

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME  
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

THEME

---

**ÉLABORATION D'UN MODELE DYNAMIQUE DE  
CONTOURNEMENT D'UN ISOLATEUR POLLUE  
SOUS TENSION ALTERNATIVE**

---

**Proposé et dirigé par :**  
**Mr. RAHALI Hilel**

**Présenté par :**  
**TAHRI Tawfiq**

Année Universitaire : **2015/2016**

N° d'ordre : **REs 225**

# Dédicace

*Je dédis ce modeste travail :*

*A ma chère maman,*

*A mon cher père,*

*A mes frères, mes sœurs et leurs enfants,*

*A tous mes amis.*

## Remerciement

*Au terme de ce mémoire de fin d'étude d'ingénieur, nous tenons à formuler nos chaleureux remerciements à Mr. RAHALI Hilel, notre encadreur, qui a dirigé nos travaux avec dévouement jusqu'à l'achèvement de ce travail.*

*Nous remerciant également Mr. A. TEGUAR pour ces directives, ses conseils combien utiles, sa très grande disponibilité et ses qualités humaines.*

*Nous adressons nos vifs remerciements au Mr. Kadour qui nous a beaucoup aidé.*

*Nous tenant aussi à exprimer notre profonde gratitude à l'ensemble de nos enseignants du département de génie électrique pour leurs efforts déployés à notre égard tout au long de notre parcours universitaire.*

*Enfin, nous remerciant tous ce qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

# Sommaire

Introduction générale

## **Chapitre I Pollution des isolateurs de haute tension**

---

I.1 Introduction .....	1
I.2 Isolateurs .....	1
I.2.1. Définition.....	1
I.2.2. Types d'isolateurs .....	1
I.2.2.1. Isolateur de type rigide .....	2
I.2.2.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne .....	2
I.2.2.2.1. Isolateurs à capot et tige.....	3
I.2.2.2.2. Isolateurs à long fût.....	3
I.2.3. Choix des isolateurs .....	4
I.3. pollution d'isolateurs .....	4
I.3.1. Sources de pollution.....	4
I.3.1.1. Pollution naturelle .....	5
I.3.1.1.1. Pollution marine .....	5
I.3.1.1.2. Pollution désertique .....	5
I.3.1.2. Pollution industrielle .....	5
I.3.1.3. Pollution mixte.....	6
I.3.2. Technique de lutte contre la pollution.....	6
I.3.2.1. Allongement de la ligne de fuite .....	6
I.3.2.2. Isolateurs plats.....	6
I.3.2.3. Revêtement silicone.....	6
I.3.2.4. Les isolateurs composites .....	7
I.3.2.5. Nettoyage des isolateurs .....	7
I.4. Définitions .....	8
I.4.1. Contournement.....	8
I.4.2. Tension de contournement.....	8
I.4.3. Tension de tenue .....	8
I.4.4. Courant de fuite .....	9
I.4.5. Courant de fuite critique.....	9
I.4.6. Longueur critique d'arc .....	9
I.5. Conclusion.....	9

## Chapitre II Principaux modèles de contournement

---

II .1. Introduction.....	10
II.2. Modèles statiques .....	10
II.2.1. Modèle d’Obenaus.....	10
II.2.2. Modèle de Neumarker.....	12
II.2.3. Modèles de Tegar.....	12
II.2.4. Modèle de Danis .....	14
II.2.5. Modèle de Nacke et Wilkins .....	16
II.2.6. Modèle de la couche mixte.....	17
II.3. Mécanismes de propagation.....	18
II.3.1. Propagation par ionisation.....	18
II.3.2. Propagation par force électrostatique.....	18
II.4. Critères de propagation de la décharger.....	19
II.4.1. Critère de Hampton.....	19
II.4.2. Critère de Hesketh .....	20
II.4.3. Critère de Wilkins .....	20
II.4.4. Critère d’Anjana et Lakshminarasimha.....	20
II.4.5. Critère de Dhabbi, Beroual et Krahenbul.....	20
II. 5. Modèles dynamique.....	21
II.5.1. Modèle de Rizk et Nguyen.....	21
II.5.2. Modèle d’Anjana et Lakshminarasimha .....	22
II.5.3. Modèle de Dhabbi.....	22
II.5.4. Modèle de Sundararajan et Gorur.....	23
II. 6. Conclusion .....	24

## Chapitre III Conception du modèle dynamique

---

III .1. Introduction.....	25
III.2. Hypothèses simplificatrices .....	25
III .3. Circuit électrique équivalent .....	25
III.3.1. Propagation de la décharge .....	26
III .3.1.1 Initialisation de la décharge.....	26
III.3.1.2. Critère de propagation.....	26
III. 3.1.3. Circuit de propagation.....	27
III.4. Paramètres du circuit électrique .....	27
III.5. Simulation numérique .....	30

III.6 .Conclusion ..... 33

## **Chapitre IV Validation et application**

---

IV. 1. Introduction ..... 34

IV. 2. Validation ..... 35

    IV. 2. 1. Validation basée sur le modèle de Tegar ..... 35

IV. 3. Application ..... 37

    IV. 3. 1. Tension appliquée, tension dans la couche de pollution et tension de la décharge ..... 37

    IV. 3. 2. Longueur de la décharge..... 40

    IV. 3. 3. Courant de fuite..... 40

    IV. 3. 4. Résistance de la couche polluante ..... 41

    IV. 3. 5. Résistance de la décharge ..... 42

    IV. 3. 6. Rayon de la décharge..... 43

    IV. 3. 7. Puissance fournie par la source ..... 44

    IV. 3. 8. Champs de la décharge et de la pollution ..... 45

    IV. 3. 9. Vitesse de propagation..... 47

IV. 4 Résistance de la décharge, Tension de la décharge et Courant de fuite en fonction de la longueur de la décharge ..... 48

IV. 4. Conclusion..... 50

Conclusion générale

Références bibliographiques

Résumé

## Table des figures

### Chapitre I

Figure I.1	Isolateur réelle .....	1
Figure I.2	Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre.....	2
Figure I.3	Assemblage à rotule.....	2
Figure I.4	Isolateurs à capot et tige.....	3
Figure I.5	Isolateur à long fût en porcelaine.....	4
Figure I.6	Isolateur pollué.....	5
Figure I.7	Isolateur plat en verre .....	6
Figure I.8	Revêtement silicone d'isolateur.....	7
Figure I.9	Nettoyage des isolateurs.....	8
Figure I.10	contournement d'un isolateur.....	8

### Chapitre II

Figure II.1	Circuit électrique équivalent du modèle d'Obenaus.....	10
Figure II.2	Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire.....	13
Figure II.3	Modèle de Danis.....	15
Figure II.4	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.	17
Figure II.5	Modèle d'un isolateur à long fut et distribution de la résistance de pollution selon Boheme et Obenaus.....	18
Figure II.6	Courbure de la décharge dans la direction de l'écoulement du courant mettant en évidence l'existence d'une force.....	19
Figure II.7	Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent.....	21
Figure II.8	Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge selon Dhahbi.....	23

### Chapitre III

Figure III.1	Circuit électrique équivalent de base.....	26
Figure III.2	Circuit électrique équivalent à la propagation de la décharge.....	27
Figure III.3	Modèle d'étude.....	28
Figure III.4	Algorithme de simulation.....	32

### Chapitre IV

Figure IV. 1	Modèle d'étude de Tegar.....	35
Figure IV. 2	Tension de contournement en fonction de la résistivité de la pollution.....	36

## Table des figures

---

Figure IV. 3 Courant de fuite en fonction de la résistivité de la pollution.....	37
Figure IV. 4 Tension de contournement appliquée en fonction du temps.....	38
Figure IV. 5 Tension de la couche de pollution en fonction du temps.....	39
Figure IV. 6 Tension de la décharge en fonction du temps.....	39
Figure IV. 7 Longueur de la décharge en fonction du temps.....	40
Figure IV. 8 Courant de fuite en fonction du temps.....	41
Figure IV. 9 Résistance de la couche de pollution en fonction du temps.....	42
Figure IV. 10 Résistance de la décharge en fonction du temps.....	43
Figure IV. 11 Rayon de l'arc en fonction du temps.....	44
Figure IV. 12 Puissance fournie par la source en fonction du temps .....	45
Figure IV. 13 Champ au pied d'arc en fonction du temps.....	46
Figure IV. 14 Champ dans la couche de pollution en fonction du temps.....	46
Figure IV. 15 Champ dans la couche de pollution et champ au pied de l'arc en fonction du temps pour une conductivité $10 \mu\text{s}$ .....	47
Figure IV. 16 Vitesse de propagation de la décharge.....	48
Figure IV. 17 Résistance de la décharge en fonction de la longueur de décharge.....	49
Figure IV. 18 Tension aux bornes de la décharge en fonction de la longueur de la décharge.....	49
Figure IV. 19 Courant de fuite en fonction de la longueur de la décharge.....	50

## Notions et symboles

$E_a$	Champ électrique longitudinal
$R_{arc}$	La résistance d'arc
$R_p$	La résistance de la couche polluée
$V_e$	La chute de tension totale aux bornes des électrodes
$\mu$	la mobilité des électrons dans l'arc
$b$	largeur de la couche de pollution
$C_i$	la capacité de la décharge
$C_p$	la capacité de la couche de pollution
$E_{arc}$	champ à l'intérieur de l'arc
$E_p$	champ dans la colonne d'eau
$F$	le facteur de forme
$I$	courant de fuite
$k$	constante de Boltzman
$K$	la constante de la caractéristique statique de l'arc
$L_i$	l'inductance de la décharge
$l_i$	longueur de la couche polluée
$M$	nombre de particules neutres dans l'arc
$n, A$	les constantes de la caractéristique statique de l'arc
$P$	puissance
$P_0$	les pertes par unités de longueur (constantes).
$r_d$	le rayon de la base de l'arc
$R_e$	la résistance externe
$R_i$	une résistance interne
$r_p$	résistance uniforme de la couche polluée
$T$	la température de l'arc
$U$	la tension aux bornes de l'isolateur
$V$	tension appliquée
$v$	vitesse de propagation de la décharge
$V_{arc}$	la tension d'arc
$W_{th}$	l'énergie nécessaire pour maintenir l'arc à sa température

$W_{\text{totale}}$	l'énergie totale fournie
$X$	longueur de l'arc
$Z_{\text{eq}}$	l'impédance équivalente d'un circuit électrique
$\gamma_p$	la conductivité superficielle de la couche polluante
$P_{\text{arc}}$	la résistivité de la couche de polluée
$\tau$	Constant de temps de l'arc.
$b$	la largeur de la surface de l'isolateur

## Introduction générale

Les besoins économiques et le bien-être des populations font partie aujourd'hui des raisons d'un développement croissant des installations de production, de transport et de transformation de l'énergie électrique. L'électricité est un agent énergétique lié à la puissance. Son approvisionnement provenant des centrales exige l'installation de lignes aériennes ou souterraines permettant l'alimentation des consommateurs. Les lignes aériennes qui sont conçues, réalisées, entretenues et exploitées conformément aux normes, prescriptions et directives de sécurité, de même qu'aux règles de l'art, sont exposées à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de transport et de l'appareillage électrique associé. En effet, les dépôts polluants qui recouvrent les surfaces isolantes peuvent, par temps de pluie, engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle et par conséquent la réduction de la tension de tenue des isolateurs pouvant conduire au contournement des isolateurs, ce qui a pour conséquence grave, la mise hors service de la ligne. La connaissance du degré de pollution constitue donc une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau de l'isolement des ouvrages installés sur site en vue de dimensionner convenablement l'isolation [1].

Dans les régions polluées, un bon choix de dimensionnement des isolateurs s'avère indispensable pour assurer la fiabilité et la qualité de l'isolement de haute tension. Afin de surveiller la qualité d'isolement d'un ouvrage, il est impératif de connaître réellement les mécanismes conduisant au contournement sous pollution. De nombreux travaux ont été faits, aussi bien théoriques qu'expérimentaux, mais ces mécanismes restent insuffisamment compris, à cause de grand nombre de facteurs difficiles à cerner qui interviennent simultanément dans la génération et la propagation des décharges électriques.

Le présent travail porte sur l'élaboration d'un modèle analytique de propagation de l'arc sur une surface isolante polluée soumis à une tension alternative. Etant donné que sa nature est idéalisée, principalement à cause des hypothèses simplificatrices rendues nécessaires dans le calcul analytique, il ne peut en aucun cas se substituer au travail expérimental. Néanmoins, ce type de modèle est un outil permettant de faire des estimations préliminaires, de rationaliser les expériences conçues pour explorer le mécanisme de contournement, d'interpréter et de généraliser les résultats obtenus en un temps réduit. Ce modèle se base sur un circuit électrique équivalent et utilise des lois physiques. Notre modèle dynamique permet la prédiction des différents paramètres de l'arc et leurs évolutions dans le temps. Quatre chapitres y seront présentés.

Nous entamons le premier chapitre par une présentation d'une synthèse bibliographique sur les isolateurs de haute tension, ainsi que les espèces de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique. Ainsi que des techniques de lutte contre ces phénomènes y sont présentés.

Dans le deuxième chapitre, nous citerons les principaux modèles de contournement rencontrés dans la littérature. Leur aspect empirique, semi empirique ou analytique, ainsi que les critères de propagation des décharges électriques y seront aussi présentés.

Un modèle dynamique permettant de prédire le comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative, sera présenté dans le chapitre trois. Ce modèle utilise un critère de propagation et se base sur circuit électrique équivalent d'Obenaus, le critère d'Hampton et le modèle de Tegar. En effet, un isolateur pollué et partiellement contourné sera représenté par une décharge électrique de longueur donnée en série avec une résistance représentant la bande de pollution. Le canal de la décharge sera assimilé à des cellules résistives. Chaque cellule nouvellement créée représentera un nouveau déplacement partiel de l'arc.

L'exploitation numérique ainsi que la validation, en comparant certains résultats de simulation à ceux obtenus par d'autres chercheurs, feront l'objet du quatrième chapitre.

# **CHAPITRE I**

## **POLLUTION DES ISOLATEURS DE HAUTE TENSION**

---

## I.1 Introduction

Les lignes aériennes et les poste du réseau de transport de l'énergie électrique, installés dans les régions où la pollution atmosphérique est importante, peuvent être sujets à des incidents graves dus aux contournements des chaînes d'isolateur où des colonnes isolantes polluent

En effet, dans un environnement naturel, des dépôts d'origines diverses (poussiers, fumées, sel etc.....) se fixent sur les surfaces isolantes et abaissent considérablement, par temps de pluie ou de brouillard, la résistivité superficielle des isolateurs .des courants de fuites circulent à la surface de ces isolateurs et provoquent des assèchements locaux de la couche polluante et l'apparition de petits arcs. Dans certains cas la conductivité de cette couche polluante est telle que les arcs se développent jusqu'à provoquer le contournement total des isolateurs et la mise hors service de l'installation.

## I.2 Isolateurs

### I.2.1. Définition

Les isolateurs sont des éléments essentiels dans la conception d'une ligne aérienne. Leur rôle est de relier les conducteurs sous tension aux supports et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux parties constitutives de la ligne. En effet, le choix du type d'isolateur, les contrôles de réception, la surveillance en exploitation doivent être faite avec un maximum de soin, pour assurer le bon fonctionnement de la ligne.

L'isolateur est constitué principalement d'un matériau isolant solide qui 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 courtes circulations, les pertes de courant et les charges d'électrocution [2].



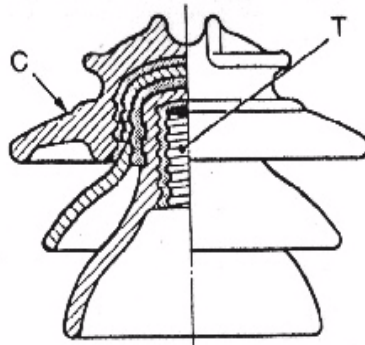
Figure I.1 Isolateur réelle

### I.2.2. Types d'isolateurs

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs : les isolateurs de type rigide et les éléments de chaîne [3].

### I .2.2.1. Isolateur de type rigide

Un isolateur rigide (Figure I.2) est relié au support par une ferrure fixe. Cet isolateur est principalement soumis à des efforts de flexion et de compression, lorsqu'il est placé en position verticale. Il peut dans certains cas être placé horizontalement. Ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 kV [3].

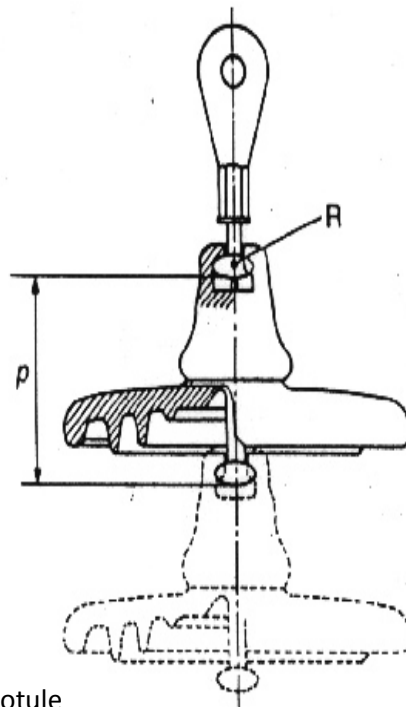


C : Cloche    T : Logement de tige

Figure I.2 Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre

### I .2.2.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

Ils sont constitués par le matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et à donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs. La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (chaîne d'alignement), soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage) [4].



R : Rotule

P : pas

Figure I.3 Assemblage à rotule

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

- les isolateurs à capot et tige.
- les isolateurs à long fût.

