

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 GÉNIE ÉLECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME  
DE MASTER EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

**OPTION : RÉSEAUX ÉLECTRIQUES**

**THEME**

---

**Élaboration d'un Modèle Dynamique de  
Contournement d'un Isolateur Pollué sous une Tension  
Impulsionnelle**

---

**Présenté par :**

**BENKHELIL Mohammed El- Maâmoun**

**Proposé et dirigé par :**

**Mr. RAHALI Hilal**

**Année Universitaire : 2015/2016**

**N° d'ordre : REs - 226**

Résumé

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DE DIPLOME  
DE MASTER EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

SPECIALITE : **RÉSEAUX ÉLECTRIQUES**

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

Présenté par : **BENKHELIL Mohammed El- Maâmoun.**

**Thème :**

**Élaboration d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous une tension impulsionnelle.**

**Résumé :**

Ce travail présente un modèle dynamique 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, son courant, son rayon, sa longueur et sa résistivité), de la vitesse instantanée de propagation et le champ dans la pollution et celui à l'intérieur 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 dynamique – arc électrique – courant de la décharge – propagation – tension impulsionnelle.

**N° d'ordre :** REs - 226

## Remerciements

*Pour commencer je tiens à remercier الله pour m'avoir donné le courage et la patience. Si Dieu ne m'avait pas facilité et accompagné dans l'élaboration de ce travail, celui-ci n'aurait pas pu aboutir. Ainsi que mes parents qui m'ont soutenu tout au long de cette année.*

*Je remercie également toute l'équipe pédagogique de la faculté de génie électrique pour avoir assuré ma formation durant ces années.*

*Et enfin je remercie Monsieur RAHALI Hilal pour ses nombreux conseils, sa disponibilité, ses encouragements pour l'élaboration de ce travail de synthèse lors des différentes entrevues, et je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à Monsieur M.TEGUAR, Professeur à l'école National Polytechnique, pour son aide, pour leurs précieuses directives, leur disponibilité, et leurs qualités humaines.*

*Que toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail accepte nos sincères remerciements.*

*BENKHELIL. Mohammed El-Maamoun*



# Sommaire

---

## Sommaire

Liste des figures	
Liste des abréviations et des symboles	
Introduction générale.....	1

---

### *CHAPITRE I*

---

#### *Généralités sur les isolateurs de haute tension et phénomène de pollution*

I.1. Introduction.....	3
I.2. Définitions.....	3
I.2.1. Les isolateurs.....	3
I.2.2. Profil de l'isolateur.....	4
I.3. Principaux types d'isolateurs.....	5
I.3.1. Isolateurs de type rigide.....	5
I.3.2. Chaîne d'isolateurs.....	5
I.3.2.1. Isolateurs capot et tige.....	6
I.3.2.2. Isolateur à long fût.....	7
I.4. Pollution des isolateurs.....	7
I.4.1. Formation et répartition des couches polluantes.....	7
I.4.2. Sources de pollution.....	8
I.4.2.1. Pollution naturelle.....	8
I.4.2.1.1. Pollution marine.....	8
I.4.2.1.2. Pollution désertique.....	8
I.4.2.2. Pollution industrielle.....	8
I.4.2.3. Pollution mixte.....	8
I.4.3. Conséquences de la pollution.....	9
I.4.3.1. Arc non localisé.....	9
I.4.3.2. Arc permanent.....	9
I.4.4. Techniques de lutte contre la pollution.....	10
I.4.4.1. Allongement de la ligne de fuite.....	10
I.4.4.2. Isolateurs plats.....	10
I.4.4.3. Graissage périodique.....	10
I.4.4.4. Revêtement silicone.....	10
I.4.4.5. Les isolateurs composites.....	10
I.4.4.6. Nettoyage des isolateurs.....	10

I.5. Phénomène de contournement des isolateurs pollués.....	13
I.5.1. Contournement.....	13
I.5.2. Définition.....	13
I.5.3. Déroulement du contournement.....	13
I.5.3.1. Contrainte de contournement.....	15
I.5.3.2. Tension de contournement.....	15
I.5.3.3. Tension de tenue.....	15
I.5.3.4. Courant de fuite.....	15
I.5.3.5. Courant de fuite critique.....	15
I.5.3.6. Longueur critique de l'arc.....	15
I.5.3.6. Diamètre de la décharge.....	16
I.6. Conclusion.....	16

---

## **CHAPITER II**

---

### ***Modèles Statiques et dynamique de contournement***

II.1. Introduction.....	18
II.2. Principaux modèles statiques de contournement.....	18
II.2.1. Modèle de base.....	18
II.2.1.1. Modèles de l'arc.....	19
II.2.1.1.1. Equation d'Ayrton.....	19
II.2.1.1.2. équation de Cassie-Francis et Mayr.....	19
II.2.2. Modèles dynamiques.....	19
II.2.2.1. Modèle d'Obenaus.....	19
II.2.2.2. Modèle de Neumarker.....	21
II.2.2.3. Modèles de Tegar.....	21
II.2.2.3.1. Cas de pollution continue.....	22
II.2.2.3.2. Cas de pollution discontinue.....	23
II.2.2.4. Modèle de Rizk.....	24
II.2.2.5. Modèle de Wilkins.....	24
II.2.2.6. Modèle de Zhicheng et Renyu.....	25
II.2.2.7. Modèle de Dhahbi et Béréal.....	26
II.2.2.8. Modèle de Danis.....	27
II.2.2.9. Modèle de D. Namane.....	29
II.3. Principaux modèles dynamique de contournement.....	30

II.3.1. Mécanisme de propagation.....	31
II.3.1.1. Propagation par ionisation.....	31
II.3.1.2. Propagation par force électrostatique.....	31
II.3.2. Critères de propagation de la décharge.....	32
II.3.2.1. Critère de Hampton.....	32
II.3.2.2. Critère de Hesketh.....	32
II.3.2.3. Critère de Wilkins.....	33
II.3.2.4. Critère d'Anjana et Lakshminarasimha.....	33
II.3.3. Modèles dynamiques.....	33
II.3.3.1. Modèle d'Anjana et Lakshminarasimha.....	33
II.3.3.2. Modèle de Dhahbi et Beroual.....	34
II.3.3.3. Modèle de Rizk et Nguyen.....	35
II.3.3.4. Modèle de Sundararajan et Gorur.....	36
II.4. Conclusion.....	36

---

### **CHAPITRE III**

---

#### ***Conception du modèle dynamique***

III.1. Introduction.....	37
III.2. Conception du modèle dynamique.....	37
III.2.1. Circuit électrique équivalent.....	37
III.2.2.1. Propagation de la décharge.....	38
III.2.2.1.1. Initialisation de la décharge.....	38
III.2.2.1.2. Critère de propagation.....	38
III.2.2.1.3. Circuit de propagation.....	39
III.2.2.2. Paramètres du circuit électrique.....	39
III.2.2.2.1. Equation du circuit.....	39
III.2.2.2.2. Résistance de la couche de pollution.....	40
III.2.2.2.3. Caractéristiques de l'arc.....	40
III.2.2.2.3.1. Chute de tension aux bornes de l'arc.....	40
III.2.2.2.3.2. Résistance de l'arc.....	41
III.2.2.2.3.3. Rayon de l'arc.....	41
III.2.2.2.3.4. Résistivité de l'arc.....	41
III.2.2.2.3.5. Puissance dissipée dans l'arc.....	42
III.2.2.2.4. Vitesse de propagation.....	42

III.2.3. Organigramme de calcul.....	42
III.3. Conclusion.....	45

---



---

## **CHAPITER IV**

---



---

### ***Résultats et interprétation***

IV.1. Introduction.....	46
IV.2. Génération d'ondes de choc.....	46
IV.2.1. Description.....	46
IV.2.2. Onde impulsionnelle.....	46
IV.3. Validations.....	48
IV.3.1. Validation basée sur le courant.....	48
IV.4. Application.....	50
IV.4.1. Vitesse de propagation en fonction du temps.....	50
IV.4.2. Tension de l'arc en fonction du temps .....	51
IV.4.3. Courant de la décharge en fonction du temps .....	52
IV.4.4. Longueur de la décharge en fonction du temps .....	53
IV.4.5. Puissance et énergie transférées dans l'arc en fonction du temps .....	54
IV.4.6. Résistance de l'arc en fonction du temps .....	55
IV.4.7. Relation courant et rayon de l'arc – la longueur de l'arc .....	56
IV.4.8. Relation résistance de l'arc – la longueur de l'arc.....	57
IV.5. Conclusion.....	57
Conclusion générale.....	59
Références bibliographiques.	
Résumé.	

## *Liste des figures et les tableaux*

### Chapitre I

<b>Figure I.1</b> forme d'un isolateur.....	3
<b>Figure I.2</b> Exemple de profil réel d'un isolateur.....	4
<b>Figure I.3</b> Isolateur rigide.....	5
<b>Figure I.4</b> Isolateur rigide (MT).....	5
<b>Figure I.5</b> Assemblage à rotule.....	6
<b>Figure I.6</b> Isolateur capot et tige.....	6
<b>Figure I.7</b> Isolateur à long fût.....	7
<b>Figure I.8</b> Sources de pollution (image réel).....	9
<b>Figure I.9</b> Techniques de lutte contre la pollution (image réel).....	11
<b>Figure I.10</b> Contournement d'isolateur.....	13
<b>Figure I.11</b> Déroulement du contournement.....	14
<b>Figure I.12</b> Phénomène de contournement (image réel).....	14

### Chapitre II

<b>Figure II.1</b> Modèle d'Obenaus.....	20
<b>Figure II.2.</b> Modèle de Tegar.....	22
<b>Figure II.3</b> Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire.....	23
<b>Figure II.4</b> Modèle de Wilkins.....	25
<b>Figure II.5</b> Modèle de Zhicheng et Renyu.....	25
<b>Figure II.6</b> Schéma d'un isolateur pollué et son modèle électrique équivalent.....	27
<b>Figure II.7</b> Modèle de Danis.....	29
<b>Figure II.8</b> Modèle expérimental selon D.Namane.....	30
<b>Figure II.9</b> Mécanisme de propagation par ionisation proposé par Wilkins.....	31
<b>Figure II.10</b> Mécanisme de propagation par force électrostatique.....	32
<b>Figure II.11</b> Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge selon Dhahbi et Al... ..	35

### Liste des tableaux

<b>Tableau II.1</b> Constantes caractéristiques statiques de l'arc selon Ghosh et Al.....	20
---	----

**Chapitre III**

**Figure III.1** Circuit électrique équivalent de base..... 38

**Figure III.2** Circuit électrique équivalent à la propagation de la décharge..... 39

**Figure III.3** Organigramme du modèle dynamique..... 44

**Chapitre IV**

**Figure IV.1** Schéma équivalent du générateur de Marx..... 47

**Figure IV.2** Forme d'une onde impulsionnelle..... 48

**Figure IV.3** Forme de courant présentée par Matsuo et al..... 49

**Figure IV.4** Courant de la décharge en fonction du temps, cas d'un isolateur de longueur..... 49  
de fuite *10cm*, de largeur *1cm*, de résistance linéique *380Ω/cm*  
et une onde de *10/800μs*.

**Figure IV.5** Vitesse de propagation comparée à 347m/s en fonction du temps..... 50

**Figure IV.6** Tension de l'arc en fonction du temps..... 51

**Figure IV.7** Courant de la décharge en fonction du temps..... 52

**Figure IV.8** Longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite en fonction du temps..... 53

**Figure IV.9** Puissance dissipée dans l'arc en fonction du temps..... 54

**Figure IV.10** Energie dissipée dans l'arc en fonction du temps..... 54

**Figure IV.11** Résistance de l'arc en fonction du temps..... 55

**Figure IV.12** Courant de la décharge en fonction de la longueur de la décharge comparée..... 56  
à la ligne de fuite.

**Figure IV.13** Rayon de la décharge en fonction de la longueur de la décharge comparée..... 56  
à la ligne de fuite.

**Figure IV.14** Résistance de la décharge en fonction de la longueur de la décharge comparée..... 57  
à la ligne de fuite.

## Liste des abréviations et des symboles

$w_r$	La largeur de la rainure.
$d_r$	Sa hauteur de la rainure.
$r_r$	La distance qui sépare la rainure et l'axe de symétrie de l'isolateur.
$d_d$	Le diamètre de la décharge dépend de la polarité de la tension et du courant.
$a_p$ et $b_p$	Les constantes dépendant de la polarité appliquée à l'électrode haute tension.
$U$	Tension appliquée.
$V_e$	Chute de tension totale aux bornes des électrodes.
$V_{arc}$	Tension de l'arc.
$i$	Courant de fuite.
$i_{arc}$	Courant de la décharge.
$I_c$	Courant d'arc critique.
$I_d$	Courant dans la décharge.
$A$ et $n$	Les constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc.
$x$	Longueur de l'arc.
$R_p$ et $R_{pi}$	Résistance de la couche de pollution.
$r_p$	Résistance de pollution linéique.
$r_d$	Rayon du pied de la décharge.
$x_c$	Longueur d'arc critique.
$U_c$	Tension critique.
$U_{cn}$	La tension de contournement.
$Y$ ou $Y'$	La longueur de la partie fortement conductrice.
$Z$ ou $Z'$	La longueur de la partie faiblement conductrice.
$L_f$	Longueur de la ligne de fuite.
$l_i$	Longueur de la pollution.
$b$	Largeur de la couche de pollution.
$b_w$	Largeur de l'isolateur.
$K_r$	Rapport entre la longueur de l'arc et la ligne de fuite.
$K_t$	Nombre des couches de pollution en série.
$f$	Facteur de forme.
$\sigma_s$ et $\gamma_p$	La conductivité superficielle de la couche polluante.
$\sigma_e$	Conductivité superficielle effective.
$\rho$ , $\rho_d$ et $\rho_{arc}$	Résistivité volumique de la couche de pollution.
$\mathcal{E}$	Permittivité.

---

$S_p$	Section de la couche polluée.
$E_{arc}$	Champ à l'intérieur de l'arc.
$E_p$	Champ dans la colonne d'eau.
$W_{Totale}$	L'énergie totale fournie.
$W_{Th}$	L'énergie nécessaire pour maintenir l'arc à sa température.
$T$	Température de l'arc.
$M$	Nombre de particules neutres dans l'arc.
$K$	Constante de boltzman.
$P_0$	Les pertes par unité de longueur (constantes).
$dt$	L'incrémentement de la longueur de la décharge.
$V$	Vitesse de propagation de la décharge.
$\mu$	Mobilité des électrique dans l'arc.
$C_p$	Capacité de la couche de pollution.
$R_i$	Résistance de l'arc.
$C_i$	Capacité de la décharge.
$L_i$	L'inductance de la décharge.
$U_i$	Tension correspondant à chaque cellule nouvellement créés.
$\tau$	Constant de temps de l'arc.
$u_{arc}$	La tension de la décharge,
$r_{iso}$	Le rayon effectif de l'isolateur.
$r$	Le rayon de la décharge.
$du_m$	Le pas d'incrémentement de l'amplitude de la tension.
$dt$	Le pas d'incrémentement du temps.
$t_p$	La durée de queue à mi- amplitude de la tension impulsionnelle.
$T_1$	La durée conventionnelle de front.
$T_2$	La durée de queue à mi- amplitude.
$T_{90}$ et $T_{30}$	Le temps au bout duquel l'impulsion atteint 90% de sa valeur crête $U_m$ et $T_{30}$ celui correspondant à 30% $U_m$ .
$T_1$ et $T_2$	étant exprimé en $\mu s$ .
$T_a$ , $T_b$ , et $T_{cr}$	sont respectivement le temps de montée, le temps à mi- amplitude, le temps crête.
$u_t$	un facteur amplitude.
$R_c$ et $C_c$	Les éléments contrôlent le front.
$R_g$ et $C_g$	La queue de l'onde.

---



# Introduction générale

## *Introduction générale*

De nos jours, l'énergie électrique joue un rôle très important dans le développement et l'évolution de l'industrie et l'économie des pays. De ce fait, il faut assurer, à tout instant, un bon équilibre entre la demande croissante et la production de l'énergie. C'est pour cela, qu'une très grande part d'importance est attachée aux réseaux électriques de distribution, principalement aux lignes de haute tension. Ces lignes peuvent parcourir des centaines de kilomètres et donc traverser des régions très différentes par leur climat, leur industrialisation, leur localisation géographique, etc. Par conséquent, les systèmes d'isolation du réseau sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution qui se dépose sur les surfaces d'isolateurs.

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 [1] à cerner qui interviennent simultanément dans la génération et la propagation des décharges électriques.

L'humidification de la couche polluante facilite en fait, la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique. Cette dernière engendre la naissance d'un courant de fuite, qui par effet joule, provoque des échauffements locaux et par la suite l'assèchement de la couche de pollution [2]. La répartition du potentiel entre électrode est alors changée. Ainsi, une partie importante de la tension appliquée se trouve rapportée sur la bande sèche engendrant, si le champ local dépasse un certain seuil, un claquage diélectrique et l'établissement d'une décharge électrique. Dans certaines conditions, cette décharge peut s'allonger jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur. Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension. Une des caractéristiques principales d'un isolateur de haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est placé.

Pendant son fonctionnement, un système d'isolation peut subir des surtensions accidentelles. Celles-ci sont d'origine atmosphérique (la foudre) ou de manœuvres (ouverture d'un disjoncteur). Cependant, comme il est difficile de reproduire ces formes d'ondes au laboratoire pour tester et dimensionner l'appareillage, on a recours, par conséquent, à des formes simples – bi-exponentielle – produites par des générateurs d'impulsions types multiplicateurs de Marx [2].

Le présent travail porte sur l'étude de l'effet de la pollution discontinue sur le comportement d'un modèle expérimental, sous tension impulsionnelle. En se basant sur un circuit électrique équivalent et utilisant des lois physiques, notre modèle permet la détermination des différentes caractéristiques décrivant la dynamique de la décharge. Pour cela nous avons structuré notre travail en quatre chapitres distincts.

Les travaux ont été répartis ainsi :

Le premier chapitre parle sur les différents types d'isolateurs et le déroulement du contournement et les différents types de pollutions.

Dans le deuxième chapitre, nous citerons les principaux modèles de contournement rencontrés dans la littérature. Nous précisons leur caractère dynamique, leur aspect empirique, semi empirique ou analytique, ainsi que les facteurs d'influence qu'ils traitent, ainsi que les critères de propagation des décharges électriques.

Un modèle dynamique, permettant de prédire le comportement d'un isolateur pollué sous tension impulsionnelle, sera élaboré dans le troisième chapitre. Ce modèle utilise un critère de propagation de Hampton et se base sur un circuit électrique équivalent. Il permet de calculer la tension de contournement des isolateurs et de décrire la dynamique de l'arc.

Finalement, dans le quatrième chapitre. Nous comparerons certains de nos résultats de simulation avec ceux obtenus par d'autres chercheurs.



---

# Chapitre I

*Généralités sur les isolateurs  
de haute tension et  
phénomène de pollution*

---



## I.1. Introduction

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

## I.2. Définitions

L'isolateur est un composant électrotechnique que 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.

### I.2.1. Les isolateurs

L'isolateur est formé par un isolant auquel sont fixés deux pièces métalliques M1 et M2.

**Isolant :** Verre, céramique, matériaux synthétiques. **M1** se fixe au pylône ; **M2** porte le conducteur.

**Rôle :** l'isolateur possède un double rôle

- Rôle mécanique : Porte le conducteur
- Rôle électrique : isole le conducteur par rapport au pylône

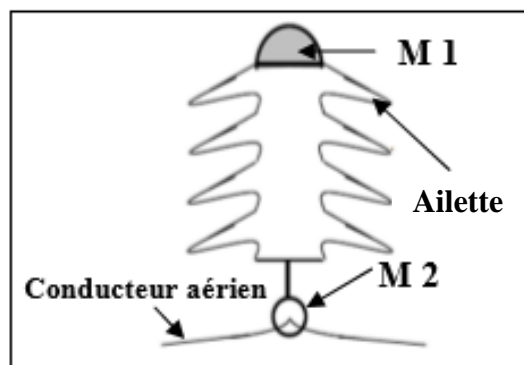


Figure I.1 forme d'un isolateur.[3, 4]

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison entre des conducteurs HT et la terre.

- 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). [3,4]

## I.2.2. Profil de l'isolateur

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

1. Une longueur de fuite maximale
2. Un nombre optimum de nervures (pour une taille donnée de l'isolateur) qui permet d'avoir une tension de contournement plus élevée.
3. Une géométrie de l'isolateur permettant le nettoyage naturel de l'isolateur par le vent ou par la pluie.
4. Des diamètres de l'isolateur différents assurant une contamination non-uniforme et donc des tensions de contournement plus élevées.

