



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
D'ALGER

DEPARTEMENT de GENIE ELECTRIQUE  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique  
Laboratoire de Haute Tension

Mémoire de Magister

Spécialité : Génie Electrique

Option : Réseaux Electriques et Haute Tension

Présenté par

M'HAMDI Ben alia

Ingénieur d'Etat en Génie Electrique (Electrotechnique)

Université de Sidi Belabes

Thème

---

---

MODELISATION D'UN ISOLATEUR NATURELLEMENT POLLUE SOUS  
TENSION IMPULSIONNELLE UTILISANT DES CIRCUITS ELECTRIQUES  
EQUIVALENTS

---

---

Rapporteur: M<sup>r</sup> : M.TEGUAR

Maitre de conférences à l'ENP

2007/2008

10, Avenue Hassen Badi, BP 182, El-Harrach, Alger, Algérie.

## Remerciements

Le présent travail a été effectué sous la direction scientifique de monsieur M. Tegar, Maître de conférence à l' Ecole Nationale Polytechnique. Qu'il me soit permis de lui exprimer mes vifs sentiments de gratitude, pour son soutien, ses directives et ses conseils combien utiles ainsi que pour sa disponibilité et ses qualités humaines.

Je remercie monsieur A. Boubakeur Professeur à l' Ecole Nationale Polytechnique, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de juger ce travail et de présider le jury.

Je remercie également monsieur A. Mekhaldi Professeur à l' Ecole Nationale Polytechnique, pour ses conseils, ses encouragements et ses qualités humaines.

Je tiens à remercier madame D. Namane chargée de cours à l' Ecole Nationale Polytechnique et monsieur R. Tahmi Maître de conférence à l' Ecole Nationale Polytechnique, qui ont aimablement accepté d'examiner mon travail et de faire partie du jury de soutenance.

Je ne saurais oublier de manifester toute ma profonde reconnaissance à monsieur Guia Tallal, ainsi à tous mes collègues du laboratoire Haute Tension pour l'ambiance et la solidarité tout au long de nos études de PG.

je n'oublie pas mes parents, mes frères et sœurs, ma femme et mes enfants sans qui je n'aurais pas eu la force d'arriver à terminer mes études et présenter ce travail.

## ملخص:

بالاعتماد على دارة كهربائية مكافئة و باستعمال القوانين الفيزيائية، يعرض عملنا هذا نموذجاً ساكناً يتنبأ بتصريف عازل ملوث طبيعياً تحت توتر نبضي. يسمح هذا النموذج بحساب تيار التسرب مع الأخذ بعين الاعتبار تأثير بعض العوامل المتمثلة في عرض شريط التلوث، قطبية التوتر العالي و قيمة التوتر. نناقش النتائج الرقمية المحصل عليها بمقارنتها مع نتائج التجارب المحررة من قبل باحثين آخرين.

الكلمات المفتاحية: عازل - تلوث - إحاطة - نموذج ساكن - تيار التسرب - توتر نبضي.

## Résumé :

En se basant sur un circuit électrique équivalent et utilisant des lois physiques, notre travail présente un modèle statique permettant de prédire le comportement d'un isolateur naturellement pollué, soumis à une tension impulsionnelle (choc de foudre). Ce modèle permet d'évaluer le courant de fuite en tenant compte de l'influence de certains paramètres, à savoir, la largeur de la pollution, la polarité de l'électrode active et l'amplitude de la tension appliquée. Les résultats de simulation ainsi obtenus sont comparés à ceux obtenus expérimentalement par d'autres auteurs.

**Mots clés :** isolateur – pollution – contournement – modèle statique – courant de fuite – tension impulsionnelle.

## Abstract:

Basing on an equivalent electrical circuit and using physical laws, our work presents a static model allowing to predict the behaviour of polluted insulator under impulsion voltage. This model permits to evaluate the leakage current taking into account some of parameters such as the width of the layer of pollution, the potential amplitude and the active electrode polarities. The simulation results so obtained are compared to experimental ones reported by other authors.

**Key words:** insulator – pollution – static model – discharge current – propagation – impulsion voltage – leakage current.

# Sommaire

Introduction générale	1
<b>Chapitre I</b>	
<b>phénomène de pollution</b>	
I.1 Introduction	4
I.2 Formation des couches polluantes sur les isolateurs	5
I.3 Sources de pollution	5
I.3.1 Pollution naturelle	5
I.3.1.1 Pollution marine	5
I.3.1.2 Pollution désertique	6
I.3.1.3 Autre type de Pollution naturelle	6
I.3.2 Pollution industrielle	6
I.3.3 Pollution mixte	6
I.4 Conséquences de la pollution	7
I.4.1 Arc non localisé	7
I.4.2 Arc fixe	7
I.4.3 Contournement des isolateurs pollués	7
I.5 Sévérité de pollution d'un site	8
I.5.1 Classification des sites pollués	9
I.5.2 Méthodes de mesures de la sévérité d'un site	9
I.5.2.1 Densité de dépôt de sel équivalent (DDSE)	10
I.5.2.2 Conductance superficielle	10
I.5.2.3 Courant de fuite	10
I.5.2.3.1 Comptages d'impulsions	11
I.5.2.3.2 Courant de fuite de la plus forte crête ( $I_{fc}$ )	11
I.5.2.4 Contrainte du contournement	11
I.5.2.5 Mesure de la pollution de l'air	12
I.5.2.6 Mesures optiques	12
I.5.2.7 Densité de dépôt non soluble (DDNS)	13
I.5.2.8 Autres méthodes	13
I.6 Méthodes d'essais sous pollution	13
I.6.1 Essais sous pollution naturelle	13
I.6.2 Essais sous pollution artificielle	14
a- Méthode de la couche solide	14
b- Méthode de brouillard salin	14
c- Méthode de la chambre de poussière	15
I.6.3 Critiques de ces méthodes d'essais	15
I.7 Techniques de lutte contre la pollution	15
I.7.1 Allongement de la ligne de fuite	16
I.7.2 Graissage des surfaces des isolateurs	16
I.7.3 Lavage des isolateurs	17
I.7.4 Isolateurs plats	17
I.7.5 Revêtement silicone	17
I.7.6 Les isolateurs composites	17
I.8 Conclusion	18

# Chapitre II

## Modèles de contournement

II.1	Introduction	19
II.2	Modèles statiques de contournement	19
II.2.1	Modèle d'Obenaus	19
II.2.2	Modèle de Neumarker	21
II.2.3	Modèle de Rizk	22
II.2.4	Modèle de Claverie et Porcheron	23
II.2.5	Modèle de Rao et Gopal	23
II.2.6	Modèle d'Alston et Zoledziowski	24
II.2.7	Modèle de J.Danis	24
II.2.8	Modèle de Nacke et Wilkins	26
II.2.9	Modèle de la couche mixte	28
II.2.10	Modèle de Woodson et Mc Elory	29
II.2.11	Modèles de Tegar	30
	a / Cas de pollution continue	30
	b / Cas de pollution discontinue	30
II.2.12	Modèle de D. Namane, A. Mekhaldi et S.Bouazabia	32
II.3	Modélisation dynamique de l'arc	33
II.3.1	Mécanisme de propagation	34
II.3.1.1	Propagation par ionisation	34
II.3.1.2	Propagation par force électrostatique	34
II.3.1.3	Critique des Mécanisme de propagation	35
II.3.2.1	Critère de propagation de la décharge	35
II.3.2.2	critère de Hampton	35
II.3.2.3	Critère de Hesketh	35
II.3.2.4	Critère de Wilkins	36
II.3.2.5	Critère de Anjana et Lakshminarasimha	36
II.3.2.6	Critère de Dhahbi, Beroual et Krahenbul	36
II.3.3.1	Modèle de Rizk	37
II.3.3.2	Modèle de Anjana et Lakshminarasimha	37
II.3.3.3	Modèle de Sundararajan et Gorur	38
II.3.3.4	Modèle de N. Dhahbi et A. Beroual	39
II.4	Vitesse de propagation	40
II.4.1	Modèle de Zoledziowski	40
II.4.2	Modèle de Matsuo et El- Baghdadi	40
II.4.3	Modèle de Rahal	41
II.4.4	Modèle de A. Beroual	41
II.4.5	Modèle de Tegar	42
II.5	Conclusion	43



# Introduction Générale

## Introduction

*Le transport de l'énergie électrique entre le producteur et le consommateur s'effectue généralement par le biais de lignes aériennes en haute et très haute tension. Traversant ainsi des régions diverses (littoral, désert, concentrations urbaines et industrielles,...), ces lignes sont alors exposées à plusieurs contraintes. Parmi celles-ci, on distingue la pollution des isolateurs qui constitue un des facteurs de première importance affectant la qualité et la fiabilité du transport d'énergie.*

*Placés dans leur environnement naturel, les isolateurs ne tardent pas à se recouvrir de différents types de pollution d'origine naturelle, industrielle ou mixte. Cette dernière représente la forme de pollution la plus sévère, car elle résulte de l'association d'une pollution naturelle et d'une ou plusieurs pollutions industrielles. En effet, le type de pollution dépend en grande partie de la localisation géographique de l'ouvrage électrique (ligne ou poste).*

*A l'état sec, la pollution pose généralement peu de problèmes. Cependant, quand elle est humide, elle provoque la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique à la surface des isolateurs, réduisant ainsi leur rigidité diélectrique. Des courants de fuite prennent alors naissance sur ces mêmes surfaces, provoquant par effet Joule des échauffements locaux, et par la suite l'assèchement progressif de la couche de pollution. Ainsi, la répartition du potentiel est modifiée d'une façon significative, et des arcs partiels peuvent apparaître, et évoluer jusqu'au contournement total de l'isolateur.*

*De nombreux problèmes sont enregistrés sur les lignes aériennes par temps humide même en l'absence de surtensions. Un bon choix de dimensionnement des isolateurs s'avère, par conséquent, indispensable afin d'assurer la fiabilité et la qualité de l'isolement en haute tension. Pour cela, il est impératif de connaître réellement les mécanismes conduisant au contournement sous pollution.*

*En raison de la complexité des phénomènes de décharges électriques sur les surfaces isolantes, plusieurs travaux aussi bien théoriques [1 - 4] qu'expérimentaux [5- 7], ont été entrepris depuis plusieurs décennies, en vue d'étudier leur comportement sous pollution. Ces travaux de recherche ont permis de développer des modèles statiques et dynamiques, établissant ainsi, les caractéristiques des décharges évoluant sur les surfaces polluées des isolateurs, et ce, jusqu'au contournement. Néanmoins, ces mécanismes restent insuffisamment compris, à cause d'un grand nombre de facteurs difficiles à cerner, qui interviennent simultanément dans la génération et la propagation des décharges électriques.*

*Une étude expérimentale a été effectuée par Guia [8] pour examiner le comportement d'un modèle d'isolateur 1512L naturellement pollué. En se basant sur des travaux antérieurs [1, 5], ce chercheur a reproduit donc sur une plaque de verre, le même état de surface que celui d'un isolateur 1512L exploité pendant une dizaine d'années dans la zone SONELGAZ de Hassi R'mel au Sahara Algérien. Afin de simuler une pollution parfaitement conductrice, les couches polluantes ont été réalisées en papier aluminium. Guia s'est intéressé à la mesure du courant de fuite sous tension impulsionnelle. Son modèle de laboratoire a été soumis à différents paramètres à savoir, l'amplitude de la tension appliquée, la largeur de la couche polluante et la polarité de l'électrode active.*

*Afin d'apporter un complément valable à cette étude expérimentale, nous avons développé un modèle théorique basé sur des circuits électriques équivalents. Notre modèle permet de déterminer le courant de fuite circulant sur la surface du même modèle d'isolateur soumis aux mêmes paramètres électrogéométriques susmentionnés. Pour valider notre modèle, nos résultats de simulation seront comparés à ceux obtenus expérimentalement par Guia.*

*Notre travail s'articule sur quatre chapitres.*

*- Dans un premier chapitre, nous présenterons une synthèse bibliographique sur les phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport d'énergie électrique. Nous citerons, entre autres, les méthodes de mesure de la sévérité de pollution des sites, les*

*méthodes d'essais sous pollution naturelle et artificielle, ainsi que certaines techniques de lutte contre ces phénomènes.*

*- Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation des principaux modèles rapportés dans la littérature et décrivant les phénomènes de contournement des isolateurs pollués, sous tension continu ou alternative, en précisant leurs caractères statique ou dynamique. Nous citerons également les mécanismes et les critères de propagation de décharges électriques.*

*- Une proposition d'un modèle statique fera l'objet du troisième chapitre. Ce modèle est basé sur un circuit électrique équivalent et utilise des lois physiques. Il permet d'examiner l'influence de certains paramètres électrogéométriques à savoir, l'amplitude de la tension appliquée (la tension étant impulsionnelle de type choc de foudre), la largeur de la pollution et la polarité de l'électrode active, sur le comportement d'un modèle d'isolateur naturellement pollué. Pour cela, nous avons considéré le même modèle plan utilisé par Guia et ayant une même répartition discontinue de la pollution que celle observée sur un isolateur 1512L prélevée de la région électrique de Hassi R'mel, la distance inter électrodes du modèle correspond à ligne de fuite de l'isolateur réel. Il s'agit en fait, de l'isolateur 1512L naturellement pollué et développé suivant sa ligne de fuite. Afin de considérer le cas extrême, les couches polluantes sont remplacées par du papier aluminium.*

*- Dans le quatrième chapitre, nous présenterons nos résultats de simulation. Nous nous sommes principalement intéressés à la validation du courant de fuite en fonction des paramètres électrogéométriques susmentionnés. Une étude comparative entre nos résultats et ceux trouvés expérimentalement par Guia y sera également présentée.*

*Enfin, nous terminerons par une conclusion générale faisant la synthèse de notre travail.*

Chapitre *I*  
Phénomènes de  
Pollution

## I.1. Introduction

La pollution des isolateurs constitue un problème majeur dans la dégradation de l'isolement des ouvrages (postes et lignes) de haute tension [5, 9]. Portés par le vent et déposés sur la surface isolante des chaînes des isolateurs, et en présence d'humidité, les divers dépôts polluants deviennent plus ou moins conducteurs. Ce qui engendre une diminution conséquente de la tension de tenue des isolateurs. Des arcs électriques prennent naissance à la surface isolante et peuvent éventuellement, se développer en provoquant le contournement total des isolateurs.

La tension de contournement d'un isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité des dépôts polluants, c'est à dire du degré de pollution, ainsi que de la répartition de cette couche sur les surfaces des isolateurs [7].

Il convient donc de connaître le degré de pollution subi par les isolateurs sur le lieu, afin de bien juger et apprécier le niveau de l'isolement des ouvrages installés sur site, en vue d'un dimensionnement convenable de l'isolation extérieure. Pour cela, on procède à un choix judicieux des isolateurs et la mise en place, si nécessaire, de solutions complémentaires fiables et économiquement justifiables.

Notant que dans le cas où la tension est continue, les problèmes dus à la pollution sont plus importants qu'en tension alternative. Ceci est dû au fait que sous tension continue les forces électrostatiques sont dominantes par rapport aux autres forces qui agissent sur le polluant et font que le polluant adhère mieux sur les surfaces des isolateurs. Par ailleurs, les isolateurs présentent des tensions de contournement plus faibles en continue qu'en alternative, de plus le passage par zéro en alternatif contribue à l'augmentation de la tension de contournement [10].

## I.1. Formation des couches polluantes sur les isolateurs

Les couches de pollution se déposent progressivement sur les surfaces des isolateurs des lignes de haute tension, du fait qu'ils forment des obstacles à l'écoulement d'air, transportant de diverses substances organiques ou minérales (poussières, sel marin, fumée, engrais,...). La couche de pollution se concentre en général, dans les parties protégées contre les facteurs de nettoyage naturel (vent violent, pluie abondante,...). La répartition de la pollution est loin d'être uniforme et homogène et dépend essentiellement [11 - 13] :

- © du profil de l'isolateur (forme géométrique de la surface) ;
- © de l'orientation (verticale ou inclinée) de la chaîne par rapport au sol ;
- © de la distance à la source de la pollution ;
- © de la nature des dépôts, poids et taille des particules ;
- © des caractéristiques climatiques du site (vent, pluie, givre,...) ;
- © des caractéristiques géographiques du site zone urbaine, industrielle, littoral, sahara,...etc.

## I.3. Sources de pollution :

La nature de la pollution est sujette à l'origine des agents entrant dans sa formation. On distingue trois sources :

1. Pollution naturelle.
2. Pollution industrielle.
3. Pollution mixte.

### I.3.1. Pollution naturelle

Elle dépend du climat et des facteurs météorologiques des régions [13]. Elle est constituée de dépôts de poussières véhiculées par les vents tels que: sable, embruns marins,... Ces dépôts, et selon leur nature, se présentent comme suit :

#### I.3.1.1. Pollution marine

Dans les installations au voisinage de la mer, les embruns portés par le vent se déposent progressivement sur les isolateurs, formant ainsi, une couche de sel qui recouvre toute leur surface. Cette couche, qui humidifiée par les embruns eux-mêmes,

devient de plus en plus conductrice. Ce qui donne naissance à des courants de fuite encore plus intenses, et des arcs pouvant se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur [13].

### I.3.1.2. Pollution désertique

Dans les régions désertiques, la pollution est due surtout aux tempêtes de sable. La densité de sel dans le sable est très élevée, et la rosée matinale est la seule source d'humidification dans ces régions. Cette humidification favorise la conduction sur la surface isolante [11].

### I.3.1.3. Autre type de Pollution naturelle

La pluie est un phénomène naturel. Dans certaines conditions de pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne d'isolateur. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut conduire au contournement; c'est le contournement sous pluie [1].

### I.3.2. Pollution industrielle

Dans des zones à forte concentration industrielle, au voisinage des usines de pétrochimie, de cimenteries, ..., les isolateurs se recouvrent peu à peu de poussières résultant des fumées dégagées par ces dernières, et qui sont faiblement conductrices, mais hygroscopique, à la présence d'une humidité intense. Le sel contenu dans ces poussières abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs [14].

De plus, dans les régions agricoles, les agents polluants peuvent être insecticide, engrais, grains de pollens,....

Cette pollution peut aussi être d'origine domestique, quant il s'agit des facteurs tels: fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport [14].

### I.3.3. Pollution mixte

La pollution mixte est la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. Car elle résulte de la combinaison entre deux ou plusieurs pollutions pré-citées. La couche électrolytique formée par le processus d'humidification des

---

dépôts solides accumulés progressivement sur la surface des isolateurs, engendre une diminution considérable de la rigidité diélectrique [1, 12].

## I.4. Conséquences de la pollution

Lorsque l'isolateur est propre ou recouvert d'une couche de pollution sèche, la résistivité à la surface est très grande et le courant capacitif circulant à la surface est très faible. Par contre, et quelle que soit sa nature, le dépôt de pollution accumulé à la surface de l'isolateur provoque, en présence de l'humidité, la formation d'une couche électrolytique augmentant ainsi la conductivité superficielle. Cette couche devient, par la suite, le siège d'un courant de conduction de valeur relativement importante. Ce qui peut conduire à la formation et au développement d'arcs électriques le long de la surface de l'isolateur.

Selon les conditions aux quelles est soumis l'isolateur, trois cas peuvent se présenter [5, 15] :

### I.4.1. Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçe à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courant de fuite entraînant des pertes d'énergie relativement petites, généralement supportable par le réseau de distribution et des échauffements locaux ou partiels, qui peuvent à long terme, conduire à une dégradation de l'isolant.

### I.4.2. Arc fixe

Contrairement au cas précédant, l'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (source continue), soit en se réamorçant au même endroit (source alternative). L'impédance de l'ensemble dépôt et zone propre, limite le courant de l'arc et sa longueur. Cet arc peut entraîner par effet thermique, une dégradation du support isolant, nécessitant ainsi le remplacement de l'élément défaillant.

### I.4.3. Contournement des isolateurs pollués

Le phénomène de contournement des isolateurs pollués résulte de la combinaison de plusieurs paramètres [15] :

- Dépôts d'une couche de pollution solides (conductrices ou isolantes).
- Humidification de ces dépôts.
- Application d'une tension (de service ou temporaire).

Lorsque les conditions électriques appropriées sont remplies [5], le contournement d'une surface isolante polluée est le résultat d'une évolution que l'on peut décrire comme suit :

- L'humidification (pluie, brouillard ou rosée) associée au dépôt polluant crée une couche (électrolytique) conductrice à la surface de l'isolateur.
- L'échauffement par effet joule, créé par la circulation du courant de fuite, provoque l'apparition d'une zone sèche.
- Une partie importante de la tension appliquée se trouve reportée aux «bornes» de la zone sèche engendrant ainsi la rupture diélectrique et l'établissement d'arc local.
- Selon les conditions électriques qui se trouvent alors réunies, cette décharge se développera jusqu'au contournement total.

L'existence de ces phases dépend de nombreux paramètres caractéristiques de l'isolateur pollué à savoir, tension appliquée, conductivité de la couche, largeur de la zone sèche, profil de l'isolateur, longueur de fuite,... etc [15].

Notant qu'il est aussi fréquent que, plusieurs arcs naissent simultanément le long d'une chaîne ou d'une colonne isolante.

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

La tension alternative présente à cet égard une différence importante du fait de son annulation deux fois par période. Lorsque le temps au contournement est très élevé, on pourra avoir un passage par zéro avant qu'il n'y est contournement total. Dans ces conditions, les arcs électriques s'éteignent à chaque passage par zéro de l'onde de courant. Pour que ces arcs se réamorcent au cours de l'alternance suivante,

---

il faut que la tension appliquée atteigne un certain seuil dit tension de réamorçage [2, 5].

## I.5. Sévérité de pollution d'un site

La connaissance de la sévérité de la pollution est indispensable afin de dimensionner convenablement l'isolation en vue d'assurer un service sans défaillance.

### I.5.1. Classification des sites pollués

Il est possible de caractériser la sévérité de la pollution d'un site en utilisant par exemple, la méthode du brouillard salin équivalent. La sévérité considérée est alors exprimée en terme de salinité équivalente. En effet, on peut faire correspondre, à chaque site où règne indifféremment une pollution naturelle ou industrielle, une solution saline équivalente.

Afin de définir l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la salinité équivalente et le niveau de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été proposées [2].

Classe 1 : pollution faible d'origine naturelle (Sauf marine). Elle concerne généralement des zones non industrielles ayant une faible densité d'habitations, situées loin de la mer. Un isolement normal convient facilement pour ces zones. La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium de concentration 2.5 g/l.

Classe 2 : pollution moyenne d'origine naturelle (Sauf marine) ou faiblement industrielle. Elle correspond à des zones à moyenne densité d'habitation et situées loin de la mer. Ces zones nécessitent un isolement renforcé. La concentration de la salinité équivalente maximale retenue est de 10 g/l.

Classe 3 : pollution forte d'origine marine et industrielle. Les zones considérées possèdent une forte densité d'habitation et situées près de la mer. Elles sont exposées à des embruns marins relativement forts. Ces sites nécessitent un isolement important. La concentration de la salinité équivalente maximale est de 80 g/l.

Classe 4 : Elle correspond à des zones où le niveau de pollution est exceptionnel. La pollution dans ces zones peut être naturelle, industrielle ou mixte. Ces zones sont sujettes aux fumées industrielles et aux poussières conductrices produisant des dépôts très épais, et situés très proches de la côte. Elles sont soumises à des vents marins très forts et très polluants. Elles nécessitent un isolement exceptionnel. La salinité équivalente maximale est de 160 g/l.

### I.5.2. Méthodes de mesures de la sévérité d'un site

Basée sur des théories et des données expérimentales, des méthodes de mesures ont été proposées, pour caractériser la sévérité d'un site, dont certaines sont encore controversées.

Les méthodes les plus répandues sont [1, 13, 16, 17] :

#### I.5.2.1. Densité de dépôt de sel équivalent (DDSE)

La DDSE est utilisée comme un paramètre de base pour l'évaluation du comportement d'isolateurs sur site. Elle est le dépôt équivalent exprimé en mg de NaCl par  $\text{cm}^2$  de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel, lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau.

Des échantillons de pollution sont prélevés à la surface d'isolateurs ou d'autres collecteurs. Le dépôt est récupéré par lavage en utilisant un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier,...) et de l'eau distillée. A partir de la conductivité de la solution obtenue, on peut donc calculer la DDSE. Les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante.

#### I.5.2.2. Conductance superficielle

La conductance superficielle caractérise l'état global de la surface isolante (niveau de pollution et degré d'humidification de la couche). Elle représente le rapport du courant électrique qui circule sur l'isolateur, à la tension appliquée :  $G = I/V$ . La tension utilisée est inférieure à la tension de service et est appliquée pendant quelques périodes. Par contre, la conductivité superficielle des isolateurs peut être obtenue en multipliant la conductance superficielle  $G$  par le facteur de forme  $f$  de l'isolateur  $K = f G$ .

---

Dans le cas de couches polluantes non homogènes, la conductivité 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, elle présente des résultats dispersés.

### I.5.2.3. Courant de fuite

La mesure du courant de fuite s'effectue de deux manières : par le comptage du nombre d'impulsions et par l'amplitude des ces dernières.

#### I.5.2.3.1. Comptages d'impulsions

Le comptage des impulsions consiste à enregistrer, par un dispositif approprié, pendant une période donnée le nombre d'impulsions du courant de fuite, dépassant une certaine amplitude, pour un isolateur soumis à sa tension de service. Généralement, la fréquence et l'amplitude de ces impulsions croissent lorsqu'on s'approche du contournement.

La méthode se prête mieux à la détermination des longueurs d'isolateurs dans le cadre de l'extension ou du reconditionnement de l'isolement de réseaux existants. Cependant, elle ne fournit pas une mesure absolue de la performance des isolateurs et exige une aptitude au contrôle permanent.

#### I.5.2.3.2. Courant de fuite de la plus forte crête ( $I_{fc}$ )

On enregistre, pendant une période relativement longue sur un échantillon ou un isolateur réel, continuellement soumis à sa tension de service, les amplitudes des impulsions de courant de fuite. La plus forte valeur de crête du courant est exploitée pour la détermination de la sévérité de pollution de site.

Cette méthode est simple et tient compte de l'effet combiné des conditions atmosphériques et de la tension appliquée. Le coût relativement élevé de l'équipement de mesure contrebalance les avantages de cette méthode.

#### I.5.2.4. Contrainte du contournement

La contrainte de contournement d'un isolateur est définie comme étant la tension de contournement divisée par la longueur totale de l'isolateur. La mesure de cette contrainte donne toutes les informations nécessaires au calcul de la longueur de l'isolateur,

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

- 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'amorçage enregistrées.
- La disposition des éclateurs qui sont disposés sur chaque chaîne afin que sa longueur effective soit augmentée jusqu'à atteindre le niveau de tenue en tension.

Ces méthodes présentent des mesures les plus directes qui puissent être faites sur les isolateurs réels. Le coût élevé peut, toutefois, être réduit par l'utilisation d'une ligne existante.

#### I.5.2.5. Mesure de la pollution de l'air

Cette méthode est basée sur l'analyse physico-chimique de l'air sur une période de temps donnée et permet 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 les analyses de l'air et la sévérité de la pollution.

