

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

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN
MOHAMED BOUDIAF



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

THESE

Thèse en vue de l'obtention du diplôme de
Doctorat en sciences

Spécialité : Electrotechnique
Option : Décharges électriques et haute tension

Présentée par

OUIS AMEL
Magister en électrotechnique

**INFLUENCE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES ET
ELECTRIQUES SUR LE CONTOURNEMENT DES ISOLATEURS**

Soutenu publiquement le...../...../ 2015 devant le jury composé de :

| | | |
|---------------------|---|------------|
| Mr A. TAIEB BRAHIMI | Professeur à USTO-MB, Oran, Algérie | Président |
| Mr S. FLAZI | Professeur à USTO-MB, Oran, Algérie | Rapporteur |
| Mr A. W. BELARBI | Professeur à USTO-MB, Oran, Algérie | Examineur |
| Mr A. BOUBAKEUR | Professeur à E N P, Alger, Algérie | Examineur |
| Mr D. MAHI | Professeur à U.A.T, Laghouat, Algérie | Examineur |
| Mr A. TILMATINE | Professeur à U.D.L,Sidi Bel-Abbès,Algérie | Examineur |

REMERCIEMENTS

Je remercie le bon DIEU de m'avoir donné la force, le courage et la patience pour terminer cette thèse.

Ce travail a été réalisé au laboratoire de Génie Électrique d'Oran « LGEO » de l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Mohamed Boudiaf -Algérie.

Quelques lignes sont trop courtes pour exprimer ma profonde reconnaissance pour mon directeur de thèse, Monsieur **Samir FLAZI**, professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Mohamed Boudiaf. C'est lui qui m'a formé à la rigueur de la démarche expérimentale et aux exigences de la communication scientifique. Ses conseils éclairés, ses encouragements constants, sa gentillesse et sa confiance sans failles ont été essentiels à notre succès au cours des années de préparation de cette thèse. Qu'il trouve ici l'expression de mon respect et ma sincère gratitude.

Je suis profondément honoré par le fait que le jury devant lequel je vais défendre ma thèse sera présidé par le professeur **Abdelhalim TAIEB BRAHIMI**, Doyen de la faculté de Génie Électrique de l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Mohamed Boudiaf. Je lui en remercie infiniment d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Mes sincères remerciements vont aussi à Monsieur **Ahmed Wahid BELARBI**, professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Mohamed Boudiaf, Monsieur **Ahmed BOUBAKEUR**, professeur à l'École National Polytechnique-Alger, Monsieur **Djillali MAHI** professeur à l'Université Amar Teldji-Laghout et Monsieur **Amar TILMATINE** professeur à l'Université Djilali Liabès de Sidi Bel-Abbès qui ont répondu à l'invitation qui leur avaient faite d'être examinateurs de cette thèse.

Je n'oublierai pas de remercier tous mes amies et collègues chercheurs du département d'Électrotechnique, avec lesquels ce fut toujours très agréable de travailler et surtout pour la bonne ambiance tout au long de la thèse, en particulier ;

Nacera, Amira, Mami, Samia, Mokhtaria, Sara.....etc.

Je dois à mes parents beaucoup de ce que je suis devenu. Je les remercie pour leur amour, leur soutien et leur confiance. Mon père a toujours placé l'éducation comme la première priorité dans ma vie et m'a incité à fixer des très hauts objectifs pour moi-même. Il m'a appris à mettre l'honnêteté et le courage au-dessus de toutes les autres vertus.

Je remercie également mon époux pour le précieux soutien qu'il m'a apporté et sa patience vis-à-vis de ma grande préoccupation par cette thèse. Je le remercie également de m'avoir remplacé auprès de mes deux adorables petites filles; Sanaâ et Wissem les fois où j'ai dû m'absenter, qui a été mon appui tout simplement.

Je ne saurais terminer sans adresser mes remerciements à toutes les personnes, qui par leur soutien moral, physique ou autres de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

Résumé

Listes des figures et des tableaux

Introduction générale

| | |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

Chapitre I

Phénomène du contournement et circuit électrique équivalent

| | |
|---|----|
| I-1 Introduction..... | 6 |
| I-2 Phénomène du contournement..... | 6 |
| I-3 Circuit électrique équivalent..... | 9 |
| I-4 Critères de contournement..... | 13 |
| I-5 Analyse critique du circuit électrique équivalent..... | 16 |
| I-5-1 La résistance de pollution dans le circuit électrique équivalent au contournement | 16 |
| I-5-1-1 Modèles multidirectionnels..... | 17 |
| I-5-1-2 Modèle secteur circulaire..... | 21 |
| A- Influence de la distribution des lignes de courant dans le plan horizontal de l'électrolyte..... | 23 |
| B- Influence de la distribution des lignes de courant dans le plan vertical de l'électrolyte..... | 25 |
| I-5-2 Aspect dynamique de la décharge électrique du contournement..... | 29 |
| I-5-2-1 Aspect dynamique du contournement..... | 30 |
| I-5-2-2 Caractéristique dynamique du contournement..... | 33 |
| I-5-2-3 Modèle expérimental..... | 34 |
| I-6 Conclusion..... | 39 |

Chapitre II

Mécanismes physiques de propagation de la décharge électrique

| | |
|---|----|
| II-1 Introduction..... | 40 |
| II-2 Mécanismes physiques de propagation de la décharge du contournement..... | 40 |
| II-2-1 Mécanisme de la force électrostatique | 40 |
| II-2-2 Mécanisme de la force thermique..... | 41 |
| II-2-3 Mécanisme d'ionisation et de la rupture progressive de l'air..... | 42 |
| II-3 Mécanisme de la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique..... | 47 |
| II-3-1 Les travaux antérieurs..... | 47 |
| II-4 Conclusion..... | 53 |

Chapitre III
Etude du mécanisme de la rupture de l'air d'un intervalle
Décharge-Electrolyte

| | |
|---|----|
| III-1 Introduction..... | 54 |
| III-2 Etude Expérimentale..... | 54 |
| III-2-1 Présentation du dispositif expérimental..... | 54 |
| III-2-2 Description de la cellule expérimentale..... | 56 |
| III-2-3 Mode opératoire..... | 57 |
| III-2-4 Résultats expérimentaux..... | 57 |
| III-2-4-1 Influence de la résistivité de l'électrolyte..... | 57 |
| III-2-4-2 Influence de la nature de l'électrode opposée à la décharge..... | 59 |
| III-2-4-3 Influence du courant initial de la décharge électrique..... | 60 |
| III-2-4-4 Temps d'apparition de la deuxième décharge..... | 60 |
| III-3 Etude théorique (Simulation)..... | 61 |
| III-3-1 Les procédures de la simulation..... | 62 |
| III-3-2 Résultats de la simulation..... | 65 |
| III-3-2-1 La distribution du champ électrique dans l'intervalle Décharge-Electrolyte..... | 65 |
| III-3-2-2 Champ électrique maximum en fonction du courant initial de la décharge..... | 66 |
| III-3-2-3 Interprétations des résultats..... | 67 |
| III-4 Conclusion..... | 68 |

Chapitre IV
Etude expérimentale et théorique sur le modèle rainure étroite

| | |
|---|----|
| IV-1 Introduction..... | 69 |
| IV-2 Etude expérimentale..... | 69 |
| IV-2-1 Mesure expérimentale de la tension et du courant critique du contournement..... | 69 |
| IV-2-2 Description du modèle expérimental rainure rectangulaire étroite... | 69 |
| IV-2-3 La procédure de mesure..... | 70 |
| IV-2-4 Résultats expérimentaux | 71 |
| IV-2-4-1 Influence de la largeur de l'électrolyte..... | 71 |
| IV-2-4-2 Influence de la longueur de la rainure..... | 73 |
| IV-2-4-3 Influence de l'épaisseur de la pollution..... | 74 |
| IV-2-4-4 Influence de la résistivité de l'électrolyte et la polarité de la tension appliquée..... | 76 |
| IV-2-4-5 Influence de la résistance par unité de longueur..... | 77 |
| IV-3 Etude théorique (simulation)..... | 79 |
| IV-3-1 Calcul du champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge sur le modèle rainure rectangulaire étroite..... | 79 |
| IV-3-2 Présentation du logiciel de calcul Comsol Multi Physics..... | 79 |
| IV-3-3 La procédure de calcul..... | 80 |
| IV-3-3-1 Choix du domaine d'étude..... | 80 |
| IV-3-3-2 Création de la géométrie du modèle expérimental..... | 80 |

| | |
|---|----|
| IV-3-3-2-1 Géométrie de la décharge électrique..... | 81 |
| IV-3-3-2-2 Géométrie de la couche de l'électrolyte..... | 82 |
| IV-3-3-2-3 Géométrie de la boîte infinie..... | 83 |
| IV-3-3-3 Description des propriétés physiques..... | 83 |
| IV-3-3-4 Le choix du maillage..... | 83 |
| IV-3-4 Résultats de la simulation..... | 84 |
| IV-3-4-1 Distribution des lignes de champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge électrique..... | 84 |
| IV-3-4-2 Champ électrique moyen dans l'intervalle Décharge-Electrolyte (Intervalle I)..... | 86 |
| IV-3-4-2-1 Influence de la largeur et l'épaisseur de l'électrolyte sur le champ électrique moyen dans l'intervalle Décharge-Electrolyte | 86 |
| IV-3-4-2-2 Influence de la résistivité et de la polarité de la tension appliquée sur le champ électrique moyen..... | 87 |
| IV-3-4-3 Champ électrique maximum dans l'air au voisinage de la décharge électrique | 88 |
| IV-3-4-3-1 Influence de la largeur et l'épaisseur de l'électrolyte sur le champ électrique maximum..... | 88 |
| IV-3-4-3-2 Influence de la résistivité et de la polarité de la tension appliquée sur le champ électrique maximum..... | 98 |
| IV-4 Analyse et interprétation des résultats..... | 90 |

Chapitre V

Etude expérimentale et théorique sur le modèle secteur circulaire

| | |
|--|-----|
| V-1 Introduction..... | 94 |
| V-2 Etude expérimentale..... | 94 |
| V-2-1 Mesure expérimentale de la tension et du courant critique de contournement..... | 94 |
| V-2-2 Description du modèle expérimental secteur circulaire..... | 94 |
| V-2-3 Résultats expérimentaux..... | 96 |
| V-2-3-1-1 Influence de l'angle et de rayon du modèle circulaire..... | 96 |
| V-2-3-1-2 Influence de la résistivité et de l'épaisseur de l'électrolyte..... | 98 |
| V-2-3-1-3 Influence de la polarité de la tension appliquée..... | 99 |
| V-3 Etude théorique (Simulation)..... | 101 |
| V-3-1 Calcul du champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge électrique..... | 101 |
| V-3-2 La procédure de calcul..... | 101 |
| V-3-2-1 Choix du domaine d'étude..... | 102 |
| V-3-2-2 Création de la géométrie du modèle expérimental..... | 102 |
| V-3-2-3 Description des propriétés physiques..... | 103 |
| V-3-3 Résultats de la simulation..... | 105 |
| V-3-3-1 Distribution du potentiel et des lignes de champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge électrique..... | 105 |

| | |
|---|-----|
| V-3-3-2 Champ électrique moyen dans l'intervalle Décharge-Electrolyte (Intervalle I)..... | 107 |
| V-3-3-2-1 Influence de rayon du modèle et de la profondeur de l'électrolyte..... | 107 |
| V-3-3-2-2 Influence de la résistivité d'électrolyte et de la polarité de la tension appliquée..... | 108 |
| V-3-3-3 Champ électrique maximum dans l'air au voisinage de la décharge électrique | 109 |
| V-3-3-3-1 Influence de rayon du modèle et de la profondeur de l'électrolyte..... | 109 |
| V-3-3-3-2 Influence de la résistivité de l'électrolyte et de la polarité de la tension appliquée..... | 110 |
| V-4 Analyse et interprétation des résultats | 111 |

Conclusion générale

| | |
|--------------------------|-----|
| Conclusion générale..... | 114 |
|--------------------------|-----|

Références Bibliographiques

Résumé

Ce travail porte d'abord sur une analyse critique du circuit électrique équivalent au phénomène de contournement concernant les deux éléments importants du circuit : La résistance de la couche de pollution et l'aspect dynamique de la décharge électrique. Ensuite, nous avons effectué une étude expérimentale et théorique pour expliquer le mécanisme de la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique. En dernier, nous avons réalisé une étude expérimentale et théorique pour déterminer les conditions critiques du contournement, sous l'influence de différents paramètres géométriques et électriques de la pollution, pour mieux comprendre le critère et le mécanisme de l'évolution de la décharge électrique. Les principaux résultats montrent que les circuits électriques équivalents au contournement des isolateurs doivent tenir compte de deux points très importants : Premièrement, la distribution des lignes de courant depuis la surface de contact « décharge-pollution » jusqu'à l'électrode de masse. Deuxièmement, la forme dynamique de la décharge cette dernière est comme un pied élargi où l'avant-pied propage sur la surface de l'électrolyte. Les paramètres géométriques et électriques de la pollution influent sur les conditions critiques du contournement par leurs actions directes et simultanées sur : La distribution des lignes de champ électrique le long de la distance entre la décharge électrique et l'électrode de masse d'une part et d'autre part sur la résistance par unité de longueur pour le modèle « rainure étroite » ou sur la résistance par unité d'angle pour le modèle « circulaire ». Le contournement est facile en polarité positive qu'en polarité négative car l'émission électronique à partir du plasma de la décharge est plus importante qu'à partir de l'électrolyte lui-même. Le contournement est possible donc si le critère suivant est vérifié: Le champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge est suffisant pour l'évolution de la décharge par le mécanisme de Streamer, de façon similaire à la rupture des intervalles d'air entre électrodes métalliques.

Mots-clés : Haute tension- Isolateur- Pollution- Décharge électrique- Contournement- Conditions critiques- Distribution du champ électrique.

Abstract

This work initially concerns a critical analysis of the equivalent electric circuit to the flashover phenomenon concerning the two important elements of the circuit: the resistance of pollution and the dynamic aspect of the electric discharge. Then, we carried out an experimental and theoretical study to explain the air breakdown mechanism in the vicinity of an electric discharge. Finally, we made an experimental and theoretical study to determine the critical conditions of flashover according to the various geometrical and electrical parameters of pollution, to better understand the flashover criterion and discharge elongation mechanism. The principal results show that the equivalent electric circuits of flashover must take into account two very important points: Firstly, the distribution of leakage current lines from the contact surface of discharge-pollution until the ground electrode. Secondly, the discharge dynamic form which like an extended foot, where the forefoot propagates at the electrolyte surface. The geometrical and electrical parameters of pollution influence the critical conditions of flashover by their direct and simultaneous actions on: The distribution of the electric field lines along the distance between the electric discharge and the ground electrode of the one part, and on the other part the resistance per unit of length for the "narrow groove" model or on the resistance per unit of angle for the "circular" model. Flashover is easier in positive polarity than negative one because the electron emission starting from the plasma of the discharge is more important than starting from the electrolyte itself. Flashover is, therefore, possible if the criterion is checked: the electric field distribution in the air in the vicinity of the discharge is sufficient for discharge elongation by Streamer mechanism, similar to the air gap breakdown between metal electrodes.

Key words: High voltage- Insulator- Pollution- Electric discharge- Flashover- Critical conditions- Electric field distribution.

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Paramètres géométriques et électrique d'un isolateur réel

Figure I-2: La simulation du contournement dans les études de modélisation

Figure I-3: Caractéristiques dynamiques du contournement, pour $A = 63$, $n = 0.76$, $L=10$ cm, $r = 8k\Omega.cm$

Figure I-4: Tension minimale en fonction de la longueur de la décharge, pour $r = 8k\Omega.cm$

Figure I-5: Modèle bidirectionnel du contournement

Figure I-6: Modèle à quatre directions du contournement

Figure I-7: Modèle à huit directions du contournement

Figure I-8: Courant critique en fonction de la résistance par unité de longueur pour $L=10cm$

Figure I-9: Tension critique en fonction de la résistance par unité de longueur pour $L=10cm$

Figure I-10: Modèle secteur circulaire

Figure I-11: Modèles secteur circulaire de 180° et 90°

Figure I-12: Courant et tension critique en fonction de l'angle du modèle secteur circulaire, pour un rayon de 137mm

Figure I-13: Courant et tension critique en fonction de rayon du modèle secteur circulaire d'angle 90°

Figure I-14: La distribution des lignes de courant dans le plan vertical de l'électrolyte (Sans lame)

Figure I-15: La distribution des lignes de courant dans le plan vertical de l'électrolyte (Avec lame)

Figure I-16: Tension critique en fonction de la profondeur d'électrolyte, pour les deux cas, avec et sans lame

Figure I-17: Courant critique en fonction de la profondeur d'électrolyte, pour les deux cas, avec et sans lame

Figure I-18: Distribution du courant dans l'air entre l'électrode de H.T et l'électrolyte au cours du contournement

Figure I-19: Courant de fuite en fonction du temps de l'évolution de la décharge ou de la longueur de la décharge dans un canal rectangulaire pour: $r=5k\Omega/cm$, $V= 13.5$ kV et $L=10cm$

Figure I-20: Forme de la décharge durant le contournement

(a) Evolution tubulaire de la décharge dans les études analytique du contournement

(b) Forme de pied élargie pendant l'évolution de la décharge dans les expériences

Figure I-21: Evolution de la décharge sur un modèle canal rectangulaire avec lame

(a) Décharge initiale

(b) Décharge en pied élargie jusqu'à la lame métallique

(c) décharge arrêtée à $x = L_i$ en forme tubulaire

Figure I-22: Courant mesuré pendant l'évolution de la décharge pour: $V=13.5$ kV and $r=5$ k Ω /cm;

abc: jusqu'au contournement sans lame;

a d_i s_i k_i: jusqu'à la lame avec $L_i = 5$ cm and $L = 10$ cm

Figure I-23: Caractéristique expérimentale et théorique du contournement du modèle rectangulaire pour $V=8.3$ kV, $r=1$ k Ω /cm, $L=10$ cm, $V_e=840$ V, $A=63$, $n=0.76$

Figure I-24: Caractéristique expérimentale et théorique du contournement du modèle rectangulaire pour: $V=13.5$ kV, $r=5$ k Ω /cm, $L=10$ cm, $V_e=840$ V, $A=63$, $n=0.76$

Figure II-1: Courbure de la décharge dans la direction de l'écoulement du courant mettant en évidence l'existence d'une force

Figure II-2: Elongation par ionisation et déplacement discontinu du pied de la décharge d'après Wilkins

Figure II-3: Mécanisme d'élongation de la décharge proposé par Flazi

Figure II-4: intervalle de rupture entre la décharge du contournement et la surface de pollution

Figure II-5 : Intervalle entre une décharge électrique et une surface de pollution

Figure II-6: Schéma d'un intervalle entre une décharge électrode et une électrode métallique

Figure II-7 : Schéma d'un intervalle entre deux décharges électriques et une électrode métallique

Figure II-8 : Schéma de l'intervalle entre une décharge électrique et une surface électrolytique carrée

Figure III-1 : Montage expérimental

Figure III-2 : Schéma de l'intervalle entre une décharge électrique et une surface circulaire d'électrolyte

Figure III-3 : Distance critique en fonction de la résistivité de l'électrolyte

Figure III-4: Distance critique en fonction de la résistivité de l'électrolyte au dessous de la plaque métallique

Figure III-5 : Distance critique en fonction du courant initial de la décharge

Figure III-6: Temps de retard de l'apparition de la deuxième décharge

Figure III-7: Les étapes de calcul du champ électrique

Figure III-8: Géométrie de la cellule expérimentale en 3D avec boîte infinie

Figure III-9: Distribution du champ électrique le long de l'axe principale entre la décharge et l'électrolyte, en polarité positive pour $I_{d1}=100$ mA, $d_c=1.55$ cm et $\rho=5k\Omega.cm$

Figure III-10: Champ électrique maximum en fonction du courant initial de la décharge

Figure IV-1 : Modèle rainure rectangulaire étroite

Figure IV-2 : Oscillogramme du courant électrique

Figure IV-3 : Tension critique en fonction de la largeur de la rainure en deux polarités, pour $L=7cm$, $e=3mm$, $\rho=2.5$ et $20k\Omega.cm$

Figure IV-4 : Courant critique en fonction de la largeur de la rainure en deux polarités, pour $L=7cm$, $e=3mm$, $\rho=2.5$ et $20k\Omega.cm$

Figure IV-5: Tension critique en fonction de la longueur de la rainure, pour $a=4cm$, $e=3mm$ et $\rho=2.5, 5, 10$ et $20k\Omega.cm$

Figure IV-6 : Courant critique en fonction de la longueur de la rainure, pour $a=4cm$, $e=3mm$ et $\rho=2.5, 5, 10$ et $20k\Omega.cm$

Figure IV-7: Tension critique en fonction de l'épaisseur de l'électrolyte, pour $a=2cm$, $L=8cm$ et $\rho=2.5, 5, 10$ et $20k\Omega.cm$

Figure IV-8: Courant critique en fonction de l'épaisseur de l'électrolyte, pour $a=2cm$, $L=8cm$ et $\rho=2.5, 5, 10$ et $20k\Omega.cm$

Figure IV-9: Tension critique en fonction de la résistivité de l'électrolyte en deux polarités pour $a=3cm$, $L=7cm$ et $e=6mm$

Figure IV-10: Courant critique en fonction de la résistivité de l'électrolyte en deux polarités pour $a=3cm$, $L=7cm$ et $e=6mm$

Figure IV-11: La variation de la tension critique en fonction de la résistance par unité de longueur en deux polarités, pour $L=7cm$

Figure IV-12: La variation du courant critique en fonction de la résistance par unité de longueur en deux polarités, pour $L=7cm$

Figure IV-13 : Géométrie du modèle expérimental avec décharge en 3D

Figure IV-14: Maillage extrêmement fin du modèle rainure

Figure IV-15: Distribution du champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge électrique

Figure IV-16: Zoom de la Figure IV-15

Figure IV-17 : Champ électrique moyen en fonction de la largeur de la rainure en deux polarité, pour $L=7cm$, $\rho=5k\Omega.cm$ et $e=3$ et $6mm$

Figure IV-18 : Champ électrique moyen en fonction de la résistivité de l'électrolyte en deux polarité, pour $L=7cm$, $a=3cm$ et $e=6mm$

Figure IV-19 : Champ électrique maximum en fonction de la largeur de la rainure en deux polarité pour $L=7\text{cm}$, $e=3$ et 6mm et $\rho=5\text{k}\Omega.\text{cm}$

Figure IV-20 : Champ électrique maximum en fonction de la résistivité de l'électrolyte en deux polarité pour $L=7\text{cm}$, $e=6\text{mm}$ et $a=2$ et 4cm

Figure V-1 : Modèle Secteur Circulaire 360°

Figure V-2 : Modèle secteur circulaire 90° et 180°

Figure V-3 : Tension critique en fonction de l'angle et de rayon du modèle en deux polarités, pour $e=3\text{mm}$ et $\rho=10\text{k}\Omega.\text{cm}$

Figure V-4 : Courant critique en fonction de l'angle et de rayon du modèle en deux polarités, pour $e= 3 \text{ mm}$ et $\rho=10\text{k}\Omega.\text{cm}$

Figure V-5 : Tension critique en fonction de la résistivité et de la profondeur de l'électrolyte, pour $R= 137\text{mm}$ et $\theta=360^\circ$ en deux polarités

Figure V-6 : Courant critique en fonction de la résistivité et de la profondeur de l'électrolyte, pour $R= 137\text{mm}$ et $\theta=360^\circ$ en deux polarités

Figure V-7 : Tension critique en fonction de la polarité de la tension appliquée, pour $R= 137\text{mm}$, $\theta=360^\circ$ et $e=3\text{mm}$

Figure V-8 : Courant critique en fonction de la polarité de la tension, pour $R= 137\text{mm}$, $\theta=360^\circ$ et $e=3\text{mm}$

Figure V-9 : Géométrie de la couche électrolytique et les différentes zones de la décharge électrique en 2D.

Figure V-10 : Description géométrique du modèle secteur circulaire en 3D

Figure V-11 : Maillage extrêmement fin du modèle secteur circulaire

Figure V-12 : Distribution du potentiel et des lignes de champ électrique entre la décharge et l'électrode de masse

Figure V-13: Zoom de la Figure V-12

Figure V-14 : Champ électrique moyen en fonction de rayon du modèle et la profondeur d'électrolyte, pour $\rho=5\text{k}\Omega.\text{cm}$ et $e=3$ et 6mm

Figure V-15 : Champ électrique moyen en fonction de résistivité d'électrolyte et la polarité de la tension appliquée, pour $R=137\text{mm}$ et $e=3$ et 6mm

Figure V-16 : Champ électrique maximum en fonction de rayon du modèle et la profondeur d'électrolyte, pour $\rho=2.5\text{k}\Omega.\text{cm}$ et $e=3$ et 6mm

Figure V-17 : Champ électrique maximum en fonction de la résistivité et la polarité de la tension appliquée pour $R=137\text{mm}$, $e=3$ et 6mm

Figure V-18 : Emplacement de l'anode et de la cathode de la décharge électrique en polarité positive et négative.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III-1

Permittivités adoptées pour la simulation

Tableau IV-1

Conductivités et permittivités adoptées pour la simulation

Tableau IV-2

Conditions critiques en fonction de la résistance par unité de longueur en polarité positive pour $L=7\text{cm}$

Tableau V-1

Conductivités et permittivités adoptées pour la simulation

Tableau V-2

Champ électrique moyen et champ électrique maximum de deux intervalles différents

Introduction Générale

Introduction générale

Afin de minimiser les pertes d'énergie et de répondre aux demandes électro-énergétiques de plus en plus importantes, entre les points de production et les utilisateurs, l'énergie électrique est transportée principalement par des lignes aériennes en haute tension. Ces lignes peuvent parcourir des centaines de kilomètres et donc traverser des régions très différentes de par leur relief, leur climat, leur industrialisation ... etc.

De ce fait, les éléments constituant les systèmes de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie.

On distingue trois classes de pollution:

- La pollution d'origine naturelle: dans les régions côtières, les embruns marins se déposent progressivement sur les isolateurs et forment des couches de sel qui deviennent conductrices lorsqu'elles sont humidifiées par les embruns eux-mêmes, ou bien par un brouillard, ou encore par condensation. Les autres pollutions naturelles proviennent des dépôts de poussières du sol, du pollen, d'engrais, de sable emporté par le vent... etc.

- La pollution d'origine industrielle: dans les régions industrielles, ce sont les raffineries, les cimenteries, les complexes sidérurgiques, les papeteries..., qui dégagent de la fumée, des particules conductrices ou diélectriques. Dans les régions urbaines, la pollution provient des appareils de chauffage domestiques et des véhicules.

- La pollution mixte: c'est la forme la plus sévère de pollution car elle résulte de l'association d'une pollution naturelle et d'une ou plusieurs pollutions industrielles.

En effet, les conditions électro-géométriques et climatiques jouent un rôle important dans l'accumulation et la distribution de la pollution sur la surface d'un

isolateur. Ainsi, la distribution de la pollution à la surface des isolateurs n'est pas répartie de façon uniforme.

Quelle que soit la nature de la pollution, les polluants posent généralement peu de problèmes, lorsqu'ils sont secs. Cependant humidifiés, les dépôts de pollution deviennent conducteurs. Le courant de fuite qui prend naissance suite à une mise sous tension, conduit à l'échauffement de cette couche provoquant ainsi l'assèchement de certaines parties. Une partie importante de la tension appliquée se trouve alors reportée sur cette bande sèche, sur laquelle une décharge pourra s'amorcer si le champ électrique local (au niveau de cette couche) est suffisant. Selon les conditions électriques, cette décharge s'éteint ou se maintient sur la surface de l'isolateur provoquant l'érosion du diélectrique. Dans le cas extrême, la décharge évolue vers le contournement total de l'isolateur [1-7].

Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension : Une des caractéristiques principales d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est placé.

Pour faire face à ces problèmes, plusieurs solutions empiriques ont été envisagées et appliquées : lavage périodique des isolateurs, application sur la surface de l'isolateur d'une graisse retardant la formation de la couche conductrice, utilisation de revêtements conférant à l'isolateur des propriétés de surface particulières, adjonctions d'éléments métalliques, dépôt sur la surface de l'isolateur d'une couche conductrice ou semi-conductrice, surdimensionnement des éléments et allongement des chaînes d'isolateurs. Par ailleurs, plusieurs formes d'isolateurs ont été développées pour différentes sortes de pollution et d'atmosphère ambiante.

Parallèlement à ces progrès techniques, de nombreux travaux ont été menés depuis plusieurs décennies afin de déterminer les mécanismes qui régissent l'évolution de la décharge électrique et d'estimer les grandeurs critiques et les conditions de propagation de la décharge. Les chercheurs considéraient que le phénomène du contournement, qui est une décharge en série avec la pollution de

l'isolateur, est équivalent à une décharge électrique en série avec une résistance d'un électrolyte. En se basant sur cette idée, plusieurs modèles empiriques et semi-empiriques, basés la plupart sur le modèle d'Obenaus [8], ont été proposés [9-17].

Les résultats de ces travaux ont conduit à l'établissement de plusieurs critères et plusieurs méthodes pour la détermination de ses conditions critiques. Les principaux critères de propagation de la décharge rencontrés dans la littérature du contournement, ont été établis sur la base d'une condition faisant intervenir un des paramètres physiques soit le champ électrique, soit le courant, soit la puissance ou encore l'énergie fournie par la source.

Malheureusement les différents critères et les différents mécanismes proposés ne sont pas encore confirmés, et le désaccord entre les diverses hypothèses ne permet pas de déterminer laquelle ou lesquelles de ces hypothèses sont valides. Par conséquent, beaucoup de questions restent sans réponses ou doivent être approfondies. Les questions essentielles qui demeurent sans réponse sont : Comment influent les paramètres géométriques et électriques de la pollution sur les conditions critiques de propagation de la décharge ? Quelles sont ces conditions nécessaires pour la propagation de la décharge sur la surface polluée ? En outre, avec quel mécanisme se propage-t-elle ?

Notre travail est consacré à trouver des réponses à ces questions. Ce manuscrit comporte cinq chapitres.

Le premier chapitre est divisé en deux parties, la première est consacrée à présenter le phénomène du contournement et son circuit électrique équivalent, d'après lequel plusieurs travaux ont été menés par différents chercheurs dont le but est de déterminer les conditions critiques du contournement. Dans la deuxième partie du chapitre nous avons présenté notre analyse critique du circuit électrique équivalent, basé sur une étude expérimentale effectuée sur plusieurs modèles de laboratoire, concernant les deux éléments importants du circuit ; la résistance de la pollution et la décharge électrique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les principaux mécanismes proposés qui tentent d'expliquer le mécanisme de propagation de la décharge électrique sur la surface des isolateurs pollués. L'identification du phénomène élémentaire de la rupture diélectrique de l'air, de la région ou de l'intervalle entre la décharge et la surface de l'électrolyte est un point très important pour la compréhension du mécanisme d'allongement de la décharge du contournement. Pour cela nous avons présenté également dans le même chapitre les différents travaux effectués, au sein de notre laboratoire, par différents chercheurs afin d'étudier la rigidité diélectrique de l'air au voisinage d'une décharge électrique.

Nous avons consacré le troisième chapitre à une étude permettant d'expliquer le mécanisme de la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique, pour cela nous avons réalisé une étude expérimentale basée sur la mesure de la rigidité diélectrique de l'intervalle d'air entre une décharge électrique et une surface électrolytique, en polarité positive et négative. Et vu l'importance du champ électrique sur la rupture de l'air au voisinage de la décharge électrique, nous avons mené une étude théorique, en se servant d'un logiciel de calcul du champ électrique COMSOL Multi-physique version 3.5, pour déterminer la distribution du champ électrique dans l'intervalle au voisinage de la décharge et la valeur maximum de ce dernier qui correspondent aux conditions critiques de rupture de l'intervalle mesurées expérimentalement.

Pour déterminer l'influence des paramètres géométriques et électriques de la pollution sur les conditions critiques nécessaires pour la propagation de la décharge ainsi que le mécanisme de son évolution, nous avons consacré le quatrième chapitre à une étude expérimentale sur un modèle de laboratoire de forme rainure rectangulaire étroite, afin de déterminer les conditions critiques du contournement, tels que la tension et le courant critique, sous l'influence de la sévérité de la pollution. Par la suite, nous avons mené une étude théorique dont l'objectif est de calculer le champ électrique critique au voisinage de la décharge qui correspond aux conditions critiques mesurées expérimentalement. Le calcul a été effectué par le logiciel de

calcul du champ électrique basé sur la méthode des éléments finis COMSOL Multiphysique version 3.5.

Au cinquième et dernier chapitre, nous avons reproduit le même travail effectué au chapitre précédent mais cette fois-ci sur un modèle de laboratoire de forme circulaire. Il est conçu pour permettre d'étudier l'influence de la distribution géométrique des lignes de courant ainsi que la distribution de la tension et son gradient dans l'électrolyte sur les conditions critiques du contournement.

L'étude expérimentale et théorique effectuée sur deux modèles différents dans leurs formes géométriques, nous permettra de comparer les résultats obtenus sur ces deux derniers et de déterminer les conditions critiques nécessaires pour la propagation de la décharge, ainsi que le mécanisme de son évolution.

Chapitre I

PHENOMENE DU CONTOURNEMENT ET CIRCUIT

ELECTRIQUE EQUIVALENT

I-1 INTRODUCTION

Dans ce présent chapitre nous présentons en première partie le phénomène du contournement et son circuit électrique équivalent, d'après lequel plusieurs travaux ont été menés par différents chercheurs dont le but est de déterminer les conditions critiques de contournement. Dans la deuxième partie nous présentons une analyse critique du circuit électrique équivalent, basé sur des études expérimentales effectuées sur plusieurs modèles de laboratoire par plusieurs chercheurs, touchant les deux éléments importants du circuit ; la résistance de la pollution et la décharge électrique.

I-2 PHENOMENE DU CONTOURNEMENT

Le dépôt d'une couche de pollution sur la surface supérieure et inférieure d'un isolateur extérieur, suivi d'une humidification de ce dépôt, produit une couche électrolytique d'une forme géométrique complexe, qui prend la forme de l'isolateur et occupe la surface entière entre le capot et la tige [1-4].

La tension appliquée entre le capot et la tige cause la circulation d'un courant de fuite dans la couche électrolytique. L'effet Joule dû au passage de ce courant produit une vaporisation partielle de la couche de pollution déposée sur la surface de l'isolateur où une bande sèche sous forme de boucle, qui entoure le capot et/ou la tige, se produit (Figure I-1) [1,5-7].

En raison de la résistance très élevée de la bande sèche comparée à celle de la partie humide, une différence de potentiel entre les bords de la bande sèche apparaît, produisant ainsi un amorçage d'une décharge électrique.

Après l'amorçage de la décharge, l'échauffement continue et la bande sèche s'élargit avec la décharge. Cette élongation de la décharge par élargissement de la bande sèche continue, si les conditions de l'existence de la décharge en série avec la pollution sont toujours vérifiées, c'est -à- dire, si la tension appliquée est suffisante pour alimenter le circuit de la décharge en série avec la résistance de la pollution restante. Cette élongation s'arrête lorsque la tension ne suffit pas pour alimenter le

circuit série, à ce moment-là, la décharge s'éteint sans court-circuiter l'ensemble de l'isolateur.

Dans certaines conditions, la décharge quitte la bande sèche, et se propage rapidement sur la surface de la pollution, jusqu'au contournement total de l'isolateur entre le capot et la tige. Les questions essentielles qui demeurent sans réponse sont : Quelles sont les conditions nécessaires pour la propagation de la décharge sur la surface polluée ? En outre, avec quel mécanisme se propage-t-elle ?

La Figure I-1 montre un isolateur réel de ligne de fuite L (distance sur la surface de la matière isolante entre le capot et la tige), d'une bande sèche développée de largeur X et d'une décharge électrique de longueur égale à la largeur de la bande sèche.

La différence de tension appliquée entre le capot et la tige, crée le courant de fuite qui traverse la décharge électrique et pénètre la pollution par la surface de contact entre la décharge et la pollution. Nous appelons cette surface de contact « pied de la décharge », en considérant que la « tête de la décharge » se trouve du côté opposé, sur le capot de l'isolateur de la Figure I-1.

Le courant de fuite qui pénètre l'électrolyte par le pied de la décharge, se répartit non uniformément dans tous les sens autour de ce pied, selon des lignes de courant de différentes longueurs (Figure I-1). La ligne de courant la plus courte MN , est la ligne qui prolonge la décharge dans le sens de sa propagation, sa longueur est égale à $(L-X)$ et c'est la ligne avec les densités de courant les plus élevées et avec les valeurs les plus élevées du gradient de tension parmi toutes les lignes de courant.

