

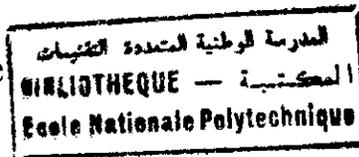
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

M0028/04B

Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Electrique
Laboratoire de Haute Tension

Mémoire de Magister
Présenté par Youcef GUEHRAR
Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Thème



Elaboration d'un Modèle
Dynamique de Contournement d'un
Isolateur Pollué sous Tensions
Alternative et Impulsionnelle

Soutenu le 05/12/2004 devant la commission d'examen:

Président : A. BOUBAKEUR , Professeur, ENP
Rapporteurs : M. TEGUAR, Maître de Conférences, ENP
M. OUADJAOUT, Chargé de Cours, ENP
Examineurs : A. MEKHALDI, Maître de Conférences, ENP
H. MOULAI, Maître de Conférences, USTHB
S. BOUAZABIA, Chargé de Cours, USTHB

M10058/04B

ملخص:

يعرض هذا العمل نموذجاً ديناميكياً يتنبأ تصرف عازل ملوث تحت توتر متناوب أو توتر نبضي. بالاعتماد على دارة كهربائية مكافئة و باستعمال قوانين فيزيائية، يسمح هذا النموذج بحساب توتر الإحاطة و الزمن المؤدي إلى الإحاطة، ويوصف ديناميكياً التفريغ أخذاً بعين الاعتبار هندسة العازل و كذا التغيرات اللحظية لكل من عوامل التفريغ (مثل مقاومة التفريغ، تياره ، نصف قطره، طوله، وناقليته)، السرعة اللحظية للانتشار، وكذا الحقول في كل من التلوث والقوس الكهربائي. نناقش النتائج الرقمية المحصل عليها بمقارنتها مع نتائج أخرى محررة من قبل باحثين آخرين.

الكلمات المفتاحية: عازل - تلوث - إحاطة - نموذج ساكن - نموذج ديناميكي - قوس كهربائي - تيار التفريغ - انتشار - توتر متناوب - توتر نبضي.

Résume :

Ce travail présente un modèle dynamique permettant de prédire le comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative ou 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 statique - modèle dynamique - arc électrique - courant de la décharge - propagation - tension alternative - tension impulsionnelle.

Abstract:

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

Key words: insulator - pollution - flashover - static model dynamic model - electric arc - discharge current - propagation - AC voltage - impulsion voltage

الإهداء

أهدي هذا العمل المتواضع

إلى التي أحسنت تربيتي وسهرت على رعايتي أمي، أمي، أمي،

إلى الذي أحسن تربيتي أبي ————— العزيز،

إلى جدتي العزيزة الحاجة قمره،

إلى نخالي العزيز إبراهيم،

إلى كل أعمامي وعماتي،

إلى إخوتي عقبة وعبد الرحيم،

إلى أخواتي وأبنائهن،

إلى كل أصدقائي وزملائي.

Remerciements

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Haute Tension du département de Génie Electrique de l'Ecole Nationale Polytechnique, sous la direction Scientifique de Monsieur **M. TEGUAR**, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique, et de Monsieur **M. OUADJAOUT** Chargé de Cours à l'Ecole Nationale Polytechnique. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma très sincère reconnaissance pour leurs précieuses directives, leur disponibilité, leurs fructueux conseils, leur suivi constant, leur courtoisie si raffinée et leurs qualités humaines.

Je remercie également Monsieur **A. BOUBAKEUR**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, et Monsieur **A. MEKHALDI**, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour leurs conseils combien utiles, leur grande disponibilité et leurs qualités humaines.

J'adresse mes vifs remerciements au président du jury ainsi qu'aux examinateurs qui ont accepté de juger ce travail.

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

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة —
BIBLIOTHEQUE —
Ecole Nationale Polytechnique

Sommaire

CHAPITRE I

MODELES STATIQUES ET DYNAMIQUES DE CONTOURNEMENT.....4

I.1. INTRODUCTION	5
I.2. MODELES STATIQUES DE CONTOURNEMENT	5
I.2.1. Modèle d'Obenaus	5
I.2.2 Modèle de Neumarker	6
I.2.3 Modèle de Rizk	7
I.2.4 Modèle de Claverie et Porcheron	7
I.2.5 Modèle de Rao et Gopal	8
I.2.6 Modèle d'Alston et Zoledziowski	8
I.2.7 Modèle de Danis	9
I.2.8 Modèle de Nacke et Wilkins	10
I.2.9. Modèle de la couche mixte	12
I.2.10. Modèle du disque circulaire	13
I.2.11. Modèles de Tegar	14
I.3. MODELES DYNAMIQUES DE CONTOURNEMENT	16
I.3.1. Mécanisme de propagation	16
I.3.1.1. Propagation par ionisation	16
I.3.1.2. Propagation par force électrostatique	17
I.3.2. Critères de propagation de la décharge	17
I.3.2.1. Critère de Hampton	17
I.3.2.2. Critère de Hesketh	18
I.3.2.3. Critère de Wilkins	18
I.3.2.4. Critère de Anjana et Lakshminarasimha	18
I.3.2.5. Critère de Dhahbi, Beroual et Krahenbul	18
I.3.3. Modèles dynamiques	19
I.3.3.1. Modèle de Rizk	19
I.3.3.2. Modèle de Anjana et Lakshminarasimha	20
I.3.3.4. Modèle de Sundararajan et Gorur	21
I.3.3.3. Modèle de Dhahbi et Beroual	23
I.4. CONCLUSION	26

CHAPITRE II

CONCEPTION DU MODELE DYNAMIQUE	27
II.1. INTRODUCTION	28
II.2. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES	28
II.3. CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT	28
<i>II.3.1. Propagation de la décharge</i>	29
II.3.1.1. Initialisation de la décharge	29
II.3.1.2. Critère de propagation	29
II.3.1.3. Circuit de propagation	30
<i>II.3.2. Paramètres du circuit électrique</i>	30
II.4. ORGANIGRAMME DE CALCUL	33
II.5 CONCLUSION	35

CHAPITRE III

RESULTATS ET INTERPRETATION EN TENSION ALTERNATIVE	36
III.1. INTRODUCTION	37
III.2. VALIDATION	38
III.3. APPLICATION	40
<i>III.3.1. Evolution temporelle</i>	40
III.3.1.1. Tension appliquée, tension dans la couche de pollution et tension de l'arc	40
III.3.1.2. Longueur de la décharge	42
III.3.1.3. Courant de la décharge	43
III.3.1.4. Résistance de la couche polluante	44
III.3.1.5. Résistance de l'arc	45
III.3.1.6. Rayon de la décharge	46
III.3.1.7. Champs au pied de l'arc et dans la pollution	47
III.3.1.8. Vitesse de propagation	49
III.3.1.10. Puissance et énergie transférées dans l'arc	50
III.3.1.11. Puissance et énergie fournie par la source	52
<i>III.3.2. Evolution spatiale</i>	53
III.3.2.1. Résistance de l'arc	53

III.3.2.2. Vitesse de propagation.....	54
III.3.2.3. Courant et rayon de la décharge.....	55
III.3.3. Temps au contournement.....	57
III.4. CONCLUSION.....	57

CHAPITRE IV

RESULTATS ET INTERPRETATION EN TENSION IMPULSIONNELLE.....	59
IV.1. INTRODUCTION.....	60
IV.2. ONDE IMPULSIONNELLE.....	60
IV.3. VALIDATIONS :.....	62
IV.3.1. Validation basée sur le courant.....	62
IV.3.2. Validation basée sur la vitesse.....	64
IV.4. APPLICATION.....	66
IV.4.1. Evolution temporelle.....	66
IV.4.1.1. Vitesse de propagation.....	66
IV.4.1.2. Tension dans la couche de pollution et tension de l'arc.....	66
IV.4.1.3. Courant et rayon de la décharge.....	68
IV.4.1.4. Longueur de la décharge.....	70
IV.4.1.5. Puissance et énergie transférées dans l'arc.....	70
IV.4.1.6. Résistance de l'arc.....	72
IV.4.2. Evolution spatiale.....	72
IV.4.2.1. Courant et rayon de la décharge.....	72
IV.4.2.2. Résistance de l'arc.....	74
IV.5. CONCLUSION.....	74
CONCLUSION GENERALE.....	76
CONCLUSION GENERALE.....	77

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction générale

Afin de minimiser les pertes d'énergie, l'isolement des réseaux électriques est réalisé à l'aide des chaînes d'isolateurs en maintenant les conducteurs à une distance suffisante de la masse pour éviter tout risque de contournement. Une très grande part d'importance est alors attachée aux réseaux électriques de transport, 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. Quelle que soit leur nature, les polluants en état sec, ne provoquent pas la dégradation de la rigidité diélectrique [1, 2]. Cependant, l'humidification de ces dépôts solides engendrent, dès la mise sous tension, la naissance d'un faible courant de fuite. Ce dernier circule le long des zones de résistivités différentes et modifie la répartition du potentiel entre électrodes [3]. La décharge électrique peut s'amorcer, si le champ électrique local atteint un certain seuil. Sous certaines conditions, cette décharge peut s'allonger sur la surface de l'isolateur menant au court-circuit de l'électrode haute tension et la masse; c'est le phénomène de contournement, dont les conséquences vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension. Une des caractéristiques principales d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est placé.

En effet, 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. Malgré les travaux aussi bien théoriques qu'expérimentaux, qu'ont été développés, ces mécanismes restent insuffisamment compris, à cause de grand nombre de facteurs difficiles à cerner qui interviennent simultanément dans la génération et la propagation des décharges électriques [1].

Ce travail porte sur l'élaboration d'un modèle dynamique de propagation de l'arc sur une surface isolante polluée soumise à une tension alternative 50 Hz et une 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.

Dans le premier chapitre, nous citerons les principaux modèles de contournement rencontrés dans la littérature. Nous préciserons leur caractère statique ou dynamique, leur aspect empirique, semi empirique ou analytique, ainsi que les facteurs d'influence qu'ils traitent. Des modèles s'appliquant aux arcs sous tension continue et alternative, ainsi que les critères de propagation des décharges électriques, y seront aussi présentés.

Un modèle dynamique permettant de prédire le comportement d'un isolateur pollué sous tension alternative ou impulsionnelle, sera élaboré dans le deuxième chapitre. Ce modèle utilise un critère de propagation 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. En effet, un isolateur pollué et partiellement contourné sera représenté par une décharge électrique de longueur donnée en série avec une résistance représentant la bande de pollution. Le canal de la décharge sera assimilé à des cellules résistives. Chaque cellule nouvellement créée représentera un nouveau déplacement partiel de l'arc.

Nous présenterons dans le troisième chapitre la validation ainsi que l'exploitation numérique de notre modèle sous tension alternative.

Finalement, le quatrième chapitre traitera le cas d'une tension impulsionnelle. Nous comparerons certains de nos résultats de simulation avec ceux obtenus par d'autres chercheurs, et nous exposerons, par la suite une application de notre modèle.

Chapitre I

Modèles Statiques et Dynamiques de Contournement

I.1. Introduction

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

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

I.2. Modèles statiques de contournement

I.2.1. Modèle d'Obenaus

C'est Obenaus [2] qui, dans un travail de pionnier, est à l'origine des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante, sous tension continue. Partant d'un modèle type circuit électrique équivalent, constitué d'un arc de longueur x en série avec une résistance R_p représentant la résistance de la pollution (Figure I.1 où L représente la longueur de fuite totale), il en a déduit la tension d'arc :

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

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

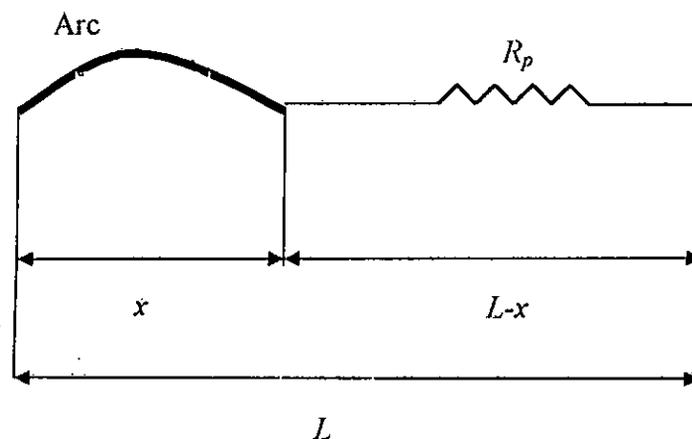


Figure I.1 : Modèle d'Obenaus [2]

Les valeurs des paramètres n et A dépendent du milieu dans lequel s'amorce la décharge. Selon les certaines auteurs [4- 8] : $0.4 \leq n \leq 1$ et $3 \leq A \leq 500$.

A partir de mesures expérimentales sur un canal d'électrolyte, Ghosh et al [8] ont proposé de prendre des valeurs différentes pour A et n caractérisant l'équation de la décharge selon la nature de l'électrolyte utilisé. Les résultats de leurs mesures sont donnés dans le tableau I.1.

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

Tableau I.1 : Constantes caractéristiques selon Ghosh et al [8]

I.2.2 Modèle de Neumarker

En reprenant les travaux d'Obenaus [2], et en y ajoutant l'hypothèse d'une couche de pollution de résistance r_p uniforme par unité de longueur de fuite, Neumarker [9] a proposé l'expression suivante pour la résistance de pollution R_p :

$$R_p = r_p (L - x) \quad (I.2)$$

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

$$U = U_{arc} + r_p (L - x) \quad (I.3)$$

ou encore :

$$U = \frac{Ax}{I^n} + r_p (L - x) \quad (I.4)$$

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

$$I_c = \left(\frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (I.5)$$

et

$$x_c = \frac{L}{n+1} \quad (I.6)$$

L'expression de la tension critique de contournement est par conséquent :

$$U_c = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} L \quad (1.7)$$

1.2.3 Modèle de Rizk

A partir d'une analyse théorique, Rizk [4] 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 établit une relation entre la tension de contournement U_c , la résistance de pollution linéique r_p et la longueur de fuite L . Cette relation peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{U_c}{L} = 23r_p^{0.4} \quad (1.8)$$

1.2.4 Modèle de Claverie et Porcheron

Plusieurs modèles expérimentaux ont été proposés pour le cas d'une tension alternative. Le plus connu est celui de Claverie et Porcheron [5, 10]. Ces auteurs ont montré que, pour un modèle d'isolateur plan (Figure 1.2), la tension d'arc est de la forme :

$$U_{arc} = 100 \frac{x}{\sqrt{I}} \quad (1.09)$$

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

$$U_{ca} = 800 \frac{x}{\sqrt{I}} \quad (1.10)$$

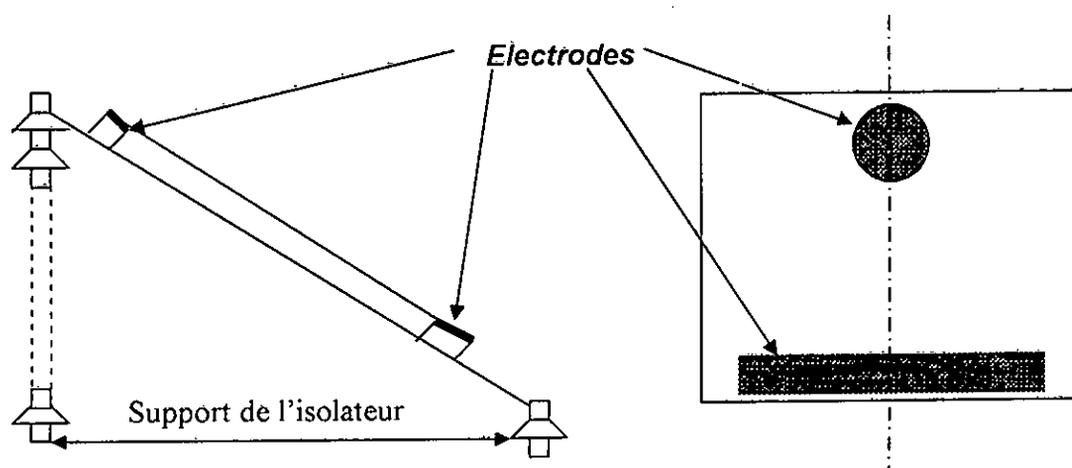


Figure 1.2 : Modèle expérimental de Claverie et Porcheron [10]

I.2.5 Modèle de Rao et Gopal

D'après Rao et Gopal [11], la tension d'arc, donnée par l'équation (I.1), n'est valable que pour une décharge de type intermédiaire entre la luminescence et l'arc. Ce type d'équation peut être contesté lorsque la décharge se réamorçait périodiquement. Ainsi, ces deux auteurs [11] ont introduit une nouvelle équation, afin d'expliquer les écarts entre les prédictions des modèles et les valeurs mesurées pendant le contournement :

$$U = \alpha + (\beta + x)^{\nu} \left[\ln \frac{I}{\delta} \right]^{-3} \quad (\text{I.11})$$

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

Cette équation a été établie par Reider [12]. Elle exprime la caractéristique $U(I,x)$ d'un arc de faible intensité dans l'atmosphère.

I.2.6 Modèle d'Alston et Zoledziowski

En tenant compte de l'hypothèse de Neumarker [9] et pour une tension d'application dépassant quelques kilovolts, Alston et Zoledziowski [13] ont déterminé la condition de maintien de l'arc électrique, dans le cas d'un isolateur cylindrique de longueur L (Figure I.3) :

$$U_{cx} = (n+1)(Ax)^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{r(L-x)}{n} \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{I.12})$$

avec

x : la longueur d'arc.

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

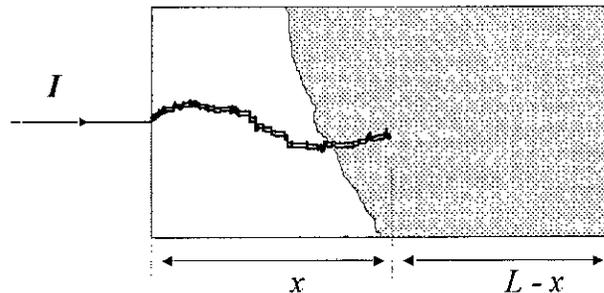


Figure I.3 : Modèle cylindrique utilisé par Alston et Zoledowski [13]

1.2.7 Modèle de Danis

Afin de reproduire des couches similaires à celles observées sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, Danis [1] a utilisé un modèle de forme géométrique simple (plan ou cylindrique) possédant plus d'une zone sèche (Figure I.4.a). La rupture des zones sèches survient alors d'une manière aléatoire (Figure I.4.b). Le lieu d'apparition des arcs partiels, la forme et le mouvement des racines des arcs sur une surface polluée (Figure I.4.c) dépendent ainsi de plusieurs facteurs, dont on ne peut déterminer leurs effets instantanés. Par conséquent, le comportement macroscopique de ces arcs a une nature stochastique. La tension de contournement est donc une variable aléatoire et a une fonction de distribution. Une simulation numérique des observations expérimentales, utilisant des photographies à grande vitesse (3000 images par seconde), a été effectuée pour déterminer cette tension.

En considérant que la résistance de la couche polluante est linéaire par rapport à la longueur, l'équation qui régit le modèle est :

$$U = \frac{Ax}{I^n} + r_p(L-x)I \quad (I.13)$$

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

r_p est la résistance linéique .

Le courant et la tension critique déduites par l'auteur [1] sont donnés par les expressions :

$$I_c = \left(\frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (I.14)$$

et

$$U_c = L(Ar_p)^{\frac{1}{n+1}} = AI_c^{-1} \quad (I.15)$$

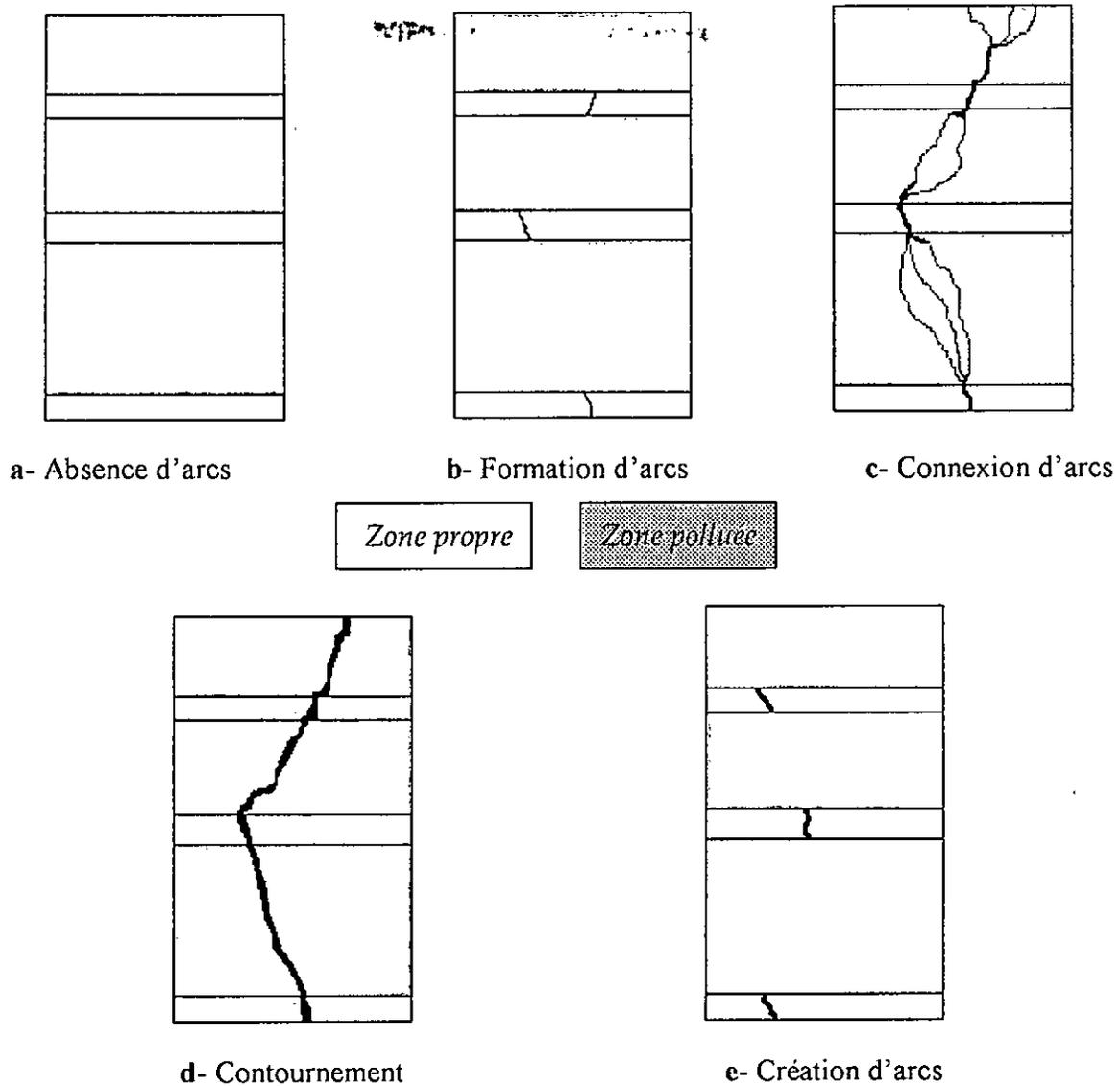


Figure I.4 : Modèle de Danis [1]

I.2.8 Modèle de Nacke et Wilkins

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

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

$$R_i(x) = \frac{1}{\pi\gamma} \quad (\text{I.16})$$

et

$$R_e(x) = rx_p + \frac{2}{\gamma\pi} \log\left(\frac{b}{2\pi r_d}\right) \quad (\text{I.17})$$

où

R : est la résistance linéique de la pollution,

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

b : la largeur de la surface de l'isolateur,

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

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

$$R_e(x) = \frac{2}{\pi\gamma} \left(0.68 + \ln \left(\frac{x_p}{r_d} \right) \right) \quad (I.18)$$

Pour un isolateur à ailettes multiples :

$$R_e = \frac{2}{\pi\gamma} \left(0.3 + \ln \left(\frac{x_p}{r_d} \right) \right) \quad (I.19)$$

Ainsi, la résistance de pollution totale sera :

$$R(x) = R_i(x) + R_e(x) \quad (I.20)$$

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

$$R(x) = r(L - x) + \frac{1}{\pi\gamma} \ln \left(\frac{b}{2\pi r_d} \right) \quad (I.21)$$

et pour une bande large :

$$R(x) = \frac{1}{\pi\gamma} \left(\ln \left(\frac{2L}{\pi r_d} \right) - \ln \left(\tan \frac{\pi x}{L} \right) \right) \quad (I.22)$$

où

x : la longueur d'arc,

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

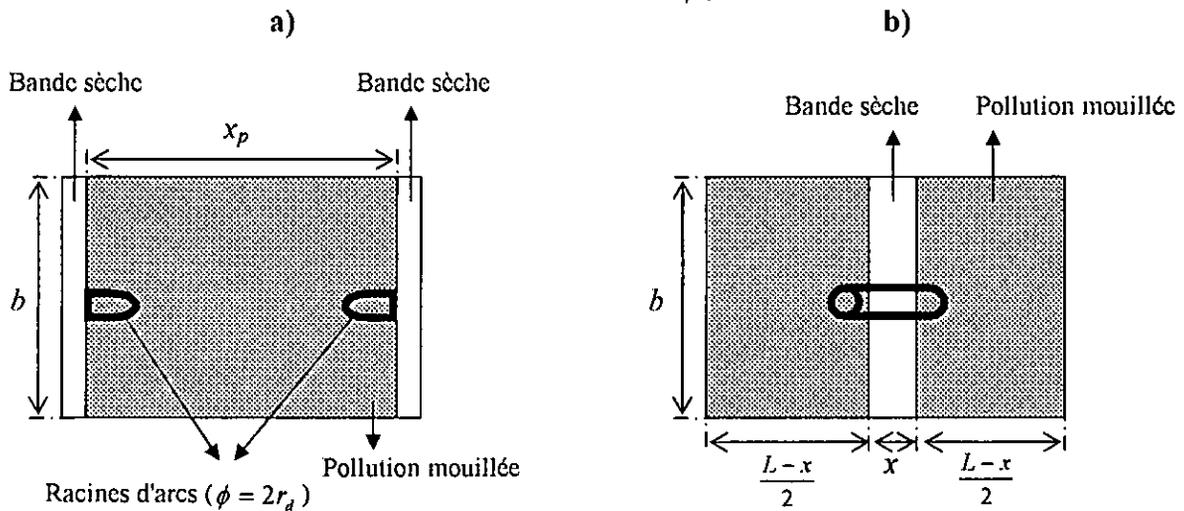


Figure I.5 : Représentation schématique de la surface d'un isolateur et des pointes de base de l'arc utilisé pour le calcul de la résistance de pollution selon:

(a) Nacke [14-15], (b) Wilkins [16]

I.2.9. Modèle de la couche mixte

De façon à mieux représenter la résistance superficielle de pollution d'un isolateur à long fût, Obenaus et Boheme [17] ont considéré que celle-ci était équivalente à deux couches résistantes en série, de résistance linéique r_1 et r_2 et correspondant respectivement à la tige et aux ailettes, et ils ont décomposé la distance totale de fuite L en deux distances partielles, L_1 et L_2 respectivement (Figure I.6). L'application du critère de Hampton [18] leur a permis de déduire la relation (II.23) donnant le gradient de contournement critique (en faisant certaines hypothèses et choisissant l'exposant $n=1$) :

$$\frac{U_c}{L} = 0.8\sqrt{Ar_p} \quad (I.23)$$

où: $A=80\text{VA/cm}$.

