

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Centre Universitaire D'El-Oued
Institut des Sciences Et Technologie
Département de Génie Electrique Et Hydraulique



MEMOIRE

Pour l'Obtention du Diplôme d'ingénieur d'état en Eléctrotchnique
Option : Réseaux Electrique



Modélisation d'un Modèle d'isolateur 1512L naturellement Pollue sous Tension impulsionnelle

Présenté par :

GHEKAMBOU SALAH

NEGHMOUCHE ALI LAZHAR

Encadrée par :

M. GUIA TALAL

Promotion 2008

Remerciements

Ce travail a été réalisé au centre universitaire d'El - Oued du département de Génie Electrique, sous la direction Scientifique de Monsieur T. GUIA.

Nous remercions, notre encadreur Mr T. GUIA Maître Assistant, Mr D BEN ATTOUS Maître de Conférences au centre universitaire d'El Oued, Mr A .CHEMSA Chargé de Cours au centre universitaire d'El-Oued. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre très sincères reconnaissances pour leurs précieuses directives, leur disponibilité, leurs fructueux conseils, leur suivi constant, leur courtoisie si raffinée et leurs qualités humaines.

Enfin, Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

الإهداء

الحمد لله الذي تتم بنعمته الصالحات
إلى رمزا لحنان والدتي الكريمة
إلى رمز العطاء والكفاح أبي الفاضل
إلى إخوتي وأخواتي الأعزاء
إلى أعمامي وعماتي وأبنائهم
إلى أخوالي وخالاتي وأبنائهم
إلى كافة الأقارب والأحباب
إلى زملائي الذين رافقوني في حياتي الدراسية.
إلى كل الأصدقاء القريب منهم والبعيد.
إلى كل من درسني كان معلما أو أستاذا
أهدي ثمرة هذا الجهد

غميمة بشير بن احمد

الإهداء

نشكر الله على إتمام هذا العمل المتواضع
واهديه إلى نبع الحنان أمي أمي أمي
إلى رمز العطاء والكفاح أبي الفاضل
إلى أخي وأخواتي الأعزاء
وخاصة ابن أختي
إلى أخوالي وخالاتي وأبنائهم
إلى أعمامي وعمتي وأبنائهم

إلى كافة الأقارب والأحباب
إلى زملائي الذين رافقوني في المشوار الدراسي
إلى كل الأصدقاء
إلى كل من درسني كان معلما أو أستاذا .

الإهداء

الحمد لله الذي تتم بنعمته الصالحات
إلى نبع الحنان الصافي, إلى نور الإيمان التي تنير دربي
أمي الغالية
إلى من بعث في الأمل و أنار لي الطريق وعلمني أن الحياة كفاح
والدي العزيز و إلى جدتي العزيزة.
إلى أخي وأخواتي الأعزاء
إلى كل براعم العائلة وأخص بالذكر: لؤي.
إلى أخوالي وخالاتي وأبنائهم
إلى أعمامي وعمتي وأبنائهم
إلى زملائي الذين رافقوني في حياتي الدراسية.
إلى كل الأصدقاء القريب منهم والبعيد.
إلى كل هؤلاء جميعا أهدي ثمرة هذا العمل المتواضع.

نغموش علي الأزهر

الإهداء

الحمد لله الذي تتم بنعمته الصالحات
إلى نبع الحنان الصافي, إلى نور الإيمان التي تنير دربي
أمي الغالية
إلى من بعث في الأمل و أنار لي الطريق وعلمني أن الحياة كفاح
والدي العزيز و إلى جدي و جدتي العزيزين.
إلى أخوتي وأخواتي الأعزاء
إلى كل براعم العائلة وأخص بالذكر: منير , آية , أيوب.
إلى أخوالي وخالاتي وأبنائهم
إلى جميع الأهل و الأقارب.
إلى زملائي الذين رافقوني في حياتي الدراسية.
إلى كل الأصدقاء القريب منهم والبعيد.
إلى كل هؤلاء جميعا أهدي ثمرة هذا العمل المتواضع.

شكـمـبـو صـالـح





SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : POLLUTION DES ISOLATEURS	
I. 1. INTRODUCTION	3
I. 2. LES ISOLATEURS	3
<i>I. 2. 1. Définition</i>	3
<i>I. 2.2. matériaux utilisés dans la constitution des isolateurs</i>	3
<i>I. 2.2. 1. Isolants</i>	3
<i>I. 2. 2. 2. Pièces métalliques de liaison</i>	5
<i>I. 2. 2. Fonctionnement et constitution d'un isolateur</i>	5
<i>I. 2. 3. Principaux types d'isolateurs</i>	6
<i>I. 2. 3. 1. Isolateurs de type rigide</i>	6
<i>I. 2. 3. 2. Elément de chaîne</i>	6
<i>I. 2. 3.2.1. Isolateurs à capot et tige</i>	7
<i>I. 2.3.2.2.isolateur à long fût en porcelaine</i>	10
<i>I. 2. 4. Choix des isolateurs</i>	11
I. 3. POLLUTION DES ISOLATEURS	12
<i>I. 3. 1. Formation et réparation des couches polluantes</i>	12
<i>I. 3. 2. Source de pollution</i>	12
<i>a) Pollution naturelle</i>	12
<i>b) Pollution marine</i>	12
<i>c) Pollution désertique</i>	13
<i>d) Pollution industrielle</i>	13
<i>e) Pollution mixte</i>	13
<i>f) Pollution par dépôts de glaces</i>	14
<i>I. 3. 3. Conséquences de la pollution</i>	14
<i>I. 3. 3. 1. Arc non localisé</i>	14
<i>I. 3. 3. 2. Arc fixe</i>	14
<i>I. 3. 3. 3. Contournement des isolateurs</i>	15
I. 3. 4. MESURE DE LA SEVERTE DE LA POLLUTION DES SITES	16
<i>I. 4. 1. Classification des sites pollués</i>	16
<i>a)Classe 1</i>	16
<i>b) Classe 2</i>	16
<i>c) Classe 3</i>	16

SOMMAIRE

<i>d) Classe 4</i>	17
<i>I.3.4. 2. Méthodes de mesure de la sévérité d'un site</i>	17
<i>I.3. 4. 2. 1. Densité du dépôt de sel équivalent</i>	17
<i>I.3. 4. 2. 2. Conductance superficielle</i>	17
<i>I.3. 4. 2. 4. Courant de fuite</i>	17
I. 3. 5. METHODES D'ESSAIS SOUS POLLUTION [Gary]	17
<i>I. 3. 5. 1. Essai sous pollution naturelle</i>	17
<i>I.3. 5. 2. Essais sous pollution artificielle</i>	18
<i>I.3. 5. 2. 1. Méthodes du brouillard salin</i>	18
<i>I.3. 5. 2. 2. Méthode des couches solides</i>	20
<i>I.3.5. 2.3. La méthode de pollution liquide [Gary]:</i>	20
<i>I.3.5. 3. Analyse des différentes méthodes d'essai artificiel:</i>	20
I. 3. 6. TECHNIQUES DE LUTTES CONTRE LA POLLUTION	21
<i>I.3. 6. 1. Allongement de la ligne de fuite</i>	21
<i>I.3. 6. 2. Isolateurs plats</i>	22
<i>I.3. 6. 3. Graissage périodique</i>	22
<i>I.3. 6. 5. Isolateurs composites</i>	22
<i>I. 3. 6. 6. Nettoyage des isolateurs</i>	22
I.3.7.DEGRE DE LA POLLUTION	23
I. 7. CONCLUSION	24

CHAPITRE II : PRINCIPAUX MODELES DE CONTOURNEMENT

II. 1. INTRODUCTION	25
II. 2. MECANISMES DE PROPAGATION	25
<i>II. 2. 1. Propagation par ionisation</i>	25
<i>II. 2. 2. Propagation par force électrostatique</i>	25
II. 3. CRITERES DE PROPAGATION DE LA DECHARGE	26
<i>II. 3. 1. Critère de Hampton</i>	26
<i>II. 3. 2. Critère de Hesketh</i>	27
<i>II. 3. 3. Critère de Wilkins</i>	27
<i>II. 3. 4. Critère de Anjana et Lakshminarasimha</i>	27
<i>II. 3. 5. Critère de Dhahbi, Beroual et Krahenbul</i>	28

SOMMAIRE

II. 4. PRINCIPAUX MODELES STATIQUES DE CONTOURNEMENT.....	29
<i>II. 4. 1. Modèle d'Obenaus.....</i>	<i>29</i>
<i>II. 4. 2. Modèle de Neumarker</i>	<i>30</i>
<i>II. 4. 3. Modèle de Rizk.....</i>	<i>31</i>
<i>II. 4. 4. Modèle de Claverie et Porcheron.....</i>	<i>32</i>
<i>II. 4. 5. Modèle de Rao et Gopal.....</i>	<i>32</i>
<i>II. 4. 6. Modèle d'Alston et Zoledziowski.....</i>	<i>33</i>
<i>II. 4. 7. Modèle de Danis.....</i>	<i>34</i>
<i>II. 4. 8. Modèle de Nacke et Wilkins.....</i>	<i>36</i>
<i>II. 4. 9. Modèle de la couche mixte</i>	<i>38</i>
<i>II. 4. 10. Modèle du disque circulaire.....</i>	<i>39</i>
<i>II. 4. 11. Modèle de Tegar</i>	<i>40</i>
II. 5. MODELES DYNAMIQUES	42
<i>II. 5. 1. Modèle de Rizk et Nguyen.....</i>	<i>43</i>
<i>II. 5. 2. Modèle de Anjana et Lakshminarasimha.....</i>	<i>43</i>
<i>II. 5. 3. Modèle de Dhahbi.....</i>	<i>44</i>
<i>II. 5. 4. Modèle de Sundararajan et Gorur</i>	<i>45</i>
<i>II. 5. 5. Modèle de Tegar.....</i>	<i>46</i>
II. 6. CONCLUSION	47

CHAPITRE III : CONCEPTION DU MODELE STATIQUE

III. 1. TENSION APPLIQUEE.....	48
<i>III. 1.1. Onde impulsionelle.....</i>	<i>48</i>
<i>III. 1.2. Détermination de la tension $U_{50\%}$ et U.....</i>	<i>54</i>
<i>III. 1.2. 1 Tension disruptive moyenne $U_{50\%}$.....</i>	<i>54</i>
<i>III. 1.2. 2 Détermination de la tension $U_{0\%}$.....</i>	<i>54</i>
III. 2.MODELE MATHÉMATIQUE	54
<i>III .2.1. Hypothèses simplificatrices.....</i>	<i>54</i>
<i>III .2.2. Modèle d'isolateur pollué.....</i>	<i>55</i>
<i>III .2.3 Eléments du circuit électrique équivalent.....</i>	<i>56</i>
<i>III .2.3.1 Eléments du circuit électrique équivalent de la zone polluée.....</i>	<i>56</i>
<i>III .2.3.2. Eléments du circuit électrique équivalent de la zone propre.....</i>	<i>57</i>

SOMMAIRE

III .2.3.2.1. Résistance R_{0i}	57
III .2.3.2.2. Capacité C_{0i}	58
III .2.3.3. Capacité des électrodes C_0	59
III .2.4. Mise en équations.....	60
III.3.ORGANIGRAMME DE CALCULE.....	64
III.4. CONCLUSION.....	66
<hr/>	
CHAPITRE IV : RESULTATS ET INTERPRETATIONS	
IV.1. INTRODUCTION.....	67
IV.2. COURANT DE FUITE.....	67
<i>IV.2.1. Influence de la tension appliquée.....</i>	<i>67</i>
<i>IV.2.2. Influence de la largeur de la pollution.....</i>	<i>77</i>
a / polarité positive.....	77
b / polarité négative.....	80
<i>IV.2.3 Influence de la polarité.....</i>	<i>82</i>
a- Courant de fuite en fonction de la tension appliquée.....	82
b- Courant de fuite en fonction de la largeur de pollution.....	87
IV.3 RAPPORT (TENSION/COURANT) K_v / mA.....	89
IV.4 CONCLUSION.....	90
CONCLUSION GENERALE.....	91

Introduction générale

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 [1-2] qu'expérimentaux [3-4], 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 [5] pour examiner le comportement d'un modèle d'isolateur 1512L naturellement pollué. En se basant sur des travaux antérieurs [1-3], 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.

I.1. INTRODUCTION :

Le phénomène de pollution des lignes aériennes constitue un sujet d'étude d'une importance primordiale. Cela provient du fait que la pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de haute tension. En effet, à la suite d'une interaction entre, l'air transportant des grains de poussières et l'isolateur, une couche étrangère se dépose sur les surfaces de celui-ci [6]. Une fois cette couche est humidifiée, la tension de tenue diminue considérablement et provoque des incidents très graves, cela est dû aux plusieurs facteurs dont les plus importants sont le profil de l'isolateur et la nature de l'agent polluant

I.2. L'isolateur :

I. 2. 1. Définition :

L'isolateur est un matériau isolant solide présente une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle. Il est utilisé pour isoler les conducteurs ou les pièces sous tension afin d'empêcher les court-circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution [7].

I. 2.2. matériaux utilisés dans la constitution des isolateurs :

Un isolateur est constitué en général de deux parties : une partie isolante et des pièces métalliques de liaison, scellées sur cette partie isolante.

I. 2.2. 1. Isolants :

Jusqu'à quelques années de cela seuls le verre et la céramique ont justifié d'un bon comportement en exploitation, bien que ces deux matériaux soient de nature fragile.

Vu leur légèreté, les matériaux synthétiques sont actuellement très utilisés en particulier lorsqu'on les compare aux chaînes d'isolateurs pour les lignes de haute tension.

a) Céramique:

Il est généralement utilisé pour les isolateurs à haute tension et aussi pour les isolateurs support (long fût).

La composition des céramiques et leur fabrication sont longuement développées, certaines céramiques à grains très fins sont recommandées pour des isolateurs devant supporter des efforts mécaniques élevés [8].

b) Verres:

Le verre recuit :

Il a surtout été utilisé pour faire des isolateurs rigides, mais on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de températures.

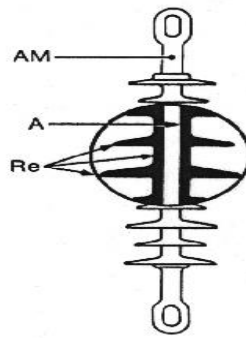
De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension.

Le verre trempé :

Celui ci est obtenu par réchauffage de l'isolant retiré du moule à une température d'environ 700 °C, puis refroidi par des jets d'air sous pression judicieusement répartis sur toute sa surface; les couches extérieures de la pièce isolante acquièrent rapidement une rigidité qui ne leur permet plus aucune déformation [8]. Le verre trempé présente une contrainte mécanique en traction environ 5 à 6 fois plus grande que celle du verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100 °C [8] . Outre son bas prix, le verre présente l'avantage de permettre de déceler les défauts par une simple observation [9].

c) Matériaux synthétiques:

Ces isolateurs (Figure I. 1.), dits composites, sont constitués d'une âme réalisée en fibre de fer imprégnée de résine, donnant à l'isolateur sa tenue mécanique, et d'une enveloppe en matériaux synthétiques isolants. Les revêtements ont démontré actuellement un comportement satisfaisant sous contraintes électriques et sous pollution.



A : Ame en fibre de verre résine.

AM : Pièces d'accrochage métallique

Re : Revêtement à ailettes en matériaux synthétique

Figure I.1 : . Isolateur composite

I. 2. 2. 2. Pièces métalliques de liaison:

Les parties isolantes constitutives de l'isolateur sont reliées entre elles ou au support par des pièces métalliques, réalisées par des métaux qui doivent répondre aux contraintes mécaniques et thermiques appliquées à l'isolateur au cours de son exploitation.

I. 2. 2. Fonctionnement et constitution d'un isolateur:

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes, ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage), ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile , SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique), ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure) [10].

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement [8]. Du point de vue électrique, l'isolateurs est considéré comme deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents, qui sont les suivants [8]:

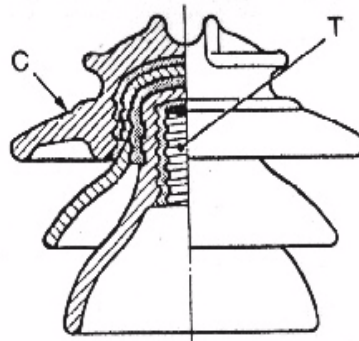
- L'intervalle d'air.
- Le matériau diélectrique.
- L'interface air - matériau diélectrique.

I. 2. 3. Principaux types d'isolateurs:

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs :

I. 2. 3.1. Isolateurs de type rigide:

Un isolateur rigide (Figure I.2), est relié au support par une ferrure fixe. Tous les isolateurs rigides normalisés sont livrés avec une douille scellée de telle façon qu'ils puissent être vissés directement sur les ferrures correspondantes. La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides [7].



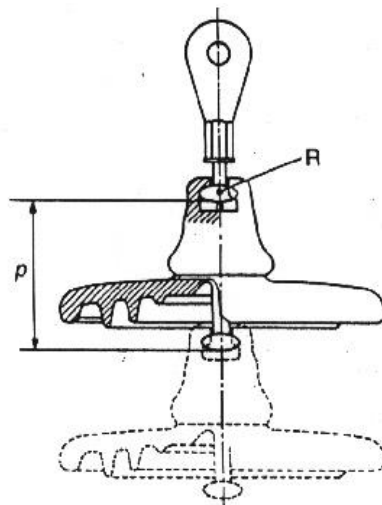
C : Cloche

T : Logement de tige.

Figure I. 2 : *Isolateur rigide en verre.*

I. 2. 3. 2 Élément de chaîne:

C'est un isolateur constitué par un matériau isolant équipé de pièces métalliques de liaison, nécessaires pour le relier de façon flexible à d'autres éléments de chaîne (Figure I.3), à la pince de suspension du conducteur ou au support, ces éléments sont soumis principalement à des efforts de traction. Ils sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (chaînes d'alignement), soit horizontal (chaînes d'ancrages) [8].



R : Rotule.

ρ : pas

Figure I. 3 : Assemblage à rotule

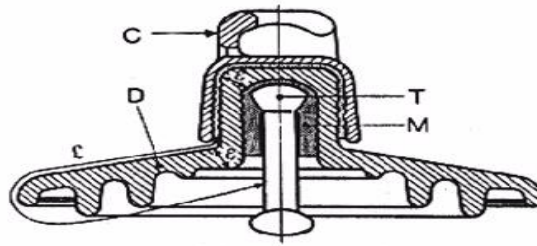
I. 2. 3.2.1. Isolateurs à capot et tige:

L'isolateur capot tige est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre (ou la porcelaine).

L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer le capot de l'élément suivant, qui est maintenue par une goupille [6,11].

L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique, le tout est posé sur une table vibrante pendant une minute afin d'obtenir un bon scellement [11].

La coupe de l'isolateur capot-tige est schématisée sur la figure I.4.



C : Capot (fonte malléable, galvanisée à chaud)

D : Diélectrique (verre trempé ou céramique)

M : Mortier de ciment alumineux ou Portland

T : Tige (acier, galvanisé à chaud)

\mathcal{L} : Plus courte distance dans l'air, extérieure à l'isolateur

Figure I.4 :Isolateur à capot et tige

On présente les différents profils des isolateurs à capot-tige qui sont :

a) Profil standard :

La faible profondeur, l'espacement entre les anneaux (nervures) et la ligne de fuite moyenne permettent l'utilisation de ce profil dans une zone de pollution modérée.



Figure I.5 :Profil standard

b) Profil antibrouillard :

Plus large que le profil standard, l'écartement entre les anneaux permet un bon nettoyage par le vent ou la pluie et facilite le lavage manuel si nécessaire. L'espacement prévient également l'apparition d'arcs entre les anneaux adjacents dans des conditions sévères de pollution.

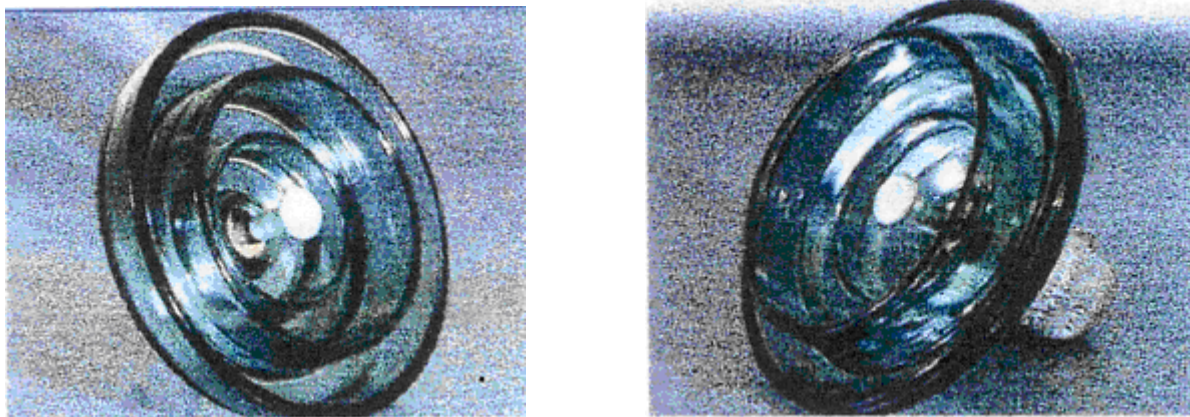


Figure I.6 : *Profil antibrouillard*

c) Profil ouvert :

La suppression complète des anneaux permet de réduire l'accumulation des dépôts polluants. Ce type de profil est particulièrement efficace en régions désertiques où le lavage par pluie est très rare.

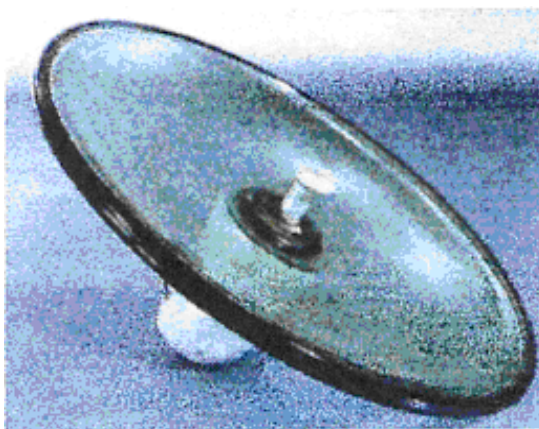


Figure I.7 : *Profil ouvert*

d) Profil sphérique:

Ce type de profil donne une ligne de fuite équivalente au profil standard, mais l'absence d'anneaux facilite le nettoyage manuel.

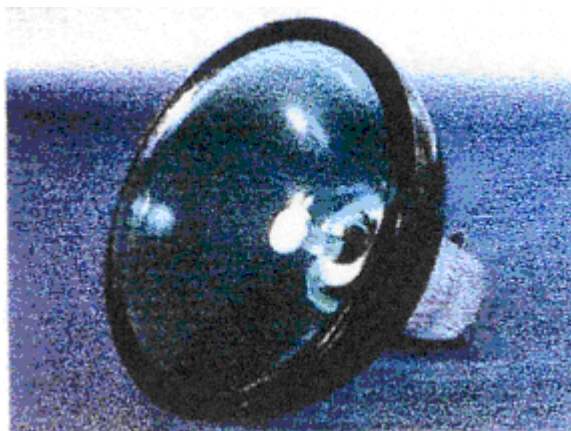
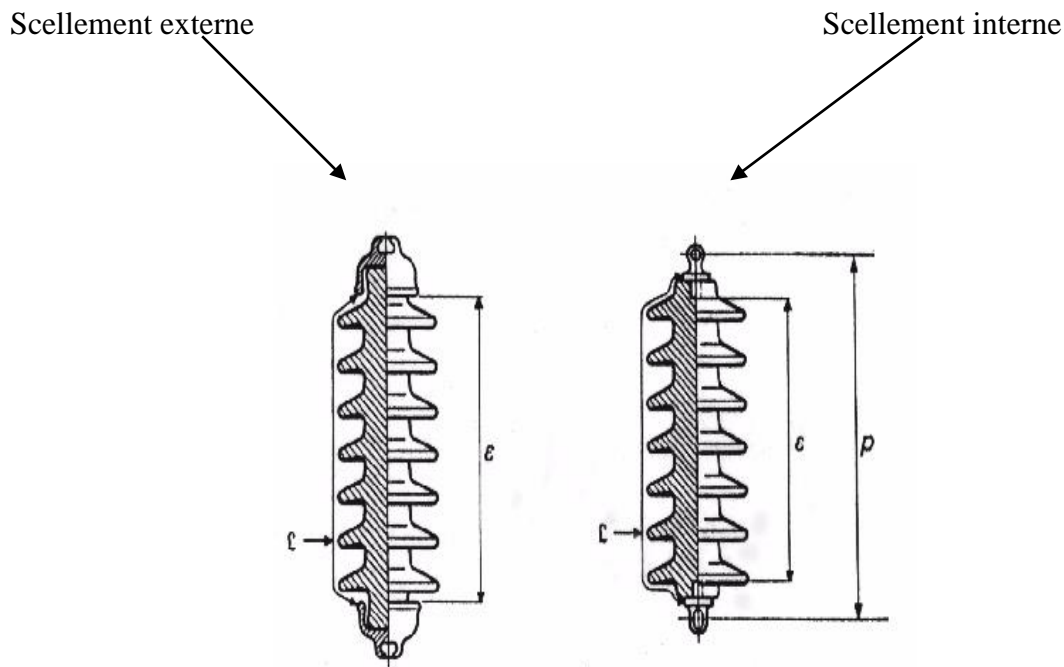


Figure I.8 : *Profil sphérique*

I. 2.3.2.2. isolateur à long fût en porcelaine :

Ils sont constitués d'un bâton cylindrique plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes (Figure.I.9), à chaque extrémité est fixé une pièce métallique de liaison ; celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le bâton, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet.

De tels isolateurs peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis [8].



\mathcal{L} : Plus courte distance dans l'air, extérieure à l'isolateur

ε : Longueur du canal de perforation

p : pas

$\varepsilon \gg \mathcal{L}/2$

Figure I. 9 : *Isolateur à long fût en porcelaine*

I. 2.4. Choix des isolateurs:

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont des éléments essentiels dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service [11]. Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire les isolateurs qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident. La sévérité de la pollution d'un site peut changer. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement,

la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation. Le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre ces nouvelles sources de pollution éventuelles [12].

I. 3. pollution des Isolateurs :

I.3.1. Formation des couches polluantes :

Suite à l'écoulement d'un air transportant des poussières diverses, et à l'obstacle formé par les isolateurs, en présence de l'humidité, une couche de pollution se développe sur la surface de ceux ci. La répartition non-uniforme et non-homogène de cette couche dépend du profil de l'isolateur, de la position de la chaîne par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), du niveau de tension ainsi que la distance à la source de pollution [13].