La différence de potentiel appliquée entre le capot et la tige, qui crée le courant de fuite, crée également une distribution de tension et de gradient dans la décharge et dans la pollution. La distribution de gradient sur la surface de la pollution, détermine le champ dans l'air près de cette surface ; il y a une analogie entre la distribution de gradient dans la pollution et le champ dans l'air, juste au-dessus de sa surface.

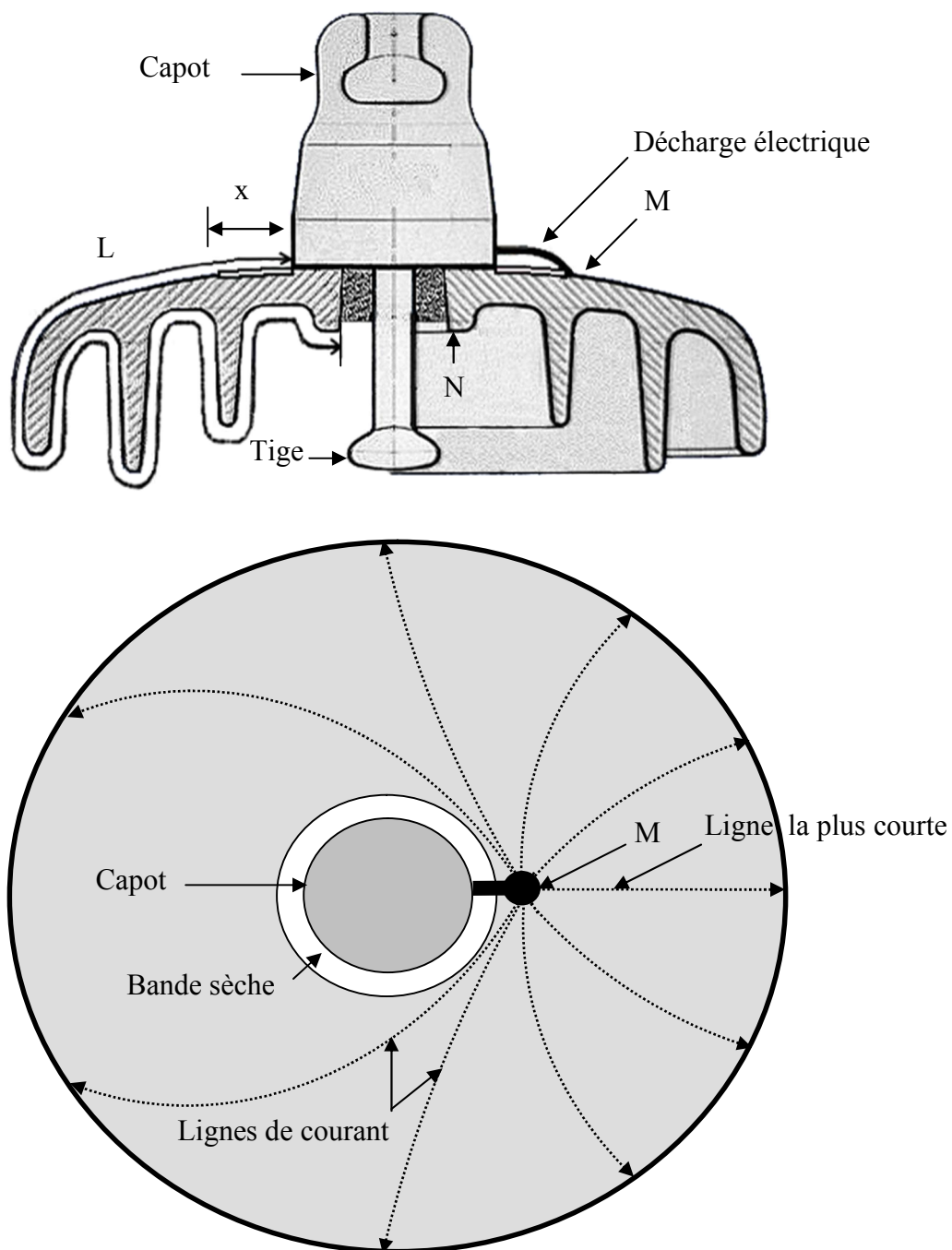


Figure I-1: Paramètres géométriques et électriques d'un isolateur réel

x: Largeur de la bande sèche.

L: Ligne (distance) de fuite.

I-3 CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT

Pour étudier l'évolution de la décharge sur la ligne MN jusqu'au contournement total, aussi bien que l'influence de différents paramètres géométriques et électriques sur cette élongation, et vu la complexité de la forme de la pollution et de la distribution spatiale des grandeurs électriques, les chercheurs considéraient que le phénomène, qui est une décharge en série avec la pollution de l'isolateur, est équivalent à une décharge en série avec une résistance d'un électrolyte.

En se basant sur cette idée, ils ont proposé plusieurs modèles expérimentaux. La plupart ayant donné les résultats les plus importants jusqu'ici, peuvent être rapportés au modèle le plus simple conçu par Obenaus en 1935 [8]. Ce dernier a représenté le phénomène du contournement par un système formé d'une décharge de forme tubulaire de longueur donnée x , placée en série avec une résistance de longueur $(L-x)$ représentant la pollution entre le pied de la décharge et la tige (Figure I-2a).

La distribution de la tension dans le circuit de la Figure I-2a s'écrit:

$$V = V_d(x) + V_p(x) \dots \dots \dots (I-1)$$

$V_p(x)$ est la différence de potentiel aux bornes de la pollution, ou bien la différence de potentiel entre le pied de la décharge et l'électrode de masse. Cette différence de potentiel est calculée par la relation suivante :

$$V_p(x) = I R_p(x) \dots \dots \dots (I-2)$$

$R_p(x)$ est la résistance de pollution.

I est le courant du circuit électrique.

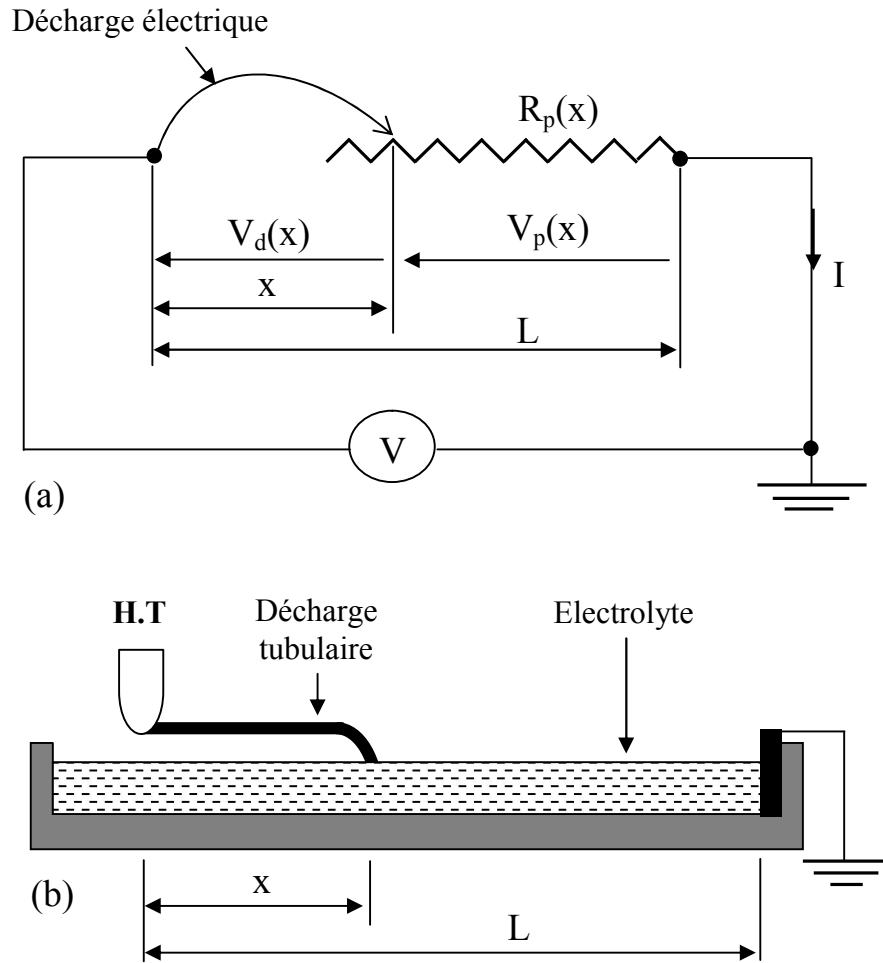


Figure I-2: La simulation du contournement dans les études de modélisation
 (a) Circuit électrique équivalent au phénomène du contournement
 (b) Evolution tubulaire de la décharge dans les études de modélisation

Dans la littérature du contournement, la majorité des travaux considèrent que cette résistance est linéaire sur la totalité de la longueur, entre le pied de la décharge et l'électrode de masse avec une valeur par unité de longueur (r) constante, dans les modèles à une couche [9-13] ou à deux couches [14,15] ou les modèles multidirectionnels [16-17], d'où :

$$R_p(x) = r(L - x) \dots \dots \dots (I-3)$$

Certaines publications considèrent que sur les premiers centimètres après le pied de la décharge, la résistance est non linéaire. Ils ont proposé plusieurs méthodes

de calcul ou de correction, pour corriger la valeur approximative de $r(L - x)$ [12, 13, 18-20].

$V_d(x)$ est la différence de potentiel aux bornes de la décharge, donnée par la relation suivante [9,11]:

$$V_d(x) = x A I^n + V_e \dots \dots \dots (I-4)$$

V_e est la chute de tension accumulée aux électrodes (cathodique et anodique).

x est la longueur de la décharge.

$A I^n$ est le gradient de tension dans la colonne positive de la décharge.

A et n étant deux constantes, définies par les conditions expérimentales [11]. Pour une décharge dans l'air sec, on prend souvent $A = 63$, $n = 0.76$ et $V_e = 840$ V et dans une atmosphère saturée en vapeur d'eau on prend : $A = 530$ et $n = 0.24$.

Donc l'équation électrique complète qui correspond au circuit électrique de la Figure2a est:

$$V = x A I^n + r(L - x) I + V_e \dots \dots \dots (I-5)$$

La relation (I-5), qui donne la tension appliquée en fonction du courant et de la longueur de la décharge, est considérée comme la fonction dynamique du contournement.

Si l'on admet que V_e est constante, et que l'on pose:

$$U = V - V_e \dots \dots \dots (I-6)$$

L'équation s'écrit alors :

$$U = x A I^n + (L-x) r I \dots \dots \dots (I-7)$$

La Figure I-3 montre les graphes $U(I)$, pour plusieurs valeurs de x (longueurs de la décharge), chaque courbe présente un minimum M . A la droite de ce point M , les caractéristiques sont stables électriquement, contrairement à sa gauche, où elles sont instables.

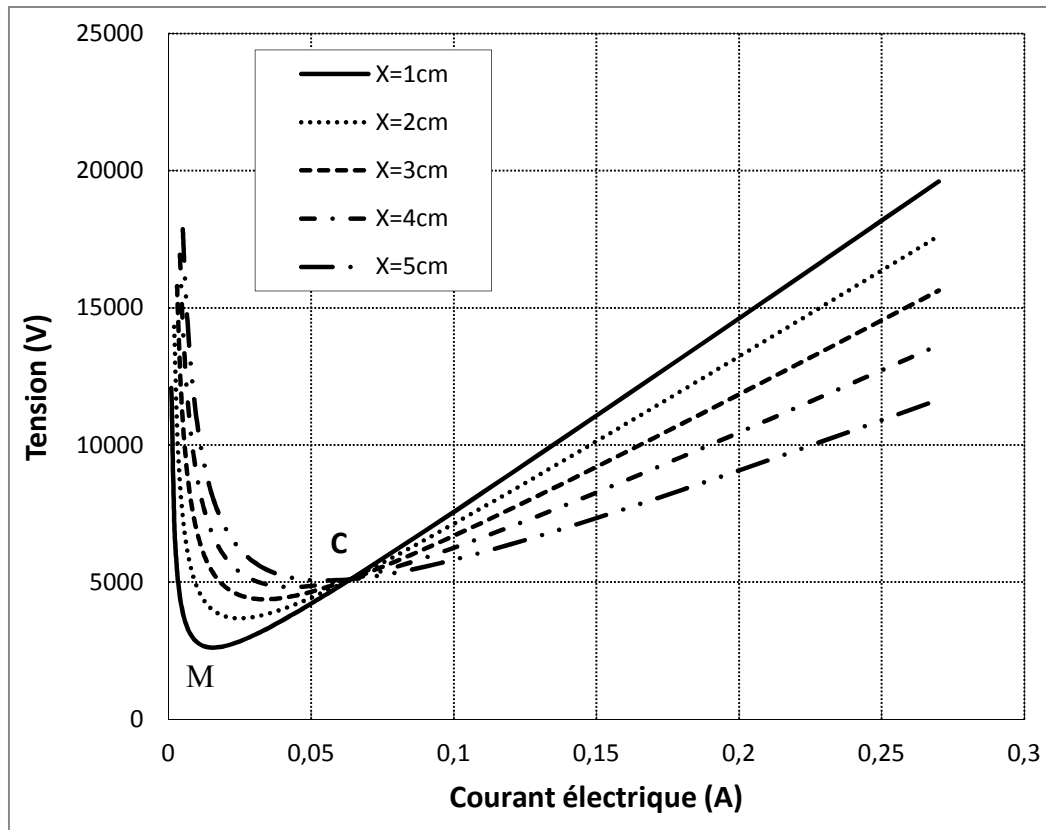


Figure I-3 : Caractéristiques dynamiques du contournement
pour $A = 63$, $n = 0.76$, $L=10\text{ cm}$, $r = 8\text{ k}\Omega.\text{cm}$

Les coordonnées du point M , I_M et U_M sont fonction de x ; quand x varie de zéro à L , les points M dessinent une courbe ayant un maximum au point C , point commun à toutes les caractéristiques $U(I)$.

La Figure I-4 montre les variations de U_M en fonction de x , on remarque que pour que la décharge puisse s'allonger jusqu'à $x=1\text{cm}$, la tension U doit être égale à U_1 . Cependant pour une tension appliquée égale ou supérieure à U_c , la décharge peut s'allonger jusqu'à x_c et rien ne l'empêchera ensuite de continuer jusqu'à $x = L$, ce qui correspond au contournement.

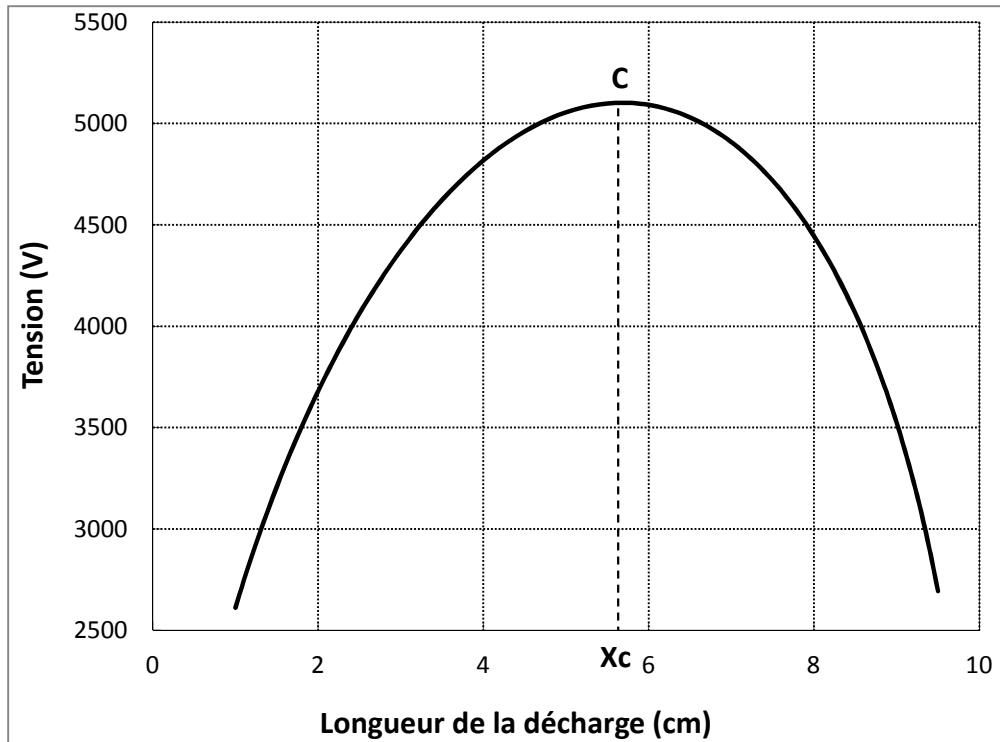


Figure I-4 : Tension minimale en fonction de la longueur de la décharge pour $r = 8 \text{ K}\Omega.\text{cm}$

Ces valeurs sont données par les équations suivantes [21-22] :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_c = (A/r)^{1/1+n} \\ U_c = L r^{n/1+n} A^{1/1+n} \\ X_c = L / 1 + n \end{array} \right.$$

Au - delà de ces valeurs qui déterminent les conditions critiques de contournement, la décharge devient « mécaniquement » instable dans l'espace et le contournement est alors possible.

I-4 CRITERES DU CONTOURNEMENT

Les principaux critères de propagation de la décharge rencontrés dans la littérature du contournement, ont été établis sur la base d'une condition faisant intervenir un des paramètres physiques suivants : le champ électrique, le courant, la puissance ou encore l'énergie fournie par la source.

HAMPTON a montré que les conditions critiques de contournement [10] sont atteintes lorsque le gradient de potentiel dans l'électrolyte est supérieur ou égal au gradient de potentiel dans la colonne positive de la décharge, ($E_p \geq E_d$). Cette condition est réalisée à partir du point C montré sur les Figures I-3 et I-4.

ALSTON et ZOLEDZIEWSKI [23], qui ont aussi traité le phénomène, ont affirmé que le point C, est le point critique du contournement. Ce point C correspond aux valeurs critiques de la tension V_c de la longueur x_c et du courant I_c . Il peut être le même défini par HAMPTON si la même caractéristique de l'arc est utilisée.

HESKETH [24] a montré que dans le modèle d'OBENAU, le critère de HAMPTON est vérifié lorsque $dI/dX > 0$, c'est-à-dire que la décharge devient instable quand:

$$\frac{dI}{dX} > 0$$

Cette condition est réalisée à partir de ce point C.

WILKINS, pour définir un critère déterminant les conditions critiques de contournement [25], a apporté plusieurs modifications du modèle simple d'OBENAU, c'est-à-dire à partir d'une base théorique différente il est arrivé au même critère $dI/dX > 0$. Il considère que le mouvement d'allongement de la décharge se produit si $dP/dX > 0$, P étant la puissance fournie par la source.

Vu que dans le cas du courant continu $P = U \cdot I$, on a donc:

$$\frac{dP}{dX} = \left(\left(\frac{dU}{dX} \right) \cdot I + \left(\frac{dI}{dX} \right) \cdot U \right) > 0$$

Lorsque la tension appliquée est constante durant la propagation de la décharge, l'équation précédente se réduit à $dI/dX > 0$ et le critère rejoint celui de HESKETH.

HURAU et RAHAL [22,26] ont retrouvé le même point critique C, en analysant les diagrammes $X(I)$ sous tension U constante.

Les coordonnées du point C, qui représentent les conditions critiques de contournement, sont les mêmes en polarité positive et négative. Ceci est en contradiction avec les résultats expérimentaux de RAHAL qui a trouvé que les tensions critiques en polarité négative sont autour de 2/3 des tensions critiques en polarité positive.

Toutes ces études qui reposent sur plusieurs hypothèses différentes par leur base physique ou par leur méthode d'exploitation aboutissent aux mêmes grandeurs critiques, qui constituent les coordonnées du même point critique C, à partir duquel, la décharge devient instable mécaniquement, et le contournement possible.

Ce fait ne permet pas de déterminer laquelle ou lesquelles de ces hypothèses sont valides. Autrement dit on ne peut pas savoir si cet accord dans les résultats est une condition nécessaire au contournement, ou bien s'il n'est dû qu'à la particularité du modèle d'OBENAUUS (**une décharge électrique en série avec une résistance de pollution**)?

L'analyse ci-dessous du circuit dynamique et de son rapport avec le contournement le rend facile de voir la condition faite dans les diverses études de la modélisation du contournement.

Premièrement, la décharge électrique, dans son état dynamique, est considérée de forme tubulaire ; de diamètre constant, tandis que l'évolution de cette dernière est simplement un déplacement de son pied sur la surface de la résistance de pollution, tout en maintenant sa forme tubulaire durant toute son évolution (Figure I-2b).

Deuxièmement, nous remarquons facilement que la forme géométrique de la pollution, et par conséquent la distribution du courant de la tension et de son gradient sont très différents entre ceux sur l'isolateur réel de la Figure I-1 et ceux du circuit équivalent de la Figure I-2. Nous pouvons également remarquer que le courant dans la direction de propagation de la décharge est très différent du courant total.

En réalité, le circuit équivalent ne permet d'étudier que l'influence de la valeur de la résistance de pollution, ou bien, la valeur du courant total, sans tenir compte de

la forme de cette pollution et de la distribution de ce courant autour du pied de la décharge [8-20].

I-5 ANALYSE CRITIQUE DU CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT

Nous présentons ci-dessous une analyse critique basée sur des études expérimentales, effectuées sur plusieurs modèles de laboratoire, touchant les deux éléments importants du circuit: La résistance de la pollution et la décharge électrique.

I-5-1 LA RESISTANCE DE POLLUTION DANS LE CIRCUIT ELECTRIQUE EQUIVALENT AU CONTOURNEMENT

Dans la littérature de la modélisation du phénomène de contournement, seulement la valeur de la résistance de pollution a été prise en considération, sans tenir compte de l'influence de sa forme géométrique, en pensant que le courant électrique du circuit participe dans le phénomène par sa valeur totale, et que la forme géométrique des lignes de courant n'a aucune influence sur le phénomène du contournement.

La différence entre la résistance réelle de la Figure I-1 et la résistance équivalente de la Figure I-2, se trouve essentiellement dans la distribution géométrique des lignes de courant. Le courant qui se trouve dans le sens de propagation de la décharge, qui peut avoir un sens physique pour la propagation de la décharge, est très différent du courant total de la pollution, ce dernier n'a pas un sens physique pour la propagation de la décharge mais il a été interprété et considéré comme une grandeur critique.

Pour vérifier la validité de cette hypothèse, non justifiée, nous avons utilisé plusieurs modèles expérimentaux, à partir du modèle bidirectionnel en l'année 1987 [16] jusqu'à le modèle circulaire de l'année 2003 [27].

I-5-1-1 Modèles multidirectionnels

Nous avons utilisé les résultats expérimentaux obtenus sur des modèles multidirectionnels étudiant la variation des conditions critiques du contournement en fonction de la forme géométrique de la répartition des lignes de courant. Le

premier est un modèle bidirectionnel avec deux rainures (canaux) séparées par un angle 180° (Figure I-5). Le second est un modèle avec quatre rainures séparées par un angle 90° (Figure I-6). Le troisième modèle est avec huit rainures séparées par un angle 45° (Figure I-7).

Comme le montre la Figure I-1, le système est à courant multi directionnel: Son modèle équivalent le plus simple est le modèle bidirectionnel de la Figure I-5 offrant deux sens de propagations de la décharge, à droite et/ou à gauche.

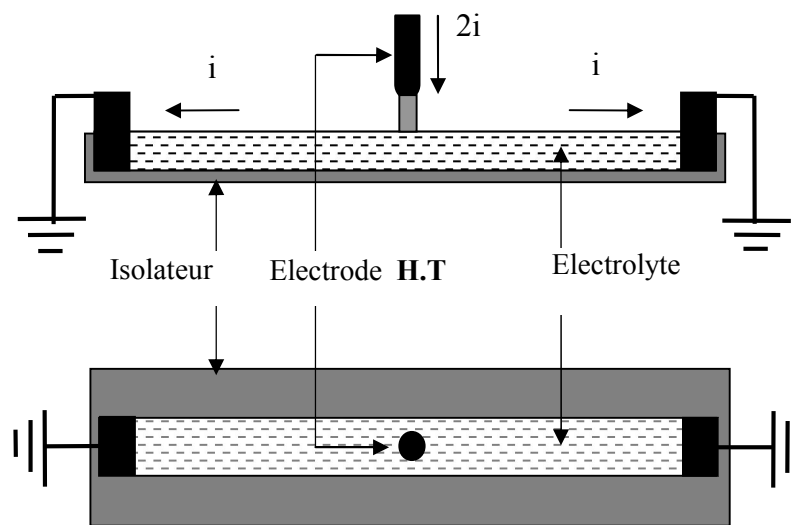


Figure I-5: Modèle bidirectionnel du contournement

Dans ce modèle, le courant dans la décharge, est divisé en deux courants de direction opposée, chacun passe par une résistance d'électrolyte avant d'atteindre l'électrode de masse. Si les deux résistances sont égales, le courant dans chaque direction (i) sera égal à la moitié du courant dérivé ($i=I/2$).

Le modèle à quatre rainures de la Figure I-6 offre quatre directions de propagation à la décharge, où le courant initial dans chaque direction est égal à un quart du courant dans la décharge ($i=I/4$). Le modèle à huit rainures de la Figure I-7 offre à son tour huit directions de propagation à la décharge, où le courant initial dans chaque direction est égal à un huitième du courant dans la décharge ($i=I/8$).

Le modèle à quatre rainures de la Figure I-6 offre quatre directions de propagation à la décharge, où le courant initial dans chaque direction est égal à un quart du courant dans la décharge ($I=4i$). Le modèle à huit rainures de la Figure I-7 offre à son tour huit directions de propagation à la décharge, où le courant initial dans chaque direction est égal au huitième du courant dans la décharge ($I=8i$).

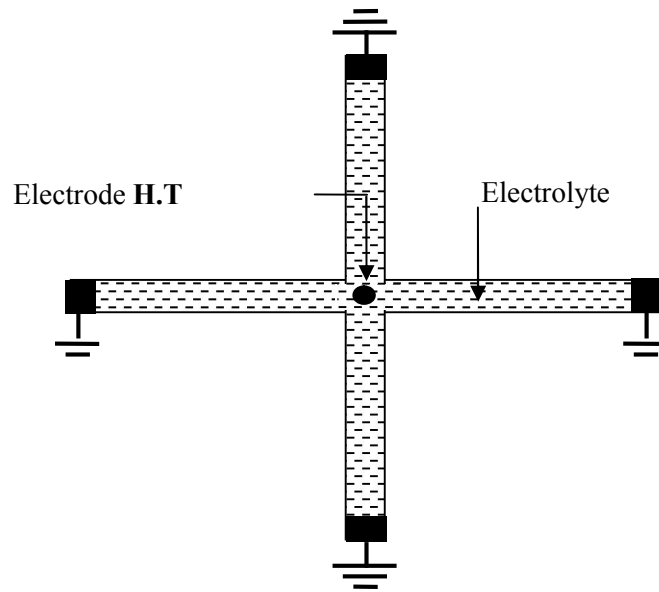


Figure I-6: Modèle à quatre directions du contournement

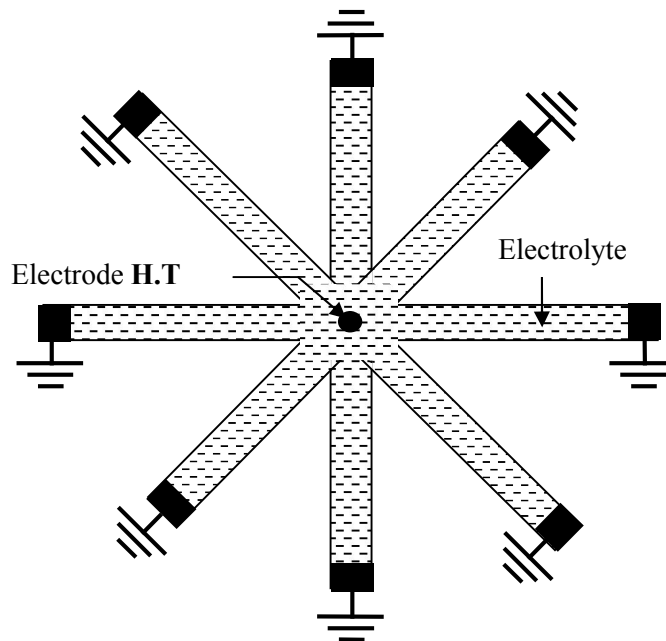


Figure I-7: Modèle à huit directions du contournement

Les Figures I-8 et I-9 montrent respectivement le courant et la tension critiques du contournement du modèle simple (mono-contournable) et les trois modèles multidirectionnels en fonction de la résistance par unité de longueur.

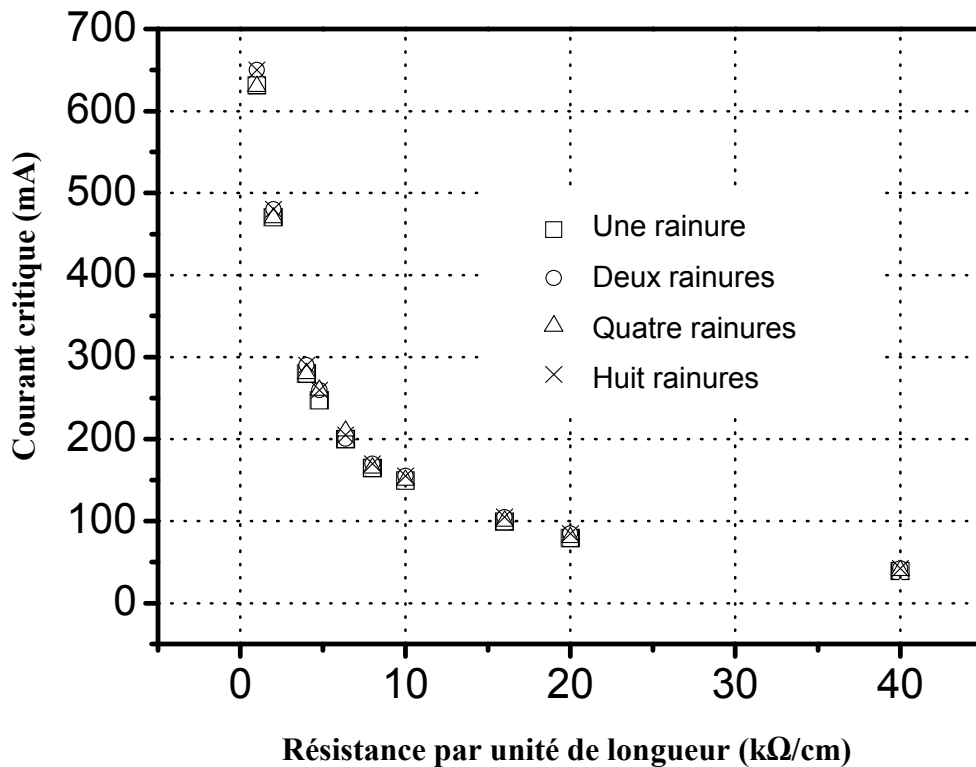


Figure I-8: Courant critique en fonction de la résistance par unité de longueur pour $L=10\text{cm}$

Les résultats montrent que le courant et la tension critique du contournement dans une rainure sont fonction de la résistance par unité de longueur mais sont invariables en fonction de nombre de rainures.

Ceci signifie que le courant dans une rainure (i) détermine les conditions critiques du contournement et non pas le courant dans la décharge ($I=2i$), et le courant critique dans une rainure est identique, indépendamment si les autres branches sont reliées ou non.

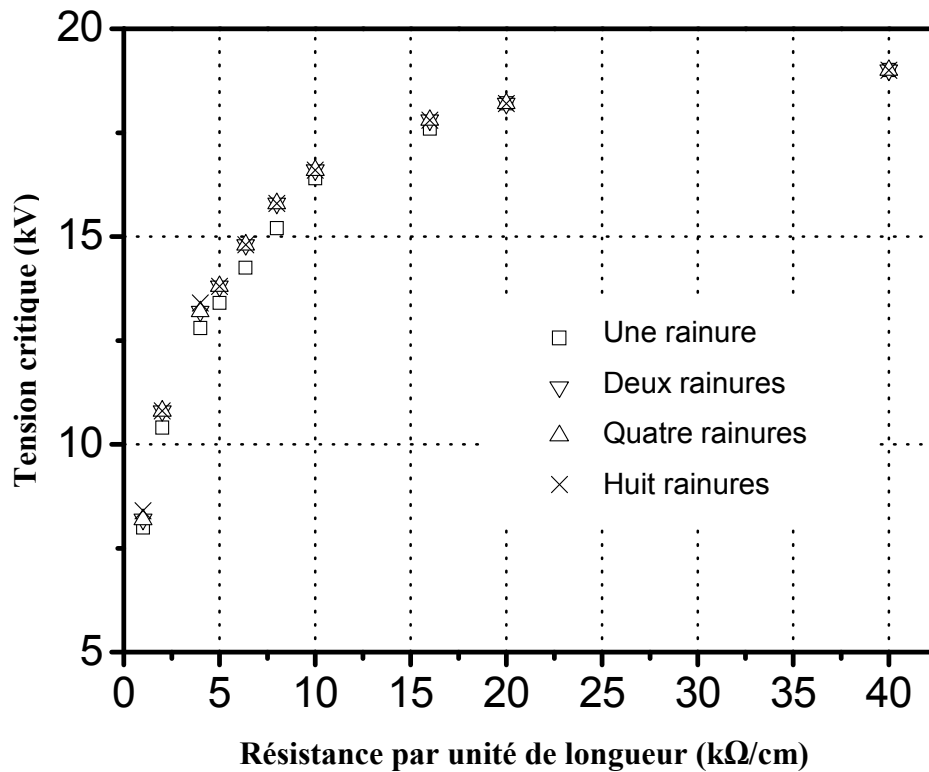


Figure I-9: Tension critique en fonction de la résistance par unité de longueur pour $L=10\text{cm}$

Ce résultat montre que c'est le courant dans la direction de propagation de la décharge qui détermine les conditions critiques du contournement et non pas le courant total du système. C'est -à- dire que le courant critique dans le modèle monodirectionnel, qui est le courant total du système dépend de la résistance par unité de longueur, et dans le modèle bidirectionnel le courant critique est le courant de la partie contournée seulement, différent du courant total du système, et il ne dépend que de la valeur de la résistance par unité de longueur de cette partie. Par conséquent, parler du courant total critique est sans signification dans le cadre des conditions critiques du contournement puisque le courant responsable du contournement est celui du côté de l'évolution de la décharge : le courant dans la branche contournée.

Basé sur les résultats expérimentaux ci-dessus, où $(E_p = i.r)$ est indépendant de $(E_d = AI^{-n})$, nous pouvons conclure que le critère de Hampton [10], utilisé dans la modélisation du contournement, qui est le suivant « le contournement est possible si le gradient de tension dans la pollution (E_p) devient supérieur au gradient dans la

décharge (E_d) » $E_p \geq E_d$ est injustifié. De même, le critère de contournement de Wilkins et Al Baghdadi [9], déclarant que « le contournement est possible si le courant total augmente pendant la propagation de la décharge » $dI/dx \geq 0$, est également injustifié comme critère.

Ces résultats nous ont permis de dire que la distribution du courant, c'est-à-dire la forme géométrique des lignes de courant est très importante dans le problème du contournement. Cette réalité n'est pas prise en considération dans la modélisation du contournement.

Nous pouvons conclure que l'isolateur réel de la Figure I-1 est équivalent à un système multidirectionnel, constitué d'un nombre infini de lignes de courant, non uniforme ou non symétrique, et chaque ligne représente une rainure et que sa valeur critique dépend de la résistivité de l'électrolyte [32].

Pour que la décharge s'allonge suivant un certain sens, il faut que les lignes de courant dans ce sens atteignent la valeur critique. Les lignes de courant en valeur et en forme sont déterminées par : La forme géométrique de la pollution, la position de la décharge et la forme de l'électrode de masse.

I-5-1-2 Modèle secteur circulaire

Les modèles à sens unique (mono-contournable) ne tiennent pas compte de l'existence des lignes de courant dans plusieurs directions autour du pied de la décharge. Les modèles multidirectionnels de la Figure I-5, I-6 et I-7 peuvent produire plusieurs directions des lignes de courant autour du pied de la décharge mais ces lignes sont séparées par l'isolation qui existe entre les rainures. Par conséquent, la distribution des lignes de courant autour du pied de la décharge est discontinue.

Pour cela, le modèle de laboratoire secteur circulaire est conçu pour permettre d'étudier l'influence de la distribution géométrique des lignes de courant ainsi que la distribution de la tension et de son gradient dans l'électrolyte sur les conditions critiques du contournement.

Ce modèle est un bac de forme circulaire constitué de secteurs d'angles et de rayons variables [33,34]. La caractéristique de ce modèle de laboratoire est:

- La distribution des lignes de courant autour du pied de la décharge est continue et radiale (Figure I-10 et I-11).

- Pour un secteur donné, la distribution de la densité du courant ainsi que celle du potentiel et de son gradient le long du rayon sont les mêmes pour tous les rayons du secteur.

