

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



Centre Universitaire D'El-Oued

MEMOIRE

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



Conception d'un Modèle Dynamique de Contournement d'un Isolateur Pollué sous Tension Alternative

Présenté par :

GHEMIMA BACHIR B AH

GHEMIMA BACHIR B AO

BEDIDA MED HAMZA

Encadrée par :

M. GUEHRAR YUCEF

Promotion 2007

Remerciements

Ce travail a été réalisé au centre universitaire d'El - Oued du département de Génie Electrique, sous la direction Scientifique de Monsieur Y. GUEHRAR.

Nous remercions, notre encadreur Mr Y GUEHRAR Maître Assistant, Mr D BEN ATTOUS Maître de Conférences au centre universitaire d'El Oued, Mr A .CHEMSA Chargé de Cours au centre universitaire d'El-Oued. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre très sincères reconnaissances pour leurs précieuses directives, leur disponibilité, leurs fructueux conseils, leur suivi constant, leur courtoisie si raffinée et leurs qualités humaines.

Nous remercions également Mr T. GUEIA, Enseignant au centre universitaire d'El- Oued,

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

الإهداء

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

غميمة بشير بن احمد

الإهداء

نشكر الله على إتمام هذا العمل المتواضع
واهديه إلى نبع الحنان أمي أمي أمي
إلى رمز العطاء والكفاح أبي الفاضل
إلى إخوتي وأخواتي الأعزاء
وخاصة البرعم أخي عبد المنعم
إلى أعمامي وعمتي وأبنائهم
إلى أخوالي وخالتي وأبنائهم

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

غميمة بشير بن عون

الإهداء

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

بديدة محمد حمزة







INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I

POLITION DE ISOLATEUR HAUT TENSION	4
--	---

CHAPITRE IINo table of contents entries found.

MODELE STATIQUE ET DYNAMIQUE DE CONTOURNEMENT.....	16
--	----

II.1. Introduction	Error! Bookmark not defined.
--------------------	-------------------------------------

II.2. Modèles statiques de contournement	17
--	----

II.2.1. Modèle d'Obenaus.....	Error! Bookmark not defined.
-------------------------------	-------------------------------------

II.2.2. Modèle de Neumarker	Error! Bookmark not defined.
-----------------------------------	-------------------------------------

II.2.3. Modèle de Rizk.....	19
-----------------------------	----

II.2.4. Modèle de Claverie et Porcheron	Error! Bookmark not defined.
---	-------------------------------------

II.2.5. Modèle de Rao et Gopal	Error! Bookmark not defined.
--------------------------------------	-------------------------------------

I.2.6 . Modèle d'Alston et Zoledziowski.....	Error! Bookmark not defined.
--	-------------------------------------

II.2.7. Modèle de Danis	Error! Bookmark not defined.
-------------------------------	-------------------------------------

II.2.8. Modèle de Nacke et Wilkins	Error! Bookmark not defined.
--	-------------------------------------

II.2.9. Modèle de la couche mixte	24
---	----

II.2.10. Modèle du disque circulaire	25
--	----

II.2.11. Modèles de Tegar	Error! Bookmark not defined.
---------------------------------	-------------------------------------

II.3. Modèles dynamiques de contournement.....	28
--	----

II.3.1. Mécanisme de propagation	28
--	----

II.3.1.1. Propagation par ionisation	28
--	----

II.3.1.2. Propagation par force électrostatique	29
---	----

II.3.2. Critères de propagation de la décharge.....	29
---	----

II.3.2.1. Critère de Hampton	29
------------------------------------	----

II.3.2.2. Critère de Hesketh	30
------------------------------------	----

II.3.2.3. Critère de Wilkins.....	30
-----------------------------------	----

II.3.2.4. Critère de Anjana et Lakshminarasimha	30
---	----

II.3.2.5. Critère de Dhahbi, Beroual et Krahenbul	30
---	----

II.3.3. Modèles dynamiques	31
----------------------------------	----

II.3.3.1. Modèle de Rizk.....	31
-------------------------------	----

II.3.3.2. Modèle de Anjana et Lakshminarasimha	32
--	----

II.3.3.3. Modèle de Sundararajan et Gorur.....	33
II.3.3.4. Modèle de Dhahbi et Beroual.....	35

II.4.

Conclusion.....**Error!**

Bookmark not defined.

CHAPITRE III

No table of contents entries found.**CHAPITRE IV**

RESULTATS ET INTREPRETATION EN TENSION ALTERNATIV.....48

IV.1.Introduction	49
IV. 2. Validation	49
IV. 2.1. Validation sur le modèle de Tegar	49
IV.2.2. Validation sur le modèle de Zafer.....	52
IV.3. Application	53
IV.3.1. Evolution temporelle.....	54
IV.3.1.1. Tension appliquée, tension dans la couche de pollution et tension de l'arc	54
IV.3.1.2. Longueur de la décharge	56
IV.3.1.3. Courant de la décharge.....	56
IV.3.1.4. Résistance de la couche polluante.....	57
IV.3.1.5. Résistance de l'arc	58
IV.3.1.6. Rayon de la décharge	59
IV.3.1.7. Champs au pied de l'arc et dans la pollution.....	60
IV.3.1.8. Vitesse de propagation.....	62
IV.3.1.9. Puissance et énergie transférées dans l'arc	63
IV.3.1.10. Puissance et énergie fournie par la source	65
IV.3.2. Evolution spatiale.....	66
IV.3.2.1. Résistance de l'arc	66
IV.3.2.2. Vitesse de propagation.....	67
IV.3.2.3. Courant et rayon de la décharge.....	68
IV.3.3. Temps au contournemen.....	70

IV.4.Conclusion.....**Er**
ror! Bookmark not defined.

CONCLUSION GENERALE.....72
Conclusion générale.....73

Introduction générale

Dans nos jours, l'énergie électrique joue un rôle très important dans le développement et l'évolution de l'industrie et l'économie des pays. De ce fait, il faut assurer, à tout instant, un bon équilibre entre la demande croissante et la production de l'énergie. C'est pour cela, qu'une très grande part d'importance est attachée aux réseaux électriques de transport et de distribution, principalement aux lignes de haute tension. Ces lignes peuvent parcourir des centaines de kilomètres et donc traverser des régions très différentes par leur climat, leur industrialisation, leur localisation géographique, etc. Par conséquent, les systèmes d'isolation du réseau sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution qui se dépose sur les surfaces d'isolateurs. Quelle que soit leur nature, les polluants en état sec, ne provoquent pas la dégradation de la rigidité diélectrique [1, 2].

Dans les régions polluées, un bon choix de dimensionnement des isolateurs s'avère indispensable pour assurer la fiabilité et la qualité de l'isolement de haute tension. Afin de surveiller la qualité d'isolement d'un ouvrage, il est impératif de connaître réellement les mécanismes conduisant au contournement sous pollution. De nombreux travaux ont été faits, aussi bien théoriques qu'expérimentaux, mais ces mécanismes restent insuffisamment compris, à cause de grand nombre de facteurs difficiles [1] à cerner qui interviennent simultanément dans la génération et la propagation des décharges électriques.

Le présent travail porte sur l'élaboration d'un modèle analytique de propagation de l'arc sur une surface isolante polluée soumise à une tension alternative 50 Hz. Etant donné que sa nature est idéalisée, principalement à cause des hypothèses simplificatrices rendues nécessaires dans le calcul analytique, il ne peut en aucun cas se substituer au travail expérimental. Néanmoins, ce type de modèle est un outil permettant de faire des estimations préliminaires, de rationaliser les expériences conçues pour explorer le mécanisme de contournement, d'interpréter et de généraliser les résultats obtenus en un temps réduit. Ce modèle se base sur un circuit électrique équivalent et utilise des lois physiques. Notre modèle dynamique permet la prédiction des différents paramètres de l'arc et leurs évolutions dans le temps. Quatre chapitres y seront présentés.

Nous commençons le premier chapitre par un rappel sur les isolateurs, leurs utilités, leurs principaux types, leurs profils et leurs matériaux, ainsi que les caractéristiques de la pollution.

En suite deuxième chapitre, nous citons les principaux modèles rencontrés dans la littérature. Nous précisons 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 soumis à une tension alternative, sera présenté dans le chapitre trois. Ce modèle utilise un critère de propagation et se base sur circuit électrique équivalent. En effet, un isolateur pollué et partiellement contourné sera représenté par une décharge électrique de longueur donnée en série avec une résistance représentant la bande de pollution. Le canal de la décharge sera assimilé à des cellules résistives. Chaque cellule nouvellement créée représentera un nouveau déplacement partiel de l'arc.

L'exploitation numérique ainsi que la validation, en comparant certains résultats de simulation à ceux obtenus par d'autres chercheurs, feront l'objet du quatrième chapitre. Notons que 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 de la géométrie de l'isolateur ainsi que des variations instantanées des caractéristiques de l'arc (à savoir sa résistance, son rayon, sa longueur, la tension à ses bornes, sa résistivité et la puissance et l'énergie transférées dans cet arc), de la vitesse de propagation, du courant de fuite ainsi que du champ dans la pollution et celui de l'arc.

I.1.Introduction

Dans les réseaux de transport de l'énergie électrique, l'isolement pylône- conducteur est assuré par une chaîne d'isolateurs. Chaque chaîne est caractérisée principalement par sa longueur de fuite (nombre d'éléments). Cette longueur est adéquate au niveau de tension transportée.

Dans les lignes de haute tension, le dimensionnement des isolateurs est déterminé par la surtension de manœuvre [2]. Dans ce cas, la tenue à la tension nominale à 50 Hz des isolateurs propres et secs est excellente. Cependant, en l'absence de surtension de foudre ou de manœuvre, des nombreux défauts sont enregistrés sur les lignes aériennes, (contournement électrique, défaillance d'isolateurs), particulièrement par temps humide (rosée, brouillard, pluie fine,... etc.). Ces défauts sont dus à la pollution des isolateurs.

I. 2. Isolateur:

L'isolateur est un matériau isolant solide présente une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle. Il est utilisé pour isoler les conducteurs ou les pièces sous tension afin d'empêcher les court –circulations, les pertes de courant et les charges d'électrocution [3].

I. 3. Fonctionnement et constitution d'un isolateur:

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes, ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage), ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile , SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique), ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure) [4].

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement [5]. Du point de vue électrique, l'isolateur est considéré comme deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents, qui sont les suivants [5]:

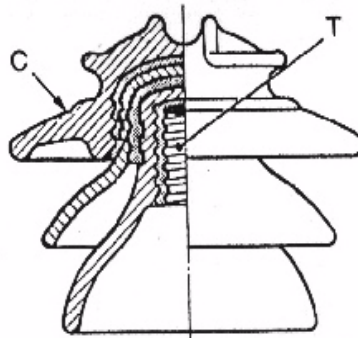
- L'intervalle d'air.
- Le matériau diélectrique.
- L'interface air - matériau diélectrique.

I. 4. Principaux types d'isolateurs:

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs :

I. 4. 1. Isolateurs de type rigide:

Un isolateur rigide (Figure I.1), est relié au support par une ferrure fixe. Tous les isolateurs rigides normalisés sont livrés avec une douille scellée de telle façon qu'ils puissent être vissés directement sur les ferrures correspondantes. La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides [3].

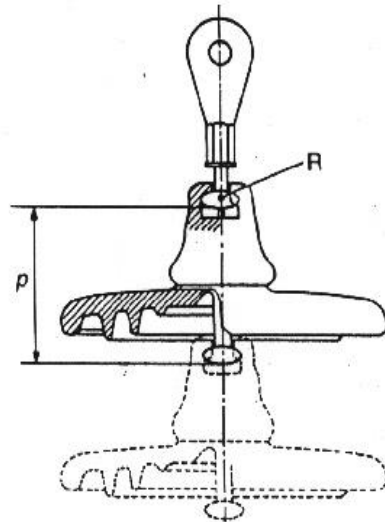


C : Cloche
T : Logement de tige.

Figure I. 1 : Isolateur rigide en verre.

I. 4. 2 Elément de chaîne:

C'est un isolateur constitué par un matériau isolant équipé de pièces métalliques de liaison, nécessaires pour le relier de façon flexible à d'autres éléments de chaîne (Figure I.2), à la pince de suspension du conducteur ou au support, ces éléments sont soumis principalement à des efforts de traction. Ils sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (chaînes d'alignement), soit horizontal (chaînes d'ancrages) [5].



R : Rotule.

ρ : pas

Figure I. 2 : Assemblage à rotule

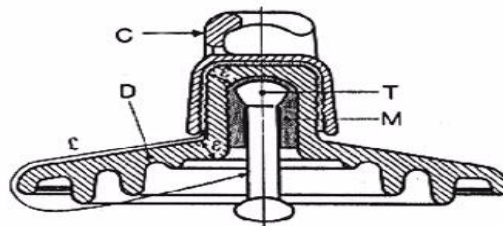
I. 4. 2. 1 Isolateurs à capot et tige:

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

L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer le capot de l'élément suivant, qui est maintenue par une goupille [6,7].

L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique, le tout est posé sur une table vibrante pendant une minute afin d'obtenir un bon scellement [7].

La coupe de l'isolateur capot-tige est schématisée sur la figure I.3.



C : Capot (fonte malléable, galvanisée à chaud)

D : Diélectrique (verre trempé ou céramique)

M : Mortier de ciment alumineux ou Portland

T : Tige (acier, galvanisé à chaud)

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

Figure I.3 : Isolateur à capot et tige

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

a) Profil standard

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



Figure I.4 : Profil standard

b) Profil antibrouillard :

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

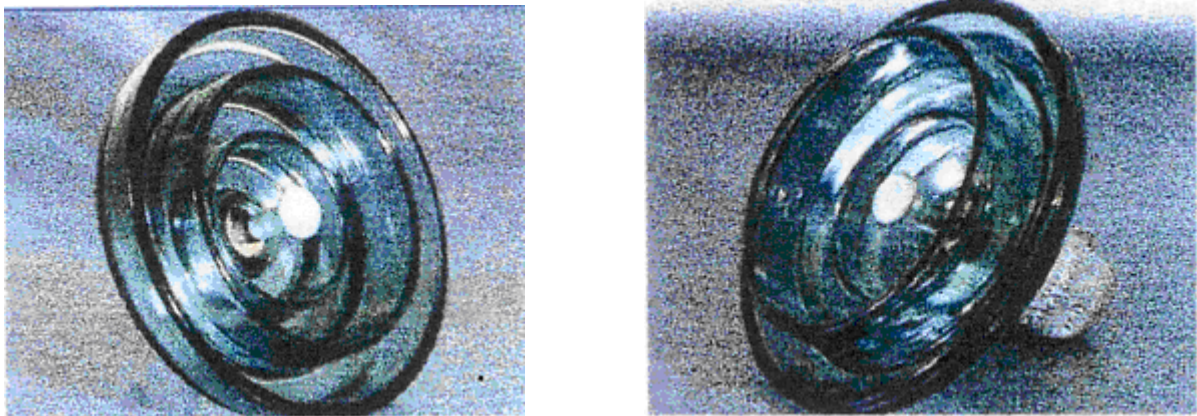


Figure I.5 : Profil antibrouillard

c) Profil ouvert :

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

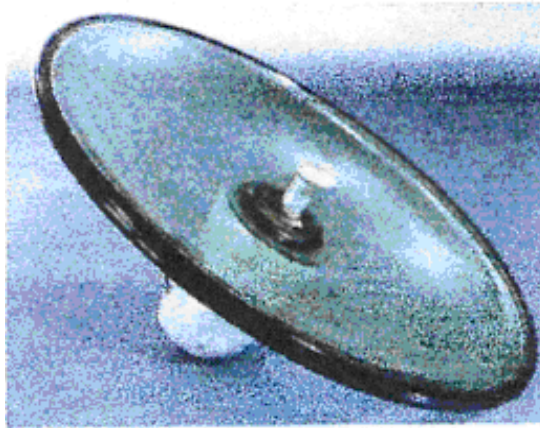


Figure I.6 : Profil ouvert

d) Profil sphérique:

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

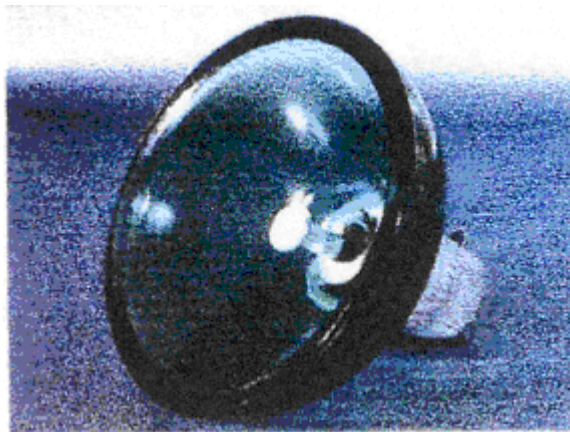
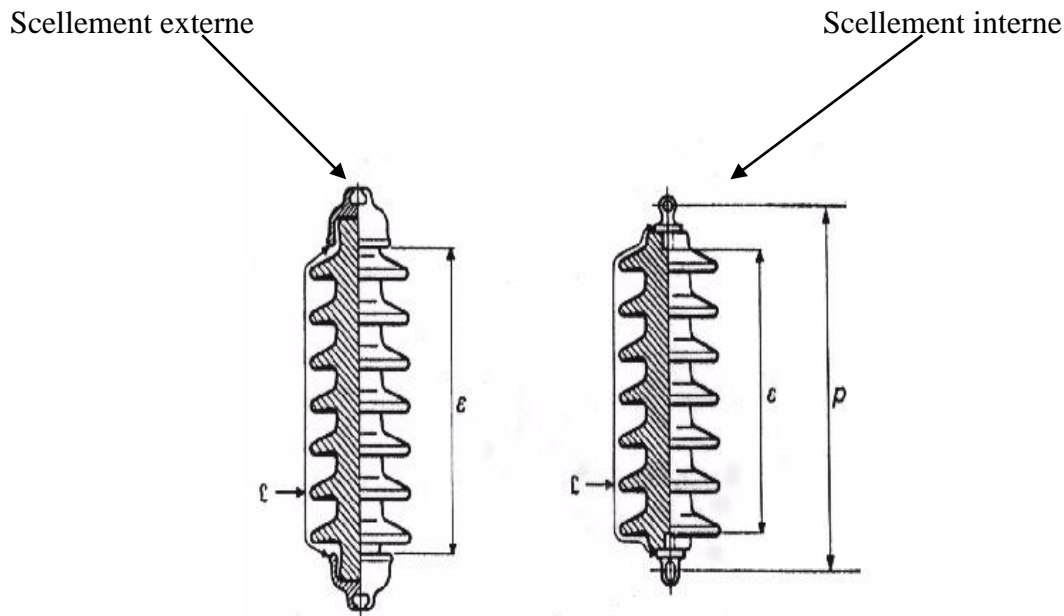


Figure I.7 : Profil sphérique

I. 4. 2. 2. isolateur à long fût en porcelaine :

Ils sont constitués d'un bâton cylindrique plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes (Figure.I.8), à chaque extrémité est fixé une pièce métallique de liaison ; celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le bâton, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet.

