



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
**Université d'Ibn Khaldoun Tiaret**

Faculté des Sciences et Sciences de la Technologie et Science de la matière  
**Département des Sciences et de la Technologie**

**Ecole Doctorale en électrotechnique et ses applications**

**MEMOIRE PREPARE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER**

**Option : Matériaux diélectriques et Haute Tension**

Présenté par

**Kasmi Ghalem**

Ingénieur d'état en électrotechnique à l'université de Tiaret

**Titre**

**Modélisation d'une décharge électrique multi-branches  
sur un isolateur pollué alimentée sous tension alternative**

Soutenu le: 30/05/2013 devant la commission d'examen:

<b>Mr. ALLAOUI Tayeb</b>	Maître de Conférences A (Univ de Tiaret)	PRESIDENT
<b>Mr. MAHI Djilali</b>	Professeur (U.A.T Laghouat)	EXAMINATEUR
<b>Mr. ZEGNINI Boubakeur</b>	Professeur (U.A.T Laghouat)	EXAMINATEUR
<b>Mr. SMAILI Atallah</b>	Maître de Conférences A (Univ de Tiaret)	RAPPORTEUR

Thèse de magister préparée au sein de laboratoire de génie énergétique et génie informatique.

**Promotion 2012/2013**

# *Remerciements*

Tout d'abord, je tiens à remercier **ALLAH** de m'avoir donné la force, le courage et la volonté de faire ce travail.

Un très grand remerciement à tous les membres de mes parents qui m'ont toujours donné un soutien et m'ont lancé sur le long chemin d'études au cours de ma formation.

Je tiens particulièrement à exprimer ma profonde gratitude et ma sincère reconnaissance envers Monsieur **ATALLAH SMAILI** pour l'intérêt qu'il a porté à l'égard de mon travail et pour avoir dirigé cette thèse. La qualité scientifique a dérivé dans des conseils précieux et appréciables pour m'avoir aidé à la réalisation de ce manuscrit.

Je remercie Monsieur **YANNALLAH KHELIFA** pour son aide précieuse, pour m'avoir consacré beaucoup de son temps et d'énergie, il est beaucoup dans la motivation de ce travail je lui témoigne mes reconnaissances.

Je voudrais exprimer ici ma gratitude à Monsieur le président de la commission d'examen qui m'a fait l'honneur de présider le jury, et également à Messieurs les membres de cette commission, qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère considération en acceptant d'examiner ce travail ainsi que leur participation à ce jury.

Je tiens à remercier l'ensemble des enseignants qui ont participé à ma formation.

Je voudrais remercier mes collègues de travail et mes amis pour leur soutien moral.

# Listes des figures

- Fig.1.1.** Isolateur rigide en verre.
- Fig. 1.2.** Assemblage à rotule.
- Fig. 1.3.** Isolateurs à capot et tige.
- Fig.1.4.** Isolateur à long fût en porcelaine.
- Fig. 1.5.**Dépôt de pollution sur une surface.
- Fig. 1.6.** Lignes de courant sur une surface isolante.
- Fig. 1.7.** Formation de la bande sèche.
- Fig. 1.8.** Contournement d'une surface isolante.
- Fig. 1.9.** Modèle d'Obenaus.
- Fig.1.10.** Montage de Claverie et Porcheron.
- Fig. 1.11.** Le montage expérimental.
- Fig.1.12.** Modèle de Danis.
- Fig.1.13.** Modèle de Nacke et Wilkins.
- Fig.1.14.** Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire selon Tegar.
- Fig. 1.15.** Modèle de GuanZhicheng et Zhang Renyu.
- Fig. 1.16.** Modèle d'isolateur en forme de disque conçu par McElroy et Woodson.
- Fig. 1.17.**Schéma d'un isolateur pollué et son circuit électrique équivalent.
- Fig. 2.1.** Circuit électrique équivalent de base.
- Fig. 2.2.** Variation de courant critique en fonction de la résistivité linéique.
- Fig. 2.3.** Variation de tension critique en fonction de la résistivité linéique.
- Fig.2.4.** variations du champ électrique en fonction de courant.
- Fig.2.5.** variations de la vitesse en fonction de courant.
- Fig.2.6.** Organigramme du modèle de Anjana et Lakshminarasimha.
- Fig.2.7.** Organigramme du modèle de Sundararajan et Gorur.
- Fig.2.8.** Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge selon Dhahbi.
- Fig. 2.9.**Organigramme du modèle de Dhahbi.
- Fig.3.1.** Propagation des arcs en série selon Farzaneh.
- Fig.3.2.** Le Modèle multi-arcs selon Cheng et Nour.
- Fig.3.3.** Présence d'une branche de la décharge.
- Fig.3.4.** Présence deux branches de la décharge.
- Fig.3.5.** Présence plusieurs branches de la décharge.
- Fig.3.6.**Calcul de courant électrique.

**Fig.3.7.** Courant dans la dernière branche de la décharge.

**Fig.3.8.** Morphologies de la décharge selon Slama.

**Fig.3.9.** Morphologies de la décharge selon Tilmatine.

**Fig.3. 10.** Tension de contournement en fonction de la résistivité linéique.

**Fig.3.11.** Courant de contournement en fonction de la résistivité linéique.

**Fig.3.12.** Tension de contournement en fonction de la résistivité linéique.

**Fig.3.13.** Courant de contournement en fonction de la résistivité linéique.

**Fig.4.1.** Fenêtre de navigateur de modèles COMSOL.

**Fig.4.2.** Le modèle expérimental.

**Fig.4.3.** Modèle de simulation.

**Fig.4.4.** Répartition du champ électrique dans l'espace inter-électrodes avant l'amorçage de la décharge.

**Fig.4.5.** Répartition du champ électrique dans l'espace inter-électrodes après l'amorçage de la décharge.

**Fig.4.6.** Répartition du champ électrique dans l'espace inter-électrodes après l'amorçage de la décharge et en présence d'une branche.

**Fig.4.7.** Répartition du champ électrique dans l'espace inter-électrodes après l'amorçage de la décharge et en présence de deux branches.

**Fig.4.8.** Organigramme de modèle.

**Fig.4.9.** Variation de la tension d'arc en fonction du temps.

**Fig.4.10.** Courant de fuite en fonction du temps.

**Fig.4.11.** Résistance de l'arc en fonction du temps.

**Fig.4.12.** Rayon de l'arc en fonction du temps.

**Fig.4.13.** Vitesse de propagation de la décharge en fonction de temps.

**Fig.4.14.** Longueur de la décharge en fonction de temps.

## Liste des symboles

$V$  : La tension appliquée aux bornes des électrodes (**V**)

$V_e$  : La tension totale accumulée aux électrodes (**V**)

$X$  : Longueur de la décharge (**cm**)

$R_p$  : La résistance de pollution ( **$\Omega$** )

$r_p$  : La résistance linéique de pollution ( **$\Omega/cm$** )

$I$  : Le courant de décharge (**A**)

$V_{arc}$  : La tension d'arc (**V**)

$A, n$  : Les constantes d'arc

$E_a$  : Le champ d'arc (**V/m**)

$L$  : La distance entre les électrodes (**cm**)

$I_c$  : Le courant critique de contournement (**A**)

$X_c$  : La longueur critique de contournement (**cm**)

$V_c$  : La tension critique de contournement (**V**)

$A, \beta, \nu, \delta$  Les constantes qui dépendent de la nature des électrodes entre lesquelles se développe la décharge dans le modèle de Gopal

$U$  : la tension de la décharge (**V**)

$b$  : la largeur de la surface de l'isolateur dans le modèle de Nacke et Wilkins (**cm**)

$r_d$  : le rayon de la base de l'arc (**cm**)

$R_i(x)$  : La résistance interne propre aux demi cercles dans le modèle de Nacke et Wilkins ( **$\Omega$** )

$R_e(x)$  : la résistance externe ( **$\Omega$** )

$\gamma_e$  : La conductivité de la couche de pollution ( **$\Omega^{-1}.cm^{-1}$** )

$\rho$  : La résistivité de la couche de pollution ( **$\Omega.cm$** )

$K$  : la constante de la caractéristique statique de l'arc

$a$  : La largeur de la couche conductrice dans le modèle de Wilkins

$E_p$  : Le champ électrique dans la couche de pollution (**V/m**)

$v$  : La vitesse de la décharge (**m/s**)

# Sommaire

	Page
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b><i>Chapitre I : Rappels sur les isolateurs et revue des modèles statiques</i></b>	
I.1. Introduction	3
I.2. Les isolateurs	3
I.3. Les principaux types d'isolateurs	3
I.4. La pollution des isolateurs	6
I.5. Contournement des isolateurs pollués	6
I.6. Principaux modèles statiques de contournement	10
I.6.1. Modèle plat	11
I.6.1.1. Modèle d'Obenaus	11
I.6.1.2. Modèle de Neumarker	13
I.6.1.3. Modèle de Rizk	14
I.6.1.4. Modèle de Claverie et Porcheron	15
I.6.1.5. Modèle de Rao et Gopal	17
I.6.1.6. Modèle de Danis	17
I.6.1.7. Modèle de Nacke et Wilkins	19
I.6.1.8. Modèle de Tegar	21
I.6.1.9. Modèle de Wilkins	23
I.6.2. Modèle ouvert	24
I.6.2.1. Travaux de GuanZhicheng et Zhang Renyu	24
I.6.2.2. Modèle disque circulaire	25
I.7. Mécanisme de propagation	26
I.7.3. Critères de propagation de la décharge électrique	26
I.8. Conclusion	30

## ***Chapitre II : Evolution des modèles dynamiques***

II.1. Introduction	31
II.2. Modèle proposé pour la modélisation des décharges électriques	31
II.2.1. Circuit électrique équivalent	31
II.3. Modèles dynamiques rapportés dans la littérature	37
II.3.1. Modèle de Rizk et Nguyen	37
II.3.2. Modèle de Rizk	38
II.3.3. Modèle d'Anjana et Lakshminarasimha	38
II.3.4. Modèle de Sundararajan et Gorur	40
II.3.5. Modèle de Dhahbi	43
II.3.6. Modèle de Tegar	45
II.4. Vitesse de propagation	45
II.5. Temps au contournement	48
II.6. Conclusion	50

## ***Chapitre III : Modèle mathématique de la décharge électrique multi-branches***

III.1. Introduction	51
III.2. Travaux antérieurs des décharges électriques multi-branches	51
III.3. Décharge électrique multi-arcs en série et en parallèle	51
III.4. Phénomène de contournement sous tension alternative	60
III.4.1. Modélisation mathématique de contournement	60
III.5. Modèle mathématique multi-branches	62
III.5.1. Calcul des valeurs critiques en tension continue	62
III.5.2. Calcul des valeurs critiques en tension alternative	63
III.5.3. Morphologies des décharges électriques	64
III.6. Résultats et interprétation	65
III.7. Conclusion	69

## ***Chapitre IV : Simulation des décharges électriques***

IV.1. Introduction	70
IV.2. Détermination de la répartition du champ électrique et du potentiel	70
IV.2.1. Equation de Maxwell	70
IV.2.2. Conditions aux limites et interfaces	72
IV.2.3. Les logiciels de simulation	73
IV.3. Méthode de simulation	75
IV.4. Distribution du champ électrique en absence de la décharge	76
IV.5. Distribution du champ électrique en présence de la décharge	77
1. Modélisation de la décharge électrique	77
2. Présence d'autres branches de la décharge électrique	80
IV.6. Les paramètres de la décharge électrique	82
IV.6.1. Tension d'arc	84
IV.6.2. Courant de la décharge électrique	85
IV.6.3. Résistance de l'arc	85
IV.6.4. Rayon de la décharge électrique	86
IV.6.5. Vitesse de propagation	87
IV.6.7. Longueur de la décharge électrique	88
IV.8. Conclusion	89
<b>Conclusion générale</b>	<b>90</b>

---

---

# *Introduction générale*

---

---

L'existence d'une décharge électrique dans l'air résulte d'un passage très rapide entre les électrodes d'un courant électrique croissant et donc de la création de particules chargées, essentiellement des électrons, à partir des atomes ou molécules neutres initialement présents[66]. Les principaux mécanismes régissant la génération de ces porteurs de charge sont ceux d'ionisation, tendant à augmenter leur densité et ceux de recombinaison et d'attachement, tendant à les réduire. Par ailleurs les mécanismes d'ionisation ne peuvent s'amorcer sans la présence préalable d'au moins un électron dans le volume au voisinage de l'électrode HT. Ces électrons primaires appelés encore électrons germes peuvent être produits par radiation cosmique, par les sources naturelles d'ionisation. Par les charges résiduelles issues des décharges précédentes ou encore par détachement des ions négatifs sous l'effet du champ électrique [67]. Ils sont les précurseurs d'un processus de multiplication électronique, base de toute forme de décharge, dont l'intensité dépend de la nature et de la pression du gaz, de la géométrie de l'intervalle inter- électrodes et de la forme d'onde appliquée.

Le présent travail porte sur l'élaboration d'un modèle mathématique de la décharge électrique multi-branches sur une surface isolante polluée, utilisant un circuit électrique et des lois physiques, et son application pour la détermination des valeurs critiques de la décharge en fonction d'autres paramètres. Il comporte quatre chapitres.

Le premier chapitre sera consacré au phénomène de contournement, les différents types d'isolateurs, l'évolution du processus de contournement sur une surface isolante polluée ainsi que les différents modèles statiques rapportés dans la littérature. Plus tard, nous discuterons les mécanismes de propagation de la décharge soit par ionisation où par force électrostatique et plus particulièrement les critères de propagation de la décharge électrique.

Le deuxième chapitre présentera les modèles dynamiques les plus représentatives pour différents auteurs qui permettent de déterminer les caractéristiques de la décharge qui se propagent sur les surfaces isolantes polluées. En utilisant la tension d'arc établie par Roa et Gopal, on a essayé de déterminer les conditions critiques de contournement de la décharge.

Le troisième chapitre exposera les différents travaux des auteurs précédents dans le domaine de la décharge multi-branches. Dans la suite des travaux de D.Mahi, un nouveau modèle mathématique qui prend en compte la présence de plusieurs branches de la décharge qui permet de calculer la tension et le courant de contournement.

Le quatrième chapitre sera consacré à la détermination de la distribution du champ le long d'un isolateur haute tension pollué. Le but de ce chapitre est de déterminer les zones à fort champ électriques favorables à l'amorçage des décharges ou à la propagation des streamers. En simplifiant la complexité de la géométrie de l'isolateur par un modèle plan circulaire et avec l'utilisation d'une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel s'est avéré d'être une des meilleures solutions. A cet effet, la méthode des éléments finis était le mieux adaptée aux conditions imposées par le problème et une simulation numérique a été prise en 2D. À la face de la difficulté de phénomène de la décharge multi-branches, on a simplifié le cas où on a pris en considération seulement la colonne principale de la décharge pour suivre leur évolution en fonction de temps.

# *Chapitre I*

---

---

*Rappels sur les  
isolateurs et revue des  
modèles statiques*

---

---

**I.1. Introduction:**

Le phénomène de pollution sur les isolateurs des lignes aériennes constitue un sujet d'étude d'une importance primordiale. Cela provient du fait que la pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux haute tension [55]. L'air transportant des grains de poussières et une couche étrangère se dépose sur les surfaces des isolateurs et par suite des courants de fuite peuvent circuler sur ces surfaces qui mènent au contournement total de l'isolateur. Dans ce qui va suivre, on va présenter les notions fondamentales du phénomène de contournement, plus tard on va exposer les différents travaux antérieurs des modèles statiques.

**I.2. Les isolateurs [28] :**

L'isolateur est un matériau isolant solide, présentant une très grande résistance au passage du courant électrique. Il est utilisé pour supporter et isoler les conducteurs sous tension afin d'empêcher les courts circuits, les pertes de courant à la terre et les dangers d'électrocution.

Les isolateurs des lignes aériennes ont pour rôle de relier mécaniquement les conducteurs sous tension aux structures qui les supportent et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux parties constitutives de la ligne.

Ils sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement. 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:

- L'intervalle d'air.
- Le matériau diélectrique.
- L'interface air - matériau diélectrique. (la longueur de l'interface constitue la ligne de fuite - ligne le long de laquelle circulerait le courant de fuite).

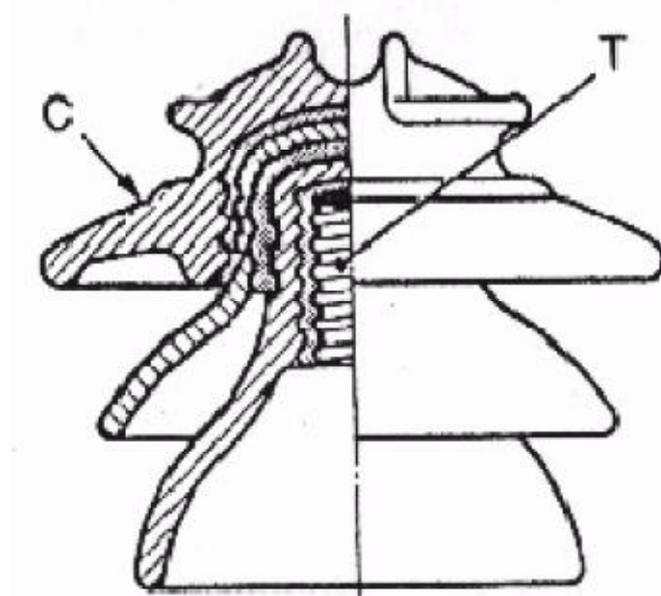
**I.3. Les principaux types d'isolateurs :**

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs : les isolateurs rigides et les éléments de chaîne.

**I. 3. 1. Isolateurs de type rigide :**

Un isolateur rigide (Fig.1.1), 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. ils sont utilisés pour les lignes de distribution de même que pour les lignes télégraphiques et téléphoniques. La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides.



C : Cloche T : Logement de tige.

Fig.1.1. Isolateur rigide en verre [38].

### **I. 3. 2. Élément de chaîne :**

C'est un isolateur constitué par un matériau isolant équipé de pièces métalliques de liaison, nécessaires pour le relier de façon flexible à d'autres éléments de chaîne (Fig.1.2), 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 horizontale (chaînes d'ancrage).

Ce type d'isolateurs sont utilisés pour les de transport.

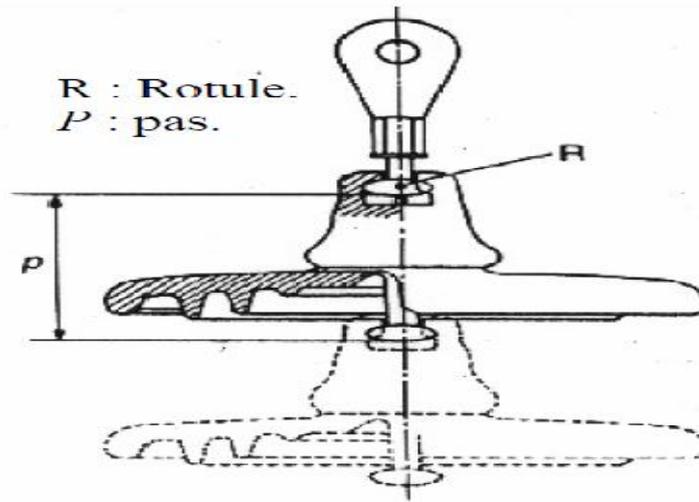


Fig.1.2. Assemblage à rotule [38].

**I. 3. 2. 1. Isolateurs à capot et tige :**

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

L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille.

L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique. La coupe de l'isolateur capot-tige est schématisée à la Fig.1.3

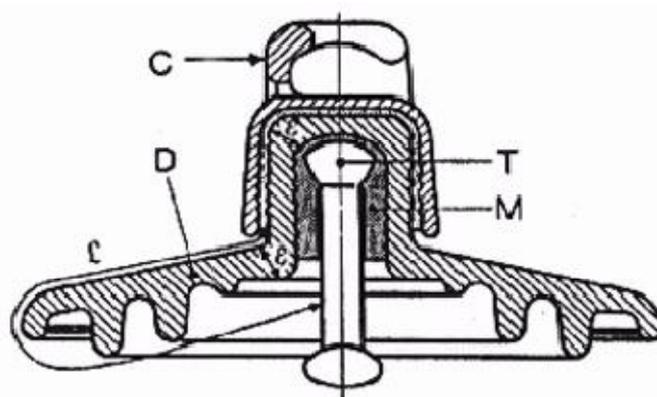


Fig. 1.3. Isolateurs à capot et tige[38].

Avec

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)

### I. 3. 2. 2. Isolateur à long fût en porcelaine :

Ils sont constitués d'un cylindrique plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes (Fig. 1.4). A chaque extrémité est fixée une pièce métallique de liaison ; celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le cylindre, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet.

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

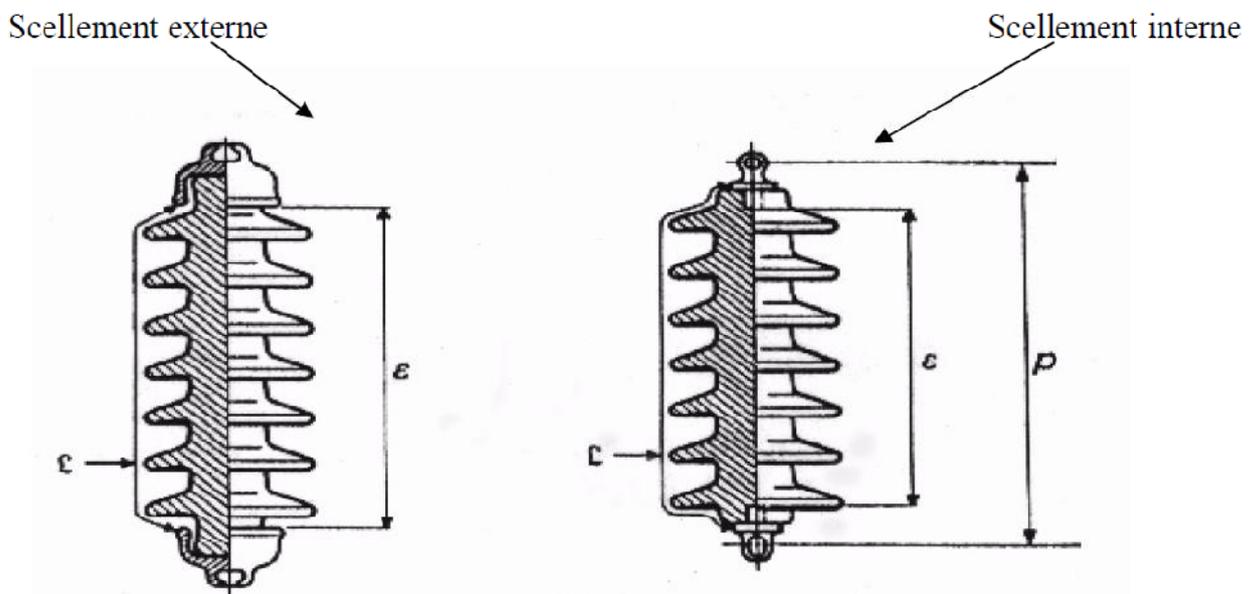


Fig.1.4. Isolateur à long fût en porcelaine [38].

Avec

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

$\varepsilon$  : Longueur du canal de perforation

$p$  : pas

### I.4. La pollution des isolateurs [59] :

Un isolateur placé à l'extérieur est exposé aux différents agents constituant l'atmosphère qui le contamine. Cette contamination se manifeste par l'accumulation des dépôts de pollution à sa surface. Ces dépôts riches en matières conductrices, associés à l'humidité, provoqueront l'abaissement de la résistance superficielle de l'isolateur celui-là qui

permet à la circulation d'un courant de fuite de la ligne vers la masse et par suite la mise hors service de la ligne.

A ce titre, des efforts considérables ont été menés afin de classer quantitativement et qualitativement ce phénomène. L'identification des substances de la pollution est impérative pour le choix de l'isolateur d'une ligne électrique.

### **I.5. Contournement des isolateurs pollués [54]:**

#### **I.5.1. Décharge électrique :**

La décharge, un phénomène électrique qui précède le contournement, est une manifestation de l'effet couronne. Elle apparaît surtout dans un champ électrique non uniforme. Le phénomène de la décharge peut s'expliquer comme suit au fur et à mesure que le champ électrique augmente, les électrons libérés par l'irradiation ou par le champ lui-même, sont de plus en plus accélérés. Ils acquièrent de plus en plus d'énergie après plusieurs collisions inélastiques et peuvent ioniser les molécules ou les atomes neutres de l'air [61]. Les électrons additionnels ainsi créés acquièrent à leur tour suffisamment d'énergie pour provoquer d'autres collisions ionisantes et ainsi de suite. Ce processus entraîne un accroissement rapide du courant de fuite et dégage de l'énergie sous forme de chaleur.

Le phénomène de décharge sur une surface isolante polluée a été la préoccupation de beaucoup de chercheurs dont Obenaus, qui a été un des premiers auteurs à réaliser une analyse quantitative sur la décharge des surfaces contaminées.

#### **I.5.2. Le contournement :**

Le contournement électrique d'un isolateur est l'extension sur sa surface d'une décharge électrique jusqu'à ce qu'elle mette en court-circuit la haute tension et la masse, ce qui permet à l'interruption de la distribution de l'énergie électrique. D'autre façon le contournement des isolateurs pollués est un phénomène de rupture diélectrique provoqué par le dépôt de la pollution sur une surface d'isolateur [62]. Donc le contournement est représenté par une décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne cette dernière. Aussi, le terme contournement est employé pour des décharges par amorçage dans l'air.

#### **I.5.3. Tension de contournement [38] :**

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

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

**I.5.4. Tension de tenue :**

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

**I.5.5. Courant de fuite:**

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

**I.5.6. Courant de fuite critique [52]:**

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

**I.5.7. Longueur critique d'arc:**

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

**I.5.8. Le processus de contournement électrique [54] :**

Généralement le processus de contournement sur une surface polluée peut être divisé en quatre étapes :

- **Le dépôt du polluant :**

Le polluant, qui va se trouver en forme d'aérosol, peut se précipiter sur une surface de l'isolateur en formant une couche de pollution comme indique la figure suivante:

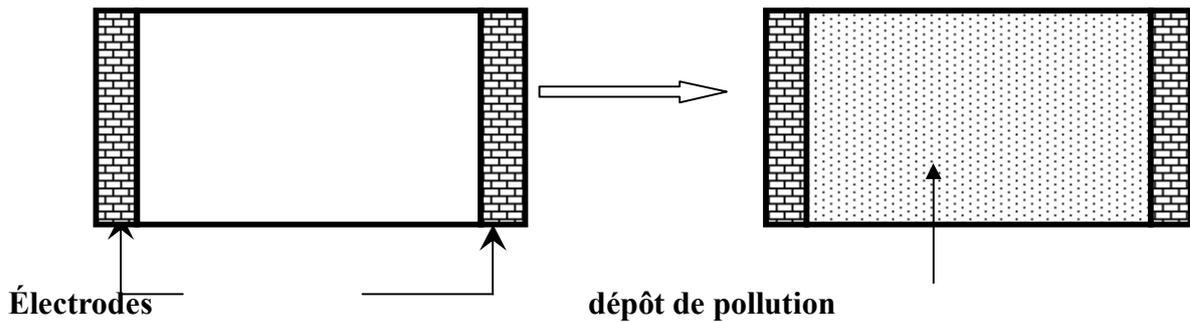


Fig. 1.5. Dépôt de pollution sur une surface isolante [37].

- **L'humidification de la couche de pollution :**

La résistance de la couche de pollution est très grande, donc la pollution ne cause pas une diminution dans les propriétés d'isolation. Sous quelques conditions climatiques telle que le brouillard, la rosée et la bruine, la couche de pollution, constituée d'électrolytes extrêmement solubles, sera humidifiée. Alors on obtient une augmentation de la conductivité surfacique et par conséquent un courant de fuite qui circule dans la couche de pollution.

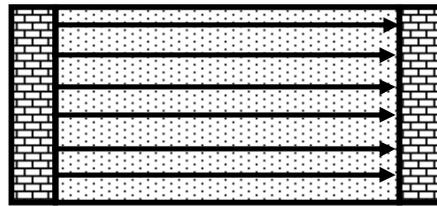


Fig. 1.6. Lignes de courant sur une surface isolante [37].

- **La formation de bande sèche et de l'arc local :**

A cause de la forme d'isolateurs, la densité du courant sur la surface est généralement non uniforme. Lors de passage de courant à travers la couche de pollution un effet de chauffage se produit et par conséquent une zone sèche aura apparue. La zone sèche locale aura tendance alors latéralement à s'étendre jusqu'à ce qu'une bande sèche est complètement formée. Une bande sèche a une grande résistance, donc la tension appliquée tombera principalement le long de la bande sèche. Si la tension est assez grande, la bande sèche ne sera pas conductrice et un arc local apparaîtra à travers cette bande, à proximité de la racine d'arc, la concentration du courant mènera à l'élargissement de la bande sèche, tout ça est schématisé dans la figure suivante.

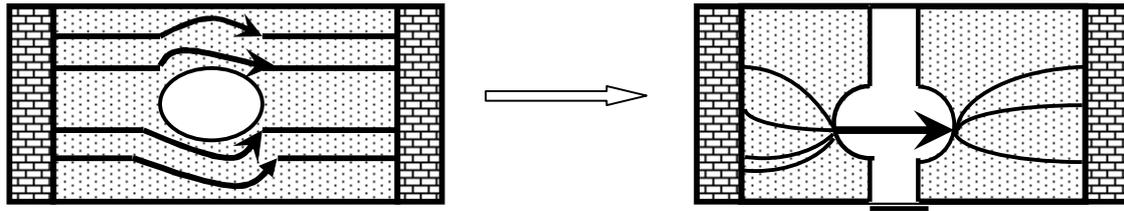


Fig. 1.7. Formation de la bande sèche [37].