I.3.2. Source de pollution :

Les divers types de pollution atmosphérique les plus fréquemment observés sur les isolateurs peuvent être regroupés selon leurs origines et classés comme suit :

a) Pollution naturelle :

La pollution naturelle provient des dépôts :

- des sels marines dans les régions côtières.
- de poussière du sol (notamment lors de chantiers importants).
- de sable véhiculé par le vent en régions désertiques.

b) Pollution marine :

Les installation situées en bordure de la mer sont exposées aux embruns portés par le vent et qui se déposent progressivement sur les isolateurs en formant une couche de pollution de sel qui devienne conductrice lorsqu'elle est humidifiée par les embruns eux même, par

brouillard ou simplement par condensation. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance dans certaines conditions, ils se développent jusqu'au provoquer le contournement total de l'isolateur [13,14].

c) Pollution désertique :

Les sources principales de la pollution de l'atmosphère au désert peuvent être de trois natures :

- Sable saharien porté par les vents.
- Eau atmosphérique sous forme de précipitations.
- Fumée de gaz industriels brûlés sortant surtout des torchères pétrolières .

Dans les régions désertiques et à la suite d'une interaction entre l'écoulement d'un vent de poussières, causé par les tempêtes de sable et l'obstacle formé par les isolateurs, une couche de pollution se forme sur leurs surfaces. Une fois qu'elle est humidifiée, elle devient conductrice et engendre un courant qui apparaît brusquement précédé par des arcs partiels qui peuvent conduire au contournement total de l'isolateur s'ils rejoignent les deux électrodes.

La pollution des isolateurs par le sable fin est un processus permanent quelque soit le type de montage aussi bien extérieur qu'intérieur [14] .

d) Pollution industrielle :

Au voisinage de certaines zones industrielles, la pollution est engendrée par l'évacuation des fumées des usines (raffinerie, cimenterie, minerie etc.). Les isolateurs se recouvrent de poussières. Dans des conditions de forte humidité, la dissolution des sels contenus dans ces poussières entraîne la formation d'un électrolyte [15].

Les gaz présents dans les fumées des usines, absorbés par la couche de poussières humide augmentent encore la conductivités de l'électrolyte.

Les industries ne sont pas d'ailleurs les responsables de ce genre de pollution ; les automobiles et les engrais utilisés en agriculture contribuent aux dépôts observés à la surface des isolateurs.

e) Pollution mixte :

C'est en fait la plus fréquente et la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. La pollution mixte résulte de la combinaison entre les différentes types de pollution, comme par exemple; la pollution marine et industrielle lorsque des composants industrielles sont installés en bord de mer.

Comme dans les cas de pollution précités, nous avons formation d'une couche de pollution et un courant de fuite engendré après humidification de cette couche, et le contournement peut parfois survenir. [11,15].

Par conséquent, on peut dire, que quelle que soit la nature et les caractéristiques de pollution, lorsqu'elle est sèche ne pose pas, généralement, de problème c'est-à-dire pas de dégradation de la rigidité diélectrique. Le phénomène de pollution résulte de la concomitance d'un dépôt polluant et d'une humidification de ce dépôt [10].

Très souvent, un site ne présente pas qu'un seul type de pollution mais plusieurs qui se combinent. La présence de la pollution humidifiée provoque une couche électrolytique caractéristique du phénomène de pollution.

f) Pollution par dépôts de glaces :

Elle concerne les pays très froids comme le Canada par exemple où le gel forme une "carapace" sur les chaînes d'isolateurs et compromet alors la tenue électrique et mécanique des isolateurs.

I.3.3. Conséquence de la pollution :

La couche de polluant qui s'accumule à la surface des isolateurs provoque une conductivité électrique superficielle, celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite et dans certaines conditions, le court-circuit complet de l'isolateur peut se reproduire ; on parle alors du contournement.

Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur [16,15] .

I.3.3.1 . Arc-non localisé :

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçait aléatoirement à un autre endroit et ainsi de suite ; il y a apparition des courants de fuite entraînant une petite perte d'énergie, généralement supportable par l'installation [15] .

I.3.3.2 . Arc fixe :

L'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit se réamorçant au même endroit (courant alternatif).

Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant [15].

I.3.3.3 . Contournement des isolateurs :

Le contournement d'une surface polluée et humidifiée est le résultat d'une évolution qui comprend quatre phases principales. Pour simplifier la présentation, considérons le cas d'une plaque plane rectangulaire avec deux électrodes :

- ◆ dans une première phase, le courant de fuite s'écoule à travers l'électrolyte qui recouvre l'isolant. Il provoque un échauffement de l'électrolyte qui a pour effet d'accroître la conductivité du milieu et par suite le courant (phase 1).
- ◆ L'échauffement croissant par l'effet joule crée par le courant de fuite, provoque un assèchement de la couche polluante. La zone sèche formée a tendance à s'étendre latéralement jusqu'à l'interruption complète du courant (phase 2).
- ◆ La tension se trouve reportée aux « bornes » de la zone sèche et des arcs locaux sont susceptibles d'amorcer. Au voisinage de la tête d'un arc local la constriction des lignes de courant conduit à un élargissement de la zone sèche (phase 3).
- ◆ A partir de ce stade, l'évolution de la décharge peut se faire de différentes façons : l'arc local peut s'éteindre (phase 4), ou bien il peut se déplacer latéralement pour retrouver une position plus stable correspondant à une plus faible longueur d'arc (phase 5), ou encore il peut s'allonger jusqu'à atteindre l'électrodes et provoquent ainsi le contournement. Dans ce cas, l'allongement de l'arc se fait à la surface de l'électrolyte sans formation de zone sèche (phase 6).

Bien entendu, en pratique le phénomène s'initie et évolue en fonction de la forme des isolateurs, de l'hétérogénéité du dépôt solide et de l'humidification de telle ou telle partie qui est plus ou moins protégée de l'isolateur. Il est aussi fréquent que plusieurs arcs naissent simultanément le long d'une chaîne ou d'une colonne isolante. Enfin, nous avons implicitement admis que la tension appliquée à l'isolateur était constante. La tension alternative présente, à cet égard, une différence importante du fait de son annulation périodique. Les arcs locaux s'éteignent à chaque passage par zéro et se réamorcent d'une façon aléatoire sur les maxima de tension [12].

I.3.4. Mesure de la sévérité de pollution des sites :

Le choix des isolateurs à installer sur le réseau ne peut se faire que si la sévérité de pollution est connue. En effet, la mesure de cette sévérité est indispensable afin de dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillance dans un site pollué [15].

La mesure de la sévérité est généralement basée sur la détermination expérimentale de la conductance superficielle de la couche polluante ou la détermination au laboratoire du courant de fuite d'un isolateur pollué artificiellement [12].

I.3.4.1 . Classification des sites pollués :

Pour définir l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la salinité et les niveaux de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été proposées [15].

a)Classe 1 :

Cette classe correspond à une pollution faible. Cette pollution est généralement naturelle (sauf marine) ou légèrement industrielle. La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium à 2.5 g /l de concentration .

b) Classe 2 :

La classe 2 correspond à une pollution moyenne. En général, cette pollution est naturelle (sauf marine) ou faiblement industrielle.

En classe 2, la salinité équivalente maximale retenue est de 10 g /l.

c) Classe 3 :

Cette classe correspond à des zones très localisées où l'on trouve simultanément une forte pollution marine et industrielle. La salinité équivalente maximale, concernant cette classe, est de 80 g /l .

d) Classe 4 :

La classe 4 correspond aux zones où le niveau de pollution est exceptionnel . La pollution est éventuellement naturelle, industrielle ou mixte . La salinité équivalente maximale, pour la classe 4, est de 160 g/l .

I.3.4. 2 . Méthodes de mesure de la sévérité d'un site :

Les principales méthodes qui ont été proposées pour caractériser la sévérité d'un site sont [17,18] :

I.3.4.2 . 1 . Densité du dépôt de sel équivalent :

Cette méthode consiste à nettoyer la surface d'un isolateur pollué à l'aide d'un matériau absorbant (coton) et l'eau distillée. La conductivité de la solution contaminée par le coton permet par des mesures, d'obtenir la quantité équivalente de sel et par suite de déterminer la salinité équivalente .

Pour obtenir les niveaux maximaux entre les périodes de lavage, il faut répéter les mesures avec une fréquence suffisante.

I.3.4. 2 . 2 . Conductance superficielle :

A l'aide de mesure de courant de fuite d'un isolateur pollué installé dans un site donné, nous mesurons le rapport $G = I/V$.

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance G par un facteur de forme de l'isolateur. Généralement la tension est appliquée aux électrodes terminales, ce qui fournit la conductivité superficielle globale de l'isolateur .

I.3.4.2 . 3 . Courant de fuite :

Si deux isolateurs identiques, l'un exposé à la pollution naturelle dans un site donné et l'autre pollué artificiellement au laboratoire, présentent les mêmes valeurs maximales du courant de fuite, sous une même tension, on peut dire que la pollution artificielle est alors équivalente à la pollution réelle du site .

I.3.5. Méthodes d'essais sous pollution :

Lorsqu'il s'agit de comparer les performances de divers types d'isolateurs afin de sélectionner ceux qui présente le meilleur comportement sous pollution, l'étude expérimentale constitue le meilleur garant d'un jugement objectif.

En effet, on distingue deux catégories d'essais sur les isolateurs pollués : les essais sous pollution naturelle et les essais sous pollution artificielle. Chacune des deux catégories a ses propres caractéristiques.

I.3.5. 1. Essais sous pollution naturelle :

La diversité des agents polluants impose si l'on désire acquérir une connaissance complète du phénomène, de réaliser des essais dans des sites variés que l'on juge a priori caractéristiques des principaux types de pollution.

Les essais entrepris ont donc tout naturellement consisté à installer dans différents sites pollués des stations dans lesquelles on observe le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs ou colonnes isolantes de longueurs ou de profils différents.

Les qualités respectives de ces isolateurs, placés sous la même tension, sont appréciées en fonction des temps au contournement. On peut les classer en distinguant ceux qui ont contourné de ceux qui ont tenu durant deux ou trois ans d'exposition par exemple.

Cependant, l'inconvénient majeur de ces essais "in situ" apparaît immédiatement. La pollution étant un phénomène à évolution lente dû à une accumulation progressive de dépôts. Plusieurs années sont nécessaires pour pouvoir comparer valablement les performances des isolateurs essayés "in situ".

Ce délai étant jugé trop long, c'est pourquoi on a rapidement cherché à reproduire en laboratoire les conditions de pollution naturelle, afin d'obtenir des résultats et effectuer des comparaisons plus rapidement, plus facilement et à un moindre coût.

Ainsi différentes méthodes d'essais de laboratoire ont été proposées [11].

I.3.5. 2. Essais sous pollution artificielle:

Le but des essais effectués au laboratoire est d'apprécier l'influence des facteurs susceptibles de modifier le comportement d'une chaîne d'isolateurs soumise à la pollution, en vue d'en tirer des conclusions quant aux performances des diverses configurations possibles des chaînes, pour haute tension.

Les essais au laboratoire sont basés sur la simulation de la couche de pollution par des solutions disposées sur l'isolateurs à travers lesquelles la conductivité électrique est réglée.

Les méthodes qui ont été proposées sont relativement nombreuses. Cette variété se comprend aisément quand on se réfère aux objectifs que l'on peut se proposer d'atteindre. Une première approche consiste à rechercher une méthode qui simule le mieux possible les conditions naturelles de pollution. D'autre part, une deuxième approche consiste à rechercher une méthode de laboratoire susceptible de fournir des résultats reproductibles, et ce, pour faciliter la comparaison des performances des différents types d'isolateurs .

Les méthodes d'essai qui demeurent actuellement normaliser sont classées en trois grandes catégories :

- La méthode de brouillard salin.
- La méthode de la couche solide.
- La méthode de pollution liquide.

I.3.5. 2.1. Méthode du brouillard salin :

La surface isolante est alimentée par une tension de service, maintenue constante durant tous les essais et soumise à un brouillard salin. La solution saline utilisée dans la méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière insoluble. Elle est également valable pour représenter de nombreux dépôts de pollution industrielle ayant une couche de pollution relativement mince .

Le degré de salinité exprimé en kg de sel par m³ de solution, définit le paramètre de sévérité. Les valeurs de salinité appliquée en référence aux conditions de pollution sont choisies selon une progression allant de 2,5 à 160 kg / m³ .

I.3.5. 2.2. La méthode de la couche solide :

Dans cette méthode la surface isolante est recouverte par pulvérisation, par trempage ou au pinceau, d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte. La conductivité de cette suspension est réglée par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium. Les isolateurs sont alors séchés afin que la couche polluante se stabilise.

Si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur) le paramètre de sévérité est défini par la densité de dépôt de sel en mg/cm^2 . Si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité se définit mieux par la conductivité de la couche polluante .

Dans certains cas, la couche solide est constituée d'une peinture semi-conductrice qui garde après séchage une conductivité constante.

I.3.5. 2.3. La méthode de pollution liquide [Gary]:

Cette méthode s'apparente à la méthode du brouillard propre dans la mesure où un mélange liquide est appliqué sur l'isolateur avant l'essai. Cependant, dans ce cas la pollution n'est pas séchée avant l'essai. Elle est constituée d'eau, de craie et de méthylcellulose ou de kaolin. Comme pour la méthode de la couche solide la conductivité est ajustée par addition de chlorure de sodium.

Après quelques minutes d'égouttage, la tension d'essai est appliquée à l'isolateur sans humidification supplémentaire [11].

I.3.5. 3. Analyse des différentes méthodes d'essai artificiel:

La méthode de brouillard salin qui a été assez strictement normalisée, permet d'obtenir une bonne reproductibilité des essais, ce qui n'est pas le cas des autres méthodes pour lesquelles nombre d'éléments subjectifs sont laissés à l'appréciation des agents d'essai. En outre, la méthode du brouillard salin est la seule qui assure un renouvellement de la couche polluante au cours de l'essai.

La méthode de brouillard salin nécessite une installation fixe assez importante, à l'encontre, des autres méthodes qui ne nécessitent pas d'installations fixes aussi complexes. Cependant, la préparation des agents polluants pour ces dernières est plus délicate et le temps d'essai est généralement plus long.

Pour qu'une méthode artificielle simule d'une façon satisfaisante un réseau électrique sur lequel les isolateurs sont pollués progressivement (simuler la pollution naturelle), il faut appliquer la tension avant que la pollution soit effective. C'est le cas de la méthode de la couche solide et la méthode de brouillard salin.

Par contre, si la pollution est appliquée avant la mise sous tension, comme dans le cas de la méthode de pollution liquide, l'essai ne peut simuler que le cas de la mise sous tension d'un réseau initialement hors tension dont les isolateurs sont pollués .

Les trois méthodes font appel au chlorure de sodium pour ajuster la conductivité de la pollution. On peut admettre que ces méthodes simulent de plus, la pollution marine et même la pollution industrielle si celle-ci ne contient que peu de matières insolubles.

Par contre, ces méthodes sont moins représentatives pour simuler la pollution désertique qui est très contraignante dans les pays qui possèdent des lignes dans des régions désertiques (Algérie, Egypte,... etc.)[mekh].

I. 3.6. Techniques de lutte contre la pollution :

Contre des nouvelles sources de pollution, le dimensionnement initial des isolateurs peut s'avère insuffisant pour le bon fonctionnement des installations. Pour cela, plusieurs moyens sont utilisés afin de prévenir, autant que possible, les incidents lorsque la ligne est en service.

Ces moyens de lutte doivent tenir compte des données propre au site considéré et au changement possible de la sévérité de pollution due à nouveaux facteurs (apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, ...). Les différents méthodes utilisées sont [12,1] :

I.3.6.1 . Allongement de la ligne fuite :

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

- ◆ Le changement de type d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite) : c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- ◆ L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existant [19].

I. 3.6.2 . Isolateurs plats :

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

I. 3.6.3 . Graissage périodique :

Grâce à ses propriétés hydrophobes, le graissage protège temporairement les isolateurs. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement comprise entre 1 et 4 ans. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de regraissage est pénible, longue et coûteuse . Elle nécessite, par ailleurs, une interruption de service.

I. 3.6.4 . Revêtement silicones :

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Comme pour le graissage à ses propriétés hydrophobes, ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre sa longévité est, en général, nettement supérieure à celle des graissages.

I. 3.6.5 .Les isolateurs composites :

Il sont constitués d'un noyau en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Ces isolateurs présentent l'avantage d'une grande légèreté alliée à une haute résistance mécanique que lui confrère le noyau. Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères.

Cependant, ces isolateurs présentent le désavantage de vieillir sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électrique et mécanique)

I. 3.6.6 . Nettoyage des isolateurs :

♦ **Le nettoyage manuel** (essuyage à sec de l'isolateur) ou **le lavage hors tension** Peuvent être utilisés de façon périodique, en particulier dans les postes. Comme ces méthodes sont utilisées

hors tension, elles entraînent nécessairement des interruptions de service parfois assez longue. Aussi, il faut limiter, autant que possible, leur utilisation.

◆ **Le lavage sous tension** permet d'éviter ces coupures. Dans son principe, ce type de lavage permet de garder propre l'isolateur. Ce dernier est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans ces cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau de lavage, le processus de lavage et les distances de sécurité à respecter afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

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

I.3.7. Degré de la pollution :

Afin de dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillance d'un site pollué [15], il est nécessaire de déterminer le degré de pollution de ce site. Les principales méthodes qui ont été utilisées pour mesurer ce degré de pollution sont :

- La densité du dépôt de sel équivalent (DDSE) : Elle consiste à la détermination de dépôt équivalent, exprimée en milligramme de NaCl / cm² de la surface d'un isolateur, dont la conductivité est égale à celle du dépôt réel, dissous dans le même volume d'eau [18].
- La conductance superficielle : la conductance s'exprime par le rapport du courant, parcourant l'isolateur à la tension appliquée [20].

La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance par un facteur de forme de l'isolateur.

- Le courant de fuite : Il s'effectue en deux étapes. On enregistre, d'abord, sur une période relativement longue, le nombre d'impulsions du courant de fuite dépassant une valeur donnée (comptage d'impulsions). Par la suite, on mesure la plus grande valeur de crête de ce courant [21, 22].
- Mesure de la pollution de l'air : Cette méthode est basée sur l'analyse physico-chimique de l'air. Elle s'effectue sur une période de temps donnée et permet d'évaluer l'intensité et les caractéristiques de la pollution de l'air pour un site.

- Mesure optique : Cette méthode permet la détermination de l'épaisseur de la couche polluante disposée sur la surface de l'isolateur, ainsi que la constante diélectrique par le biais d'un dispositif à rayons laser [20].
- 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 mg/cm^2 .

Conclusion :

Les considérations théoriques qui viennent d'être présentées, dans cette brève synthèse bibliographique, sont d'une grande utilité pour étudier les phénomènes de pollutions.

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

- La pollution reste un facteur déterminant dans le dimensionnement des isolateurs dans les lignes de haute tension.
- La nature et la sévérité de pollution dépendent, en grande partie, de la localisation géographique.
- La connaissance de degré de pollution est une condition indispensable pour dimensionner convenablement les isolateurs extérieurs.
- La meilleure définition de degré de pollution d'un site est d'obtenir la salinité équivalente de ce site.
- Les méthodes d'essais sous pollution artificielle permettent d'étudier séparément les paramètres spécifiant le contournement par pollution.

II. 1. INTRODUCTION :

Plusieurs travaux expérimentaux et théoriques ont été consacrés pour expliquer le mécanisme conduisant au contournement des isolateurs pollués. Le but de ces travaux est d'élaborer un modèle pouvant tenir compte des paramètres réels intervenant dans la génération et la propagation des arcs électriques sur les surfaces isolantes. Il s'agit en particulier de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes (homogènes ou non homogènes), de la résistivité des échanges thermiques, de la non uniformité du mouillage, de l'intensité des arcs au voisinage de la surface isolante, de la formation d'arcs multiples et de la détermination de la tension de contournement.

Dans ce qui va suivre, nous allons exposer une recherche bibliographique des différents modèles statiques et dynamiques développés dans ce domaine.

II. 2. Mécanismes de propagation :

II. 2. 1. Propagation par ionisation :

Wilkins et Al-Baghdadi [23] ont proposé un mécanisme d'élongation basé sur l'ionisation et le déplacement discontinu du pied de la décharge. Selon Wilkins,

la probabilité d'ionisation dans la région précédant l'avant pied de la décharge est grande, étant donné que la température et le potentiel sont élevés dans cette région.

Si l'ionisation est suffisante, alors il y a circulation d'un courant électrique. La conductivité du nouveau trajet du courant va augmenter avec celui-ci, tandis que celle du trajet précédent dans l'électrolyte reste constante. Ainsi, le changement progressif du courant total entraîne une élongation de la décharge.

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

II. 2. 2. Propagation par force électrostatique :

A partir des observations faites sur un canal d'électrolyte, Rahal [24] a essayé de mettre en évidence l'existence d'une force électrostatique s'exerçant sur la décharge, responsable du déplacement de l'arc.

Il a démontré que du point de vue électrique macroscopique, cette force était due à la dissymétrie de la distribution du potentiel, elle-même causée par le passage du courant dans le liquide couvrant la surface isolante.

Cette force va provoquer la courbure de la décharge vers l'électrode de masse (Figure II.1). La décharge se déplace vers l'électrode de masse, si les conditions critiques sont satisfaites.

Dans une analyse critique des différents mécanismes de propagation de la décharge présents dans la littérature, Flazi [25] a déduit que l'augmentation du degré d'ionisation à l'intérieur de la décharge et le démarrage du processus d'ionisation devant celle-ci, sont les facteurs responsables de l'allongement et du changement que subit la décharge, dans ses états dynamiques.

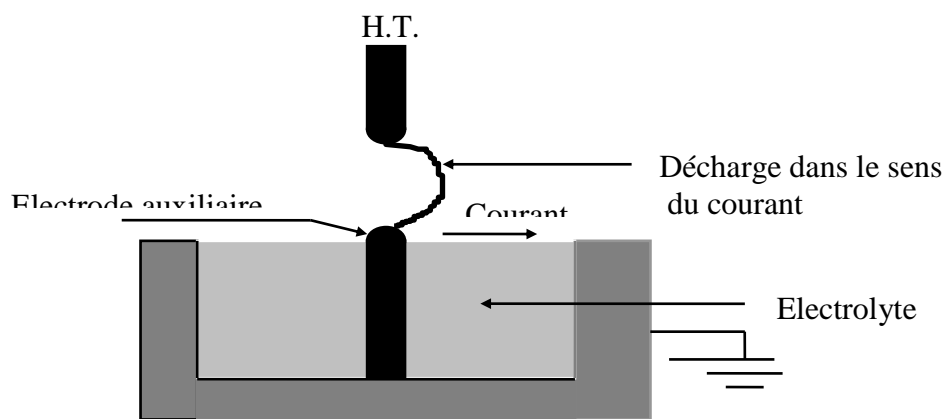


Figure II. 1. Courbure de la décharge dans la direction de l'écoulement du courant mettant en évidence l'existence d'une force

II. 3. Critères 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. 1. Critère de Hampton :

Partant de résultats expérimentaux, Hampton [29] a déterminé les conditions critiques de propagation de l'arc, en remplaçant la couche de pollution en série avec l'arc par une colonne d'eau uniforme présentant une résistance linéique constante.

Il a pu établir que la condition pour que le contournement se produise, est que le champ E_p dans la colonne d'eau dépasse le champ E_{arc} à l'intérieur de l'arc :

$$E_{arc} < E_p \quad (II.1)$$

II. 3. 2. Critère de Hesketh :

En supposant que l'arc en série avec la couche de pollution mouillée change de façon à rendre maximale le courant I qu'il tire de la source d'alimentation, Hesketh [27] a établi un critère de propagation de l'arc, exprimé par la relation :

$$\frac{dI}{dx} > 0 \quad (II.2)$$

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

II. 3. 3. Critère de Wilkins :

Wilkins [28] a généralisé la condition énoncée par Hesketh [27] et a établi un critère de propagation utilisant la puissance ; en considérant qu'un système placé dans une configuration lui permettant de dissiper le maximum d'énergie, l'allongement de la décharge est assuré par l'augmentation de la puissance P fournie par la source :

$$\frac{dP}{dx} > 0 \quad (II.3)$$

Lorsque la tension appliquée au système est constante, le critère de Wilkins se réduit à la condition établie par Hesketh [27].

II. 3. 4. Critère de Anjana et Lakshminarasimha :

En assimilant l'arc à une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, Anjana et Lakshminarasimha [29] ont établi une condition nécessaire à la propagation de l'arc, basée sur des conditions énergétiques :

l'énergie totale fournie W_{totale} doit être supérieure ou égale à l'énergie W_{th} nécessaire pour maintenir l'arc à sa température :

$$W_{\text{totale}} \geq W_{\text{th}} \quad (\text{II.4})$$

II. 3. 5. Critère de Dhabbi, Beroual et Krahenbul :

Ils ont proposés un nouveau critère analytique de propagation de la décharge [30] en faisant intervenir l'impédance équivalente Z_{eq} d'un circuit électrique (Figure II. 2), simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite.

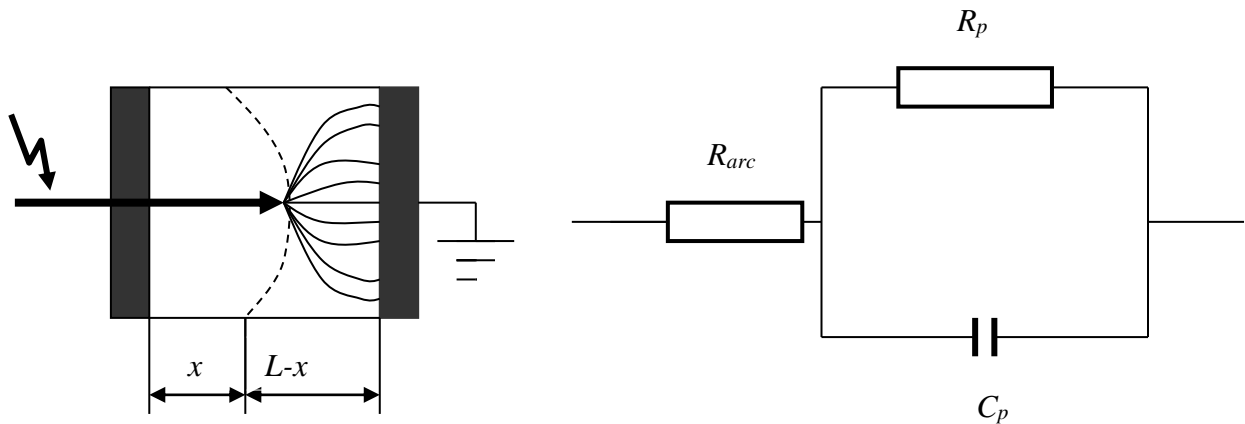


Figure II. 2. Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent

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

$$\frac{d|Z_{\text{eq}}|}{dx} \leq 0 \quad (\text{II.5})$$

Ces auteurs ont abouti à un critère qui est :

$$E_{\text{arc}} \geq \frac{E_p}{\sqrt{a}} \quad (\text{II.6})$$

Avec: $a=1$ en tension continue, car $a=1+\omega^2\rho_p\xi^2$

Ils ont conclu que, pour la tension continue ($a=1$), l'arc peut s'allonger, même si $E_{\text{arc}} \geq E_p$; le critère de Hampton alors ne correspond pas à une condition suffisante à la propagation de la décharge.