De tels isolateurs peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis [5].



\mathcal{L} : Plus courte distance dans l'air, extérieure à l'isolateur
 ε : Longueur du canal de perforation
 p : pas
 $\varepsilon \gg \mathcal{L}/2$

Figure I. 8 : Isolateur à long fût en porcelaine

I. 5. Choix des isolateurs:

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

Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident. La sévérité de la pollution d'un site peut changer. L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste, la construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation. Le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre ces nouvelles sources de pollution éventuelles [8].

I. 6. Isolateurs utilisés:

Le réseau électrique SONELGAZ utilise différents types d'isolateurs en verre et en porcelaine. Néanmoins ceux en verre sont les plus répandus [9]. En MT le verre trempé seul est utilisé.

L'équipement des lignes aériennes en isolateurs porcelaine est abandonné pour les raisons suivantes :

- Isolateur trop lourd,
- Détection difficile de l'amorçage (isolateur en porcelaine perforé n'est pas toujours détecté du sol par l'exploitant).

I. 7. Matériaux utilisés dans la constitution des isolateurs:

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

I. 7. 1. Isolants:

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

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

a) Céramique:

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

La composition des céramiques et leur fabrication sont longuement développées, certaines céramiques à grains très fins sont recommandées pour des isolateurs devant supporter des efforts mécaniques élevés [5].

b) Verres:

- **Le verre recuit**

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

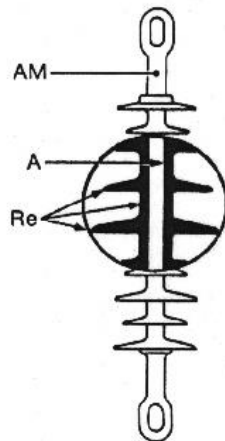
De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension.

- **Le verre trempé**

Celui ci est obtenu par réchauffage de l'isolant retiré du moule à une température d'environ 700 °C, puis refroidi par des jets d'air sous pression judicieusement répartis sur toute sa surface; les couches extérieures de la pièce isolante acquièrent rapidement une rigidité qui ne leur permet plus aucune déformation [5]. Le verre trempé présente une contrainte mécanique en traction environ 5 à 6 fois plus grande que celle du verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100 °C [5] . Outre son bas prix, le verre présente l'avantage de permettre de déceler les défauts par une simple observation [10].

c) Matériaux synthétiques:

Ces isolateurs (Figure I. 9.), dits composites, sont constitués d'une âme réalisée en fibre de fer imprégnée de résine, donnant à l'isolateur sa tenue mécanique, et d'une enveloppe en matériaux synthétiques isolants. Les revêtements ont démontré actuellement un comportement satisfaisant sous contraintes électriques et sous pollution.



A : Ame en fibre de verre résine.

AM : Pièces d'accrochage métallique

Re : Revêtement à ailettes en matériaux synthétique

Figure I.9 : Isolateur composite

I. 7. 2. Pièces métalliques de liaison:

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

I.8. Classification des isolateurs:

Conformément à la publication CEI 383 (Commission d'électrotechnique internationale), les isolateurs de lignes aériennes sont divisés en deux classes selon leur forme.

I. 8. 1. Classe A

Elle comprend tous les isolateurs ou éléments de chaînes pour lesquels la plus courte longueur " ϵ " du canal de perforation à travers la matière isolante solide est au moins égale à la moitié de la plus courte distance dans l'air " \mathcal{L} " extérieur à l'isolateur ; cette forme implique que ces isolateurs soient imperforables. Les isolateurs à long fût font, en général, partie de cette classe.

I. 8. 2. Classe B

Elle comprend tous les isolateurs ou éléments de chaînes pour lesquels la plus courte longueur " ϵ " du canal de perforation à travers la matière isolante est inférieure à la moitié de la plus courte distance dans l'air " \mathcal{L} " extérieur à l'isolateur. Les isolateurs à capot et tige appartiennent à cette classe [5].

I.9.Caractéristiques de la pollution:

I.9.1. Formation et répartition de la couche de pollution

Les isolateurs forment un obstacle à l'écoulement d'un air transportant de la poussière. L'interaction entre les isolateurs et la poussière, en présence de l'humidité, forme une couche de pollution [6]. La répartition de cette couche dépend de profils des isolateurs utilisés, du niveau de tension appliqué, de la position de l'isolateur par rapport à la borne H.T, de la hauteur de l'isolateur par rapport au sol, du type de la pollution, des conditions climatiques (direction du vent, taux de pluie,...) et de la disposition de la chaîne des isolateurs (verticale, horizontale, oblique).

I.9.2.Types de pollution

Les principaux types de pollution qui peuvent être rencontrés sont : la pollution naturelle, la pollution industrielle et la pollution mixte.

- La pollution naturelle provient des dépôts de poussière naturelle, de sable véhiculé par les vents en régions désertiques, de pluie, des embruns portés par le vent est

déposée progressivement sur des isolateurs installés au bordure de la mer ...etc [11, 12].

- La pollution industrielle provient des fumées des usines, de cimenteries, de complexes sidérurgiques, chimiques ou même aux bords des centrales thermiques. Cette pollution peut être d'origine domestique (véhicules automobiles,...) ou agricole (engrais...) [13, 14].
- Les pollutions mixtes représentent la forme de pollution la plus sévère car elle résultent de la combinaison d'une ou plusieurs pollutions précitées [13,7,15, 16].

I.9.3. Consequences de la pollution

La pollution des isolateurs engendre une conductivité électrique superficielle. Alors que la tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface de l'isolateur entraînent l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes aux quelles est soumis l'isolateur [17, 18]:

- Arc non localisé : L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçe à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courants de fuite entraînant une faible perte d'énergie, généralement supportable par l'installation.
- Arc fixe : L'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en se réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation du support isolant de l'élément défailant.
- Contournement des isolateurs : Le contournement d'un isolateur pollué est en général précédé par l'apparition brutale d'un courant de fuite accompagné de la formation d'une bande sèche et d'arc partiels. Un arc peut s'allonger jusqu'au contournement total.

I.9.4. Degré de la pollution

Afin de dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillance d'un site pollué [13], il est nécessaire de déterminer le degré de pollution de ce site. Les principales méthodes qui ont été utilisées pour mesurer ce degré de pollution sont :

- La densité du dépôt de sel équivalent (DDSE) : Elle consiste à la détermination de dépôt équivalent, exprimée en milligramme de NaCl / cm² de la surface d'un

isolateur, dont la conductivité est égale à celle du dépôt réel, dissous dans le même volume d'eau [19].

- La conductance superficielle : la conductance s'exprime par le rapport du courant, parcourant l'isolateur à la tension appliquée [20].

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

- Le courant de fuite : Il s'effectue en deux étapes. On enregistre, d'abord, sur une période relativement longue, le nombre d'impulsions du courant de fuite dépassant une valeur donnée (comptage d'impulsions). Par la suite, on mesure la plus grande valeur de crête de ce courant [21, 22].
- Mesure de la pollution de l'air : Cette méthode est basée sur l'analyse physico-chimique de l'air. Elle s'effectue sur une période de temps donnée et permet d'évaluer l'intensité et les caractéristiques de la pollution de l'air pour un site.
- Mesure optique : Cette méthode permet la détermination de l'épaisseur de la couche polluante disposée sur la surface de l'isolateur, ainsi que la constante diélectrique par le biais d'un dispositif à rayons laser [20].
- Densité de dépôt non soluble (DDNS) : Elle correspond à la quantité de dépôts polluants non solubles présents dans une couche de pollution. Elle s'exprime en mg/cm^2 .

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse bibliographique sur les isolateurs en haute tension et les différents aspects de la pollution. On conclure que la pollution est un facteur déterminant dans le dimensionnement des isolateurs et que la connaissance du degré de pollution est également une condition indispensable pour un dimensionnement convenable.

II.1. Introduction

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

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

II.2. Modèles statiques de contournement :

II.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 II.1 où L représente la longueur de fuite totale), il en a déduit la tension d'arc :

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

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

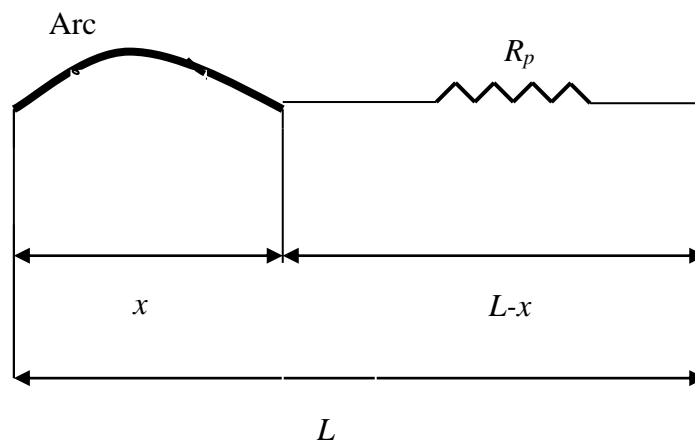


Figure II.1 : Modèle d'Obenaus [2]

Les valeurs des paramètres n et A dépendent du milieu dans lequel s'amorce la décharge. Selon les certaines auteurs [23- 24] : $0.4 \leq n \leq 1$ et $3 \leq A \leq 500$.

A partir de mesures expérimentales sur un canal d'électrolyte, Ghosh et al [24] 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 II.1.

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

Tableau II.1 : Constantes caractéristiques selon Ghosh et al [24]

II.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 [25] a proposé l'expression suivante pour la résistance de pollution R_p :

$$R_p = r_p (L - x) \quad (\text{II.2})$$

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 :

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

ou encore :

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

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

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

et

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

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

$$U_c = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} L \quad (\text{II.7})$$

II.2.3. Modèle de Rizk :

A partir d'une analyse théorique, Rizk [23] 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 :

$$\frac{U_c}{L} = 23r_p^{0.4} \quad (\text{II.8})$$

II.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 [26, 27]. Ces auteurs ont montré que, pour un modèle d'isolateur plan (Figure II.2), la tension d'arc est de la forme :

$$U_{arc} = 100 \frac{x}{\sqrt{I}} \quad (\text{II.09})$$

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

$$U_{cx} = 800 \frac{x}{\sqrt{I}} \quad (\text{II.10})$$

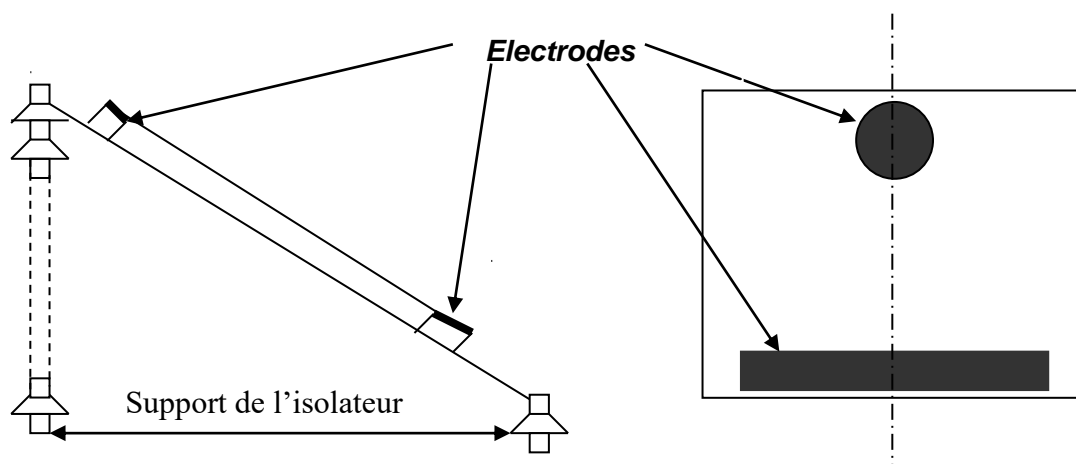


Figure II.2 : Modèle expérimental de Claverie et Porcheron [27]

II.2.5. Modèle de Rao et Gopal :

D'après Rao et Gopal [28], la tension d'arc, donnée par l'équation (II.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 réamorce périodiquement. Ainsi, ces deux auteurs [28] ont introduit une nouvelle équation, afin d'expliquer les écarts entre les prédictions des modèles et les valeurs mesurées pendant le contournement :

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

α , β , v 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 [29]. 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 [25] et pour une tension d'application dépassant quelques kilovolts, Alston et Zoledziowski [30] ont déterminé la condition de maintien de l'arc électrique, dans le cas d'un isolateur cylindrique de longueur L (Figure II.3) :

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

avec

x : la longueur d'arc.

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

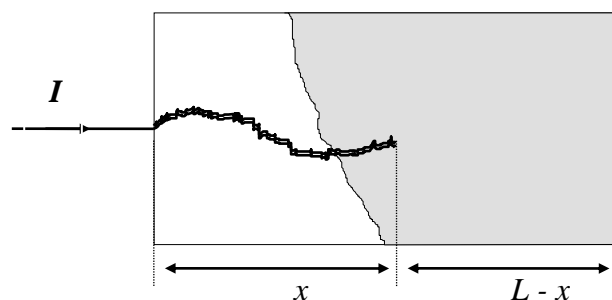


Figure II.3 : Modèle cylindrique utilisé par Alston et Zoledowski [30]

II.2.7. Modèle de Danis :

Afin de reproduire des couches similaires à celles observées sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, Danis [31] a utilisé un modèle de forme géométrique simple (plan ou cylindrique) possédant plus d'une zone sèche (Figure II.4.a). La rupture des zones sèches survient alors d'une manière aléatoire (Figure II.4.b). Le lieu d'apparition des arcs partiels, la forme et le mouvement des racines des arcs sur une surface polluée (Figure II.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 :

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

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 [31] sont donnés par les expressions :

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

et

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

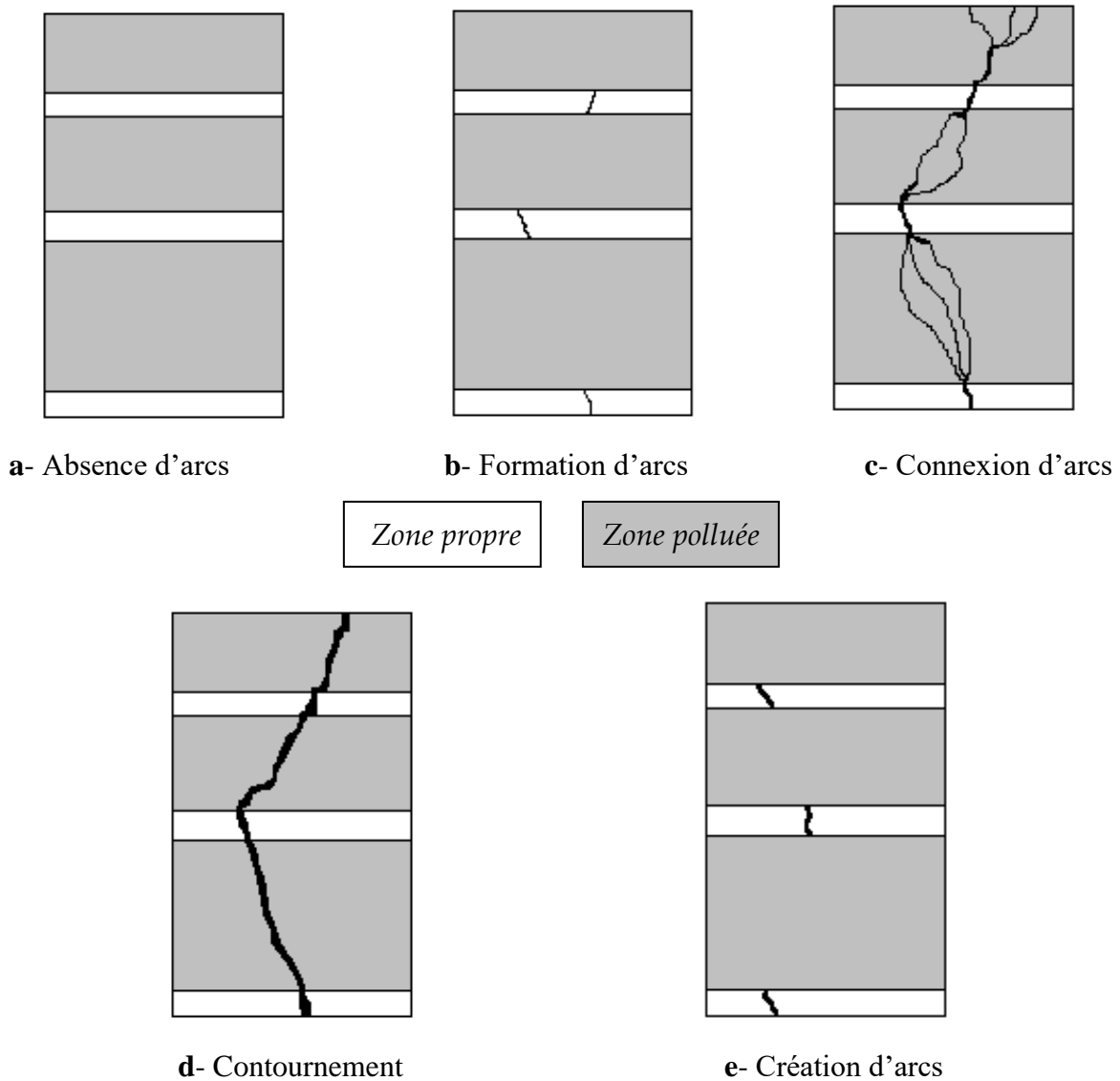


Figure II.4 : Modèle de Danis [31]

II.2.8. Modèle de Nacke et Wilkins :

Nacke [32,33] et Wilkins [34] considèrent que les points à la base de l'arc forment des demi-cercles aux limites des bandes sèches (Figure II.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 ($x_p/b \geq 2/\pi$) :

$$R_i(x) = \frac{1}{\pi\gamma} \tag{II.16}$$

et

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

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 :

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

Pour un isolateur à ailettes multiples :

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

Ainsi, la résistance de pollution totale sera :

$$R(x) = R_i(x) + R_e(x) \quad (\text{II.20})$$

Pour la même configuration (Figure II.5.b), dans le cas d'une bande étroite, Wilkins [34] a obtenu :

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

et pour une bande large :

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

où

x : la longueur d'arc,

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

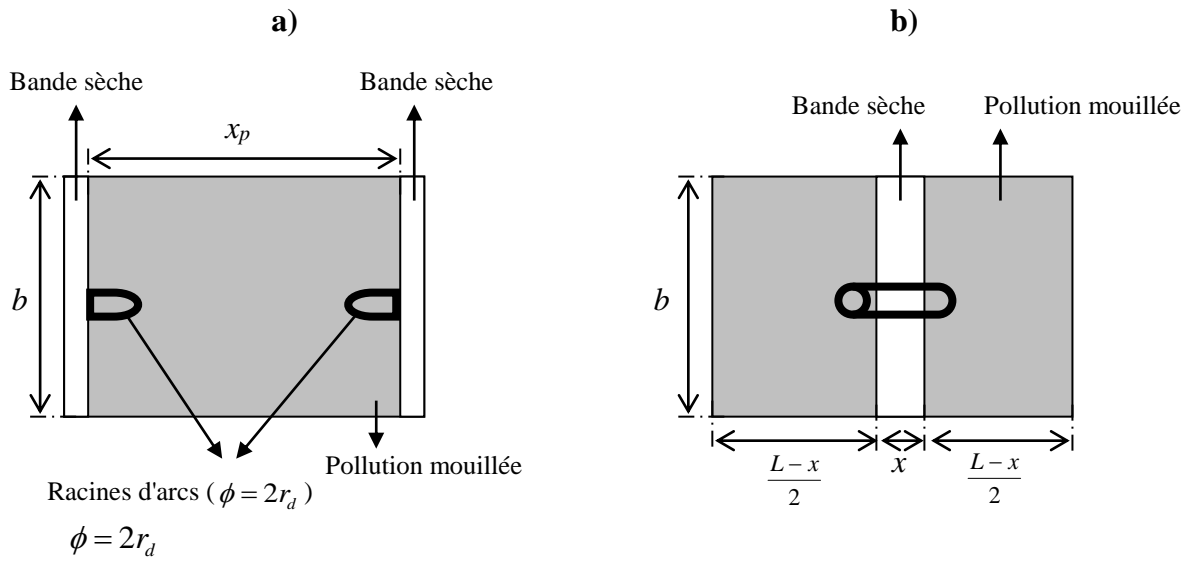


Figure II.5 : Représentation schématique de la surface d'un isolateur et des pointes de base de l'arc utilisé pour le calcul de la résistance de pollution selon:

(a) Nacke [32-33], (b) Wilkins [34]

II.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 [35] ont considéré que celle-ci était équivalente à deux couches résistantes en série, de résistance linéique r_1 et r_2 et correspondant respectivement à la tige et aux ailettes, et ils ont décomposé la distance totale de fuite L en deux distances partielles, L_1 et L_2 respectivement (Figure II.6). L'application du critère de Hampton [36] leur a permis de déduire la relation (II.23) donnant le gradient de contournement critique (en faisant certaines hypothèses et choisissant l'exposant $n=1$) :

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

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.