- **Le développement d'un arc et l'achèvement du contournement :**

Selon les conditions, une décharge de surface peut évoluer de façons suivantes :

L'arc local s'éteint Fig.1.8.1

L'arc local peut se déplacer latéralement pour trouver une position stable qui correspond à une longueur d'arc plus courte Fig.1.8.2

L'arc local s'allonge longitudinalement jusqu'à ce qu'il atteigne les électrodes et provoquant ainsi le saut final vers le contournement. Dans ce cas, l'arc d'étend le long de la surface de couche de pollution humide hors de la zone sèche Fig.1.8.3.

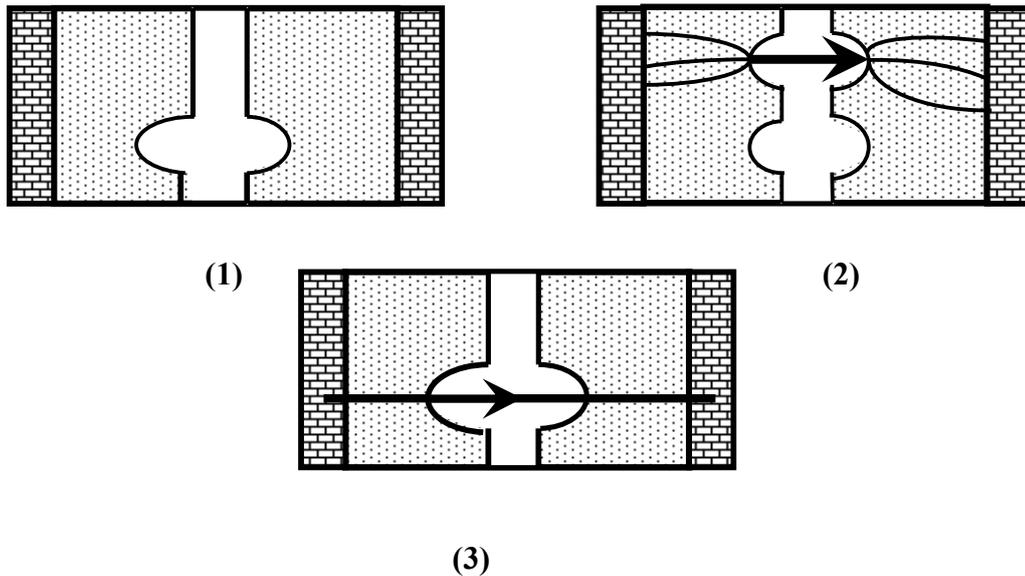


Fig. 1.8. Contournement d'une surface isolante [37].

**I.6. Principaux modèles statiques de contournement :**

Lorsqu'une chaîne d'isolateurs est installée, par exemple pour soutenir une ligne haute tension, elle remplit parfaitement son rôle de support en plus aucune décharge n'apparaît sur sa surface. Dans un environnement naturel, des dépôts d'origine diverses (poussières, fumées, ...) peuvent s'accumuler sur la surface d'isolateur provoquant une conductivité électrique superficielle qui modifie la répartition du potentiel le long de la ligne

de fuite. Dans ces conditions-la des décharges peut s'amorcer qui va conduire à un court-circuit de la partie haute tension à la masse [30]. 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, du non uniformité du mouillage, de l'intensité des arcs au voisinage de la surface isolante, de la formation d'arcs multiples et de la détermination de la tension de contournement. Dans ce qui va suivre, nous présentons les différents modèles de contournement développés par des chercheurs précédents.

### I.6.1. Modèle plat :

#### I.6.1.1. Modèle d'Obenaus :

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

$$V_{\text{arc}} = \frac{X.A}{I_n} \quad (1.1)$$

Où

$I$  : courant de fuite

net  $A$  : constantes de la caractéristique statiques de l'arc.

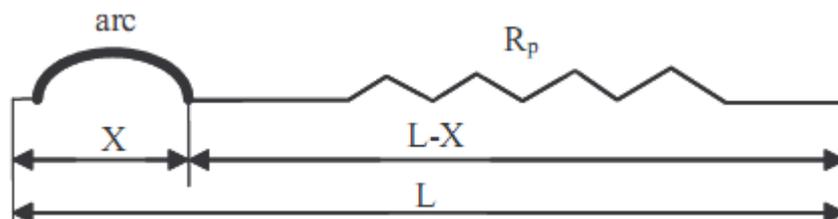


Fig. 1.9. Modèle d'Obenaus[30].

En effet, la tension aux bornes d'isolateur est donné par :

$$V = V_e + V_{\text{arc}} + R_p(X).I \quad (1.2)$$

Avec

$V$  : tension appliquée

$V_e$  : chute de tension totale accumulée aux électrodes, cette dernière dépend des conditions expérimentales.

$R_p(X)$  : résistance de la couche polluée

$V_{\text{arc}}$  : tension d'arc telle que:

$$V_{\text{arc}} = R_{\text{arc}}(X).I \quad (1.3)$$

Où

$R_{\text{arc}}$  : résistance d'arc par unité de longueur

$X$  : longueur d'arc

$I$  : le courant qui traverse la couche polluée.

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

$$E_a = \frac{V_{\text{arc}}}{X} = A.I^{-n} \quad (1.4)$$

Donc:

$$V_{\text{arc}} = A.X.I^{-n} \quad (1.5)$$

Ainsi, on obtient l'équation de la tension totale aux bornes de l'isolateur :

$$V = V_e + A.X.I^{-n} + R_p(X).I \quad (1.6)$$

Les valeurs des paramètres  $n$  et  $A$  dépendent du milieu dans lequel brûle la décharge. Elles varient selon différents auteurs comme suite :

<i>référence</i>	<i>A</i>	<i>n</i>	<i>commentaires</i>
Obenaus [1958]	102	0.70	Arc et couche de pollution
Alston et Zoldziowski [1963]	63	0.76	Arc et couche de pollution
Claverie et porcheron [1973]	101	0.50	Arc et couche de pollution
Jolly et Chu [1975]	80	0.62	Arc et couche d'oxyde l'étain
Rahal et Huraux [1979]	534	0.24	Arc et solution
Guan et Zhang [1990]	138	0.69	Arc et couche de pollution
Ghosh et Chatterjee [1995]	270	0.66	Arc et solution de FeCl <sub>3</sub>
Ghosh et Chatterjee [1995]	360	0.59	Arc et solution de NaCl
Ghosh et Chatterjee [1995]	451	0.41	Arc et solution de CuSO <sub>4</sub>
Ghosh et Chatterjee [1995]	462	0.42	Arc et solution de CaCl <sub>2</sub>

Tableau I.1 : valeurs typiques de A et de n pour des arcs à courant alternatif au-dessus des surfaces humides ou polluées [53].

**I.6.1.2. Modèle de Neumarker :**

En partant des travaux d'Obenaus, **Neumarker[1]** a ajouté l'hypothèse d'une couche de pollution de résistance  $r_p$  uniforme par unité de longueur de fuite. Il propose l'expression suivante pour la résistance de pollution :

$$R_p (X) = r_p (L - X) \tag{1.7}$$

Où

L : longueur de fuite

$r_p$  : résistance de la couche de pollution par unité de longueur.

En introduisant cette expression dans le modèle d'Obenaus, la tension V aux bornes de l'isolateur sera :

$$V = V_{\text{arc}} + r_p (L - X) \cdot I \tag{1.8}$$

Ou encore

$$V = \frac{A \cdot X}{I^n} + r_p (L - X) I \tag{1.9}$$

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

$$I_c = \left( \frac{A \cdot X}{I^n} \right)^{1/n+1} \tag{1.10}$$

Et

$$X_c = \frac{L}{n + 1} \tag{1.11}$$

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

$$V_c = A^{1/n+1} r_p^{n/n+1} L \tag{1.12}$$

**I.6.1.3. Modèle de Rizk :**

A partir d'une analyse théorique, **Rizk [4]** a décrit le phénomène d'entretien de l'arc par le mécanisme de la rupture diélectrique. Il a mis en évidence l'expression de la rigidité diélectrique de l'espace résiduel et établi une relation entre la tension minimale  $V_c$  (tension de contournement minimale) nécessaire à l'entretien de l'arc, la résistance de pollution linéique  $r_p$  et la longueur de fuite  $L$  de la forme :

$$\frac{V_c}{L} = 23 r_p^{0.4} \tag{1.13}$$

#### I.6.1.4. Modèle de Claverie et Porcheron:

Plusieurs modèles expérimentaux ont été proposés pour le cas d'une tension alternative dont le plus connu est celui de **Claverie et Porcheron** [10]. Ces auteurs utilisent un modèle plan constitué d'une plaque de porcelaine vernie, munie de deux électrodes en cuivre, et recouverte d'une couche de pollution. Ils ont constaté au cours de leurs essais que:

- La tension de contournement était fonction de la conductivité de la couche polluante,
- Qu'il existait une longueur d'arc critique, indépendante de cette conductivité.

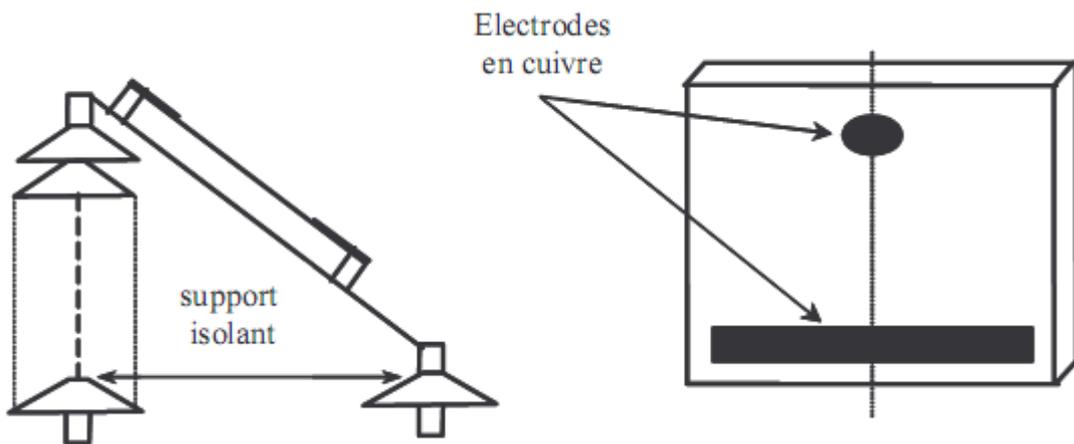


Fig.1.10. Montage de Claverie et Porcheron[30].

Ce modèle se traduit par l'utilisation du schéma électrique de la Fig.1.11

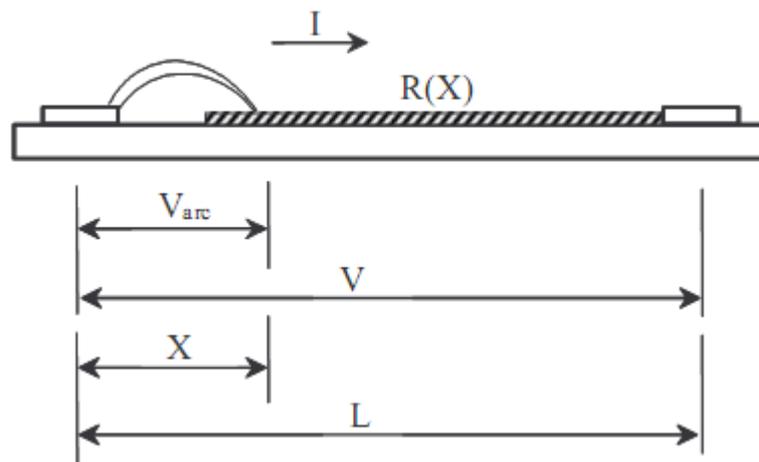


Fig. 1.11. Le montage expérimental [30].

Avec

V : tension entre les électrodes,

I : courant de fuite en A

L : distance entre les électrodes,

X : longueur de l'arc en cm

R(X) : résistance en série avec l'arc exprimée en fonction de X.

L'équation du circuit est la suivante :

$$V = V_{\text{arc}} + R(X).I \quad (1.14)$$

Des mesures en courant alternatif ont permis d'établir la tension d'arc pour un isolateur plan :

$$V_{\text{arc}} = \frac{100X}{\sqrt{I}} \quad (1.15)$$

D'où :

$$V = \frac{100X}{\sqrt{I}} + R(X).I \quad (1.16)$$

Du fait que l'on soit en alternatif, le courant est interrompu à chaque alternance puis réapparaît quand la tension est suffisante pour provoquer le réamorçage de l'arc, arc qui ne pourra se maintenir ou de développer que sous certaines conditions (conductivité, phénomènes d'échanges thermiques). La condition de réamorçage établie par Claverie et Porcheron est donnée par la relation :

$$V \leq \frac{A.X}{I^n} \quad (1.17)$$

En effet, le terme R(X).I est peu différent de 0, I est négligeable avant le réamorçage de l'arc électrique. A et n sont des constantes trouvées respectivement égales à 800 et 0.5.

D'où la tension minimale d'entretien de l'arc  $V_{\text{cx}}$  :

$$V_{cx} = \frac{800.X}{\sqrt{I}} \quad (1.18)$$

#### I.6.1.5. Modèle de Rao et Gopal :

D'après **Rao et Gopal**[11], l'équation de la tension d'arc donnée par l'équation (1.5) n'est pas 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 auteurs ont essayé d'expliquer les écarts entre les prédictions des modèles et les valeurs mesurées pendant le contournement, en introduisant une nouvelle équation exprimant le champ dans la colonne de la décharge :

$$U_{arc} = \alpha + (\beta + X) v \left( \ln \frac{I}{\delta} \right)^{-3} \quad (1.19)$$

**A, β, v, δ** sont des constantes qui dépendent de la nature des électrodes entre lesquelles se développe la décharge. Cette équation a été établie à partir du modèle Gopal et Al. Elle exprime la caractéristique  $U(I,X)$  d'un arc de faible intensité se propageant dans l'atmosphère.

#### I.6.1.6. Modèle de Danis :

Afin de reproduire des couches similaires à celles observées sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, à titre d'exemple **Danis**[31] a utilisé un modèle de forme géométrique simple (plan ou cylindrique) possédant plus d'une zone sèche (Fig.1.12.a). La rupture des zones sèches survient alors d'une manière aléatoire (Fig.1.12.b). Le lieu d'apparition des arcs partiels, la forme et le mouvement des racines des arcs sur une surface polluée (Fig.1.12.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 :

$$U = \frac{Ax}{I^n} + r_p(L - x)I \quad (1.20)$$

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

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

$$I_c = \left( \frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{1+n}} \quad (1.21)$$

Et

$$U_c = L(Ar_p)^{\frac{1}{n+1}} = AI_c^{-1} \quad (1.22)$$

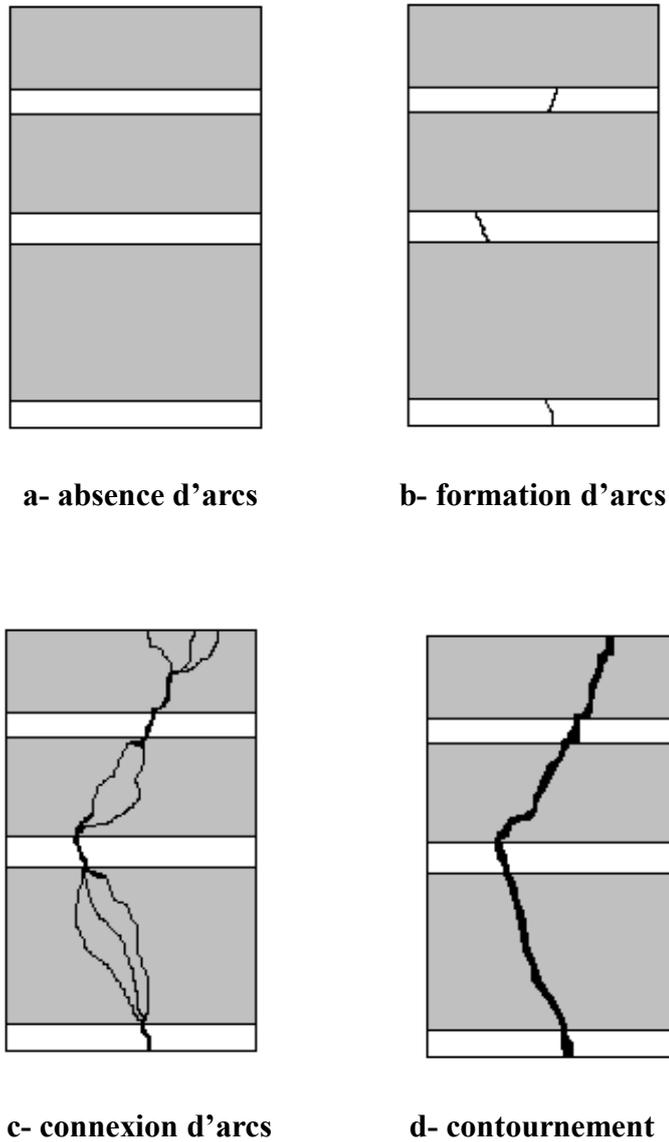


Fig.1.12. Modèle de Danis [37].

**I.6.1.7. Modèle de Nacke et Wilkins :**

**Nacke et Wilkins [7]** proposent de considérer que les points à la base de l'arc forment des demi-cercles aux limites des bandes sèches fig.1.13.a. Ainsi la résistance de pollution se compose de deux termes : une résistance interne  $R_i(x)$  propre aux demi-cercles et une résistance externe  $R_e(x)$  pour le reste. Pour une largeur de bande étroite

$$\frac{X_p}{b} \geq \frac{2}{\pi} \tag{1.23}$$

$$R_i(x) = \frac{1}{\pi\gamma} \tag{1.24}$$

Et

$$R_e(x) = rx_p + \frac{2}{\gamma\pi} \log\left(\frac{b}{2\pi r_d}\right) \quad (1.25)$$

Où

$r$ : résistance linéique de la pollution,

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

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

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

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

$$R_e(x) = \frac{2}{\pi\gamma} \left( 0.68 + \ln\left(\frac{x_p}{r_d}\right) \right) \quad (1.26)$$

Pour un isolateur à ailettes multiples :

$$R_e = \frac{2}{\pi\gamma} \left( 0.3 + \ln\left(\frac{x_p}{r_d}\right) \right) \quad (1.27)$$

Ainsi, la résistance de pollution totale sera :

$$R(x) = R_i(x) + R_e(x) \quad (1.28)$$

Pour la même configuration (Fig.1.13.b), dans le cas d'une bande étroite, Wilkins a obtenu

$$R(x) = r(L - x) + \frac{1}{\pi\gamma} \ln\left(\frac{b}{2\pi r_d}\right) \quad (1.29)$$

Et pour une bande large :

$$R(x) = \frac{1}{\pi\gamma} \left( \ln\left(\frac{2L}{\pi r_d}\right) - \ln\left(\tan\frac{\pi x}{L}\right) \right) \quad (1.30)$$

Où

$x$  : la longueur d'arc,

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

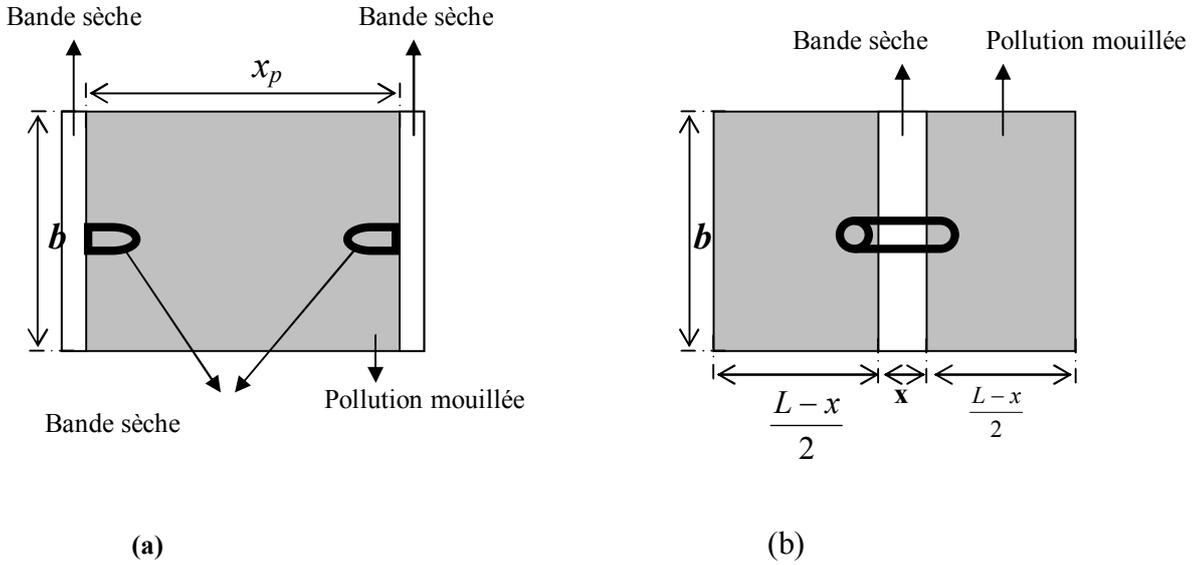


Fig.1.13. Modèle de Nacke et Wilkins (a) Nacke, (b) Wilkins [37].

Avec

$N$  : le nombre d'arcs

Pour le modèle de Nacke, La résistance de pollution est :

$$R_p(x) = \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[ 1 + \frac{\pi(L-x)}{b} + 2Ln \left( \frac{b}{2\pi r_0} \right) \right] \quad (1.31)$$

Et pour le modèle de Wilkins

$$R_p(x) = \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[ \frac{\pi(L-x)}{b} + N Ln \left( \frac{b}{2\pi r_0} \right) \right] \quad (1.32)$$

**I.6.1.8. Modèle de Tegar :**

**a. Cas de pollution continue :**

Tegar[55] a élaboré un modèle statique en tension alternative. Son modèle est basé sur celui d'Obenaus, et permet d'avoir les différentes caractéristiques concernant le développement de l'arc électrique sur une surface isolante uniformément polluée.

En se basant sur l'équation du circuit et sur la condition limite de réamorçage. 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 :

$$R_p = \frac{1}{\rho} \frac{K - 100 U}{K I} \quad (1.33)$$

Où

$\rho$  : résistivité de la couche de pollution

$K$  : 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 Teguar pour caractériser la propagation d'une décharge électrique sur des surfaces isolantes soumises à une pollution continue non uniforme.

#### **b. Cas de pollution discontinue :**

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

La figure suivante représente le circuit électrique équivalent au modèle de laboratoire sous pollution discontinue. Dans ce circuit, chaque bande  $i$  ( $i=1$  à  $6$ ) est constituée d'une résistance  $R_{0i}$  en parallèle avec une capacité  $C_{0i}$ . Pour chaque bande polluée  $i$  ( $i=2, 4, 6$ ), ces circuits sont shuntés par une résistance  $R_{pi}$  représentant la couche de pollution.

Le fait que les couches polluantes possèdent des formes rectangulaire et selon la recommandation de la CEI 60-1, l'expression de la résistance pour chaque bande polluée  $i$  peut être formulée par :

$$R_{Pi} = R_{SP} \int_0^{L_i} \frac{dl}{b} = R_{SP} \frac{L_i}{b} = R_{Pf} \frac{L_i}{b} \tag{1.34}$$

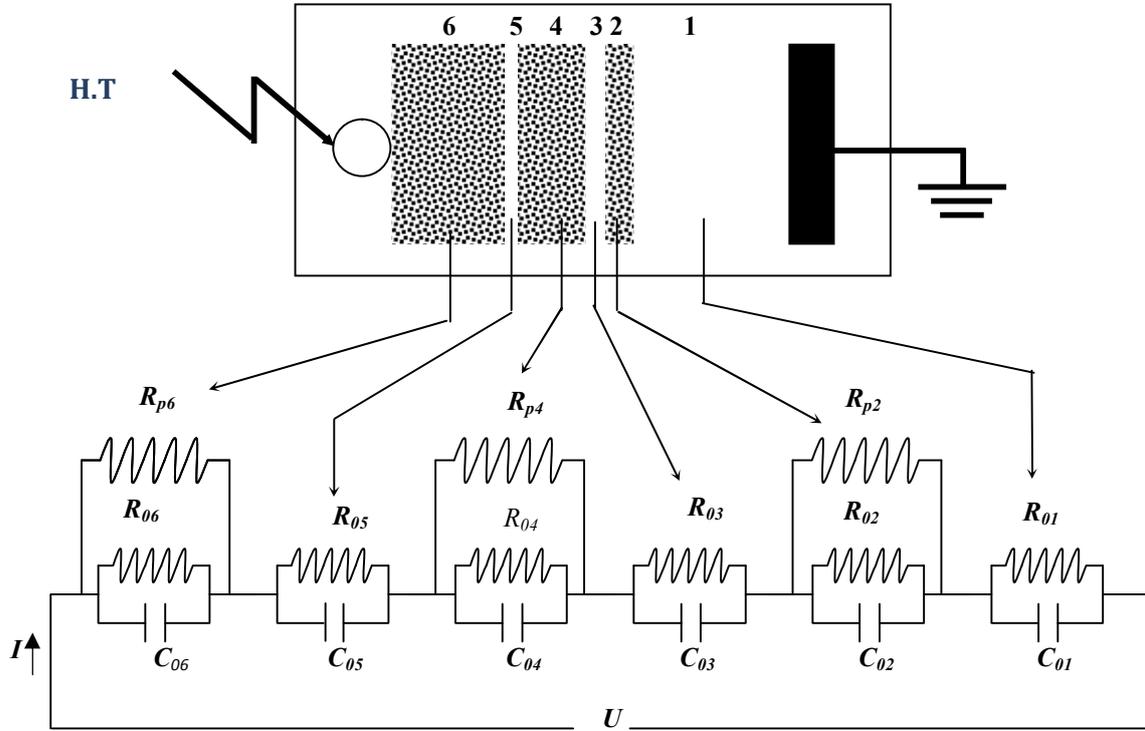


Fig.1.14. Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire selon Teguar[57].

Avec  $i=2, 4, 6$ ,  $R_{pi}$  la résistance de 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.

**I.6.1.9. Modèle de Wilkins :**

**Wilkins [7]** a introduit dans le modèle d’Obenaus, la géométrie de la couche conductrice, en considérant le rapport entre la longueur et la largeur  $a$  et en négligeant son épaisseur.

La résistance de pollution s’écrit :

$$R_p = r \left[ (L - x) + \frac{a}{2\pi} \text{Ln} \frac{a^2}{4\pi^2 r_d^2} \right] \tag{1.35}$$

On voit apparaître un terme additionnel au terme  $r(L-x)$  qui correspond à la correction due à la constriction des lignes de courant dans la couche de pollution au voisinage de la racine de la décharge dont le rayon est  $r_d$ .

**I.6.2. Modèle ouvert :**

**I.6.2.1. Travaux de GuanZhicheng et Zhang Renyu :**

Ce travail a pour objectif de trouver l'expression de la résistance de la couche de pollution [15], ces auteurs ont convertis la surface de l'isolateur réel pour déterminer le potentiel dans un point situé entre deux arcs, l'un se trouve du côté capot et l'autre du côté tige comme montré sur la figure ci-dessous, Puis ils ont déterminé la résistance de la couche de pollution d'après le modèle ouvert, ou  $\pi D$  est la circonférence de l'isolateur.

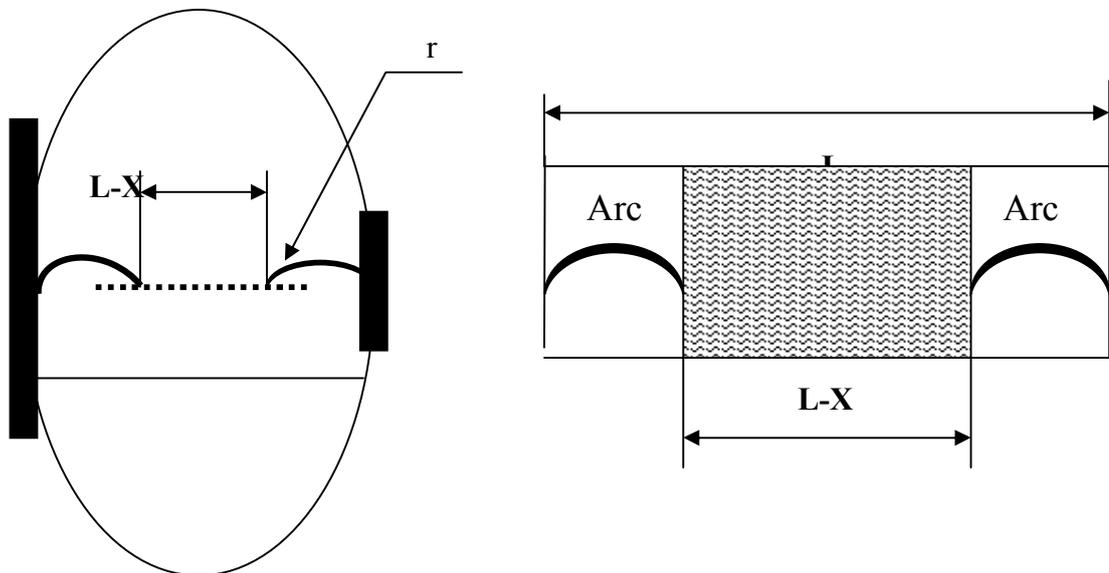


Fig. 1.15. Modèle de GuanZhicheng et Zhang Renyu [30].

L'expression de la résistance de pollution est donnée par la relation :

$$R(x) = \frac{1}{\pi\sigma_e} \ln\left(\frac{L-X}{r}\right) \tag{1.36}$$

Avec:

L: est la longueur de la ligne de fuite.

