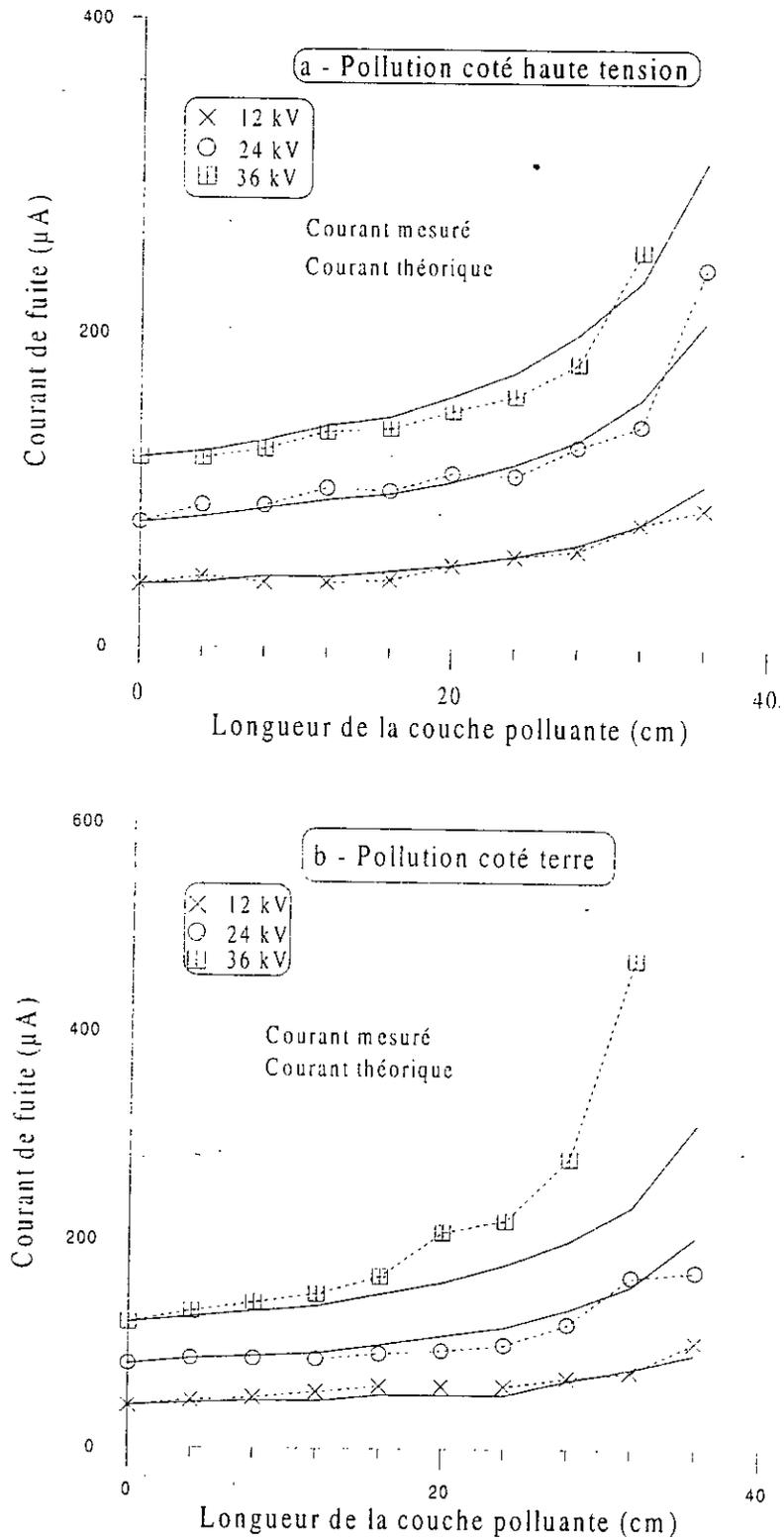


Fig. 4.22 : Courant de fuite - longueur de la couche polluante ( $\gamma = 500 \mu\text{S/cm}$ )

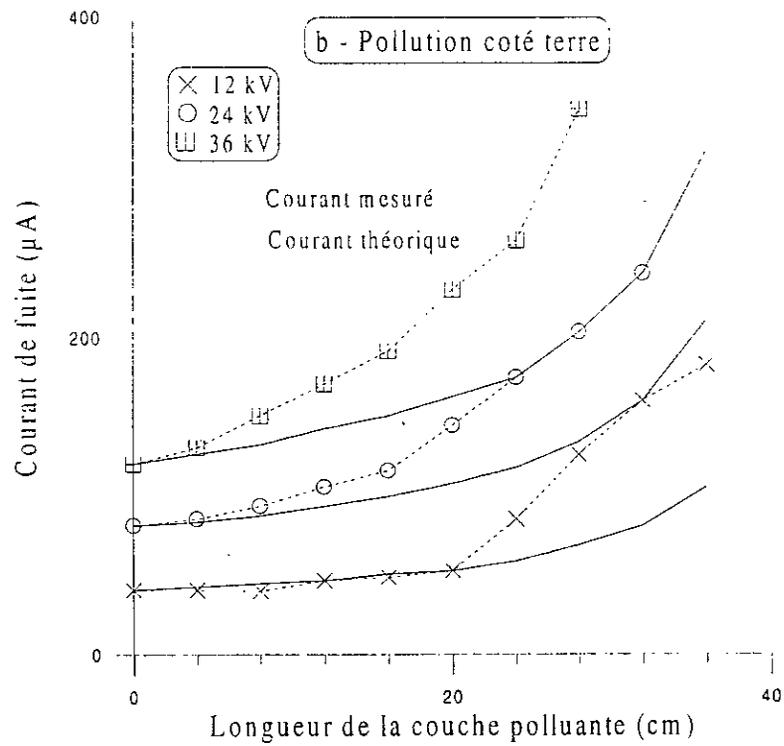
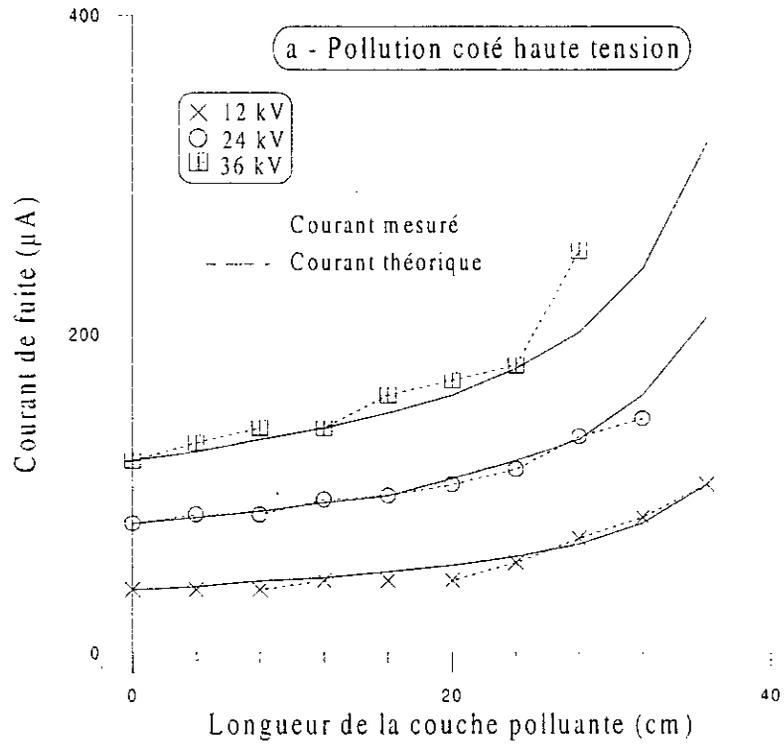


Fig. 4.23 : Courant de fuite - longueur de la couche polluante  
 ( $\gamma = 2000 \mu\text{S/cm}$ )

## CONCLUSION

Il existe un régime critique à partir duquel nous obtenons une augmentation brutale du courant (régime associé au phénomène d'ionisation de l'air). Ce régime est atteint pour les grandes longueurs de couche polluante, lorsque la tension et/ou la conductivité sont élevées. D'autre part, le courant de fuite dépend de la position de la couche polluante (côté terre ou côté haute tension). Lorsque l'effet couronne s'établit, le courant de fuite devient plus élevé lorsque la couche polluante est du côté de l'électrode rectangulaire, mise à la terre. Le modèle empirique proposé, nous a permis d'expliquer et d'interpréter les allures des caractéristiques expérimentales du courant de fuite.

Nous avons observé une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et le modèle empirique tant que la zone sèche garde les mêmes propriétés d'isolement.

Il est difficile d'évaluer correctement le développement de l'arc lorsque celui-ci a lieu côté terre à cause d'arcs multiples se développant également côté haute tension. Nous avons néanmoins observé que la position a peu (voire pas) d'influence sur la tension d'entretien de l'arc.

La conductivité de la couche influe sur la tension d'entretien d'arc. Cette dernière diminue sensiblement, pour une même longueur de la zone sèche, lorsque la conductivité augmente.

En ce qui concerne la tension de contournement, nous avons observé que la position de la pollution n'a apparemment pas d'influence sur la tension de contournement pour les conductivités utilisées. Par ailleurs, il existe une longueur d'arc critique à partir de laquelle on ne peut plus maintenir un arc stable. Cette longueur, évaluée au tiers de la longueur de la plaque, diffère considérablement de celle obtenue par Claverie et Porcheron dans le cas de pollution continue [42, 43]; ceci est dû probablement au processus de création d'arcs qui est très différent lorsque des zones sèches sont préétablies. La longueur d'arc critique est toutefois indépendante de la conductivité, confirmant ainsi les résultats rapportés par d'autres chercheurs [11, 42, 43].