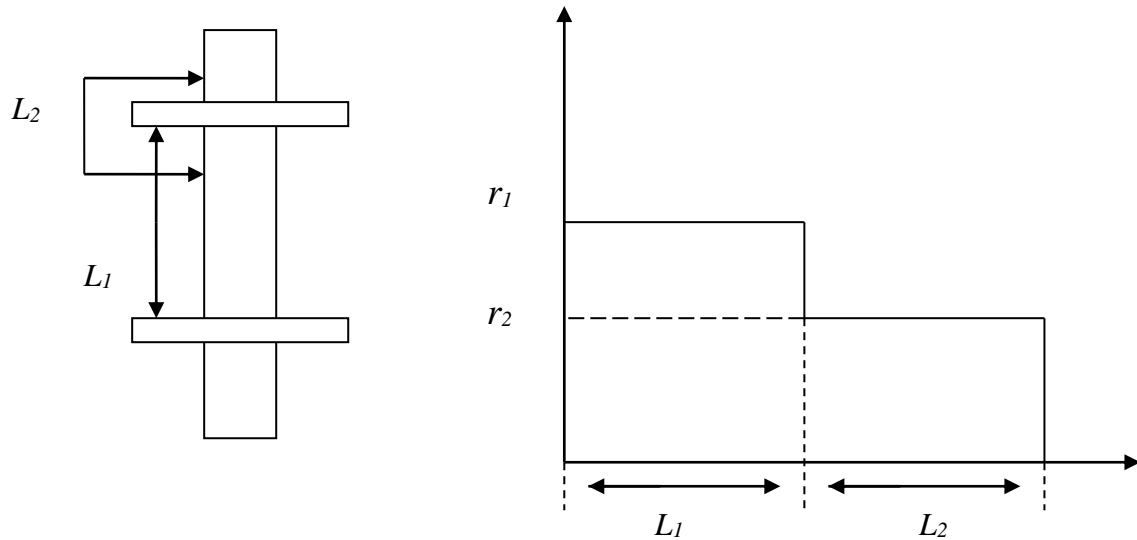


Figure II.6 : Modèle d'un isolateur à long fût et distribution de la résistance de pollution selon Boheme et Obenaus [35]

En appliquant le critère de Hesketh [33], l'expression précédente devient

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

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

II.2.10. Modèle du disque circulaire :

Woodson et McElroy [37] ont imaginé une configuration géométrique, illustrée à la figure (II.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 :

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

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 :

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

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.

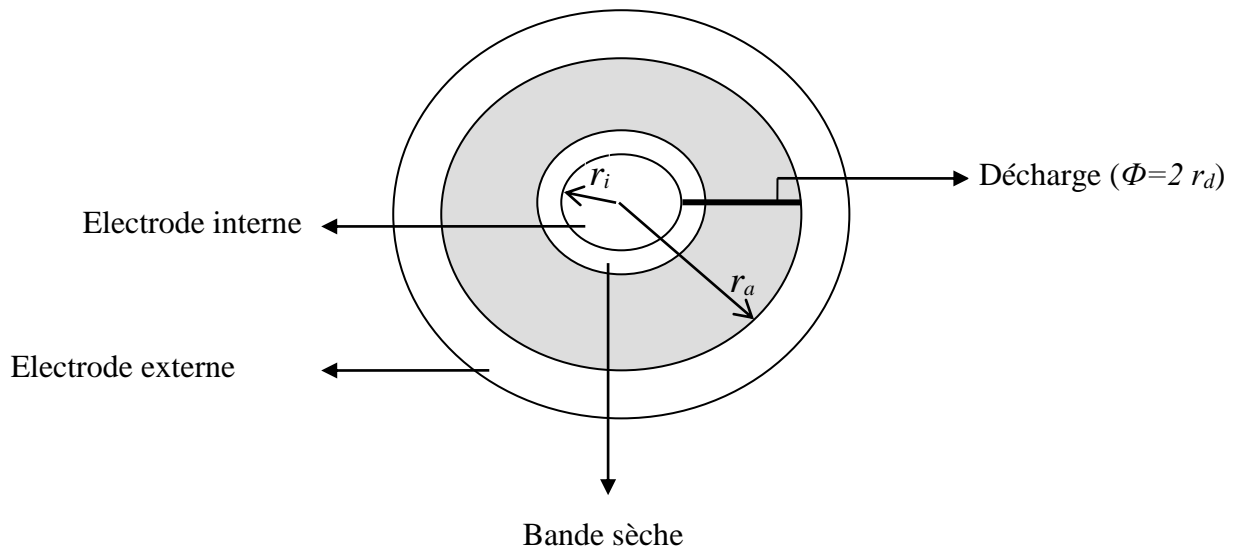


Figure II.7: Model d'isolateur en forme de disque conçu par McElroy et Woodson [37]

II.2.11. Modèles de Tegar :

a / Cas de pollution continue

Tegar [38] 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 [26, 27], il a déterminé l'expression donnant la résistance de pollution en série avec l'arc, en fonction de la tension appliquée et le courant de fuite :

$$R_p = \frac{1}{\rho} \frac{K - 100 U}{K I} = \rho F_p \quad (\text{II.27})$$

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 [39] 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 [39] a élaboré un algorithme qui permet d'obtenir les différentes caractéristiques des phénomènes de conduction sur les surfaces isolantes sous pollution discontinue. Les bandes propres et polluées sont représentées pas des circuits électriques. Les composants de ces circuits sont déterminés à partir des essais effectués sur la plaque propre et celle uniformément polluée. Le courant de fuite critique et la tension de contournement sont calculés à partir de la connaissance de la tension de contournement obtenue expérimentalement dans le cas où les couches de la pollution discontinue sont remplacées par du papier aluminium.

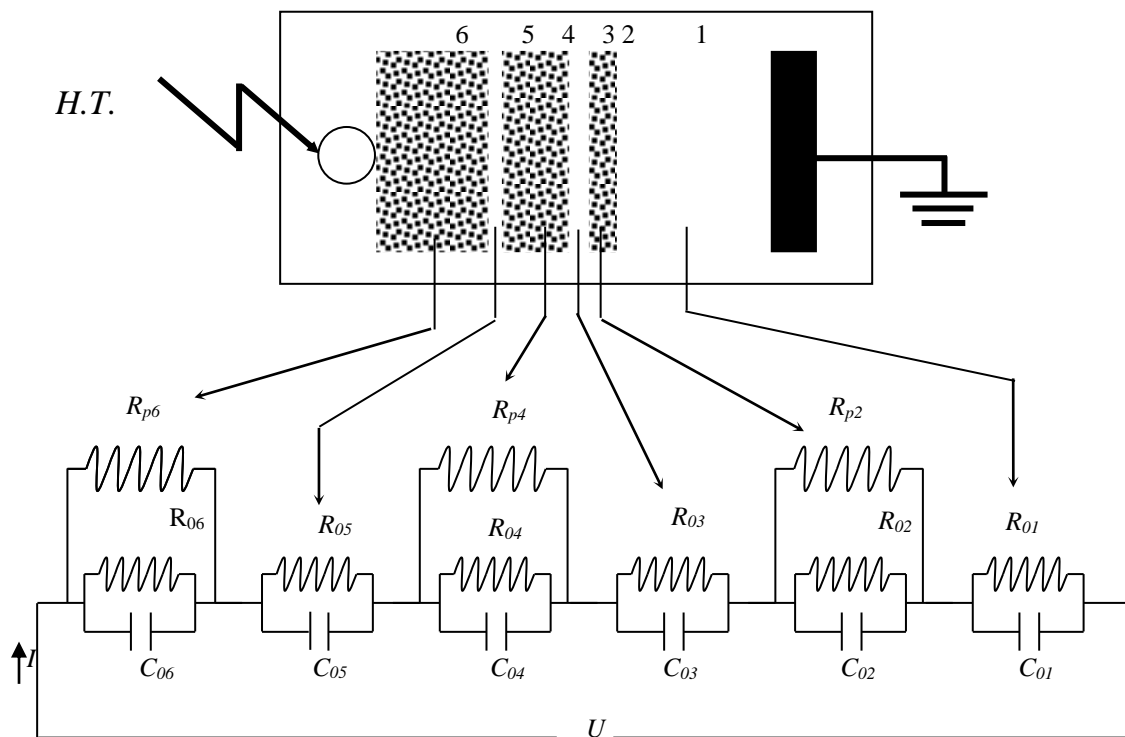


Figure II.8 : Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire selon Tegar [39]

La figure (II.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 [40], l'expression de la résistance pour chaque bande polluée i peut être formulée par :

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

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.

II.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.

II.3.1. Mécanisme de propagation :

II.3.1.1. Propagation par ionization:

Wilkins et Al-Baghdadi [41] 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.

II.3.1.2. Propagation par force électrostatique:

A partir des observations faites sur un canal d'électrolyte, Rahal [42] 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.

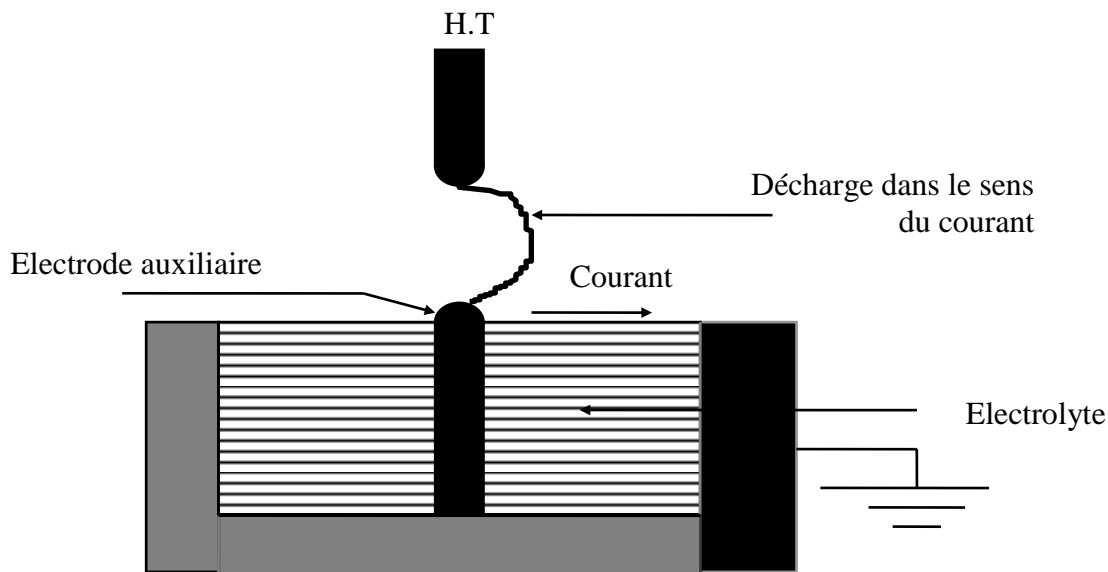


Figure II.6 : Courbure de la décharge dans la direction de l'écoulement du courant mettant en évidence l'existence d'une force électrostatique [42]

II.3.2. Critères de propagation de la décharge :

II.3.2.1. Critère de Hampton:

A partir d'une étude expérimentale, Hampton [36] a déterminé les conditions critiques de propagation de l'arc, en remplaçant la couche de pollution en série avec l'arc par une colonne d'eau uniforme présentant une résistance linéique constante. Il a pu établir que la condition pour que le contournement se produise, est que le champ E_p dans la colonne d'eau dépasse le champ E_{arc} à l'intérieur de l'arc :

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

II.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 [43] a établi un critère de propagation de l'arc, exprimé par la relation :

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

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.

II.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 [34] a généralisé la condition énoncée par Hesketh [43] et établit un critère de propagation utilisant la puissance P fournie par la source :

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

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.

II.3.2.4. Critère de Anjana et Lakshminarasimha :

En assimilant l'arc à une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, Anjana et Al [44] 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 :

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

II.3.2.5. Critère de Dhahbi, Beroual et Krahenbul :

Ces auteurs [45] ont proposé un nouveau critère analytique de propagation de la décharge en faisant intervenir l'impédance équivalente Z_{eq} d'un circuit électrique (Figure II.9), simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite.

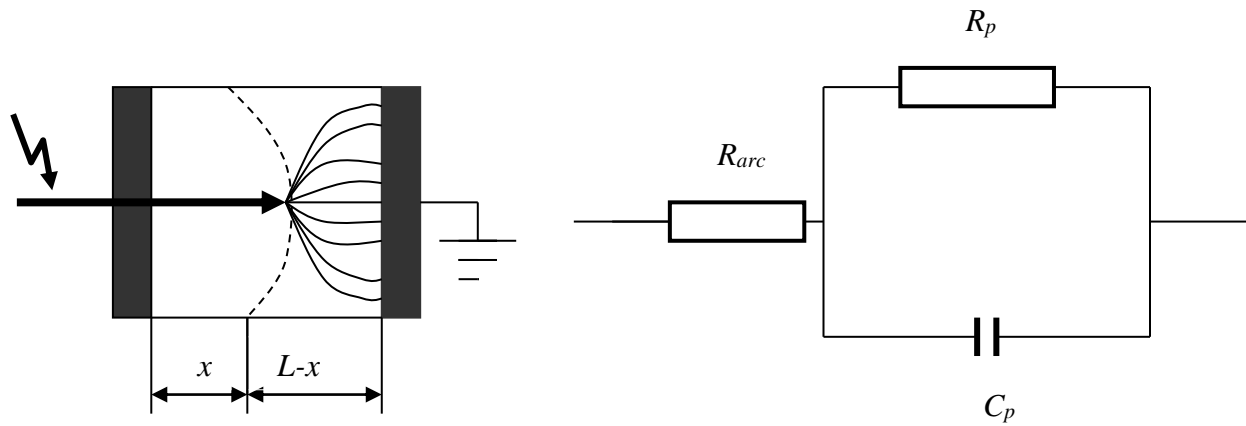


Figure II.9 : Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent [45]

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

$$\frac{d|Z_{eq}|}{dx} \leq 0 \quad (\text{II.33})$$

ces auteurs ont abouti à un critère qui est :

$$E_{arc} \geq \frac{E_p}{\sqrt{a}} \quad (\text{II.34})$$

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.

II.3.3. Modèles dynamiques :

II.3.3.1. Modèle de Rizk:

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

$$\frac{dR_{arc}}{dt} = \frac{R_{arc}}{\tau} - \frac{R_{arc}^2 I^{n+1}}{A \tau} \quad (\text{II.35})$$

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.

II.3.3.2. Modèle de Anjana et Lakshminarasimha:

Anjana et Lakshminarasimha [44] ont proposé un modèle basé sur l'équation de Mayr [47] 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 :

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

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

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

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 :

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

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(II.10).

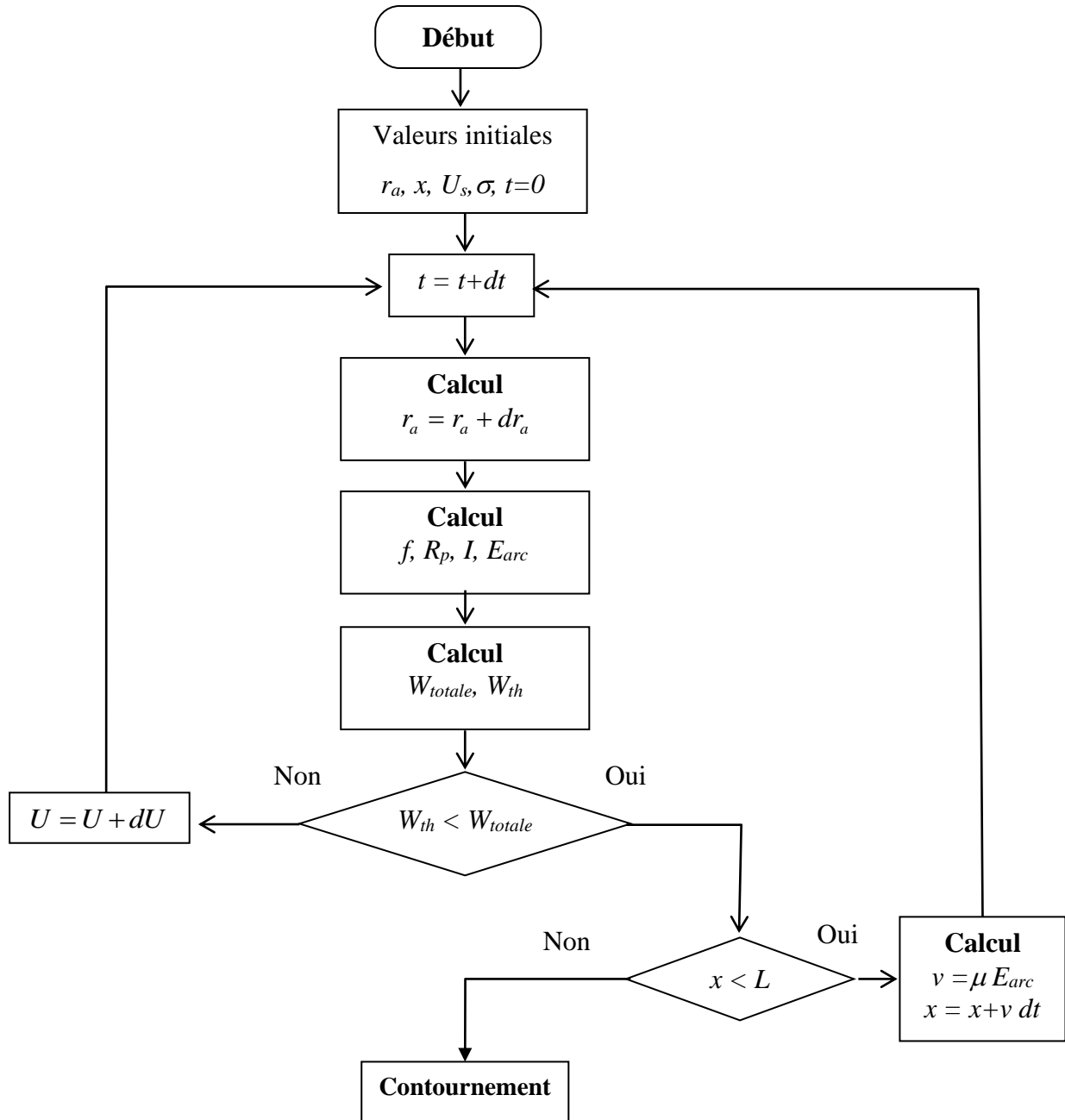


Figure II.10 : Organigramme du modèle de Anjana et Lakhminarasimha [44]

II.3.3.3. Modèle de Sundararajan et Gorur:

Sundararajan et Gorur [48] ont proposé un modèle dynamique en continu, qui ressemble à celui de Anjana et Lakhminarasimha, mais basé sur le critère de propagation de Hampton [36].