X : est la longueur d'arc

r : est le rayon du pied de l'arc donné par  $r=(I/1.45\pi)^{1/2}$

Zhicheng et Renyu supposent que la tension de contournement dépend de la conductivité superficielle  $\sigma$  au moment critique et proposent l'idée de la conductivité superficielle effective  $\sigma_e$  tel que :  $\sigma_e = 1.25\sigma$

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

$$U = A x k_i^{-n} + \left( \frac{k_t}{\pi \sigma_e} \right) \ln \left( \frac{(L - X)}{k_t \sigma} \right) \tag{1.37}$$

Avec:

K: le rapport entre la longueur de l'arc et la ligne sur la surface de l'isolateur

$K_t$  : est le nombre de couches de pollution en série.

**1.6.2.2. Modèle disque circulaire [30] :**

Woodson et McElroy ont essayé se reproduire, d'une façon idéale, la surface d'un isolateur en utilisant une configuration géométrique circulaire comme explique la figure suivante :

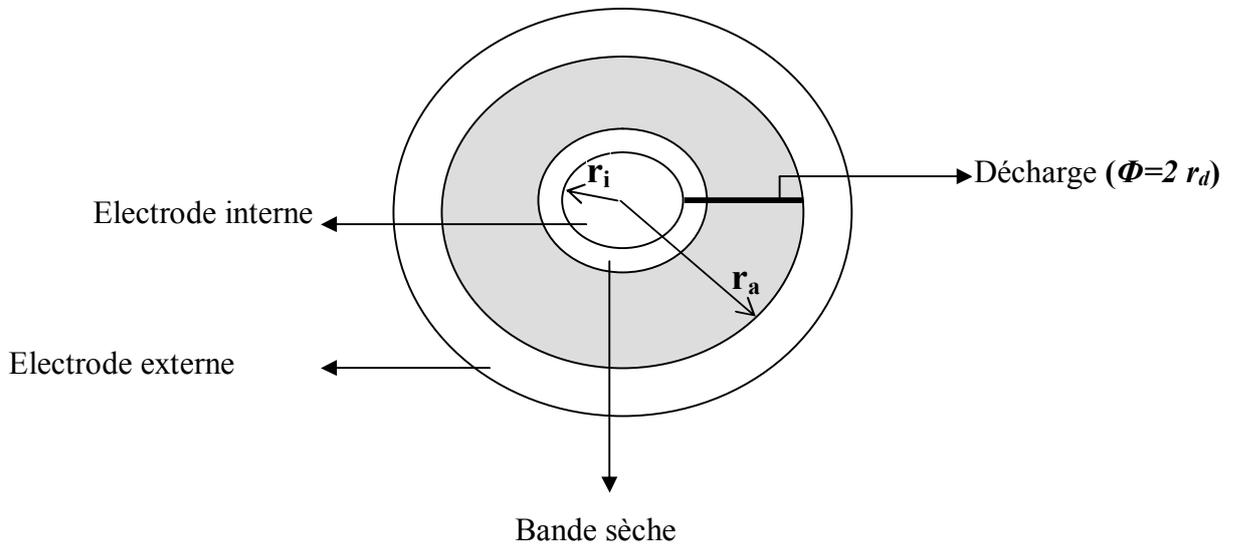


Fig.1.16. Modèle d'isolateur en forme de disque conçu par McElroy et Woodson[37].

Ils partaient de l'hypothèse que, de façon générale, la résistance superficielle de la couche de pollution humide, pour n'importe quelle position  $r_a$  du point de départ de l'arc de

rayon  $r_d$ , peut s'exprimer par une fonction de la forme :

$$R_p = \frac{1}{\gamma} f(r_d, r_a, r_o) \quad (1.38)$$

Où

$r_o$  : rayon de l'électrode externe

$\gamma$  : 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 :

$$R_p = \frac{c}{\gamma} (r_o - r_a)^m \quad (1.39)$$

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

### I.7. Mécanisme de propagation :

Dans le phénomène de propagation de l'arc électrique, il existe deux modes principaux : la propagation par ionisation et la propagation par force électrostatique.

#### I.7.1. Propagation par ionisation [1] :

Wilkins et Al-Baghdadi ont proposé un mécanisme d'élongation basé sur l'ionisation et le déplacement discontinu du pied de la décharge. Selon Wilkins, la probabilité d'ionisation dans la région précédant l'avant pied de la décharge est grande, étant donné que la température ainsi que le potentiel sont élevés dans cette région.

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

#### I.7.2. Propagation par force électrostatique :

A partir des observations faites sur un canal d'électrolyte, **Rahal [8]** 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.

### I.7.3. Critères de propagation de la décharge :

Les isolateurs des équipements des lignes aériennes se couvrent progressivement des couches de pollution. Ces couches lorsqu'elles sont humidifiées deviennent conductrices et laissent passer un courant de fuite. Ce qui engendre un échauffement non uniforme, d'où formation des bandes sèches. Lorsque plusieurs bandes sèches se forment en même temps, après quelques secondes une de ces bandes va prédominer [26]. La chute de tension aux bornes de la bande sèche est égale à la tension qui a été appliquée initialement aux bornes des électrodes de l'isolateur. Ce qui conduit à une augmentation du champ au niveau de la bande sèche, à un amorçage d'arc et au contournement de l'isolateur pollué.

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

#### I.7.3.1. Critère de Hampton :

A partir d'une étude expérimentale, **Hampton [6]** 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 :

$$E_a < E_p \quad (1.40)$$

#### I.7.3.2. Critère de Hesketh :

En supposons que l'arc en série avec la couche de pollution mouillée se modifie de façon à rendre maximal le courant qu'il tire de la source d'alimentation, **Hesketh [12]** a établi un critère de propagation de l'arc, exprimé par la relation:

$$\frac{di}{dx} > 0 \quad (1.41)$$

$I$  étant le courant d'arc.

**I.7.3.3. Critère de Wilkins :**

En considérant qu'un système se place dans la configuration qui lui permet de dissiper le maximum d'énergie, **Wilkins [7]** a généralisé la condition énoncée par Hesketh et établi un critère de propagation utilisant la puissance  $P$  fournie par la source :

$$\frac{dP}{dx} > 0 \tag{1.42}$$

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

**I.7.3.4. Critère de Anjana et Lakshminarasimha :**

En assimilant l'arc à une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, **Anjana et Al[13]** 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 :

$$W_{totale} \geq W_{th} \tag{1.43}$$

**I.7.3.5. Critère de N.Dhahbi, A.Beroual, L.Krahenbul :**

Contrairement aux critères précédents, **N.Dhahbi et al[22]** proposent un critère analytique de propagation de la décharge faisant intervenir l'impédance équivalente d'un circuit électrique simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produit. Pour ce faire, ils considèrent un isolateur plan de longueur de fuite  $L$  sur lequel il est apparu un arc partiel de longueur  $X$  et de résistance  $R_{arc}$  comme la montre la figure suivante.

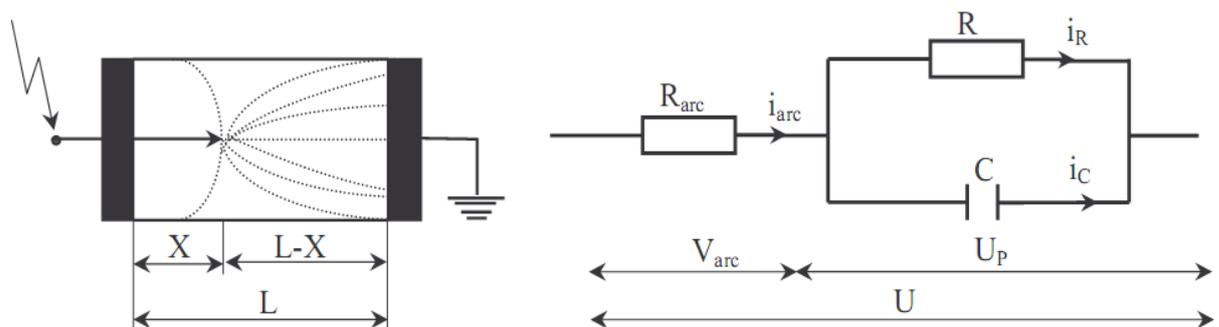


Fig. 1.17.Schéma d'un isolateur pollué et son circuit électrique équivalent [40].

Où  $i_{\text{arc}}$  est le courant d'arc,  $i_{\text{R}}$  et  $i_{\text{C}}$  étant les deux composantes active et capacitive représentant les courants dans la couche de pollution.

D'où l'expression de l'impédance équivalente pour le cas d'une tension sinusoïdale :

$$Z_{\text{eq}} = R_{\text{arc}} + \frac{R_{\text{P}}}{1 + j\omega R_{\text{P}}C} \quad (1.44)$$

Ou encore

$$Z_{\text{eq}} = \frac{\rho_{\text{arc}}x}{S} + \frac{\rho_{\text{p}}(L-X)}{S_{\text{p}}(1 + j\omega\rho_{\text{p}}\varepsilon)} \quad (1.45)$$

Une condition nécessaire pour la propagation de la décharge est que la variation de l'impédance soit décroissante :

$$\frac{d|Z_{\text{eq}}|}{dt} \leq 0 \quad (1.46)$$

Notons que le critère sur les impédances conduit à un critère de propagation identique à celui établi par Hampton.

**I.8. Conclusion :**

Le contournement électrique observé sur les isolateurs haute tension représente l'aboutissement d'un processus aléatoire qui se déroule en étapes d'une décharge sur une surface polluée. Beaucoup d'études consacrées à la compréhension ne permettent pas de rendre compte de la dynamique du phénomène. Ce dernier dépend essentiellement des mécanismes physiques et atmosphériques, et surtout la pollution dont il tenir compte lors de la conception de réseau de transport. Le phénomène de contournement fait intervenir plusieurs paramètres qui évoluent dans le temps. Par ailleurs, l'étude de ce phénomène a été souvent réalisée sur la base statique.

Les modèles statiques rencontrés dans la littérature ont un aspect global parce qu'ils n'ont pas décrit le comportement de la décharge. Il s'agit des modèles qui photographient le phénomène d'une façon claire.

Dans le chapitre suivant, nous essayerons de présenter les différents modèles dynamiques rencontrés par les auteurs précédents.

# ***Chapitre II***

---

---

## ***Evolution des modèles Dynamiques***

---

---

## II.1. Introduction :

Dans les conditions météorologiques auxquelles peuvent être soumis les équipements des réseaux électriques, les accumulations des dépôts d'embruns, de sable ou de poussières sont les plus dangereuses [62]. En effet, les dépôts polluants qui recouvrent les surfaces isolantes peuvent par temps de pluie, engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle et par conséquent la réduction de la tension de tenue des isolateurs pouvant conduire au contournement. Ce qui a pour conséquence, la mise hors service de la ligne.

Pour pallier à ce phénomène et protéger le réseau de transport d'énergie de ce genre de problème, qui est en majorité la cause à de fréquentes coupures, il est impératif d'étudier les conditions favorables, qui régissent l'évolution de la décharge [28]. De nombreux travaux, aussi bien théoriques qu'expérimentaux ont été effectués dans ce domaine, dans le but de trouver les conditions de contournement.

Concernant la modélisation des décharges électriques qui se propagent sur les surfaces isolantes polluées plusieurs modèles ont été consacré sur ce phénomène mais la majorité de ces modèles sont statiques veut dire que ne tient pas en compte l'évolution de certains paramètres par rapport au temps.

Dans ce chapitre on va utiliser la tension d'arc établie par Roa et Gopal pour déterminer les conditions critiques de contournement et par suite on va présenter les différents modèles dynamiques concernant la modélisation des décharges électriques.

## II.2. Modèle proposé pour la modélisation des décharges électriques :

### II.2.1. Circuit électrique équivalent [61] :

En se basant sur le modèle proposé par Obenaus[3] parce qu'il est pertinent au cas des tensions alternatives à la fréquence industrielle, nous pouvons représenter un isolateur pollué et partiellement contourné par une décharge électrique, comme l'indique la Fig.2.1.

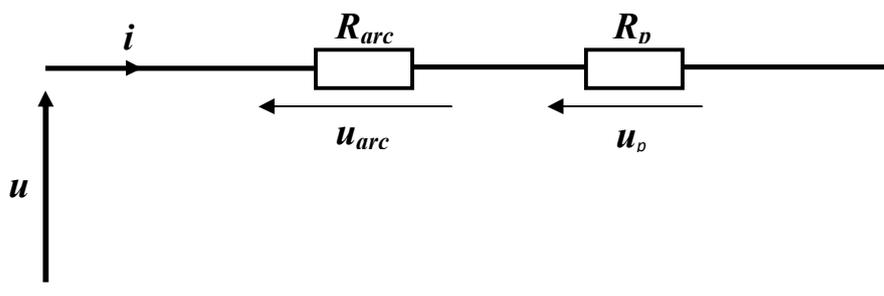


Fig. 2.1. Circuit électrique équivalent de base.

Ce circuit ayant la forme d'un dipôle, la loi d'Ohm permet une équation sous la forme:

$$\begin{aligned} U &= V_{\text{arc}} + V_p + V_e \\ &= (R_{\text{arc}} + R_p)i + V_e \end{aligned} \quad (2.1)$$

Avec

U : tension appliquée à l'isolateur (V);

I : intensité du courant fourni par la source (A);

X : longueur de la décharge (cm).

Selon Rizk[4], la résistance de la couche de pollution étant comme une fonction linéaire de la longueur de fuite donnée par la relation :

$$R_p = r_p (L - X) \quad (2.2)$$

L'équation de la tension aux bornes de l'isolateur est donnée par l'équation :

$$U = V_{\text{arc}} + r_p (L - x)I + V_e \quad (2.3)$$

Tous les modèles précédents sont utilisés la tension d'arc établie par Obenaus, Dans notre cas nous essayons d'utiliser la tension d'arc établie par Rao et Gopal[21].

D'après de Rao et Gopal, la tension d'arc est donnée par la relation suivante :

$$V_{\text{arc}} = \alpha + (\beta + X) v \left( \text{Ln} \frac{I}{\delta} \right)^{-3} \quad (2.4)$$

En négligeant la tension cumulée aux électrodes, Donc l'équation (2.3) devient :

$$V = \alpha + (\beta + X) v \left( \text{Ln} \frac{I}{\delta} \right)^{-3} + r_p (L - x)I \quad (2.5)$$

On ajoute que le champ c'est une dérivé d'un potentiel, donc le champ d'arc d'après Roa et Gopal est donné par l'expression :

$$E_{\text{arc}} = v \cdot \text{Ln}^{-3} \left( \frac{I}{\delta} \right) \quad (2.6)$$

On a pris l'équation (2.5) pour chercher les conditions critiques de contournement qui sont défini comme suite :

$$\frac{dV}{dx} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{dV}{dI} = 0 \tag{2.7}$$

D'après une analyse mathématique nous avons trouvé les relations ci-dessous

Le courant critique de contournement est donné par :

$$I_c = \frac{v}{6.rp} \tag{2.8}$$

Rappelant que le courant critique trouvé par l'équation de Ayrton est donné par :

$$I_c = \left( \frac{A}{rp} \right)^{\frac{1}{n+1}} \tag{2.9}$$

Donc on va comparer entre les deux courants celui qui a trouvé par le modèle choisi et l'autre trouvé par les différents auteurs.

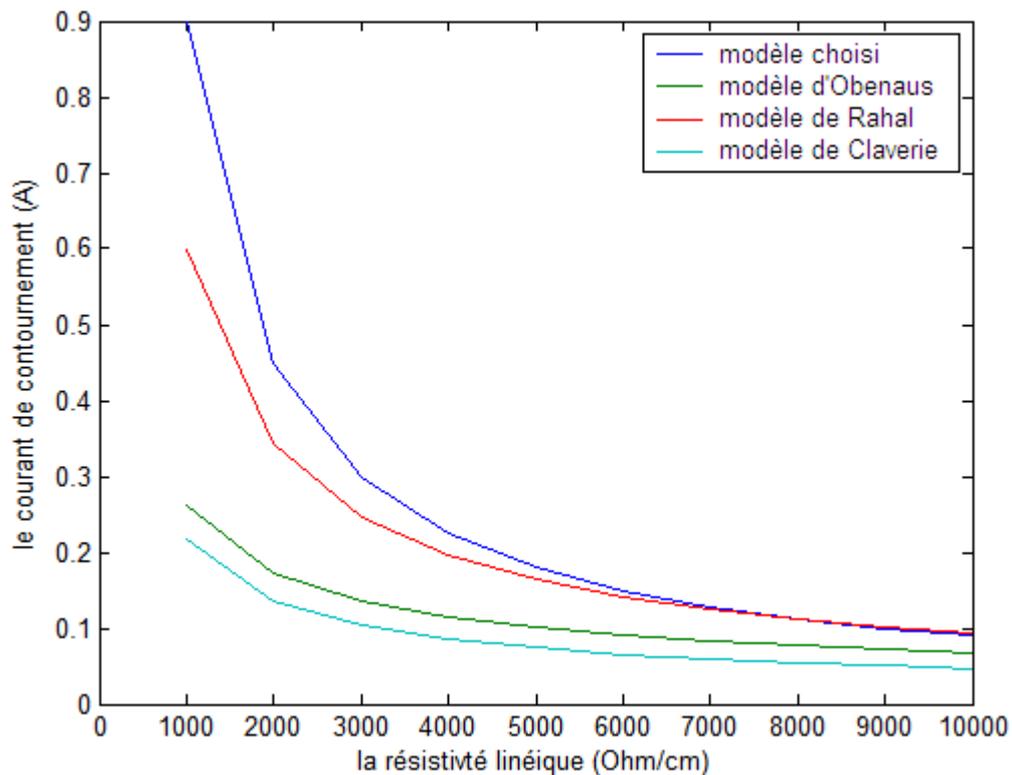


Fig.2.2. Variation de courant critique en fonction de la résistivité linéique.

La figure ci-dessus donne que le courant critique déduit par le modèle Gopal et Roa prend le même trajet avec celui déduit par l'équation d'Ayrton. Ce qui examine la validité de modèle d'équation de Reider pour la modélisation de la décharge.

Ce résultat nous montre que le courant est diminué lorsqu'on augmente la résistance linéique celui-là est logique c'est-à-dire l'augmentation de la conductivité du milieu (diminution de la résistivité) entraîne l'élévation du courant.

Le modèle choisi basé sur l'utilisation de la tension d'arc établie par Roa et Gopal donne une bonne concordance avec celui d'autres modèles. Veut dire qu'il diminue lorsqu'on a augmentation de la résistivité mais avec un faible déphasage surtout avec le modèle de Rahal et Hauraux.

La longueur critique est donné par :

$$x_c = \frac{L - 18\beta L n^{-4} \left( \frac{v}{6.\delta.r_p} \right)}{\left( 18L n^{-4} \left( \frac{v}{6.\delta.r_p} \right) - 1 \right)} \quad (2.10)$$

Nous prenons le courant et la longueur critique et faire remplacer dans l'équation (2.5) pour trouver la tension critique.

$$U_c = \alpha + \frac{L n^{-3} \left( \frac{v}{6.\delta.r_p} \right) . \nu . (\beta + L) + 3 . \nu . (L + \beta) L n^{-4} \left( \frac{v}{6.\delta.r_p} \right)}{\left( 18L n^{-4} \left( \frac{v}{6.\delta.r_p} \right) + 1 \right)} \quad (2.11)$$

La tension critique rapportée dans la littérature déduite par le modèle d'Obenaus est :

$$U_c = L . A^{\frac{1}{n+1}} . r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (2.12)$$

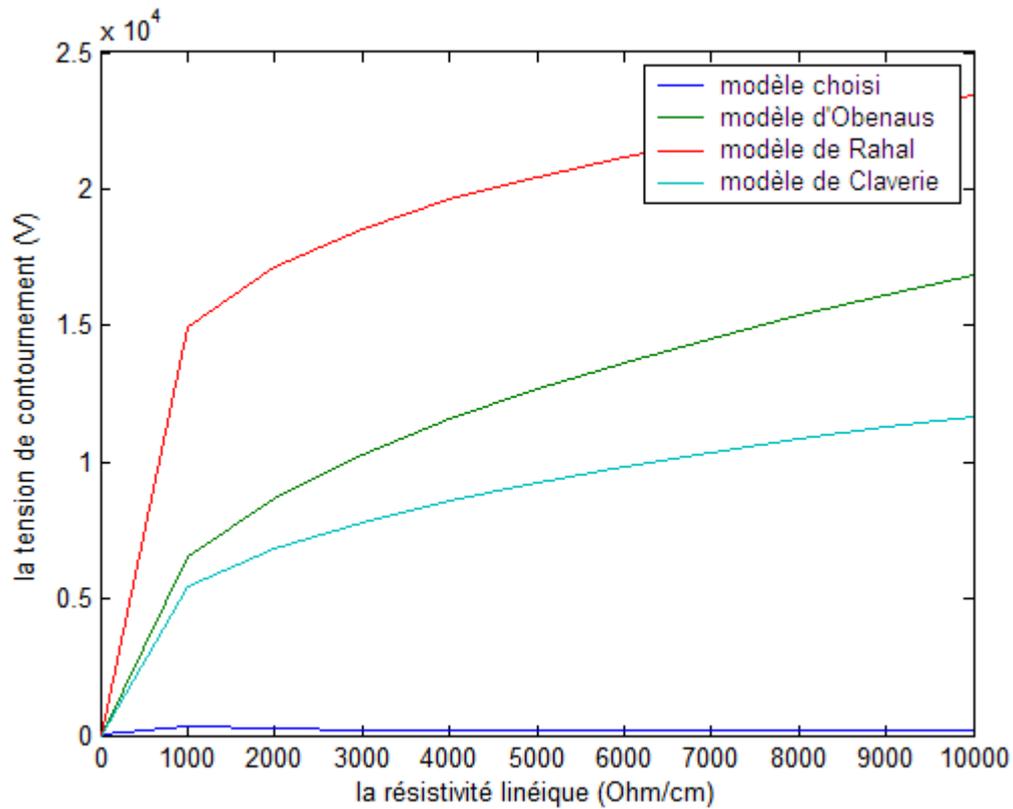


Fig.2.3. Variation de tension critique en fonction de la résistivité linéique.

Ce graphe nous donne la variation de la tension de contournement en fonction de la résistance linéique.

Pour tous les modèles précédents, la tension est proportionnelle à la résistance linéique sauf le cas de modèle choisi qui augmente puis il diminue jusqu'à annuler. Notons que ce dernier représente un très grand écart par rapport aux autres. Contrairement au courant critique déduit par le modèle de Roa et Gopal qui donne des résultats en bonne concordance avec celui des travaux antérieurs, la tension de contournement limite la validité de modèle choisi. D'après ces résultats l'utilisation de l'équation de Reider pour la modélisation des phénomènes de contournement n'est pas satisfaisante pour notre cas.

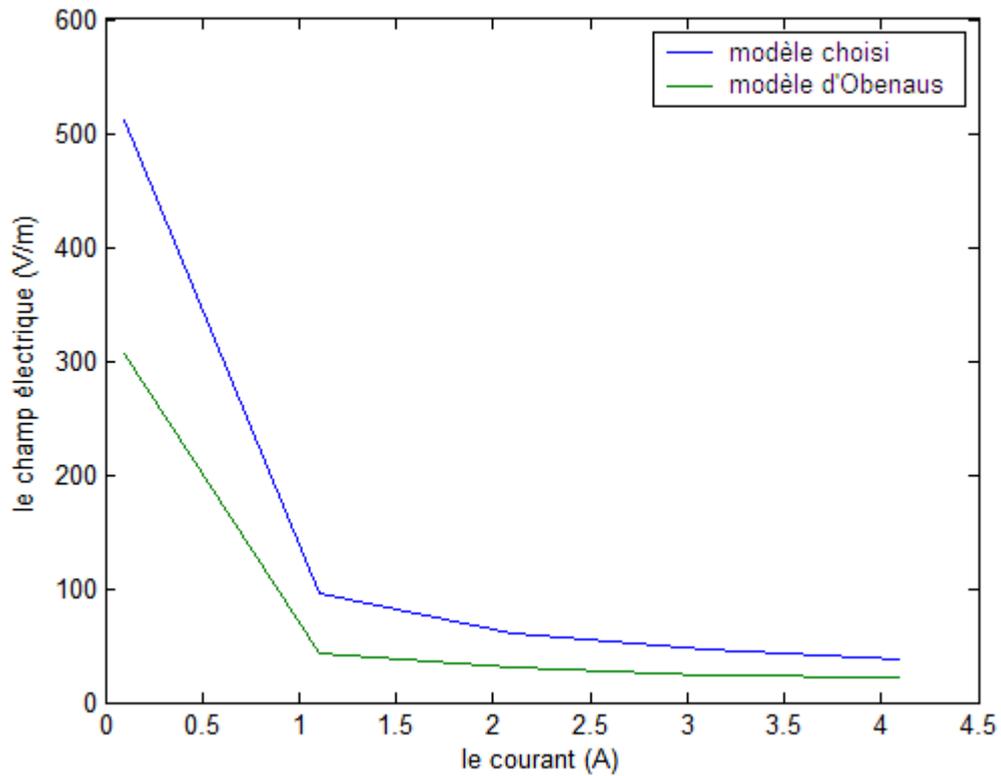


Fig.2.4. variations du champ électrique en fonction de courant.

Le champ électrique d'arc déduit par le modèle d'Obenaus diminue avec l'augmentation du courant de la décharge ceci est expliqué par l'augmentation de la conductivité du canal de la décharge et devient peu conducteur.

Le modèle choisi suit les variations que l'autre avec des faibles écarts entre les deux.

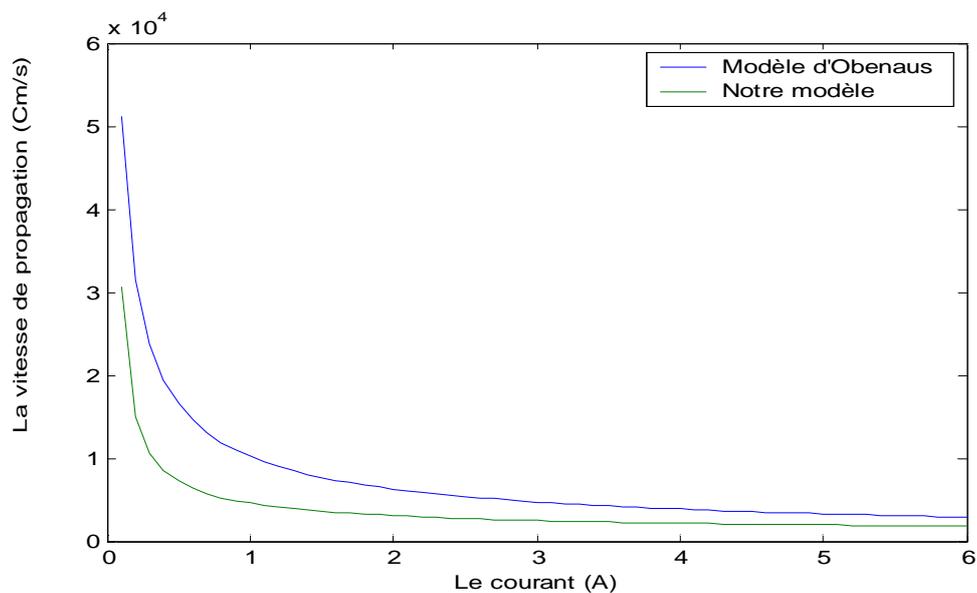


Fig.2.5. variations de la vitesse en fonction de courant.

La vitesse de propagation de la décharge électrique diminue avec l'augmentation du courant de la décharge.

D'après ces résultats, la vitesse déduite par le modèle choisi prend des valeurs inférieures que celui d'Obenaus mais avec faible écart.

### II.3. Modèles dynamiques rapportés dans la littérature :

#### II.3.1. Modèle de Rizket Nguyen:

Pour caractériser la dynamique de l'arc pour le cas continu, Rizk et al [62] ont considéré une résistance d'arc qui varie selon l'équation de Mayr :

$$\frac{dr_a}{dt} = \frac{r_a}{\tau} - \frac{r_a^2 I^{n+1}}{\tau N} \quad (2.13)$$

Avec

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

$n=0,8$  et  $N=60$

La température de l'électrolyte est calculée à partir du bilan des énergies qui prend en compte les pertes d'énergie due à l'évaporation, la convection et la condensation:

$$\delta C_p h \frac{dT}{dt} = \frac{R_p(x) i^2}{S(x)} - \delta H \frac{dh_e}{dt} - \left( H_c + \delta C_p \frac{dh_w}{dt} \right) (T - T_a) \quad (2.14)$$

Où

$H$  : Epaisseur de la couche de pollution

$\Delta$  : Masse volumique de l'électrolyte

$H$  : Enthalpie (2260 j/g),

$H_c$  : Coefficient de transfert de la chaleur par convection ( $250\mu W/cm^2/^\circ C$ ),

$C_p$  : Chaleur spécifique sous pression constante,

$T_a$  : Température ambiante

$S(x)$  : Surface de l'électrolyte non contournée.

Dans ce modèle, pour une durée d'impulsion de courant inférieur à 1s, l'augmentation de

l'épaisseur de l'électrolyte par humidification ( $h_w$ ) est négligeable devant sa diminution par évaporation ( $h_e$ ).

Cette dernière peut être calculée pour une température de  $T=100^\circ\text{C}$  à partir de:

$$\frac{dh_e}{dt} = \frac{\left[ R_p i^2 / S(x) - H_c (T - T_a) \right]}{\delta \left[ H + C_p (T - T_a) \right]} \quad (2.15)$$

### II.3.2. Modèle de Rizk:

**Rizk [1]** proposa un modèle théorique basé sur la rupture diélectrique du plasma résiduel laissé par l'arc lors de son passage par zéro. L'auteur se fonde sur l'hypothèse que la conductance électrique de l'arc résiduel devient négligeable dans la plage des courants se situant entre 0.05A et 1A.

Cette dernière s'abaisse par la suite de phénomène de conduction thermique et de convection naturelle et conditionne le rayon limite de l'arc. Le modèle que propose l'auteur fait intervenir la fonction de flux thermique  $S$  qui peut être exprimée en fonction de la température dans la plage des températures allant de  $300^\circ\text{K}$  à  $3000^\circ\text{K}$ .