#### I.5.2.6. Mesures optiques

Un dispositif à rayons lasers permet d'évaluer l'épaisseur de la couche de pollution déposée à la surface de l'isolateur et la constante diélectrique de cette dernière. La mesure de la sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche.

### I.5.2.7. Densité de dépôt non soluble (DDNS):

Elle correspond à la quantité de dépôts polluants non solubles présents dans une couche de pollution. Elle s'exprime en  $\text{mg}/\text{cm}^2$ . La mesure de la DDNS s'accompagne souvent d'une analyse physico-chimique de la pollution, au terme de laquelle les sources polluantes peuvent être identifiées.

### I.5.2.8. Autres méthodes

Ce sont notamment l'analyse d'échantillons d'air pour la recherche de sel, des solides et du  $\text{SO}_2$ , et l'utilisation de jauges de dépôts, qu'elles soient météorologique ou directionnelle. Les statistiques de défauts sur les lignes d'une région donnée peuvent être d'une grande utilité. Les mesures météorologiques (quantité de pluie, humidité relative, importance du brouillard, vitesse et direction du vent) peuvent également être utilisées pour évaluer la sévérité des sites.

## I.6. Méthodes d'essais sous pollution

Afin de sélectionner le type d'isolateur à installer, il faut bien comparer les performances de divers types d'isolateurs et sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution pour chaque site. Pour cela, il est nécessaire de les soumettre à des essais. Ces derniers peuvent être réalisés sous conditions naturelles (sur site) ou au laboratoire. D'où on distingue deux types d'essais sur les isolateurs pollués :

- Essais sous pollution naturelle.
- Essais sous pollution artificielle.

### I.6.1. Essais sous pollution naturelle

Ces essais consistent à installer dans les différents sites pollués des stations d'essais dans lesquelles on suspend à l'air libre (extérieur) un certain nombre de chaînes d'isolateurs de longueurs et de profils différents et d'observer leurs comportements. Les qualités respectives de ces isolateurs, placés sous la même

tension, sont appréciées en fonction du courant de fuite, de la conductivité superficielle ainsi qu'en fonction du temps au contournement [5, 7].

On peut classer alors les isolateurs en distinguant ceux qui ont été contourné de ceux qui ont tenu. Ces essais s'étalent sur une durée assez longue voir deux ou trois ans d'exposition.

Ces essais ont l'avantage de tenir en compte de l'effet de toutes les contraintes, dans toutes leurs complexités sur un site donné [5, 7]. L'inconvénient majeur de ces essais est qu'ils nécessitent plusieurs années, pour pouvoir étudier valablement les performances des isolateurs, faute de l'évolution lente du phénomène de pollution due à l'accumulation progressive de dépôts.

### I.6.2. Essais sous pollution artificielle

Vu leur rapidité et leur coût relativement bas, de nos jours sont largement utilisés par les chercheurs. Ils consistent à reproduire en laboratoire les conditions de la pollution naturelle.

Les méthodes d'essais qui demeurent actuellement normalisées peuvent être classées en trois grandes catégories :

- Méthodes de la couche solide.
- Méthode du brouillard salin.
- Méthode de la chambre de poussière.

#### a- Méthode de la couche solide

Dans ces méthodes, une couche de pollution solide à base de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte, généralement le kaolin, le kieselguhr (terre d'infusoire, diatomées) ou la silice, est appliquée par pulvérisation sur la surface isolante de l'isolateur. La conductivité de cette suspension est ajustée par réglage de la concentration de chlorure de sodium.

Notant que si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérité est définie comme étant la densité de dépôt de sel en  $\text{mg}/\text{cm}^2$ . Par ailleurs, si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est définie comme étant la conductivité de la couche polluante.

---

Certains chercheurs utilisent une couche semi-conductrice comme agent polluant [6].

#### b- Méthode de brouillard salin

Dans cette méthode, l'isolateur soumis à la tension d'essai, est placé dans un brouillard salin dont le taux de salinité définit la sévérité de pollution. 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. Selon la classification des sites pollués, les valeurs de salinité appliquée sont choisies selon une progression allant de 2.5 à 160 g/l.

La méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine. Elle est également valable pour représenter de nombreux dépôts de pollution industrielle ayant une couche de pollution relativement mince [16].

#### c- Méthode de la chambre de poussière

Afin de représenter le niveau de pollution et la distribution de polluants de la même manière que dans les conditions naturelles, dans une chambre d'essai, on génère un débit d'air lent transportant du sel et des matériaux inertes avec une distribution uniforme que possible, l'objet d'essai étant positionné au milieu de la chambre. Un vaporisateur va mouiller le dépôt de pollution généré précédemment [7, 16].

### 1.6.3. Critiques de ces méthodes d'essais

La méthode du brouillard salin est d'une grande facilité de mise en œuvre et permet d'obtenir une bonne reproductibilité des essais est donc la plus utilisée. De plus, sa validité a été vérifiée dans un certain nombre de régions côtières et zones industrielles. La méthode de la chambre de poussière offre un atout considérable pour les essais au laboratoire en tension continue. Cependant son utilisation est limitée vu les complexités qu'elle présente en terme de faisabilité.

Notant que, ces méthodes sont moins représentatives pour simuler la pollution désertique [13].

---

## I.7. Techniques de lutte contre la pollution

Une bonne conception de l'isolation des lignes basée sur des mesures de sévérité de pollution permet de limiter, autant que possible, les incidents lorsque la ligne est en service. Cependant, un changement dans les données d'un site est toujours possible, par l'apparition de nouvelles industries, la construction des ouvrages routiers ainsi que l'accroissement inattendu de l'urbanisation d'un site, rend le dimensionnement initial insuffisant. Dans ces circonstances, on a recourt à des solutions techniques appropriés pour chaque cas. Parmi les techniques proposées, on trouve :

### I.7.1. Allongement de la ligne de fuite

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

- Le changement de type d'isolateurs par un autre de longueur de la ligne de fuite supérieur, opération délicate et coûteuse [18].
- L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [19].

### I.7.2. Graissage des surfaces des isolateurs

Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs. La longévité du graissage dépend de l'environnement et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement comprise entre un et quatre ans [18]. Par mesure économique, seule les isolateurs de postes sont concernés.

### I.7.3. Lavage des isolateurs [18]

Le lavage des isolateurs peut se faire soit hors tension soit sous tension. En particulier dans les postes, pouvant supportés des interruption de service assez longue le nettoyage manuel, lavage ou essuyage à sec des isolateurs peuvent être utilisés de façon périodique.

Le lavage sous tension permet d'éviter ces coupures. Il doit être effectué selon des règles strictes concernant les distances de sécurité à respecter et la qualité de l'eau de

---

lavage. L'utilisation d'un abrasif pulvérisé sous pression pour le nettoyage des pollutions très adhérentes (ciment,...) est possible.

#### I.7.4. Isolateurs plats

Même avec une ligne de fuite moins longue que pour les isolateurs traditionnels, les isolateurs plats (sans nervures) ont la propriété d'accumuler moins de pollution et s'auto nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont principalement utilisés dans les régions désertiques [13].

#### I.7.5. Revêtement silicone

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Ce revêtement protège les isolateurs et améliore leur tenue sous pollution. Sa longévité est nettement supérieure à celle du graissage [20].

#### I.7.6. Les isolateurs composites

Ces isolateurs présentent l'avantage d'une grande légèreté, une haute résistance mécanique et de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollutions très sévères. Cependant, ces isolateurs, revêtus d'une polymère, voient leurs caractéristiques changer au cours du temps. Ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) aux quelles ils sont soumis en service [18].

---

## I.8. Conclusion

Dans ce chapitre introductif, une synthèse bibliographique des différents aspects des phénomènes de pollutions est présentée.

Les principales conclusions que l'on peut tirer de cette synthèse sont :

- ♣ La pollution reste un facteur déterminant pour le dimensionnement des isolateurs dans les ouvrages de haute tension.
- ♣ La connaissance de degré de pollution est une condition indispensable, pour prévoir une isolation externe convenable.
- ♣ La nature et la sévérité de pollution dépendent, en grande partie, de la localisation géographique et de l'industrialisation du site.
- ♣ La meilleure définition de degré de pollution d'un site est d'obtenir la salinité équivalente du site.
- ♣ Les méthodes d'essais sous pollution artificielle sont aujourd'hui largement utilisées.
- ♣ Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (graissage, lavage, nouveau type d'isolateurs, revêtements hydrophobes) permettent de disposer aujourd'hui de solutions curatives à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants sur le réseau.

*Chapitre II*  
*Modèles de*  
*Contournement*

## II.1. Introduction

Dans le but de comprendre et d'expliquer les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs pollués, on a consacré une quantité importante de travaux tant théoriques qu'expérimentaux, sans pour autant aboutir à l'élaboration d'un modèle pouvant tenir compte simultanément de tous les paramètres réels caractéristiques du phénomène. Il s'agit en particulier des formes géométriques 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 de l'isolateur, de la formation d'arcs multiples, etc. ainsi que pour la détermination de la tension de contournement des isolateurs pollués.

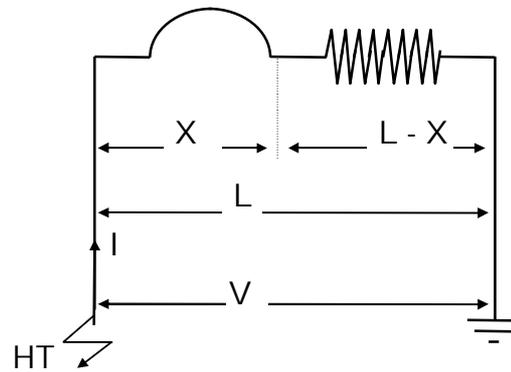
Afin de contourner la difficulté liée à la configuration souvent complexe de l'isolateur, des modèles simples de laboratoire ont été adoptée par un certain nombre de chercheurs. Certains modèles reflètent assez bien le comportement de l'isolateur.

Le long de ce chapitre, nous allons exposer quelques modèles développés dans ce domaine.

## II.2. Modèles statiques de contournement

### II.2.1 Modèle d'Obenaus

Partant des observations de laboratoire sur les phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche de pollution, sous tension continue, Obenaus [21], dans un travail de pionnier, a essayé de donner les analyses quantitatives en utilisant un circuit électrique équivalent. Son modèle (Fig. II.1) est constitué d'un arc de longueur  $x$  en série avec une résistance  $R_p$  représentant la résistance de la zone de pollution non encore court-circuité par l'arc.



**Figure II.1** Circuit électrique équivalent d'après Obenaus

L'équation électrique est telle que :

$$U = U_e + U_{arc} + R_p(X)I \quad (II.1)$$

avec :

$U$  : la tension appliquée ;

$U_e$  : la chute de tension totale aux bornes des électrodes ;

$U_{arc}$  : la tension d'arc ;

$X$  : longueur de l'arc ;

$R_p(X)$  : la résistance de la couche polluante ;

$I$  : le courant de fuite qui traverse la couche polluée.

L'équation de la tension d'arc est :

$$U_{arc} = AXI^{-n} \quad (II.2)$$

où  $A$  et  $n$ , sont les constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc. Ainsi, on obtient l'équation de la tension totale appliquée au système :

$$U = U_e + AXI^{-n} + R_p(X)I \quad (II.3)$$

Les valeurs des paramètres  $n$  et  $A$  dépendent du milieu dans lequel s'amorce la décharge. Elles varient selon les auteurs [22, 23] :

$$0.4 < n < 1 \quad \text{et} \quad 3 < A < 500$$

### II.2.2. Modèle de Neumarcker

Se basant sur les travaux d'Obenaus, Neumarcker [24] suppose que la résistance de la couche de pollution est uniforme par unité de longueur. La résistance  $R_p(X)$  peut être donnée par :

$$R_p(X) = r_p(L - X) \quad (II.4)$$

où

$r_p$  : est la résistance moyenne par unité de longueur ;

$(L - X)$  : la longueur de la zone non court-circuitée par l'arc.

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

$$U = U_e + U_{arc} + r_p(L - X)I \quad (II.5)$$

En négligeant les chutes de tension cumulées aux électrodes :

$$U = \frac{AX}{I^n} + r_p(L - X)I \quad (II.6)$$

Selon Neumarcker, la tension continue minimale  $U_c$ , nécessaire pour entretenir l'arc sur une fraction  $X/L$  ( $L$  étant la distance de fuite), est liée aux paramètres fondamentaux par la relation :

$$\frac{An}{r_p} \left( \frac{U_c}{(1+n)AL} \right)^{\frac{n}{n+1}} = \left( \frac{X}{L} \right)^{\frac{1}{n}} - \left( \frac{X}{L} \right)^{\frac{n+1}{n}} \quad (II.7)$$

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

$$X_c = \frac{L}{n+1} \quad (II.8)$$

et

$$I_c = \left( \frac{AX}{I^n} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (II.9)$$

En remplaçant dans la première équation, la tension critique de contournement peut s'écrire alors comme suit :

$$U_c = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} L \quad (II.10)$$

### II.2.3. Modèle de Rizk

A partir d'une analyse théorique, Rizk [3] a décrit le phénomène d'entretien de l'arc et le mécanisme de rupture diélectrique. Il a mis en évidence l'expression de la rigidité de l'espace résiduel et établi une relation entre la tension minimale  $U_c$  nécessaire à l'entretien de l'arc, la résistance de pollution linéique  $r_p$  et la longueur de fuite  $L$ .

Considérant un arc en série avec une résistance de pollution uniforme, Rizk obtient l'expression de la tension critique suivante :

$$\frac{U_c}{L} = \frac{XA}{Li^n} + \left(1 - \frac{X}{L}\right) r_p I_m \quad (II.11)$$

à et  $I_m$  étant courant d'arc et son maximum

En résolvant numériquement cette équation, on obtient la relation suivante :

$$\frac{U_c}{L} = 23r_p^{0.4} \quad (II.12)$$

### II.2.4. Modèle de Claverie et Porcheron

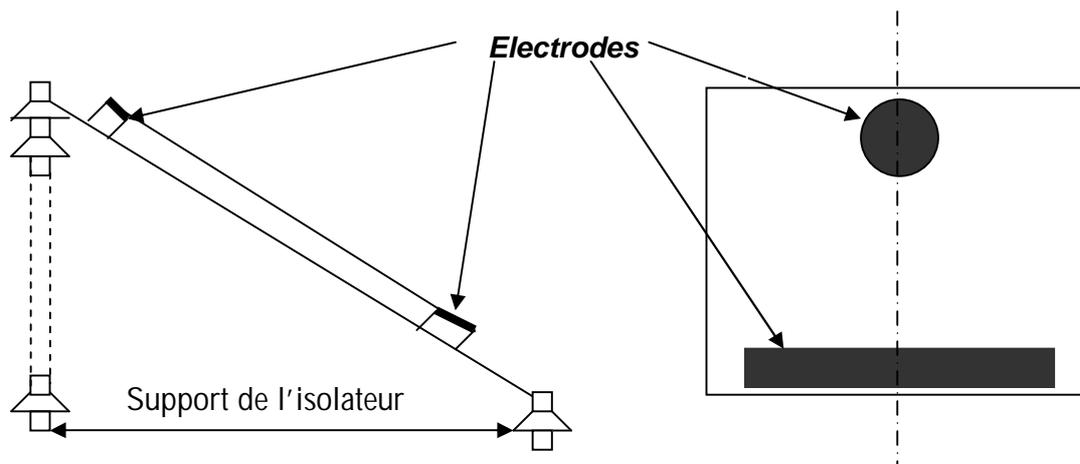
Pour étudier les isolateurs pollués sous tension alternative, plusieurs modèles expérimentaux ont été élaborés. Le plus connu est celui de Claverie et Porcheron [25]. L'isolateur de forme complexe est remplacé par un isolateur plan (Fig. II.2).

Ces auteurs ont montré que, pour un tel modèle, la tension d'arc est donné par :

$$U_{arc} = \frac{100X}{\sqrt{I}} \quad (II.13)$$

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

$$U_{cx} = \frac{800X}{\sqrt{I}} \quad (II.14)$$



**Figure II.2 : Modèle expérimental de Claverie et Porcheron**

### II.2.5. Modèle de Rao et Gopal

Pendant les essais, Rao et Gopal [26] ont constaté que l'équation de la tension donné par Obenaus ( $U_{arc} = \frac{XN}{I^n}$ ), n'est valable que pour une décharge de type intermédiaire, entre la luminescence et l'arc. Dans le but de donner des explications entre les écarts des

prédictions des modèles et les valeurs mesurées pendant le contournement, ils ont introduit une nouvelle équation exprimant le champ dans la colonne de la décharge.

$$U = a + u(b + X) \left( \ln \frac{I}{d} \right)^{-3} \quad (II.15)$$

Cette équation donne la relation entre  $U$ ,  $I$  et  $X$  d'un arc de faible intensité évoluant dans l'atmosphère.

$a$ ,  $b$ ,  $u$  et  $d$  sont des constantes qui dépendent de la nature des électrodes entre lesquelles s'amorce la décharge.

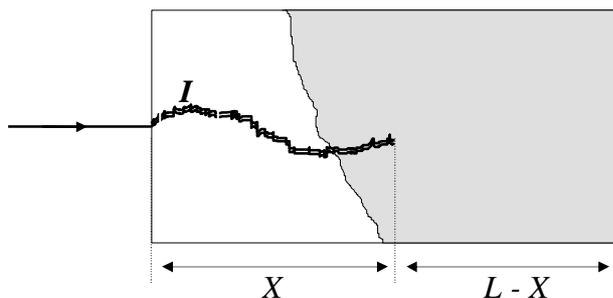
### II.2.6. Modèle d'Alston et Zoledziowski

En se basant sur le fait que la résistance de la couche de pollution est uniforme par unité de longueur (l'hypothèse de Neumärker), Alston et Zoledziowski [27] ont pu déterminer, en appliquant une tension de quelques kilos volts, la condition de maintien de l'arc électrique, dans le cas d'un isolateur cylindrique de longueur  $L$  (Fig. II.3) :

$$U_c(X) = (n + 1)(AX)^{\frac{n}{n+1}} \left( r \frac{L - X}{n} \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (II.16)$$

$X$  : est longueur d'arc.

$A$  et  $n$  : les constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc.

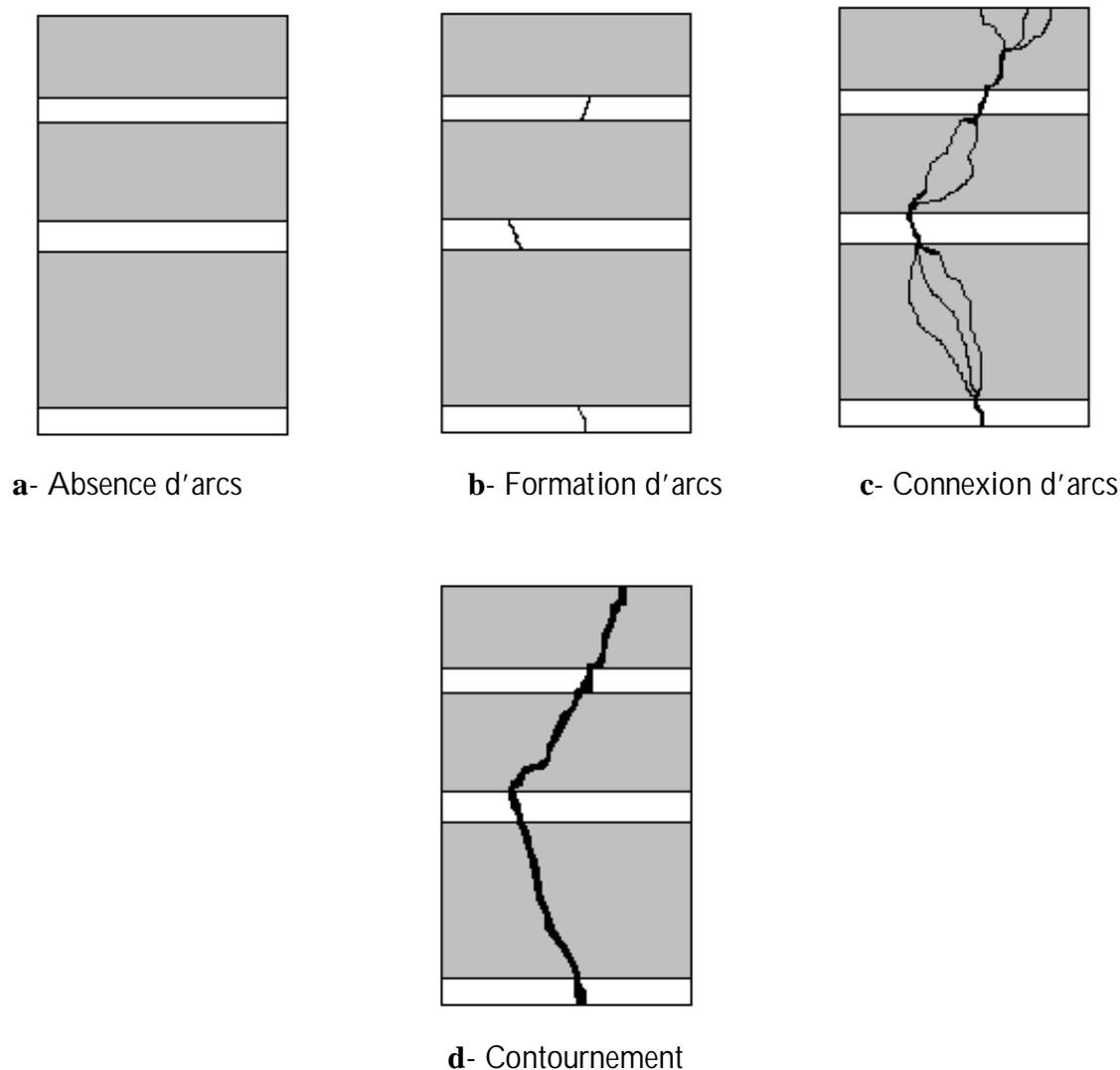


**Figure II.3 : Modèle cylindrique utilisé par Alston et Zoledowski**

### II.2.7. Modèle de Danis

Se basant sur la reproduction de manière la plus proche possible de l'état de surface d'un isolateur en exploitation, Danis [28] proposa alors un modèle de forme géométrique simple (plan ou cylindre) possédant plus d'une zone sèche (Fig.II.4). La rupture des zones sèches survient alors d'une manière aléatoire. Les arcs partiels apparaissent et se déplacent de

façon imprévue, car ils dépendent de plusieurs facteurs dont on ne peut pas déterminer leurs effets instantanés.



**Figure II.4 : Modèle de Danis**

- © L'arc se développe toujours d'abord à travers la zone sèche, puis dans la zone humide (Fig. II.4-b).
- © L'arc peut se développer à n'importe quelle position le long de la zone sèche et aucune position n'est donc privilégiée par rapport à une autre (Fig. II.4-c).
- © Le contournement se fait à travers les chemins déjà préétablis par les différents arcs de chaque zone sèche (Fig. II.4-d).
- © Lorsque l'expérience est répétée, les positions des arcs développés sont différentes et le contournement se fera donc à travers un tout autre chemin.

En considérant que la résistance de la couche polluante est linéaire comme pour Neumärker, une simulation numérique des observations expérimentales, utilisant des photographies à grande vitesse (3000 images / seconde), a été développée pour déterminer la tension de contournement.

L'équation qui régit le modèle sous tension continue est :

$$U = \frac{AX}{I^n} + r_p(L - X)I \quad (II.17)$$

Avec  $n \cdot 0.5$  et  $200 \cdot A \cdot 400$ ,

$r_p$  est la résistance linéique et L la longueur de fuite.

Le courant et la tension critiques déduits par l'auteur sont donnés par les expressions :

$$I_c = \left( \frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (II.18)$$

et

$$U_c = L(Ar_p)^{\frac{1}{n+1}} = AI_c^{-1} \quad (II.19)$$

### II.2.8. Modèle de Nacke et Wilkins

Pour déterminer la résistance de la zone polluée, Nacke et Wilkins [29], considèrent que les racines de l'arc électrique prennent une forme de demi-cercles aux frontières des zones sèches (Fig.II5). Ainsi, la résistance de la pollution se compose d'une résistance  $R_i$  (interne) propre aux deux demi-cercles, et d'une résistance  $R_e$  (externe) pour le reste de la pollution.

L'expression de la résistance est :

$$R(X) = R_i(X) + R_e(X) \quad (II.20)$$

Quant à Nacke,

pour une largeur de bande étroite  $\left( \frac{X_p}{b} \geq \frac{2}{p} \right)$  :

$$R_i(X) = \frac{1}{pS_s} \quad (II.21)$$

$$\text{et } R_e(X) = rX_p + \frac{2}{pS_s} \ln\left(\frac{b}{2pr_d}\right) \quad (II.22)$$

et pour une bande large :

Si l'isolateur est à ailette unique, la résistance externe est donnée par :

$$R_e(X) = \frac{2}{\rho S_s} \left[ 0.68 + \ln \left( \frac{X_p}{r_d} \right) \right] \quad (II.23)$$

S'il est à ailettes multiples :

$$R_e(X) = \frac{2}{\rho S_s} \left[ 0.3 + \ln \left( \frac{X_p}{r_d} \right) \right] \quad (II.24)$$

où :  $r = \frac{1}{b S_s}$  étant la résistance linéique de la pollution ;

$X_p$  : est la longueur de la couche polluée dans les conditions critiques ;

$b$  : la largeur de la surface de l'isolateur ;

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

Selon Wilkins, la résistance globale de la pollution peut s'écrire :

pour le cas d'une bande étroite par :

$$R(X) = r(L - X) + \frac{1}{\rho S_s} \ln \left( \frac{b}{2pr_d} \right) \quad (II.25)$$

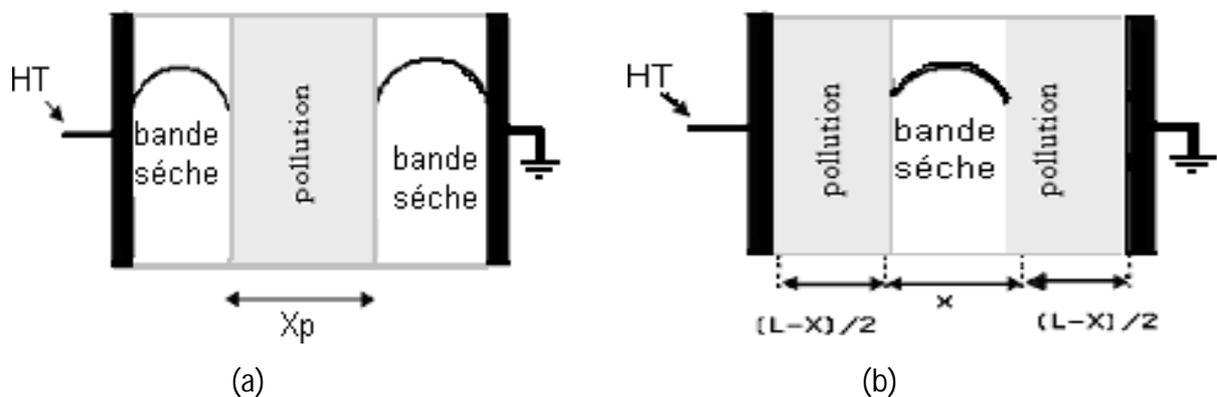
et pour une bande large par :

$$R(X) = \frac{1}{\rho S_s} \left[ \ln \left( \frac{2L}{pr_d} \right) - \ln \left( \tan \frac{pX}{L} \right) \right] \quad (II.26)$$

avec

$X$  : est la longueur de l'arc ;

$L$  : la distance totale de fuite de l'isolateur.