Finalement, le modèle que nous avons adopté, et le choix du mode d'application de la pollution sur ce dernier, peuvent constituer une représentation intéressante d'un isolateur pollué compte tenu des résultats obtenus.

CHAPITRE 5: ALGORITHME DE CONTROLE DE LA  
SEVERITE DES COUCHES POLLUANTES

## 1. INTRODUCTION:

Afin de pouvoir intervenir à temps et éviter les incidents engendrés par le contournement sous pollution, il est utile pour l'exploitant des lignes de transport électroénergétiques de disposer de moyens de surveillance de la pollution des isolateurs et d'estimer sa sévérité.

Le but de ce chapitre est de présenter un algorithme permettant d'avoir les différentes caractéristiques de la propagation de l'arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par des couches de pollution continues ou discontinues sous tension alternatives 50 Hz. Cet algorithme est basé sur un modèle de circuit électrique équivalent et utilise la condition de réamorçage de l'arc [12]. Les résultats de simulations sont comparés à ceux obtenus expérimentalement au laboratoire [93, 94].

Pour valider notre algorithme, nous comparerons les résultats de simulations avec ceux obtenus expérimentalement. Nous montrerons qu'il est possible de surveiller le degré de pollution des isolateurs d'un ouvrage, en mesurant simplement le niveau des pointes du courant de fuite.

## 2. MODELE EXPERIMENTALE

Le modèle expérimentale utilisé est semblable à celui utilisé par Claverie et Porcheron [12]. Il est constitué d'une plaque de bakélite rectangulaire munie de deux électrodes en aluminium, l'une circulaire et l'autre rectangulaire (Fig. 5.1).

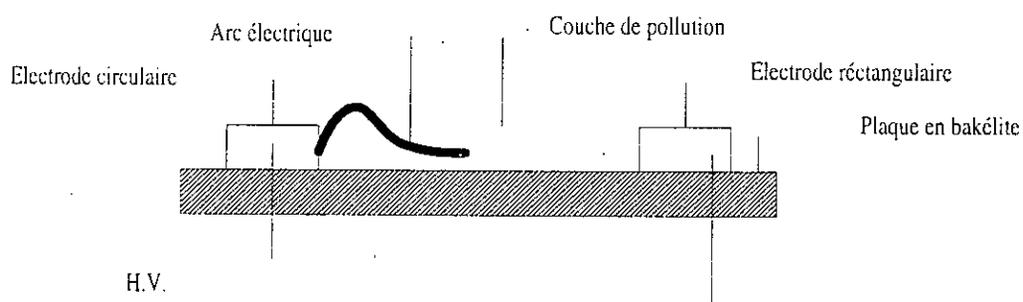


Fig. 5.1: Modèle plan de Laboratoire.

Pour valider notre simulation, nous considérons des couches de pollution constituées par du sable provenant de Hassi-R'Mel (région septentrionale du Sahara Algérien). Par ailleurs, pour reproduire le phénomène de condensation matinale, très fréquent au Sahara, nous utilisons la vapeur d'eau (comme méthode d'humidification initiale) juste avant l'application de la tension d'essai. La distance entre électrodes est de 292 mm (Fig. 5.2) [95, 96]. Elle correspond à la longueur de fuite d'un isolateur très utilisé par SONELGAZ (type 1512 L). Le courant de fuite est mesuré à travers une résistance de 50 Ω insérée entre l'électrode rectangulaire et la terre et connectée à un oscilloscope à mémoire. Deux diodes très rapides montées en tête bêche sont utilisées pour protéger l'oscilloscope contre les surtensions. La longueur de l'arc électrique est mesurée à l'aide de photographies statiques, l'objet d'essai étant installé dans une chambre noire.

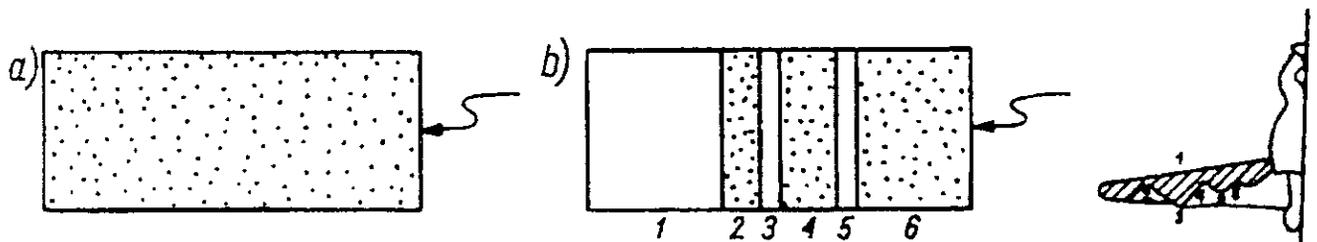


Fig. 5.2: Modèles de Laboratoire pour les deux configurations de pollution:

a) uniforme et b) non uniforme avec l'isolateur correspondant où les longueurs des zones 1, 2, 3,

4, 5 et 6 sont respectivement de 106, 30, 13, 52, 4 et 87 mm.

### 3. MODELE DE CONTOURNEMENT ET MISE EN EQUATIONS

Le modèle de laboratoire peut être représenté par un circuit équivalent constitué d'un arc dont la tension aux bornes est  $V_{arc}$  en série avec une résistance  $R(x)$  représentant la portion de la couche polluante non court-circuitée (Fig. 5.3). Ainsi:

$$V = V_{arc} + R(x)i \quad (5.1)$$

où  $i$  est le courant de fuite à travers  $R(x)$ .

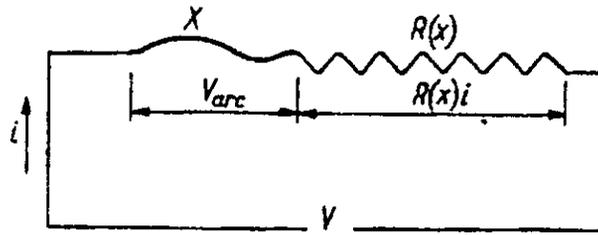


Fig. 5.3: Circuit électrique équivalent.

L'expression approximative de la tension d'arc  $V_{arc}$  a été obtenue en effectuant des mesures en courant alternatif en établissant un arc entre une tige métallique et la surface libre d'une solution de chlorure de sodium [28]:

$$V_{arc} = \frac{100x}{i^n} \quad (5.2)$$

Par ailleurs, la résistance  $R(x)$  de la couche polluante dépend de la longueur, de la position et de la direction de l'arc. Dans ce qui suit, nous considérons que l'arc se développe le long de l'axe perpendiculaire à l'électrode rectangulaire.

Si la résistivité  $\rho$  de la couche polluante est la même en chaque point de la surface polluée, alors  $R(x)$  peut s'exprimer comme le produit de  $\rho$  par une fonction  $F(x)$  appelée "fonction de répartition de la pollution".  $F(x)$  dépend des caractéristiques géométriques de la surface isolante, de la répartition de la couche polluante et de la direction de l'arc sur cette surface [12].

$$R(x) = \rho F(x) \quad (5.3)$$

Par conséquent, la tension appliquée devient:

$$V = \frac{100x}{i^n} + \rho F(x)i \quad (5.4)$$

Par ailleurs, la condition de réamorçage de l'arc, après chaque alternance est [36, 37]:

$$V \geq \frac{kx}{i^n} \quad (5.5)$$

où  $k$  et  $n$  sont les constantes caractéristiques de l'arc déterminées par des mesures du courant de fuite pour différents niveaux de tension d'essai. Selon Claverie et Porcheron [12],  $k$  et  $n$  sont

égaux respectivement à 800 et 0,5. La condition (5.5) reste valable quand il s'agit du réamorçage du même arc le long du même parcours ionisé.

Selon Rizk [9], rien ne justifie physiquement le fait que les exposants associés au courant de fuite dans les expressions de la tension d'entretien de l'arc (5.2) et de la tension de réallumage (5.5) doivent avoir la même valeur. Seule une raison pratique peut justifier un tel choix: simplifier les calculs analytiques.

Ainsi, la tension appliquée entre les deux électrodes peut s'écrire sous la forme:

$$V = \frac{100x}{i^n} + R(x)i \quad (5.6)$$

Ainsi, nous pouvons déduire que la tension V, le courant maximal I et la longueur maximale d'arc X, pour une résistivité  $\rho$  donnée, seront liés par la relation fondamentale suivante:

$$VI^n = kX \quad (5.7)$$

Cette relation est valable quelques soient la conductivité et la répartition de la couche polluante. A partir des équations (5.6) et (5.7) nous obtenons après réarrangement (en prenant  $i=I$ ):

$$V = \frac{k}{(k - 100)^{\frac{n}{n+1}}} \left[ X^{\frac{1}{n}} R(X) \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (5.8)$$

et quand la résistivité  $\rho$  est uniforme:

$$\frac{V}{\rho^{\frac{n}{n+1}}} = \frac{k}{(k - 100)^{\frac{n}{n+1}}} \left[ X^{\frac{1}{n}} F(X) \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (5.9)$$

Ces relations lient donc la longueur d'arc maximale X à la tension V et aux caractéristiques de la couche de pollution (résistivité  $\rho$  et répartition de cette couche à la surface de l'isolateur F(X)).

Les équations (5.8) et (5.9) sont fonction uniquement de  $X$ ,  $\rho$  étant constante. Elles présentent un maximum  $V_c$  pour une longueur d'arc  $X = X_c$ . Pour les valeurs de tensions appliquées inférieures à  $V_c$ , nous avons établissement d'un régime stable.

Les valeurs de tensions, de courants et des longueurs d'arcs sont reliés par les relations (5.7) et (5.8) ou (5.9). Dès que la tension dépasse  $V_c$ , l'arc se développera et atteindra l'autre électrode en provoquant le contournement du dispositif; c'est le régime instable. La limite entre le régime stable et le régime instable est dite "état critique".