- Si la résistance du secteur de 90° est R celles de 180° et 360° seront $R/2$ et $R/4$ respectivement.

- Si la valeur de la tension appliquée est la même pour ces trois secteurs, le courant sera I , $2I$ et $4I$ pour les secteurs 90° , 180° et 360° respectivement et la distribution du courant le long des rayons est la même pour tous les secteurs de la Figure I-10 et I-11.

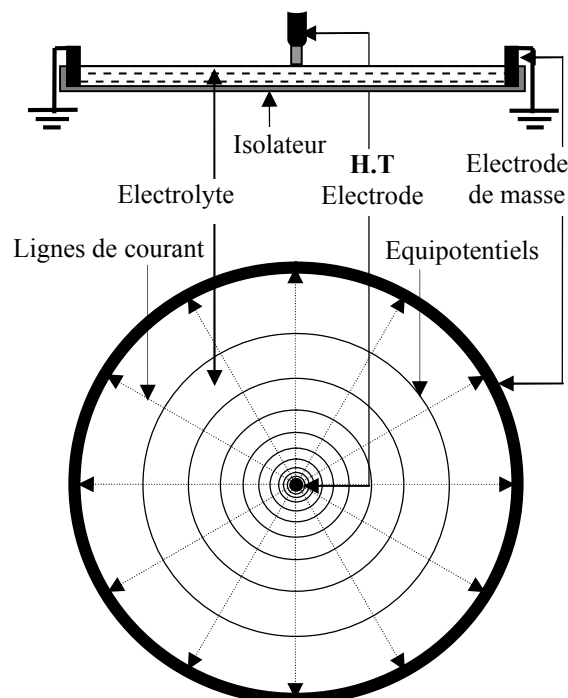


Figure I-10: Modèle secteur circulaire

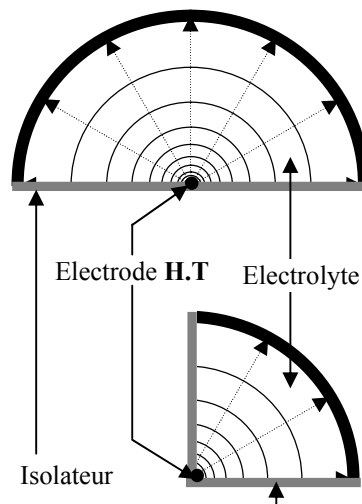


Figure I-11: Modèles secteur circulaire de 180° et 90°

Nous présentons ci-dessous les résultats expérimentaux [32,35], sur le modèle secteur circulaire d'angles différents, de l'étude de l'influence de la distribution horizontale et verticale du courant dans l'électrolyte sur les conditions critiques du contournement.

A- Influence de la distribution des lignes de courant dans le plan horizontal de l'électrolyte

Les courbes de la Figure I-12 et I-13 montrent l'influence de la distribution des lignes de courant dans le plan horizontal de la surface électrolytique, remplie dans le bac circulaire à une profondeur de 3 mm, sur les conditions critiques du contournement à savoir tension et courant critiques en fonction de la variation de l'angle et de rayon du modèle.

Nous pouvons remarquer sur les courbes de la Figure I-12 que pour une résistivité donnée:

- Le courant critique varie proportionnellement (linéairement) avec la variation de l'angle, c'est-à-dire, l'intensité du courant qui traverse chaque unité d'angle (1°)

est la même pour tous les secteurs ; elle est égale à 3.8 mA/°, à 2.3 mA/° et à 1.65 mA/° pour les résistivités 2.5, 5 et 10 kΩ.cm respectivement.

- La valeur critique de la tension est la même pour tous les angles : elle est égale à 8, 9.5 et 13 kV pour les résistivités 2.5, 5 et 10 kΩ.cm respectivement.

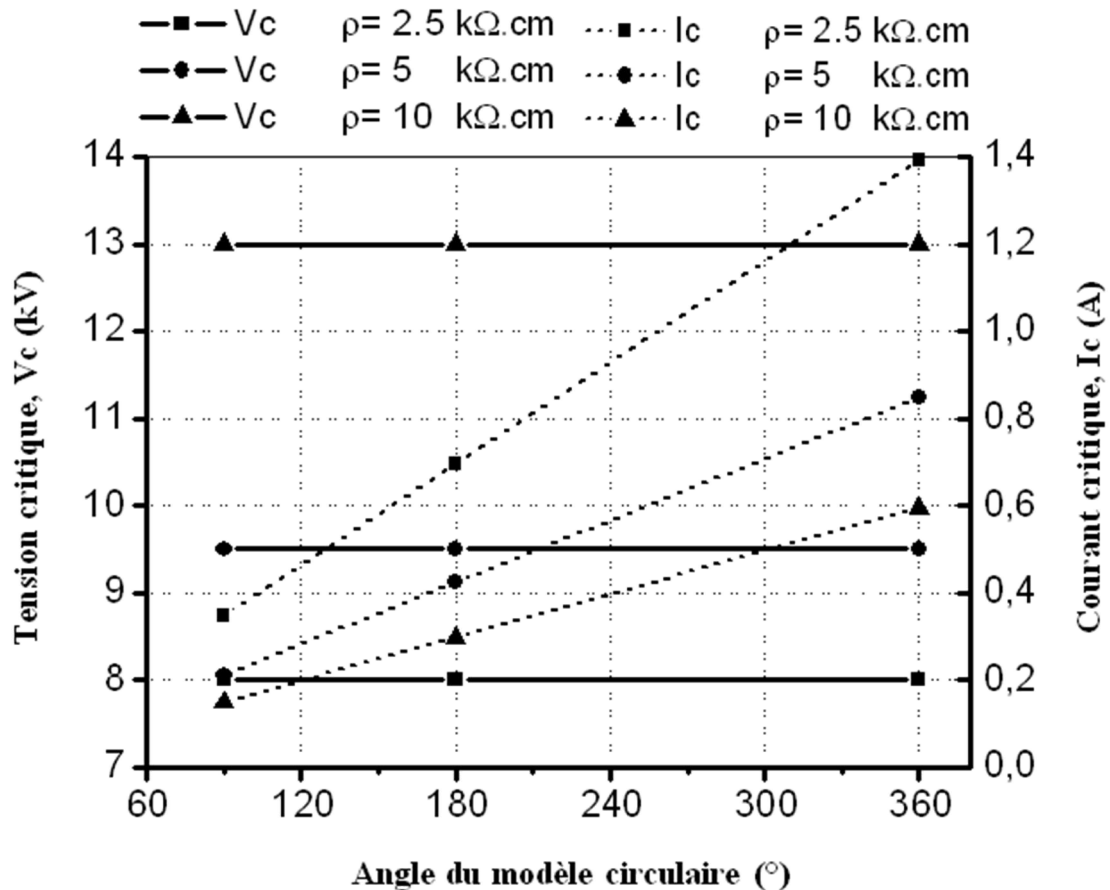


Figure I-12 : Courant et tension critique en fonction de l'angle du modèle secteur circulaire, pour un rayon de 137 mm

La Figure I-13 montre que :

- La tension critique varie presque linéairement avec le rayon du secteur. Pour une variation du rayon de 6 cm à 12 cm (100%) la tension critique augmente de 6 kV à 9 kV (50%) en utilisant la résistivité 5 kΩ.cm, et de 7.5kV à 12 kV (60%) en utilisant la résistivité 10 kΩ.cm.

- Également le courant critique subit une augmentation presque linéaire avec l'augmentation de rayon du secteur pour les deux résistivités 5 et 10 kΩ.cm.

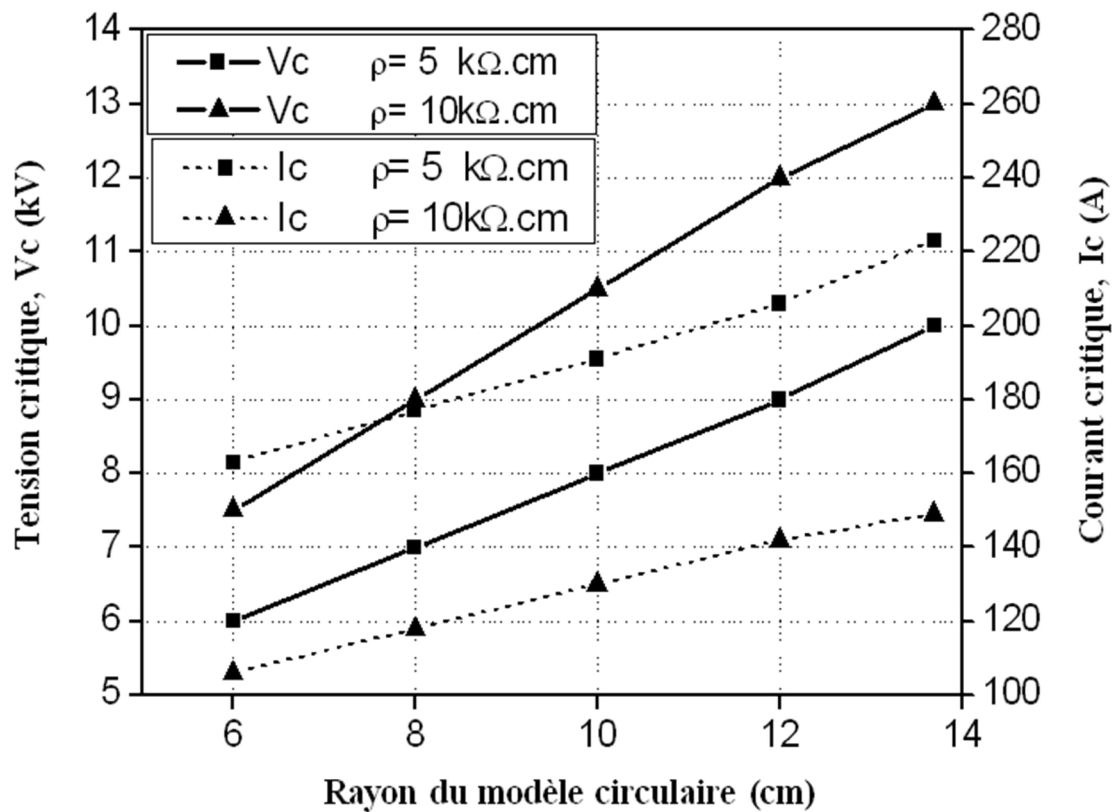


Figure I-13 : Courant et tension critique en fonction du rayon du modèle secteur circulaire d'angle 90°

B- Influence de la distribution des lignes de courant dans le plan vertical de l'électrolyte

Pour étudier l'influence de la distribution des lignes de courant dans le plan vertical de l'électrolyte sur les conditions critiques du contournement, en utilisant le secteur de 90° de la Figure I-11 ayant un rayon de 137mm rempli d'électrolyte possédant une résistivité de $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ et une épaisseur variant de 2 à 10mm, deux cas ont été considérés : le premier est celui de la Figure I-14, dont la distribution des lignes de courant sur le plan vertical est non uniforme ; le second est celui de la Figure I-15, où cette distribution est uniforme en raison de la présence d'une lame métallique immergée dans l'électrolyte. La lame métallique a une épaisseur de 0.5 mm et une hauteur égale à la profondeur de l'électrolyte rempli dans le bac circulaire.

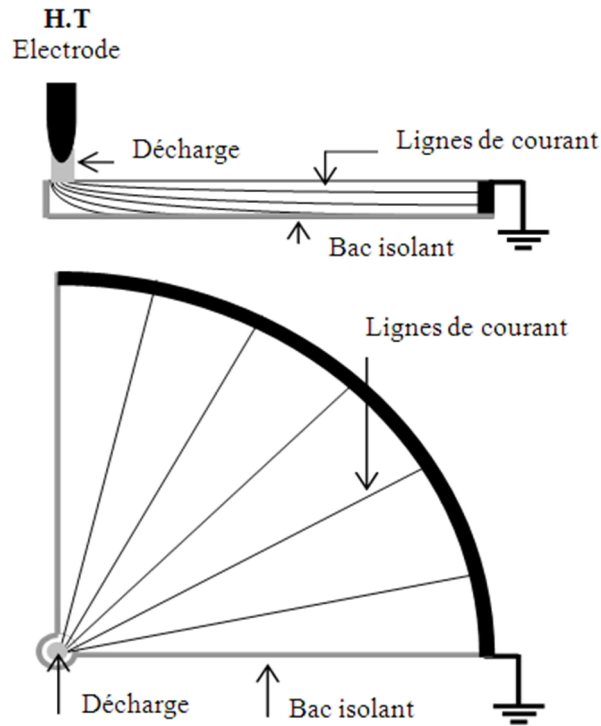


Figure I-14: La distribution des lignes de courant dans le plan vertical de l'électrolyte (Sans lame)

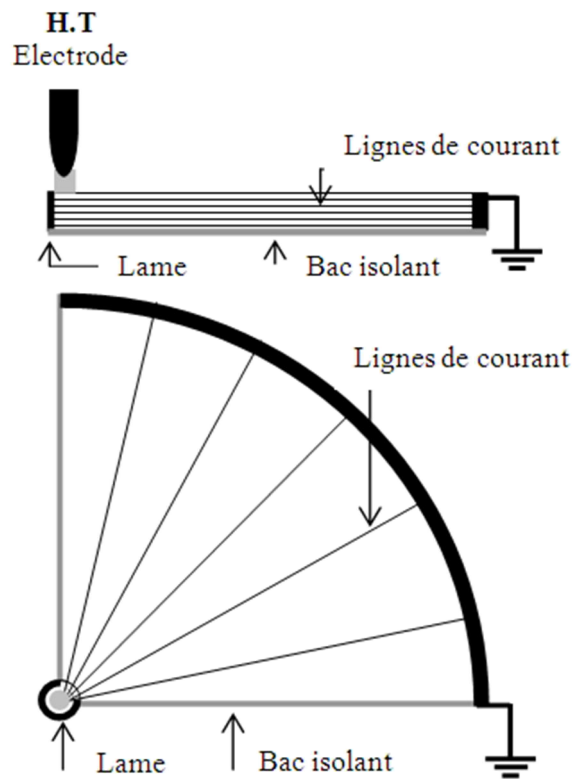


Figure I-15: La distribution des lignes de courant dans le plan vertical de l'électrolyte (Avec lame)

La Figure I-16 montre la variation de la tension critique en fonction de la profondeur de l'électrolyte pour les deux cas. Nous avons remarqué que dans le premier cas (sans lame) où la distribution des lignes de courant est non uniforme dans le plan vertical, la valeur critique de la tension diminue quand la profondeur de l'électrolyte augmente : La tension diminue de 15kV jusqu'à 9.5kV. Dans le deuxième cas (avec lame) où la distribution des lignes de courant est uniforme dans le plan vertical, la tension critique est pratiquement invariable, sa valeur est autour de 15.5kV.

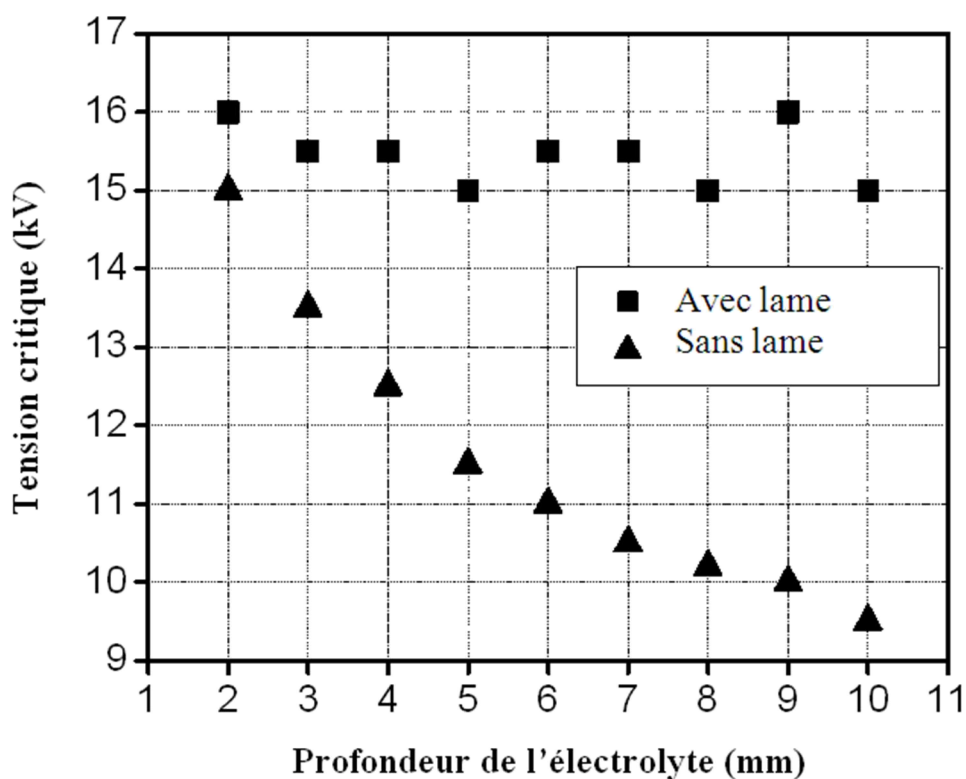


Figure I-16 : Tension critique en fonction de la profondeur d'électrolyte pour les deux cas, avec et sans lame

La Figure I-17 montre la variation du courant critique en fonction de la profondeur d'électrolyte pour les deux cas, nous avons remarqué que:

- Dans le cas avec lame (distribution uniforme), le courant critique varie linéairement avec la variation de la profondeur d'électrolyte, c'est-à-dire, l'intensité

du courant critique qui croise chaque unité de profondeur (1mm) est la même pour toutes les profondeurs et est égale à 60mA/mm.

- Dans le cas sans lame (distribution non uniforme), la variation du courant est non linéaire ; sa valeur est plus petite que celle du cas avec lame.

La différence entre les deux valeurs de l'intensité de courant devient plus petite quand la profondeur diminue : Elles ont presque la même valeur pour la profondeur de 2mm (120mA pour le premier cas et 116mA pour le second cas). Malheureusement, l'expérience ne peut être effectuée pour une profondeur de 1 mm, mais nous pouvons prévoir que les valeurs du courant dans les deux cas seront les mêmes et sont égales à 60mA. Également, les valeurs de la tension critique seront les mêmes et sont égales à 15.5kV.

Donc, les conditions critiques du contournement sont remplies dans les premiers millimètres de la surface d'électrolyte, c'est-à-dire, le contournement se produit quand l'intensité du courant dans les premiers millimètres de la surface d'électrolyte atteint 60 mA, avec ou sans lame.

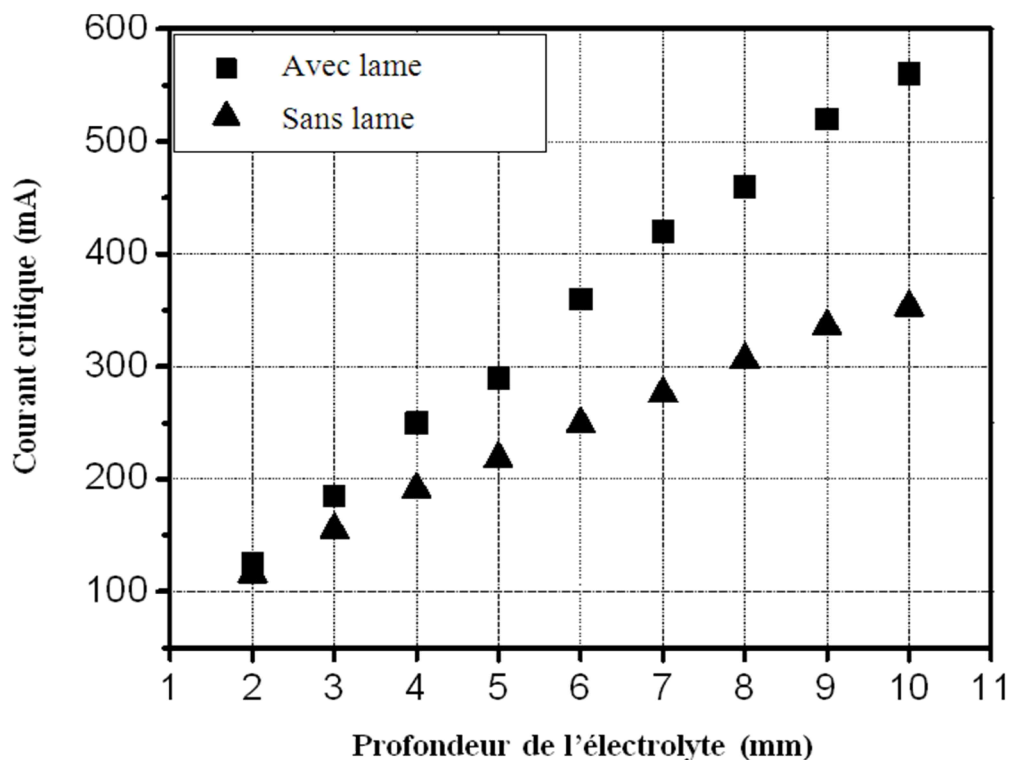


Figure I-17 : Courant critique en fonction de la profondeur d'électrolyte pour les deux cas, avec et sans lame

D'après l'étude de l'influence de l'angle du modèle circulaire de secteurs 90° , 180° et 360° sur les conditions critiques du contournement, nous pouvons conclure que, pour une distribution uniforme du courant dans le plan horizontal de l'électrolyte les conditions critiques sont déterminées par la valeur critique du courant par unité d'angle ($A/^\circ$), et non pas **le courant total**.

Également pour une distribution uniforme du courant dans le plan vertical de l'électrolyte, l'étude de l'influence de la profondeur d'électrolyte a montré que les conditions critiques sont déterminées par la valeur critique du courant par unité de profondeur (A/mm), et non pas **le courant total**.

Rassemblant ces résultats, nous pouvons constater que les conditions critiques du contournement sont déterminées par la valeur critique du courant par unité d'angle et par unité de la profondeur d'électrolyte ($A/^\circ/mm$) [35]. Cette condition critique est exigée pour que le contournement se produit mais ne pourrait pas représenter son critère parce qu'elle n'a pas une signification physique directe. Elle participe à la création d'un autre paramètre qui a une signification physique et une contribution dans l'évolution de la décharge. Ce paramètre est le champ dans l'air à proximité de la surface d'électrolyte entre la décharge et l'électrode de masse.

Basé sur cette conclusion, Flazi propose un nouveau critère du contournement: « le contournement est possible si la distribution du champ électrique le long de la distance de fuite est suffisante pour l'évolution de la décharge par rupture progressive de l'air entre la décharge et l'électrolyte ».

Le critère de Hampton $E_p \geq E_d$ et le critère de Wilkins $dI/dx \geq 0$, les deux basés sur les modèles simples de laboratoire, sont injustifiés.

I-5-2 ASPECT DYNAMIQUE DE LA DECHARGE ELECTRIQUE DU CONTOURNEMENT

La forme de la décharge pendant son évolution sur la surface des isolateurs pollués est un paramètre très important pour deux raisons essentielles : Premièrement, pour vérifier la validité des équations mathématiques employées dans la modélisation du

phénomène de contournement, et deuxièmement, pour mieux comprendre le mécanisme physique de l'évolution de la décharge électrique.

L'aspect tubulaire statique de la décharge a été vérifié par beaucoup d'auteurs [11,25]. L'aspect tubulaire dynamique, d'une part, est une déclaration qui n'est pas confirmée mais est simplement énoncée en tant que fait évident et employé comme prétention dans la simulation du contournement et la détermination de ses caractéristiques dynamiques. L'aspect tubulaire dynamique est employé dans toutes les études théoriques pour la modélisation du contournement, avec les modèles à une couche [8,10,12,16,21-25,28-31] ou à deux couches [14-15] ou les modèles multidirectionnels [13].

Afin de vérifier la validité de cette hypothèse «Aspect tubulaire dynamique», nous avons présenté les différentes études expérimentales traitant la forme de la décharge pendant son évolution, en plus de la différence entre les vraies caractéristiques dynamiques du contournement et celles utilisées dans la modélisation du contournement basées sur la forme tubulaire.

I-5-2-1 Aspect dynamique du contournement

Dans des travaux antérieurs [16, 36], et à partir des courants et des potentiels mesurés pendant l'évolution de la décharge jusqu'au contournement, une distribution du courant à un instant (t) donné, entre l'électrolyte et l'air, a été déduite afin de construire un profil de la région où circule le courant dans l'air et schématiser à l'intérieur de ce profil les lignes de courant, à partir de positions, l'une par rapport à l'autre, de l'électrode H.T et de la surface de pénétration de courant dans l'électrolyte.

La distribution du courant obtenue pour différentes périodes de l'évolution de la décharge le long de la surface de l'électrolyte est présentée à la Figure I-18. Deux périodes différentes étaient observées τ_1 et τ_2 de la période entière du contournement τ de sorte que $\tau_1 + \tau_2 = \tau$.

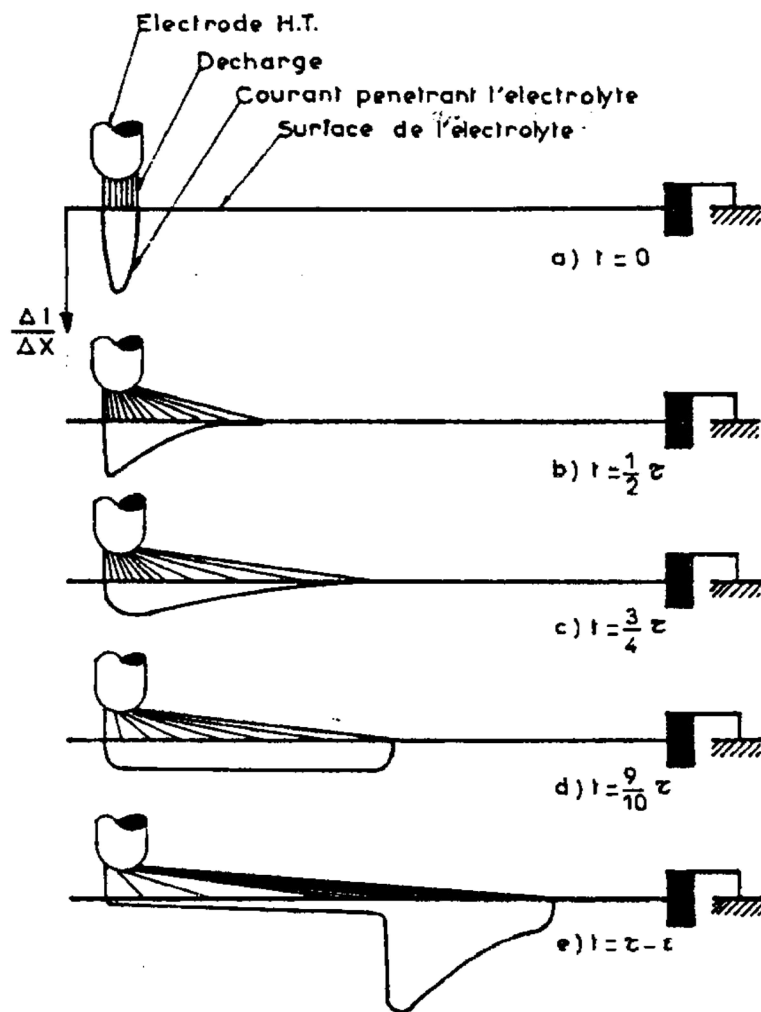


Figure I-18: Distribution du courant dans l'air entre l'électrode de H.T et l'électrolyte au cours du contournement

La première période τ_1 est comprise entre $t=0$ et l'instant de la distribution la plus homogène $t=9/10 \tau$, elle correspond à une prolongation importante de l'avant-pied de la décharge avec une concentration du courant dans la partie arrière ou en arrière-pied de la décharge. Cette prolongation est comme une légère évolution du centre de gravité électrique de la décharge qui produit une légère diminution de la résistance de l'électrolyte placée en série avec la décharge. Au cours de cette période, le courant augmente très lentement. Ceci explique l'augmentation légère du courant dans la partie (ab) de la courbe $I(t)$ donnée à la Figure I-19. Cette dernière représente la caractéristique dynamique expérimentale du contournement, c'est-à-dire, la forme

du courant $I(t)$ mesuré pendant l'évolution de la décharge qui finit par le contournement, sur un canal rectangulaire rempli d'électrolyte [16] ou de glace [18].

Au cours de la deuxième période τ_2 qui est très courte ($< \tau / 10$), le courant est concentré du côté vers l'avant-pied de la décharge. Il produit une diminution importante de la résistance de l'électrolyte qui mène à une importante augmentation du courant. La partie (bc) montre cette augmentation sur la courbe $I(t)$ donnée à la Figure I-19.

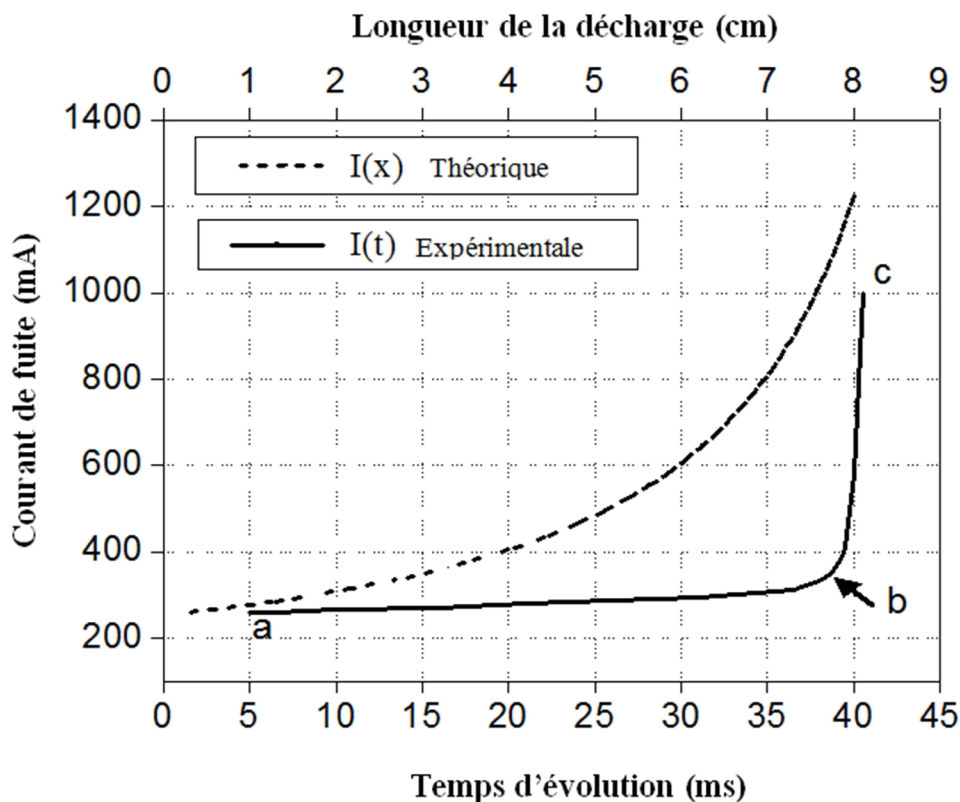


Figure I-19: Courant de fuite en fonction du temps de l'évolution de la décharge ou de la longueur de la décharge dans un canal rectangulaire pour :

$$r=5\text{k}\Omega/\text{cm}, V= 13.5\text{kV et } L=10\text{cm}$$

Avec :

$I(t)$ courant de fuite mesuré en fonction du temps de l'évolution de la décharge (Aspect dynamique expérimental du contournement);

$I(x)$ courant de fuite calculé en fonction de la longueur de la décharge pour:

$V_e= 840\text{V}, A= 63, n=0.76$ (Aspect dynamique de la décharge dans l'étude analytique).

Mahi [19] et Pissolato [20] ont montré, sans parler du sujet de l'aspect de la décharge électrique, qu'il y a deux zones dans la décharge, qui avancent avec deux vitesses différentes. Matsuo et all [30] ont remarqué les courants qui circulent entre le corps de la décharge et l'électrolyte derrière le pied de la décharge, ces derniers n'ont pas considéré que le volume d'air traversé par ces courants soit un élément intégré dans la décharge.

I-5-2-2 Caractéristique dynamique du contournement

La relation (I-5) peut être écrite comme suit :

$$x = (V - r L I - V_e) / (A I^n - r I) \dots\dots\dots(I-8)$$

Cette relation détermine la longueur de la décharge en fonction du courant pour une tension appliquée constante. La courbe I(x) de cette relation montrée à la Figure I-19 est considérée en tant que caractéristique dynamique du contournement dans la modélisation de ce dernier.

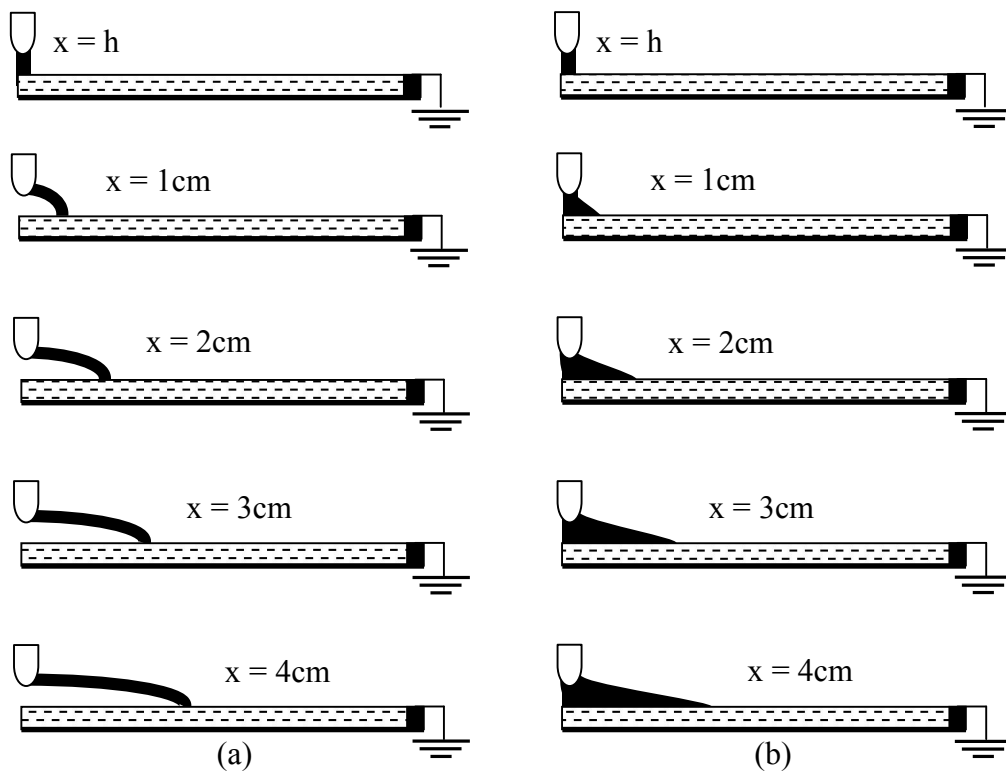


Figure I-20: Forme de la décharge durant le contournement
 (a) Evolution tubulaire de la décharge dans les études analytiques du contournement
 (b) Forme de pied élargie pendant l'évolution de la décharge dans les expériences

En fait, cette courbe représente une évolution tubulaire, comme le montre la Figure I-20a, et cela prouve que la forme de la décharge pendant son évolution est comme le montre la Figure I-20b, c'est-à-dire, la courbe $I(x)$ de la Figure I-19 ne représente pas la caractéristique dynamique du contournement mais la somme des points statiques.

Malheureusement, la caractéristique dynamique expérimentale $I(t)$ est liée à la période (t), et la caractéristique dynamique théorique de la forme tubulaire $I(x)$ de la même Figure est liée à la longueur de la décharge (x). La comparaison entre ces deux caractéristiques est possible seulement si le rapport entre (x) et (t) sera déterminé.

Pour déterminer expérimentalement ce rapport et pour montrer la différence entre les caractéristiques dynamiques du contournement basé sur la forme tubulaire et les vraies caractéristiques dynamiques [37], nous avons présenté les expériences effectuées sur le modèle classique d'OBENSAUS.

I-5-2-3 Modèle expérimental

Le modèle est un canal rectangulaire en Plexiglas (Figure I-21) d'une longueur de 20 cm, une largeur de 2 cm et une profondeur de 4mm, ce dernier est rempli d'électrolyte ($H_2O+NaCl$) de résistance par unité de longueur (r) variable. Une lame métallique mince avec une surface égale à la section du canal a été immergée dans l'électrolyte à une distance variable L_i afin d'arrêter la progression de la décharge complètement ou temporairement au point L_i et produire une décharge tubulaire stable avec une longueur $x = L_i$ (Figure I-21c). La Figure I-22 représente la forme du courant mesuré expérimentalement avec et sans présence de la lame métallique.