#### I.2.2.2.1. Isolateurs à capot et tige

Chaque élément est constitué d'un capot, d'une partie isolante en forme de jupe et d'une tige, La coupe d'un tel isolateur est schématisée sur la (Figure I.4). La forme de la tête est dessinée de sorte que les efforts de traction appliqués à l'isolateur se transforment, autant que possible, en compression des diélectriques sur lesquels apparaissent, toutefois, inévitablement certaines contraintes de cisaillement [3].

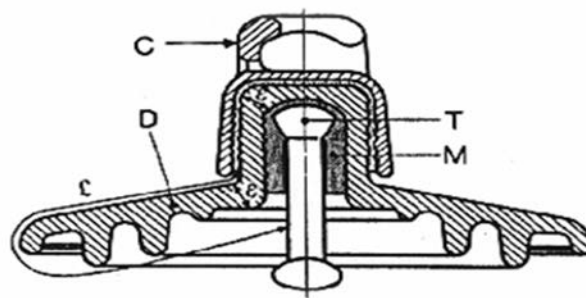


Figure I.4 Isolateurs à capot et tige

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)

c : Plus courte distance dans l'air, extérieure à l'isolateur

$\varepsilon$  : Longueur du canal de perforation,

#### I.2.2.2.2. Isolateurs à long fût

L'isolateur à long fût est constitué d'un bâton cylindrique en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques muni d'ailettes, à chaque extrémité duquel est fixée une pièce métallique de liaison. Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, soit elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (Figure I.5 (a)), soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (Figure I.5 (b)) [3].

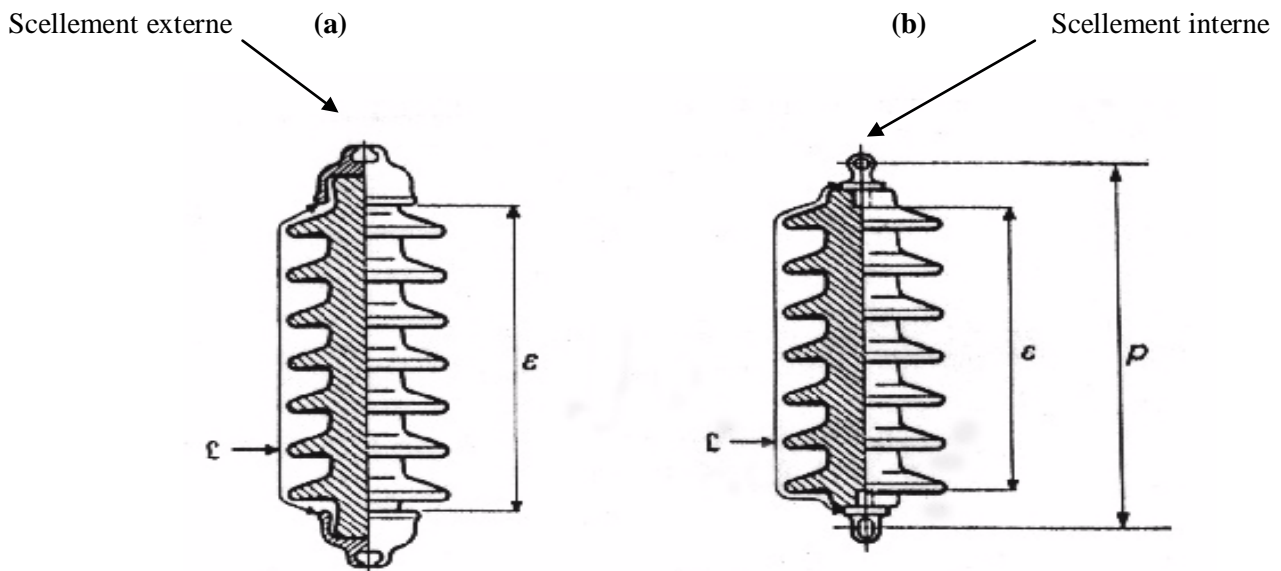


Figure I.5 Isolateur à long fût en porcelaine

$\epsilon$ : Plus courte distance dans l'air, extérieure à l'isolateur

$\epsilon$  : Longueur du canal de perforation

$p$  : pas

$\epsilon \gg \epsilon/2$

### I.2.3. 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 un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service [5].

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 ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

## I.3. pollution d'isolateurs

### I.3.1. Sources de pollution

La nature de la pollution dépend de la situation géographique et climatique. Les diverses sources de pollution les plus fréquemment observées sur les isolateurs peuvent être regroupées selon leur origine et classées comme suit [4]:

### I.3.1.1. Pollution naturelle

La pollution naturelle provient:

- des sels marins dans les régions côtières.
- des poussières du sol (notamment lors de chantiers importants).
- des sables véhiculés par le vent en régions désertiques.



Figure I.6 Isolateur pollué

#### I.3.1.1.1. Pollution marine

Les installations situées au bord de la mer sont exposées aux embruns portés par le vent et qui se déposent progressivement sur les isolateurs, formant une couche de pollution de sel qui devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée par le 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'à provoquer le contournement total de l'isolateur [6].

#### I.3.1.1.2. Pollution désertique

La pollution désertique est caractérisée surtout par les dépôts de sable se formant à la surface des isolateurs après les vents de sable. Une fois humidifiés, ces dépôts deviennent plus ou moins conducteurs (en fonction des concentrations en sels solubles qu'ils contiennent) et engendrent la circulation d'un courant de fuite qui apparaît brusquement et qui est suivi par l'apparition d'arcs partiels qui peuvent conduire au contournement total de l'isolateur [7].

#### I.3.1.2. Pollution industrielle

Au voisinage de certaines zones industrielles, la pollution est engendrée par l'évacuation des fumées des usines (raffinerie, cimenterie, minerais ..... etc.). La présence d'éléments conducteurs dans les couches, la dissolution des sels qu'elles contiennent engendrent la circulation d'un courant de fuite plus ou moins fort selon les concentrations des agents polluants.

Les usines ne sont pas les seules responsables de ce genre de pollution, les gaz d'échappement des véhicules et les engrais utilisés en agriculture contribuent aussi aux dépôts observés à la surface des isolateurs [4].

### I.3.1.3. Pollution mixte

Ce type de pollution est en fait le plus fréquent et le plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. La pollution mixte résulte de la combinaison entre les différents types de pollution, comme par exemple les pollutions marine et industrielle lorsque des installations industrielles sont situées en bord de mer.

### I.3.2. Technique de lutte contre la pollution

L'augmentation du degré de pollution représente un risque immense pour les installations électriques. Pour cela plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées [3].

#### I.3.2.1. Allongement de la ligne de fuite

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

Le changement de type d'isolateur (pour rallonger la ligne de fuite) : c'est une technique très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.

L'utilisation de prolonger de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants.

#### I.3.2.2. Isolateurs plats

Les isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'autonettoyant très bien sous l'effet du vent.



Figure I.7 Isolateur plat en verre

#### I.3.2.3. Revêtement silicone

Il consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Il protège et améliore leur tenue sous pollution et sa longévité est nettement supérieure.



Figure I.8 Revêtement silicone d'isolateur

#### I.3.2.4. Les isolateurs composites

Ils sont constitués d'un noyau en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Ces isolateurs présentent l'avantage d'une grande légèreté, une haute résistance mécanique et une propriété hydrophobe. Ils peuvent être utilisés dans les régions où règne une pollution exceptionnelle. Mais, ils présentent l'inconvénient de vieillir sous l'effet des différentes contraintes électrique et mécanique [3].

#### I.3.2.5. Nettoyage des isolateurs

Il existe trois types :

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, nécessitant des interruptions de service assez longue.

Le lavage sous tension qui permet d'éviter les coupures à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans ce 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, pour éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

Le nettoyage des isolateurs à l'aide d'un abrasif pulvérisé sous pression. C'est une technique utilisée dans certains pays (Amérique du nord, en particulier). Cette méthode permet le nettoyage pour des agents polluants très adhérents (ciment) et peut être utilisée pour dégraisser les isolateurs.



Figure I.9 Nettoyage des isolateurs

## I.4. Définitions

### I.4.1. Contournement

Le contournement est représenté par une décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne cette dernière. Aussi, le terme contournement est employé pour des décharges par amorçage dans l'air [8].



Figure I.10 contournement d'un isolateur

### I.4.2. Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les deux électrodes. Elle dépend [8]:

- De la résistivité volumique moyenne de la pollution.
- De la répartition de la couche de pollution.
- Du profil et des dimensions de l'isolateur.

### I.4.3. Tension de tenue

C'est le niveau de tension le plus important, que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive (contournement dans le cas des isolateurs) [8].

#### **I.4.4. Courant de fuite**

C'est un courant de nature impulsionnelle. Il est de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur. Il est donc à caractère électrolytique et de type résistif. Il devient important lorsqu'on s'approche à la tension de contournement. Il dépend de plusieurs facteurs, entre autres, la nature de la couche de pollution, la longueur de la ligne de fuite et les conditions atmosphériques.

#### **I.4.5. Courant de fuite critique**

C'est le courant minimal nécessaire pour provoquer le contournement sous pollution d'un isolateur à une tension donnée. Il est indépendant du procédé d'essai ainsi que de la forme de l'isolateur. Le seul facteur dont dépend ce courant sous une tension donnée est la ligne de fuite, c'est-à-dire la contrainte spécifique exprimée en kV/cm [8].

#### **I.4.6. Longueur critique d'arc**

C'est la longueur limite  $X_C$  de l'arc partiel au-delà de laquelle l'arc conduira au contournement total [5].

### **I.5. Conclusion**

Les isolateurs sont des éléments essentiels dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service. Les isolateurs les mieux adaptées à un environnement donné sont ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

**CHAPITRE II**  
**PRINCIPAUX MODELES DE**  
**CONTOURNEMENT**

---

## II .1. Introduction

Depuis une cinquantaine d'années, plusieurs travaux ont été menés pour comprendre les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs pollués et se prémunir d'outils permettant la prédiction de ce phénomène. Les résultats de ces multiples études ont permis d'établir des modèles donnant les caractéristiques des décharges évoluant sur les surfaces d'isolateurs et allant jusqu'au contournement. Toutefois, il faut préciser que la plupart de ces modèles sont empiriques ou semi-empiriques [7]. De nos jours, d'autres modèles analytiques sont proposés [7, 9]. Dans ce qui va suivre, nous allons exposer une recherche bibliographique des différents modèles statiques et dynamiques développés dans ce domaine.

## II.2. 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 [10].

### II.2.1. Modèle d'Obenaus

C'est Obenaus [1] 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.1), il en a déduit la tension d'arc :

$$U_{\text{arc}} = \frac{AX}{I^n} \quad (\text{II. 1})$$

Où  $I$  est le courant de fuite,  $n$  et  $A$  sont les constantes de la caractéristique statique de l'arc :

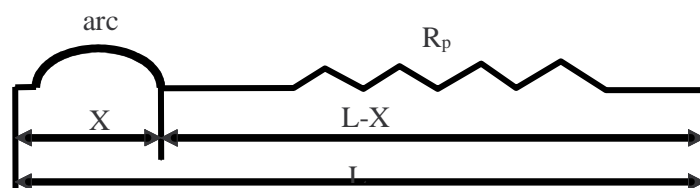


Figure II.1 Circuit électrique équivalent du modèle d'Obenaus

Avec

$L$  : représente la longueur de fuite.

En effet, en appliquant la loi d'Ohm à ce circuit, on peut écrire :

$$V = V_e + V_{arc} + R_p(X).I \quad (\text{II. 2})$$

Où  $V$  est la tension appliquée et  $V_e$ , la chute de tension totale aux bornes des électrodes, cette dernière dépend des conditions expérimentales.  $R_p(X)$  Est la résistance de la couche polluée et  $V_{arc}$ , la tension d'arc telle que :

$$V_{arc} = R_{arc}(X).I \quad (\text{II. 3})$$

$R_{arc}$  Est la résistance d'arc par unité de longueur,  $X$  la longueur d'arc et  $I$ , le courant qui traverse la couche polluée.

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

$$E_a = \frac{V_{arc}}{X} = A.I^{-n} \quad (\text{II. 4})$$

D'où l'équation :

$$V_{arc} = A.X.I^{-n} \quad (\text{II. 5})$$

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

$$V = V_e + A.X.I^{-n} + R_p(X).I \quad (\text{II. 6})$$

Les valeurs des paramètres  $n$  et  $A$  dépendent du milieu dans lequel brule la décharge, Elles varient de façon générale

$$0.40 \leq n \leq 1 \text{ et } 3 \leq A \leq 500$$

A partir des mesures expérimentales sur un canal d'électrolyte, Ghosh et al [11,12] ont proposé de prendre des valeurs différentes pour les constantes  $A$  et  $n$  caractérisant l'équation de la charge selon la nature de l'électrolyte utilisé. Les résultats de leurs mesures sont donnés dans le tableau suivant :

Electrolyte	A	n
NaCl	360	0.59
CaCl <sub>2</sub>	461	0.42
FeCl <sub>3</sub>	270	0.66
CuSO <sub>4</sub>	450	0.49

Tableau : valeurs des constantes A et n

### II.2.2. Modèle de Neumarker

Neumarker [1] a repris les travaux d'Obenaus, 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):

$$R_p = r_p (L - x) \quad (\text{II. 7})$$

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

$$U = U_{\text{arc}} + r_p (L - x) I \quad (\text{II. 8})$$

ou encore :

$$U = \frac{x A}{I^n} + r_p (L - x) I \quad (\text{II. 9})$$

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

$$I_c = \left( \frac{x A}{I^n} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (\text{II.10})$$

Et

$$x_c = \frac{L}{n + 1} \quad (\text{II.11})$$

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

$$U_c = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} L \quad (\text{II.12})$$

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

### II.2.3. Modèles de Tegar

#### a / Cas de pollution continue

Tegar [4] a élaboré un modèle statique en tension alternative. Son modèle est basé sur celui d'Obenaus, 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 [13], 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 :

$$R_p = \frac{1}{\rho} \frac{K - 100 U}{K I} = \rho F_p \quad (\text{II.13})$$

Où  $\rho$  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 [14] 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 [14] a élaboré un algorithme qui permet d'obtenir les différentes caractéristiques des phénomènes de conduction sur les surfaces isolantes sous pollution discontinue. Les bandes propres et polluées sont représentées par des circuits électriques. 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.

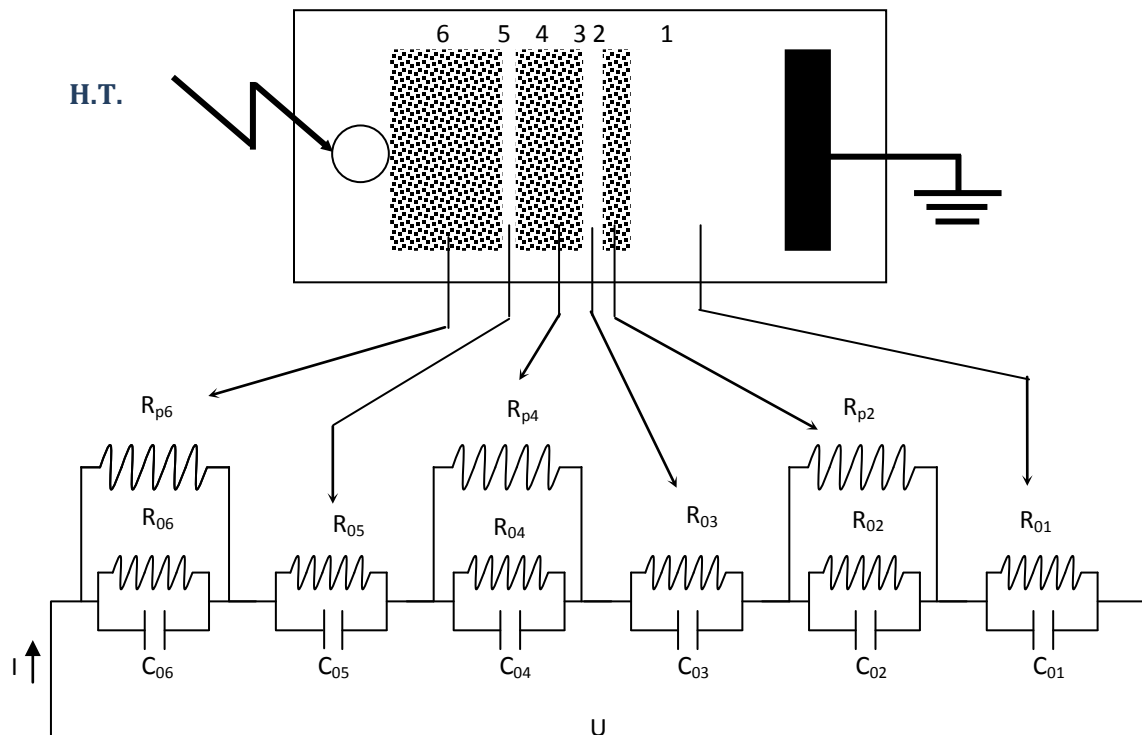


Figure II.2 Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire

La figure (II.2) 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, l'expression de la résistance pour chaque bande polluée  $i$  peut être formulée par :

$$R_{pi} = R_{sp} \int_0^{l_i} \frac{dx}{b} = R_{sp} \frac{l_i}{b} = R_p f \frac{l_i}{b} \quad (\text{II.14})$$

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

#### II.2.4. Modèle de Danis

Afin de reproduire des couches similaires à celles observées sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, Danis [15] a utilisé un modèle de forme géométrique simple (plan ou cylindre) possédant plus d'une zone sèche (Figure II. 3. a). La rupture des zones sèches survient alors d'une manière aléatoire (Figure II. 3. b). Le lieu d'apparition des arcs partiels, la forme et le mouvement des racines des arcs sur une surface polluée (Figure II. 3. 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 [16].