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

$$E_p = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{II.39})$$

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 [25].

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

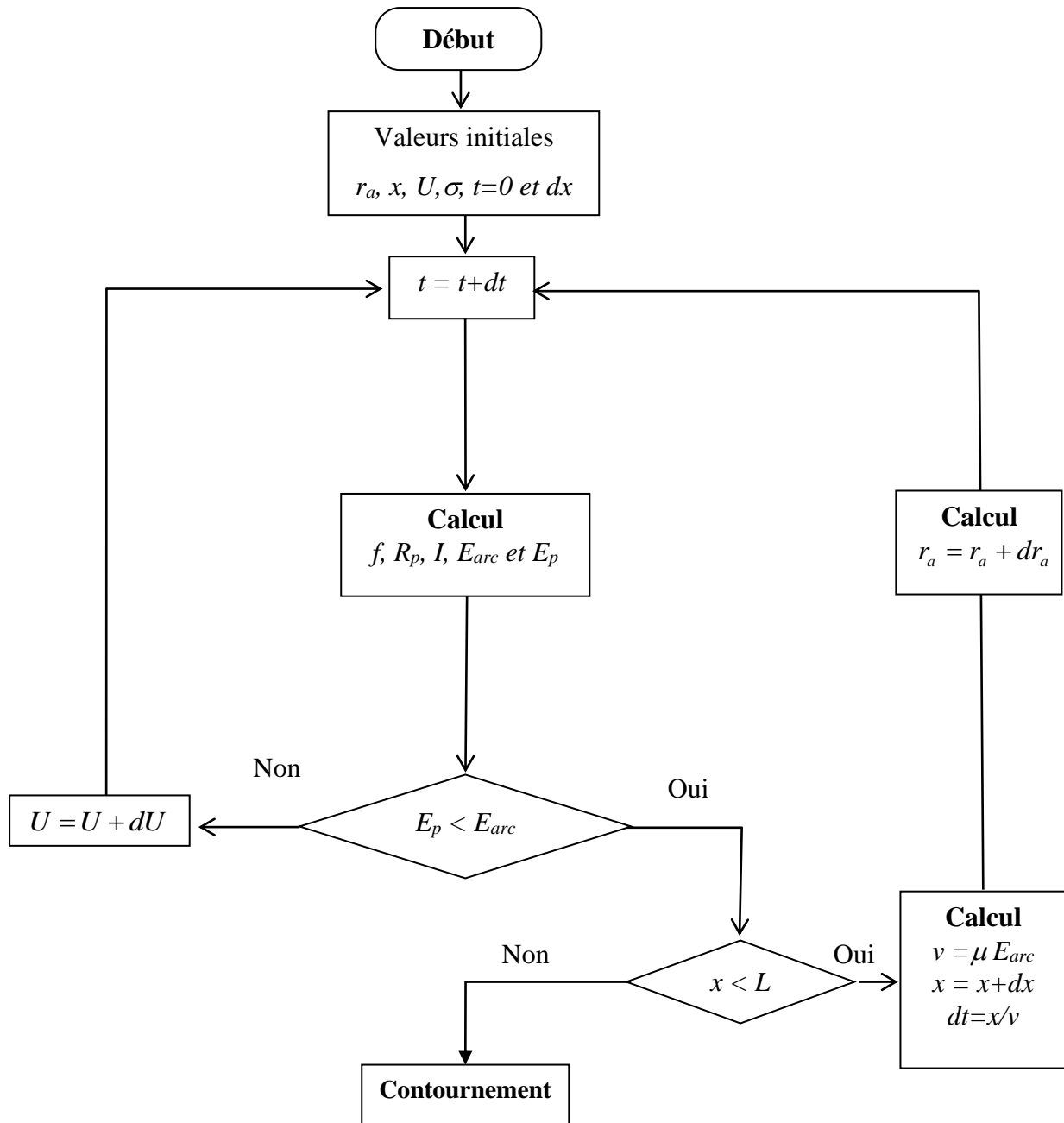


Figure II.11 : Organigramme du modèle de Sundararajan et Gorur [48]

II.3.3.4. Modèle de Dhabhi et Beroual :

Ces deux chercheurs [49, 50] considèrent que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure (II.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 .

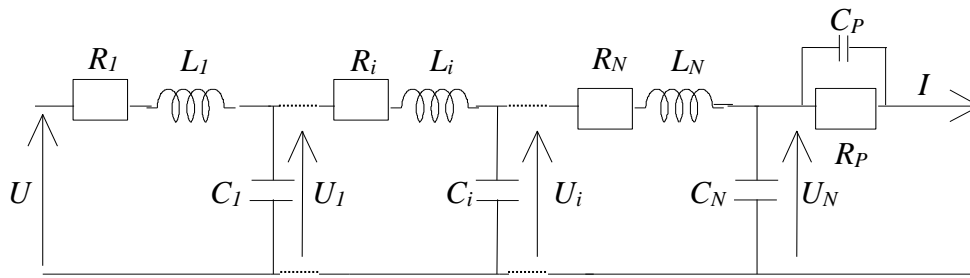


Figure II.12 : Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge selon Dhahbi et Al. [49, 50]

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.

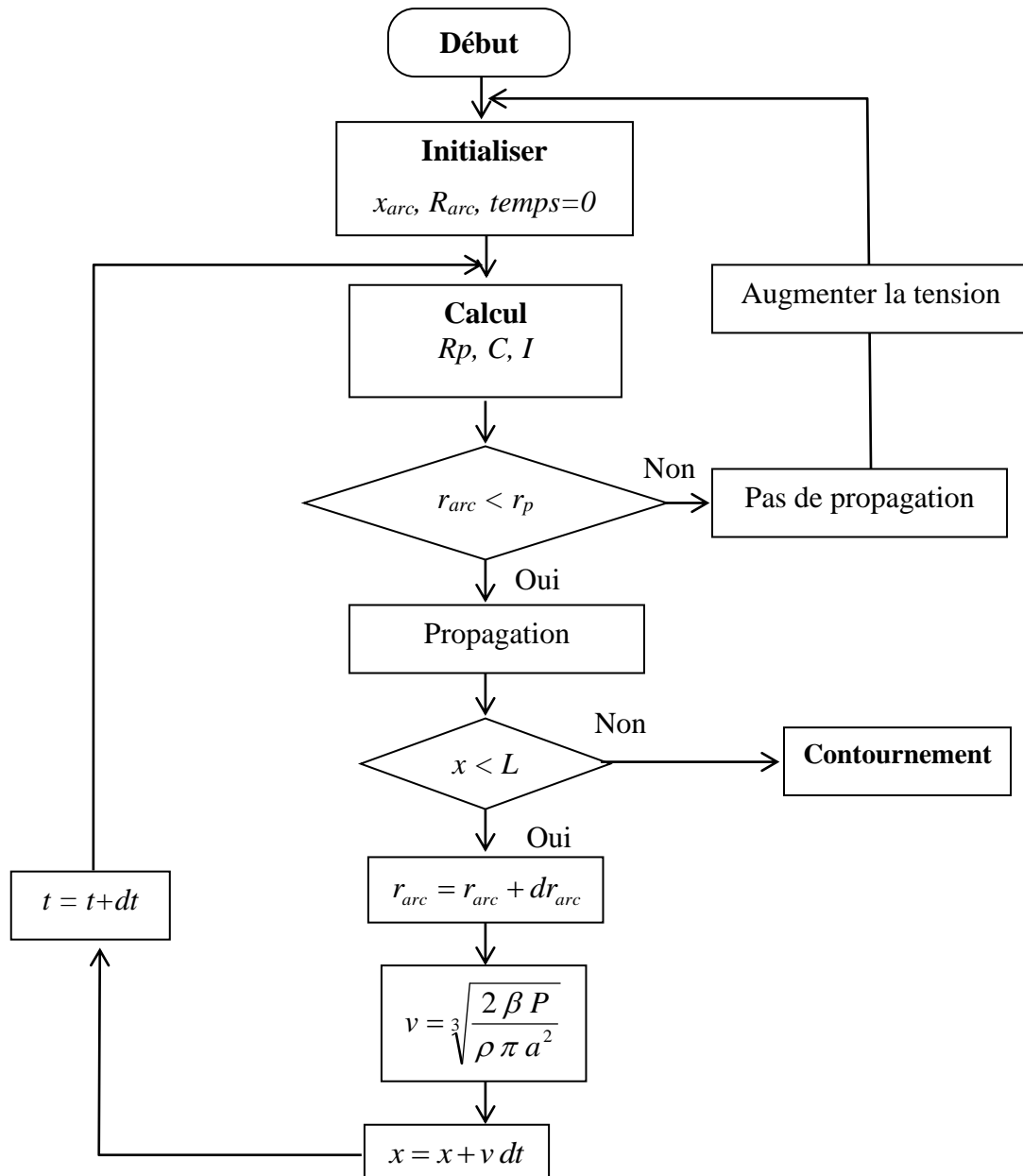


Figure II.13 : Organigramme du modèle de Dhahbi et Al [49, 50]

II.4. Conclusion

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

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons proposer un modèle dynamique basé sur celui de Tegar [39]. 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.

III.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 .

III.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 III.1).

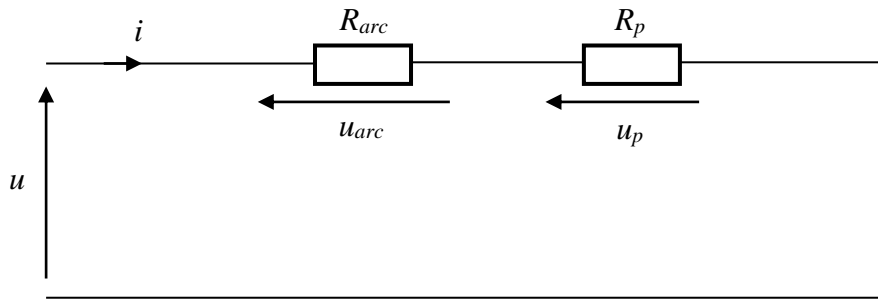


Figure III.1 : Circuit électrique équivalent de base

III.3.1. Propagation de la décharge

III.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 [44, 48] 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.

III.3.1.2. Critère de propagation

Le critère de propagation que nous avons adopté pour notre modèle, est celui proposé par Hampton [36]. Sous tension alternative, ce critère s'écrit :

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

où

e_{arc} : le champ dans l'arc,

e_p : le champ dans la pollution.

Lorsque la couche polluante est représentée par une résistance pure, Tegar [38] a montré que tous les critères de propagation définis dans le chapitre précédent aboutissent aux mêmes résultats obtenus par le critère d'Hampton.

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

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

III.3.1.3. Circuit de propagation

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

Dans cette figure, R_j , i et u_j ($j=1$ à N) représentent respectivement la résistance, le courant et la tension, correspondant à chaque cellule nouvellement créée et R_p la résistance de la partie de la couche de pollution non court-circuitée par l'arc.

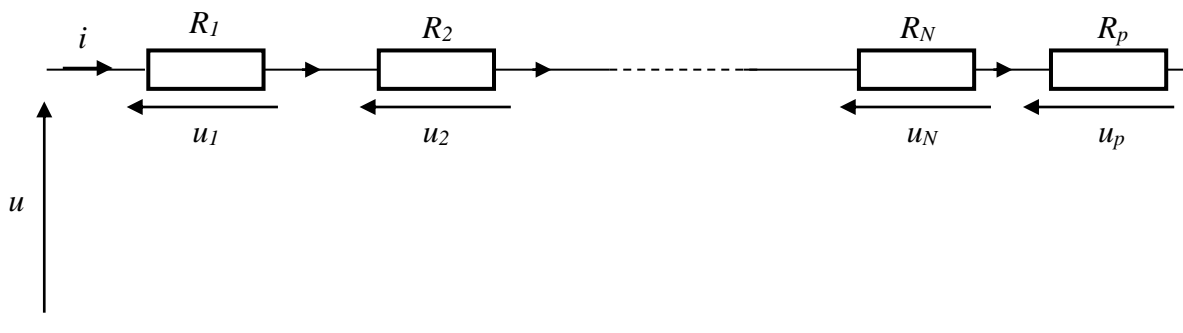


Figure III.2 : Circuit électrique équivalent à la propagation de la décharge

III.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 [34], l'équation du circuit sera donnée par:

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

avec:

u : la tension appliquée,

u_{arc} : la tension de la décharge,

R_p : la résistance de la couche polluante,

i : le courant de fuite ou de la décharge.

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 [51, 52] :

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

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 [53], 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 :

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

où

γ_p : la conductivité superficielle de la pollution,

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

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

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

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

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

avec:

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

x : la longueur d'arc,

i : le courant d'arc.

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

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

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

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

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 [34] par :

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

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 :

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

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

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

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

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

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

$$p_{arc} = u_{arc}i = e_{arc}xi = Axi^{1-n} \quad (\text{III.14})$$

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

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

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

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.

III.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 (III .3) suivante :

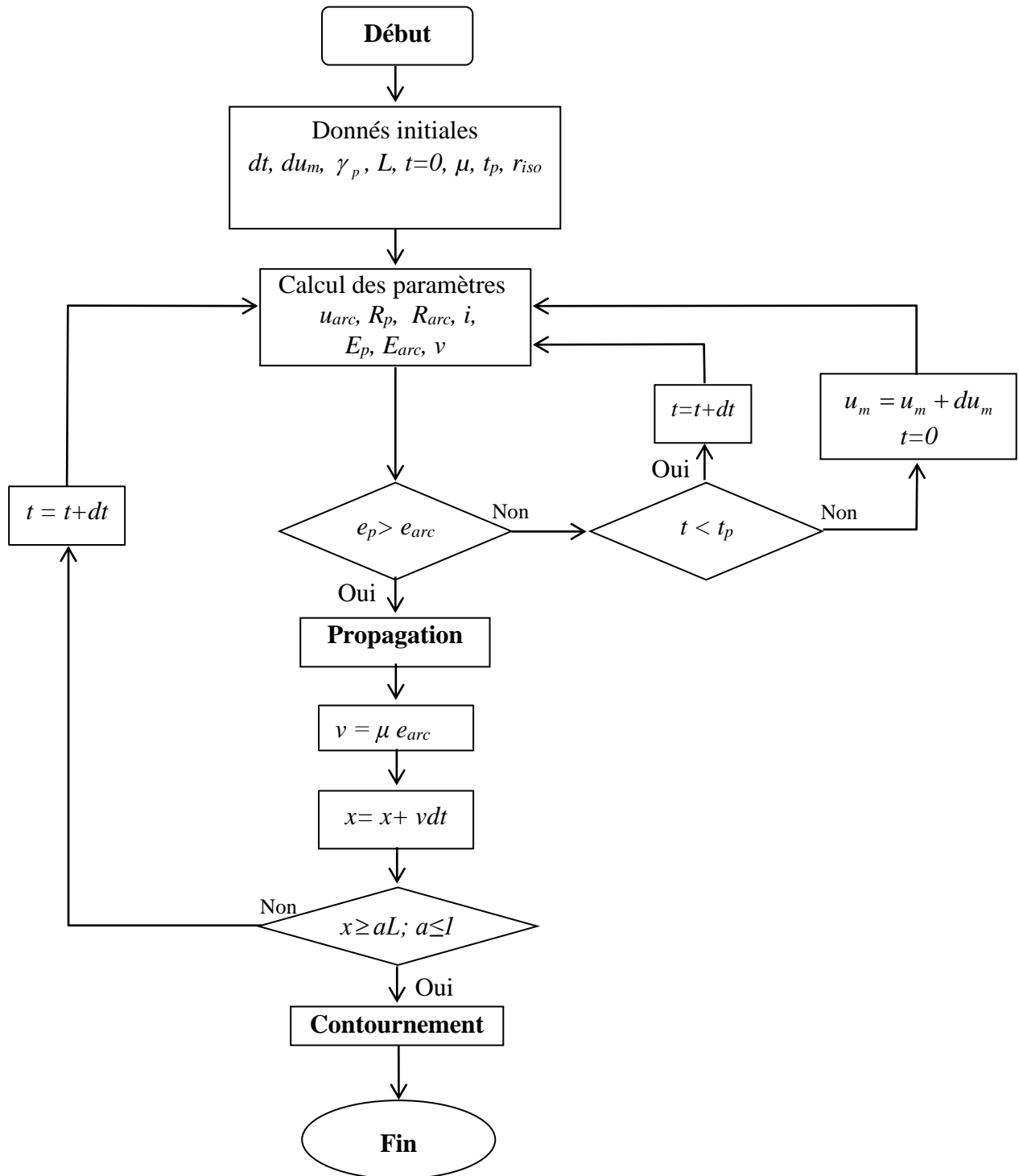


Figure III.3 : Organigramme du modèle dynamique

III.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 [36]. 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.

40	III.1. INTRODUCTION
40	III.2. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES
40	III.3. CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT
41	III.3.1. Propagation de la décharge
41.....	III.3.1.1. Initialisation de la décharge
41.....	III.3.1.2. Critère de propagation
42.....	III.3.1.3. Circuit de propagation
42	III.3.2. Paramètres du circuit électrique
45	III.4. ORGANIGRAMME DE CALCUL
47	III.5 CONCLUSION

IV.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.