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

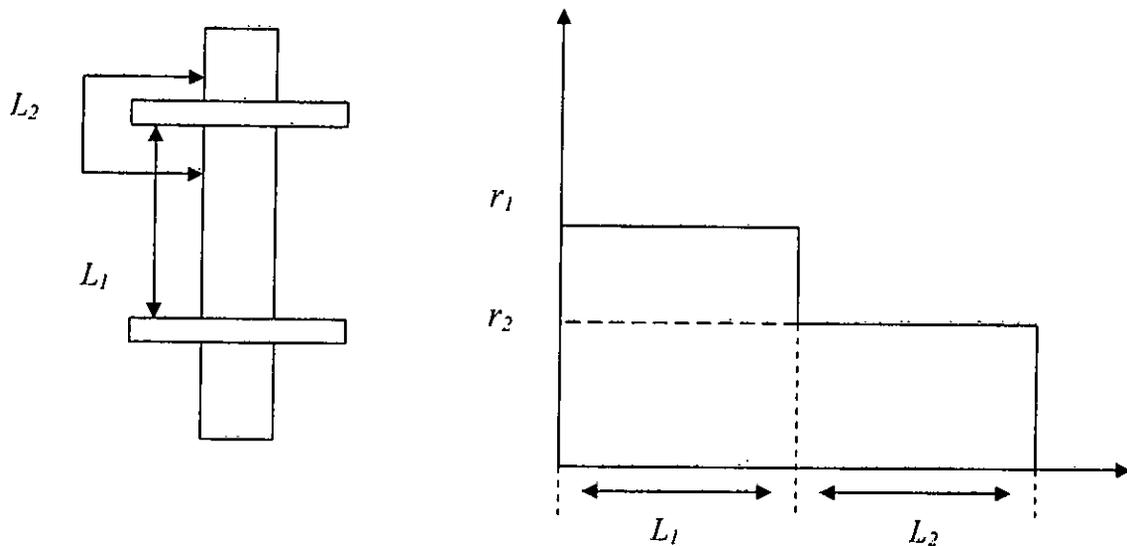


Figure I.6 : Modèle d'un isolateur à long fût et distribution de la résistance de pollution selon Boheme et Obenaus [17]

En appliquant le critère de Hesketh [19], l'expression précédente devient

$$\frac{U_c}{L} = 0.8(Lr_p I) \quad (I.24)$$

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

I.2.10. Modèle du disque circulaire

Woodson et McElroy [19] ont imaginé une configuration géométrique, illustrée à la figure (I.7), qui représenterait de façon idéale la surface d'un isolateur à disque. Ils partaient de l'hypothèse que, de façon générale, la résistance superficielle de la couche de pollution humide, pour n'importe quelle position r_a du point de départ de l'arc de rayon r_d , peut s'exprimer par une fonction de la forme :

$$R_p = \frac{1}{\gamma} f(r_d, r_a, r_0) \quad (I.25)$$

où r_0 est le rayon de l'électrode externe et γ la conductivité superficielle du polluant.

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

$$R_p = \frac{c}{\gamma} (r_0 - r_a)^m \quad (I.26)$$

où c est une constante trouvée expérimentalement égale à 1.4 pour $R_p = 1.6 \cdot 10^{-2} \Omega$, et m est une constante.

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

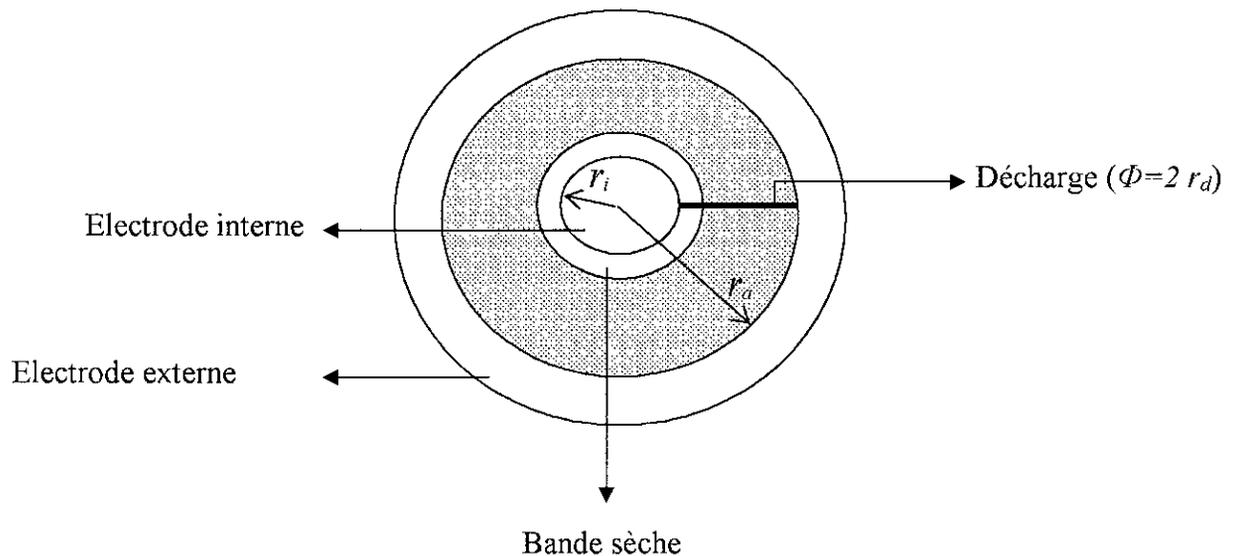


Figure I.7: Model d'isolateur en forme de disque conçu par McElroy et Woodson [19]

I.2.11. Modèles de Tegar

a / Cas de pollution continue

Tegar [6] a élaboré un modèle statique en tension alternative. Son modèle est basé sur celui d'Obenaus [2], 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 [5, 10], il a déterminé l'expression donnant la résistance de pollution en série avec l'arc, en fonction de la tension appliquée et le courant de fuite :

$$R_p = \frac{1}{\rho} \frac{K - 100 U}{K I} = \rho F_p \quad (1.27)$$

où ρ représente la résistivité de la couche de pollution et K la constante de la caractéristique statique de l'arc.

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

Un modèle amélioré a été mis au point par Tegar [20], pour caractériser la propagation d'une décharge électrique sur des surfaces isolantes soumises à une pollution continue non uniforme.

b / Cas de pollution discontinue

Tegar [20] a élaboré un algorithme qui permet d'obtenir les différentes caractéristiques des phénomènes de conduction sur les surfaces isolantes sous pollution discontinue. Les bandes propres et polluées sont représentées pas des circuits électriques. Les composants de ces circuits sont déterminés à partir des essais effectués sur la plaque propre et celle uniformément polluée. Le courant de fuite critique et la tension de contournement sont calculés à partir de la connaissance de la tension de contournement obtenue expérimentalement dans le cas où les couches de la pollution discontinue sont remplacées par du papier aluminium.

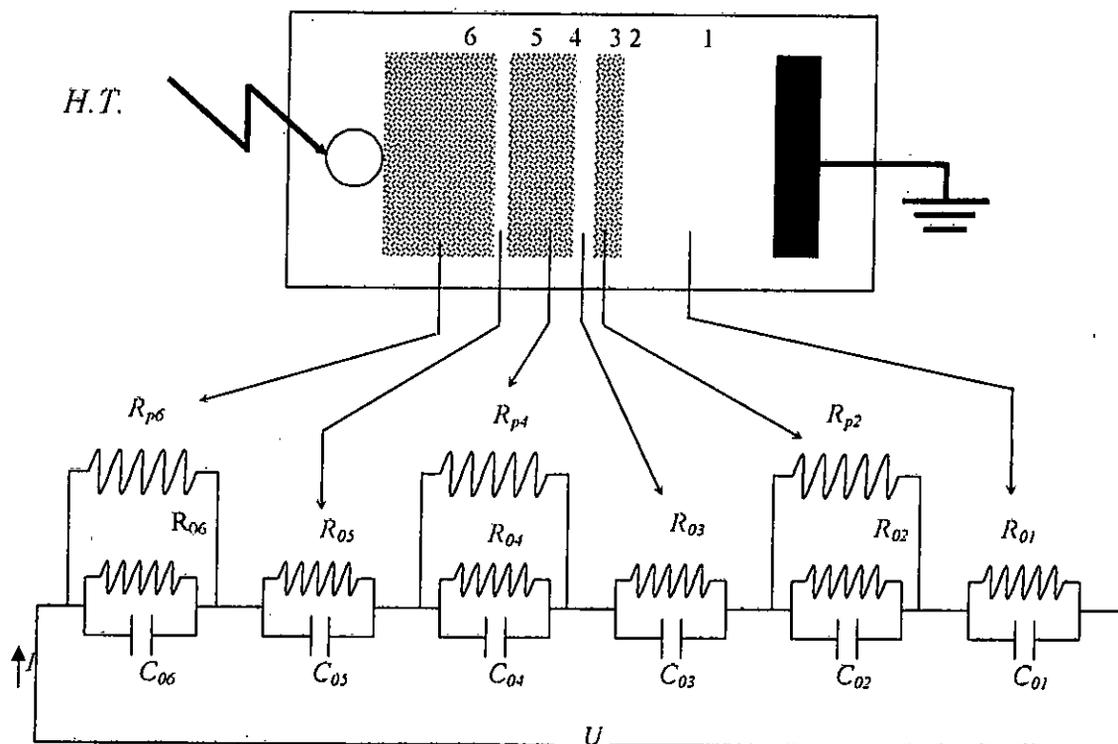


Figure I.8 : Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire selon Tegar [20]

La figure (I.8) 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_{oi} en parallèle avec une capacité C_{oi} . 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 rectangulaires et selon la recommandation de la CEI 60-1 [21], l'expression de la résistance pour chaque bande polluée i peut être formulée par :

$$R_{pi} = R_{sp} \int_0^{L_i} \frac{dl}{b} = R_{sp} \frac{L_i}{b} = R_p \cdot f \frac{L_i}{b} \quad (I.28)$$

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

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

1.3. Modèles dynamiques 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 modèles 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.

1.3.1. Mécanisme de propagation

1.3.1.1. Propagation par ionisation

Wilkins et Al-Baghdadi [22] 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 ainsi que le potentiel sont élevés dans cette région.

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

I.3.1.2. Propagation par force électrostatique

A partir des observations faites sur un canal d'électrolyte, Rahal [23] a essayé de mettre en évidence l'existence d'une force électrostatique s'exerçant sur la décharge, responsable du déplacement de l'arc. Il a démontré que du point de vue électrique macroscopique, cette force était due à la dissymétrie de la distribution du potentiel; elle-même causée par le passage du courant dans le liquide couvrant la surface isolante.

Cette force provoque la courbure de la décharge vers l'électrode de masse. La décharge se déplace vers l'électrode de masse, si les conditions critiques sont satisfaites.

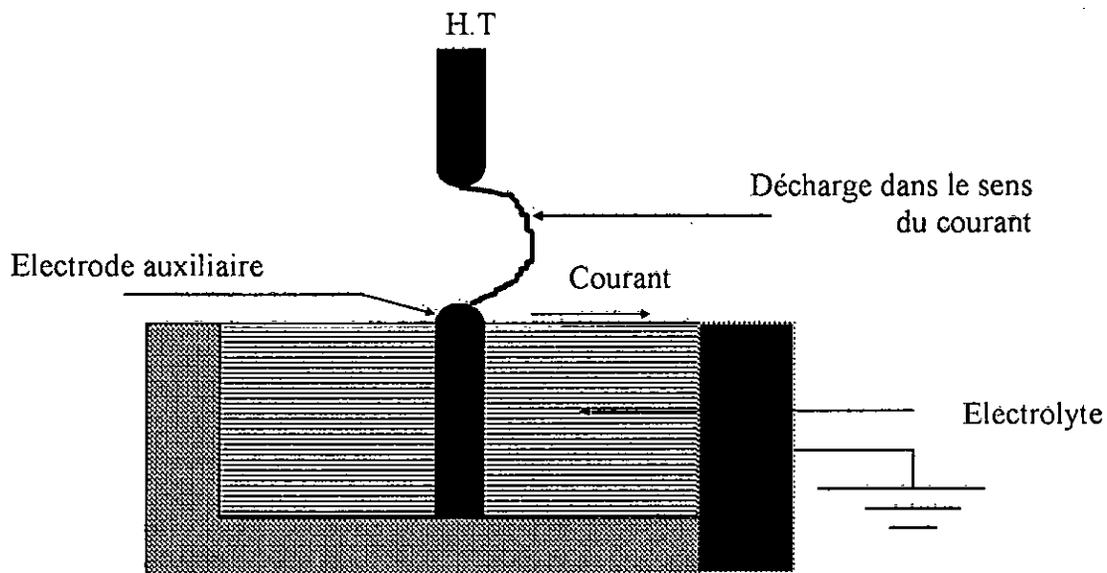


Figure I.6 : Courbure de la décharge dans la direction de l'écoulement du courant mettant en évidence l'existence d'une force électrostatique [23]

I.3.2. Critères de propagation de la décharge

I.3.2.1. Critère de Hampton

A partir d'une étude expérimentale, Hampton [18] 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 :

$$E_{arc} < E_p \quad (I.29)$$

I.3.2.2. Critère de Hesketh

En supposant que l'arc en série avec la couche de pollution mouillée se modifie de façon à rendre maximale le courant I qu'il tire de la source d'alimentation, Hesketh [24] a établi un critère de propagation de l'arc, exprimé par la relation :

$$\frac{dI}{dx} > 0 \quad (I.30)$$

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

I.3.2.3. Critère de Wilkins

En considérant qu'un système se place dans la configuration qui lui permet de dissiper le maximum d'énergie, Wilkins [16] a généralisé la condition énoncée par Hesketh [24] et établit un critère de propagation utilisant la puissance P fournie par la source :

$$\frac{dP}{dx} > 0 \quad (I.31)$$

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

I.3.2.4. Critère de Anjana et Lakshminarasimha

En assimilant l'arc à une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, Anjana et Al [25] 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 :

$$W_{totale} \geq W_{th} \quad (I.32)$$

I.3.2.5. Critère de Dhahbi, Beroual et Krahenbul

Ces auteurs [26] ont proposé un nouveau critère analytique de propagation de la décharge en faisant intervenir l'impédance équivalente Z_{eq} d'un circuit électrique (Figure I.9), simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite.

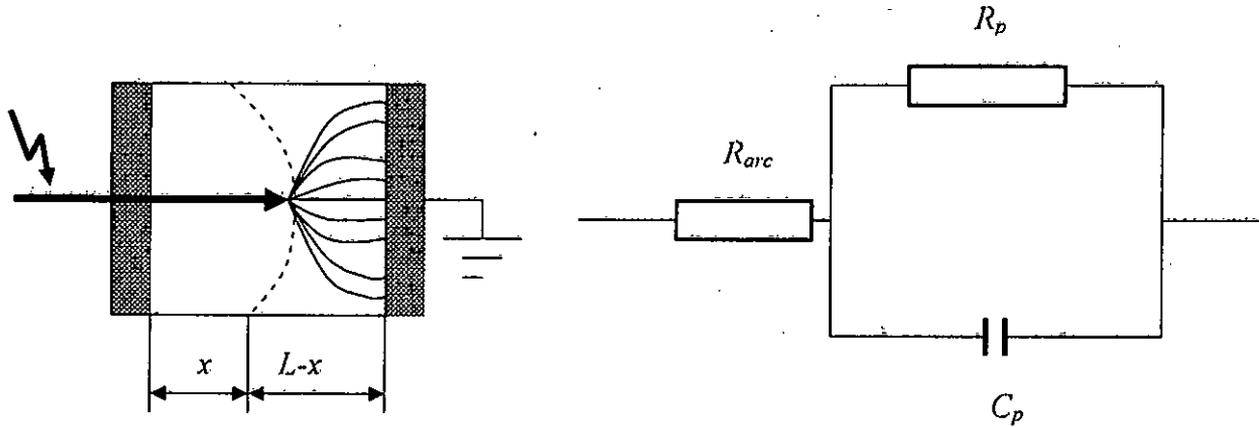


Figure 1.9 : Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent [26]

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

$$\frac{d|Z_{eq}|}{dx} \leq 0 \quad (1.33)$$

ces auteurs ont abouti à un critère qui est :

$$E_{arc} \geq \frac{E_p}{\sqrt{a}} \quad (1.34)$$

Sous tension continue $a=1$, car $a = 1 + \omega^2 \rho_p^2 \varepsilon^2$

Où

ω : la pulsation,

ρ_p : la résistivité de la pollution,

ε : la permittivité de la pollution.

1.3.3. Modèles dynamiques

1.3.3.1. Modèle de Rizk

Pour caractériser la dynamique de l'arc pour le cas continu, Rizk et Nguyen [27] ont considéré une résistance d'arc qui varie selon l'équation de Mayr [28] :

$$\frac{dR_{arc}}{dt} = \frac{R_{arc}}{\tau} - \frac{R_{arc}^2 I^{n+1}}{A \tau} \quad (1.35)$$

avec

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

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

I.3.3.2. Modèle de Anjana et Lakshminarasimha

Anjana et Lakshminarasimha [25] ont proposé un modèle basé sur l'équation de Mayr [28] et sur le modèle statique d'Obenaus [2]. Ils ont proposé que l'isolateur est divisé en un certain nombre de bandes, formant des anneaux symétriques par rapport à l'axe de l'isolateur, et que l'arc est une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, dont l'énergie est donnée par :

$$W_{th} = \frac{3}{2} KTM \quad (I.36)$$

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

$$W_{totale} = (E_{arc} I_{arc} - P_0) dt \quad (I.37)$$

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 :

$$v = \mu E_{arc} \quad (I.38)$$

où

μ : est la mobilité de l'arc.

On déduira la longueur d'arc $dx = v dt$

Donc 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. Les différentes étapes du programme de calcul sont données dans l'organigramme de la figure 1.10.

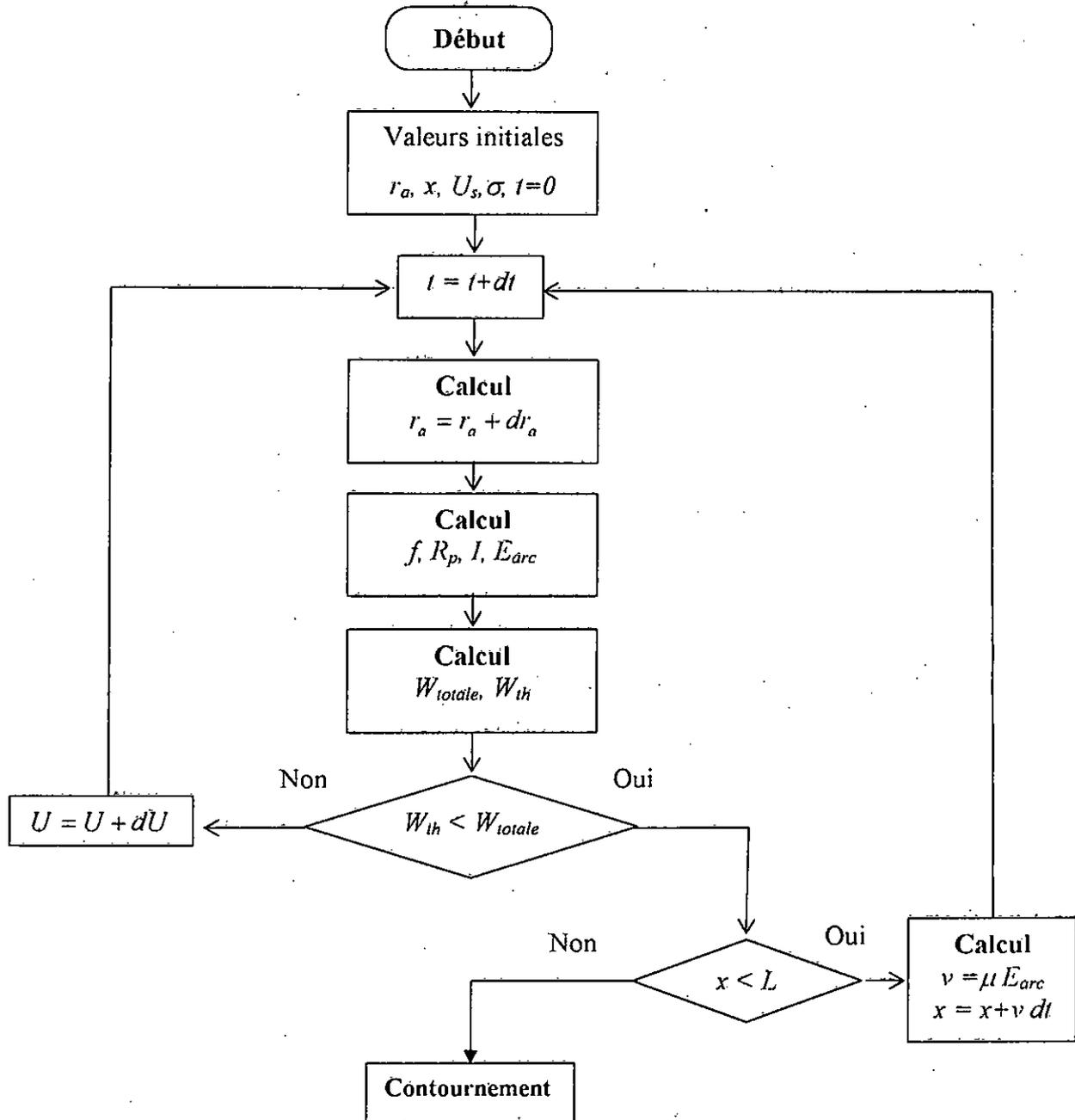


Figure 1.10 : Organigramme du modèle de Anjana et Lakhminarasimha [25]

1.3.3.4. Modèle de Sundararajan et Gorur

Sundararajan et Gorur [29] ont proposé un modèle dynamique en continu, qui ressemble à celui de Anjana et Lakhminarasimha, mais basé sur le critère de propagation de Hampton [18].