**Figure II.5 : Représentation schématique de la surface d'un isolateur et des points de la base de l'arc, utilisés pour le calcul de la résistance de pollution selon :**

**(a) Nacke et (b) Wilkins**

## II.2.9. Modèle de la couche mixte

Comme les couches de pollution qui s'accumulent à la surface des isolateurs sont non homogène, Obenaus et Boehme [30] ont considéré que la résistance superficielle d'un isolateur à long fût pollué ne peut être uniforme le long de sa ligne de fuite. Elle est plutôt équivalente à deux couches résistantes en série, de résistance linéique  $r_{p1}$  et  $r_{p2}$  correspondant respectivement à la tige et aux ailettes. Ils ont décomposé ainsi la longueur totale de fuite en deux distances totales partielles  $L_1$  et  $L_2$  correspondant respectivement à la tige et aux ailettes (Fig. II.6).

En appliquant le critère de Hampton, ils ont pu déduire la relation ci-dessous, donnant le gradient du contournement critique en fonction de deux paramètres :

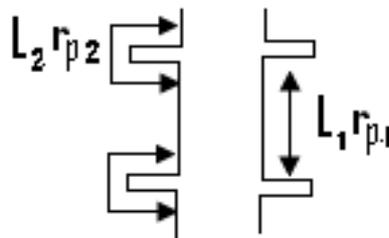
$$\frac{U_c}{L} = 0.8\sqrt{Ar_{p1}} \quad (II.27)$$

où :  $A=80\text{VA/cm}$  et  $r_{p1} > r_{p2}$

Par application du critère d'Hesketh, l'expression précédente devient :

$$\frac{U_c}{L} = 0.8(Lr_p I) \quad (II.28)$$

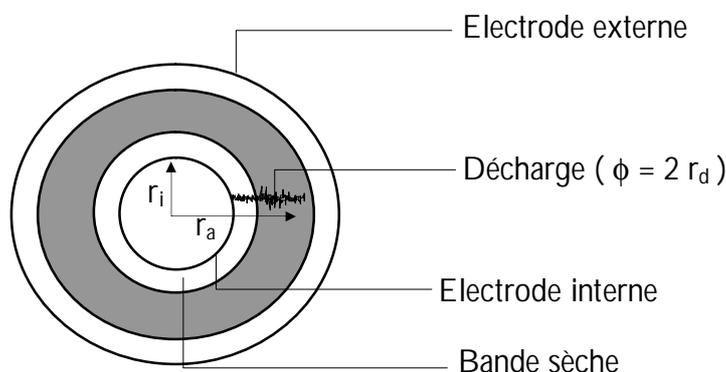
où  $r_p$  est la résistance linéique sur une longueur  $L_1$  ou  $L_2$ .



**Figure II.6 : Modèle à long fût selon Boehme et Obenaus**

## II.2.10. Modèle de Woodson et Mc Elory

Connu sous le nom du modèle du disque circulaire, Woodson et McElory [31] ont essayé de reproduire, d'une façon idéale, la surface d'un isolateur en utilisant une configuration géométrique circulaire (Fig. II.7).



**Figure II.7 : Modèle de Woodson et McElroy**

Utilisant certaines hypothèses, la résistivité superficielle du polluant peut s'écrire sous la forme suivante :

$$R(X) = \frac{C}{S_s} (r_0 - r_a)^m \quad (11.29)$$

où :

- $r_0$  : est le rayon de l'électrode externe ;
- $\bullet_s$  : la conductivité superficielle du polluant ;
- $r_a$  : la somme de la longueur initiale de l'arc et la longueur de l'électrode interne ( $r_i$ ) ;
- C et m : constantes.

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

### II.2.11. Modèles de Tegar

#### a / Cas de pollution continue

Tegar [6] a élaboré un modèle statique sous tension alternative. Son modèle est basé sur celui de Claverie et Porcheron, et permet d'avoir les différentes caractéristiques concernant le développement de l'arc électrique sur une surface isolante uniformément polluée.

En se basant sur l'équation du circuit et sur la condition limite de réamorçage, il a déterminé l'expression donnant la résistance de pollution en série avec l'arc, en fonction de la tension appliquée et le courant de fuite :

$$R_p = \frac{1}{r} \frac{K - 100 U}{K I} = r F_p \quad (II.30)$$

où  $r$  : représente la résistivité de la couche de pollution ;

$K$  : la constante de la caractéristique statique de l'arc ;

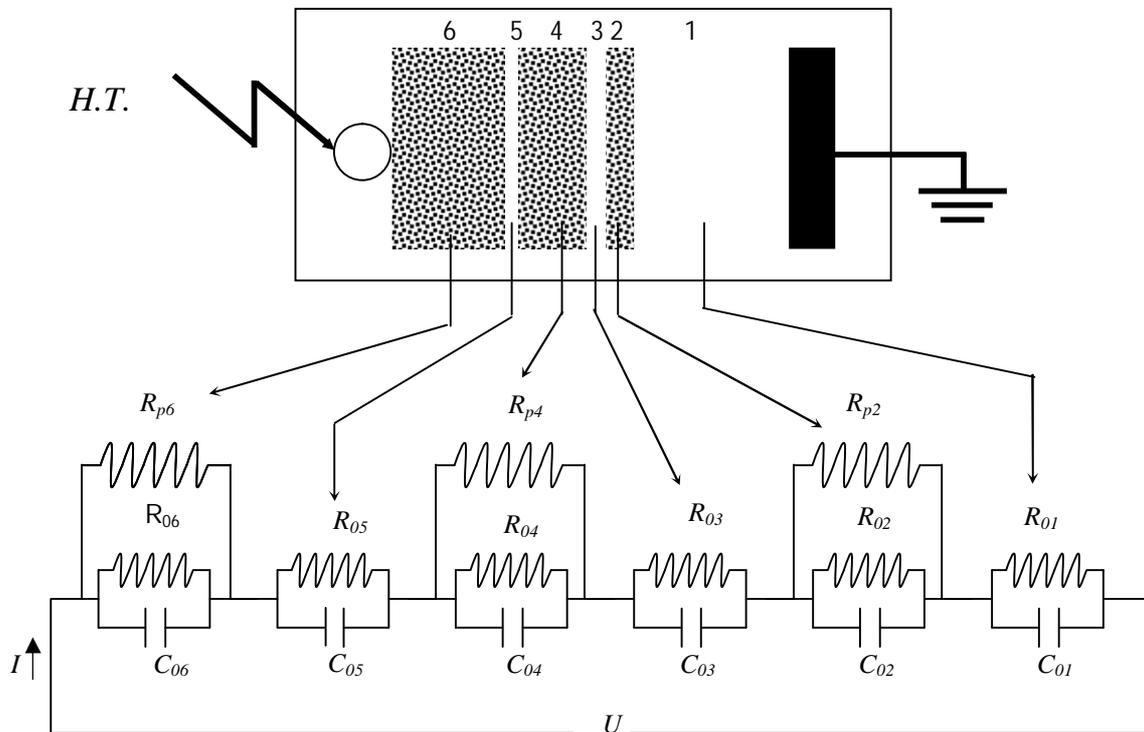
$R_p$  : la résistance de la couche polluante en série avec l'arc.

Cette équation lui a permis d'évaluer la longueur critique de l'arc et par suite tous les paramètres caractérisant les phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des surfaces isolantes uniformément polluées.

Un modèle amélioré a été mis au point par Tegar [6] pour caractériser la propagation d'une décharge électrique sur des surfaces isolantes soumises à une pollution continue non uniforme.

#### b / Cas de pollution discontinue

Tegar [6] a élaboré un algorithme qui permet d'obtenir les différentes caractéristiques des phénomènes de conduction sur les surfaces isolantes sous pollution discontinue. Les bandes propres et polluées sont représentées par des circuits électriques (Fig.II.8). Les composants de ces circuits sont déterminés à partir des essais effectués sur la plaque propre et celle uniformément polluée. Le courant de fuite critique et la tension de contournement sont calculés à partir de la connaissance de la tension de contournement obtenue expérimentalement dans le cas où les couches de la pollution discontinue sont remplacées par du papier aluminium.



**Figure II.8 : Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire selon Tegar**

La figure ci dessus représente le circuit électrique équivalent au modèle de laboratoire sous pollution discontinue. Dans ce circuit, chaque bande  $i$  ( $i=1$  à  $6$ ) est constituée d'une résistance  $R_{0i}$  en parallèle avec une capacité  $C_{0i}$ . Pour chaque bande polluée  $i$  ( $i=2, 4, 6$ ), ces circuits sont shuntés par une résistance  $R_{pi}$  représentant la couche de pollution (peinture semi-conductrice à base de graphite)

Le fait que les couches polluantes possèdent des formes rectangulaire et selon la recommandation de la CEI 60-1 [32], l'expression de la résistance pour chaque bande polluée  $i$  peut être formulée par :

$$R_{pi} = R_{sp} \int_0^{L_i} \frac{dl}{b} = R_{sp} \frac{L_i}{b} = R_p f \frac{L_i}{b} \quad (\text{II.31})$$

Avec  $i=2, 4, 6$ ,  $R_{pi}$  la résistance de la couche de pollution,  $dl$  élément de longueur,  $L_i$  la longueur de la pollution,  $b$  la largeur de la couche de pollution et  $f$  le facteur de forme.

Les résultats simulés concordent parfaitement avec ceux obtenus expérimentalement pour les grandes largeurs de couches polluantes.

## II.2.12. Modèle de Namane, Mekhaldi et Bouazabia

Namane, Mekhaldi, et Bouazabia [33] ont étudié l'influence de la répartition discontinue de la couche de pollution et ont développé un modèle qui tient compte de la position par rapport aux électrodes (Fig. II.9), de la largeur et de la conductivité de la couche polluante.

Ils ont déterminé l'impédance de la zone propre pour les deux dispositions des couches de pollutions.

pollution côté haute tension :

$$Z_{0C}(y) = [Z_0(Y=0)] \left[ \frac{L-y}{L} \right]^{0.42} \quad (II.32)$$

pollution côté terre :

$$Z_{0C}(y') = [Z_0(Y'=0)] \left[ \frac{L-y'}{L} \right]^{0.42} \quad (II.33)$$

avec:

$L$  : longueur de fuite [cm] ;

$Z_{0C}$  : Impédance de la zone propre en fonction de la couche de pollution ;

$Y$  : longueur de la couche polluante côté haute tension ;

$Y'$  : longueurs de la couche polluante côté terre ;

$Z_0(y=0)$  et  $Z_0(y'=0)$  sont les impédances mesurées de la surface isolante propre et sèche.

Ils ont déterminé l'impédance de la couche polluante assimilée à une résistance lorsque

la pollution est du côté haute tension :

$$R(y) = \left[ \frac{1}{eSa} \right] \text{Log} \left[ \frac{y+a}{a} \right] = \left[ \frac{K}{S} \right] \text{Log} \left[ \frac{y+a}{a} \right] \quad (II.34)$$

la pollution est du côté terre :

$$R(y') = \left[ \frac{K}{\sigma} \right] \text{Log} \left[ \frac{a+L}{a+L-y'} \right] \quad (II.35)$$

avec :  $K = \frac{1}{e\alpha} = 8.2610^9$  ;

$a$  : rayon de l'électrode sous tension [cm] ;

$\sigma$  : conductivité superficielle de la pollution [ $\bullet$ S] ;

$e$  : épaisseur moyenne de la couche de pollution.

L'impédance totale entre les électrodes peut être exprimée, lorsque

la pollution est du côté haute tension, par :

$$Z_t(y) = [Z_0(Y=0)] \left[ \frac{L-y}{L} \right]^{0.42} + \left[ \frac{K}{S} \right] \text{Log} \left[ \frac{y+a}{a} \right] \quad (II.36)$$

la pollution est du côté terre, par :

$$Z_t(y') = [Z_0(Y'=0)] \left[ \frac{L-y'}{L} \right]^{0.42} + \left[ \frac{K}{S} \right] \text{Log} \left[ \frac{a+L}{a+L-y'} \right] \quad (II.37)$$

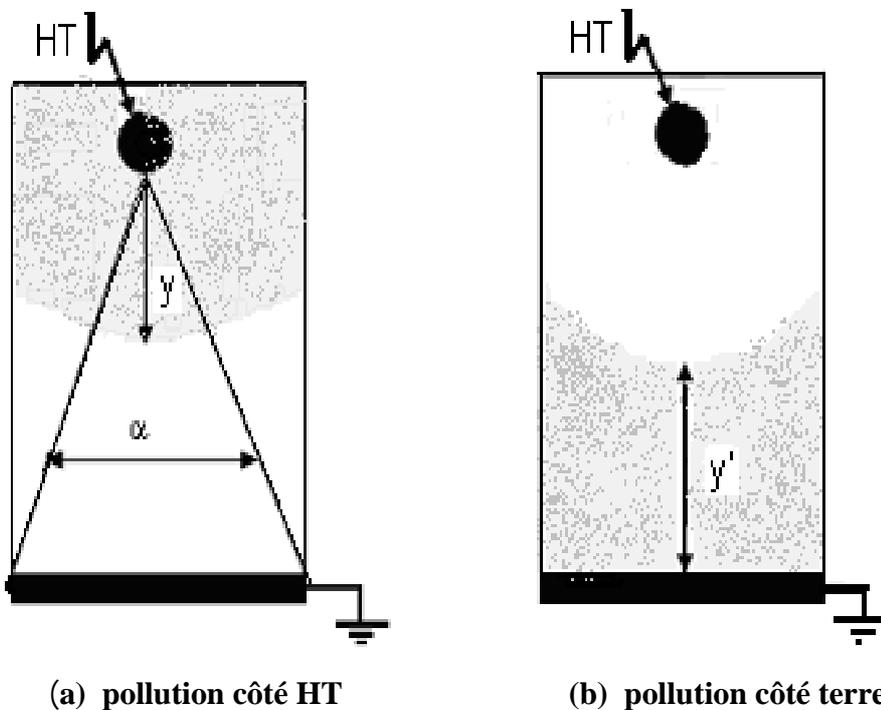


Figure II.9 : Modèle expérimental de Namane, Mekhaldi et Bouazabia

### II.3. Modélisation Dynamique de l'arc

Alors que les paramètres caractérisant la propagation des décharges électriques évoluent dans le temps, l'étude du phénomène a été souvent effectuée en utilisant des modèles statiques. Dans le but de se rapprocher le plus possible de la réalité, de nouveaux modèles ayant pris en considération la variation de certains paramètres dans le temps, ont

été développés. Afin d'étudier la dynamique de la décharge, la plupart des modèles utilisent des critères de propagation basé sur des lois physiques.

### II.3.1. Mécanisme de propagation

#### II.3.1.2. Propagation par ionisation

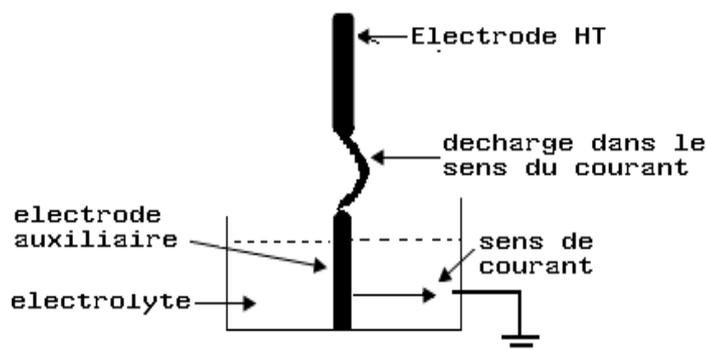
L'élongation de la décharge électrique selon, Wilkins et Al Baghdadi [34] se réalise dans la région où on a une forte ionisation. Étant donné que la température et le potentiel sont élevés dans la zone précédant l'avant tête de la décharge, la probabilité d'ionisation est grande dans cette dernière.

En effet, si l'ionisation est suffisante, un courant électrique circule, entraînant ainsi une élongation  $dx$  de la décharge ; on parle ainsi d'une rupture diélectrique progressive.

#### II.3.1.2. Propagation par force électrostatique

A partir des observations faites sur un canal d'électrolyte, Rahal [35] 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 provoque la courbure de la décharge vers l'électrode de masse (Fig.II.10). La décharge se déplace vers l'électrode de masse, si les conditions critiques sont satisfaites.



**Figure II.10 : Courbure de la décharge dans le sens de courant mettant en évidence l'existence d'une force**

### II.3.1.3. Critique des Mécanismes de propagation

Dans une analyse critique des différents mécanismes de propagation de la décharge présentée dans la littérature, Flazi [36], 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 dû se ramener à une approche plus globale du phénomène. A 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.

#### II.3.2.1. 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.

#### II.3.2.2. Critère de Hampton

En remplaçant la couche de pollution en série avec l'arc électrique par une colonne d'eau uniforme présentant une résistance linéique constante, Hampton [37] a pu établir que la condition nécessaire pour la propagation de la décharge, est que le champ  $E_p$  dans la colonne d'eau dépasse le champ à l'intérieur de l'arc  $E_{arc}$  :

$$E_{arc} < E_p \quad (II.38)$$

#### II.3.2.3. Critère de Hesketh

En supposant que l'arc en série avec la couche de pollution mouillée se modifie de façon à rendre maximale le courant  $I$  qu'il tire de la source d'alimentation, Hesketh [38] a établi un critère de propagation de l'arc, exprimé par la relation :

$$\frac{dI}{dx} \geq 0 \quad (II.39)$$

Cette relation montre, par conséquent, que la propagation de la décharge est possible, si elle provoque l'augmentation du courant circulant à la surface isolante.

#### II.3.2.4. Critère de Wilkins

En considérant qu'un système se place dans la configuration qui lui permet de dissiper le maximum d'énergie, Wilkins [29] a généralisé la condition énoncée par Hesketh et établi un critère de propagation utilisant la puissance  $P$  fournie par la source ; l'allongement de la décharge est assuré par l'augmentation de cette puissance :

$$\frac{dP}{dx} \geq 0 \quad (II.40)$$

#### II.3.2.5. Critère de Anjana et Lakshminarasimha

En assimilant l'arc à une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, Anjana et Lakshminarasimha [39] ont établi une condition nécessaire à la propagation de l'arc, basée sur des considérations énergétiques : l'énergie totale  $W_t$  doit être supérieure ou égale à l'énergie  $W_{th}$  nécessaire pour maintenir l'arc à sa température :

$$W_t \geq W_{th} \quad (II.41)$$

#### II.3.2.6. Critère de Dhabbi, Beroual et Krahenbul

Ces auteurs [40] ont proposés un nouveau critère analytique de propagation de la décharge en faisant intervenir l'impédance équivalente  $Z_{eq}$  d'un circuit électrique, simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite (Fig. II.11).

En utilisant la condition nécessaire à la propagation de l'arc, donnée par :

$$\frac{d|Z_{eq}|}{dx} \leq 0 \quad (II.42)$$

ces auteurs ont abouti à un critère qui est :

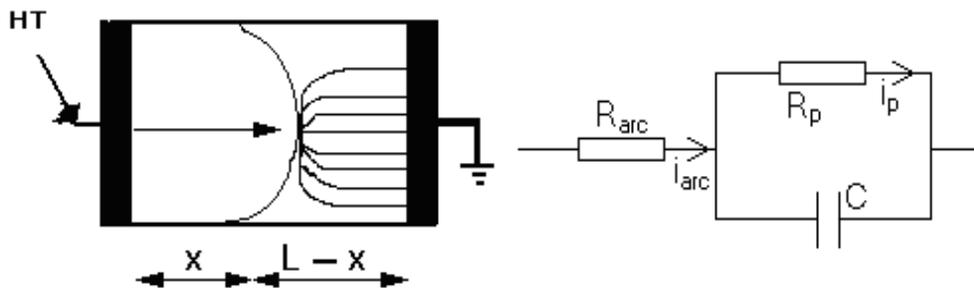
$$E_{arc} \leq \frac{E_p}{\sqrt{a}} \quad (II.43)$$

où  $a = 1 + w^2 r_p^2 e^2$  (Sous tension continue  $a=1$ ) ;

• : la pulsation ;

$r_p$  : la résistivité de la pollution ;

$e$  : La permittivité de la pollution.



**Figure II.11 : Modèle d'un isolateur pollué et circuit équivalent correspondant**

### II.3.3.1. Modèle de Rizk

Pour caractériser la dynamique de l'arc pour le cas continu, Rizk et Nguyen [41] ont considéré que la résistance de l'arc varie selon l'équation de Mayr :

$$\frac{dR_{arc}}{dt} = \frac{R_{arc}}{\tau} - \frac{R_{arc}^2 I^{n+1}}{A\tau} \quad (II.44)$$

Avec

$\tau = 100 \mu s$  : constante de temps de l'arc ;

$n = 0,8$  et  $A = 60$  : constantes de la caractéristique statique de l'arc.

### II.3.3.2. Modèle de Anjana et Lakshminarasimha

En se basant sur l'équation de Mayr et le modèle statique d'Obenaus, Anjana et Lakshminarasimha [39] 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 :

$$W_{th} = \frac{3}{2} KTM \quad (II.45)$$

avec T : la température de l'arc ;

M : le nombre de particules neutres dans l'arc ;

K : la constante de Boltzman.

Pour que l'arc se propage il faut que son énergie totale  $W_t$  soit supérieure ou égale à l'énergie  $W_{th}$  nécessaire pour le maintenir à sa température. Cette énergie  $W_t$  est donnée par l'expression suivante:

$$W_t = (E_{arc} I_{arc} - P_0) \Delta t \quad (II.46)$$

\*  $E_{arc}$  étant le gradient dans l'arc ;

\*  $P_0$  est 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 sont égales respectivement à 3000 °K et 300 °K.

Si la condition de propagation de l'arc 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 :

$$V = \mu E_{arc} \quad (II.47)$$

où  $\mu$  est la mobilité de l'arc.

On déduit la variation de la longueur d'arc ( $dx$ ) grâce au pas de temps  $\Delta t$ , tel que ( $dx = V \Delta t$ ).

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

### II.3.3.3. Modèle de Sundararajan et Gorur

En adoptant le critère de Hampton, Sundararajan et Gorur [42] proposent un modèle dynamique en continu qui ressemble à celui de Anjana et Lakhminarasimha en utilisant l'expression suivante :

$$E_p = A \frac{1}{n+1} r_p \frac{n}{n+1} \quad (II.48)$$

avec  $r_p$  : la résistance linéique de la tension ;

$A = 63$  et  $n = 0.5$  : les constantes de la caractéristique statique de l'arc.

Notons que la valeur de  $E_p$  utilisée par Sundrarajan et Gorur est en fait la contrainte critique

établie par Neumarker ( $E_c = A \frac{1}{n+1} r_p \frac{n}{n+1}$ ).

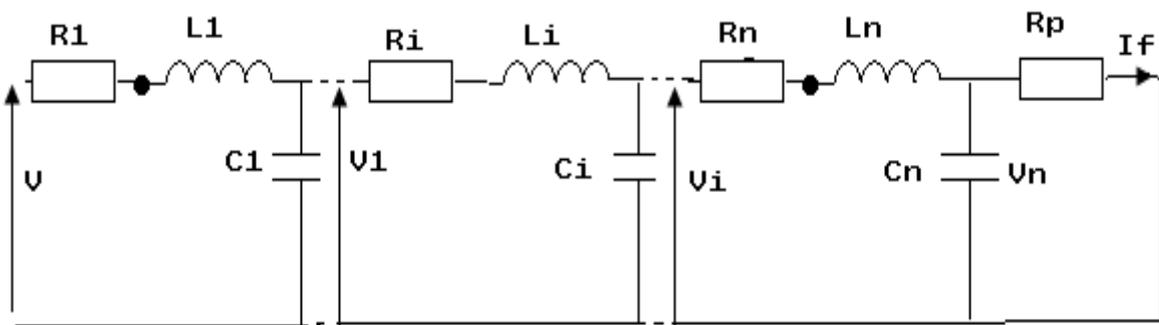
Dans le cas alternatif, Sundrarajan et Gorur utilisent le même modèle en y remplaçant le critère de propagation de l'arc par la condition de ré allumage établie par Rizk :

$$\frac{U_c}{L} = 23r_p^{0.4} \quad (II.49)$$

#### II.3.3.4. Modèle de Dhahbi et Beroual

Dans ce modèle, Dhahbi et Beroual [43] considère que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme indiqué à la figure II.12.

$R_i$ ,  $C_i$ ,  $L_i$ , et  $U_i$  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 électrique.



**Figure II.12 : Circuit électrique équivalent de la propagation de l'arc de Dhahbi et Beroual.**

Ce modèle est basé sur le critère d'impédance. Pour déterminer ces paramètres ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ), ces auteurs ont utilisés [44 - 46] :

§ pour calculer la variation de la résistance, l'équation de Mayer;

- § pour déterminer la capacité, une approximation sphérique;
- § pour l'inductance du canal de la décharge, les simplifications proposées par Fofana et Beroual.

## II.4. Vitesse de propagation

Plusieurs mécanismes ont été proposés pour expliquer la propagation des arcs sur les surfaces polluées, mais rare ceux qui se sont penchés sur l'évaluation de la vitesse de la décharge nous citons :

### II.4.1. Modèle de Zoledziowski

En se basant sur l'hypothèse que l'allongement de l'arc est lié à la puissance  $P$ , disponible au moment de la naissance de la décharge et à l'énergie nécessaire pour l'obtenir, Zoledziowski [27] a établi la relation suivante :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{V^2}{s r_p^2 (L-x)^2 Q} \quad (II.50)$$

avec :

- $s$  : la conductance de la décharge ;
- $Q$  : la densité d'énergie linéique de la décharge ;
- $x$  : la longueur d'arc,  $r_p$  la résistance de pollution ;
- $r$  : résistance de la pollution.

### II.4.2. Modèle de Matsuo et El- Baghdadi

En mesurant les intervalles de temps entre les signaux lumineux détectés par les fibres optiques placées sur le chemin de la décharge à des distances distincts les unes des autres et en utilisant un caméra ultra rapide, Matsuo et El- Baghdadi [34] ont pu déduire la vitesse moyenne de propagation de l'arc et par la suite ont établi la relation empirique suivante :

$$V = 1.5410^{-4} r_p^{2.5} (I^4 - I_C^4) \quad (II.51)$$

où:

- $V$  : vitesse en [cm/s] ;

$I_C$  : le courant critique en [A] ;

$r_p$  : la résistance linéique de pollution en [ $\bullet$ /cm].