Les variations dans le temps de la rigidité diélectrique de l'intervalle inter électrodes après le passage du courant par zéro sont données par l'expression :

$$U_d(x, I_{max}, t) = x E_{d0} \left[ 1 + \frac{51.9}{1 + \frac{157.5t}{I_{max}^{1.26}}} \right]^{-0.636} \quad (2.16)$$

Où :

$x$ : est la distance entre les électrodes

$I_{max}$ : est le maximum du courant dans la demi-période précédente

$t$ : est le temps écoulé depuis le passage du courant par zéro

$E_{d0}$ : est le gradient de la rigidité diélectrique à la température ambiante.

### II.3.3. Modèle de Anjana et Lakshminarasimha :

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

$$W_{th} = \frac{3}{2} kTM \quad (2.17)$$

Où :

$T$  : température de l'arc,

$M$  : nombre de particules neutres dans l'arc,

$k$  : constante de Boltzmann.

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

$$W_t = (E_{arc} I_{arc} - P_0) \Delta t \quad (2.18)$$

$E_{arc}$  étant le gradient dans l'arc,  $P_0$  les pertes par unité de longueur considérées comme constantes; cette valeur sera calculée en fonction des pertes par conduction et des pertes par rayonnement. La température de l'arc et la température ambiante sont supposées constantes et égales respectivement à 3000 K et 300 K.

Si la condition de propagation n'est pas satisfaite, la tension est incrémentée de  $\Delta V_s$  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:

$$v = \mu E_{arc} \quad (2.19)$$

Où  $\mu$  est la mobilité de l'arc.

On en déduira, grâce au pas de temps  $\Delta t$ , la variation de la longueur d'arc  $dx$  ( $dx = v \Delta t$ ).

Si la nouvelle valeur de la longueur d'arc  $x+dx$  atteint la dernière bande, il y a contournement, sinon le temps est incrémenté de  $\Delta t$  et les calculs sont repris depuis le début.

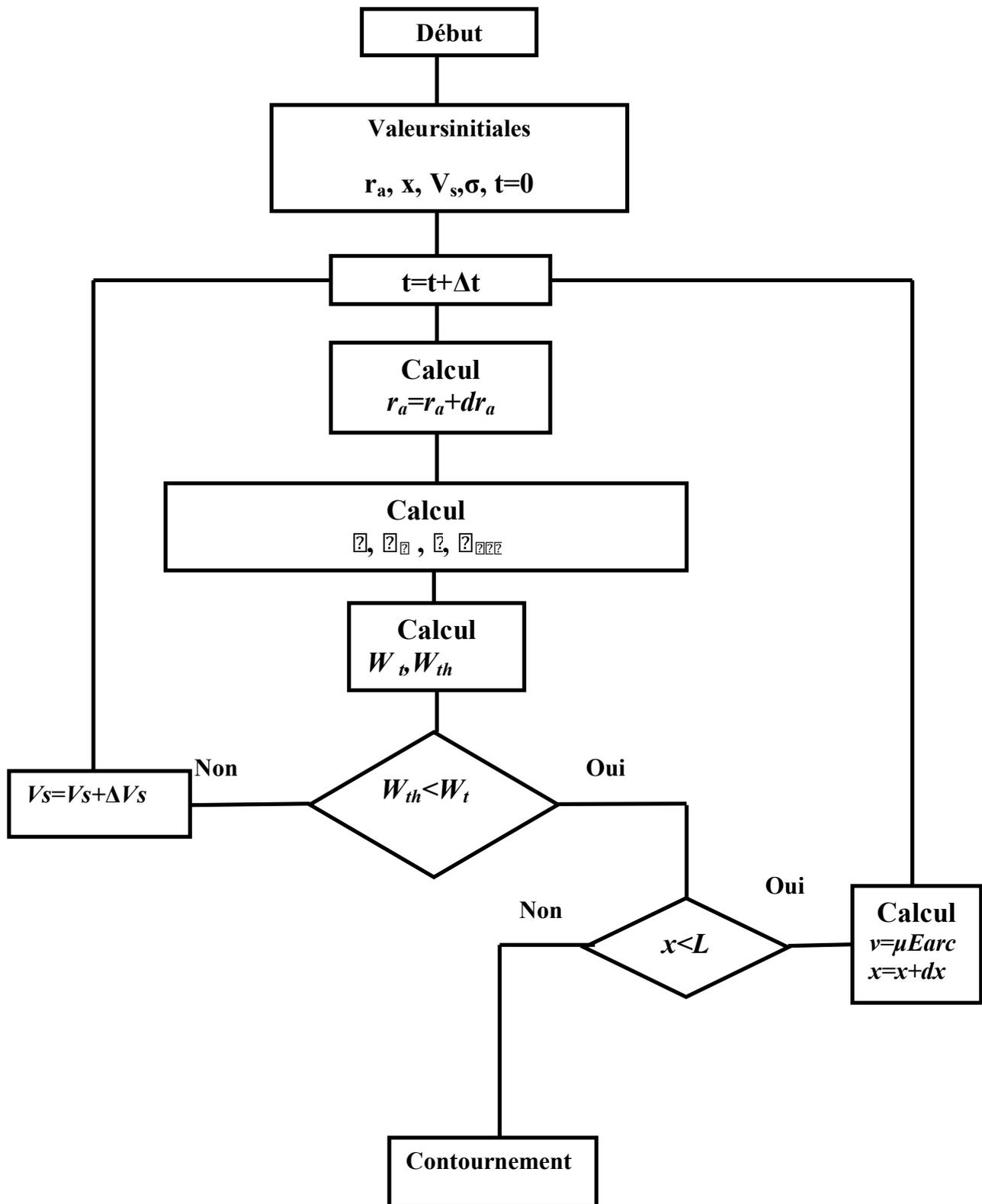


Fig.2.6. Organigramme du modèle de Anjana et Lakshminarasimha [13].

**II.3.4. Modèle de Sundararajan et Gorur :**

Dans le but d'estimer la tension de contournement des isolateurs pollués sous tension continue, **Sundararajan et Gorur[14]** ont proposé un modèle dynamique, qui ressemble à celui de Anjana et Lakshminarasimha, mais basé sur le critère de propagation de Hampton (champ au pied de l'arc inférieur à celui dans la pollution).

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

$$E_p = A \frac{1}{r_p^{n+1}} \frac{n}{r_p^{n+1}} \tag{2.20}$$

Avec:

$r_p$  : la résistance linéique de la couche de pollution

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

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

$$R_p = \frac{1}{\gamma_p} f = \frac{1}{\gamma_p} \int_0^L \frac{dX}{2r_a \pi} \tag{2.21}$$

Avec

$L$  : longueur de fuite de l'isolateur en cm,

$X$  : longueur d'arc en cm,

$dX$  : pas de la longueur d'arc en cm,

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

Le programme de calcul est schématisé sur la figure suivante :

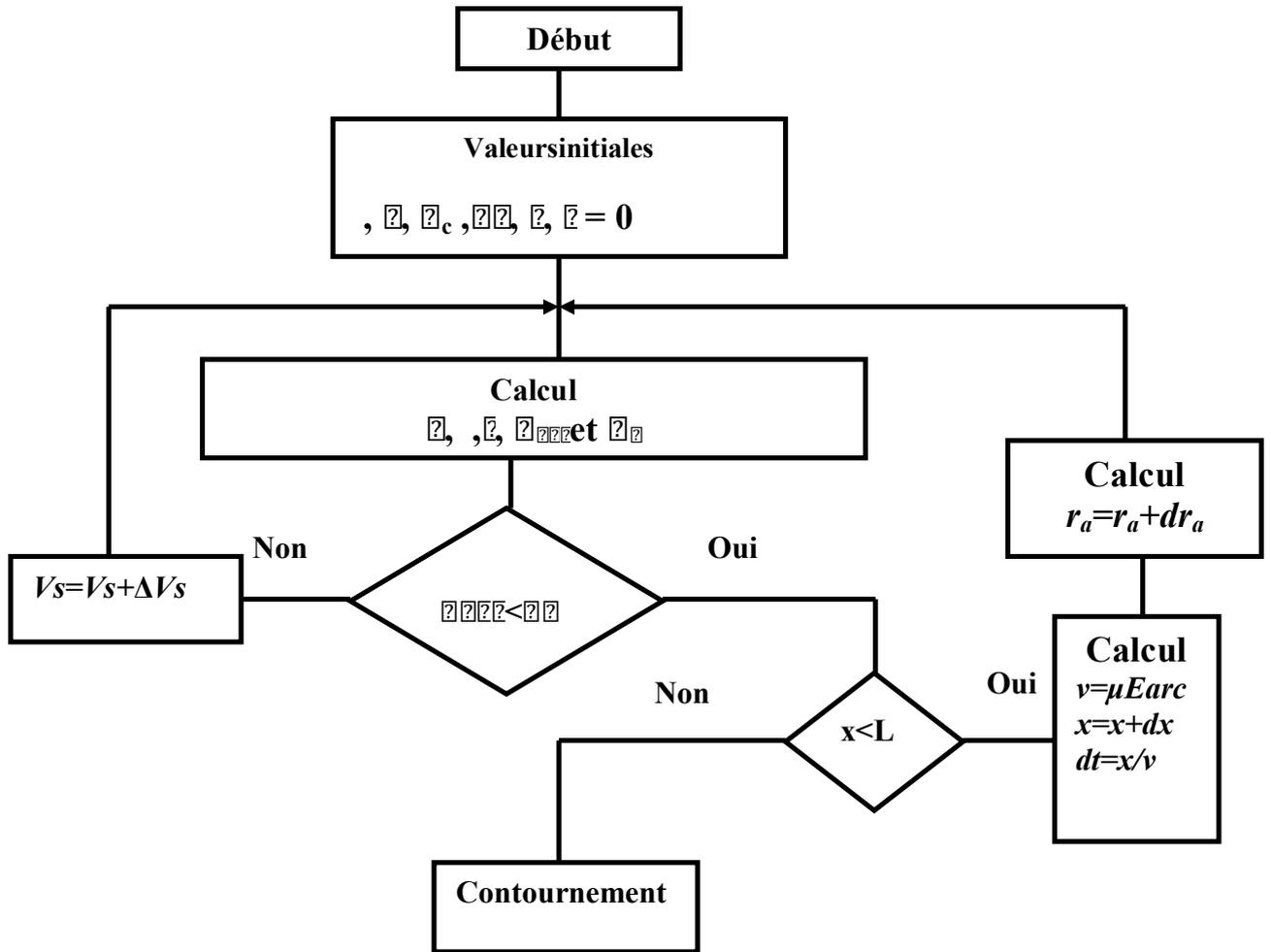


Fig.2.7. Organigramme du modèle de Sundararajan et Gorur[14].

Notons que la valeur de  $E_p$  utilisée par Sundararajan et al est en fait la contrainte critique établie par Neumarker

$$E_c = N^{n+1} I_p^{n+1} \tag{2.22}$$

Pour le cas alternatif, Sundararajan et al utilisent le même modèle mais en y remplaçant le critère de propagation de l'arc par la condition de ré-allumage.

II.3.5. Modèle de Dhahbi:

Le choix de cette représentation en deux dimensions est justifié par le fait que le phénomène de contournement dépend essentiellement des caractéristiques surfaciques de la couche de pollution. Cette couche de pollution peut à son tour être modélisée par une résistance  $R_p$  en parallèle avec une capacité  $C$ .

Dhahbi[37] a considéré que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure (2.5). Pour chaque saut de l'arc, on obtient une nouvelle cellule ayant les paramètres suivants :  $R_i$ ,  $C_i$ ,  $L_i$  et  $U_i$ . Elle a considéré aussi que la résistance du canal d'arc varie selon l'équation de Mayr et que la forme de ce canal est cylindrique de résistivité constante.

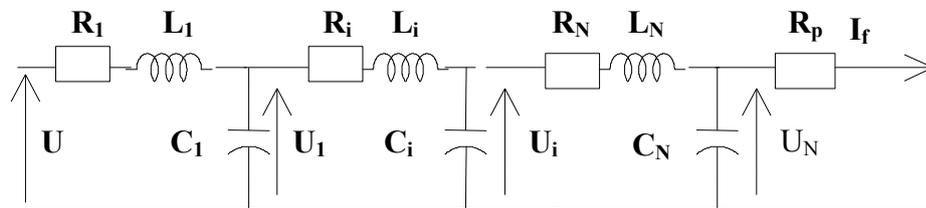


Fig.2.8. Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge selon Dhahbi[22].

Où:

$R_p$  : est la résistance de la pollution

$C_p$  : la capacité de la couche de pollution

$R_i$  : est la résistance de l'arc

$C_i$  : la capacité de la décharge

$L_i$  : l'inductance de la décharge

$U_i$  : tension correspondant à chaque cellule nouvellement créée

En écrivant les équations électriques correspondant à ce circuit sous forme matricielle et en utilisant le critère d'impédance comme critère de propagation. Ce modèle permet de calculer la tension de contournement, le temps au contournement ainsi que certains paramètres caractérisant la propagation de la décharge électrique le long d'une surface isolante polluée. Elle a utilisé le critère d'impédance comme critère de propagation. Ainsi, Dhahbi a trouvé que les effets de l'inductance du canal de la décharge sont négligeables, et

que la forme d'onde de la tension appliquée a une influence directe sur les paramètres régissant le phénomène de contournement.

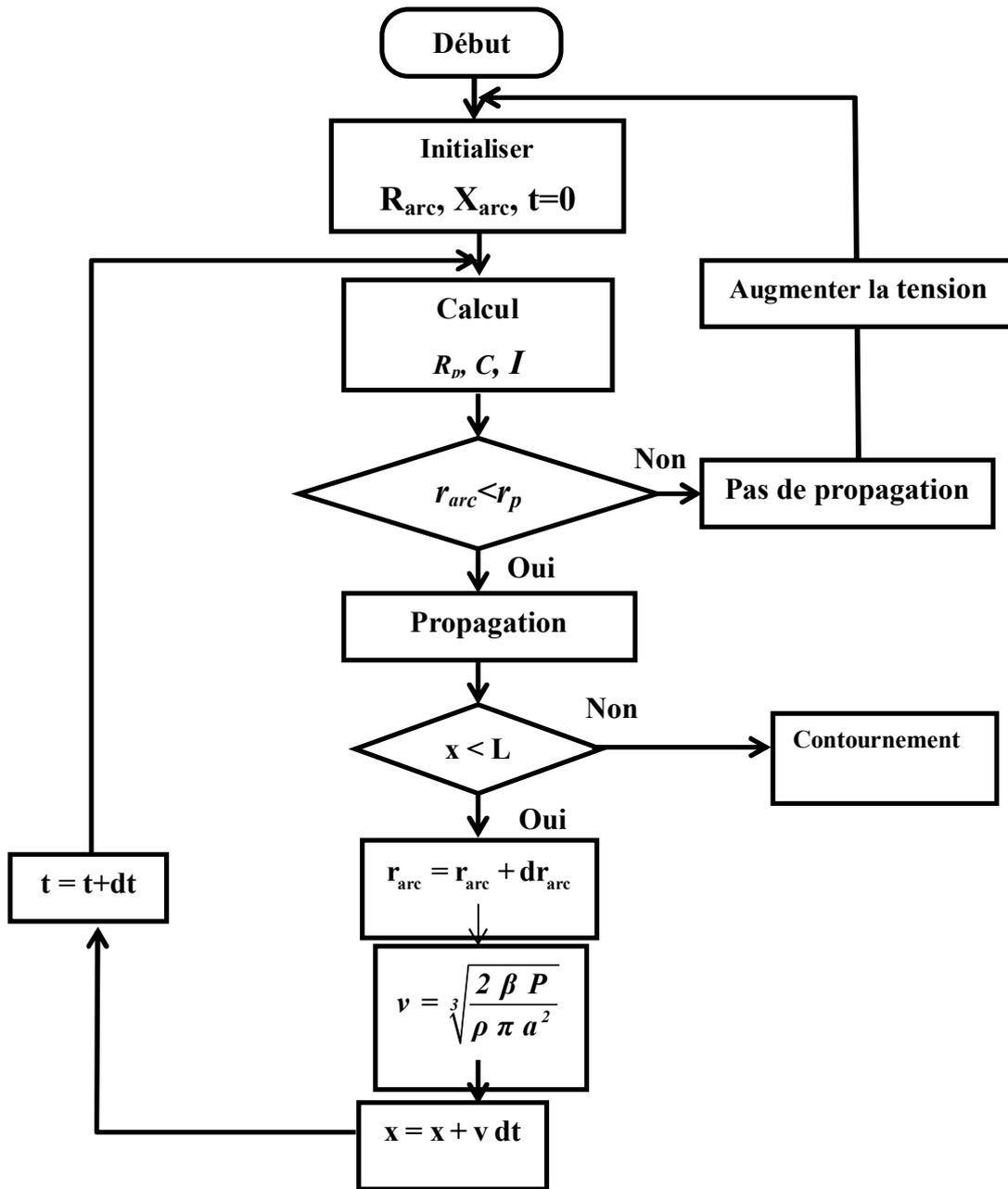


Fig. 2.9. Organigramme du modèle de Dhahbi[22].

### II.3.6. Modèle de Tegar :

Le modèle de **Tegar**[55] en tension continue se base sur le circuit électrique équivalent d'obenaus et utilise le critère de propagation de Hampton.

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

Le modèle qu'il a proposé permet d'évaluer la tension de contournement et le temps au contournement et de décrire la dynamique de l'arc en tenant compte de la géométrie de l'isolateur ainsi que des variations instantanées de certains paramètres importants à savoir le courant de fuite, la vitesse de propagation, la puissance et l'énergie fournies par la source, le champ dans la pollution et au pied de l'arc, la résistance de la pollution, le rayon du canal d'arc, la résistance de ce canal, sa longueur, sa résistance linéique, sa résistivité, sa tension ainsi que la puissance et l'énergie qui lui ont été transférées.

### II.4. Vitesse de propagation [5] :

Plusieurs mécanismes ont été proposés pour expliquer la propagation de la décharge sur les surfaces isolantes polluées, mais il existe peu de relation permettant d'évaluer la vitesse de propagation de la décharge.

En faisant l'hypothèse que l'allongement de la décharge est lié à la puissance  $P$  disponible à la naissance de la décharge et à l'énergie nécessaire pour l'obtenir,

**Zoledziowski** a établi la relation suivante :

$$\frac{dX}{dt} = \frac{U^2}{\sigma r^2 (L - X)^2 Q} \quad (2.23)$$

Où

$\sigma$  : désigne la conductance de la décharge,

$Q$  : densité d'énergie linéique de la décharge,

$X$  : longueur d'arc

$r_p$  : la résistance linéique de pollution.

Matsuo et al abordent de façon directe à l'étude de la variation de la vitesse de propagation. En utilisant des fibres optiques placés sur le chemin de la décharge à des distances données les unes des autres et en mesurant les intervalles de temps entre les signaux lumineux détectés par les fibres, ils déduisent la vitesse moyenne de propagation de la décharge.

A l'aide d'une caméra ultra rapide, Al Baghdadi a pu établir une relation empirique donnant la vitesse :

$$v = 1.54 \times 10^{-4} r_p^{2.5} (i^4 - i_c^4) [\text{cm/s}] \quad (2.24)$$

Où

$i_c$  : courant critique en A

$r_p$  : résistance linéique de pollution en  $\Omega/\text{cm}$

**Rizk** a trouvé que cette formule concorde avec une analyse dimensionnelle et l'a utilisé dans le modèle dynamique.

**Rahala** aussi suppose que la vitesse moyenne de ces ions est proportionnelle au champ  $E_{pr}$  existant à la racine de l'arc. De plus, une force de rappel provenant de la colonne de la décharge, s'exerce sur ces ions. Le champ total s'exerçant sur les ions est alors égal à la différence entre  $E_{pr}$  et  $E_{arc}$  et la vitesse aura pour expression :

$$v = \frac{dx}{dt} = \mu (E_{pr} - E_{arc}) \quad (2.25)$$

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

D'après Rahal, le champ peut être exprimé par :

$$E_{pr} = \frac{I_p}{2ae} \left[ \frac{\text{sh} \left( \frac{2\pi r_d}{a} \right)}{\text{ch} \left( \frac{2\pi r_d}{a} \right)} + 1 \right] \quad (2.26)$$

Où

$e$  : Largeur de la couche d'électrolyte.

$a$  : Profondeur de la couche d'électrolyte.

$I$  : Courant de la décharge

$\rho$ : Résistivité de l'électrolyte.

$r_d$ : Rayon de la décharge

L'expression de la vitesse de propagation de l'arc qui semble donner des valeurs très bonne en très bon accord avec celles mesurées expérimentalement et celle proposée par Beroual.

Celle-ci, établie à l'origine pour les streamers dans les diélectriques liquides a été étendue avec succès aux autres décharge dans d'autres milieux et aux interfaces diélectriques. Elle est basée sur le fait que pendant la propagation de l'arc, l'énergie totale  $W_t$  est dépensée sous différents formes, et qu'une fraction ( $\beta$ ) de cette énergie est transférée au canal d'arc sous forme d'énergie cinétique  $W_c$  lui permettant ainsi de s'allonger d'une distance  $dx$ .

$$W_c = \beta W_t \tag{2.29}$$

$\beta$  et tel que  $0 < \beta < 1$

Pendant un temps  $dt$  :

$$W_c = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 dx v^2 \tag{2.30}$$

Où

$r$  : rayon de l'arc,

$v$  : vitesse de propagation

$\rho$  : la masse volumique de gaz.

Sachant que :

$$dx = v dt \tag{2.31}$$

On a alors que :

$$\frac{1}{2} \rho \pi v^3 (dt) = \beta dW_t (t) \tag{2.32}$$

Par conséquent :

$$v(t) = \left( \frac{2\beta}{\rho\pi r^2} \times \frac{dW_t(t)}{dt} \right)^{1/3} \quad (2.33)$$

Ou encore

$$v(t) = \sqrt[3]{\frac{2\beta P(t)}{\rho\pi r^2}} \quad (2.34)$$

$P(t)$  : étant la puissance injectée dans l'intervalle.

En utilisant cette expression, N.Dhahbi et A.Beroual obtiennent des valeurs de la vitesse en très bon accord avec celles mesurées. La vitesse donnée par ce modèle trouvée supérieurs à celle donné par ailleurs ( $v=\mu E_{arc}$ ), même en prenant des mobilités relativement grandes (de l'ordre de  $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ). Cependant, l'augmentation de la vitesse de propagation avec la longueur et le rayon de la décharge donnée par ce modèle trouve confirmation dans les observations rapportées dans la littérature, ce qui n'est pas le cas avec l'expression de la vitesse en fonction de la mobilité ( $v=\mu E_{arc}$ ) où celle-ci diminue avec l'augmentation de la longueur de la décharge vue que le champ  $E_{arc}$  diminue lorsque le courant augmente.

### II.5. Temps au contournement [59] :

On appelle temps de contournement, le temps qui s'écoule entre l'instant d'amorçage de la décharge et l'instant où son pied atteint l'électrode basse tension. Dans le cas d'une tension alternative, ce temps est précédé d'un temps  $t_0$  plus grand qu'une demi-période pendant lequel la décharge s'éteint et se ré-allume plusieurs fois avant de contourner la surface de l'isolateur. Ce temps  $t_0$  est appelé temps de retard; il correspond à la durée pendant laquelle le milieu où brûle la décharge, perd ses propriétés isolantes.

Dans une étude expérimentale de mesure du champ électrique dans l'arc en fonction du temps, Swift a observé la dépendance du temps au contournement avec la nature de mouillage de l'isolateur.

**Ghosh et Chatterjee** ont montré que le temps au contournement décroît avec l'augmentation de la tension appliquée et dépend de la nature chimique du polluant. Ils ont trouvé que pour chaque électrolyte, il y a une valeur particulière de la tension appliquée pour laquelle un contournement se produit au bout de 1ms et que toute augmentation de la tension n'a pas d'effet remarquable sur le temps au contournement.

**Matsuoka et al** ont montré également que le temps au contournement dépend de la nature chimique du polluant. Ils ont aussi émis l'hypothèse sans la démontrer qu'il existe une

corrélation entre la variation temporelle des caractéristiques de la résistance de pollution et le temps au contournement.

En étudiant l'influence de la tension appliquée sur le temps de contournement d'un canal d'électrolyte en tension continue, **Pollentes** a observé qu'à résistivité d'électrolyte constante, les temps de contournement moyens sont d'autant plus élevés que l'on se rapproche de la valeur de la tension critique de contournement. Il a aussi constaté qu'en polarité négative, les temps de contournement sont supérieurs à ceux obtenus en polarité positive, à résistivité égale et à niveau de surtension égal. Ces tendances ont été également observées par Peyrène.

R <sub>p</sub>	L=0.05m		L=0.08m		L=0.10m		L=0.12	
	V (kV)	t (ms)	V (kV)	t (ms)	V (kV)	t (ms)	V (kV)	t (ms)
<b>100</b>	7.0	11.3	11.0	36.2	13.0	79.8	16.0	87.2
	8.0	5.6	12.0	16.4	14.0	39.5	17.0	48.9
	9.0	2.7	13.0	9.4	15.0	20.4	18.0	27.9
	10.0	1.0	14.0	5.5	16.0	11.6	19.0	16.8
			15.0	3.3	17.0	6.5	20.0	11.1
			16.0	1.0	18.0	4.2	21.0	6.7
					19.0	1.0	22.0	3.3
							23.0	1.0
<b>1500</b>	9.0	21.1	14.0	81.7	17.0	119.1	20.0	153.6
	10.0	11.3	15.0	35.0	18.0	64.1	21.0	95.2
	11.0	4.5	16.0	12.1	19.0	30.3	22.0	49.3
	12.0	1.1	17.0	5.9	20.0	14.8	23.0	22.5
			18.0	2.5	21.0	8.1	24.0	13.5
			19.0	1.4	22.0	5.8	25.0	8.9
					23.0	4.0	26.0	6.2
					24.0	1.0	27.0	5.1
<b>2160</b>	9.0	21.1	14.0	81.7	17.0	119.1	20.0	153.6
	10.0	11.3	15.0	35.0	18.0	64.1	21.0	95.2
	11.0	4.5	16.0	12.1	19.0	30.3	22.0	49.3
	12.0	1.1	17.0	5.9	20.0	14.8	23.0	22.5
			18.0	2.5	21.0	8.1	24.0	13.5
			19.0	1.4	22.0	5.8	25.0	8.9
					23.0	4.0	26.0	6.2
					24.0	1.0	27.0	5.1
						28.0	4.0	
						29.0	1.0	

Tableau II.1 : variation de temps de contournement en fonction de tension appliqué sous différentes valeurs de résistance de pollution et différentes longueur de fuite selon **P. S.**

**Gohsh, S. Chakravortiet N. Chatterjee [62].**

**II.6. conclusion :**

Dans ce chapitre on a présenté des résultats basés sur l'utilisation d'un nouveau modèle pour décrire la tension d'arc en contraire avec les études précédents.

Les résultats de calcul des conditions critiques de contournement ne sont pas satisfaisants en les comparants aux résultats d'autres chercheurs. Ainsi de suite on a vu les différents modèles dynamiques rapportés dans la littérature qui permettent d'identifier l'évolution temporelle des différents paramètres de la décharge. Ces modèles ont plus d'avantages que les modèles statiques car tous paramètres peuvent être identifié à quelque instant donné.

Dans ce qui suivre, nous citerons les travaux antérieurs sur la décharge électrique multi-branches en exposant les différents modèles des différents auteurs ainsi nous proposerons un nouveau modèle statique permet de décrire la zone de transition d'un modèle multi-arcs à un modèle mono-arc.

# *Chapitre III*

---

---

## *Modèle mathématique de la décharge électrique multi- branches*

---

---

### III.1. Introduction :

L'isolation des lignes de transmission aériennes est soumise à plusieurs types de conditions anormales qui peuvent causer des ruptures diélectriques et des pannes de longue durée [23].

La nature des dépôts sur les surfaces d'isolateur est largement différente, selon la source de pollution, le niveau de la contamination, la forme de l'isolateur, et les conditions atmosphériques. Le processus de contournement au-dessus des surfaces polluées est donc tout à fait complexe.

D'après les études expérimentales, lors de la propagation de la décharge électrique sur les surfaces isolantes polluées, la colonne de celui-là est composée de plusieurs branches.

Dans ce qui suit, on va essayer d'exposer les différents modèles des différents auteurs en ce qui concerne la décharge multi-branches ensuite on va proposer un nouveau modèle pour la modélisation des décharges multi-branches qui se propagent en parallèle.

### III.2. Travaux antérieurs des décharges électriques multi-branches:

Les études expérimentales, lors de la propagation de décharge montrent que d'autres décharges peuvent être brûler, donc la source doit offrir plus de courant pour entretenir ces arcs additionnels et par suite la tension est plus grande qu'un seul arc.

D'après les ouvrages que nous dispose, certains chercheurs ont montrés que la décharge se propage en série en contradiction avec d'autres qui montrent la propagation en parallèle.

#### III.2.1. Décharge électrique multi-arcs en série et en parallèle:

1. **Rizk [4]** considère qu'il existe  $m$  arcs en série et  $m_d$  bandes sèches. Au début, le nombre d'arcs est égal au nombre de bandes sèches et au fur et à mesure que les arcs avancent sur le chemin de fuite, leur nombre se réduit graduellement de telle façon qu'au contournement, il n'y aura qu'un seul arc. Durant le processus de propagation, Rizk suppose qu'en parcourant une distance  $\Delta x$ , le nombre d'arcs se réduit de  $\Delta m$  proportionnellement à  $m$  et à  $\Delta x$ ; une fois l'équation différentielle résolue, il a obtenu la relation suivante:

$$m = m_d^{1-x/L} \quad (3.1)$$

Le nombre  $m_d$  de bandes sèches est supposé égal à 2 par disque d'isolateur. Le nombre d'arcs en série, rentre dans le calcul de la chute de tension et dans le calcul de la vitesse de propagation. Ce modèle est basé sur celui d'Obenaus. Ainsi, la tension aux bornes de l'isolateur sera:

$$U = V_{\text{arc}} + R_p(x) \cdot I + mV_e \quad (3.2)$$

Où  $V_e$  est la chute de tension accumulée à l'anode et à la cathode.