Pour le gradient de la tension dans la couche de pollution, ils ont utilisé l'expression :

$$E_p = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (I.33)$$

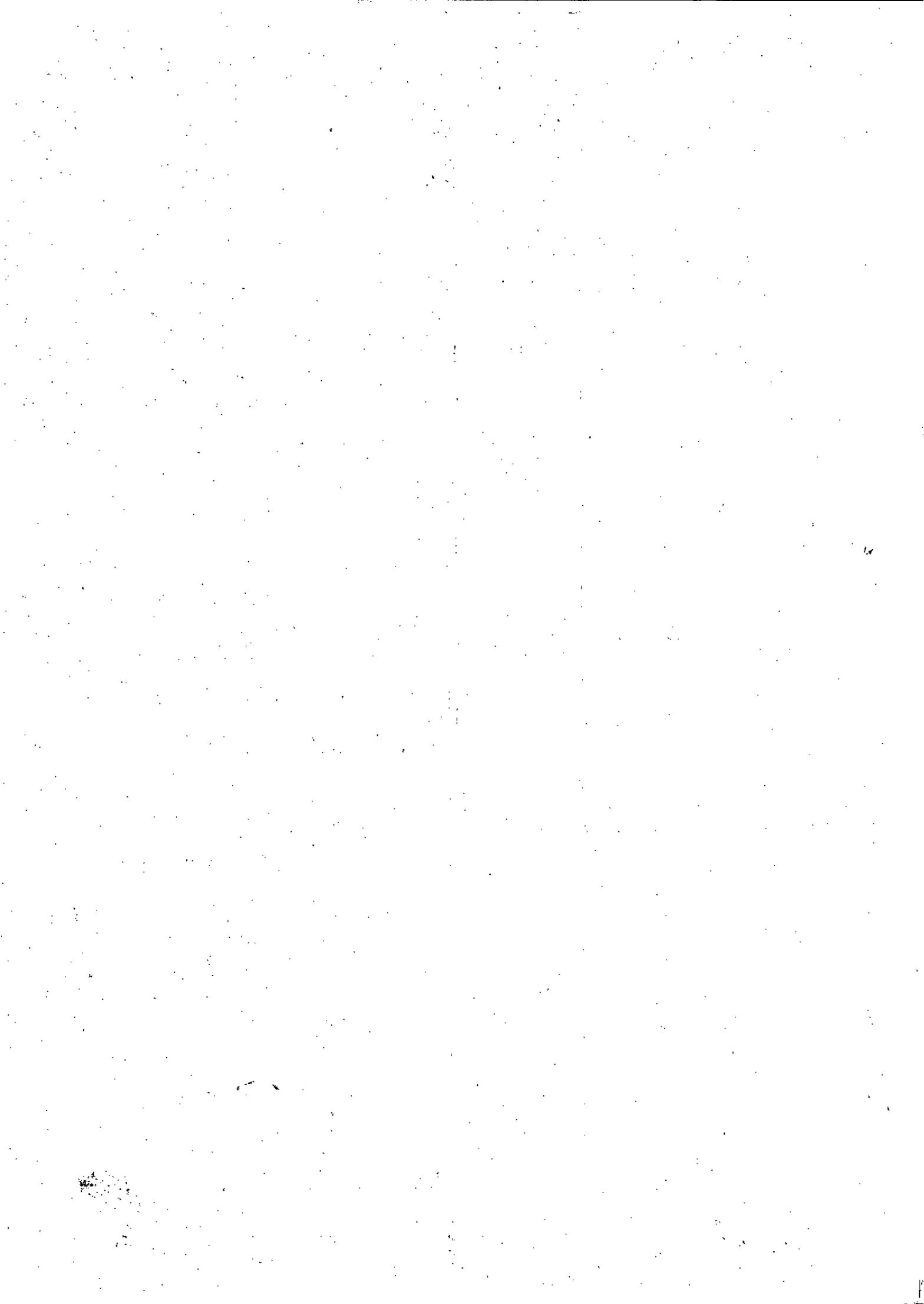
avec

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.

Notons que la valeur de E_p utilisée par Sundrarajan et al est en fait la contrainte critique $E_c = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}}$ établie par Neumarker [9].

L'ensemble de ces équations est résumé dans l'organigramme indiqué dans la figure I.9.



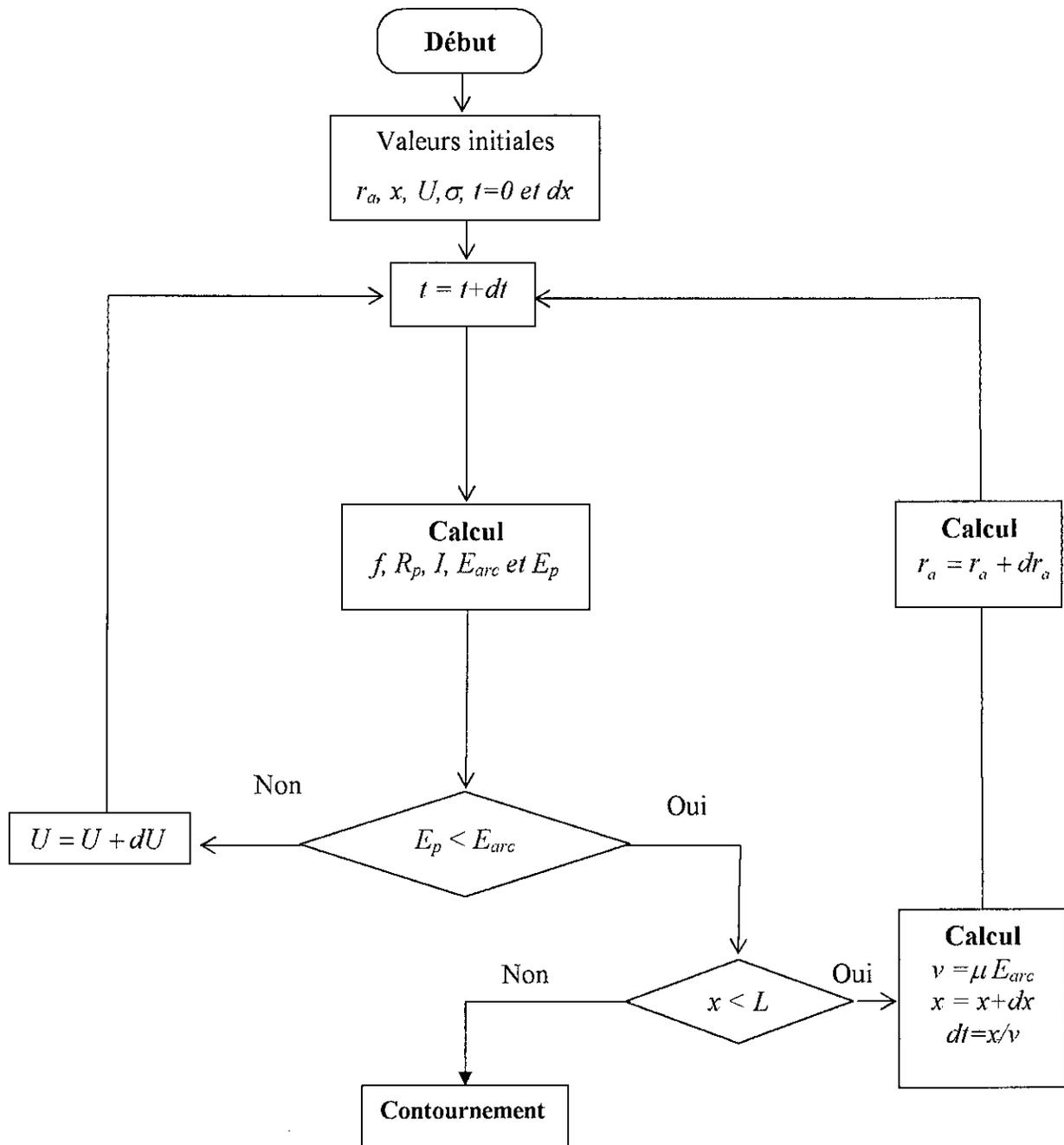


Figure I.11 : Organigramme du modèle de Sundararajan et Gorur [29]

I.3.3.3. Modèle de Dhahbi et Beroual

Ces deux chercheurs [30, 31] considèrent que la décharge peut être représentable par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure (I.12). 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 .

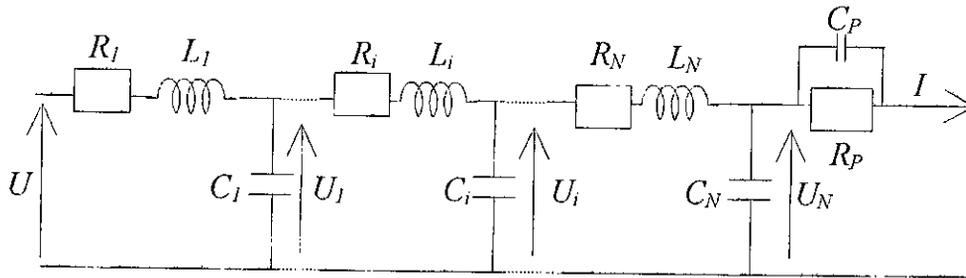


Figure I.12 : Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge selon Dhahbi et Al. [30, 31]

où

R_p : la résistance de la pollution,

C_p : la capacité de la couche de pollution,

R_i : la résistance de l'arc,

C_i : la capacité de la décharge,

L_i : l'inductance de la décharge.

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. Il utilise le critère d'impédance comme critère de propagation. Ainsi, ces auteurs ont 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.

L'organigramme suivant représente le modèle dynamique de Dhahbi pour la tension continue. Pour les cas alternative et impulsionnelle ils rajoutèrent des boucles permettant de calculer l'évolution des différents paramètres des modèles sur un intervalle de temps fixé à l'avance.

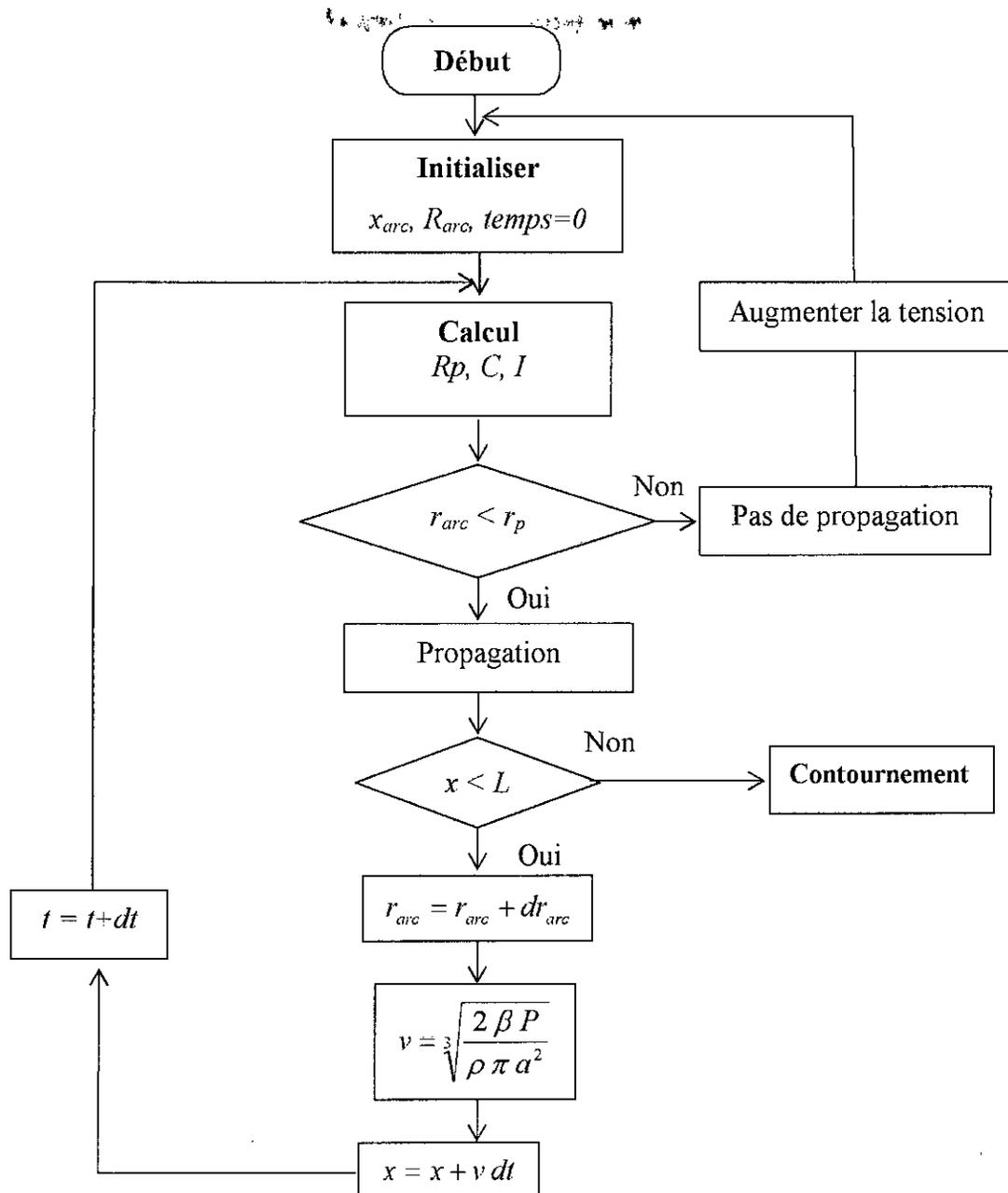


Figure I.13 : Organigramme du modèle de Dhahbi et Al [30, 31]

I.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 et sur le modèle de Mayr 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 II

Conception du Modèle Dynamique

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons proposer un modèle dynamique basé sur celui de Tegar [20]. Notre modèle permet de prédire le comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension alternative ou impulsionnelle. Il utilise le critère de propagation de Hampton et se base sur le circuit électrique équivalent d'Obenaus [2].

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.

II.2. Hypothèses simplificatrices

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 .

II.3. Circuit électrique équivalent

En se basant sur le modèle proposé par Obenaus [2], 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 II.1).

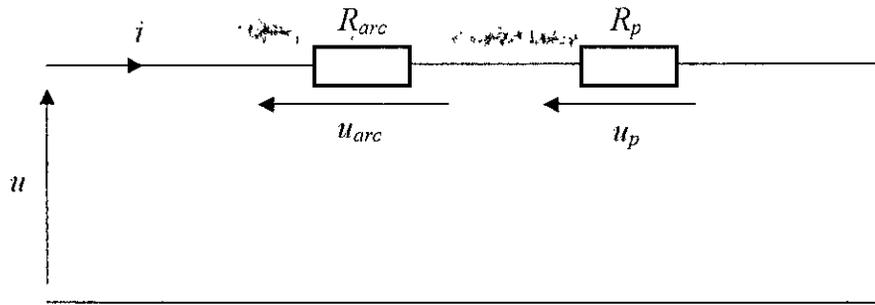


Figure II.1 : Circuit électrique équivalent de base

II.3.1. Propagation de la décharge

II.3.1.1. Initialisation de la décharge

Dans le cas continu, 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 [25, 29] est égale à 1 % de la longueur de fuite totale de l'isolateur.

Dans notre étude, nous considérons une longueur initiale de la décharge proche de zéro car les tensions alternative et impulsionnelle commencent par zéro.

II.3.1.2. Critère de propagation

Le critère de propagation que nous avons adopté pour notre modèle, est celui proposé par Hampton [18]. Sous tension alternative, ce critère s'écrit :

$$e_{arc} < e_p \quad (\text{II.1})$$

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 [6] 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 :

$$e_{arc} = \left| \frac{du_{arc}}{dx} \right| = r_p i \quad \text{et} \quad e_p = \left| \frac{du_p}{dx} \right| = \frac{A}{i^n} \quad (\text{II.2})$$

II.3.1.3. 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 (II.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.

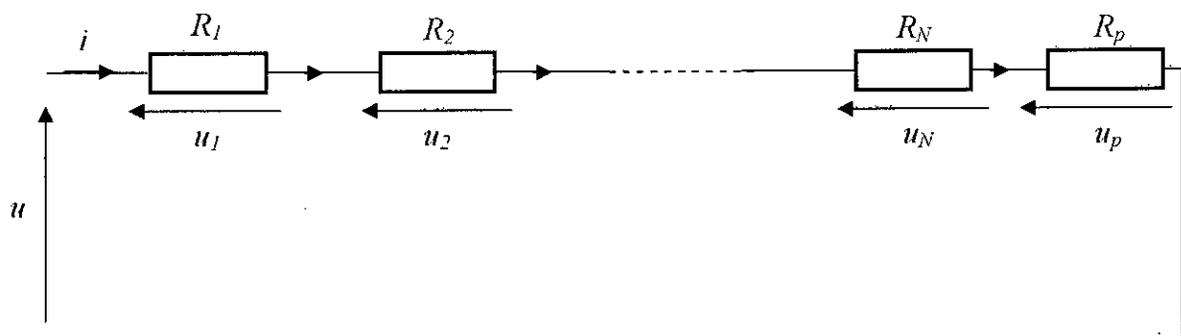


Figure II.2 : Circuit électrique équivalent à la propagation de la décharge

II.3.2. 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.

En négligeant la chute de tension cumulée aux électrodes, de l'ordre de 840V selon Wilkins [16], l'équation du circuit sera donnée par:

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

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.

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 [32, 33] :

$$R_p = r_p (L - x) \quad (\text{II.4})$$

avec:

- r_p la résistance linéique,
- L la longueur de fuite totale,
- x la longueur de l'arc.

En se basant sur le modèle de Renyu et Zhicheng [34], 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 :

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

où

- γ_p : la conductivité superficielle de la pollution,
- r_{iso} : le rayon effectif de l'isolateur.

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

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

Par ailleurs, la relation approximative de la tension aux bornes de l'arc est donnée, selon Obenaus [2], par l'expression empirique suivante :

$$u_{arc} = \frac{Ax}{i^n} = e_{arc} x \quad (\text{II.7})$$

avec:

- A et n : constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc,
- x : la longueur d'arc,
- i : le courant d'arc.

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

$$R_{arc} = \frac{u_{arc}}{i} = \frac{Ax}{i^{n+1}} \quad (\text{II.8})$$

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

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

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 [16] par :

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

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 ρ_{arc} du canal conducteur peut être donnée par :

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

Cette résistivité peut être déterminée en fonction du courant, en substituant, dans cette dernière équation, R_{arc} et r_d par leurs expressions respectives (II.8) et (III.10) :

$$\rho_{arc} = \frac{A}{1.45 I^n} \quad (\text{II.12})$$

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

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

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

$$p_{arc} = u_{arc} i = e_{arc} x i = A x i^{1-n} \quad (\text{II.14})$$

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

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

$$v = \mu e_{arc} \quad (\text{II.15})$$

v : la vitesse de propagation,

μ : 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.

II.4. 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 résistivité superficielle ou la résistance linéique, la géométrie de l'isolateur (sa longueur totale de fuite L et son rayon effectif r_{iso}), la mobilité μ des électrons, le pas d'incrément de l'amplitude de la tension du_m et le pas d'incrément de temps dt .

Etape 1 : Initialisation de la longueur d'arc et du temps.

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 d'une alternance de la tension sinusoïdale ($t_p = 10ms$) ou 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 ρ_{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 une certaine longueur estimée à aL ($a \leq 1$), et de l'étape 8 (contournement) dans le cas contraire.

Etape 7 : Incrément de 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 (II.3) suivante :

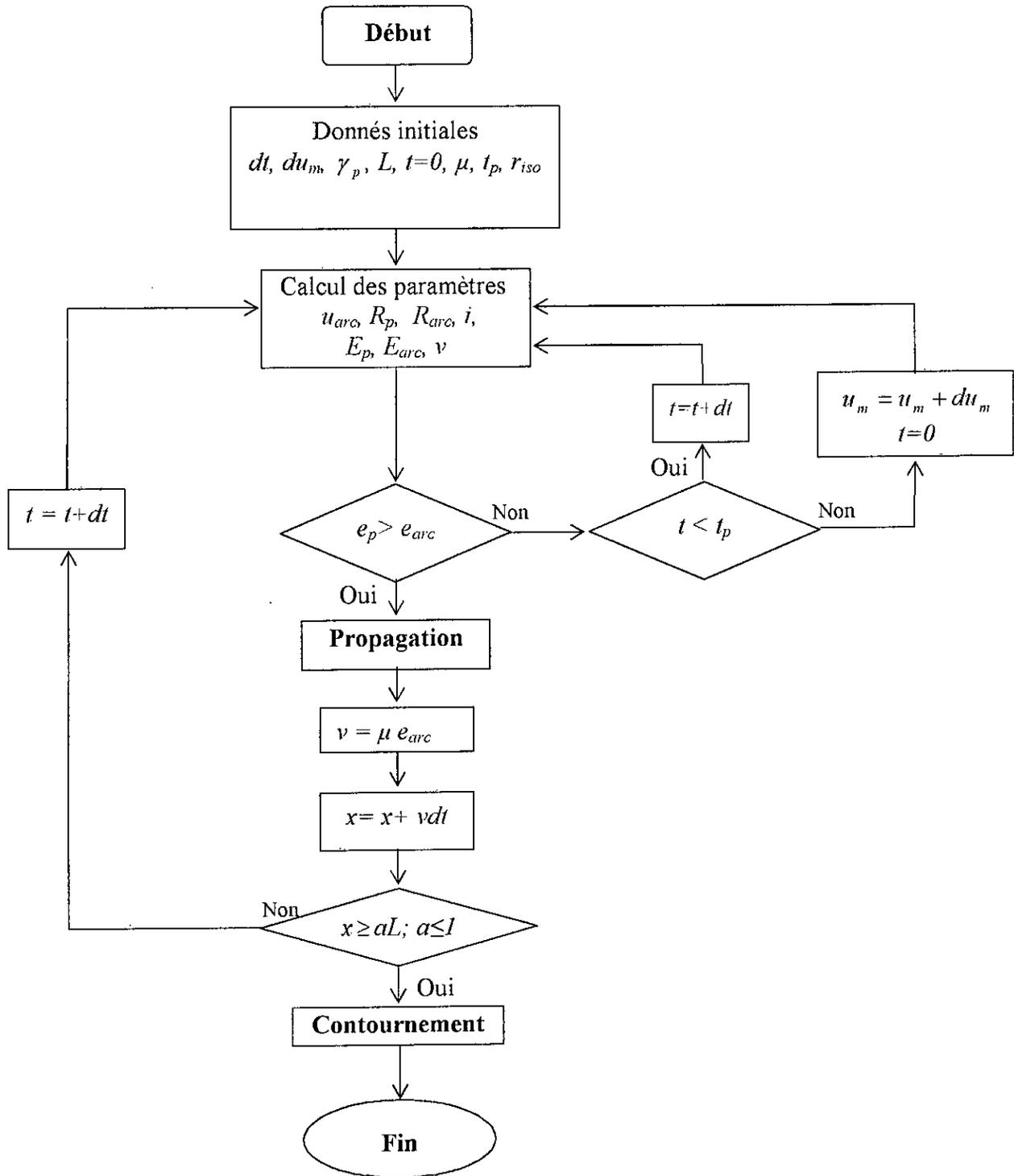


Figure II.3 : Organigramme du modèle dynamique

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis au point un modèle dynamique. Ce dernier est basé sur un circuit électrique résistif équivalent proposé par Obenaus [2] et utilise le critère de propagation de Hampton [18]. Tenant compte de la géométrie de l'isolateur, ce modèle permet de calculer la tension de contournement et le temps au contournement et de suivre l'évolution temporelle et spatiale des différents paramètres caractérisant l'état critique des surfaces isolantes polluées. L'exploitation de l'algorithme que nous avons élaboré ainsi que la validation de ses résultats seront l'objet des deux chapitres suivants.

Chapitre III

Résultats et Interprétation en Tension Alternative

III.1. Introduction

La performance d'un isolateur sous une contrainte continue est plus critique car les décharges produites après formation de bandes sèches persistent plus longtemps que pour le cas d'une contrainte alternative.

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

D'après Rahal [35], il faut distinguer trois cas dans le mécanisme de contournement :

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

En outre et dans son étude sur les mécanismes physiques du contournement des isolateurs haute tension, Rahal [35] a traité qualitativement le contournement en alternatif. Ces observations lui ont permis de supposer que le processus de contournement se fait toujours dans une seule alternance, même si le processus de préparation consistant par exemple à un échauffement progressif de la couche de l'électrolyte, nécessite plusieurs alternances.

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

Dans ce chapitre, nous allons valider notre modèle en tension alternative 50Hz, en se basant sur les résultats obtenus par le modèle statique de Tegar [6]. Nous ferons aussi des applications dans le cas d'une pollution forte et légère, pour montrer les évolutions temporelle et spatiale des différents paramètres caractérisant le développement des décharges électriques sur des surfaces isolantes polluées.

III. 2. Validation

Nous validons notre modèle en comparant les tensions de contournement et les courants critiques à ceux obtenus par Tegar [6]. Notons que la longueur critique considérée par cet auteur est égale à deux tiers de la ligne de fuite totale de l'isolateur.

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

L'isolateur en question est constitué d'une plaque rectangulaire de porcelaine vernie, munie de deux électrodes en cuivre, l'une circulaire mise à la haute tension et l'autre rectangulaire mise à la terre (Figure III.1).