### II.4.3. Modèle de Rahal

En partant du fait que le déplacement de la décharge est gouverné par les ions extraits dont la vitesse est proportionnelle au champ à la racine de l'arc et les forces de rappel provenant de la décharge exercée sur ces ions, la relation donnant la vitesse en fonction des deux champs est [5, 35] :

$$V = \frac{\partial x}{\partial t} = m(E_{Pr} - E_{acr}) \quad (II.52)$$

avec :

$$E_{Pr} = \frac{I r}{2 a e} \left[ \frac{sh \left( \frac{2 p r_d}{a} \right)}{ch \left( \frac{2 p r_d}{a} \right)} \right] + 1 \quad (II.53)$$

$E_{arc}$  : champ de l'arc ;

$E_{Pr}$  : champ existant a la racine de l'arc ;

$\mu$  : mobilité des électrons dans l'arc ;

$e, a, I, \bullet$  et  $r_d$  : sont respectivement l'épaisseur de la couche électrolyte, la largeur du canal contenant la couche de pollution, le courant de la décharge, la résistivité de la couche, le rayon de la décharge.

### II.4.4. Modèle de Beroual

Seule une partie de l'énergie totale  $W_t$  est transférée au canal d'arc sous forme d'énergie cinétique  $W_c$  ( $W_c = \bullet W_t$  avec  $0.1 \bullet \bullet \bullet 0.2$ ) qui permet à l'arc de s'allonger d'une distance  $dx$ . Ainsi, Beroual [47] a abouti à la relation suivante :

$$V^2 = \frac{2 b}{r p r^2} q E \quad (II.54)$$

où:  $r$  : est le rayon de l'arc ;

$\bullet$  : la masse volumique du gaz ;

$q$  : la charge ;

---

E : le champ à la tête de l'arc.

#### II.4.5. Modèle de Tegar

Le modèle qu'a proposé Tegar [6] en tension continue, se base sur celui d'Obenaus et utilise le critère de propagation de Hampton. Tegar a représenté la résistance de pollution comme une fonction linéaire de la longueur de fuite, il a utilisé l'expression donnée par Wilkins pour calculer le rayon d'arc, et celle de Anjana et Lakshminarasimha pour déterminer la vitesse d'élongation.

Ce modèle permet d'évaluer la tension de contournement, le temps au contournement et de décrire la dynamique de l'arc en tenant compte de la géométrie de l'isolateur ainsi que des variations instantanées de certains paramètres importants à savoir le courant de fuite, la vitesse de propagation, la puissance et l'énergie fournies par la source, le champ dans la pollution et au pied de l'arc, la résistance de la pollution, le rayon du canal d'arc, la résistance de ce canal, sa longueur, sa résistance linéique, sa résistivité, sa tension ainsi que la puissance et l'énergie qui lui ont été transférées.

Sous la base de ce modèle, d'autres modèles ont été développés en tension alternatives et impulsionnelle [48].

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une recherche bibliographique qui nous a permis d'explorer les principaux modèles statiques et dynamiques, ainsi que de citer certains mécanismes et critères de propagation de la décharge sous tensions continue, alternative et impulsionnelle.

La plupart des modèles traitent le problème de manière statique et reposent sur modèle proposé par Obenaus. Ils traitent le phénomène de contournement sous un aspect global en lui associant des critères d'extension se basant soit sur le champ électrique, soit sur l'énergie ou encore la puissance dissipée.

Dans le but, d'étudier l'évolution temporelle de certains paramètres liés au phénomène de contournement, de nouveaux modèles dynamiques furent établis. Eux aussi basés sur le modèle statique d'Obenaus ainsi que sur l'équation de Mayr.

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

Ces modèles sont, cependant, insuffisants lors du passage à l'application pratique principalement à cause des hypothèses simplificatrices rendues nécessaires par les traitements mathématiques. Il est clair que lorsqu'il s'agit de comparer les performances de divers types d'isolateurs, l'étude expérimentale constitue en définitive le meilleur garant d'un jugement objectif.

*Chapitre III*  
*Modèle théorique*

## III.1. Tension Appliquée

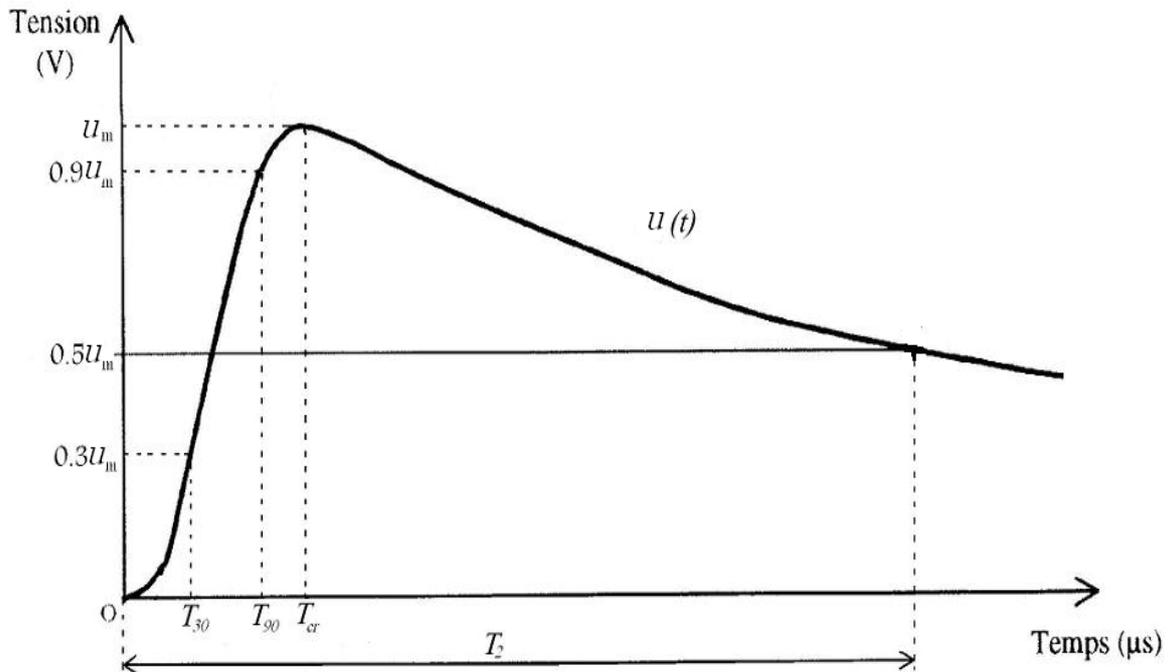
Pendant son fonctionnement, un système d'isolation peut subir des surtensions accidentelles. Celles-ci sont d'origine atmosphérique (la foudre) ou de manœuvre (ouverture ou fermeture d'un disjoncteur) [10, 49]. Cependant, et comme il est difficile de reproduire les formes exactes de ces ondes en laboratoire pour l'étude et pour le dimensionnement de l'appareillage de haute tension, on a généralement recours à des formes d'ondes conventionnelles simples [49], pouvant être reproduites par des générateurs d'impulsions de type multiplicateur de Marx.

### III.1.1. Onde impulsionnelle

La surtension impulsionnelle est une tension transitoire apériodique qui habituellement croît rapidement jusqu'à une valeur de crête, puis décroît plus lentement jusqu'au point zéro. On peut créer au laboratoire des ondes bi-exponentielle (différence de deux exponentielles) en utilisant des générateurs de chocs de type Marx. Le principe de ces générateurs est basé sur la charge de condensateurs en parallèle, puis de leur décharge en série à travers des résistances [8, 42, 48]. La tension délivrée est caractérisée par deux paramètres :

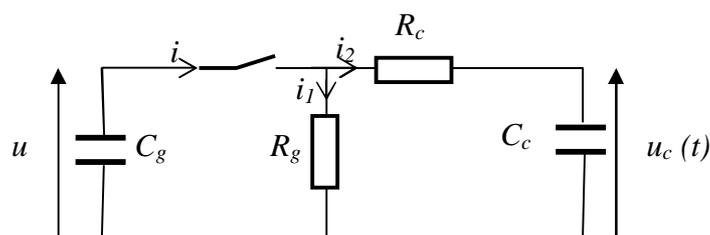
- la durée conventionnelle de front  $T_1 = 1.67 (T_{90} - T_{30})$ .
- la durée de queue à mi-amplitude  $T_2$ .

$T_{90}$  étant le temps au bout duquel l'impulsion atteint 90% de sa valeur crête  $U_m$ , et  $T_{30}$  celui correspondant à 30% de  $U_m$ ,  $T_2$  est la durée jusqu'à la mi-amplitude. Chaque forme d'onde est caractérisée par le rapport  $T_1/T_2$ ,  $T_1$  et  $T_2$  étant exprimé en  $\mu s$ .



**Figure III.1 : Forme de l'onde impulsionnelle**

Afin de déterminer l'expression de l'onde de choc, on utilise généralement un schéma équivalent du générateur. Celui-ci se limite en une capacité  $C_g$  qui est chargée à la tension requise  $u$ , et qui se décharge dans le circuit comprenant les éléments  $C_c$ ,  $R_s$  et  $R_p$ . Les constantes de temps peuvent être ajustées en jouant sur les valeurs des composants du circuit, afin d'obtenir la forme d'onde désirée. Le circuit de base de ce générateur est représenté par la figure (III.2) suivante [44, 46] :



**Figure III.2 : Schéma équivalent du générateur de Marx**

Les éléments  $R_c$  et  $C_c$  interviennent de façon prépondérante sur le temps de montée du choc, alors que les éléments  $R_g$  et  $C_g$  interviennent principalement sur le temps de descente de l'onde [49].

A partir des éléments du schéma équivalent et de la tension d'alimentation du générateur de choc, au moment de son amorçage  $U_{g0}$ , on détermine l'expression de la tension de sortie  $u_c(t)$ .

En appliquant les lois de Kirchhoff au circuit équivalent du générateur du choc, on aura les équations suivantes:

$$i = i_1 + i_2 \quad (\text{III.1})$$

$$u_g(t) = \frac{1}{c_g} \int i \, dt \quad (\text{III.2})$$

$$u_c(t) = \frac{1}{c_c} \int i_2 \, dt \quad (\text{III.3})$$

$$u_g = R_c i_2 + u_c \quad (\text{III.4})$$

ou encore, en dérivant et en remplaçant  $i_2$  dans la dernière équation,

$$i(t) = c_g \frac{\partial u_g}{\partial t} \quad (\text{III.5})$$

$$i_2(t) = c_c \frac{\partial u_c}{\partial t} \quad (\text{III.6})$$

$$u_g = R_c c_c \frac{\partial u_c}{\partial t} + u_c \quad (\text{III.7})$$

dérivant  $u_g$  (équation III.7) en fonction de temps  $t$  :

$$\frac{\partial u_g}{\partial t} = R_c c_c \frac{\partial^2 u_c}{\partial t^2} + \frac{\partial u_c}{\partial t} \quad (\text{III.8})$$

En remplaçant, dans l'équation (III.1), les courants par leurs expressions (III.5 et III.6), on a :

$$c_g \frac{\partial u_g}{\partial t} = \frac{u_g}{R_g} + c_c \frac{\partial u_c}{\partial t} \quad (\text{III.9})$$

En remplaçant,  $u_g$  par son expression (III.7), l'équation (III.9) devient :

$$\frac{\partial u_g}{\partial t} = \frac{R_c c_c}{R_g c_g} \frac{\partial u_c}{\partial t} + \frac{1}{R_g c_g} u_c + \frac{c_c}{c_g} \frac{\partial u_c}{\partial t} \quad (\text{III.10})$$

En égalant (III.8) et (III.10) et en arrangeant, on obtient :

$$R_c c_c c_g \frac{\partial^2 u_c}{\partial t^2} + \left( c_g - \left( \frac{R_c + R_g}{R_g} \right) c_c \right) \frac{\partial u_c}{\partial t} - \frac{1}{R_g} u_c = 0 \quad (\text{III.11})$$

Cette équation est de type [49] :

$$A \frac{\partial^2 u_c}{\partial t^2} + B \frac{\partial u_c}{\partial t} - C u_c = 0 \quad (\text{III.12})$$

En appliquant la transformée de Laplace à l'équation (III.11), on obtient :

$$Ap^2 U_c(p) + Bp U_c(p) - C U_c(p) = 0 \quad (\text{III.13})$$

Cette dernière équation permet d'obtenir les pôles suivants :

$$p_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4C}}{2A} \quad (\text{III.14})$$

Les conditions initiales sont :

$$\frac{\partial u_c}{\partial t} \Big|_{t=0} = c_g \frac{U_{g0}}{p_1 - p_2} \quad \text{et} \quad u_c(0) = 0 \quad (\text{III.15})$$

$U_{g0}$  étant la tension maximale de la charge de  $C_g$ .

En posant :

$$T_a = \frac{1}{p_1} \quad ; \quad T_b = \frac{1}{p_2}$$

L'expression de l'onde de choc aura la forme finale suivante :

$$u_c(t) = \frac{U_{g0}}{R_c c_c} \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \left[ \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) - \exp\left(-\frac{t}{T_b}\right) \right] \quad (\text{III.16})$$

Nous voyons ainsi que la forme de l'onde de tension  $u_c(t)$  dépend des constantes de temps  $T_a$  et  $T_b$ . Pour déterminer ces dernières, les approximations suivantes sont admissibles [49]

$$\begin{cases} U_{cr} = U_0 \exp\left(-\frac{T_{cr}}{T_a}\right) \\ \frac{U_{cr}}{2} = U_0 \exp\left(-\frac{T_2}{T_a}\right) \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

En divisant la première équation du système (III.17) par la deuxième équation, on détermine  $T_a$  :

$$T_a = \frac{T_2 - T_{cr}}{\ln 2} = \frac{T_2 - T_{cr}}{0.7} \quad (\text{III.18})$$

on détermine aussi  $T_b$  [43, 48, 49] :

$$T_b = \frac{T_a}{\exp\left(1.35 + 1.2 \ln \frac{T_2}{T_{cr}}\right)} \quad (\text{III.19})$$

La valeur maximale de  $u_c(t)$  sera atteinte à :

$$t = T_{cr} = \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \ln \frac{T_a}{T_b} \quad (\text{III.20})$$

Ce qui donne :

$$U_{cr} = \frac{U_{g0}}{R_c c_c} \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \left[ \exp\left(-\frac{T_b}{T_a - T_b} \ln \frac{T_a}{T_b}\right) - \exp\left(-\frac{T_a}{T_a - T_b} \ln \frac{T_a}{T_b}\right) \right] \quad (\text{III.21})$$

D'autre part, en posant  $d = T_a/T_b$ , on peut déduire  $U_0$  :

$$U_0 = \frac{U_{cr}}{\left(d^{1/1-d} - d^{d/1-d}\right)} \quad (\text{III.22})$$

où :

$T_a$  : est le temps de montée ;

$T_b$  : le temps à mi-amplitude ;

$T_{cr}$  : le temps crête ;

$U_0$  : facteur amplitude.

### III.1.2. Détermination de la tension $U_{50\%}$ et $U_{0\%}$

#### III.1.2.1. Tension disruptive moyenne $U_{50\%}$

La tension  $U_{50\%}$  de décharge disruptive est la tension pour la quelle la probabilité de décharge est  $P(U) = 0.5$ . Elle est déterminée par la méthode Up and Down, et calculée d'après la formule de Dixon et Mood [50]. Les valeurs sont ramenées aux conditions normales de température et de pression selon la norme CEI 60-1 [32].

#### III.1.2.2. Détermination de la tension $U_{0\%}$

La tension  $U_{0\%}$  est le niveau de tension le plus important que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive. Elle est déterminé par la méthode des paliers multiples constants, et consiste à appliquer trois paliers de tensions différentes avec application de 20 chocs par palier. Plus le nombre de paliers appliqué est grand, plus l'interpolation des points est meilleure, et par voie de conséquence, une bonne précision lors de l'extrapolation pour déterminer  $U_{0\%}$ . En effet, cette dernière correspond à la fréquence de décharge de 0.1% sur une échelle gaussio-arithmétique [8].

## III.2. Modèle Mathématique

Certains travaux de recherche [3], dans le domaine de la pollution des isolateurs, ont montré l'existence des décharges partielles précédant le contournement. Les processus physiques mis en jeu sont nombreux et très complexes. Cependant, il est souhaitable qu'un modèle mathématique simple soit élaboré, avec l'objectif d'aider à la compréhension des phénomènes électrique intervenant sur des surfaces non uniformément polluées [47].

En se basant sur la reproduction, de la manière la plus proche possible, de l'état de surface de l'isolateur 1512L exploité pendant une dizaine d'années dans la région de Hassi Remal (Fig. III.3), nous proposons un modèle mathématique pour simuler son comportement sous tension impulsionnelle (choc de foudre).

### III.2.1. Hypothèses simplificatrices

Une connaissance des phénomènes inhérents à la conduction surfacique s'avère nécessaire. Ces phénomènes sont régis principalement par les équations de Maxwell. Toutefois, l'application de ces lois sur les systèmes d'isolation, composés de milieux de différentes propriétés électriques et de diverses formes géométriques, génère souvent un ensemble complexe d'équations. Cependant, l'adaptation des hypothèses simplificatrices réduit l'ordre de complexité, et rend la représentation du système possible à l'aide d'un modèle mathématique.

- La couche de pollution est de faible épaisseur afin de pouvoir introduire une distribution surfacique bidimensionnelle.
- La couche de pollution est représentée par une résistance pure.
- La conductivité de la pollution est la même en tout point de la couche polluante et ne change pas durant les essais.
- Le courant électrique de fuite circule le long de la surface.

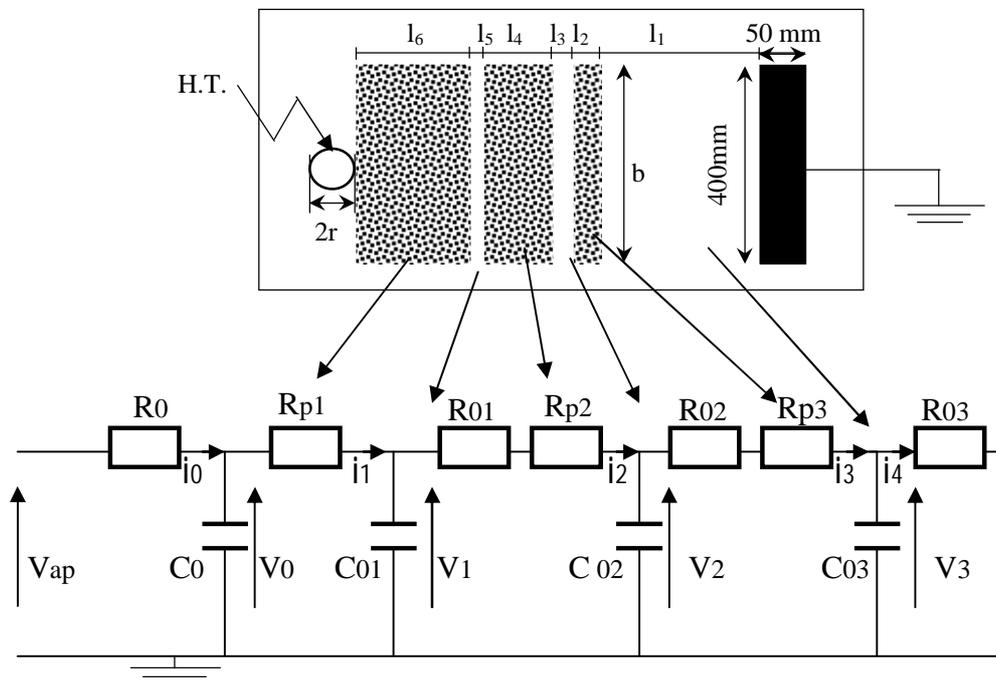
### III.2.2. Modèle d'isolateur pollué

Se basant sur le modèle (schéma) de la répartition de la tension le long d'une chaîne d'isolateurs [4], ainsi que sur les travaux de Beroual, Fofana, et Dhahbi concernant les décharges électrique sur les surfaces d'isolateurs pollués [44 - 46, 51], nous avons élaboré un modèle permettant l'étude du comportement d'un isolateur naturellement pollué et soumis à une tension de type choc de foudre.

Dans le circuit électrique équivalent que nous proposons (Fig.III.3), pour simuler le modèle de laboratoire sous pollution discontinue, chaque zone polluée est représentée par une résistance pure  $R_{pi}$ , et ceci, du fait que le courant en zones polluées est plutôt résistif, alors que les zones propres sont représentées chacune par une résistance  $R_{0i}$  en parallèle avec un condensateur  $C_{0i}$ .

Lorsque nous appliquons une tension de quelques kilos volts entre les deux électrodes, une première décharge de type couronne peut avoir lieu. Cette décharge peut être simulée par une résistance  $R_0$  en parallèle avec un condensateur  $C_0$ . La capacité  $C_0$  peut être déterminée en faisant une approximation sphérique. Tandis que la valeur de la résistance dépendrait des conditions d'essais.

- Pour la modélisation des décharges électriques dans les longs intervalles d'air, ainsi que les streamers dans les diélectriques liquides, Fofana et Beroual [46, 51] prennent la valeur de  $R_0$  égale à  $100 \cdot \dots$
- Lors de la modélisation dynamique des décharges sur les surfaces polluées, certains chercheurs [43- 46, 51] prennent  $R_0$  comme étant la résistance d'une élévation initiale  $x_0$  de l'ordre de 1% de la longueur de fuite.
- Pour notre simulation, nous avons considéré une valeur de  $R_0$  de l'ordre de cent kilos Ohm. Cela donnera une chute de tension de quelques centaines de volts. Ceci est en accord avec la littérature [24].



**Figure III.3 : Circuit électrique équivalent**

### III.2.3 Eléments du circuit électrique équivalent

Dans notre étude, l'isolateur réel est remplacé par un modèle plan équivalent. La longueur de fuite de ce dernier égale à celle de l'isolateur réel, tandis que la largeur du modèle correspond à la circonférence de l'isolateur. Le choix de cette représentation bidimensionnelle est justifiée par le fait que, les phénomènes de conduction et de décharges électriques dépendraient principalement des

caractéristiques surfaciques de la couche de pollution se déposant sur les isolateurs.

### III.2.3.1 Eléments du circuit électrique équivalent de la zone polluée

En se basant sur le fait que le courant dans les couches polluées est plutôt résistif [47, 52], nous pouvons considérer l'impédance de la bande polluée comme étant une résistance pure. Avec l'hypothèse d'une conductivité  $\gamma_p$  de la couche polluante constante (la même en tout point de la surface polluée), la résistance par unité de longueur et unité de largeur  $R_{sp}$  s'exprime comme suit :

$$R_{sp} = \frac{1}{e\gamma_p} \quad (\text{III.23})$$

où  $\gamma_p$  : est la conductivité volumique de la pollution ;  
 $e$  : épaisseur de la couche de la pollution.

Ainsi, comme les couches de pollutions ont la forme de bandes rectangulaires, les différentes résistances seront données par les équations linéaires suivantes :

$$R_{pi} = R_{sp} \int_0^{l_i} \frac{dx}{b} = R_{sp} \frac{l_i}{b} \quad (\text{III.24})$$

avec  $l_i$  : la longueur de la bande polluée  $i = 2, 4, 6$  ;  
 $b$  : la largeur de la bande polluée.

### III.2.3.2. Eléments du circuit électrique équivalent de la zone propre

En se basant sur une étude antérieure [6], l'impédance équivalente de la zone propre possède en plus du caractère capacitif, un caractère résistif non négligeable. En effet, nous pouvons représenter une bande propre par une résistance et une capacité en parallèle.

III.2.3.2.1. Résistance  $R_{0i}$ :

La largeur de la surface propre est considérée égale à celle de la zone polluée [6]. Ceci se justifie par le fait que le champ se concentre dans l'endroit délimité par les différentes couches de pollution. Dans ces conditions, les résistances  $R_{0i}$  des zones propres, sont formulées par :

$$R_{0i} = R_{0s} \frac{l_i}{b} \quad (\text{III.25})$$

avec: 
$$R_{0s} = \frac{1}{e\gamma} \quad (\text{III.26})$$

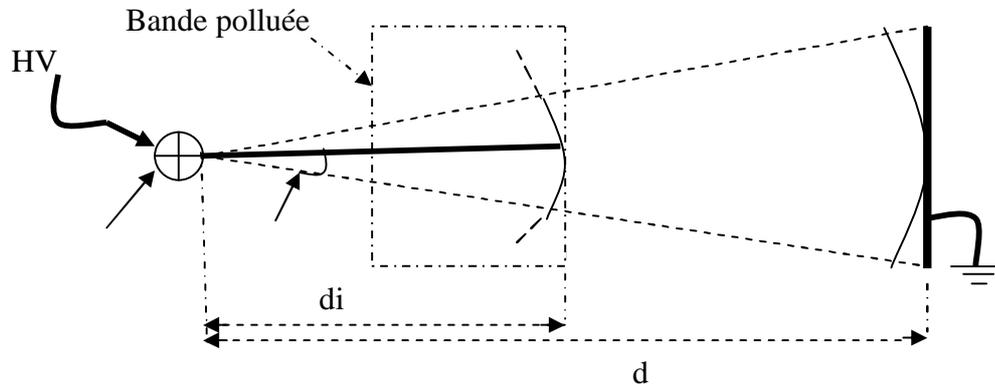
- et
- : est la conductivité de la zone propre ;
  - e : épaisseur de la couche de la pollution ;
  - $l_i$  : la longueur de la bande propre  $i = 1, 3, 5$  ;
  - b : la largeur de la bande polluée.

III.2.3.2.2. Capacité  $C_{0i}$ :

Les capacités  $C_{0i}$  peuvent être obtenues en faisant une approximation sphérique simple [45 – 47, 51]. Pour cela, nous supposons que chaque  $C_{0i}$  est un condensateur formé par deux demi sphères concentriques, la demi sphère intérieure est de rayon  $d_i$ , et la demi sphère extérieure de rayon d (Fig. III.4). La distance séparant les deux sphères ; intérieure et extérieure, est (pour la capacité  $C_{0i}$ ) la distance entre l'électrode de terre et la pollution correspondante (côté de la pollution en face de l'électrode de terre).

La capacité vaut donc [47] :

$$C_{0i} = 2\pi\epsilon_0 \left( \frac{1}{\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d}} \right) \quad (\text{III.23})$$



**Figure III.4 : Approximation sphérique**

En considérant que le condensateur est en réalité formé par une portion plus petite et délimitée par un angle solide  $\bullet$  [47].

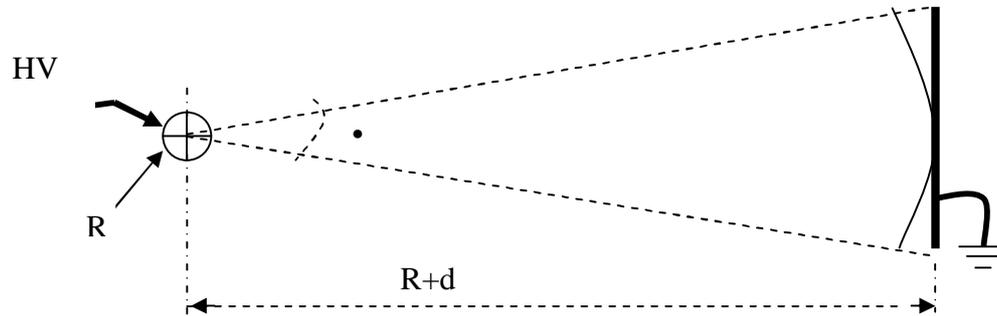
$$\Gamma = 2p(1 - \cos q) \quad (\text{III.28})$$

La capacité devient alors [45, 46] :

$$C_{0i} = \Gamma \epsilon_0 \left( \frac{d_i d}{d - d_i} \right) \quad (\text{III.29})$$

### III.2.3.3. Capacité des électrodes $C_0$

De même, la capacité  $C_0$  des électrodes peut être obtenue en faisant une approximation sphérique [49, 51]. Pour cela, nous supposons que les deux électrodes (haute tension et terre) sont deux sphères concentriques de rayons  $R$  (rayon de l'électrode haute tension) pour la sphère intérieure, et  $R+d$  pour la sphère extérieure;  $d$  étant la longueur de fuite. En se basant sur l'hypothèse de Beroual [47], la capacité  $C_0$  que nous avons prise correspond à la moitié de celle calculée à partir des deux sphères concentriques.