On remarque que :

a) La courbe abc, représente le courant pendant l'évolution de la décharge jusqu'au contournement en fonction du temps (t), sans la présence de la lame métallique. C'est la caractéristique dynamique expérimentale du contournement $I(t)$ de la Figure I-19.

b) La courbe $i_s(t)$ représente le courant pendant l'évolution de la décharge jusqu'à la position de la lame au point $L_i = 5$ cm en fonction du temps (t).

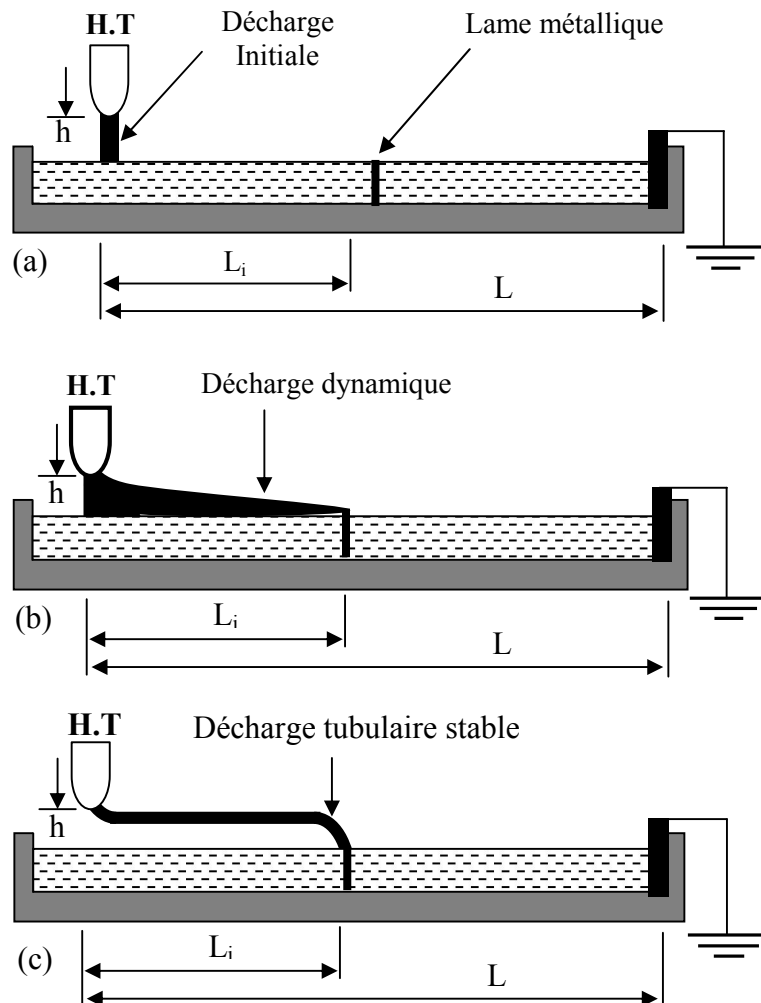


Figure I-21: Evolution de la décharge sur un modèle canal rectangulaire avec lame

(a) Décharge initiale

(b) Décharge en pied élargie jusqu'à la lame métallique

(c) Décharge arrêtée à $x = L_i$ en forme tubulaire

Le point (a) à la Figure I-22 représente la décharge tubulaire initiale d'une longueur de 3 mm, en série avec une résistance de longueur de 10 cm (Figure I-21a). Le point (d_i) correspond au moment où l'avant-pied dynamique de la décharge atteint la lame métallique (Figure I-21b), et le point (s_i) correspond au moment où l'arrière-pied de la décharge rejoint rapidement l'avant-pied, formant ainsi une décharge statique tubulaire de longueur $x = L_i$ (Figure I-21c), c'est-à-dire, le point (d_i)

est sur la caractéristique dynamique tandis que (s_i) est sur la caractéristique tubulaire ou statique.

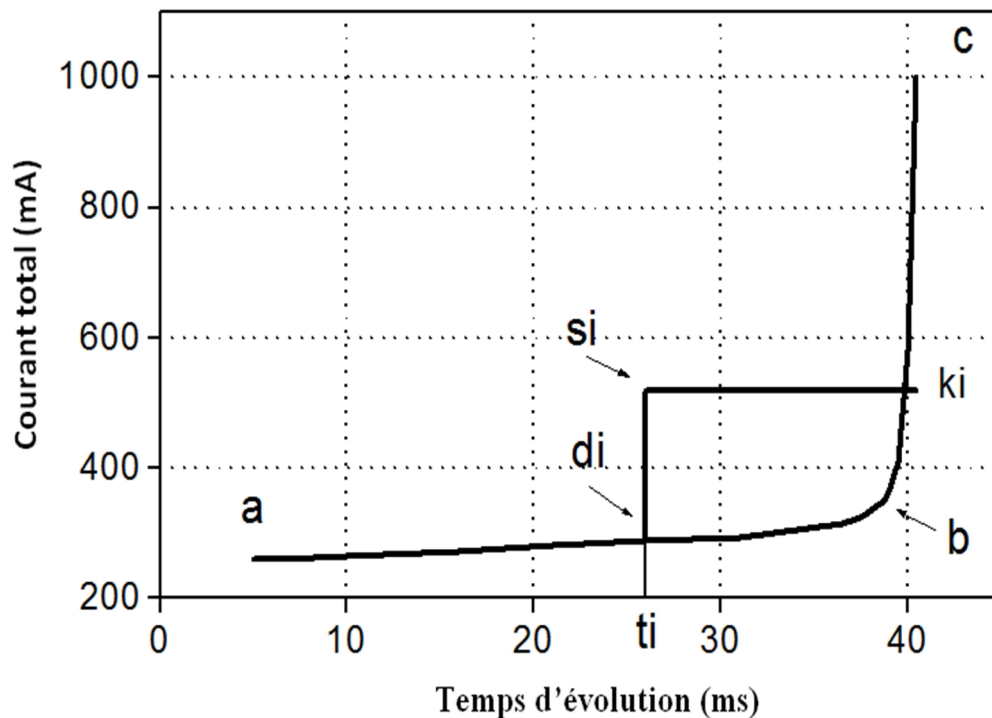


Figure I-22: Courant mesuré pendant l'évolution de la décharge pour:

$$V = 13.5 \text{ kV and } r = 5 \text{ k}\Omega/\text{cm};$$

abc: jusqu'au contournement sans lame;

a d_i s_i k_i: jusqu'à la lame avec $L_i = 5 \text{ cm}$ and $L = 10 \text{ cm}$

La valeur du courant mesuré I_{s_i} à l'instant t_i correspond à la valeur calculée du courant pour une décharge statique de longueur $x = L_i$ placée en série avec une résistance de longueur $(L - L_i)$.

Pendant que L_i change de 1 cm à la valeur la plus élevée qui peut être atteinte dans notre expérience, dans les étapes 1cm, les points (s_i) tracent une courbe « s ». Chaque point (s_i) de cette courbe représente une décharge tubulaire avec une longueur de $x = L_i$, en série avec une résistance de longueur $(L - L_i)$. Par conséquent la courbe « s » est la somme des points qui représentent des décharges tubulaires stables indépendantes. En d'autres termes, elle représente expérimentalement : La somme des décharges tubulaires statiques dans cette expérience et les caractéristiques dynamiques de l'aspect tubulaire dans la théorie.

La Figure I-23 montre les points expérimentaux « s », les points expérimentaux « d » et la courbe théorique déterminée à partir de la relation (I-8) pour une tension appliquée de 8.3kV et une résistance d'électrolyte par unité de longueur (r) de $1\text{k}\Omega/\text{cm}$. Également la Figure I-24 montre les mêmes courbes pour une tension appliquée de 13.5kV et une résistance d'électrolyte par unité de longueur (r) de $5\text{k}\Omega/\text{cm}$.

D'après les résultats, nous pouvons clairement remarquer la différence entre les caractéristiques dynamiques « d » et les caractéristiques statiques « s » pour les valeurs utilisées de (r). Également, les points des décharges statiques « s » sont pratiquement identiques que la caractéristique théorique.

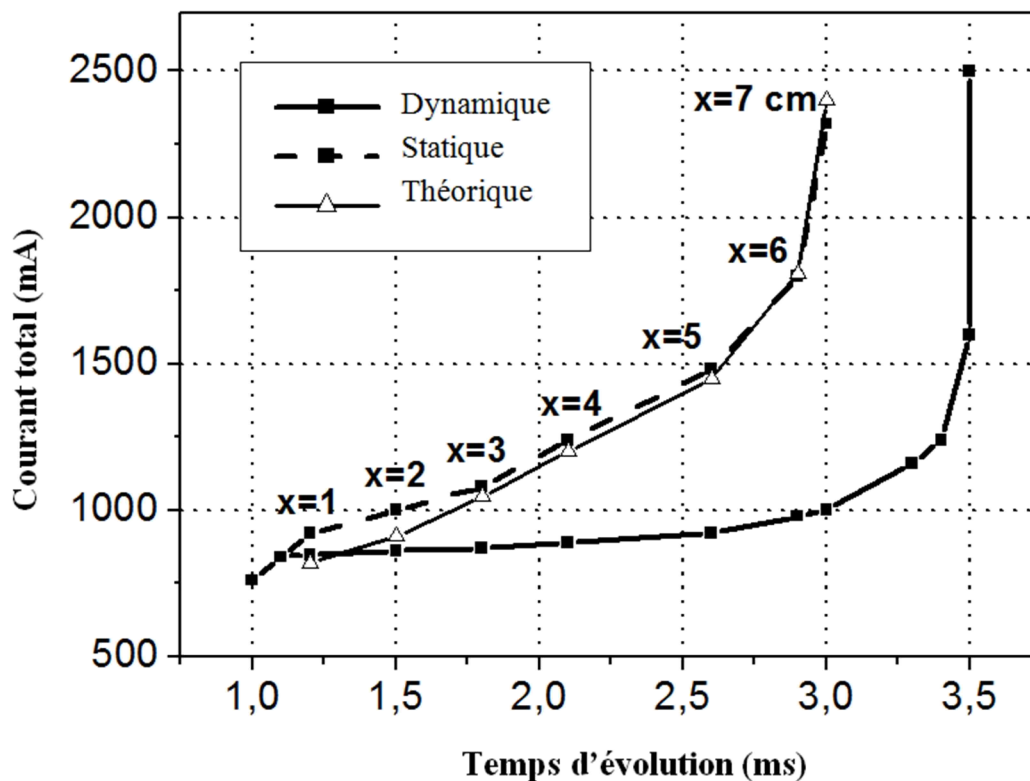


Figure I-23: Caractéristique expérimentale et théorique du contournement du modèle rectangulaire pour :

$$V=8.3 \text{ kV}, r=1\text{k}\Omega/\text{cm}, L=10 \text{ cm}, V_e=840\text{V}, A=63, n=0.76$$

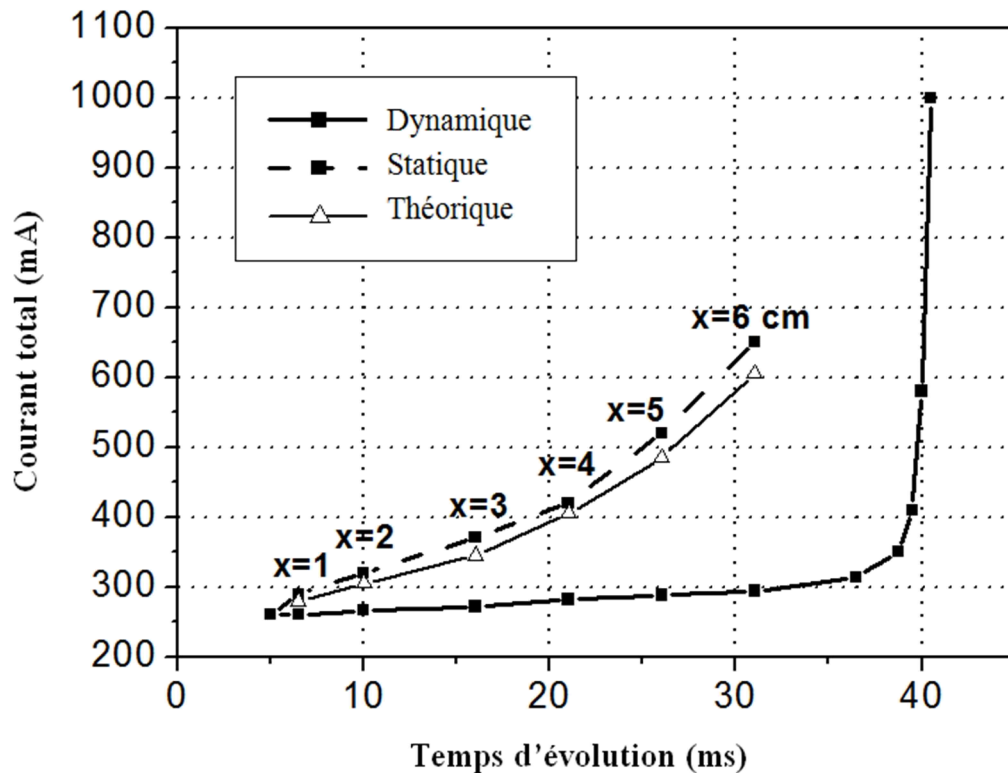


Figure I-24: Caractéristique expérimentale et théorique du contournement du modèle rectangulaire pour: $V=13.5$ KV, $r=5k\Omega/cm$, $L=10$ cm, $V_e=840V$, $A=63$, $n=0.76$

Pendant l'installation du circuit électrique équivalent au contournement et la simulation de ce phénomène, l'aspect dynamique tubulaire de la décharge a été introduit sans être vérifié. C'était l'une des causes de l'échec du modèle suggéré pour la modélisation du contournement.

Pour vérifier cette prétention, nous avons présenté les résultats obtenus de l'étude de la forme de la décharge pendant son évolution sur la surface de l'électrolyte, et pour déterminer la différence entre la vraie caractéristique dynamique du contournement et celle utilisée dans la modélisation basée sur la forme tubulaire dynamique, nous avons précisé ce qui suit:

1- La forme tubulaire de la décharge utilisée dans toutes les études de modélisation du contournement est une hypothèse valide seulement quand la décharge est à l'état statique, ou quand la décharge s'élargit avec la bande sèche.

2- La forme dynamique de la décharge est comme un pied élargi, où l'avant-pied se propage sur la surface d'électrolyte.

3- Ainsi, la relation analytique de la tension de la décharge dans le circuit équivalent électrique basé sur la forme tubulaire ne s'applique pas à la forme de pied élargi. Ceci cause un échec dans l'étude analytique du contournement. La modélisation de ce dernier doit tenir compte de l'aspect dynamique non tubulaire de la décharge.

4- Les caractéristiques dynamiques théoriques calculées en utilisant l'aspect dynamique tubulaire de la décharge sont la somme des décharges statiques indépendantes, elles sont clairement différentes des caractéristiques dynamiques expérimentales.

5- « L'aspect de pied élargi » peut expliquer les vraies caractéristiques dynamiques et statiques aussi bien que la transition de l'état statique à l'état dynamique ou vice-versa.

I-6 CONCLUSION

Les circuits électriques équivalents au contournement des isolateurs doivent tenir compte de la distribution des lignes de courant, leurs valeurs et leurs formes géométriques en incorporant les causes déterminantes de ces lignes telles : La tension appliquée, la forme de la pollution et sa résistivité, la forme de la surface de contact « décharge-pollution » et la forme des électrodes de masse. C'est pour cette raison que la tension de contournement est influencée non seulement par la distance de fuite mais également par le profil des lignes de fuite. Pour une tension appliquée, la distance de fuite et le profil des lignes de fuite déterminent le champ électrique près de la surface de l'isolateur.

Chapitre II

*MECANISMES PHYSIQUES DE PROPAGATION DE LA
DECHARGE ELECTRIQUE*

II-1 INTRODUCTION

La compréhension des phénomènes d'initiation et de propagation de la décharge électrique est fondamentale car elle permet de quantifier et de modéliser les grandeurs électriques et physiques qui conditionnent et gouvernent la décharge jusqu'au contournement total de l'isolateur. On trouve dans la littérature plusieurs hypothèses différentes les unes des autres qui tentent d'expliquer le mécanisme de propagation de la décharge électrique sur la surface des isolateurs pollués.

II-2 MECANISMES PHYSIQUES DE PROPAGATION DE LA DECHARGE DU CONTOURNEMENT

Les principaux mécanismes proposés peuvent être résumés comme suit :

- Mécanisme de la force électrostatique
- Mécanisme de la force thermique
- Mécanisme d'ionisation et de rupture progressive de l'air

II-2-1 Mécanisme de la force électrostatique

Le mécanisme de la force électrostatique fût proposé en premier par Nasser [7] puis repris par Rahal [12,22]. Sous surtension modérée, Rahal fonde son hypothèse sur l'existence d'une force qui s'exerce sur la décharge et qui serait capable de provoquer son allongement, dès que les conditions critiques sont atteintes. Du point de vue électrique macroscopique, cette force serait due à la dissymétrie de la distribution du potentiel provoquée par le passage du courant dans le liquide couvrant la surface isolante. Avant que les conditions critiques ne soient remplies, cette force provoque la courbure de la décharge stable vers la droite, côté de l'électrode de masse, comme le montre la Figure II-1. Une fois ces conditions critiques satisfaites, il s'effectue alors un déplacement de la décharge vers l'électrode de masse.

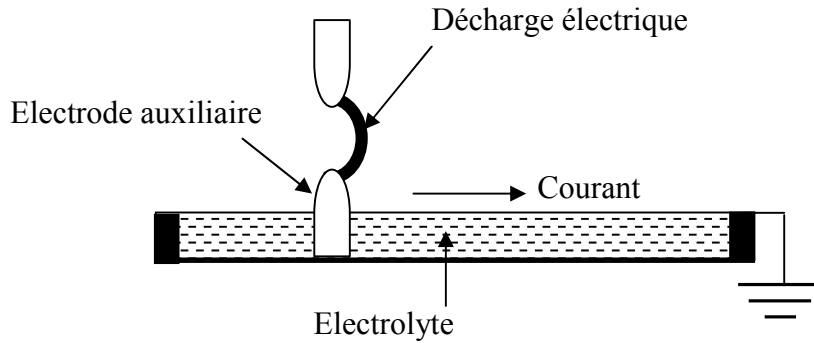


Figure II-1: Courbure de la décharge dans la direction de l'écoulement du courant mettant en évidence l'existence d'une force

D'après l'auteur, l'existence de cette force implique en effet, que l'on considère la décharge comme un élément de circuit doué d'une certaine auto-consistance macroscopique et susceptible de s'étirer de façon plus ou moins élastique.

II-2-2 Mécanisme de la force thermique

Mercure et Drouet [38] proposent un nouveau mécanisme de propagation de la décharge, à partir des résultats obtenus avec une décharge à courant ($>7A$) appelée dans l'article « arc » mais pratiquement traité comme une décharge de type intermédiaire, qu'ils attribuent à la dissymétrie dans la distribution du courant dans la section de la décharge. Le gradient de cette distribution, dans la direction de propagation est beaucoup plus grand que dans la direction opposée ; et dans la mesure où un gradient de température est associé à un grand gradient de courant, et que le flux de chaleur dépend du gradient de température, alors il en résulte un grand flux de chaleur dans la direction de propagation. Ceci entraîne à son tour, une propagation de la décharge par le double mouvement de son plasma et de l'air ambiant.

Li [39] a montré que la contrainte de champ électrique au niveau de la racine de la décharge est trop faible pour provoquer la rupture de l'air. Il a suggéré que le contournement est provoqué par l'ionisation, de la température élevée du sel dans la colonne de la décharge et réalisé par la migration des ions positifs et négatifs sous l'effet du champ électrique.

Utilisant la photographie à haute vitesse, Claverie [40] a déclaré que la progression de la décharge sur les isolateurs pollués est sûrement due à des phénomènes thermiques.

II-2-3 Mécanisme d'ionisation et de la rupture progressive de l'air

Wilkins et Albaghdadi [9] ont proposé le mécanisme de l'élongation par « Ionisation et déplacement discontinu (δ) de la racine de la décharge ». D'après ces auteurs, la probabilité d'ionisation dans la région précédant la racine de la décharge est grande, étant donné que la température ainsi que le gradient de potentiel électrique sont élevés dans cette région (Figure II-2.a). Si l'ionisation dans cette région est suffisante, alors il y a circulation d'un courant électrique à travers celle-ci (Figure II-2.b). La conductivité du nouveau trajet du courant augmente avec celui-ci, tandis que celle du trajet précédent dans l'électrolyte, reste constante. Par conséquent, le courant total change progressivement de trajet, entraînant ainsi une élongation (δ) de la décharge (Figure II-2.c).

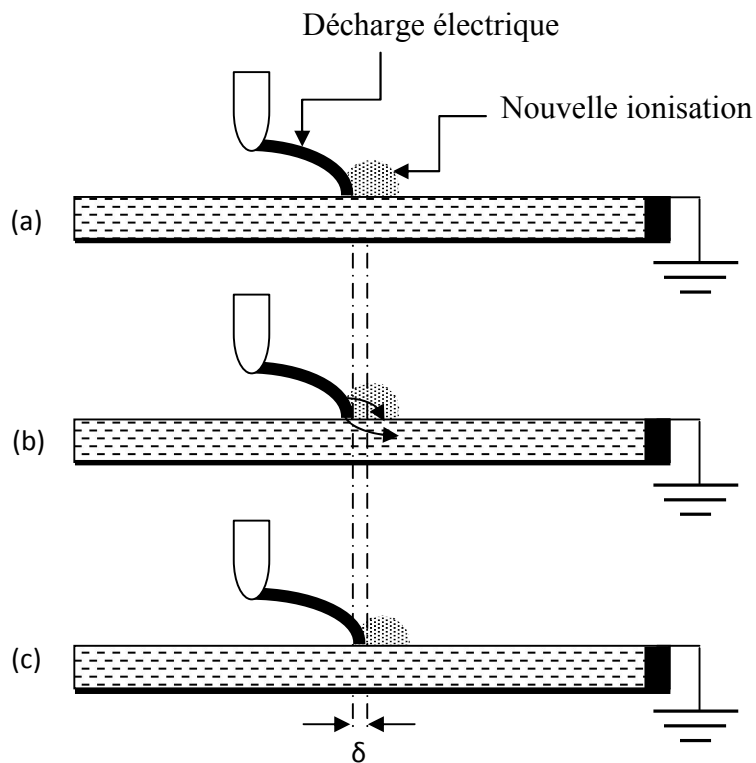


Figure II-2: Elongation par ionisation et déplacement discontinu du pied de la décharge d'après Wilkins

Wilkins parle d'ionisation, de passage d'un courant et de l'existence d'un champ mais sans parler de « claquage de l'air ». Sous le nom d'ionisation, il considère en réalité une rupture diélectrique progressive.

Selon Jolly [41-42] les mécanismes responsables de l'élongation d'une décharge sur un électrolyte ne peuvent se réduire aux seules forces électrostatiques ou thermiques et le phénomène de contournement qui en résulte est surtout lié à un processus de rupture diélectrique. En effet, la convergence des lignes de courant au pied de la décharge pourrait produire un champ électrique local très élevé capable d'ioniser l'air en avant de la pointe de la décharge; cela se traduit par une progression du pied de la décharge. L'ionisation par collision était renforcée par les processus d'ionisation thermique, de photo-ionisation et d'émission secondaire de la surface polluée le long du parcours.

En se basant sur cette approche, Rumeli [43] propose que la progression et l'élongation de la décharge se fassent par rupture diélectrique localisée au niveau de la racine de la décharge. Cette rupture a lieu lorsque le courant dans la décharge devient supérieur au courant critique.

Allen [44] a montré que l'ionisation à proximité de l'isolateur est améliorée par l'émission d'électrons à partir de la surface de photons par les avalanches dans le gaz. La vitesse de propagation relativement élevée des streamers le long d'une surface isolante, plutôt que dans l'air appuie ses arguments. Toutefois, il indique que la dépendance de la vitesse de propagation de streamer sur le matériel suggère que ce mécanisme est en fonction de la nature de la matière isolante.

Toutes ces hypothèses concernant le mécanisme de l'allongement de la décharge du contournement, qui sont différentes dans leurs bases physiques, n'étudient ni l'aspect dynamique de la décharge ni les interactions à l'intérieur de celle-ci. Ces hypothèses traitent seulement de ce qu'on peut appeler « mécanisme extérieur de l'élongation de la décharge ».

Flazi [16], propose que les changements que subit la décharge dans son aspect et son état interne entre deux instants d'élongation soient dus à l'ionisation devant la décharge et à l'intérieur de celle-ci, suivant un processus que l'on explique à l'aide de la Figure II-3.

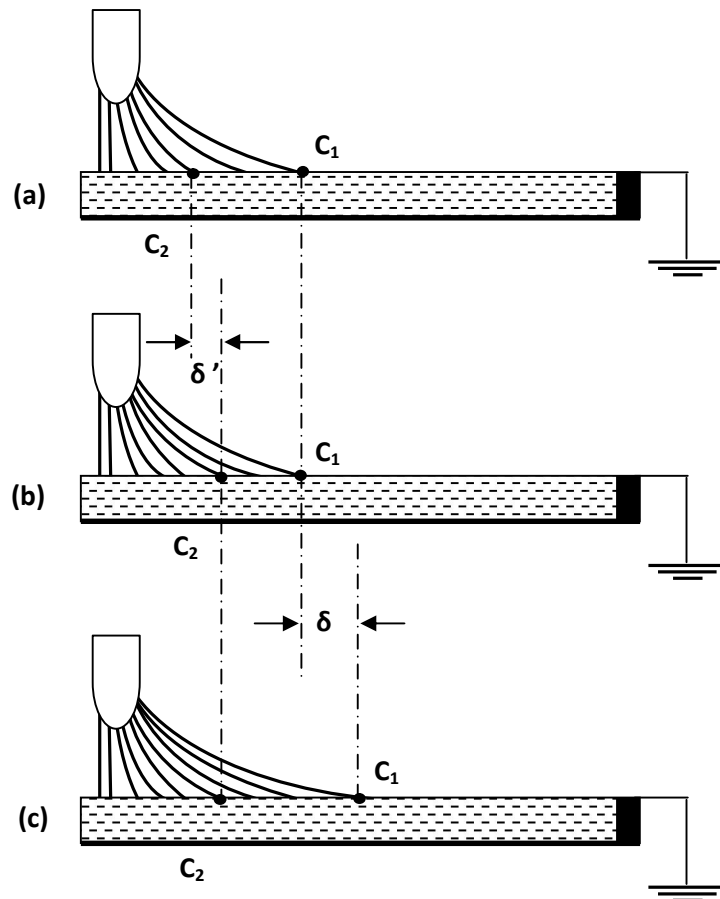


Figure II-3: Mécanisme d'élongation de la décharge proposé par Flazi

L'augmentation du degré d'ionisation le long des lignes de champ autour des lignes de faible densité dont l'extrémité en contact avec l'électrolyte est située entre les points C_1 et C_2 de la Figure II-3a, produit une augmentation du courant. Les lignes de courant les plus proches de C_2 deviennent plus denses et s'intègrent dans la région des courants forts, entraînant le déplacement vers l'avant du point C_2 , comme le montre la Figure II-3b. Ceci entraîne une légère augmentation de la valeur du courant total qu'on peut associer à une légère diminution de la résistance totale

équivalente au système, et en même temps elle produit un déplacement vers l'avant du centre de gravité électrique de la zone de pénétration sous la plus forte densité de courant.

Le changement de la distribution du courant dans la décharge montré sur la Figure II-3b, modifie dans sa forme et ses valeurs, le champ électrique à l'intérieur et autour de la décharge. Sur ces nouvelles lignes de champ apparaîtra l'ionisation et les nouvelles lignes de courant ainsi créées viendront s'intégrer à la décharge, comme le montre la Figure II-3c, produisant ainsi l'avancement de l'avant-pied C_1 d'une distance δ . A ce stade d'élongation une nouvelle étape peut se dérouler de la même manière, si le champ électrique dans ses nouvelles directions et valeurs est suffisant pour permettre au processus d'ionisation de s'intensifier à l'intérieur de la décharge et de démarrer devant elle.

Dans une analyse critique présentée au premier chapitre, Flazi et *al* [16,36,37] proposent une description de la dynamique de la décharge qui est très différente de celle de l'aspect dynamique cylindrique ou tubulaire couramment admis dans la littérature du contournement. Ceci remet en question tout ce qui est basé sur cette dernière, en particulier les conditions critiques et les critères de contournement qui ne peuvent être reliés physiquement avec les mécanismes proposés.

Flazi [16] est arrivé à vérifier que les conditions critiques du contournement sont les conditions électriques initiales les plus faibles qui vérifient le critère d'élongation au point le plus difficile que doit dépasser la décharge dans son trajet. Énonçant ainsi son mécanisme reliant le critère et les conditions critiques du contournement: « *la décharge évolue par rupture diélectrique de l'intervalle d'air devant le pied de celle-ci (entre la décharge et la surface de l'électrolyte), si et seulement si le champ électrique dans cet intervalle est suffisant et les conditions critiques sont les conditions électriques initiales, tension et courant critiques, les plus faibles qui remplissent ce critère* ».

Sachant qu'en avant de la décharge les paramètres sont très mal définis :

- Le champ électrique est très divergent entre la décharge et la surface de la pollution.
- La température varie beaucoup entraînant des variations de la pression du gaz et même de sa composition.
- Le comportement de la décharge comme source de porteurs (ions ou électrons) suivant la polarité du système est mal connu, de même que l'influence de la décharge sur la rupture de gaz.
- La photoionisation du gaz doit intervenir mais son mode d'action est difficile à cerner compte tenu de la composition du mélange gazeux et de la nature de la décharge.

Il est donc très difficile d'analyser le comportement de la décharge pendant son évolution d'une manière fine. Cependant, l'identification du phénomène élémentaire de rupture diélectrique de l'air, de la région ou de l'intervalle entre la décharge et la surface de l'électrolyte représenté à la Figure II-4, est un point très important pour la compréhension du mécanisme d'allongement de la décharge du contournement, plus précisément, l'influence de la décharge sur la rigidité diélectrique de l'air à son voisinage.

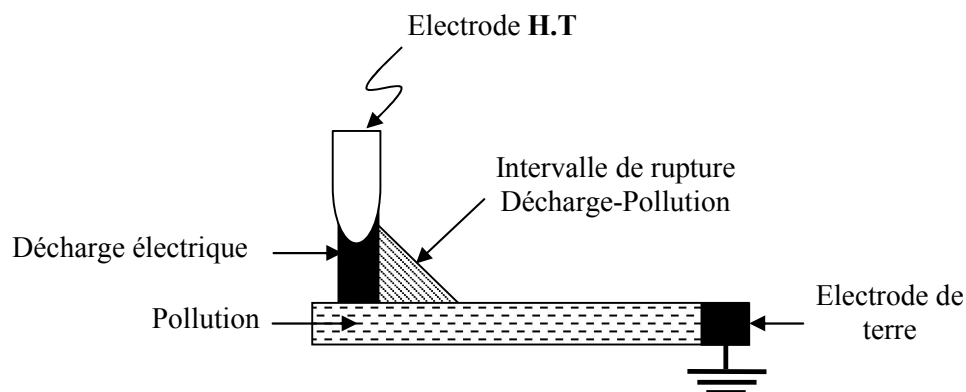


Figure II-4: intervalle de rupture entre la décharge du contournement et la surface de pollution

II-3 MECANISME DE LA RUPTURE DE L'AIR AU VOISINAGE D'UNE DECHARGE ELECTRIQUE

L'étude du mécanisme de l'élongation de la décharge du contournement revient à l'étude du mécanisme de rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique. Afin d'étudier ce phénomène et pour trouver une explication physique, plusieurs études ont été consacrées pour étudier la rigidité diélectrique de l'air au voisinage d'une décharge électrique, cette rigidité est représentée par la distance (d_c) de la rupture de l'intervalle d'air entre la surface de la décharge et la surface de la pollution (Figure II-5).

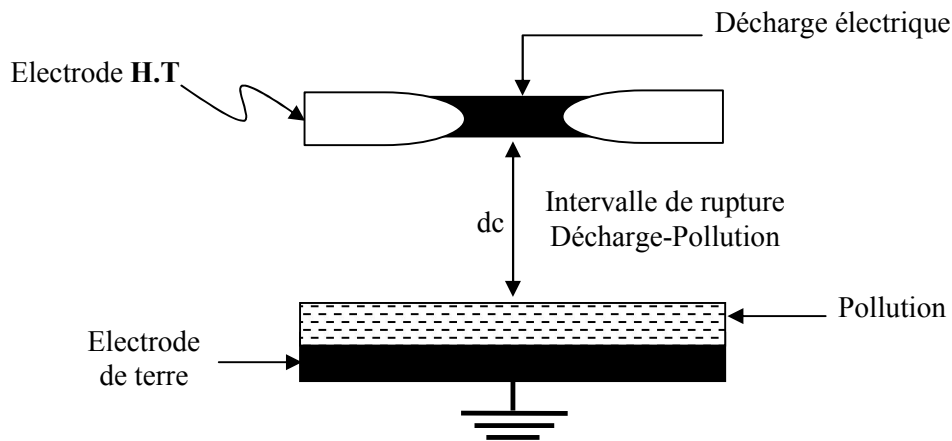


Figure II-5 : Intervalle entre une décharge électrique et une surface de pollution

II-3-1 Les travaux antérieurs

Les travaux de recherche concernant la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique ont commencé il y a juste une vingtaine d'années. Suite aux recherches effectuées au laboratoire Haute Tension de l'USTO-MB et sous la direction du Professeur FLAZI, des chercheurs ont développé une méthode pour évaluer la rigidité diélectrique de l'air soumis à des conditions critiques de lumière de température et de champ intense, au voisinage d'une décharge électrique sous des tensions positive et négative. Cette méthode est basée sur l'étude de la variation de la rigidité diélectrique (distance critique) de l'air entre une décharge électrique et

une électrode opposée (électrode métallique, solution électrolytique à l'état humide et à l'état givré) sous l'influence de la variation de plusieurs paramètres tels que le courant circulant dans la décharge, la polarité de la tension appliquée, la nature et la forme de l'électrode opposée ...etc.

El Hachem et Boucheta [45] peuvent être considérés comme étant les premiers qui ont effectué des expériences sur la rupture de l'air dans un intervalle entre une décharge électrique et une électrode métallique plane. L'objectif de ces expériences est d'étudier, sous tension continue en polarité positive et négative, l'influence du rayon de la décharge électrique, de la tension appliquée et de la distance entre la décharge et l'électrode plane sur la rupture diélectrique de l'air au voisinage de la décharge. Cette dernière est de forme cylindrique créée entre deux électrodes pointues de diamètre 8 mm (Figure II-6).

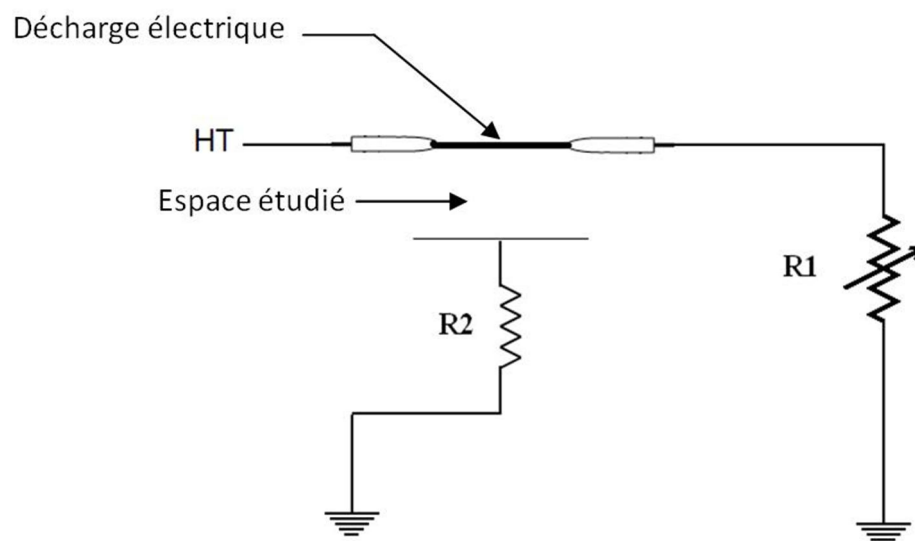


Figure II-6: Schéma d'un intervalle entre une décharge et une électrode métallique

Les résultats de leurs travaux montrent que :

- Le champ moyen de la rupture de l'intervalle décharge-électrode plane est de l'ordre de 8kV/cm en polarité positive et de 5kV/cm en polarité négative ;

- La présence de la décharge électrique a beaucoup affaibli la rigidité diélectrique de l'air de l'intervalle décharge-électrode plane;
- Dans l'intervalle décharge-électrode plane, la rupture de l'air demande un champ moyen plus faible en polarité négative qu'en polarité positive.