La couche polluante est réalisée en pulvérisant à la surface de la plaque une solution de chlorure de sodium dont la conductivité désirée est obtenue suivant la concentration de la solution considérée.

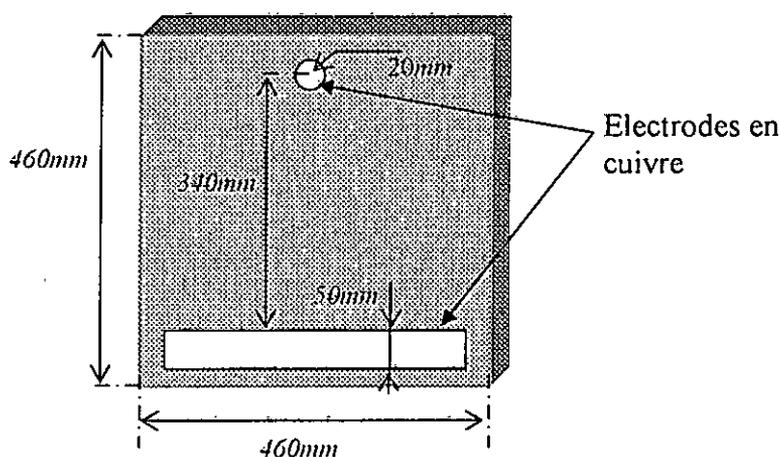


Figure III.1: Modèle d'étude de Tegar

Les figures (III.2) et (III.3) illustrent la variation de la tension de contournement et le courant de la décharge en fonction de la résistivité de la couche polluante obtenue par notre modèle ainsi que celle trouvée par Tegar [6]. Pour l'isolateur considéré et les résistivités prises par cet auteur, une bonne concordance entre les deux modèles a été obtenue.

Il est à signaler qu'avec l'augmentation de la résistivité, la tension de contournement augmente et le courant de la décharge diminue. Ceci est évident, car la réduction de la résistivité (qui se traduit par l'augmentation de la conductivité superficielle) de la pollution engendre la diminution de la tension de tenue.

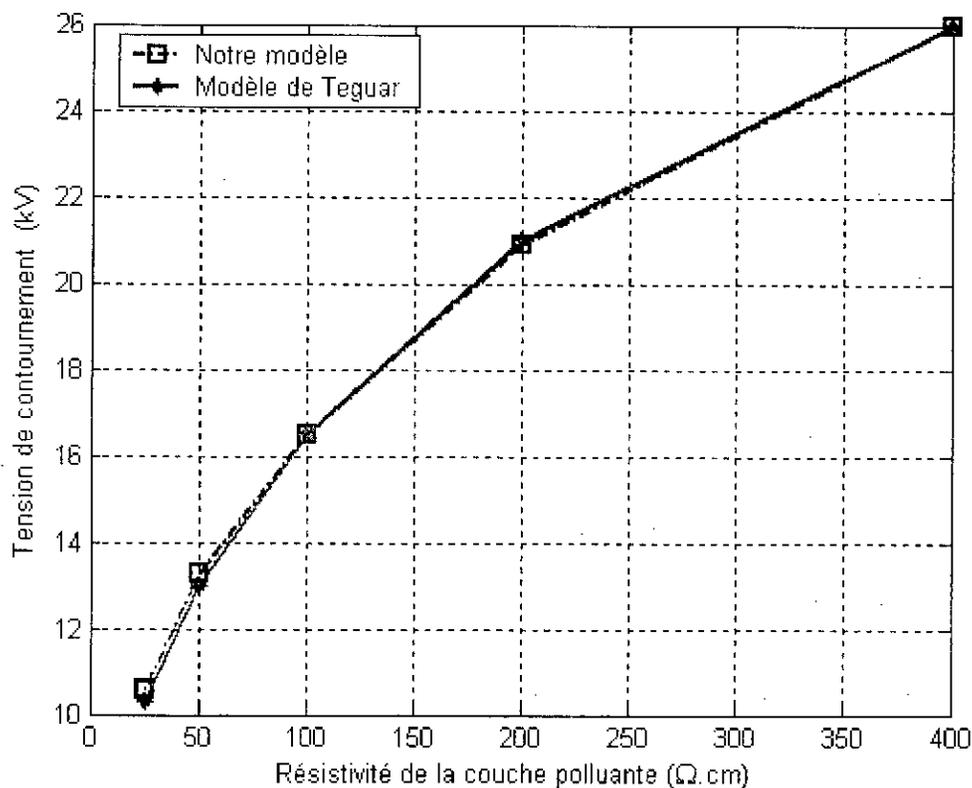


Figure III.2 : Tension de contournement en fonction de la résistivité de la pollution

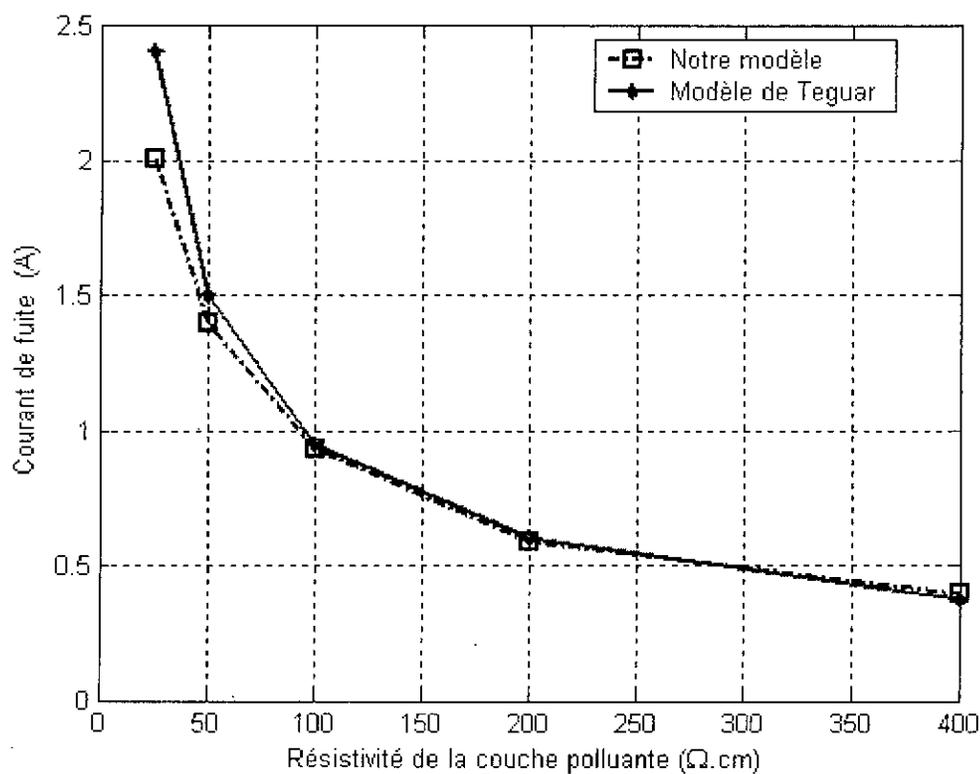


Figure III.3 : Courant de fuite en fonction de la résistivité de la pollution

III.3. Application

La dynamique de l'arc électrique est décrite en tenant compte des évolutions temporelle (dans le temps) et spatiale (suivant la longueur d'arc), des différents paramètres régissant le comportement d'un isolateur pollué, sur lequel une décharge se développe jusqu'à provoquer le contournement total. Nous adoptons le même isolateur considéré par Tegar et les mêmes résistivités [6]. Par ailleurs, nous considérons que le saut final de la décharge s'effectue lorsque la longueur de cette décharge atteint les 90% de la ligne de fuite de l'isolateur ($\alpha=0.9$).

III.3.1. Evolution temporelle

III.3.1.1. Tension appliquée, tension dans la couche de pollution et tension de l'arc

Les figures (III.4), (III.5) et (III.6) illustrent respectivement la variation dans le temps de la tension appliquée entre électrodes, la tension dans la couche de pollution et la tension de l'arc pour différentes résistivités. Initialement, la tension dans la couche de pollution évolue d'une façon sinusoïdale ; car la tension appliquée est sinusoïdale. Dès que le critère de propagation est vérifié, la décharge est amorcée. A partir de cet instant, la tension dans la couche de pollution diminue brusquement puis augmente de nouveau. En outre, la tension de l'arc présente une première partie pratiquement nulle car elle est caractérisée par l'absence totale de l'arc du moment que le critère de propagation n'étant pas vérifié. Puis une deuxième partie croissante représentant la phase de propagation et une troisième partie décroissante représentant la phase de contournement.

Nous remarquons, par ailleurs, que l'augmentation de la résistivité engendre une augmentation de la tension dans la couche de pollution ainsi que la tension aux bornes de l'arc.

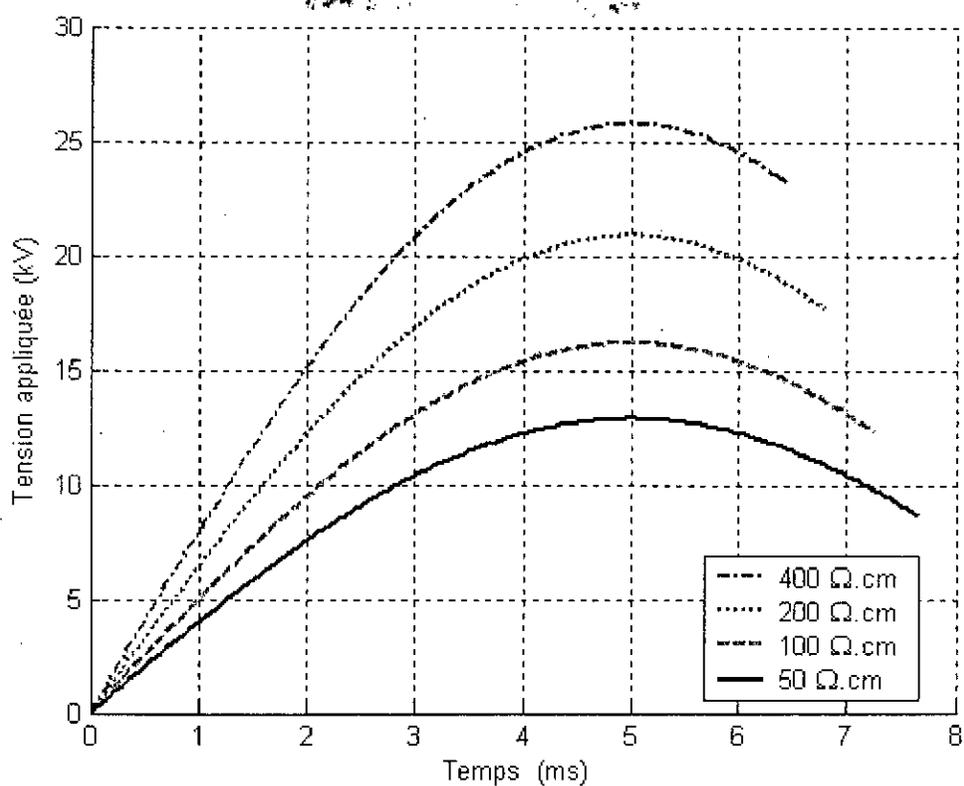


Figure III.4 : Tension de contournement appliquée en fonction du temps

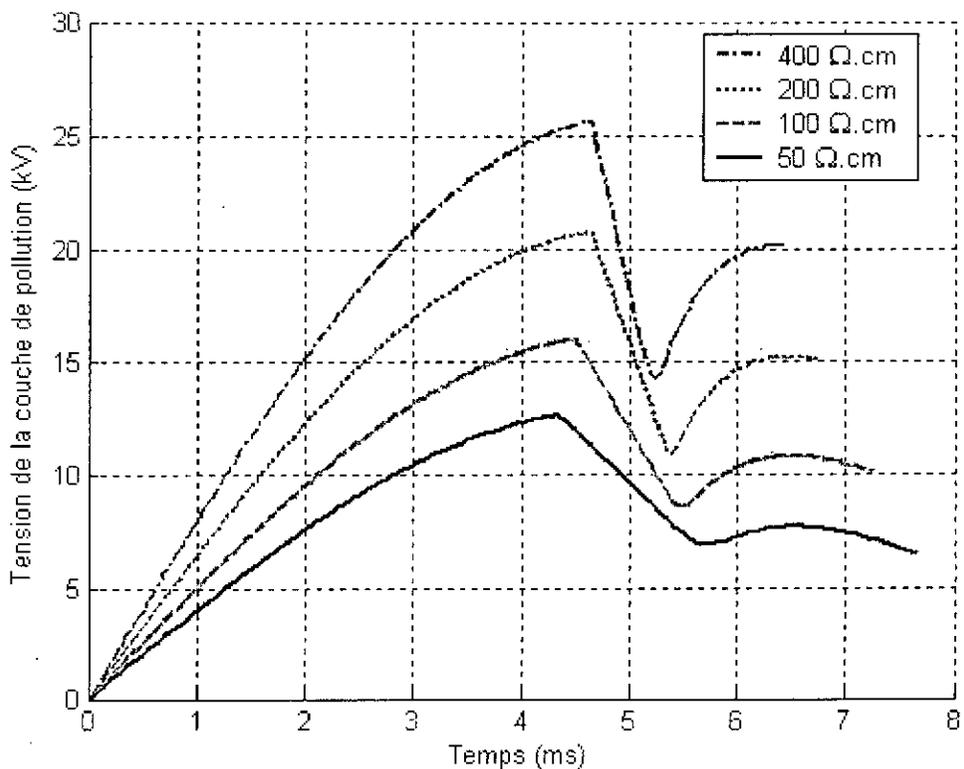


Figure III.5 : Tension dans la couche de pollution en fonction du temps

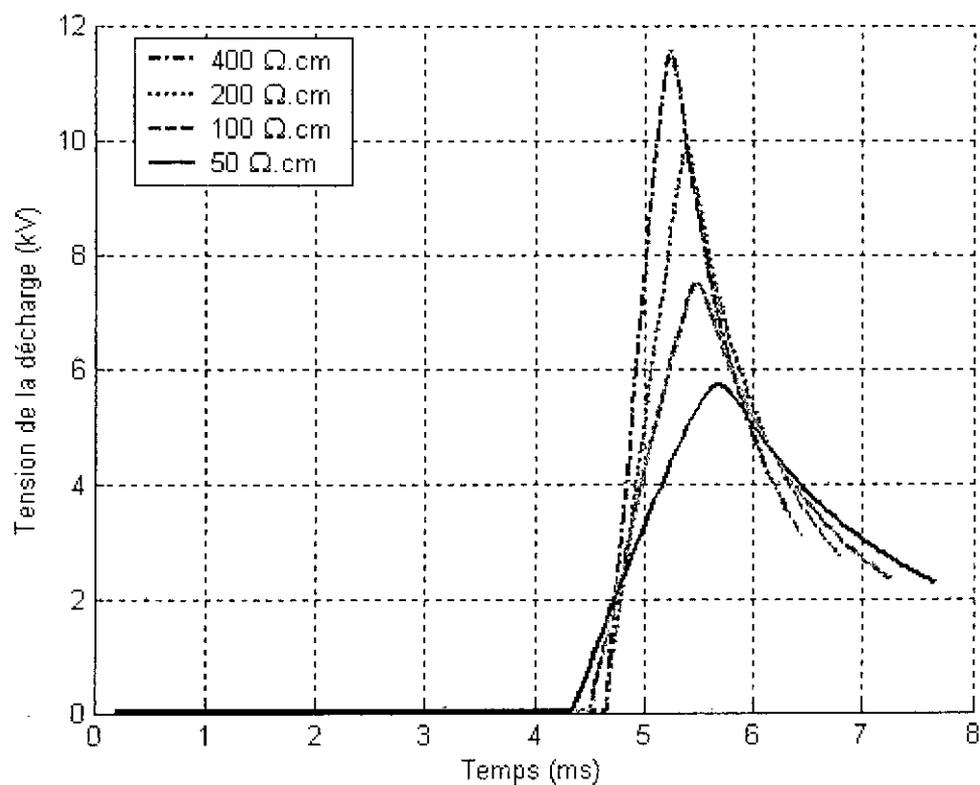


Figure III.6 : Tension de l'arc en fonction du temps

III.3.1.2. Longueur de la décharge

L'évolution de la décharge dans le temps se fait en deux parties. La première partie consiste la phase de préparation (avant la propagation) où la longueur de la décharge est pratiquement nulle. Dès que le critère de propagation est vérifié, l'arc avance et sa longueur augmente régulièrement (Figure III.7), c'est la deuxième partie de cette évolution. Notons que plus la résistivité est importante, plus l'arc se déplace rapidement. En effet, la diminution de la résistivité engendre le prolongement de la phase de propagation.

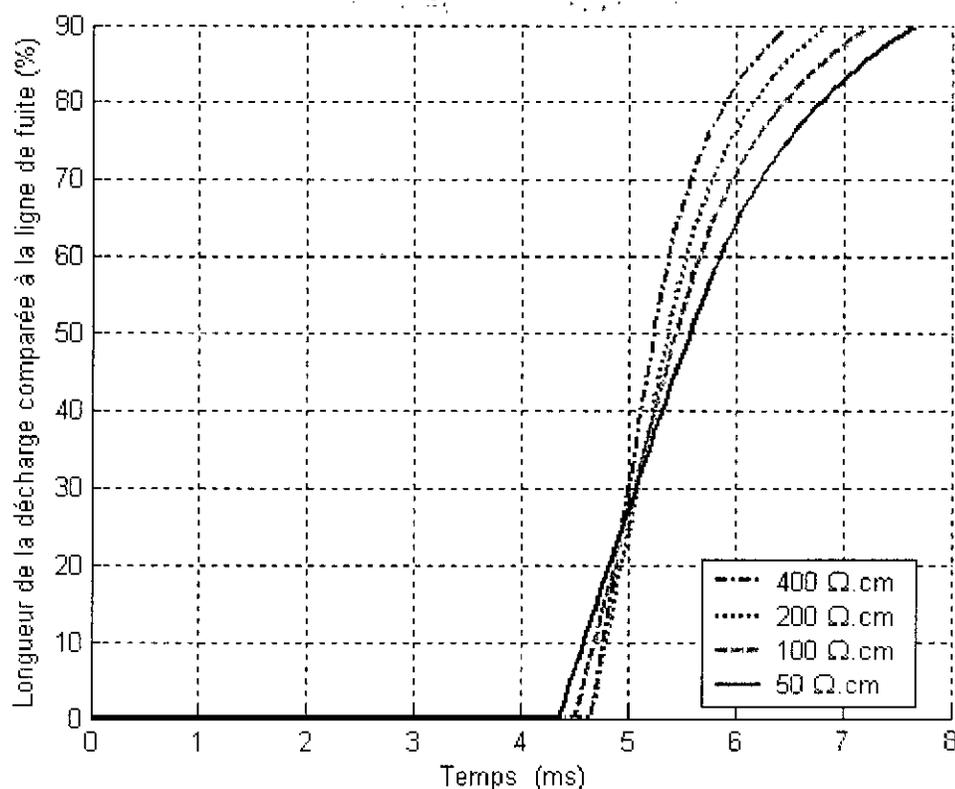


Figure III.7 : Longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite en fonction du temps

III.3.1.3. Courant de la décharge

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

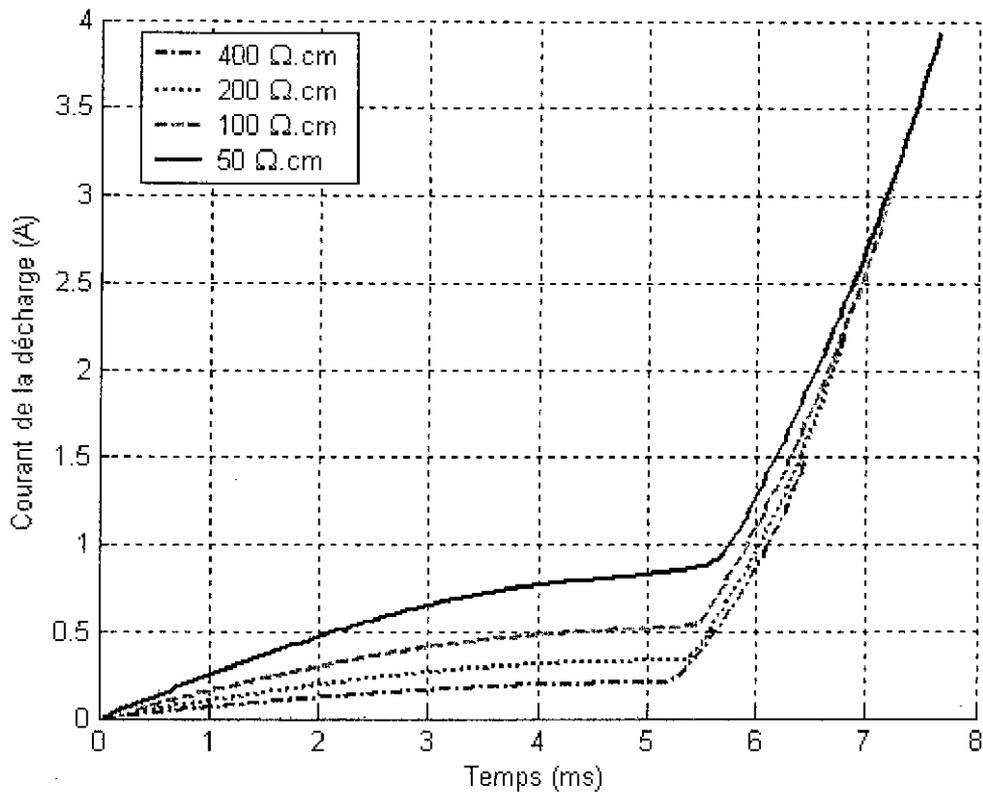


Figure III.8 : Courant de fuite en fonction du temps

III.3.1.4. Résistance de la couche polluante

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

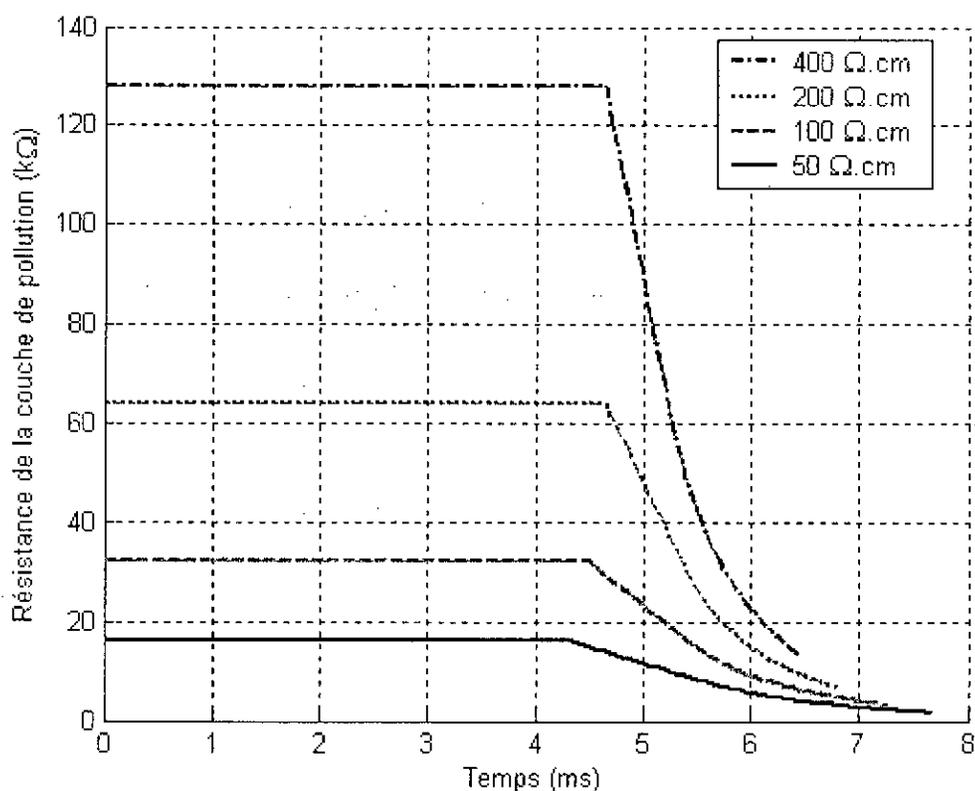


Figure III.9 : Résistance de la couche de pollution en fonction du temps

III.3.1.5. Résistance de l'arc

La variation de la résistance de l'arc en fonction du temps est présentée à la figure (III.10). Avant propagation, cette résistance est pratiquement nulle, ensuite elle augmente jusqu'à atteindre un maximum puis diminue par la suite. Par ailleurs, il est tout à fait évident que, la résistance de l'arc augmente avec l'augmentation de la résistivité de la couche polluante.