En s'inspirant de cette hypothèse, 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 [38] et le modèle dynamique de zafer [55]. 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.

IV. 2. Validation

Nous validons notre modèle en comparant notre résultats à ceux obtenu par Tegar [38] et Zafer[55].

IV. 2.1 Validation sur le modèle de Tegar :

En tension alternative, Tegar [38] 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 IV.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.

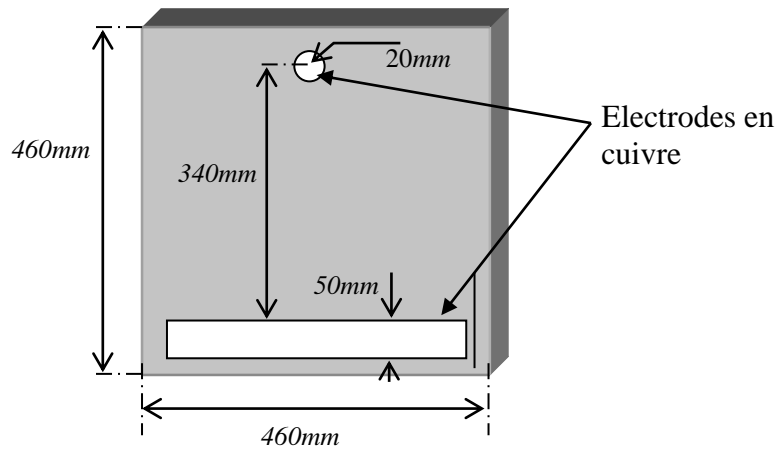


Figure IV.1: Modèle d'étude de Tegar

Les figures (IV.2) et (IV.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 [38]. 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.

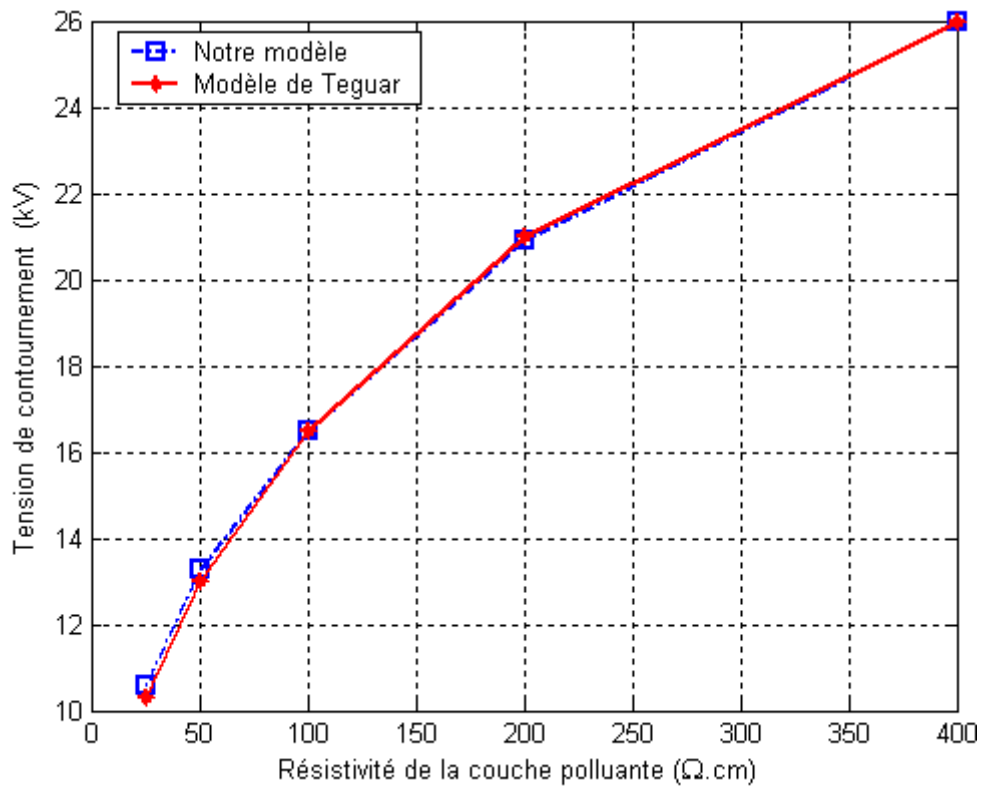


Figure IV.2 : Tension de contournement en fonction de la résistivité de la pollution

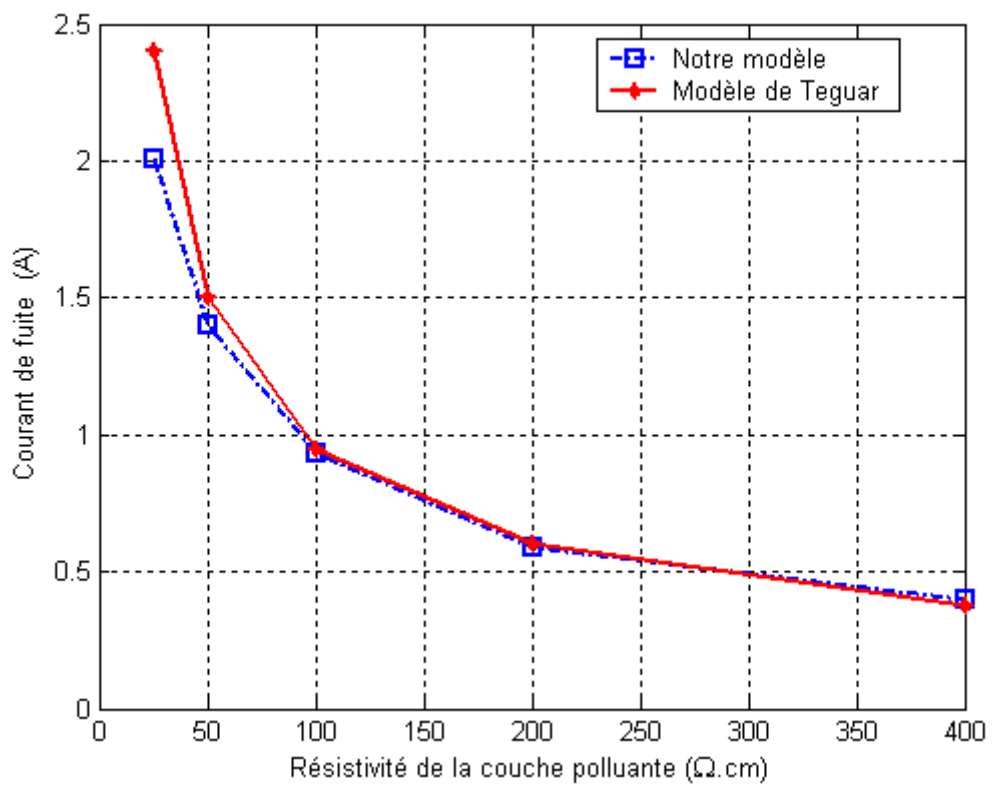


Figure IV.3 : Courant de fuite en fonction de la résistivité de la pollution

IV.2.2. Validation sur le modèle de Zafer :

En tension alternative, Zafer [55] a proposé un modèle dynamique basé sur le critère de propagation de Hampton, il a utilisé un modèle ouvert (open model) de l'isolateur pour calculer la résistance de pollution en série avec l'arc, ce modèle ouvert est obtenue par la méthode des éléments finis. Il a considéré un isolateur réel BSFT-9336 le figure(IV.4) sa longueur de fuite est 405 mm.

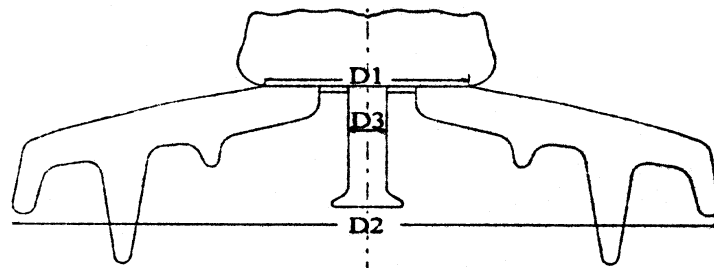


Figure IV.4: isolateur réel BSFT-9336

Afin de calculer la résistance de la pollution selon l'équation (IV.1) [56] l'approximer par une fonction classique, nous avons interpolé la forme extérieure de l'isolateur modèle ouvert par un polynôme de Newton pour obtenir la fonction $r(l)$ (rayon en fonction de la longueur de fuite).

$$R_P = \frac{1}{\sigma} \int_x^L \frac{dl}{2\pi r(l)} \dots\dots\dots (IV.1)$$

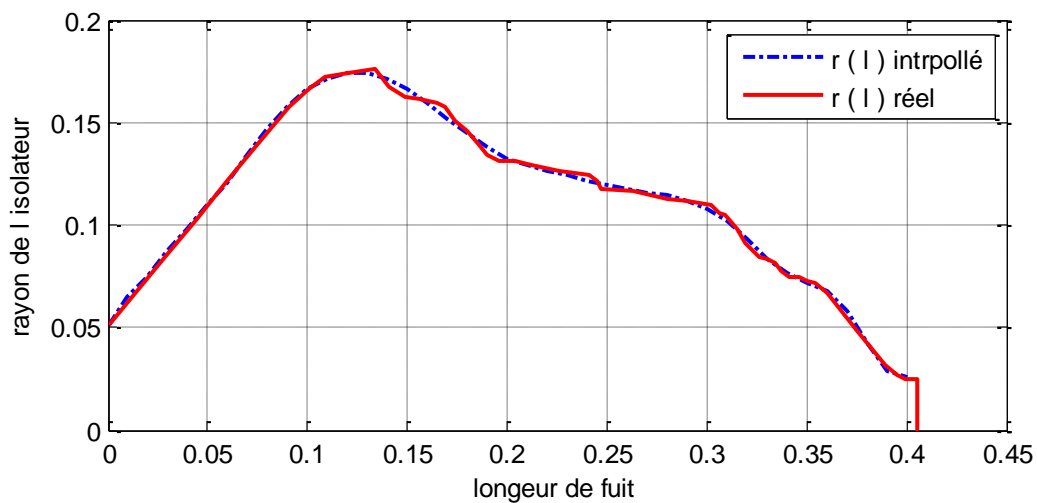


Figure IV.5 : rayon en fonction de la longueur de fuit

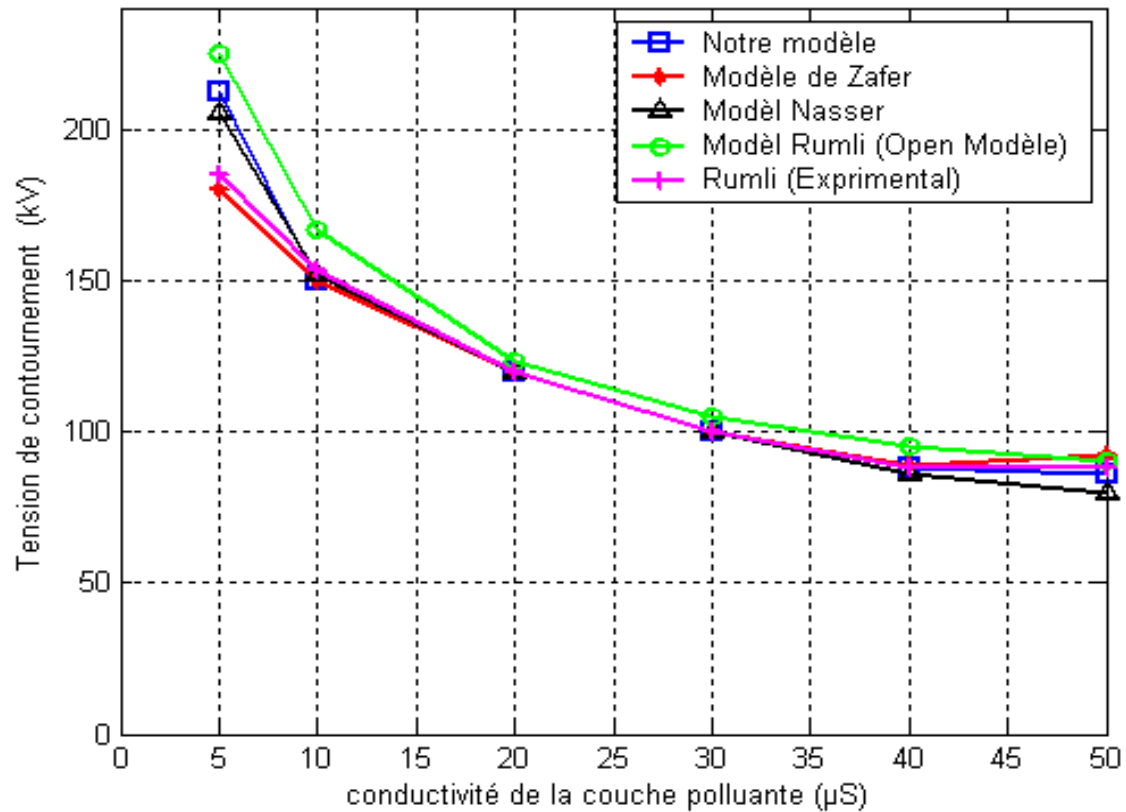


Figure IV.6 : Tension de contournement en fonction de la conductivité de la pollution

Le Figure (IV.6) illustre la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité de la couche polluante obtenue par notre modèle ainsi que celle trouvée par Zafer et Nasser et Rumli [55]. On remarque que notre modèle donne une bonne corcondance avec les autres modèles.

IV.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 [38]. 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 ($a=0.9$).

IV.3.1. Evolution temporelle :

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

Les figures (IV.7), (IV.8) et (IV.9) 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.

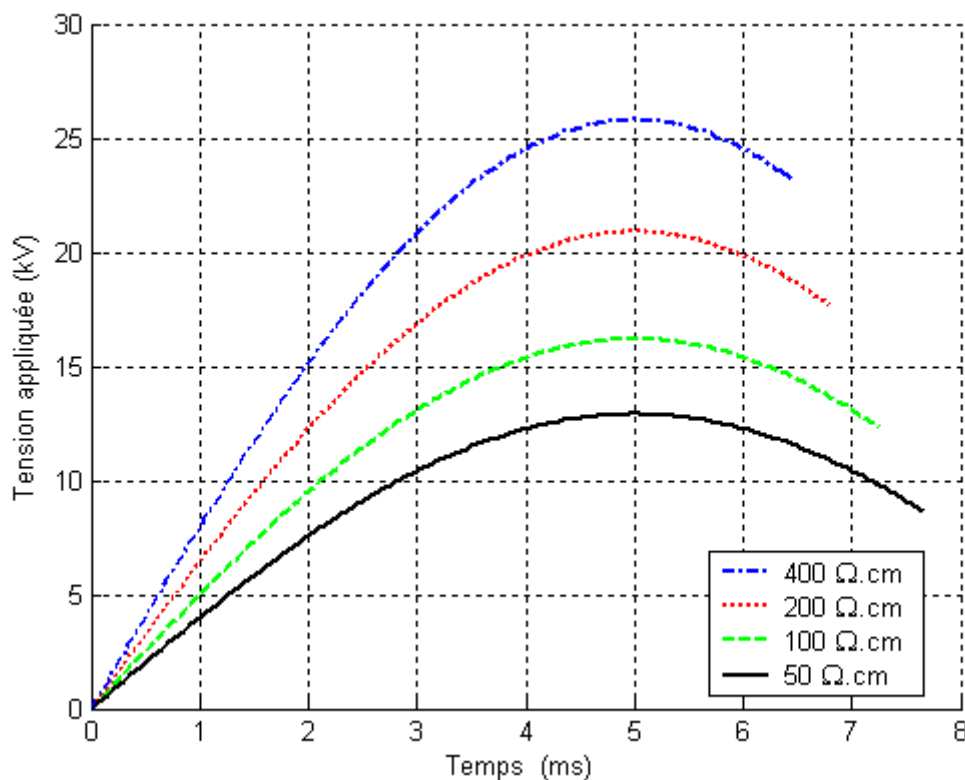


Figure IV.7 : Tension de contournement appliquée en fonction du temps

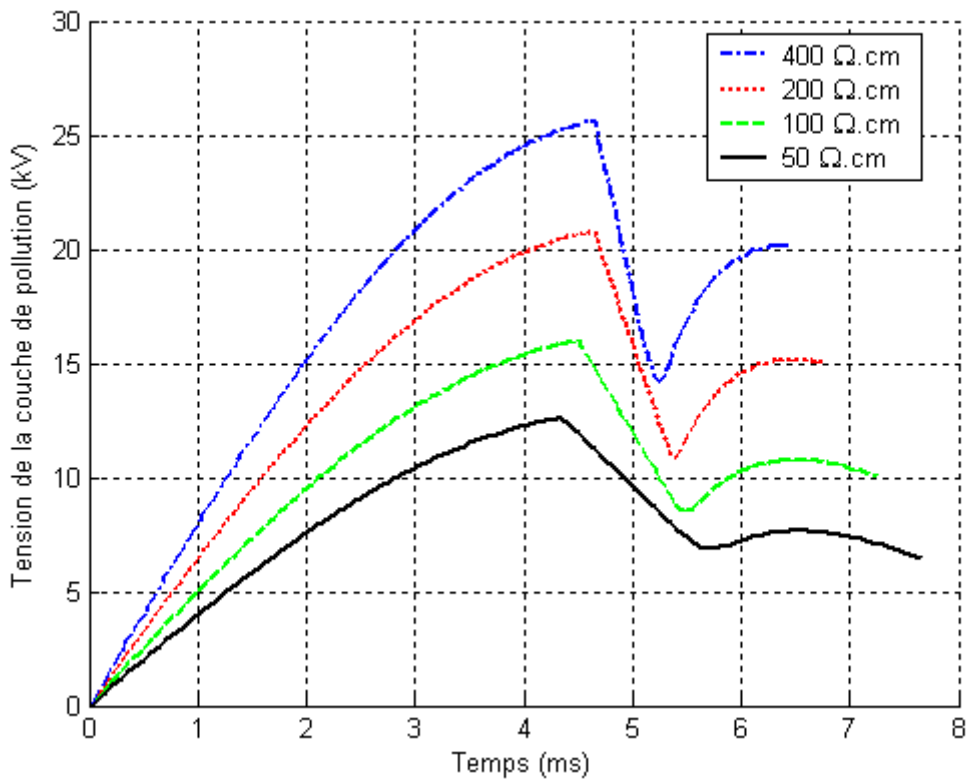


Figure IV.8 : Tension dans la couche de pollution en fonction du temps

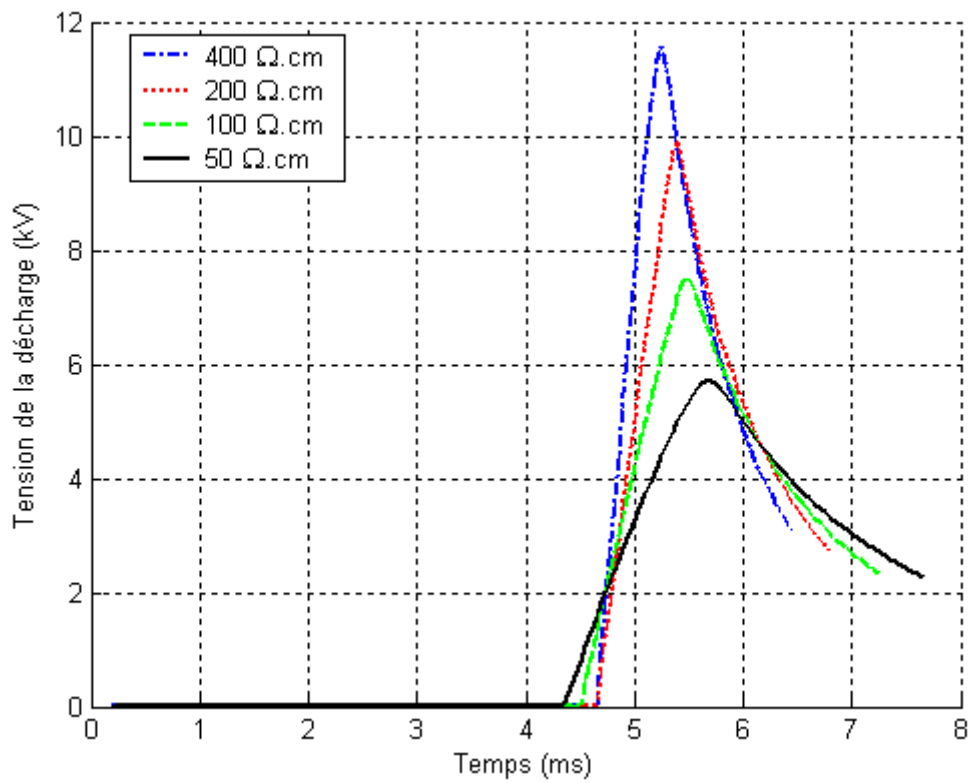


Figure IV.9: Tension de l'arc en fonction du temps

IV.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 IV.10), 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.