A l'état critique correspond donc une tension critique, ou tension de contournement  $V_c$ , qui apparaît comme la tension qui ne serait être dépassée sans que le contournement du dispositif isolant ne se produise:

$$V_c = V(X = X_c),$$

et

$$V_c = \frac{k}{(k - 100)^{\frac{n}{n+1}}} \left[ X_c^{\frac{1}{n}} R(X_c) \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (5.10)$$

et  $X_c$  est la racine de :

$$\frac{dV_c}{dX} = 0 \quad (5.11)$$

Pour résoudre cette équation, il suffit de résoudre l'équation suivante:

$$\frac{d \left[ X^{\frac{1}{n}} R(X) \right]}{dX} = 0 \quad (5.12)$$

Si la fonction de répartition de la couche polluante  $F(X)$  est connue, il est possible de définir un coefficient de sécurité de l'isolement pollué. Ce coefficient est donné par le rapport de la tension appliquée  $V$  à la tension de contournement  $V_c$  correspondant au degré de pollution de l'isolement considéré. L'écart séparant la tension appliquée de la tension de contournement caractérise en fait la marge de sécurité du dispositif isolant.

En effet, d'après la relation (5.8) et (5.10) nous pouvons écrire:

$$C_s = \frac{V}{V_c} = \left[ \frac{X^{\frac{1}{n}} F(X)}{X_c^{\frac{1}{n}} F(X_c)} \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (5.13)$$

Le coefficient  $C_s$  apparaît donc comme étant une fonction de  $X$  seulement, car  $X_c$  est constante lorsque  $F(X)$  demeure inchangée.

Nous définissons  $P$  comme étant le produit de la tension  $V$  par le courant  $I$  élevé à la puissance  $n$ , soit par le produit de la constante  $k$  par la longueur d'arc  $X$ :

$$P = VI^n = kX \quad (5.14)$$

Par suite, le produit critique  $P_c$  est tel que:

$$P_c = V_c I_c^n = kX_c \quad (5.15)$$

A partir des relations (5.14) et (5.15), il est clair que  $X$  peut s'exprimer en fonction du rapport  $P/P_c$ :

$$X = \frac{P}{P_c} X_c \quad (5.16)$$

En définitive, le coefficient de sécurité pourra donc être considéré comme étant une fonction du rapport  $P/P_c$ :

$$C_s = \frac{V}{V_c} = \left[ \frac{\left( \frac{P}{P_c} \right)^{\frac{1}{n}} F\left( \frac{P}{P_c} X_c \right)}{F(X_c)} \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (5.17)$$

Nous devons souligner qu'en général, dans les conditions réelles d'exploitation, le degré de pollution ne peut pas être caractérisé par la résistivité superficielle (ou la conductivité) de la couche polluante car sa distribution n'est pas uniforme. La caractéristique  $R(X)$  représenterait le mieux les isolateurs sous pollution naturelle.

#### 4. SIMULATION:

Le modèle mathématique élaboré dans notre étude, se base surtout sur la connaissance de la fonction caractéristique  $R(X)$ , donc sur la fonction de répartition de la couche polluante  $F(X)$ . Celles-ci représentent la clé de notre travail. Pour cette raison, nous commençons d'abord par déterminer les constantes caractéristiques  $k$  et  $n$ .

Les essais au laboratoire permettent de mesurer les courants de fuite et les longueurs d'arcs sur les surfaces polluées, pour différents niveaux de tensions d'application et éventuellement pour différentes résistivités.

A partir de ces valeurs expérimentales et pour une résistivité donnée, nous déterminons les constantes caractéristiques statiques de l'arc en utilisant le logiciel EUREKA disponible au Laboratoire de Haute Tension de l'ENP.

$X$  et  $R(X)$  peuvent être calculées à partir des équations (5.7) et (5.8):

$$X = \frac{VI^n}{k} \quad (5.18)$$

et

$$R(X) = \frac{k - 100V}{k} \frac{V}{I} \quad (5.19)$$

Connaissant les valeurs de  $X$  et  $R(X)$ , et en utilisant une méthode d'approximation (par exemple la méthode des moindres carrés ou la méthode de Householder), nous pouvons déduire une fonction polynomiale simple telle que:

$$R(X) = C_1 + C_2 X + C_3 X^2 + \dots + C_M X^{M-1} \quad (5.20)$$

où  $C_j$  ( $j = 1, M$ ) représentent les coefficients polynomiaux de  $R(X)$ ,  $X \in [0, L]$ ,  $L$  la longueur totale de fuite de l'isolateur.

Le degré  $T = M - 1$  du polynôme considéré varie progressivement de 1 à  $T_{\max}$  jusqu'à atteindre la plus faible erreur possible (c'est à dire la valeur absolue de la différence entre la valeur réelle et la valeur approchée) qui est de l'ordre de  $10^{-4}$ .

Une fois le polynôme  $R(X)$  (par conséquent  $F(X)$  quand  $\rho$  est uniforme) est déterminé, il devient facile d'estimer la valeur de la longueur critique de l'arc  $X_c$  qui est la solution numérique de l'équation (5.12) en utilisant une méthode itérative. Nous utilisons dans notre cas la méthode

de dichotomie donnant  $X_c$  avec une précision de  $10^{-6}$ . Par la suite, nous évaluons la tension critique  $V_c$ , le courant de fuite critique  $I_c$  et le coefficient de sécurité  $C_s$  pour chaque longueur d'arc  $X$  en utilisant les équations (5.10), (5.15) et (5.17). En variant la résistivité de la couche polluante  $\rho$ , nous pouvons déduire les différentes valeurs de la tension et du courant de fuite, la fonction de répartition  $F(X)$  restant inchangée. Finalement, il est possible d'avoir toutes les caractéristiques décrivant les phénomènes de contournement sur des surfaces isolantes polluées.

Les principales étapes de l'algorithme de simulation sont:

Etape 1: Détermination des constantes caractéristiques  $k$  et  $n$  à partir des valeurs expérimentales de la tension d'essai  $V$ , du courant de fuite  $I$  et de la longueur d'arc  $X$ , à l'aide de la relation (5.7).

Etape 2: Calcul de la fonction caractéristique de la couche polluante  $R(X)$  pour chaque valeur de  $X$  à l'aide de l'expression (5.19).

Etape 3: Détermination des coefficients  $C_j$  ( $j$  variant de 1 à  $M$ ) de la fonction caractéristique à partir des valeurs de  $X$  et  $R(X)$  à l'aide d'une méthode itérative. Le choix de  $M$  correspond à une erreur minimale de modélisation commise sur le calcul de ces coefficients.

Etape 4: Formulation d'un polynôme  $R(X)$  simple et linéaire de degré  $(M-1)$  d'après la relation (5.20).

Etape 5: Déduction du polynôme de la fonction de répartition  $F(X)$  à partir des expressions (5.3) et (5.19), en supposant que la résistivité  $\rho$  est la même en tout point de la surface polluée.

Etape 6: Détermination de la valeur de la longueur critique de l'arc représentant la racine de la relation (5.12).

Etape 7: Evaluation de la tension critique  $V_c$ , du courant de fuite critique  $I_c$ , du produit  $P$ , du produit critique  $P_c$ , et du coefficient de sécurité  $C_s$  d'après les relations (5.10), (5.14), (5.15) et (5.17) respectivement.

Etape 8: Evaluation de la tension d'essai et du courant de fuite pour différentes résistivités (la fonction de  $F(X)$  demeure inchangée).

Etape 9: Exploitation des résultats.

## 5. VALIDATION DE L'ALGORITHME

Avant de procéder à la validation, des essais préliminaires ont été effectués dans le but d'évaluer les valeurs moyennes de la tension de contournement  $V_c$  pour chaque configuration de la pollution et pour différentes conductivités du sable (Tableau 1 et 2). Notons que pour chaque type de pollution, la longueur critique de l'arc  $X_c$  est constante pendant que les valeurs du courant de fuite critique sont différentes.  $I_c$  varie avec la conductivité  $\gamma$  et la tension  $V_c$ .  $X_c$  reste constant quelle que soit la conductivité car elle correspond à la longueur d'arc avant le saut final appelé aussi l'étape ultime, la longueur totale de fuite étant constante.

$\gamma$	$\mu\text{S/cm}$	1	3	6	12	24
$V_c$	kV	28.5	19.1	15.1	12.4	9.9
$I_c$	mA	133	277	440	698	1107
$X_c$	cm	15.3				
$F(X_c)$	$\text{cm}^{-1}$	0.182				

Tableau 1: Valeurs critiques principales dans le cas de la couche continue.

$\gamma$	$\mu\text{S/cm}$	1	3	6	12	24
$V_c$	kV	28.1	19.9	16	12.8	10.3
$I_c$	mA	158	336	539	867	1394
$X_c$	cm	9.8				
$F(X_c)$	$\text{cm}^{-1}$	0.166				

Tableau 2: Valeurs critiques principales dans le cas de la couche discontinue.

En injectant les valeurs expérimentales de la tension appliquée  $V$ , le courant de fuite correspondant  $I$  et de la longueur de l'arc  $X$  dans le programme élaboré, nous déterminons d'abord les constantes caractéristiques de l'arc  $n$  et  $k$ . A titre d'exemple, considérons deux points expérimentaux  $(V_1, X_1, I_1)$  et  $(V_2, X_2, I_2)$ . D'après l'équation (5.18):  $k = \frac{V_1}{X_1} I_1^n$  et

$$k = \frac{V_2}{X_2} I_2^n. \text{ D'où:}$$

$$n = \frac{\ln\left(\frac{V_1 X_2}{V_2 X_1}\right)}{\ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}$$

Connaissant  $n$ , nous pouvons déduire une valeur moyenne de  $k$ . Des valeurs approximatives de  $n$  et  $k$  peuvent être obtenues en utilisant les tableaux 1 et 2. Cependant, afin d'avoir  $n$  et  $k$  avec une bonne précision, nous utilisons les résultats expérimentaux obtenus à partir d'une série d'essais qui seront par la suite traités par la méthode des moindres carés.