La résistance de la couche de pollution dans le cas où l'isolateur est simulé par un rectangle de longueur  $L$  et de largeur  $b$  selon Wilkins. Il est donné par la relation :

$$R_p(x) = \frac{1}{\pi\gamma_e} \left[ \frac{\pi(L-x)}{b} + N \cdot \text{Ln} \left( \frac{b}{2\pi r_0} \right) \right] \quad (3.3)$$

La vitesse d'extension de l'arc  $v$  est exprimée à partir des résultats d'Al Baghdadi en fonction de courant  $i$ , par la relation suivante :

$$v = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m.r}_p^{2.5}(x) (i^4 - i_c^4) \quad (3.4)$$

Où :

$r_p$ : est la résistance moyenne de la ligne de fuite en  $\Omega/\text{m}$ .

$i_c$ : c'est le courant critique en A, pour de lequel l'égalité de gradient d'arc  $E_{\text{arc}}$ , et le gradient de la couche de pollution  $E_p$  est assurée localement.

## 2. M. Farzaneh [53, 36] :

Durant le processus de contournement sur les surfaces contaminées, un équilibre dynamique s'établit entre le nombre d'arcs en série et le nombre des bandes sèches.

La présence de deux couches de pollution ou plus en série, reliée par les arcs partiels comme l'indique la figure suivante, n'est pas traité par les modèles mathématiques.

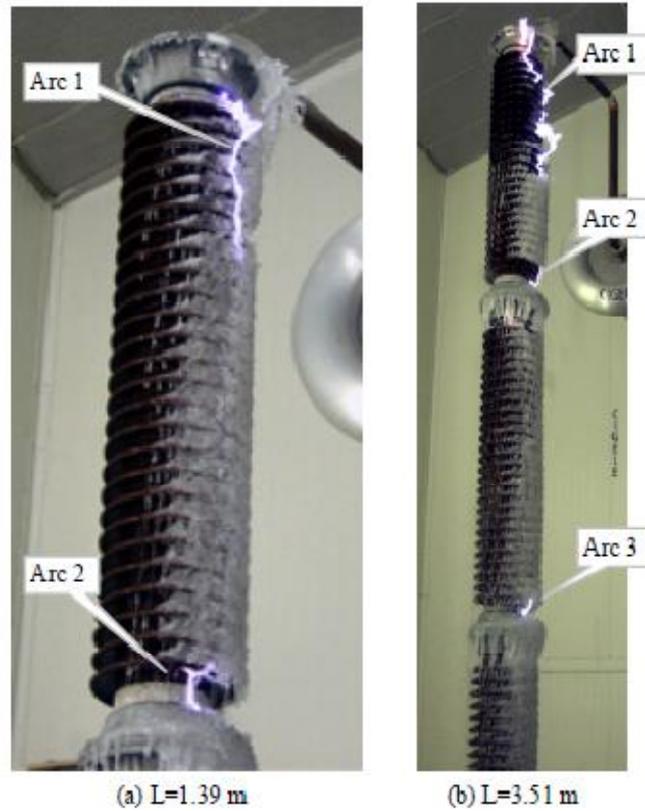


Fig.3.1. propagation des arcs en série selon Farzaneh [53].

Donc le calcul général de la résistance de la couche de pollution en présence d’arcs multiple est affecté par plusieurs facteurs qui sont quelque peu aléatoires en nature. La plupart de ces facteurs sont la formation d’un certain nombre d’arcs consécutifs en série et la forme de la couche de pollution (uniforme ou non uniforme).

Le modèle établi par Farzaneh est donné par l’équation suivante :

$$V = V_e + A.x.I^{-n} + \left[ \frac{NI}{\pi\gamma_e} \right] \text{Ln} \left[ \frac{L-x}{r_0} \right] \tag{3.5}$$

Avec

N : nombre de branche de la décharge

$\gamma_e$ : la conductivité de la couche de pollution ( $\mu\text{S}$ )

$r_0$ : le rayon de la racine d’arc (cm)

3. C. Cheng et H. Nour:

Ce problème a été aussi traité par Cheng et Nour [16, 18] en supposant qu'il existe  $m$  décharges simultanées. En partant du modèle d'Obenaus, ils considèrent que le courant qui circule dans la couche de pollution est la somme des courants dans chaque branche. La recherche des conditions critiques par rapport au leader (c'est à dire la décharge la plus avancée), les a conduit à des résultats plus proches des mesures que ceux du modèle sans l'hypothèse d'arcs multiples. Le schéma du modèle multi-arcs est donné à la figure ci-dessous.

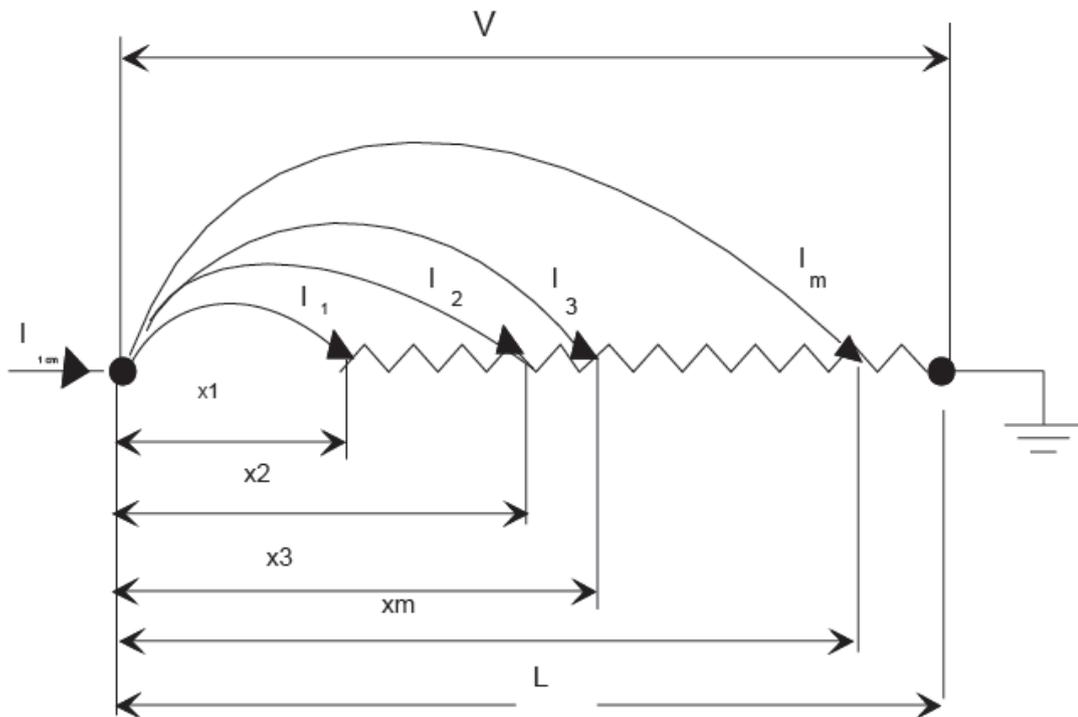


Fig.3.2. Le Modèle multi-arcs selon Cheng et Nour[64].

Cheng et Nour [16] ont présenté un modèle mathématique qui prend en compte la présence de plusieurs branches de la décharge entre l'électrode haute tension et la masse.

Soit  $V_j$  la chute de tension à travers la longueur de l'arc  $X_j$ , puis :

$$V_j = A \cdot x_j \cdot I_j^{-n} + V_e \tag{3.6}$$

Aussi

$$V_{j+1} = V_j + r_p (x_{j+1} - x_j) \sum_{k=1}^j I_k \quad (3.7)$$

$$J=1, 2, 3, \dots, m$$

Supposons que  $m$  décharges existent simultanément, donc, La tension appliquée  $V$  est exprimée par :

$$V = A \cdot x_m \cdot I_m^n + r_p (L - x_m) \sum_{k=1}^m I_k + V_e \quad (3.8)$$

Ce modèle est un modèle statique et ses auteurs n'ont pas déterminé les conditions dynamiques de propagation de la décharge. Il conduit, en partant des expressions de la tension et de courant critiques de Wilkins, aux conditions critiques de contournement, lequel aura lieu si :

$$\frac{dV}{dI_m} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{dV}{dx_m} = 0 \quad (3.9)$$

En se basant sur ces conditions, Cheng et Nour ont trouvé que les valeurs critiques de la tension de contournement calculées avec leur modèles se rapprochent plus des valeurs expérimentales que celle prédites par le modèle d'Aston et Zoledowski.

Le modèle multi-arc de Cheng et Nour a été adapté par Zmajkovic, qui partant du principe de la propagation de la décharge par amorçage des ramifications successives de la colonne principale de la décharge. C'est un modèle unidimensionnel qui tient compte de la constriction des lignes de courant au contact de la décharge avec l'électrolyte. La ramification de la décharge est simulée par plusieurs branches de la décharge. Zmajkovic suppose que la ramification de la décharge la plus avancée vers l'électrode de masse est de nature différente de celles qui précèdent.

Pour cette raison, il a décrit la dernière branche de la décharge par l'équation de Rieder (modèle de modèle de Rao et Gopal).

L'équation décrivant le modèle est basée sur la représentation de la décharge. En supposant que la décharge est ramifiée en  $m$  branches, cette équation s'écrit comme suit :

$$V = \alpha + (\beta + x_m) \gamma \left( \ln \frac{I_m}{\delta} \right)^{-3} + r_p (L - x_m) \sum_{k=1}^m I_k + V_e \quad (3.10)$$

Où :

$\alpha, \beta, \gamma$  : constantes qui dépendent de la nature des électrodes entre lesquelles se développe la décharge,

$V$  : tension appliquée sur l'électrode haute tension

$R_p$  : résistance par unité de longueur du canal

$V_e$  : chute de tension accumulée à l'anode et la cathode

$I_k$  : courant dans la branche  $k$

$X_m$  : longueur de la branche  $m$  de la décharge

$L$  : longueur de la ligne de fuite.

Les courants et les chutes de tension dans les autres branches sont déterminés à partir de l'équation d'Ayrton (Modèle de Cheng et Nour).

L'expression (3.8) donne la chute de tension dans la dernière branche de la décharge.

La relation entre la dernière branche  $m$  et l'avant dernière branche ( $m-1$ ) est décrite comme suit :

$$\alpha + (\beta + x_m) \gamma \left( \text{Ln} \frac{I_m}{\delta} \right)^{-3} = A I_{m-1}^{-n} x_{m-1} + r_p (x_m - x_{m-1}) \sum_{k=1}^{m-1} I_k \quad (3.11)$$

Les autres branches sont décrites par l'équation :

$$A I_{j+1}^{-n} x_{j+1} = A I_j^{-n} x_j + r_p (x_{j+1} + x_j) \sum_{k=1}^j I_k \quad (3.12)$$

Où :  $j=1, 2, \dots, m-2$ .

Le problème rencontré par Cheng et Nour est que ces auteurs ne peuvent pas prédire le nombre d'arcs qui peuvent être brûlé en parallèle.

#### 4. D.Mahi :

**Mahi**[41, 43] a utilisé le diviseur de courant pour avoir des relations entre les courants dans toutes les branches.

Nous donnons ici un exemple d'étapes d'avancement d'une décharge avec graphes électriques qui leur associés :

- Etape 1 à t1 :

$$v_0 = Ax_0 I_0^{-n}$$



Fig.3.3. Présence d'une branche de la décharge.

- Etape 2 à t2 :

$$v_1 = v_0 + r.Ax.I_0$$

$$v_1 = (x_0 + \Delta x).AI_1^{-n}$$

- Etape 3 à t3 :

$$v_2 = v_1 + r.Ax.(I_0 + I_1)$$

$$v_2 = (x_0 + 2.\Delta x).AI_2^{-n}$$

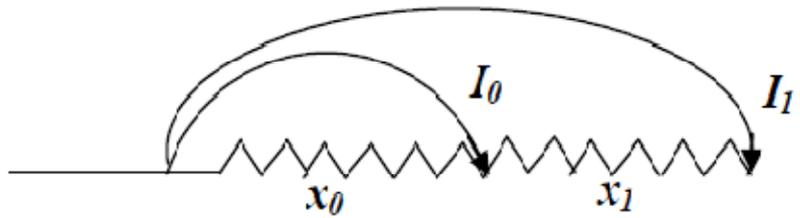


Fig.3.4. Présence deux branches de la décharge.

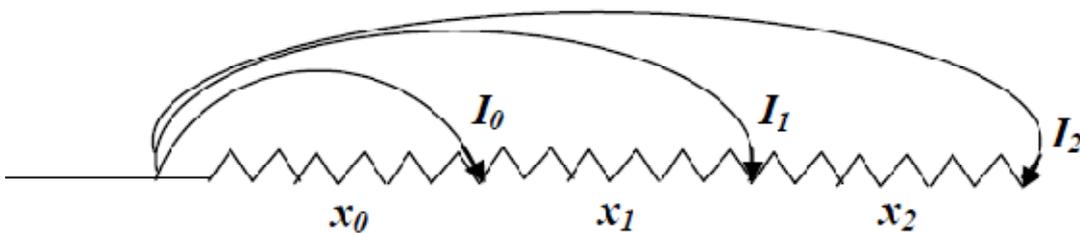


Fig.3.5. Présence plusieurs branches de la décharge.

Ce calcul nous permet d'avoir l'expression du courant dans diverses branches et par la même en déduire les résistances dans diverses branches par la relation :

$$R_d = Ax_d I_d^{-n-1} \tag{3.13}$$

Le calcul de  $R_{dj}$ , la résistance de la branche j, nous permet par la règle de diviseur de courant de trouver le courant d'une branche par rapport à celle qui lui est immédiatement parallèle soit :

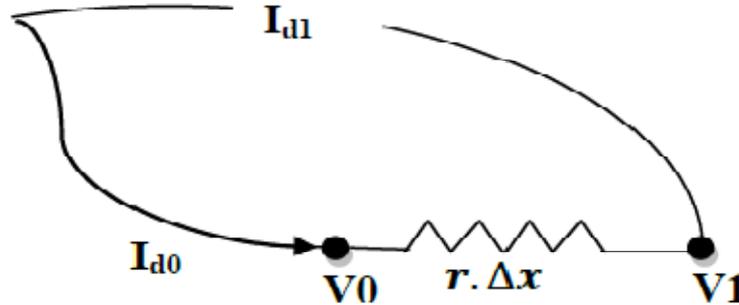


Fig.3.6. calcul de courant électrique.

$$I_{d1} = \left( \frac{R_{d0} + r \cdot \Delta x}{R_{d1}} \right) I_{d0} \tag{3.14}$$

Avec :

$$R_{d0} + r \cdot \Delta x = R_{eq0} \tag{3.15}$$

- Etape m à tm :

Dans le cas de la dernière branche où le courant  $I_m$  est déterminé par rapport à la résistance équivalente de tout le circuit qu'il lui est en aval, on a trouvé que

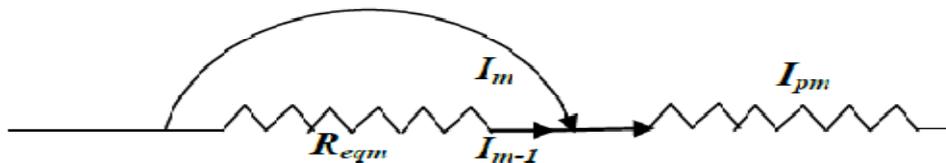


Fig.3.7. courant dans la dernière branche de la décharge

$$\begin{cases} I_{m-1} = \sum_{k=1}^{m-1} I_k \\ I_{pm} = I_m + I_{m-1} \end{cases} \tag{3.16}$$

$$I_{pm} = I_m + \sum_{k=1}^{m-1} I_k \tag{3.17}$$

$$I_m = \frac{R_{eqm}}{R_m} I_{m-1} \Rightarrow I_{pm} = I_m \left( 1 + \frac{R_m}{R_{eqm}} \right) \tag{3.18}$$

L'équation du modèle de type circuit électrique équivalent est exprimée comme suit :

$$V = Ax_m I_m^{-n} + r_p (L-x) I_{pm} \Rightarrow V = Ax_m I_m^{-n} + r_p (L-x) I_m \left( 1 + \frac{R_m}{R_{eqm}} \right) \quad (3.19)$$

D'autre part :

$$R_d = Ax_d I_d^{-n-1} \quad (3.20)$$

Alors l'équation (3.19) sera :

$$V = Ax_m I_m^{-n} \left( 1 + \frac{r_p (L-x)}{R_{eqm}} \right) + r_p (L-x) I_m \quad (3.21)$$

Ou pour décrire des décharges instables à faible courant, on pose

$$V = \alpha + (\beta + x_m) \gamma \left( \text{Ln} \frac{I_m}{\delta} \right)^{-3} + r_p (L-x_m) \sum_{k=1}^m I_k + V_e \quad (3.22)$$

Avec :

$\alpha, \beta, \gamma$  : Sont des constantes qui dépendent de la nature des électrodes entre lesquelles se développe la décharge ( $\alpha = 26$ ,  $\beta = 1.1$ ,  $\gamma = 5.4$ )

$\delta = 7.4$ ).

Après une analyse paramétrique de modèle Cheng et Nour, nous a conduits aux relations suivantes :

$$\begin{cases} I_m = \left( \frac{n.A.x_m}{r_p (L-x_m)} \right)^{\frac{1}{n+1}} \\ \sum_{k=1}^m I_k = \frac{A.I_m^{-n}}{r_p} \end{cases} \quad (3.23)$$

Et

$$\begin{cases} \frac{-3}{I_m} \cdot \gamma \cdot \left( \text{Ln} \frac{I_m}{\delta} \right)^{-4} (\beta + x_m) + r_p (L-x_m) = 0 \\ \sum_{k=1}^m I_k = \frac{\gamma}{r_p} \left( \text{Ln} \frac{I_m}{\delta} \right)^{-3} \end{cases} \quad (3.24)$$

### III.3. Phénomène de contournement sous tension alternative [54] :

L'action d'un isolateur pollué sous tension continue est plus critique qu'en tension alternative. Le contournement d'un isolateur soumis à une tension alternative se fait sur la première alternance, si la tension appliquée est très élevée.

D'après **Rahal [8]**, le contournement se fait toujours sur la première alternance positive, ces résultats a été démontré plus tard par **Mahi [29]** dans ces études expérimentales sur la propagation des décharges électriques sur les surfaces faiblement conductrice, il a observé que le contournement dure plusieurs période et termine dans l'alternance positive.

Le contournement selon **Rahal[8]** est de trois types :

- Contournement immédiat, à résistivité de la couche de pollution quasiment constante, nécessitant une seule alternance; dans ce cas, **Rahal [8]** suppose que les phénomènes ne seront pas fondamentalement différents de ce qu'ils étaient sous tension continue.
- Contournement consécutif à un abaissement de la résistivité de la couche de pollution, alors même que la tension appliquée était au départ insuffisante.
- Non contournement, la couche de pollution électrolytique étant arrivée à son échauffement maximum l'amenant à ébullition et la résistivité demeurant trop élevée pour la tension appliquée.

En outre et dans son étude sur les mécanismes physiques du contournement des isolateurs haute tension, **Rahal[8]** a traité qualitativement le contournement en alternatif. Ces observations lui ont permis de supposer que le processus de contournement se fait toujours dans une seule alternance, même si le processus de préparation consistant par exemple à un échauffement progressif de la couche de l'électrolyte, nécessite plusieurs alternances.

#### III.3.1. Modélisation mathématique de contournement [62] :

D'après Obenaus, le circuit électrique équivalent du phénomène comporte une colonne de la décharge en série avec une résistance de pollution. L'expression qui donne la tension aux bornes de l'isolateur en alternative est :

$$V_m = A \cdot x \cdot I_m^n + r_p(x) \cdot I_m + V_e \quad (3.25)$$

Où :

$V_m$ : est la valeur de crête de la tension alternative appliquée, en (V);

$I_m$ : est la valeur de crête de courant de fuite, en (A);

La tension accumulée aux électrodes  $V_e$  peut être négligé parce que la tension appliquée c'est une fonction du temps.

$$V_m = A.x.I_m^{-n} + r_p(x).I_m \tag{3.26}$$

Si la tension appliquée est alternative, la décharge s'éteint et se réamorçe et par suite le courant s'annule deux fois par cycle donc la condition de réamorçage doit satisfaisante.

Ces conditions peuvent être exprimées comme suit :

$$V_m \geq \frac{k.x}{I_m^b} \tag{3.26}$$

Où :

k et b : sont des constantes de réamorçage de l'arc.

Donc la condition critique de réamorçage est exprimée comme suite :

$$V_m = \frac{k.x}{I_m^b} \quad \text{et} \quad I_m = \left( \frac{k.x}{V_m} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Cette équation signifie que les conditions critiques sont satisfaisantes, quand la valeur maximum de la tension appliquée  $V_m$  et la valeur crête du courant de fuite atteint  $I_m$ , alors la longueur d'arc peut arriver à une longueur  $x$ .

Le contournement sous tension alternative est possible, si et seulement si la condition de réamorçage et la condition de contournement déduite dans le cas de la tension continue sont vérifiées simultanément.

**Zegnini[60]** dans ces études expérimentales, il trouve que le courant ne se rétablit pas immédiatement mais il aura un retard qui est plus élevée qu'une demi-alternance.

Compte tenu de l'importance du réamorçage dans la détermination de la tension de contournement en alternative.

**III.4. Modèle mathématique multi-branches :**

Le modèle mathématique multi-branches établi par Cheng et Nour est donné par la relation :

$$V = A \cdot x_m \cdot I_m^{-n} + r_p (L - x_m) \sum_{k=1}^m I_k + V_e \tag{3.27}$$

D’après les auteurs précédents, la chute de tension accumulée aux électrodes est négligeable dans le cas où plusieurs arcs brûlent dans l’air. L’équation (3.26) devient

$$V = A \cdot x_m \cdot I_m^{-n} + r_p (L - x_m) \sum_{k=1}^m I_k \tag{3.28}$$

Le problème posé est la détermination du courant total  $I_t$  qui circule dans tous les branches de la décharge. Donc on peut écrire :

$$\sum_{k=1}^m I_k = I_t \tag{3.29}$$

Dans une analyse mathématique, **Mahi et Zegnini [40]** ont suivi le courant total et le courant de la dernière branche en fonction de sa longueur, ils trouvent que le courant total coupe le courant de la dernière branche dans un point ce qui montre que le contournement se fait sur la dernière branche.

D’autre résultat permet de visualiser le courant dans les différentes branches de la décharge en fonction de longueur, pour cela on a proposé une approximation puisque les courbes des courants dans les branches diminué avec l’augmentation de la longueur de dernière branche, à partir de certain point jusqu’à deviennent uniformes et presque égaux. Ce pour cela, on a fait

$$I_t = N \cdot I_m \tag{3.30}$$

Avec

$N$  : est le nombre de branches de la décharge électrique.

$I_m$  : le courant dans la dernière branche

En remplaçant la relation (3.30) dans l’équation du modèle électrique (3.28)

$$V = A \cdot x_m \cdot I_m^{-n} + r_p (L - x_m) N \cdot I_t \tag{3.31}$$

**III.4.1. Calcul des valeurs critiques du système en tension continue :**

Les expressions des grandeurs critiques sont obtenues à partir du système d'équations (3.31) liant la tension  $V$  à l'élongation  $X$  et le courant  $I$ .

- **Détermination de  $X_c$  :**

$X_c$  sera déterminée en dérivant  $V(I_m)$  par rapport à  $I_m$  et en annulant cette dérivée comme suite :

$$\frac{dv}{dI_m} = 0$$

Après tout calcul fait, on obtient :

$$x_c = \frac{L}{n+1} \quad (3.32)$$

On peut conclure que la présence des arcs multiples n'affectent pas la longueur critique de contournement et d'après la relation (3.32) est le même pour le cas d'un décharge avec un seul arc et selon les auteurs précédents la longueur critique atteint toujours 80 %-90 %  $L$ .

- **Détermination de  $I_c$  :**

$I_c$  sera déterminée en dérivant  $V(X_m)$  par rapport à  $X_m$  et en annulant cette dérivée comme suite :

$$\frac{dv}{dx_m} = 0$$

On obtient :

$$I_c = \left( \frac{A}{N \cdot r_p} \right)^{1/n+1} \quad (3.33)$$

- **Détermination de  $V_c$  :**

En remplaçant  $x_c$  et  $I_c$  par ces valeurs dans l'équation (3.31) et après tout calcul on trouve :

$$V_c = N \cdot L \cdot A^{1/n+1} \cdot r_p^{n/n+1} \quad (3.34)$$

**III.4.2. Calcul des valeurs critiques du système en tension alternative :**

En tension alternative on ajoute seulement la condition de réamorçage de la décharge qui est la relation suivante :

$$V_m = \frac{k.x}{I_m^b} \tag{3.35}$$

Donc, l'expression de courant critique donné par :

$$I_c = \left( \frac{k.x}{V_c} \right)^{\frac{1}{b}} \tag{3.36}$$

D'après Neumarker, les constantes de la condition de réamorçage est:

**K=800, b= 0.50**

En remplaçant (3.35) dans l'équation (3.31), on obtient

$$V_c^{2.n+2} + N.rp(L - x_c) \frac{800^{2.n+2} . x_c^{2.n-1}}{A} - \frac{800^{2.n} . x_c^{2.n-1}}{A} V_c^3 = 0 \tag{3.37}$$

Cette équation permet d'étudier la variation de la tension de contournement en fonction de la longueur critique.

**III.4.3. Morphologies des décharges :**

Dans ces études expérimentales sur la décharge électrique qui se propage sur les surfaces isolantes polluées, **M.EL. Slama [52]** a suivi la propagation de la décharge à partir de l'instant de l'application de la tension jusqu'à le contournement, Il a trouvé les figures suivantes :

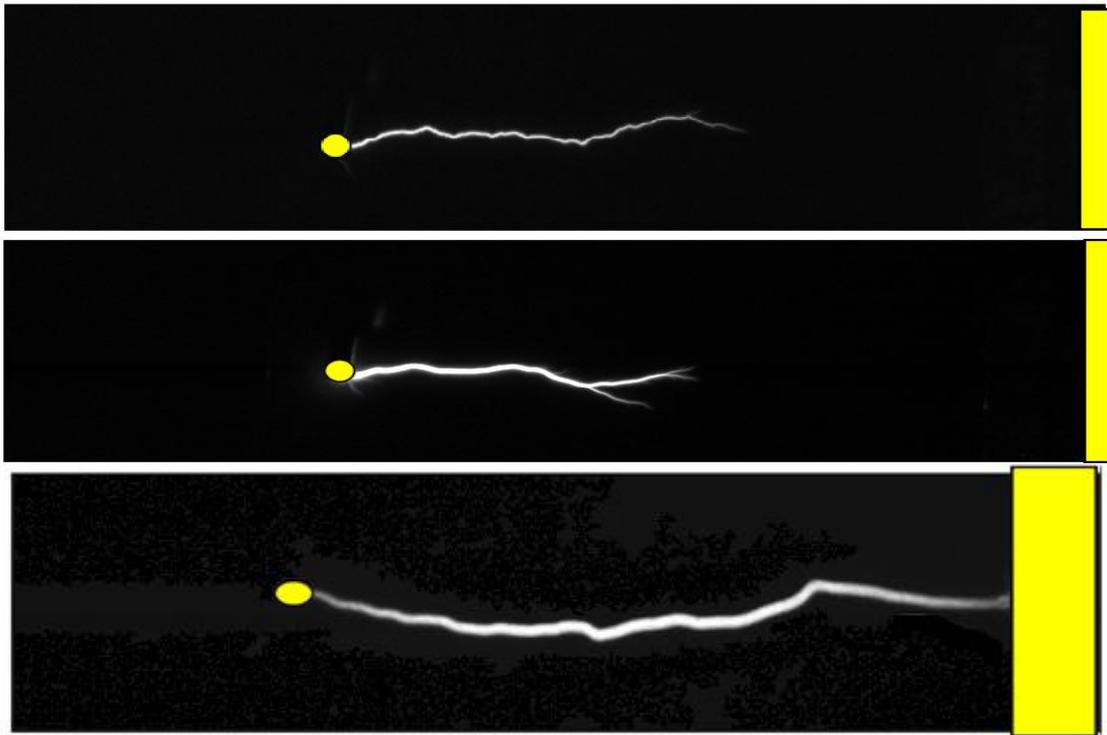


Fig.3.8. Morphologies de la décharge selon Slama [52].



Fig.3.9. Morphologies de la décharge selon Tilmatine [68].

Selon Tilmatine, les décharges dans les isolants n'est pas accompli par la formation d'un seul arc, mais prend un forme d'un arbre comme montré la figure précédente.

### III.5. Résultats et interprétation :

#### III.5.1. Etude de la variation de la tension et courant de contournement en fonction de la résistance de pollution :

A partir des relations (3.33), (3.34), nous avons trouvées Fig.3.10 et Fig.3.11 pour le cas d'une tension continue. Et Fig.3.12 et Fig.3.13 pour le cas alternatif.

La figure ci-dessous illustre la variation de la tension de contournement en fonction de résistivité de la couche de pollution. Ces courbes sont tracées pour les constantes d'arc comme définis par Obenaus ( $A=102$ ,  $n=0.70$ ) et pour une ligne de fuite  $L=25$  cm. D'après ces graphes on peut conclure que le nombre d'arcs a une influence sur les grandeurs électriques.

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.

Les tensions de contournement sont différentes selon le nombre d'arcs qui brûlant en parallèle donc la source doit fournir plus de tension pour maintenir ces arcs.