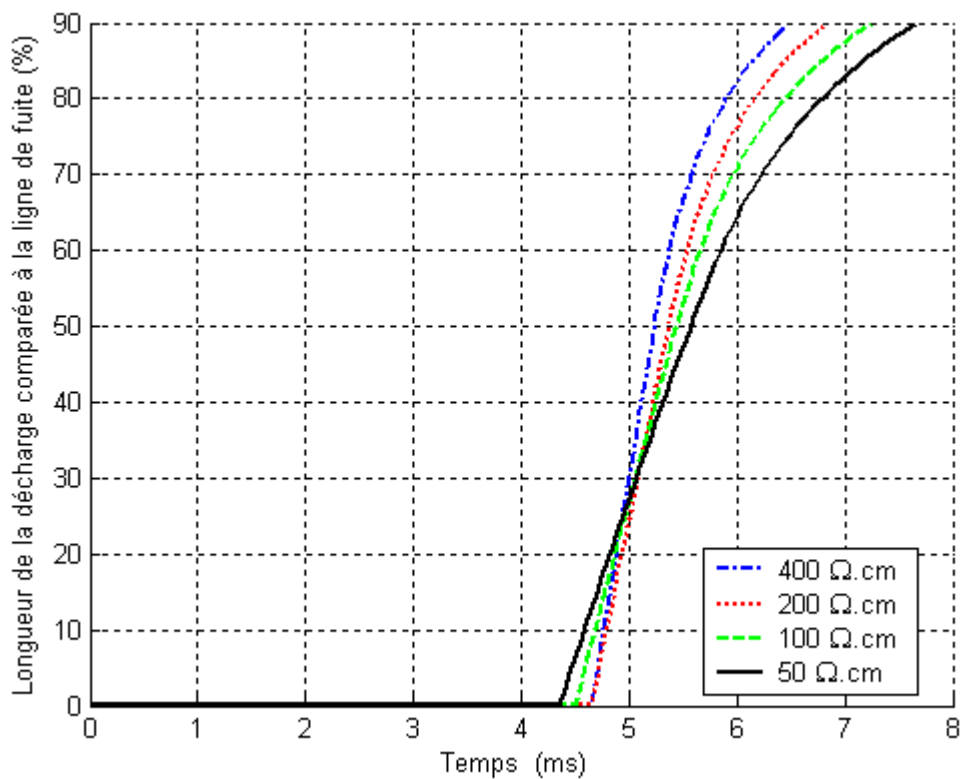


Figure IV.10 : Longueur de la décharge comparée à la ligne de fuite en fonction du temps

IV.3.1.3. Courant de la décharge

Les caractéristiques de la figure (IV.11), 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.

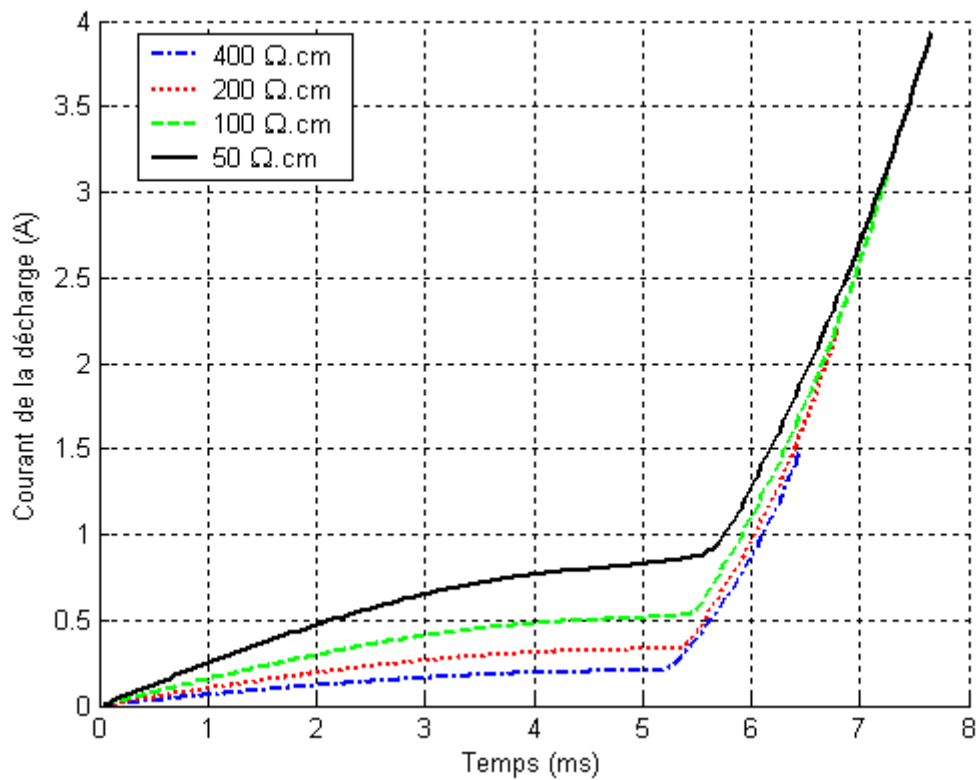


Figure IV.11 : Courant de fuite en fonction du temps

IV.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 IV.12). 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.

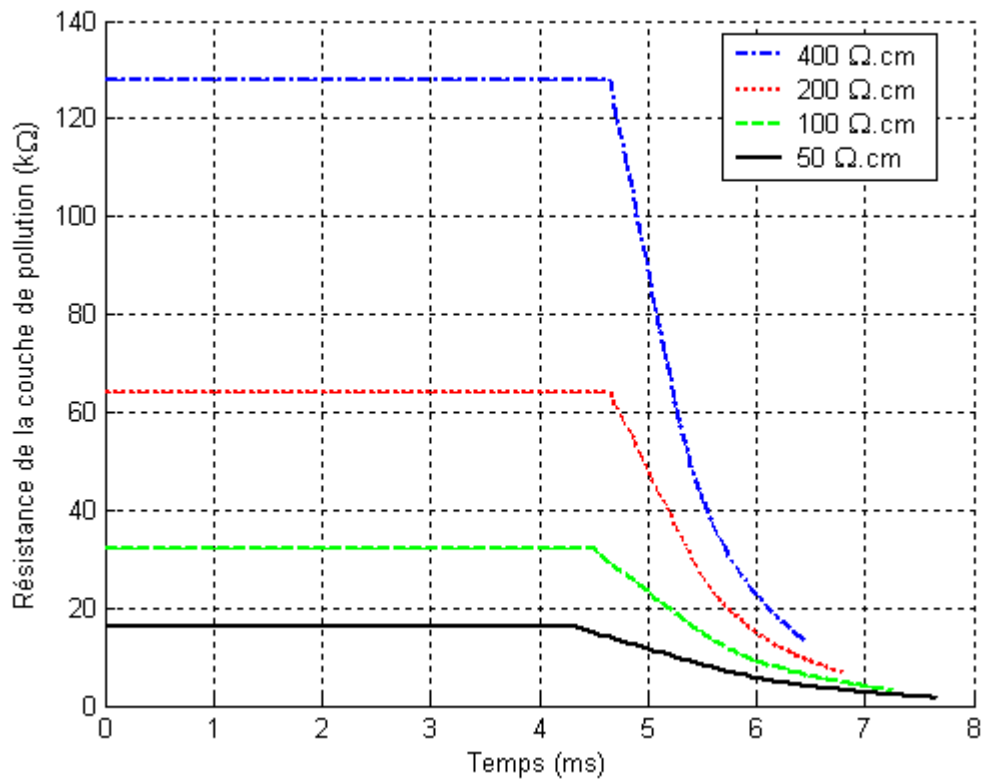


Figure IV.12 : Résistance de la couche de pollution en fonction du temps

IV.3.1.5. Résistance de l'arc

La variation de la résistance de l'arc en fonction du temps est présentée à la figure (IV.13). 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.

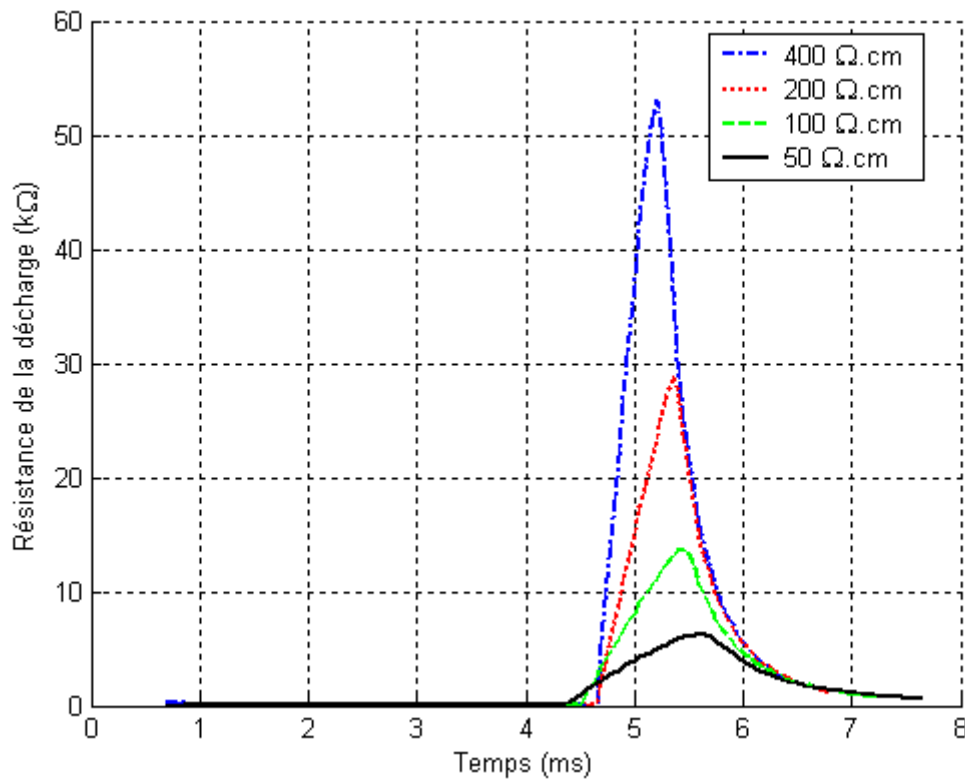


Figure IV.13 : Résistance de l'arc en fonction du temps

IV.3.1.6. Rayon de la décharge

La figure (IV.14) 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 [34], 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.

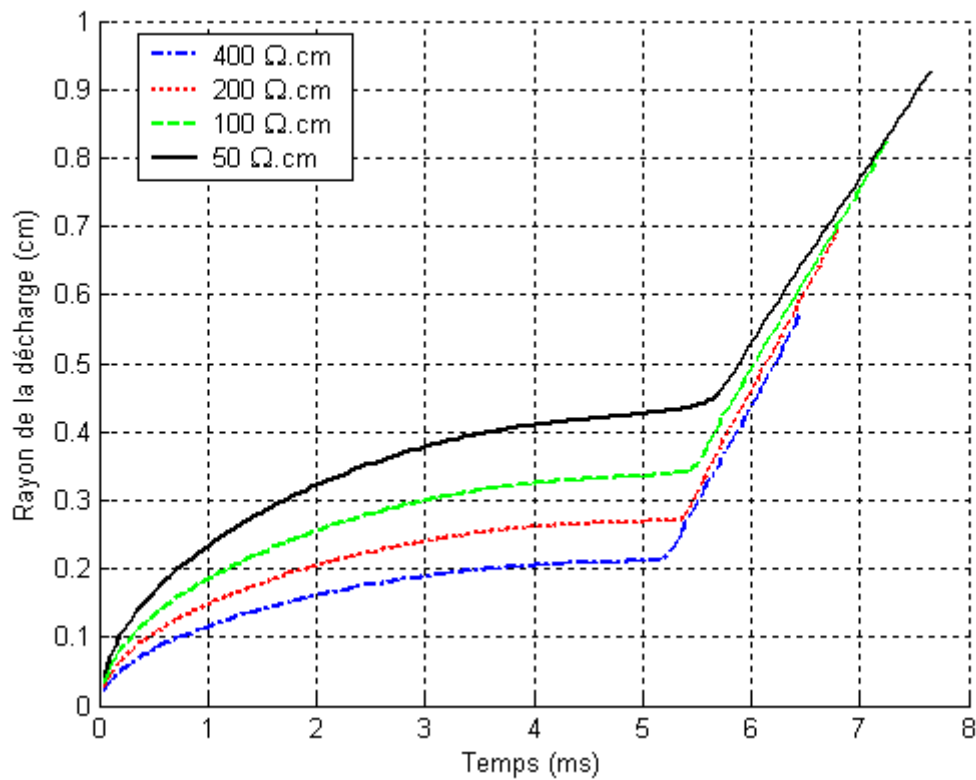


Figure IV.14 : Rayon de l'arc en fonction du temps

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

Les figures (IV.15) et (IV.16) 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 (IV.17).