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 :

$$U = \frac{Ax}{I^n} + r_p (L - x)I \quad (\text{II.15})$$

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

$r_p$  est la résistance linéique

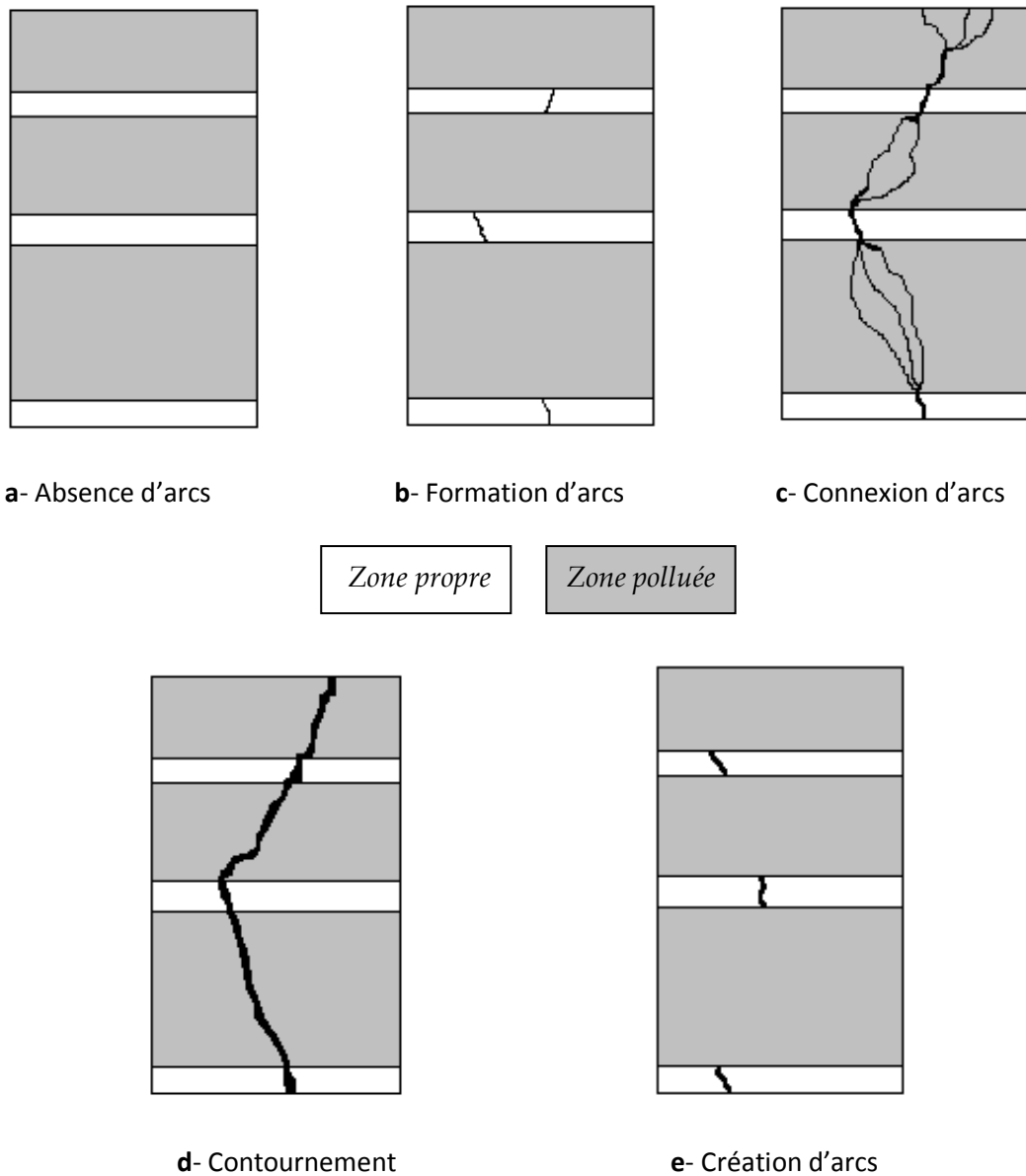


Figure II.3 Modèle de Danis

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

$$I_c = \left( \frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \tag{II.16}$$

$$U_c = L(Ar_p)^{\frac{1}{n+1}} = AI_c^{-n} \tag{II.17}$$

### II.2.5. Modèle de Nacke et Wilkins

Nacke [14,15] et Wilkins [16] considèrent que les points à la base de l'arc forment des demi-cercles aux limites des bandes sèches (Figure I.5.a). Ainsi, la résistance de la pollution se compose de deux termes : une résistance interne  $R_i(x)$  propre aux deux demi-cercles, et une résistance externe  $R_e(x)$  pour le reste.

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

$$R_i(x) = \frac{1}{\pi\gamma} \quad (\text{II.18})$$

et

$$R_e(x) = rx_p + \frac{2}{\gamma\pi} \log\left(\frac{b}{2\pi r_d}\right) \quad (\text{II.19})$$

où

$R$  : 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 :

$$R_e(x) = \frac{2}{\pi\gamma} \left( 0.68 + \ln\left(\frac{x_p}{r_d}\right) \right) \quad (\text{II.20})$$

Pour un isolateur à ailettes multiples :

$$R_e = \frac{2}{\pi\gamma} \left( 0.3 + \ln\left(\frac{x_p}{r_d}\right) \right) \quad (\text{II.21})$$

Ainsi, la résistance de pollution totale sera :

$$R(x) = R_i(x) + R_e(x) \quad (\text{II.22})$$

Pour la même configuration (Figure I.5.b), dans le cas d'une bande étroite, Wilkins [16] a obtenu :

$$R(x) = r(L-x) + \frac{1}{\pi\gamma} \ln\left(\frac{b}{2\pi r_d}\right) \quad (\text{II.23})$$

et pour une bande large :

$$R(x) = \frac{1}{\pi\gamma} \left( \ln \left( \frac{2L}{\pi r_d} \right) - \ln \left( \tan \frac{\pi x}{L} \right) \right) \tag{II.24}$$

où

x : la longueur d'arc,

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

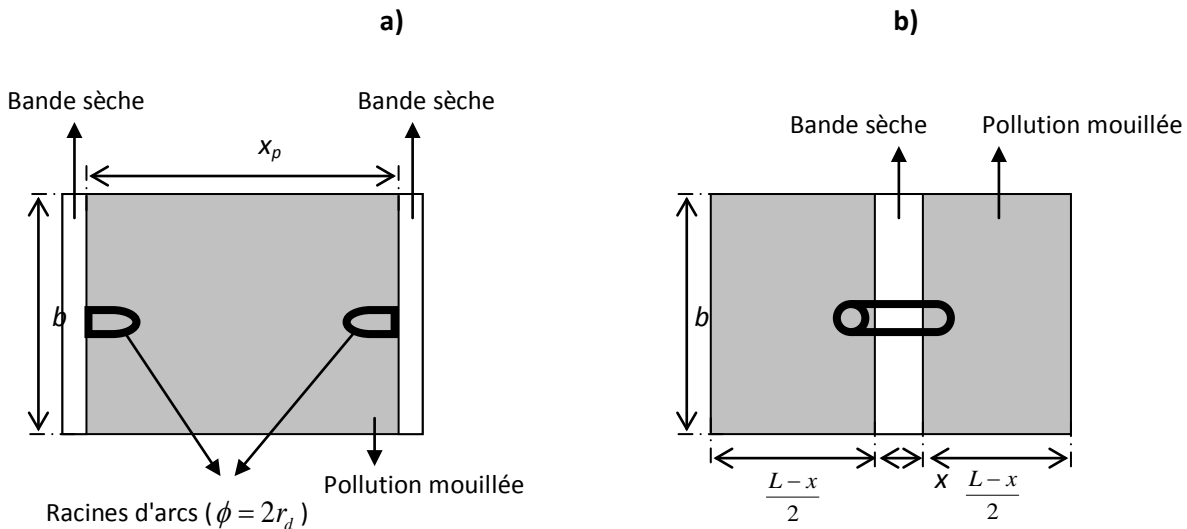


Figure II.4 : Représentation schématique de la surface d'un isolateur et des points de base de l'arc utilisé pour le calcul de la résistance de pollution selon:

(a) Nacke (b) Wilkins

## II.2.6. Modèle de la couche mixte

De façon à mieux représenter la résistance superficielle de pollution d'un isolateur à long fut, Obenaus 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.5). 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  $n=1$ ) [1]:

$$\frac{U_c}{L} = 0.8\sqrt{A} \cdot \sqrt{r_1} \tag{II.25}$$

Où:  $A=80VA/cm$

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

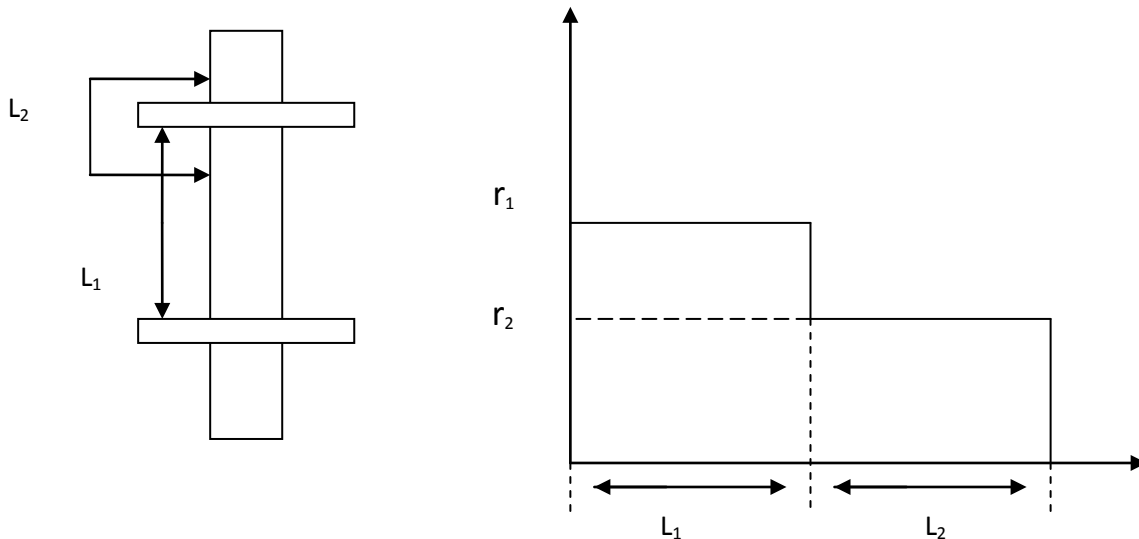


Figure II.5 Modèle d'un isolateur à long fut et distribution de la résistance de pollution selon Boheme et Obenaus

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

$$\frac{U_c}{L} = 0.8(L.r_p.i) \quad (\text{II.26})$$

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

## II.3. Mécanismes de propagation

### II.3.1. Propagation par ionisation

Wilkins et Al-Baghdadi [17] 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.3.2. Propagation par force électrostatique

A partir des observations faites sur un canal d'électrolyte, Rahal [18] 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.6). 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 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.

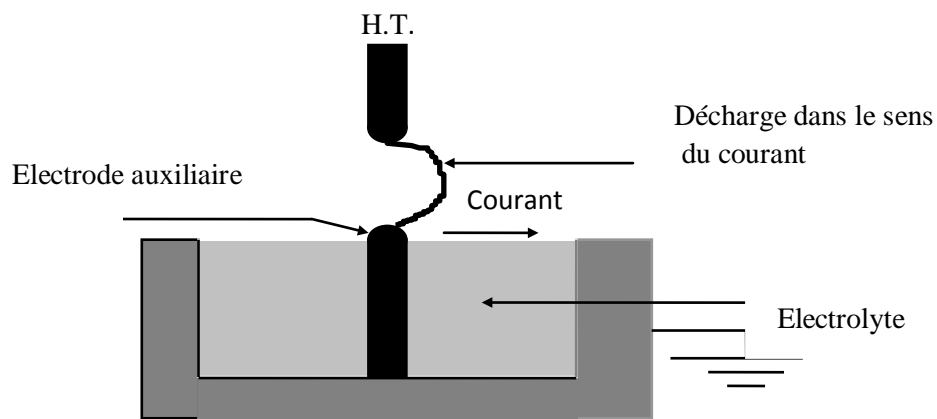


Figure II.6 Courbure de la décharge dans la direction de l'écoulement du courant mettant en évidence l'existence d'une force

## II.4. 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.4.1. Critère de Hampton

Partant de résultats expérimentaux, Hampton 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 [1]:

$$E_{arc} < E_p \quad (II.27)$$

### II.4.2. 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 a établi un critère de propagation de l'arc, exprimé par la relation [10]:

$$\frac{dI}{dx} > 0 \quad (\text{II.28})$$

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.4.3. Critère de Wilkins

Wilkins a généralisé la condition énoncée par Hesketh 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 [10]:

$$\frac{dP}{dx} > 0 \quad (\text{II.29})$$

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

### II.4.4. Critère d'Anjana et Lakshminarasimha

En assimilant l'arc à une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, Anjana et Lakshminarasimha [19] ont établi une condition nécessaire à la propagation de l'arc, basée sur des conditions énergétiques : l'énergie totale fournie  $W_{\text{totale}}$  doit être supérieure ou égale à l'énergie  $W_{\text{th}}$  nécessaire pour maintenir l'arc à sa température:

$$W_{\text{totale}} \geq W_{\text{th}} \quad (\text{II.30})$$

### II.4.5. Critère de Dhahbi, Beroual et Krahenbul

Ils ont proposer un nouveau critère analytique de propagation de la décharge [9] en faisant intervenir l'impédance équivalente  $Z_{\text{eq}}$  d'un circuit électrique (Figure II. 7), simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite[10].

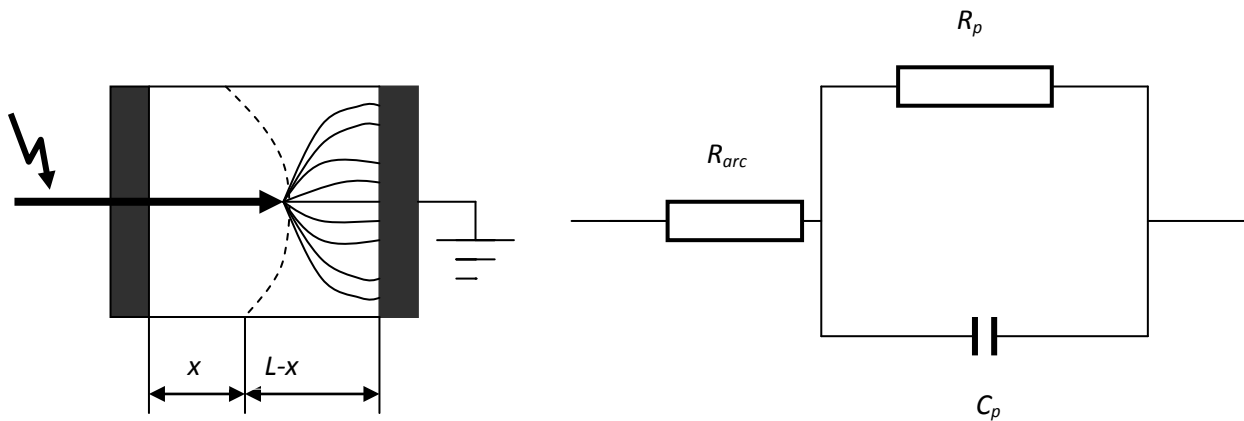


Figure II.7 : Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent

Ces auteurs ont abouti à un critère qui est :

$$E_{\text{arc}} \geq \frac{E_p}{\sqrt{a}} \quad (\text{II.31})$$

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. 5. Modèles dynamique

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 pour le comportement dynamique de l'arc [1].

### II.5.1. Modèle de Rizk et Nguyen

Pour caractériser la dynamique de l'arc pour le cas continu, Rizk et Nguyen [20] ont considéré une résistance d'arc :

$$\frac{dR_{\text{arc}}}{dt} = \frac{R_{\text{arc}}}{\tau} - \frac{R_{\text{arc}}^2 I^{n+1}}{A\tau} \quad (\text{II.32})$$

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 d'Anjana et Lakshminarasimha

Anjana et Lakshminarasimha [19] ont proposé un modèle basé sur l'équation de Mayr et sur le modèle statique d'Obenaus. 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 :

$$W_{th} = \frac{3}{2} kTM \quad (\text{II.33})$$

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 [19] 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 :

$$W_{totale} = (E_{arc} I_{arc} - P_0) dt \quad (\text{II.34})$$

Avec :

$E_{arc}$  : 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 :

$$v = \mu E_{arc} \quad (\text{II.35})$$

$v$  : vitesse de propagation de la décharge et  $\mu$  est la mobilité des électrons dans l'arc.

On déduira :

$$dx = v dt \quad (\text{II.36})$$

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 [21] a considéré que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure (II.8). 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 et que la forme de ce canal est cylindrique de résistivité constante.