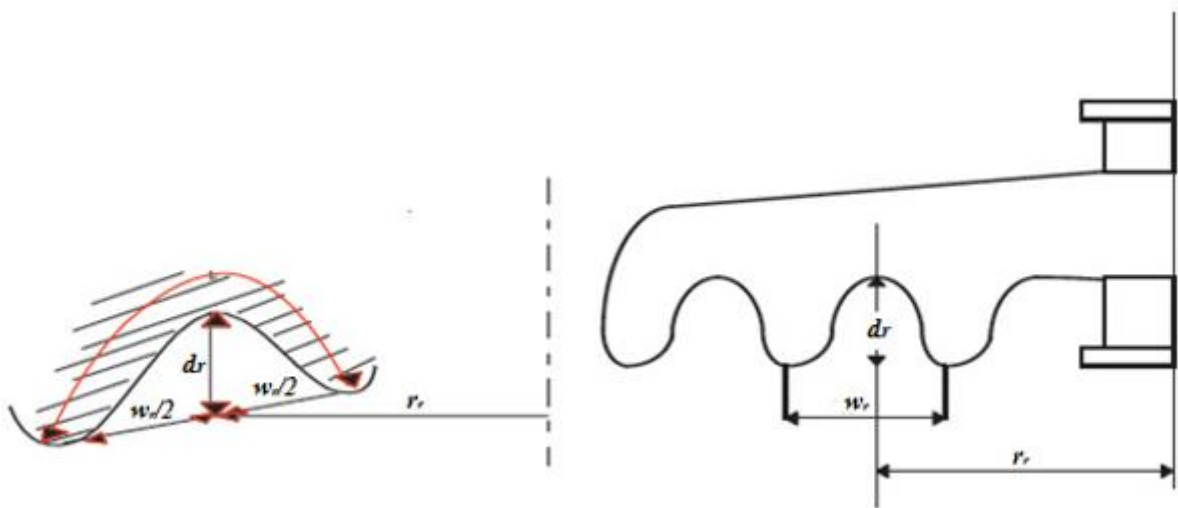


Figure I.2 Exemple de profil réel d'un isolateur. [5]

Avec :

$w_r$  : la largeur de la rainure en cm.

$d_r$  : sa hauteur en cm.

$r_r$  : la distance qui sépare la rainure et l'axe de symétrie de l'isolateur en cm.

## I.3. Principaux types d'isolateurs

Il y a deux principaux types d'isolateurs : les isolateurs de type rigide et les éléments de chaîne.

### I.3.1. Isolateurs de type rigide

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés entre eux, ils sont fixés aux pylônes par des ferrures de différentes formes (Figure I.3). Il sont montés sur pylônes soit d'une façon verticale, horizontale ou oblique (inclinée). Mais ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de **60 kv** [6].



Figure I.3 Isolateur rigide.

La céramique et verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides. [4]

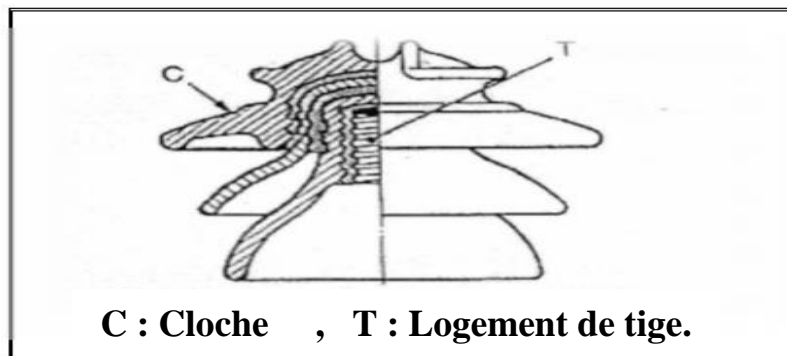


Figure I.4 Isolateur rigide (MT).

### I.3.2. Chaîne d'isolateurs

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, 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 horizontales (chaînes d'ancrages). Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne. [4]

- L'isolateur capot et tige.
- L'isolateur long fut.

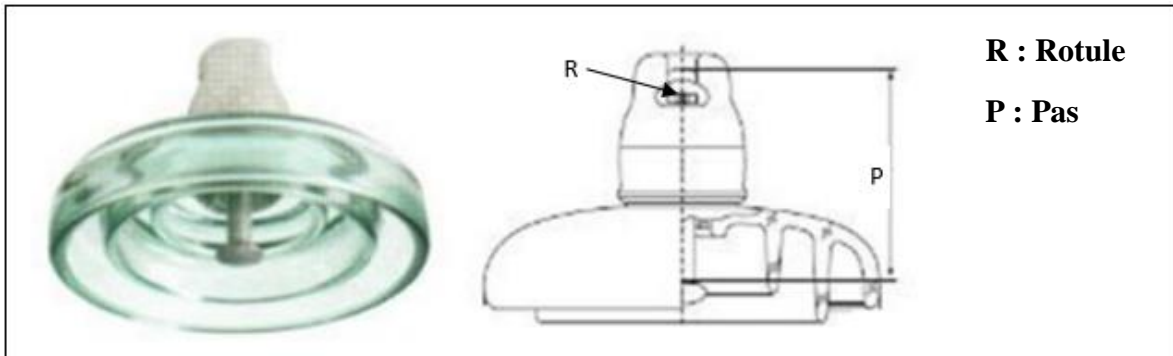


Figure I.5 Assemblage à rotule.

### I.3.2.1. Isolateurs capot et tige

L'isolateur capot et 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 dans le capot de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille. L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique. [7]

La coupe de l'isolateur capot-tige est schématisée à la figure.



Figure I.6 Isolateur capot et tige.

- A : le capot.
- B : le diélectrique (verre trempé ou céramique).
- D : le ciment de fixation.
- C : la tige.
- L : plus courte distance dans l'air entre le capot et la tige.
- $\epsilon$  : longueur du canal de perforation,  $\epsilon \ll L/2$ .

### I.3.2.2. Isolateur à long fût

Il est constitué d'un cylindre plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes (Fig. I.7). A chaque extrémité est fixée une pièce métallique de liaison. Celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le cylindre, 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.

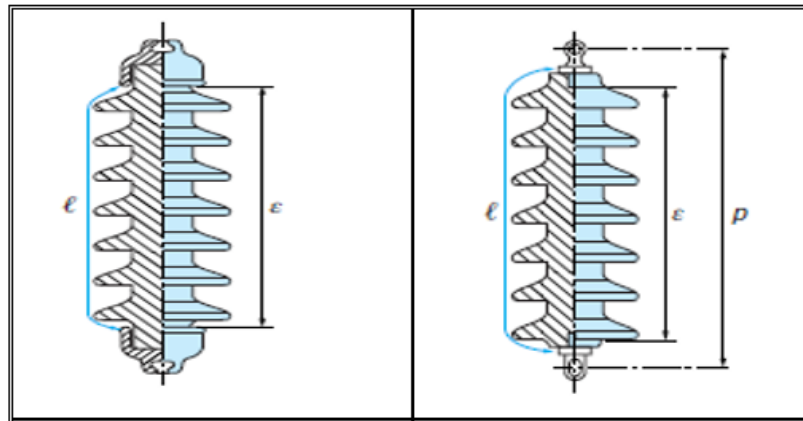


Figure I.7 Isolateur à long fût.

## I.4. Pollution des isolateurs

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème sur l'isolement des ouvrages de haute tension, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de haute tension. Ceci est dû à la formation de couches plus ou moins conductrices sur la surface des isolateurs. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle des surfaces des isolants et par suite la diminution de la tension de tenue des isolateurs.

### I.4.1. Formation et répartition des couches polluantes

Suite à l'écoulement d'un air transportant des poussières diverses, une couche de pollution se forme à la surface des isolateurs. 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 du degré de pollution du site où est situé l'isolateur.

Plusieurs travaux d'observation [8, 9] ont montré qu'il existe toujours une distinction nette entre les couches formées à la surface supérieure et celles formées à la surface inférieure d'un isolateur soumis à la pollution naturelle. Cela veut dire que la répartition de la pollution le long de l'isolateur est très peu uniforme ; le vent, par exemple, impose des orientations préférentielles pour les dépôts.

La pluie qui lave périodiquement les surfaces exposées est un autre facteur de non-uniformité puisque les parties arbitrées de l'isolateur ne sont jamais lavées. Cette répartition dépend [10] :

- du profil de l'isolateur,
- de la position de l'isolateur,
- du niveau de tension appliqué.

## I.4.2. Sources de pollution

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

### I.4.2.1. Pollution naturelle

La pollution naturelle provient :

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

#### I.4.2.1.1. 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 (Fig. I.8.b), 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.

#### I.4.2.1.2. 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 (Fig. I.8.a). 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.

### I.4.2.2. 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, et/ou 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.

### I.4.2.3. 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.

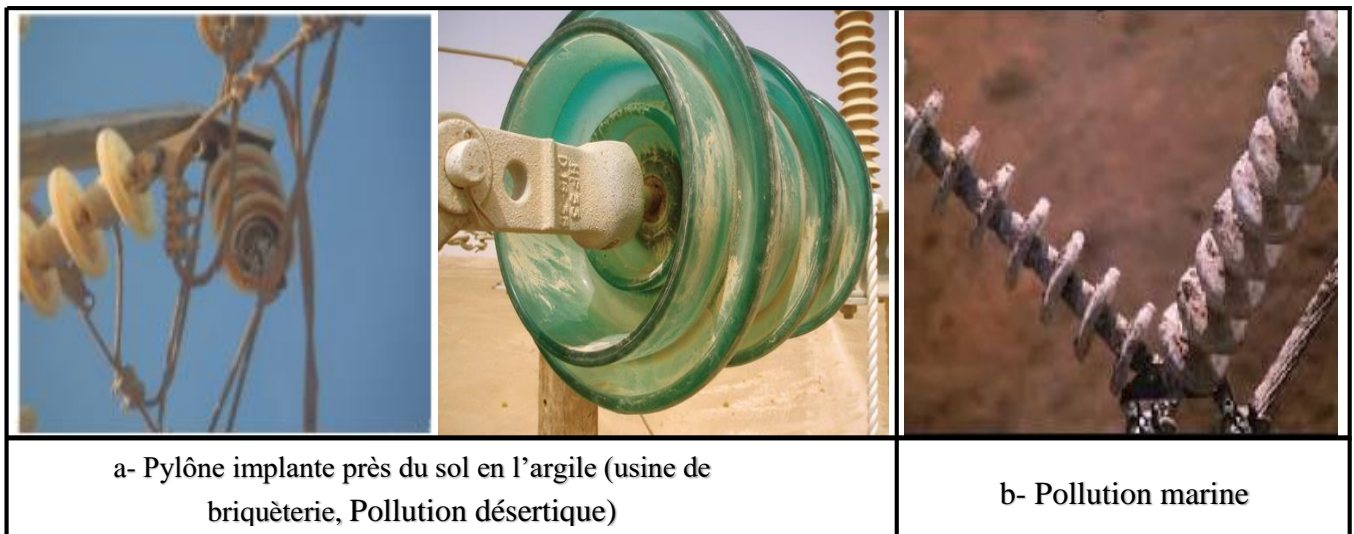


Figure I.8 Sources de pollution (image réel).

### I.4.3. Conséquences de la pollution

Lorsque l'isolateur est propre ou recouvert d'une couche de pollution sèche, un très faible courant capacitif circule à sa surface. Ceci est dû aux très faibles valeurs des conductivités volumiques de l'air, de l'isolant solide et de la couche de pollution. On obtient ainsi une répartition électrostatique du potentiel électrique. Par contre, lorsque la couche de pollution est humidifiée, elle devient le siège d'un courant de conduction de valeur relativement importante et la répartition du potentiel électrique diffère de la répartition électrostatique.

La rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite. Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur [10, 11].

#### I.4.3.1. 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 d'un courant de fuite intermittent entraînant une perte d'énergie relativement faible et généralement supportable par l'installation [11].

#### I.4.3.2. Arc permanent

L'arc électrique se fixe à la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en se réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant [11].

## I.4.4. Techniques 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.

### I.4.4.1. 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 la ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existents [2].

Le nombre de disques en verre par chaîne d'isolateurs indique la tension transportée par les lignes de distribution électrique.

### I.4.4.2. Isolateurs plats

Les isolateurs (Fig. I.9.d-e) sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'autonettoyant très bien sous l'effet du vent [2].

### I.4.4.3. Graissage périodique

Par mesure économique, seuls les isolateurs de postes sont concernés. On utilise des graisses silicones. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs [2].

### I.4.4.4. Revêtement silicone

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs (Fig. I.9.f). Ce revêtement protège les isolateurs et améliore leurs tenues sous pollution.

### I.4.4.5. Les isolateurs composites

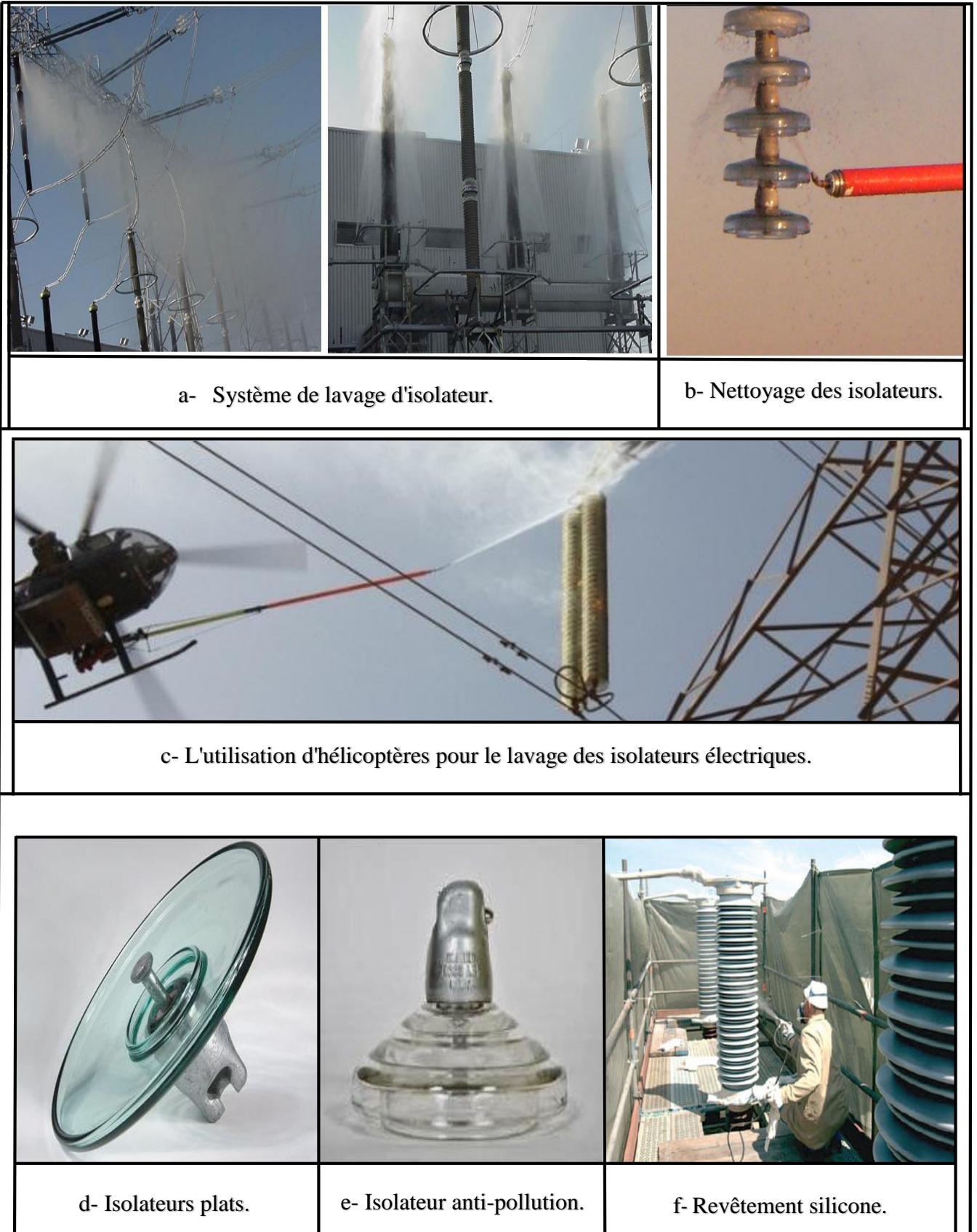
Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes (Fig. I.9.g) et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère voient leurs caractéristiques changer au cours du temps ; ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service.

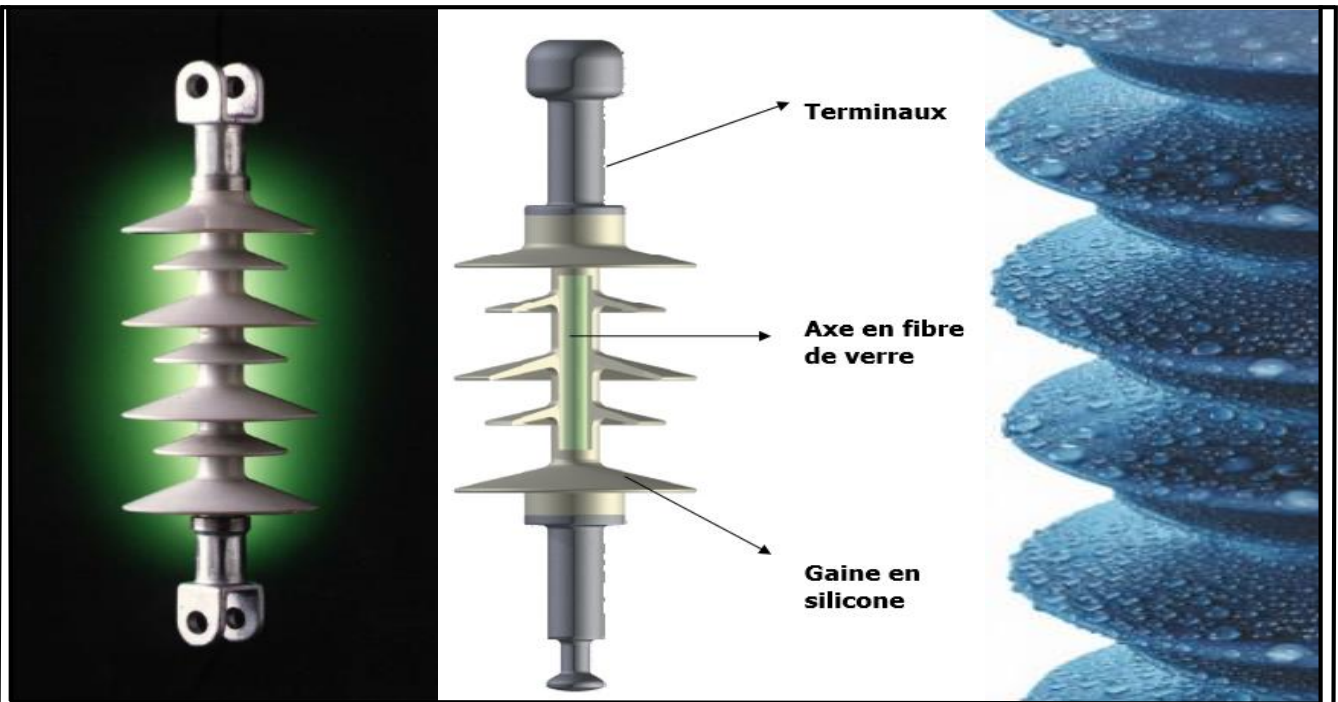
### I.4.4.6. Nettoyage des isolateurs

Le nettoyage (Fig. I.9.a-b-c) manuel et le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde. Néanmoins, l'application de ces méthodes pose des problèmes majeurs à cause des interruptions de service, parfois assez longues. Pour éviter ces coupures, un lavage sous tension des

isolateurs est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau du lavage, le processus du lavage et les distances de sécurité, et ce afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

Ceci est représenté par ces illustrations :





g- Les isolators composites : ce modèle se caractérise de sa forte isolation qui empêche l'eau de créer des couches avec la pollution sur l'isolateur, ce qui limite l'influence de la pollution sur ces isolants, il se caractérise aussi de son poids qui est plus léger par rapport aux autres isolants



h- Graissage périodique

Figure I.9 Techniques de lutte contre la pollution (image réel).