II. 4. Principaux modèles statiques de contournement :

Pour adapter plus rationnellement les isolateurs d'un ouvrage à la sévérité de pollution d'un site ou pour surveiller la qualité de l'isolement et donc d'éviter les éventuelles défaillances, il est impératif de disposer de modèles permettant de prévoir le contournement des isolateurs.

C'est dans cette optique que de nombreux modèles analytiques, empiriques ou semi-empiriques ont été développés.

II. 4. 1. Modèle d'Obenaus :

C'est Obenaus [31] qui, dans un travail de pionnier, est à l'origine des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante, sous tension continue. En effet, partant d'un modèle type circuit électrique équivalent, constitué d'un arc de longueur x en série avec une résistance R_p représentant la résistance de la pollution (Figure II. 3), il en a déduit la tension d'arc :

$$U_{\text{arc}} = \frac{Ax}{I^n} \quad (\text{II.7})$$

où I est le courant de fuite, n et A sont les constantes de la caractéristique statique de l'arc et x représente la longueur d'arc.

Les valeurs des paramètres n et A dépendent du milieu dans lequel s'amorce la décharge. Selon certains auteurs [1, 3, 32] :

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

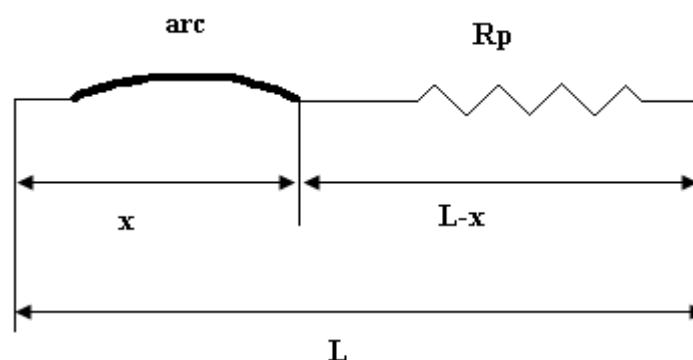


Figure II. 3. Modèle d'Obenaus

A partir de mesures expérimentales sur un canal d'électrolyte, Ghosh et al [32] ont proposé de prendre des valeurs différentes pour les constantes A et n caractérisant l'équation de la décharge selon la nature de l'électrolyte utilisé. Les résultats de leurs mesures sont donnés dans le tableau (II.1).

Electrolyte	A	n
NaCl	360	0,59
CaCl ₂	461	0,42
FeCl ₃	270	0,66
CuSO ₄	450	0,49

Tableau II. 1. Constantes caractéristiques statiques de l'arc selon Ghosh et Al

II. 4. 2. Modèle de Neumarker :

Neumarker [33] a repris les travaux d'Obenaus [31], et a ajouté l'hypothèse d'une couche de pollution de résistance r_p uniforme par unité de longueur de fuite. En effet Neumarker propose l'expression suivante pour la résistance de pollution R_p (résistance linéique) :

$$R_p = r_p (L - x) \quad (\text{II.8})$$

En introduisant cette expression dans le modèle d'Obenaus et en négligeant les chutes de tension cumulées aux électrodes [34], la tension U aux bornes de l'isolateur sera :

$$U = U_{\text{arc}} + r_p (L-x) I \quad (\text{II.9})$$

$$U = \frac{xA}{I^n} + r_p (L-x)I \quad (\text{II.10})$$

ou encore :

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

$$I_c = \left(\frac{xA}{I^n} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (\text{II.11})$$

et

$$x_c = \frac{L}{n+1} \quad (\text{II.12})$$

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

$$U_c = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} L \quad (\text{II.13})$$

Les modèles établis en courant continu ci-dessus, ont été étendus au cas d'une tension alternative en y apportant certaines modifications.

II. 4. 3. Modèle de Rizk :

A partir d'une analyse théorique, Rizk [25] 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 . Cette relation peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{U_c}{L} = 23r_p^{0.4} \quad (\text{II.14})$$

II. 4. 4. Modèle de Claverie et Porcheron :

Plusieurs modèles expérimentaux ont été proposés pour le cas d'une tension alternative. Le plus connu est celui de Claverie et Porcheron [35, 36]. Ces auteurs ont montré que, pour un modèle d'isolateur plan (Figure II. 4), la tension d'arc est de la forme :

$$U_{\text{arc}} = 100 \frac{x}{\sqrt{I}} \quad (\text{II.15})$$

et la tension minimale d'entretien de l'arc est :

$$U = 800 \frac{x}{\sqrt{I}} \quad (\text{II.16})$$

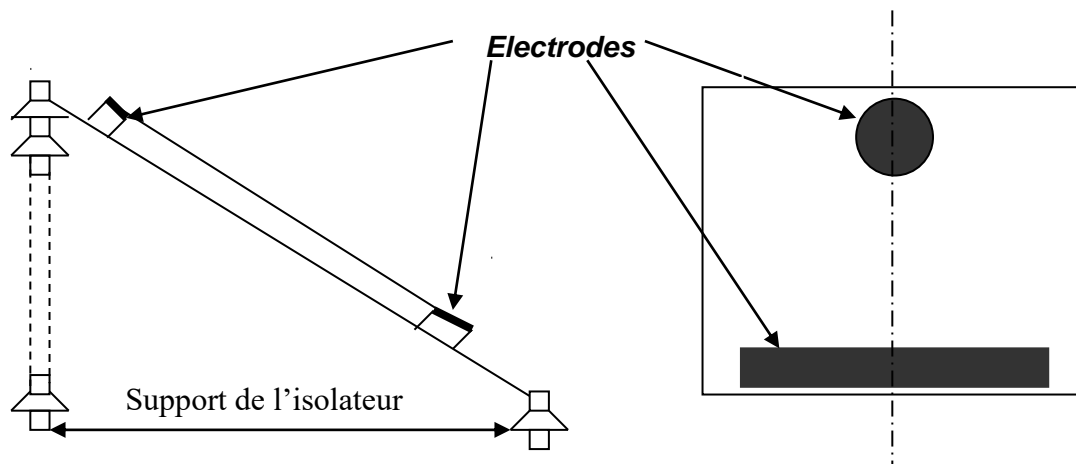


Figure II. 4. Modèle expérimental de Claverie et Porcheron

II. 4. 5. Modèle de Rao et Gopal :

D'après Rao et Gopal [37], la tension d'arc, donnée par l'équation (II.7), n'est valable que pour une décharge de type intermédiaire entre la luminescence et l'arc [38]. Ce type d'équation peut être contesté lorsque la décharge se réamorce périodiquement. Ainsi, les auteurs ont introduit une nouvelle équation, afin d'expliquer les écarts entre les prédictions des modèles et les valeurs mesurées pendant le contournement :

$$U = \alpha + (\beta + x)v\left(\ln \frac{I}{\delta}\right)^{-3} \quad (\text{II.17})$$

α , β , v et δ sont des constantes qui dépendent de la nature des électrodes entre lesquelles s'amorce la décharge.

Cette équation exprime la caractéristique $U(I, x)$ d'un arc de faible intensité brûlant dans l'atmosphère sous tension continue [38].

II. 4. 6. Modèle d'Alston et Zoledziowski :

En tenant compte de l'hypothèse de Neumarker [33] et pour une tension d'application dépassant quelques kV. Alston et Zoledziowski [39] ont déterminé la condition de maintien de l'arc électrique, dans le cas d'un isolateur cylindrique de longueur L (figure II. 5) soumis à une tension continue:

$$U_{cx} = (n + 1)(Ax)^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{r(L - x)}{n} \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{II.18})$$

où x est la longueur d'arc, A et n sont les constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc, et r représente la résistance de la pollution en série avec l'arc.

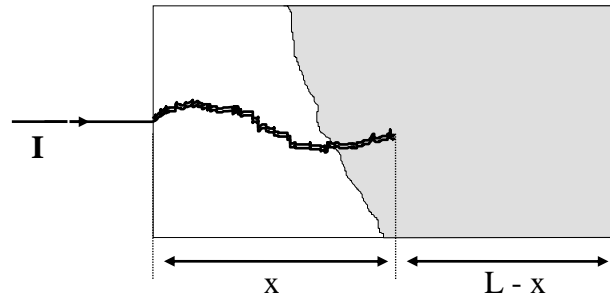


Figure II. 5. Modèle cylindrique utilisé par Alston et Zoledowski

II. 4. 7. Modèle de Danis :

Afin de reproduire des couches similaires à celles observées sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, Danis [40] a utilisé un modèle de forme géométrique simple (plan ou cylindre) possédant plus d'une zone sèche (Figure II. 6. a). La rupture des zones sèches survient alors d'une manière aléatoire (Figure II. 6. b). Le lieu d'apparition des arcs partiels, la forme et le mouvement des racines des arcs sur une surface polluée (Figure II. 6. c) dépendent ainsi de plusieurs facteurs, dont on ne peut pas déterminer les effets instantanés. Par conséquent, le comportement macroscopique de ces arcs a une nature stochastique. La tension de contournement est donc une variable aléatoire et a une fonction de distribution.

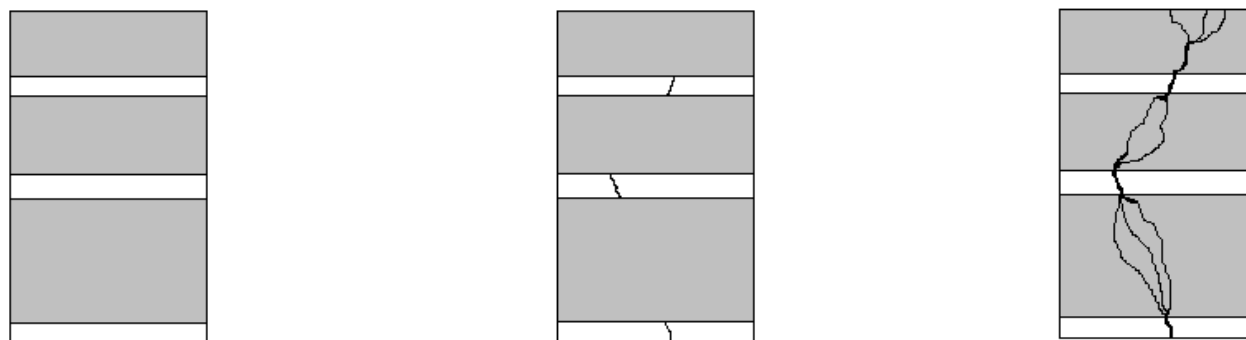
Une simulation numérique des observations expérimentales, utilisant des photographies à grande vitesse (3000 images par seconde), a été effectuée pour déterminer cette tension.

En considérant que la résistance de la couche polluante est linéaire, l'équation qui régit le modèle sous tension continue est :

$$U = \frac{Ax}{I^n} + r_p(L - x)I \quad (\text{II.19})$$

avec $n \leq 0.5$ et $200 \leq A \leq 400$

r_p est la résistance linéique .



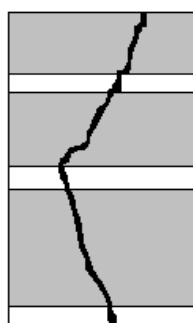
a- Absence d'arcs

b- Formation d'arcs

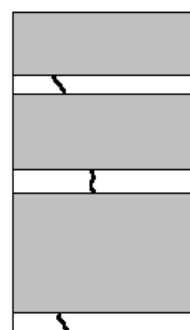
c- Connexion d'arcs

Zone polluée

Zone propre



d- Contournement



e- Création d'arcs

Figure II . 6 . Modèle de Danis

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

$$I_c = \left(\frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \tag{II.20}$$

et

$$U_c = L(Ar_p)^{\frac{1}{n+1}} = AI_c^{-n} \tag{II.21}$$

II. 4. 8. Modèle de Nacke et Wilkins :

Nacke [41, 42] et Wilkins [28] ont élaboré un modèle sous tension continue. Ils considèrent que les points à la base de l'arc forment des demi-cercles aux limites des bandes sèches (Figure II. 7. a). Ainsi, la résistance de la pollution se compose de deux termes : une résistance interne R_i propre aux deux demi-cercles, et une résistance externe R_e pour le reste.

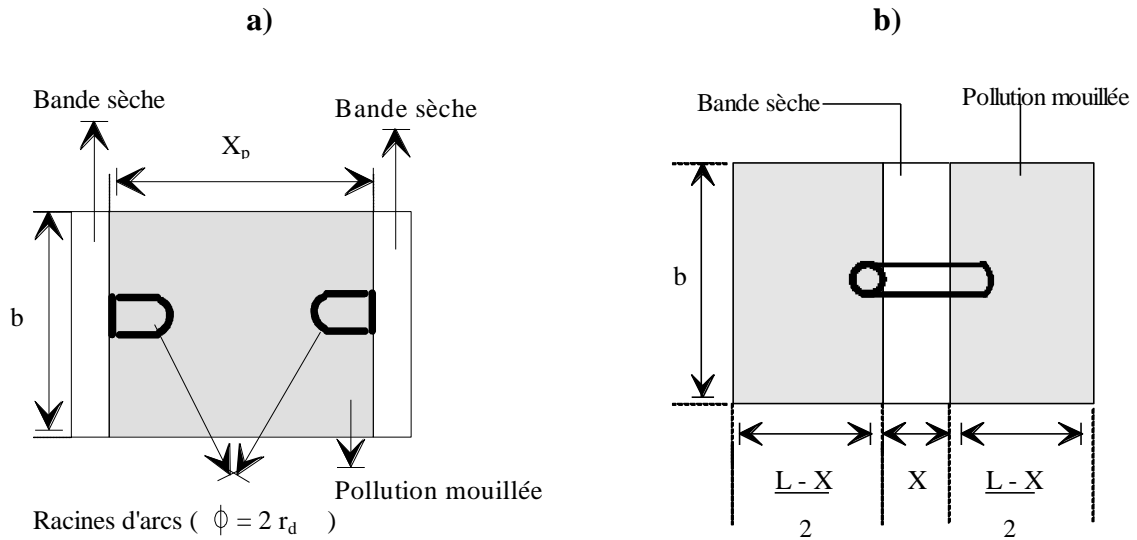


Figure II. 7. Représentation schématique de la surface d'un isolateur et des pointes de base de l'arc utilisé pour le calcul de la résistance de pollution selon:

(a) Nacke, (b) Wilkins

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

$$R_i = \frac{1}{\pi\gamma} \quad (\text{II.22})$$

et

$$R_e = r_p x_p + \frac{2}{\gamma\pi} \log\left(\frac{b}{2r_d\pi}\right) \quad (\text{II.23})$$

avec

$$R_p = \frac{x_p}{b} \quad (\text{II.24})$$

Avec:

r_p : est la résistance linéique de la pollution

x_p : la longueur de la couche polluée (mouillée) dans les conditions critiques

b : la largeur de la surface de l'isolateur

r_d : le rayon de la base de l'arc

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

$$R_e = \frac{2}{\pi\gamma} \left(0.68 + \ln \left(\frac{x_p}{r_d} \right) \right) \quad (\text{II.25})$$

Pour un isolateur à ailettes multiples :

$$R_e = \frac{2}{\pi\gamma} \left(0.3 + \ln \left(\frac{x_p}{r_d} \right) \right) \quad (\text{II.26})$$

Ainsi, la résistance de pollution totale sera :

$$R_p = R_i + R_e \quad (\text{II.27})$$

Pour la même configuration (Figure II. 7. b), dans le cas d'une bande étroite, Wilkins [18] a obtenu :

$$R_p = r_p(L - x) + \frac{1}{\pi\gamma} \ln\left(\frac{b}{2r_d\pi}\right) \quad (\text{II.28})$$

et pour une bande large :

$$R_p = \frac{1}{\pi\gamma} \left(\ln\left(\frac{2L}{\pi r_d}\right) - \ln\left(\tan\frac{\pi x}{L}\right) \right) \quad (\text{II.29})$$

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

II. 4. 9. Modèle de la couche mixte :

De façon à mieux représenter la résistance superficielle de pollution d'un isolateur à long fut, Obenaus et Boheme [43] ont considéré que celle-ci était équivalente à deux couches résistantes en série, de résistance linéique r_1 et r_2 et correspondant respectivement à la tige et aux ailettes, et ils ont décomposé la distance totale de fuite L en deux distances partielles, L_1 et L_2 respectivement (Figure II. 8).

L'application du critère de Hampton leur a permis de déduire la relation (II.30) donnant le gradient de contournement critique (en faisant certaines hypothèses et choisissant l'exposant $n=1$) :

$$\frac{U_c}{L} = 0.8\sqrt{A}\cdot\sqrt{r_1} \quad (\text{II.30})$$

où: $A=80\text{VA/cm}$

Le modèle concorde bien avec les résultats d'essais obtenus en régime alternatif pour les couches polluantes de faibles résistivités.

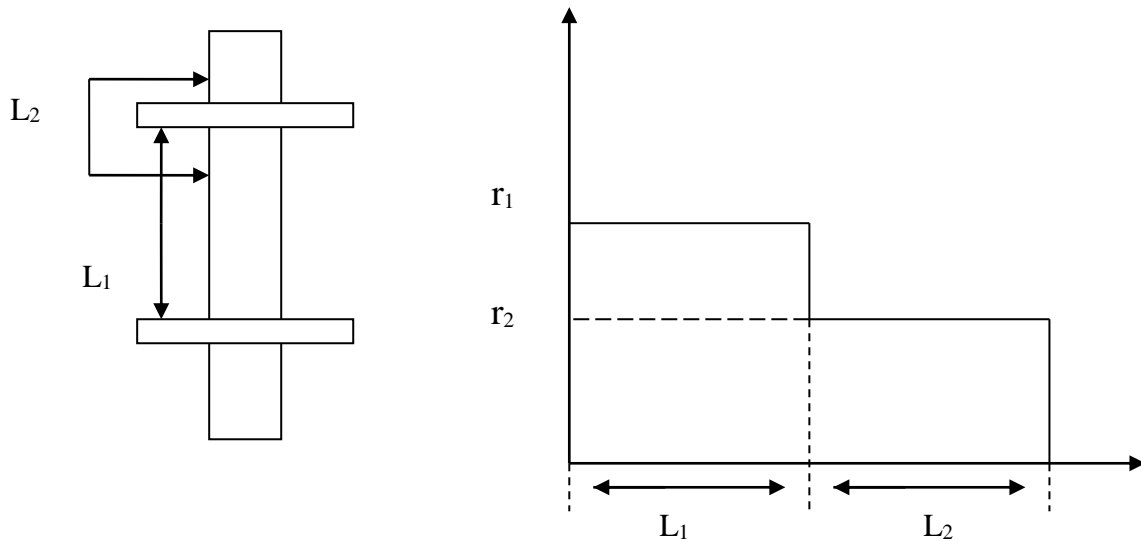


Figure II. 8. Modèle d'un isolateur à long fut et distribution de la résistance de pollution selon Boheme et Obenaus

En appliquant le critère de Hesketh [27], l'expression précédente devient

$$\frac{U_c}{L} = 0.8(L.r_p.i) \quad (\text{II.31})$$

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

II. 4. 10. Modèle du disque circulaire :

Woodson et McElroy [44] ont imaginé une configuration géométrique, illustrée à la figure (II. 9), qui représenterait de façon idéale la surface d'un isolateur à disque. Ils partaient de l'hypothèse que, de façon générale, la résistance superficielle de la couche de pollution humide, pour n'importe quelle position r_a du point de départ de l'arc de rayon r_d , peut s'exprimer par une fonction de la forme :

$$R_p = \frac{1}{\gamma} f(r_d, r_a, r_o) \quad (\text{II.32})$$

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

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

$$R_p = \frac{\text{const}}{\gamma} (r_o - r_a)^m \quad (\text{II.33})$$

La constante a été ensuite déterminée expérimentalement pour $R_p = 1.6 \cdot 10^{-2}$ et la valeur obtenue était 1,4. McElroy et Woodson [44] l'ont utilisé avec assez peu de succès.

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

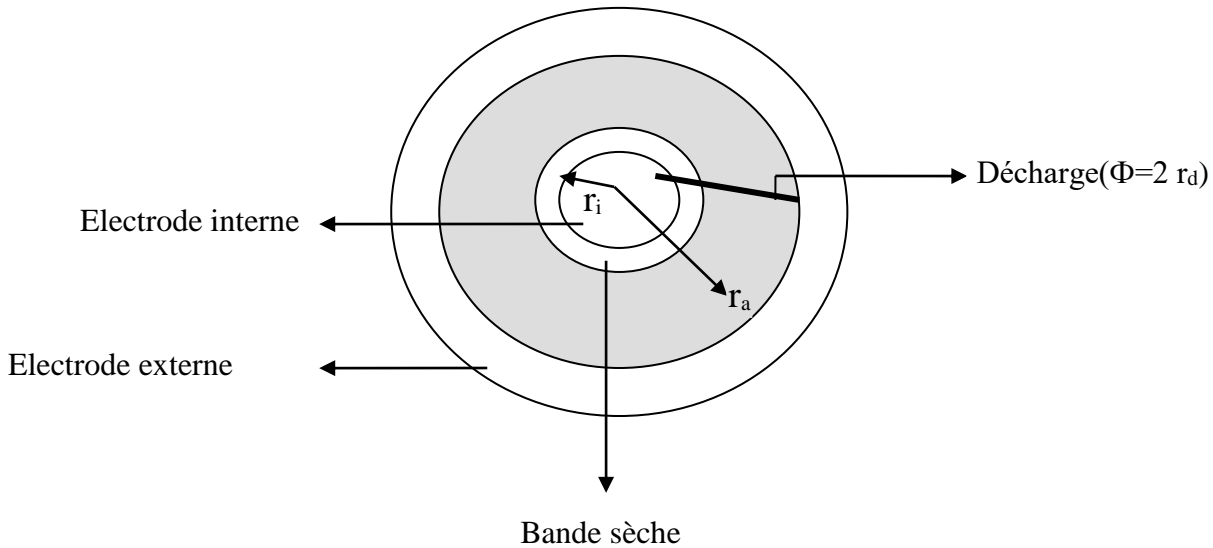


Figure II. 9. Model d'isolateur en forme de disque conçu par McElroy et Woodson

II. 4. 11. Modèles de Tegar :

a / Cas de pollution continue :

Tegar [1] a élaboré un modèle statique en tension alternative. Son modèle est basé sur celui d'Obenaus [31], 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 [35, 36], 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 :

$$R_p = \frac{1}{\rho} \frac{K - 100}{K} \frac{U}{I} = \rho F_p \quad (\text{II.34})$$

où ρ représente la résistivité de la couche de pollution et K la constante de la caractéristique statique de 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 décharge électriques sur des surfaces isolantes uniformément polluées.

Un modèle amélioré a été mis au point par Tegar [45] 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 [45] 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 pas des circuits électriques. 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.

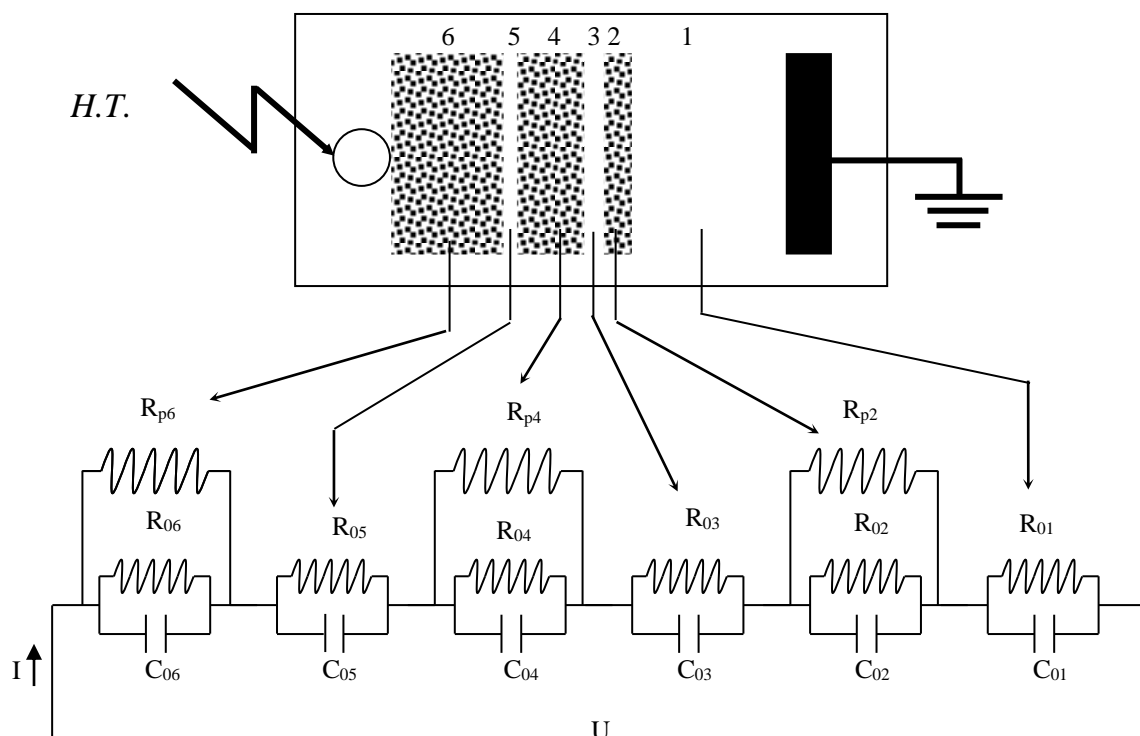


Figure II. 10. Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire

	Bande i	Longueur l _i (mm)	Pourcentage par rapport à la longueur de fuite (%)	
Bande propre équivalente	1	106	36.30	42.12
	3	13	4.45	
	5	04	1.37	
Bande polluée équivalente	2	30	10.27	57.88
	4	52	17.81	
	6	87	29.80	

Tableau II.2: Dimensions longitudinales des zones propres et polluées

La figure (II.10) 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 [14],

l'expression de la résistance pour chaque bande polluée i peut être formulée par :

$$R_{pi} = R_{sp} \int_0^{l_i} \frac{dx}{b} = R_{sp} \frac{l_i}{b} = R_p f \frac{l_i}{b} \quad (\text{II.35})$$

avec $i=2, 4, 6$, R_{pi} la résistance de couche de pollution, dx 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 assez parfaitement avec ceux obtenus expérimentalement pour les grandes largeurs de couches polluantes.