**Figure III.5 : Approximation sphérique du  $C_0$**

Dans ces conditions, cette capacité peut s'écrire [45] :

$$C_0 = 2\pi\epsilon_0 \left( \frac{1}{\frac{1}{R} - \frac{1}{d+R}} \right) \quad (\text{III.30})$$

Vu les démentions des électrodes, la capacité  $C_0$  est plutôt formée par une portion plus petite délimitée par un angle solide  $\Gamma_0$  .

$$\Gamma_0 = 2\rho(1 - \cos b) \quad (\text{III.31})$$

La capacité  $C_0$  devient alors [45] :

$$C_0 = \Gamma_0\epsilon_0 \left( \frac{R(R+d)}{d} \right) \quad (\text{III.32})$$

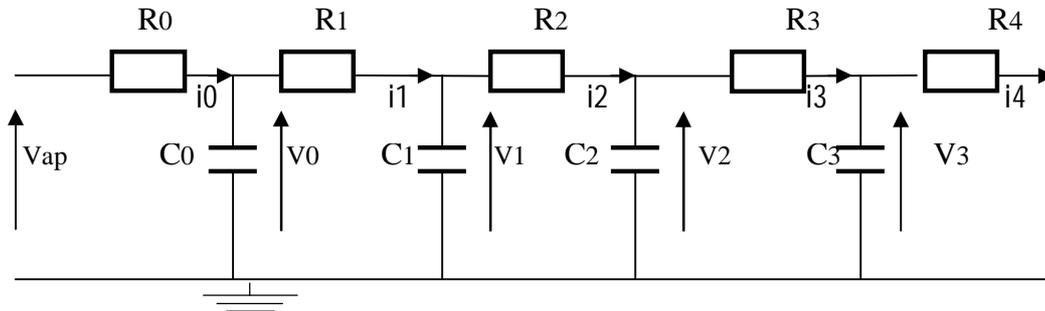
#### III.2.4. Mise en équations

Pour la commodité des calculs, le schéma électrique du modèle global de la figure (III. 3) est simplifié, en posant :

$$R1 = R_{p1}; \quad R2 = R_{o1} + R_{p2} \quad ; \quad R3 = R_{o2} + R_{p3}; \quad R4 = R_{o3}$$

$$C1 = C_{o1}; \quad C2 = C_{o2} \quad C_i = C_{o3}$$

Nous aurons le schéma de la figure (III.6)



**Figure III. 6 : Circuit électrique équivalent simplifiée**

En appliquant la loi de Kirchhoff au circuit à cinq mailles, nous obtenons pour chaque branche  $j$  :

$$i_c(t) = C \frac{\partial V_c}{\partial t} \quad (\text{III.33})$$

$$i_j(t) - i_{j-1}(t) = C_{j-1} \frac{\partial V_{j-1}}{\partial t} \quad (\text{III.34})$$

$$V_{j-1}(t) - V_j(t) = R_j i_j(t) \quad (\text{III.35})$$

les  $v_j(t)$  étant les tensions des nœuds  $j$  et les  $i_j(t)$  les courants des branches  $j$  ( $j=1, 2, 3, 4$ ).

En se basant sur les équations (III.34) et (III.35), nous pouvons obtenir le courant de la branche  $j = 0$  :

$$i_0(t) = \frac{v_{ap}(t) - v_0(t)}{R_0} \quad (\text{III.36})$$

Dans cette dernière équation la tension  $v_0(t)$  est inconnue. Pour la déterminer, nous écrivons alors les équations pour l'ensemble des mailles du circuit de la figure (III.6).

$$C_0 \frac{\partial V_0}{\partial t} = i_0(t) - i_1(t) \quad (\text{III.37})$$

$$C_1 \frac{\partial V_1}{\partial t} = i_1(t) - i_2(t) \quad (\text{III.38})$$

$$C_2 \frac{\partial V_2}{\partial t} = i_2(t) - i_3(t) \quad (\text{III.39})$$

$$C_3 \frac{\partial V_3}{\partial t} = i_3(t) - i_4(t) \quad (\text{III.40})$$

et

$$V_{ap}(t) - V_0(t) = R_0 i_1(t) \quad (\text{III.41})$$

$$V_0(t) - V_1(t) = R_1 i_1(t) \quad (\text{III.42})$$

$$V_1(t) - V_2(t) = R_2 i_2(t) \quad (\text{III.43})$$

$$V_2(t) - V_3(t) = R_3 i_3(t) \quad (\text{III.44})$$

$$V_3(t) = R_4 i_4(t) \quad (\text{III.45})$$

En éliminant les courants  $i_j(t)$  ( $j= 1, 2,3$  et  $4$ ) entre les équations (III.37) à (III.40) et (III.41) à (III.45), nous obtenons :

$$\frac{\partial V_0(t)}{\partial t} = -\left(\frac{1}{R_0 C_0} + \frac{1}{R_1 C_0}\right) V_0(t) + \frac{1}{R_1 C_0} V_1(t) + \frac{1}{R_0 C_0} V_{ap}(t) \quad (\text{III.46})$$

$$\frac{\partial V_1(t)}{\partial t} = \frac{1}{R_1 C_1} V_0(t) - \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2}\right) V_1(t) + \frac{1}{R_2 C_1} V_2(t) \quad (\text{III.47})$$

$$\frac{\partial V_2(t)}{\partial t} = \frac{1}{R_2 C_2} V_1(t) - \left(\frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_3 C_2}\right) V_2(t) + \frac{1}{R_3 C_2} V_3(t) \quad (\text{III.48})$$

$$\frac{\partial V_3(t)}{\partial t} = \frac{1}{R_3 C_3} V_2(t) - \left(\frac{1}{R_3 C_3} + \frac{1}{R_4 C_3}\right) V_3(t) \quad (\text{III.49})$$

Ces dernières forment un système d'équations différentielles du premier ordre à coefficients constants. Pour la résolution de ce dernier, nous l'écrivons sous une forme plus compacte.

En posant :

$$a_{11} = -\left(\frac{1}{R_0 C_0} + \frac{1}{R_1 C_0}\right) \quad ; \quad a_{12} = \frac{1}{R_1 C_2}$$

$$\begin{aligned}
 a_{21} &= \frac{1}{R_1 C_1} & ; & & a_{22} &= -\left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} \right) & ; & & a_{23} &= \frac{1}{R_2 C_1} \\
 a_{32} &= \frac{1}{R_2 C_2} & ; & & a_{33} &= -\left( \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_3 C_2} \right) & ; & & a_{34} &= \frac{1}{R_3 C_2} \\
 a_{43} &= \frac{1}{R_3 C_3} & ; & & a_{44} &= -\left( \frac{1}{R_3 C_3} + \frac{1}{R_4 C_3} \right) & ; & & b &= \frac{1}{R_0 C_0}
 \end{aligned}$$

nous pouvons maintenant écrire le système d'équations différentielles sous la forme matricielle suivante :

$$\frac{\partial V(t)}{\partial t} = AV(t) + BV_{ap}(t) \quad (\text{III.50})$$

avec

$$\frac{\partial V(t)}{\partial t} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_0(t)}{\partial t} \\ \frac{\partial V_1(t)}{\partial t} \\ \frac{\partial V_2(t)}{\partial t} \\ \frac{\partial V_3(t)}{\partial t} \end{bmatrix} ; \quad V(t) = \begin{bmatrix} V_0(t) \\ V_1(t) \\ V_2(t) \\ V_3(t) \end{bmatrix}$$

et

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} ; \quad B = \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Pour la modélisation, nous passons au concept d'état [51]. Pour cela, nous posons  $X(t) = V(t)$  et  $\frac{\partial X(t)}{\partial t} = \frac{\partial V(t)}{\partial t}$

Le vecteur  $X(t)$  étant proposé comme vecteur d'état. Si, le vecteur d'entrée est  $U(t) = V_{ap}(t)$  et le vecteur de sortie est  $Y(t)$ , nous pouvons alors écrire :

$$\frac{\partial X(t)}{\partial t} = AX(t) + BU(t) \quad (\text{III.51})$$

$$Y(t) = CX(t) + DU(t) \quad (\text{III.52})$$

Les matrices A, B, C et D sont les matrices d'état avec C représentant la matrice unité et D la matrice nulle [51].

En passant au domaine de Laplace, et en manipulant formellement les équations d'état (III.51) et (III.52), nous donnons :

$$X = (Is - A)^{-1} BU \quad (\text{III.53})$$

d'où l'équation de sortie est alors :

$$Y = [C(Is - A)^{-1} B - D]U \quad (\text{III.54})$$

L'expression entre crochets représente la matrice de transfert. La résolution des équations d'états nous donne les  $v_j(t)$ , et par la suite nous pouvons déterminer les courants  $i_j(t)$ .

### III.3. Conclusion

Le long de ce chapitre, nous avons mis au point un modèle statique basé sur un circuit électrique constitué d'éléments passifs. Utilisant des lois physiques, ce modèle, simule le comportement d'un isolateur naturellement pollué et développer suivant sa ligne de fuite. Il permet de calculer le courant de fuite pour différents paramètres électrogéométriques à savoir la largeur de la pollution, la polarité positive et négative de l'électrode de haute tension, et l'amplitude de la tension impulsionnelle.

La validation de notre modèle fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre ***IV***  
**Validation**

## IV.1. Introduction

Dans ce qui suit, nous allons valider notre modèle en comparant nos résultats à ceux obtenus expérimentalement par Guia [8]. Pour cela, nous allons considérer le même modèle utilisé par ce dernier, ainsi que les mêmes contraintes auxquelles est soumis le modèle. Ces dernières consistent en la largeur des bandes polluantes en papier aluminium, l'amplitude de la tension impulsionnelle de type choc de foudre ( $1.2/50 \mu\text{s}$ ) et la polarité de l'électrode active.

Nous nous intéressons spécialement, à l'évolution du courant de fuite, sous l'influence des deux paramètres, la tension et la largeur de la pollution. Nous traçons les courbes du courant de fuite en fonction de la tension pour chaque largeur de la bande de pollution, puis en fonction de la largeur de la bande de pollution pour chaque niveau de tension et cela pour les deux polarités. Enfin, nous traçons, pour chaque polarité, les deux courbes du courant en fonction de la tension et de même en fonction de la largeur de la pollution.

Pour la simulation, nous avons pris les valeurs suivantes :

§ Epaisseur de la couche de pollution  $e = 2.5 \mu\text{m}$  ;

§ La permittivité  $\epsilon_o = 8,85 * 10^{-12}$  ;

§ La résistivité de l'Aluminium  $\rho = 0.036 \mu\Omega \cdot \text{m}$  ;

§ La conductivité de la bande propre  $\sigma = 30 \text{ nS}$ .

## IV.2. Courant de fuite

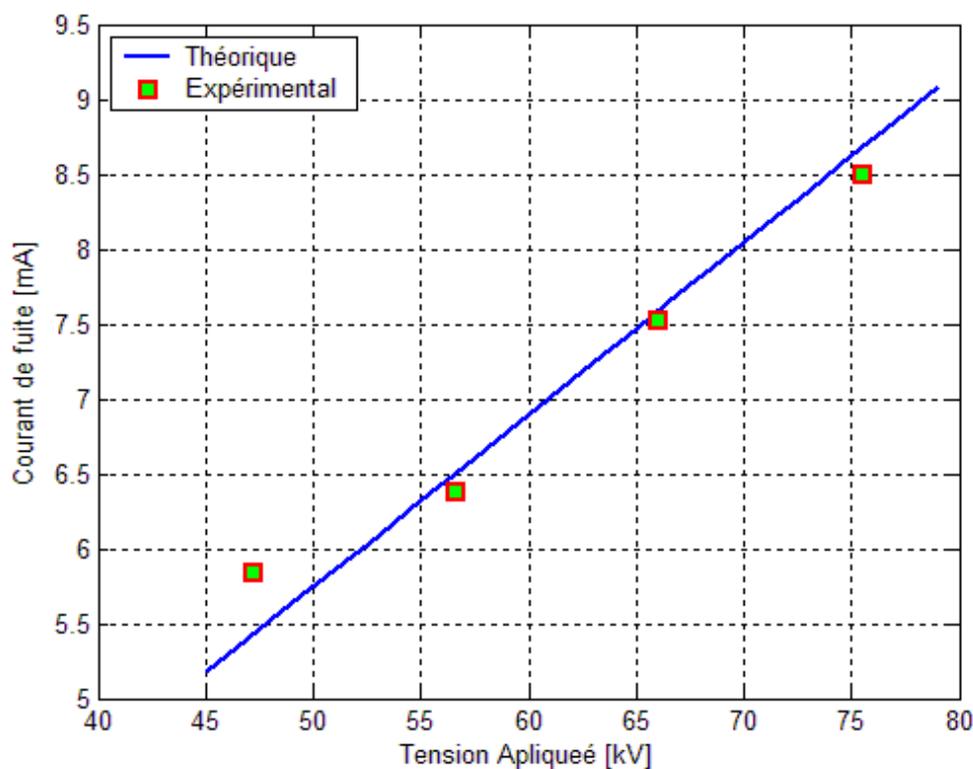
Les niveaux de tension choisis sont :  $0.5U_{0\%}$  ,  $0.6U_{0\%}$  ,  $0.7U_{0\%}$  et  $0.8U_{0\%}$  . Par ailleurs, les largeurs des bandes en papier aluminium que nous avons adoptées et les tensions  $U_{0\%}$  correspondantes sont comme suites :

Largeur de la pollution (cm)		1	2	4	6	8	16	32
$U_{0\%}$ (kV) polarité positive		94.4	87.5	94	76	100	88.7	101
$U_{0\%}$ (kV) polarité négative		104.4	99.5	102	94	120	100	83

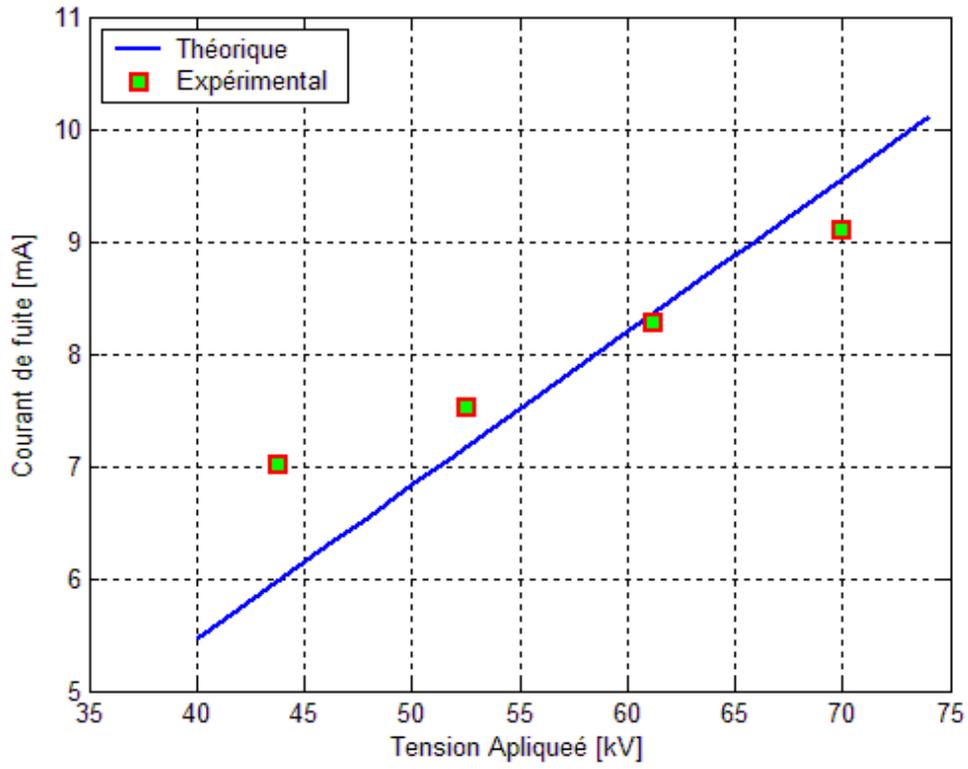
### IV.2.1. Influence de la tension appliquée

Les figures (Fig. IV.1) et (Fig. IV.2) illustrent la variation du courant de fuite en fonction de la tension, pour différentes largeurs de la pollution, ainsi que pour les deux polarités.

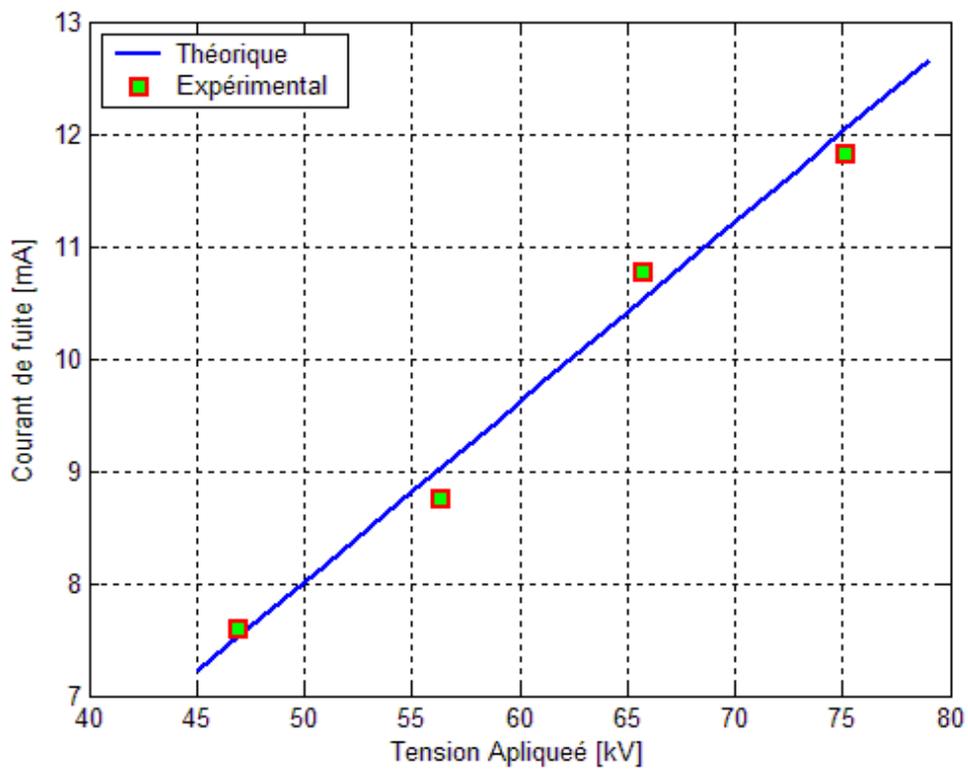
Nous remarquons que le courant de fuite augmente quasi-linéairement avec la tension appliquée. Notons que cette augmentation est relativement faible pour les petites largeurs de la pollution (inférieur à 8cm). Cependant, elle est plus accentuée pour les pollutions les plus larges et cela pour les deux polarités.