## I.5. Phénomène de contournement des isolateurs pollués

### I.5.1. Contournement

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, et suite à l'interaction entre, l'air transportant des grains de poussières et l'isolateur, une couche étrangère se dépose sur les surfaces de celui-ci. Une fois cette couche humidifiée, la tension de tenue peut diminuer considérablement, provoquant des incidents très graves. [3]

### I.5.2. Définition

On dit que le contournement se produit sur la surface de l'isolateur lorsqu'une décharge électrique s'établit entre ses extrémités et contourne la surface de l'isolateur. Le contournement provoque l'ouverture du disjoncteur, car il établit un court-circuit entre le conducteur et le pylône (défaut monophasé à la terre). Le contournement cause habituellement l'interruption momentanée de l'écoulement de l'énergie dans le réseau. De telles interruptions, bien qu'étant nocives, peuvent être tolérées dans des endroits ruraux. Dans des secteurs urbains avec les industries de pointe (domaines pharmaceutiques, production de véhicules...) les interruptions ne sont pas acceptables parce qu'elles mènent à d'énormes pertes financières de production, de machines bloquées et des pertes de contrôle du cycle du processus. Par exemple, aux USA une interruption de 0,25 s dans une usine à papier peut provoquer des pertes de 100 000 dollars. [3]

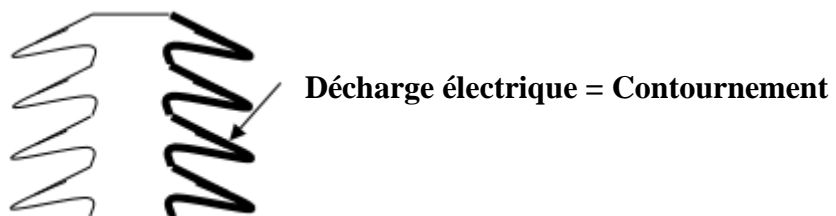


Figure I.10 Contournement d'isolateur.

### I.5.3. Déroulement du contournement

**Phase 1 :** dépôt de pollution Des grains de pollution se déposent sur la surface de l'isolateur (Fig. a).

**Phase 2 :** Formation d'un électrolyte conducteur A sec, la résistance superficielle reste élevée malgré le dépôt de pollution. Quand la couche de pollution devient humide (brouillard, humidité, rosée du matin, pluie fine...), elle se transforme en électrolyte conducteur et donne naissance à un courant de fuite superficiel  $I_f$  circulant sur la surface de l'isolateur (Fig. b).

**Phase 3 :** formation d'une bande sèche Dans les régions étroites de l'isolateur, où la densité de courant est élevée, une partie de l'électrolyte s'évapore et crée une bande sèche (Fig. c).

**Phase 4 :** contournement Comme la résistance de la bande sèche est beaucoup plus grande par rapport au reste de l'électrolyte, pratiquement toute la tension aux bornes de l'isolateur est maintenant appliquée aux extrémités de cette zone. Il se produit alors un claquage dans la bande sèche :

- Soit la décharge s'éteint  $\Rightarrow$  pas de contournement (Fig. d).
- Soit la décharge progresse sur la surface  $\Rightarrow$  contournement de l'isolateur (Fig. e).

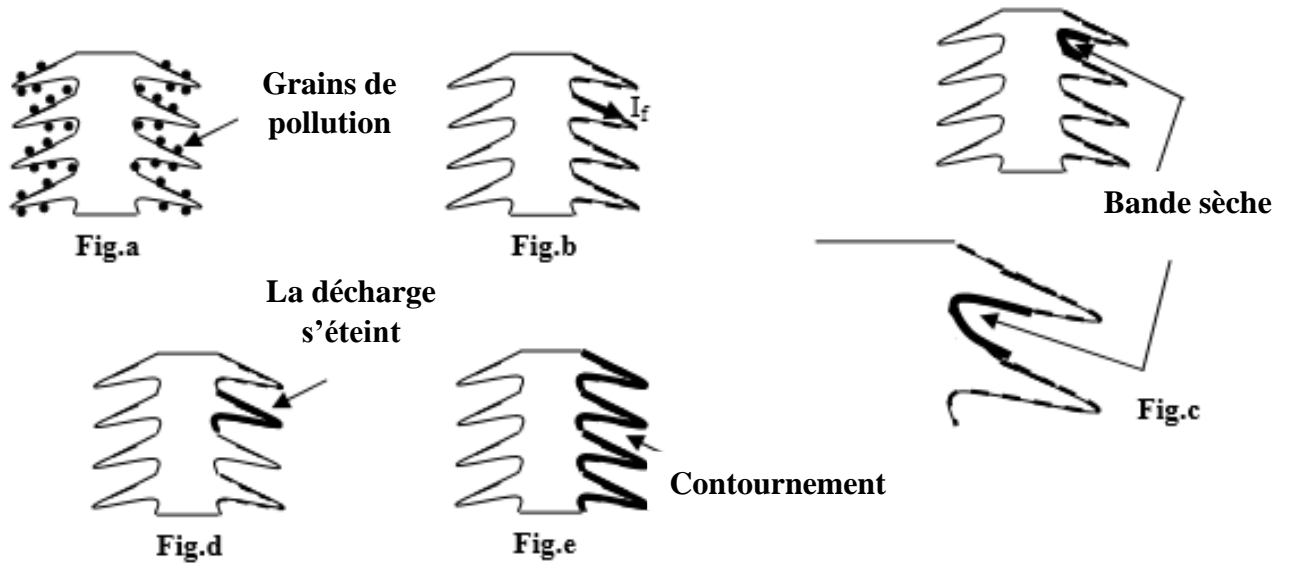


Figure I.11 Déroulement du contournement [3].

De manière générale, le contournement d'un isolateur pollué est précédé de l'apparition d'un courant de fuite accompagné de la formation d'une bande sèche et d'arc partiels, Un arc peut se propager en surface jusqu'au contournement total de l'isolateur.

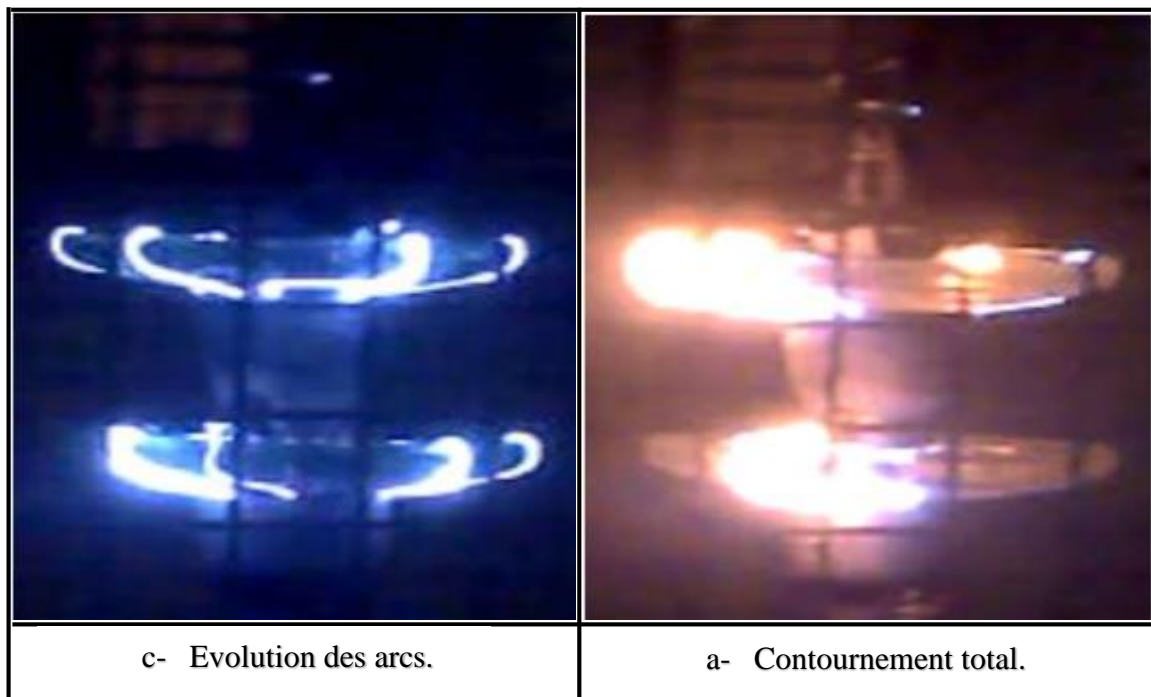


Figure I.12 Phénomène de contournement (image réel).

### **I.5.3.1. Contrainte de contournement**

La contrainte de contournement d'un isolateur est le rapport de la tension de contournement à la longueur totale de l'isolateur [11].

### **I.5.3.2. 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 [12]. Elle dépend :

- 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.5.3.3. 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). [12]

### **I.5.3.4. 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 de 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 [4].

### **I.5.3.5. 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 [10].

### **I.5.3.6. Longueur critique de l'arc**

En atmosphère polluée, l'apparition d'un courant de fuite est accompagnée par la formation d'arcs partiels sur des surfaces isolantes. Selon les conditions électriques, ces arcs peuvent se développer en engendrant le contournement total ou s'éteindre après un certain temps.

La longueur critique d'un arc représente la longueur limite de l'arc partiel qui peut s'éteindre. Dès que l'arc dépasse cette longueur critique, il se propagera et conduira inévitablement au contournement total [10].

### I.5.3.7. Diamètre de la décharge

Le diamètre du canal de la décharge est un paramètre important ; sa connaissance est indispensable à l'élaboration de modèles et la caractérisation physique du phénomène. Sa mesure est cependant très délicate à cause de la diffusion de la lumière. La décharge n'est pas un volume dont les frontières sont parfaitement nettes (bien définies). Il est donc nécessaire de définir un diamètre équivalent.

Matsumoto et al. [5] ont développé un dispositif de mesures optiques composé d'une matrice de 512 photodiodes disposées à des intervalles de  $28\mu m$ . Ce dispositif leur a permis de mesurer avec une bonne précision le diamètre de la colonne de la décharge. Leurs observations montrent que le diamètre  $d_d$  (mm) de la décharge dépend de la polarité de la tension et du courant  $i$  (A) qui la parcourt. A cet effet, ils proposent une relation empirique liant le diamètre de la décharge et le courant :

$$d_d = a_p \cdot i^{b_p} \quad (I.1)$$

Où

$i$  : le courant,  $d_d$  : le diamètre, Les constantes  $a_p$  et  $b_p$  : dépendant de la polarité appliquée à l'électrode haute tension avec :

- $a_p = 14$  et  $b_p = 0,78$  pour la polarité positive.
- $a_p = 22$  et  $b_p = 0,78$  pour la polarité négative.

A partir de la mesure de la densité du courant pendant la propagation de la décharge, Wilkins [5] montre que le rayon de la décharge peut être estimé par :

$$r_d = \sqrt{\frac{i}{1.45 \pi}} \quad (I.2)$$

## I.6. Conclusion

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

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

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.

La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension de transport d'énergie électrique.

Pour mieux dimensionner les chaînes d'isolateurs, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés. La connaissance de cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation. Il n'en demeure pas moins que trois années sont au minimum nécessaires pour déterminer la sévérité d'un site.



---

# Chapitre II

## *Modèles statiques et dynamiques de contournement*

---



## 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 homogène), de la résistivité des échanges thermiques, du 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.

Une quantité importante de travaux tant théoriques qu'expérimentaux ont été consacré à l'étude de contournement des isolateurs, dans ce chapitre on rappelle les modèles proposés par plusieurs chercheurs, et les principaux critères de propagation rencontrés dans la littérature.

## II.2. Principaux modèles statiques de contournement

Lorsqu'une chaîne d'isolateurs neufs est installée. Par exemple pour soutenir une ligne haute tension, elle remplit parfaitement son rôle de support mécanique et de plus aucune décharge n'apparaît sur sa surface car la longueur de l'ensemble est telle que le champ électrique en chaque point de son voisinage est nettement inférieur à la rigidité diélectrique de l'atmosphère ambiante. Il est ainsi tant que l'isolateur reste propre et sec.

Malheureusement, dans un environnement naturel, des dépôts d'origine diverses (poussières, fumées, suie, ...) peuvent s'accumuler de façon non homogène sur la surface isolante provoquant une conductivité électrique superficielle qui modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. Cette hétérogénéité du champ électrique sur les différentes parties de l'isolateur peut encore être accentuée par l'humidification plus ou moins grande de la couche de pollution suivant les circonstances atmosphériques (pluie, brouillard, embruns, ...). Dans ces conditions entre deux points de la tension isolante, la tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte, entraînant l'amorçage d'une décharge électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

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 des éventuelles défaillances, il est impératif de disposer de modèles permettant de prévoir le contournement des isolateurs. C'est dans cette optique, plusieurs modèles furent développés afin d'établir le critère d'établissement de l'arc en continu, pour ensuite être étendu au cas d'une tension impulsionnelle.

### II.2.1. Modèle de base

Obenaus a été un pionnier dans le domaine qui a effectué des analyses quantitatives du phénomène d'arc sur la surface des isolateurs recouverts d'une couche conductrice. Il a procédé en considérant un circuit électrique équivalent, constitué d'un arc de longueurs  $x$  en série avec une résistance. (Figure II.1).

Ce modèle simple est devenu la base de presque tous les travaux ultérieurs.

### II.2.1.1. Modèles de l'arc

#### II.2.1.1.1. Equation d'Ayrton

De nombreux chercheurs utilisent l'équation d'Ayrton arc gradient pour modéliser l'arc :

$$E_{arc} = A \cdot i_{arc}^{-n} \quad (II.1)$$

Ou

$i_{arc}$  : est le courant de fuite.

$A$  et  $n$  : sont des constantes d'arc.

Ces constantes peuvent varier en fonction du matériel de support à l'arc et les conditions ambiantes.

#### II.2.1.1.2. Equation de Cassie-Francis et Mayr

Les deux modèles précédents ont déjà été abordé dans le sujet de la dépendance du temps de résistance de l'arc en fonction de deux autres équations semi-empiriques contenant plusieurs constantes indéterminées. Après l'évaluation de ces constantes en termes de résultats expérimentaux, l'équation est appliquée conjointement avec l'équation du circuit et la loi d'Ohm pour prédire la tension, forme d'onde de courant, et extinction de l'arc ou le rallumage. L'une de ces équations est l'équation Mayr [4, 13] celle-ci se lit, après une certaine simplification, comme ceci :

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = \gamma \cdot E_{arc} \cdot I_{arc} - \beta \quad (II.2)$$

Où  $G = I_{arc}/E_{arc}$  est la conductance d'arc par unité de longueur, et  $\gamma$  et  $\beta$  sont des constantes indéterminées. Cette équation a été utilisée pour décrire l'effet des pertes par conduction dans un arc dont le rayon est supposé être déterminé par le flux de convection.

## II.2.2. Modèles dynamiques

### II.2.2.1. Modèle d'Obenaus

Partant des observations de laboratoire sur les phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche de pollution, sous tension continue, Obenaus [5, 14], dans un travail de pionnier, a essayé de donner les analyses quantitatives en utilisant un circuit électrique équivalent. Son modèle (figure.II.1) est constitué d'un arc de longueur  $x$  en série avec une résistance  $R_p$  représentant la résistance de la zone de pollution non encore court-circuité par l'arc.

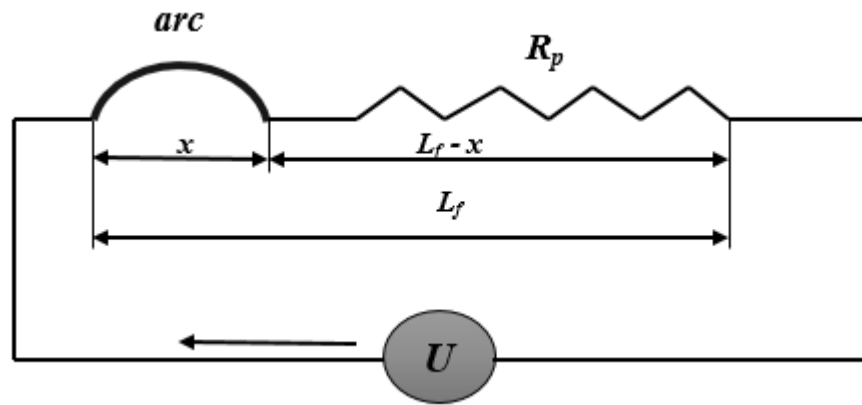


Figure II.1. Modèle d’Obenaus.

L’équation électrique est telle que : La quasi-totalité

$$u = u_e + u_{arc} + R_p i \tag{II.3}$$

Où  $u$ ,  $u_e$  et  $u_{arc}$  sont respectivement la tension appliquée, la chute de tension totale aux bornes des électrodes et la tension de l’arc,  $R_p$  est la résistance de la couche de pollution et  $i$  est le courant de fuite qui traverse la couche polluée. L’équation de la tension d’arc est :

$$u_{arc} = A \cdot x \cdot i^{-n} \tag{II.4}$$

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

$$u = u_e + A \cdot x \cdot i^{-n} + R_p i \tag{II.5}$$

Les valeurs des paramètres  $n$  et  $A$  dépendent du milieu dans lequel brule la décharge.

Elles varient selon les auteurs [15] : de façon générale

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

A partir des mesures expérimentales sur un canal d’électrolyte, Ghosh et al [16] 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 II.1.

Tableau II.2 : Valeurs des constantes  $A$  et  $n$  [16]

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

### II.2.2.2. Modèle de Neumarker

En partant des travaux d'Obenaus, Neumarker [5, 14] a ajouté l'hypothèse d'une couche de pollution de résistance  $r_p$  uniforme par unité de longueur de fuite. Il propose l'expression suivante pour calculer la résistance de la couche de pollution :

$$R_p = r_p(L_f - x) \quad (\text{II.6})$$

Où  $L_f$  et  $r_p$  représentent respectivement la longueur de la ligne de fuite totale et la résistance moyenne par unité de longueur. En introduisant cette expression dans le modèle d'Obenaus, la tension  $u$  aux bornes de l'isolateur sera :

$$u = u_{arc} + (L_f - x)r_p \cdot i \quad (\text{II.7})$$

Ou encore

$$u = x \cdot A \cdot i^{-n} + (L_f - x)r_p \cdot i \quad (\text{II.8})$$

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

$$I_c = \left(\frac{A}{r_p}\right)^{\left(\frac{1}{n+1}\right)} \quad (\text{II.9})$$

et

$$x_c = \frac{L_f}{n+1} \quad (\text{II.10})$$

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

$$x_c = L_f \cdot A^{\left(\frac{1}{n+1}\right)} \cdot r_p^{\left(\frac{n}{n+1}\right)} \quad (\text{II.11})$$

### II.2.2.3. Modèles de Tegar

Un premier modèle utilisé par M. Tegar [17] est similaire à celui de D. Namane [18], comprenant deux électrodes planes, l'une circulaire mise sous tension et l'autre rectangulaire mise à la terre.

Deux configurations de la pollution sont considérées. Chacune d'elles possède deux dispositions distinctes des couches polluantes.

Dans la première configuration (Figure II.2. (a)), trois couches de pollution dont deux sont de conductivité et de dimensions identiques et l'autre d'une conductivité différente. Dans une première

disposition, la couche faiblement conductrice est située des deux côtés de la plaque isolante, contrairement à la seconde où cette couche est appliquée au milieu.

Concernant la deuxième configuration, l'auteur a considéré deux milieux de conductivités différentes. La couche fortement conductrice est totalement établie du côté terre, pour une première disposition et du côté haute tension, pour la seconde (Figure II.2. (b)).

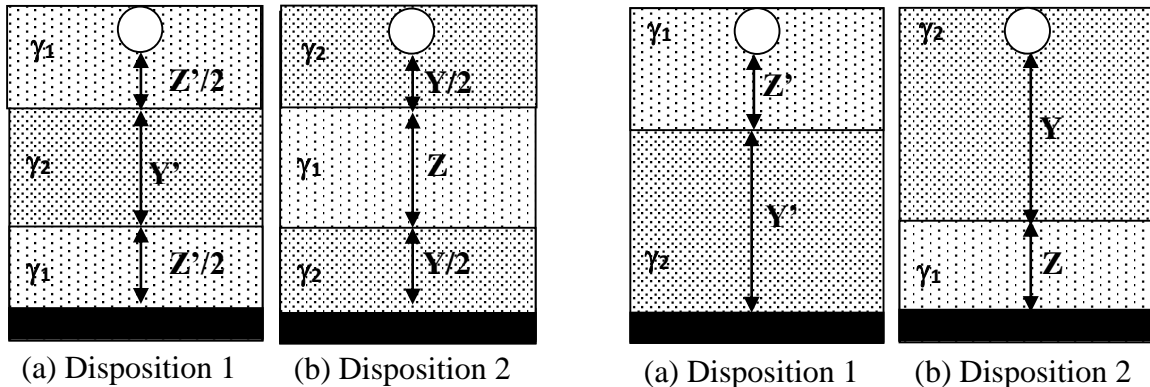


Figure II.2. Modèle de TEGUAR.