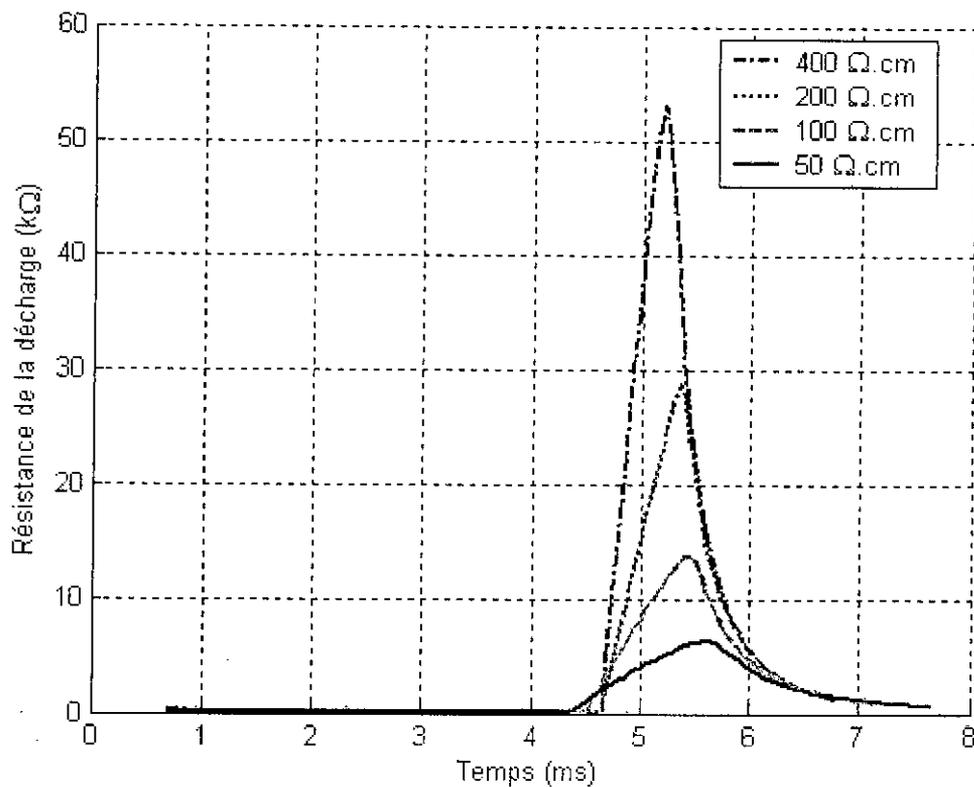


Figure III.10 : Résistance de l'arc en fonction du temps

III.3.1.6. Rayon de la décharge

La figure (III.11) montre la variation du rayon de la décharge en fonction du temps, pour différentes résistivités. Comme le rayon du pied de l'arc est calculé à partir du modèle de Wilkins [16], son allure est similaire à celle du courant de fuite. En effet, le rayon de la décharge augmente au cours du temps. Cependant, cette augmentation est relativement faible durant la phase de propagation. A partir d'un certain temps, le rayon de la décharge croît assez rapidement pour atteindre une taille plus ou moins importante, c'est la phase d'augmentation rapide du courant de l'arc. Cette caractéristique présente, par conséquent, un coude. Ce dernier exprime la fin de la phase de propagation due à l'affaiblissement de la résistance de la couche polluée. Par ailleurs, ce rayon diminue, tout comme le courant, avec l'augmentation de la résistivité de la couche polluante.

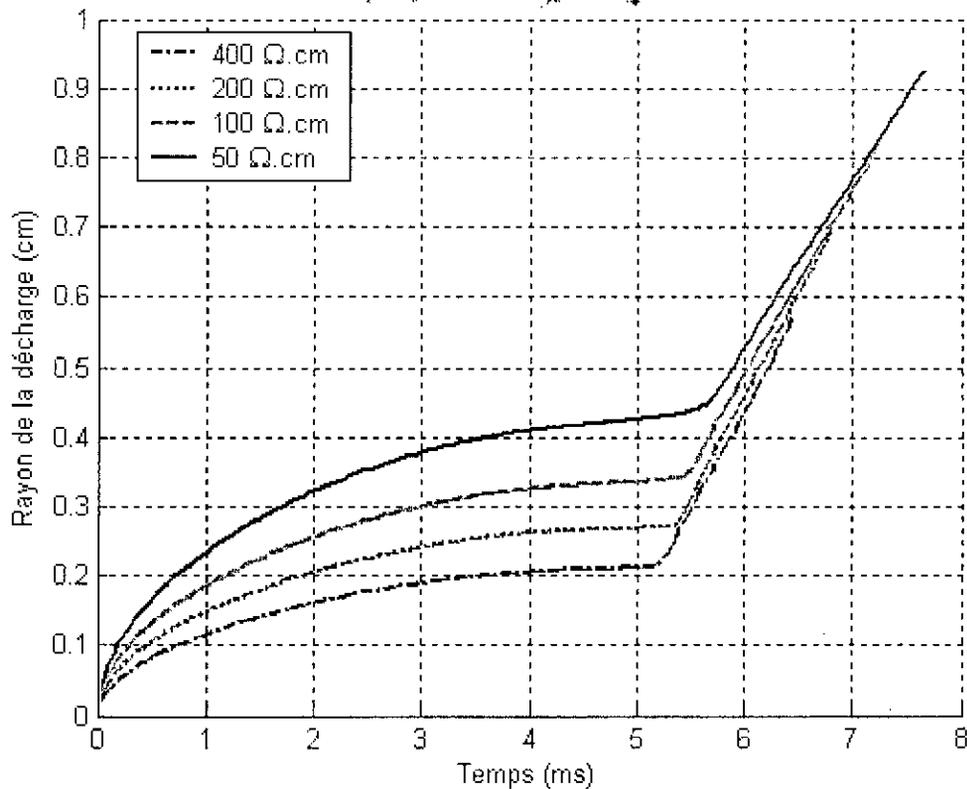


Figure III.11 : Rayon de l'arc en fonction du temps

III.3.1.7. Champs au pied de l'arc et dans la pollution

Les figures (III.12) et (III.13) présentent les évolutions des champs au pied de la décharge et dans la pollution en fonction du temps, pour différentes résistivités. A l'instant où le critère de propagation est vérifié, le champ dans la couche polluante devient supérieur à celui au pied de la décharge. Ce dernier champ diminue au cours du temps. Cette diminution est plus accentuée durant la phase de préparation. L'intersection entre le champ au pied de l'arc et celui dans la pollution représente en fait l'instant de propagation de la décharge comme le montre la figure (III.14).

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

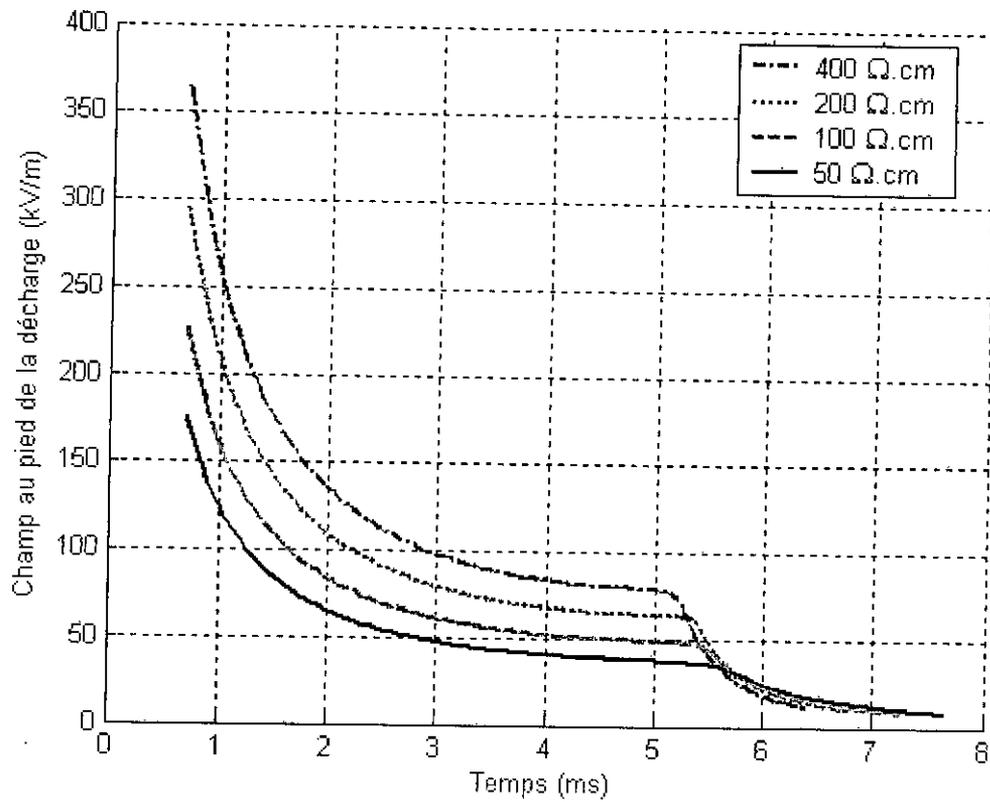


Figure III.12 : Champ au pied d'arc en fonction du temps

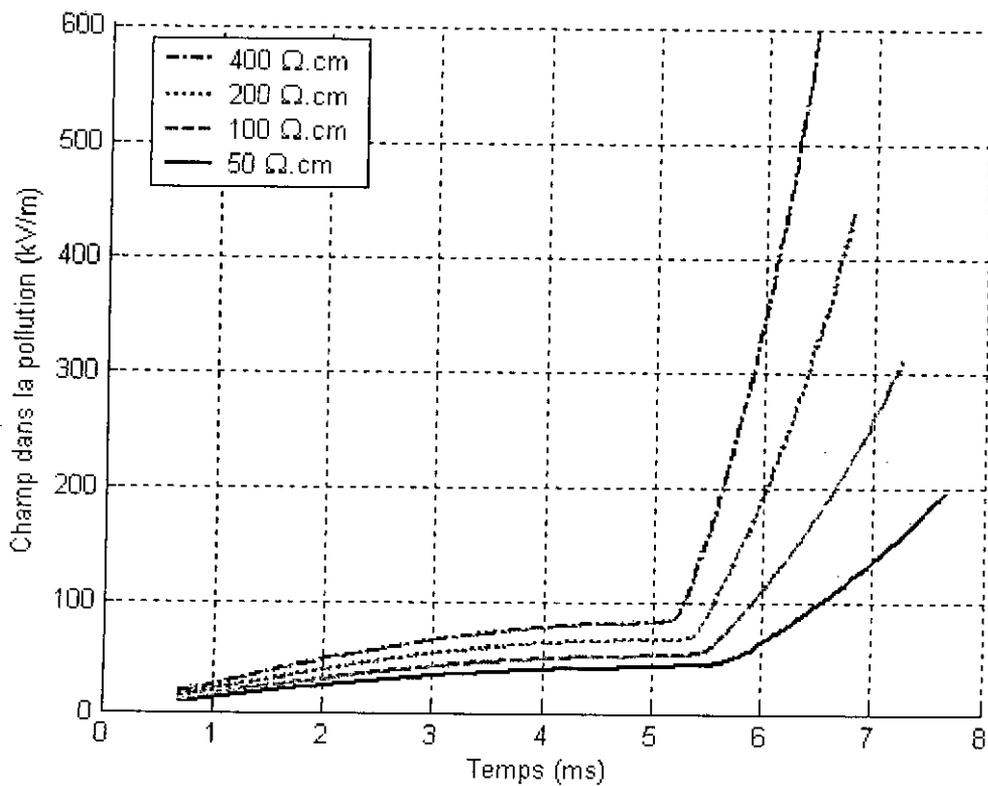


Figure III.13 : Champ dans la couche de pollution en fonction du temps

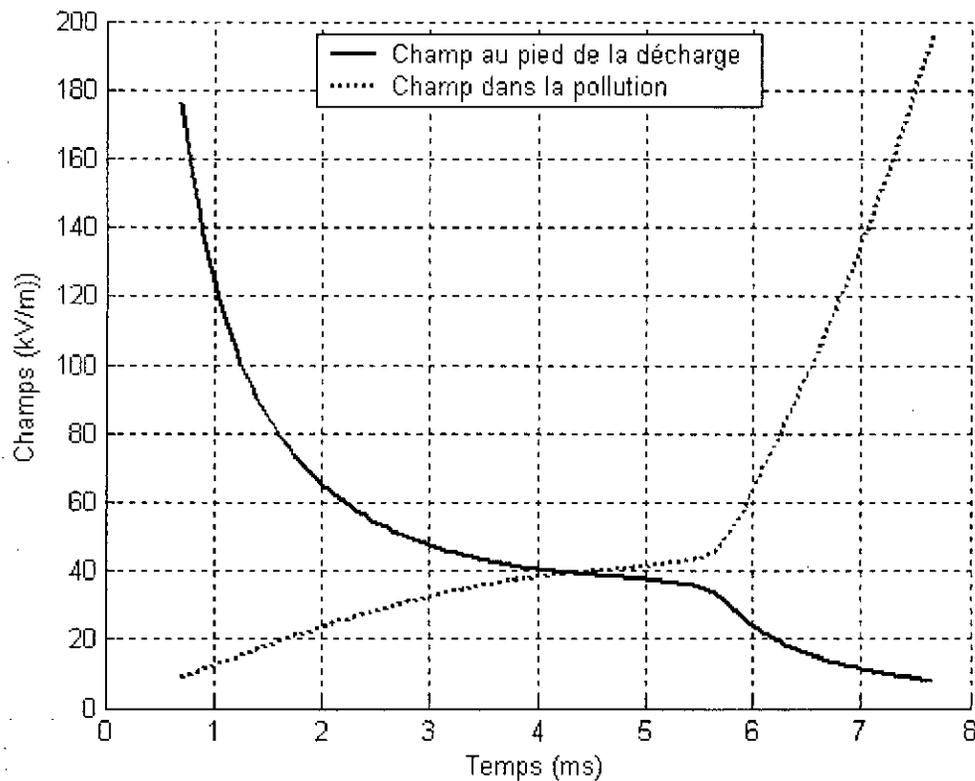


Figure III.14 : Champ dans la couche de pollution et Champ au pied d'arc en fonction du temps, pour une résistivité de $50 \Omega \cdot \text{cm}$

III.3.1.8. Vitesse de propagation

La figure (III.15) illustre l'évolution temporelle de la vitesse de d'élongation de la décharge électrique. Cette vitesse diminue dans le temps. Cette diminution est plus accentuée durant la phase de contournement. Ceci est expliqué par la diminution du champ au pied de cette décharge auquel la vitesse est proportionnelle. D'autre part, l'augmentation de la résistivité entraîne la l'augmentation de la vitesse de propagation.

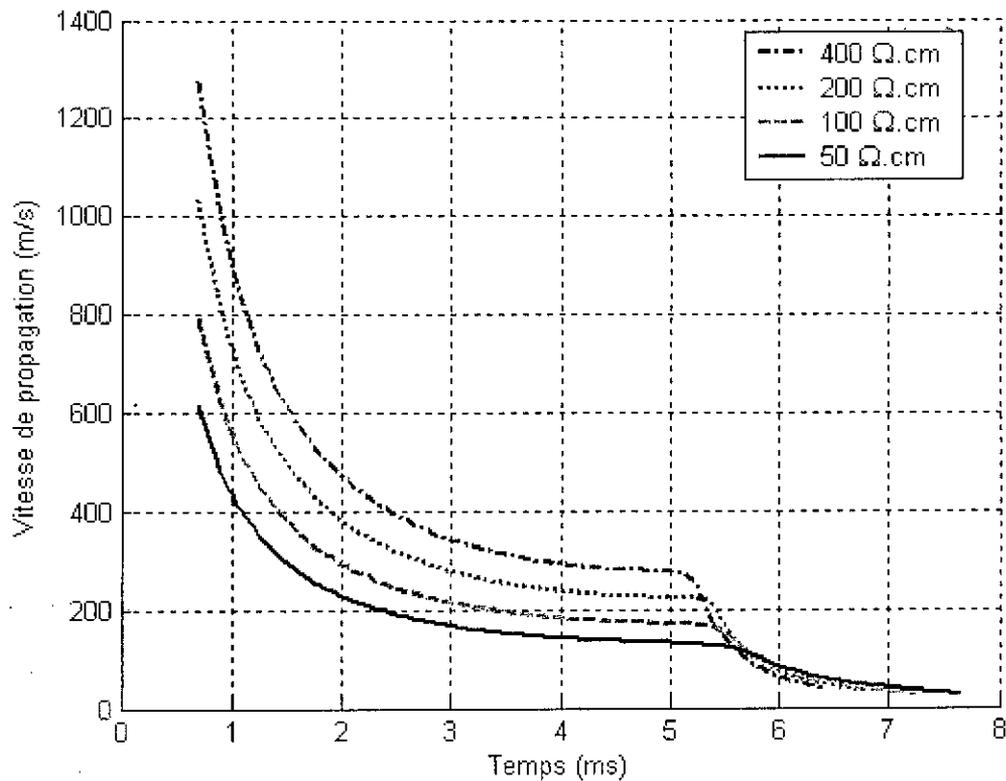


Figure III.15 : Vitesse de propagation de la décharge en fonction de temps

III.3.1.10. Puissance et énergie transférées dans l'arc

La puissance et l'énergie dissipées dans l'arc électrique possèdent une même allure que celle de la longueur de l'arc à laquelle elles sont proportionnelles (Figure III.16 et Figure III.17), puisque la constante caractéristique de l'arc n est prise égale à l'unité.

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

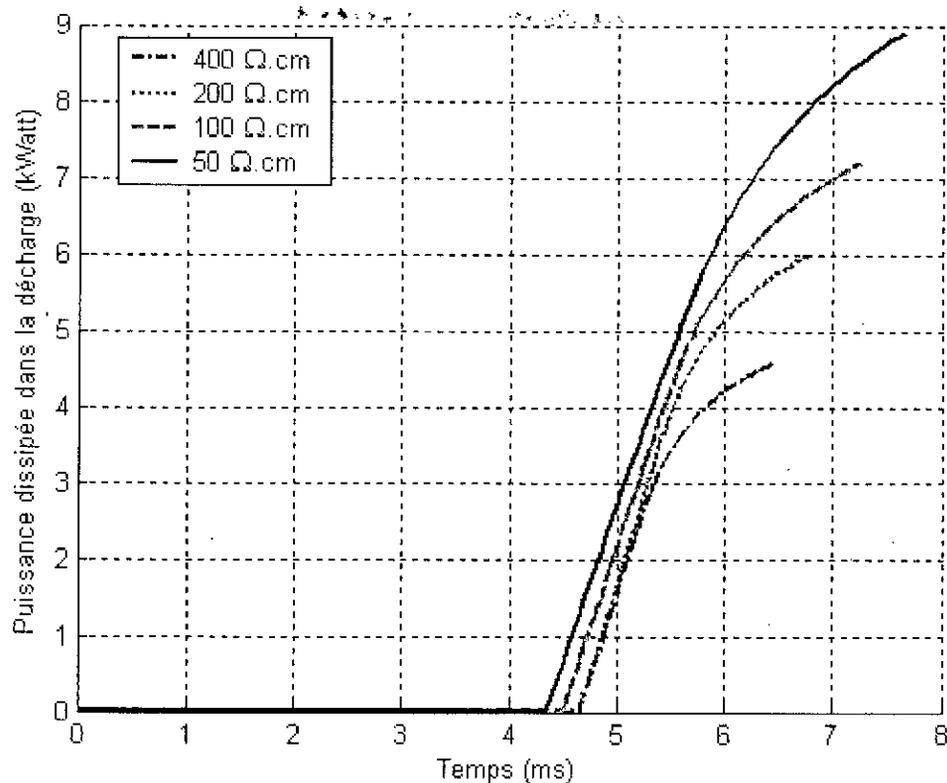


Figure III.16 : Puissance dissipée dans l'arc en fonction du temps

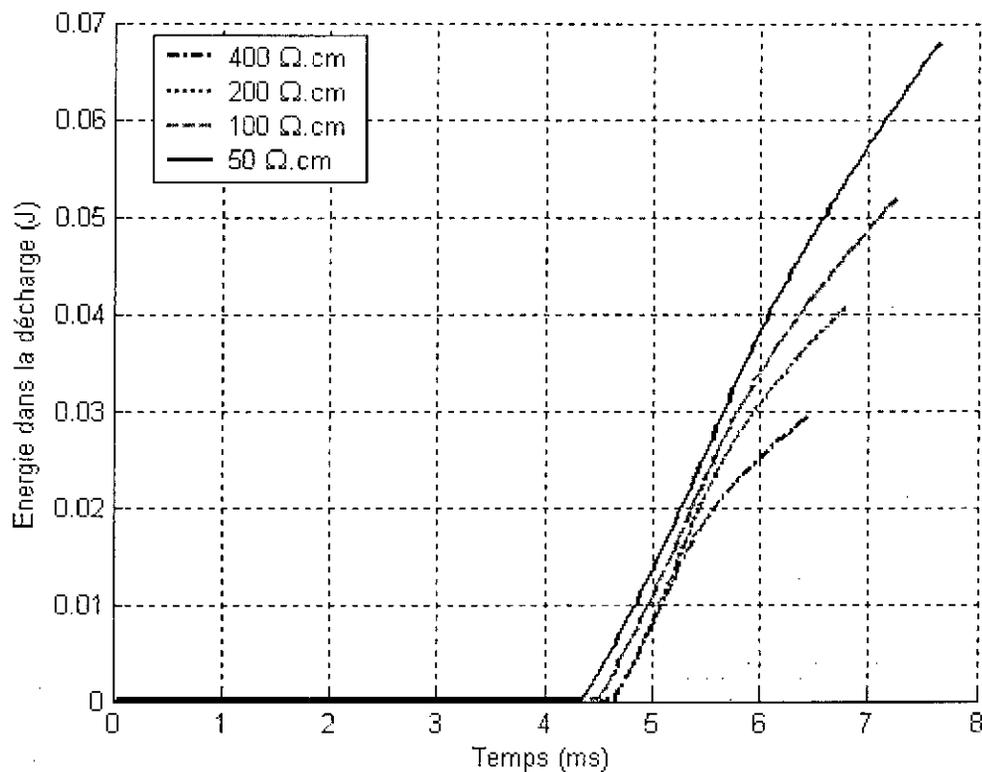


Figure III.17 : Energie dissipée dans l'arc en fonction du temps

III.3.1.11. Puissance et énergie fournie par la source

La puissance et l'énergie délivrées par la source augmentent lentement pendant la phase de préparation et la phase de propagation, et rapidement durant la phase de contournement (Figure III.18 et Figure III.19).

Notons que l'augmentation de la résistivité de la pollution engendre la diminution de la puissance et l'énergie fournie par la source.