II. 5. modèles dynamiques :

Alors que plusieurs paramètres évoluent dans le temps, l'étude du phénomène de contournement a été souvent effectuée en utilisant des modèles statiques. Afin d'être plus proche de la réalité, de nouveaux modèles ont été élaborés prenant en considération la variation dans le temps de certains paramètres. Ainsi, des lois physiques sont utilisées pour établir les critères de propagation et l'étude de la dynamique de l'arc.

Nous présentons, dans cette section, certains modèles dynamiques basés sur le modèle d'Obenaus [31] et celui de Mayr [46] pour le comportement dynamique de l'arc.

II. 5. 1. Modèle de Rizk et Nguyen :

Pour caractériser la dynamique de l'arc pour le cas continu, Rizk et Nguyen [47] ont considéré une résistance d'arc qui varie selon l'équation de Mayr [46] :

$$\frac{dR_{\text{arc}}}{dt} = \frac{R_{\text{arc}}}{\tau} - \frac{R_{\text{arc}}^2 I^{n+1}}{A\tau} \quad (\text{II.36})$$

Avec

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

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

Les résultats expérimentaux ont montré que ce modèle reproduit correctement l'influence de la résistance de protection placée en série avec l'électrode haute tension.

II. 5. 2. Modèle de Anjana et Lakshminarasimha :

Anjana et Lakshminarasimha [29] ont proposé un modèle basé sur l'équation de Mayr [46] et sur le modèle statique d'Obenaus [31]. Ils ont proposé 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 :

$$W_{\text{th}} = \frac{3}{2} kTM \quad (\text{II.37})$$

Avec

T : la température de l'arc, M le nombre de particules neutres dans l'arc et k la constante de Boltzman.

Pour la propagation de l'arc, Anjana et Al [29] proposent leur propre modèle, selon lequel l'arc ne se déplace que si son énergie totale W_{totale} est supérieure ou égale à l'énergie W_{th} nécessaire pour maintenir l'arc à sa température, où W_{totale} est donnée par l'expression suivante :

Avec :

$$W_{\text{totale}} = (E_{\text{arc}} I_{\text{arc}} - P_0) dt \quad (\text{II.38})$$

E_{arc} : le gradient de la décharge. I_{arc} : le courant de la décharge.

dt : le laps de temps. P_0 : les pertes par unités de longueur (constantes).

Si la condition de propagation n'est pas satisfaite, la tension est incrémentée de dU 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 :

$$V = \mu E_{\text{arc}} \quad (\text{II.39})$$

V : vitesse de propagation de la décharge et μ est la mobilité des électrons dans l'arc.

On déduira :

$$dx = V dt \quad (\text{II.40})$$

La multiplication de la vitesse instantanée par l'intervalle de temps dt (représentant l'incrément temporelle) permet d'obtenir l'évolution dans l'espace équivalente (dx) qui représente l'allongement de la décharge, dont la nouvelle longueur est $(x+dx)$. Si, cette dernière atteint la longueur totale de fuite, il y a contournement. Dans le cas contraire, le temps est incrémenté et les calculs sont repris depuis le début.

II. 5. 3. Modèle de Dhahbi :

Dhahbi [30] a considéré que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure (II.10).

Pour chaque saut de l'arc, on obtient une nouvelle cellule ayant les paramètres suivants : R_i , C_i , L_i et U_i . Elle a considéré aussi que la résistance du canal d'arc varie selon l'équation de Mayr [46] et que la forme de ce canal est cylindrique de résistivité constante.

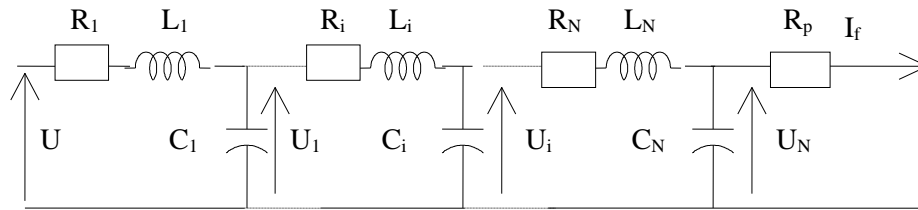


Figure II. 10. Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge selon Dhahbi

où:

R_p : est la résistance de la pollution

C_p : la capacité de la couche de pollution

R_i : est la résistance de l'arc

C_i : la capacité de la décharge

L_i : l'inductance de la décharge

U_i : tension correspondant à chaque cellule nouvellement créée

Ce modèle permet de calculer la tension de contournement, le temps au contournement ainsi que certains paramètres caractérisant la propagation de la décharge électrique le long d'une surface isolante polluée. Elle a utilisé le critère d'impédance comme critère de propagation. Ainsi, Dhahbi a trouvé que les effets de l'inductance du canal de la décharge sont négligeables, et que la forme d'onde de la tension appliquée a une influence directe sur les paramètres régissant le phénomène de contournement.

II. 5. 4. Modèle de Sundararajan et Gorur :

Dans le but d'estimer la tension de contournement des isolateurs pollués sous tension continue, Sundararajan et Gorur [48]

ont proposé un modèle dynamique, qui ressemble à celui de Anjana et Lakshminarasimha [29], mais basé sur le critère de propagation de Hampton [36] (champ au pied de l'arc inférieur à celui dans la pollution).

Concernant le gradient de la tension dans la couche de pollution E_p , ils ont utilisé la contrainte critique donnée par l'expression :

$$E_p = A \frac{1}{r_p^{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{II.41})$$

avec:

r_p : la résistance linéique de la couche de pollution

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

La résistance R_p de la couche de pollution est calculée en se basant sur le facteur de forme de l'isolateur :

$$R_p = \frac{1}{\gamma_p} f = \frac{1}{\gamma_p} \int_X^L \frac{dX}{2r_a \pi} \quad (\text{II42})$$

L est la longueur de fuite de l'isolateur en cm, X la longueur d'arc en cm, dX le pas de la longueur d'arc en cm, γ_p la conductivité superficielle de la couche polluante, en S.

II. 5. 5. Modèle de Tegar :

Le modèle de Tegar [45] en tension continue se base sur le circuit électrique équivalent d'obenaus [31] et utilise le critère de propagation de Hampton [26].

Par ailleurs, Tegar [45] a représenté la résistance de pollution comme une fonction linéaire de la longueur de fuite. Concernant le rayon d'arc, il a utilisé l'expression donnée par Wilkins [28] qui met en évidence la relation entre le rayon r au pied de l'arc et le courant I dans l'arc.

Le modèle qu'il a proposé permet d'évaluer la tension de contournement et 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.

II. 6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons cité les principaux modèles, en régime dynamique et statique, pour l'étude du phénomène de contournement. Ces modèles présentent une approche électrique et se basent tous sur un critère d'extension.

Les modèles statiques traitent le phénomène de contournement sous un aspect global en lui associant un critère d'extension. Ces modèles nous donnent une image à un temps fixe reflétant une situation donnée. Par ailleurs, les modèles dynamiques représentent le mécanisme de contournement qui tient compte des changements instantanés des paramètres caractérisant l'arc électrique.

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) [49, 50]. 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 [50], 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 [5, 48, 51]. 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 μs .

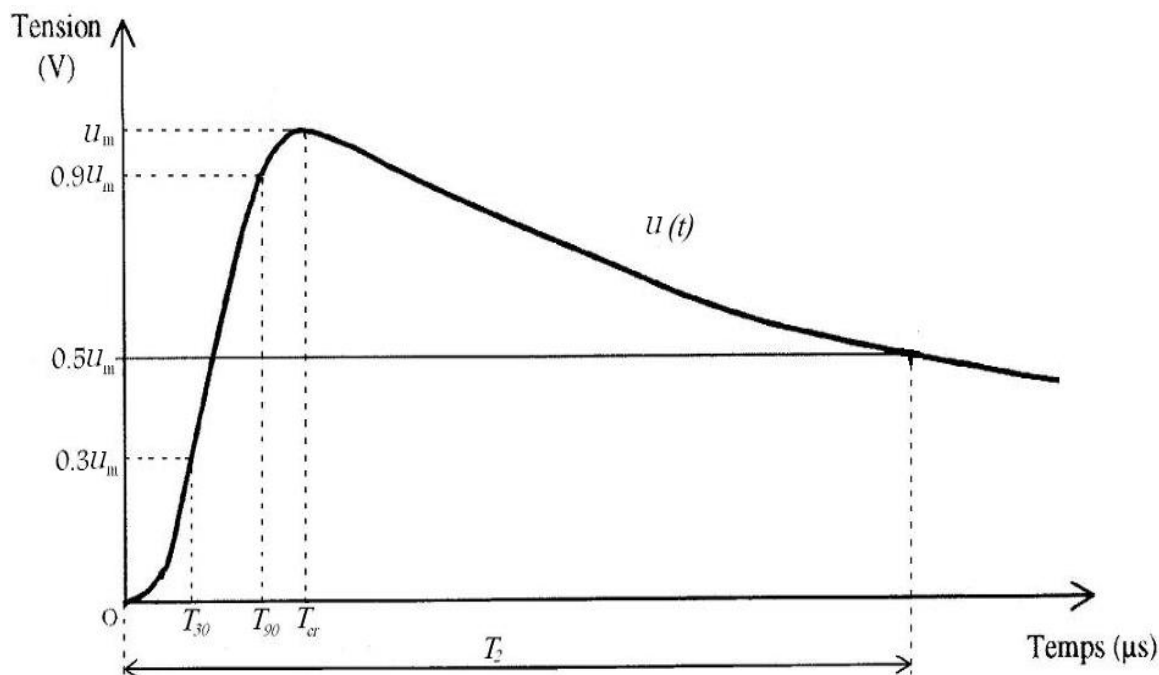


Figure III . 1 : Forme de l'onde impulsionnelle

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 [52, 53] :

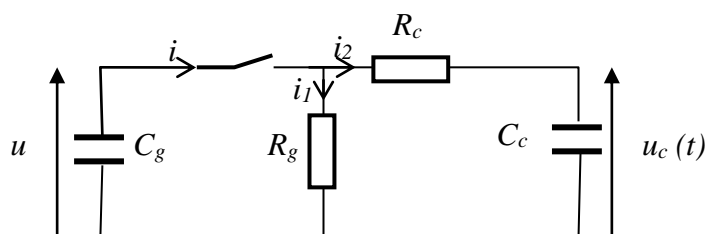


Figure III . 2 : Schéma équivalent du générateur de Marx

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 [50].

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 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 (1), les courants par leurs expressions (5 et 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 (7), l'équation (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 (8) et (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 (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 :

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

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 [50]

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

En divisant la première équation du système (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 [54, 51, 50] :

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

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 $\delta = T_a/T_b$, on peut déduire U_0 :

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

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 [55]. Les valeurs sont ramenées aux conditions normales de température et de pression selon la norme CEI 60-1 [14].

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 [5].

III. 2. Modèle Mathématique :

Certains travaux de recherche [56], 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 [57].

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. .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 [2], ainsi que sur les travaux de Beroual, Fofana, et Dhahbi concernant les décharges électrique sur les surfaces d'isolateurs pollués [52 - 53, 59], 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.

Nous utilisons le circuit électrique équivalent proposé en (Fig. II.10), 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 [53, 59] prennent la valeur de R_0 égale à 100Ω .
- Lors de la modélisation dynamique des décharges sur les surfaces polluées, certains chercheurs [54- 53, 59] prennent R_0 comme étant la résistance d'une élancement 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].

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 [57, 60], nous pouvons considérer l'impédance de la bande polluée comme étant une résistance pure. Avec l'hypothèse d'une conductivité γ_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 γ_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 [52], 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 [52]. 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 γ : 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 [62 – 57, 59]. 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 [57]:

$$C_{0i} = 2\pi\epsilon_0 \left(\frac{1}{\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d}} \right) \quad (\text{III .27})$$

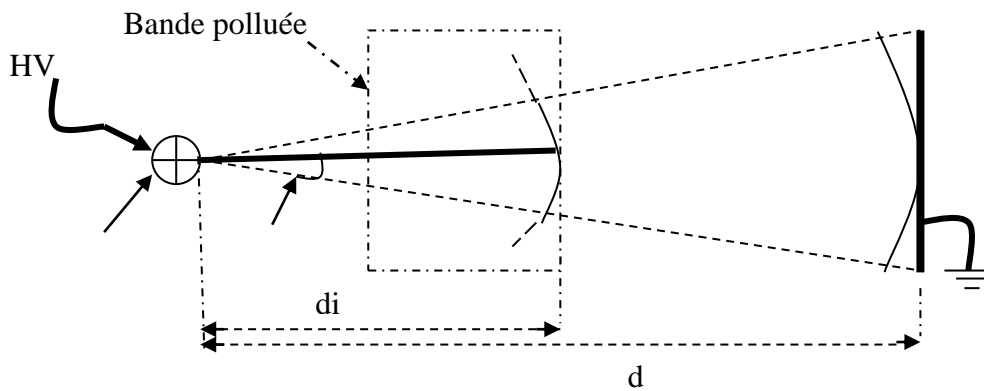


Figure III . 3 : Approximation sphérique

En considérant que le condensateur est en réalité formé par une portion plus petite et délimitée par un angle solide Γ [57].

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

La capacité devient alors [62, 53] :

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

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 [50, 59]. 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 [57], la capacité C_0 que nous avons prise correspond à la moitié de celle calculée à partir des deux sphères concentriques.

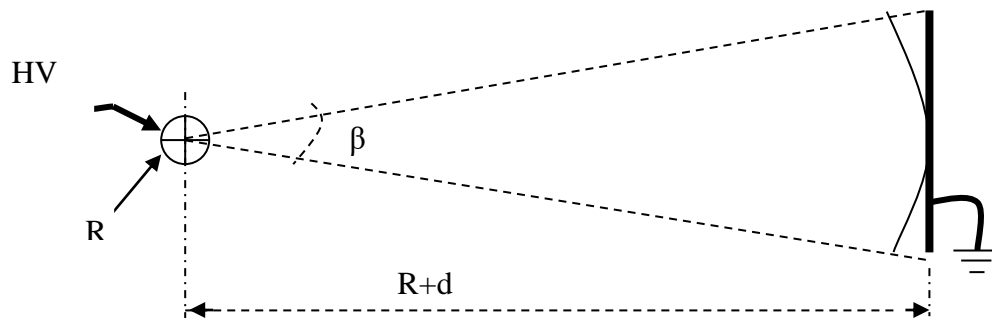


Figure III . 4 : Approximation sphérique du C_0

Dans ces conditions, cette capacité peut s'écrire [62] :

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

Vu les déformations des électrodes, la capacité C_0 est plutôt formée par une portion plus petite délimitée par un angle solide Γ_0 .

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

La capacité C_0 devient alors [45] :

$$C_0 = \Gamma_0 \varepsilon_0 \left(\frac{R(R+d)}{d} \right) \quad (\text{III.32})$$

III .2.4. Mise en équations :

Pour la commodité des calculs, le schéma électrique du modèle global de la figure (. 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)

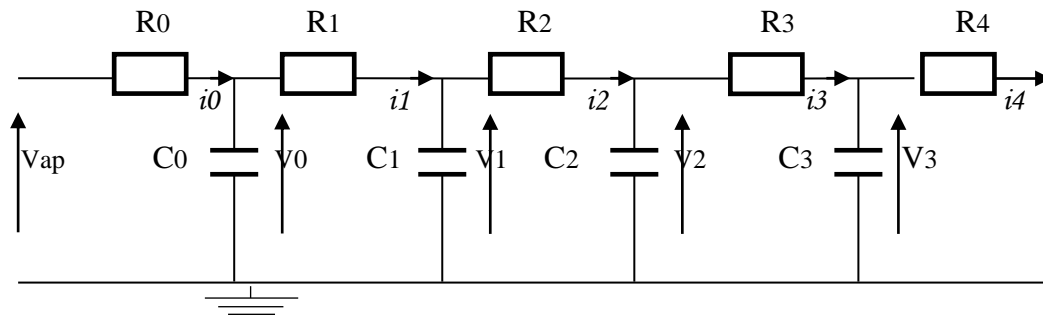


Figure III . 5 : Circuit électrique équivalent simplifiée

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 (.34) et (.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 (.37) à (.40) et (.41) à (.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 :

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

$$a_{21} = \frac{1}{R_1 C_1} \quad ; \quad a_{22} = -\left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2}\right) \quad ; \quad a_{23} = \frac{1}{R_2 C_1}$$

$$a_{32} = \frac{1}{R_2 C_2} \quad ; \quad a_{33} = -\left(\frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_3 C_2}\right) \quad ; \quad a_{34} = \frac{1}{R_3 C_2}$$

$$a_{43} = \frac{1}{R_3 C_3} \quad ; \quad a_{44} = -\left(\frac{1}{R_3 C_3} + \frac{1}{R_4 C_3}\right) \quad ; \quad b = \frac{1}{R_0 C_0}$$

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 [59]. 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 [59].

En passant au domaine de Laplace, et en manipulant formellement les équations d'état (.59) et (.60), 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.Organigramme de calcul :

Pour une résistivité donnée, les principales étapes de l'algorithme de simulation de notre modèle dynamique élaboré sont les suivantes :

Etape 1 : Modulisé le choc de foudre (tension impulsionnelle).

Etape 2 : donnée , largeur de zone de pollution profil de l'isolateur.

Etape 3 : Calcul des paramètres : $C_0, C_{0i}, R_{pi}, R_{0i}$

Etape 4 : Calcul le Matrice de transfert (Y)

Etape 5 : Calcul de courant de fuite I

Etape 6 : Exploitation des résultats.

Ces différentes étapes peuvent être représentées dans l'organigramme de la figure (III .6) suivante :

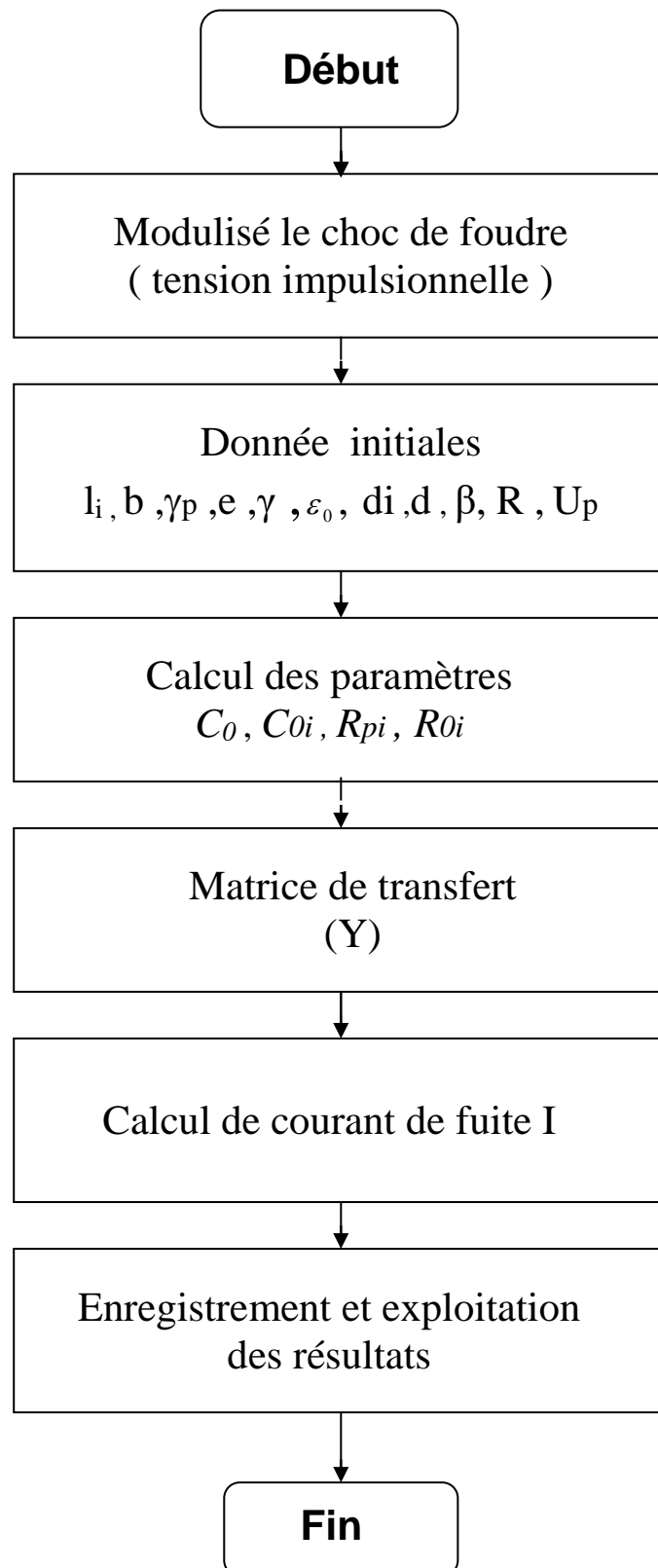


Figure III .6 : *Organigramme du modèle dynamique*

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.

IV.1 INTRODUCTION :

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 $\rho = 0.036 \mu\Omega\text{m}$;
- La conductivité de la bande propre $\gamma = 30 \text{ nS}$.

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 adoptés et les tensions $U_{0\%}$ correspondantes sont comme suites :

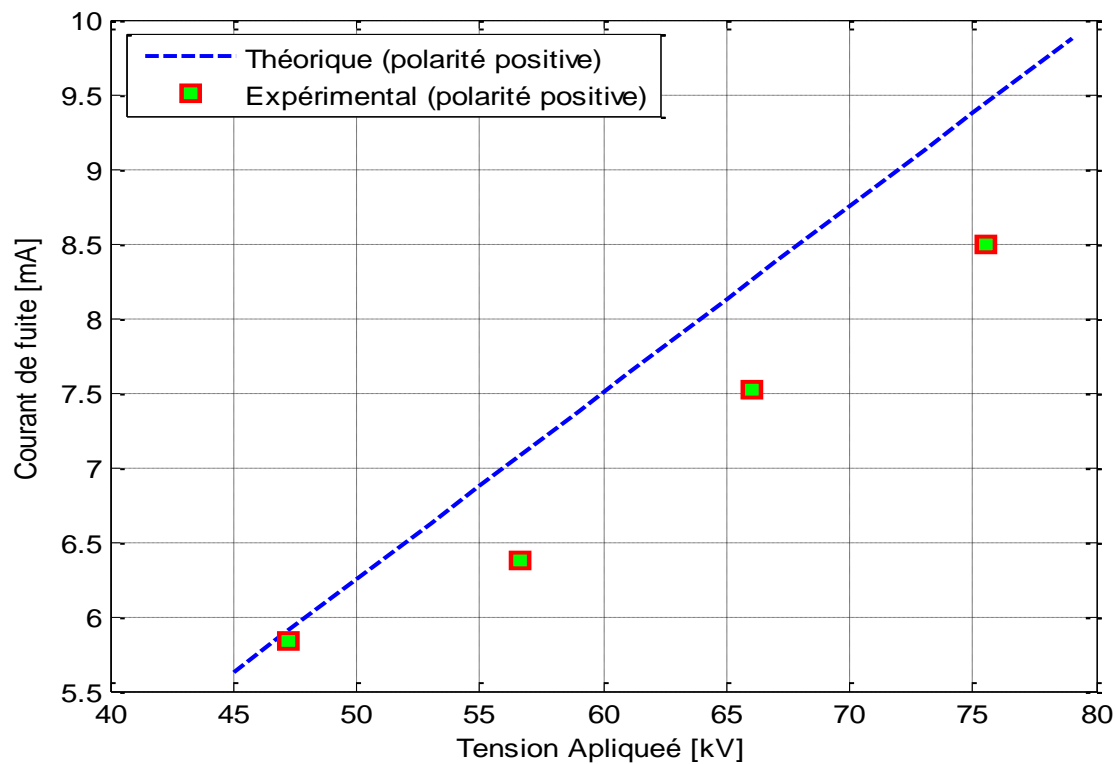
Largeur de la pollution (cm)	1	2	4	6	8	16	32
$U_{0\%}$ (kV) polarité positive	94.4	87.5	94	76	100	88.7	101
$U_{0\%}$ (kV) polarité négative	104.4	99.5	102	94	120	100	83

IV.2.1. Influence de la tension appliquée :

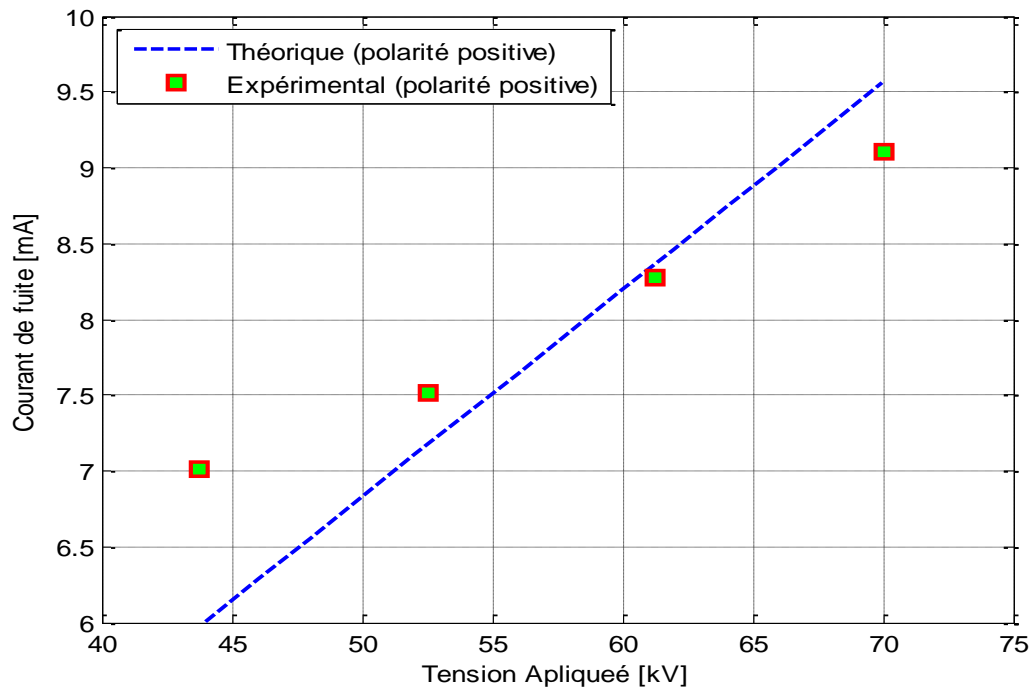
Les figures (IV.1) et (IV.2) illustrent la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour les largeurs de la pollution indiqué au tableau précédant, ainsi que pour les deux polarités.