Avec :

Y ou Y' : la longueur de la partie fortement conductrice ( $\gamma_2=420 \mu\text{S/cm}$ ).

Z ou Z' : la longueur de la partie faiblement conductrice ( $\gamma_1=42 \mu\text{S/cm}$ ).

Dans un autre travail M. TEGUAR utilise un modèle statique sous tension alternative, soumis à une répartition discontinue de la pollution, reproduisant l'état de surface de l'isolateur capot et tige type 1512L, prélevé de la zone SONELGAZ de Hassi R'mel [17].

II.2.2.3.1. Cas de pollution continue

TEGUAR [10] a élaboré un modèle statique en tension alternative. Son modèle est basé sur celui d'OBENAU [19], et permet d'avoir les différentes caractéristiques concernant le développement de l'arc électrique sur une surface isolante uniformément polluée. En se basant sur l'équation du circuit et sur la condition limite de réamorçage, il a déterminé l'expression donnant la résistance de pollution en série avec l'arc, en fonction de la tension appliquée et le courant de fuite :

$$R_p = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{A-100U}{A} \cdot \frac{U}{i} = \rho \cdot F_p \tag{II.12}$$

Où  $\rho$  représente la résistivité de la couche de pollution et A la constante de la caractéristique statique de l'arc.

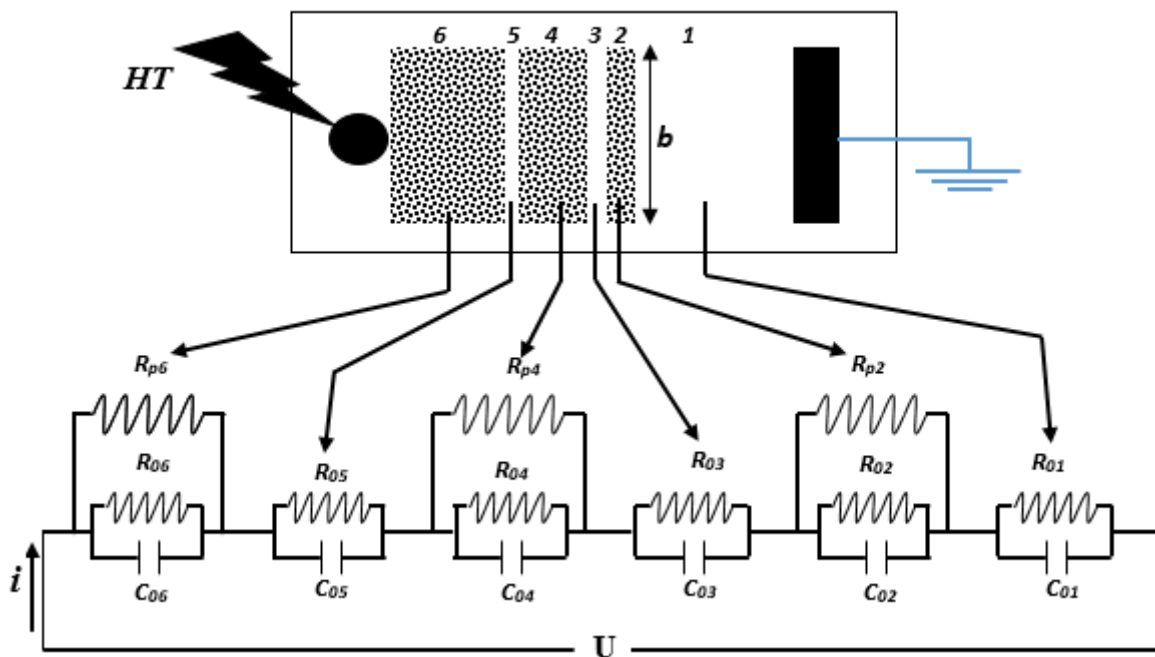
Cette équation lui a permis d'évaluer la longueur critique de l'arc et par suite tous les paramètres caractérisant les phénomènes de conduction et de décharge électriques sur des surfaces isolantes uniformément polluées.

Un modèle amélioré a été mis au point par Tegar [17] pour caractériser la propagation d'une décharge électrique sur des surfaces isolantes soumises à une pollution continue non uniforme.

**II.2.2.3.2. Cas de pollution discontinue**

Tegar [17] 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.3. Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire.**

La figure (II.3) 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 [11], l'expression de la résistance pour chaque bande polluée  $R_{pi}$  peut être formulée par :

$$R_{pi} = R_{sp} \int_0^{l_i} \frac{dx}{b} = R_{sp} \frac{l_i}{b} = R_p f \frac{l_i}{b} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$i=2, 4, 6$ ,  $R_{pi}$  : la résistance de couche de pollution,  $dx$  : élément de longueur,

$l_i$  : la longueur de la pollution,  $b$  : largeur de la couche de pollution et  $f$  : le facteur de forme.

#### II.2.2.4. Modèle de Rizk

A partir d'une analyse théorique, Rizk [15] 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  $L_f$ . Cette relation peut s'écrire sous la forme :

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

#### II.2.2.5. Modèle de Wilkins

Wilkins [5] a étudié l'effet de la concentration des lignes de courant au pied de la décharge sur la résistance de la couche de pollution (figure II.4). Il a ajouté un terme à la résistance de la couche de pollution représentant l'influence de la constriction des lignes de courant dans la couche au voisinage de la décharge. Cette correction s'exprime différemment selon le rapport entre la ligne de fuite  $L_f$  et la largeur  $b_w$  de l'isolateur. Ainsi, la résistance de la pollution pour une bande de pollution étroite sera :

$$R_p = \frac{1}{2.\pi.\sigma_s} \left[ (L_f + x) + \frac{b_w}{2\pi} \ln \left( \frac{b_w^2}{4.\pi.r_d^2} \right) \right] \quad (\text{II.15})$$

Pour le cas d'une bande large, la résistance de la couche de pollution sera :

$$R_p = \frac{1}{2.\pi.\sigma_s} \left[ \ln \left( \frac{2.L_f}{\pi.r_d} \right) - \ln \left( \tan \left( \frac{\pi.x}{L_f} \right) \right) \right] \quad (\text{II.16})$$

Où

$\sigma_s$ ,  $b_w$  : sont respectivement la conductivité de la couche de pollution et la largeur de l'isolateur,

$r_d$  : le rayon du pied de la décharge qui peut être estimé par la relation :

$$r_d = \sqrt{\frac{i}{1.45 \pi}} \quad (\text{II.17})$$

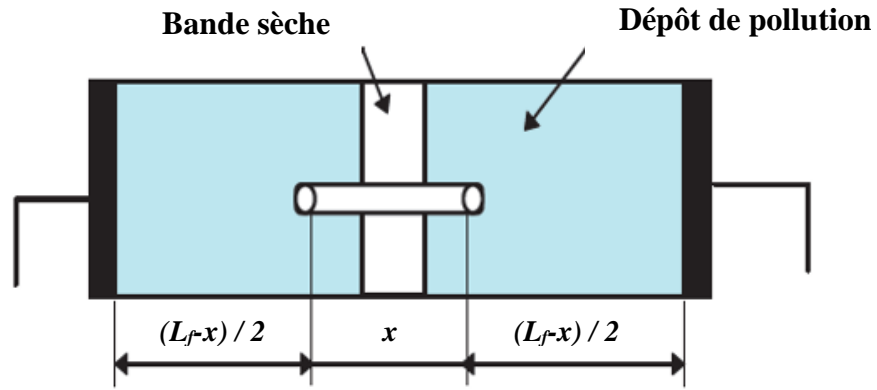


Figure II.4. Modèle de Wilkins.

### II.2.2.6. Modèle de Zhicheng et Renyu

Zhicheng et Renyu [5] ont démontré que la résistance de la couche de la pollution pour des isolateurs de formes complexes peut être ramenée à une résistance d'un isolateur plat (figure II.5). Ils proposent l'expression suivante :

$$R_p = \frac{1}{\pi \cdot \sigma_s} \cdot \ln \left( \frac{L_f - x}{r_d} \right) \tag{II.18}$$

Où

$L_f$  : est la longueur de la ligne de fuite,

$r_d$  : est le rayon du pied de l'arc.

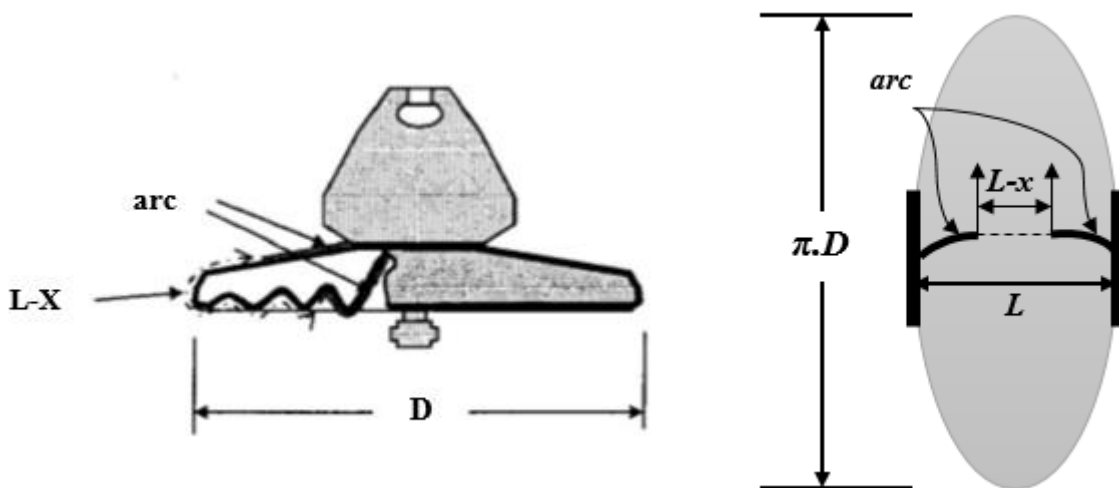


Figure II.5. Modèle de Zhicheng et Renyu.

Les auteurs supposent que la tension de contournement dépend de la conductivité superficielle au moment critique et proposent l'idée de la conductivité superficielle effective  $\sigma_e$  tel que :

$$\sigma_e = 1.25 \sigma_s \tag{II.19}$$

Sachant que le nombre d'arcs en série avant le contournement est aléatoire, ils proposent une nouvelle formule pour calculer la tension de contournement :

$$U_{cn} = A. x. K_r. i^{-n} + \left( \frac{K_t}{\pi. \sigma_e} \right) \ln \left( \frac{(L_f - x)}{K_t. \sigma_S} \right) \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$k_r$  : est le rapport entre la longueur de l'arc et la ligne de fuite sur la surface de l'isolateur.

$k_t$  : est le nombre de couches de pollutions en série.

### II.2.2.7. Modèle de Dhahbi et Béréal

Dhahbi et Béréal [5] considèrent que la décharge se présente comme étant un canal cylindrique de résistance  $R_d$  en série avec une couche de pollution d'impédance  $Z_b$  ( $R_p$ ,  $C_b$ ) (figure II.6). Le choix de cette représentation est justifié par le fait que le phénomène de contournement dépend essentiellement des caractéristiques surfaciques de la couche de pollution. Cette couche de pollution peut à son tour être modélisée par une résistance  $R_p$  en parallèle avec une capacité  $C_b$ . Les expressions de  $R_p$  et  $C_b$  peuvent être déterminées par :

$$R_p = \rho \frac{(L_f - x)}{S_p} \quad (\text{II.21})$$

$$C_b = \varepsilon \frac{S_p}{(L_f - x)} \quad (\text{II.22})$$

Où

$\rho$ ,  $\varepsilon$ , et  $S_p$  sont respectivement la résistivité, la permittivité et la section de la couche polluée.

D'autre part, en considérant que l'arc est un canal cylindrique de section  $S$ , de longueur  $x$  et de résistivité  $\rho_d$ ,

□ sa résistance  $R_d$  sera :

$$R_d = \rho_d \frac{x}{S} \quad (\text{II.23})$$

D'où l'expression de l'impédance équivalente :

$$Z_b = R_d + \frac{R_p}{1 + j\omega R_p C_b} \quad (\text{II.24})$$

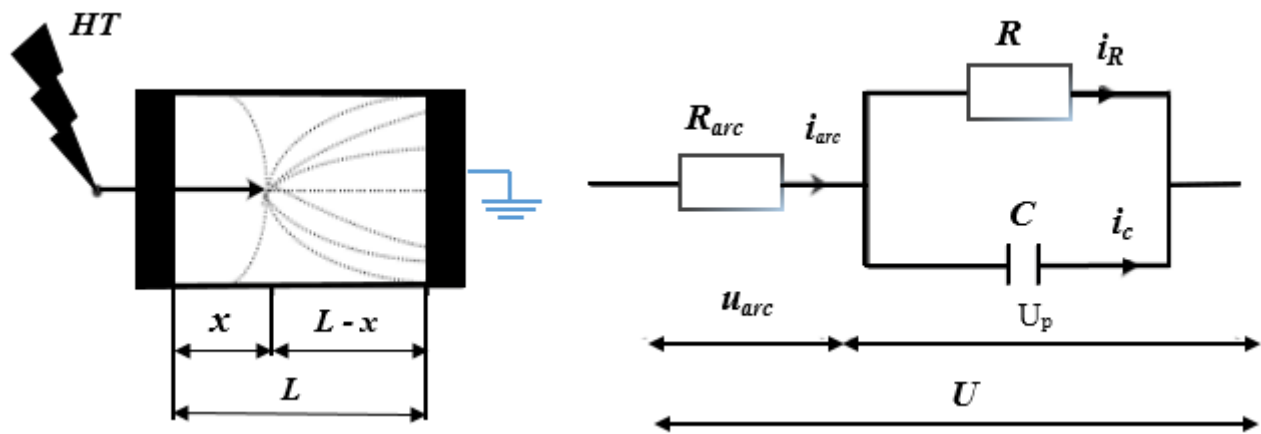


Figure II.6. Schéma d'un isolateur pollué et son modèle électrique équivalent.

### II.2.2.8. Modèle de Danis

Ce modèle est constitué d'une plaque de verre isolante, plane ou cylindrique, munie de deux électrodes rectangulaires identiques et placées aux deux extrémités de la plaque (Fig. II.7). Dans le but de reproduire des couches similaires à celles observées sur des isolateurs naturellement pollués, J.Danis [12, 17] a considéré un modèle constitué de plusieurs zones sèches séparées par des zones humides (Fig. II.7.a). Ainsi, l'auteur a abouti aux résultats suivants :

- L'arc électrique prend naissance dans les zones sèches et se déplace vers les zones humides (Fig. II.7.b).
- Cet arc s'amorce d'une façon aléatoire le long de la zone sèche et aucune position n'est privilégiée par rapport à une autre.
- Aux premiers stades du processus, de nombreux arcs partiels peuvent avoir lieu dans la zone sèche. Lorsque le courant augmente, les arcs disparaissent de telle sorte qu'un seul arc dominant persiste. Celui-ci se développe donc, seul, à travers la zone humide.
- Le développement de l'arc d'une zone sèche s'effectue de manière à rejoindre l'arc développé sur la zone sèche voisine (Fig. II.7.c).
- Le contournement se fait à travers les chemins déjà préétablis par les différents arcs de chaque zone sèche (Fig. II.7.d).
- Les positions des arcs développés changent lorsque l'expérience est répétée, et le contournement se fera donc à travers un autre chemin qui n'est pas forcément le plus court (Fig. II.7.e).

A partir de ces considérations, l'auteur a conclu que le lieu, la forme et la propagation des arcs partiels sont déterminés à partir de plusieurs facteurs qui sont dépendants entre eux. Comme il est impossible de déterminer l'effet instantané de tous ces facteurs, le comportement macroscopique de ces arcs a une nature aléatoire. Ainsi, la rupture des zones sèches survient d'une manière aléatoire. Comme la tension de contournement dépend de la rupture de ces zones sèches, celle-ci possède également le même caractère, c'est à dire qu'elle obéit aux lois statistiques.

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 par rapport à la longueur, l'équation qui régit le modèle est :

$$U = \frac{Ax}{i^n} + r_p(L_f - x)i \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$$n \geq 0.5 \quad \text{et} \quad 200 \leq A \leq 400,$$

$r_p$ : est la résistance linéique.

Le courant et la tension critique déduite par l'auteur sont donnés par les expressions :

$$I_c = \left( \frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (\text{II.26})$$

Et

$$U_c = L(Ar_p)^{\frac{1}{n+1}} = AI_c^{-1} \quad (\text{II.27})$$

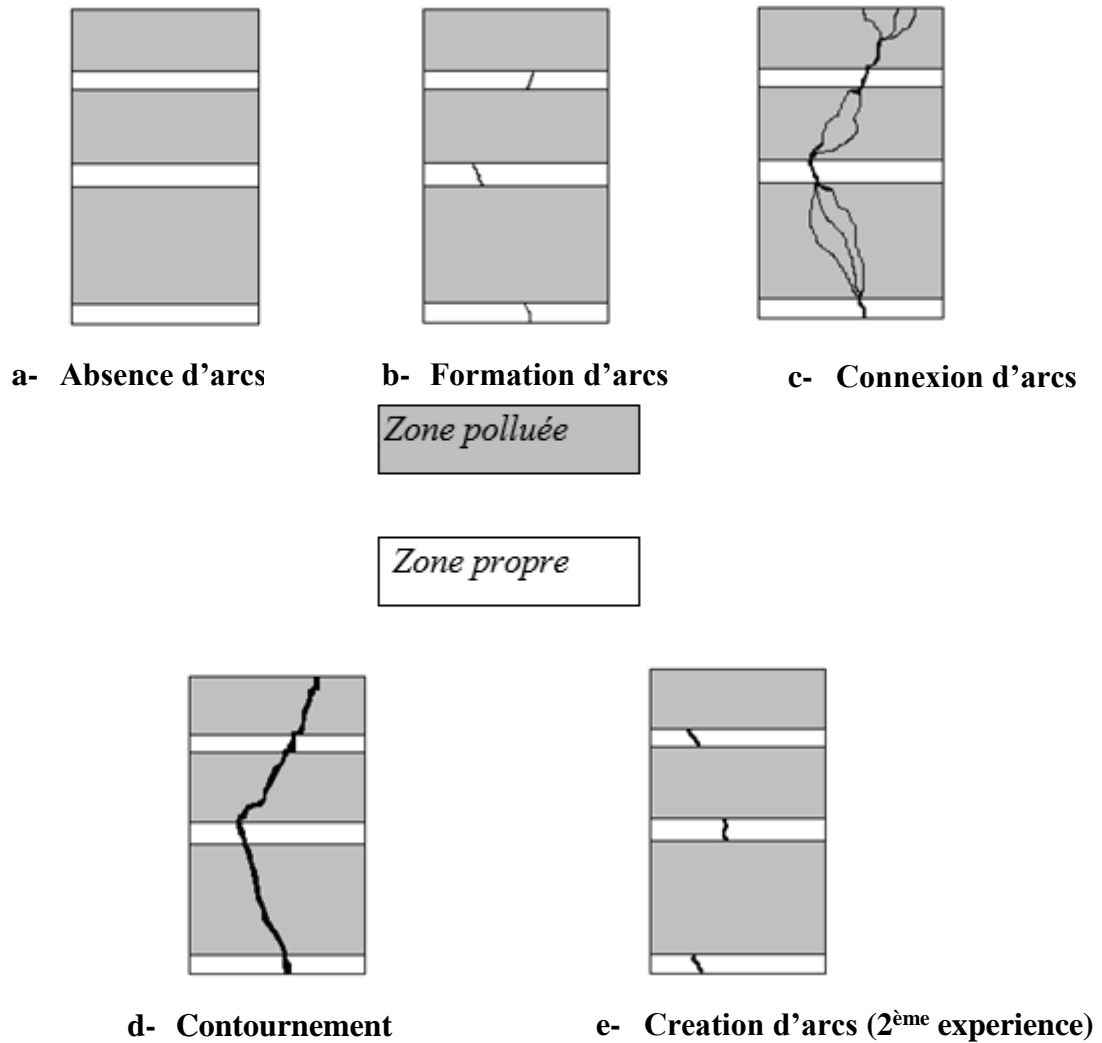


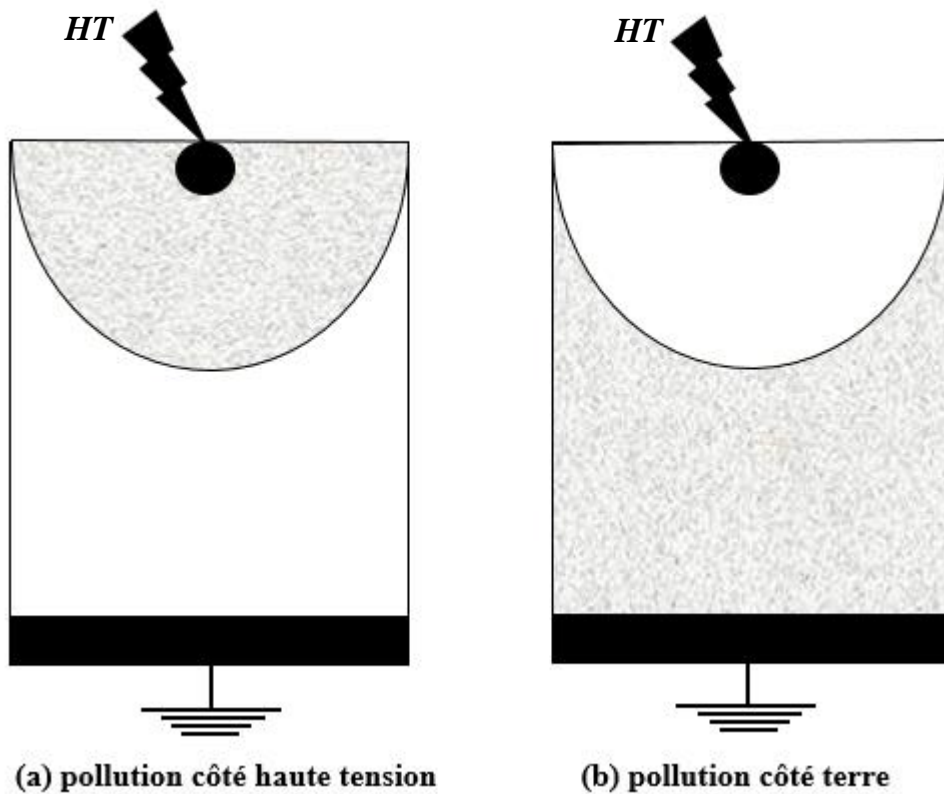
Figure II.7. Modèle de Danis.