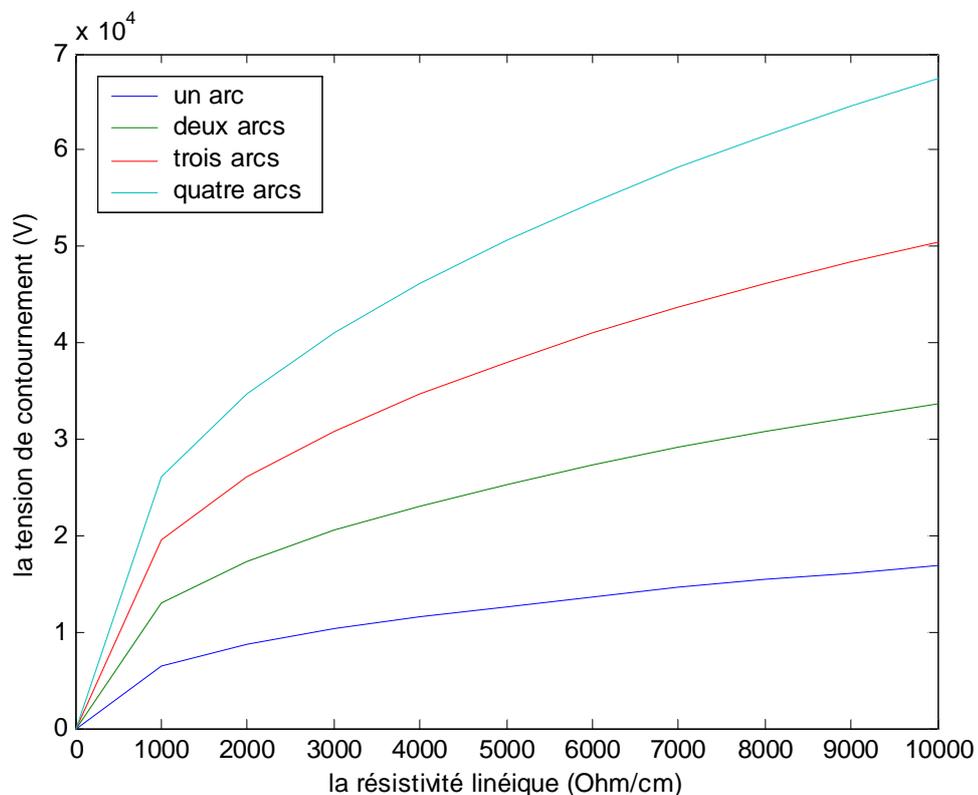


Fig.3. 10. Tension de contournement en fonction de la résistivité linéique.

La figure suivante visualise la variation de courant de contournement en fonction de la résistivité de la couche de pollution. Les constantes d'arcs sont pris comme précédemment et même pour la longueur de fuite.

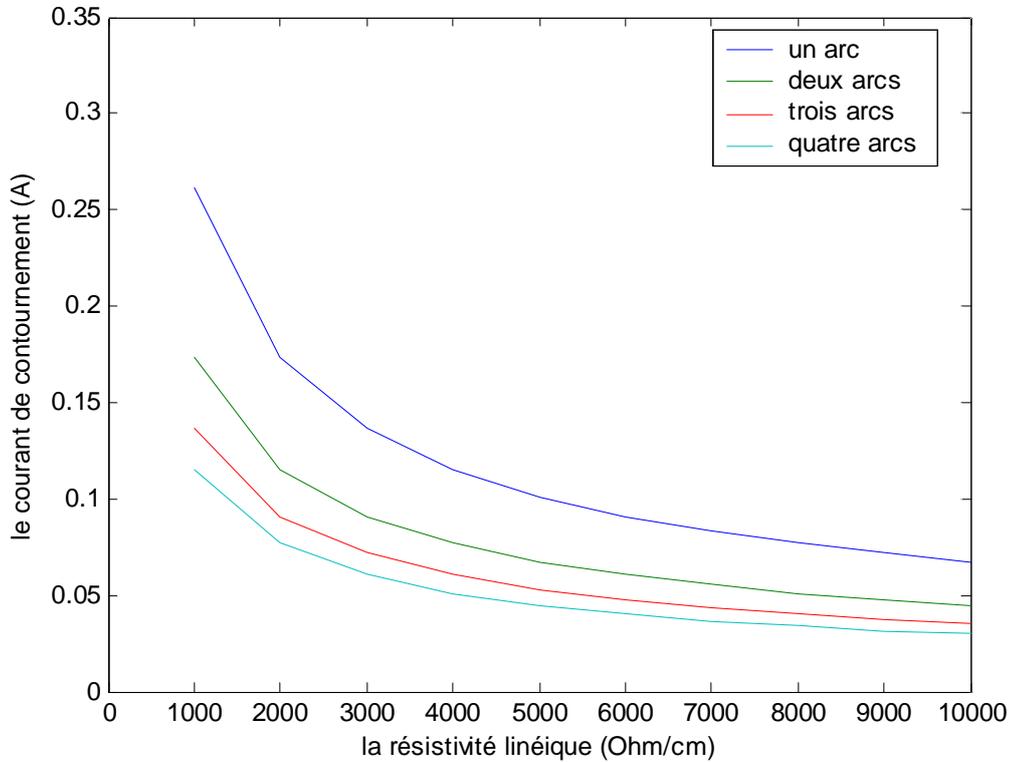


Fig.3.11. Courant de contournement en fonction de la résistivité linéique.

Les courants critiques diminuent lorsque la résistance linéique augmente. Selon ces graphes le nombre d'arcs influe sur le courant de contournement.

Les figures ci-après illustrent la variation de la tension et de courant de contournement en fonction de la résistivité de pollution pour le cas alternative.

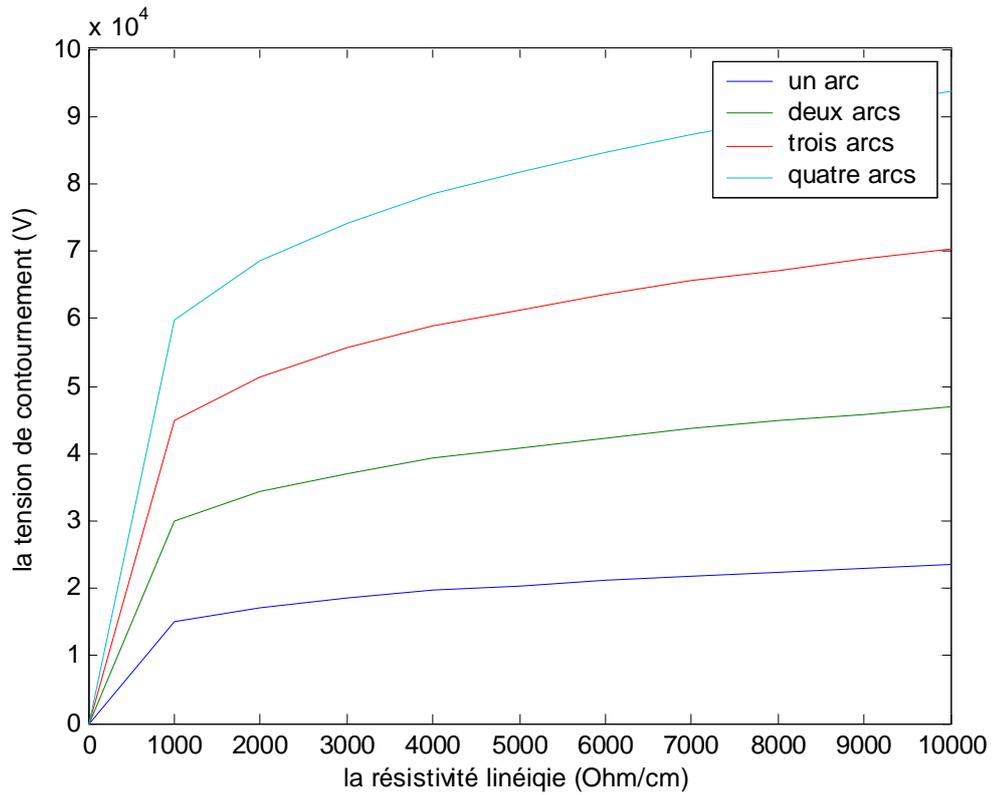


Fig.3.12. Tension de contournement en fonction de la résistivité linéique.

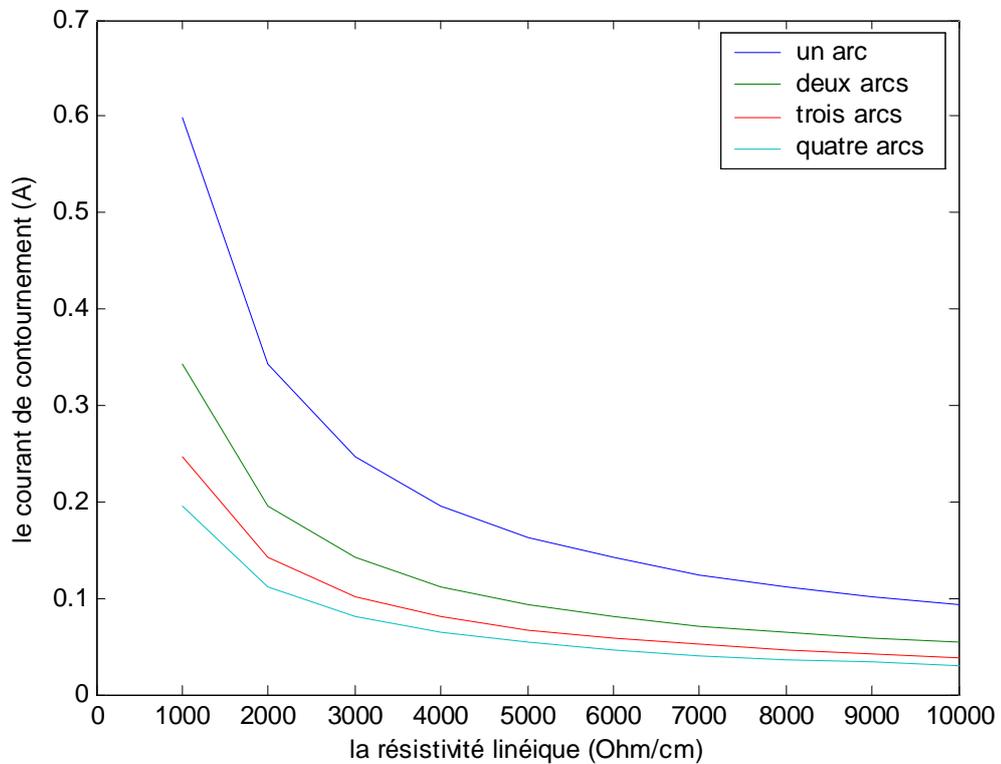


Fig.3.13. Courant de contournement en fonction de la résistivité linéique.

D'après les figures précédentes, la tension de contournement sont plus élevée dans le cas alternatif que dans le cas continu car les arcs créés en continu persistent longtemps.

Le nombre d'arcs a une influence directe sur la tension et le courant de contournement.

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

Dans ce chapitre, on a exposé les différents modèles des auteurs précédents en ce qui concerne la décharge électrique multi-branches. Plus tard on a présenté le modèle de **Cheng** et **Nour** adapté par **Mahi** qui repose sur la ramification de la colonne principale de la décharge. Et dans la continuité des travaux de **D.Mahi**, on a présenté un modèle statique de la décharge électrique multi-branches qui décrit l'existence d'une zone de transition d'une décharge multi-branches à une décharge monobranchée, ce modèle permet de calculer la tension et le courant de contournement.

Compte tenu de la complexité des phénomènes mis en jeu ainsi que la forme d'isolateur haute tension on va essayer de simplifier leur géométrie en forme plat pour voir la répartition de champ électrique dans l'espace inter-électrodes ceci fait l'objet du suivant.

# *Chapitre IV*

---

---

## *Simulation des décharges électriques*

---

---

**IV.1. Introduction:**

Tous les travaux précédents sur le phénomène de contournement sont consacrés à la prédiction des conditions critiques et par suite peu de travaux existent sur la détermination de champ et du potentiel le long des isolateurs pollués.

Une alternative intéressante aux mesures expérimentales se trouve dans l'utilisation des méthodes numériques dont l'application aux domaines de l'électrotechnique et des hautes tensions n'est plus à montrer [59]. Entre autre, ces méthodes ont été utilisées avec succès dans l'étude de la distribution du potentiel et du champ électrique autour des isolateurs propres et pollués. Généralement, les méthodes numériques utilisées pour ce type de problème sont des différences finies, la méthode simulation de charge, la méthode des éléments finis, la méthode des éléments finis de frontières.

Le progrès de l'informatique ont permet de développer des méthodes numériques de calcul par l'intermédiaire d'un logiciel afin de déterminer de façon précise la distribution du champ et de potentiel électrique.

Le présent chapitre porte sur la détermination de la distribution de champ électrique dans l'espace inter-électrodes en tenant compte la géométrie réelle de l'isolateur haute tension. Nous avons étudié successivement deux situations autour de la géométrie. La première présente une configuration sans décharge et le deuxième avec une décharge pour situer la région dans laquelle la valeur de champ électrique qui correspond au champ d'amorçage de streamers qui contribue à l'allongement de la décharge jusqu'à le contournement totale de l'isolateur.

**IV.2. Détermination de la répartition du champ électrique et du potentiel:**

La complexité des formes de surfaces des lignes de transmission rend le problème du système haute tension très difficile quant au calcul de la répartition du champ.

Dans ce cas on recourt à la résolution de l'équation de LAPLACE en utilisant la méthode des éléments finis tout en imposant des conditions aux limites.

**IV.2.1. Equation de Maxwell [60] :**

Dans un milieu donné, les phénomènes électromagnétiques sont décrits par quatre fonctions qui dépendent du temps  $t$ .

- Le champ électrique  $E$ , qui est la dimension d'une force par unité de charge ( $V.m^{-1}$ )

- L'induction magnétique B, qui est la dimension d'une force par unité de courant (Tesla)
- Le champ magnétique H en (A.m<sup>-1</sup>)
- Le déplacement électrique D, en (C.m<sup>-2</sup>)

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho_v \quad (4.2)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4.3)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (4.4)$$

$\rho_v$  : la densité volumique de charges

Les relations qui donnent le lien entre D à E et B à H sont :

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (4.5)$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (4.6)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4.7)$$

Où

$\epsilon$ : permittivité relative

$\sigma$  : conductivité électrique

$\mu$  : susceptibilité du milieu.

Sous tension alternative, la dérivée par rapport au temps devient  $j\omega$

Avec

J : unité imaginaire

W : pulsation de la tension

Donc toutes les dimensions doivent multiplier par  $j\omega$

$$\text{rot } \vec{E} = -j\omega\mu \vec{H} \quad (4.8)$$

$$\text{div}(\epsilon \cdot \vec{E}) = \rho_v \quad (4.9)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \sigma \cdot \vec{E} + j\omega \vec{D} \quad (4.10)$$

En haute tension, les dimensions magnétique sont négligé par rapport aux dimensions électriques, ce pour cela on a :

$$\text{rot } \vec{E} = 0 \quad (4.11)$$

Dans les expressions précitées, on constate que les équations (4.9) et (4.11) qui déterminent les grandeurs électriques parmi celles qui génèrent les grandeurs magnétiques, peuvent être découplées, afin de déduire que (4.9) donne la forme locale du théorème du Gauss.

$$\vec{E} = -\text{grad}U \quad (4.12)$$

On procède comme suit :

Après l'introduction de l'expression (4.12) dans (4.9) on obtient (4.13) :

$$\text{div}(-\varepsilon.\text{grad}U) = \rho_v \quad (4.13)$$

### **Remarque 1 :**

Les équipements haute tension utilisant les isolants leur densité volumique est nulle et par suit l'expression (4.13) devient :

$$\nabla^2 U = 0 \quad \text{car } (\rho = 0) \quad (4.14)$$

Ce dernier c'est l'équation de LAPALACE qui gouverne la répartition du potentiel dans un milieu donné.

### **IV.2.2. Conditions aux limites et interfaces [62] :**

- a. Lorsqu'on borne le domaine d'étude par une frontière, on doit imposer des conditions aux limites au bord du domaine borné, ces conditions sont deux types :
  - La condition de **DRICHLET** (potentiel V connu sur la frontière).
  - La condition de **NEWMAN** (Newman homogène  $\frac{\partial V}{\partial n} = 0$ ).
- b. Au niveau des frontières de deux milieux, la constante de la permittivité absolue dans le domaine valide l'expression (4.14) et qui sera valable uniquement dans les milieux homogènes.

Au-delà de deux milieux l'expression (4.14) perd sa validité.

Dans ces conditions on doit chercher pour chaque milieu une approche et le lier aux autres solutions par les conditions d'interfaces.

**Remarque 2 :**

L'écriture des expressions à la zone de séparation de deux milieux différents (charge et courant superficiel nuls) sont :

$$U_1 = U_2 \quad (4.15)$$

Comme on déduit ceci pour les vecteurs déplacements

$$\vec{D}_1 \cdot \vec{n}_1 = \vec{D}_2 \cdot \vec{n}_2 \quad (4.16)$$

Où :

$\vec{n}_1, \vec{n}_2$  : Vecteurs unitaires dirigés vers l'extérieur des milieux 1 et 2 respectivement.

**IV.2.3. Les logiciels de simulation :**

Plusieurs logiciels ont été utilisés par nos prédécesseurs dans le domaine de la modélisation de la décharge électrique et chaque logiciel a des propriétés différentes, parmi celle-ci on peut citer *flux2D*, *flux3D*, *Lorentz2D*, *Coulomb3D*. Dans notre travail on a utilisé le *Comsolmultiphysiques*.

**IV.2.3.1. Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics :**

Il existe des différents outils de résolutions des équations partielles, dans notre cas, on a utilisé le logiciel de COMSOL. Cet outil résout les équations par la méthode des éléments finis.

COMSOL permet de modéliser les différents phénomènes parmi celles-ci :

- Electromagnétique
- Electrostatique
- Physique des plasmas...

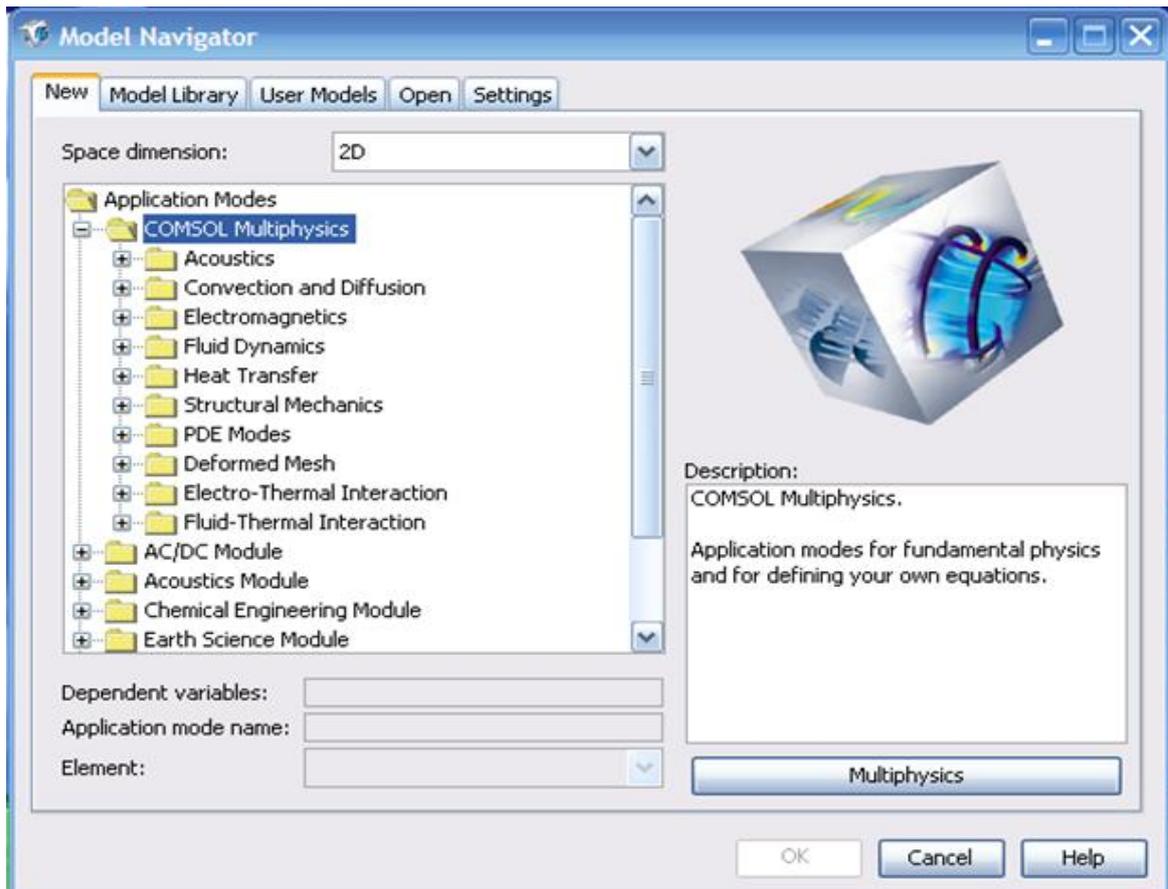


Fig.4.1. Fenêtre de navigateur de modèles COMSOL.

COMSOL est un logiciel complet intégrant au sein d'un programme les étapes essentielles d'un projet éléments finis tel que :

#### IV.2.3.1.1. Description géométrique :

La première étape dans la modélisation d'un dispositif électromagnétique est description géométrique de ce dispositif. Elle nécessite la définition d'un domaine d'étude et l'introduction de l'ensemble des côtes et dimensions des différentes pièces.

- En ce qui concerne le domaine d'étude, il est intéressant d'ajuster ses dimensions en tenant compte d'une part des éventuelles symétries où périodicités géométriques et physiques.
- En ce qui concerne l'introduction de l'ensemble des caractéristiques dimensionnelles, descripteur géométrique est de type frontalier, ce qui signifie qu'un volume est décrit par les faces qui le bordent, qu'une face est décrite par les lignes qui la bordent et qu'une ligne est décrite par une relation vers des points.

#### IV.2.3.1.2. Maillage :

La résolution d'un problème par la méthode des éléments finis nécessite le découpage du domaine d'étude en éléments finis tout en respectant les interfaces de la géométrie.

#### IV.2.3.1.3. Résolution :

Le module de résolution permet de :

- Résoudre un problème.
- Vérifier la cohérence d'un problème.
- Organiser des résolutions évolutives.
- Configurer le solveur.

#### IV.2.3.1.4. Exploitation des résultats :

Le post-processeur de COMSOL permet d'appréhender de nombreuses grandeurs soit directement (potentiels, champs,.....) soit indirectement en utilisant des formules d'exploitation pour définir interactivement la grandeur physique souhaitée (énergie, courant,.....).

#### IV.3. Méthode de simulation :

Dans tous les travaux expérimentaux des chercheurs précédents, le phénomène de contournement est modélisé par le modèle ci-dessous Fig. 4.2.

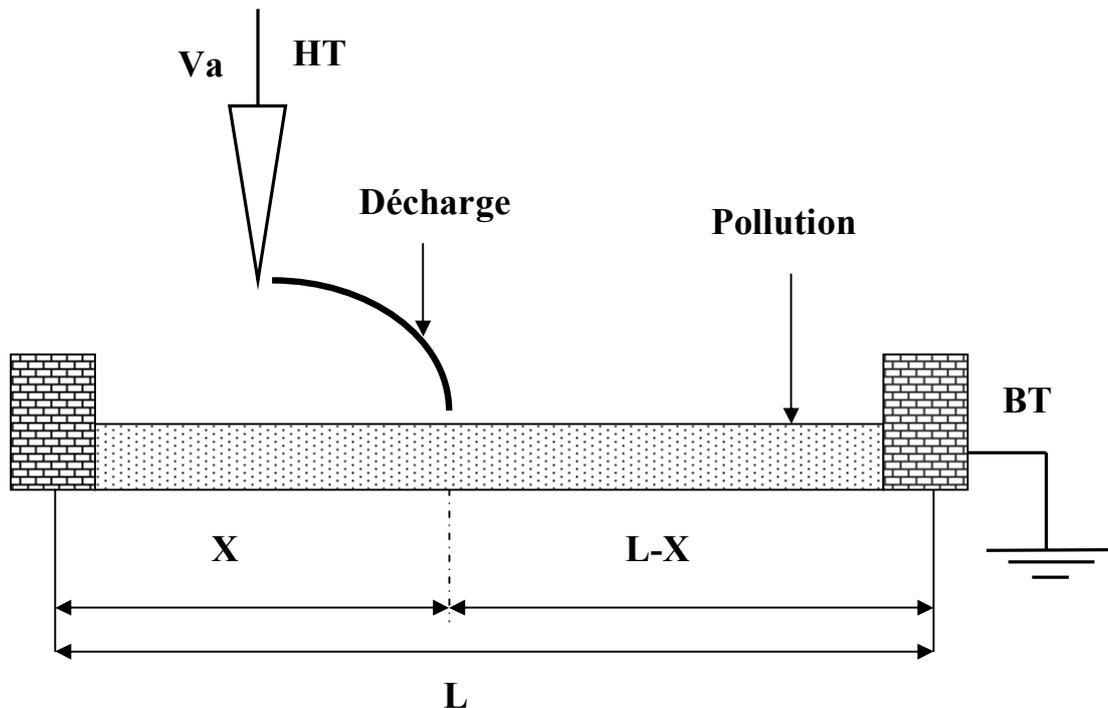


Fig.4.2. Le modèle expérimental [30].

Pour notre cas l'isolateur en question est constitué d'une plaque circulaire de plexiglas, munie de deux électrodes en cuivre l'une circulaire interne mise à la haute tension et l'autre externe mise à la terre. On ajoute que ce modèle est correspond au modèle bi-contournable de Flazi [46].

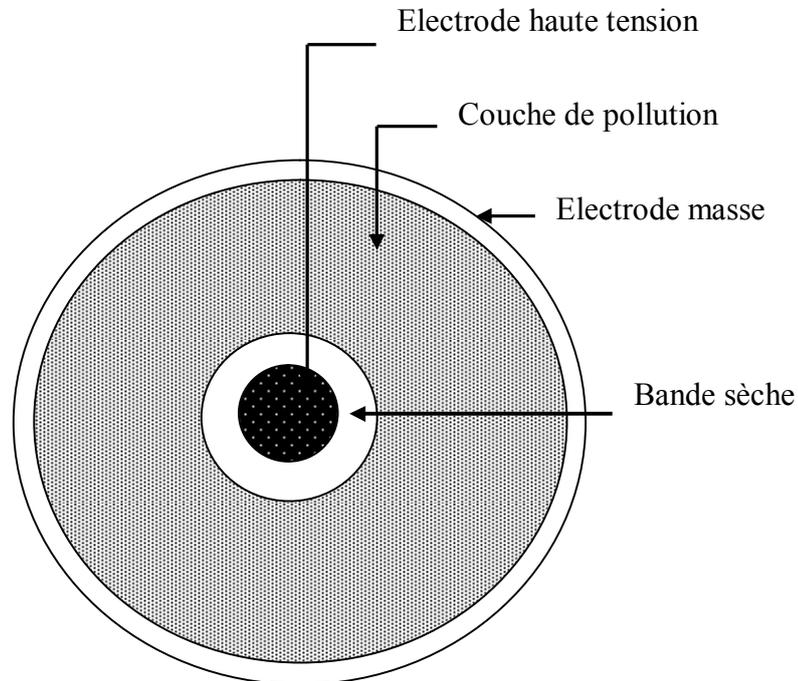


Fig.4.3. Modèle de simulation.

#### IV.4. Distribution du champ électrique en absence de la décharge :

La figure ci-dessous représente la répartition du champ le long du notre modèle lorsque la tension appliquée est **13 KV** et une résistance linéique de pollution

$$r_p = 5000 \Omega / cm$$

A partir de cette figure, le champ est intense au voisinage des électrodes parce qu'ils représentent des surfaces équipotentielles et que le champ du côté électrode haute tension est très important que celui du côté masse.

Grâce à cette distribution du champ, nous pouvons prédire l'endroit de l'initiation de la décharge pour tous les points situés plus proche de l'électrode haute tension, donc le claquage de l'air va produire spontanément à l'aplomb de cette électrode. D'après la répartition du potentiel on a vu qu'il aura une chute de potentiel entre l'électrode haute tension et l'électrolyte de **12680 V** car en absence du courant qui traverse l'électrolyte prolonge l'électrode masse.