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.

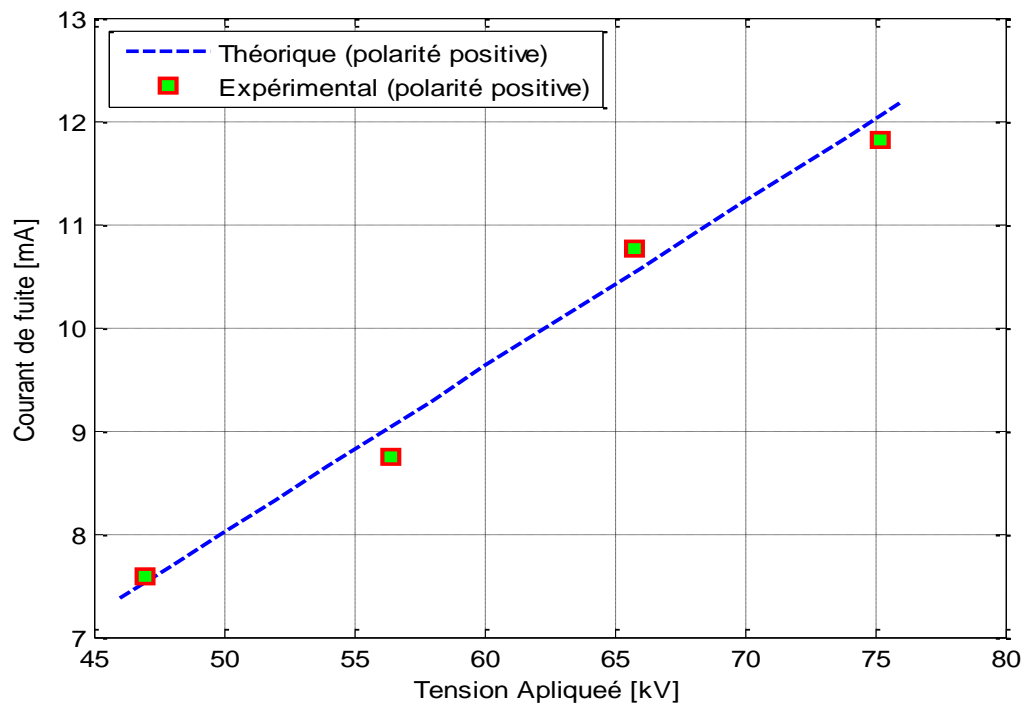
L'analyse des caractéristiques des figures (IV.1) et (IV.2) montre que le modèle théorique proposé présente des résultats assez proches de ceux expérimentaux, et ce pour les deux polarités.



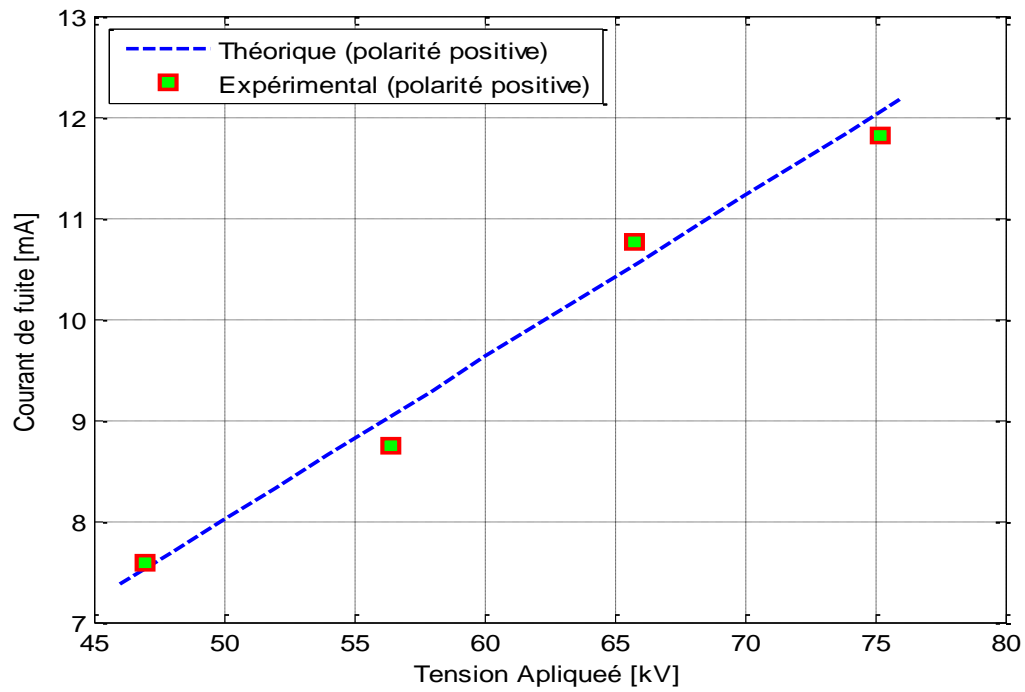
(a) largeur de la pollution : 1 cm



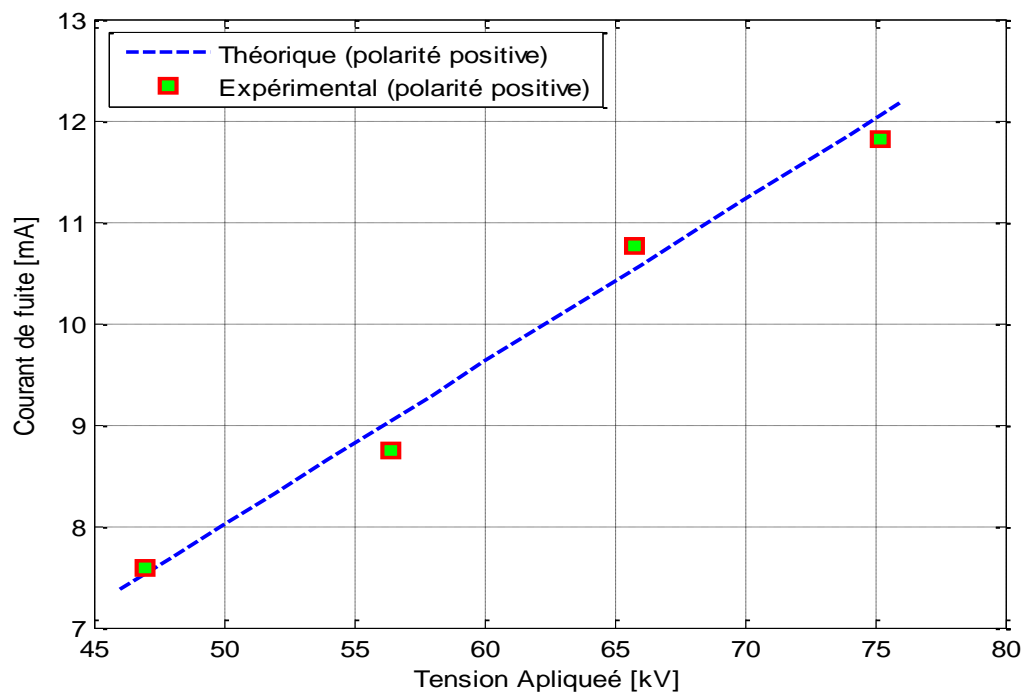
(b) largeur de la pollution : 2 cm



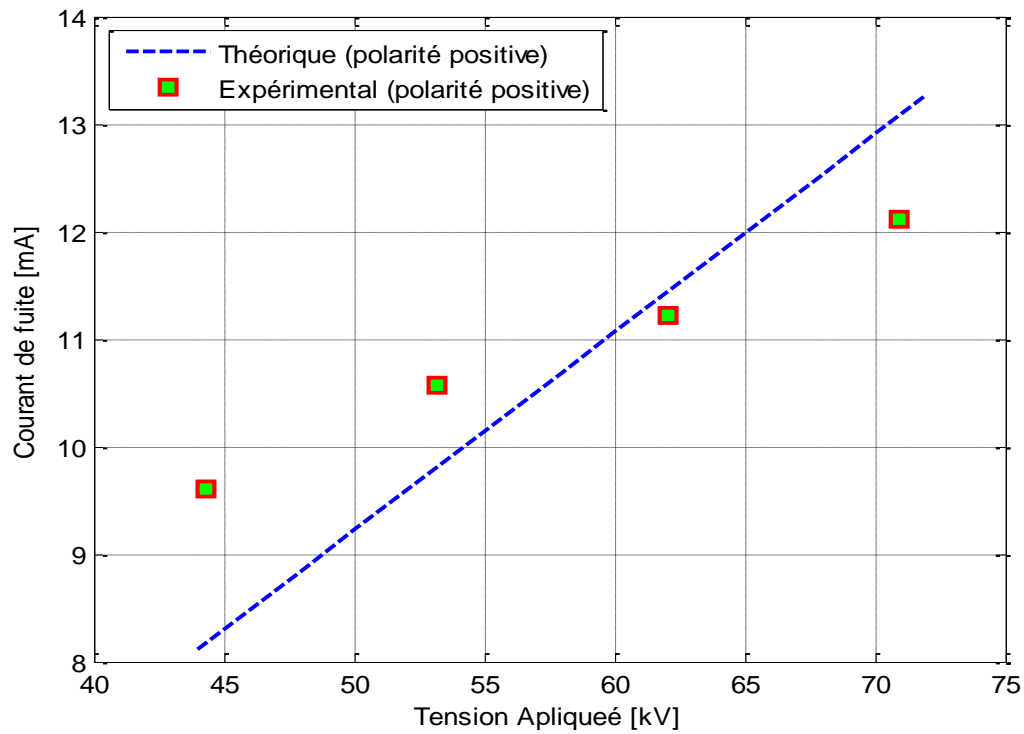
(c) largeur de la pollution : 4 cm



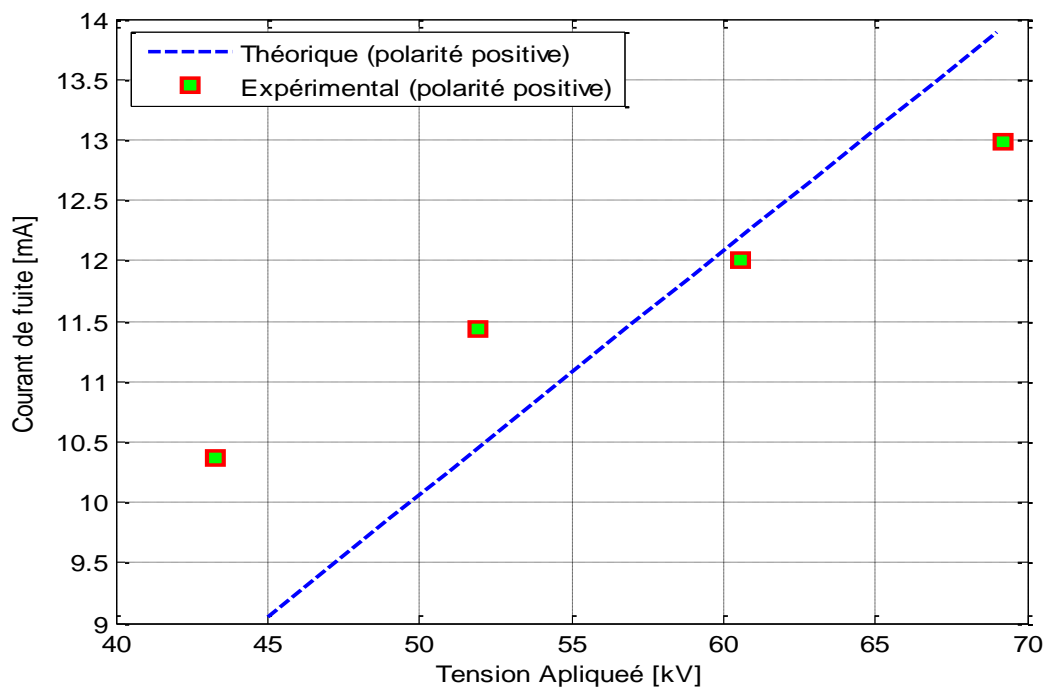
(d) largeur de la pollution : 6 cm



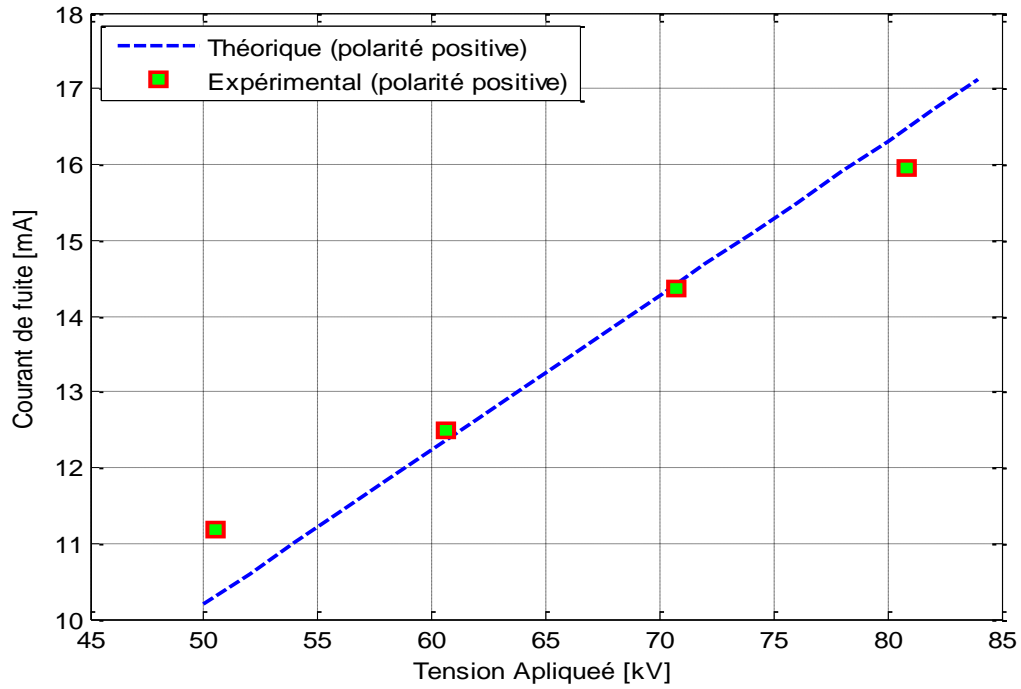
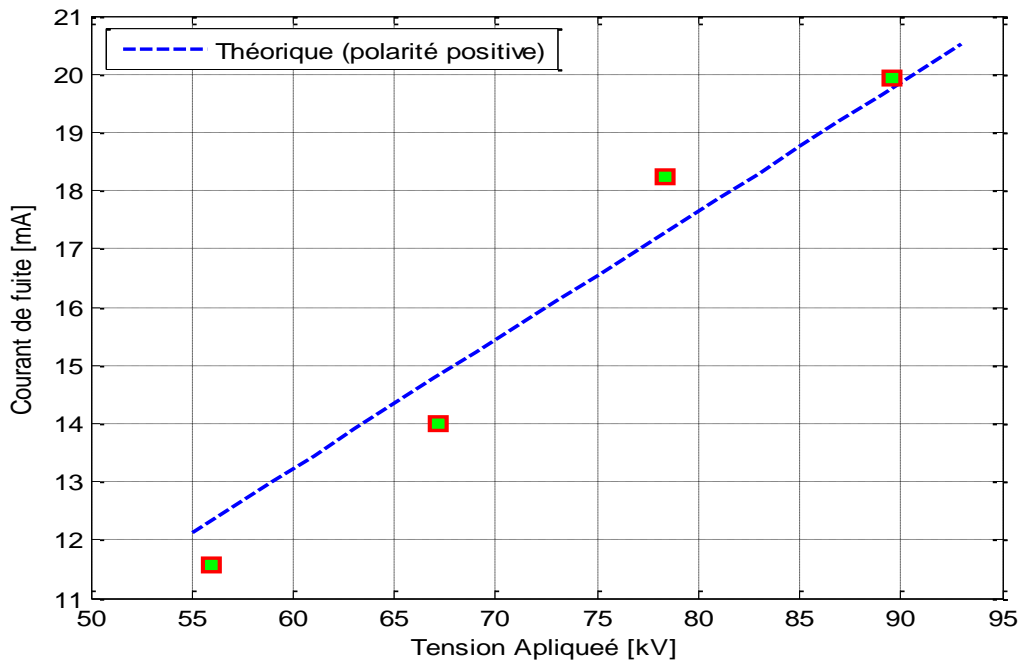
(e) largeur de la pollution : 8 cm

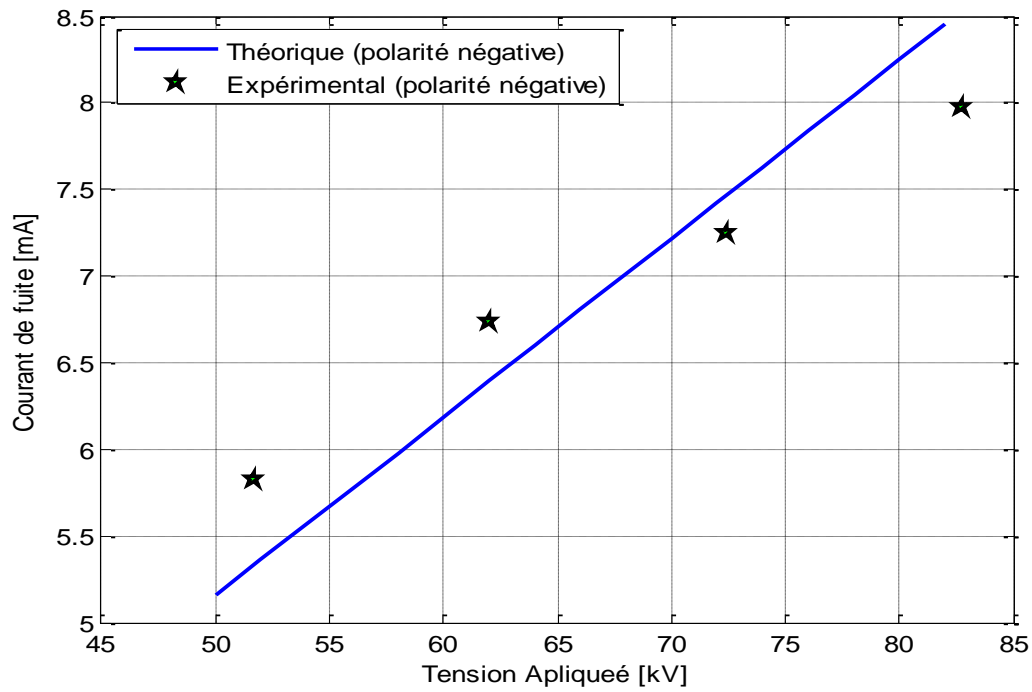


(f) largeur de la pollution : 16 cm

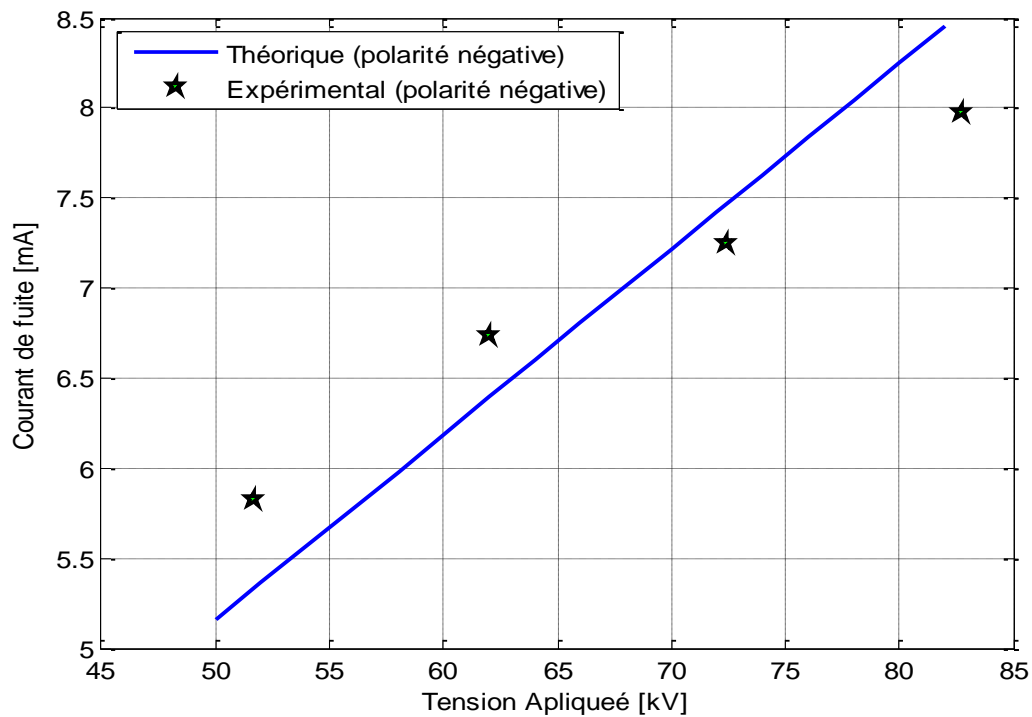


(g) largeur de la pollution : 24 cm

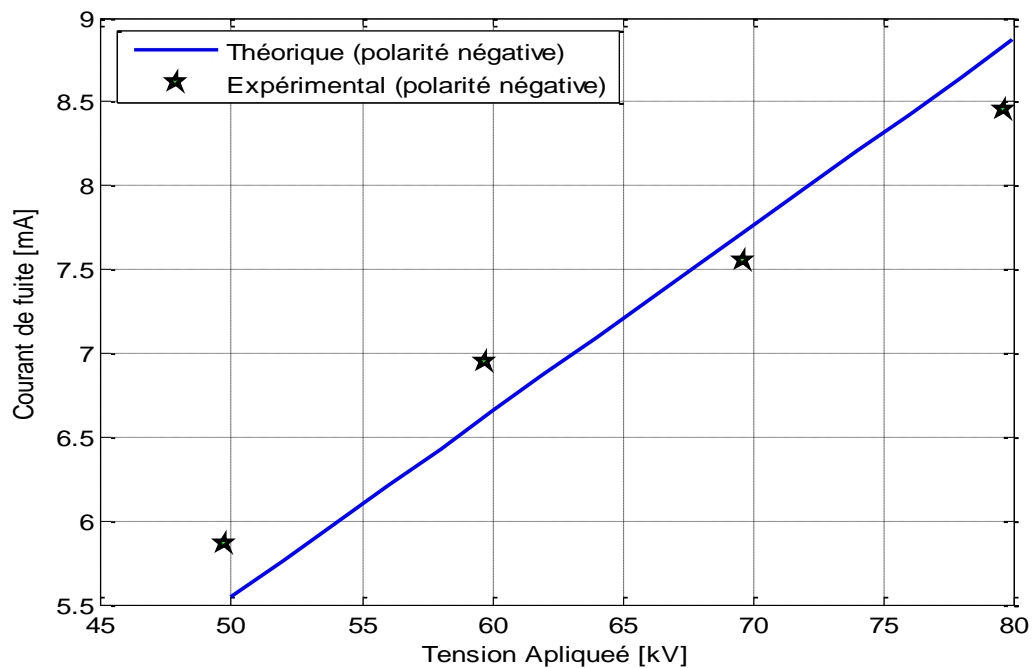
**(h) largeur de la pollution : 32 cm****(i) largeur de la pollution : 40 cm****Figure IV.1** : Courant de fuite en fonction de la tension appliqué en polarité positive