Dans leur interprétation et après l'analyse des résultats expérimentaux, l'hypothèse de la charge d'espace a été écartée car cette dernière n'est valable qu'en polarité positive, étant donné qu'en polarité négative ils ont trouvé un gradient de rupture plus faible que celui d'une polarité positive. Donc l'hypothèse des Streamer n'explique pas le phénomène de rupture de l'air entre une décharge cylindrique et une électrode plane. Par contre, ils ont pris en considération l'hypothèse des émissions secondaires où ils ont calculé le deuxième coefficient de Townsend " γ ". A partir des valeurs obtenues du deuxième coefficient de Townsend, ils ont considéré que l'hypothèse de l'émission secondaire γ est possible.

Ouddir et Hamid [46] ont essayé de formuler plusieurs possibilités de rupture d'un intervalle entre une décharge électrique et une électrode plane. En utilisant la même cellule expérimentale de la Figure II-6, ils ont étudié l'influence d'une plaque isolante et d'un écran métallique sur la rupture de l'intervalle décharge-électrode plane. Les résultats expérimentaux qu'ils ont obtenus leur permettraient de conclure ce qui suit :

- L'existence de la décharge affaiblit la rigidité diélectrique de l'air par la température et l'émission des photons ;
- L'émission secondaire en polarité négative est plus importante qu'en polarité positive, ce qui explique la facilité relative de la rupture en polarité négative.

En 1989, Settaouti [47] a étudié l'influence de la présence d'une deuxième décharge électrique sur la rigidité diélectrique de l'air (Figure II-7), il a remarqué que la présence d'une deuxième décharge affaiblit davantage la rigidité diélectrique de l'air.

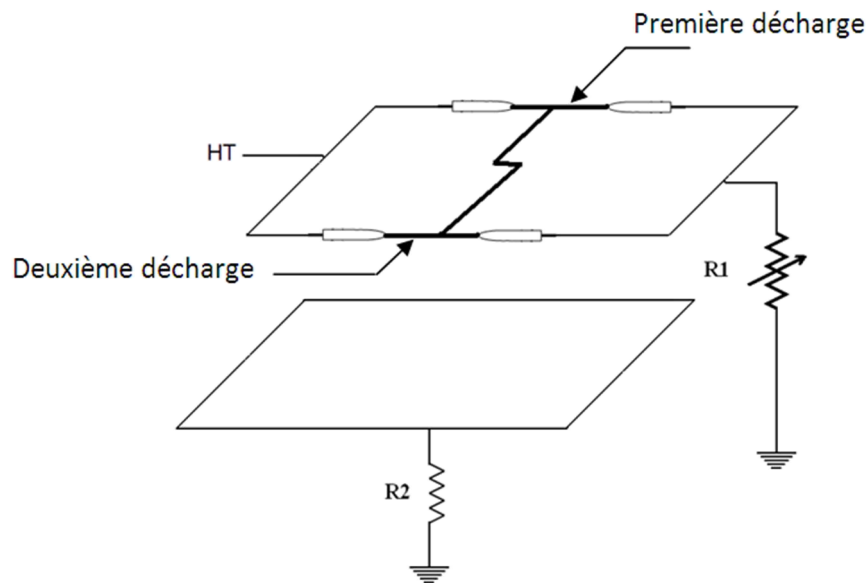


Figure II-7 : Schéma d'un intervalle entre deux décharges électriques et une électrode métallique

Ensuite il a étudié, dans un intervalle entre une seule décharge et une électrode métallique, l'influence de la géométrie de l'électrode reliée à la terre en utilisant un cylindre métallique plein ensuite une pointe en cuivre. Il a remarqué qu'en polarité positive le champ électrique moyen au claquage diminue en passant de la géométrie plan à la pointe et de la pointe à la tige. Par contre en polarité négative, il a remarqué un effet inverse, cette influence réside dans la variation du champ électrique au niveau des deux électrodes, la décharge électrique et l'électrode reliée à la terre.

Les résultats expérimentaux obtenus mettant en évidence les effets secondaires cathodiques, Settaouti pense que la théorie de Townsend s'applique au claquage de l'intervalle d'air où l'une des électrodes est une décharge électrique à la pression atmosphérique.

Les processus du type Streamer existent du fait de la présence d'une charge d'espace au voisinage de l'électrode décharge, en conséquence, il conclue que les deux mécanismes Townsend et Streamer contribuent ensemble au claquage de l'intervalle d'air où l'une des électrodes est une décharge électrique.

Les travaux de Rezouga [48] sont en quelque sorte similaires aux travaux de Settaouti, excepté qu'il a focalisé ses recherches sur l'effet de la nature du matériau et de la géométrie de l'électrode reliée à la terre comme l'aluminium, le bronze et l'acier, de diamètre différents. Les expériences consistent aussi à mesurer le temps écoulé avant l'apparition de la décharge secondaire par rapport à la décharge principale. Les résultats montrent que ;

- L'existence de la décharge électrique affaiblit la rigidité diélectrique de l'air ;
- L'émission secondaire en polarité négative est plus importante qu'en polarité positive, ce qui explique la facilité de la rupture de l'intervalle en polarité négative.

Les différentes constatations sont fondées surtout sur les effets secondaires de la cathode, qui ont permis à l'auteur d'identifier le critère de claquage au mécanisme de Townsend modifié.

Notre contribution [49] sur ce point-là, dans le cadre de préparation de la thèse de magister, été basée sur une étude expérimentale en polarité positive et négative, pour expliquer l'influence de la résistivité de l'électrolyte et de sa résistance totale sur la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique. Ce paramètre est très important dans la détermination des conditions critiques du contournement car il est directement lié à la tension critique et a déjà fait l'objet d'une étude expérimentale par plusieurs chercheurs, sur différents modèles.

Alors, dans un intervalle d'air entre une décharge électrique et une surface électrolytique de forme géométrique carrée de 10 cm de côté (Figure II-8), nous avons mesuré la rigidité diélectrique de l'air, représenté par la distance (d) de la rupture de l'intervalle, sous l'influence de la variation de la résistivité et la résistance totale de l'électrolyte, la tension appliquée et sa polarité.

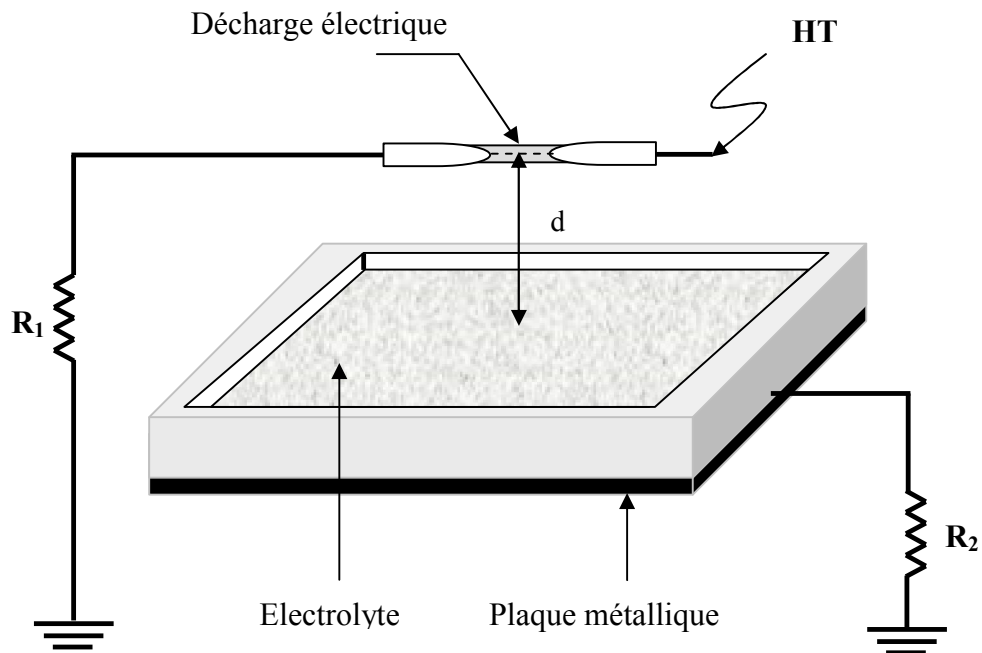


Figure II-8 : Schéma de l'intervalle entre une décharge électrique et une surface électrolytique carrée

Les résultats de l'expérience ont montré que:

- La résistivité de l'électrolyte et sa résistance totale n'ont pratiquement pas d'influence sur la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique ;
- La tension appliquée influe sur la rigidité diélectrique de l'air ;
- La rupture de l'air au voisinage de la décharge est facile en polarité négative qu'en polarité positive, contrairement aux résultats connus aux intervalles d'air entre électrodes métalliques.

En utilisant la même cellule expérimentale de la Figure II-8, Talhi [50,51] a étudié la rigidité diélectrique de l'air au voisinage d'une décharge électrique sous l'influence de la variation du courant initial dans la première décharge et de l'état de la surface électrolytique humide ou givré. Les résultats expérimentaux ont montré que l'état de la solution électrolytique (humide ou givré) n'a pas d'influence sur la rupture de l'air au voisinage de la décharge électrique. En considérant que la répartition du champ électrique entre la décharge et l'électrolyte est approximativement comme celle entre un conducteur de même rayon que la

décharge électrique et une électrode plane, Talhi a calculé le champ électrique maximum au voisinage de la décharge par l'équation suivante :

$$E_{maxc} = \frac{U}{r_d \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot d_c - r_d}{r_d}\right)} \dots\dots\dots (II-1)$$

U: tension appliquée.

d_c: distance critique mesurée (cm).

r_d : le rayon de la décharge électrique (cm).

Le résultat de calcul a montré que le gradient de potentiel critique maximum au voisinage de la décharge est plus faible que le gradient disruptif dans l'air. Tahli a conclu que l'évolution de la décharge ne se fait pas par un mécanisme de rupture classique (Streamer ou Townsend), le champ critique arrache le plasma de la décharge créant ainsi un canal fortement ionisé le long de l'intervalle entre la décharge et l'électrolyte. Ce canal devient la deuxième décharge de la rupture.

II-4 CONCLUSION

Les résultats des travaux antérieurs concernant l'étude de la rupture de l'air entre une décharge électrique et une électrode (métallique ou électrolytique) ont conduit à l'établissement de plusieurs théorèmes relatifs aux ruptures de l'air dans un intervalle décharge-électrode. Par contre, il n'existe aucun théorème dans la littérature permettant de décrire avec exactitude le mécanisme avec lequel la décharge évolue dans l'air vers l'électrode métallique.

Chapitre III

ETUDE DU MECANISME DE LA RUPTURE DE L'AIR

D'UN INTERVALLE

DECHARGE-ELECTROLYTE

III-1 INTRODUCTION

Sachant que, l'étude du phénomène de contournement des isolateurs aériens faite par plusieurs chercheurs, sur différents modèles, a montré que le contournement n'est qu'une rupture progressive de l'air entre la décharge électrique et la couche de pollution déposée sur la surface de l'isolateur, nous avons consacré ce troisième chapitre à une étude permettant de clarifier le mécanisme de la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique. Pour cela nous avons effectué une étude expérimentale basée sur la mesure de la rigidité diélectrique de l'intervalle d'air entre une décharge électrique et une surface électrolytique, en polarité positive et négative. Et vu l'importance du champ électrique sur la rupture de l'air au voisinage de la décharge électrique, nous avons jugé utile de déterminer la distribution du champ électrique dans l'intervalle et la valeur maximum du champ électrique au voisinage de la décharge qui correspond aux conditions critiques de la rupture de l'intervalle d'air étudié.

III-2 ETUDE EXPERIMENTALE

L'étude expérimentale a été basée sur la mesure de la rigidité diélectrique de l'intervalle d'air étudié, sous l'influence de la variation de la résistivité d'électrolyte, de la nature de l'électrode opposée à la décharge et du courant initial circulant dans la décharge. Cette rigidité est représentée par la distance de rupture la plus grande (d_c) entre la surface de la décharge et la surface de pollution. Les mesures ont été effectuées en polarité positive et négative, sous tension continue d'une valeur constante égale à 11kV.

III-2-1 Présentation du dispositif expérimental

Toutes les expériences ont été effectuées au sein du Laboratoire de Génie Electrique d'Oran (LGEO) à la salle de la Haute Tension et des Décharges Electriques de l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (USTO-MB). Le montage est constitué de trois parties essentielles (Figure III-1) : Un générateur de haute tension continue, un banc de mesure de tension et de courant et une cellule expérimentale.

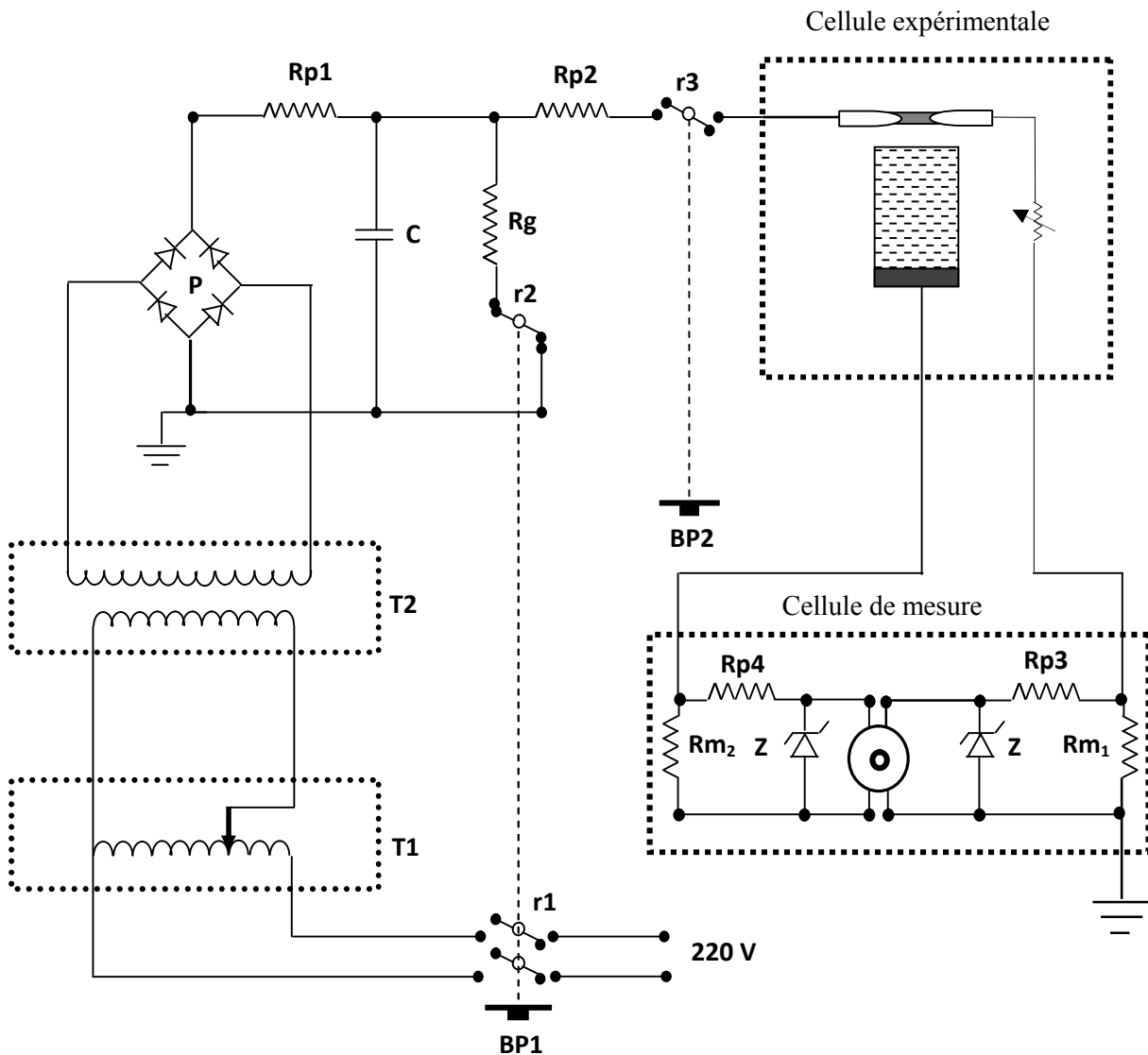


Figure III-1 : Montage expérimental

T_1 : Autotransformateur d'alimentation

T_2 : Transformateur élévateur haute tension 220V/30kV

P: Pont de redressement Haute Tension

C: Un ensemble de batteries de condensateurs haute tension de capacité totale 16,7 μ F.

R_{p1} , R_{p2} , R_{p3} , R_{p4} : résistance de protection de valeurs respectives de 500 Ω , 300 Ω , 100 Ω et 100 Ω .

R_g : résistance de décharge à la terre d'une valeur de 100 Ω

R_{m1} , R_{m2} : résistances de mesure du courant de valeur de 2.2Ω

r_1 , r_2 , r_3 : relais de contacts Haute Tension

B_{p1} , B_{p2} : bouton poussoir de commande

Z : diodes zener pour la protection de l'oscilloscope durant les pics de courant

O: Oscilloscope à mémoire Tektronix de 20MHz de bande de fréquence.

III-2-2 Description de la cellule expérimentale

La cellule expérimentale est représentée à la Figure III-2. Elle est formée principalement d'une décharge électrique et d'un tube cylindrique [33] :

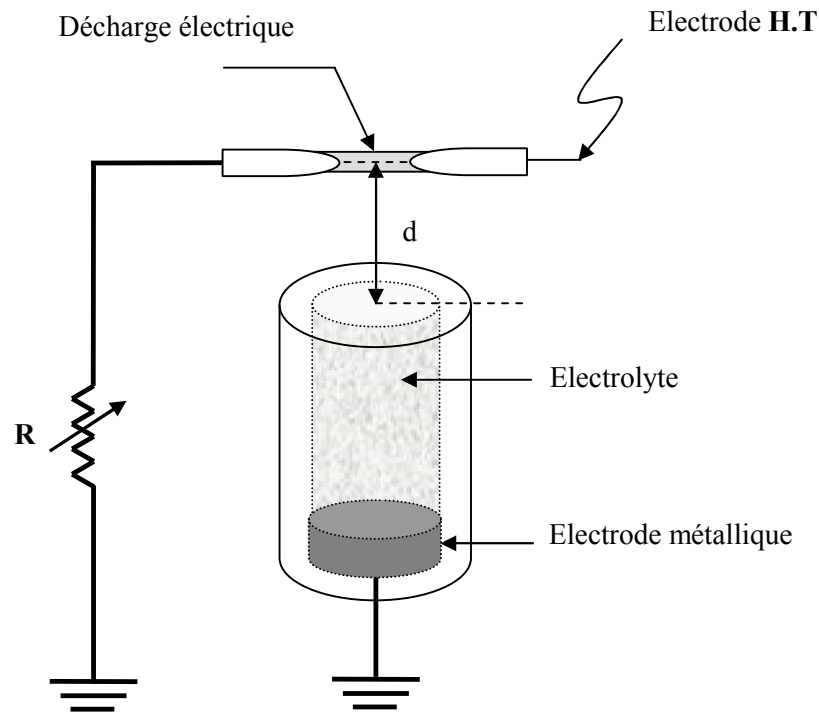


Figure III-2 : Schéma de l'intervalle entre une décharge électrique et une surface circulaire d'électrolyte

La décharge électrique est créée entre deux électrodes métalliques séparées d'une distance de 3mm, une de ces électrodes est reliée à la haute tension et l'autre est reliée à la terre par l'intermédiaire d'une résistance R pour fixer le courant initial de la décharge électrique. Le tube cylindrique est en plexiglass, de rayon intérieur

égal à 6mm et une hauteur de 5cm, rempli d'électrolyte (NaCl+H₂O) d'une résistivité variable. Une électrode métallique placée au-dessous de ce tube est reliée à la terre.

III-2-3 Mode opératoire

On fixe une certaine distance (d) entre l'axe des électrodes métalliques et la surface électrolytique, on charge notre générateur de haute tension continue à 11kV et après l'application de cette tension, une décharge initiale apparaît entre les deux électrodes métalliques avec une valeur de courant désiré (I_{d1}) fixée par la résistance R de la Figure III-2. Si la distance fixée (d) est plus grande que la distance critique de la rupture de l'intervalle d'air, la décharge initiale s'éteint sans faire le claquage. Donc on diminue progressivement la distance (d) entre l'axe de la décharge et la surface de l'électrolyte jusqu'à l'obtention de la rupture, une deuxième décharge apparaît après un certain temps de retard (t).

La distance critique (d_c) qui est la distance entre la surface de la décharge et la surface de l'électrolyte est calculée par l'équation suivante :

$$d_c = d - r_d \dots \dots \dots (III-1)$$

r_d : est le rayon de la décharge calculé par l'équation (III-2).

$$r_d^2 = I_{d1} / J \cdot \pi \dots \dots \dots (III-2)$$

I_{d1} : courant de la décharge initiale

J: densité du courant (A.cm⁻²)

En continu et à pression atmosphérique, d'après Wilkins [25] la densité du courant dans la colonne positive de la décharge est égale à 1.45A.cm⁻².

III-2-4 Résultats expérimentaux

III-2-4-1 Influence de la résistivité de l'électrolyte

La résistivité de l'électrolyte est un paramètre très important dans la détermination des conditions critiques du contournement. Elle est directement liée à la tension

critique [32,35,49,52]. Influence-t-elle ou non sur la rupture de l'air au voisinage de la décharge ? Pour répondre à cette question, nous avons fait les mesures pour des résistivités variables $\rho = 1, 2, 5, 10, 20, 40 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$. La résistance R a été fixée à $30 \text{ k}\Omega$ afin d'obtenir un courant électrique initial dans la décharge égale à 300 mA . La Figure III-3 montre les valeurs mesurées de la distance critique (d_c) de rupture en fonction de la résistivité d'électrolyte en polarité positive et négative.

On remarque sur la Figure III-3 ce qui suit :

- L'augmentation de la résistivité de l'électrolyte n'a pratiquement pas d'influence sur la distance critique (d_c).

- La distance critique (d_c) est plus grande en polarité négative qu'en polarité positive, elle est autour de 1.9 cm et 1.5 cm respectivement. C'est-à-dire que la rupture est facile en polarité négative qu'en polarité positive.

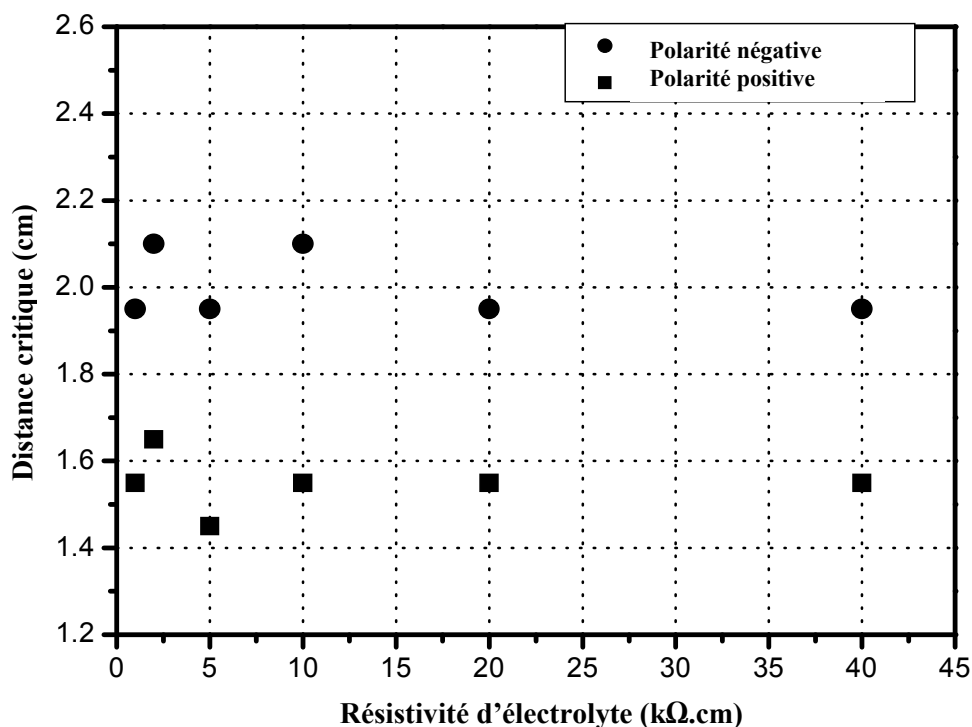


Figure III-3 : Distance critique de rupture en fonction de la résistivité de l'électrolyte

Habituellement, en géométrie non uniforme et lorsque les électrodes sont métalliques, les tensions nécessaires pour l'apparition d'une décharge électrique sont plus grande en polarité négative qu'en polarité positive.

III-2-4-2 Influence de la nature de l'électrode opposée à la décharge

Vu que la résistivité de l'électrolyte n'influe pas sur la rupture, on s'est proposé de vérifier si la nature de l'électrode opposée à la décharge influe ou non sur la rupture de l'air au voisinage de la décharge électrique. Nous avons ajouté une plaque métallique carrée de 2cm de côté au-dessus de la surface électrolytique remplie dans le tube cylindrique de la Figure III-2. Le courant initial de la première décharge est toujours maintenu à 300mA.

La Figure III-4 montre les valeurs mesurées de la distance critique (d_c) en fonction de la résistivité d'électrolyte en polarité positive et négative. On constate que les résultats obtenus sont presque identiques aux résultats trouvés sans plaque métallique (Figure III-3).

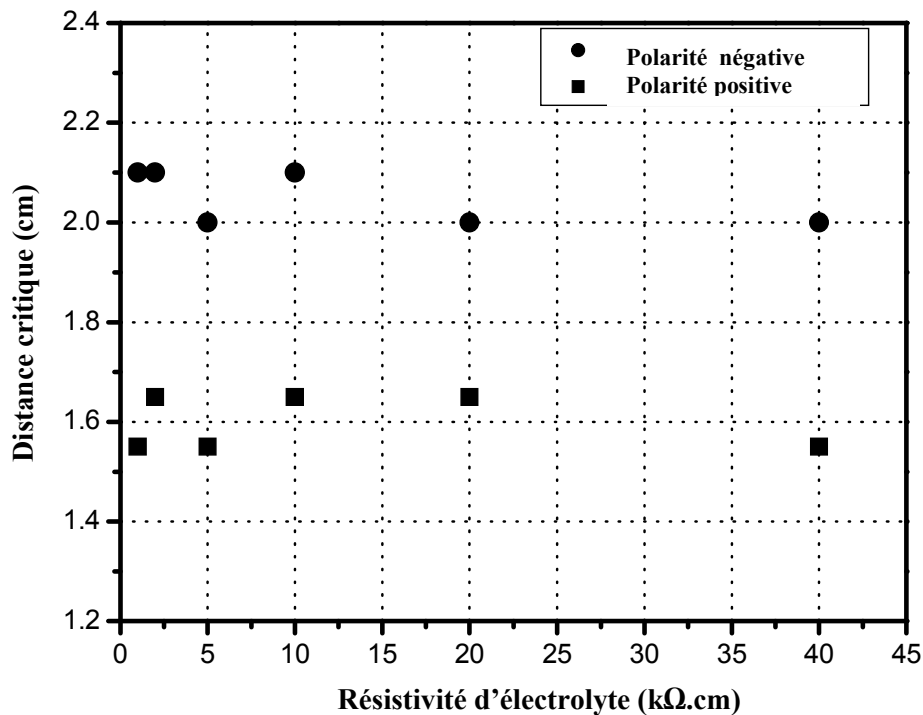


Figure III-4: Distance critique en fonction de la résistivité de l'électrolyte au-dessous de la plaque métallique

III-2-4-3 Influence du courant initial de la décharge électrique

Les valeurs de courant initial de la décharge utilisées sont: 10, 50, 100, 200, 300, 500, 800mA, la résistivité de l'électrolyte utilisée est 5kΩ.cm. La Figure III-5 représente les valeurs mesurées de la distance critique (d_c) en fonction du courant initial.

Nous avons remarqué que :

- Pour chaque valeur du courant initial de la décharge, la rigidité diélectrique de l'air est plus faible en polarité négative qu'en polarité positive.
- L'accroissement du courant initial de la décharge provoque une augmentation rapide puis une diminution de la distance critique (d_c), la valeur la plus élevée correspond à une valeur de courant au tour de 100mA.

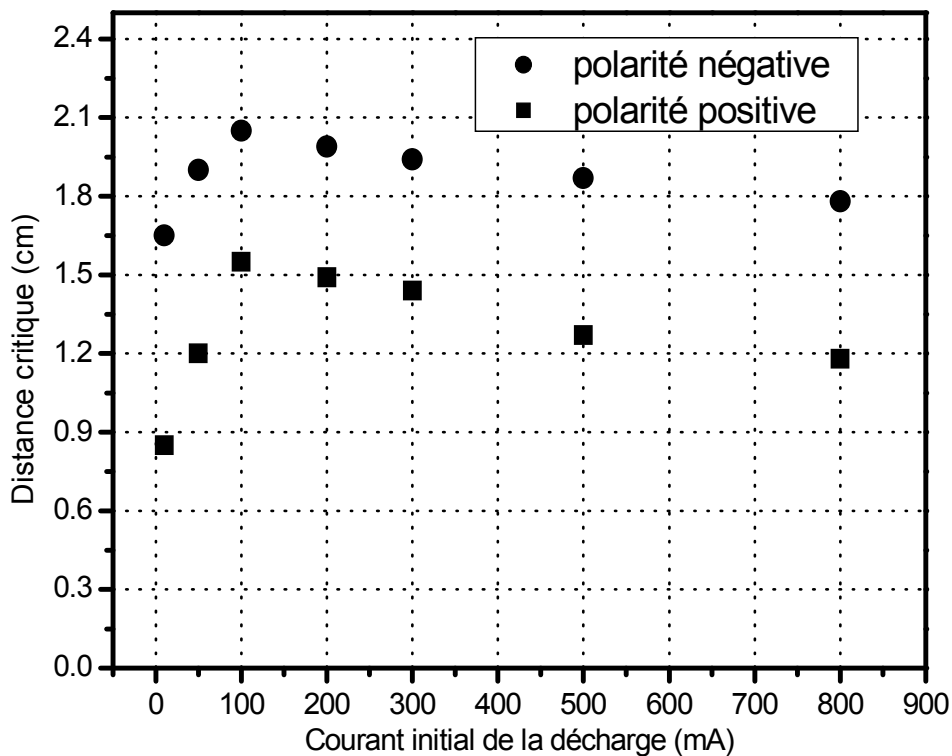


Figure III-5 : Distance critique en fonction du courant initial de la décharge

III-2-4-4 Temps d'apparition de la deuxième décharge :

Nous avons remarqué que la valeur du temps (t) mesurée entre les instants de l'apparition des deux décharges est de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes. Ce temps est très grand par rapport au temps de retard de l'apparition d'une

décharge donné par le mécanisme de Townsend qui est de l'ordre de 10^{-5} s, ou par le mécanisme de Streamer qui est de l'ordre de 10^{-7} – 10^{-8} s [53].

La Figure III-6 représente une de nos mesures prélevée par l'oscilloscope, cette Figure montre l'allure du courant de la première décharge (I_{d1}) et de la deuxième décharge (I_{d2}), le courant initial de la première décharge est fixé à 300mA par la résistance R. Le courant de la deuxième décharge apparaît après un laps de temps (t) égale à 35ms, entre le début de la première décharge et le début de la deuxième décharge qui représente la rupture de l'intervalle d'air.

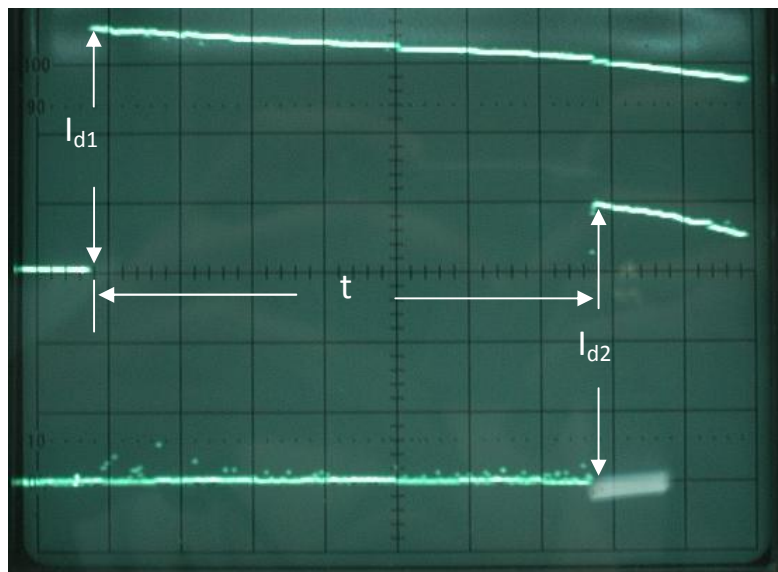


Figure III-6: Temps de retard de l'apparition de la deuxième décharge

I_{d1} : le courant initial de la première décharge électrique, fixé par la résistance R.

I_{d2} : le courant initial de la deuxième décharge électrique.

t : temps de retard de l'apparition de la deuxième décharge électrique.

III-3 ETUDE THEORIQUE (SIMULATION)

Afin de calculer le champ électrique maximum au voisinage de la décharge et pour déterminer la distribution du champ électrique dans l'air entre la décharge électrique et la surface électrolytique, nous avons utilisé les conditions critiques de la rupture de l'intervalle d'air étudié prélevées à partir de l'étude expérimentale. Le calcul du champ électrique a été établi à l'aide d'un logiciel de calcul du champ électrique basé

sur la méthode des éléments finis COMSOL Multi Physics version 3.5.

III-3-1 Les procédures de la simulation

L'algorithme représenté à la Figure III-7 montre les différentes étapes suivies pour effectuer le calcul du champ électrique en utilisant le logiciel COMSOL Multi Physics.

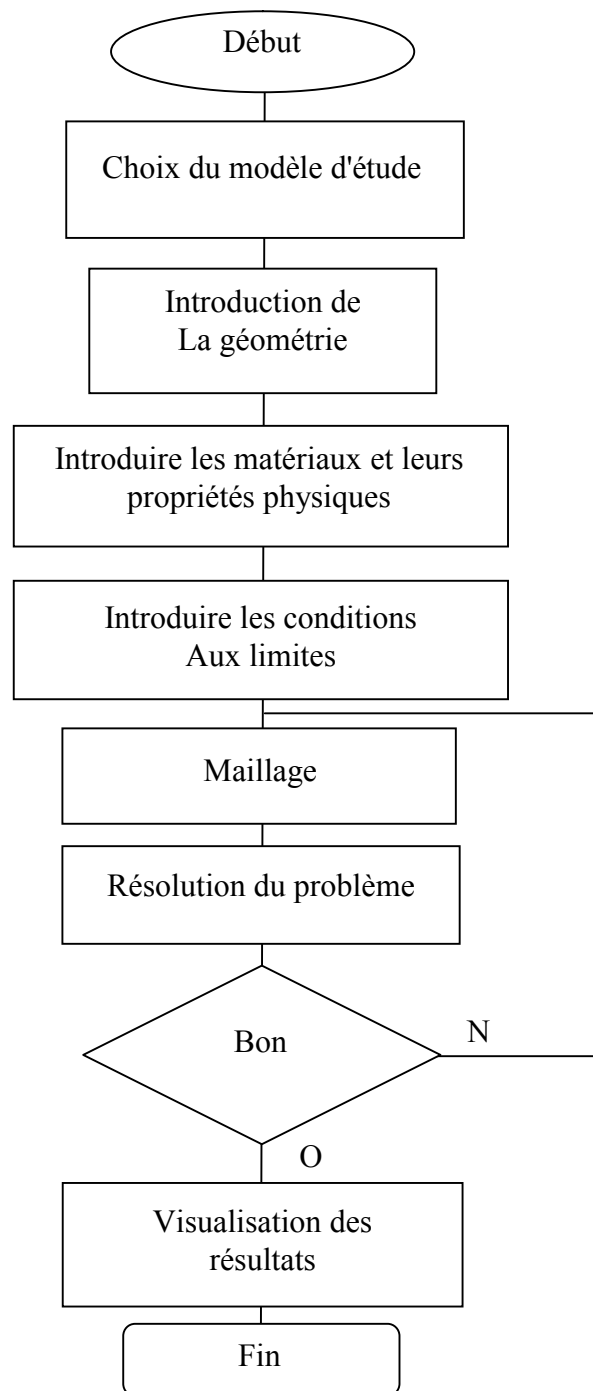


Figure III-7: Les étapes de calcul du champ électrique

- Le choix du modèle d'étude: Notre problème a été résolu en 3D modèle électrostatique afin de calculer le champ électrique entre la décharge électrique et la surface électrolytique.