Dans notre cas de pollution constituée d'un mélange sable - vapeur d'eau, nous obtenons: (1)  $n = 0.5$  et  $k = 678$  pour une couche de pollution uniforme, et (2)  $n = 0.46$  et  $k = 1215$  pour une couche de pollution discontinue. Ces valeurs sont quelque peu différentes de celles rapportées dans la littérature [5]. Les constantes caractéristiques  $n$  et  $k$  dépendent beaucoup de la nature de l'agent polluant et de la distribution de la couche de pollution comme montré par P.S. Gosh et N. Chatterjee [41].

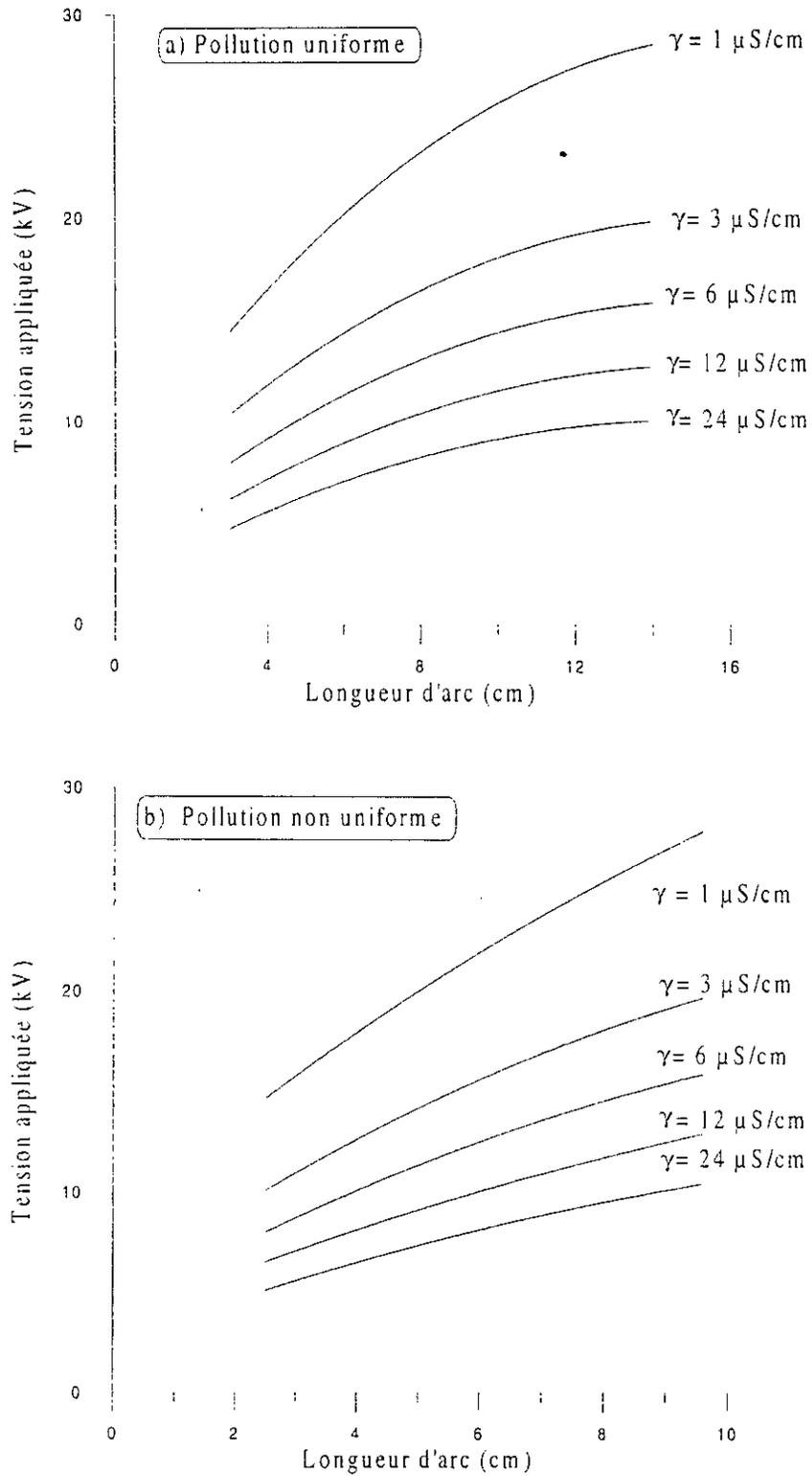


Fig. 5.4 a et b: Caractéristiques simulées tension appliquée - longueur d'arc pour différentes conductivités du sable.

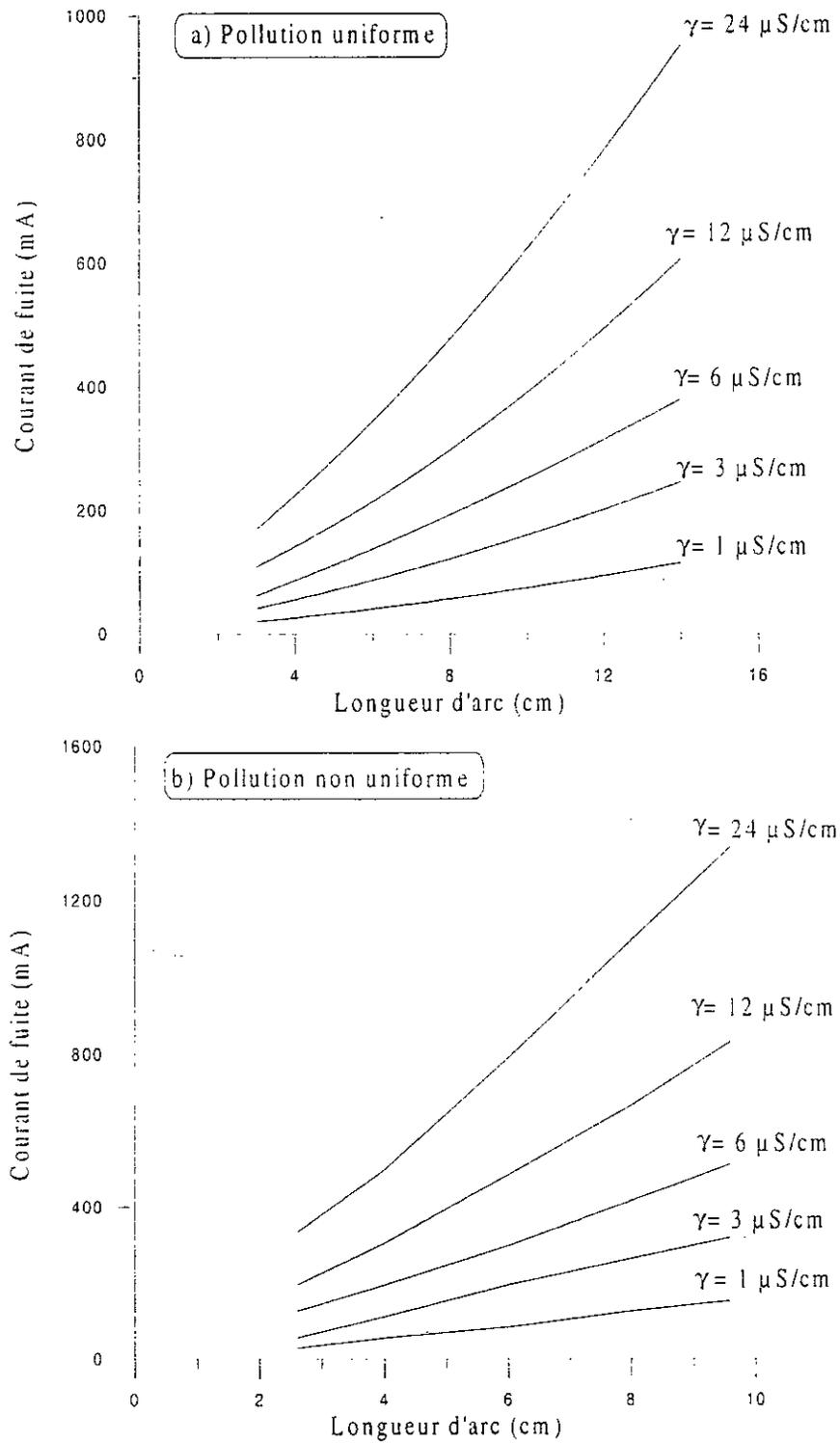


Fig. 5.5 a et b: Caractéristiques simulées courant de fuite - longueur d'arc pour différentes conductivités du sable.

Grâce à cette simulation, nous pouvons déduire les différentes caractéristiques correspondant aux deux configurations de pollution (uniforme et non uniforme), c'est à dire  $V(X)$ ,  $I(X)$ ,  $V/\rho^{n(n+1)}F(X)$ ,  $F(X)$  et  $C_s (P/P_c)$  comme le montrent les figures 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 et 5.8 respectivement pour différentes conductivités de la couche polluante. Ces caractéristiques sont similaires à celles obtenues expérimentalement par d'autres auteurs [5. 12]. Nous observons dans les deux cas de configurations de pollution que le courant de fuite et la longueur de l'arc électrique augmentent avec la tension appliquée (Fig. 5.4 et 5.5). Cependant, le courant de fuite dépend non seulement de la tension appliquée mais aussi de la répartition des couches polluantes.