### II.2.2.9. Modèle de D. Namane

Afin d'examiner le comportement des surfaces isolantes sous pollution discontinue, D. Namane [17, 18] proposé un modèle plan rectangulaire (Fig. II.8) [20]. Les différentes contraintes sous lesquelles est soumis son modèle de laboratoire sont : la discontinuité de la pollution en variant de manière régulière la largeur de la pollution, la position de la pollution par rapport aux électrodes ainsi que la conductivité de la couche polluante appliquée sur la plaque.

L'influence de ces contraintes sur le courant de fuite, sur la tension d'entretien de l'arc électrique et sur la tension de contournement ainsi que le processus de contournement, est alors examinée.

- Le courant de fuite est toujours plus élevé lorsque la couche polluante est du côté de l'électrode rectangulaire, mise à la terre. Ceci est dû au phénomène de la conduction dans la zone sèche et à l'effet de couronne. En effet, lorsque la zone sèche est de côté haute tension, le rayon de courbure de l'électrode circulaire provoque un champ électrique, plus intense que celui de l'électrode rectangulaire, par conséquent, on obtient une augmentation du courant de fuite.



**Figure II.8. Modèle expérimental selon D.Namane.**

Les principaux résultats qui ont été obtenus sont les suivants :

- La position de la couche polluante vue des électrodes a peu d'influence sur la tension d'entretien de l'arc.
- La position de la pollution n'a apparemment pas d'influence sur la tension de contournement pour les conductivités utilisées.
- Il existe une conductivité limite, selon l'auteur, à partir de laquelle, en cas de zones sèches préétablies, la couche polluante peut être considérée comme court-circuitée.
- L'augmentation de la conductivité diminue la tension d'entretien d'arc et réduit la rigidité du modèle.

### **II.3. Principaux modèles dynamique de contournement**

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 conforme à la réalité de nouveaux ayant pris en considération la variation dans le temps de certains paramètres, ont été développés. Ainsi, les critères de propagation et l'étude de la dynamique de l'arc sont régis par des lois physiques.

## II.3.1. Mécanisme de propagation

### II.3.1.1. Propagation par ionisation

Wilkins et Al-Baghdadi 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. [14]

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.

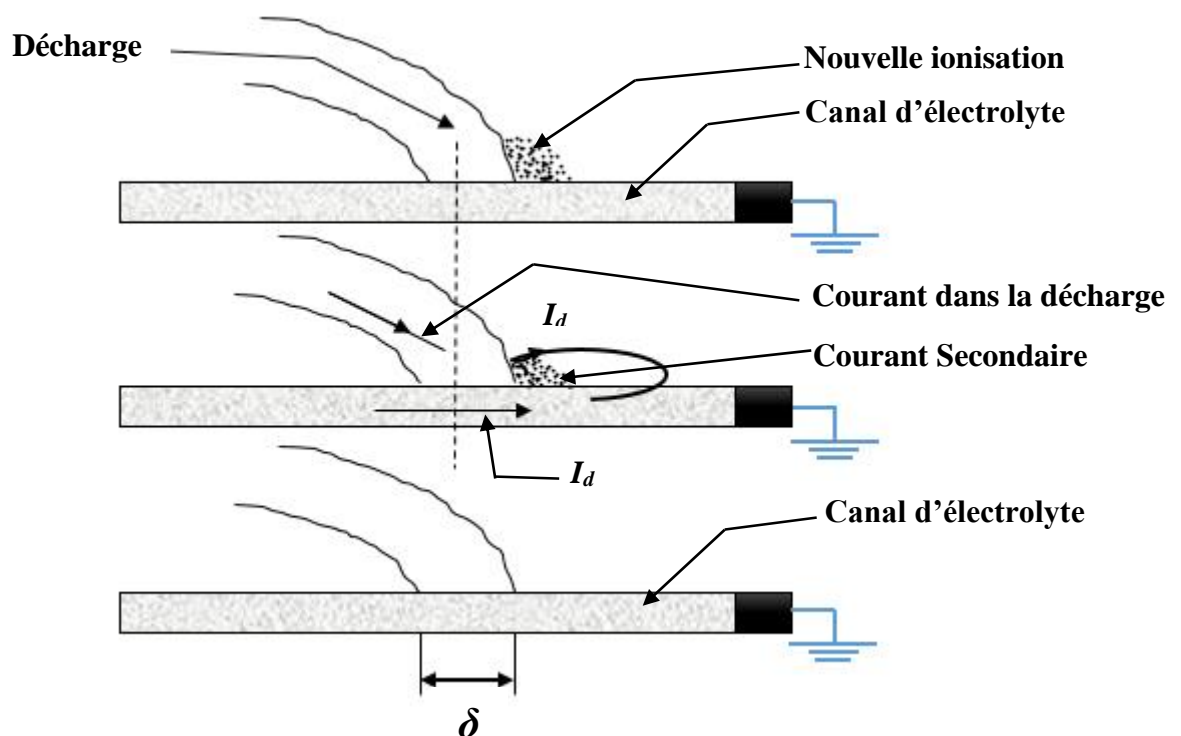


Figure II.9. Mécanisme de propagation par ionisation proposé par Wilkins. [5]

### II.3.1.2. Propagation par force électrostatique

A partir des observations faites sur un canal d'électrolyte, Rahal 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. [14]

Cette force va provoquer la courbure de la décharge vers l'électrode de masse (Figure II.10). 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 [21] 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.[14]

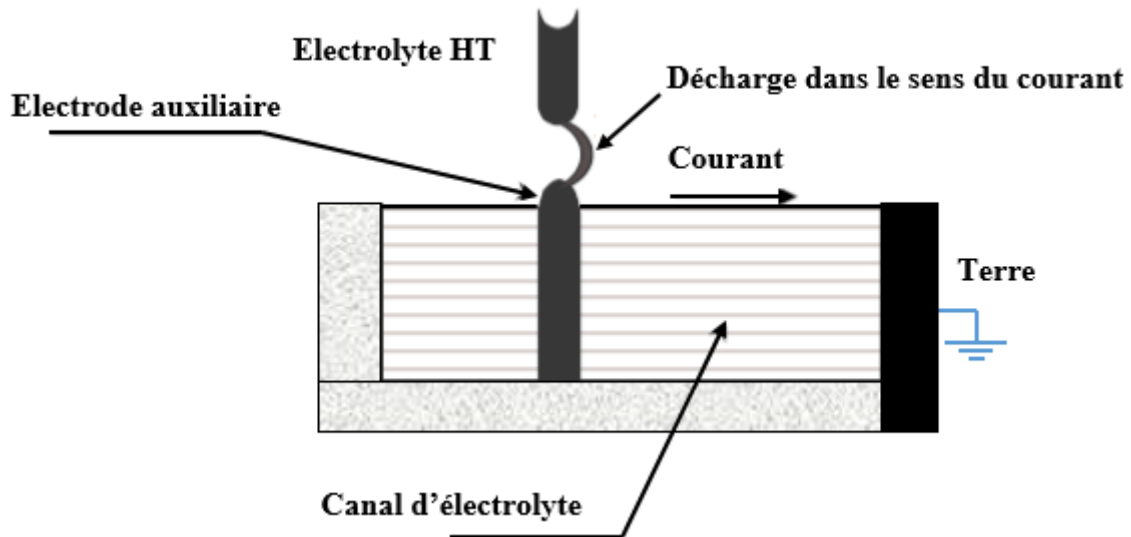


Figure II.10. Mécanisme de propagation par force électrostatique.

### II.3.2. 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.3.2.1. Critère de Hampton

Partant de résultats expérimentaux, Hampton [1] 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 :

$$E_{arc} < E_p \quad (II.28)$$

#### II.3.2.2. 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 [1] a établi un critère de propagation de l'arc, exprimé par la relation :

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

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.3.2.3. Critère de Wilkins

Wilkins [1] 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 :

$$\frac{dp}{dx} > 0 \quad (\text{II.30})$$

Lorsque la tension appliquée au système est constante, le critère de Wilkins se réduit à la condition établie par Hesketh. [1]

### II.3.2.4. Critère d'Anjana et Lakshminarasimha

En assimilant l'arc à une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, Anjana et Lakshminarasimha [1] 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 :

$$W_{Total} \geq W_{th} \quad (\text{II.31})$$

## II.3.3. Modèles dynamiques

Il existe plusieurs modèles pour caractériser la dynamique de l'arc. Nous allons présenter les plus importants parmi ceux-ci

### II.3.3.1. Modèle d'Anjana et Lakshminarasimha

Anjana et Lakshminarasimha [1] ont proposé un modèle dynamique basé sur l'équation de Mayr [4, 13] et sur le modèle statique d'Obenaus [19]. Ils ont supposé que l'isolateur est divisé en un certain nombre de bandes formant des anneaux symétriques par rapport à l'axe de l'isolateur et que l'arc est une colonne de gaz en équilibre thermodynamique dont l'énergie est donnée par :

$$W_{th} = \frac{3}{2} KTM \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$T$  : la température de l'arc.

$M$  : le nombre de particules neutres dans l'arc.

$K$  : la constante de boltzman.

Pour la propagation de l'arc, Anjana et Al [1] proposent leur propre modèle, selon lequel l'arc ne se déplace que si son énergie totale  $W_{total}$  est supérieure ou égale à l'énergie  $W_{th}$  nécessaire pour maintenir l'arc à sa température, ou  $W_{totale}$  est donnée par l'expression suivante :

$$W_{totale} = (E_{arc} \cdot i_{arc} - P_0)dt \quad (II.333)$$

Avec :

$E_{arc}$  : le gradient de la décharge.

$i_{arc}$  : le courant de la décharge.

$dt$  : l'incrément de la longueur de la décharge.

$P_0$  : les pertes par unité 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 :

$$V = \mu \cdot E_{arc} \quad (II.34)$$

Où

$\mu$  : est la mobilité des électrons dans l'arc.

$V$  : vitesse de propagation de la décharge.

On déduira :

$$dx = V dt \quad (II.35)$$

La multiplication de la vitesse instantanée par l'intervalle de temps  $dt$  (représentant l'incrément temporel) permet d'obtenir l'évolution dans l'espace équivalent ( $dx$ ) 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.3.3.2. Modèle de Dhahbi et Beroual

Ces deux chercheurs [22] considèrent que la décharge peut être représentable par un schéma électrique équivalent comme l'indique la (figure II.11). Sachant que pour chaque saut de l'arc, on obtient une nouvelle cellule ayant les paramètres suivants :  $R_i$ ,  $C_i$ ,  $L_i$  et  $U_i$ .

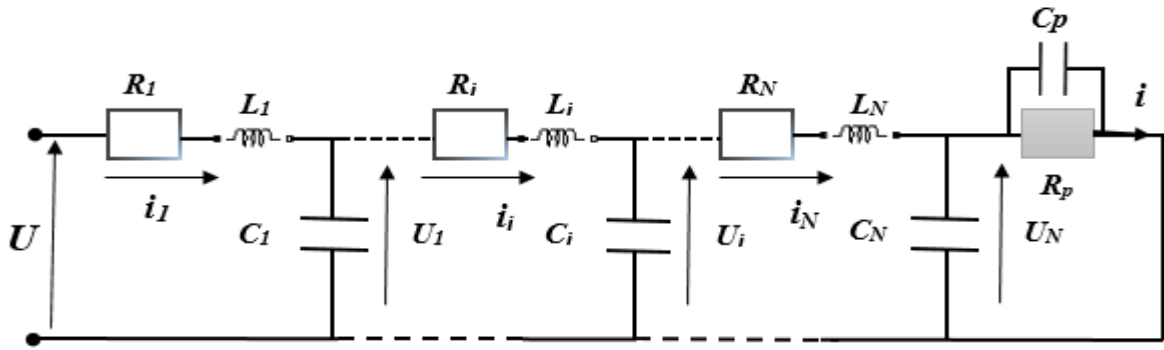


Figure II.11. Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge selon Dhahbi et Al. [22]

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.3.3.3. Modèle de Rizk et Nguyen

Pour caractériser la dynamique de l'arc pour le cas continu, Rizk et Nguyen [22] ont considéré une résistance d'arc qui varie selon l'équation de Mayr [4, 13] :

$$\frac{dR_{arc}}{dt} = \frac{R_{arc}}{\tau} - \frac{R_{arc}^2 \cdot i^{n+1}}{A\tau} \tag{II.36}$$

Avec :

$\tau = 100 \mu s$ , constant de temps de l'arc.

$n = 0.8$  et  $A = 60$ , constants 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.3.3.4. Modèle de Sundararajan et Gorur

Dans le but d'estimer la tension de contournement des isolateurs pollués sous tension continue, Sundararajan et Gorur [1] ont proposé un modèle dynamique, qui ressemble à celui de Anjana et Lakshminarasimha , mais basé sur le critère de propagation de Hampton (champ au pied de l'arc inférieur à celui dans la pollution).[1]

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

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

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:

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

Avec:

$L_f$  : 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.4. 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 modèle dynamique*

---



## III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons proposer un modèle dynamique. Notre modèle permet de prédire le comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension impulsionnelle. Il utilise le critère de propagation de Hampton et se base sur le circuit électrique équivalent d'Obenaus [19].

Dans notre simulation, un isolateur pollué et partiellement contourné est représenté par une décharge électrique de longueur donnée en série avec une résistance représentant la bande de pollution. Le canal de la décharge est assimilé à des cellules résistives. Chaque cellule nouvellement créée correspond à un nouveau déplacement partiel de l'arc. Nous comparons nos résultats de simulation à ceux obtenus par d'autres chercheurs.

## III.2. Conception du modèle dynamique

Devant la complexité du phénomène de contournement et afin de simplifier la représentation mathématique, nous avons adopté les hypothèses suivantes :

- 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 pure.
- 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  $r_d$ .

### III.2.1. Circuit électrique équivalent

En se basant sur le modèle proposé par Obenaus [19], nous pouvons représenter un isolateur pollué et partiellement contourné par une décharge électrique, par un circuit électrique équivalent constitué de deux résistances en série.

La première résistance  $R_{arc}$  représente le canal de la décharge, et la seconde résistance  $R_p$  représente la couche de pollution non court-circuitée par la décharge (Figure III.1).

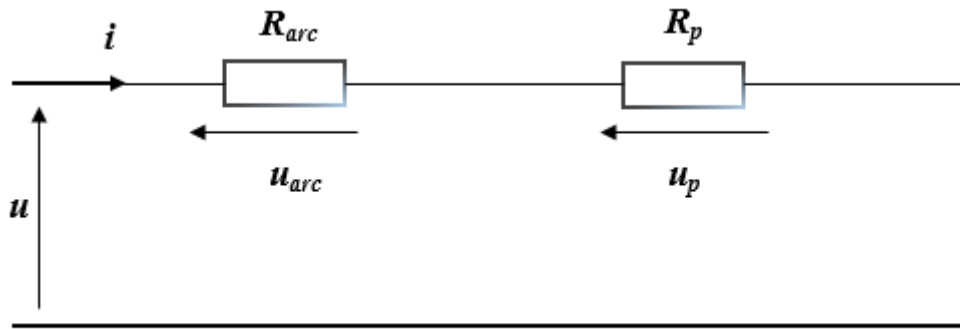


Figure III.1 : Circuit électrique équivalent de base.

### III.2.2.1. Propagation de la décharge

#### III.2.2.1.1. Initialisation de la décharge

Si la tension appliquée entre deux électrodes est suffisamment élevée, une décharge de longueur initiale  $x_0$  de type couronne peut prendre naissance à la surface de l'isolateur. 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 certains chercheurs est égale à 1 % de la longueur de fuite totale de l'isolateur. [22]

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

#### III.2.2.1.2. Critère de propagation

Le critère de propagation que nous avons adopté pour notre modèle, est celui proposé par Hampton [1], ce critère s'écrit.

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

Où

$E_{arc}$  : le champ dans l'arc,

$E_p$  : le champ dans la pollution.

Lorsque la couche polluante est représentée par une résistance pure, Tegar a montré que tous les critères de propagation définis dans le chapitre précédent aboutissent aux mêmes résultats obtenus par le critère d'Hampton.

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

$$E_{arc} = \left| \frac{du_{arc}}{dx} \right| = \frac{A}{i^n} \quad , \quad E_p = \left| \frac{du_p}{dx} \right| = r_p i \quad (\text{III.2})$$

### III.2.2.1.3. Circuit de propagation

La propagation de l'arc électrique est possible, si le critère d'élongation de la décharge électrique est vérifié. 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,  $R_j$ ,  $i$  et  $u_j$  ( $j=1$  à  $N$ ) représentent respectivement la résistance, le courant et la tension, correspondant à chaque cellule nouvellement créée et  $R_p$  la résistance de la partie de la couche de pollution non court-circuitée par l'arc.

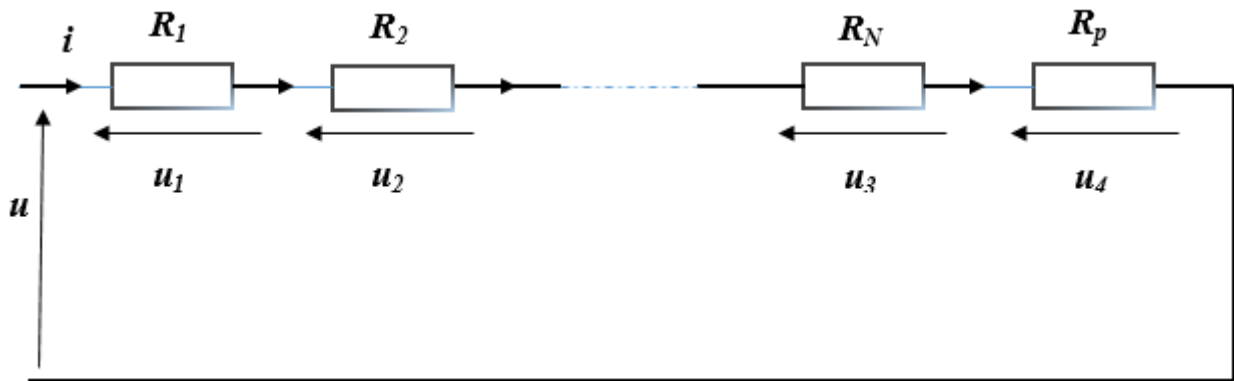


Figure III.2 : Circuit électrique équivalent à la propagation de la décharge.