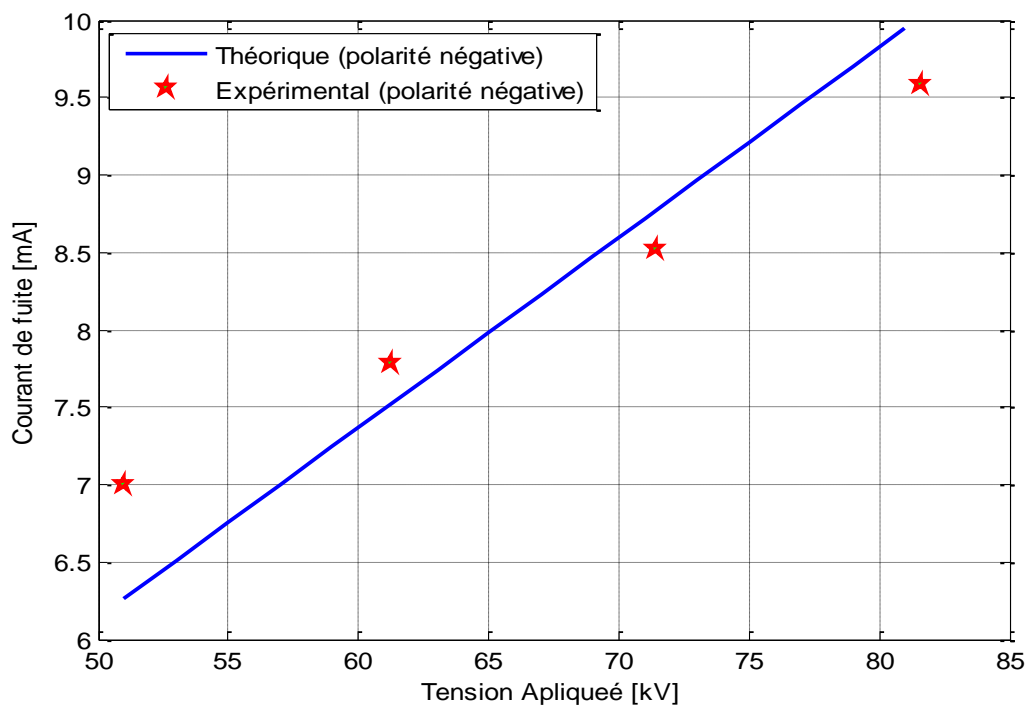
(a) largeur de la pollution : 1 cm



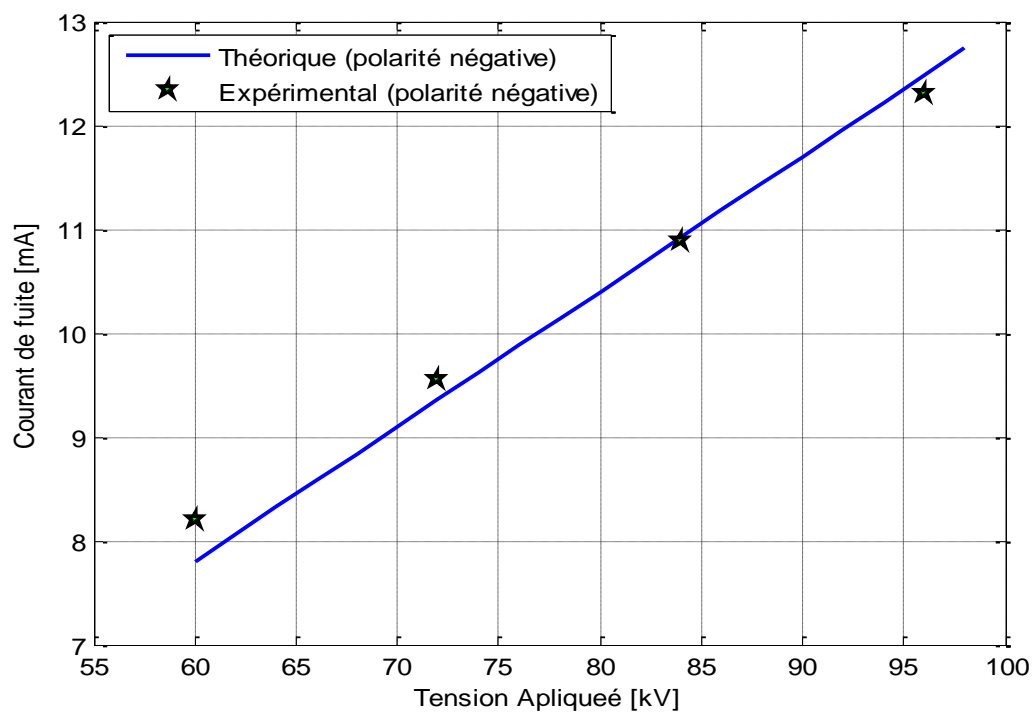
(b) largeur de la pollution : 2 cm



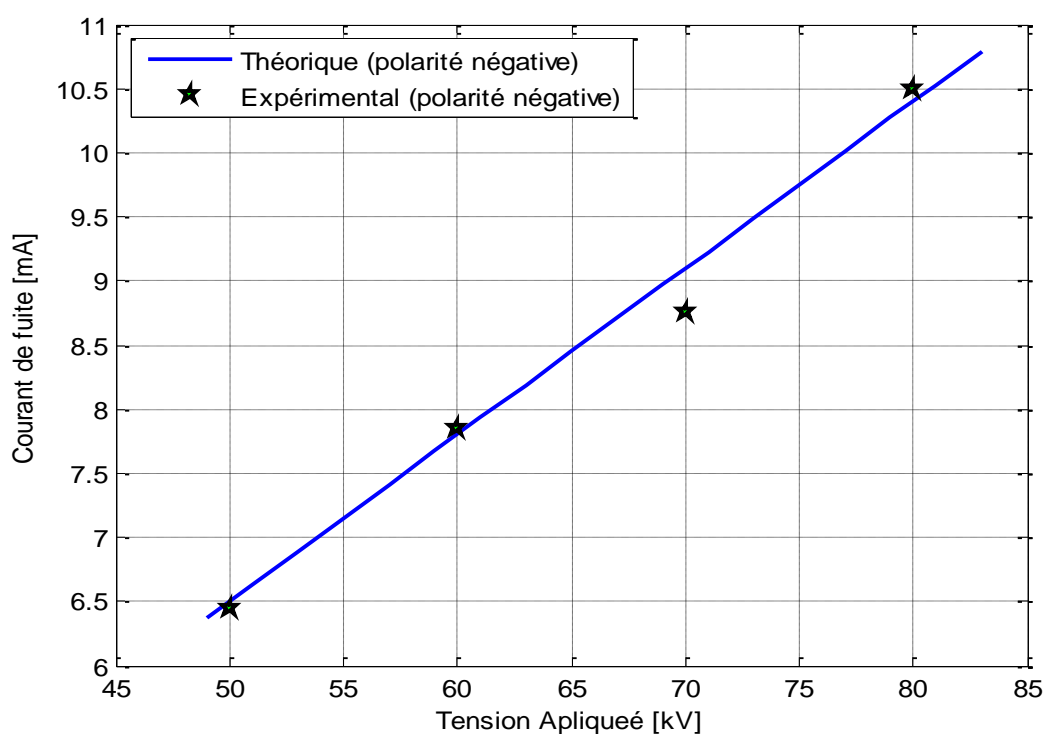
(c) largeur de la pollution : 4 cm



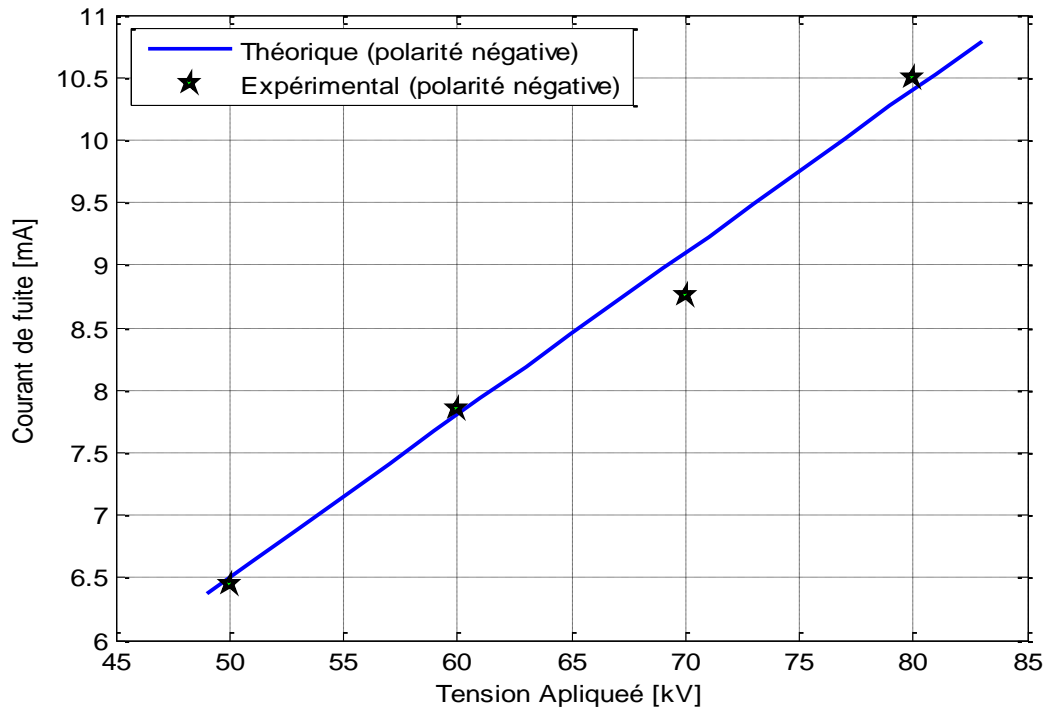
(d) largeur de la pollution : 6 cm



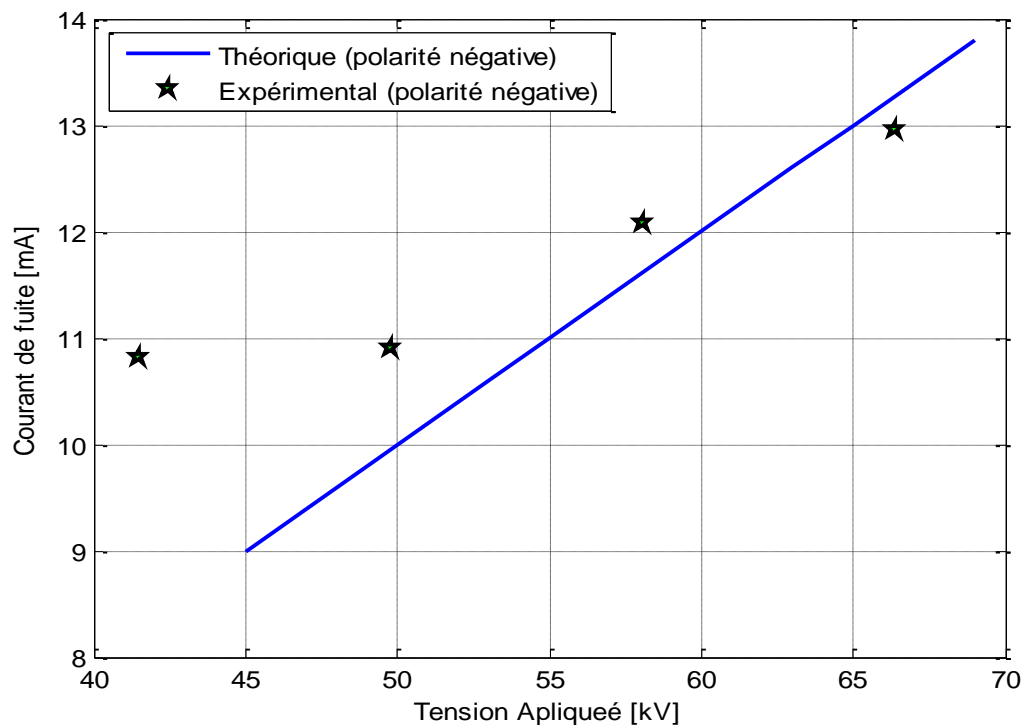
(e) largeur de la pollution : 8 cm



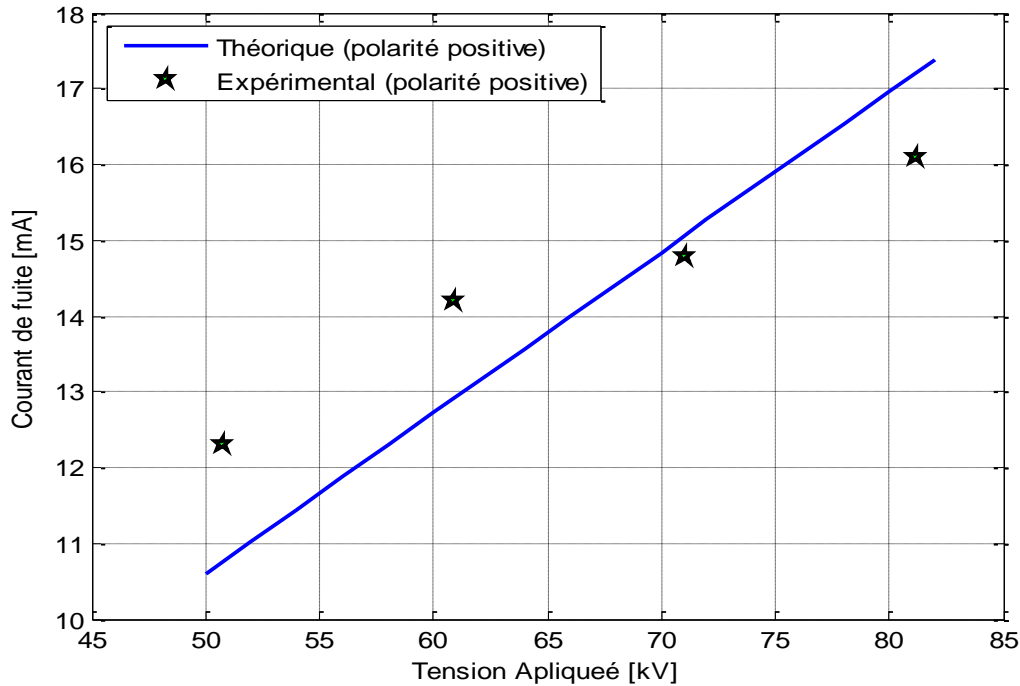
(f) largeur de la pollution : 16 cm



(g) largeur de la pollution : 24 cm



(h) largeur de la pollution : 32 cm



(i) largeur de la pollution : 40 cm

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

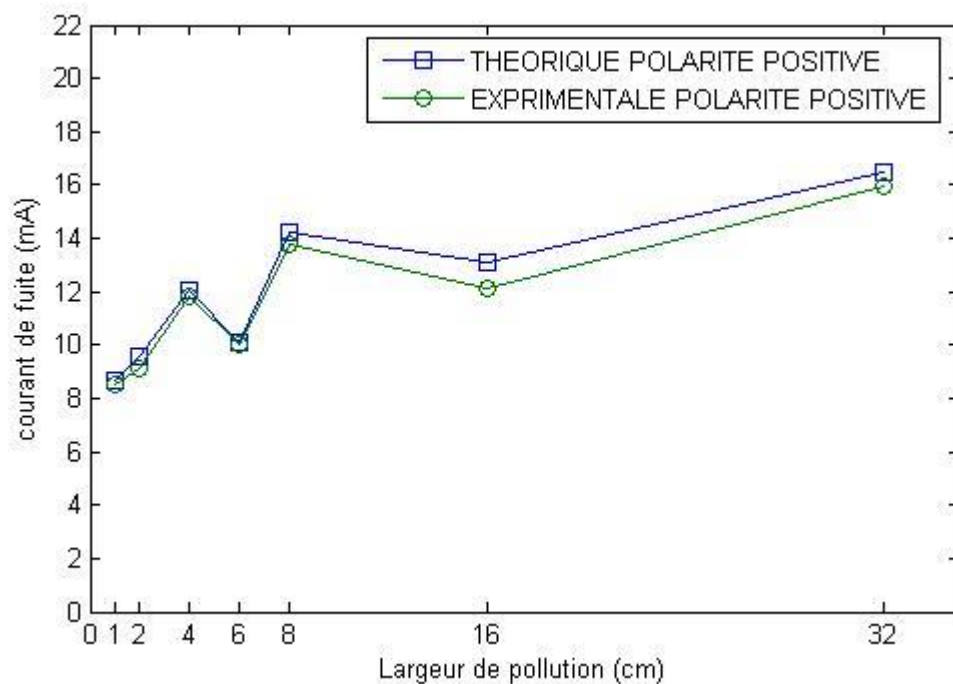
IV.2.2. Influence de la largeur de la pollution :

a / polarité positive :

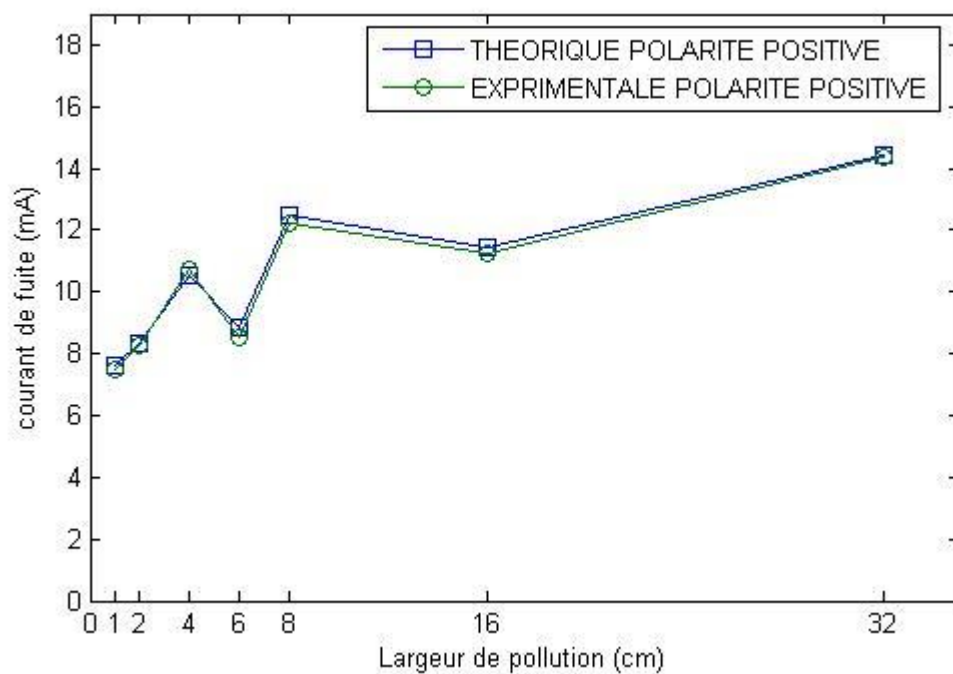
Pour étudier la variation du courant de fuite en fonction de la largeur de la pollution, nous traçons, sur les figures (VI.3) et (VI.4), les courbes théoriques et celles expérimentales, pour différents niveaux de tension et pour la polarité positive ensuite négative.

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

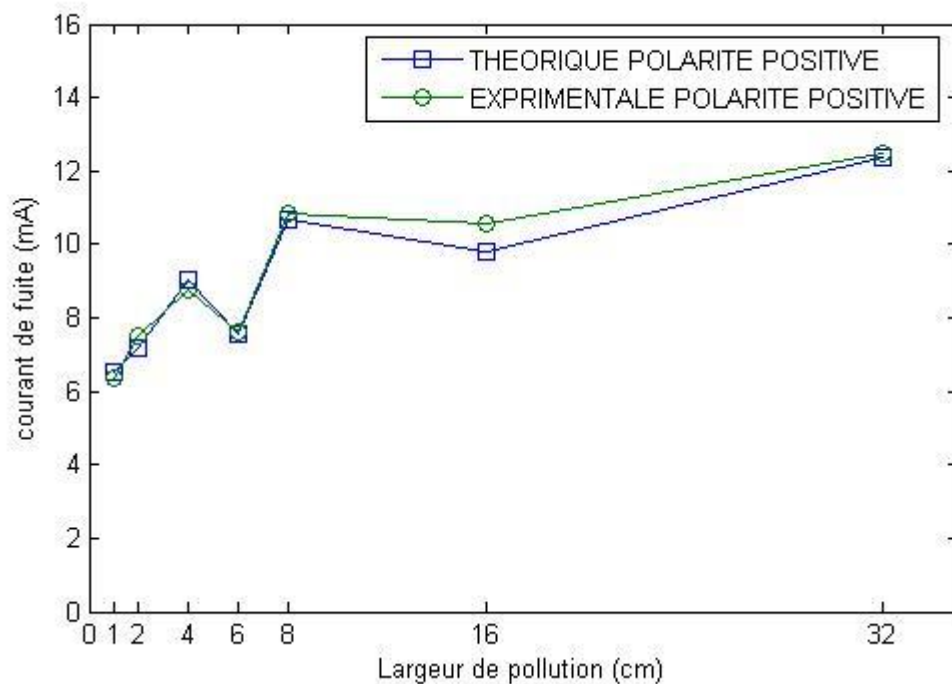
Nous remarquons également que l'accroissement du courant devient rapide pour une largeur de la bande de pollution supérieur à 16cm, et ce quelles que soient la tension et la polarité. Cette augmentation du courant de fuite s'explique par l'affaiblissement de l'impédance totale entre électrodes.



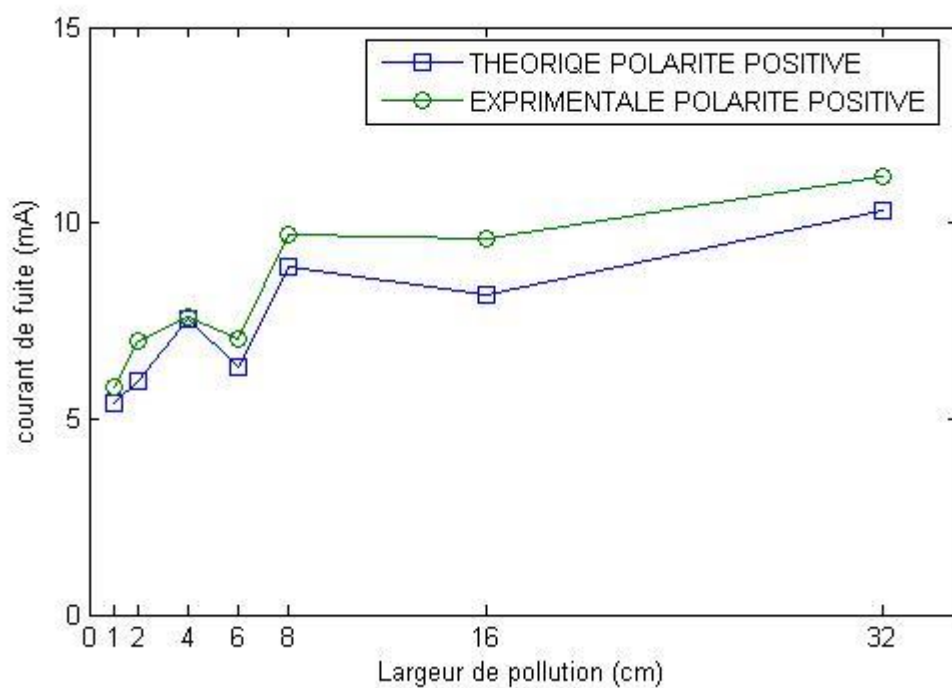
(a)



(b)



(c)

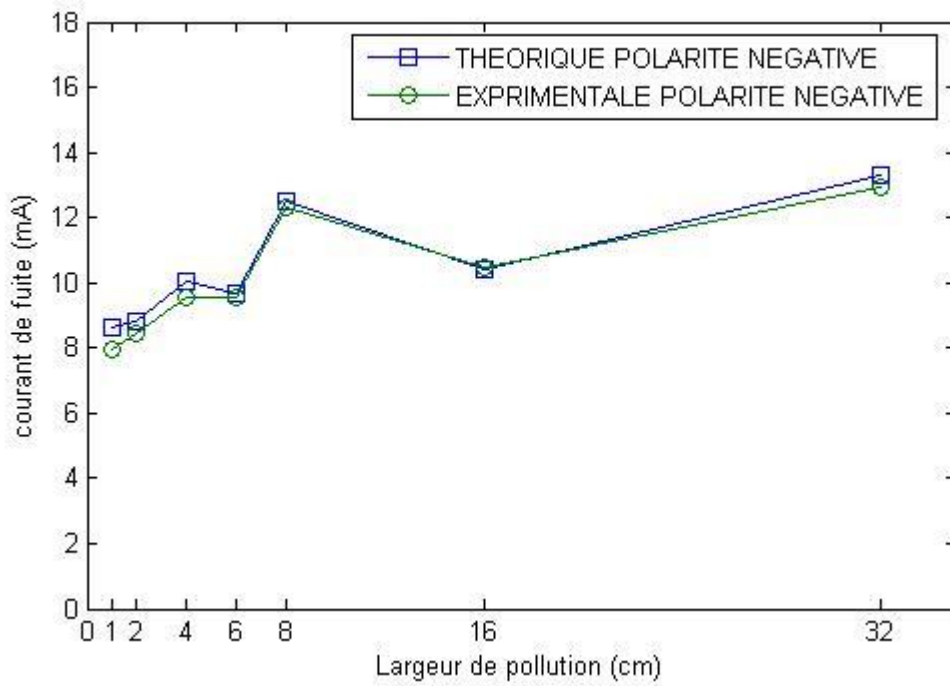


(d)

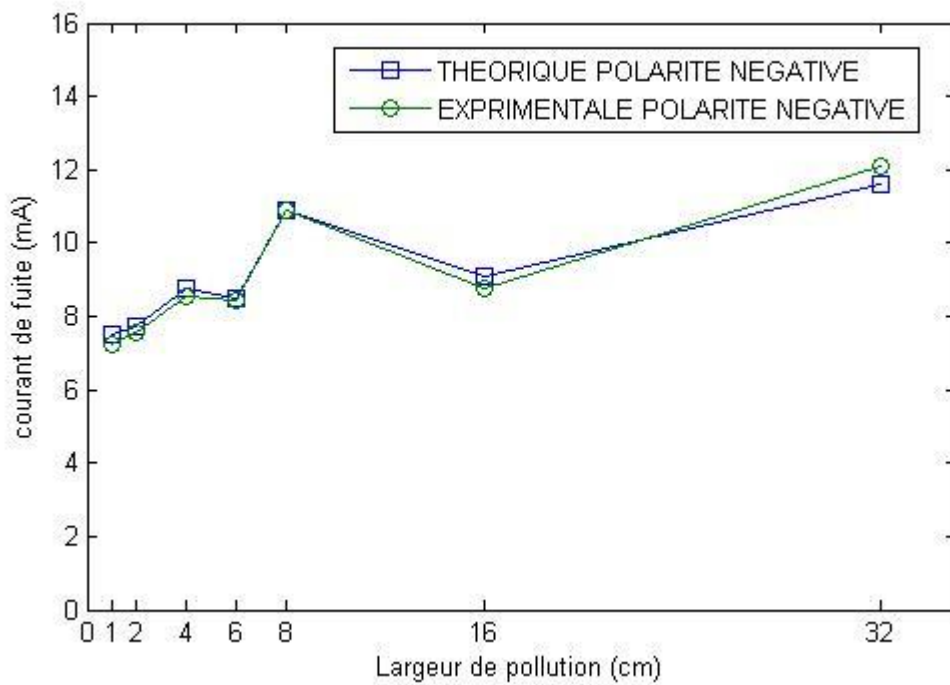
Figure IV.3 : Courant de fuite en fonction de la largeur de pollution et en polarité positive pour :

(a) 0.8U₀% (b) 0.7U₀% (c) 0.6U₀% (d) 0.5U₀%

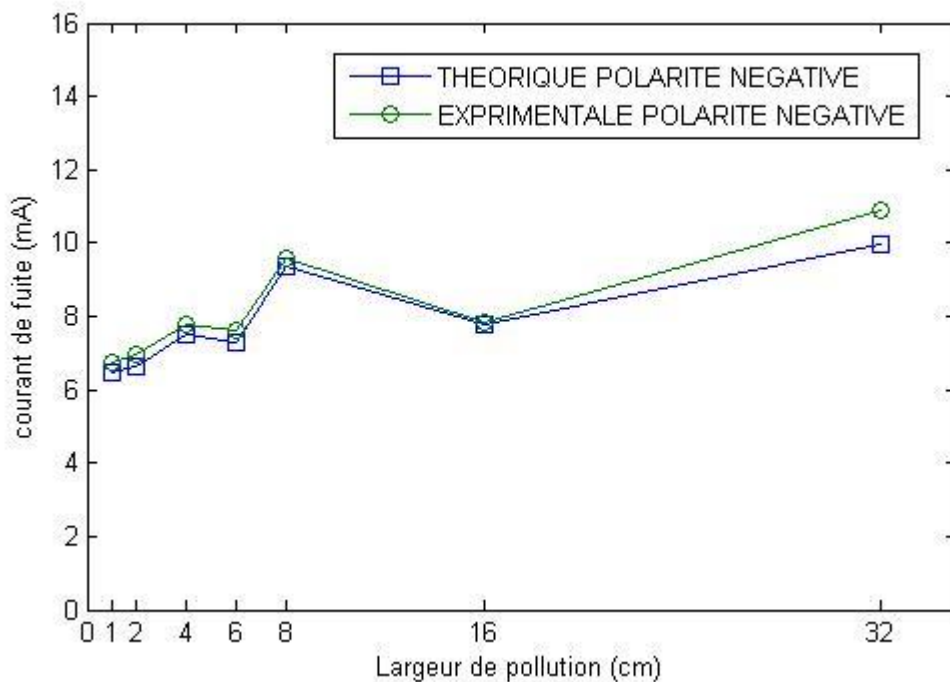
b - polarité négative :



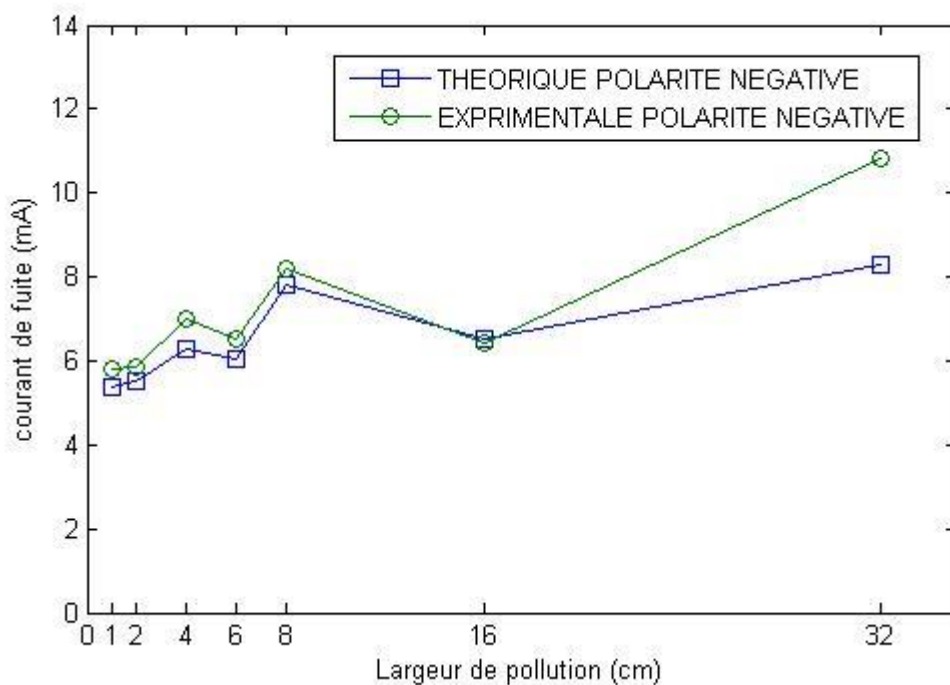
(a)



(b)



(c)



(d)

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

(a) 0.8U₀% (b) 0.7U₀% (c) 0.6U₀% (d) 0.5U₀%

Les caractéristiques (IV.3) et (IV.4) montrent aussi 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 16 cm) et les petites amplitudes de la tension ($0.5U_0\%$).