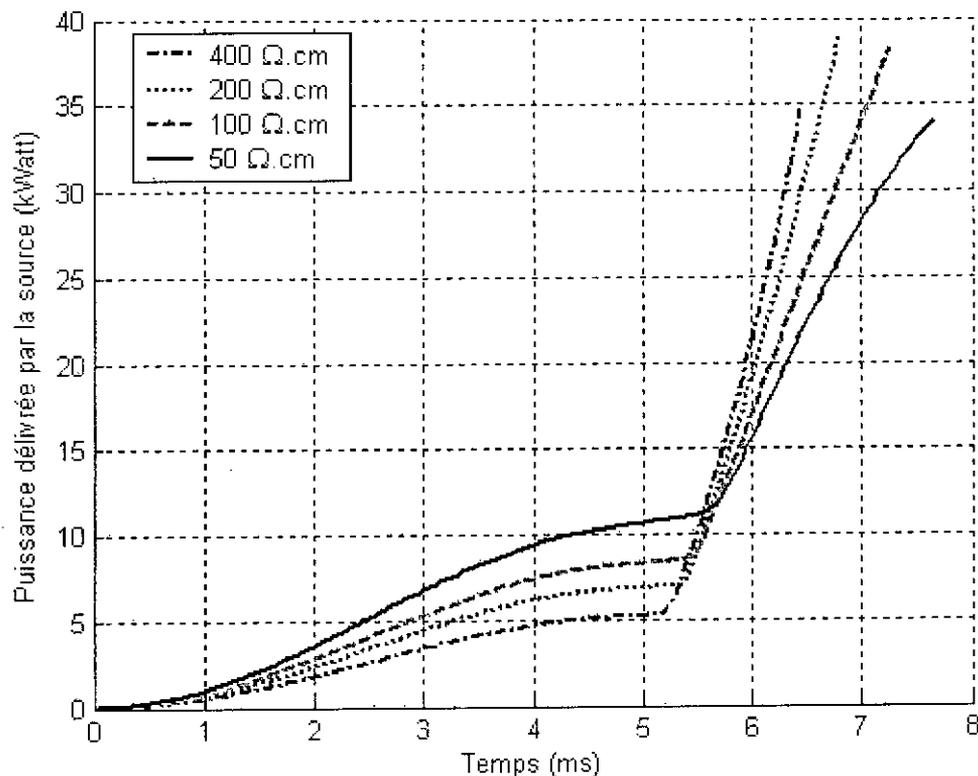


Figure III.18 : Puissance fournie par la source en fonction du temps

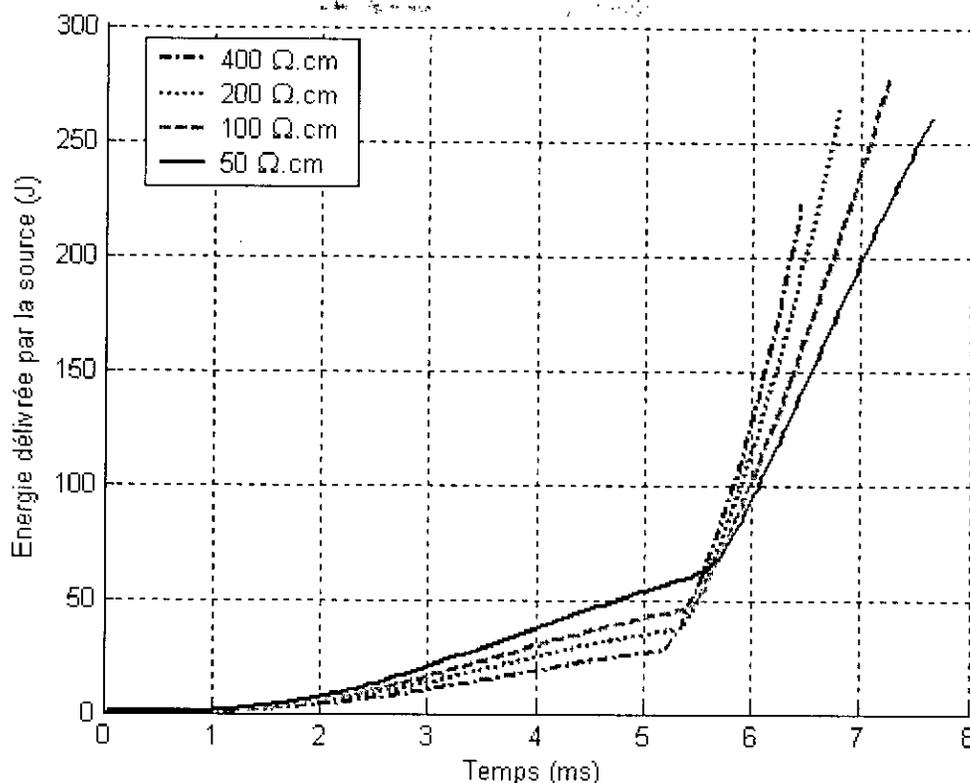


Figure III.19 : Energie fournie par la source en fonction du temps

III.3.2. Evolution spatiale

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

III.3.2.1. Résistance de l'arc

La figure (III.20) montre la variation de la résistance de l'arc en fonction de la longueur d'arc comparée à la ligne de fuite. Nous observons que la résistance d'arc augmente jusqu'à une certaine longueur critique, puis diminue. Nous remarquons également que cette longueur critique varie en fonction de la résistivité, car plus la résistivité est grande, plus cette longueur critique est faible.

Cette constatation a été déjà faite par Zegnini et Mahi [36], lorsqu'ils ont montré l'existence d'une zone critique de développement et de propagation de la décharge, responsable de l'élongation et donc de l'accomplissement du phénomène de contournement. Selon ces auteurs, cette zone évolue entre 38.5% jusqu'à 72.1% de la longueur de fuite. Les

valeurs de la longueur critique comparée à la ligne de fuite que nous avons obtenues sont 47.4, 48.9, 50.65 et 51.24% respectivement pour les résistivités suivantes 400, 200, 100 et 50 Ω .cm. il est évident que nos valeurs appartiennent à l'intervalle trouvé par Zegnini et Mahi, ce qui justifie la validité du programme élaboré.

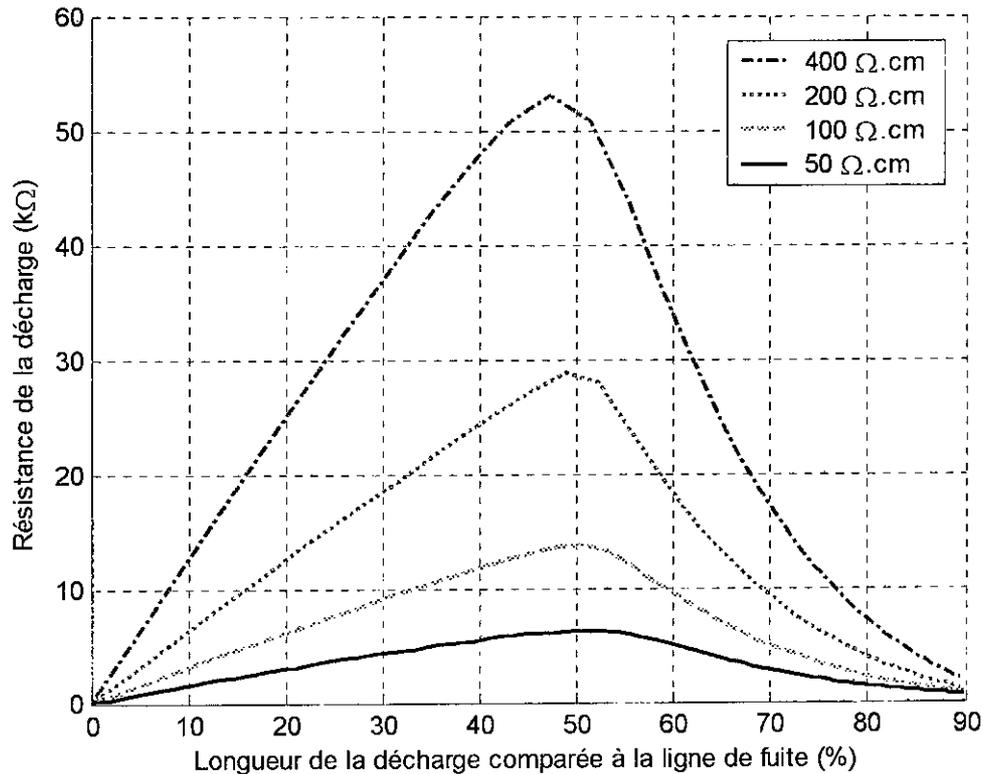


Figure III.20 : Résistance de la décharge en fonction de la longueur d'arc comparée à la ligne de fuite

III.3.2.2. Vitesse de propagation

La variation de la vitesse de propagation en fonction de la longueur de fuite est illustrée dans la figure (III.21). Nous remarquons que la vitesse de propagation diminue lentement jusqu'à la longueur critique puis diminue brusquement ailleurs.

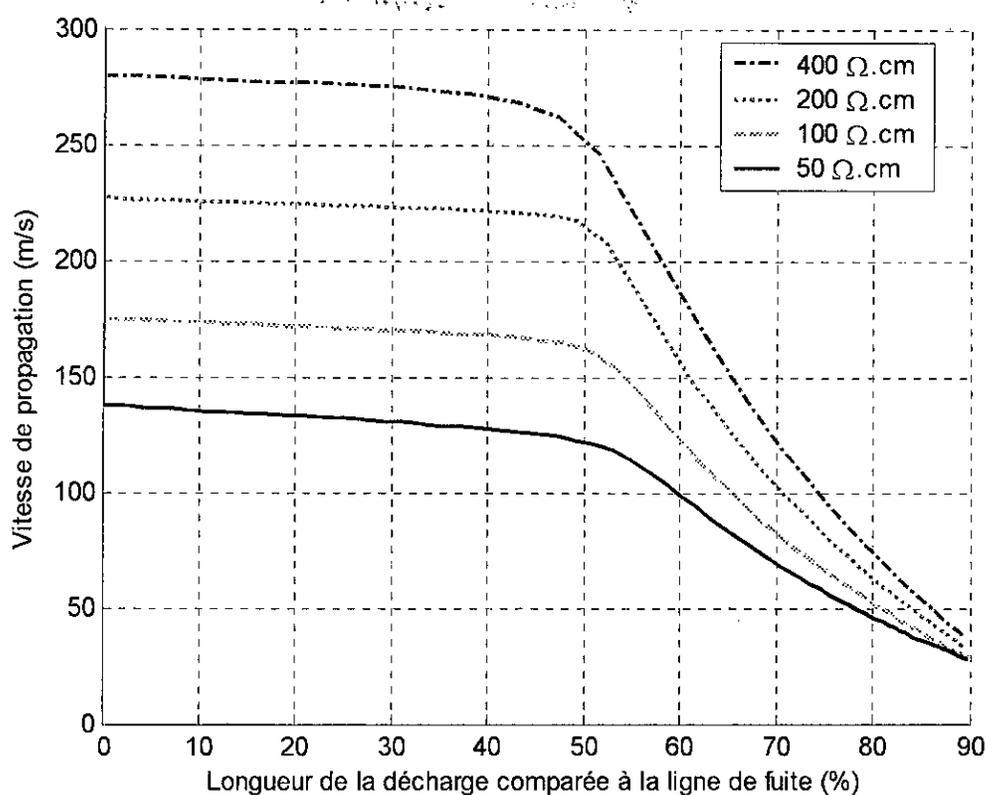


Figure III.21 : Vitesse de propagation en fonction de la longueur d'arc comparée à la ligne de fuite

III.3.2.3. Courant et rayon de la décharge

Les figures (III.22) et (III.23) présentent respectivement la variation de courant de fuite et le rayon de la décharge en fonction de la longueur de fuite. Nous constatons que le courant et le rayon augmentent lentement jusqu'à la longueur critique, puis rapidement sur le reste de l'intervalle inter-électrodes.

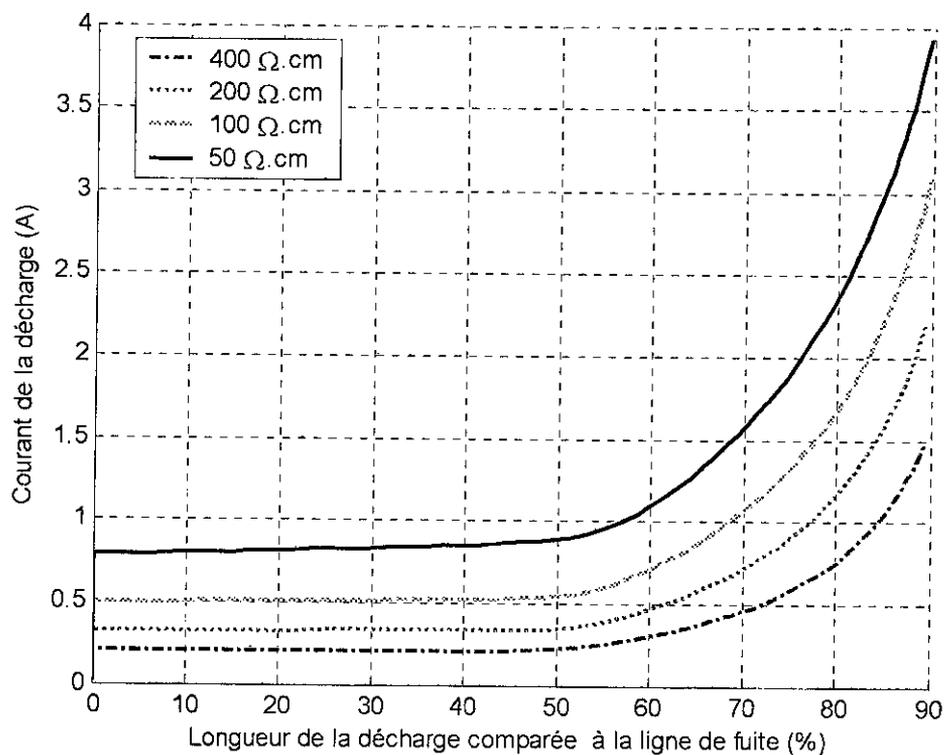


Figure.III.22 : Courant de fuite en fonction de la longueur d'arc comparée à la ligne de fuite

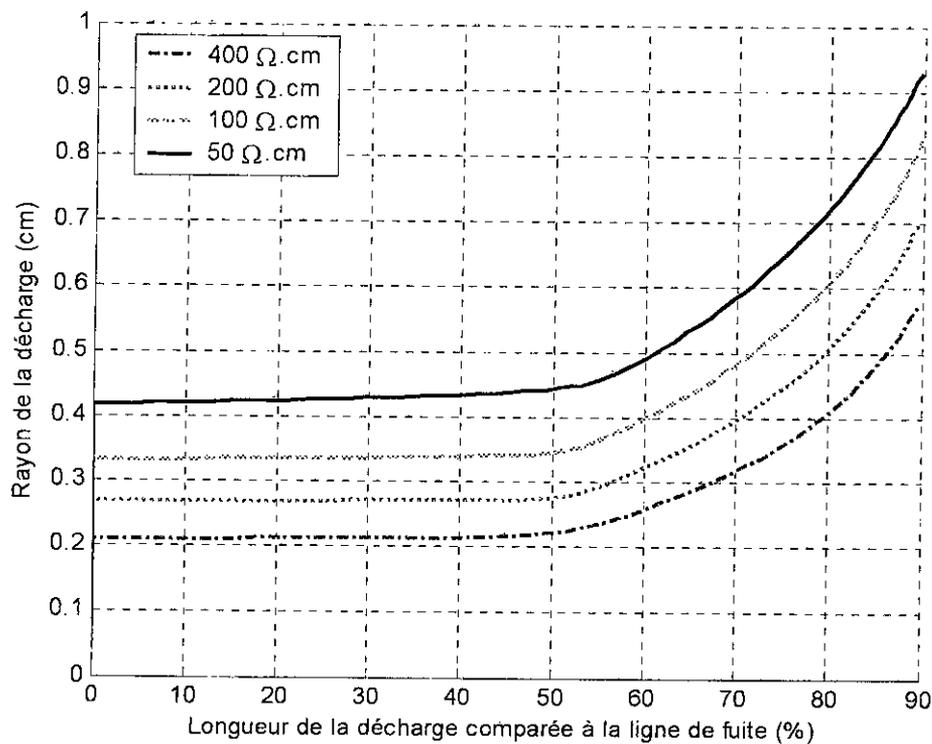


Figure III.23 : Rayon de décharge en fonction de la longueur d'arc comparée à la ligne de fuite

III.3.3. Temps au contournement

La figure (III.24) montre que le temps au contournement diminue avec la résistivité de la couche polluante. Ceci est expliqué par le fait que lorsque la résistivité de la couche polluante est très grande, le contournement se produit directement sans apparition d'arcs partiels. Ce processus a pour effet de réduire le temps au contournement. Par contre, lorsque cette résistivité est telle que des décharges prenant naissance, se développent jusqu'à provoquer le contournement, le temps dû à cette élongation sera important.

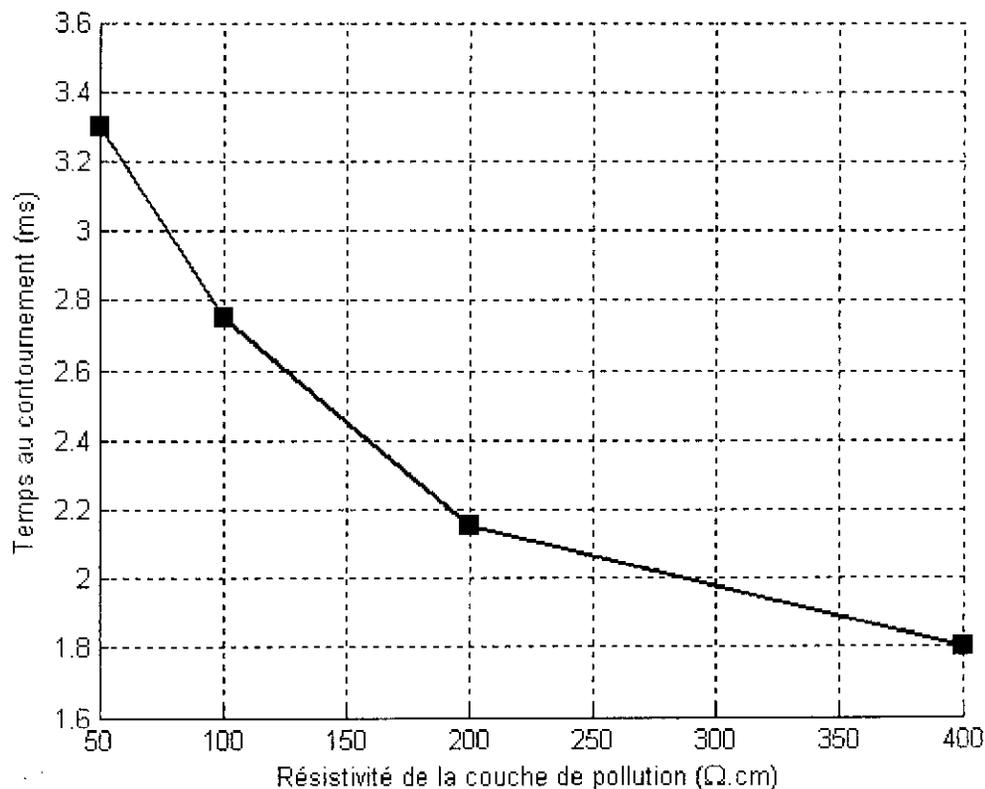


Figure III.24 : Temps au contournement en fonction de la résistivité de la couche polluante

III.4. Conclusion

L'étude du phénomène de contournement sous tension alternative, pose le problème du réamorçage de l'arc après extinction, suite au passage par zéro du courant. Pour éviter cette difficulté, nous avons considéré que le contournement aura lieu dans la première alternance positive. Les résultats ainsi obtenus sont satisfaisants par rapports à ceux rapportés dans la littérature [6].

Par ailleurs, les caractéristiques temporelles que nous avons obtenues présentent trois évolutions distinctes correspondant à la phase de préparation (avant propagation

correspondant à l'effet de couronne), la phase de propagation et la phase de contournement. Le courant de fuite et le rayon de la décharge augmentent lentement dans la phase de préparation et la phase de propagation, puis augmentent rapidement dans la phase de contournement. D'autre part, la longueur et la puissance de la décharge augmentent régulièrement dans la phase de propagation et celle de contournement, et dans la phase de préparation, elles sont pratiquement nulles.

Nos caractéristiques spatiales présentent deux parties correspondant à la phase de propagation et de contournement. La résistance de la décharge augmente rapidement dans la phase de propagation jusqu'à une valeur critique, puis diminue dans la phase de contournement. Le courant et le rayon de la décharge augmentent lentement dans la phase de propagation jusqu'à la longueur critique, puis rapidement sur le reste de l'intervalle inter-électrodes. Cette longueur critique (correspondant à la fin de la phase de propagation et le début de la phase de contournement) varie légèrement en fonction de la résistivité. Ce résultat a été déjà trouvé par Zegnini et Mahi [36].

Chapitre IV

Résultats et Interprétation en Tension Impulsionnelle

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 – biexponentielle – 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. Onde impulsionnelle

La tension impulsionnelle est une tension transitoire apériodique qui habituellement croît rapidement jusqu'à une valeur crête, puis décroît plus lentement jusqu'à zéro. On peut produire une onde biexponentielle en laboratoire par les générateurs de choc. Le principe de ces générateurs 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 μs [31].

L'expression d'une onde biexponentielle 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).

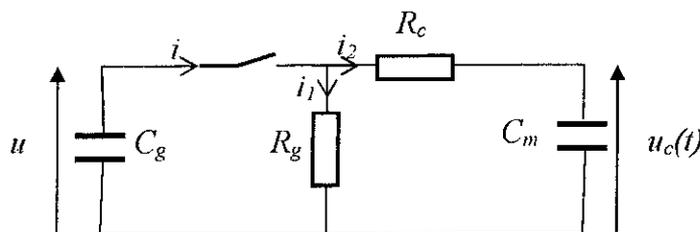


Figure IV.1 : Schéma équivalent du générateur de Marx

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 :

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

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_i 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_i :

$$u_i = \frac{u_m}{\left(\delta^{1/\delta} - \delta^{\delta/\delta}\right)} \quad (\text{IV.5})$$

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

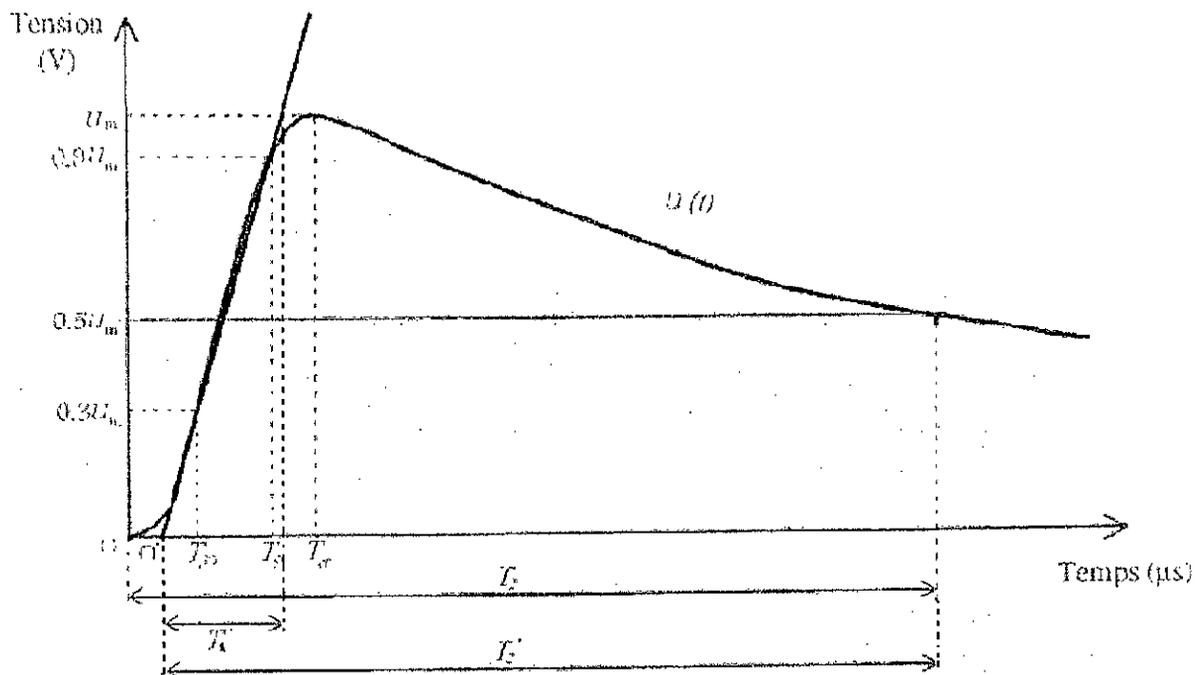


Figure IV.2 : Forme d'une onde impulsionnelle

IV.3. Validations :

Pour valider notre modèle en tension impulsionnelle, nous allons comparer certains de nos résultats à ceux obtenus numériquement par Dhahbi [31] et expérimentalement par Matsuo et al [37, 38].

IV.3.1. Validation basée sur le courant

Matsuo et al ont utilisé un modèle expérimental constitué d'une boîte de bakélite, de 20cm de longueur, de 3cm de profondeur et de 1cm de largeur. Cette boîte est remplie de 1cm de solution de chlorure de potassium. Une électrode pointe constituée d'une tige de tungstène de 1mm de diamètre, a été placée de 1mm au-dessus de la surface de solution (Figure IV.3). La distance inter-électrodes est maintenue constante et égale à 10cm. La résistance linéique ρ de la solution peut être variée de 80 à 700 Ω /cm.

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 figures (IV.4) et (IV.5). Notons que la résistance linéique est égale 380 Ω /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 μ 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.