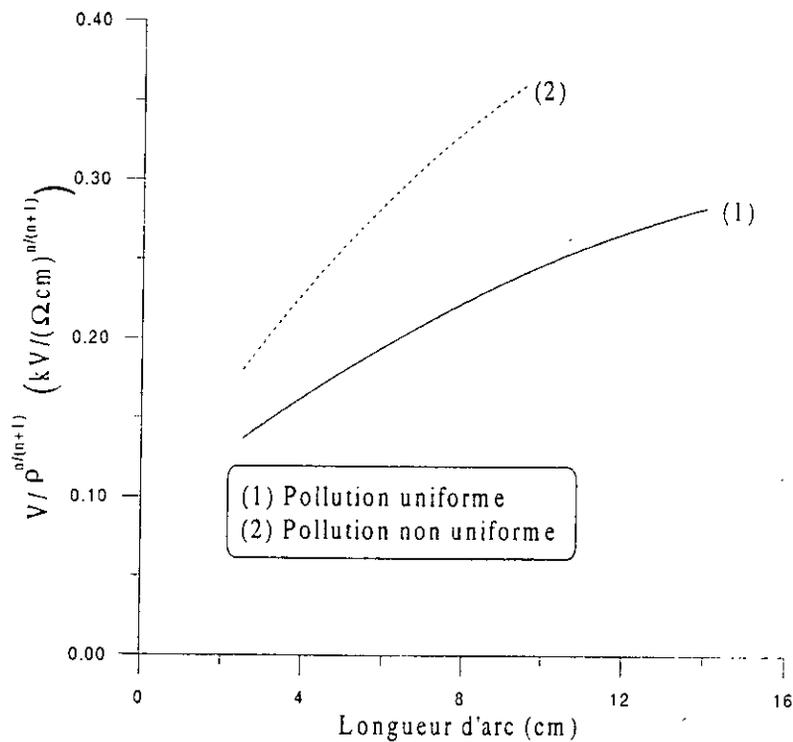
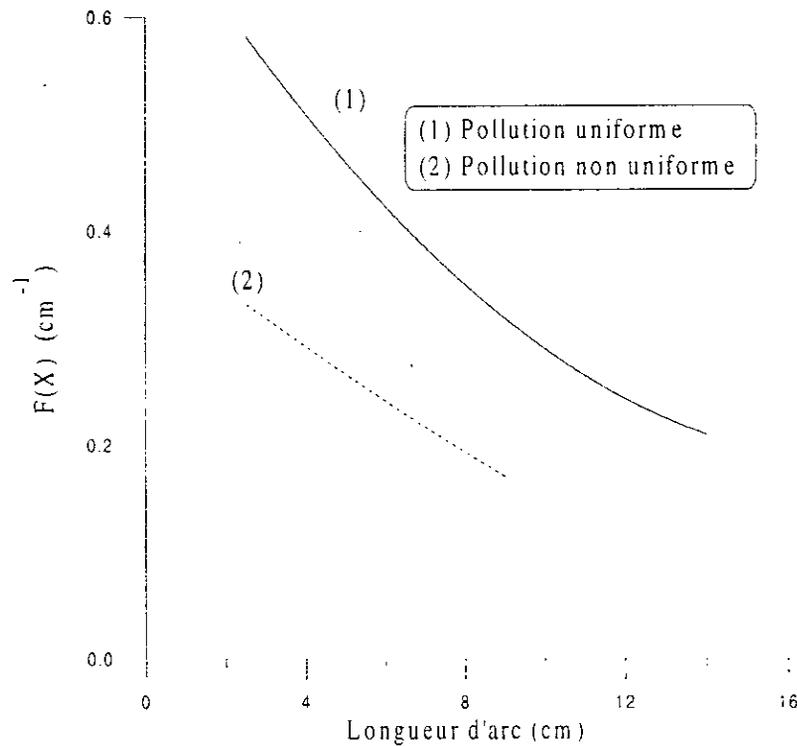


Fig. 5.6: Caractéristiques simulées  $V/\rho^{n(n+1)}(X)$ .

Fig. 5.7: Caractéristiques simulées de la fonction  $F(X)$ .

Pour une tension donnée, la longueur de l'arc est plus importante dans le cas d'une couche de pollution uniforme. Ceci est probablement dû aux zones sèches qui pourraient avoir l'effet de barrières isolantes pour la propagation de l'arc. Un tel effet d'une répartition non uniforme de la couche polluante a été également observé par R. Sundararajan et R.S. Gorur [7]. D'après le modèle proposé, il est évident que lorsque la longueur de l'arc augmente, la résistance  $R(X)$ , et donc la fonction caractéristique  $F(X)$ , de la portion de la surface polluée non court-circuitée par l'arc, entre les électrodes décroît. La propagation de l'arc électrique provoque la diminution de la fonction de répartition (Fig. 5.7). Les fonctions caractéristiques de la couche polluante qui sont équivalentes à celles de la résistance, ont le même aspect quand la résistivité change. Cependant, pour une même longueur d'arc, la résistance  $R(X)$  est plus grande dans le cas d'une répartition non uniforme de la couche polluante. Par ailleurs, le facteur de sécurité peut être évalué uniquement en mesurant le courant de fuite. En effet, pour une tension appliquée donnée  $V$ , la mesure de la valeur maximale du courant de fuite  $I$  permet de calculer le produit  $P$ . Par la suite, en se référant à la caractéristique considérée, nous déduisons la valeur du facteur de sécurité

$V/V_c$ . Ainsi, nous pouvons évaluer l'écart entre la tension appliquée et la tension de contournement sans la connaissance du degré de pollution de l'isolateur (Fig. 5.8).

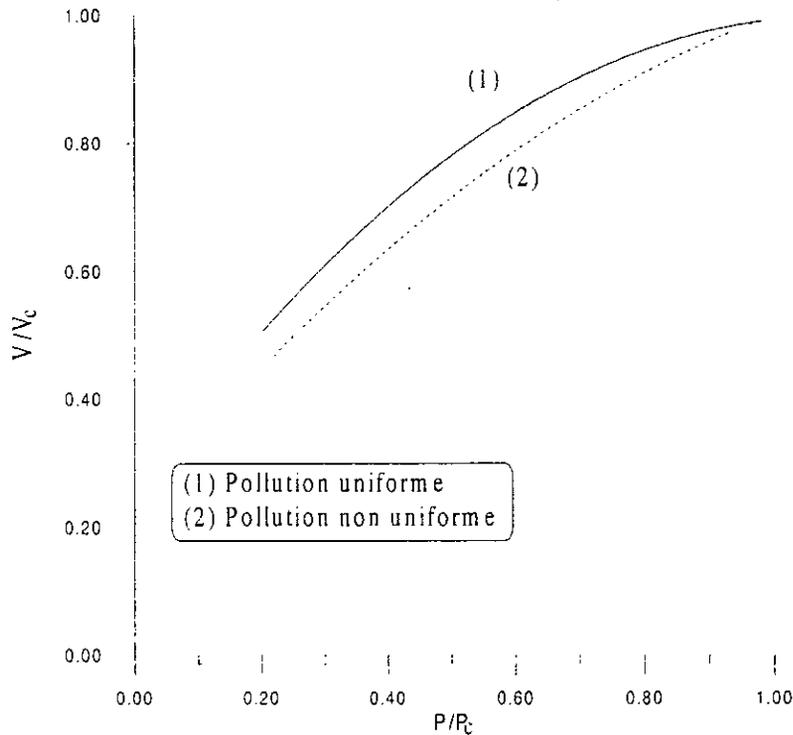


Fig. 5.8: Caractéristiques simulées du facteur de sécurité  $C_s$  en fonction du produit relatif ( $P/P_c$ ).

L'algorithme développé représente un moyen satisfaisant pour le suivi et le contrôle du comportement d'un isolateur haute tension pollué dans un site donné. Nous pouvons l'utiliser pour une configuration quelconque de répartition de la couche polluante (continue ou discontinue), et quelles que soient la conductivité et la nature de l'agent polluant, donc du degré de pollution, considérées.

Comparons les caractéristiques  $V(X)$ ,  $I(X)$  et  $V(I)$  déduites à partir de la simulation à celles trouvées expérimentalement pour un échantillon de sable ayant une conductivité  $\gamma = 1 \mu\text{S/cm}$  (Fig. 5.9, 5.10 et 5.11). Ceci correspond typiquement à la pollution caractérisant la région de Hassi-R'Mel. Chaque point expérimental reporté sur les figures représente une moyenne de cinq mesures. De ces figures il apparaît que les valeurs expérimentales sont très proches de celles obtenues par simulation confirmant ainsi la validité de notre algorithme.

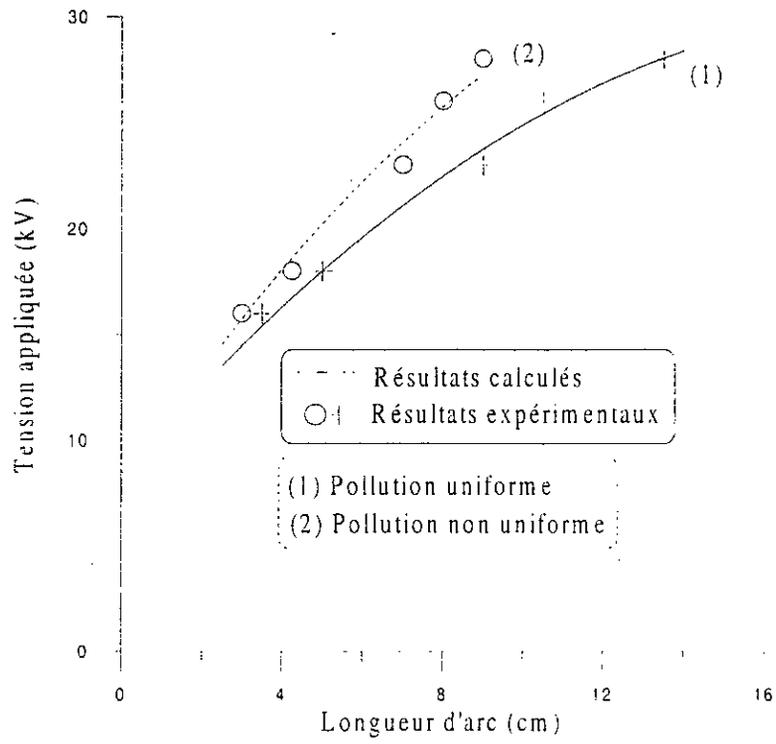


Fig. 5.9: Résultats expérimentaux et caractéristiques simulées de la tension appliquée  $V$  en fonction de la longueur d'arc  $X$ .