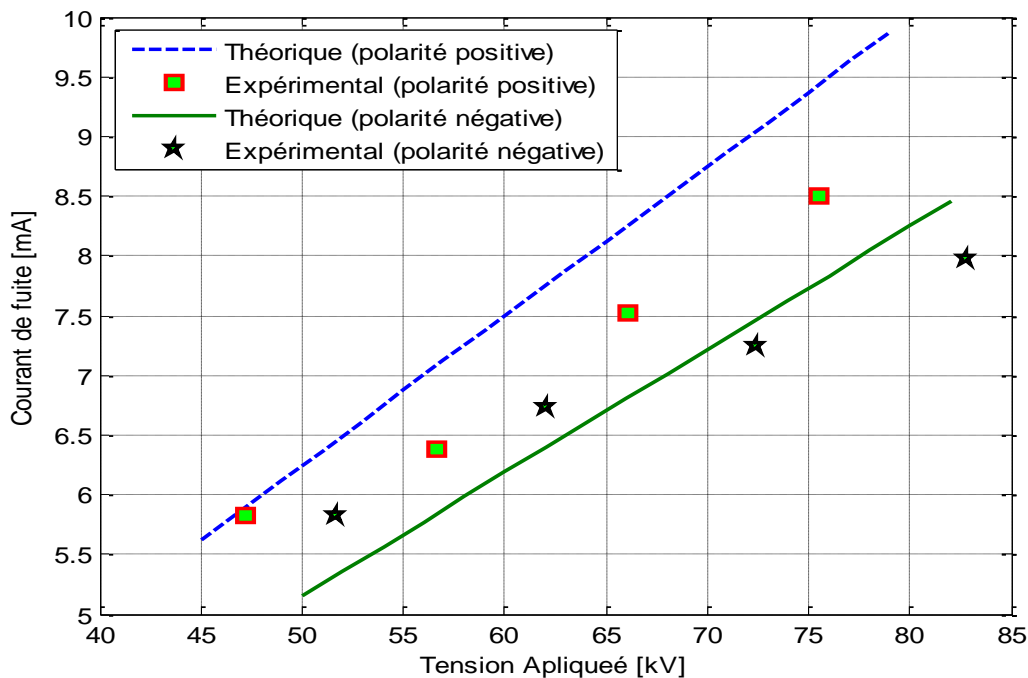
IV.2.3 Influence de la polarité :

L'influence de la polarité de la tension appliquée est très importante a étudiée, car elle a été remarquée par plusieurs auteurs, dans le cas des isolateurs pollué et même pour les diélectriques liquides. Dans une étude plus poussée, Renyu et Al 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.

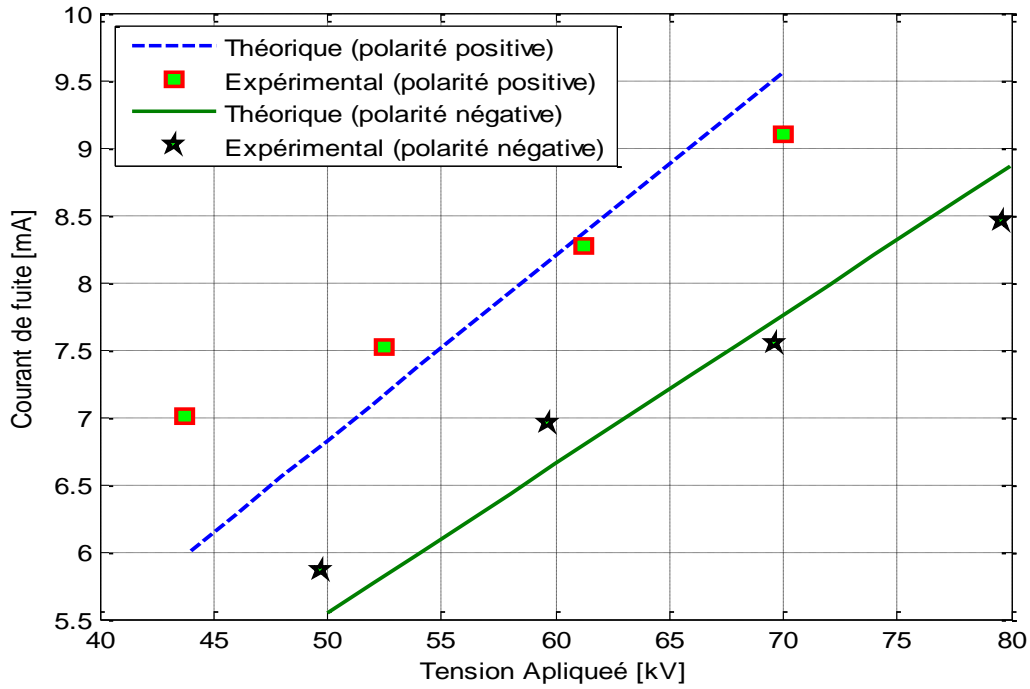
Pour étudier l'influence de la polarité sur le courant de fuite, nous avons tracé, sur les figures (IV.5) et (IV.6), ce dernier en fonction de la tension appliquée, puis en fonction de la largeur de la couche de pollution, pour les deux polarités.

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

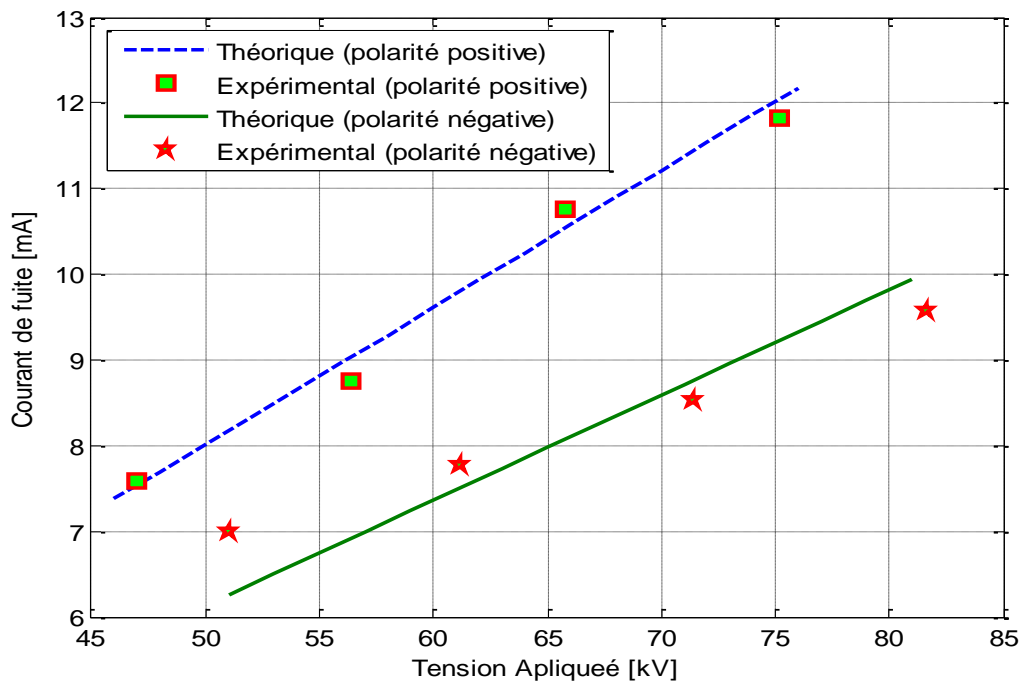
a- Courant de fuite en fonction de la tension appliquée :



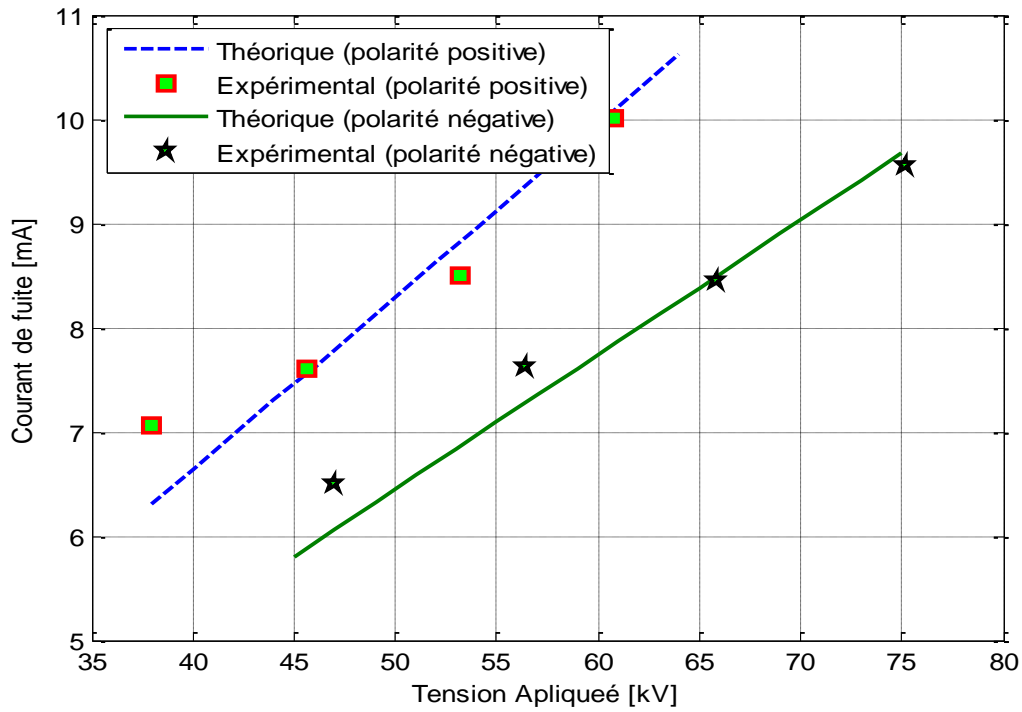
(a) largeur de la pollution : 1 cm



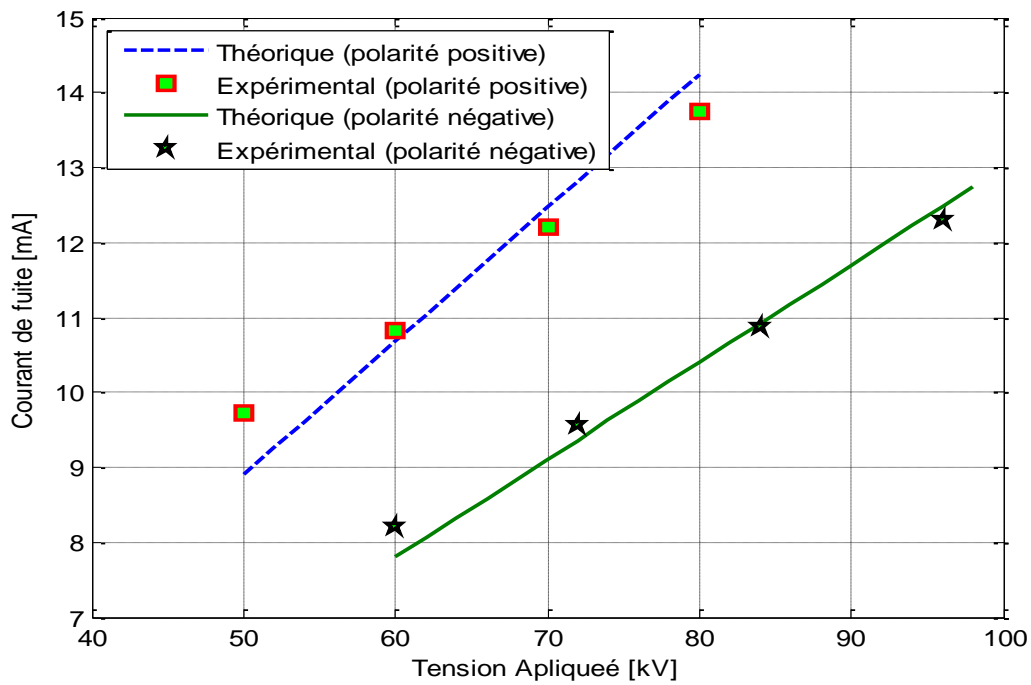
(b) largeur de la pollution : 2 cm



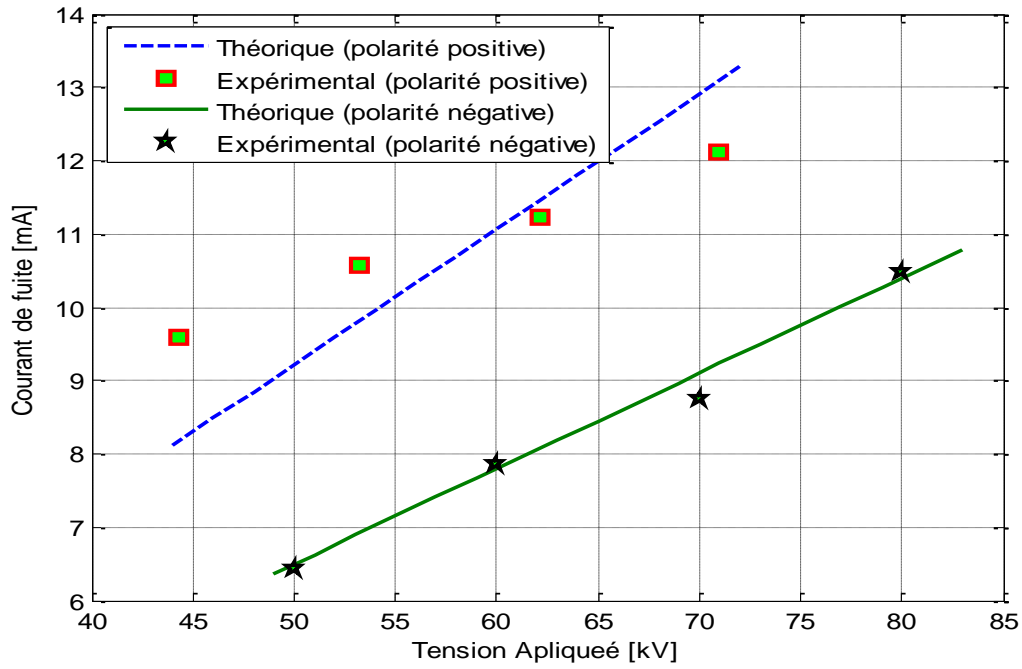
(c) largeur de la pollution : 4 cm



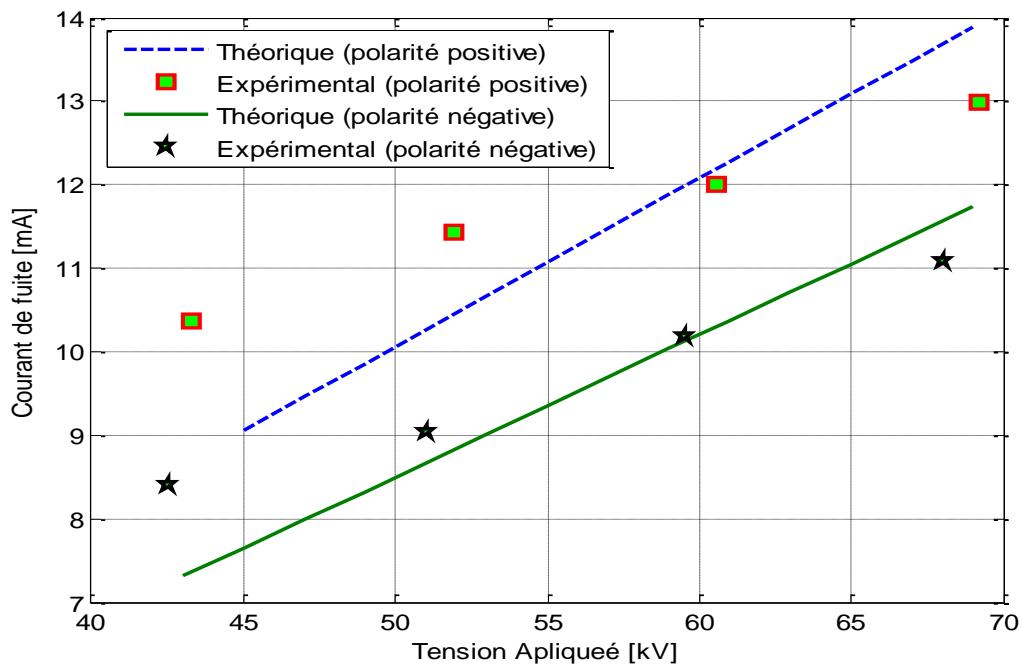
(d) largeur de la pollution : 6 cm



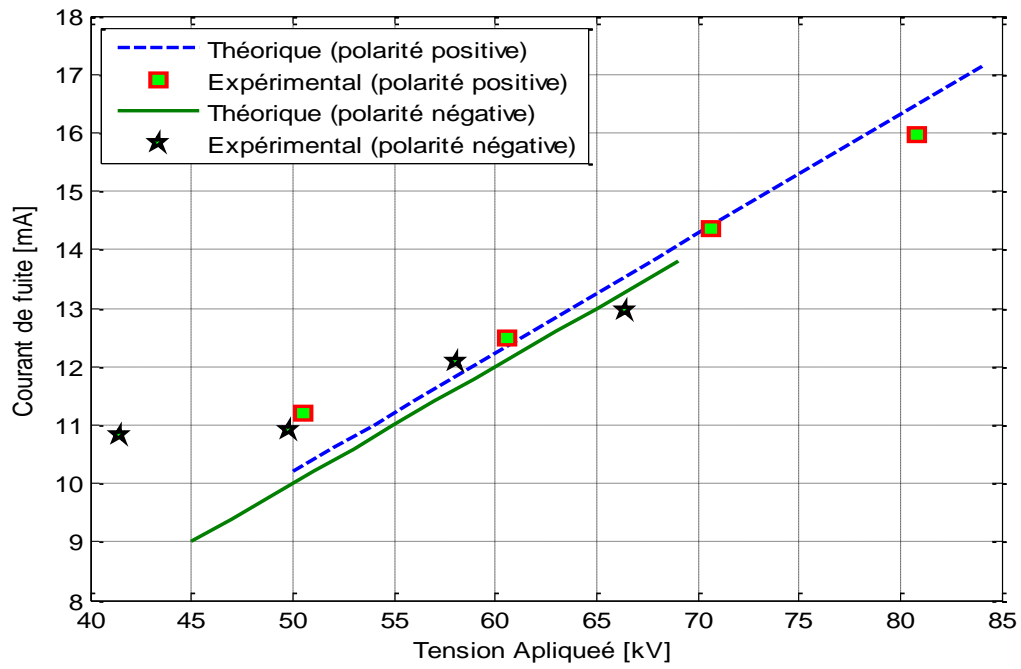
(e) largeur de la pollution : 8 cm



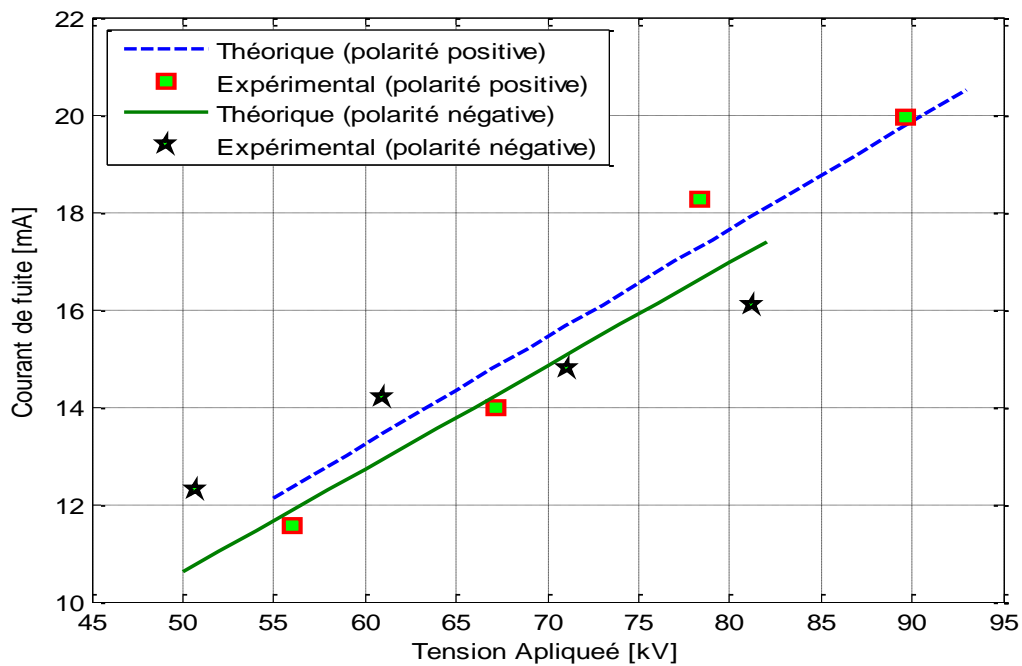
(f) largeur de la pollution : 16 cm



(g) largeur de la pollution : 24 cm



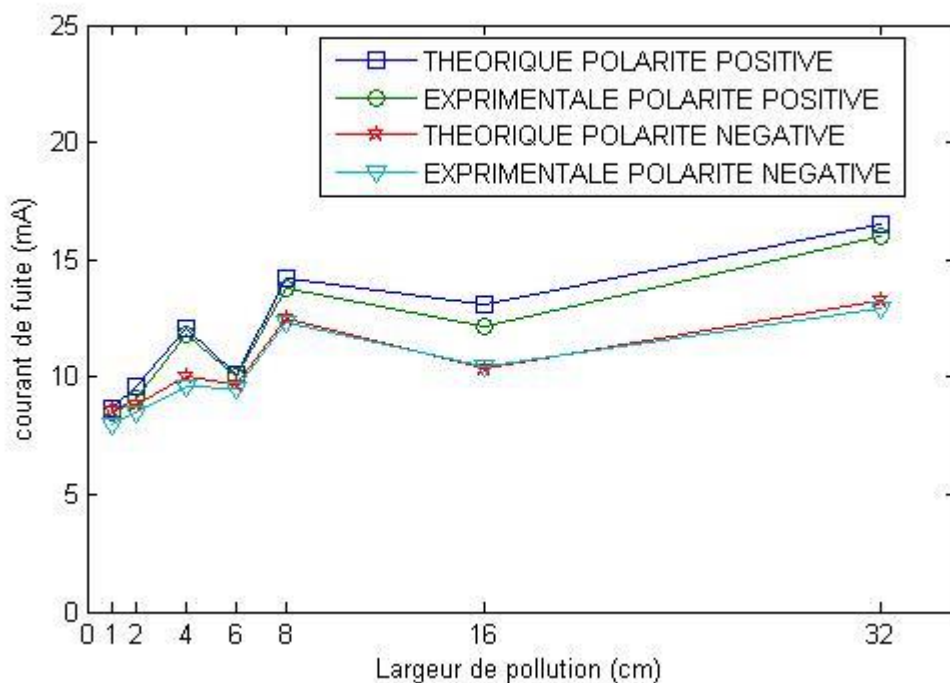
(h) largeur de la pollution : 32 cm



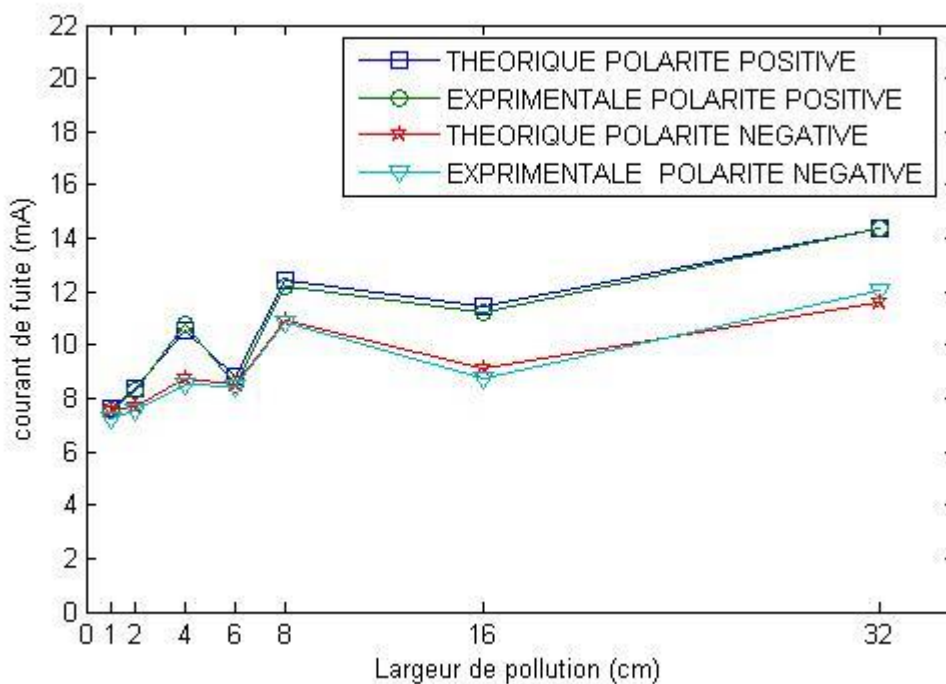
(i) largeur de la pollution : 40 cm

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

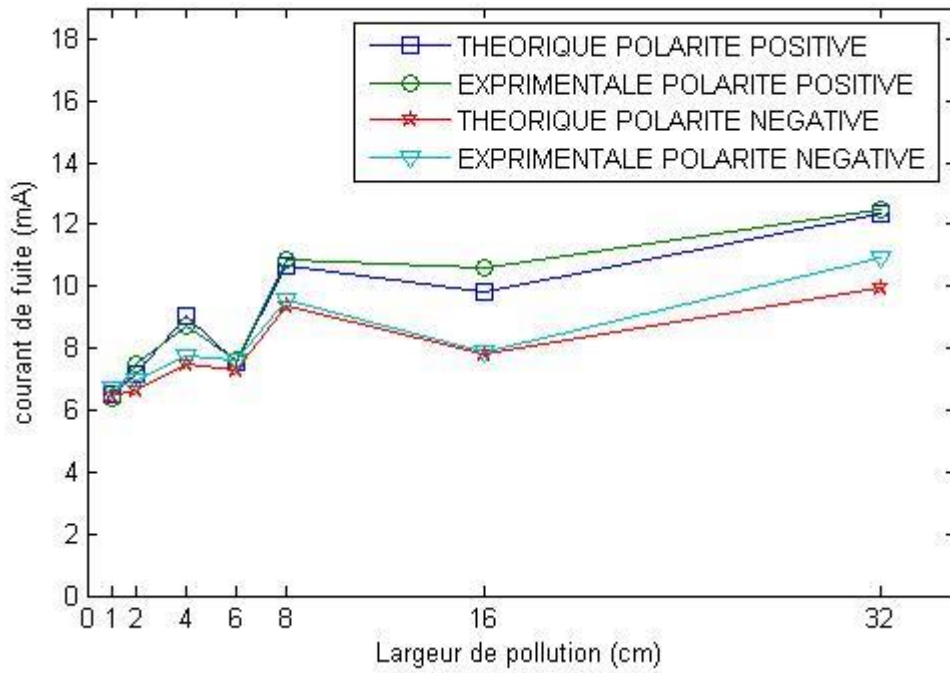
b- Courant de fuite en fonction de la largeur de la pollution :