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

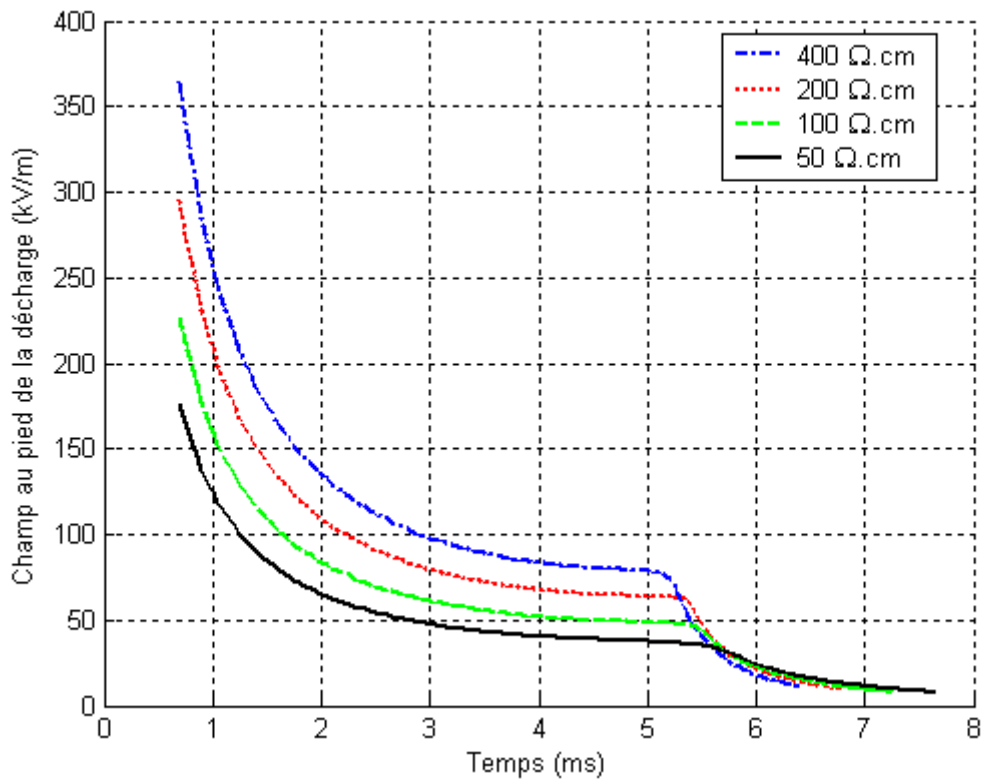


Figure.IV.15 : Champ au pied d'arc en fonction du temps

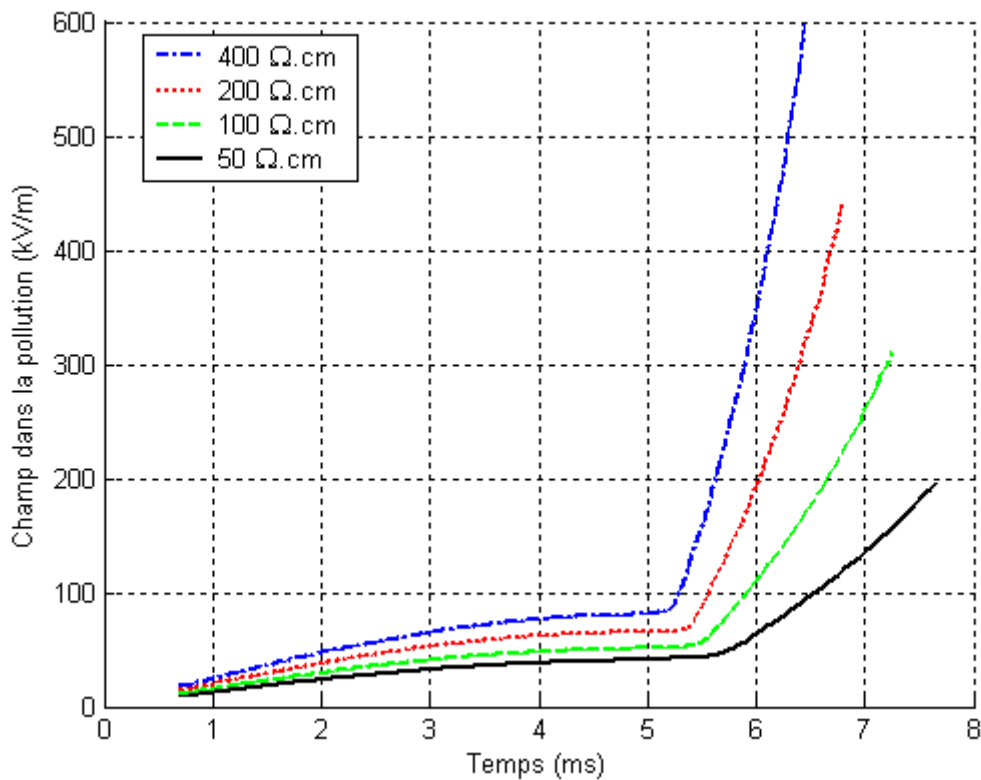


Figure IV.16 : Champ dans la couche de pollution en fonction du temps

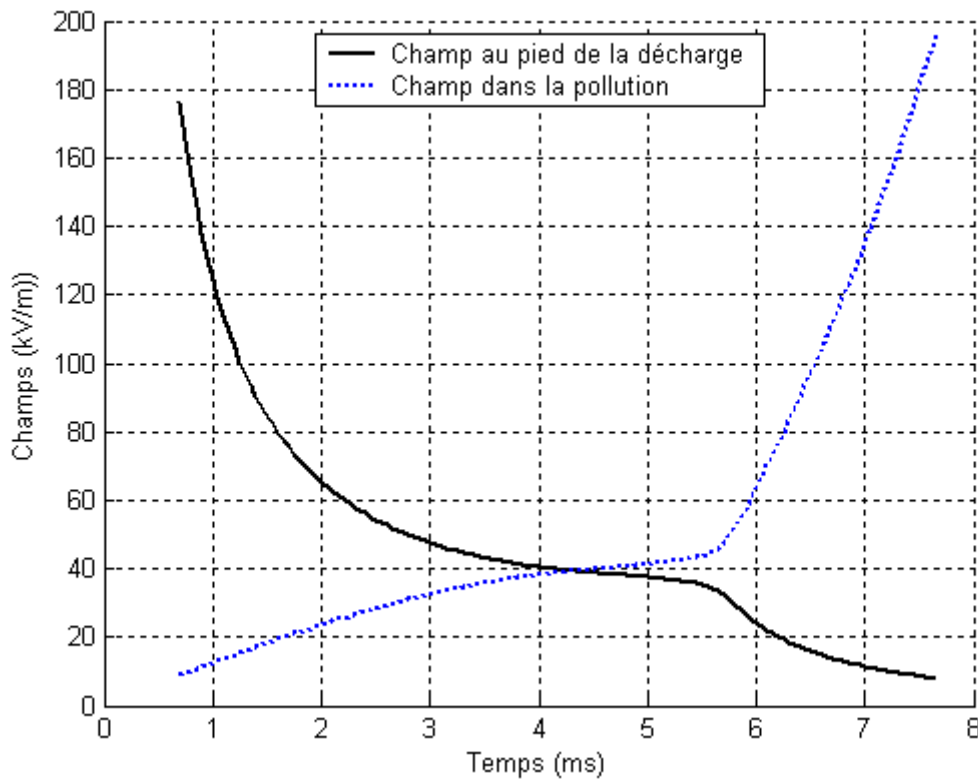


Figure IV.17 : Champ dans la couche de pollution et Champ au pied d'arc en fonction du temps, pour une résistivité de $50 \Omega.cm$

IV.3.1.8. Vitesse de propagation

La figure (IV.18) 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.

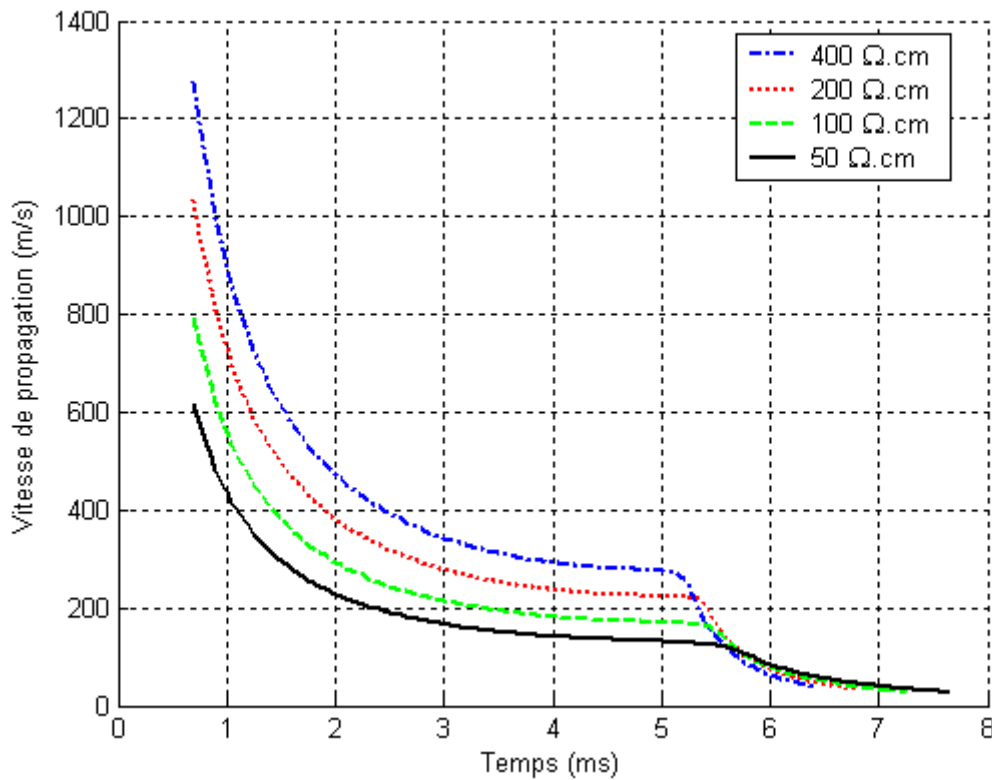


Figure IV.18 : Vitesse de propagation de la décharge en fonction de temps

IV.3.1.9. 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 IV.19 et Figure IV.20), 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.

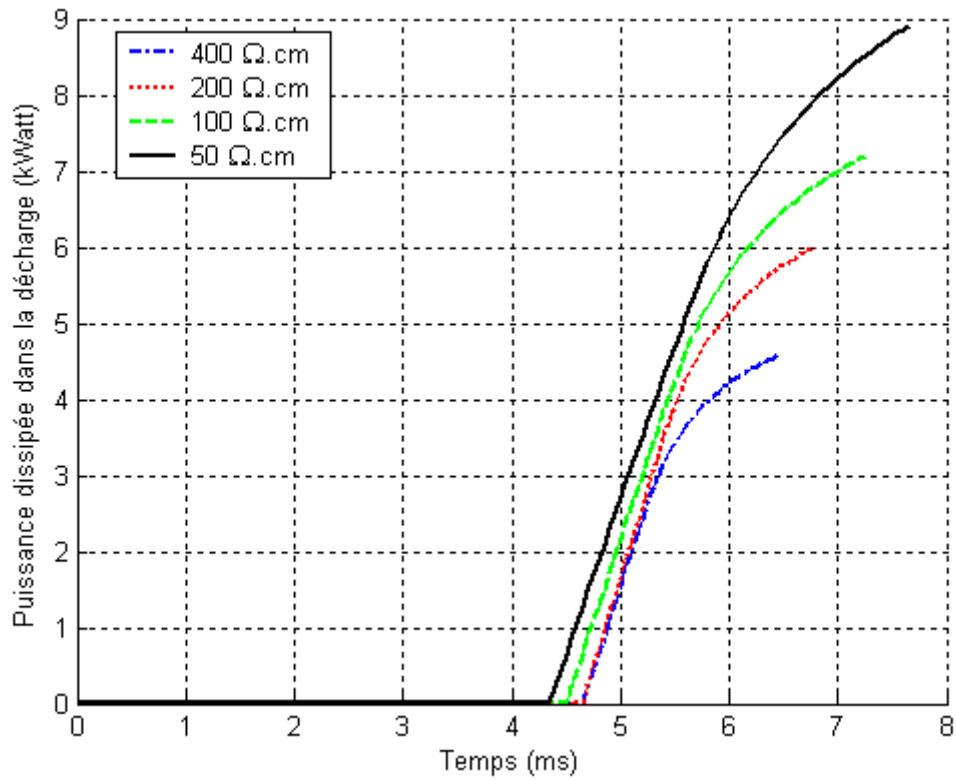


Figure IV.19 : Puissance dissipée dans l'arc en fonction du temps

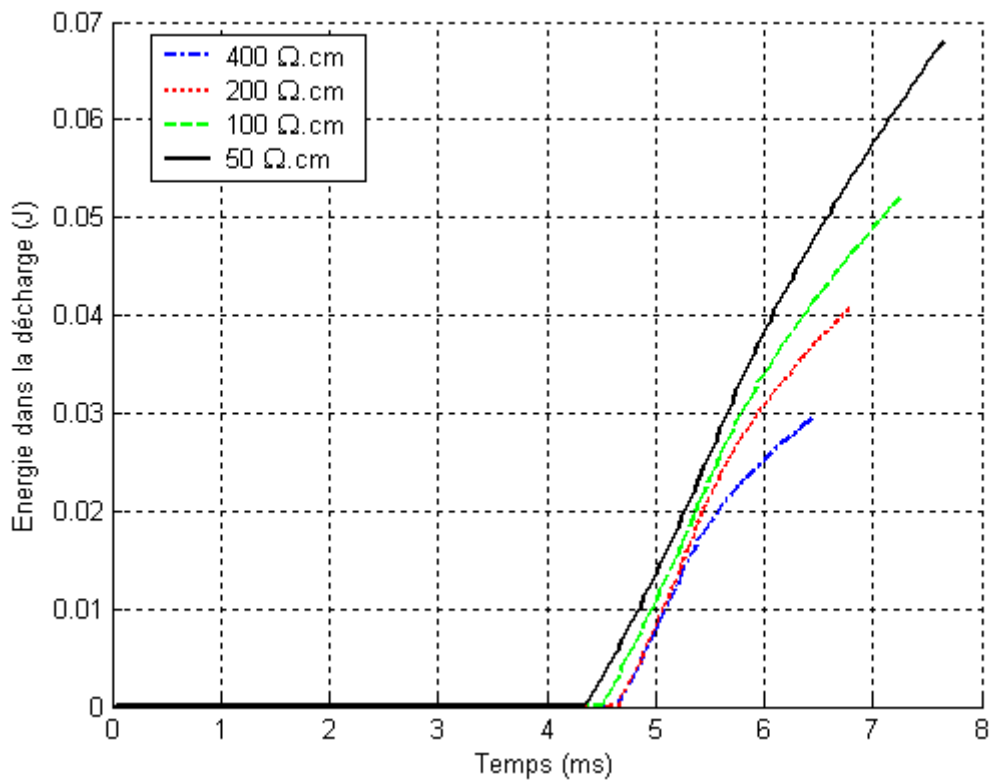


Figure IV.20 : Energie dissipée dans l'arc en fonction du temps

IV.3.1.10. 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 IV.21 et Figure IV.22).

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

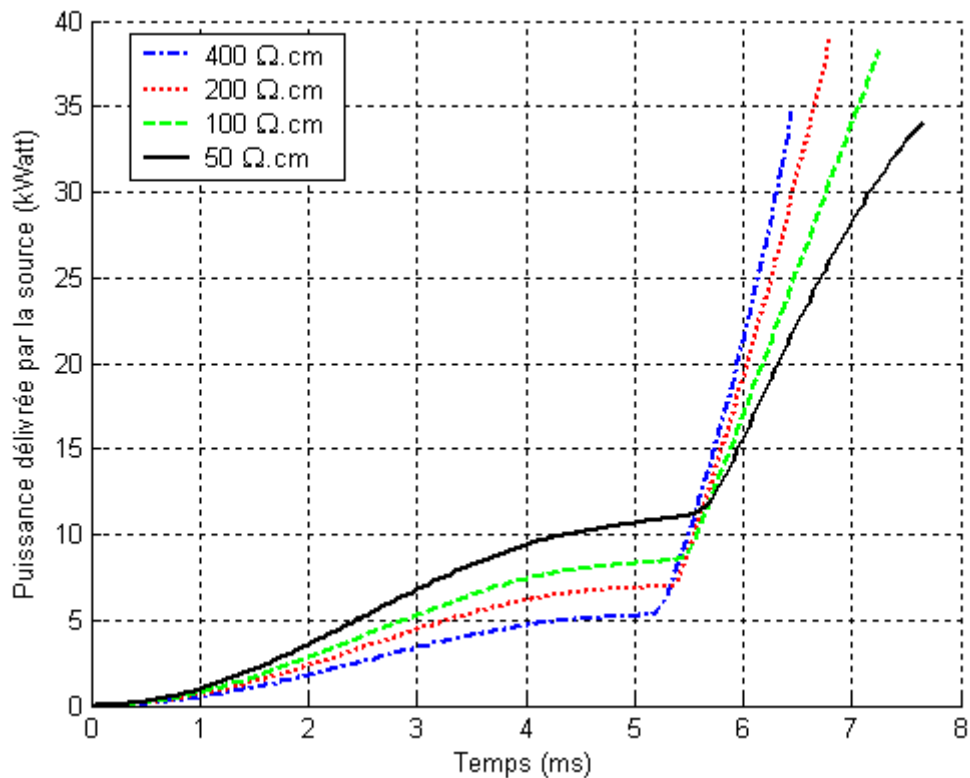


Figure IV.21 : Puissance fournie par la source en fonction du temps

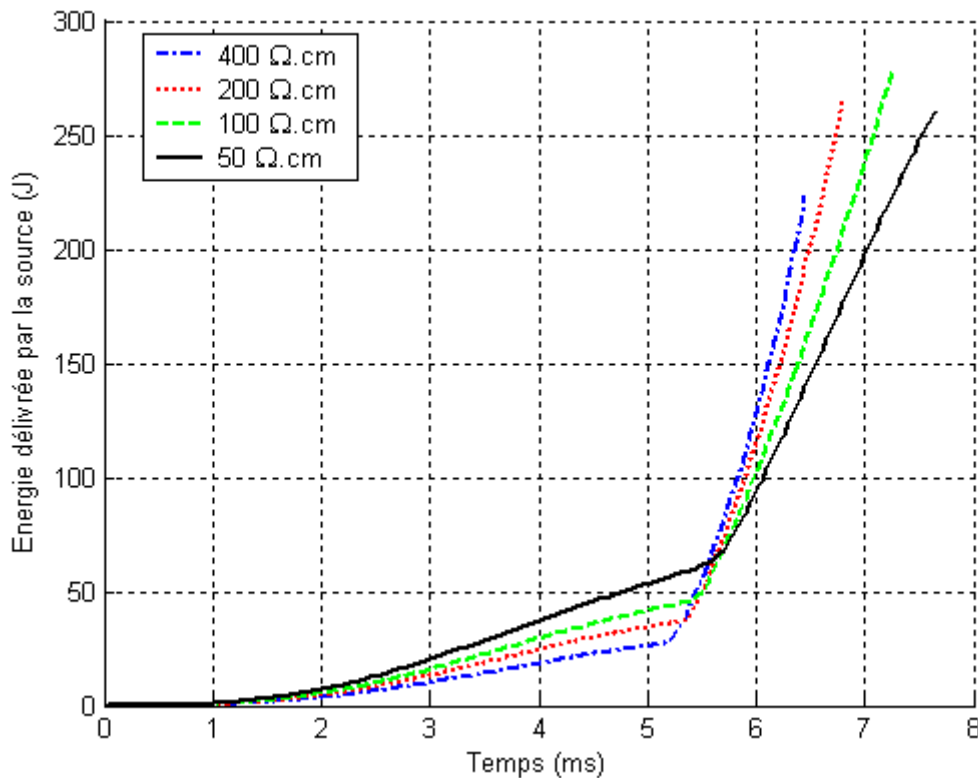


Figure IV.22: Energie fournie par la source en fonction du temps

IV.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.

IV.3.2.1. Résistance de l'arc

La figure (IV.23) 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 [48], 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.

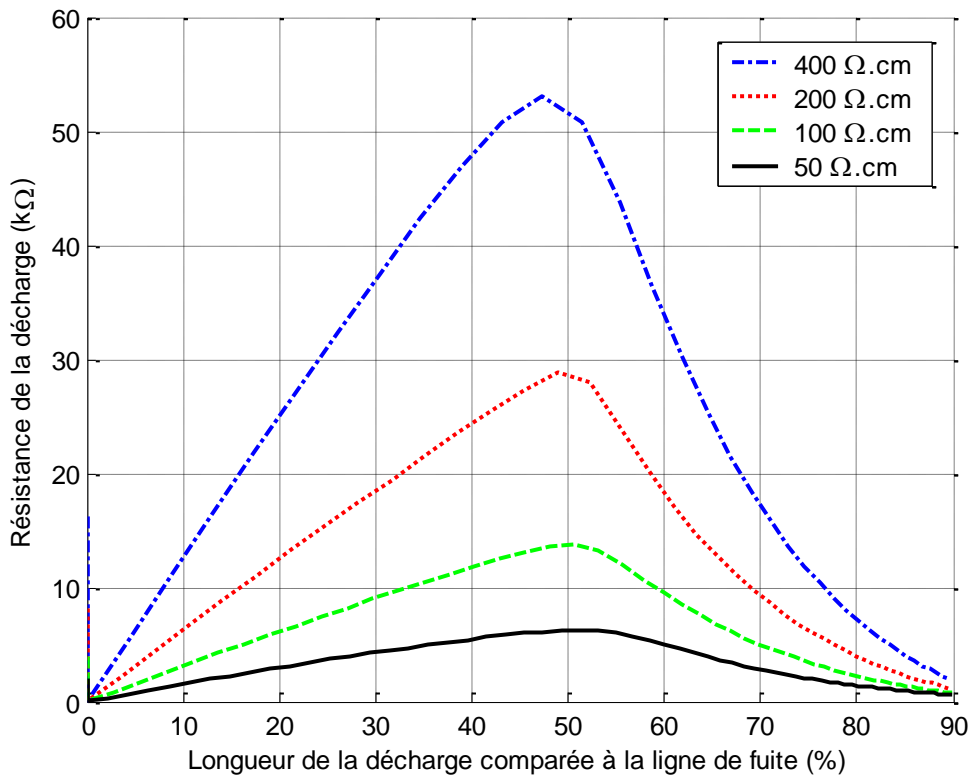


Figure IV.23 : Résistance de la décharge en fonction de la longueur d'arc comparée à la ligne de fuite

IV.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 (IV.24). Nous remarquons que la vitesse de propagation diminue lentement jusqu'à la longueur critique puis diminue brusquement ailleurs.