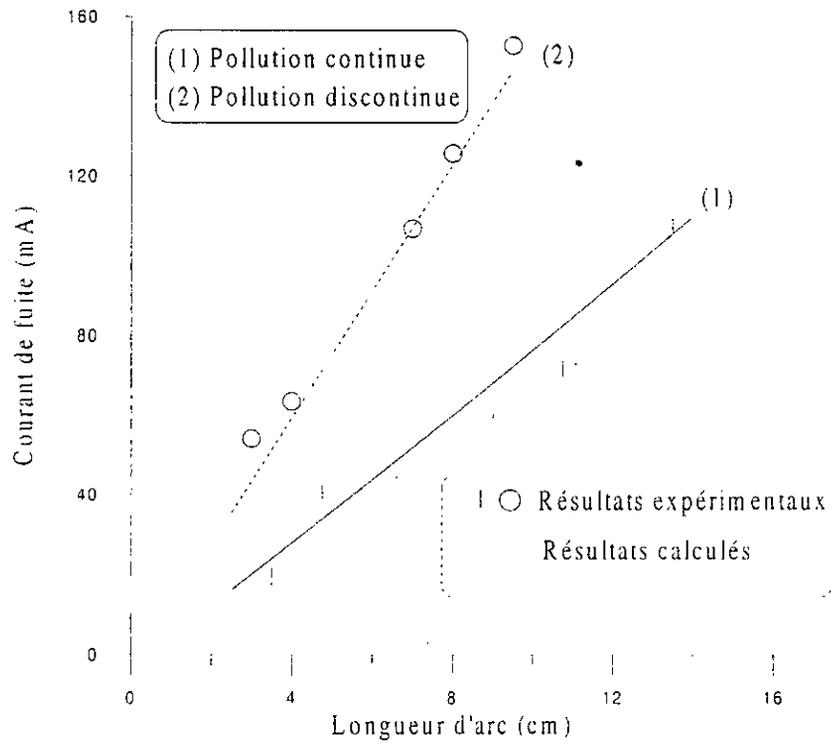


Fig. 5.10: Résultats expérimentaux et caractéristiques simulées du courant de fuite  $I$  en fonction de la longueur d'arc  $X$ .

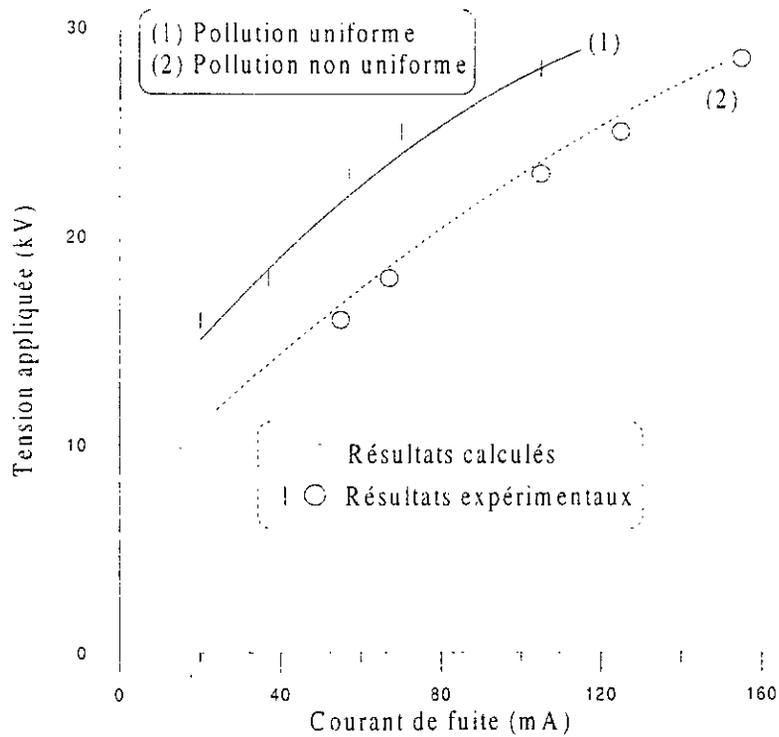


Fig. 5.11: Résultats expérimentaux et caractéristiques simulées du courant de fuite  $I$  en fonction de la tension appliquée  $V$ .

## 6. CONCLUSIONS

Il ressort de ce chapitre qu'il est possible d'élaborer un algorithme qui peut donner différentes caractéristiques de la propagation de la décharge sur des surfaces isolantes polluées jusqu'au contournement total. La connaissance du courant de fuite permet de déterminer le facteur de sécurité. Le fait que les résultats obtenus par simulation sont en bon accord avec ceux obtenus expérimentalement, confirme la validité de notre algorithme. Par conséquent, en extrapolant un tel algorithme à un isolateur réel, il serait possible d'avoir un outil permettant de prévoir d'éventuels incidents qui peuvent être provoqués par des contournements des surfaces isolantes polluées. En effet, en procédant à la mesure permanente du courant de fuite pour un type donné d'isolateur en laboratoire et sur site (en service), et en utilisant la caractéristique  $C_s (P/P_c)$ , il serait possible d'évaluer l'écart entre la tension de service (appliquée) et celle de contournement, sans connaître au préalable le degré de pollution.

## CONCLUSION:

Ce travail nous a permis d'abord de mieux comprendre le mécanisme de contournement des surfaces isolantes polluées.

Après avoir rappelé les principaux modèles statiques et dynamiques rapportés dans la littérature, et discuté leur domaine de validité, nous nous sommes d'abord intéressés au cas de surfaces isolantes complètement polluées (couches continues). L'étude montre que le courant de fuite dans ce cas, est plutôt un courant de conduction. La composante capacitive est négligeable devant la composante résistive.

Pour des niveaux de tensions faibles, une bonne corrélation a été observée entre les résultats expérimentaux et ceux calculés à partir du modèle théorique que nous proposons. Cependant, pour des niveaux de tensions élevés, ce modèle théorique n'est plus valable. En effet, dans ce cas le modèle ne peut plus être assimilé à un système cylindrique concentrique mais tendrait plutôt vers un système pointe - plan. Néanmoins, il constitue un bon moyen permettant de connaître rapidement le courant de fuite et la longueur de l'arc électrique correspondant, pour une configuration donnée d'un isolateur.

L'épaisseur de la couche polluante joue un rôle très important dans l'augmentation du courant de fuite et l'élongation de l'arc électrique. Plus la couche de pollution est épaisse, plus le courant de fuite est important et la longueur de l'arc électrique est grande.

Le cas des couches discontinues reflète mieux l'état réel de surface d'un isolateur pollué en exploitation. Les essais nous ont montré l'importance de la présence d'une bande sèche (propre) et son influence sur le comportement de l'isolateur en général. En effet, elle peut se comporter comme barrière isolante, le courant de fuite est moins important que dans le cas d'une couche continue; dans certaines conditions par contre, elle peut avantager la propagation de l'arc électrique. Une analyse est faite concernant l'effet de la longueur de la bande sèche et sa position par rapport aux électrodes, sur le contournement total de l'isolateur ainsi que sur le courant de fuite et la longueur de l'arc électrique.

Par ailleurs, en se basant sur nos résultats expérimentaux, nous proposons un modèle permettant d'évaluer l'impédance entre les électrodes, la tension transférée sur la bande sèche d'un isolateur pollué et le courant de fuite correspondant. La tension transférée sur la bande sèche et le courant de fuite correspondant déduits de cette impédance sont en bon accord avec les résultats expérimentaux tant que la répartition du potentiel le long de la bande sèche reste uniforme, c'est à dire que la bande sèche préserve ses propriétés isolantes. Ainsi, l'impédance

peut constituer un moyen utile permettant d'apprécier la sévérité de pollution et de prévoir un éventuel contournement de l'isolateur.

Un algorithme de calcul permettant d'obtenir les différents paramètres caractérisant la propagation de la décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées jusqu'au contournement est proposé. Nous avons montré qu'à l'aide de mesures préliminaires du courant de fuite, nous pouvons obtenir les différentes grandeurs critiques et particulièrement le facteur de sécurité. Les résultats calculés sont très proches de ceux obtenus expérimentalement.