### III.2.2.2. 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.

#### III.2.2.2.1. Equation du circuit

En négligeant la chute de tension cumulée aux électrodes, de l'ordre de 840V selon Wilkins, l'équation du circuit sera donnée par :

$$u = u_{arc} + u_p = (R_{arc} + R_p)i \quad (III.3)$$

Avec :

$u$  : la tension appliquée,

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

$R_p$  : la résistance de la couche polluante,

$i$  : le courant de fuite ou de la décharge.

### III.2.2.2.2. Résistance de la couche de pollution

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 :

$$R_p = r_p(L_f - x) \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$r_p$  : la résistance linéique,

$L_f$  : la longueur de fuite totale,

$x$  : la longueur de l'arc.

En se basant sur le modèle de Zhicheng et Renyu, nous pouvons ramener une structure complexe d'un isolateur pollué à un modèle plan dont la résistance  $R_p$  de la pollution peut prendre la forme suivante :

$$R_p = \frac{1}{\pi \cdot \gamma_p} \cdot \frac{L_f - x}{r_{iso}} \quad (\text{III.5})$$

Où

$\gamma_p$  : la conductivité superficielle de la pollution,

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

A partir des équations (III.4) et (III.5), la résistance linéique de la pollution peut être formulée par :

$$r_p = \frac{1}{\pi \cdot \gamma_p \cdot r_{iso}} \quad (\text{III.6})$$

### III.2.2.2.3. Caractéristiques de l'arc

#### III.2.2.2.3.1. Chute de tension aux bornes de l'arc

Par ailleurs, la relation approximative de la tension aux bornes de l'arc est donnée, selon Obenaus, par l'expression empirique suivante :

$$u_{arc} = \frac{A \cdot x}{i^n} = E_{arc} \cdot x \quad (\text{III.7})$$

Avec :

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

$x$  : la longueur d'arc,

$i$  : le courant d'arc.

### III.2.2.2.3.2. Résistance de l'arc

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

$$R_{arc} = \frac{u_{arc}}{i} = \frac{A.x}{i^{n+1}} \quad (III.8)$$

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

$$r_{arc} = \frac{R_{arc}}{x} = \frac{A}{i^{n+1}} \quad (III.9)$$

### III.2.2.2.3.3. Rayon de l'arc

Le rayon d'arc est un paramètre important dans la vérification des modèles physiques. Cependant, il est nécessaire de définir un diamètre équivalent car les frontières du canal d'arc ne sont pas parfaitement définies.

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

$$r_d = \sqrt{\frac{i}{1.45 \pi}} \quad (III.10)$$

### III.2.2.2.3.4. Résistivité de l'arc

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  $\rho_{arc}$  du canal conducteur peut être donnée par :

$$\rho_{arc} = \frac{R_{arc}.S}{x} = \frac{R_{arc}.\pi.r_d^2}{x} \quad (III.11)$$

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.8) et (III.10) :

$$\rho_{arc} = \frac{A}{1.45 i^n} \quad (III.12)$$

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

$$\rho_{arc} = \frac{A}{1.45^{n+1}.\pi^n.r_d^{2n}} \quad (III.13)$$

### III.2.2.2.3.5. Puissance dissipée dans l'arc

Lors du développement de l'arc, des pertes en puissance apparaissent et deviennent de plus en plus importantes avec l'augmentation du courant de fuite. Ces pertes sont dangereuses et insupportables par le réseau électrique, si elles sont considérables.

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

$$P_{arc} = u_{arc} \cdot i = E_{arc} \cdot x \cdot i = A \cdot x \cdot i^{1-n} \quad (\text{III.14})$$

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

### III.2.2.2.4. Vitesse de propagation

La vitesse de propagation est un facteur très important qui influe directement sur le comportement de la décharge évoluant sur des surfaces isolantes contaminées. Parmi tous les modèles qui ont été établis dans la littérature, peu proposent des relations permettant d'évaluer la vitesse d'élongation de la décharge.

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

$$V = \mu \cdot E_{arc} \quad (\text{III.15})$$

Avec :

$v$  : 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.2.3. Organigramme de calcul

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

**Etape 0 :** Introduction des données initiales : la conductivité de la couche de pollution  $\gamma_p$ , la longueur totale de fuite  $L_f$ , le rayon effectif de l'isolateur  $r_{iso}$ , la mobilité des électrons  $\mu$ , la valeur initiale de la tension appliquée  $U$ , le pas d'incrément de l'amplitude de la tension  $du_m$  et le pas d'incrément du temps  $dt$ .

**Etape 1 :** Initialisation de la longueur d'arc ( $x=0 \% L$ ) et du temps ( $t=0$ ).

**Etape 2 :** Calcul de la résistance  $R_p$  et la résistance linéique  $r_p$  de la couche de pollution non court-circuitée par l'arc, du courant de fuite  $i$  et des champs au pied de l'arc  $E_{arc}$  et dans la pollution  $E_p$ .

**Etape 3 :** Vérification du critère de propagation de Hampton ( $E_p > E_{arc}$ ), puis accomplissement de l'étape 4 (pas de propagation) si le champ au pied de l'arc est inférieur à celui dans la pollution et de l'étape 5 (propagation) dans le cas contraire.

**Etape 4 :** vérification de durée de l'onde, si  $t < t_p$  ( $t_p$  est la durée de queue à mi-amplitude de la tension impulsionnelle) nous augmentons le temps ( $t=t+dt$ ), sinon nous incrémentons l'amplitude de la tension ( $u_m=u_m+du_m$ ) et reprenons les étapes 1 à 3.

**Etape 5 :** Calcul de la longueur d'arc  $x$ , de sa résistivité  $\rho_{arc}$ , de sa résistance  $R_{arc}$ , de son rayon  $r_d$ , de sa chute de tension  $u_{arc}$ , du courant  $i$  et la vitesse de propagation  $v$ .

**Etape 6 :** Test de la nouvelle valeur de la longueur d'arc ( $x=x+vdt$ ) ; accomplissement de l'étape 7 (pas de contournement) si cette longueur n'atteint pas la longueur critique estimée à deux tiers de la ligne de fuite totale de l'isolateur ( $x_c=2/3 L_f$ ) [17, 23], et de l'étape 8 (contournement) dans le cas contraire.

**Etape 7 :** Incrémentation du temps ( $t=t+dt$ ) et reprise des étapes 2 à 6.

**Etape 8 :** Prélèvement de la tension critique de contournement correspondant.

**Etape 9 :** Exploitation des résultats.

Ces différentes étapes peuvent être représentées dans l'organigramme de la figure (III.3) suivante :

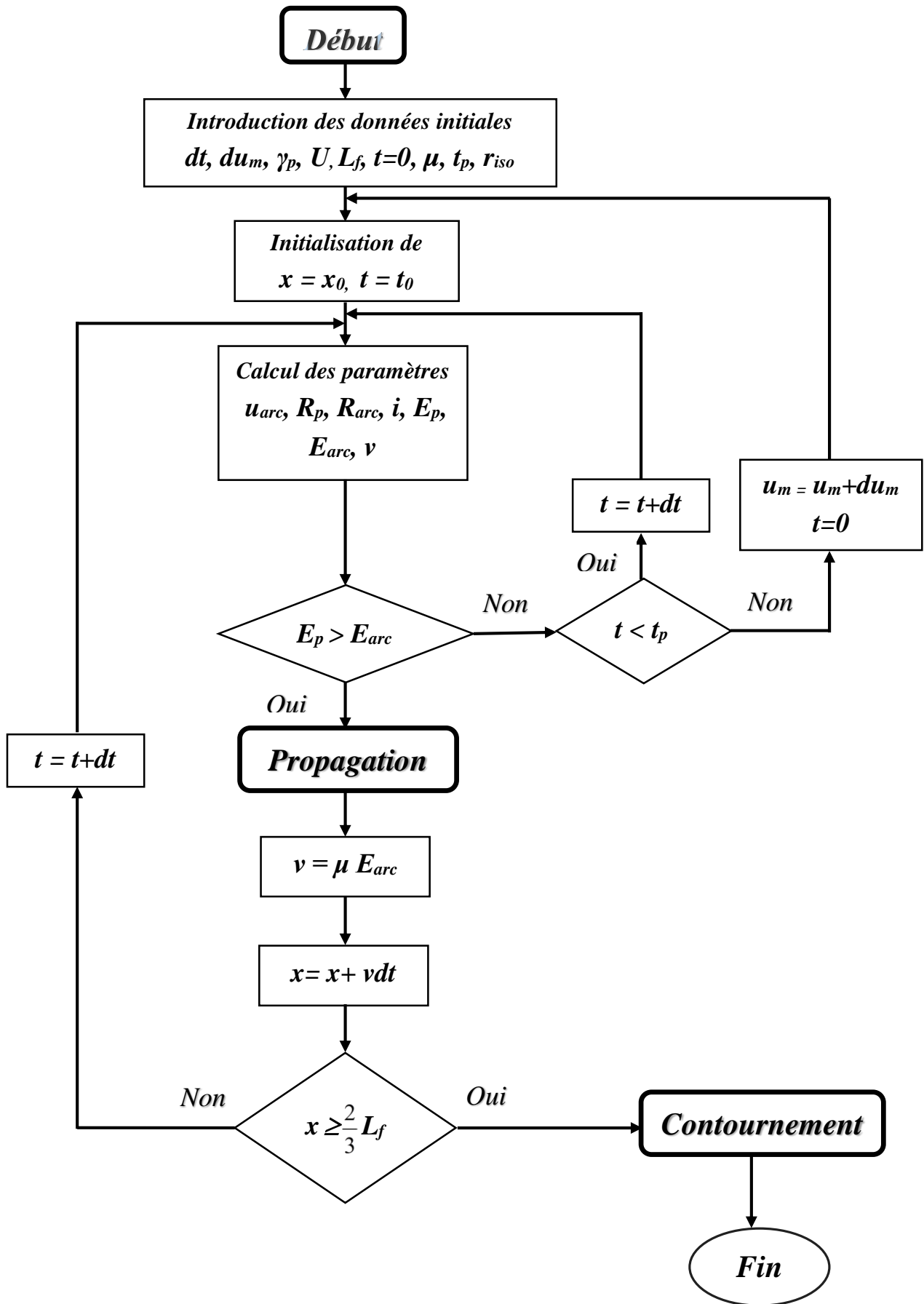


Figure III.3 Organigramme du modèle dynamique.

### III.3. Conclusion

Nous avons étudié le comportement dynamique. Celui-ci est basé sur un circuit électrique résistif identique à celui proposé par Obenaus et utilise le critère de propagation de Hampton. Tenant compte de la géométrie de l'isolateur, ce modèle permet de calculer le temps au contournement et la tension de contournement et de suivre l'évolution temporelle et spatiale des différents paramètres caractérisant l'état critique des surfaces isolantes polluées.



---

# Chapitre IV

## *Résultats et interprétation*

---



## IV.1. Introduction

Pendant son fonctionnement, un système d'isolation peut subir des surtensions accidentelles. Celles-ci sont d'origine atmosphérique (la foudre) ou de manœuvre (ouverture d'un disjoncteur). Cependant, comme il est difficile de reproduire ces formes d'ondes en laboratoire pour tester et dimensionner l'appareillage, on a recours à des formes simples – bi-exponentielle – produites par des générateurs d'impulsions types multiplicateurs de Marx.

Dans ce chapitre nous allons tenter de valider notre modèle en tension impulsionnelle en se basant sur les résultats numériques et expérimentaux rapportés dans la littérature.

## IV.2. Génération d'ondes de choc

Une onde de choc est un type d'onde, mécanique ou d'une autre nature, associé à l'idée d'une transition brutale. Elle peut prendre la forme d'une vague de haute pression, et elle est alors souvent créée par une explosion ou un choc de forte intensité. Parmi les différentes ondes de choc, il y a la tension impulsionnelle qui est une tension transitoire aperiodique qui habituellement croît rapidement jusqu'à une valeur crête, puis décroît plus lentement jusqu'à zéro.

### IV.2.1. Description

Le générateur de choc est de type Marx [2] ayant les composants suivantes :

- ✓ Nombre d'étages.
- ✓ Tension nominale.
- ✓ Energie.

### IV.2.2. Onde impulsionnelle

Il est impossible de reproduire en laboratoire les formes complexes de surtensions observées ou attendues sur les réseaux ; c'est pourquoi, les résultats ont été obtenus avec une onde bi-exponentielle pure pouvant être produite en laboratoire par les générateurs de choc. Le principe de ces générateurs (générateur de Marx) est basé sur la charge de condensateurs en parallèle, puis de leur décharge en série à travers des résistances. 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  $T_2$

où  $T_{90}$  est le temps au bout duquel l'impulsion atteint 90% de sa valeur crête  $U_m$  et  $T_{30}$  celui correspondant à 30%  $U_m$ . Chaque forme d'onde est caractérisée par le rapport  $T_1/T_2$ ,  $T_1$  et  $T_2$  étant exprimé en  $\mu s$  [23].

L'expression d'une onde bi-exponentielle peut être obtenue en utilisant un schéma équivalent. Ceci consiste en une capacité  $C_g$  qui est chargée à la tension requise  $u$  et qui se décharge à travers un

circuit ; les constantes de temps peuvent être ajustées afin d'obtenir la forme d'onde désirée. Le circuit de base de ce générateur est donné dans la (Figure IV.1).

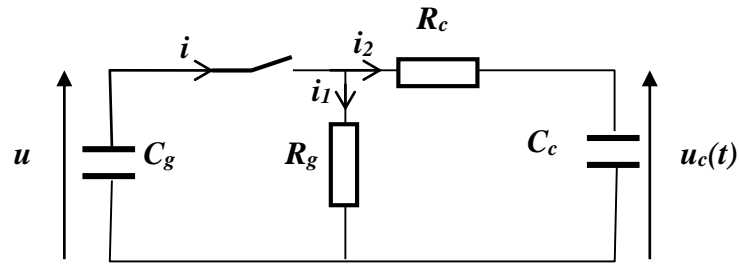


Figure IV.1 Schéma équivalent du générateur de Marx.

Les éléments  $R_c$  et  $C_c$  contrôlent le front et  $R_g$  et  $C_g$  la queue de l'onde. Une analyse de ce circuit, permet d'obtenir l'expression de la tension de sortie  $u(t)$ . En utilisant les propriétés de la transformée de Laplace, nous aurons :

$$u_c(t) = u_t \left[ \exp\left(\frac{-t}{T_a}\right) - \exp\left(\frac{-t}{T_b}\right) \right] \quad (\text{IV.1})$$

Nous voyons ainsi que la forme de l'onde de tension  $u(t)$  dépend des constantes de temps  $T_a$  et  $T_b$ .

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

et

$$T_b = \frac{T_a}{\exp\left(1.35 + 1.2 \ln \frac{T_2}{T_{cr}}\right)} \quad (\text{IV.3})$$

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

$$t = T_{cr} = \frac{T_a T_b}{T_a - T_b} \ln \frac{T_a}{T_b} \quad (\text{IV.4})$$

où  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $T_{cr}$  et  $u_t$  sont respectivement le temps de montée, le temps à mi-amplitude, le temps crête et un facteur amplitude.

D'autre part, en posant  $\delta = T_a / T_b$ , on peut déduire  $u_t$  :

$$u_t = \frac{u_m}{\left( \delta^{1/(1-\delta)} - \delta^{\delta/(1-\delta)} \right)} \tag{IV.5}$$

Finalement,  $u(t)$  sera obtenu à partir de l'équation (IV.1).

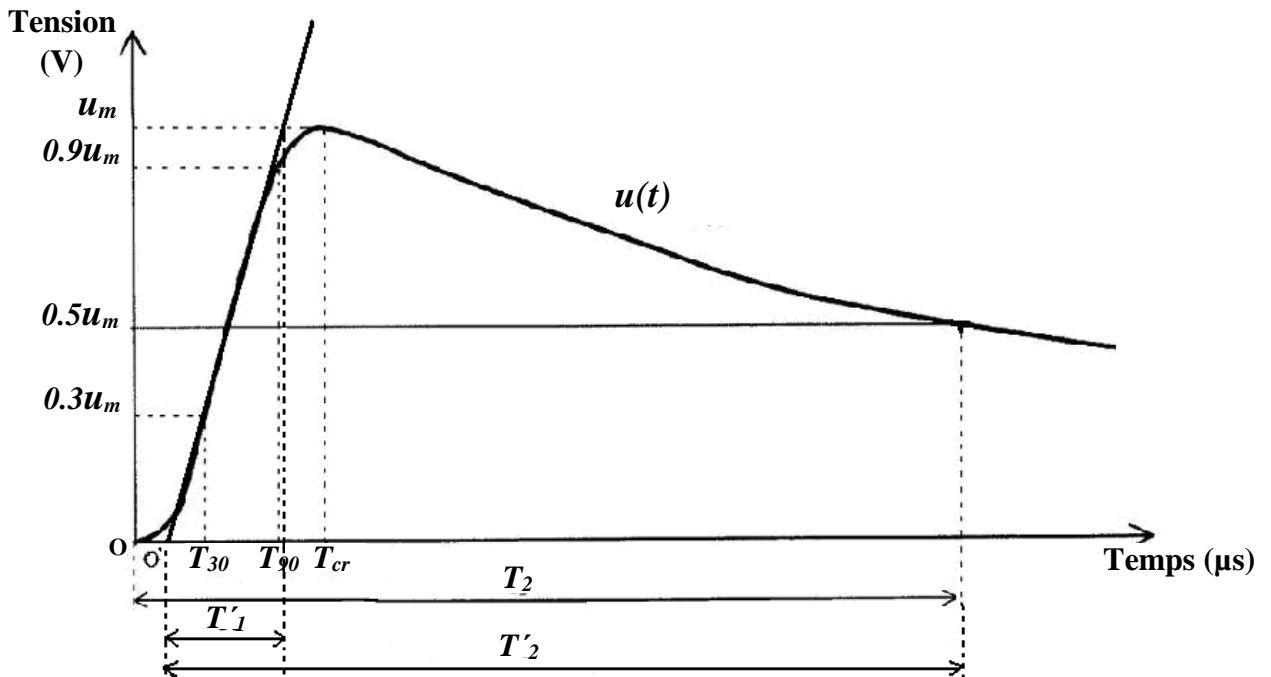


Figure IV.2 Forme d'une onde impulsionnelle.

### IV.3. Validations

La validation de notre modèle en tension impulsionnelle est basé sur une comparaison de nos résultats à ceux obtenus par autres chercheurs. [23].

#### IV.3.1. Validation basée sur le courant

Nous validons notre modèle en comparant nos valeurs du courant à celles expérimentales de Matsuo et al et numériques de Dhahbi. La forme du courant de la décharge est représentée dans les (Figure IV.3) et (Figure IV.4). Notons que la résistance linéique est égale  $380\Omega/cm$ , la valeur maximale de la tension appliquée  $10.5 kV$  (soit  $1.1 \times U_{50\%}$ ) et  $T_1/T_2$  égaux à  $10/800\mu s$ .

Notre modèle concorde d'une part, en forme, en amplitude et en temps avec celui de Matsuo et al et d'autre part en forme et en amplitude uniquement avec le modèle de Dhahi.