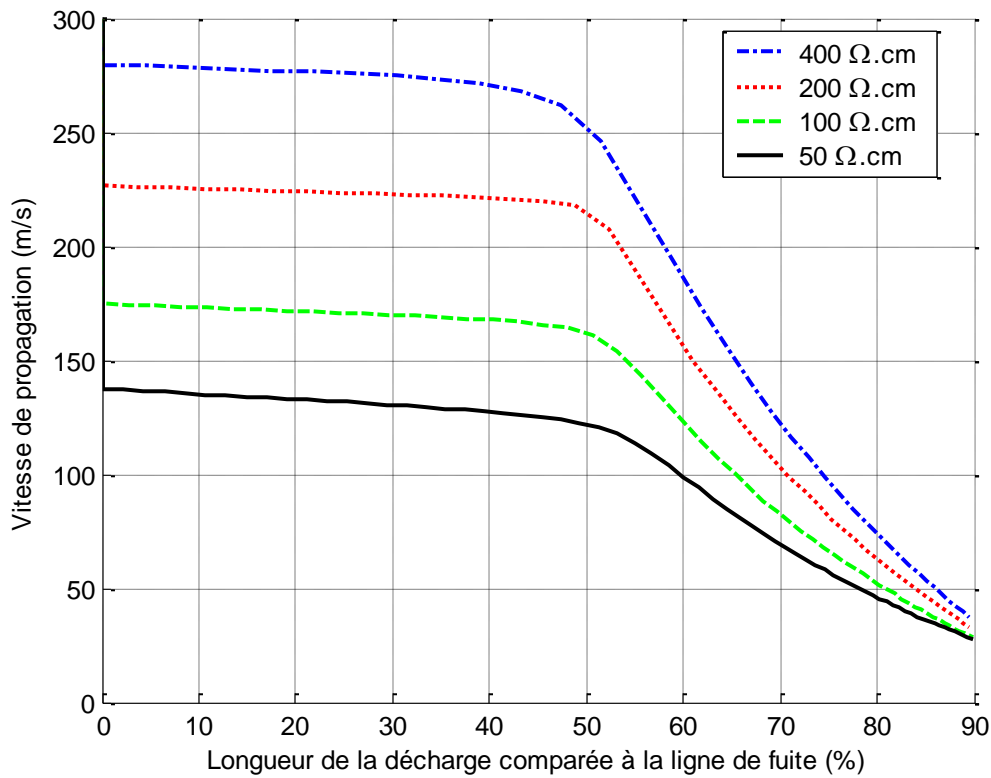


Figure IV.24 : Vitesse de propagation en fonction de la longueur d'arc comparée à la ligne de fuite

IV.3.2.3. Courant et rayon de la décharge

Les figures (IV.25) et (IV.26) 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.

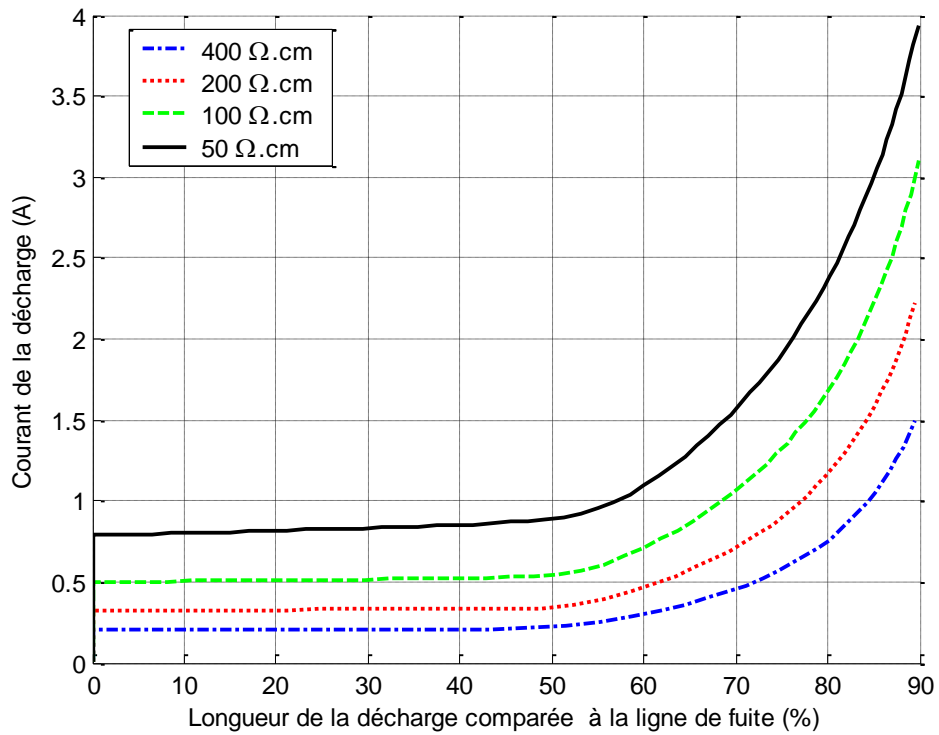


Figure IV.25 : Courant de fuite en fonction de la longueur d'arc comparée à la ligne de fuite

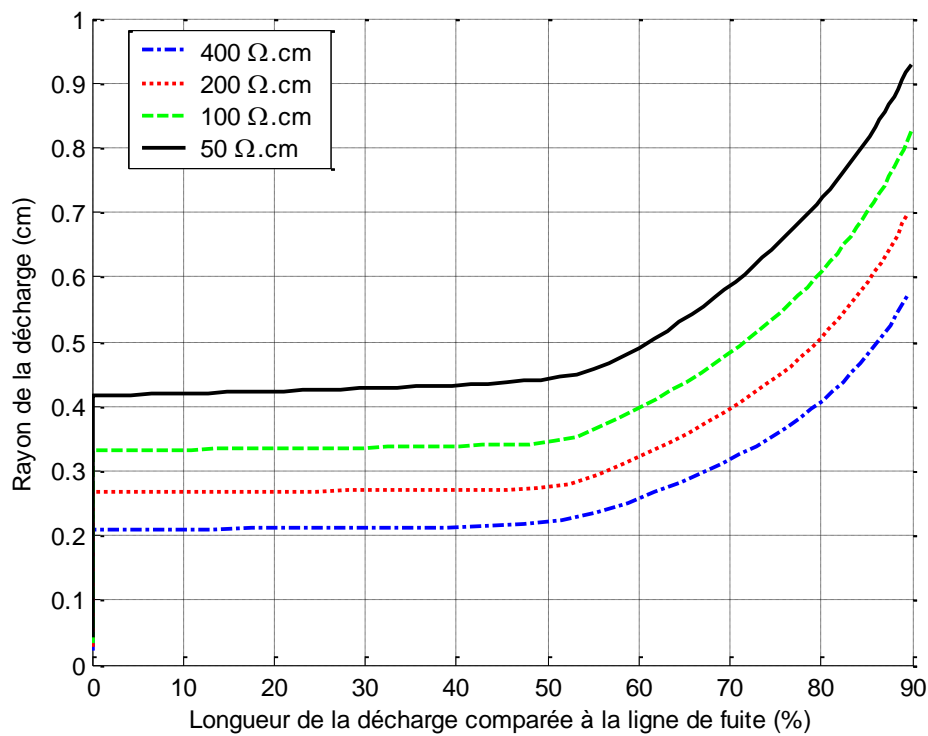


Figure IV.26 : Rayon de décharge en fonction de la longueur d'arc comparée à la ligne de fuite

IV.3.3. Temps au contournement

La figure (IV.27) 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.

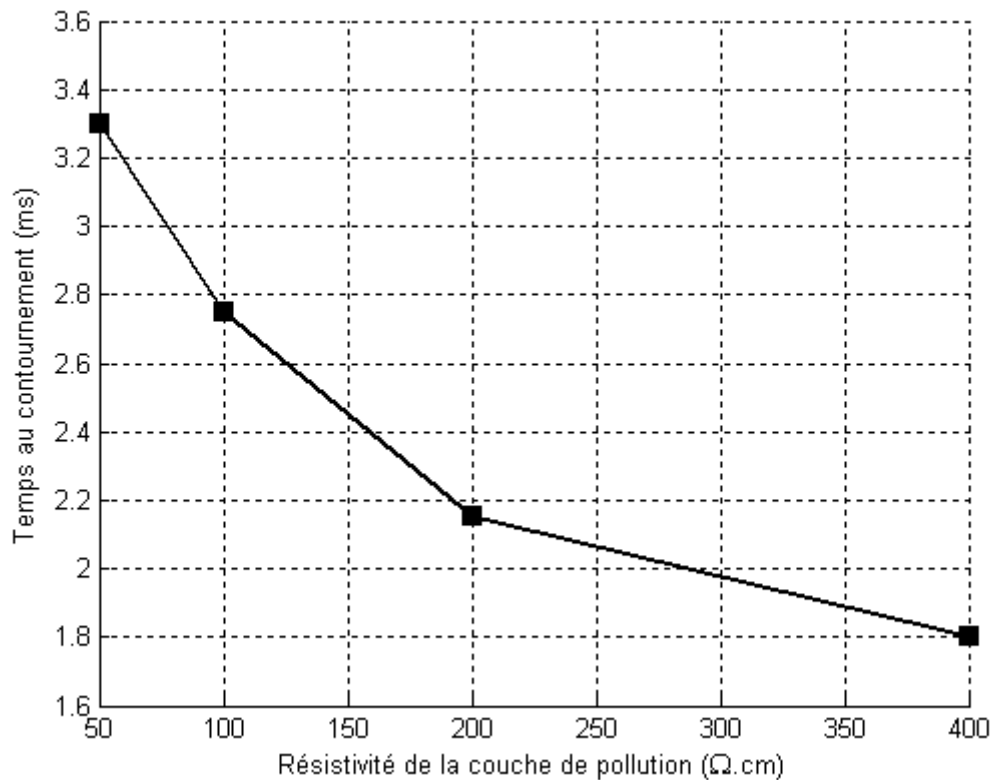


Figure IV.27 : Temps au contournement en fonction de la résistivité de la couche polluante

IV.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 [38] Zafer Nasser Rumli [56]

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 [57].

49	IV.1. Introduction
49	IV. 2. Validation
49	IV. 2.1 Validation sur le modèle de Tegar :
52	IV.2.2. Validation sur le modèle de Zafer :
53	IV.3. Application
54	IV.3.1. Evolution temporelle :
54	IV.3.1.1. Tension appliquée, tension dans la couche de pollution et tension de l'arc
56	IV.3.1.2. Longueur de la décharge
56	IV.3.1.3. Courant de la décharge
57	IV.3.1.4. Résistance de la couche polluante
58	IV.3.1.5. Résistance de l'arc
59	IV.3.1.6. Rayon de la décharge
60	IV.3.1.7. Champs au pied de l'arc et dans la pollution
62	IV.3.1.8. Vitesse de propagation
63	Puissance et énergie transférées dans l'arc
65	Puissance et énergie fournie par la source
66	IV.3.2. Evolution spatiale
66	IV.3.2.1. Résistance de l'arc
67	IV.3.2.2. Vitesse de propagation
68	IV.3.2.3. Courant et rayon de la décharge
70	IV.3.3. Temps au contournement
70	IV.4. Conclusion

Conclusion générale

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

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

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

- [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] D. Dumora, "Matériaux isolants céramiques en électrotechnique", Technique de l'ingénieur D275.
- [4] G. Riquel, E. Span genberg, "De la céramique au synthétique", EDE-Epure, N° 58, Avril 1998.
- [5] Y. Porcheron, "Lignes aériennes : Matériels entrant dans la constitution d'une ligne aérienne", Technique de l'ingénieur D4425.
- [6] M. A. B. EL Koshairy, 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.
- [7] F. Amidi, k. Ouerdane, "Les effets de la pollution sur les ouvrage électrique à 30kV en région littorales", projet de fin d'étude, département d'électrotechnique, USTH Bab Ezzouar, juin 1998.
- [8] A. Cimador, S. Vitet, "La Pollution des Isolateurs", EDF-Epure, N°. 27, Juillet 1990.
- [9] Société : CERAVÉR, "Isolateur capot tige en porcelaine et Isolateur capot tige en verre trempé", (**incomplet**)
- [10] QUILLET, "Encyclopédie des sciences industrielles", 1981.
- [11] D.NAMANE, "Effet de la Discontinuité de la Couche de Pollution sur le Comportement d'Isolateur Haute Tension, sous la Fréquence 50Hz", *Thèse de Magister ENP, Février 1998.*
- [12] C.E.I-60 " Technique des Essais à Haute Tension, Définitions et Prescription Générales aux Essais " *première édition 1973.*
- [13] W. Heise, G.F, luxa, G.Revery, M.P. Verma " Estimation de la Méthode d'Essais sous Pollution Artificielle par Couche Solide " *cigré, rapport 33- 09 1982*
- [14] G.leroy, C.Gary "Propriétés Diélectriques de l'air et les très Hautes Tensions", *Edition Eyrolles, Paris 1984*
- [15] A.MEKHALDI, "Etude du Développement d'un Arc Électrique sur des Surfaces Isolantes Contaminées par la Pollution Désertique", *Thèse De Magister, ENP, Juin 1990*
- [16] L.CHOUGUI, R.BELAICHA, "Contribution à l'Étude de la Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région d'Arzew", *PFE, ENP Janvier 1983.*
- [17] C.HURAU, A.M.RAHAL, "Le Contournement des Isolateurs Haute Tension : Approche à l'Aide d'un Modèle de Laboratoire", *RGE, Juin 1975.*
-

- [18] P.J.LAMBETH, A.AUXEL M.P. VERMA “ Méthode de Mesure de la Sévérité de la Pollution Compte tenu de son Influence sur le Comportement des Isolateurs à Haute Tension” *Electra N°20, janvier 1972.*
- [19] HE.PEI-ZHONG, XU.CHENG-DONG “Résultats d’Essais et de Recherches Sur des Isolateurs Naturellement Pollués et leur Application à la Conception de l’Isolation d’un Réseau en Régions Polluées” *CIGRE, Rapport 33-07, 1982.*
- [20] Groupe d’action 33-04-03, “Dispositif de Surveillance des Isolateurs Soumis à la Pollution ” *Electra, n°152, février 1994 p 78-90.*
- Dresden, Allemagne, 26-30 Août 1991.*
- [21] J.P.HOLTZHAUSEN, O.C.T.POTGIETER, J.M.SMITH, “The One Site Leakage Current Performance of Insulators of Various Designs and Materials
- [22] A. LECHEB, “Visualisation et Traitement de Signal du Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée”, *PFE, ENP Juin 1999.*
- [23] F. Rizk, “*Mayhemical Modeles for Pollution Reignition*”, *Electra*, Vol. 78, pp. 71 - 103, 1981.
- [24] 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.
- [26] P. Claverie and Y. Porcheron, “*How to Choose Insulators for polluted Areas*”, *IEEE Trans. PAS*, Vol. 92, N° 3, pp. 1121 - 1131, 1973.
- [25] G. Neumärker , “*Verschmutzungs Zustand und Kriechweg*”, *Monatsber. d. Deut. Akad, Wiss.*, Berlin, Vol. 1, pp.352 - 359, 1959.
- [27] P. Claverie, “*Predetermination of the Behaviour of Polluted Insulators*”, *IEEE Trans. PAS*, Vol. 90, N° 4, pp. 1902 - 1908, Juillet 1971.
- [28] S. Gopal and Y. Narayana Rao, “*On the Flashover Mechanisms of Polluted Insulators*”, *ISPPISD, IIT*, pp. 1 - 6, Madras, Inde, 1983.
- [29] Publication IEC 71-2, “*Insulation Coordination, Application Guide*”, Seconde Edition, 1976.
- [30] L. L. Alston and S. Zoledziowski, “*Growth of Discharges on Polluted Insulators*”, *IEEE, Trans. PAS*, Vol. 110, N° 7, pp. 1260 - 1266, Juillet 1963.
- [31] J. Danis, “*A Stochastic Pollution Flashover Model*”, 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 - 12, Septembre 5 - 9, 1983, Athènes, Grèce.
- [32] H. Nacke, “*Lichtbogen festigkeit und kriechstrom festigkeit von isolier stoffen*”, *Dissertation, University of Berlin-Charlottenburg*, 1962.
-

- [33] H. Nacke, "*Stabilitat der Fremdschichtentladungen und Theorie des Fremdschichtuberschlags*", ETZ - A, N° 16, pp. 577 - 585, 1966.
- [34] R. Wilkins, "*Flashover Voltage of High Voltage Insulators with Uniform Surface Pollution Films*", Proc. IEE, Vol. 116, N° 3, pp. 457 - 465, Mars 1969.
- [35] 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.
- [36] B. F. Hampton, "*Flashover Mechanism of Polluted Insulation*", Proc. PIEEE, Vol. 111, N° 5, pp. 985 - 990, Juillet 1964.
- [37] 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.
- [38] M. Tégua, "*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.
- [39] 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.
- [40] CEI 60 - 1, "*Techniques des Essais à Haute Tension*", Définitions et Prescriptions Générales Relatives aux Essais, Deuxième Edition, 1989.
- [41] R. Wilkins and A. J. Al-Baghdadi, "*Arc Propagation along an Electrolyte Surface*", Proc. IEE, Vol. 118, N° 12, pp. 1886 - 1892, December 1971.
- [42] A. M. Rahal and C. Huraux, "*Flashover of High Voltage Insulators*", IEEE Trans., Vol. Pas - 98, N° 6, pp. 2223 - 2231, 1979.
- [43] S. Hesketh, "*General Criterion for the Prédiction of Pollution Flashover*", Proc. IEE, Vol. 114, N° 4, p. 531 - 532, April 1967.
- [44] 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.
-

- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] O. Mayr, "Beitrag zur Theorie der Statischen und der Dynamischen Litchbogens", *Arch. f. Elektrotechnik*, Vol. 37, pp. 588 - 608, 1943.
- [48] R. Sundararajan and R. S. Gorur, "Computer Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Conditions", *IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul.*, Vol. 2, N° 1, pp. 121 - 127, February 1995.
- [49] N. Dhahbi - Megriche and A. Beroual, "Flashover Dynamic Model of Polluted Insulators Under AC Voltage", *IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul.*, Vol. 7, N° 2, pp. 283 - 289, April 2000.
- [50] 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.
- [51] R. Sundararajan and R. S. Gorur, "Dynamic Arc Modeling of Pollution Flashover of Insulators under dc Voltage", *IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul.*, Vol. 26 N° 2, pp. 209 - 218, April 1993.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] E. H. A. M. Rahal, "Sur les Mécanismes Physiques du Contournement des Isolateurs Haute Tension", Thèse Sciences Physiques, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1979.
- [55] ZAFER AYDOGMUS AND MEHMET CEBECI, *IEEE transactions on dielectric and electrical insulation* (vol. 11, No. 4; August 2004). "A New Flashover Dynamic model of polluted HV Insulators"
-

Bibliographie

[56] Felix Amarh '' Electric Transmission Line Flashover Prediction System '' , *Ph.D. Thesis and Final Project Report*, P S E R Center A National Science Foundation Industry/University Cooperative Research Center since 1996

[57]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.