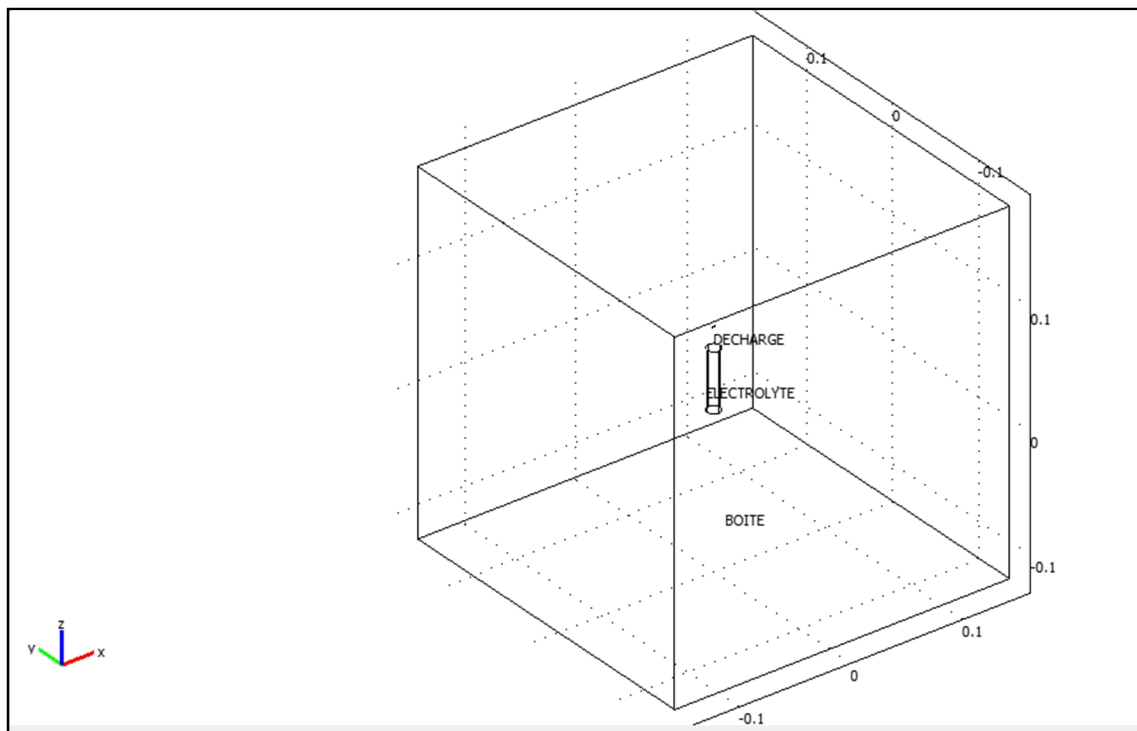
- Introduire la géométrie simplifiée de la cellule expérimentale de la Figure III-2:

- La géométrie de la cellule est composée essentiellement de deux cylindres qui représentent la décharge électrique et l'électrolyte. Nous avons introduit bien sûr les dimensions correspondant à chaque point expérimental (d_c et r_d).

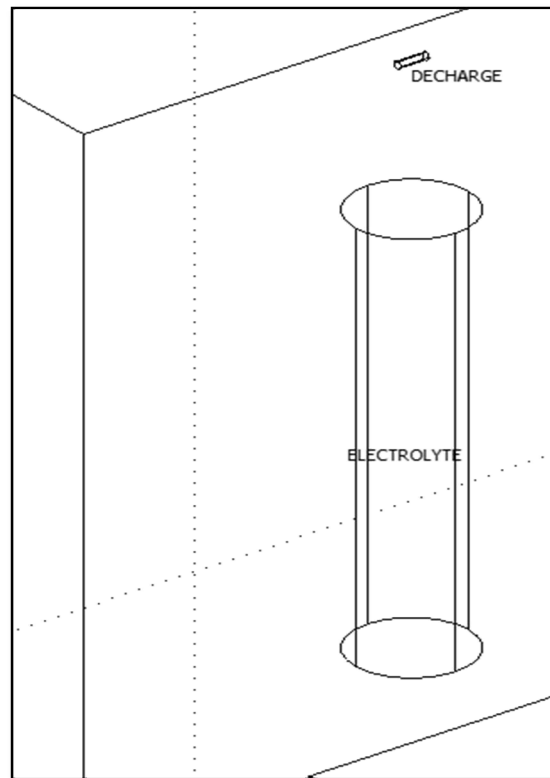
d_c : la distance critique de la rupture de l'intervalle calculée par l'équation (III-1).

r_d : le diamètre de la décharge calculée par l'équation (III-2).

- La boîte infinie est définie pour être trois à cinq fois la dimension de la cellule. À cette frontière, on suppose que le champ électrique tend vers zéro. Le schéma de la Figure III-8-a montre la géométrie de la cellule (décharge + électrolyte) avec la boîte infinie introduit dans le logiciel, le zoom de la géométrie est représenté à la Figure III-8-b.



8-a)



8-b)

Figure III-8: Géométrie de la cellule expérimentale en 3D avec boîte infinie

- Introduire les différents matériaux et leurs propriétés physiques : La constante diélectrique de la décharge électrique et de l'électrolyte sont définies dans le tableau III-1.

Tableau III-1

Permittivités adoptées pour la simulation

| Modèle | Matériaux | Permittivité (ϵ_r) |
|-----------------|---------------------|-------------------------------|
| Electrostatique | Décharge électrique | 1 |
| | Electrolyte | 80 |
| | Air | 1 |

- Introduire les conditions aux limites: Les conditions aux limites sont prédéfinies à l'interface graphique ; nous devons seulement choisir les conditions qui sont appropriées.
- Le maillage : C'est une opération automatique, il ne reste donc qu'à veiller à ce que le maillage soit suffisamment fin pour que le résultat soit le plus précis possible.
- La résolution du problème : La dernière étape est le lancement de la résolution automatique du problème par l'interface graphique.
- Visualisation des résultats.

III-3-2 Résultats de la simulation

III-3-2-1 La distribution du champ électrique dans l'intervalle Décharge-Electrolyte

La Figure III-9 montre la distribution de champ électrique le long de l'axe principal entre la surface de la décharge et l'électrolyte.

Nous avons remarqué que la valeur maximale du champ électrique se trouve à proximité de la surface de la décharge, elle est égale à 39.17kV/cm. Cette valeur diminue progressivement le long de l'axe principal entre la décharge et l'électrolyte jusqu'à une valeur proche de 2kV/cm à la limite de la surface de l'électrolyte. La valeur maximale du champ électrique est supérieure à l'intensité du champ disruptive dans l'air à pression atmosphérique [54] (environ 30kV/cm), qui est nécessaire pour effectuer des collisions ionisantes.

Pour la prochaine étape, la valeur maximale du champ électrique à proximité de la décharge, en polarité positive et négative, est calculée pour différentes valeurs du courant initial de la décharge et comparée avec l'intensité de champ disruptive dans l'air à pression atmosphérique.

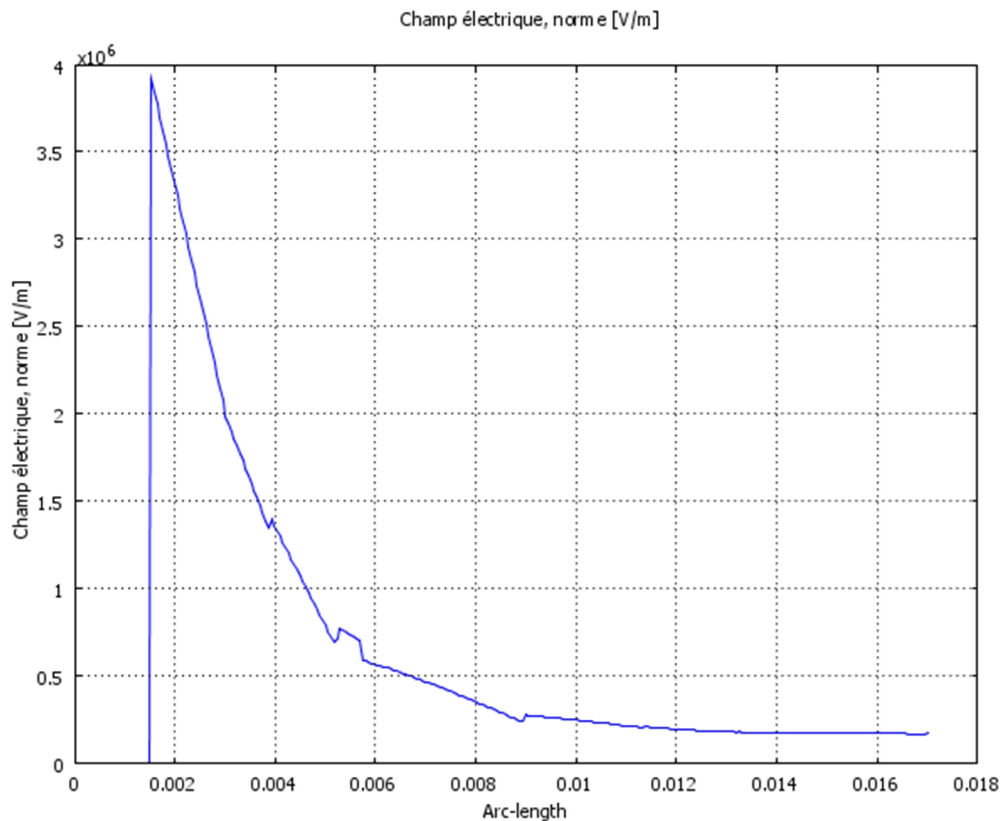


Figure III-9: Distribution du champ électrique le long de l'axe principal entre la décharge et l'électrolyte, en polarité positive pour :

$$I_{d1}=100\text{mA}, d_c=1.55\text{cm et } \rho=5\text{k}\Omega.\text{cm}$$

III-3-2-2 Champ électrique maximum en fonction du courant initial de la décharge

En utilisant les conditions critiques de la rupture mesurées expérimentalement, en polarité positive et négative, qui sont représentées à la Figure III-5, nous avons calculé le champ électrique maximum à proximité de la décharge en fonction du courant initial de cette dernière. Les valeurs calculées du champ électrique sont comparées avec le champ disruptif dans l'air à pression atmosphérique (environ 30kV/cm) et sont représentées à la Figure III-10.

Nous avons remarqué qu'en deux polarités, le champ électrique diminue en augmentant l'intensité du courant initial dans la décharge électrique. Les résultats montrent également que presque toutes les valeurs du champ électrique sont plus élevées que la valeur du champ disruptif dans l'air à pression atmosphérique.

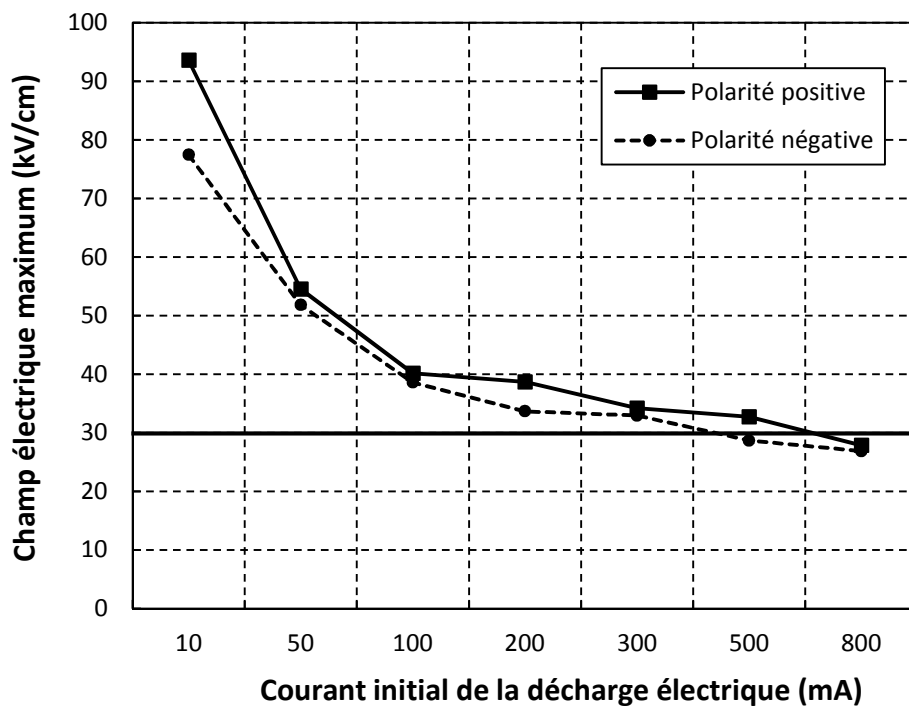


Figure III-10: Champ électrique maximum en fonction du courant initial de la décharge

III-3-2-3 Interprétations des résultats

L'étude de la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique a rapporté trois principaux résultats:

- La rupture de l'air de l'intervalle décharge-électrolyte peut-être déclenchée par un champ électrique faible inférieur à 30kV/cm. La rigidité diélectrique de l'air dans l'intervalle étudié décharge-électrolyte est faible comparée à l'intervalle d'air entre deux électrodes métalliques [55-57], cela peut être due à l'influence physique du corps de la décharge sur l'air (milieu) à son voisinage par : Sa lumière émise, l'échauffement du milieu, la photo-ionisation et la charge d'espace. La présence de ces facteurs affaiblit le champ électrique nécessaire pour qu'un Streamer puisse commencer à partir de la décharge. Pour cela, l'augmentation des valeurs du courant électrique de la décharge ne fait qu'augmenter l'effet de ces facteurs dans l'affaiblissement du champ électrique nécessaire pour la rupture de l'air, comme il est montré à la Figure III-10 [51,58-61].

- Le temps de retard de l'apparition de la deuxième décharge qui est remarquable et peut-être expliqué par le temps nécessaire pour la préparation physique du milieu (échauffement).

- La rupture de l'air dans cet intervalle est facile en polarité négative qu'en polarité positive. En polarité positive, la surface électrolytique représente la cathode tandis qu'en polarité négative c'est la décharge qui représente la cathode, donc, le champ électrique au niveau de la surface électrolytique en polarité positive est plus faible que celui au niveau de la décharge en polarité négative, par conséquent l'émission secondaire de la décharge en polarité négative est plus importante que celle de la surface électrolytique, ce qui facilite la rupture en polarité négative par rapport à la polarité positive.

III-4 CONCLUSION

D'après les résultats obtenus de l'étude expérimentale ainsi que l'étude théorique, nous avons constaté que le mécanisme de la rupture de l'air de l'intervalle entre la décharge et l'électrolyte se fait par une rupture classique d'air connue par le mécanisme de Streamer à partir de la décharge : Cette dernière affaiblit la rigidité diélectrique de l'air à son voisinage. La rupture est facile en polarité négative que celle en positive car l'émission électronique est plus importante en polarité négative.

Les résultats obtenus dans ce chapitre clarifient le phénomène physique responsable de la propagation de la décharge électrique. Pour vérifier si c'est le même mécanisme qui se reproduit dans le phénomène du contournement, une étude expérimentale et théorique est nécessaire pour déterminer le champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge du contournement, en prenant en compte les différentes régions de la décharge : Anodique, cathodique et la colonne positive.

Chapitre IV

ETUDE EXPERIMENTALE ET THEORIQUE SUR LE

MODELE RAINURE ETROITE

IV-1 INTRODUCTION

Ce présent chapitre est consacré à l'étude de la variation des conditions critiques du contournement en fonction des paramètres géométriques et électriques de la pollution, afin de déterminer leurs contributions sur le mécanisme de l'évolution de la décharge électrique du contournement. Cependant nous avons effectué une étude expérimentale en polarité positive et négative, sur un modèle de laboratoire de forme rainure étroite, pour mesurer la tension et le courant critique du contournement.

Cette étude est suivie par une étude théorique pour calculer le champ électrique critique dans l'air au voisinage de la décharge qui correspond aux conditions critiques du contournement mesurées expérimentalement, et constater sa variation avec celles des paramètres géométriques et électriques. Le calcul est mené par un logiciel de calcul du champ électrique basé sur la méthode des éléments finis COMSOL Multi Physics version 3.5.

IV-2 ETUDE EXPERIMENTALE

IV-2-1 Mesure expérimentale de la tension et du courant critique du contournement

Notons que tous les expériences ont été effectuées au sein du Laboratoire de Génie Electrique d'Oran (LGEO) à la salle de la Haute Tension et des Décharges Electriques de l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (USTO-MB), en utilisant le même montage expérimental présenté au chapitre précédent (Figure III-1) avec une cellule expérimentale simulant le phénomène du contournement.

IV-2-2 Description du modèle expérimental rainure rectangulaire étroite

La cellule expérimentale que nous avons utilisée (Figure IV-1) est une plaque en plexiglass creusée d'un canal (rainure) de longueur (L) et de largeur (a), rempli d'une solution électrolytique ($H_2O+NaCl$) simulant la couche de pollution déposée sur la surface de l'isolateur, cette solution a une épaisseur (e) et une résistivité (ρ). Une électrode métallique, génère une haute tension provenant de la décharge des condensateurs, surplombant la surface électrolytique à une hauteur égale à 3mm,

cette hauteur représente la longueur initiale de la décharge électrique. Une deuxième électrode métallique reliée à la masse est placée à l'une des extrémités de la rainure.

Sur ce modèle, nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques et électriques suivants :

- Largeur de l'électrolyte ou rainure (a),
- Longueur de la rainure, c'est-à-dire, la distance entre la décharge et l'électrode de masse (L),
- Epaisseur de l'électrolyte ou de la rainure (e),
- Résistivité (ρ) et résistance par unité de longueur de l'électrolyte (r),
- La polarité de la tension appliquée.

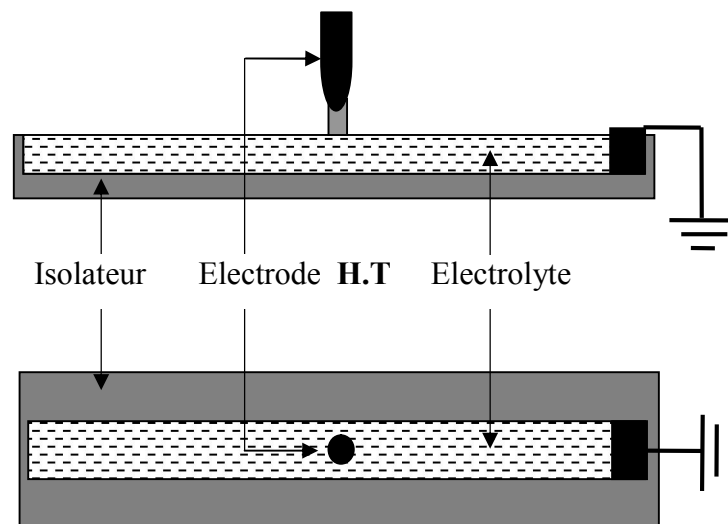


Figure IV-1 : Modèle rainure rectangulaire étroite

IV-2-3 La procédure de mesure

Après l'application de la haute tension, une décharge initiale apparaît entre l'électrode haute tension et l'électrolyte. Si la valeur de la tension appliquée est inférieure à la tension critique du contournement (U_c), ou si l'intensité du courant initial est inférieure au courant critique (I_c), la décharge reste stable à sa position initiale. Mais si la tension appliquée est supérieure à la tension critique U_c , ou si l'intensité du courant initial est plus élevée que le courant critique I_c , la décharge se propage sur la surface de l'électrolyte vers l'électrode de masse, provoquant ainsi la

rupture totale de l'intervalle entre l'électrode de haute tension et l'électrode de masse. Ce type de propagation, sur une surface conductrice, caractérise le phénomène du contournement. Le courant augmente au cours de la propagation de la décharge électrique en raison de la diminution de la résistance de l'électrolyte (en face de la décharge), au moment où la décharge arrive à joindre l'électrode de masse le courant de fuite devient très élevé.

La Figure IV-2 montre la forme du courant pour les trois étapes de contournement: à partir du point O à A, le stade de l'amorçage de la décharge, où le point A représente la décharge initiale stable et le courant de fuite initial. De A à B, le stade de l'évolution de la décharge sur la surface de l'électrolyte en quelques millisecondes. Au point B, la décharge arrive à l'électrode de masse et commence la phase de court-circuit de l'intervalle entre les deux électrodes. À partir de B, le courant circule très rapidement annonçant ainsi le contournement total dans l'expérience.

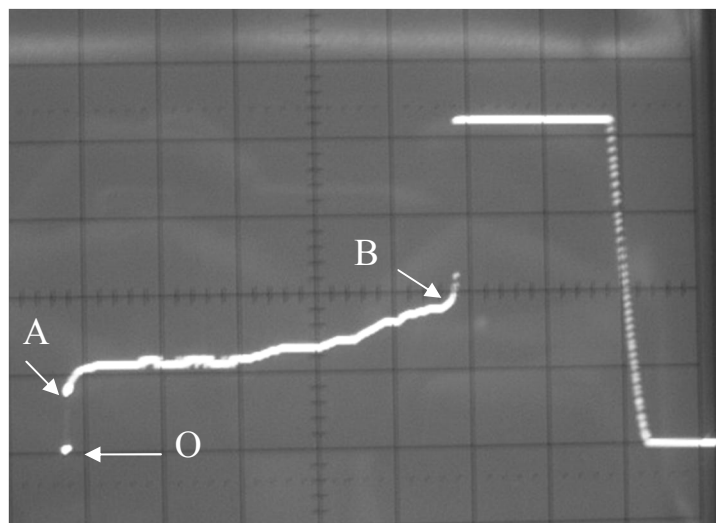


Figure IV-2 : Oscillogramme du courant électrique

IV-2-4 Résultats expérimentaux

IV-2-4-1 Influence de la largeur de l'électrolyte

En utilisant des rainures de largeurs différentes $a=1, 2, 3$ et 4cm ayant la même longueur $L=7\text{cm}$ et remplies avec un électrolyte de résistivité $\rho=2.5$ et $20\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ et une

même épaisseur de 3mm, nous avons mesuré en polarité positive et négative, la tension et le courant critique du contournement en variant à chaque fois la largeur de la rainure (a). Les résultats obtenus, sont représentés aux Figures IV-3 et IV-4.

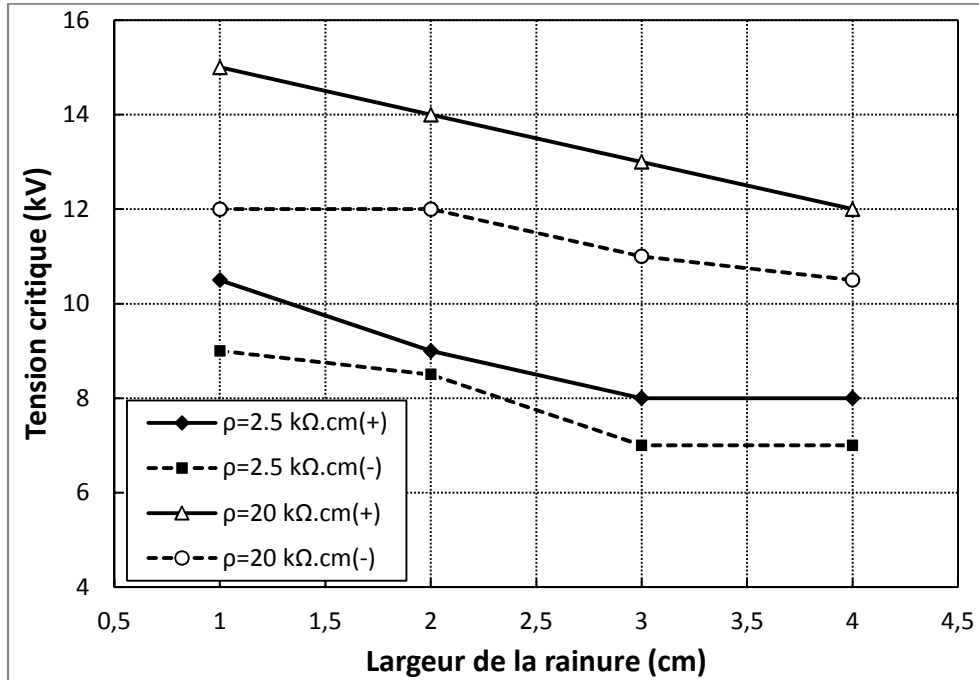


Figure IV-3 : Tension critique en fonction de la largeur de la rainure en deux polarités, pour $L=7\text{cm}$, $e=3\text{mm}$, $\rho=2.5$ et $20\text{k}\Omega.\text{cm}$

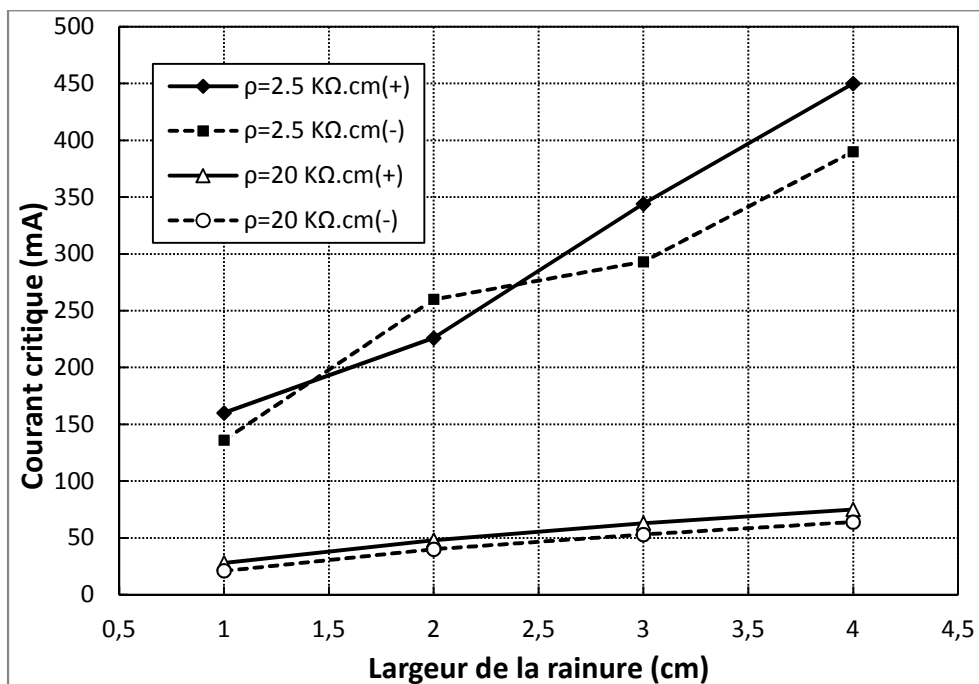


Figure IV-4 : Courant critique en fonction de la largeur de la rainure en deux polarités, pour $L=7\text{cm}$, $e=3\text{mm}$, $\rho= 2.5$ et $20\text{k}\Omega.\text{cm}$

Les courbes montrent que l'augmentation de la largeur de l'électrolyte (a) provoque une diminution de la tension et une augmentation du courant critique du contournement.

Nous avons remarqué aussi que les valeurs du courant critique sont élevées en polarité positive qu'en polarité négative.

IV-2-4-2 Influence de la longueur de la rainure

Afin de montrer les effets de la longueur de la ligne de fuite (longueur de la rainure entre la décharge et l'électrode de masse (L)) sur les conditions critiques du contournement, nous avons représenté aux Figures IV-5 et IV-6 les valeurs mesurées de la tension et du courant critique, en polarité positive, qui correspondent à un électrolyte de résistivités variables $\rho=2.5, 5, 10$ et $20\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ et d'épaisseur $e=3\text{mm}$, rempli dans une rainure de largeur $a=4\text{cm}$ et de longueur variables $L=6, 7, 8, 9$ et 10cm .

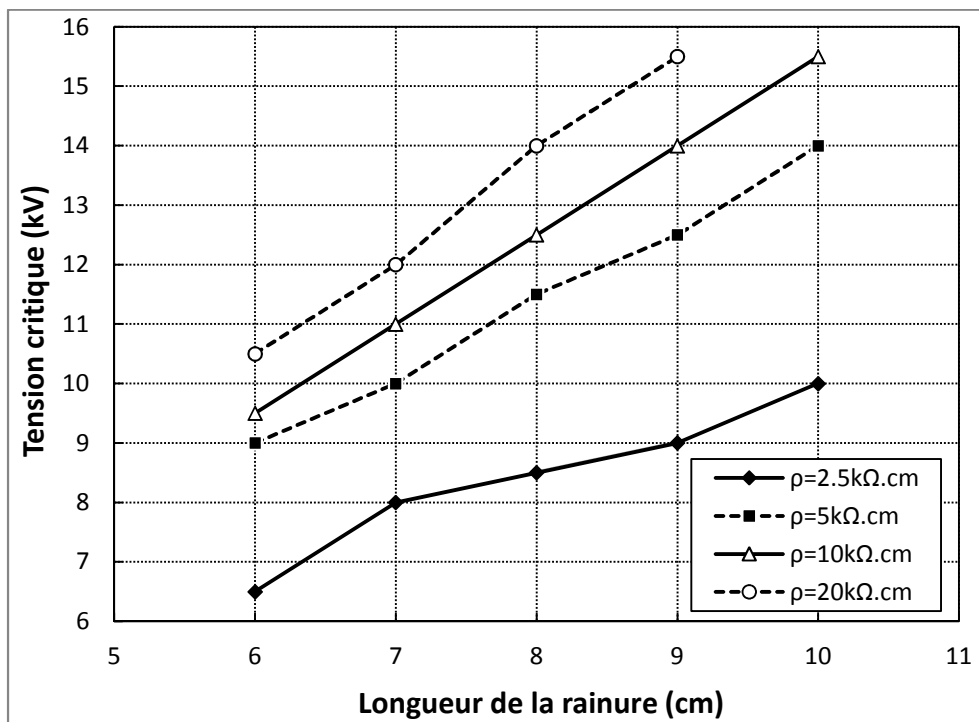


Figure IV-5: Tension critique en fonction de la longueur de la rainure pour $a=4\text{cm}$, $e=3\text{mm}$ et $\rho=2.5, 5, 10$ et $20\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$

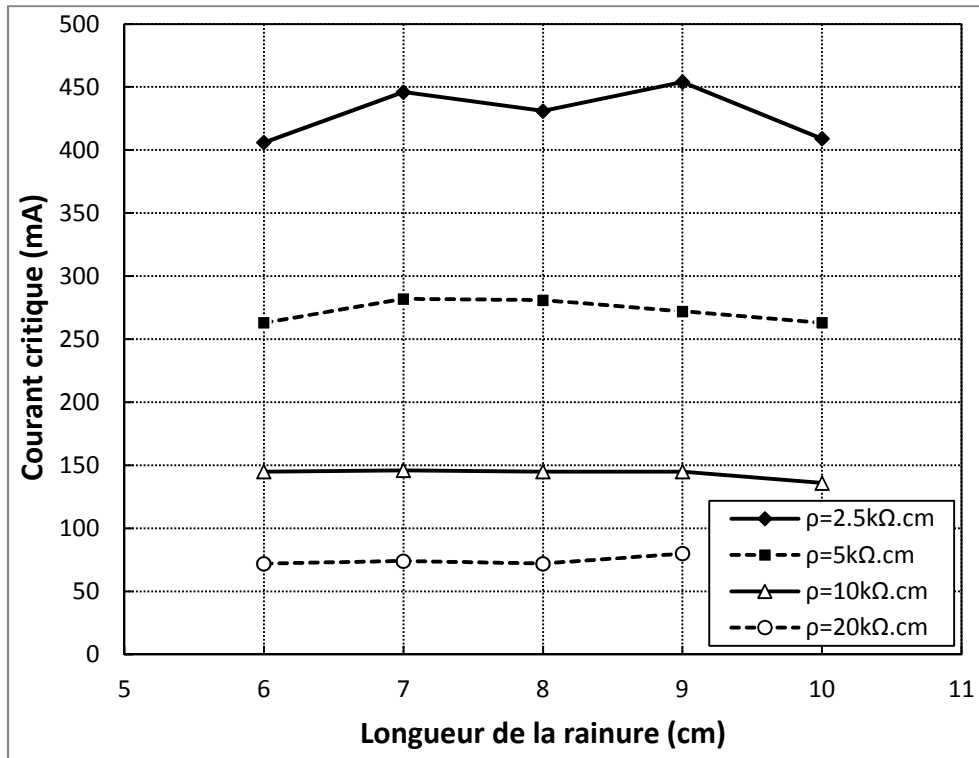


Figure IV-6 : Courant critique en fonction de la longueur de la rainure pour $a=4\text{cm}$, $e=3\text{mm}$ et $\rho=2.5, 5, 10$ et $20\text{k}\Omega.\text{cm}$

Les résultats montrent que l'augmentation de la longueur de la rainure entraîne une augmentation de la tension critique du contournement par contre le courant critique est presque constant avec l'augmentation de cette dernière.

On note que pour une rainure de même largeur, même épaisseur et même résistivité d'électrolyte on obtient la même valeur de la résistance par unité de longueur de l'électrolyte, quelle que soit la longueur de la rainure, ce qui justifie la raison pour laquelle le courant critique n'a presque pas changé de valeur.

IV-2-4-3 Influence de l'épaisseur de la pollution

En utilisant une rainure de largeur 2cm et de longueur 8cm, nous avons mesuré, en polarité positive, les valeurs de la tension et du courant critique en changeant à chaque fois l'épaisseur de l'électrolyte 3 et 6mm et les valeurs de résistivité (ρ) utilisées précédemment 2.5, 5, 10 et 20kΩ.cm. Les résultats obtenus sont représentés aux Figure IV-7 et IV-8.

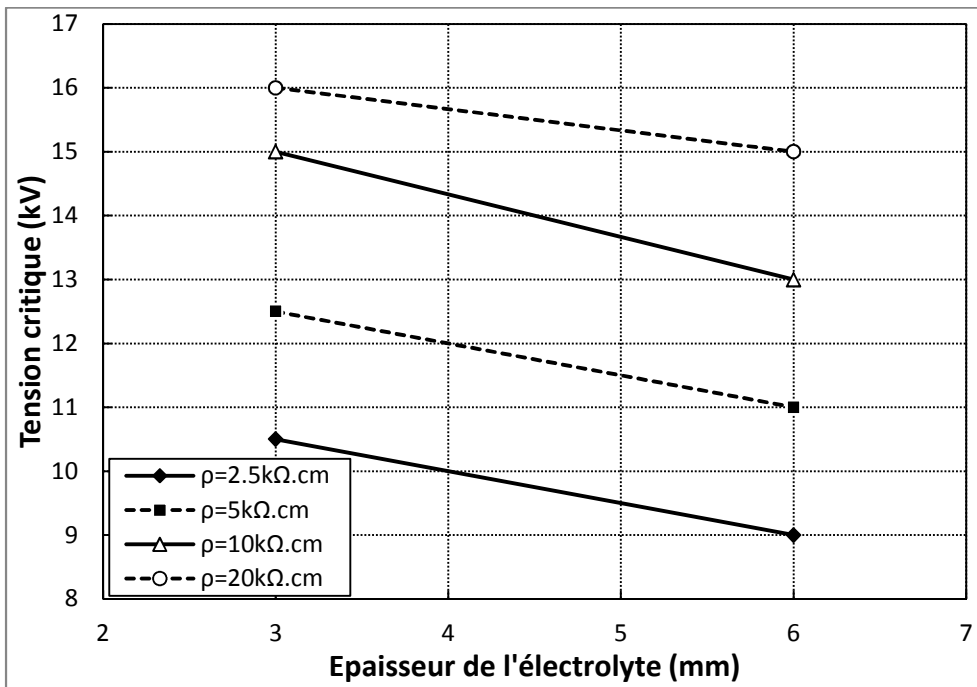


Figure IV-7: Tension critique en fonction de l'épaisseur de l'électrolyte pour $a=2\text{cm}$, $L=8\text{cm}$ et $\rho=2.5, 5, 10$ et $20\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$

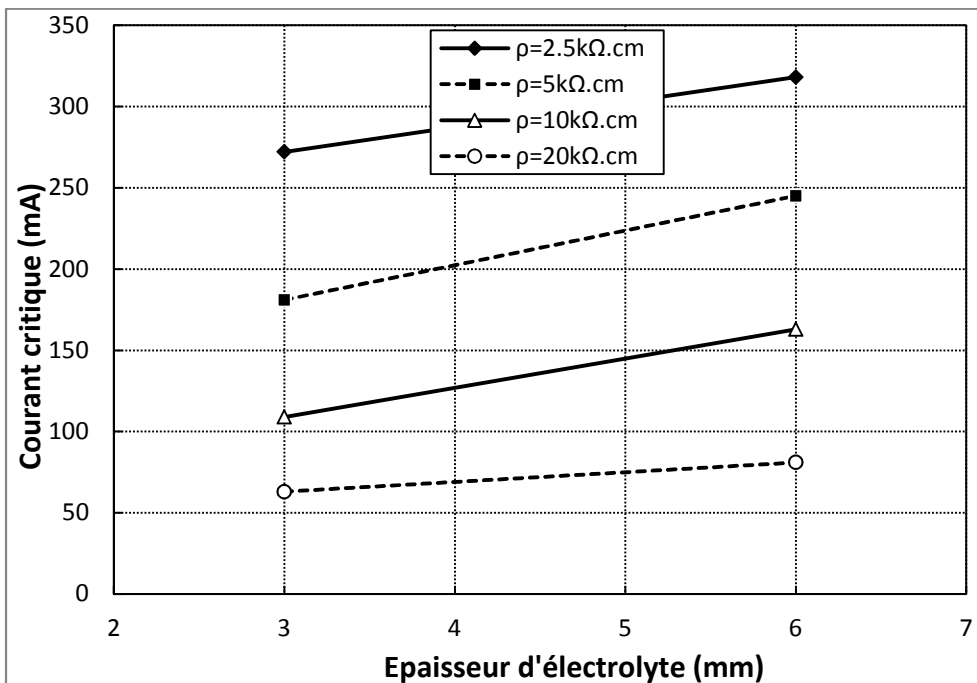


Figure IV-8: Courant critique en fonction de l'épaisseur de l'électrolyte pour $a=2\text{cm}$, $L=8\text{cm}$ et $\rho=2.5, 5, 10$ et $20\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$

D'après les résultats montrés aux Figures IV-7 et IV-8, nous remarquons que la tension critique de contournement diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de l'électrolyte alors que le courant critique augmente avec l'augmentation de cette dernière.