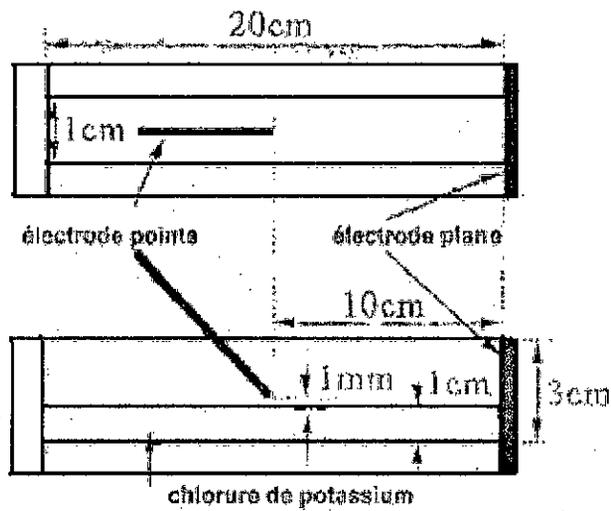


Figure IV.3 : Dispositif d'essai utilisé par Matsuo et al. [37]

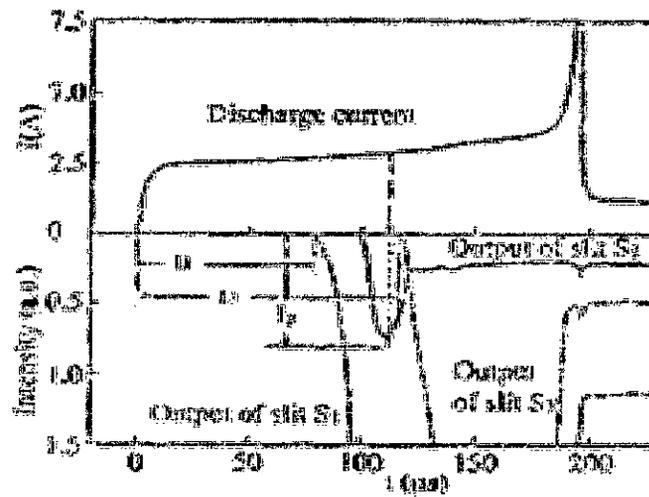


Figure IV.4 : Forme de courant présentée par Matsuo et al. [37]

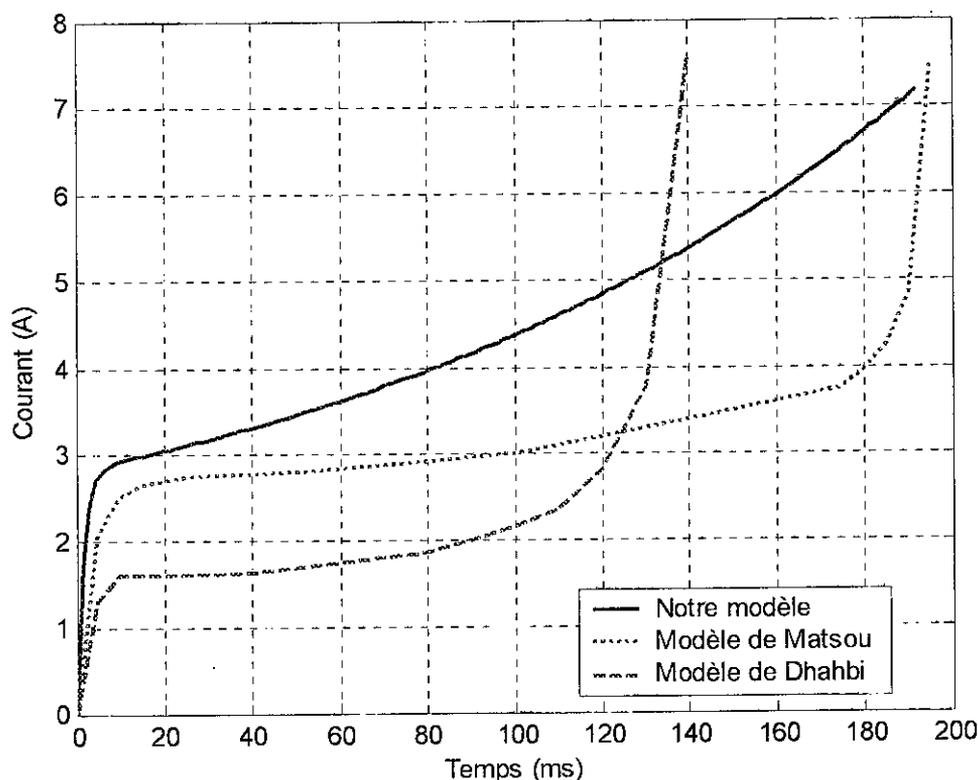


Figure IV.5 : Courant de la décharge en fonction du temps, cas d'un isolateur de longueur de fuite 10cm, de largeur 1cm, de résistance linéique $380\Omega/\text{cm}$ et une onde de $10/800\mu\text{s}$

IV.3.2. Validation basée sur la vitesse

Matsuo et al [38] ont mesuré la vitesse de propagation de la décharge, sur une solution d'électrolyte de résistance linéique variable (85 , 600 et $3000\Omega/\text{cm}$), pour une onde $2/80\mu\text{s}$.

La figure (IV.6) montre leurs zones de variation des vitesses de propagation mesurées, en grandeur réduite rapportée à celle du son (347 m/s) à pression et température ambiantes. Par ailleurs, la figure (IV.7) illustre la caractéristique de la vitesse de propagation en fonction de la longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite totale de l'isolateur. Des deux figures précédentes, nous constatons que nos valeurs concordent parfaitement avec celles mesurées par Matsuo et al.

Notons que les tensions que nous avons appliquées sont 6 , 12 et 21kV respectivement pour 85 , 600 et $3000\Omega/\text{cm}$.

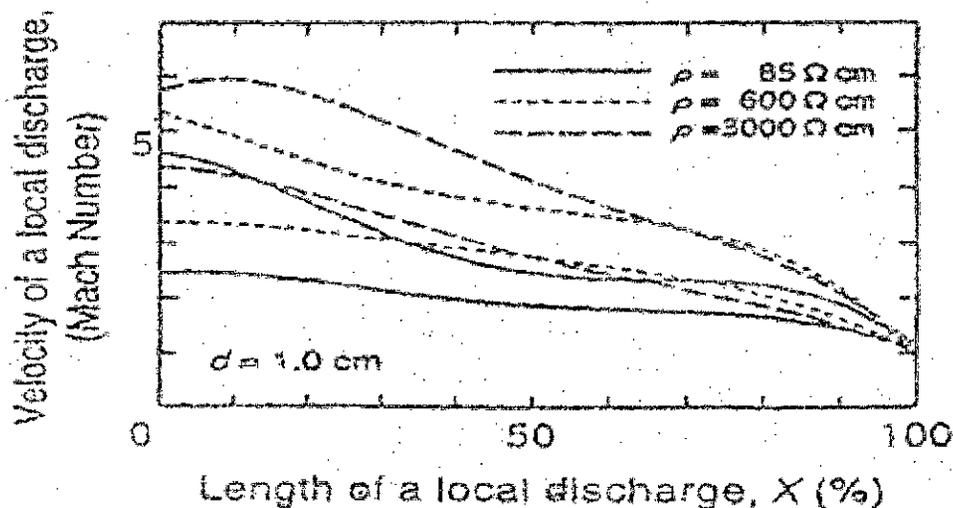


Figure IV.6 : Vitesse de propagation comparée à 347m/s en fonction de la longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite, cas d'un isolateur de 10cm de longueur de fuite, de 1cm de largeur et une onde de 2/80μs, selon Matsuo et al.[38]

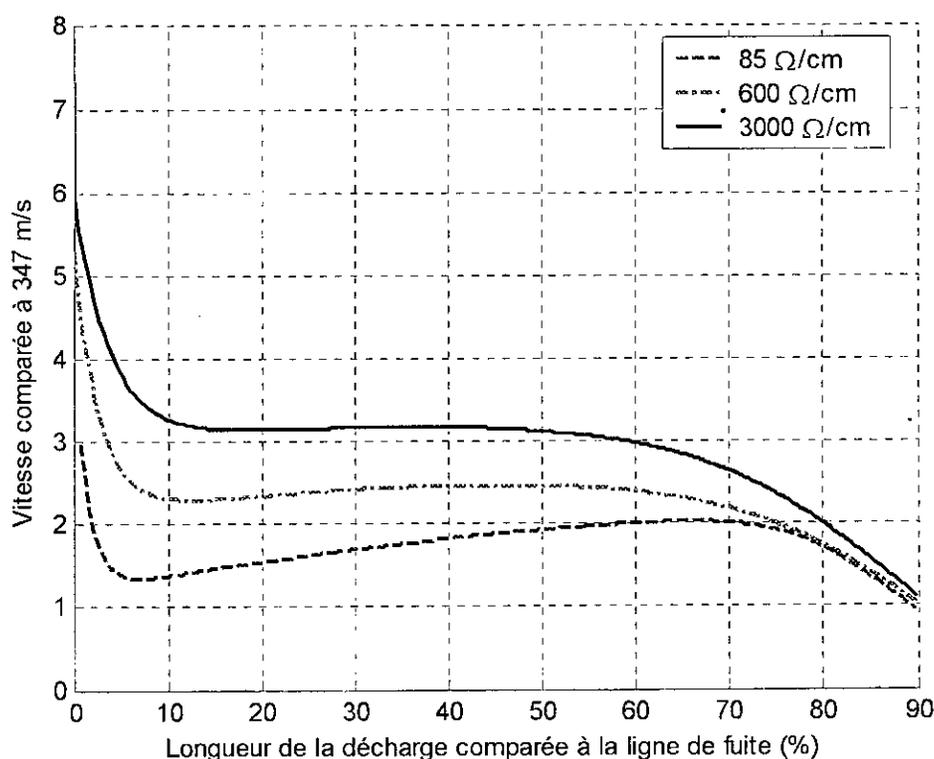


Figure IV.7 : Vitesse de propagation comparée à 347m/s en fonction de la longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite, cas d'un isolateur de 10cm de longueur de fuite, de 1cm de largeur et une onde de 2/80μs

IV.4. Application

Dans le but de décrire la dynamique de l'arc électrique évoluant sur une surface isolante polluée sous tension impulsionnelle, 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 [38] et les mêmes résistances linéiques.

IV.4.1. Evolution temporelle

IV.4.1.1. Vitesse de propagation

La figure (IV.8) 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.

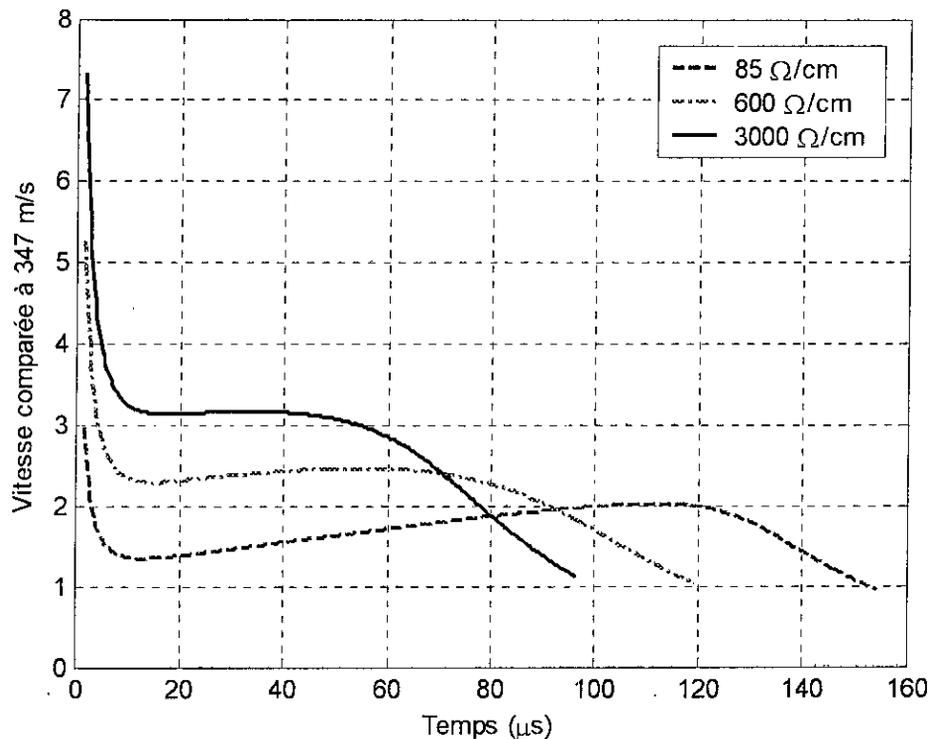


Figure IV.8 : Vitesse de propagation comparée à 347m/s en fonction de temps

IV.4.1.2. Tension dans la couche de pollution et tension de l'arc

Les figures (IV.9) et (IV.10) montrent respectivement la variation dans le temps de la tension dans la couche de pollution et la tension de l'arc, pour différentes résistances

linéiques. La tension dans la couche de pollution évolue selon la tension appliquée. D'autre part, 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 dans la couche de pollution ainsi que la tension d'arc. Il est à signaler que la tension de la couche polluante est considérable par rapport à celle aux bornes de la décharge. Ceci est conforme à l'expérimentation, du fait que la plus grande partie de la tension appliquée se trouve reportée aux bornes de la couche non court-circuitée par l'arc [6, 20]

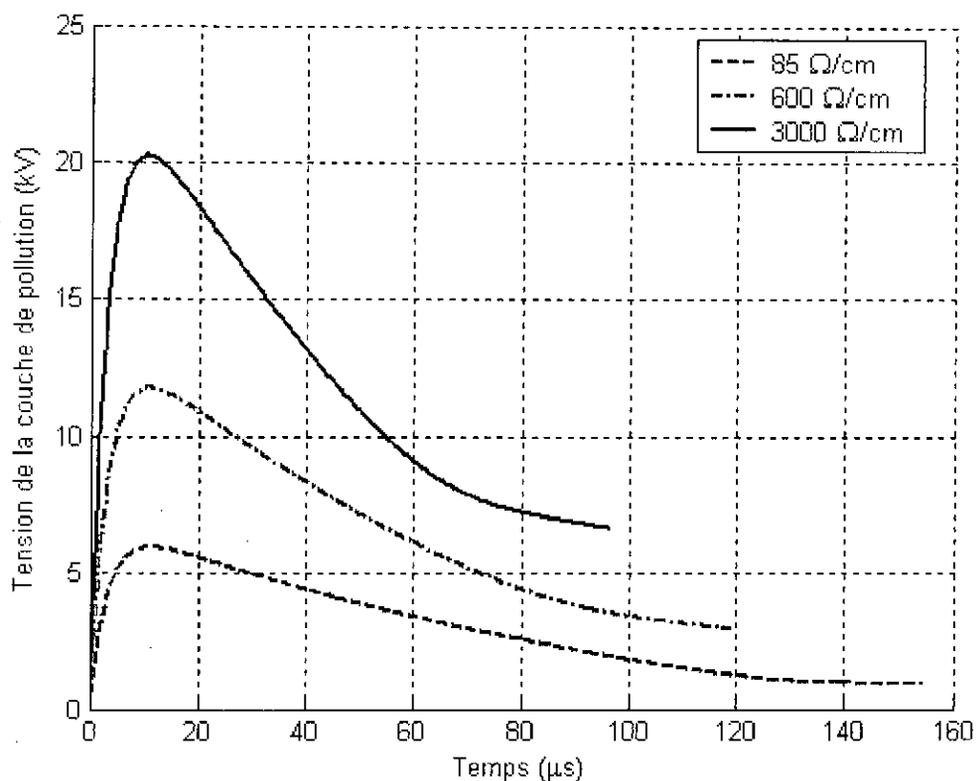


Figure IV.10 : Tension dans la couche de pollution en fonction du temps

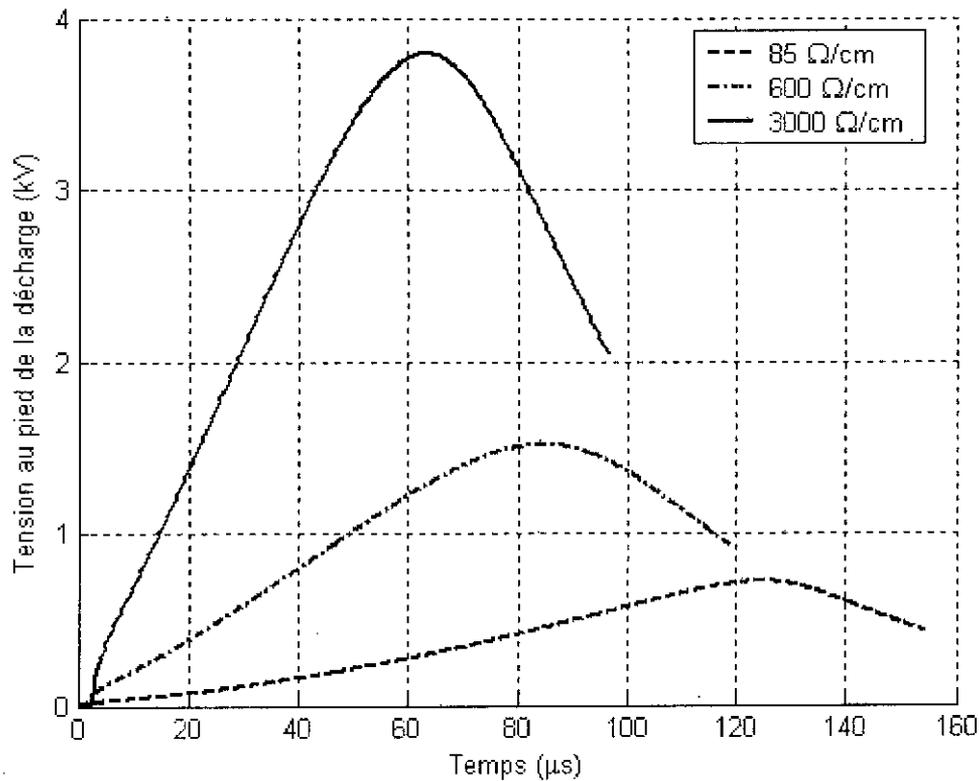


Figure IV.11 : Tension de l'arc en fonction du temps

IV.4.1.3. Courant et rayon de la décharge

Les caractéristiques des figures (IV.12) et (IV.13), donnant respectivement le courant et le rayon de la décharge en fonction du temps, montrent que durant la phase de préparation de l'arc électrique, 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 lentement. Cette décroissance est suivie d'une augmentation brutale correspondant à la phase de contournement. Nous constatons également que plus la résistance linéique est faible plus les courants et donc les rayons de la décharge sont importants.

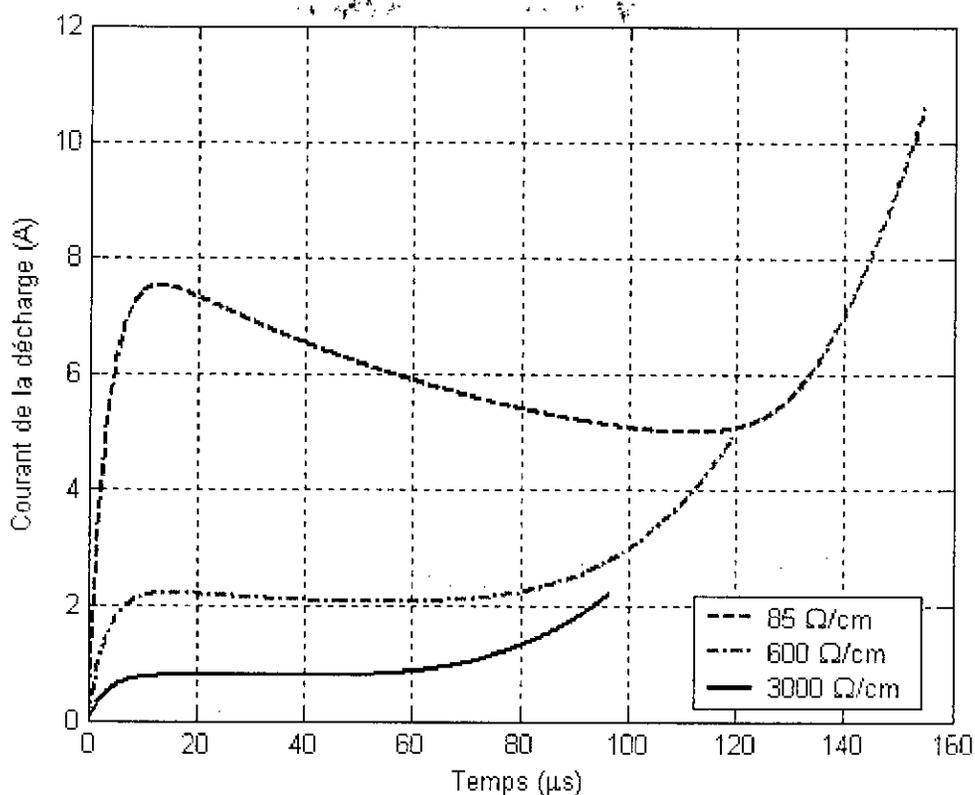


Figure IV.12 : Courant de la décharge en fonction de temps

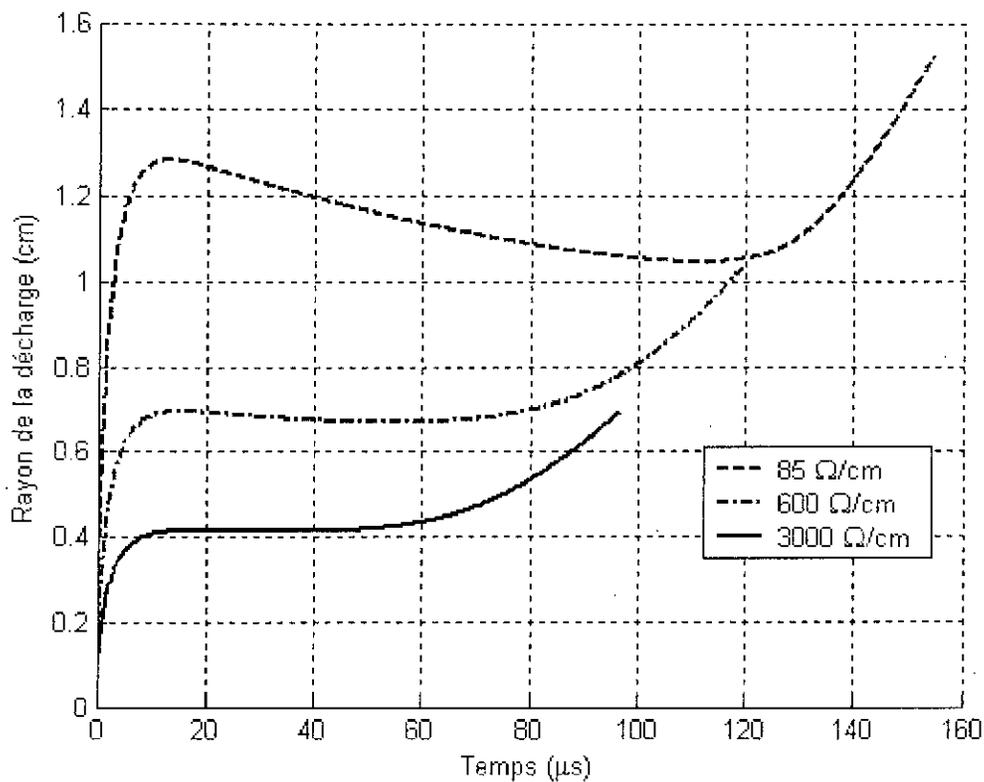


Figure IV.13 : Rayon de la décharge en fonction du temps

IV.4.1.4. Longueur de la décharge

L'évolution de la décharge dans le temps est illustrée dans la figure (IV.14). Cette dernière montre que l'arc électrique augmente d'une manière régulière dans le temps. Notons que plus la résistance linéique est importante, plus vite l'arc se déplace. En effet, l'augmentation de la résistance linéique engendre l'élongation de l'arc.

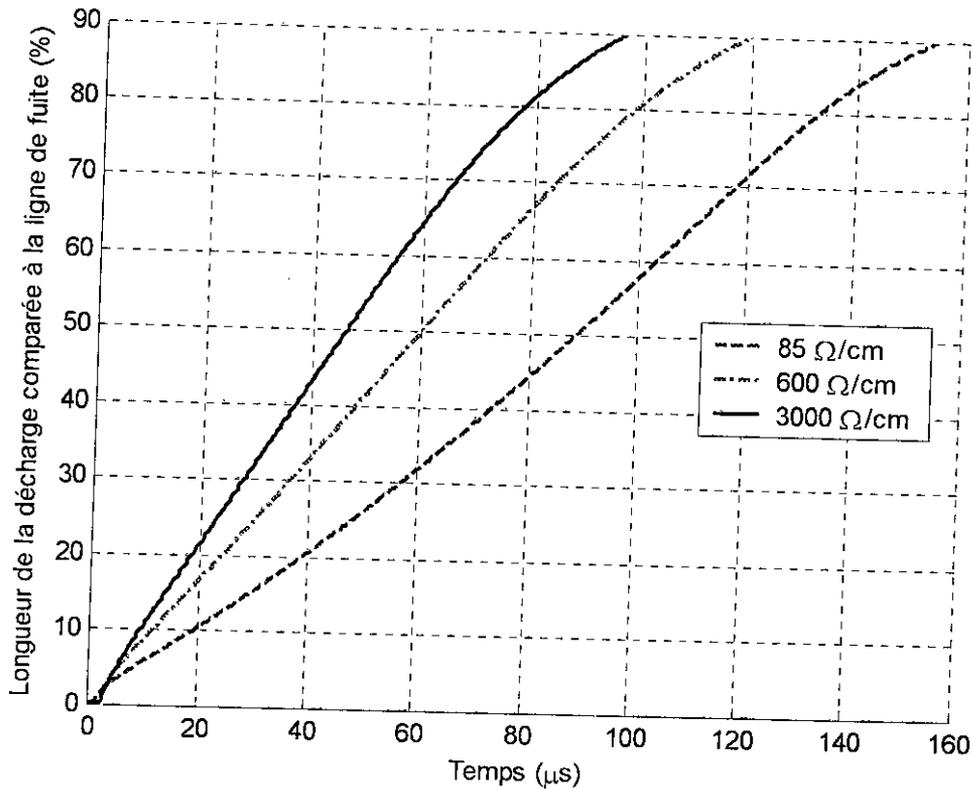


Figure IV.14 : Longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite en fonction du temps

IV.4.1.5. Puissance et énergie transférées dans l'arc

La puissance dissipée dans l'arc électrique possède la même allure que celle de la longueur de l'arc (Figure IV.15). Par ailleurs, l'énergie transférée dans l'arc augmente en fonction du temps (Figure IV.16).