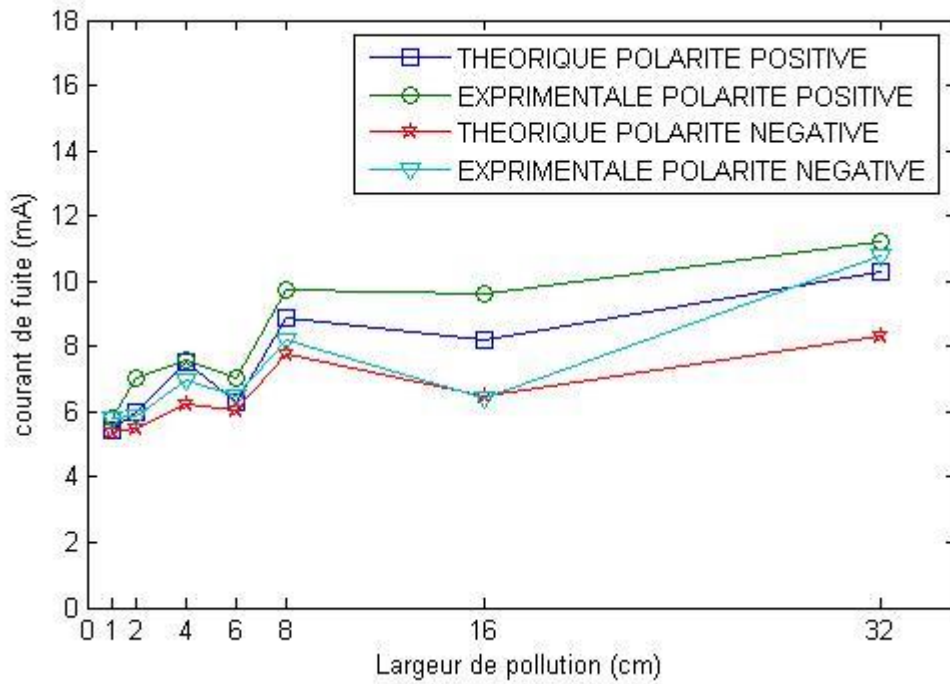
(a)



(b)



(c)



(d)

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

(a) $0.8 U_{0\%}$

(b) $0.7 U_{0\%}$

(c) $0.6 U_{0\%}$

(d) $0.5 U_{0\%}$

IV.3 Rapport (tension /courant) Kv / mA :

Pour une largeur des pollutions 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 tous les largeurs, 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.

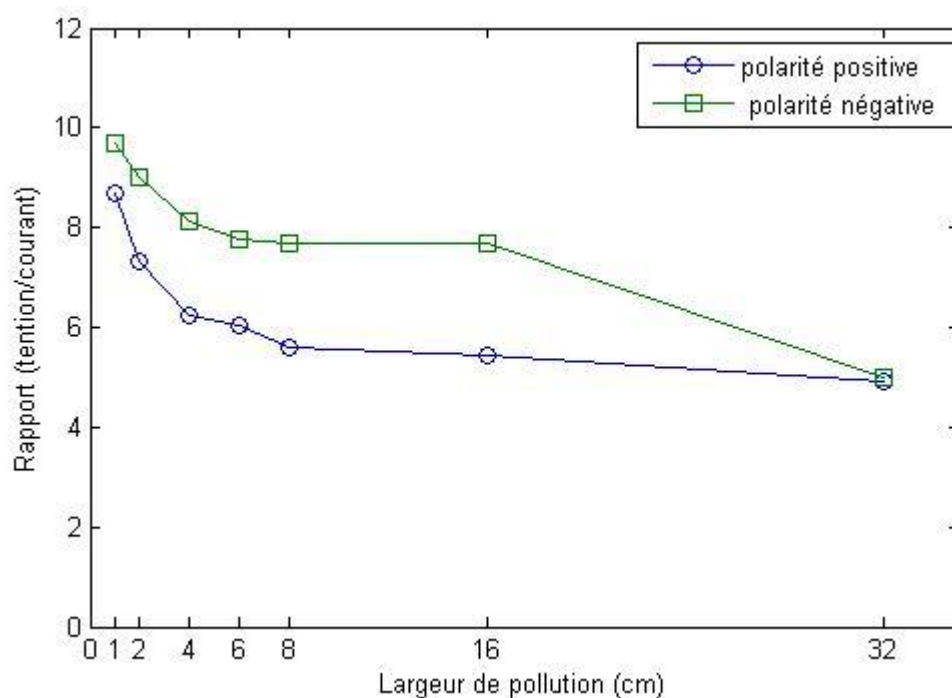


Figure IV.7 : Rapport tension courant en fonction de la largeur de pollution pour les deux polarités

IV.4 Conclusion :

A la fin 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 en aluminium, l'amplitude du courant de fuite augmente, puis diminue pour atteindre un minimum, ensuite elle augmente de nouveau. En outre, il existe une limite (16cm) 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. Ainsi, ce rapport est plus important en polarité négative.

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

Conclusion générale

Notre étude nous a permis, dans un premier temps, de mieux comprendre le comportement d'une surface isolante non uniformément polluées, 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 (16cm) 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 toutes les largeurs de pollution.

L'analyse des courbes obtenues montre bien que les résultats de simulation concordent parfaitement avec ceux obtenus expérimentalement par Guida . 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.

- Influence de la largeur de la pollution :

a / polarité positive :

largeur de pollution 1(cm)		U0%(kV) polarité positive	Résultats	1/K P+	ISIM	I Lab
Tention appliqué						
U=0,8U0%	0,8	94,4	75,52	0,11494	8,6802688	8.5
U=0,7U0%	0,7	94,4	66,08	0,11494	7,5952352	7.52
U=0,6U0%	0,6	94,4	56,64	0,11494	6,5102016	6.38
U=0,5U0%	0,5	94,4	47,2	0,11494	5,425168	5.83
largeur de pollution 2(cm)		U0%(kV) polarité positive	Résultats	1/K P+	ISIM	I Lab
Tention appliqué						
U=0,8U0%	0,8	87,5	70	0,13657	9,5599	9.1
U=0,7U0%	0,7	87,5	61,25	0,13657	8,3649125	8.27
U=0,6U0%	0,6	87,5	52,5	0,13657	7,169925	7.52
U=0,5U0%	0,5	87,5	43,75	0,13657	5,9749375	7.01
largeur de pollution 4(cm)		U0%(kV) polarité positive	Résultats	1/K P+	ISIM	I Lab
Tention appliqué						
U=0,8U0%	0,8	94	75,2	0,16025	12,0508	11.82
U=0,7U0%	0,7	94	65,8	0,16025	10,54445	10.76
U=0,6U0%	0,6	94	56,4	0,16025	9,0381	8.75
U=0,5U0%	0,5	94	47	0,16025	7,53175	7.59
largeur de pollution 6(cm)		U0%(kV) polarité positive	Résultats	1/K P+	ISIM	I Lab
Tention appliqué						
U=0,8U0%	0,8	76	60,8	0,16588	10,085504	10.01
U=0,7U0%	0,7	76	53,2	0,16588	8,824816	8.5
U=0,6U0%	0,6	76	45,6	0,16588	7,564128	7.6
U=0,5U0%	0,5	76	38	0,16588	6,30344	7.06
largeur de pollution 8(cm)		U0% (kV) polarité positive	Résultats	1/K P+	ISIM	I Lab
Tention appliqué						
U=0,8U0%	0,8	100	80	0,17801	14,2408	13.75
U=0,7U0%	0,7	100	70	0,17801	12,4607	12.2
U=0,6U0%	0,6	100	60	0,17801	10,6806	10.83
U=0,5U0%	0,5	100	50	0,17801	8,9005	9.72
largeur de pollution 16(cm)		U0%(kV) polarité positive	Résultats	1/K P+	ISIM	I Lab
Tention appliqué						
U=0,8U0%	0,8	88,7	70,96	0,18442	13,0864432	12.12
U=0,7U0%	0,7	88,7	62,09	0,18442	11,4506378	11.22
U=0,6U0%	0,6	88,7	53,22	0,18442	9,8148324	10.57
U=0,5U0%	0,5	88,7	44,35	0,18442	8,179027	9.60
largeur de pollution 32(cm)		U0%(kV) polarité positive	Résultats	1/K P+	ISIM	I Lab
Tention appliqué						
U=0,8U0%	0,8	101	80,8	0,2039	16,47512	15.96
U=0,7U0%	0,7	101	70,7	0,2039	14,41573	14.37
U=0,6U0%	0,6	101	60,6	0,2039	12,35634	12.50
U=0,5U0%	0,5	101	50,5	0,2039	10,29695	11.19

b - polarité négative :

largeur de pollution 1(cm)						
Tention appliqué		U0%(kV) polarité négative	Résultats	1/K P-	ISIM	I Lab
U=0,8U0%	0,8	104,4	83,52	0,1031	8,610912	7.97
U=0,7U0%	0,7	104,4	73,08	0,1031	7,534548	7.25
U=0,6U0%	0,6	104,4	62,64	0,1031	6,458184	6.73
U=0,5U0%	0,5	104,4	52,2	0,1031	5,38182	5.82
largeur de pollution 2(cm)						
Tention appliqué		U0%(kV) polarité négative	Résultats	1/K P-	ISIM	I Lab
U=0,8U0%	0,8	99,5	79,6	0,11085	8,82366	8.45
U=0,7U0%	0,7	99,5	69,65	0,11085	7,7207025	7.55
U=0,6U0%	0,6	99,5	59,7	0,11085	6,617745	6.95
U=0,5U0%	0,5	99,5	49,75	0,11085	5,5147875	5.86
largeur de pollution 4(cm)						
Tention appliqué		U0%(kV) polarité négative	Résultats	1/K P-	ISIM	I Lab
U=0,8U0%	0,8	102	81,6	0,1228	10,02048	9.58
U=0,7U0%	0,7	102	71,4	0,1228	8,76792	8.52
U=0,6U0%	0,6	102	61,2	0,1228	7,51536	7.78
U=0,5U0%	0,5	102	51	0,1228	6,2628	7
largeur de pollution 6(cm)						
Tention appliqué		U0%(kV) polarité négative	Résultats	1/K P-	ISIM	I Lab
U=0,8U0%	0,8	94	75,2	0,129	9,7008	9.55
U=0,7U0%	0,7	94	65,8	0,129	8,4882	8.44
U=0,6U0%	0,6	94	56,4	0,129	7,2756	7.62
U=0,5U0%	0,5	94	47	0,129	6,063	6.5
largeur de pollution 8(cm)						
Tention appliqué		U0%(kV) polarité négative	Résultats	1/K P-	ISIM	I Lab
U=0,8U0%	0,8	120	96	0,13	12,48	12.30
U=0,7U0%	0,7	120	84	0,13	10,92	10.88
U=0,6U0%	0,6	120	72	0,13	9,36	9.56
U=0,5U0%	0,5	120	60	0,13	7,8	8.21
largeur de pollution 16(cm)						
Tention appliqué		U0%(kV) polarité négative	Résultats	1/K P-	ISIM	I Lab
U=0,8U0%	0,8	100	80	0,13	10,4	10.49
U=0,7U0%	0,7	100	70	0,13	9,1	8.76
U=0,6U0%	0,6	100	60	0,13	7,8	7.85
U=0,5U0%	0,5	100	50	0,13	6,5	6.44
largeur de pollution 32(cm)						
Tention appliqué		U0%(kV) polarité négative	Résultats	1/K P-	ISIM	I Lab
U=0,8U0%	0,8	83	66,4	0,2	13,28	12.95
U=0,7U0%	0,7	83	58,1	0,2	11,62	12.08
U=0,6U0%	0,6	83	49,8	0,2	9,96	10.90
U=0,5U0%	0,5	83	41,5	0,2	8,3	10.81

- Rapport (tension/courant) Kv / mA :

largeur de pollution (cm)	1/K P+	1/K P-	K P+	K P-
1	0,11494	0,1031	8,7001914	9,69932105
2	0,13657	0,11085	7,32225232	9,02119982
4	0,16025	0,1228	6,24024961	8,14332248
6	0,16588	0,129	6,0284543	7,75193798
8	0,17801	0,13	5,61766193	7,69230769
16	0,18442	0,13	5,42240538	7,69230769
32	0,2039	0,2	4,90436488	5



Références Bibliographiques

- [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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] G. Riquel, E. Span genberg, " *De la céranique au synthetique*", EDE-Epure, N° 58, Avril 1998.
- [7] D. Dumora, " *Matériaux isolants céramiques en électrotechnique*", Technique de l'ingénieur D275.
- [8] Y. Porcheron, " *Lignes aériennes : Matériels entrant dans la constitution d'une ligne aerienne*", Technique de l'ingénieur D4425.
- [9] QUILLET, " *Encyclopédie des sciences industrielles*", 1981
- [10] G. Riquel, E. Span genberg, " *De la céranique au synthetique*", EDE-Epure, N° 58, Avril 1998
- [11] F. Amidi, k. Ouerdane, " *Les effets de la pollution sur les ouvrage électrique à 30kV en région littorales*", PFE, USTHB, juin 1998.
- [12] A. Cimador, S. Vilet, " *La Pollution des Isolateurs*", EDF-Epure, No 27, Juillet 1990.
- [13] D.Namane, " *Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateurs haute tension , sous la fréquence 50Hz*", thèse de Magister, ENP 1998.



- [14] C. E.I-60, ‘‘Technique des essais à haute tension , Définition et prescription générales aux essais’’, Première édition, 1973.
- [15] W. Heise , G.F , luxa , G.Revrery , M. P. Verma, ‘ ‘ Estimation de la méthode d’essais sous pollution artificielle par couche solide ‘ ‘ cigré , rapport 33-09 1982
- [16] A. Beroual ‘‘les phénomènes de pollution et leurs conséquence sur le transport d’énergie électrique’’ cour de poste-gradation, département Génie électrique, laboratoire de haute tension. ENP, 1992.
- [17] A. Boubakeur, ‘‘Essais d’isolateurs pollués dans les conditions naturelles’’, Rapport interne, I. W. N Pollitechnika warszawka, Varsovie, 1978.
- [18] G. leroy, C. gary, ‘‘les propriété diélectrique de l’eau et très haute tension’’, Eyrolles, paris 1984
- [19] M. N. RAYES, M. ZHIRH, " Investigation about Flashover Performance of Insulators under Uniform and Non-Uniform Contamination", 7th International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport 43-08, 26-30 Août 1991, Dresden, Allemagne.
- [20] Groupe d’action 33-04-03, "Dispositif de Surveillance des Isolateurs Soumis à la Pollution " *Electra*, n°152, février 1994 p 78-90. Dresden, Allemagne, 26-30 Août 1991.
- [21] J.P.HOLTZHAUSEN, O.C.T.POTGIETER, J.M.SMITH, ‘‘The One Site Leakage Current Performance of Insulators of Various Designs and Materials
- [22] A. LECHEB, ‘‘Visualisation et Traitement de Signal du Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée’’, *PFE, ENP Juin 1999..*
- [23] R. Wilkins, A. A. J. Al-Baghdadi, "Arc Propagation along an Electrolyte Surface", Proc. IEE, Vol. 118, N° . 12, pp. 1886 – 1892, December 1971.
- [24] A. M. Rahal, C. Huraux, "Flashover of High Voltage Insulators", IEEE Trans., Vol. Pas - 98, N° . 6, pp. 2223 - 2231, 1979.
- [25] S. Flazi, « Etude du contournement Electrique des isolateurs haute tension pollués Crotère d’elongation de la décharge et dynamique du phénomène », Doctorat d’état de l’université Paul Sabatier, Toulouse, 1987.
- [26] B. F. Hampton, "Flashover Méchanism of Polluted Insulation", Proc.PIEE, Vol. 111, N°5, pp. 985 - 990, Juillet 1964.
- [27] S. Hesketh, "General criterion for the prédiction of pollution flashover", Proc.IEE, Vol.114, N° 4, p. 531 – 532, Avril 1967.
- [28] R. Wilkins, "Flashover Voltage of High Voltage Insulators with Uniform Surface Pollution Films", Proc. IEE, Vol. 116, No 3, pp. 457 - 465, Mars 1969



- [29] S. Anjana, C. S. Lakshminarasimha, "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
- [30] N. Dhahbi - Megriche, 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.
- [31] F. Obenaus, "Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge", Deutsche Elektrotechnik, vol. 4, pp. 135 – 136, 1958.
- [32] P. S. Gosh, S. Chakravorti, N. Chatterjee, "Estimation of Time to Flashover Characteristics of Contaminated Electrolytic Surfaces Using a Neural Network", IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul., Vol. 2, N° 6, pp. 1064 - 1076, December 1995.
- [33] G. Neumärker, "Verschmutzungszustand und Kriechweg", Monatsber. d. Deut. Akad. Wiss., Berlin, vol.1, pp.352 – 359, 1959.
- [34] T. C. Chung, H. I. M. Nour, C. Y. Wu, "DC Interfacial Breakdown on Contaminated Electrolytic Surfaces", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 19, N° 6, pp. 536 - 542, December 1984
- [35] P. Claverie, "Predetermination of the Behaviour of Polluted Insulators", IEEE Trans. PAS, Vol. 90, N° 4, pp. 1902 - 1908, Juillet 1971.
- [36] P. Claverie, Y. Porcheron, "How to Choose Insulators for Polluted Areas", IEEE Trans. PAS, Vol. 92, N° 3, pp. 1121-1131, 1973.
- [37] S. Gopal Y. Narayana Rao, "On the Flashover Mechanisms of Polluted Insulators", ISPPISD, IIT, pp. 1 - 6, Madras, Inde, 1983.
- [38] Publication IEC 71-2, "Insulation Coordination, Application Guide", Seconde Edition, 1976
- [39] L. L. Alston, S. Zoledziowski, "Growth of Discharges on Polluted Insulators", IEEE, Trans. PAS, Vol. 110, N° 7, pp. 1260–1266, Juillet 1963.
- [40] J. Danis, "A Stochastic Pollution Flashover Model", 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 - 12, Septembre 5 – 9, 1983, Athènes, Grèce
- [41] H. Nacke, "Lichtbogen festigkeit und kriechstrom festigkeit von isolier stoffen", Dissertation, University of Berlin-Charlottenburg, 1962.
- [42] H. Nacke, "Stabilitat der Fremdschichtentladungen und Theorie des Fremdschichtuberschlags", ETZ - A, N° 16, pp. 577 - 585, 1966.



- [43] H. Boehme, F. Obénaus. “ Essais de contournement sur des isolateurs pollués en laboratoire et en lieu de service du point de vue de la conception d’un modèle d’amorçage pour courant rampant “, CIGRE, N°. 407, Paris, France,1966.
- [44] H. H. Woodson, A. J. McElroy. “Insulators with contaminated surfaces part II: modelling of discharge mechanisms”, IEEE Trans., Vol. Pas-89, N°. 8, November- December 1970. p. 858-867.
- [45] M.Teguar. “ Modélisation d’isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro-géométriques”, Thèse de doctorat d’état. ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Alger, Avril 2003.
- [46] O. Mayr, “Beitrag zur Theorie der Statischen und der Dynamishchen Litchbogens”, Arch. f. Elektrotechnik, Vol. 37, pp. 588 - 608, 1943
- [47] 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.
- [48] R. Sundararajan, R. S. Gorur, “Computer Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Conditions”, IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul., Vol. 2, N°. 1, pp. 121-127, February 1995.
- [49] A.Boubakeur, " Cours de Post-graduation, Haute Tension", Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.
- [50] M.Aguet, M.Ianoz, " *Traité de l’Electricité. Volume XXII Haute Tension* ", Ecole Nationale Fédérale de Lausanne, Deuxième Edition, 1982
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] A.Beroual, I.Fofana, "*Modeling of the Streamers in Dielectric Liquid with an Equivalent Electrical Network*", 12th International conference on conduction and breakdown in dielectric liquid, Roma, Italy, pp.214 -217, July 15-19, 1996.
- [54] 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.
- [55] W.J.Dixon, A.M.Mood, "*Journal of America Statistic Association*", Vol.43, pp.109-126, 1948.



- [56] F. Rizk, "*Mathematical Models for Pollution Flashover*", *Electra*, Vol. 78, pp. 71 - 103, 1981.
- [57] 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
- [59] A.Beroual, N.Dhahbi, "*Dynamic Model of Discharge Propagation on Polluted Surfaces under Impulse Voltage*", 12th IEE Pro.Gener. Transm. Vol 147 No. 5, pp. 279 – 284, September 2000.
- [60] 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.
- [61] M.Teguar, "*Modélisations d'Isolateurs Pollués Soumis à Divers Paramètres électro géométriques*", Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Avril 2003.
- [62] I.Fofana, A.Beroual, "*Modeling of the Leader and the Return Stroke Currents with an Equivalent Electrical Network* ", 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, Austria, pp 1- 4, August 28-Sept 1, 1995.

RESUME

Ce travail présente un modèle statique permettant de prédire le comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension impulsionnelle. Se basant sur un circuit électrique équivalent et utilisant des lois physiques, ce modèle permet d'évaluer la tension de contournement et le temps au contournement et de décrire la dynamique de l'arc en tenant compte du profil de l'isolateur et des variations instantanées des caractéristiques de l'arc (comme la résistance de l'arc, le courant de fuite, le rayon, la longueur et de la résistivité de l'arc), de la vitesse instantanée de propagation, de la puissance instantanée fournie par la source ainsi que du champ dans la pollution et celui à l'intérieur de l'arc. Les résultats de simulation obtenus avec notre modèle sont discutés par rapport à ceux obtenus par d'autres auteurs.

Mots clés : pollution – contournement – isolateur – modèle – tenue diélectrique – décharge – courant de fuite – propagation – dynamique – tension

ABSTRACT

This work presents a static model allowing predicting the behaviour of polluted insulator under impulsionnelle voltage. Basing on an equivalent electrical circuit and using physical laws, this model allows to evaluate the flashover voltage and the time lag to flashover taking into account the insulator profile and the instantaneous variations of the discharge parameters (such as the arc resistance, the leakage current, the arc radius, length and resistivity), the instantaneous propagation velocity, the instantaneous power delivered by the source, as well as the fields in the pollution and in the arc. The simulation results obtained with our model are discussed with regards to those reported by other authors.

Key words : pollution – flashover – insulator – model – dielectric strength – discharge – leakage current – propagation – dynamic – voltage

ملخص

يعرض هذا العمل نموذج ستاتيكي يتنبأ بتصرف عازل ملوث تحت توتر نبضي. بالاعتماد على دائرة كهر بائية مكافئة و باستعمال قوانين فيزيائية، هذا النموذج يسمح بحساب توتر الإحاطة آخذا بعين الاعتبار هندسة العازل و كذا التغيرات اللحظية لكل من عوامل التفريغ (مثل مقاومة التفريغ، التيار المتسرب، نصف قطر، طول، و ناقلية القوس)، السرعة اللحظية للانتشار، الاستطاعة اللحظية المحررة من قبل المنبع، وكذا الحقل في كل من التفريغ و التلوث. نناقش النتائج الرقمية المحصل عليها من برنامجنا بمقارنتها مع أخرى محررة من قبل باحثين آخرين.

الكلمات المفتاحية: تلوث – إحاطة – عازل – نموذج – شدة عزل – تفريغ – تيار متسرب – انتشار –

توتر