IV-2-4-4 Influence de la résistivité de l'électrolyte et de la polarité de la tension appliquée

Nous pouvons constater l'influence de la résistivité de l'électrolyte et de la polarité de la tension appliquée sur les conditions critiques du contournement d'après les courbes représentées aux Figures IV-9 et IV-10, regroupant les résultats de mesure sur une rainure de largeur 3cm, profondeur de l'électrolyte $e=6\text{mm}$ et une longueur de 7cm.

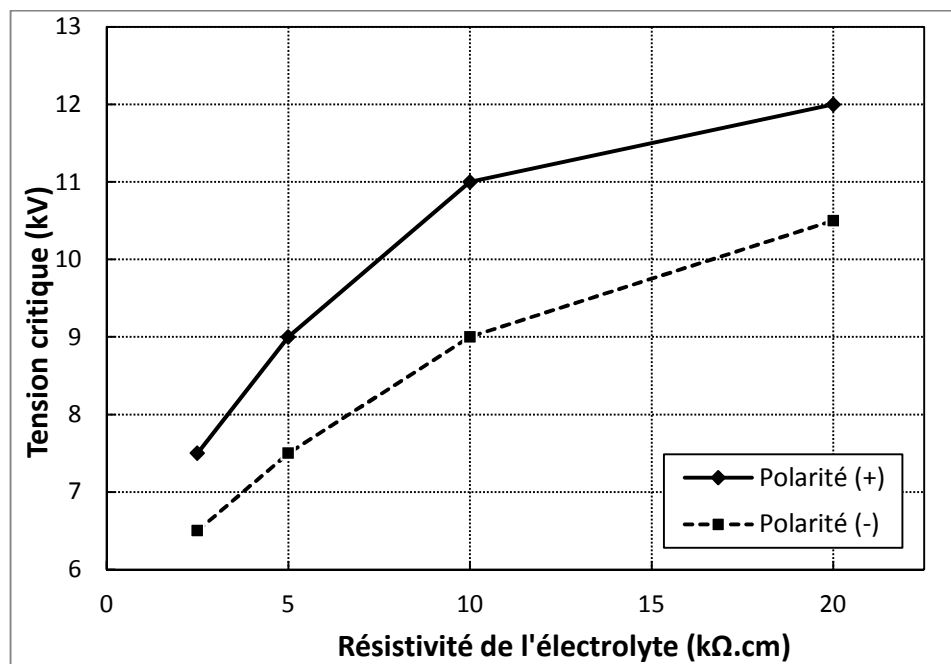


Figure IV-9: Tension critique en fonction de la résistivité de l'électrolyte en deux polarités pour $a=3\text{cm}$, $L=7\text{cm}$ et $e=6\text{mm}$

Nous avons remarqué que l'augmentation de la résistivité de l'électrolyte entraîne une augmentation de la tension critique de contournement et une diminution du courant critique de contournement. Concernant la polarité de la

tension appliquée, les conditions critiques de contournement, tels que la tension et le courant critique sont plus importantes en polarité positive.

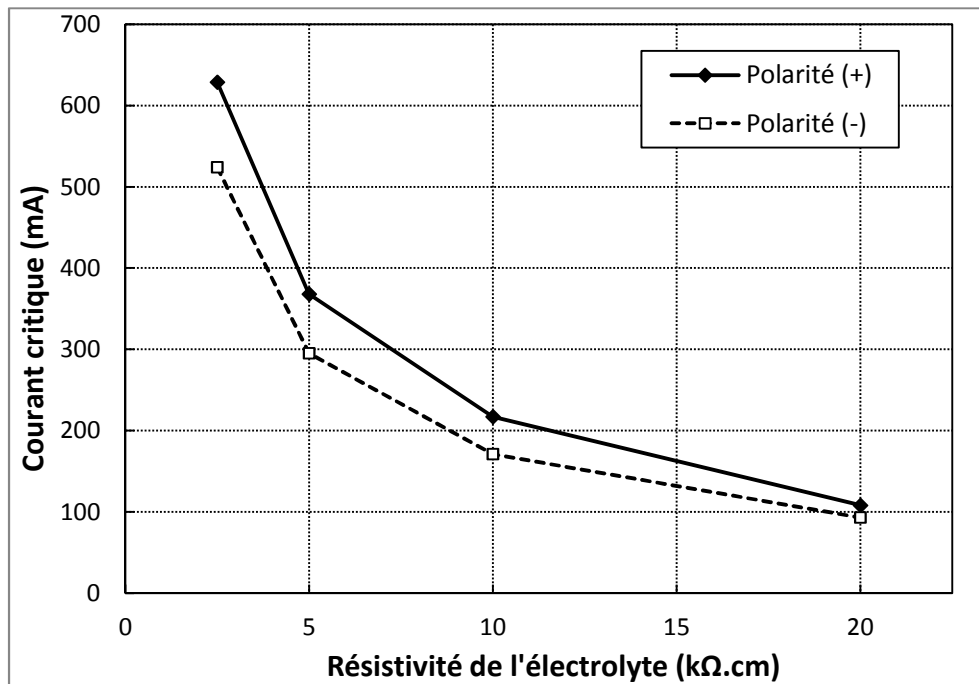


Figure IV-10: Courant critique en fonction de la résistivité de l'électrolyte en deux polarités pour $a=3\text{cm}$, $L=7\text{cm}$ et $e=6\text{mm}$

IV-2-4-5 Influence de la résistance par unité de longueur

En se basant sur les valeurs mesurées de la tension et du courant critique de contournement obtenus en variant les différents paramètres géométriques et électriques du modèle expérimental (rainure), nous avons tracé les courbes donnant la variation de la tension et du courant critique en fonction de la résistance par unité de longueur (r) en polarité positive et négative.

D'après les Figures IV-11 et IV-12, nous avons remarqué que l'augmentation de la résistance par unité de longueur (r) engendre une augmentation de la tension critique et une diminution de la valeur du courant critique de contournement.

Pour la même valeur de résistance par unité de longueur (r), la tension critique prend plusieurs valeurs mais le courant critique est presque le même, ce résultat a été vérifié et justifié au premier chapitre [32].

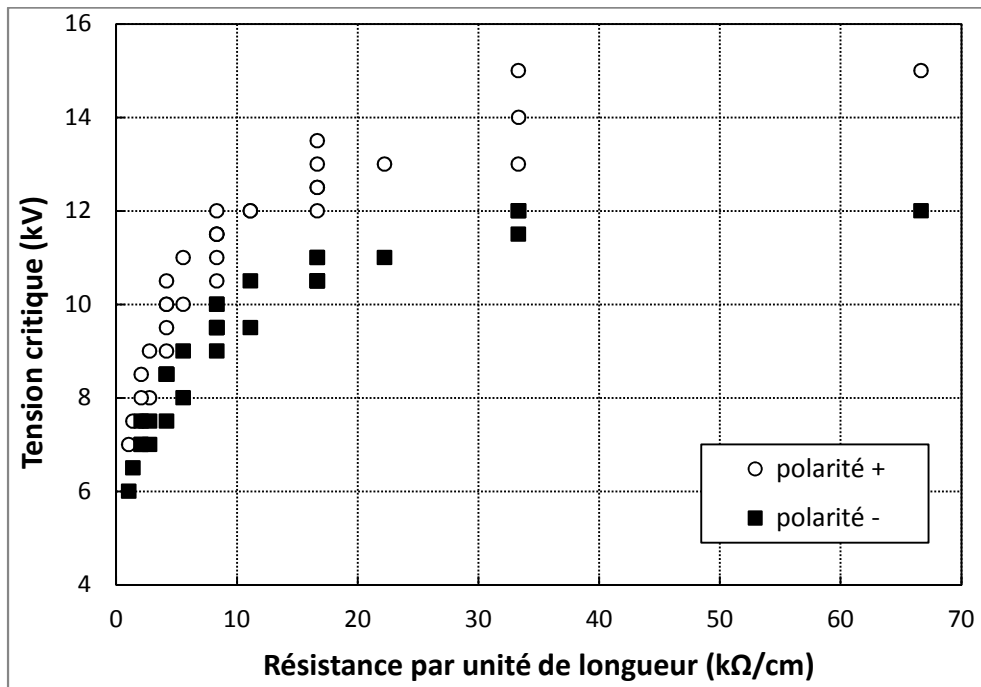


Figure IV-11: La variation de la tension critique en fonction de la résistance par unité de longueur en deux polarités, pour L=7cm

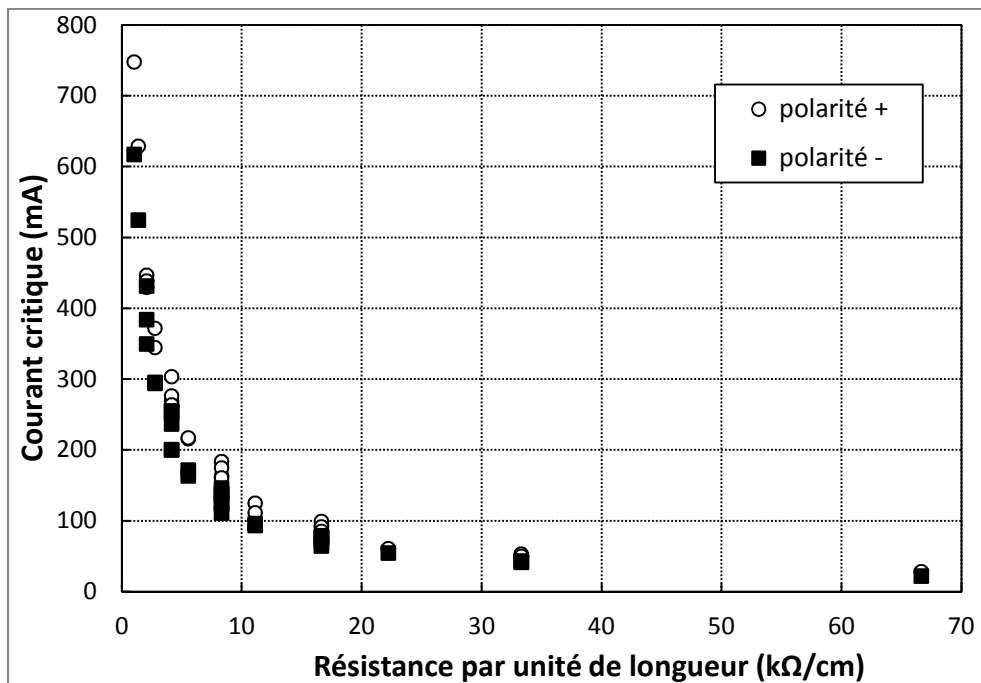


Figure IV-12: La variation du courant critique en fonction de la résistance par unité de longueur en deux polarités, pour L=7cm

IV-3 ETUDE THEORIQUE (SIMULATION)

IV-3-1 Calcul du champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge sur le modèle rainure rectangulaire étroite

En se basant sur les valeurs de la tension et du courant critique de contournement mesurées expérimentalement, nous avons calculé le champ électrique critique, qui ne peut être mesuré expérimentalement au niveau de notre laboratoire. Le calcul du champ électrique est effectué dans l'intervalle d'air entre la décharge électrique du contournement et la pollution (électrolyte) au pied de la décharge à l'instant initial. À cet instant la décharge électrique (état statique) est considérée comme ayant une forme tubulaire d'un diamètre uniforme contrairement à son état dynamique où elle a une forme d'un pied élargi avec un avant pied qui se déplace lors de son évolution [25].

Le calcul du champ électrique a été établi à l'aide d'un logiciel de calcul COMSOL Multi Physics version 3.5.

IV-3-2 Présentation du logiciel de calcul COMSOL Multi Physics

La détermination de la distribution du champ électrique et du potentiel électrique de tout système haute-tension est un problème complexe de calcul non pas par la simplicité des équations aux dérivées partielles qui les décrivent mais plutôt à cause de la forme irrégulière des diélectriques, de la proximité de surfaces métalliques aux formes complexes, des lignes de transmission, et dans certains cas, de la présence d'une couche conductrice.

Dans ce contexte, les progrès de l'informatique ont permis de développer des codes de calcul afin de déterminer de façon précise la distribution du champ et du potentiel électrique. Dans notre étude, le calcul du champ électrique a été effectué à l'aide du logiciel de calcul COMSOL Multi Physics version 3.5, anciennement appelé FEMLAB.

Ce logiciel est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, comme

l'électrostatique, la magnétostatique ou encore l'électromagnétisme.

Sa spécificité est également de permettre de coupler différentes EDP, de manière à décrire des phénomènes multi physiques, particulièrement adaptés au micro technologie. Il est ainsi possible d'obtenir la déformation d'une membrane causée par la pression dans un liquide par exemple. Ou encore l'élévation de température dans un conducteur dû au passage d'un courant électrique.

La différence fondamentale, entre COMSOL Multi Physics et les autres outils de simulation multi physiques du marché, est que COMSOL Multi Physics ne procède pas à une analyse séquentielle des différents modèles, mais charge un seul et unique solveur de résoudre simultanément l'ensemble des équations.

Le logiciel dispose d'une famille de solveurs directs et itératifs, développés en C++, permettant de résoudre les problèmes linéaires, non-linéaires stationnaires, temporels et aux valeurs propres, et capables de traiter de manière simultanée n'importe quelles combinaisons de modèles physiques. Le choix du solveur optimal se fait automatiquement en fonction de la nature du problème à résoudre.

IV-3-3 La procédure de calcul

IV-3-3-1 Choix du domaine d'étude

La première étape consiste à choisir le domaine d'étude en sélectionnant la dimension de l'espace (2D, 2D axisymétrique, 3D,...) ainsi que le modèle à utiliser. Notre problème est résolu en 3D, nous avons combiné le modèle électrocinétique et le modèle électrostatique de sorte que le champ électrique calculé dans l'air devant la décharge soit le résultat de la distribution du potentiel calculée dans le modèle électrocinétique.

IV-3-3-2 Création de la géométrie du modèle expérimental

Après la sélection du domaine d'étude, nous avons introduit la géométrie du modèle expérimental étudié (rainure étroite). Ce dernier est constitué essentiellement de la couche de la pollution (électrolyte) et de la décharge électrique.

IV-3-3-2-1 Géométrie de la décharge électrique :

Aux conditions initiales, c'est-à-dire au moment de l'apparition de la décharge électrique entre l'électrode haute tension et la surface électrolytique, à cet instant la décharge électrique (état statique) est considérée comme ayant une forme tubulaire d'un diamètre uniforme contrairement à son état dynamique où elle a une forme d'un pied élargi avec un avant pied qui se déplace lors de son évolution [37].

Le type de la décharge dans notre étude, à pression atmosphérique, est intermédiaire entre luminescente et arc "décharge luminescente anormale". Dans une telle décharge on peut y distinguer trois zones: la gaine anodique, la colonne positive et la gaine cathodique.

La différence de tension aux bornes de la décharge électrique est donnée par la relation suivante (IV-1) [9,11,25]:

$$V_d(x) = x A I_d^{-n} + V_e \dots \dots \dots (IV-1)$$

x: longueur de la décharge (3mm).

A. I_d^{-n} : le gradient de tension dans la colonne positive de la décharge.

I_d : le courant de la décharge électrique mesuré expérimentalement (A).

A: constante égale à 63, n : constante égale à 0.76.

V_e : chute de tension cumulée des deux électrodes (égale à 840V).

$$V_e = V_a + V_c \dots \dots \dots (IV-2)$$

V_a : chute de tension anodique (égale à 240V).

V_c : chute de tension cathodique (égale à 600V).

Dans la géométrie, nous avons présenté les différentes zones de la décharge électrique par un ensemble de trois cylindres posés l'un sur l'autre dont la hauteur globale est 3mm, c'est la hauteur que surplombe l'électrode haute tension par rapport à l'électrolyte.

On note que : la hauteur de la zone cathodique h_c est 0.35 mm, elle correspond à la distance entre la colonne positive de la décharge et l'électrolyte en polarité positive, et elle correspond à la distance entre l'électrode haute tension et la colonne positive en polarité négative.

La hauteur de la zone anodique h_a est égale à 0.15mm et la hauteur de la colonne positive est égale à 2.5mm pour les deux polarités.

Le rayon de la décharge (r_d) est calculé d'après la relation (IV-3) donnée par Wilkins [9]:

$$r_d = \sqrt{\frac{I_d}{J \cdot \pi}} \dots\dots\dots(IV-3)$$

Où, J : densité du courant de la décharge (égale à 1.45 A.cm⁻²)

IV-3-3-2-2 Géométrie de la couche de l'électrolyte :

La couche électrolytique est représentée par un rectangle, sa longueur et sa largeur correspondent à celle du modèle expérimentale, l'épaisseur du rectangle égale à 3 ou 6mm correspond à la profondeur d'électrolyte (e) remplie dans la rainure expérimentale.

La Figure IV-13 représente la géométrie du modèle expérimental, c'est-à-dire la couche électrolytique et la décharge électrique reproduite en 3D.

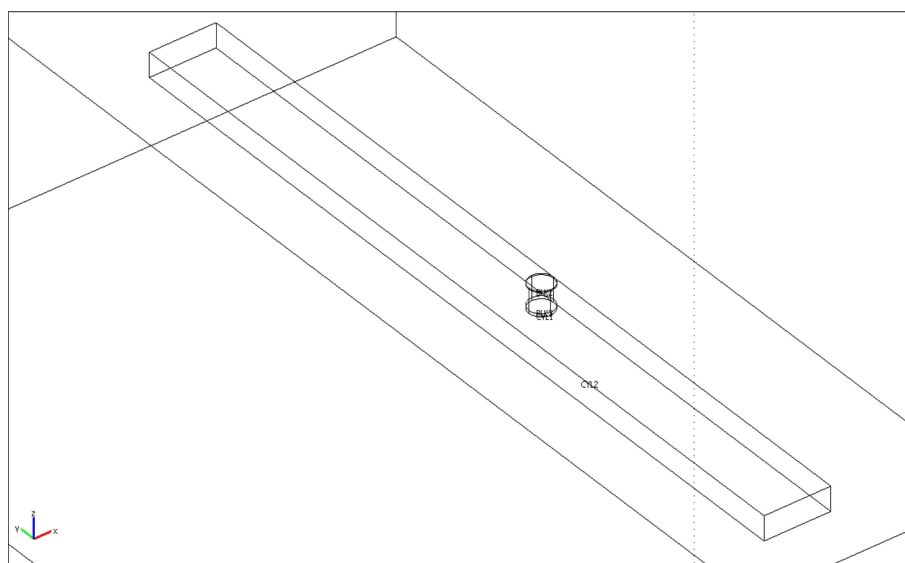


Figure IV-13 : Géométrie du modèle expérimental avec décharge en 3D

IV-3-3-2-3 Géométrie de la boîte infinie :

La boîte infinie (frontière artificielle) est définie pour être trois à cinq fois la dimension du modèle expérimental. Aux limites de cette frontière, il est supposé que le champ électrique soit nul, elle est activée seulement en modèle électrostatique.

IV-3-3-3 Description des propriétés physiques

Les différents matériaux et leurs propriétés physiques sont introduits dans le modèle et reportés sur le tableau IV-1.

Tableau IV-1

Conductivités et permittivités adoptées pour la simulation

| Modèle Rainure | Matériaux | | Conductivité σ (mS/cm) | Permittivité relative ϵ_r |
|-------------------|------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| Electrocinétique | Décharge électrique | Gaine anodique | $J \cdot h_a / V_a$ | 1 |
| | | Colonne positive | $J / A \cdot I_d^{-n}$ | 1 |
| | | Gaine cathodique | $J \cdot h_c / V_c$ | 1 |
| | Electrolyte | | 0.4;0.2;0.1;0.05 | 80 |
| Electrostatique | Air | | - | 1 |

Les conditions aux limites sont prédéfinies à l'interface graphique, on doit seulement sélectionner les conditions qui conviennent.

IV-3-3-4 Le choix du maillage

Le maillage à travers l'interface graphique de COMSOL est une opération automatique, il ne reste donc qu'à veiller à ce que le maillage soit suffisamment fin pour que le résultat soit le plus précis possible (Figure IV-14). La dernière étape est le lancement de la résolution automatique du problème à travers l'interface graphique.

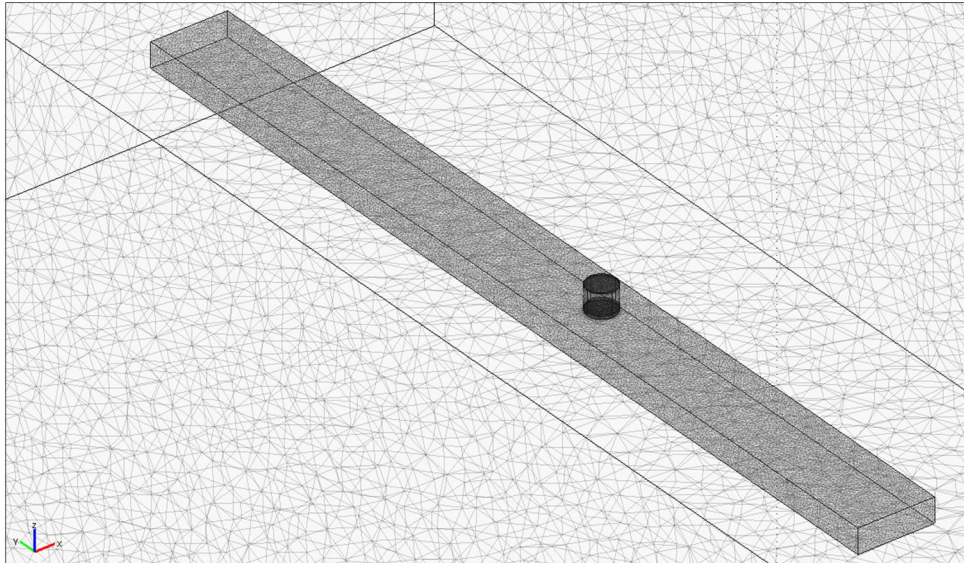


Figure IV-14: Maillage extrêmement fin du modèle rainure

IV-3-4 Résultats de la simulation

IV-3-4-1 Distribution des lignes de champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge électrique

La Figure IV-15 représente la distribution des lignes de champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge électrique dans le plan passant par l'axe de la rainure. On remarque que les lignes de champ électrique issues de la décharge pour rejoindre l'électrode de masse, forment deux intervalles :

Le premier intervalle (I), limité par le triangle $h\ell\Delta d$, comme il est montré sur la Figure IV-16, est entre la décharge électrique et la surface de l'électrolyte. Il est constitué par les lignes de champ électrique qui pénètrent la solution électrolytique ;

Le second intervalle (II) est constitué par les lignes de champ électrique qui se propagent dans l'air pour rejoindre l'électrode de masse sans passer par l'électrolyte.

h : hauteur de la décharge appartenant au premier intervalle, il regroupe l'ensemble des lignes de champ électrique qui pénètrent la solution électrolytique.

ℓ : longueur de la surface de pénétration de l'ensemble des lignes de champ électrique appartenant au premier intervalle.

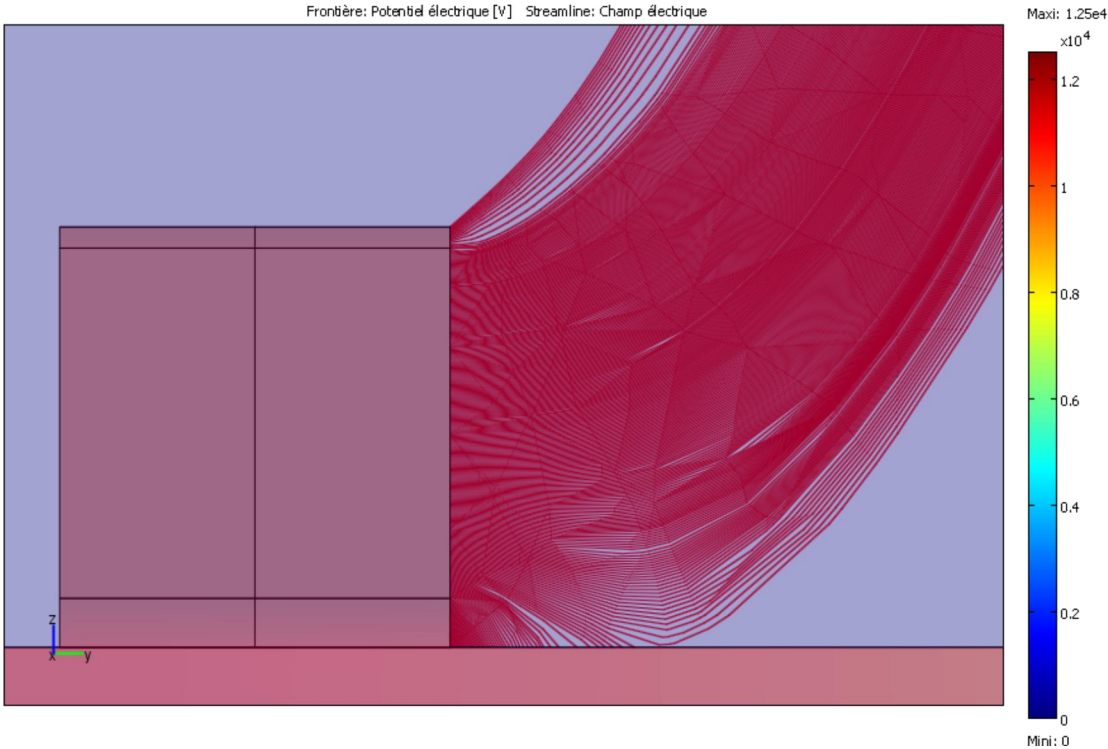


Figure IV-15: Distribution du champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge électrique

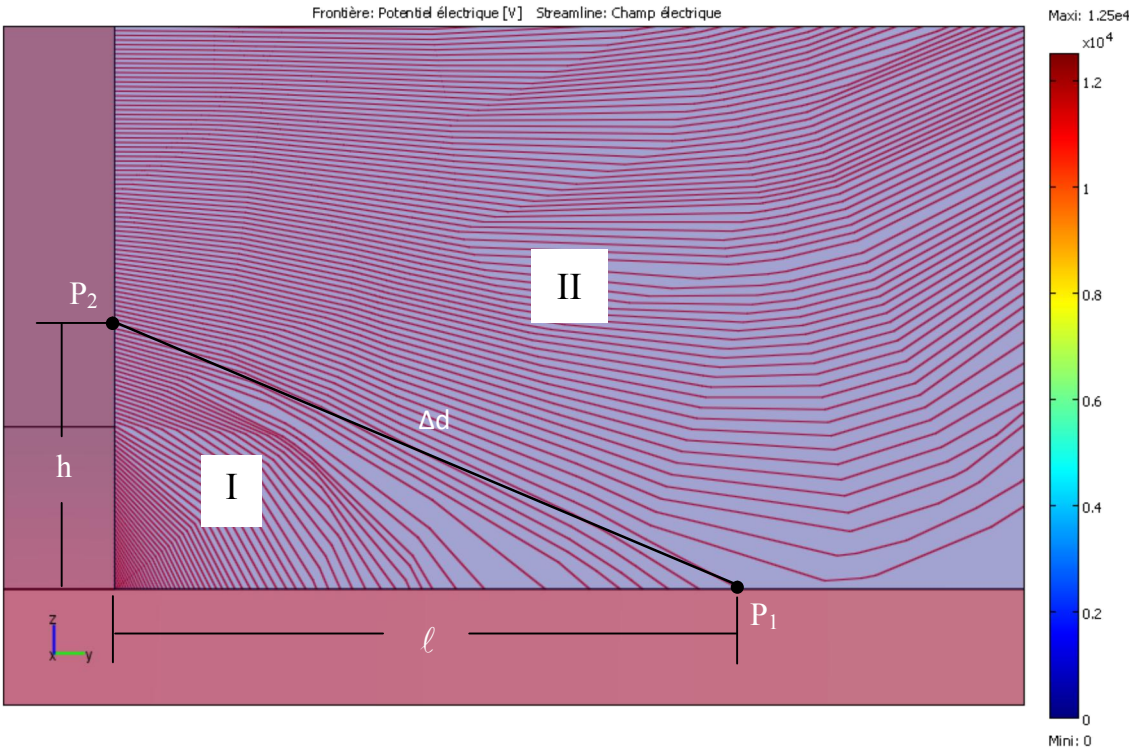


Figure IV-16: Zoom de la Figure IV-15

IV-3-4-2 CHAMP ELECTRIQUE MOYEN DANS L'INTERVALLE DECHARGE-ELECTROLYTE (Intervalle I)

Comme tous les intervalles d'air entre électrodes métalliques, où la distribution du champ électrique est non-uniforme, le champ électrique moyen varie d'une ligne à l'autre. Pour une ligne donnée, la valeur moyenne du champ électrique est égale au rapport entre la différence de potentiel à ses bornes et la longueur de cette ligne.

Dans notre intervalle décharge-électrolyte (Figure IV-16), la valeur maximale du champ électrique moyen correspond à la ligne la plus près de l'angle droit du triangle $h\ell\Delta d$, cette valeur diminue en allant vers l'hypoténuse Δd . La valeur la plus faible du champ électrique moyen correspond à la ligne de champ électrique la plus près de l'hypoténuse Δd , cette valeur moyenne la plus faible a été calculé par la formule (IV-4).

$$E_{\text{moy}} = (V_{p2} - V_{p1})/\Delta d \dots\dots\dots (IV-4)$$

Où ;

V_{p1} : le potentiel au point P_1 .

V_{p2} : le potentiel au point P_2 .

Δd : hypoténuse du triangle $h\ell\Delta d$ (cm)

IV-3-4-2-1 Influence de la largeur et l'épaisseur de l'électrolyte sur le champ électrique moyen dans l'intervalle décharge-électrolyte

Nous avons calculé les valeurs du champ électrique moyen en deux polarités, qui correspondent aux valeurs critiques mesurées expérimentalement sous l'influence de la variation de la largeur et l'épaisseur de l'électrolyte. Pour une résistivité (ρ) égale à $5K\Omega.cm$, de longueur $L=7cm$ et des épaisseurs $e= 3$ et $6mm$, les valeurs calculées du champ électrique maximum au pied de la décharge sont représentées à la Figure IV-17.

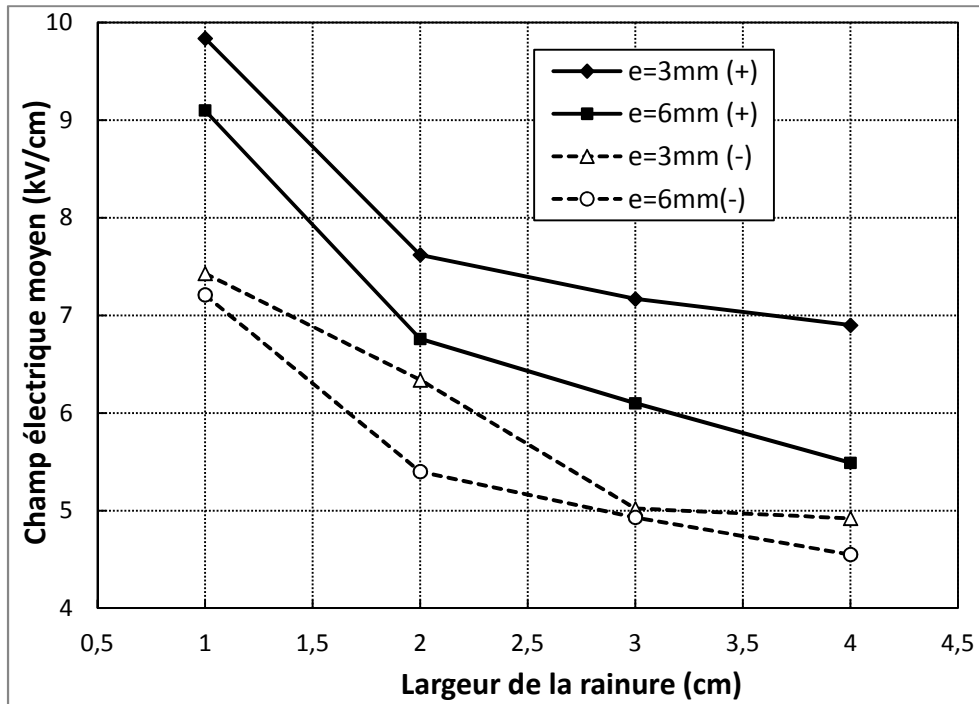


Figure IV-17 : Champ électrique moyen en fonction de la largeur de la rainure en deux polarités pour $L=7\text{cm}$, $\rho=5\text{k}\Omega.\text{cm}$ et $e=3$ et 6mm

D'après les courbes de la Figure IV-17, nous avons remarqué que le champ électrique moyen est inversement proportionnel à la variation de la largeur de l'électrolyte et à la variation de l'épaisseur de l'électrolyte. Il diminue en augmentant la largeur de l'électrolyte, également, il diminue en augmentant l'épaisseur de l'électrolyte.

IV-3-4-2-2 Influence de la résistivité et de la polarité de la tension appliquée sur le champ électrique moyen

Nous avons représenté à la Figure IV-18, les caractéristiques du champ électrique moyen, en polarité positive et négative, en fonction de la variation de la résistivité d'électrolyte. Pour une épaisseur de 6 mm, une largeur de 3 cm et une longueur d'électrolyte de 7 cm. Nous avons remarqué que le champ électrique moyen est proportionnel à la résistivité de l'électrolyte, il augmente avec l'augmentation de cette dernière. Les valeurs du champ électrique moyen en polarité positive sont plus importantes que celles en polarité négative.

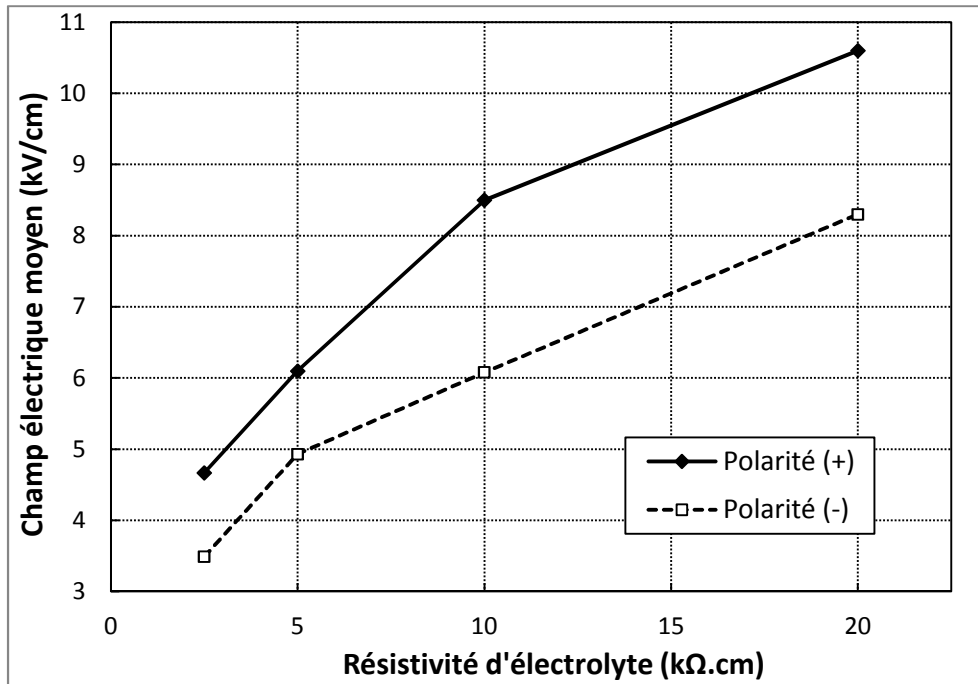


Figure IV-18 : Champ électrique moyen en fonction de la résistivité de l'électrolyte en deux polarités pour $L=7\text{cm}$, $a=3\text{cm}$ et $e=6\text{mm}$

IV-3-4-3 CHAMP ELECTRIQUE MAXIMUM DANS L'AIR AU VOISINAGE DE LA DECHARGE ELECTRIQUE

IV-3-4-3-1 Influence de la largeur et l'épaisseur de l'électrolyte sur le champ électrique maximum

Nous avons calculé le champ électrique maximum, en polarité positive et négative, sous l'influence de la variation de la largeur et l'épaisseur de l'électrolyte. Les valeurs calculées du champ électrique maximum au voisinage de la décharge sont représentées à la Figure IV-19, pour une résistivité $\rho=5\text{k}\Omega.\text{cm}$, longueur de la rainure $L=7\text{cm}$ et une épaisseur $e= 3$ et 6mm .