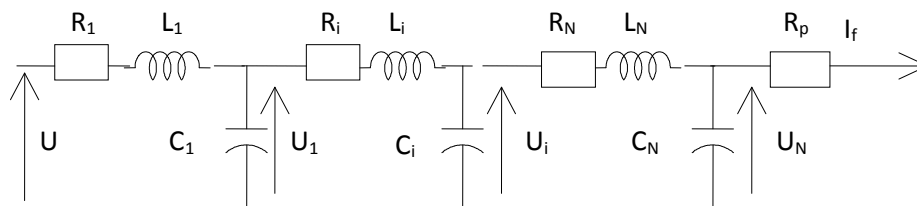


Figure II.8 Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge selon

**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 [22] ont proposé un modèle dynamique, qui ressemble à celui de Anjana et Lakshminarasimha [19], mais basé sur le critère de propagation de Hampton (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 :

$$E_p = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{II.37})$$

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 :

$$R_p = \frac{1}{\gamma_p} f = \frac{1}{\gamma_p} \int_x^L \frac{dX}{2r_a \pi} \quad (\text{II.38})$$

$L$  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,  $\gamma_p$  la conductivité superficielle de la couche polluante, en S.

## II. 6. Conclusion

Les principaux modèles statiques, rapportés dans la littérature, traitent le phénomène de contournement sous un aspect global en lui associant un critère d'extension. Par ailleurs, tous les modèles dynamiques ont un aspect commun, ils sont basés sur le modèle statique d'Obenaus pour le comportement dynamique de l'arc.

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

## **CHAPITRE III**

# **CONCEPTION DU MODELE DYNAMIQUE**

---

### III .1. Introduction

Une quantité importante de travaux théoriques a été consacrée à l'étude du phénomène de contournement des isolateurs pour aboutir à l'élaboration d'un modèle pouvant tenir compte des paramètres réels caractéristiques du phénomène de pollution. Il s'agit de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes, et leurs résistivités ainsi que les échanges thermiques.

La modélisation théorique permet non seulement de mieux comprendre le processus physique de contournement mais aussi de réduire considérablement le temps très long que nécessitent les essais sur site. Mais, elle reste insuffisante lors du passage à l'application pratique, principalement à cause des hypothèses simplificatrices rendues nécessaires par le traitement mathématique.

Dans ce chapitre nous proposons un modèle dynamique de contournement sous tension alternative, en tenant compte de la géométrie de l'isolateur.

### III.2. Hypothèses simplificatrices

Les phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces polluées sont tellement complexes, qu'il est indispensable de faire de nombreuses hypothèses simplificatrices, pour rendre possible leur représentation. Dans notre étude, nous avons adopté différentes hypothèses qui sont données comme suit :

- L'isolateur réel est remplacé par un modèle plan équivalent ; il s'agit donc d'une représentation bidimensionnelle.
- La conductivité de la pollution est la même en tout point de la couche polluante et ne change pas durant la propagation de la décharge.
- La couche de pollution est représentée par une résistance.
- Parmi tous les arcs multiples se développant sur la surface isolante, un seul arc dominant est pris en considération.
- Le canal d'arc est assimilé à un cylindre de longueur  $X$  et de rayon  $r$ .
- le contournement total de l'isolateur a lieu seulement si la longueur de la décharge est supérieure ou égale au critère d'arrêt  $x = 0.9 L$  [21]

### III .3. Circuit électrique équivalent

Une fois générée, la décharge électrique ne peut évoluer que si certaines conditions sont réunies. Dans ce qui suit, nous analysons le comportement ainsi que l'effet de la décharge le long de son parcours sur une surface isolante polluée. Pour cela, nous représentons cette dernière par un circuit électrique équivalent (Fig. III.1), semblable à celui déjà proposé par F.Obenaus [10].

En effet, un isolateur pollué et partiellement contourné par une décharge électrique, peut être représenté par un circuit électrique équivalent constitué de deux résistances en série. La première  $R_{arc}$  représente la résistance du canal de la décharge et la seconde  $R_p$  celle de la partie de la couche de pollution non court-circuitée par cette décharge.

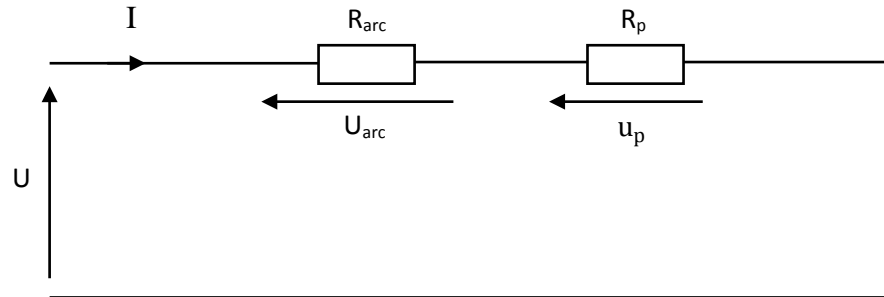


Figure III.1 Circuit électrique équivalent de base

### III.3.1. Propagation de la décharge

Les états critiques du contournement représentent les conditions initiales nécessaires et suffisantes pour remplir le critère d'élongation de la décharge tout au long de la surface isolante, jusqu'à la mise en court-circuit de la haute tension avec la masse. Le bon accord entre les prévisions théoriques et les valeurs expérimentales prouve la validité des différents critères de propagation proposés dans la littérature. Par conséquent, ces critères servent d'appui pour la majorité d'études de modélisation à travers le monde entier.

#### III .3.1.1 Initialisation de la décharge

Lorsque la tension appliquée entre deux électrodes dépasse une certaine valeur, une décharge de longueur initiale  $X_0$  de type couronne peut prendre naissance à la surface de l'isolant. Si les conditions de propagation sont vérifiées, alors le canal de l'arc est alimenté par le courant de cette décharge couronne et peut donc s'allonger. Dans le cas contraire, le canal se refroidit et disparaît. La valeur initiale de la décharge généralement prise par les chercheurs [1, 16] est égale à 1 % de la longueur de fuite totale de l'isolateur.

Dans notre étude, nous considérons une longueur initiale de la décharge proche de zéro car la tension alternative commence par zéro.

#### III.3.1.2. Critère de propagation

Lorsque la tension appliquée est suffisamment élevée entre les deux électrodes, il y aura apparition d'une première décharge de longueur  $X_0$  sous forme d'effet couronne. Cette décharge ne peut s'allonger que si le critère de propagation est vérifié.

Le critère de propagation que nous avons adopté pour notre modèle, est celui proposé par Hampton [9], Sous tension alternative, ce critère s'écrit:

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

Avec :

$E_{arc}$  : Le champ dans l'arc.

$E_p$ : Le champ dans la pollution.

Sachant que les champs dans l'arc et dans la pollution s'écrivent comme suit :

$$E_p = \left| \frac{du_{arc}}{dx} \right| = r_p i \quad (III.2)$$

$$E_{arc} = \left| \frac{du_p}{dx} \right| = \frac{A}{i^n} \quad (III.3)$$

### III. 3.1.3. Circuit de propagation

La propagation de l'arc électrique est possible, si le critère d'élongation est rempli. Dans ces conditions, le canal de la décharge sera assimilé à des cellules résistives. Chaque cellule nouvellement créée représentera un nouveau déplacement partiel de l'arc. Cette propagation de la décharge peut être donc représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure (III. 2).

Dans cette figure,  $R_j$ ,  $i_j$ , et  $u_j$  représentent respectivement la résistance, le courant et la tension, correspondant à chaque cellule nouvellement créé et  $R_p$  la résistance de la partie de la couche de pollution non court-circuitée par l'arc.

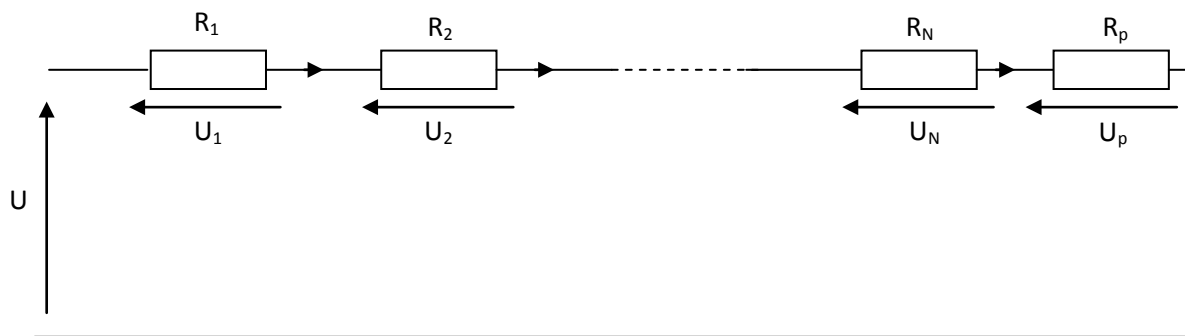


Figure III.2 Circuit électrique équivalent à la propagation de la décharge électrique

## III.4. Paramètres du circuit électrique

Les paramètres de ce circuit concernent la tension totale entre électrodes, la résistance de pollution et les caractéristiques du canal d'arc à savoir sa tension, sa résistance, sa résistivité, son rayon, sa longueur, sa puissance et son énergie.

En négligeant la chute de tension cumulée aux électrodes, selon Wilkins [1], l'équation du circuit sera donnée par:

$$u = u_{arc} + u_p = (R_{arc} + R_p)i \quad (III.4)$$

Avec

$u$ : la tension instantanée appliquée.

$u_{arc}$ : la tension de la décharge.

$R_{arc}$ : résistance de l'arc.

$u_p$ : la tension de la couche polluante.

$R_p$ : résistance de la couche polluante.

$i$ : le courant de fuite instantané.

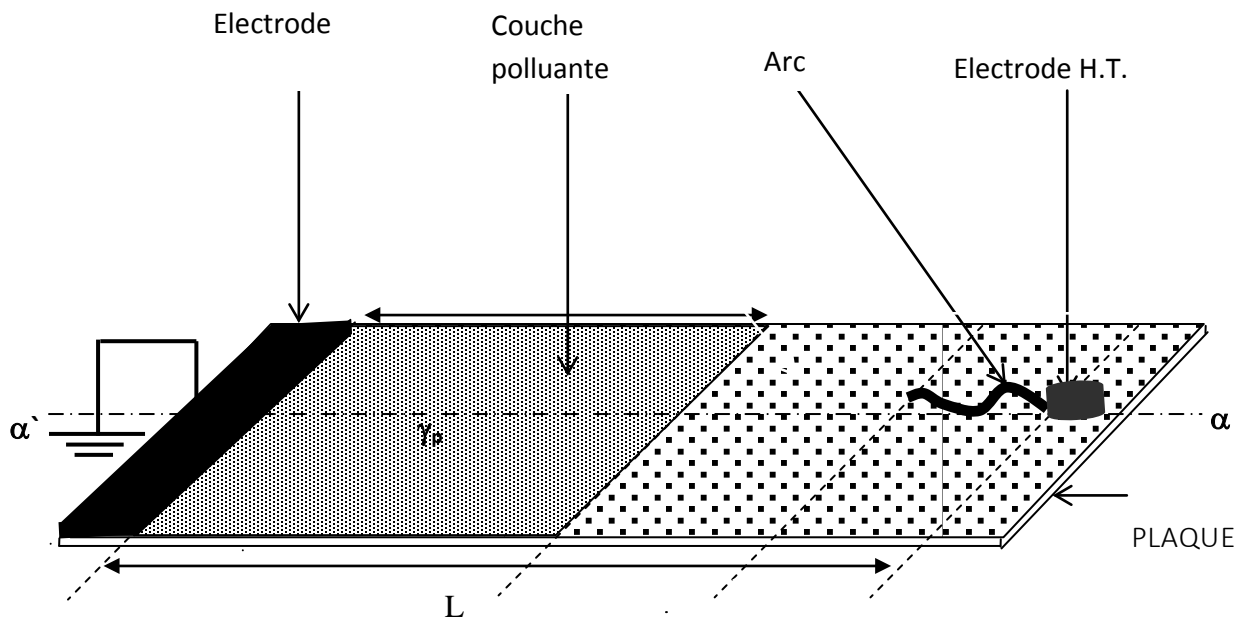


Fig. III.3 Modèle d'étude

Pour représenter la pollution, nous avons adopté le modèle linéaire, car c'est le modèle le plus utilisé. Il considère une répartition critique (uniforme) de la pollution et exprime, par conséquent, la résistance de la couche de pollution comme une fonction linéaire de la longueur de fuite [16, 10] :

$$R_p = r_p (L - X) \quad (III.5)$$

Avec :

$r_p$ : la résistance linéique.

L : la longueur de fuite totale.

X : la longueur de l'arc.

En se basant sur le modèle de Renyu et Zhicheng [1], nous pouvons ramener une structure complexe d'un isolateur pollué peut être ramenée à un modèle plan équivalent, dont la résistance  $R_p$  de la pollution peut s'écrire sous la forme suivante [10]:

$$R_p = \frac{1}{\pi \gamma_p} \frac{L-X}{r_{iso}} \quad (\text{III.6})$$

Où

$\gamma_p$  est la conductivité superficielle de la pollution

$r_{iso}$  le rayon effectif de l'isolateur

A partir des équations (III.5) et (III.6), la résistance linéique de la pollution peut être formulée par :

$$r_p = \frac{1}{r_{iso} \gamma_p \pi} \quad (\text{III.7})$$

La relation approximative de la tension aux bornes de l'arc est donnée, selon F.Obenaus [20], par la l'expression empirique suivante :

$$u_{arc} = \frac{AX}{i^n} = E_{arc} X \quad (\text{III.8})$$

Avec A et n sont les constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc.

La résistance  $R_{arc}$  du canal de cet arc peut s'écrire sous la forme :

$$R_{arc} = \frac{u_{arc}}{i} = \frac{AX}{i^{n+1}} \quad (\text{III.9})$$

Sachant que la résistance linéique  $r_{arc}$  de ce canal est donnée par :

$$r_{arc} = \frac{R_{arc}}{X} = \frac{A}{i^{n+1}} \quad (\text{III.10})$$

La relation entre le rayon  $r_d$  (en cm) du pied de l'arc et le courant i dans l'arc est donné selon Wilkins par [13] :

$$r_d = \sqrt{\frac{i}{1.45\pi}} \quad (\text{III.11})$$

Nous considérons que le canal d'arc est cylindrique de section  $S$  ( $S=\pi r^2$ ,  $r$  étant le rayon de la décharge), de longueur  $X$  et de résistance  $R_{arc}$ . Dans ces conditions, la résistivité  $p_{arc}$  du canal conducteur peut être donnée par :

$$p_{arc} = \frac{S R_{arc}}{X} = \frac{\pi r_d^2 R_{arc}}{X} \quad (III.12)$$

Cette résistivité peut être déterminée en fonction du courant, en substituant, dans cette dernière équation,  $R_{arc}$  et  $r_d$  par leurs expressions respectives (III.9) et (III.11) :

$$p_{arc} = \frac{A}{1.45 i^n} \quad (III.13)$$

Par ailleurs, en fonction du rayon du canal d'arc, cette résistivité peut être exprimée par :

$$p_{arc} = \frac{A}{1.45^{n+1} \pi^n r_d^{2n}} \quad (III.14)$$

La puissance fournie aux électrons peut s'écrire comme suit :

$$P_{arc} = u_{arc} i = e_{arc} x i = A x i^{1-n} \quad (III.15)$$

En raison de leur grande mobilité, les électrons cèdent cette puissance aux particules lourdes par collisions, par conduction thermique, par rayonnement, etc.

La vitesse de propagation de la décharge électrique est donnée par l'équation :

$$v = \mu E_{arc} \quad (III.16)$$

$v$  : la vitesse de propagation.

$\mu$ : la mobilité.

Le temps au contournement estimé dans notre modèle, représente la différence entre l'instant d'amorçage de l'arc (correspondant à l'instant où le critère de propagation est vérifié) et l'instant où son pied atteint l'électrode basse tension. Dans notre modèle, ce temps dépend de la conductivité de la pollution, de la géométrie de l'isolateur et de la vitesse de propagation de la décharge.

### III.5. Simulation numérique

Dans l'élaboration de notre modèle dynamique, nous avons utilisé le critère de propagation de Hampton. Nous avons aussi supposé que le canal d'arc est cylindrique et sa résistance est déduite de l'expression empirique de Obenaus donnant la tension aux bornes de ce canal, nous avons considéré que le contournement a lieu durant la première alternance de la tension sinusoïdale.

Dans cette simulation, nous introduisons en premier lieu les données du système d'isolation à savoir la conductivité  $\gamma_p$  de la couche de pollution, la longueur de fuite totale de l'isolateur  $L$ , le rayon effectif de l'isolateur  $r_{iso}$  ou sa largeur  $z$  suivant le type d'isolateur considéré, ainsi que la mobilité des électrons dans l'arc  $\mu$ , la valeur initiale de la tension appliquée  $u$ , le pas d'incrément de la tension  $du$  et le pas d'incrément de temps  $dt$ .

En second lieu, nous initialisons le temps ( $t_0 = 0$ ). Nous considérons à cet instant que la décharge électrique est de type couronne et de longueur ( $X_0 = 0$ ). A partir de ces données initiales, nous pouvons calculer tous les paramètres du circuit électrique équivalent, à savoir la résistance de la pollution  $R_p$ , la tension aux bornes de l'arc  $u_{arc}$ , le courant de fuite  $i$ , la résistance d'arc  $R_{arc}$ , la puissance dans l'arc  $P_{arc}$ , le rayon de l'arc  $r_d$  et enfin la vitesse de propagation de la décharge  $V$ .

Par la suite, nous testons le critère de propagation ( $E_p > E_{arc}$ ). Si ce critère n'est pas vérifié, il faut augmenter la tension  $u$  et reprendre les calculs précédents. Par contre, si le critère est vérifié, il y a propagation et il faudra alors recalculer tous les paramètres précédents à partir des nouvelles valeurs de la longueur de la décharge ( $X = X + V dt$ ) et du temps ( $t = t + dt$ ).