Enfin, les deux modèles que nous avons établi, gagneraient à être étendus à des configurations plus complexes particulièrement celles concernant le cas critique (système pointe - plan).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## Références:

- [1] J. Danis, "A Stochastic Pollution Flashover Model", 4<sup>e</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46-12, Athènes, 5-9 Septembre 1983.
- [2] F. Obenaus, "Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge", Deutsche Elektrotechnik, vol.4,1958, p.135-136.
- [3] H. Zhang and R. Hackam, "Electrical Surface Resistance, Hydrophobicity and Diffusion Phenomena in PVC", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 6, N° 1, pp. 73 - 83, February 1999.
- [4] H. Matsuo, T. Fujishima, T. Yamashita and K. Hatase, "Relation between Leakage Impedance and Equivalent Salt Deposit Density on an Insulator under a Saltwater Spray", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 6, N° 1, pp. 117 - 121, February 1999.
- [5] L.L. Alston, S. Zoledziowski, "Growth of Discharges on Polluted Insulators" IEEE, Trans.PAS, Vol. 110, N° 7, Juillet 1963, p. 1260 - 1266.
- [6] A. Cimador, S. Vitet, " La Pollution des Isolateurs ", EDF-Epure, No 27, Juillet 1990.
- [7] R. Sundararajan and R.S. Gorur, "Dynamic Arc Modelling of Pollution Flashover of Insulators under DC Voltage", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 28, pp. 209-219, April 1993.
- [8] N. Dhabbi - Megriche, A. Beroual and L. Krahenbuhl, "A New Proposal Model for Polluted Insulators Flashover". Journal of Physics D: Applied Physics, (30), N° 5, March 1997, pp. 889 - 894.
- [9] F. Rizk, "Mathematical Models for Pollution Flashover", Electra, Vol. 78, pp. 71-103, 1981.
- [10] M.A.B. EL Koshairy et F.A.M. Rizk, "Comportement des Isolateurs des Lignes de Transport à Très Haute Tension dans les Conditions de Pollution Désertiques", CIGRE, Rapport 33-05, Paris 1970.
- [11] M.A.B. EL Koshairy, E. El Sharkaoui, M.M. Awad, H.E.M. Zarzoura, M.M. Khalifa et A. Nosseir, " Performance de Chaînes d'Isolateurs Haute Tension Soumises à la Pollution du Désert". CIGRE, Rapport.33-09, Paris 1982.
- [12] P. Claverie, Y. Porcheron, " Les Phénomènes de Pollution des Isolateurs et l'Isolément des Ouvrages en Régions Polluées". RGE, Tome 82, N°3, pp. 166-194, Mars 1973.
- [13] A. Mekhaldi, "Etude du Développement d'un Arc Electrique sur des Surfaces Isolantes Contaminées par la Pollution Désertique", thèse de Magister, ENP, Alger, Juin 1990.
- [14] C. Huraux, A.M. Rahal, "Le Contournement des Isolateurs Haute Tension Approché à l'aide d'un Modèle de Laboratoire". RGE, Tome 84, N°6, pp. 425-429, Juin 1975.

[15] A. Cimador, M. Cojan, P. Hautefeuille, M. Moreau, "Méthodes de Dimensionnement des Isolateurs de Lignes Aériennes en Régions Polluées" CIGRE, rapport 33-04, 1978.

[16] W. Heise, M.P. Verma, H. Niklash, H. Lipken, H. Schreiber, G.F. Luxa, "Critères de Contournement par Pollution et ses Applications pour le Dimensionnement et le Contrôle de l'Isolation". CIGRE, Rapport 33-09, Paris 1978.

[17] P.J. Lambeth, H. Auxel, M.P. Verma, "Méthode de Mesure de la Sévérité de la Pollution compte tenu de son Influence sur le Comportement des Isolateurs à Haute Tension", Electra N°20, Janvier 1972.

[18] Publication IEC 71-2, "Insulation Coordination, Application Guide", Seconde Edition, 1976.

[19] CIGRE, Groupe de Travail du Comité d'Etudes, N° 33, "Mesure de la Sévérité de Pollution des Sites et Application au Dimensionnement des Isolateurs pour les Réseaux à Courant Alternatif", Electra, N° 64, Mai 1979.

[20] Groupe d'Action 33-04-03 "Dispositifs de Surveillance des Isolateurs soumis à la Pollution", Electra, N° 152, Février 1994, p.78-90.

[21] R. Kostaluk, W. Czaplak, R. Kucharski "Mesures de Pollution, Essais d'Isolateurs Pollués, Choix des Isolateurs", CIGRE, rapport 33-07, 1978.

[22] CEI 60-1, "Techniques des Essais à Haute Tension", Définitions et Prescriptions Générales relatives aux Essais, Deuxième Edition, 1989.

[23] Arnaldo G.Kanashiro, Geraldo F.Burani "Leakage Current Monitoring of Insulators Exposed to Marine and Industrial Pollution" IEEE-ISEI, Montréal, Québec, Canada, 16-19 juin 1996, p.271-274.

[24] Norme polonaise P.N.71/E-04405, " Matériaux Isolants Solides - Mesure de Résistance Electrique", Varsovie 1971.

[25] P.J. Lambeth, J.S.T. Looms, M. Sforzini, C. Malaguti, "Recherches Internationales sur la Pollution des Isolateurs", CIGRE, Rapport 33-02, Paris 1970.

[26] J. Safarna, R. Kosztaluk, "Essais d'Isolateurs de Lignes sur Stands de Pollution Naturelle", Proc.IEE, Vol.111, N°5, pp. 985-990, 1964.

[27] M. Khalifa, M. Abou-Seada, H. El-Ghazaly "Laboratory Simulation of Desert Pollution Flashover of High Voltage Insulators", 4<sup>e</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46-03, Athènes, 5-9 Septembre 1983.

[28] B.F.Hampton, "Flashover Mechanism of Polluted Insulation", Proc.PIEE, vol.111, N°5, pp.985-990, Juillet 1964.

- [29] W. Heise, G.F. Luxa, G. Revery, M.P. Verma, " Estimation de la Méthode d'Essai sous Pollution Artificielle par Couche Solide.", CIGRE, Rapport 33-09 1972.
- [30] A. Boubakeur, "Essais d'Isolateurs Pollués dans les Conditions Naturelles", -Rapport Interne, I.W.N. Politechnika Warszawska, Varsovie 1978.
- [31] C.H.A.Ely, P.J.Lambeth, J.S.T. Looms, D.A.Swift, C.E.G.B "Contournement des polymères humides et pollués: l'ailette BOOSTER" CIGRE, Rapport 15-02, 1978.
- [32] S. Flazi, "Etude du Contournement Electrique des Isolateurs Haute Tension Pollués, Critère d'Elongation de la Décharge et Dynamique du Phénomène", Doctorat d'Etat-Sciences de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1987.
- [33] F.W. Crawford and H. Edels, "The Reignition Voltage Characteristics of Freely Recovering", Proc. IEE, Vol.107, pp. 202 - 212, April, 1960.
- [34] H. Edels, " Arc Interruption and Thermal Reignition", Proc. IEE, Vol. 109, pp. 89 - 98, Feb., 1962.
- [35] R. Wilkins, "Flashover Voltage of High Voltage Insulators with Uniform Surface Pollution Films", Proc. IEE, Vol. 116. No3, pp. 457-465, Mars 1969.
- [36] P. Claverie, "Predetermination of the Behaviour of Polluted Insulators", IEEE Trans. PAS, Vol. 90, N° 4, pp. 1902 - 1908, Juillet 1971.
- [37] P. Claverie and Y. Porcheron, "How to Choose Insulators for Polluted Areas", IEEE Trans. PAS, Vol. 92, N° 3, pp. 1121 - 1131, 1973.
- [38] A.M. Rahal, C. Huraux, "Flashover of High Voltage Insulators", IEEE Trans., Vol.Pas-98, N°6, pp. 2223-2231, 1979.
- [39] P.S. Gosh, S. Chakravorti and N. Chatterjee, "Estimation of Time to Flashover Characteristics of Contaminated Electrolytic Surfaces Using a Neural Network", IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul., Vol. 2, N° 6, pp. 1064-1076. December 1995.
- [40] H. Boehme, F. Obenaus, "Pollution Flashover Tests on Insulators in Laboratory and in Systems and Model Concept of Creepage Path Flashover", Cigre, 1485.11, paper N° 406, June 1966.
- [41] P.S. Gosh and N. Chatterjee, "Polluted Insulator Flashover Model for AC Voltage", IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul., Vol. 2, N° 1, pp. 128-136, February 1995.
- [42] G. Neumärker, "Verschmutzungszustand und Kriechweg", Monatsber. d. Deut. Akad, Wiss., Berlin, vol.1,1959, p.352-359.
- [43] S. Hesketh, "General criterion for the prédiction of pollution flashover", Proc.IEE, Vol.114, N° 4, Avril 1967, p.531-532.

- [44] H.H. Woodson, A.J. Mc Elroy, "Insulators with Contaminated Surface, Part II, Modeling of Discharge Mechanisms", IEEE, Trans.PAS, Vol.89, No8, Nov-Dec 1970, p.1858-1867.
- [45] H. Nacke, "Lichtbogen festigkeit und kriechstrom festigkeit von isolier stoffen", Dissertation, University of Berlin-Charlottenburg, 1962.
- [46] H. Nacke, "Stabilitat der Fremdschichtentladungen und Theorie des Fremdschichtuberschlags", ETZ-A, N°16, pp. 577-585, 1966.
- [47] S. Gopal and Y. Narayana Rao, "On the Flashover Mechanisms of Polluted Insulators", ISPPISD, IIT-, MADRAS, Inde, pp. 1-6, 1983.
- [48] M.D. Mahi, "Dynamique de l'Allongement sur une Surface Faiblement Conductrice d'une Décharge Electrique Alimentée en Courant Alternatif", Thèse es Science de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1986.
- [49] R.Wilkins, A.A.J. Al-Baghdadi, "Arc Propagation along an Electrolyte Surface", Proc.IEE, vol.118, N° 12, Décembre 1971, p.1886-1892.
- [50] S. Anjana and C.S. Lakshminarasmha, "Computed of Flashover Voltages of Polluted Insulators using Dynamic Arc Model", 6<sup>th</sup> International Symposium on high voltage Engineering, paper 30-09, New Orleans, USA, 1989.
- [51] F.A.M. Rizk and D.H. Nguyen, "Digital Simulation of Source Insulator Interaction in HVDC Pollution Tests", IEEE Trans. on Power Delivery, pp. 405-410, 1988.
- [52] O. Mayr, "Beitrag zur Theorie der Statischen und der Dynamishchen Litchbogens", Arch. f. Electrotechnik, Vol. 37, pp. 588-608, 1943.
- [53] F.A.M. Rizk, "Application of Dimensional Analysis to Flashover Characteristics of Polluted Insulators", Proc. IEE, Vol. 117, pp. 2257-2260, 1970.
- [54] R. Sundararajan and R.S. Gorur, "Computer Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Conditions", IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul., Vol. 2, N°1, pp. 121-127, February 1995.
- [55] N. Dhahbi - Megriche and A. Beroual, "Evaluation of Polluted Insulators Flashover Voltage for Different Waveforms Using an Equivalent Electrical Network Model", 11<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, London, UK, 1999.
- [56] S. Zoledziowski, "Discussion Contribution", Proc. IEE, Vol.111, N°9, pp. 1589-1592, 1964.