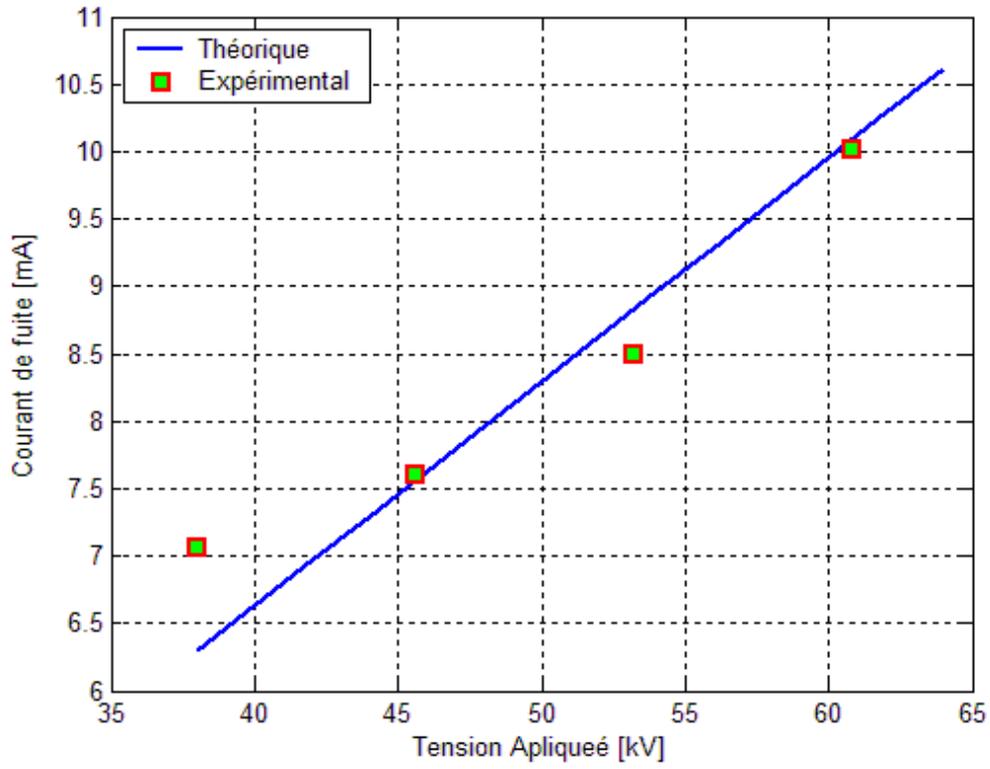
(a) largeur de la pollution : 1cm



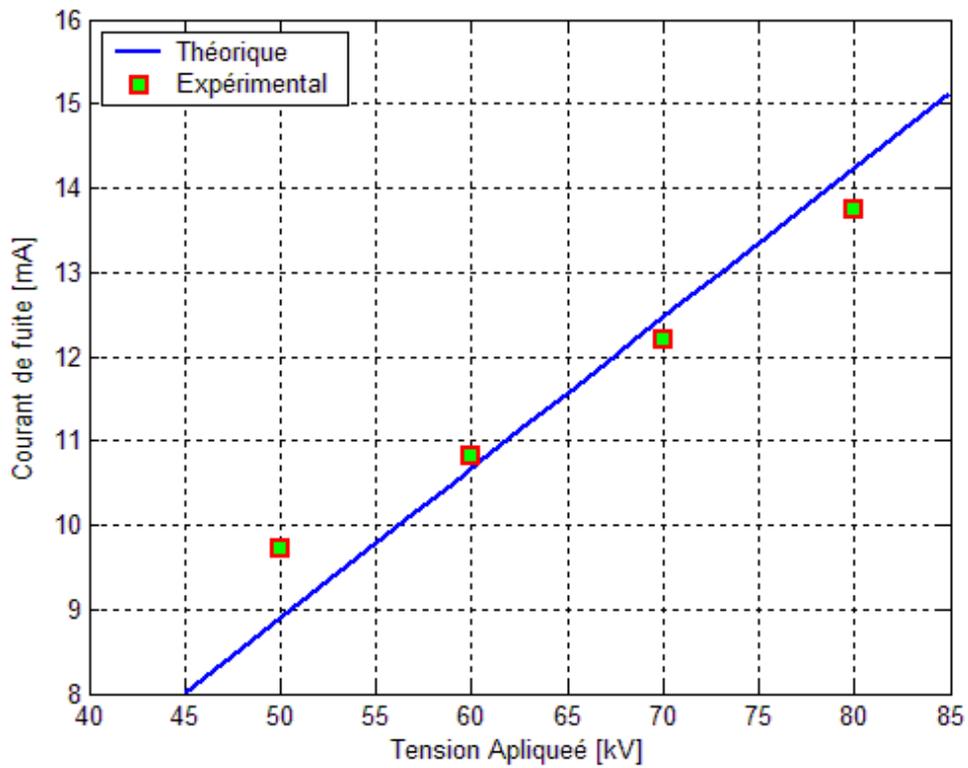
(b) largeur de la pöylutiöy : 10cm



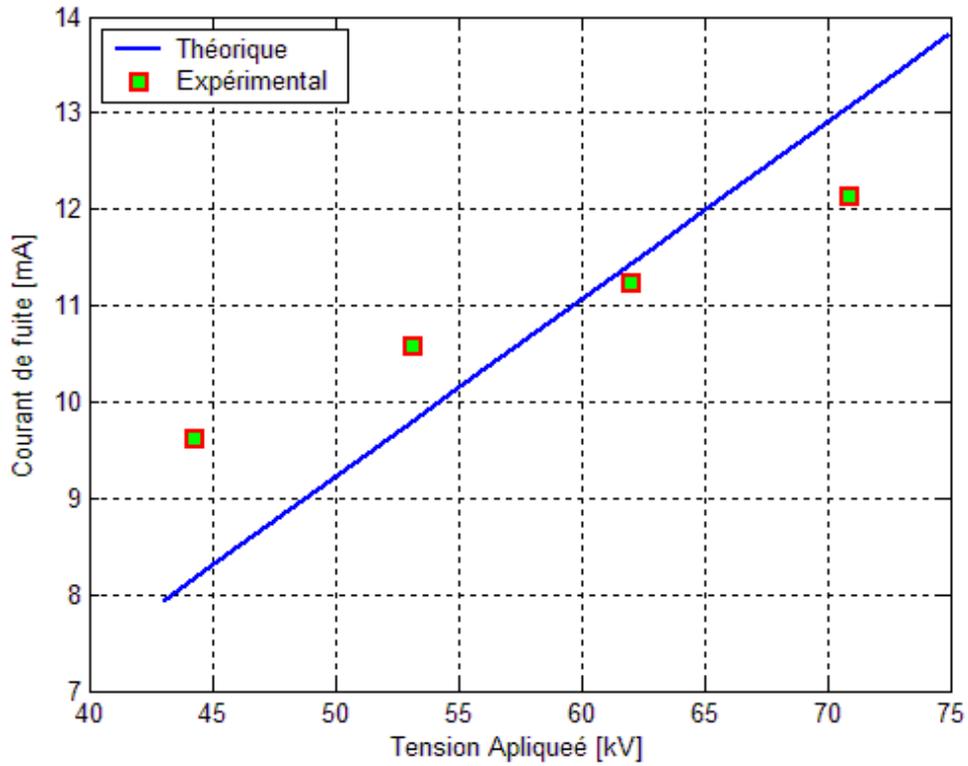
(c) largeur de la pöyütion : 4cm



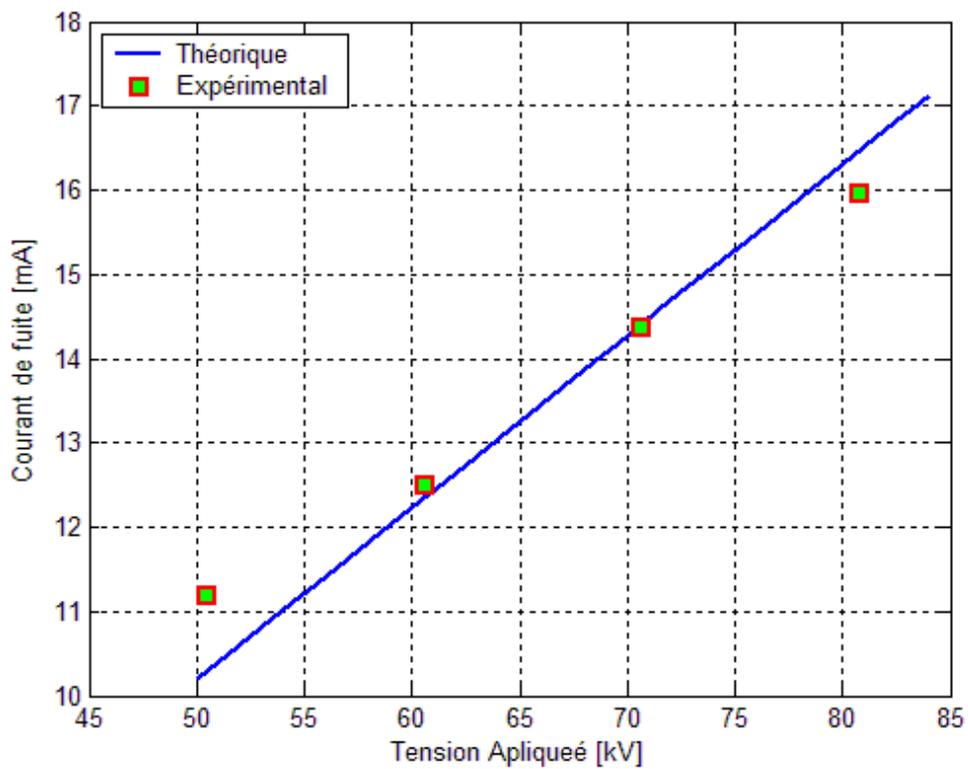
(d) largeur de la pollution : 6cm



(e) largeur de la pollution : 8cm

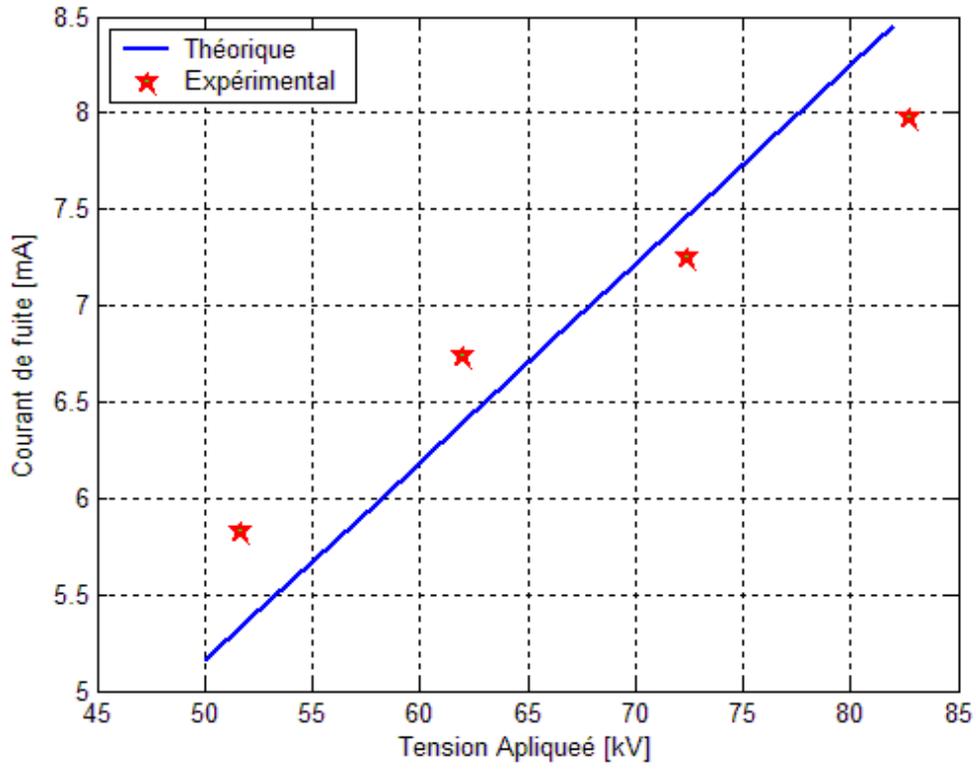


(f) largeur de la pollution : 16cm

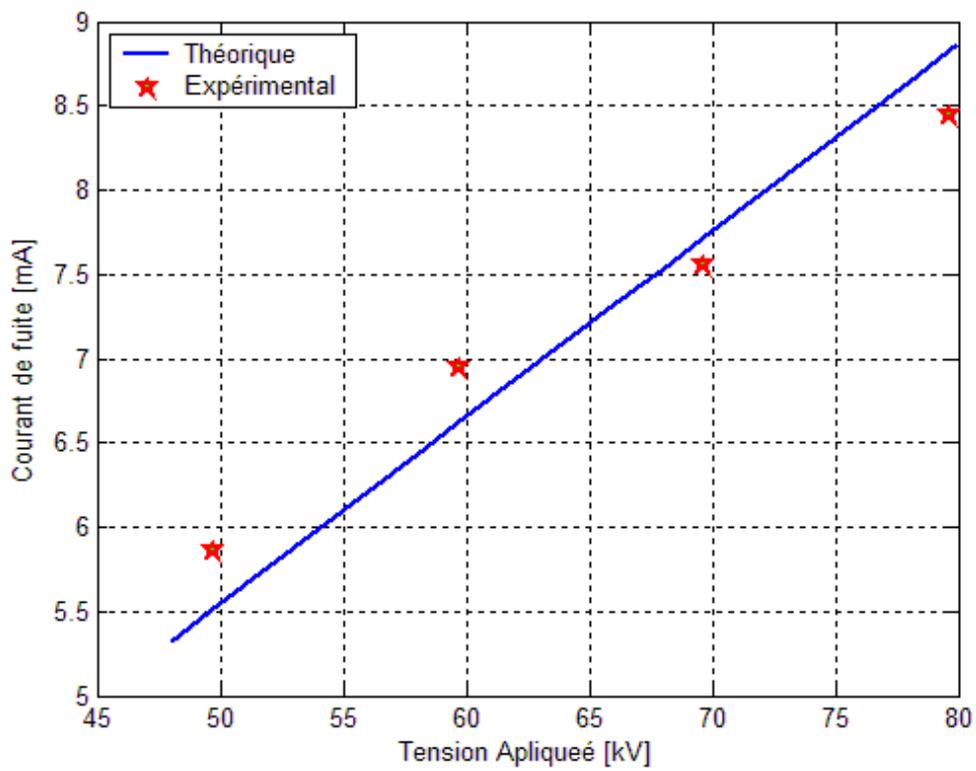


(g) largeur de la pollution : 32cm

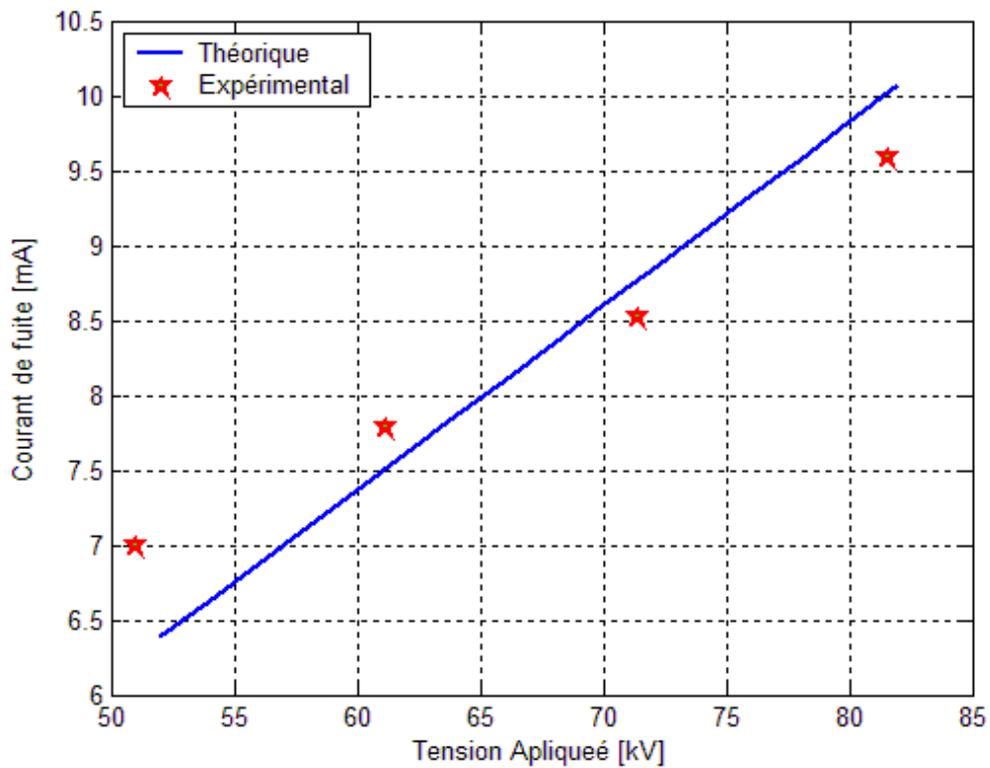
**Figure IV.1 : Courant de fuite en fonction de la tension appliqué en polarité positive**



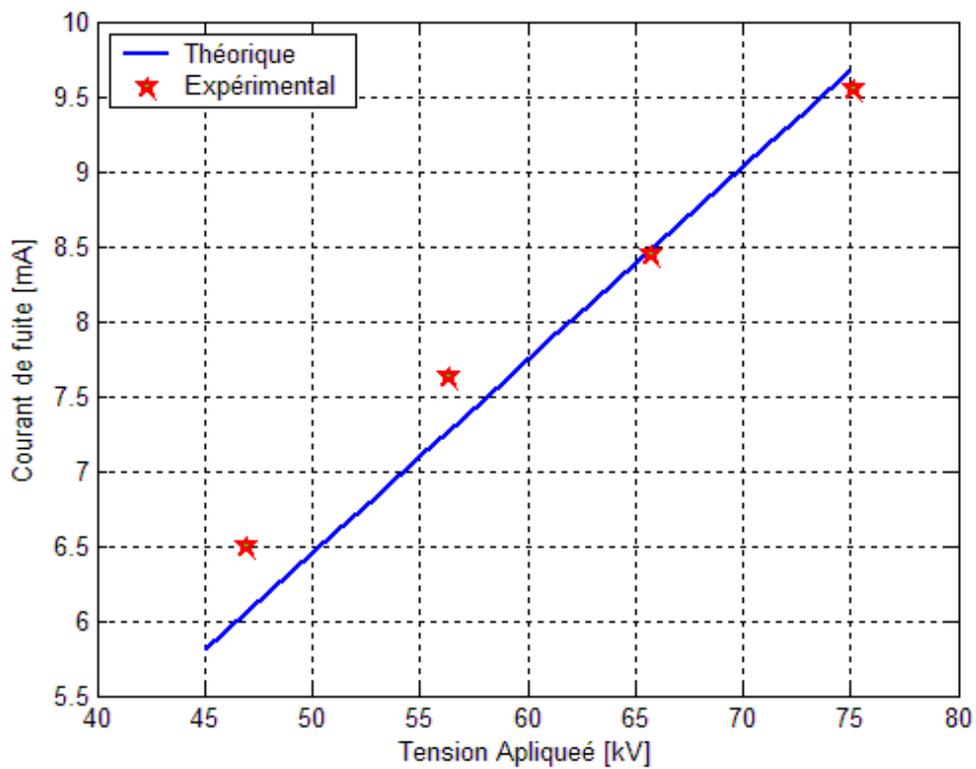
(a) largeur de la pollution : 1cm



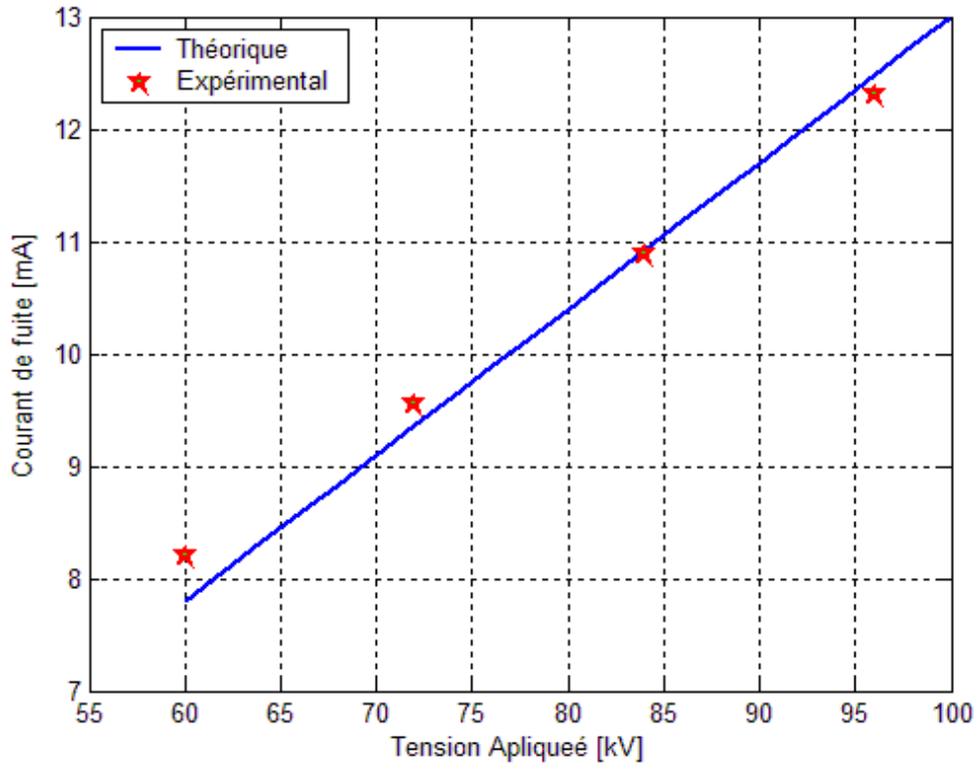
(b) largeur de la pollution : 2cm



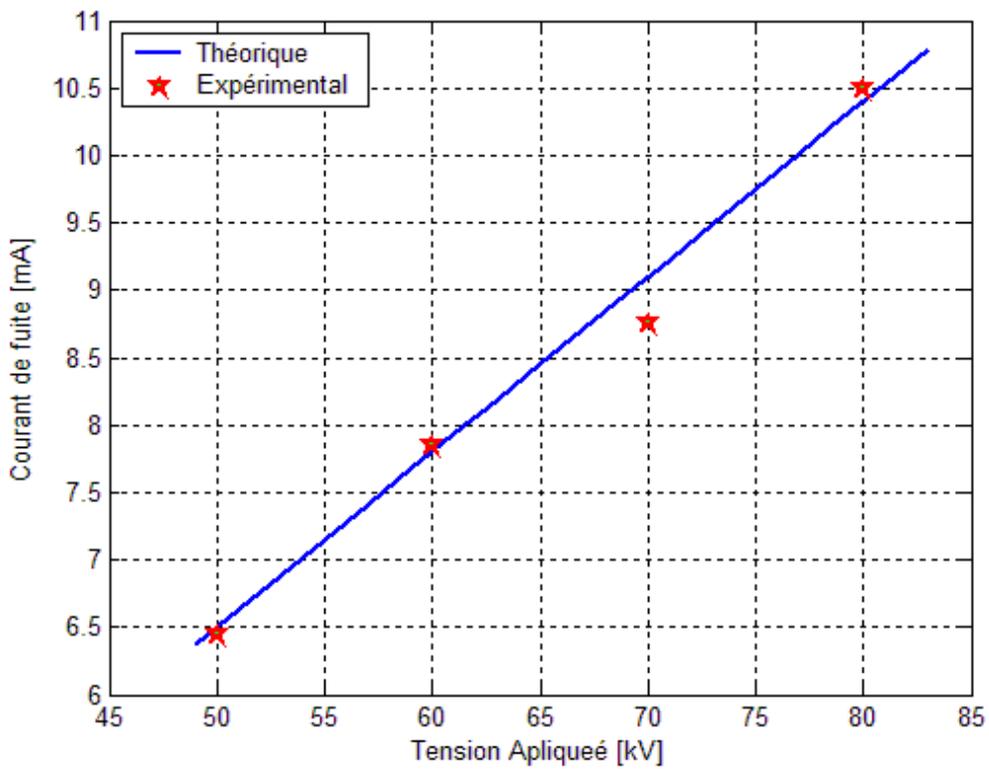
(c) largeur de la pollution : 4cm



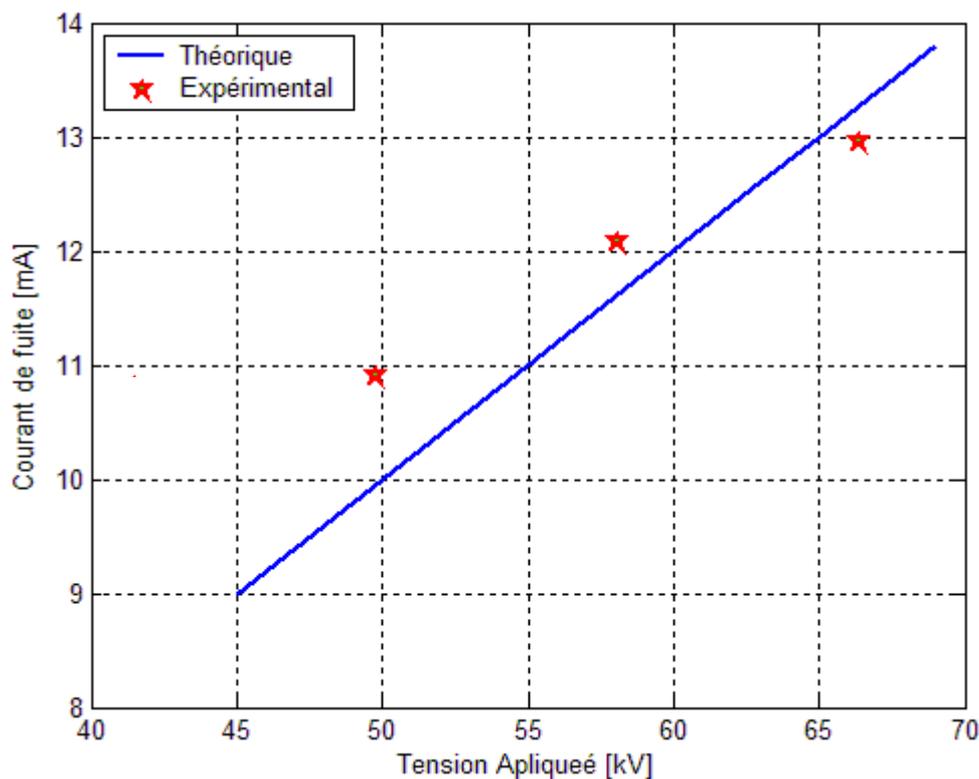
(d) largeur de la pollution : 6cm



(e) largeur de la pollution : 8cm



(f) largeur de la pollution : 16cm



(g) largeur de la pollution : 32cm

**Figure IV.2 : Courant de fuite en fonction de la tension appliqué en polarité négative**

L'analyse des caractéristiques des figures (IV.1) et (IV.2) montre que le modèle théorique proposé présente des résultats assez proches de ceux expérimentaux, et ce pour les deux polarités.

#### IV.2.2. Influence de la largeur de la pollution

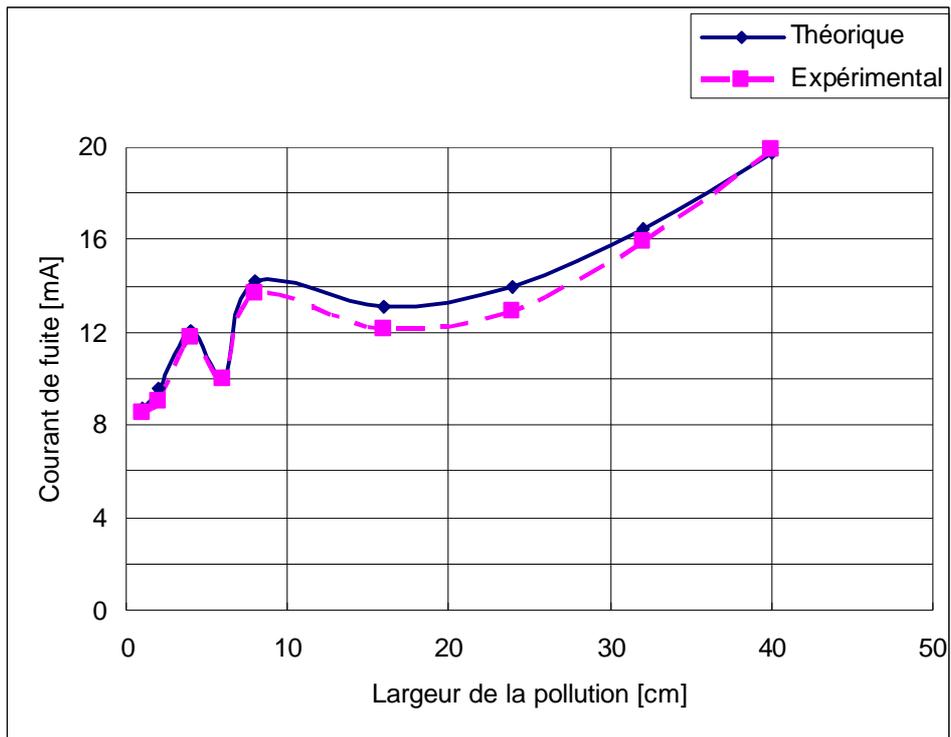
Pour illustrer la variation du courant de fuite en fonction de la largeur de la pollution, nous traçons, sur les figures (VI.3) et (VI.4), les courbes théoriques et celles expérimentales, pour différents niveaux de tension et pour les deux polarités.

Avec l'augmentation de la largeur des bandes en aluminium, le courant de fuite augmente pour les largeurs allant de 1 à 4cm, diminue pour 6cm, et augmente de nouveau.

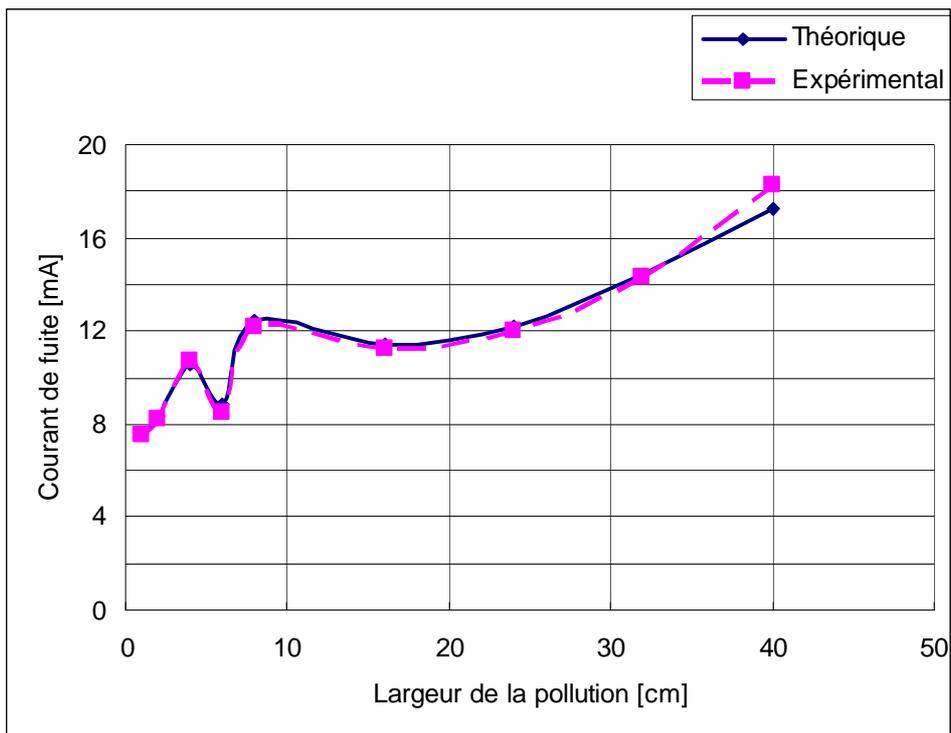
Nous remarquons également que l'accroissement du courant devient rapide pour une largeur de la bande de pollution supérieur à 24cm, et ce quelles que soient

la tension et la polarité. Cette augmentation du courant de fuite s'explique par l'affaiblissement de l'impédance totale entre électrodes.