Dans le cas où le critère de propagation est vérifié, le contournement total de l'isolateur a lieu seulement si la longueur de la décharge est supérieure ou égale au critère d'arrêt ( $x = 0.9 L$ ) [21]. Dans le cas contraire, les calculs précédents sont repris depuis le début.

Il est à noter qu'après chaque incrément de temps, il faut tester le temps de propagation. Si ce temps est supérieur à la durée d'une alternance de la tension sinusoïdale ( $t_p = 10\text{ms}$ ), il faudra alors incrémenter la tension et reprendre les calculs depuis le début ; sinon, il n'y aura pas de changement dans le déroulement du programme.

Dans ce qui suit, nous présentons l'algorithme de simulation illustrant les étapes à suivre dans le calcul des différents paramètres d'une décharge électrique sur un isolateur pollué (Figure III. 4) :

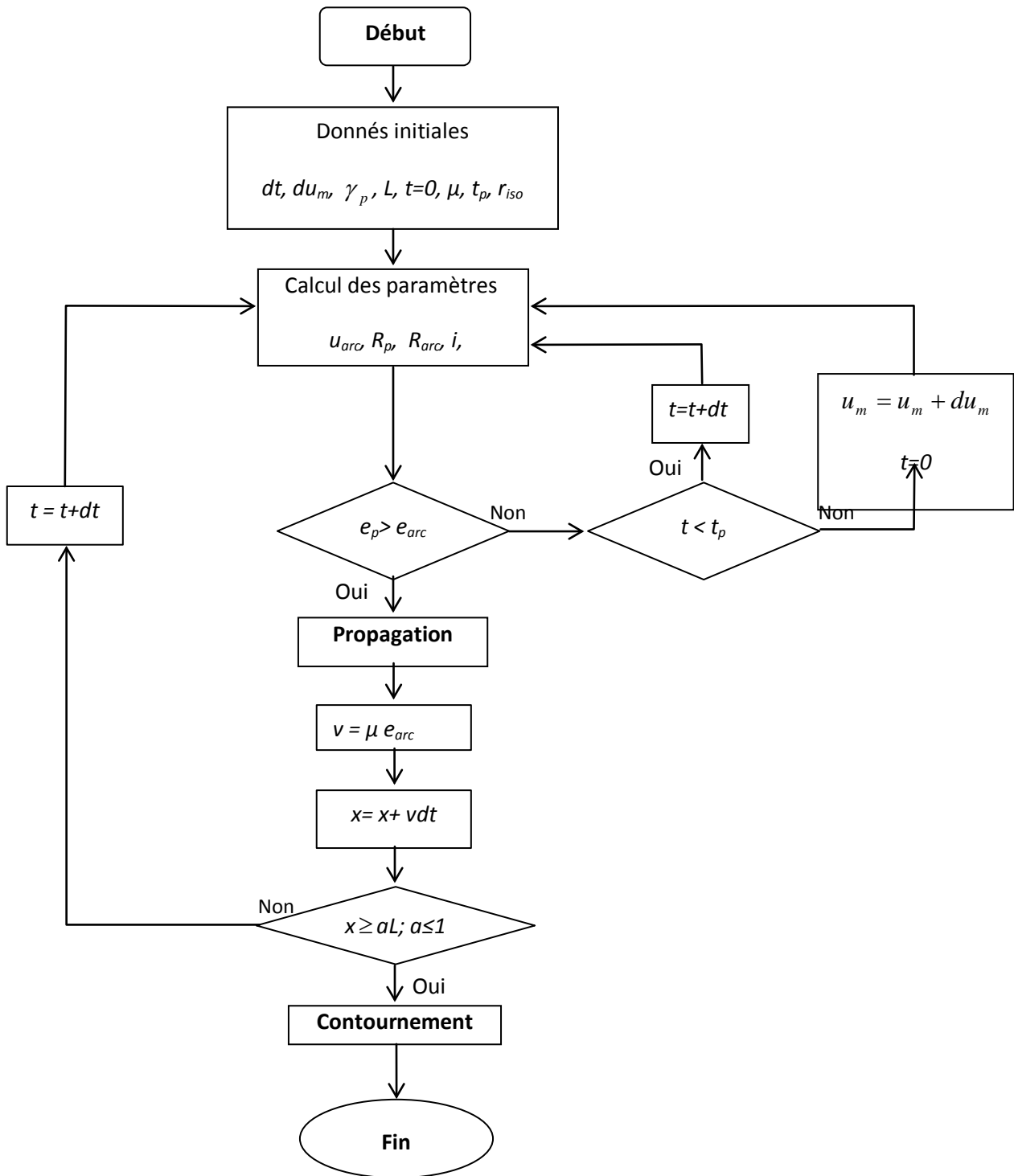


Figure III.4 Algorithme de simulation

### **III.6 .Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons mis au point un modèle dynamique. Ce dernier est basé sur le circuit électrique d'Obenaus, et utilise le critère de propagation d'Hampton et le modèle de Tegar. Tenant compte de la géométrie de l'isolateur, ce modèle permet de calculer la tension de contournement et le temps au contournement ainsi que de suivre l'évolution temporelle et spatiale des différents paramètres caractérisant l'état critique des surfaces isolantes polluées. L'exploitation de l'algorithme que nous avons fait ainsi que la validation de ses résultats seront l'objet du chapitre suivant.

**CHAPITRE IV**  
**VALIDATION ET APPLICATION**

---

## IV. 1. Introduction

Contrairement à la tension continue et la tension impulsionnelle, la tension alternative présente le problème du passage par zéro du courant, Ainsi, la performance d'un isolateur sous une contrainte continue est plus critique car les décharges produites après formation de bandes sèches persistent plus longtemps que pour le cas d'une contrainte alternative [10].

Par ailleurs, le contournement d'un isolateur soumis à une tension alternative peut intervenir sur la première alternance, si la tension appliquée est suffisamment élevée.

D'après Rahal, il faut distinguer trois cas dans le mécanisme de contournement :

- Contournement immédiat à résistivité de la couche de pollution quasiment constante, nécessitant une seule alternance. Dans ce cas, Rahal suppose que les phénomènes ne seront pas fondamentalement différents à ce qu'ils étaient sous tension continue.
- Contournement consécutif à un abaissement de la résistivité de la couche de pollution, alors même que la tension appliquée était au départ insuffisante.
- Non contournement, la couche de pollution électrolytique étant arrivée à son échauffement maximum l'amenant à l'ébullition et la résistivité demeurant trop élevée pour la tension appliquée.

Dans ce qui suit, nous allons considérer le cas où la tension appliquée est suffisante pour conduire à un contournement.

Dans son étude sur les mécanismes physiques du contournement des isolatrices hautes tensions, Rahal a traité qualitativement le contournement en alternatif. Ces observations lui ont permis de supposer que le processus de contournement se fait toujours dans une seule alternance, même si le processus de préparation consistant par exemple à un échauffement progressif de la couche de l'électrolyte, nécessite plusieurs alternances.

Dans une étude expérimentale sur la propagation sur une surface faiblement conductrice, Mahi [23] a observé que le contournement au voisinage de la tension critique, dure plusieurs périodes et se termine toujours pendant l'alternance positive.

En s'inspirant de ces travaux, nous sommes proposés de calculer la tension critique la plus basse qui permet d'avoir un contournement sur une seule alternance (positive).

Dans ce chapitre, nous allons valider notre modèle en tension alternative, en se basant sur les résultats obtenus par le modèle de Tegar [6], Nous ferons aussi des applications dans le cas d'une pollution forte et légère, pour montrer les évolutions temporelles et spatiales des différents paramètres caractérisant le développement des décharges électriques sur des surfaces isolantes polluées.

## IV. 2. Validation

La validation est effectuée en comparant la tension de contournement et le courant critique estimés par notre modèle dynamique à ceux obtenus par Tegar [6]. Pour cela, nous allons considérer la même géométrie de l'isolateur ainsi que les mêmes contraintes auxquelles est soumis cet isolateur, supposées par ce chercheur.

### IV. 2. 1. Validation basée sur le modèle de Tegar

En tension alternative, Tegar [6] a proposé un modèle permettant de calculer la résistance de la pollution, la tension appliquée et le courant de fuite en fonction de la longueur de la décharge ainsi que la tension et le courant critiques pour différentes résistivités de la couche de pollution (25, 50, 100, 200 et 400  $\Omega$ .Cm).

L'isolateur considéré est de type rectangulaire plan, ayant une longueur de fuite totale de 34 cm et de 46 cm largeur (Figure IV.1).

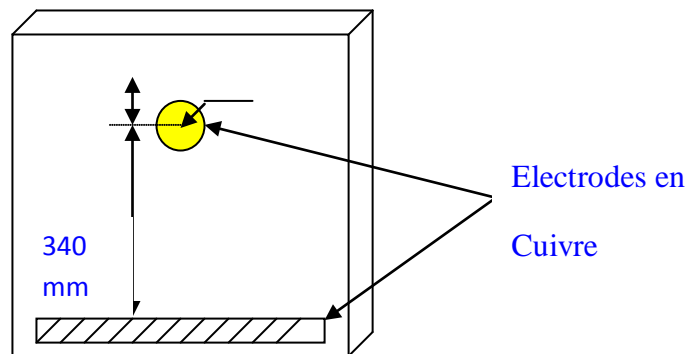
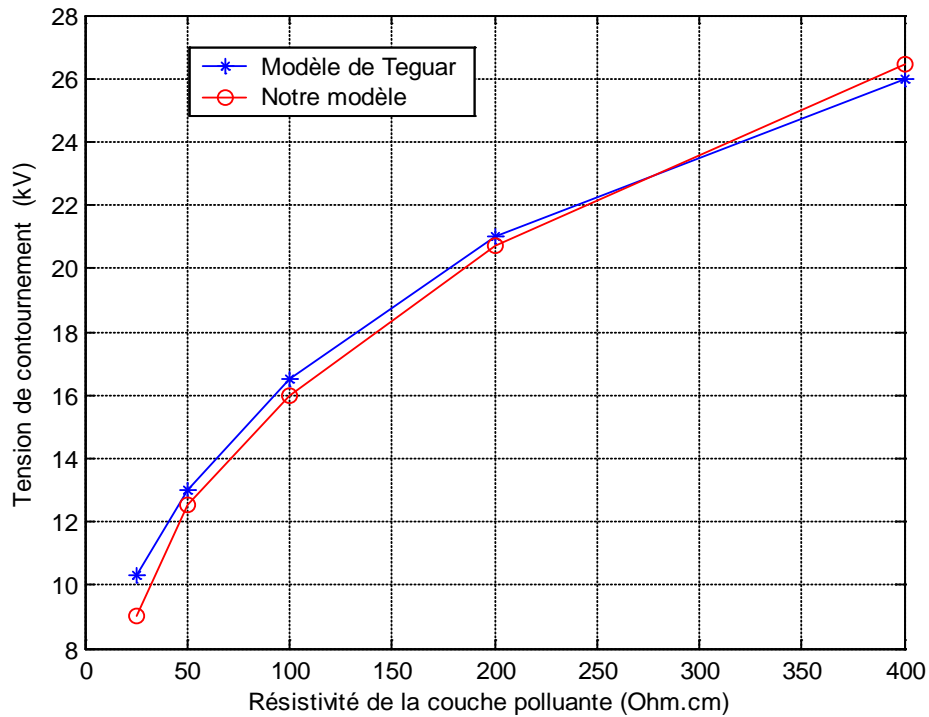


Figure IV. 1 Modèle d'étude de Tegar

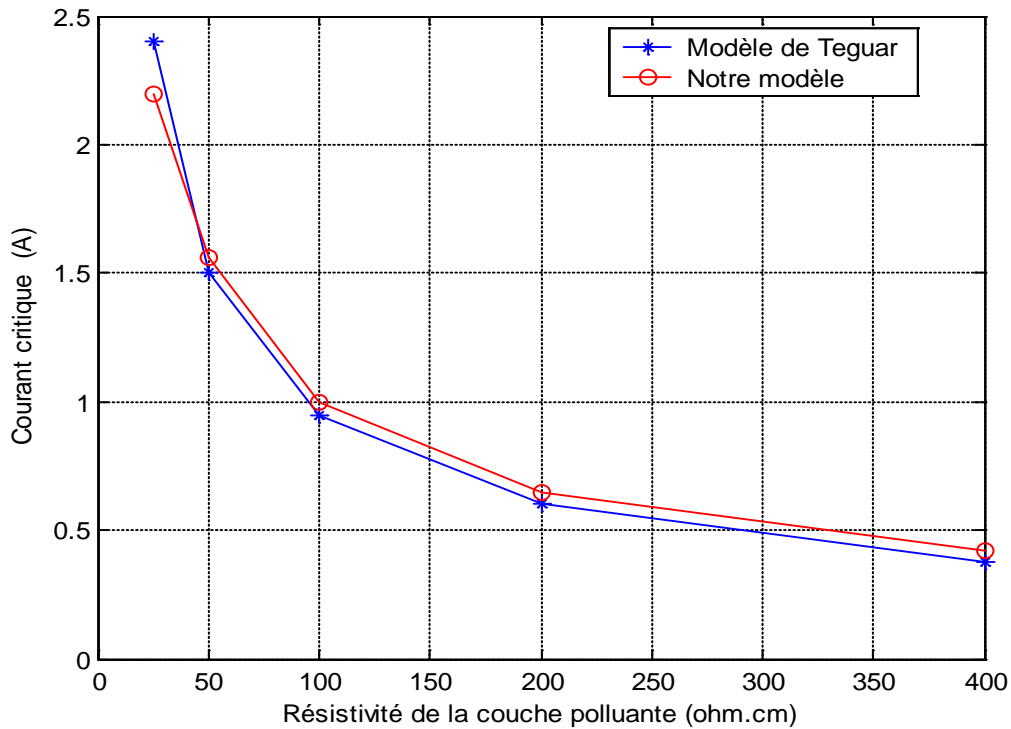


**Figure IV. 2 Tension de contournement en fonction de la résistivité de la pollution**

La figure (IV. 2) illustre la variation de la tension de contournement en fonction de la résistivité de la pollution obtenue par notre modèle ainsi que celle trouvée par Tegar [6]. Pour l'isolateur considéré et les résistivités prises par cet auteur, une bonne concordance entre les deux modèles a été obtenue.

Il est à signaler que la tension de contournement augmente avec l'augmentation de la résistivité de la couche polluante. Ceci est évident, car la réduction de la résistivité (qui se traduit par l'augmentation de la conductivité superficielle) de la pollution engendre la diminution de la tension de tenue.

Pour le même isolateur considéré, notre caractéristique concernant le courant de fuite critique en fonction de la résistivité de la pollution ainsi que celle obtenue par Tegar [6] sont représentées sur la figure (IV. 3).



**Figure IV. 3 Courant de fuite en fonction de la résistivité de la pollution**

Le courant de fuite critique diminue avec l'augmentation de la résistivité. En général, notre modèle présente des courants légèrement supérieurs à ceux obtenus par le modèle de Tegar [6].

Notons que les constantes caractéristiques  $A$  et  $n$  permettant d'obtenir ces résultats sont, dans notre cas, égales à 340 et 0.59 respectivement.

### IV. 3. Application

La dynamique de l'arc électrique est décrite en tenant compte des évolutions temporelle (dans le temps) et l'évolution spatiale (suivant la longueur d'arc), des différents paramètres régissant le comportement d'un isolateur pollué, sur lequel une décharge se développe jusqu'à provoquer le contournement total. L'isolateur considéré est cylindrique de longueur de fuite 50cm et de diamètre 10cm, sur lequel s'est déposé un dépôt polluant de conductivité superficielle variant de 10 à 60  $\mu\text{S}$ . En outre, nous avons considéré une mobilité de 140cm<sup>2</sup>/Vs.

#### IV. 3. 1. Tension appliquée, tension dans la couche de pollution et tension de la décharge

Les figures (IV. 4), (IV. 5) et (IV. 6) illustrent respectivement la variation dans le temps de la tension appliquée entre électrodes, la tension dans couche de pollution et la tension de la décharge pour différentes conductivités. Initialement, la tension dans couche de pollution évolue d'une façon sinusoïdale, car la tension appliquée est sinusoïdale. Dès que le critère de propagation est vérifié, la décharge est amorcée. A partir de cet instant, la tension dans la couche de pollution diminue brusquement puis augmente de nouveau. En outre, la tension de la décharge présente une première

partie pratiquement nulle car elle est caractérisée par l'absence totale de l'arc du moment que le critère de propagation n'étant pas vérifié. Puis une deuxième partie croissante représentant la phase de propagation et une troisième partie décroissante représentant la phase de contournement.

Nous remarquons, par ailleurs, que l'augmentation de la conductivité engendre la diminution de la tension dans la couche polluante ainsi que la tension de la décharge.