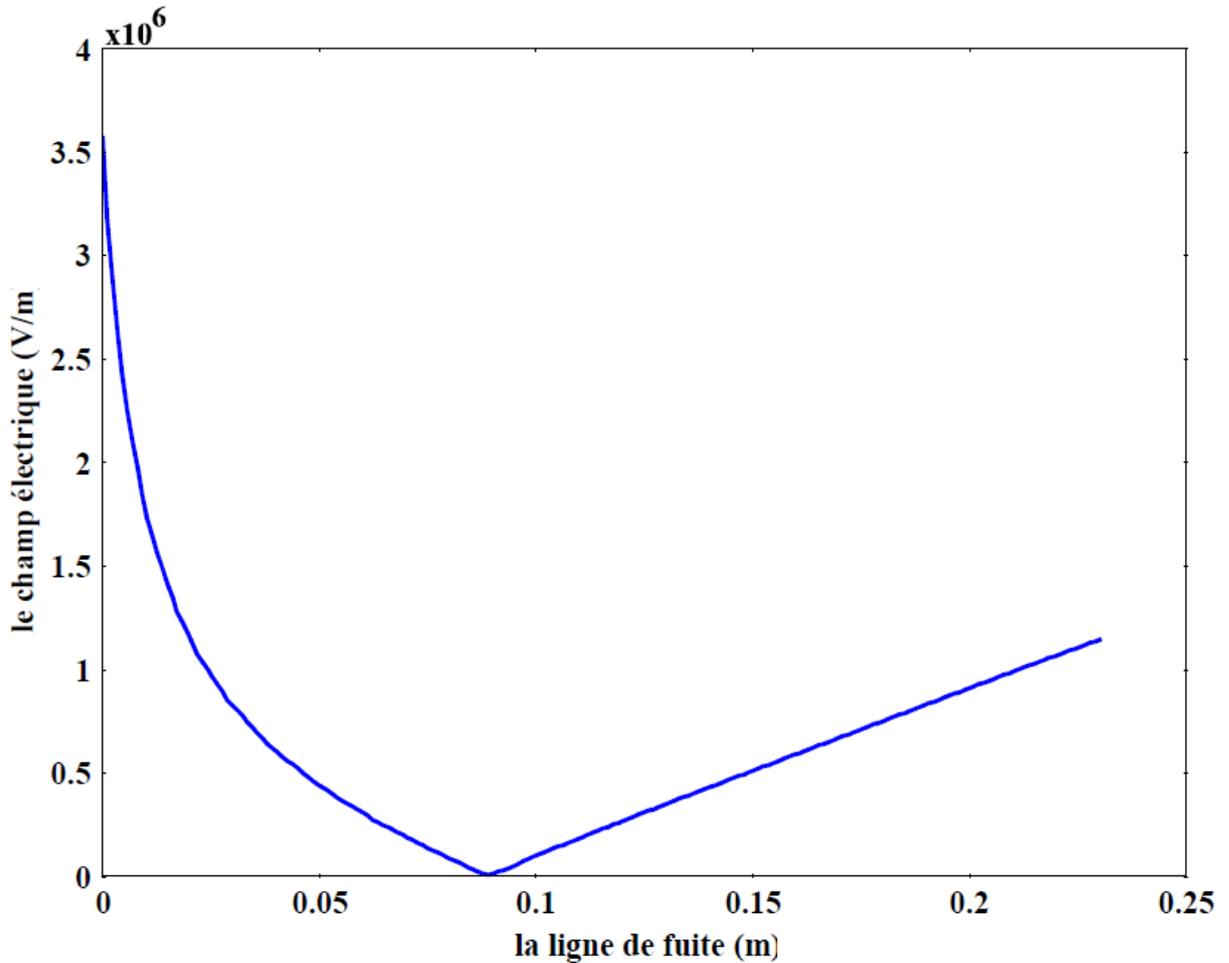


Fig.4.4. Répartition du champ électrique dans l'espace inter-électrodes avant l'amorçage de la décharge.

#### IV.5. Distribution du champ électrique en présence de la décharge:

##### 1. Modélisation de la décharge électrique :

Parmi les problèmes trouvés c'est la modélisation de la décharge électrique parce que le logiciel n'est pas conçu pour une modélisation directe de ce phénomène, donc à partir de la tension d'arc on arrive à une expression qui permet de modéliser la décharge électrique par une quantité de charge.

La tension appliquée aux bornes de l'isolateur est donné par l'expression:

$$V = V_{\text{arc}} + V_p + V_e \quad (4.17)$$

La tension accumulée aux électrodes  $V_e$  peut être négligé où en l'introduisant dans la chute totale aux bornes de l'isolateur et en substituant chaque tension par sa valeur.

L'équation (4.17) devient :

$$V = \frac{A \cdot x}{I^n} + R_p(x) \cdot I \quad (4.18)$$

D'après cette équation, le courant dans la décharge est donné par la relation :

$$I = \frac{V - A \cdot x \cdot I^{-n}}{R_p(x)} \quad (4.19)$$

Pour déterminer le courant  $I$ , La méthode de Newton est la plus indiquée a fourni la solution de l'équation précédente, La solution s'écrit sous la forme :

$$I_p = I_{p-1} - \frac{R_p(x) - (V - A \cdot x \cdot I_{p-1}^{-n})}{R_p(x) - A \cdot n \cdot x \cdot I_{p-1}^{-n-1}} \quad (4.20)$$

Où  $p$  est le nombre d'itérations. La valeur initiale de  $I_0$  choisie arbitrairement.

La résistance du canal de l'arc peut s'écrire :

$$R_{\text{arc}} = \frac{V_{\text{arc}}}{I} = \frac{A \cdot x}{I^{n+1}} \quad (4.21)$$

La relation entre le rayon de l'arc  $r_d$  et le courant de l'arc est donné par la relation selon Wilkins [7] :

$$r_d = \sqrt{\frac{I}{1.45 \cdot \pi}} \quad (4.22)$$

Le canal de l'arc est assimilable à un cylindre de section  $S$  avec  $S = \pi \cdot r_d^2$ , de longueur  $x$  et de résistance  $R_{\text{arc}}$ , dans ces conditions, la résistance du canal conducteur est donnée par :

$$\rho_{\text{arc}} = \frac{R_{\text{arc}} \cdot S}{x} = \frac{R_{\text{arc}} \cdot \pi \cdot r_d^2}{x} \quad (4.23)$$

Cette résistivité peut être déterminée en fonction de courant, en substituant dans cette dernière équation  $R_{\text{arc}}$ ,  $r_d$  par leurs expressions respectives (4.21) et (4.22)

$$\rho_{\text{arc}} = \frac{A}{1,45 \cdot I^n} \quad (4.24)$$

A partir de cette équation, le canal d'arc est modélisé par une quantité de charge dans notre simulation sous Comsol.

Les matériaux que nous avons utilisés dans notre modèle sont: le Plexiglas qui représente l'isolateur. Leurs propriétés sont la suivante:

Le plexiglas:  $\epsilon_r = 3$

L'eau salée :  $\epsilon_r = 80$ ,  $\rho = 5000 \Omega/\text{cm}$

L'Air :  $\epsilon_r = 1$ .

Si la tension appliquée entre les 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 [13, 14] est égale à 1 % de la longueur de fuite totale de l'isolateur. Les constantes d'arc sont prises comme dans le chapitre précédent.

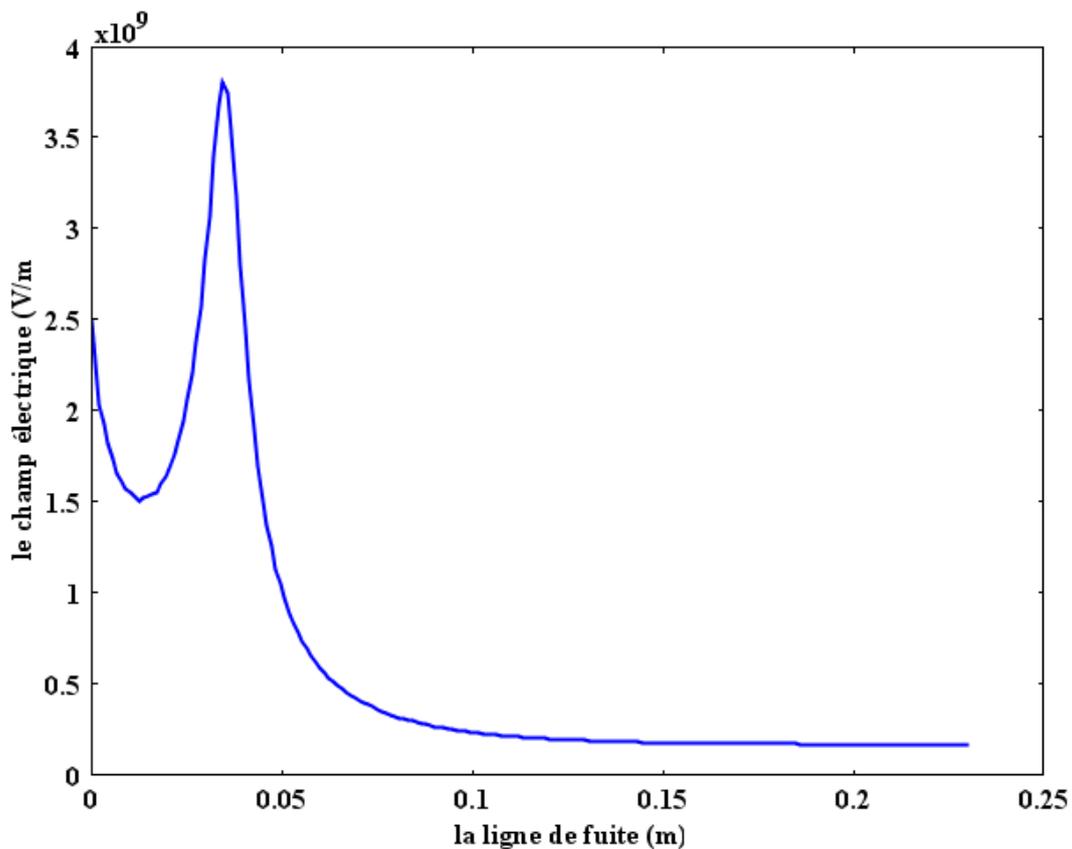


Fig.4.5. Répartition du champ électrique dans l'espace inter-électrodes après l'amorçage de la décharge.

La décharge va déformer le champ, donc sa présence va augmenter le champ entre le pied de l'arc et l'électrode haute tension et faire le diminuer entre le pied et l'électrode masse.

La présence de la décharge a réduit la chute de tension entre l'électrode haute tension et l'électrolyte à **1090V**. Cette distorsion du champ n'est explicable que par des charges d'espace créées par les processus microscopiques.

## 2. Présence d'autres branches de la décharge :

### a) Présence d'une seule branche :

On a essayé de modéliser la région cathodique à l'aide des conditions de **DRICHLET** par la création d'une bande de 0.5 mm et on a fixé la tension aux bornes de celui-là afin d'estimer la quantité de la charge d'espace, cette modélisation a été proposée par nos prédécesseurs de la région cathodique à cause de la charges d'espaces créés dans ce dernier et en s'inspirant des travaux précédents, ces charges existent près de la cathode.

Afin de pouvoir estimer la quantité de charge d'espace créées dans cette partie de la décharge, nous utilisons l'expression de Cobine [20] :

$$\rho = \frac{2 \cdot \epsilon_0 \cdot U_c}{d^2} \quad (4.25)$$

Avec :

$\rho$ : densité de charges

$\epsilon_0$  : permittivité diélectrique du vide,

$U_c$ : chute de tension au voisinage de la cathode

$d$ : longueur de la zone cathodique.

Pour déterminer la longueur de la région cathodique, nous avons sommes servis d'une autre expression de Cobine qui établit une relation approximative entre cette longueur et le libre parcours moyen des électrons  $\lambda_m$  :

$$d = 100 \cdot \lambda_m \quad (4.26)$$

La valeur du libre parcours moyen des électrons dans les gaz ionisés est exprimée d'après Engel [20] par :

$$\lambda_m = \frac{1}{n \cdot \sigma} \quad (4.27)$$

Où :  $n$  est la densité de molécules et  $\sigma$  est la section efficace totale de collisions électron-molécules, le l'ordre de grandeur de  $n\sigma$  est de  $10^{22}$  m<sup>-1</sup>. La densité de molécules  $n$  a été calculée à partir de l'équation décrivant les gaz parfaits [64] :

$$P.V = n.R.T \tag{4.28}$$

Pour  $T=5000K$  sa valeur est de  $2.5 \times 10^{22}$  m<sup>-3</sup>. Donc, pour  $\sigma = 10^{-20}$  m<sup>2</sup>. La valeur de la densité calculée est de  $2.5 \times 10^{22}$  m<sup>-3</sup> [62].

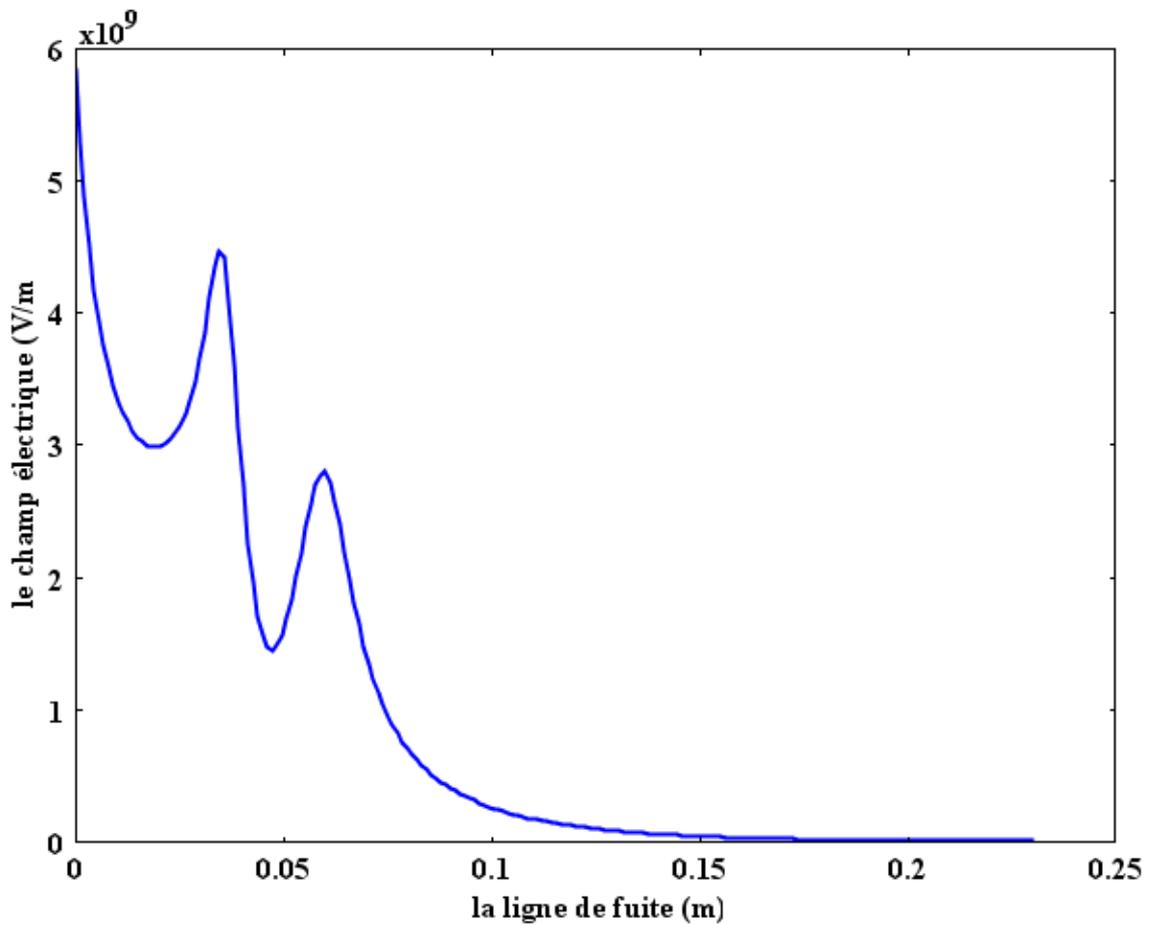


Fig.4.6. Répartition du champ électrique dans l'espace inter-électrodes après l'amorçage de la décharge et en présence d'une seule branche.

D'après ce résultat, le champ électrique est déformé à chaque branche cela est due à la charge d'espace créée juste au pied de la décharge puisque ce sont des zones de forte ionisation.

## b) Présence de deux branches:

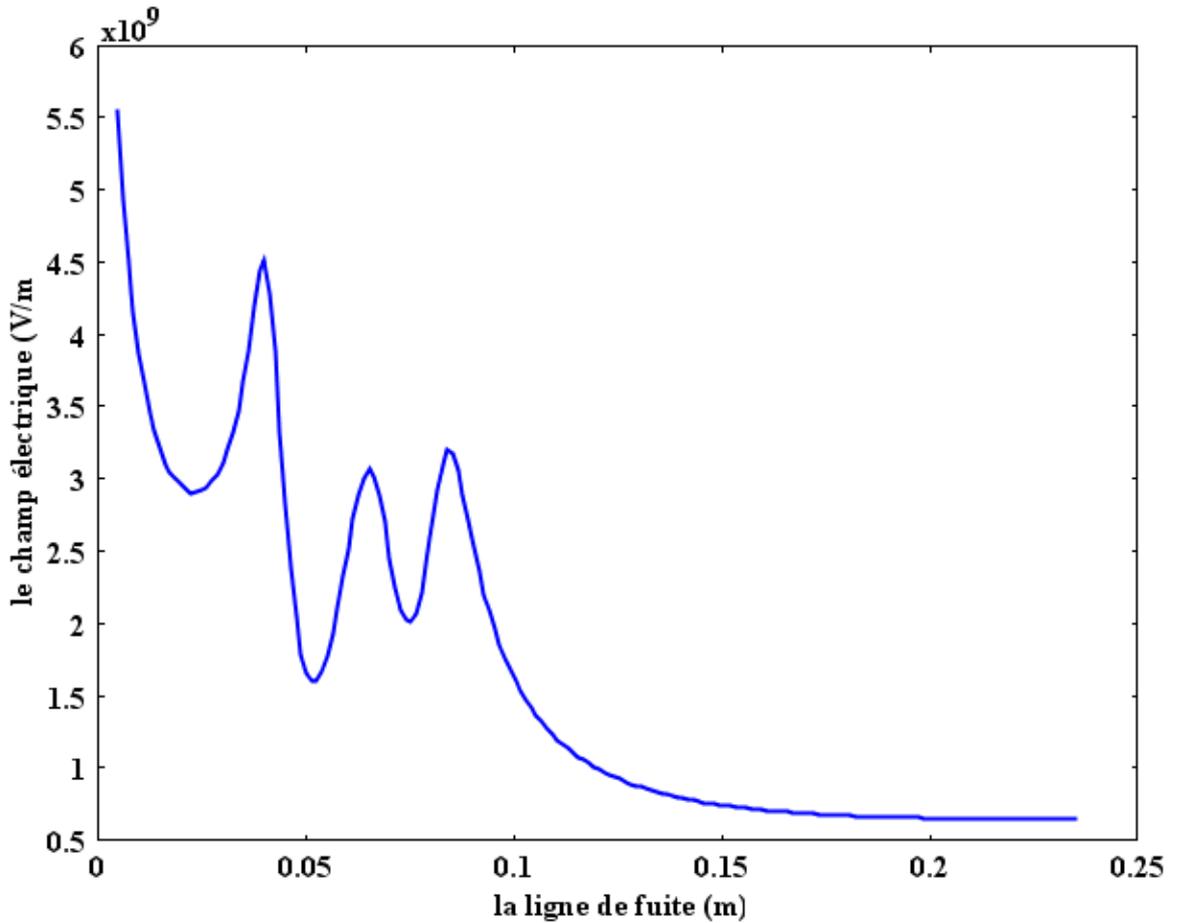


Fig.4.7. Répartition du champ électrique dans l'espace inter-électrodes après l'amorçage de la décharge et en présence de branches de la décharge

#### IV.6. Les paramètres de la décharge :

Face à la difficulté de phénomène de la décharge multi-branches, on a simplifié le cas c'est-à-dire seulement un arc est pris en considération. Celui-là est la colonne principale de la décharge et on établit un programme qui permet de suivre l'évolution temporelle des différents paramètres de la décharge (Résistance, longueur, courant, rayon de la décharge, vitesse).

L'organigramme de calcul est schématisé sur la figure suivante.

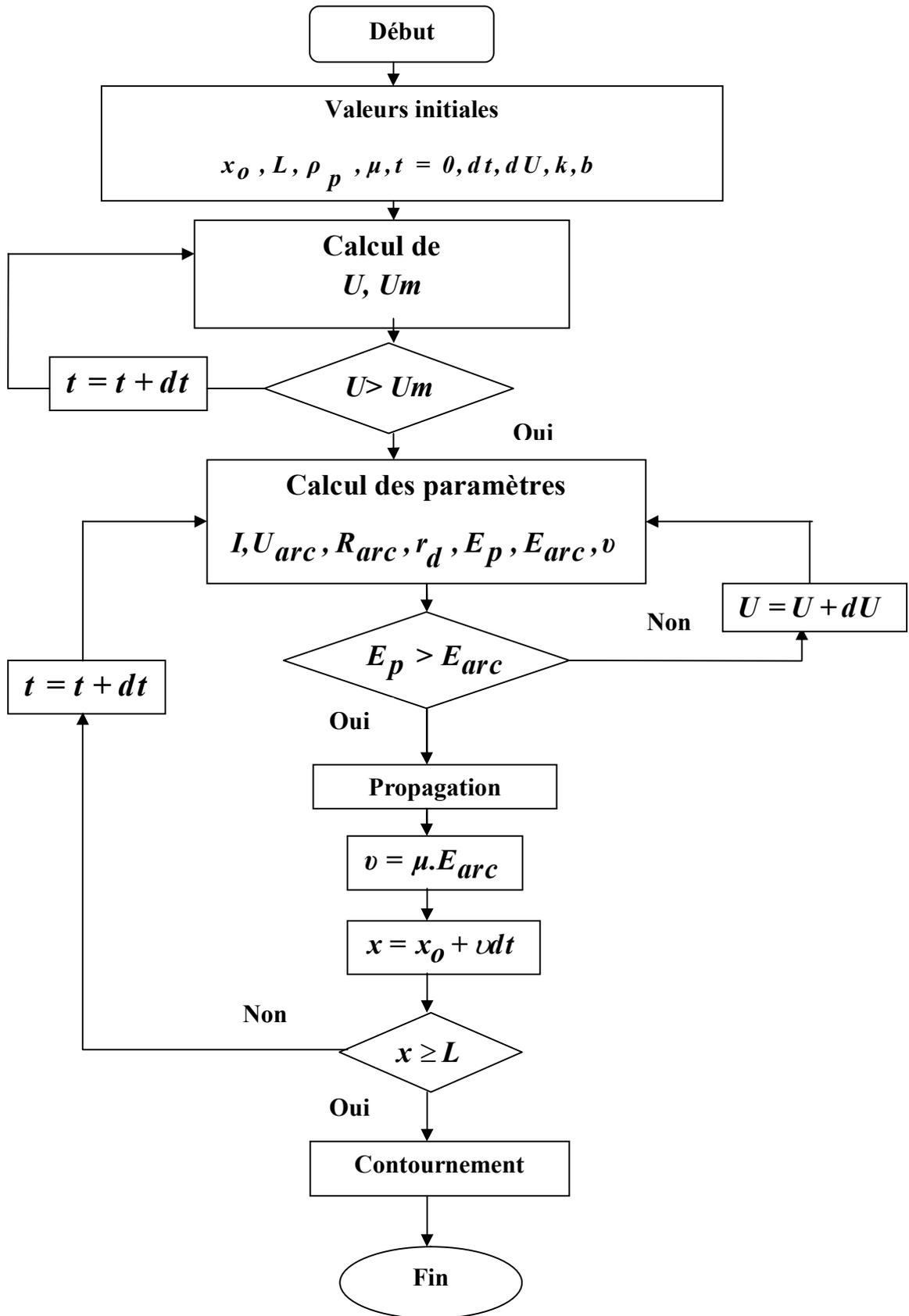


Fig.4.8. Organigramme de modèle.

**IV.6.1. Tension d'arc :**

D'après la figure suivante, la tension d'arc comporte deux régimes différents, au début la tension d'arc est proportionnelle au temps donc c'est la phase de préparation de la décharge. Plus tard la tension diminue jusqu'à annulé c'est la phase de contournement parce que durant le contournement le canal d'arc devient plus en plus conducteur.

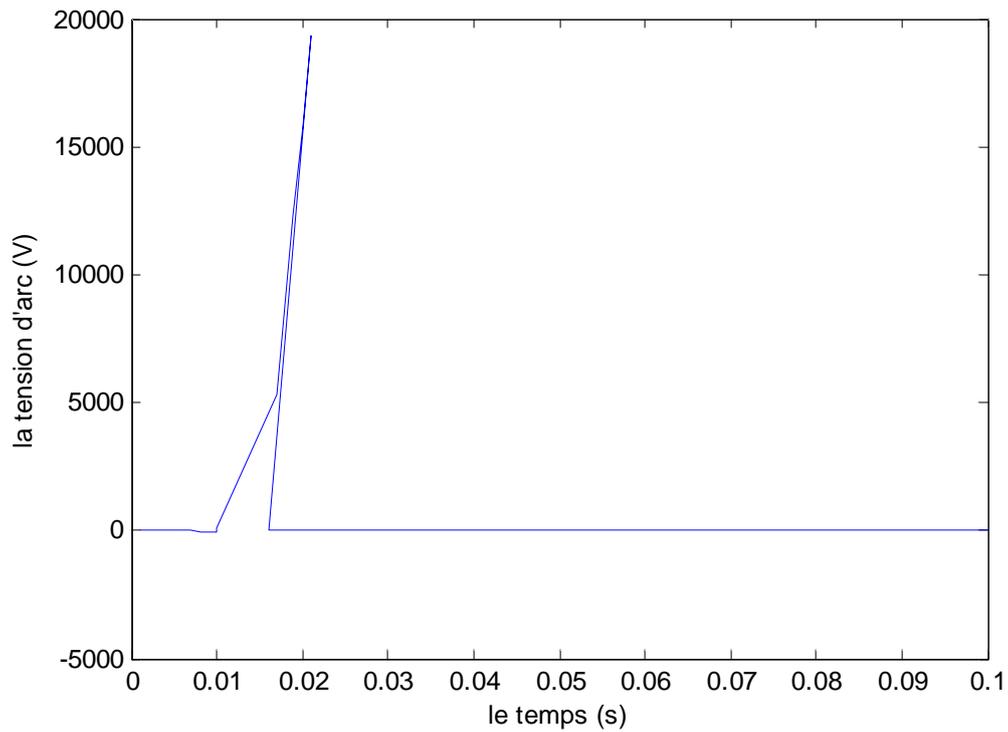


Fig.4.9. Variation de la tension d'arc en fonction du temps.

## IV.6.2. Courant de la décharge :

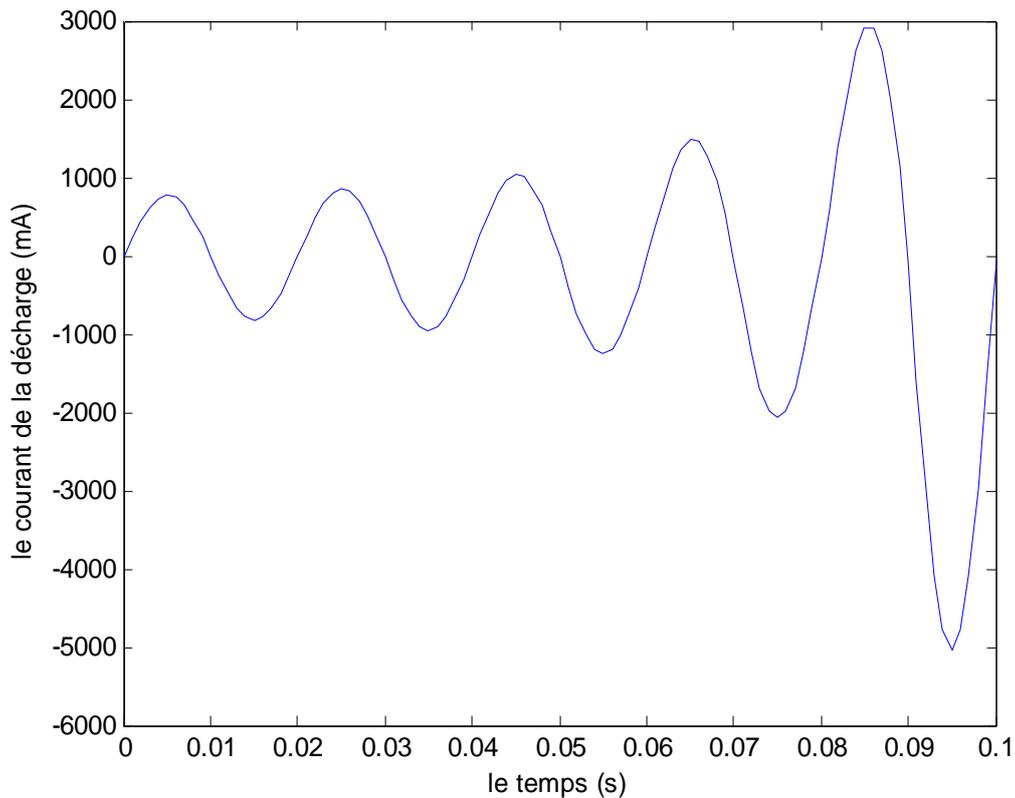


Fig.4.10. Courant de fuite en fonction du temps.

La figure précédente, donne le courant de la décharge en fonction du temps, le courant varie avec le temps d'une façon sinusoïdale mais avec une faible amplitude ceci est expliqué par la préparation de la décharge suivie par une apparition de la première couronne. Plus tard le courant devient sinusoïdal donc c'est la phase de contournement. On ajoute que ce résultat est en concordance aux résultats expérimentaux de **Zegnini [60]**.

## IV.6.3. Résistance de l'arc :

La variation de la résistance de l'arc en fonction du temps est présentée à la Fig (4.10). Avant le contournement, cette résistance est grande, ensuite elle diminue jusqu'à annuler c'est la phase de contournement où le canal de l'arc devient un conducteur.