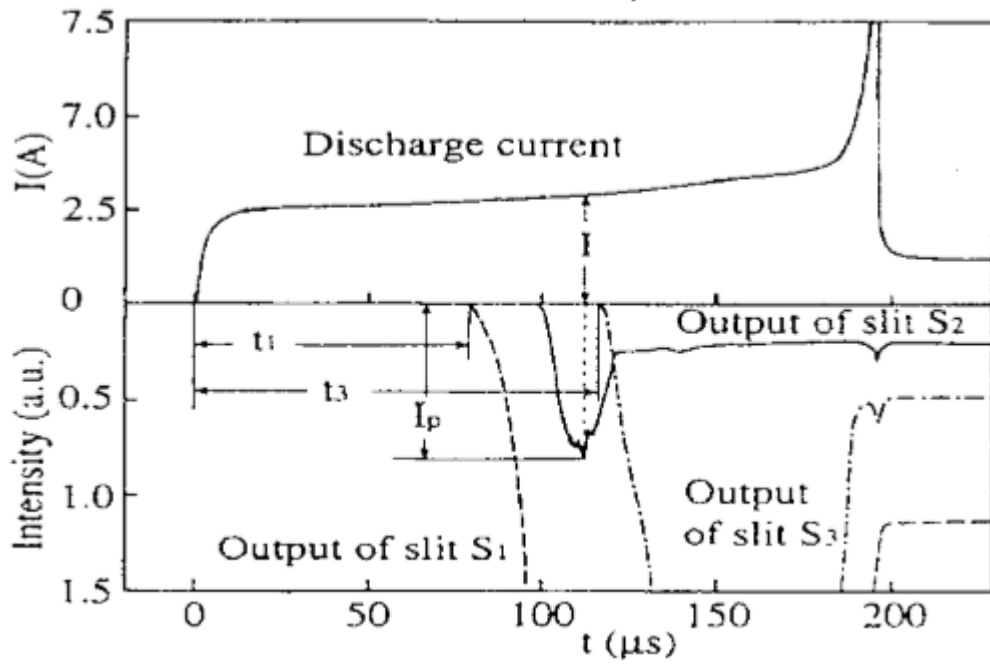


Figure IV.3 Forme de courant présentée par Matsuo et al. [23]

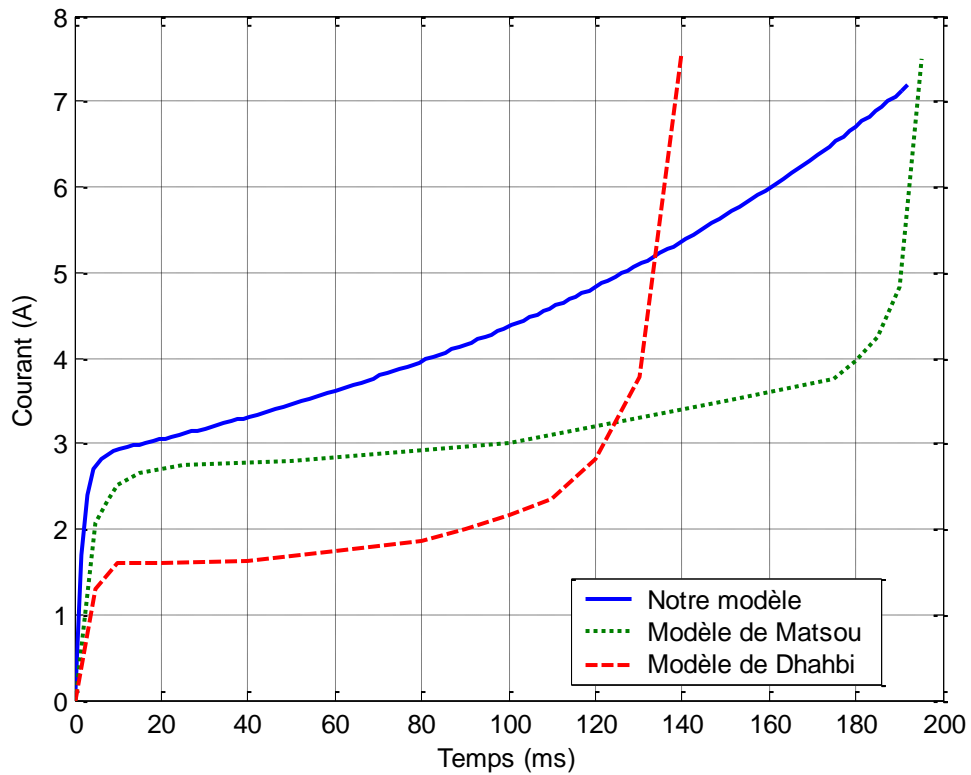


Figure IV.4 Courant de la décharge en fonction du temps, cas d'un isolateur de longueur de fuite 10cm, de largeur 1cm, de résistance linéique  $380\Omega/cm$  et une onde de  $10/800\mu s$ .

## IV.4. Application

L'objectif ici est de décrire la dynamique de l'arc électrique évoluant sur une surface isolante polluée sous tension impulsionnelle, pour cela nous présentons les variations temporelle et spatiale des différents paramètres régissant les phénomènes de conduction et de décharge électrique. Pour cela, nous faisons une application numérique en considérant le même modèle que Matsuo et al [22] et les mêmes résistances linéiques.

### IV.4.1. Vitesse de propagation en fonction du temps

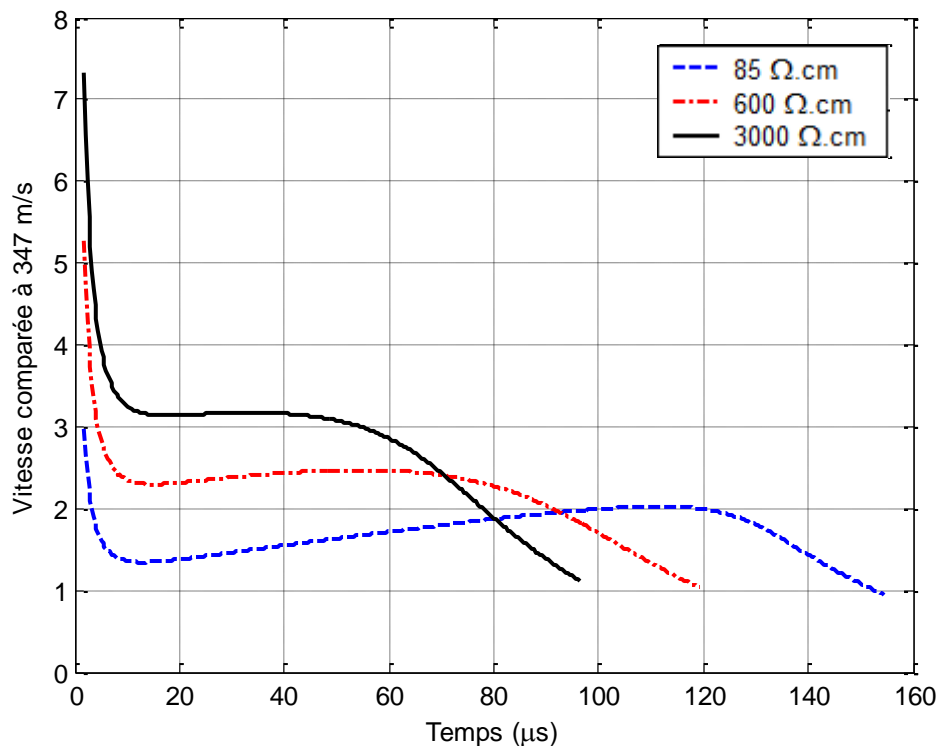


Figure IV.5 Vitesse de propagation comparée à 347m/s en fonction du temps.

Cette figure présente l'évolution de la vitesse de propagation en fonction du temps pour différentes résistances linéiques. Durant la phase de préparation, cette vitesse diminue brusquement, augmente légèrement pendant la phase de propagation et diminue une seconde fois durant la phase de contournement. Par ailleurs, cette vitesse augmente avec l'augmentation de la résistance linéique.

### IV.4.2. Tension de l'arc en fonction du temps

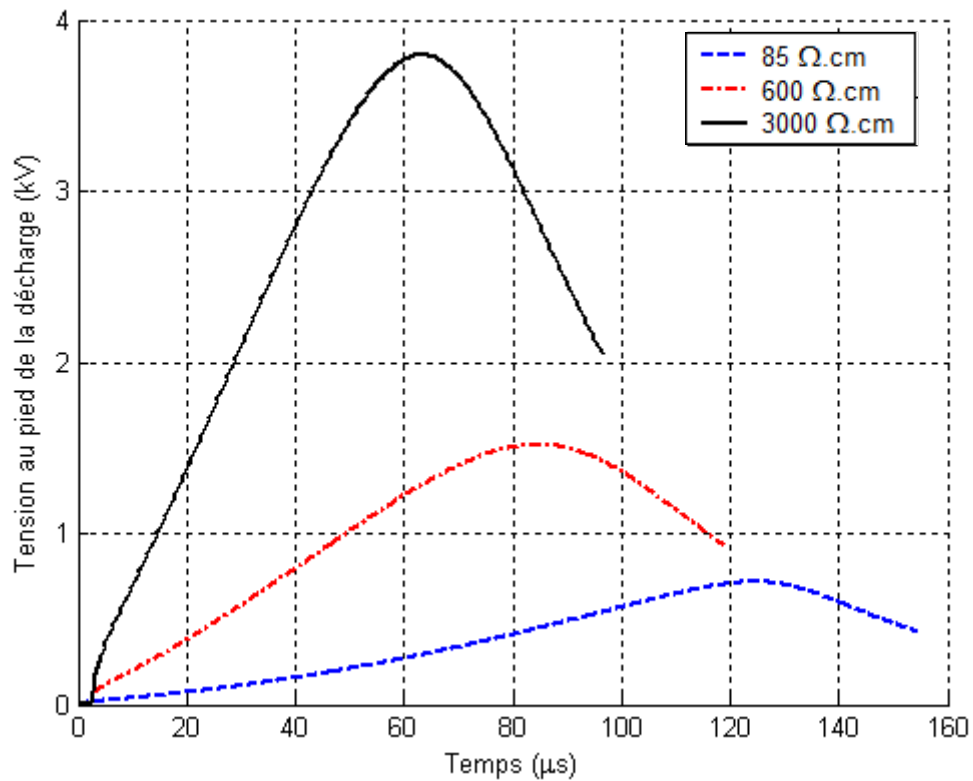


Figure IV.6 Tension de l'arc en fonction du temps.

Cette figure montre la variation dans le temps de la tension de l'arc, pour différentes résistances linéiques. La tension de l'arc augmente pendant la phase de propagation et diminue ailleurs.

Nous remarquons également que l'augmentation de la résistance linéique engendre l'augmentation de la tension d'arc.

### IV.4.3. Courant de la décharge en fonction du temps

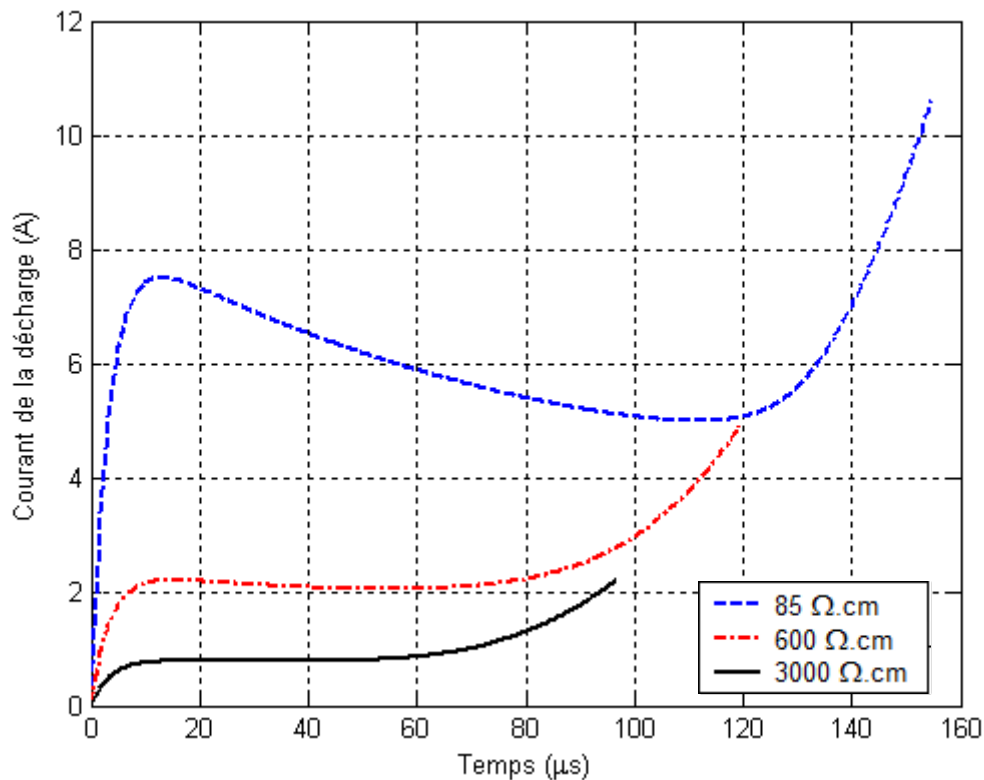


Figure IV.7 Courant de la décharge en fonction du temps.

La caractéristique de la figure (IV.7), donne le courant de la décharge en fonction du temps, montre que durant la phase de préparation de l'arc électrique, la forme du courant suit la tension appliquée. Durant la phase de propagation, le courant diminue lentement. Cette décroissance est suivie par une augmentation brutale correspondant à la phase de contournement. Nous constatons également que plus la résistance linéique est faible plus le courant est plus importants.

#### IV.4.4. Longueur de la décharge en fonction du temps

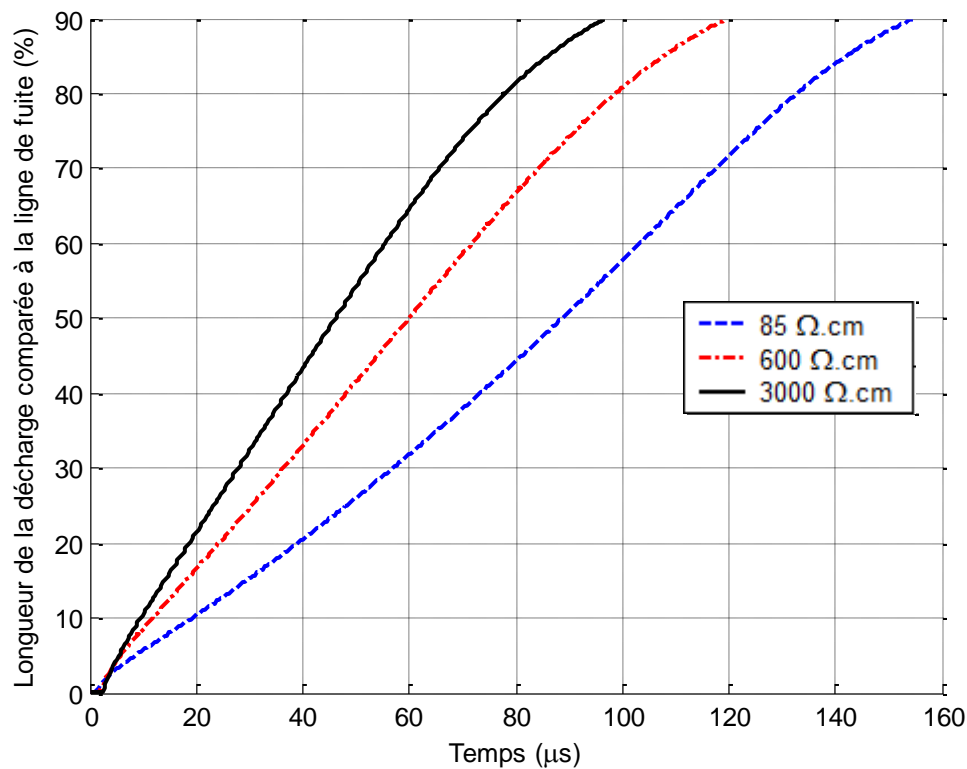


Figure IV.8 Longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite en fonction du temps.

L'évolution de la décharge dans le temps est illustrée dans la figure (IV.8). Cette dernière montre que l'arc électrique augmente d'une manière régulière dans le temps. Et nous remarquons que plus la résistance linéique n'est importante, plus vite l'arc se déplace. En effet, l'augmentation de la résistance linéique engendre l'élongation de l'arc.

### IV.4.5. Puissance et énergie transférées dans l'arc en fonction du temps

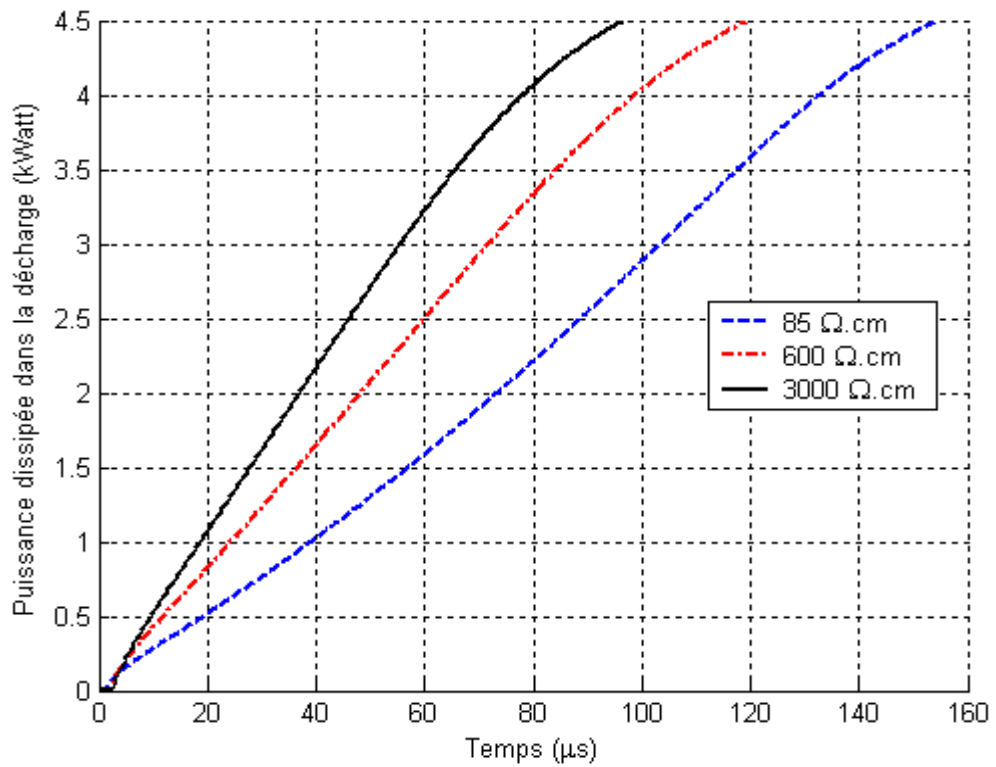


Figure IV.9 Puissance dissipée dans l'arc en fonction du temps.

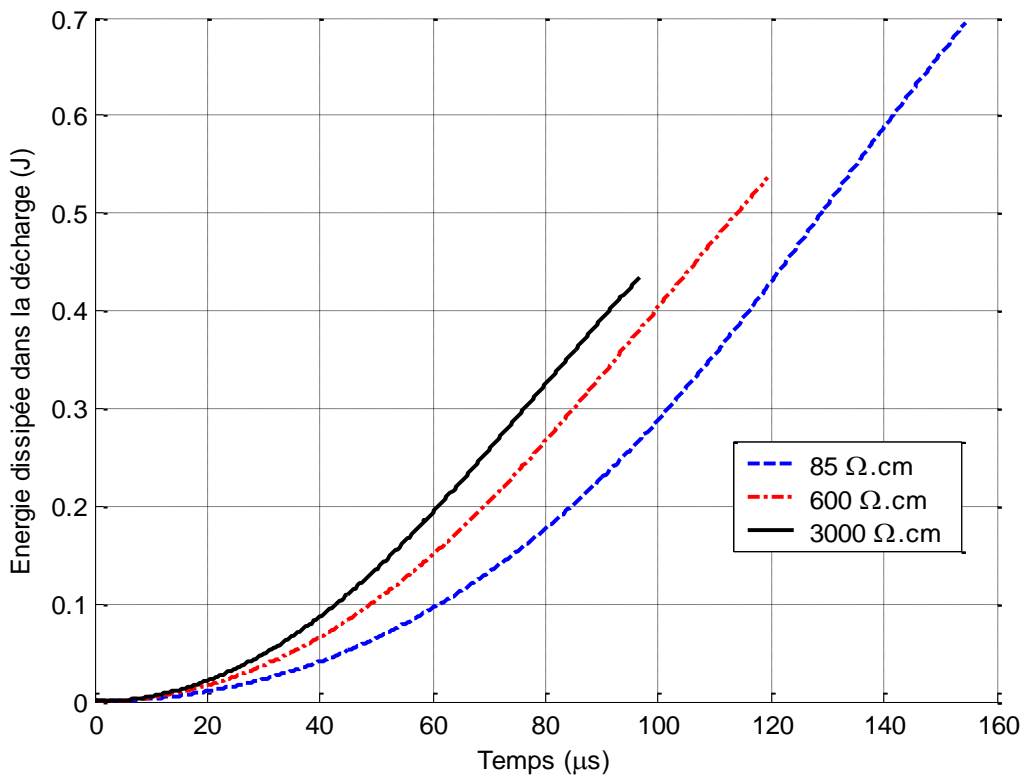


Figure IV.10 Energie dissipée dans l'arc en fonction du temps.

La puissance dissipée dans l'arc électrique possède la même allure que celle de la longueur de l'arc (Figure IV.9). Par ailleurs, l'énergie transférée dans l'arc augmente en fonction du temps (Figure IV.10).