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.

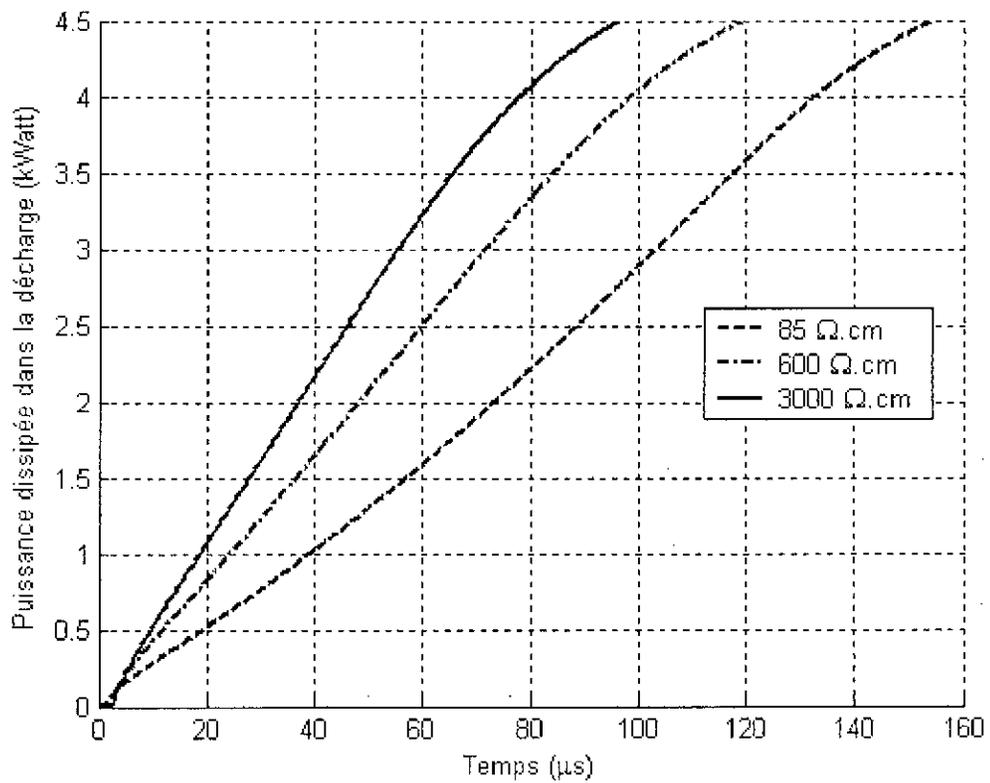


Figure IV.15 : Puissance dissipée dans l'arc en fonction du temps

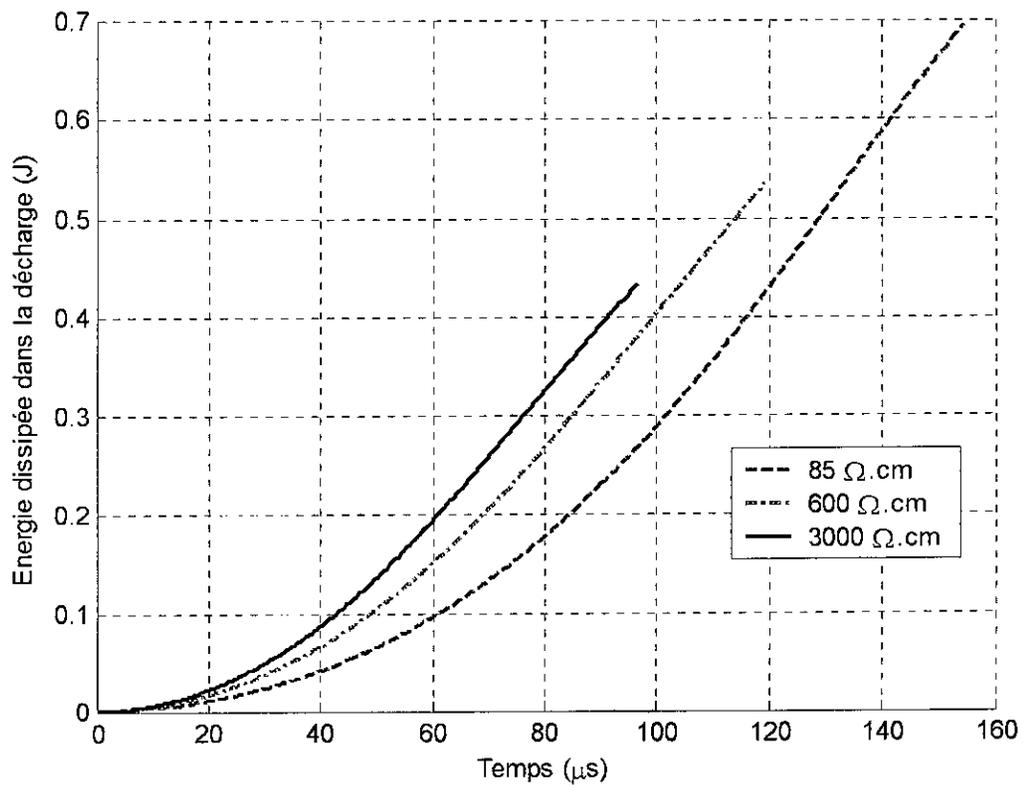


Figure IV.16 : Energie dissipée dans l'arc en fonction du temps

IV.4.1.6. Résistance de l'arc

La variation de la résistance de l'arc en fonction du temps est présentée à la figure (IV.17). 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.

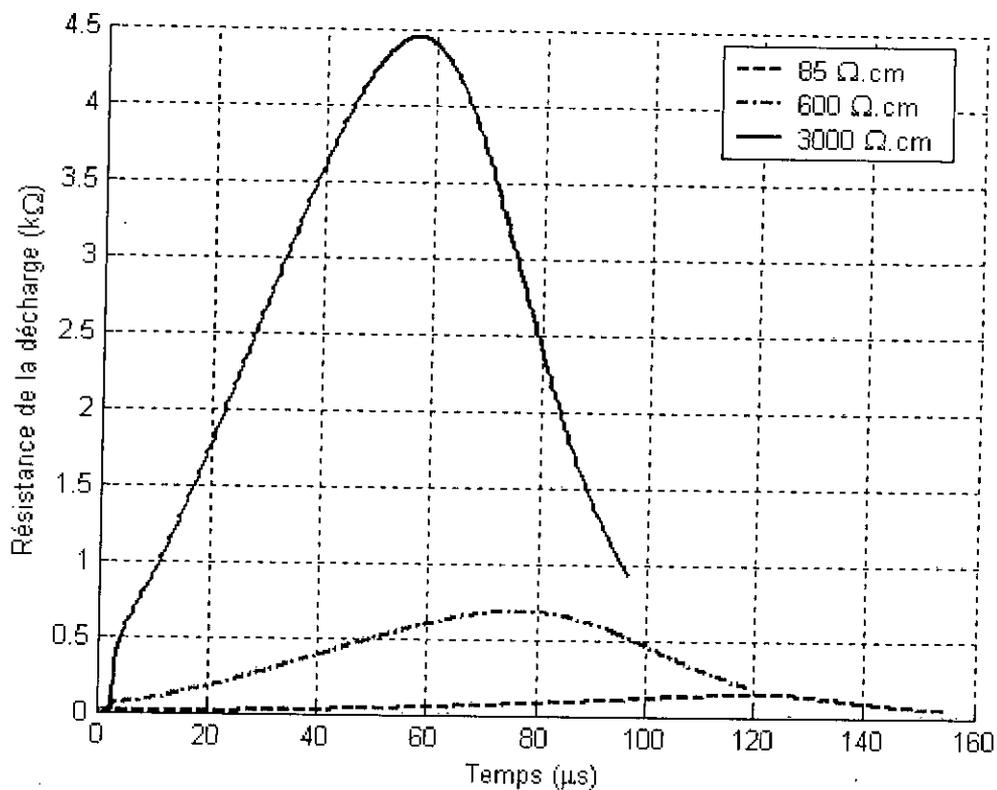


Figure IV.16 : Résistance de l'arc en fonction du temps

IV.4.2. Evolution spatiale

IV.4.2.1. Courant et rayon de la décharge

Les figures (IV.18) et (IV.19) 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 lentement. Cette décroissance est suivie d'une augmentation brutale correspondant à la phase de contournement.

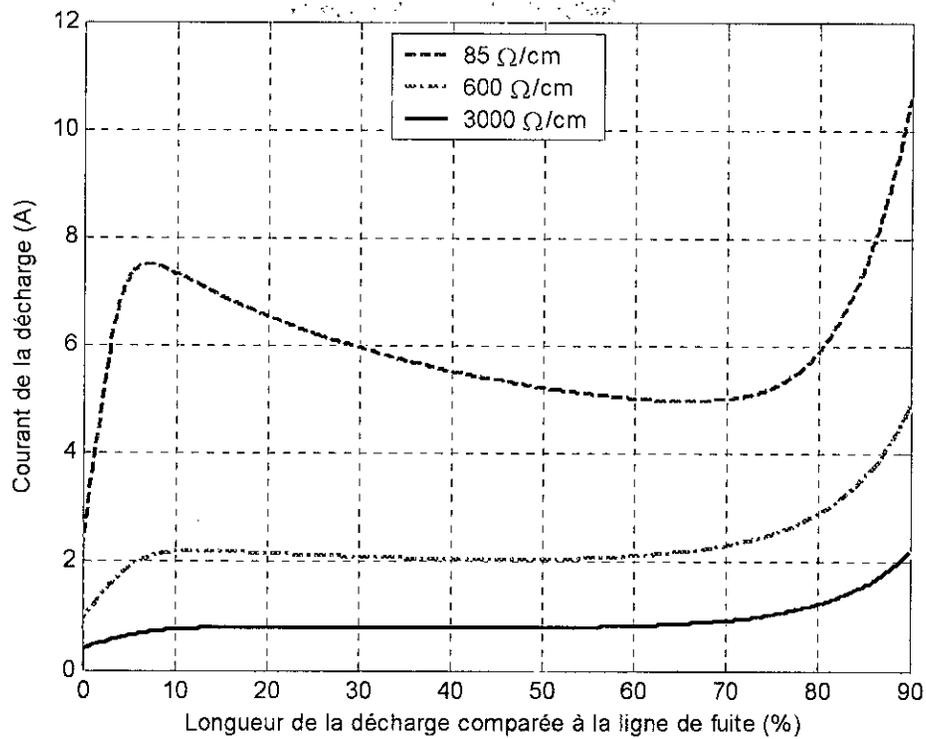


Figure IV.18 : Courant de la décharge en fonction de la longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite

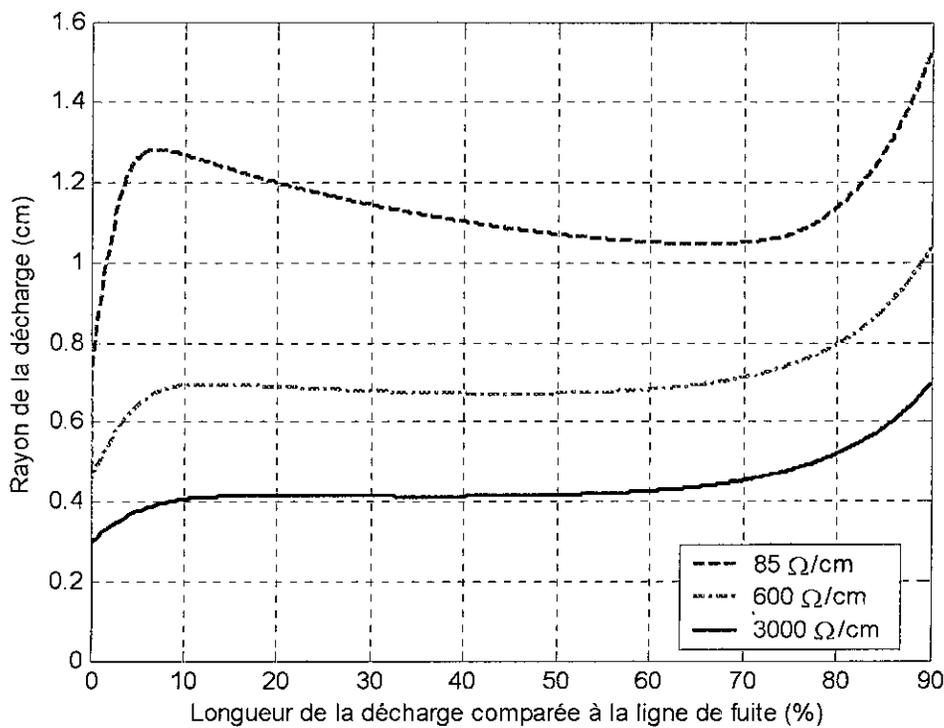


Figure IV.19 : Rayon de la décharge en fonction de la longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite

IV.4.2.2. Résistance de l'arc

La figure (IV.20) 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.

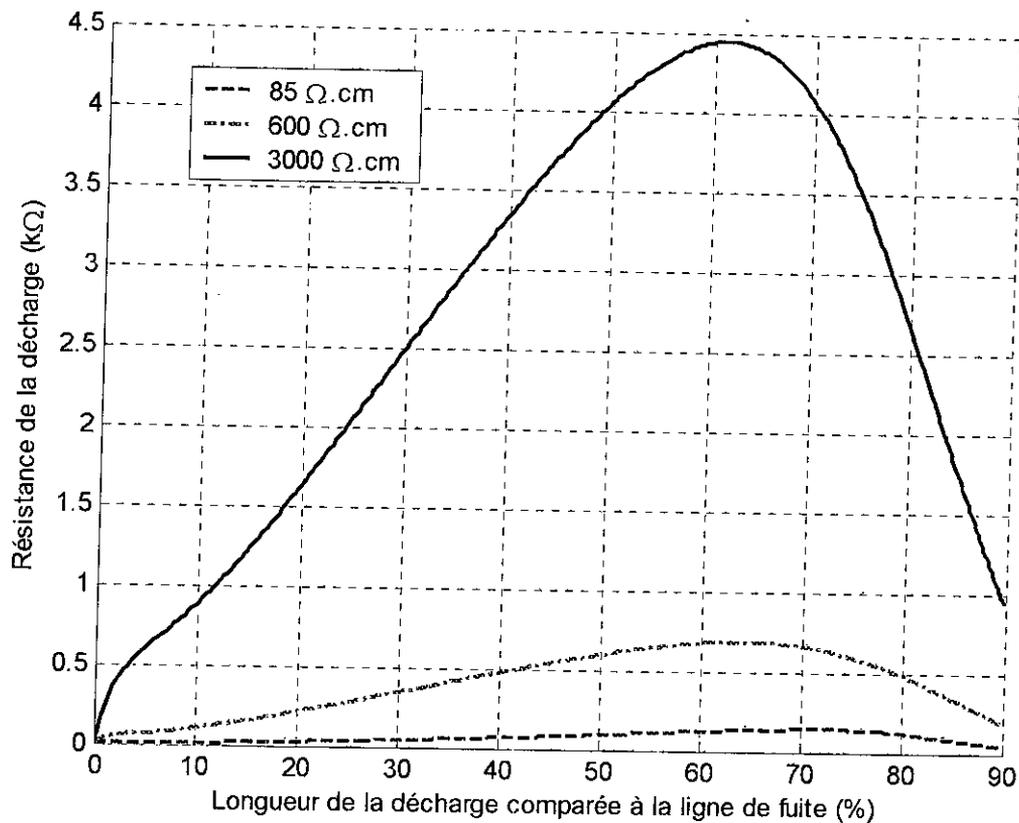


Figure IV.20 : Résistance de la décharge en fonction de la longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite

IV.5. Conclusion

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

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. Selon le modèle proposé, il est évident 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. En effet, nous avons trouvé une longueur critique de 61.3, 64 et 72.3% respectivement pour 3000, 600 et 85 Ω /cm.

Conclusion générale

Conclusion générale

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, l'énergie et la puissance transférées dans cet arc), ainsi que la résistance de pollution, le champ dans la pollution et la vitesse de propagation de l'arc.

Un bon 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. Ce résultat a été prouvé par Zegnini et Mahi, dans le cas d'une tension alternative. Nous estimons, par conséquent, que notre modèle est un outil appréciable de prédiction du comportement d'un isolateur pollué, soumis à une tension alternative ou 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 à cet handicap, une connaissance de la physique de la décharge s'avère indispensable.

Par ailleurs, notre modèle peut être développé en y intégrant d'autres paramètres tels que la présence d'arcs multiples, l'influence de l'effet thermique, la discontinuité de la résistance de la couche polluante, la formation des zones sèches et des conditions atmosphériques, etc.

Bibliographie

- [1] J. Danis, "*A Stochastic Pollution Flashover Model*", 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 - 12, Septembre 5 - 9, 1983, Athènes, Grèce.
- [2] F. Obenaus, "*Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge*", Deutsche Elektrotechnik, Vol. 4, pp. 135 - 136, 1958.
- [3] H. Zhang and R. Hackam, "*Electrical Surface Resistance, Hydrophobicity and Diffusion Phenomena in PVC*", IEEE Trans. on Elect. Insul, Vol. 6, N° 1, pp. 73 - 83, February 1999.
- [4] F. Rizk, "*Mayhemical Modeles for Pollution Reignition*", Electra, Vol. 78, pp. 71 - 103, 1981.
- [5] P. Claverie and Y. Porcheron, "*How to Choose Insulators for polluted Areas*", IEEE Trans. PAS, Vol. 92, N° 3, pp. 1121 - 1131, 1973.
- [6] M. Teguar, "*Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Électriques sur des Isolateurs Installés en Régions Polluées*", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Juillet 1993.
- [7] A. Mekhaldi, "*Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternatives 50 Hz*", Thèses de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Septembre 1999.
- [8] P. S. Gosh, S. Chakravorti and N. Chatterjee, "*Estimation of Time to Flashover Characteristics of Contaminated Electrolytic Surfaces Using a Neural Network*", IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul., Vol. 2, N° 6, pp. 1064 - 1076, December 1995.
- [9] G. Neumärker, "*Verschmutzungs Zustand und Kriechweg*", Monatsber. d. Deut. Akad, Wiss., Berlin, Vol. 1, pp. 352 - 359, 1959.
- [10] P. Claverie, "*Predetermination of the Behaviour of Polluted Insulators*", IEEE Trans. PAS, Vol. 90, N° 4, pp. 1902 - 1908, Juillet 1971.
- [11] S. Gopal and Y. Narayana Rao, "*On the Flashover Mechanisms of Polluted Insulators*", ISPPISD, IIT, pp. 1 - 6, Madras, Inde, 1983.
- [12] Publication IEC 71-2, "*Insulation Coordination, Application Guide*", Seconde Edition, 1976.
- [13] L. L. Alston and S. Zoledziowski, "*Growth of Discharges on Polluted Insulators*", IEEE, Trans. PAS, Vol. 110, N° 7, pp. 1260 - 1266, Juillet 1963.
- [14] H. Nacke, "*Lichtbogen festigkeit und kriechstrom festigkeit von isolier stoffen*", Dissertation, University of Berlin-Charlottenburg, 1962.
- [15] H. Nacke, "*Stabilitat der Fremdschichtentladungen und Theorie des Fremdschichtüberschlags*", ETZ - A, N° 16, pp. 577 - 585, 1966.

- [16] R. Wilkins, "*Flashover Voltage of High Voltage Insulators with Uniform Surface Pollution Films*", Proc. IEE, Vol. 116, N° 3, pp. 457 - 465, Mars 1969.
- [17] H. Boehme and F. Obénaus. "*Essais de Contournement sur des Isolateurs Pollués en Laboratoire et en Lieu de Service du Point de Vue de la Conception d'un Modèle D'amorçage pour Courant Rampant*", CIGRE, N° 407, Paris, France, 1966.
- [18] B. F. Hampton, "*Flashover Mechanism of Polluted Insulation*", Proc. PIEEE, Vol. 111, N° 5, pp. 985 - 990, Juillet 1964.
- [19] H. Woodson and A. J. McElroy. "*Insulators With Contaminated Surfaces Part II: Modelling of Discharge Mechanisms*", IEEE Trans., Vol. Pas-89, N° 8, pp. 858 - 867. November- December 1970.
- [20] M. Tégua. "*Modélisations d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro-géométriques*", Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Avril 2003.
- [21] CEI 60 - 1, "*Techniques des Essais à Haute Tension*", Définitions et Prescriptions Générales Relatives aux Essais, Deuxième Edition, 1989.
- [22] R. Wilkins and A. J. Al-Baghdadi, "*Arc Propagation along an Electrolyte Surface*", Proc. IEE, Vol. 118, N° 12, pp. 1886 - 1892, December 1971.
- [23] A. M. Rahal and C. Huraux, "*Flashover of High Voltage Insulators*", IEEE Trans., Vol. Pas - 98, N° 6, pp. 2223 - 2231, 1979.
- [24] S. Hesketh, "*General Criterion for the Prediction of Pollution Flashover*", Proc. IEE, Vol. 114, N° 4, p. 531 - 532, April 1967.
- [25] S. Anjana and C. S. Lakshminarasmha, "*Computed of Flashover Voltages of Polluted Insulators using Dynamic Arc Model*", 6th International Symposium on high voltage Engineering, paper 30 - 09, New Orleans, USA, 1989.
- [26] N. Dhahbi - Megriche, A. Beroual and L. Krahenbuhl, "*A New Proposal Model for Polluted Insulators Flashover*", Journal of Physics D: Applied Physics, (30), N° 5, pp. 889 - 894, March 1997.
- [27] F. A. M. Rizk and D. H. Nguyen, "*Digital Simulation of Source Insulator Interaction in HVDC Pollution Tests*", IEEE Trans. on Power Delivery, pp. 405 - 410, 1988.
- [28] O. Mayr, "*Beitrag zur Theorie der Statischen und der Dynamischen Litchbogens*", Arch. f. Elektrotechnik, Vol. 37, pp. 588 - 608, 1943.
- [29] R. Sundararajan and R. S. Gorur, "*Computer Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Conditions*", IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul., Vol. 2, N° 1, pp. 121 - 127, February 1995.
- [30] N. Dhahbi - Megriche and A. Beroual, "*Flashover Dynamic Model of Polluted Insulators Under AC Voltage*", IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul., Vol. 7, N° 2, pp. 283 - 289, April 2000.

- [31] N. Dhahbi, "*Modélisation Dynamique des Décharges sur les Surfaces d'Isolateurs Pollués sous Différentes Formes de Tensions: Elaboration d'un Critère Analytique de Propagation*", Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, France, 1998.
- [32] R. Sundararajan and R. S. Gorur, "*Dynamic Arc Modeling of Pollution Flashover of Insulators under dc Voltage*", IEEE Trans. on Dielec. and Elect. Insul., Vol. 26 N° 2, pp. 209 - 218, April 1993.
- [33] M. A. B. EL Koshairy and F. A. M. Rizk, "*Comportement des Isolateurs des Lignes de Transport à Très Haute Tension dans les Conditions de Pollution Désertiques*", CIGRE, Rapport 33 - 05, Paris, 1970.
- [34] Z. Renyu and G. Zhicheng, "*A Study on the Difference between the Flashover Voltages of Contaminated Insulators under AC and DC Voltages*", IEEE Trans., pp. 332 - 334, 1985.
- [35] E. H. A. M. Rahal, "*Sur les Mécanismes Physiques du Contournement des Isolateurs Haute Tension*", Thèse Sciences Physiques, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1979.
- [36] B. Zegnini et D. Mahi, "*Etude Dynamique de la Propagation sur une Surface d'Electrolyte d'une Décharge Electrique Alimentée en Courant Alternatif*", 4^{ième} Conférence National de Haute Tension, pp. 129 - 132, Ghardaïa 16-17 janvier 2002.
- [37] H. Matsuo T. Yamashita, T. Fujishima and O. Takenouchi. "*Propagation Velocity and Photoemission Intensity of a Local Discharge on an Electrolytic Surface*", IEEE Trans. on Diel and Elect. Insul., Vol.3, N° 3, pp. 444 - 449, June 1996.
- [38] H. Matsuo, T. Yamashita, T. Fujishima and O. Takenouchi. "*Gas Density Changes Generated by Local Discharge on an Electrolytic Surface*", 10th International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 121 - 124, Montréal, 1997.