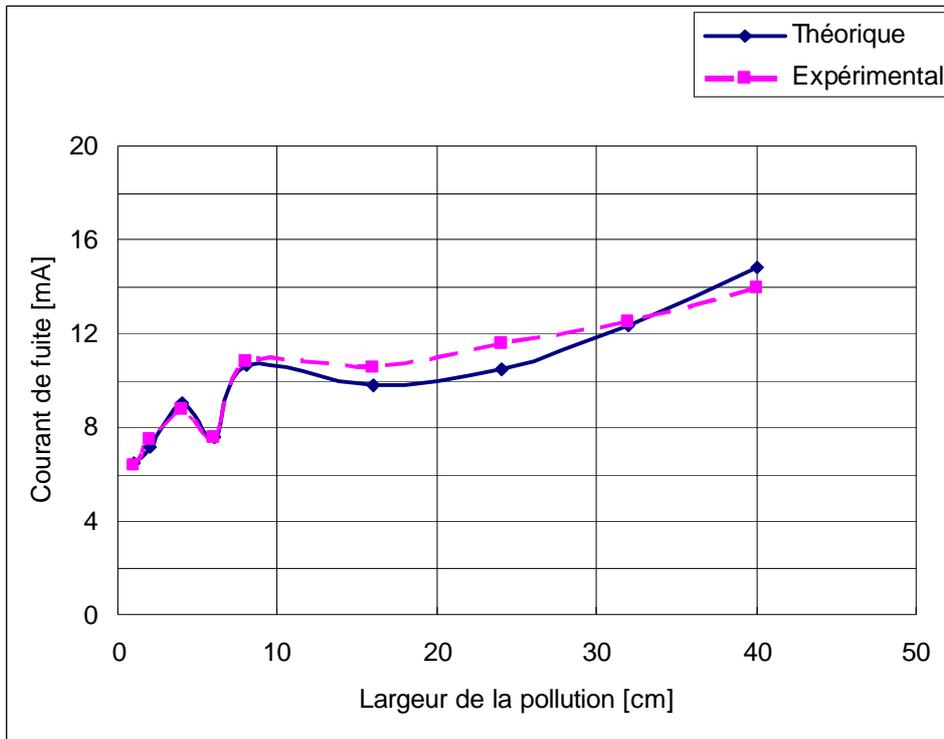
a / polarité positive



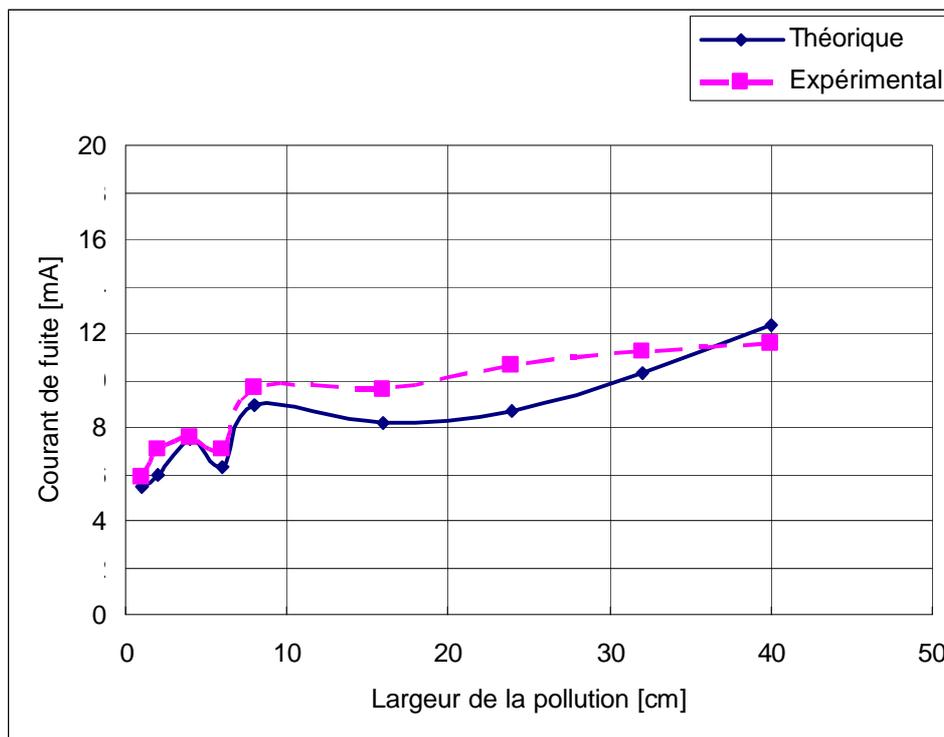
(a)



(b)



(c)

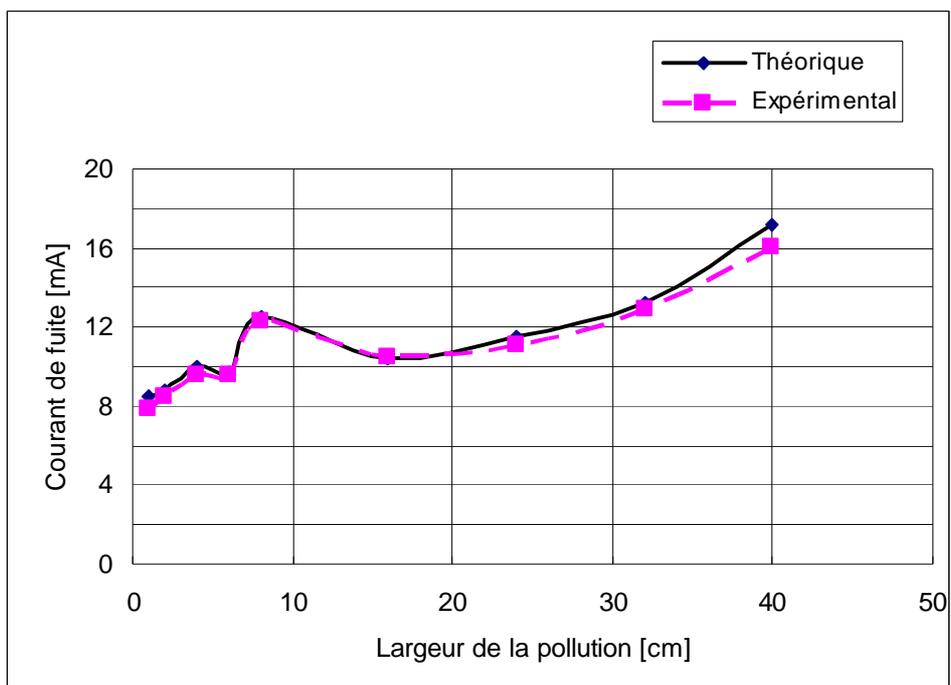


(d)

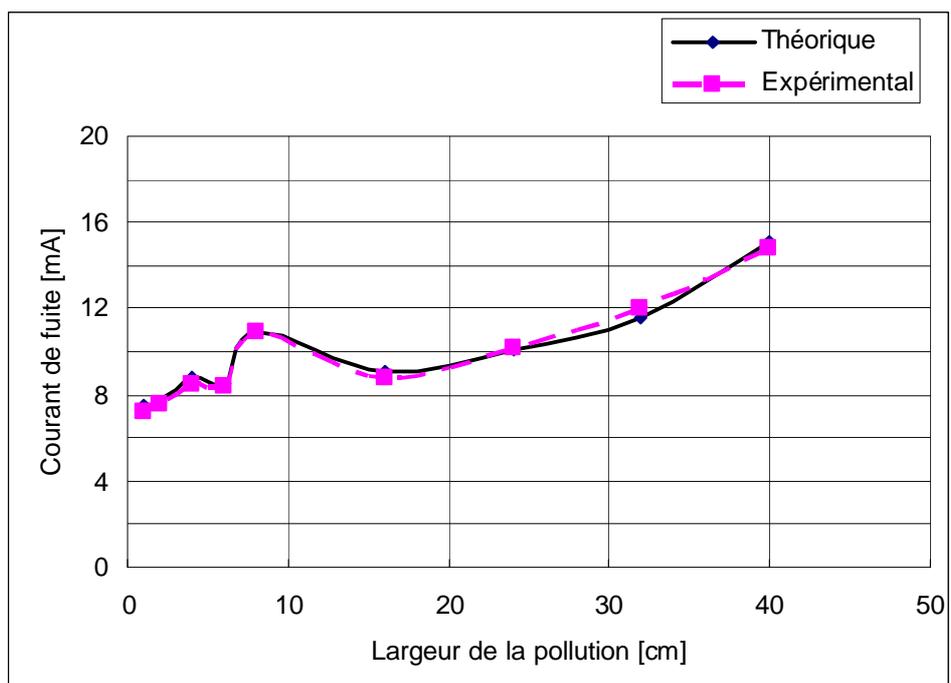
**Figure IV.3 : Courant de fuite en fonction de la largeur de pollution et en polarité positive pour :**

- (a) 0.8U<sub>0</sub>%    (b) 0.7U<sub>0</sub>%
- (c) 0.6U<sub>0</sub>%    (d) 0.5U<sub>0</sub>%

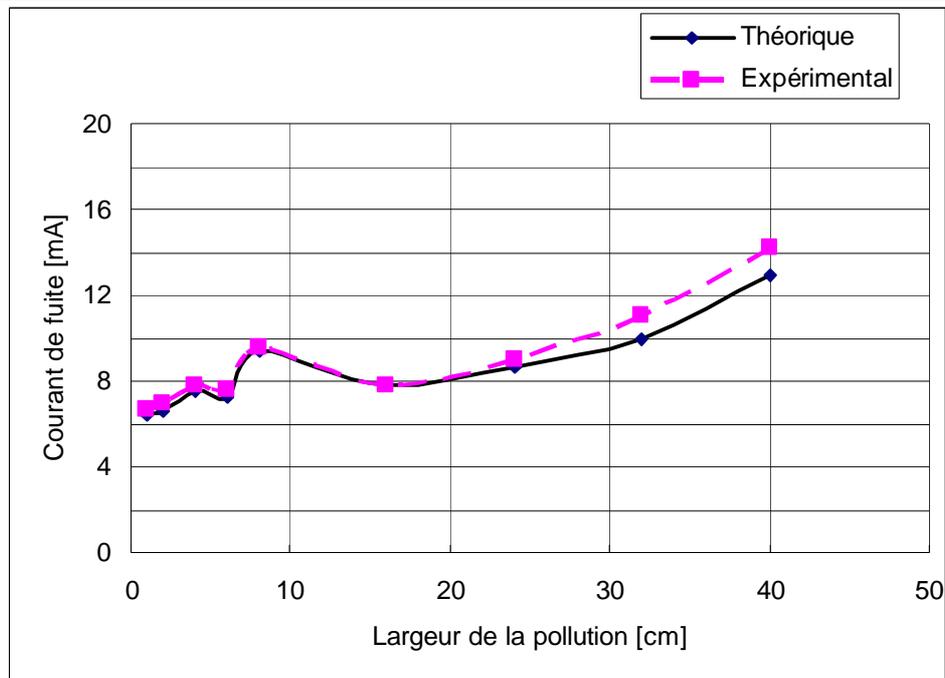
b - polarité négative



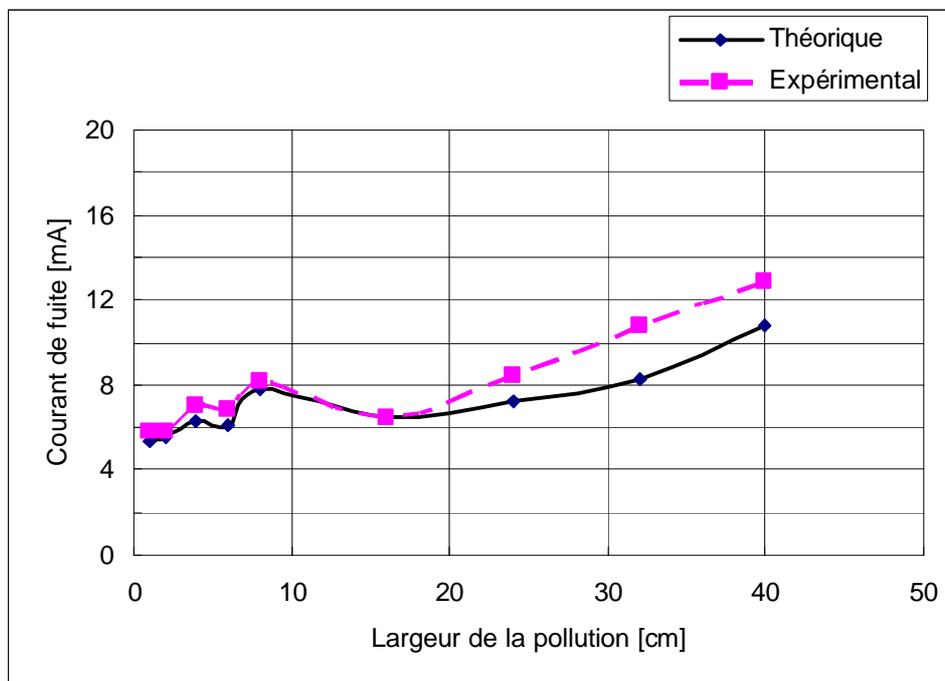
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure IV.4 : Courant de fuite en fonction de la largeur de pollution et en polarité négative pour :**

- (a) 0.8U<sub>0</sub>%    (b) 0.7U<sub>0</sub>%  
 (c) 0.6U<sub>0</sub>%    (d) 0.5U<sub>0</sub>%

Les caractéristiques des figures (IV.3) et (IV.4) montrent que le modèle proposé reflète le même comportement que celui expérimental. Cependant, une

légère différence est remarquée pour les largeurs élevées de la pollution (supérieur ou égale à 24cm) et les petites amplitudes de la tension ( $0.5U_0\%$ ).

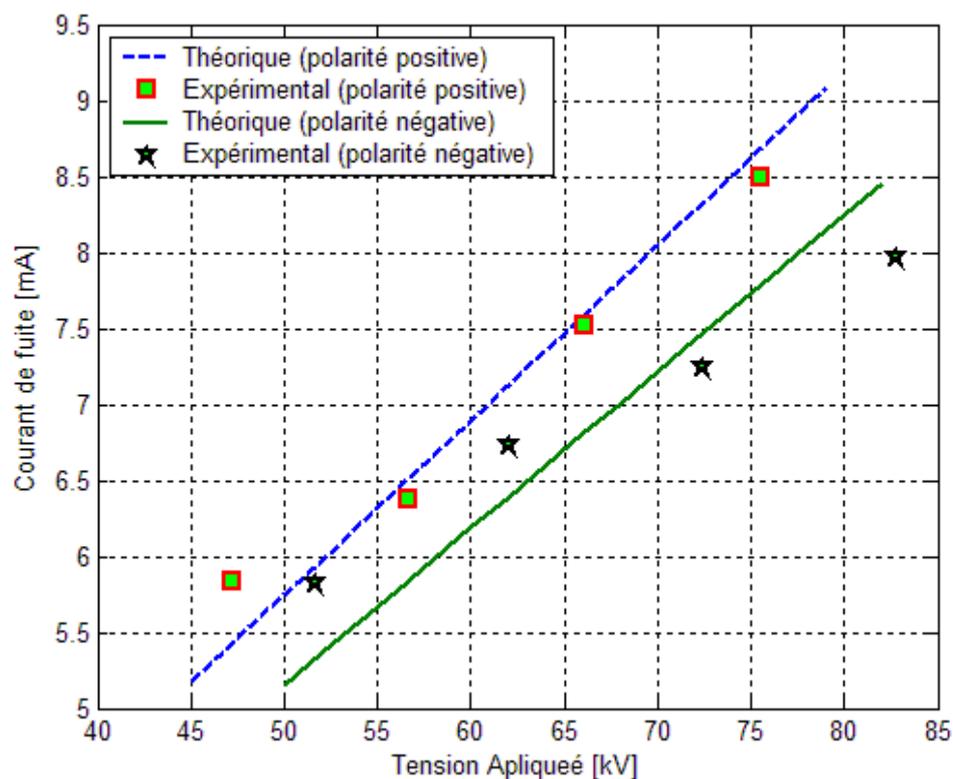
### IV.2.3 Influence de la polarité

L'influence de la polarité de la tension appliquée est incontournable, car elle a été remarquée par plusieurs auteurs [34], dans le cas des isolateurs pollués et même pour les diélectriques liquides. Dans une étude plus poussée, Renyu et Al [53] ont montré que l'influence de la polarité est liée au profil de l'isolateur; pour un isolateur simple et lisse, un arc négatif est plus stable qu'un arc positif.

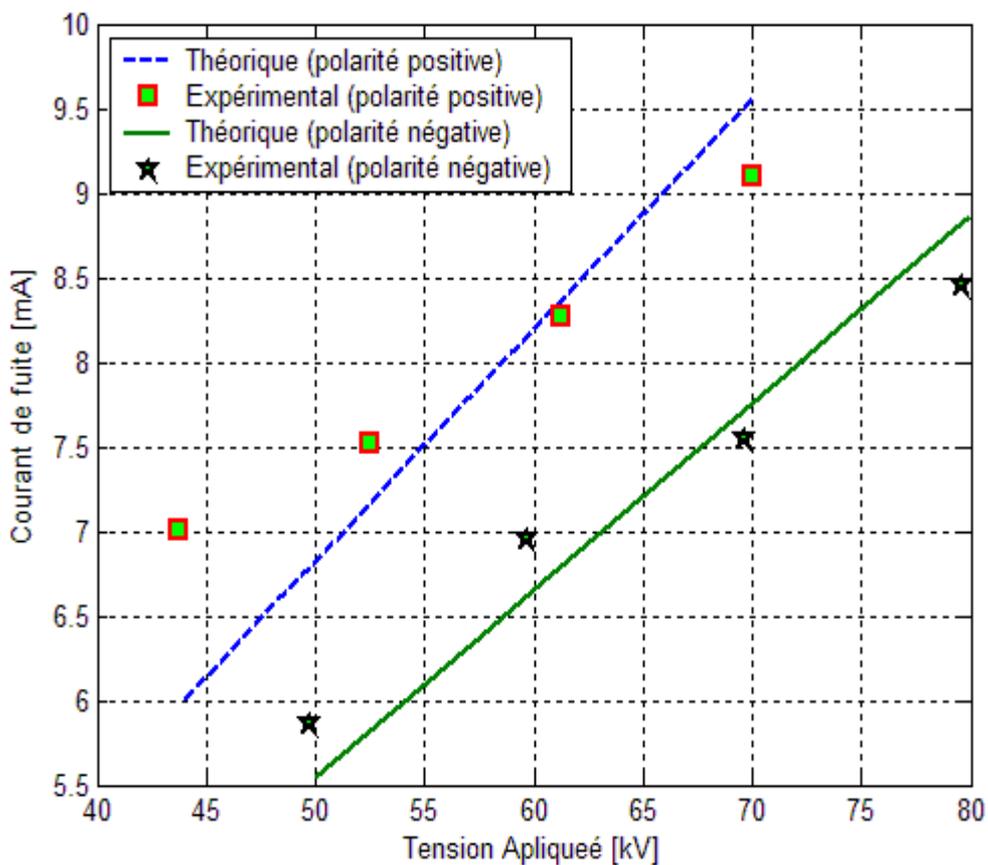
Pour étudier l'influence de la polarité sur le courant de fuite, nous avons tracé, sur les figures (IV.5) et (IV.6), ce dernier en fonction de la tension appliquée, puis en fonction de la largeur de la couche de pollution, pour les deux polarités.

Ces caractéristiques obtenues montrent bien que le courant de fuite est plus important dans le cas d'une polarité positive.

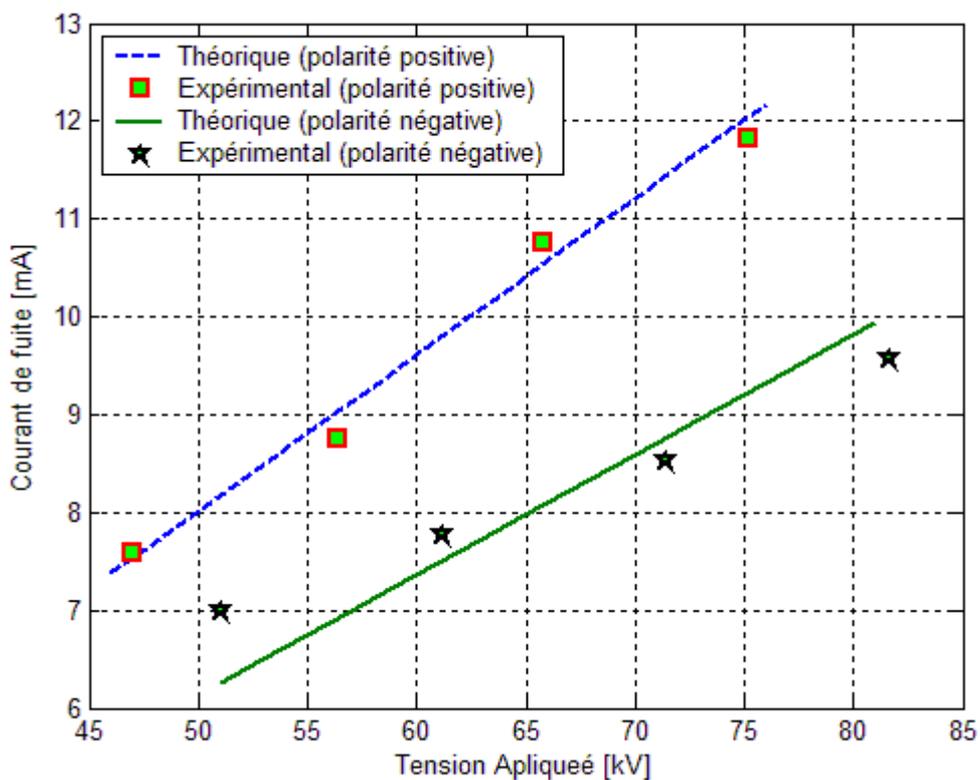
#### a- Courant de fuite en fonction de la tension appliquée