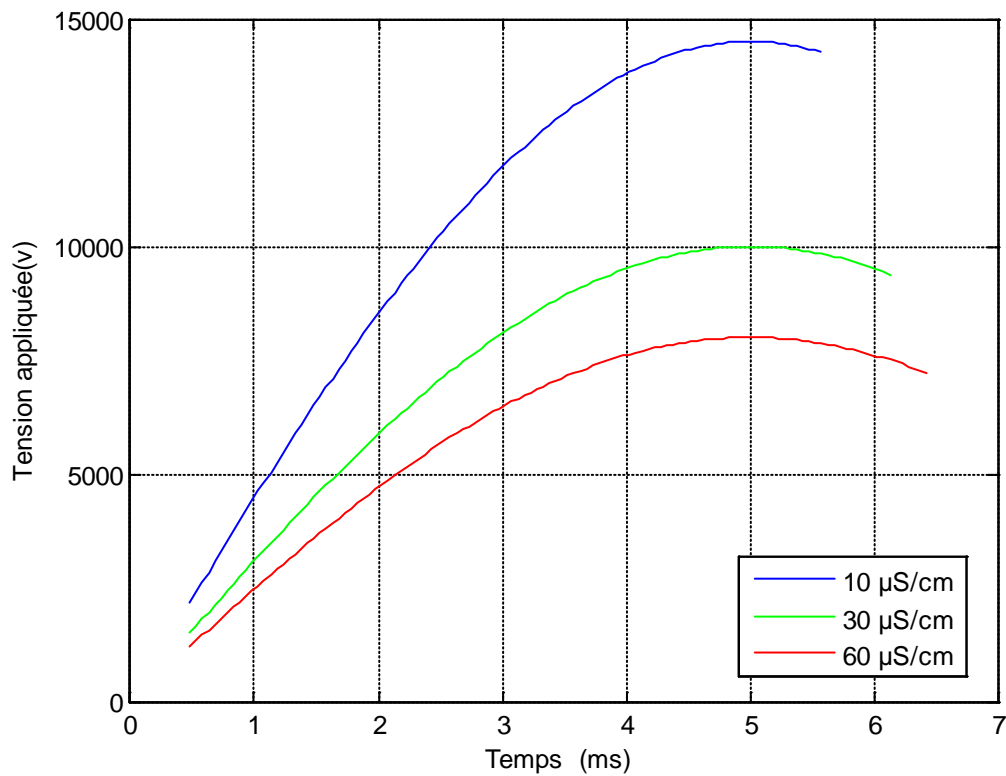


Figure IV. 4 Tension de contournement appliquée en fonction du temps.

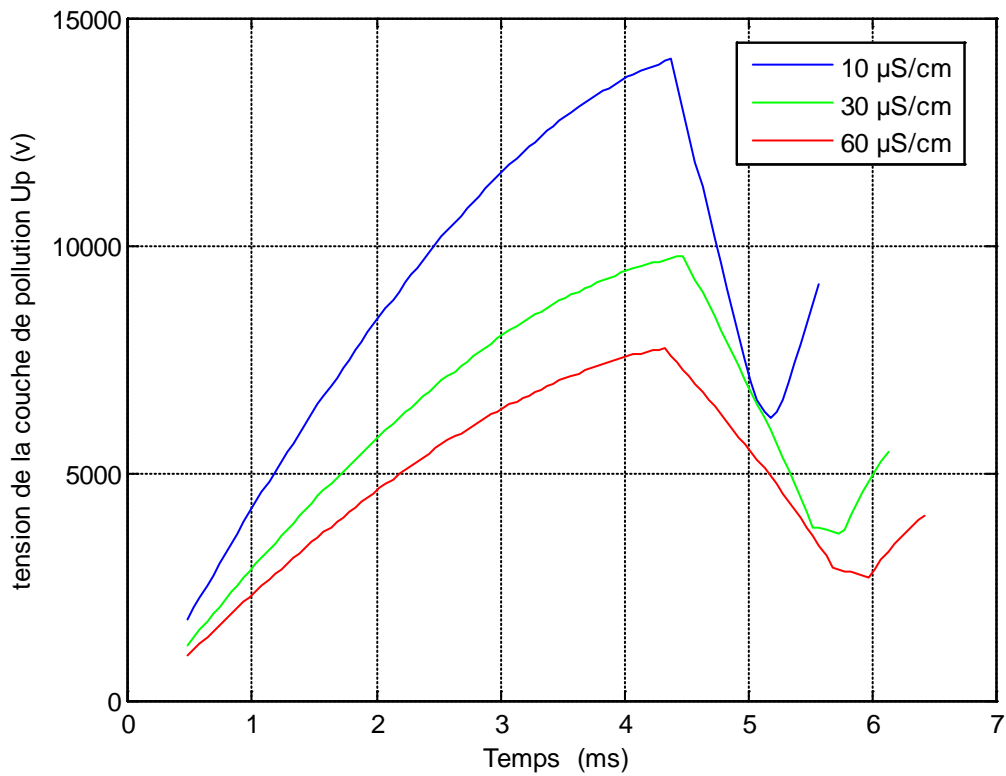


Figure IV. 5 Tension de la couche de pollution en fonction du temps.

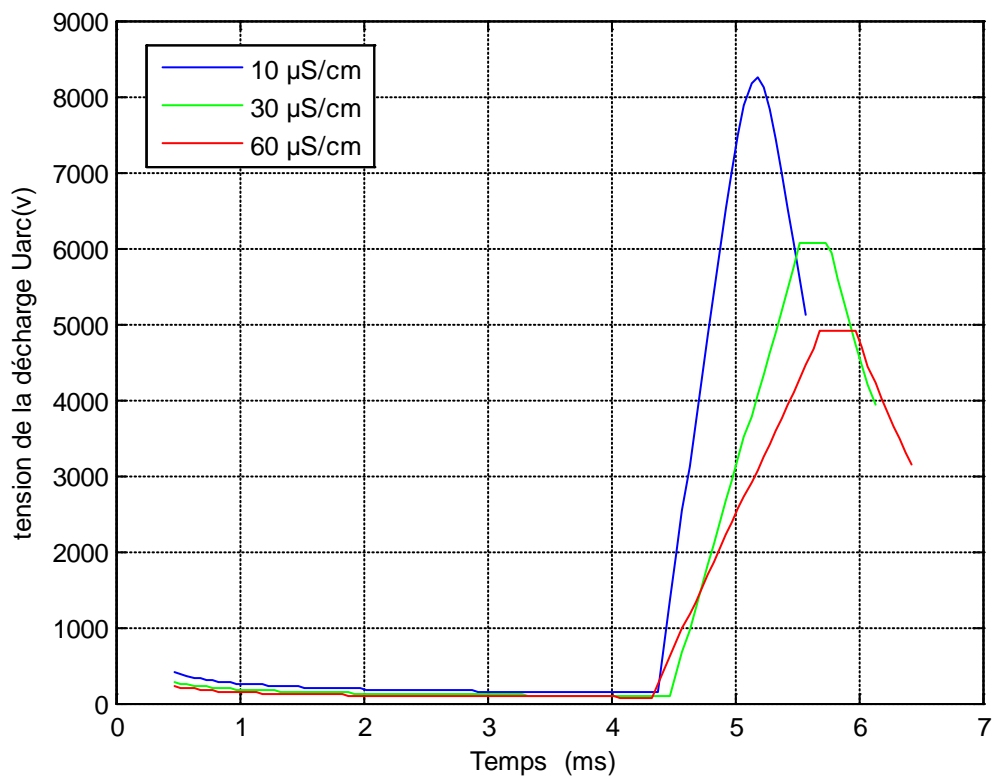


Figure IV. 6 Tension de la décharge en fonction du temps

### IV. 3. 2. Longueur de la décharge

L'évolution de la décharge dans le temps se fait d'une manière régulière dès que les critères de propagation sont vérifiés, comme le montre la figure (IV. 7). Notons que plus la conductivité n'est importante, moins vite l'arc se déplace. En effet, l'augmentation de la conductivité engendre l'accroissement de la phase de propagation. Cette figure montre bien l'instant où la décharge commence à s'allonger. Il est estimé à  $t = 4,4$  ms et reste pratiquement le même pour les trois conductivités superficielles.

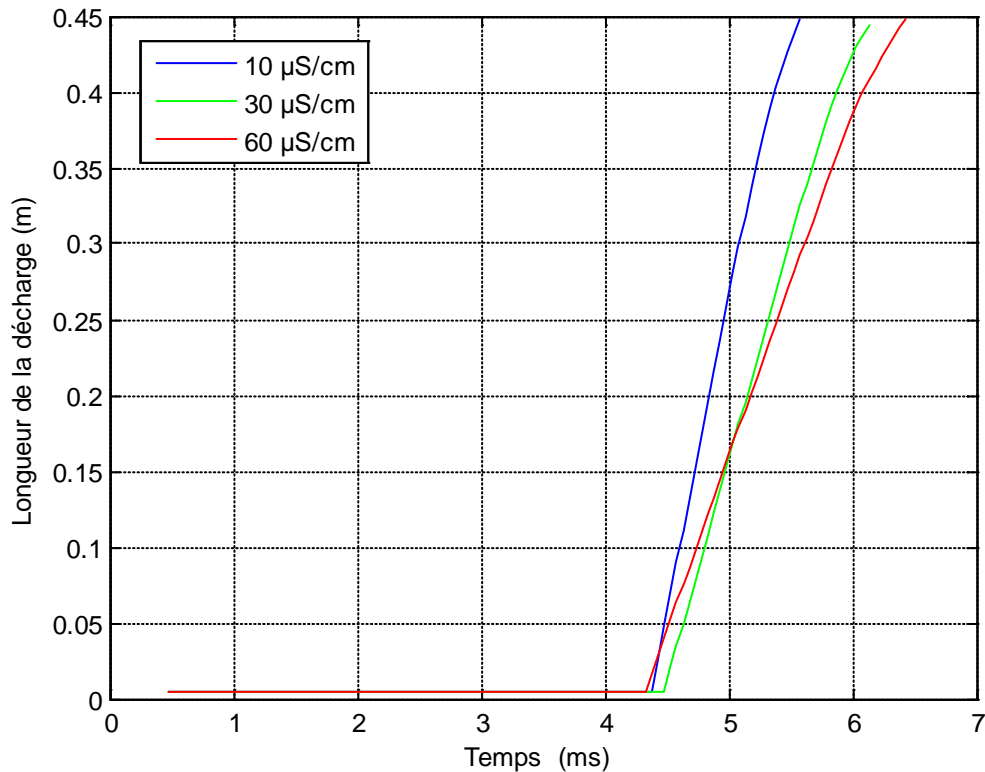


Figure IV. 7 Longueur de la décharge en fonction du temps

### IV. 3. 3. Courant de fuite

Les caractéristiques de la figure (IV.8), donnant le courant en fonction du temps, montrent qu'avant l'amorçage et donc avant l'allongement de l'arc électrique, le courant de fuite suit la tension appliquée et varie de façon sinusoïdale. Durant la phase de propagation, ce courant augmente très lentement. Cette croissance est suivie d'une augmentation brutale correspondante à la phase de contournement. Nous constatons également que plus la pollution est accentuée (donc plus la conductivité est grande), plus les courants sont importants.

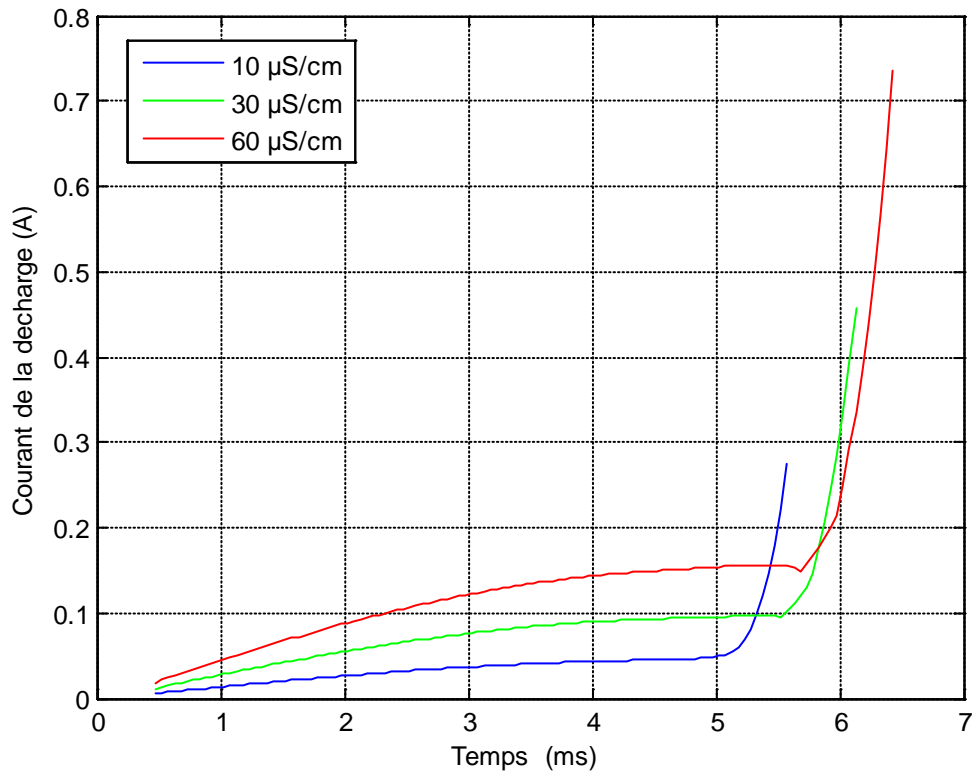


Figure IV. 8 Courant de fuite en fonction du temps

#### IV. 3. 4. Résistance de la couche polluante

La résistance de la couche polluante non court-circuitée par l'arc est constante avant la propagation. Dès la vérification de propagation, cette résistance commence à décroître dans le temps (Figure IV.9). Ce qui est en parfait accord avec l'élongation de l'arc. D'autre part et comme cette résistance est inversement proportionnelle à la conductivité, l'augmentation de cette dernière provoque la diminution de la résistance de la couche polluante.

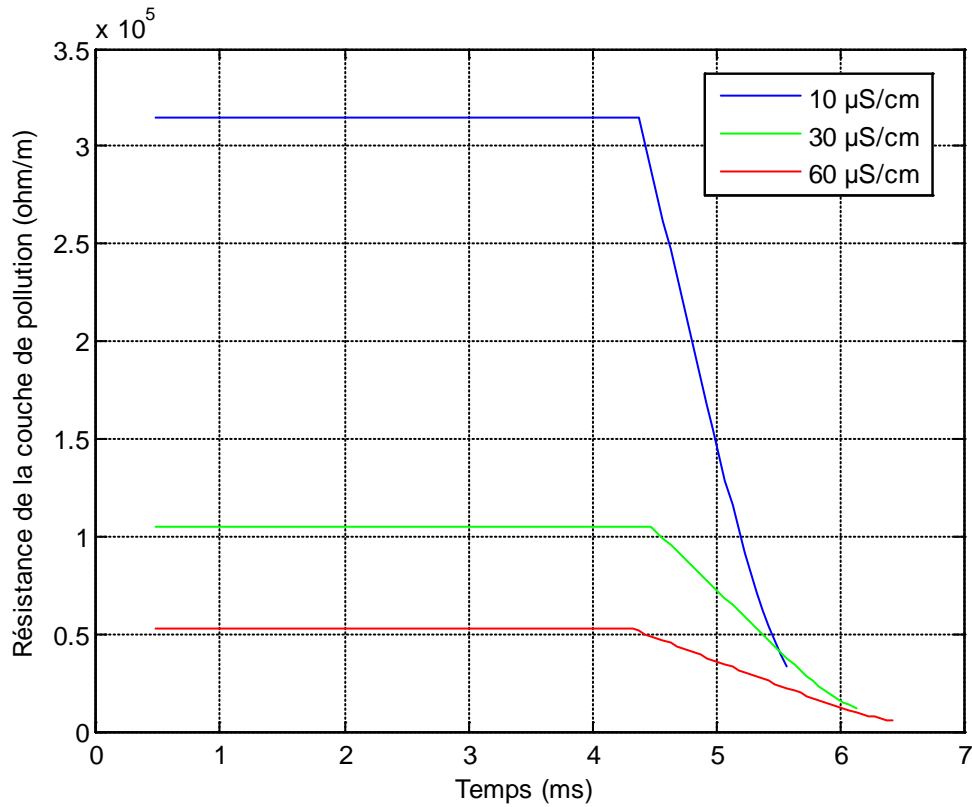


Figure IV. 9 Résistance de la couche de pollution en fonction du temps

### IV. 3. 5. Résistance de l'arc

Les caractéristiques illustrant la variation de la résistance de l'arc, en fonction du temps sont présentées à la figure (IV. 10), montrent que cette résistance augmente en premier lieu, atteint un maximum et diminue par la suite. La raideur de ces caractéristiques est d'autant plus importante que les conductivités sont faibles. Par ailleurs, il est tout à fait évident que la résistance de l'arc décroît avec l'augmentation de la conductivité de la pollution.