- [57] O. Takenouchi, T. Yamashita, K.K. Ooishi, T. Fujishima and H. Matsuo, "Propagation Characteristics of Local Discharge on an Electrolytic Surface", 9<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, paper 32-14, Graz, Autriche, 1995.
- [58] E.H.A.M. Rahal, "Sur les Mécanismes Physiques du Contournement des Isolateurs Haute Tension", Thèse Sciences Physiques, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1979.
- [59] A. Beroual, "Electronic and Gaseous Processes in the Breakdown Phenomena of Dielectric Liquids", Journal of Applied Physics 73(9), pp. 4528 - 4533, May, 1993.
- [60] J. Fofana and A. Beroual, "A New Proposal for Calculation of the Leader Velocity based on Energy Considerations", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 29, pp. 691 - 696, 1996.
- [61] N. Dhahbi, "Modélisation Dynamique des Décharges sur les Surfaces d'Isolateurs Pollués sous Différentes Formes de Tensions: Elaboration d'un Critère Analytique de Propagation", Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, France, 1998.
- [62] José Pissalto Filho, "Analyse du Contournement d'une Surface Faiblement Conductrice par une Décharge Electrique Alimentée en Courant Continu", Thèse Sciences Physiques, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1986.
- [63] G. Pyrène and A.M. Rahal, C. Huraux, "Flashover of a Liquid Conducting Film, Part 2: Time to Flashover-Mechanisms", IEEE Trans.on Elect. Insul., Vol.17, N° 1, pp. 10-19, 1982.
- [64] Z. Renyu and G. Zhicheng, "A Study on the Difference between the Flashover Voltages of Contaminated Insulators under AC and DC Voltages", IEEE Trans., pp. 332-334, 1985.
- [65] T.C. Chen, H.I.M. Nour and C.Y. Wu, "DC Interfacial Breakdown on Contaminated Electrolytic Surfaces", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 19, N° 6, pp. 536-542, December 1984.
- [66] D.A. Swift, "Flashover of Polluted Insulators: Electric Field in the Arc", 6<sup>th</sup> 9<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, paper 30-10, New Orleans, Sep. 1989.
- [67] R. Matsuoka, K. Kondo, K. Naito and M. Ishii, "Influence of Non Soluble Contaminants on the Flashover Voltage of Artificially Contaminated Insulators", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, N° 1, January, 1996.
- [68] Michel Pollentes, "Sur l'Utilisation de Modèles de Laboratoire pour l'Etude de la Tenue au Contournement des Isolateurs Pollués", Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1996.
- [69] T.C. Chen and H.I.M. Nour, "A Study on the Profile of HVDC Insulators", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 24, N° 1, pp. 113-117, February 1989.

- [70] R. Sundararajun and R.S. Gorur, "Role of Non Soluble Contaminants on the Flashover Voltage of Porcelain Insulators", IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., Vol. 3, N° 1, Feb., 1996.
- [71] Peter Zmajkovic, "Modélisation du Contournement Electrique et Validation Expérimentale du Mécanisme proposé pour l'Extension de la Décharge", Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1996.
- [72] W. Reider, "Plasma und Lichtbogen", Vieweg Verlag, Braunschweig, pp. 128 - 132, 1967.
- [73] R. Matsuoka, H. Shinokuba, K. Kondo, Y. Mizuno, K. Naito, T. Fujimura and T. Terada, "Assessment of Basic Contamination Withstand Voltage Characteristics of Polymer Insulators", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, N° 4, pp. 1895-1900, October 1996.
- [74] O.E. Gouda and A.El-Mershedy, "Factors Affecting the Dry Band Formation on Energized Polluted Insulators", 5<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, Allemagne, paper 52-08, 1987.
- [75] S. Gopal and Y.N. Rao, "Initiation and Growth of Dry Band on Polluted Insulator Surfaces", 5<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig, Allemagne, paper 52-07, 1987.
- [76] B.C. Gellert, J.K. Rasmussen et al, "Finite Element Modelling of Dry Zone Formation on Polluted Out door HV Insulators", 6<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, paper 24-07, New Orleans, USA, 1989.
- [77] A. Mekhaldi and S. Bouazabia, "Conduction Phenomena on Polluted Insulating Surfaces under AC High Voltages", 9<sup>th</sup> International Symposium of High Voltage, paper N° 3174, Graz, Autriche, 1995.
- [78] A. Mekhaldi, S. Bouazabia, A. Beroual, "Electrical Arc Inception and Propagation Phenomena on Polluted Insulating Surfaces under AC High Voltage", Archives of Electrical Engineering, Vol. XLVII, N° 3, pp. 255 - 269, 1998.
- [79] S. Bouazabia et A. Mekhaldi, "Etude du Courant de Fuite sur les Isolants Pollués", Special Issue of AJOT, Proceedings of 2nd CEA Algiers, Nov. 29 - 30 1994/ Vol. 1.
- [80] A. Mekhaldi, S. Bouazabia et A. Beroual "Phénomène de Conduction sur des Surfaces Polluées. Approche par un Modèle Théorique". Deuxième Conférence Nationale sur la Haute Tension, Tizi - Ouzou, Algérie. 17, 18 et 19 Novembre 1997.
- [81] D. Perin, A. Pignini, A. Porrino and I. Visintainer, "Flashover in HVDC Bushings under Non Uniform Rain", 9<sup>th</sup> International Symposium of High Voltage Engineering, paper N° 3204, Graz, Autriche, 1995.

- [82] F.A.M. Rizk and Sherif I. Kamel, "Modelling of HVDC Wall Bushing Flashover in Non Uniform Rain", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, N° 4, pp. 1650 - 1662, 1991.
- [83] J.P. Holtzhausen, "The Relationship between the Parameters affecting the AC Pollution Performance of a Cylindrical Insulator", 9<sup>th</sup> International Symposium of High Voltage Engineering, paper N° 3223, Graz, Autriche, 1995.
- [84] K. Kupfmuller, "Electricité Théorique et Appliquée", Dunod, Paris, 1959.
- [85] D. Namane, A. Mekhaldi et S. Bouazabia, "Influence de la Largeur de la Couche de Pollution sur le Courant de Fuite des Isolateurs", Deuxième Conférence Nationale sur la Haute Tension, Tizi - Ouzou, Algérie, 17, 18 et 19 Novembre 1997.
- [86] S. Bouazabia, D. Namane et A. Mekhaldi, "Effet de la Discontinuité de la Couche Polluante sur les Phénomènes de Conduction Surfacique sur les Isolateurs de Haute Tension", 17<sup>ème</sup> Journées Tunisiennes d'Electrotechnique et d'Automatique, 5, 6 Novembre 1997, Nabeul - Tunisie.
- [87] D. Namane, A. Mekhaldi et S. Bouazabia, "Influence de la Discontinuité de la Couche Polluante sur la Tension de Contournement d'un Isolateur", 3<sup>ème</sup> Conférence Maghrébine d'Automatique, d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle (COMAEI), Bejaia, 8, 9 Dec. 1998.
- [88] M. Farzaneh, X. Chen, J. Zhang, "The Influence of Applied Voltage on the Surface of Atmospheric Ice deposited on Insulating Surfaces", IEEE, ISEI, Montreal, Québec, Canada, 16 - 19 Juin 1996.
- [89] M.N. Rayes, M. Zhirh, "Investigation about Flashover Performance of Insulators under Uniform and Non Uniform Contamination", 7<sup>th</sup> International Symposium of High Voltage Engineering, Paper N° 43 - 08, Dresden, Germany, 26 - 30 August 1991.
- [90] M. Farzaneh, "Effects of the Thickness of Ice and Voltage Polarity on Flashover Voltage of Ice - Covered High Voltage Insulators", 7<sup>th</sup> International Symposium of High Voltage Engineering, Paper N° 43 - 10. Dresden, Germany, 26 - 30 August 1991.
- [91] A. Mekhaldi, D. Namane, S. Bouazabia and A. Beroual, "Flashover of Discontinuous Pollution Layer on High Voltage Insulators" IEEE. Trans. Elect. Insul. (to be appeared).
- [92] A. Mekhaldi, D. Namane, S. Bouazabia and A. Beroual, "Empirical model of a high voltage insulator under nonuniform pollution ", 11<sup>th</sup> International Symposium of High Voltage, London, UK, 1999.
- [93] A. Mekhaldi, M. Tegar, A. Beroual, "Algorithm for Pollution Flashover Calculations", Archives of Electrical Engineering, Vol. XLV, N° 4, pp. 385 - 397, 1996.

[94] A. Mekhaldi , M. Tegar et A. Beroual, "Etude Mathématique du Développement de l'Arc Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées", 1<sup>st</sup> Conférence on Modelling and Simulation of Electrical Systems, Guelma, Algérie, 07 - 08 Nov. 1995.

[95] A. Mekhaldi et A. Boubakeur, "Modèle de Contournement d'Isolateurs Pollués dans les Conditions Désertiques du Sahara Algérien", 14<sup>èmes</sup> Journées Tunisiennes d'Electrotechnique et d'Automatique, 5-6-7 Novembre 1994, Hammamet - Tunisie.

[96] A. Mekhaldi et A. Boubakeur. "Méthodes d'Essais à Tension Alternative des Isolateurs Pollués dans les Conditions Naturelles au Sahara Algérien", 1<sup>er</sup> Colloque sur l'Electrotechnique et l'Automatique, 8-9 Mai 1990, Alger, Algérie.