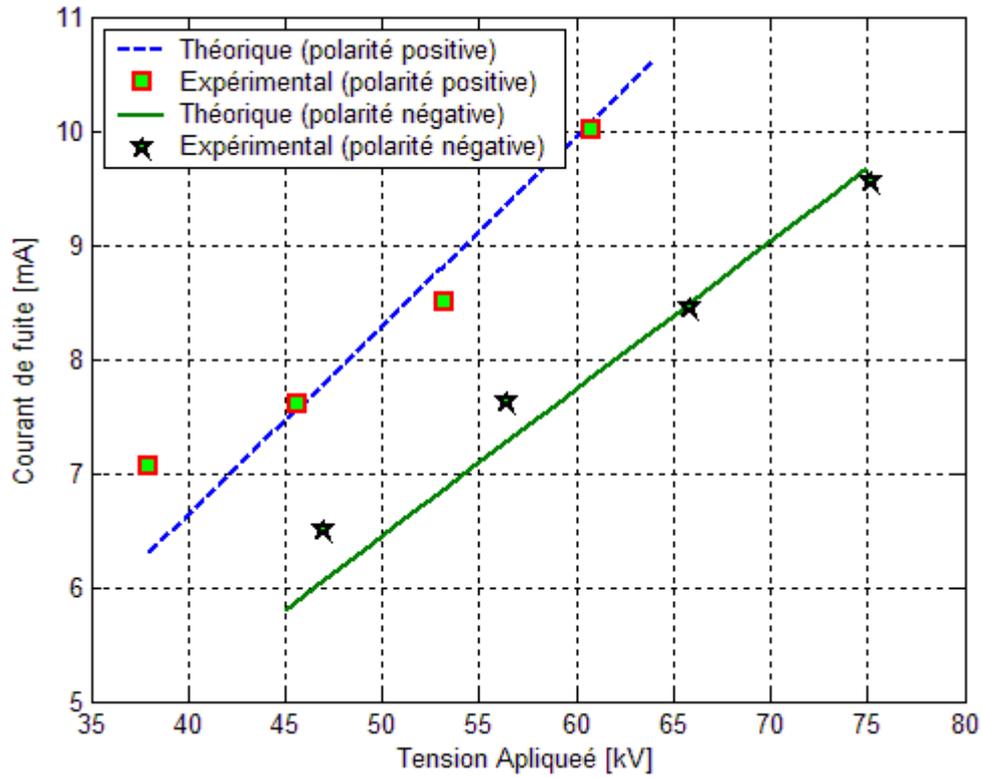
(a) largeur de la pollution : 1cm



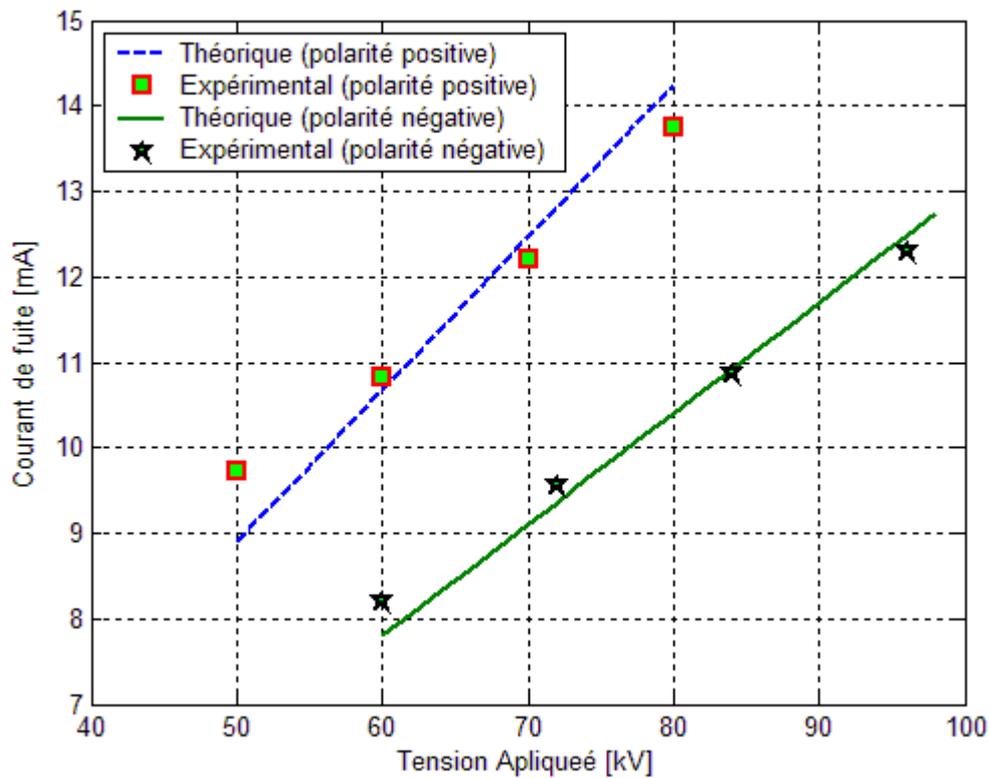
(b) largeur de la pollution : 2cm



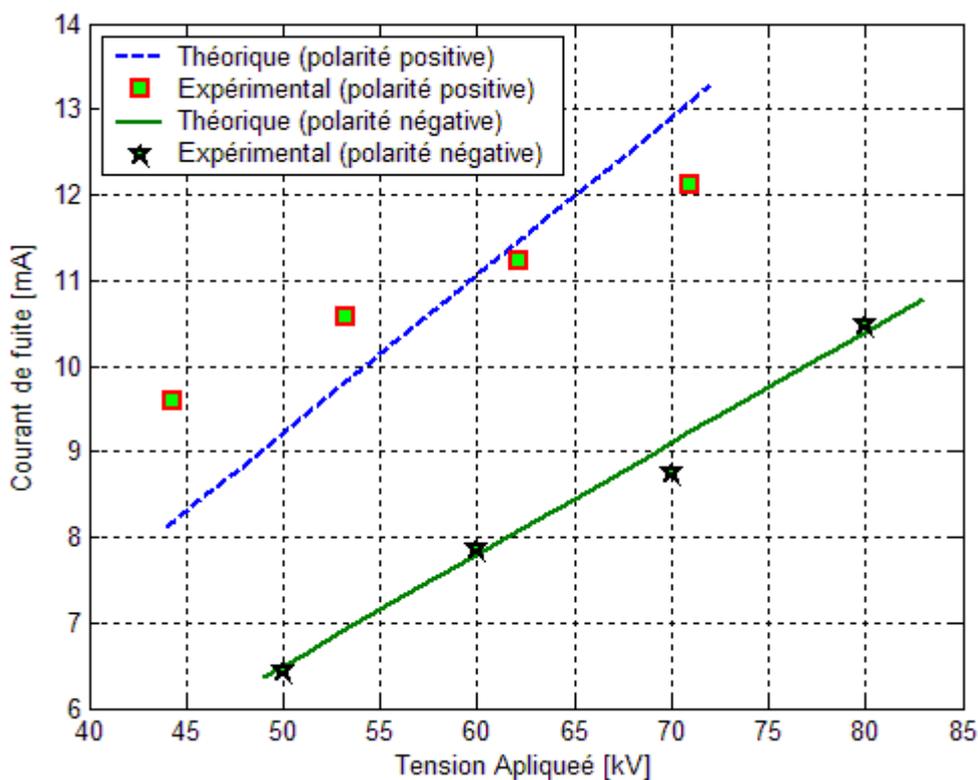
(c) largeur de la pollution : 4cm



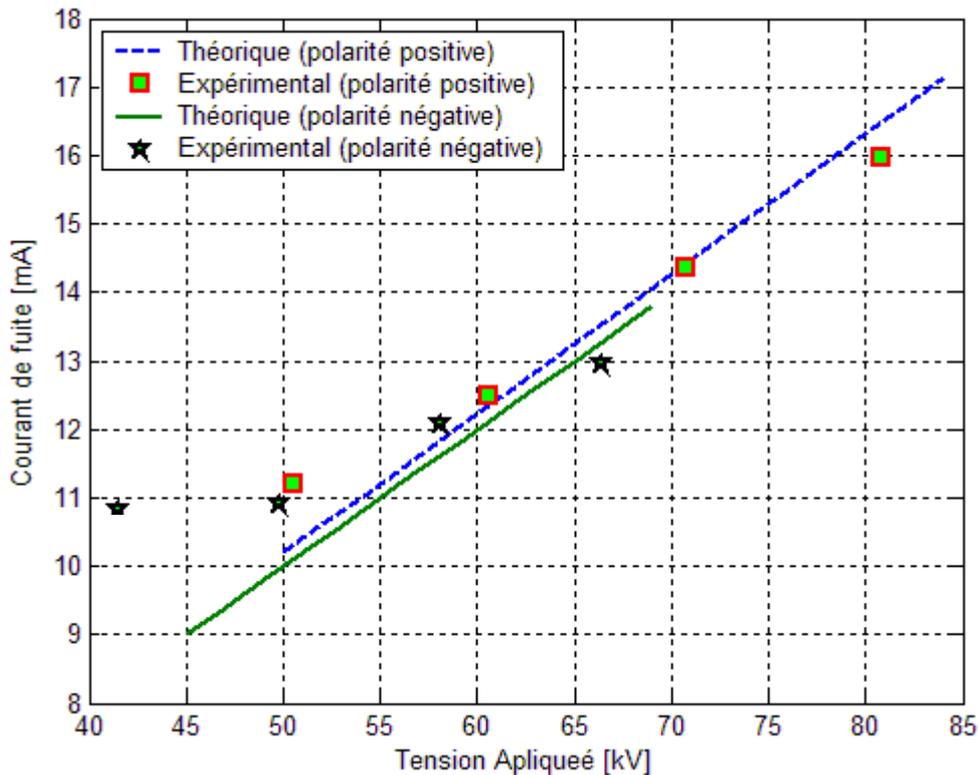
(d) largeur de la pollution : 6cm



(e) largeur de la pollution : 8cm



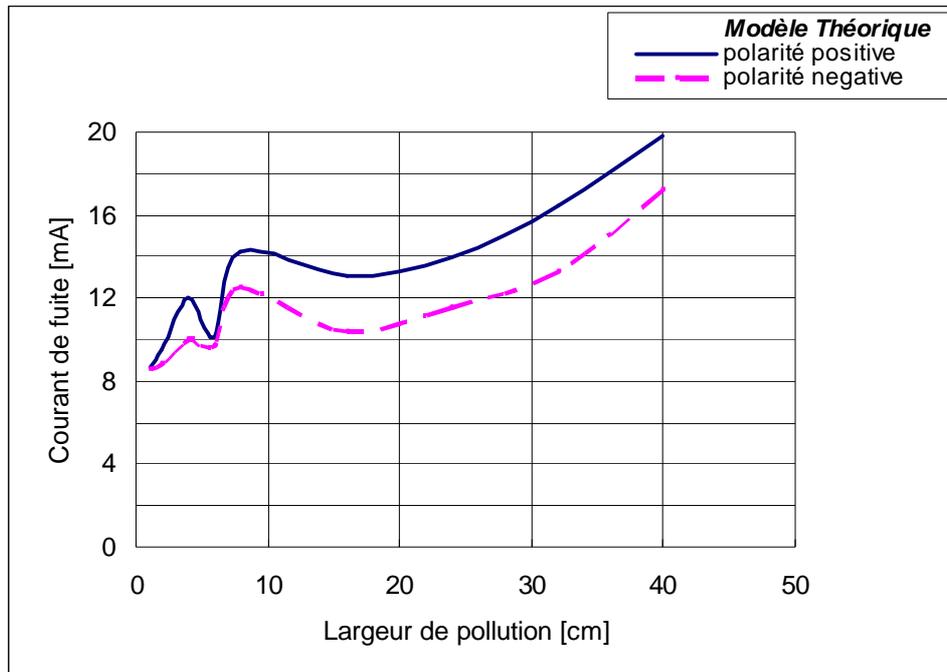
(f) largeur de la pollution : 16cm



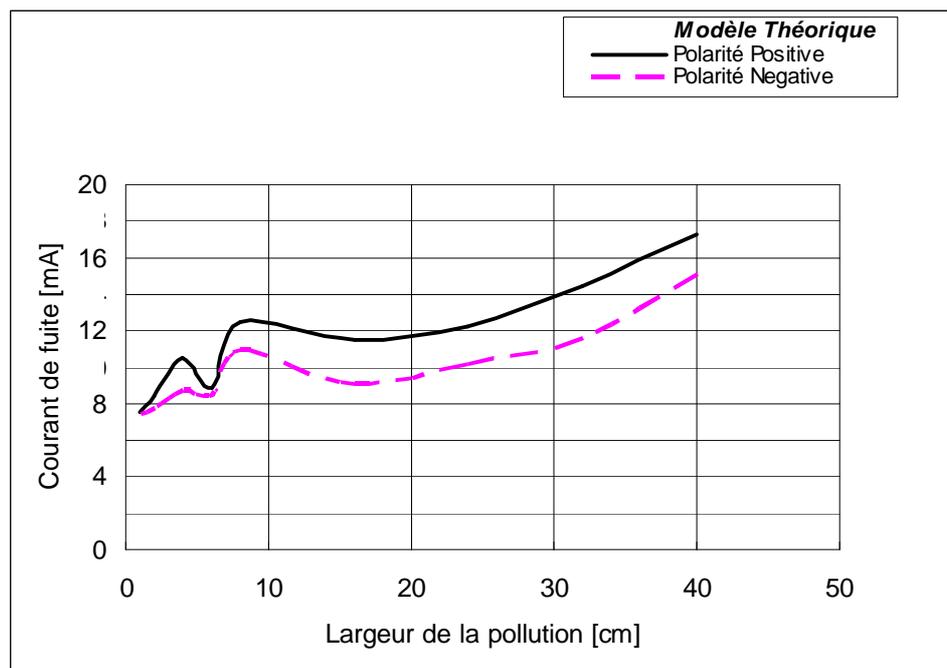
(g) largeur de la pollution : 32cm

**Figure IV.5 : Courant de fuite en fonction de la tension appliqué pour les deux polarités**

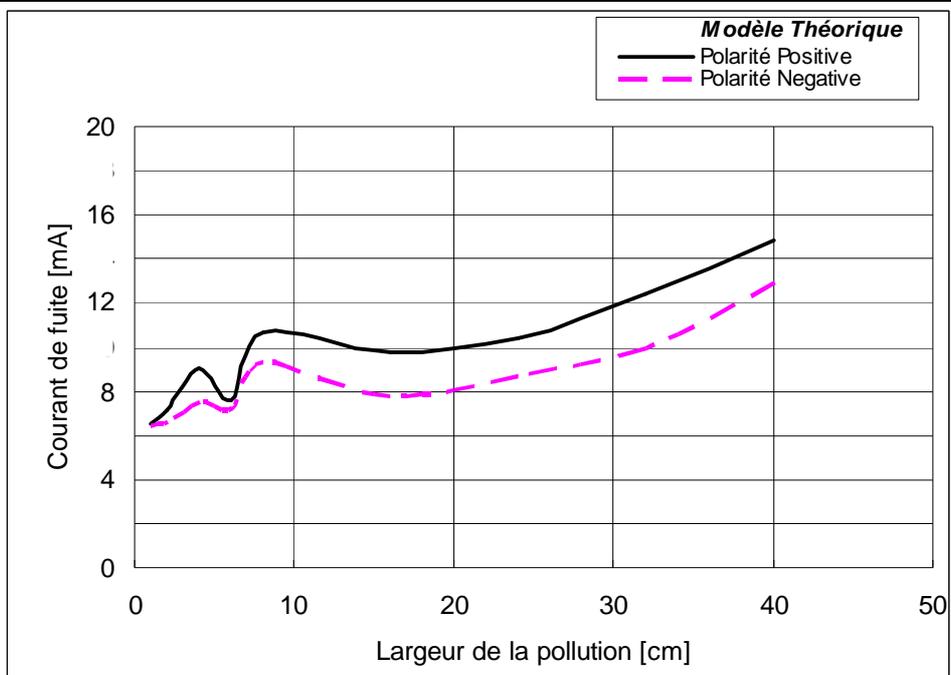
b- Courant de fuite en fonction de la largeur de la pollution



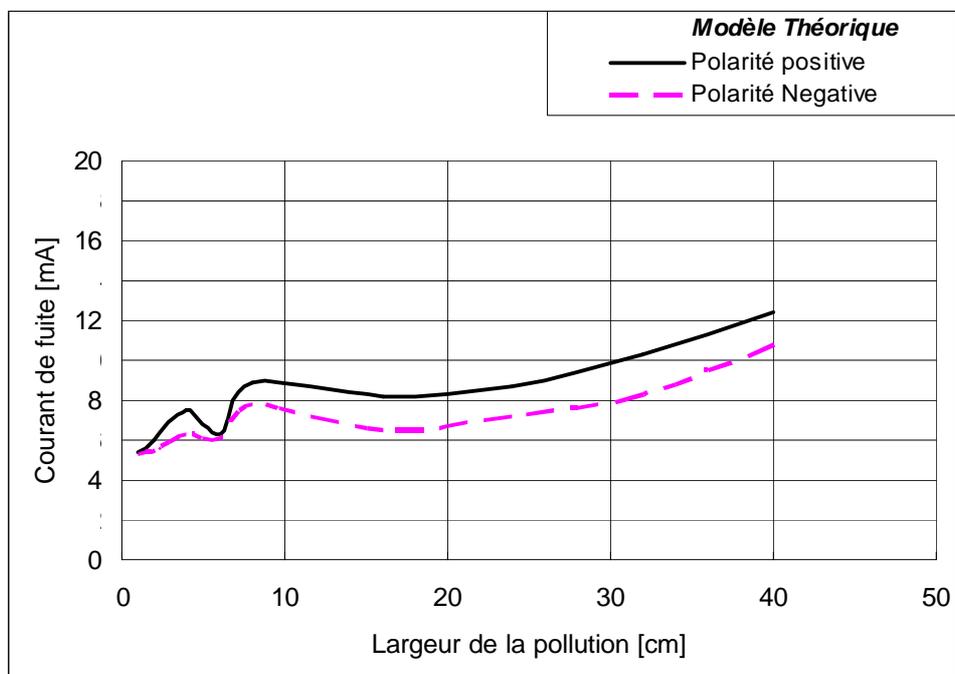
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure IV.6 : Courant de fuite en fonction de la largeur de pollution et pour niveaux de tension**

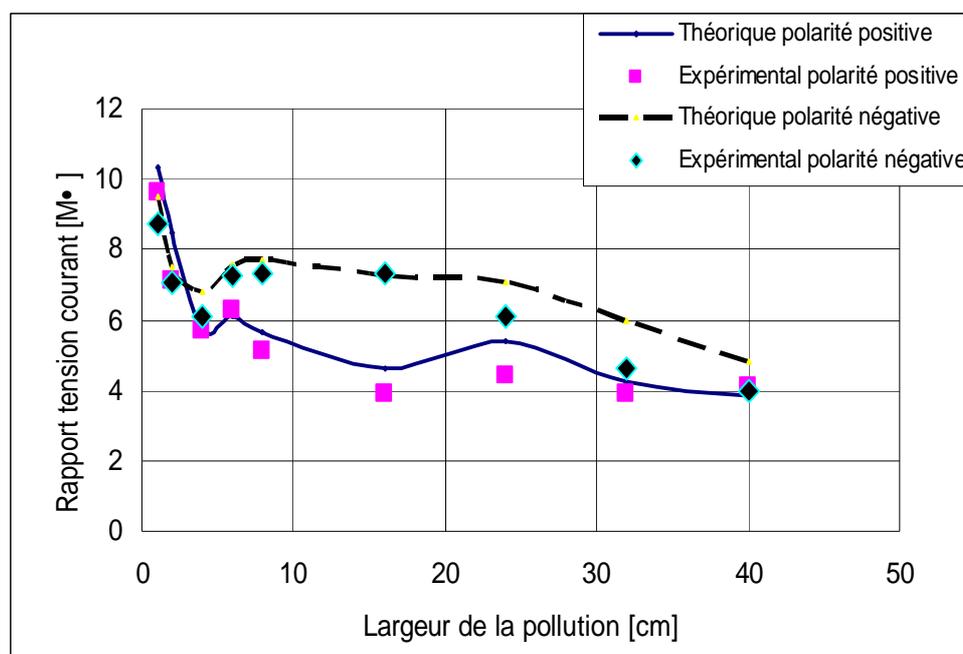
- (a) 0.8 U<sub>0%</sub>      (b) 0.7U<sub>0%</sub>
- (c) 0.6 U<sub>0%</sub>      (d) 0.5U<sub>0%</sub>

### IV.3 Rapport tension/courant

Pour une largeur des bandes en papier en aluminium donnée, le rapport tension/courant représente l'inverse de la pente de chaque caractéristique illustrant la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée.

Pour une polarité donnée, nous constatons que l'augmentation de la largeur de la pollution engendre une diminution du rapport tension/courant.

Pour les largeurs élevées (supérieur à 8cm), ce rapport est plus important en polarité négative qu'en polarité positive. Toutefois, pour les faibles largeurs, les rapports obtenus pour les deux polarités sont très proches.



**Figure IV.7 : Rapport tension courant en fonction de la largeur de pollution pour les deux polarités**

## IV.4 Conclusion

A l'issue de cette étude, nous pouvons retenir les conclusions suivantes :

- © L'amplitude du courant de fuite croît d'une manière linéaire avec la tension appliquée, et elle est plus importante dans le cas d'une polarité positive.
- © En fonction de la largeur des bandes de pollution, l'amplitude du courant de fuite augmente, puis diminue pour atteindre un minimum, ensuite elle augmente de nouveau. En outre, il existe une limite (24cm) à partir de laquelle le courant de fuite croît rapidement.
- © L'augmentation de la largeur de la couche polluante engendre une diminution de rapport tension/courant. Pour des largeurs élevées de la pollution, ce rapport est plus important en polarité négative.

L'analyse des courbes obtenues montre bien que les résultats de simulation concordent parfaitement avec ceux obtenus expérimentalement par Guia [8]. Ce qui confirme la validité de notre modèle.

# Conclusion Générale

## Conclusion générale

Notre étude nous a permis, dans un premier temps, de mieux comprendre le comportement d'une surface isolante non uniformément polluée, lorsqu'une tension impulsionnelle lui est appliquée. En effet, et en utilisant des circuits électriques équivalents, nous avons mis au point un modèle théorique permettant de simuler le comportement d'un isolateur naturellement pollué, développé suivant sa ligne de fuite. Pour cela nous nous sommes intéressés à l'évolution du courant de fuite en fonction du niveau de la tension impulsionnelle (type choc de foudre) appliquée, ainsi qu'en fonction de la largeur de la couche polluante, et ce pour les deux polarités de l'électrode active (de HT).

Il ressort de notre étude les conclusions suivantes :

- © L'amplitude du courant de fuite croît d'une manière linéaire avec la tension appliquée.
- © L'amplitude du courant de fuite est plus importante dans le cas d'une polarité positive qu'en polarité négative.
- © Avec l'augmentation de la largeur de la pollution, le courant de fuite augmente dans un premier lieu, diminue pour atteindre un minimum, puis augmente de nouveau. En outre, il existe une limite (24cm) à partir de laquelle le courant de fuite croît rapidement.
- © La largeur de la couche polluante joue un rôle très important dans le rapport tension/courant. L'augmentation de la largeur engendre une diminution du rapport. Ce dernier est plus important en polarité négative, notamment pour les grandes largeurs de pollution.

L'analyse des courbes obtenues montre bien que les résultats de simulation concordent parfaitement avec ceux obtenus expérimentalement par Guia. Ce qui confirme la validité de notre modèle.

Le modèle de simulation que nous avons élaboré constitue un outil appréciable de prédiction du comportement d'un isolateur pollué, soumis à une tension impulsionnelle. Cependant, notre modèle statique gagnera à être étendu à une étude dynamique des décharges électriques.

# Références Bibliographiques

## Bibliographie

- [1] M.Teguar, " *Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Electrique sur des Isolateurs Installé en Régions Polluées*", Thèse de Magister Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Juillet 1993.
- [2] J.L.Rafnoumanana, "*Modélisation par la Méthode des Equations Intégrales de Frontière de Phénomènes de Conduction Surfaiques sur les Isolateurs Pollués*", Thèse de Doctorat d'état, Ecole Centrale de Lyon, Mai 1992.
- [3] F. Rizk, "*Mathematical Models for Pollution Flashover*", *Electra*, Vol. 78, pp. 71 - 103, 1981.
- [4] A.S.A.Farag, F.M.Zedan, T.Cheng, " *Analytical Studies of HV Insulators in Saudi Arabia Theoretical Aspects*", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 28 N°3, pp. 379-392, June 1993.
- [5] A.Mekhaldi, "*Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternative 50 Hz*", Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Décembre 1999.
- [6] M.Teguar,<sup>2</sup> *Modélisations d'Isolateurs Pollués Soumis à Divers Paramètres électrogéométriques<sup>2</sup>*, Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Avril 2003.
- [7] A.K.Mujundar, N.Vasudev, K.N.Ravi Channakeshava, "*Pollution Test Method of Insulators Under DC Voltage Using Dust Chamber*", Ninth international symposium on high voltage engineering, 28 Aout –1 September 1995.
- [8] T.Guia, "*Comportement d'un Isolateur Soumis à une Tension Impulsionnelle*", Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Mai 2004.
- [9] R.Pinnet, " *Prévention des Incidents dus à la Pollution des Isolateurs sur les Ouvrages de Transport*", RGE, Tome 82, Mars 1973.
- [10] A.Boubakeur, " *Cours de Post-graduation, Haute Tension*", Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.
- [11] J.Keller-Jacobsen, A.Pedersen, J.K.Rasmussen, A.Henriksen, C.Lindovist, S.Smedesflet, "*Essais au Laboratoire et en Plein Air pour Dimensionner Correctement les Isolateurs Exposés à la Pollution Saline*", CIGRE rapport n°33- 11, Paris, France, 1978.
- [12] D.Namane, "*Effet de la Discontinuité de la Couche de Pollution sur le Comportement d'Isolateur Haute Tension, sous la Fréquence de 50Hz* ", Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Février 1998.
- [13] A.Mekhaldi, "*Etude du Développement d'un Arc Electrique sur des Surfaces Isolantes Contaminées par la Pollution Désertique*", Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Juin 1990.
- [14] G.leroy, C.Gary, " *Les Propriétés Diélectriques de L'air et les très Hautes Tensions*", Edition Eyrolles, Paris 1984.
- [15] P.Claverie, Y.Porcheron, " *Les Phénomènes de Pollution des Isolateurs et l'Isolément des Ouvrages en Région Polluées*", RGE. Tome 82, N°3, pp. 166-194, Paris, France, Mars 1973.
- [16] CIGRE groupe de travail 04 du comité d'étude 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, Paris, France, Mai 1979.

## Bibliographie

- 
- [17] CIGRE groupe de travail 04 du comité d'étude n°33, "*Comparaison Critique des Méthodes d'Essais d'Isolateurs Haute Tension sous Pollution Artificielle*", électra N°64, Paris, France, Mai 1979.
- [18] A.Cimador, S. Vitet, "*La pollution des Isolateurs*", EDF-Epure, N° 27, Paris, France, Juillet 1990.
- [19] C.H.A.Ely, P.J.Lambeth, J.S.T.Looms, D.A.Swift, "*Contournement des Polymères Humides et Pollués l'Ailette BOOSTER*", CIGRE, Rapport 15 - 02, Paris, France, 1978.
- [20] A.El-Arabaty, A.Nosseir, S.El-Debeiky, E.Nasser, A.El-Sharky, "*Choix d'Isolateurs Utilisables dans des Ambiances Polluées et Notamment dans des Régions désertiques<sup>2</sup>*", CIGRE, Rapport 33 – 11, Paris, France, 1980.
- [21] R.Sundararajan, R.S.Gorur, "Role of Non Soluble Contaminants on the Flashover Voltage of Porcelain Insulators", IEEE Trans. On Dielect. & Elec. Insul. Vol.3, No2, April 1997.
- [22] A.Mekhaldi, M.Teguar, 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.
- [23] J.P.Holtzhausen, D.A.Swift, "*The Pollution Flashover of AC and DC Energised Cap and Pin Insulators: The Role of Shortening of the Arc*", Ninth international symposium on high voltage engineering, Graz, Autriche, 28 Aout – 1 sept 1995.
- [24] X.Chen, "*Modeling of Electrical Arc on Polluted Ice Surfaces*", Thèse Ph.D, Ecole Polytechnique de Montréal, février 2000.
- [25] P.Claverie, Y.Porcheron, "*How to Choose Insulators for Polluted Areas*", IEEE Trans. PAS, Vol. 92, N° 3, pp. 1121 - 1131, 1973.
- [26] S.Gopal, Y.N.Rao, "*Initiation and Growth of Dry Band on Polluted Insulator Surfaces*", 5<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, paper 52-07, Braunschweig, Allemagne, 1987.
- [27] L.L.Alston, S.Zoledziowski, "*Growth of Discharges on Polluted Insulators*", IEEE, Trans. PAS, Vol. 110, N° 7, pp. 1260 - 1266, Juillet 1963.
- [28] J.Danes, "*A stochastic Pollution Flashover Model*", 4<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 -12, Athènes, Grèce, September 5 - 9, 1983.
- [29] R.Wilkins, "*Flashover Voltage of High Voltage Insulators with Uniform Surface Pollution Films*", Proc. IEE, Vol. 116, N° 3, pp. 457 - 465, Mars 1969.
- [30] H.Boehme, F.Obénaus,<sup>2</sup> "*Essais de Contournement sur des Isolateurs Pollués en Laboratoire et en Lieu de Service du Point de Vue de la Conception d'un Modèle D'amorçage pour Courant Rampant<sup>2</sup>*", CIGRE, N° 407, Paris, France, 1966.
- [31] H.Woodson, A.J.McElroy,<sup>2</sup> "*Insulators with Contaminated Surfaces Part II: Modelling of Discharge Mechanisms<sup>2</sup>*", IEEE Trans., Vol. Pas-89, N° 8, pp. 858 – 867, November- December, 1970.
- [32] CEI 60-1, "*Techniques des Essais à Haute Tension. 1- Définitions et Prescriptions Générales relatives aux Essais*", Deuxième Edition, 1989.
- [33] A.Mekhaldi, D.Namane, S.Bouazabia, A.Beroual, "*Flashover of Discontinuous Pollution Layer on High Voltage Insulators*", IEEE, Trans, on Dielectrics and electric insul. vol. 6, N° 6. pp. 900-906, December 1999.
- [34] R.Wilkins, A.J.Al-Baghdadi, "*Arc Propagation along an Electrolyte Surface*", Proc. IEE, Vol. 118, No 12, pp. 1886 - 1892, December 1971.
- [35] A.M.Rahal, C.Hurax, "*Flashover of High Voltage Insulators*", IEEE Trans. Vol. Pas - 98, N° 6, pp. 2223 - 2231, 1979.

## Bibliographie

- 
- [36] S.Flazi, "*Etude Critique des Critères du Contournement*", 4<sup>ème</sup> Conférence Nationale de la Haute Tension, Ghardaïa, Algérie, 16-17 janvier 2002.
  - [37] B.F.Hampton, "*Flashover Mechanism of Polluted Insulation*", Proc.PIEE, Vol. 111, No 5, pp. 985 - 990, Juillet 1964.
  - [38] S.Hesketh, "*General Criterion for the Prediction of Pollution Flashover*", Proc. IEE, Vol.114, No 4, p. 531 - 532, April 1967.
  - [39] S.Anjana, C.S.Lakshminarasmha, "*Computed of Flashover Voltages of Polluted Insulators using Dynamic Arc Model*", 6th International Symposium on high voltage Engineering, paper 30 - 09, New Orleans, USA, 1989.
  - [40] N.Dhahbi-Megrache, A.Beroual, L.Krahenbuhl, "*A New Proposal Model for Polluted Insulators Flashover*", Journal of Physics D: Applied Physics, (30), N° 5, pp. 889 - 894, March 1997.
  - [41] F.A.M.Rizk, D.H.Nguyen, "*Digital Simulation of Source Insulator Interaction in HVDC Pollution Tests*", IEEE Trans. on Power Delivery, pp. 405 - 410, 1988.
  - [42] R.Sundararajan, R.S.Gorur, "*Computer Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Conditions*", IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., Vol. 2, N° 1, pp. 121 - 127, February 1995.
  - [43] 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 Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, France, 1998.
  - [44] I.Fofana, C.Tavakoli, M.Farzanch, A.Beroual, "*Modeling of DC Electric Arc Propagation on an Ice Surface*", XIII International Symposium on High Voltage Engineering, Rotterdam, pp. 10 - 14, Netherlands 2003.
  - [45] I.Fofana, A.Beroual, "*Modeling of the Leader and the Return Stroke Currents with an Equivalent Electrical Network*", 9<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, Austria, pp 1- 4, August 28-Sept 1, 1995.
  - [46] A.Beroual, I.Fofana, "*Modeling of the Streamers in Dielectric Liquid with an Equivalent Electrical Network*", 12<sup>th</sup> International conference on conduction and breakdown in dielectric liquid, Roma, Italy, pp.214 -217, July 15-19, 1996.
  - [47] A.Beroual, "*An Universal Dynamic Model of Discharge Propagation in Air, Liquid, Solid/Liquid Interface and Polluted Insulator*", XIII International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 1- 4, Netherlands 2003.
  - [48] Y.Guehrar, "*Elaboration d'un Modèle Dynamique de Contournement d'un Isolateur Pollué sous Tension Alternative ou Pulsionnelle*", Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2004.
  - [49] M.Aguet, M.Ianoz, "*Traité de l'Electricité. Volume XXII Haute Tension*", Ecole Nationale Fédérale de Lausanne, Deuxième Edition, 1982.
  - [50] W.J.Dixon, A.M.Mood, "*Journal of America Statistic Association*", Vol.43, pp.109-126, 1948.
  - [51] A.Beroual, N.Dhahbi, "*Dynamic Model of Discharge Propagation on Polluted Surfaces under Impulse Voltage*", 12<sup>th</sup> IEE Pro.Gener. Transm. Vol 147 No. 5, pp. 279 - 284, September 2000.
  - [52] N.Dhahbi, A.Beroual, "*Flashover Dynamic Model of Polluted Insulators under ac Voltage*", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 7 N° 2, pp. 283-290, April 2000.
  - [53] Z.Renyu, 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.
  - [54] A.Mekhaldi, D.Namane, S.Bouazabia, A.Beroual, "*Empirical Model of a High Voltage Insulator under Nonuniform Pollution*", 11th international symposium of high voltage, London, UK, 1999.