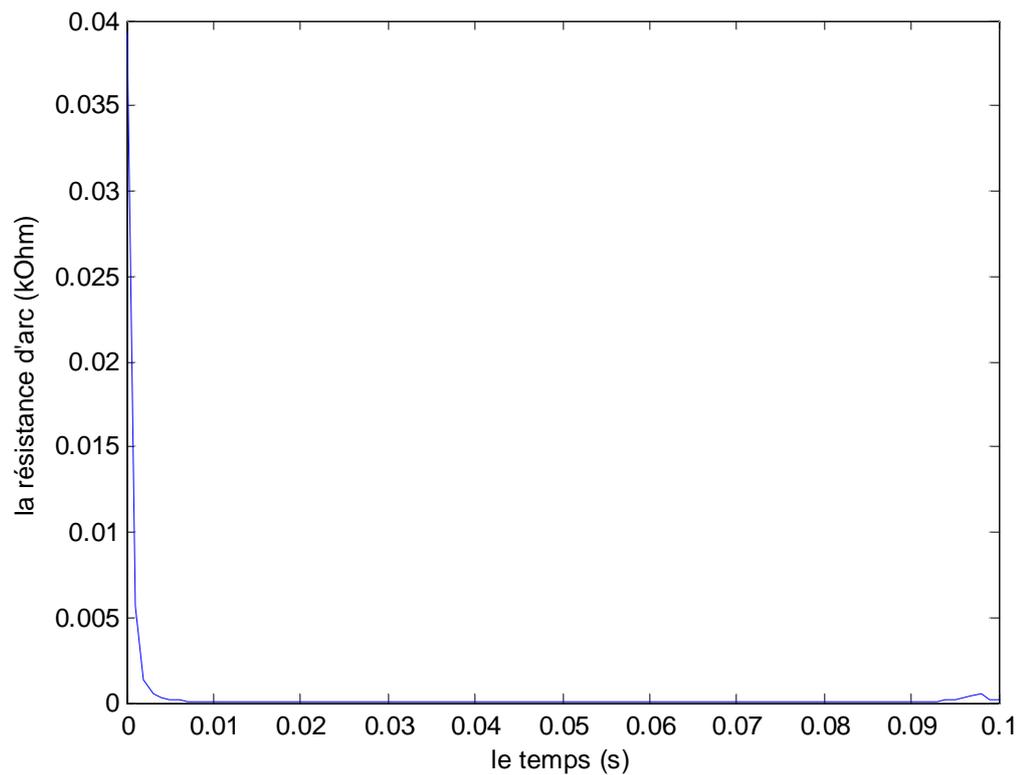


Fig.4.11. Résistance de l'arc en fonction du temps.

#### IV.6.4. Rayon de la décharge :

La Fig (4.11) montre la variation du rayon de la décharge en fonction du temps, Son allure est similaire à celle du courant de fuite. En effet, le rayon de la décharge augmente au cours du temps et il annule lorsque le courant passe par zéro. 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.

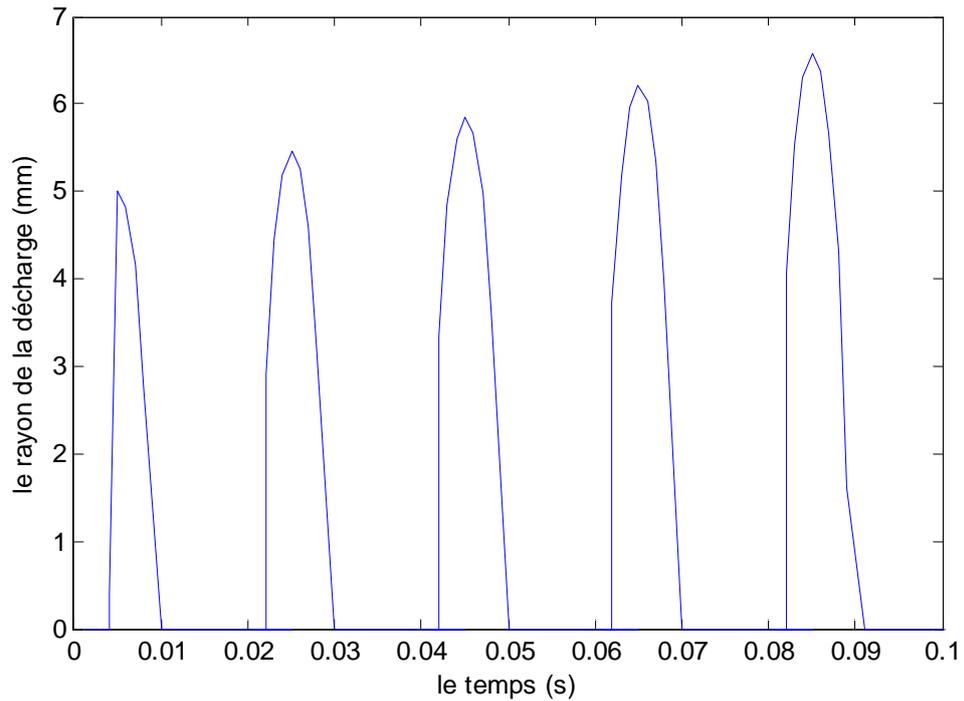


Fig.4.12. Rayon de l'arc en fonction du temps.

#### IV.6.5. Vitesse de propagation :

La fig. (4.12) illustre l'évolution temporelle de la vitesse de d'élongation de la décharge électrique. Au début la vitesse augmente jusqu'à un pic ceci correspond à la phase de la propagation de la décharge. Après cette augmentation la vitesse diminue en fonction du temps. Cette diminution est plus accentuée durant la phase de contournement. Ceci est expliqué par la diminution du champ au pied de cette décharge.

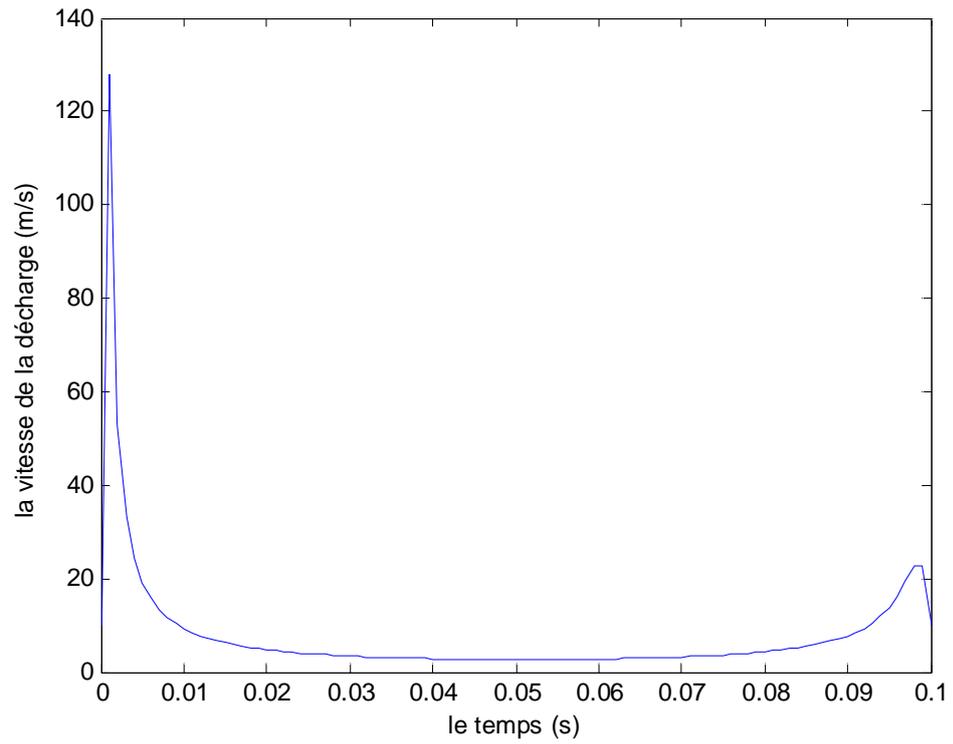


Fig.4.13. Vitesse de propagation de la décharge en fonction de temps.

**IV.6.7. Longueur de la décharge :**

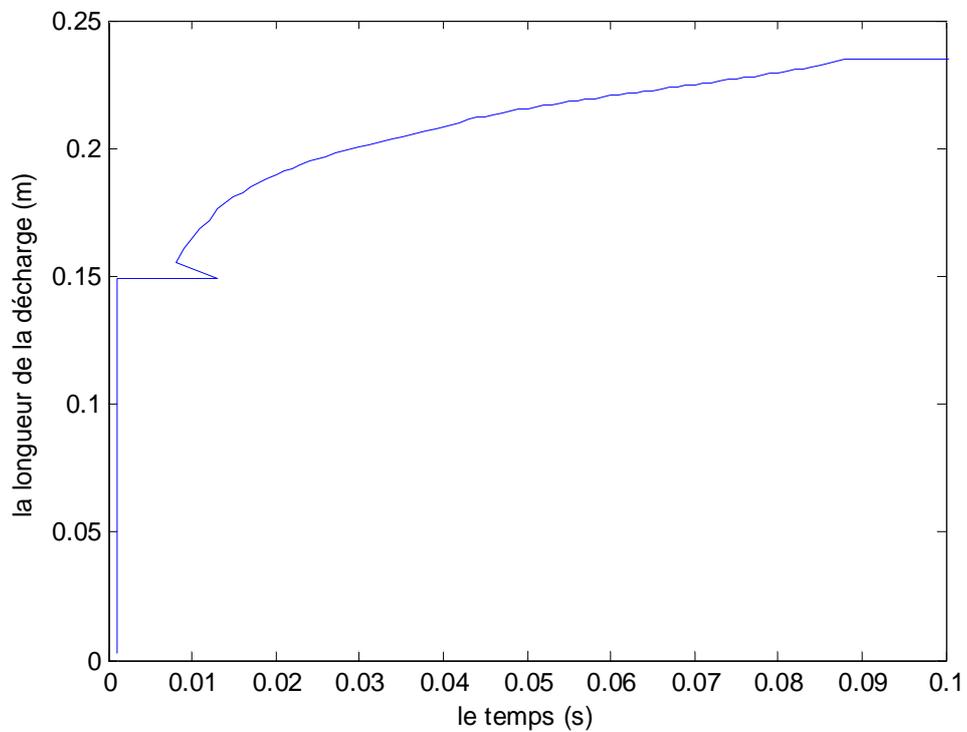


Fig.4.14. Longueur de la décharge en fonction de temps.

La figure précédente présente la variation de la longueur de la décharge électrique en fonction du temps. D'après cet allure, l'augmentation de la longueur est rapide durant un temps plus petit celui-là est la phase de propagation de la décharge, après cette augmentation la variation est presque linéaire jusqu'à le contournement.

#### **IV.8. Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a simulé la surface d'isolateur par un modèle circulaire avec une couche de pollution uniforme et d'après les résultats obtenus, le champ électrique est très intense au voisinage de l'électrode haute tension.

Suite à ces résultats la décharge électrique s'amorce dans l'endroit le plus proche de l'électrode haute tension si la conductivité est uniforme, cette variation du champ est différente dans le cas statique c'est dire en absence de la décharge et on ajoute que la présence de ce dernier augmente le champ ce qui permet à l'apparition des streamers. Dans le cas contraire, il est amorcé aux bornes de la bande sèche.

L'évolution temporelle des différents paramètres de la décharge montre que tous les paramètres subissent deux évolutions, le premier correspond à la phase de la propagation et le deuxième à la phase de contournement.

---

---

# ***Conclusion générale***

---

---

Dans ce travail on s'est à l'étude de phénomène de contournement dans deux cas, le premier en présence d'une seule branche de la décharge et le deuxième à la présence de plusieurs branches. Ce qui permet de mieux comprendre le mécanisme de contournement et les différents paramètres qui peuvent influencer sur le contournement.

Dans le premier chapitre de ce mémoire, on a présenté un résumé d'une étude bibliographique sur les isolateurs et la pollution de celui-ci. Avec la présentation des définitions des paramètres entrant en jeu et le développement du processus de contournement. Ensuite on a cité les différents modèles statiques de laboratoire pour présenter un isolateur pollué soumis à une décharge électrique dans l'air. Plus tard on a exposé les deux types de propagation de la décharge et les critères de propagation faits par les auteurs précédents.

Dans le deuxième chapitre, on a proposé un modèle mathématique pour la modélisation des décharges électriques sur les surfaces isolante polluée utilisant l'équation de Reider pour décrire la tension d'arc (modèle de **Roa** et **Gopal**) en rappelant que tous les travaux précédents utilisent l'équation d'Ayrton dans l'espoir que ce modèle sera d'une aide appréciable à ceux qui veulent suivre cette étude. Ensuite on a donné les différents modèles dynamiques c'est-à-dire les modèles qui prennent en compte l'évolution temporelle des paramètres de la décharge électrique. Ces modèles sont plus avantageux que les modèles statiques.

Dans le troisième chapitre, on a présenté les travaux antérieurs dans le domaine de la décharge électrique multi-branches en évoquant les résultats des différents modèles, la propagation en série selon Rizk et en parallèle selon Cheng et Nour. Ensuite et dans la continuité des travaux de D.Mahi, on a proposé un modèle statique de la décharge multi-branches qui décrit l'existence d'une zone de transition d'un modèle multi-arcs à un modèle mono-arc, ce modèle nous permet de calculer la tension et le courant de contournement.

Dans le dernier chapitre, on a essayé de calculer la répartition de champ électrique dans l'espace inter-électrodes en utilisant le Comsol basé sur la méthode des éléments finis et on a déterminé les zones de champ fort qui permet à l'évolution de la décharge, face à la difficulté de phénomène de la décharge électrique multi-branches on a simplifié le cas pour suivre l'évolution temporelle des différents paramètres de la décharge (Tension, courant, longueur, rayon, vitesse de propagation) et un programme écrit sous Matlab.

Le présent mémoire fait l'objet de la décharge électrique multi-branches d'un point de vue statique. Comme perspectives on envisagera l'étude dynamique de la décharge électrique en utilisant la tension d'arc établie par Roa et Gopal puisque tous les travaux précédents sont basés sur la tension d'arc d'Obenaus et proposera un modèle de laboratoire pour valider les résultats numériques.

# Bibliographie

- [1] **A. Smaili**, « *Dynamique de la décharge électrique sur une surface isolante et revue des modèles avec prédiction de contournement des isolateurs pollués H.T* » Thèse de doctorat d'état, l'université Djillali Liabes de Sidi Belabbes, Décembre 2007.
- [2] **F. Obenaus** « *Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge* », Deutsche Elektrotechnik, vol. 4, 1958, p. 135-136.
- [3] **F. Obenaus**, « *Die überschlagspannungsverschmutzter Isolatoren* »; ETZ, vol 56, pp 369-70, 1935
- [4] **F. A. M Rizk**, « *Mathematical models for pollution flashover* », Electra, n°78, 1981. pp. 71-103.
- [5] **L. Alston et S. Zoledziowski**, « *Growth of Discharges on Polluted Insulation* » P IEEE, Vol. 110, pp. 1260-1266, 1963.
- [6] **B. F Hampton**, « *Flashover Mechanism of Polluted Insulation* », P IEEE, Vol. 111 pp. 985-990, 1964.
- [7] **R. Wilkins**, « *Flashover Voltage of HV, Insulators with Uniform Surface Pollution Films* », P IEEE, Vol. 116, pp. 54-64, 1969.
- [8] **A. M. Rahalet C. Huraux**, « *Flashover Mechanism of High Voltage Insulators* », IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. Pas-98, N°. 6, pp. 2223-2230, 1979.
- [9] **P. S. Gohsh, S. Chakravortiet N. Chatterjee**, « *Estimation of Time to Flashover Characteristics of Contaminated Electrolytic Surfaces using a Neural Network* », IEEE Trans. on Dielect and Elect Insul, Vol. 2, N° 6, pp. 1064-1074, 1995.
- [10] **P. Claverie et Y. Porcheron**, « *How to Choose Insulators for Polluted Areas* », IEEE Trans. PAS, Vol. 92, N° 3, pp. 1121-1131, 1973.
- [11] **S. Gopale et Y. Narayana Rao**, « *On the Flashover Mechanisms of Polluted Insulators* », I S P P I S D, IIT, MADRAS, pp. 1.06, 1983.
- [12] **S. Hesketh**, « *General Criterion for the Prediction of Pollution Flashover* », Proc IEE, Vo. 114, N° 4, pp. 531-532, April 1967.
- [13] **S. Anjana et 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, 1989.
- [14] **R. Sundararajan et R.S. Gorur**, « *Dynamic Arc Modeling of Pollution Flashover of Insulators under dc Voltage* », IEEE Trans. on Elect. Insul. Vol. 28 N° 2, pp. 209-219, April 1993.

- [15] **Z. Renyuet G. Zhicheng**, «*A Study on the Difference between the Flashover Voltages of Contaminated Insulators under AC and DC Voltage*», IEEE Trans., pp. 332-334, 1985.
- [16] **T.C. Chen, H.I.M. Nouret C.Y. Wu**, «*DC Interfacial Breakdown on Contaminated Electrolytic Surfaces*», IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 19, N° 6, pp. 536-542, December 1984.
- [17] **P. S. Ghosh and N. Chatterjee**, «*Polluted Insulator Flashover Model for AC Voltage*», IEEE Trans. on Diel. et Elect. Insul. vol. 2, N°. 1, pp. 128-136, February 1995.
- [18] **T.C. Chen et H.I.M. Nour**, «*A Study on the Profile of HVDC Insulators*», IEEE Trans. on Elect. Insul, Vol. 24, N° 1, pp. 113-117, February 1989.
- [19] **Guan Zhanga et Zhang Renyu**, «*Calculation of dc and ac Flashover Voltage of Polluted Insulators*», IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 25, N°. 4, pp. 723-729, 1990.
- [20] **Peter Zmajkovic**, «*Modélisation du Contournement Electrique et Validation Expérimentale du Mécanisme Proposé pour l'Extension de la Décharge*», Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1996.
- [21] **S. Gopalet Y. N. Rao**, «*Initiation and Growth of Dry band on Polluted Insulator Surfaces*», 5th Internatioanal Syposium on High Voltage Engeneering, Braunschweig, paper. 5207, 1987.
- [22] **N. Dhahbi-Megrache, A. Beroualet L. Krahenbuhl**, «*A New Proposal Model for Flashover of Polluted Insulators*», J. Phys.D. Appl. Phys., Vol. 30, pp. 889\_894, 1997.
- [23] **A. Smaili**, «*Caractéristique du temps de contournement d'une décharge électrique sur une surface isolante polluée alimentée en courant alternatif*» Thèse magister, Centre Universitaire de Tiaret, Avril 1996.
- [24] **M. Pollentes**, «*Sur l'utilisation des modèles de laboratoire pour l'étude de la tenue au contournement des isolateurs pollués* » LGET n°2130 Thèse doctorat U.P.S Toulouse 1995
- [25] **D.Mahi, A.Chaker , B.Zegnini**, «*Determination of the characteristics of AC arcs developing along electrolytic surface using regression on the test results*», ICEEE 2004 ISSN1112-4652, pp 179-183, Avril 2004.
- [26] **S. Flazi**, «*Etude de contournement électrique des isolateurs haute tension pollué, critères d'élongation de la décharge et dynamique du phénomène*» Thèse de docteur d'état, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1987.
- [27] **M. Slama**, «*Contribution à l'étude de l'influence de la non-uniformité de la distribution de la pollution basée sur la méthode de la DDSE pour le dimensionnement des isolateurs des lignes THT à courant alternatif*», Thèse de Magister à L'USTO, Algérie, 2002.
- [28] **M. Mariche**, «*Modélisation dynamique du contournement des isolateurs pollués*». Thèse magister, universitaire USTO, 2006.

- [29] **D. Mahi**, « *Dynamique de l'allongement sur une surface faiblement conductrice d'une décharge électrique alimentée en courant alternatif* ». Thèse docteur ingénieur, Université Paul-Sablier Toulouse 1986.
- [30] **S. DiampeniKimbakala**, « *Modélisation dynamique des décharges se propageant sur une surface isolante polluée avec dispositifs discontinus sous différentes formes de tension* ». Thèse Docteur, Ecole Doctorale de Lyon, Décembre 2007.
- [31] **J. Danis**, « *A Stochastic Pollution Flashover Model* », 4ème International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46-12, Athens, 5-9 September 1983.
- [32] **R. Chaarani**, « *Etude de l'influence des caractéristiques des isolateurs sur leurs performances électriques dans des conditions de givrage* », Thèse de doctorat En Ingénierie de l'Université Du Québec à Chicoutimi, Canada, 2003.
- [33] **R. Wilkins, A. Al-Baghdadi**, « *Arc propagation along an electrolytic surface* », Proc. I.E.E., Vol.118, n° 12, Dec. 1971, pp. 1886-1892.
- [34] **M. Fethi**, « *Etude Temporelle et Fréquentielle du Courant de Fuite des Isolateurs de Poste Recouverts de Glace En Vue du Développement d'un Système de Surveillance et de Prédiction en Temps Réel du Contournement Electrique* », Thèse de doctorat En Ingénierie de l'université Du Québec, Canada, 2007.
- [35] **I. Fofanaet M. Farzaneh**, « *Application of Dynamic Model to Flashover of Ice-covered Insulators* », IEEE Trans.onElectr.Insul, Vol.14, nr.6, pp.1410, December 2007.
- [36] **M. Farzanehet J. Zhang**, « *A Multi-Arc Model for Predicting AC Critical Flashover Voltage of Ice-covered Insulators* », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 6; December 2007.
- [37] **N. Dhahbi**, « *Modélisation Dynamique Des Décharges Sur les Surfaces d'Isolateurs Pollués Sous Différentes Formes De Tension : Elaboration d'un Critère Analytique de Propagation* », Thèse Doctorat de l'Université Lyon, France, 1998.
- [38] **M. Tegar et A. Boubakeur**, « *Pollution des Isolateurs de Haute Tension* », International Conférence on Electrical Engineering, ENP, Janvier 2004.
- [39] **N. Dhahbi-Megrache et A. Beroual**, « *Flashover Dynamic Model of Polluted Insulators under ac Voltage* », IEEE Trans. Dielectr. Electr.Insul, Vol.7, pp. 283\_2 89, 2000.
- [40] **D.Mahi,B. Zegnini et F.Benazzouz**, « *Multi-branches modeling of an electric on slightly conductive surfaces* », IEEE 2002 Annual report Conference on Electrical Insulation and Phenomena.
- [41] **D.Mahi,B. Zegnini et F.Benazzouz**, « *Dynamic approach with multi-branches model of the flashover on insulating surfaces under direct current* », IEEE 2002 Annual report Conference on Electrical Insulation and Phenomena.

- [42] **T. C. Cheng et AS. Farag**, «*Interfacial breakdown on contaminated electrolytic surfaces*», IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol 19, n°6, Dec. 1984, pp 536-542.
- [43] **F. Benazzouz**, «*Approche dynamique du phénomène par un modèle multi-branches* », Thèse de Magister de l'université Laghouat, Algérie, 2001.
- [44] **C. VOLAT**, «*Modélisation physique et numérique par la méthode des éléments finis de frontière de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur standard de poste 735 KV recouvert de glace*», Thèse de doctorat, université de QUEBEC, 2002.
- [45] **F.D.A Boylett – I.G. Maclean**, «*The propagation of electric discharges across the surface of an electrolyte*», ProC. Roy.Society London, Vol. A n°324, pp-469 –489, Nov. 1971
- [46] **S. Flazi**, «*Modélisation d'une décharge électrique sur une surface isolante polluée recouverte d'une couche conductrice. Application au contournement des isolateurs H.T* » Thèse de Docteur ingénieur, Université Paul Sabatier, Toulouse, N° 698, 2 juillet 1980.
- [47] **H.Hadi, M.Marich, R.Amiri**, «*New approach for the modeling of the polluted insulators*», IEEE/ CEIDP 2 IEEE/CEIDP, October 15-18, Kansas City, Missouri, 2006, USA.
- [48] **M. Marich, H.Hadi, R.Amiri**, «*Validation d'une nouvelle approche pour la modélisation dynamique du contournement des isolateurs pollués*», CEE'06, novembre 2006, Batna, Algérie.
- [49] **Jean-L. R. RASOLONJANAHARY**,«*Modélisation par les méthodes des équations intégrales de frontières de conduction surfaciques sur les isolateurs pollués*», Thèse Doctorat de l'Université Lyon, France, 1992.
- [50] **Guide CEI-815**, Guide pour le choix des isolateurs sous pollution, 1986.
- [51] **B. Zegnini, D, Mahi**, «*Distribution of the electric field in the discharge interval under AC voltage on contaminated electrolytic surfaces simulated HV insulators*», 2002 IEEE Annual report conference on electrical insulation and dielectric, Octobre 20-24-2002, pp 164-167 Cancun, Quintana Roo, Mexico.
- [52] **M. Slama**, «*étude expérimentale et modélisation de l'influence de la constitution chimique et de la répartition de la pollution sur le contournement des isolateurs HT*», Thèse de Doctorates sciences à L'USTO, Algérie, 2011.
- [53] **M. Farzaneh et W. A. Chisholm**,«*Insulators for icing and polluted environments*», IEEE Press, John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2009.
- [54] **H. Hadi**, «*Mécanismes de contournement et sa modélisation dynamique appliquée aux isolateurs réels*», Thèse de doctorat d'état, Université des Sciences et Technologies d'Oran (USTO), Algérie, 2002

- [55] **M. Tegar**, «*Modélisations d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro-géométriques*», Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, El-Harrach, Algérie, 2003.
- [56] **S. Flazi, A. Ouis et N. Boukhenoufa**, «*Resistance of pollution in equivalent electrical circuit of flashover*», IET Generation, Transmission et Distribution, Vol. 1, No. 1, pp 183-188, January 2007.
- [57] **S. Flazi, A. Ouis, M. Hamouda et H. Hadi**, «*Dynamic features of DC flashover on polluted insulators*», IET Generation Transmission and Distribution, Vol. 1, No. 1, pp. 8-12, January 2007.
- [58] **Hadi, S.Flazi,A.Taieb**, «*Modélisation dynamique du contournement des isolateurs pollués des lignes aériennes en haute tension*». CIMASI 2002, 22-23-25 Octobre, Casablanca, Maroc.
- [59] **S.A.Bessedik**, «*Modélisation des isolateurs pollués Des lignes Haute tension*», Thèse de magister, USTO 2008.
- [60] **Z. Boubakeur**, «*Etude du Phénomène du Contournement des Surfaces Isolantes Polluées Sous Tension Alternatif : Application A L'étude de la Tenue des Isolateurs Dans Leur Environnement Naturel*», Thèse Doctorat de l'Université de USTO, Algérie, 2006.
- [61] **Y.Ghuehrrar**, «*Elaboration d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternatif où impulsioneille* », Thèse de magister. ENP 2004.
- [62] **A. Bensaci**, «*Modélisation d'une décharge dynamique multi-branches alimentée en courant alternatif, sur une surface isolante polluée* », Thèse de magister, USTO 2011.
- [63] **S.A. Bessedik H. Hadi, M. Marich, et A. Bouyekni**, «*Modélisation dynamique du phénomène de contournement des isolateurs pollués* » Algerian Journal of Technolgy, AJOT, série B, numéro spécial, Alger, Algérie, Mai 2011.
- [64] **S. Mouhoubi**,« *Etude de l'influence d'une barrière dans un intervalle pointe – plan, par la mesure de la tension disruptive, du champ électrique et des décharges partielles* ». Thèse de doctorat, ENP 2008.
- [65] **Z.Teztaz**, «*Analyse optique d'une décharge électrique sur une surface isolante polluée alimentée en courant alternatif* ». Thèse de magister au centre universitaire de Tiaret. 1999.
- [66] **M. Giralt**,« *Adaptation d'un modèle de décharge en vue son application à la conception de l'isolation aérienne H.T et T.H.T* ». Thèse de doctorat à l'école centrale de Lyon. 1999.
- [67] [www.amartilmatine.freeiz.com](http://www.amartilmatine.freeiz.com). Site de cours de Amar Tilmatine, université de DjillaliLiabes de Sidi Belabbes consulté le 12/07/2011 à 09:30.

## ملخص

يهدف هذا العمل إلى اقتراح نموذج ساكن الذي يتنبأ تصرف عازل ملوث في حالة تفريغ كهربائي باستعمال علاقة أخرى التي تعطي توتر التفريغ الكهربائي و التي لم تستعمل من طرف الباحثين السابقين. استطعنا من خلال هذا النموذج بحساب توتر و تيار الإحاطة و قمنا بمقارنتها إلى نتائج سابقة. وفي حالة تفريغ كهربائي متعدد الفرع حاولنا إعطاء نموذج ساكن الذي يصف نقطة التحول من نموذج متعدد الفرع إلى نموذج بفرع واحد يسمح لنا بحساب توتر الإحاطة و كذلك شدة تياره. هذا النموذج يصف منطقة التحول من تفريغ كهربائي متعدد الفرع إلى تفريغ بفرع واحد. كما أردنا بهذا العمل حساب شدة الحقل الكهربائي بين القطبين الكهربائيين في حالة غياب التفريغ وحضوره وأكثر من فرع ونظرا للصعوبات التي تلقيناها أخذنا تبسيطاً لتتبع مختلف عناصر التفريغ ( توتر التفريغ, تياره, سرعته...).

الكلمات المفتاحية: عازل – تلوث – إحاطة – نموذج ساكن-تفريغ كهربائي-متعدد الفرع.

## Résumé

Le but de ce travail est de proposer un modèle statique qui permet de prédire l'action d'un isolateur pollué dans le cas d'une décharge électrique en utilisant la relation qui donne la tension d'arc établie par Roa et Gopal. Ce modèle nous permet de calculer la tension et le courant de contournement et les comparer à d'autres résultats des travaux antérieurs. Dans le cas d'une décharge électrique multi-branches on a pris en considération d'existence d'une zone de transition d'un modèle multi-arcs à un modèle mono-arc ce qui permet de calculer le courant et la tension de contournement.

Nous essayons de calculer la répartition de champ électrique dans l'espace inter-électrodes dans l'absence de décharge et à sa présence avec d'autres branches. à cause des difficultés trouvés on a simplifié le cas pour suivre les différents paramètres temporelles de la décharge.

Mots clés : isolateur-pollution-contournement-modèle statique-décharge électrique-multi-branche.

## Abstract

The goal of this work is to propose a static model which makes it possible to predict the action of an insulator polluted in the case of an electric discharge using the relation which gives the voltage of arc established by Roa and Gopal. This model enables us to calculate the voltage and the current of flashover then to compare them with other results of former work. In the case of an electric discharge multi-arcs one took into account the existence of a zone of transition from a model multi-arc to a model with single arc what makes it possible to calculate the current and the voltage of flashover.

We try to calculate the distribution of electric field in space inter-electrodes in the absence of discharge and with his presence with other branches because of the difficulties found one simplified the case to follow the various parameters temporal of the discharge.

## Keys words:

Insulator – pollution-flashover-static model-electric discharge-multi-arcs.