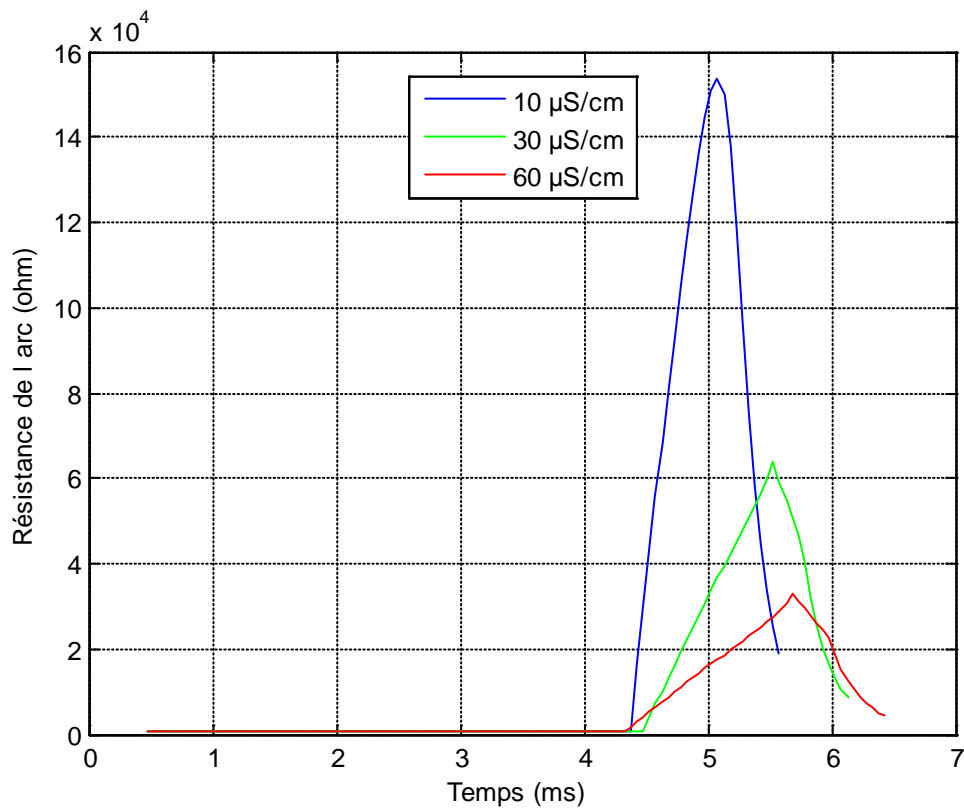


Figure IV. 10 Résistance de l'arc en fonction du temps

#### IV. 3. 6. Rayon de la décharge

La figure (IV. 11) montre la variation du rayon de la décharge en fonction du temps, son allure est similaire à celle du courant de fuite. En effet, le rayon de la décharge augmente au cours du temps. Cependant, cette augmentation est très faible durant la phase de propagation. A partir d'un certain temps, le rayon de la décharge croît assez brutalement pour atteindre une taille plus ou moins importante. C'est la phase d'augmentation rapide du courant dans l'arc. Cette caractéristique présente, par conséquent, un coude. Ce dernier exprime la fin de la phase de propagation due à l'affaiblissement de la résistance de la couche polluée. Par ailleurs, ce rayon augmente, tout comme le courant, avec la conductivité de la pollution.

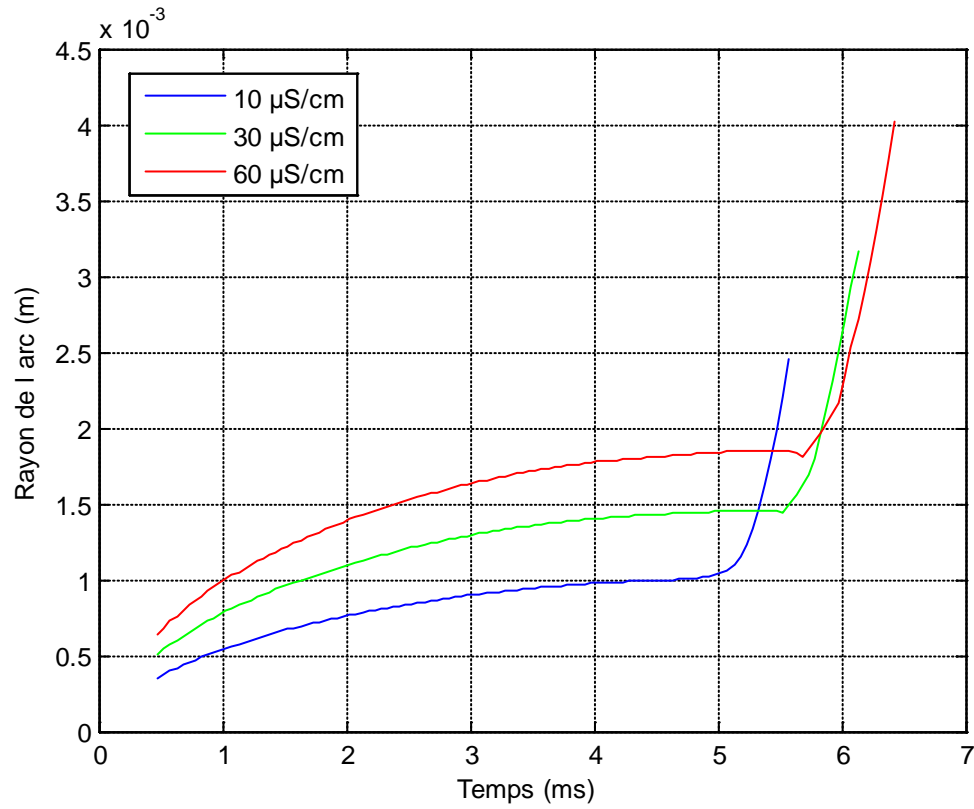


Figure IV. 11 Rayon de l'arc en fonction du temps

### IV. 3. 7. Puissance fournie par la source

La puissance délivrée par la source augmente lentement pendant la phase de propagation, et rapidement durant la phase de contournement (IV. 12).

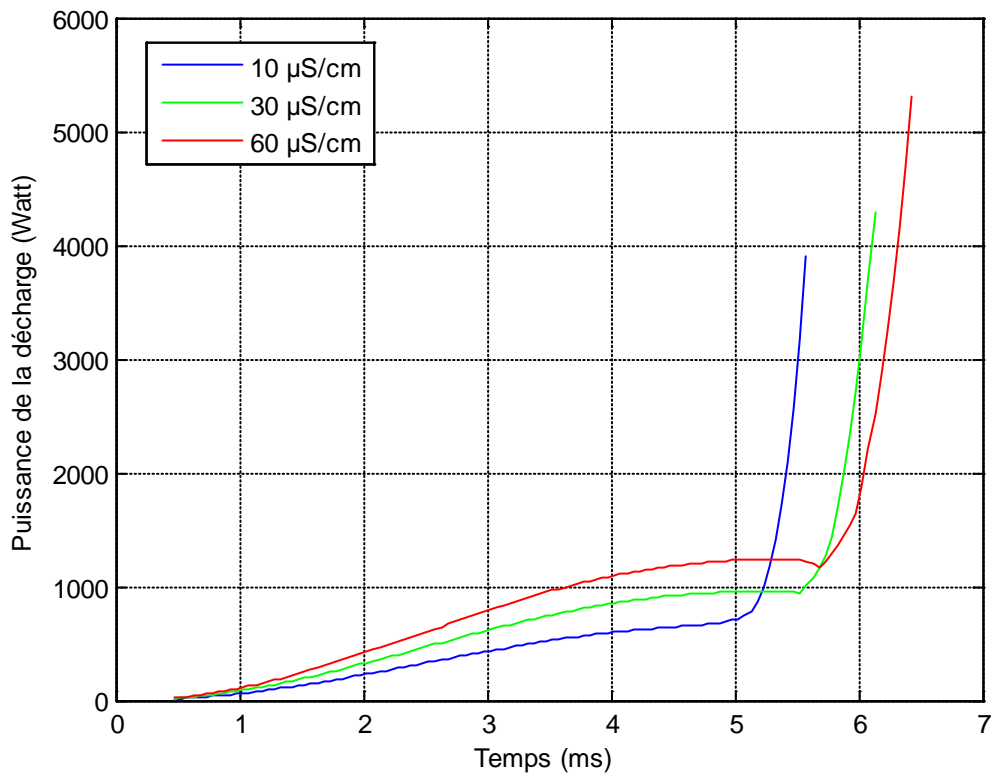


Figure IV. 12 Puissance fournie par la source en fonction du temps

#### IV. 3. 8. Champs de la décharge et de la pollution

Les figures (IV.13) et (IV.14) présentent les évolutions des champs au pied d'arc et dans la pollution en fonction du temps, pour différentes conductivités. A l'instant où le critère de propagation est vérifié, le champ dans la couche polluante devient supérieur à celui au pied d'arc. Ce dernier champ diminue au cours du temps. Cette diminution est plus accentuée durant la phase du contournement. L'intersection entre le champ au pied de l'arc et celui dans la pollution représente en fait l'instant de propagation de la décharge comme montre la figure(IV.15).

Notons que l'augmentation de la conductivité engendre la diminution de ces deux champs électriques.

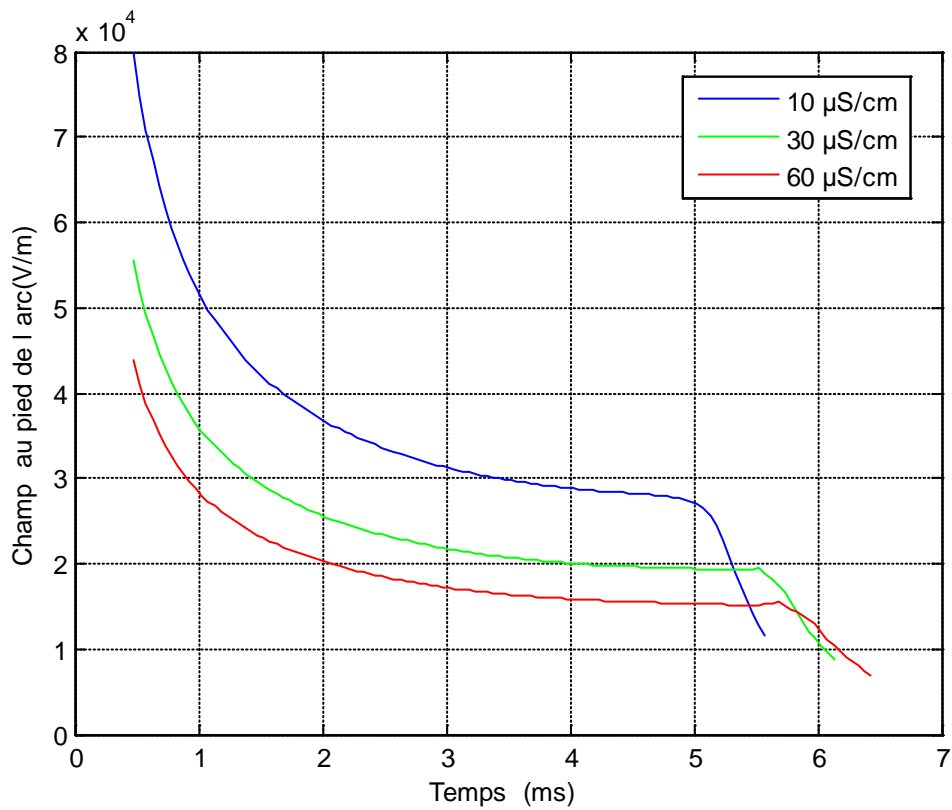


Figure IV. 13 Champ au pied d'arc en fonction du temps

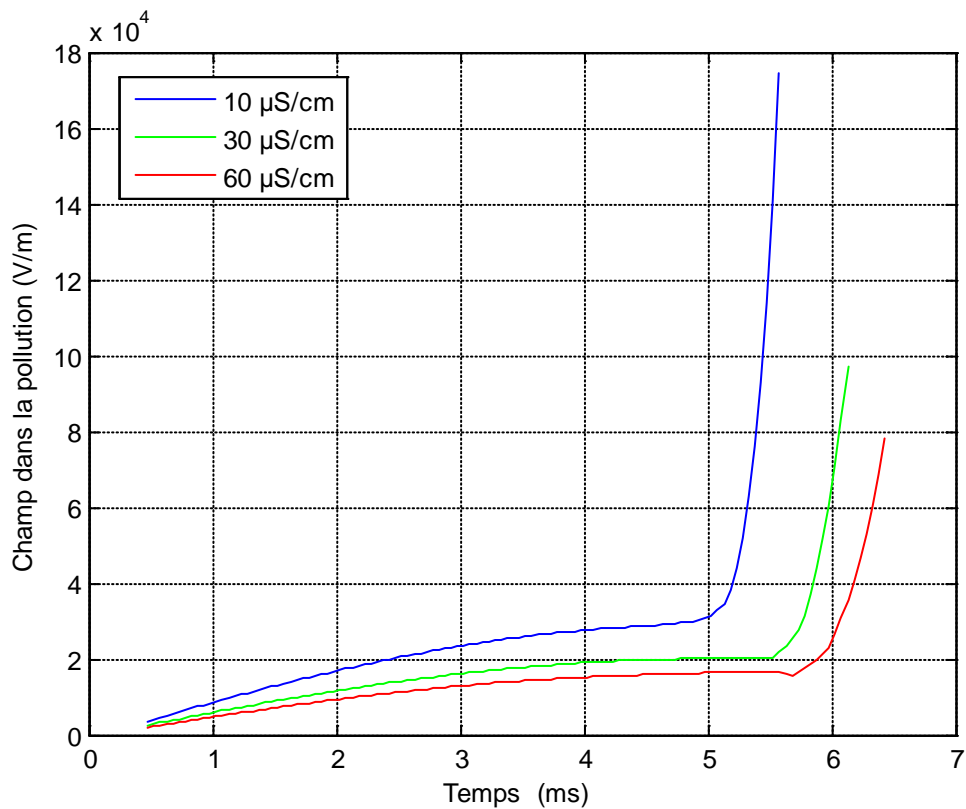


Figure IV. 14 Champ dans la couche de pollution en fonction du temps

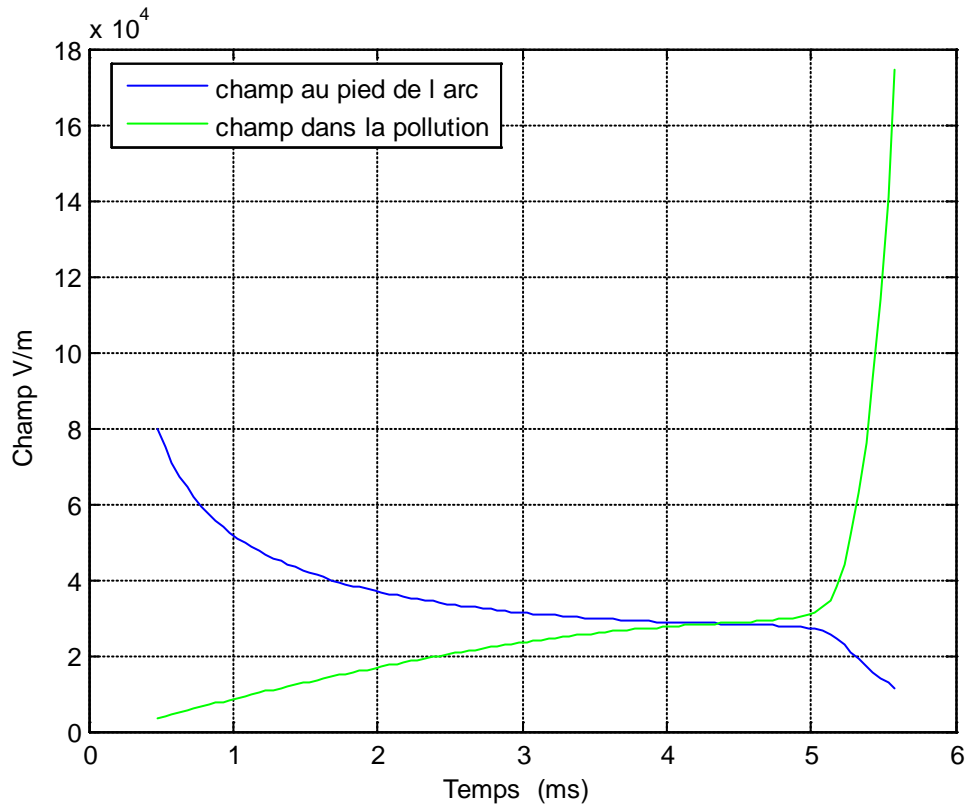


Figure IV. 15 Champ dans la couche de pollution et champ au pied de l'arc en fonction du temps pour une conductivité  $10 \mu\text{s}$

### IV. 3. 9. Vitesse de propagation

Pour une mobilité donnée des électrons, la vitesse d'élongation de la décharge électrique diminue au cours du temps, comme le montre la figure (IV.16). Ceci est expliqué par la diminution du champ au pied de cette décharge auquel la vitesse est proportionnelle. L'allure de la vitesse de propagation présente en faite deux parties. Une première à décroissance plus au moins rapide, suivie d'une deuxième à diminution brusque correspondante à la fin de la phase de propagation. D'autre part, l'augmentation de la conductivité entraîne la diminution de la vitesse de propagation.

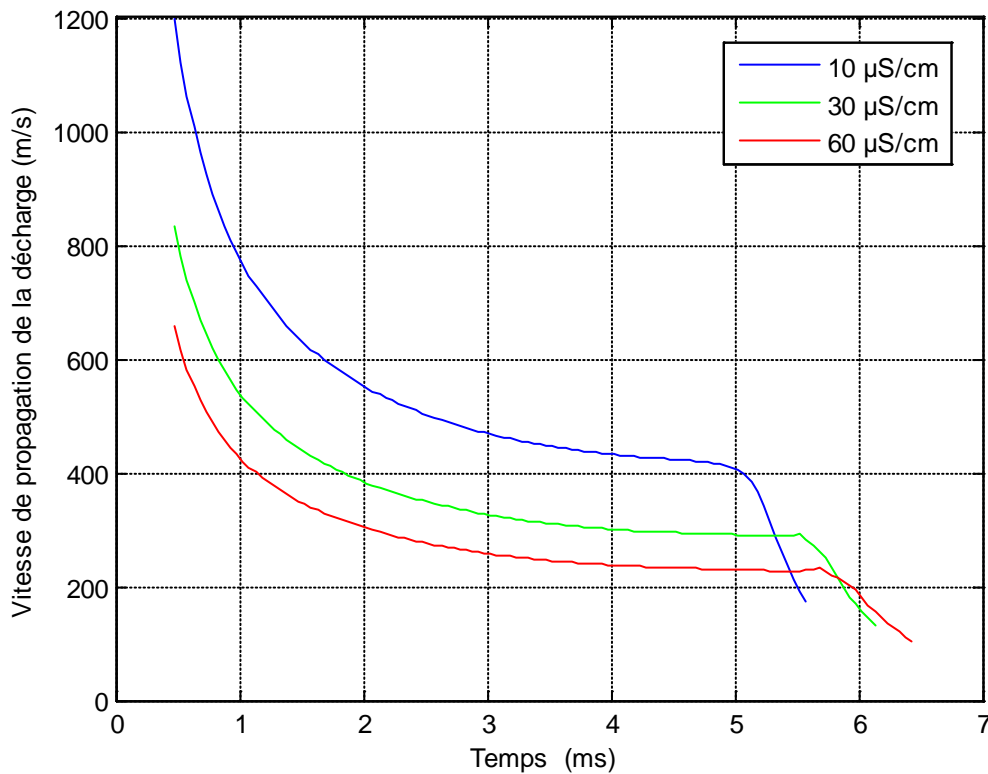


Figure IV. 16 Vitesse de propagation de la décharge

#### IV. 4 Résistance de la décharge, Tension de la décharge et Courant de fuite en fonction de la longueur de la décharge

Etant donné que la longueur de la décharge augmente de façon continue au cours du temps, les caractéristiques des différents paramètres régissant l'arc électrique conservent leurs mêmes allures en fonction de la longueur de la décharge, qu'en fonction du temps.