En outre, l'augmentation de la résistance linéique de la pollution engendre la diminution de la puissance et de l'énergie transférées dans le canal d'arc. En effet, plus la résistance linéique est grande, plus l'arc se développe en absorbant moins de puissance et donc moins d'énergie.

#### IV.4.6. Résistance de l'arc en fonction du temps

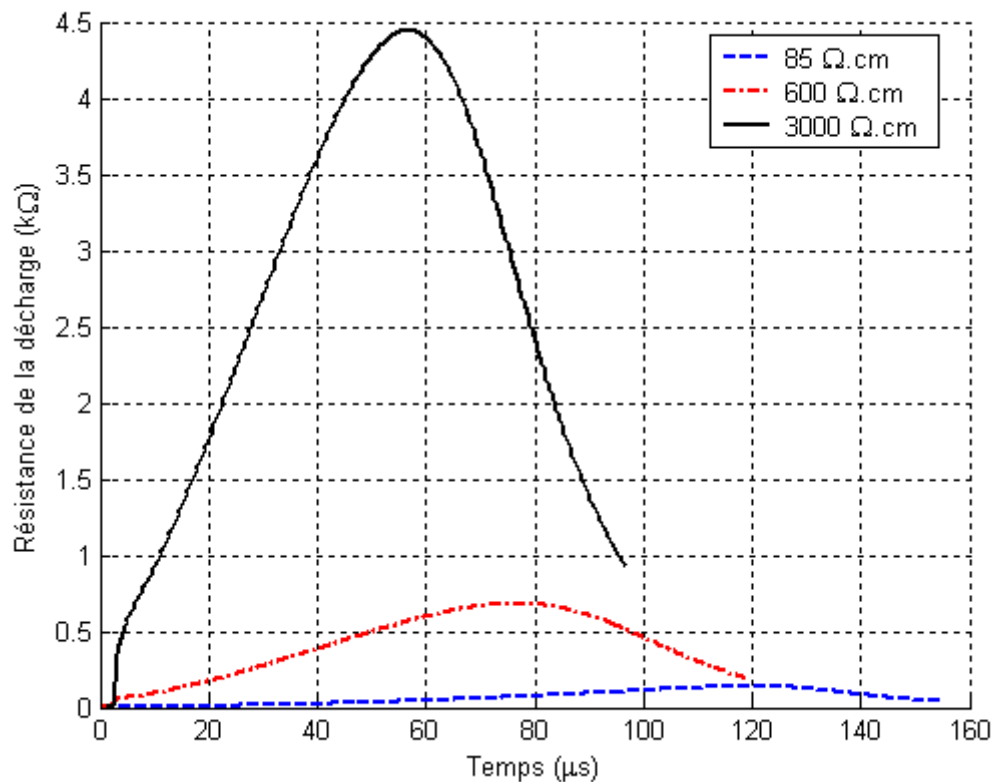


Figure IV.11 Résistance de l'arc en fonction du temps.

La variation de la résistance de l'arc en fonction du temps est présentée à la figure (IV.11). Nous constatons que cette résistance augmente jusqu'à un maximum puis diminue par la suite. Par ailleurs, il est évident que l'augmentation de la résistance linéique entraîne l'augmentation de la résistance de la décharge.

### IV.4.7. Relation Courant et rayon de l'arc - la longueur de l'arc

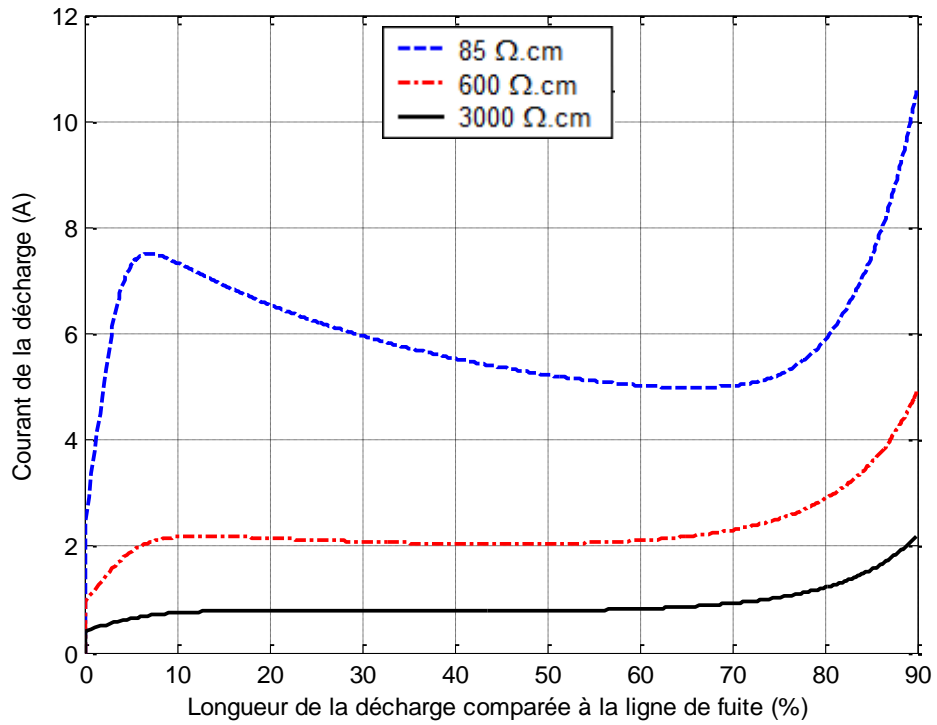


Figure IV.12 Courant de la décharge en fonction de la longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite.

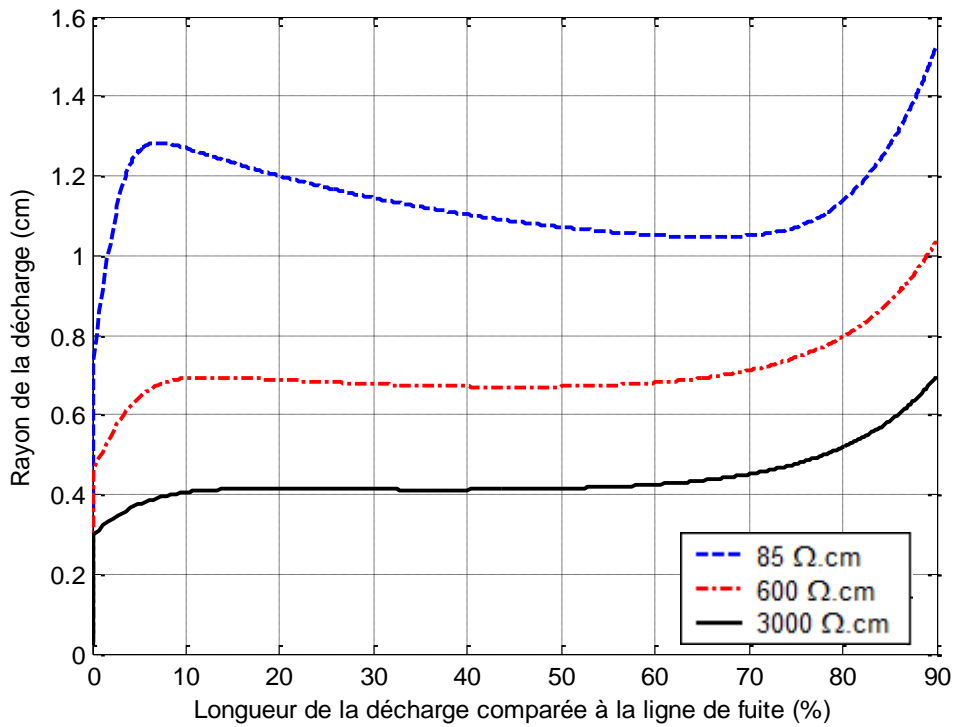


Figure IV.13 Rayon de la décharge en fonction de la longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite.

Les figures (IV. 12) et (IV. 13) présentent la variation du courant et du rayon de la décharge en fonction de la longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite respectivement. Nous constatons qu'avant que le critère de propagation ne soit vérifié, la forme du courant et du rayon de la décharge suivent la tension appliquée. Durant la phase de propagation, le courant et le rayon diminuent légèrement. Suivie d'une augmentation brutale correspondant à la phase de contournement. Il est évident que l'augmentation de la résistance linéique entraîne diminution le courant et le rayon de la décharge.

#### IV.4.8. Relation Résistance de l'arc - la longueur de l'arc

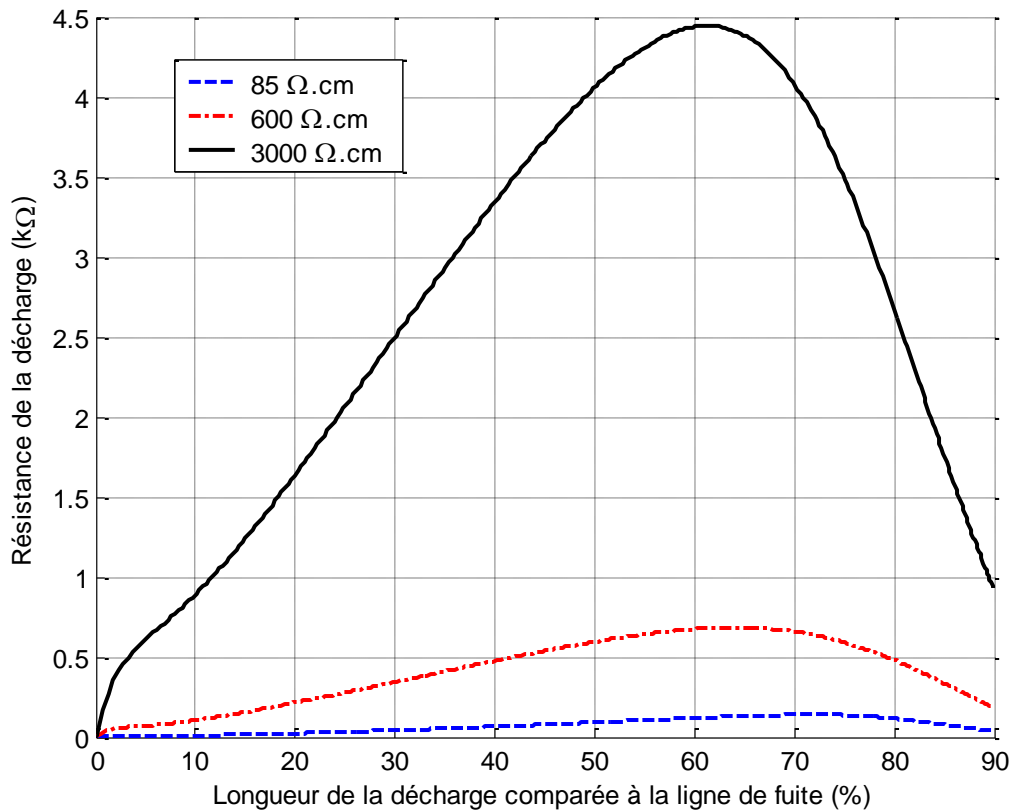


Figure IV.14 Résistance de la décharge en fonction de la longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite.


Cette figure montre la variation de la résistance de l'arc en fonction de la longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite. Nous observons que la résistance d'arc augmente jusqu'à une certaine longueur critique, puis diminue. Ainsi, cette longueur critique varie légèrement en fonction de la résistance linéique, car plus la résistance linéique est grande, plus que cette longueur critique est faible.

#### IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement dynamique d'un isolateur pollué soumis à une tension impulsionnelle. Une concordance a été obtenue en comparant nos résultats à ceux rapportés dans la littérature [23].

Comme principales conclusions, le courant et le rayon de la décharge augmentent rapidement durant la phase de préparation, diminuent lentement pendant la phase de propagation, puis augmentent rapidement durant la phase de contournement. Par ailleurs, la longueur de la décharge, la puissance et l'énergie augmentent régulièrement. La tension au pied de la décharge et la résistance de la décharge augmentent rapidement durant la phase de propagation jusqu'à une valeur critique, puis diminuent pendant la phase de contournement. En peu dire que lorsque la longueur de la décharge augmente, la résistance de la partie non court-circuitée par cette décharge diminue.

Par ailleurs, nous avons constaté que la longueur critique de l'arc augmente légèrement avec la diminution de la résistance linéique.



# Conclusion générale

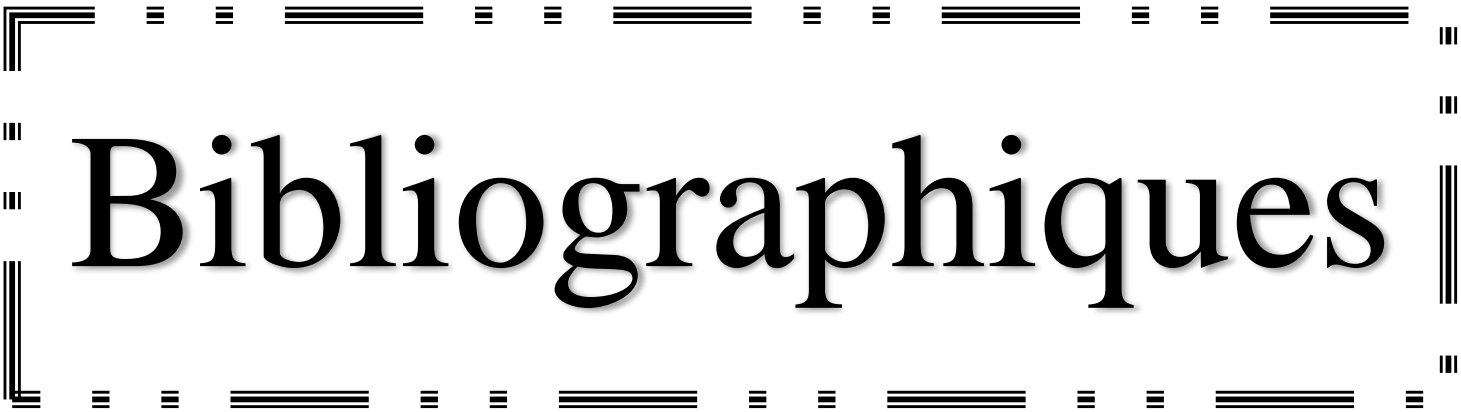
## *Conclusion générale*

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié le phénomène de contournement des isolateurs pollués des lignes hautes tension. Ce travail nous a permis de mieux comprendre le mécanisme du contournement et d'analyser différents paramètres pouvant influencer la tension de contournement et la dynamique de la décharge.

Dans ce travail, nous avons rappelé les principaux modèles statiques et dynamiques rapportés dans la littérature, en précisant leur caractère et en discutant leur domaine de validité. Nous avons proposé, par la suite, un modèle dynamique représentatif de l'arc électrique. Ce modèle utilise le critère de propagation de Hampton et se base sur le circuit électrique équivalent d'Obenaus. Il permet d'évaluer la tension de contournement, le temps au contournement et les différentes grandeurs caractérisant l'arc (le courant dans l'arc, sa longueur, sa résistance, sa tension, le champ à son pied), ainsi que la résistance de pollution, le champ dans la pollution et la vitesse de propagation de l'arc.

Un accord a été obtenu en comparant nos résultats à ceux rapportés dans la littérature. Les caractéristiques que nous avons obtenues présentent, en général, trois évolutions distinctes correspondant à la phase de préparation (avant propagation), la phase de propagation et la phase de contournement. La longueur critique correspondant à la fin de la phase de propagation et le début de la phase de contournement, varie en fonction de la résistivité. Nous estimons, par conséquent, que notre modèle est un outil appréciable de prédiction du comportement d'un isolateur pollué, soumis à une tension impulsionnelle.

Cependant, nous avons traité le phénomène de contournement uniquement du point de vue électrique. Cette analyse ne peut à elle seule expliquer les mécanismes réels intervenant dans la génération et l'élongation des décharges électriques sur les isolateurs pollués. Pour remédier cet handicap, une connaissance de la physique de la décharge s'avère indispensable.



# Bibliographiques

*Références bibliographiques*

- [1]. **Mohamed Amine SOUFI, Menouar ZEMIRLINE**, « Conception d'un Modèle Dynamique de Contournement d'un Isolateur Pollué sous Tension Alternative 50 Hz », Mémoire de Magister, en Génie Electrique (Electrotechnique) à l'ENP, Juin 2004.
- [2]. **GUIA Talal**, « Comportement d'un Modelé D'isolateur Sous Tension Impulsionnelle » Mémoire de Magister, en Génie Electrique (Electrotechnique) à l'ENP, 10, Avenue Hassen Badi, BP 182, El-Harrach, Alger, Algérie.
- [3]. **A.Tilmatine**, « Isolateurs des lignes aérienne haute tension », cours chapitre 6, juin 2002.
- [4]. **CHAKOU Abdelkarim, DJEMMAA Mohamed** « Elaboration d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous une tension impulsionnelle» Projet de fin d'Etudes, Département d'électrotechnique, Université Kasdi Merbah–Ouargla, juin 2012.
- [5]. **Mr. Sid Ahmed Bessedik**, « Contournement des isolateurs pollutes », these de doctorat, Département d'électrotechnique, Option: Haute Tension et Décharges Electriques. Université des Sciences et de la Technologie D'Oran Mohamed Boudiaf, Soutenue le 28 juin 2015.
- [6]. **M.Terkmani, M .Bouamer**, « Contournement des isolateurs des lignes de haute tension », PFE, USTO, Juin 2005.
- [7]. **F.Amidi, K.Ouerdane**, « Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30 kV en régions littorales », Projet de fin d'Etudes, Département d'électrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bâb Ezzouar, juin 1998.
- [8]. **A. Mekhaldi**, « Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternatives 50 Hz », Thèse de doctorat, ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Septembre1999.
- [9]. **CEI 60 - 1**, « Techniques des Essais à Haute Tension Définitions et Prescriptions Générales relatives aux Essais », Deuxième Edition, 1989.
- [10]. **M. Tegar**, « Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Électriques sur des Isolateurs Installés en Régions Polluées », Thèse de Magister ENP, Juillet 1993.
- [11]. **W. Heise, G.F, luxa, G.Revrery, M. P. Verma**, « Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide », CIGRE, rapport 33-09, Paris. France, 1982.
- [12]. **Boudjamaa Med Abdelhakim, Sebti Redouane**, « Modélisation Des Phénomènes de Pollution Des Isolateurs de Haute Tension » Projet de fin d'Etudes, Département Electrotechnique Industriel, Université Kasdi Merbah–Ouargla, juin 2012.

- [13]. **D. Mayr**, « Beitrag Zur Theorie der Statischen und der Dynamishchen Litchbogens », Arch. F. Electrotechnick, Vol. 37, pp. 558-608, 1943.
- [14]. **Siméon DIAMPENI KIMBAKALA**, « Modélisation Dynamique des Décharges se propageant sur des Surfaces Isolantes Polluées avec des Dépôts Discontinus sous Différentes Formes de Tension », These de DOCTEUR (Arrêté du 30/03/1992) Spécialité : Génie Electrique, L'Ecole Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon, 18 décembre 2007.
- [15]. **F. Rizk**, « Mathematical Models for Pollution Flashover », Electra, Vol. 78, pp. 71 -103, Paris, France, 1981.
- [16]. **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, Decembre 1995.
- [17]. **M. Tegar**. « 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, Mardi 29 Avril 2003.
- [18]. **D.Namane**, « Effet de discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateurs haute tension, sous la fréquence 50 Hz », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Février 1998.
- [19]. **F. Obenaus**, « Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge », Deutsche Elektrotechnik, vol. 4, pp. 135 – 136, 1958.
- [20]. **Mr. BELHOUCHE KHALED**, « Estimation des paramètres de l'arc de contournement des isolateurs pollués en utilisant l'approche génétique », Thème de Magister en Electrotechnique, Option: Réseaux électriques, Université Ferhat Abbas – Setif.
- [21]. **S. Flazi**, « Etude du contournement Electrique des isolatrices hautes tensions pollués Critère d'elongation de la décharge et dynamique du phénomène », Doctorat d'état de l'université Paul Sabatier, Toulouse, 1987.
- [22]. **Youcef GUEHRAR**, « Elaboration d'un Modèle Dynamique de Contournement d'un Isolateur pollué sous Tension Alternative et Impulsionnelle », Mémoire de Magister, en Génie Electrique (Laboratoire de Haute Tension) à l'ENP, 05/12/2004.
- [23]. **N. Dhahbi**, « Modélisation Dynamique des Décharges sur les Surfaces d'Isolateurs Pollué sous Différentes Formes de Tensions : Elaboration d'un Critère Analytique de Propagation », Thème de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, France, 1998.