A titre d'exemple, les caractéristiques des figures (VI.17) à (IV.18) présentent deux phases de variation correspondant à la propagation et au contournement. La limite entre ces deux phases est obtenue pour une longueur de l'arc électrique estimée à deux tiers de la longueur de fuite totale de l'isolateur. Cette longueur représente la longueur critique de l'arc électrique. Ce résultat, indépendant de la conductivité de la couche polluante, concorde avec de celui obtenu par Dhahbi [10]. Par ailleurs, la longueur critique de l'arc a été évaluée expérimentalement par Mekhaldi [4] et Namane [24] au tiers de la ligne de fuite totale. Cette différence dans l'évaluation de la longueur critique de l'arc peut être justifiée par le choix du modèle ainsi que le mode d'application de la pollution.

Le fait que la longueur critique de l'arc est proportionnelle à la longueur de fuite totale de l'isolateur comme indique la figure (VI.19), l'augmentation de la distance inter-électrodes engendre la croissance de la phase de propagation. Ainsi le temps au contournement augmente.

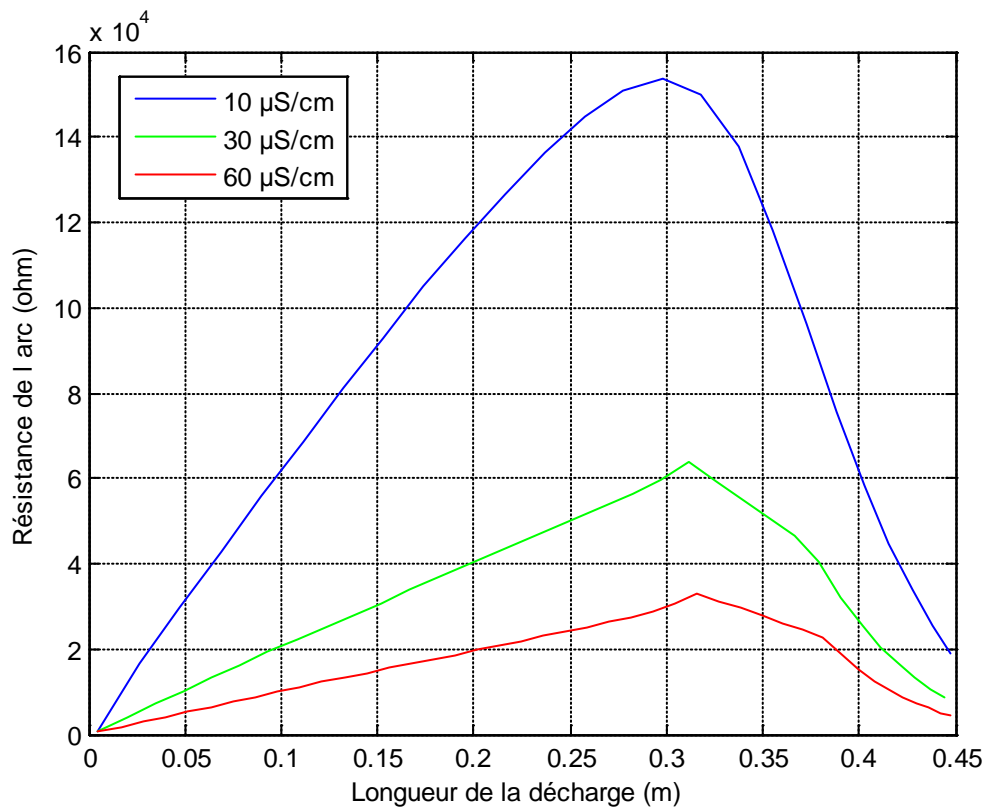


Figure IV. 17 Résistance de la décharge en fonction de la longueur de la décharge

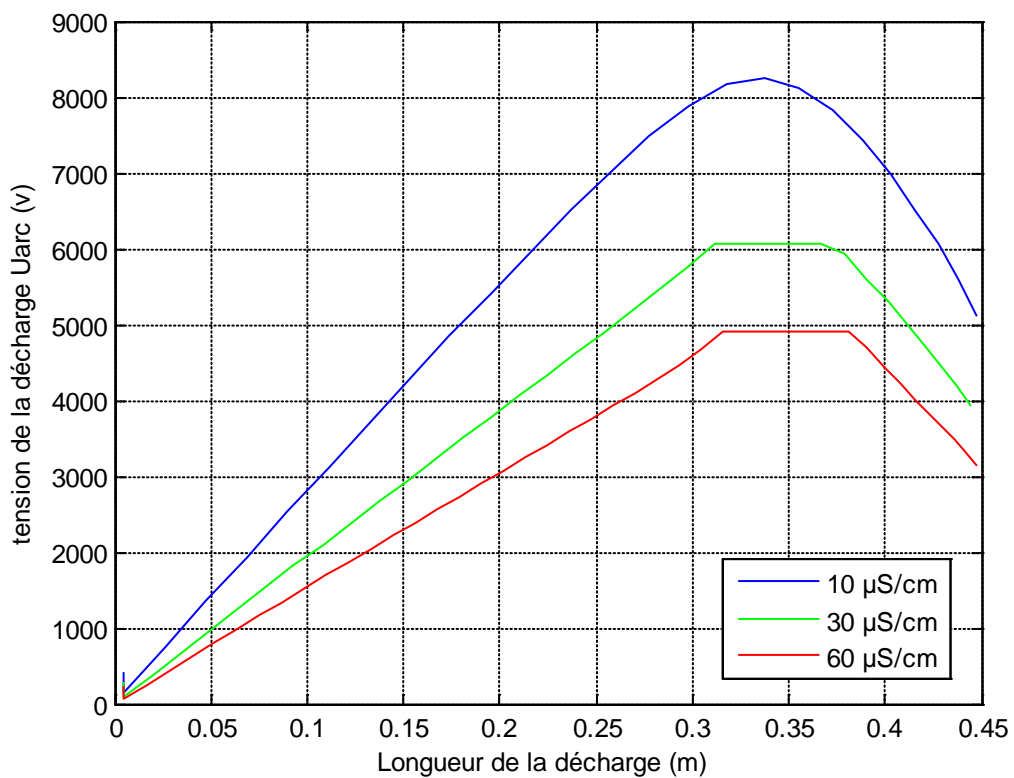


Figure IV. 18 Tension aux bornes de la décharge en fonction de la longueur de la décharge

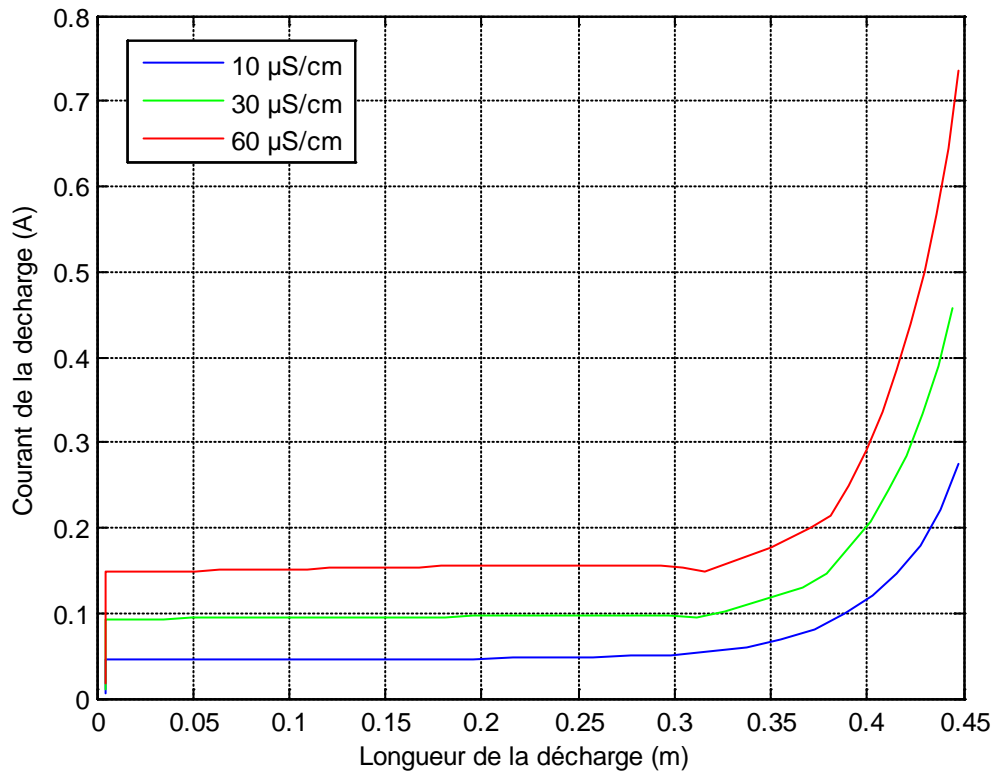


Figure IV. 19 Courant de fuite en fonction de la longueur de la décharge

## IV. 4. Conclusion

L'étude du phénomène de contournement sous tension alternative, pose le problème du passage par zéro du courant. L'hypothèse du contournement qui peut avoir lieu sur une seule alternance, donne des résultats de simulation satisfaisants à ceux rapportés dans la littérature.

Par ailleurs, les caractéristiques temporelles que nous avons obtenues présentent trois évolutions distinctes correspondant à la phase de préparation (avant propagation correspondant à l'effet de couronne), la phase de propagation (qui s'effectue sur les deux tiers de la distance inter électrodes) et la phase de contournement dans le reste. Nos caractéristiques sont en bon accord avec celles obtenues par Tegar.

## CONCLUSION GENERALE

Notre étude nous a permis, dans un premier temps, de mieux comprendre les différents mécanismes régissant le phénomène de contournement sur des surfaces isolantes polluées, et de contribuer à la modélisation des isolateurs pollués afin de prédéterminer la dynamique de la décharge et ses différents paramètres.

Après avoir présenté les phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique, nous avons rappelé, les principaux modèles élaborés, en précisant leur caractère et en discutant leur domaine de validité. Ensuite, nous avons proposé un modèle dynamique représentatif de l'arc électrique. Ce modèle permet d'évaluer la tension de contournement, le temps au contournement et les différents facteurs caractérisant l'arc (courant dans l'arc, longueur d'arc, résistance d'arc, tension d'arc, le champ dans l'arc, vitesse de propagation et la puissance), ainsi que la résistance de pollution et le champ dans la pollution.

Un bon accord a été obtenu en comparant les résultats obtenus par notre modèle à ceux rapportés dans la littérature. Nous estimons, par conséquent, que notre modèle est un outil appréciable de prédiction du comportement d'un isolateur pollué, soumis à une tension alternative. Cependant, nous avons traité le phénomène de contournement uniquement du point de vue électrique. Cette analyse ne peut à elle seule traduire les mécanismes réels intervenants dans la génération et l'élongation des décharges électriques sur isolateurs pollués. Pour remédier à ce handicap, une connaissance de la physique de la décharge s'avère très indispensable. Par ailleurs, notre modèle peut être développé en y intégrant des paramètres assez difficile à cerner, comme la présence d'arc multiple, l'influence de l'effet thermique, etc.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **D. Kimbakala** « Modelisation dynamique des decharges se propageant sur des surfaces isolentes pollues avec des depots discontinus sous differentes forms de tension » these Doctorat, L'école central de Lyon 2007.
- [2] **F. Amidi, K. Ouerdane**, « Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30kV en régions littorales », Projet de Fin d'Etude, Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, juin 1998.
- [3] **S. Tounsi, F. chikh** « influence du sol sur comportement d'un modèle d'isolateur sous tension » these d'ingenieur d'etet en electrotechnique.ENP departemant de genie electrique Laboratoire de haute tension 2008.
- [4] **A. Mekhaldi**, « Etude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz », Thèses de Doctorat, ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Septembre 1999.
- [5] **D. Namane**, « Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateur de haute tension, sous la fréquence 50Hz », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie, Algérie, Février 1998.
- [6] **M. Tegar**, « Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Électriques sur des Isolateurs Installés en Régions Polluées », Thèse de Magister ENP, Juillet 1993.
- [7] **M.D. Mahi**, "Dynamique de l'Allongement sue une Surface Faiblement Conductrice d'une Décharge Electrique Alimentée en Courant Alternatif", Thèse es-Sciences de l'es de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1986.
- [8] **T.Guia** «comportement d'un isolateur sous tension impulsionnelle»mémoire de magister ,ENP laboratoire haute tension 2005.
- [9] **N. Dhahbi – Megriche, A. Beroual and L. Krahenbuhl**, "A New Proposal Model for Polluted Insulators Flashover", Journal of Physics D: Appl. Phys. (30), nr. 5, pp. 889-894, March 1997.
- [10] **N. Dhahbi** "Modelisation dynamique des decharges sur des surfaces d'isolateurs pollues sous differentes forms de tension:Elaboration d'un critère analytique de propagation" these Doctorat, L'école central de Lyon 1998.
- [11] **P.S. Ghosh, S. Chacravorti and N. Chatterjee**, « Estimation of Time to Flashover Characteristics of Contaminated Electrolytic Surfaces Using a Neural Network », IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul., Vol. 2, nr. 6, pp. 1064-1076, December 1995.
- [12] **P.S. Ghosh and N. Chatterjee**, « Polluted and Insulator Flashover Model for AC. Voltage », IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul., Vol. 2, nr.1, pp. 128-136, February 1995.

- [13] **P. Claverie**, « Predetermination of the Behaviour of Polluted Insulators », IEEE Trans. PAS, Vol. 90, N°. 4, pp. 1902 - 1908, Juillet 1971.
- [14] **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.
- [15] **J. Danis**, « A Stochastic Pollution Flashover Model », 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 - 12, September 5 – 9, 1983, Athènes, Grèce.
- [16] **M. Salama** «Etude expérimentale et modélisation de l'influence de la constitution chimique et de repartition de la pollution sur le contournement des isolateurs haute tension» thèse Doctorat, L'école central de Lyon 2011.
- [17] **R. Wilkins, A. A. J. Al-Baghdadi**, « Arc Propagation along an Electrolyte Surface », Proc. IEE, Vol. 118, No . 12, pp. 1886 – 1892, December 1971.
- [18] **A. M. Rahal, C. Huraux**, « Flashover of High Voltage Insulators », IEEE Trans., Vol. Pas - 98, N°. 6, pp. 2223 - 2231, 1979.
- [19] **S. Anjana, C. S. Lakshminarasmha**, « Computed of Flashover Voltages of Polluted Insulators using Dynamic Arc Model », 6th International Symposium on high voltage Engineering, paper 30-09, New Orleans, USA, 1990.
- [20] **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.
- [21] **N. Dhahbi – Megriche, A. Beroual**, « Evaluation of Polluted Insulators Flashover Voltage for Different Waveforms Using an Equivalent Electrical Network Model », 11th International Symposium on High Voltage Engineering, Conference Publication No. 467, IEE, Vol. 4, sec. P2, pp 377-380, August 22-27, London, UK, 1999.
- [22] **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.
- [23] **M. D. Mahi**, “ Dynamique de l'allongement sur une surface faiblement conductrice d'une décharge électrique alimentée en courant alternatif “, Thèse des sciences de l'université Paul Sebatier, 1986.
- [24] **D. Namane, A. Mekhaldi, S. Bouazabia**, "Influence de la Largeur de la Couche de Pollution sur le Courant de Fuite des Isolateurs", Deuxième Conférence Nationale sur la Haute Tension, Tizi - Ouzou, Algérie, 17 - 19 Novembre 1997.

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DE DIPLOME**  
**DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE**  
**SPECIALITE RESEAUX ELECTRIQUES**

**Proposé et dirigé par : Mr. RAHALI Hilel**

**Présenté par : TAHRI Tawfiq**

**Thème :**

**ÉLABORATION D'UN MODELE DYNAMIQUE DE CONTOURNEMENT  
D'UN ISOLATEUR POLLUE SOUS TENSION ALTERNATIVE**

**Résumé :**

Le travail proposé dans ce mémoire présente un modèle dynamique permettant de prédire le comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative. Se basant sur un circuit électrique équivalent et utilisant des lois physiques, ce modèle permet d'évaluer plusieurs paramètres 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. Les résultats de simulation ainsi obtenus sont discutés par rapport à ceux obtenus par d'autres auteurs.

**Mots clés :** isolateur – pollution – contournement – modèle statique – modèle dynamique – propagation.

**Numéro d'ordre :** REs - 225