D'après les courbes de la Figure IV-19, nous avons remarqué que le champ électrique maximum au voisinage de la décharge diminue en augmentant la profondeur de l'électrolyte en polarité positive et en négative. Concernant l'influence de la largeur de l'électrolyte, nous avons remarqué une légère variation du champ électrique maximum avec l'augmentation de la largeur du modèle.

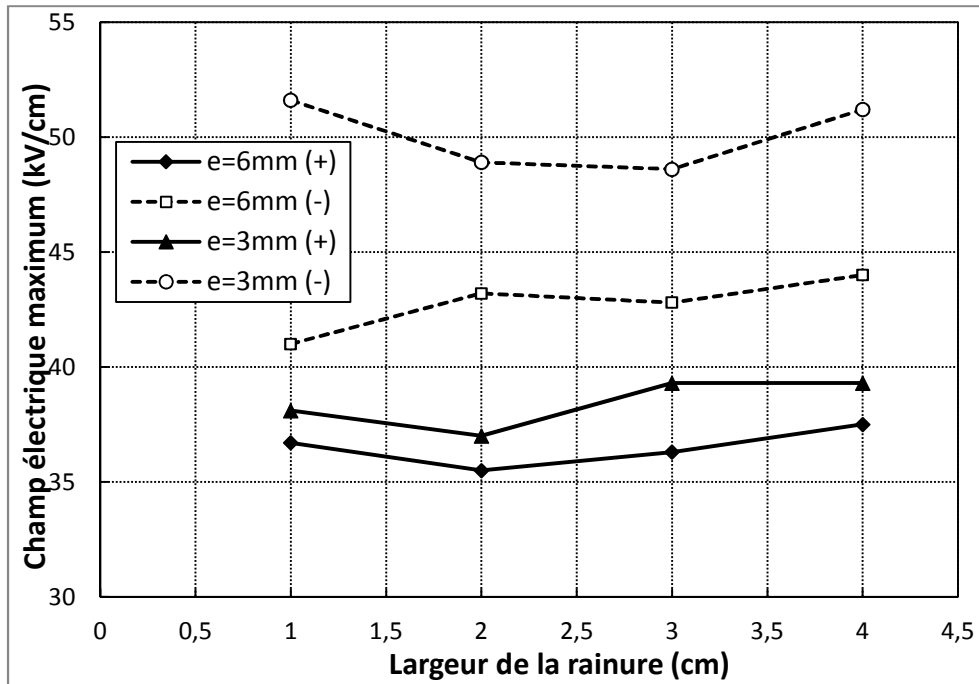


Figure IV-19 : Champ électrique maximum en fonction de la largeur de la rainure en deux polarités pour $L=7\text{cm}$, $e=3$ et 6mm et $\rho=5\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$

La remarque la plus importante est que toutes les valeurs du champ électrique maximum au voisinage de la décharge sont supérieures à la valeur du champ disruptif de l'air à pression atmosphérique ($\approx 30\text{kV/cm}$) [54]. Elles varient entre environ 35.5kV/cm et 39.3kV/cm en polarité positive, 41kV/cm et 51.6kV/cm en polarité négative.

IV-3-4-3-2 Influence de la résistivité et de la polarité de la tension appliquée sur le champ électrique maximum

Pour étudier la variation du champ électrique maximum au voisinage de la décharge en fonction de la polarité de la tension appliquée et de la résistivité d'électrolyte, nous avons tracé les valeurs calculées du champ électrique à la Figure IV-20, pour deux rainures de même longueur 7cm et de largeur $2, 4\text{cm}$ remplis avec une profondeur d'électrolyte égale à 6mm .

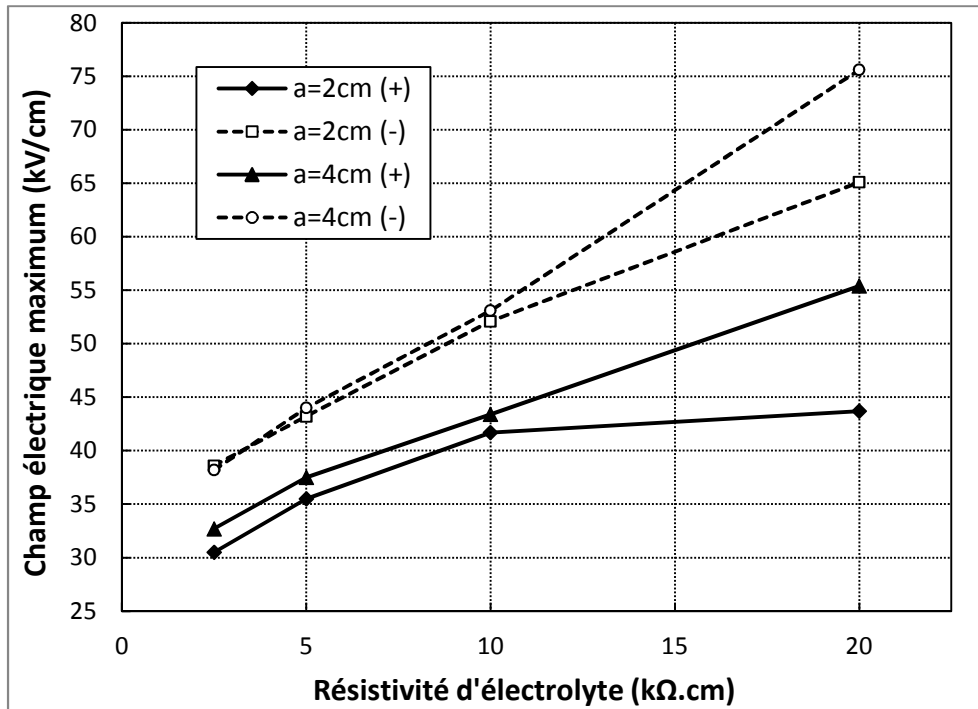


Figure IV-20 : Champ électrique maximum en fonction de la résistivité de l'électrolyte en deux polarités pour $L=7\text{cm}$, $e=6\text{mm}$ et $a=2$ et 4cm

Les courbes représentées à la Figure IV-20 montrent qu'en deux polarités, le champ électrique maximum dans l'air au voisinage de la décharge électrique varie avec la variation de la résistivité de l'électrolyte, il augmente avec l'augmentation de cette dernière. Le champ électrique maximum en polarité négative est supérieur que celui en positive.

On peut remarquer aussi que les valeurs de champ électrique maximum varient entre environ 30.5kV/cm et 55.4kV/cm en polarité positive, 38.6kV/cm et 75.6kV/cm en polarité négative. Ces valeurs sont supérieures à la valeur du champ disruptif de l'air à pression atmosphérique ($\approx 30\text{kV/cm}$).

IV-4 ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Les résultats obtenus de l'étude expérimentale effectuée sur le modèle rainure étroite, étudiant la variation de la tension et du courant critique du contournement en fonction de la variation des grandeurs géométriques et électriques, ainsi les résultats de l'étude théorique effectuée pour calculer le champ électrique critique dans l'air au voisinage de la décharge électrique du contournement, nous permettent de constater

que : La variation des grandeurs géométriques et électriques de la pollution influe sur les conditions critiques du contournement par leurs actions directes et simultanées sur la résistance par unité de longueur de la pollution et sur la distribution des lignes de champ électrique le long de la distance entre la décharge électrique et l'électrode de terre [62].

Le tableau IV-2 regroupe quelques résultats montrant l'influence de la résistance par unité de longueur et de la distribution des lignes de champ électrique dans l'air entre la décharge et l'électrolyte sur les conditions critiques du contournement telles que, tension, courant, champ électrique moyen et champ électrique maximum.

Tableau IV-2

Conditions critiques en fonction de la résistance par unité de longueur en polarité positive pour $L=7\text{cm}$

| r (k Ω /cm) | ρ (k Ω .cm) | a (cm) | e (mm) | V_c (kV) | I_c (A) | E_{moy} (kV/cm) | E_{max} (kV/cm) |
|-----------------------|----------------------------|-----------|-----------|---------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 4.17 | 5 | 4 | 3 | 10 | 0.282 | 6.9 | 39.3 |
| | 10 | 4 | 6 | 10.5 | 0.267 | 7.51 | 43.4 |
| | 5 | 2 | 6 | 9.5 | 0.266 | 6.76 | 35.5 |
| 8.33 | 10 | 4 | 3 | 11 | 0.147 | 8.82 | 41.6 |
| | 20 | 4 | 6 | 11.5 | 0.132 | 9.68 | 55.4 |
| | 10 | 2 | 6 | 11.5 | 0.156 | 8.81 | 41.7 |
| 16.66 | 10 | 1 | 6 | 13.5 | 0.098 | 13.3 | 48.1 |
| | 5 | 1 | 3 | 12.5 | 0.095 | 9.84 | 38.1 |

La résistance par unité de longueur de la pollution est le facteur principal qui détermine la tension et le courant critique de contournement. Ces derniers sont presque constants pour des cas de géométrie de pollution différente, possédant la même valeur de la résistance par unité de longueur comme le montre le tableau IV-2.

Nous interprétons la petite différence, remarquée dans les valeurs du courant et de la tension critique mesurées expérimentalement par l'influence de la distribution

des lignes de champ électrique dans l'air entre la décharge électrique et l'électrolyte. Cette distribution est considérée comme facteur secondaire dans la détermination des conditions critiques du contournement, en particulier les valeurs du champ électrique moyen et du champ électrique maximum dans l'air au voisinage de la décharge.

Le même tableau IV-2, montre les valeurs calculées du champ électrique moyen dans l'intervalle entre la décharge et l'électrolyte ainsi que les valeurs du champ électrique maximum dans l'air au voisinage de la décharge, ces derniers sont déterminés par la distribution des lignes de champ électrique dans l'air entre la décharge et l'électrolyte. Comparant ces résultats avec ceux obtenus dans l'étude de la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique[49], qui a montré que la rigidité diélectrique de l'intervalle d'air « décharge-pointe » est plus faible que pour un intervalle d'air « décharge-plan », nous avons remarqué que le contournement demande des valeurs de tension, de champ électrique moyen et de champ électrique maximum au voisinage de la décharge les plus faibles dans une configuration où la distribution des lignes de champ électrique est concentrique sur le plan horizontal et vertical le long de la distance entre la décharge électrique et l'électrode de masse.

Concernant la polarité de la tension appliquée ; en rappelant également que la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique se fait avec des distances plus petites en polarité négative qu'en polarité positive, car l'émission secondaire à partir du plasma de la décharge est plus importante qu'à partir de l'électrolyte, comme expliqué dans [33,51,58-59,61]. Cela peut justifier pourquoi en polarité négative les conditions critiques du contournement sont moins importantes que celles en polarité positive, tels que tension et courant critique.

Nous avons constaté que les valeurs du champ électrique maximum dans l'air au voisinage de la décharge sont importantes en polarité négative qu'en polarité positive. Cela peut être justifié par les valeurs de la tension critique et de champ électrique moyen qui sont moins importantes en polarité négative nécessitant ainsi un champ électrique maximum plus important qu'en polarité positive.

En polarité positive comme en négative, les valeurs calculées du champ électrique maximum dans l'intervalle d'air décharge-électrolyte sont supérieures à la valeur du champ disruptif de l'air à pression atmosphérique ($\approx 30\text{kV/cm}$), et suffisantes pour faire la rupture de l'intervalle d'air étudié du modèle rainure étroite.

Chapitre V

ETUDE EXPERIMENTALE ET THEORIQUE SUR LE

MODELE SECTEUR CIRCULAIRE

V-1 INTRODUCTION

Dans ce dernier chapitre, nous avons reproduit la même étude expérimentale (mesure de la tension et du courant critique de contournement) et la même étude théorique (calcul du champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge électrique) effectuées au chapitre précédent mais sur un modèle de laboratoire de forme circulaire. Ce dernier est conçu pour permettre d'étudier l'influence de la distribution géométrique des lignes de courant ainsi que la distribution de la tension et son gradient dans l'électrolyte sur les conditions critiques du contournement.

V-2 ETUDE EXPERIMENTALE

V-2-1 Mesure expérimentale de la tension et du courant critique de contournement

En utilisant le même montage expérimental présenté au troisième chapitre (Figure III-1), nous avons mené une étude expérimentale pour mesurer en polarité positive et négative les conditions critiques de contournement, tels que la tension et le courant critique sous l'influence de la variation des différents paramètres géométriques et électriques du modèle circulaire.

V-2-2 Description du modèle expérimental secteur circulaire

Le deuxième modèle utilisé (Figure V-1) est une plaque en plexiglass creusée d'un secteur circulaire d'angle 360° , de rayon (R) et 12mm de profondeur. Le secteur circulaire est rempli d'une solution électrolytique ($H_2O+NaCl$), d'épaisseur (e) et de résistivité (ρ), qui représente la couche de la pollution déposée sur la surface de l'isolateur.

Une électrode de masse en cuivre d'épaisseur 2mm et d'une hauteur de 15mm est placée tout autour du modèle circulaire, une électrode de haute tension de forme cylindrique de 10mm de diamètre, 60mm de longueur et d'extrémité hémisphérique ayant un rayon de courbure de 2mm, surplombe le secteur circulaire perpendiculairement au centre à une hauteur de 3mm au-dessus de la surface électrolytique : Cette hauteur représente toujours la longueur initiale de la décharge

électrique. À l'aide d'une matière isolante on dérive de ce modèle circulaire d'angle 360°, deux secteurs élémentaires d'angle 180° et 90° comme le montre la Figure V-2.

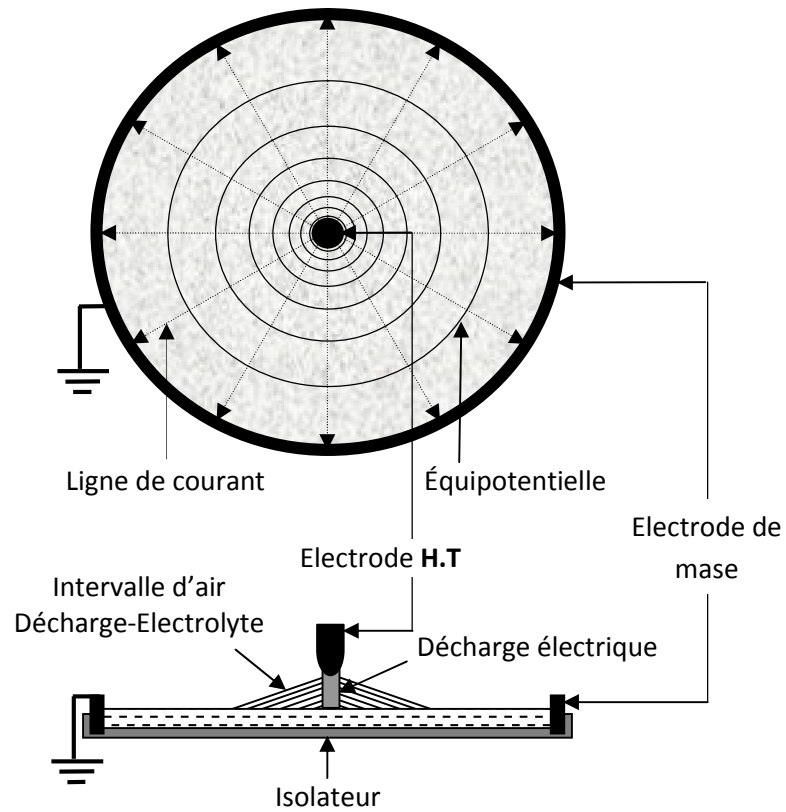


Figure V-1 : Modèle Secteur Circulaire 360°

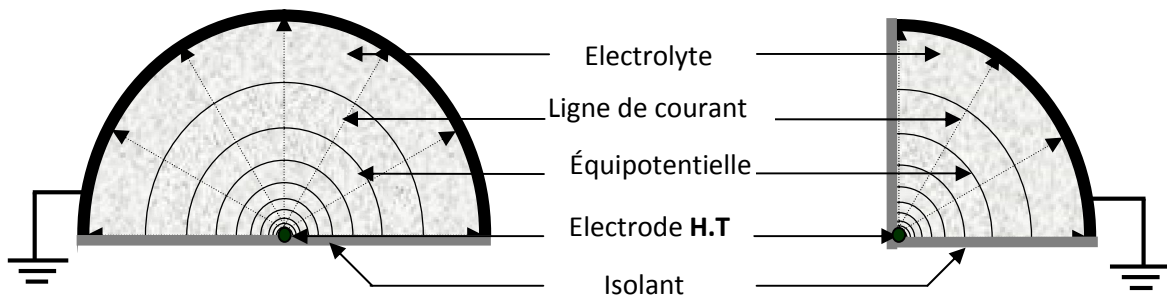


Figure V-2 : Modèle secteur circulaire 90° et 180°

Nous rappelons que : Aux conditions initiales, après l'apparition de la décharge initiale entre l'électrode haute tension et l'électrolyte de quelques centaines de mA (décharge stable), les caractéristiques particulières de ce modèle sont les suivantes :

-La distribution des lignes de courant autour du pied de la décharge est continue et radiale (FigureV-1 et V-2) ;

- Pour un secteur donné, la distribution de la densité de courant ainsi que celle du potentiel et de son gradient le long du rayon sont les mêmes pour tous les rayons du secteur ;

- Pour une tension appliquée, la distribution du courant et celle de la tension ainsi de son gradient le long des rayons sont invariables en fonction de l'angle du secteur ou de la profondeur de l'électrolyte. Par contre, la résistance de l'électrolyte est inversement proportionnelle à l'angle et la profondeur de l'électrolyte, en conséquence, le courant total est directement proportionnel à l'angle du secteur et à la profondeur de l'électrolyte [27,35].

En utilisant ce modèle, nous avons mesuré la tension et le courant critique de contournement sous l'influence de la variation des paramètres géométriques et électriques suivants :

θ : angle du modèle

R : rayon du modèle

e : épaisseur de la pollution

ρ : résistivité de la pollution

La polarité de la tension appliquée.

V-2-3 Résultats expérimentaux

V-2-3-1 Influence de l'angle et du rayon du modèle circulaire

En utilisant les trois secteurs de 90°, 180° et 360° possédant deux rayons 100 et 137mm, nous avons mesuré en polarité positive et négative les valeurs de la tension et du courant critique, afin de montrer leurs variations en fonction de l'angle et du rayon du modèle circulaire. La solution électrolytique utilisée possède une résistivité (ρ) de 10k Ω .cm remplie à une profondeur (e) de 3mm.

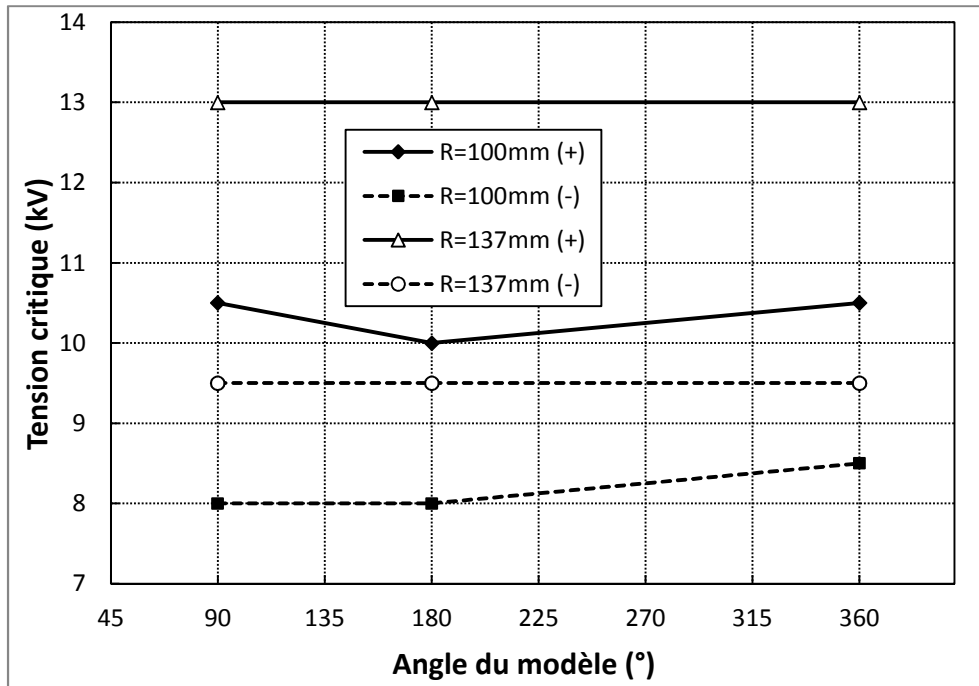


Figure V-3 : Tension critique en fonction de l'angle et de rayon du modèle en deux polarités, pour $e=3\text{mm}$ et $\rho=10\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$

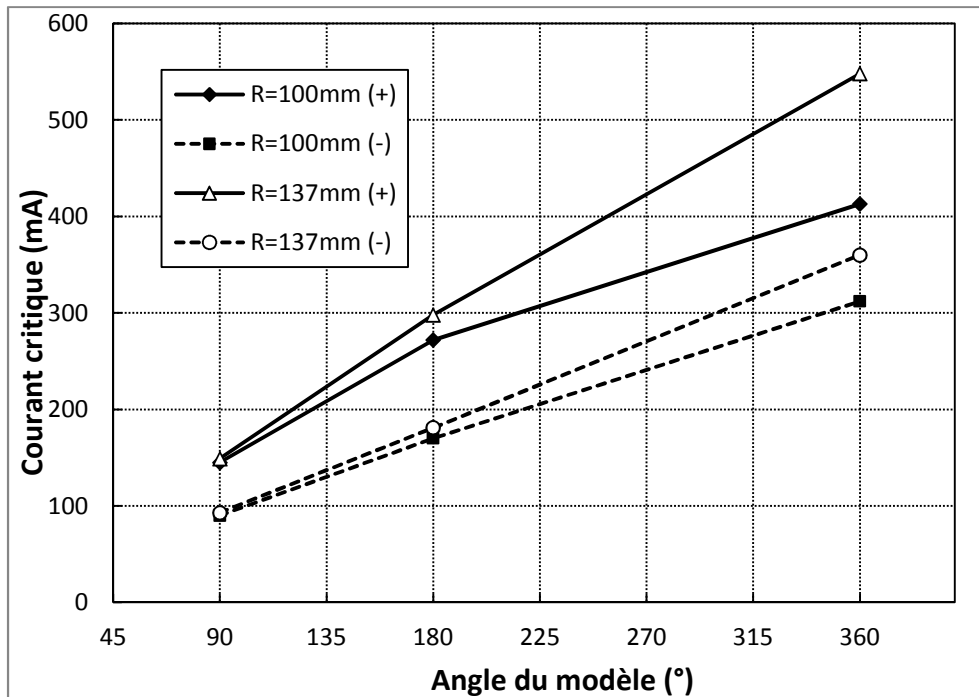


Figure V-4 : Courant critique en fonction de l'angle et de rayon du modèle en deux polarités, pour $e=3\text{ mm}$ et $\rho=10\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$

Les résultats de mesure de la tension critique sont montrés à la Figure V-3. Nous avons remarqué en polarité positive comme en négative que la tension critique du contournement est presque constante en fonction de la variation de l'angle du modèle (θ), par contre elle augmente avec l'augmentation du rayon (R).

Concernant les courbes représentées à la Figure V-4, en polarité positive comme en négative, nous avons constaté que le courant critique de contournement augmente avec l'augmentation de l'angle du modèle (θ) et ainsi qu'avec l'augmentation du rayon (R).

V-2-3-2 Influence de la résistivité et de l'épaisseur de l'électrolyte

Les Figures V-5 et V-6 montrent, la variation de la tension et de courant critique du contournement en fonction de la variation de la résistivité de l'électrolyte $\rho = 2,5, 5, 10$ et $20 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ et des épaisseurs d'électrolyte 3 et 6mm, pour un secteur d'angle 360° et un rayon $R=13.7 \text{ cm}$. Les mesures sont effectuées en polarité positive et en négative.

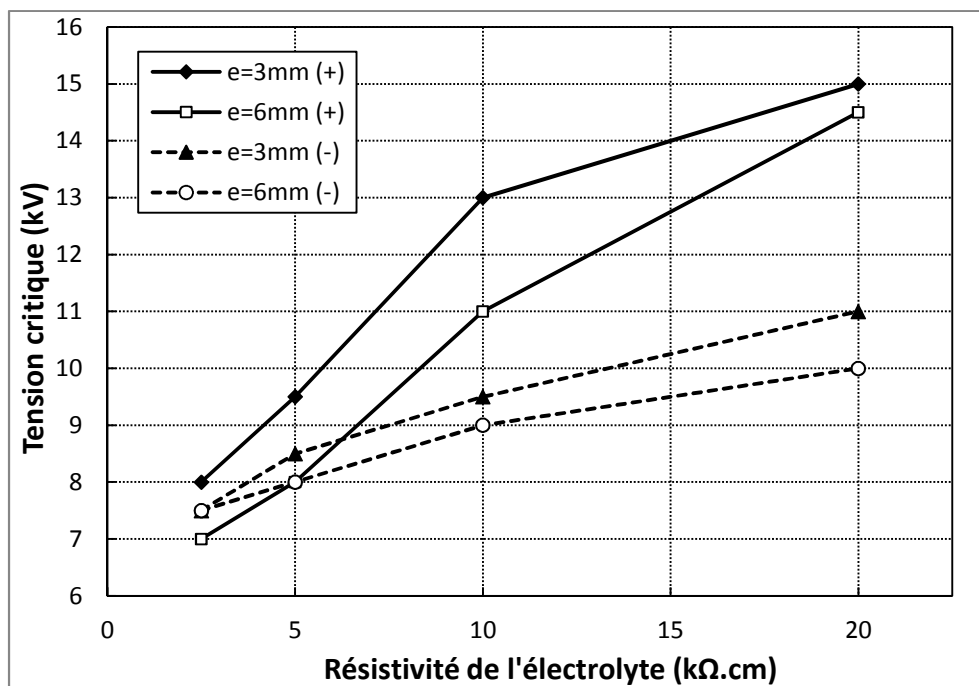


Figure V-5 : Tension critique en fonction de la résistivité et de la profondeur de l'électrolyte pour deux polarités : $R= 137 \text{ mm}$ et $\theta=360^\circ$

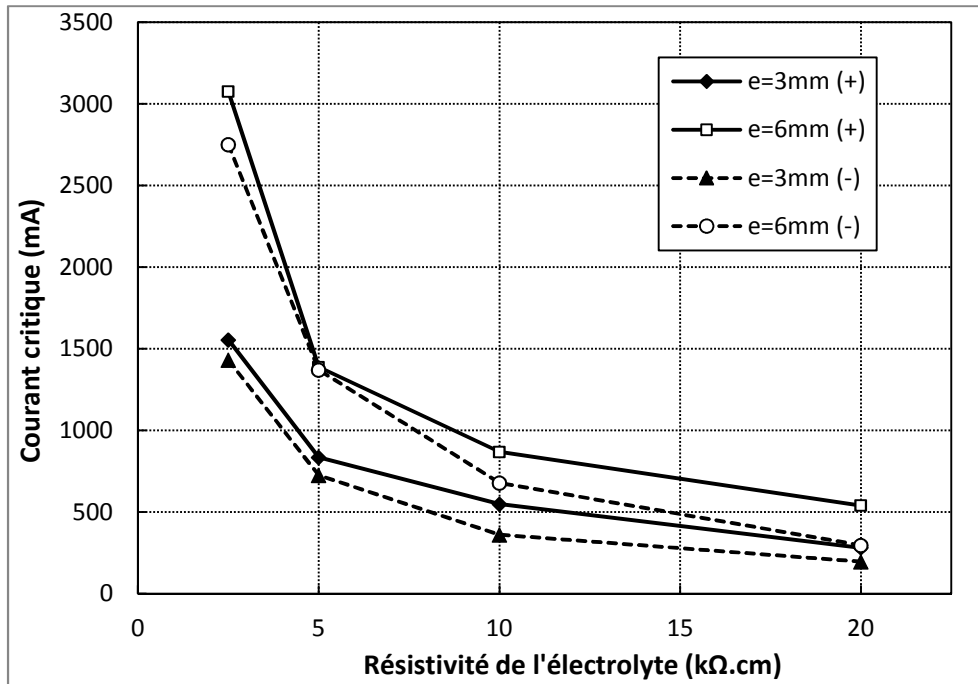


Figure V-6 : Courant critique en fonction de la résistivité et de la profondeur de l'électrolyte pour deux polarités : $R= 137\text{mm}$ et $\theta=360^\circ$

Les courbes montrent qu'en deux polarités :

- Pour une profondeur donnée, l'augmentation de la résistivité de l'électrolyte entraîne une augmentation de la valeur de la tension critique ainsi une diminution de la valeur du courant critique.
- Pour une résistivité donnée, l'augmentation de la profondeur d'électrolyte engendre une diminution de la tension critique et une augmentation de la valeur du courant critique.

V-2-3-3 Influence de la polarité de la tension appliquée

Pour montrer l'influence de la polarité de la tension appliquée sur les conditions critiques du contournement, nous présentons les résultats obtenus en polarité positive et négative de la tension et du courant critique de contournement aux Figures V-7 et V-8 respectivement, pour plusieurs valeurs de la résistivité d'électrolyte $\rho= 2.5, 5, 10$ et $20\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ remplie dans le bac circulaire avec une profondeur $e=3\text{mm}$ et un secteur de rayon 137mm et d'angle 360° .

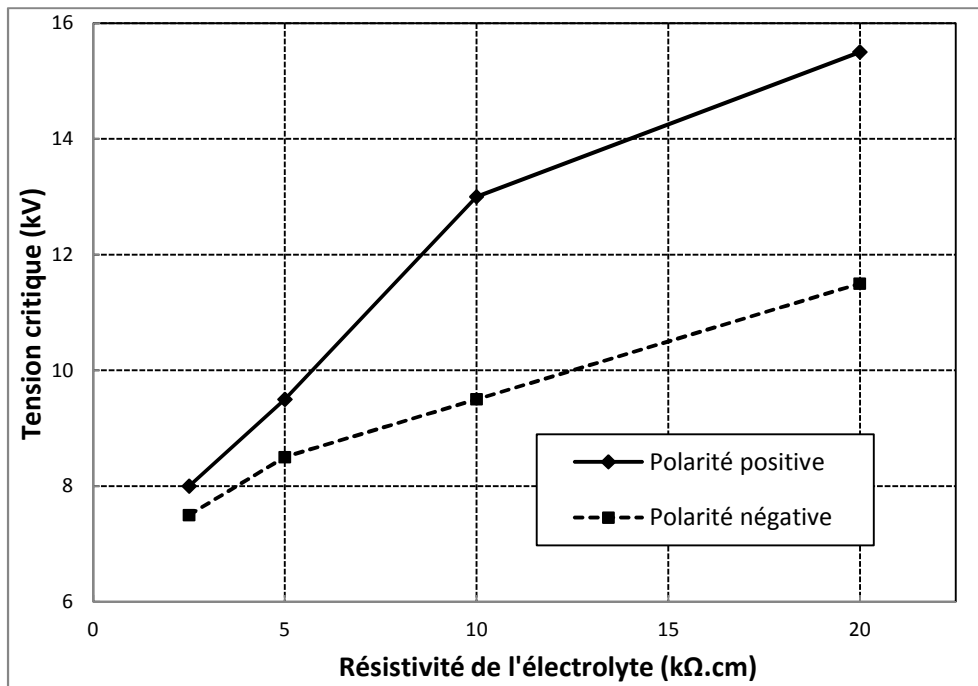


Figure V-7 : Tension critique en fonction de la polarité de la tension appliquée pour $R=137\text{mm}$, $\theta=360^\circ$ et $e=3\text{mm}$

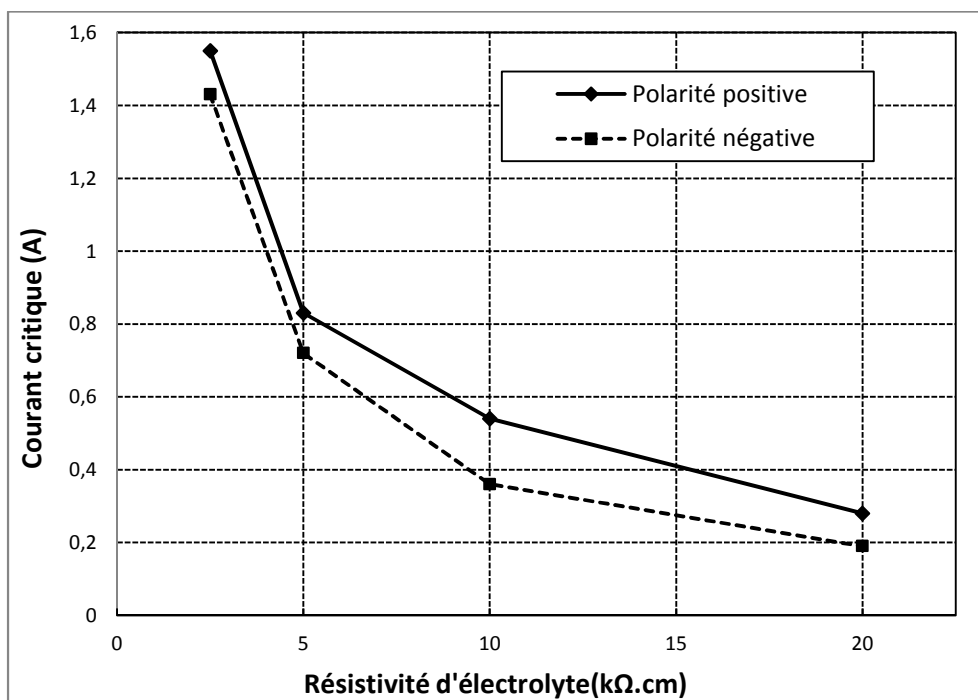


Figure V-8 : Courant critique en fonction de la polarité de la tension pour $R=137\text{mm}$, $\theta=360^\circ$ et $e=3\text{mm}$

Nous avons remarqué aux Figures V-7 et V-8 que les valeurs de la tension et du courant critique de contournement sont plus importantes en polarité positive qu'en polarité négative.

V-3 ETUDE THEORIQUE (SIMULATION)

V-3-1 Calcul du champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge électrique

Nous avons utilisé les conditions critiques du contournement mesurées expérimentalement, qui sont la tension et le courant critique, pour calculer le champ électrique maximum dans l'intervalle d'air entre la décharge électrique de contournement et la surface de la pollution (électrolyte) au pied de la décharge à l'instant initial.

Nous avons choisi seulement le secteur circulaire d'angle 360° pour le calcul du champ électrique car les deux autres secteurs d'angle 180° et 90° posent des problèmes dans la simulation.

V-3-2 La procédure de calcul

Nous avons reproduit les mêmes étapes de calcul effectué sur le modèle rainure étroite, décrites au chapitre précédent, en utilisant le même logiciel de calcul COMSOL Multi Physics version 3.5, (description géométrique, propriété physique, maillage...) afin de;

- Visualiser la distribution du potentiel dans la décharge et dans le liquide (la solution électrolytique) ;

- Visualiser la distribution du champ électrique dans l'air entre la décharge et l'électrolyte ;

- Déterminer la valeur du champ électrique moyen dans l'intervalle d'air entre la décharge et l'électrolyte ainsi que la valeur du champ électrique maximum dans l'air au voisinage de la décharge électrique.

V-3-2-1 Choix du domaine d'étude

Notre problème est résolu en 3D. Nous avons combiné le modèle électrocinétique et le modèle électrostatique de sorte que le champ électrique calculé dans l'air devant la décharge soit le résultat de la distribution du potentiel calculée dans le modèle électrocinétique.

V-3-2-2 Création de la géométrie du modèle expérimental

Nous avons introduit la géométrie du modèle secteur circulaire représenté par la forme géométrique de la couche de pollution (électrolyte) et la décharge électrique.

La couche électrolytique est représentée par un cylindre, son rayon est égal à celui du modèle circulaire utilisé expérimentalement (100 et 137mm), et son hauteur égale à 3 ou 6mm correspond à la profondeur d'électrolyte remplie dans le modèle secteur circulaire.

La décharge électrique est considérée à l'état statique, ayant une forme tubulaire et un diamètre uniforme, est constituée de trois zones: la gaine anodique, la colonne positive et la gaine cathodique. La Figure V-9 représente la géométrie de la couche électrolytique et les différentes zones de la décharge électrique en 2D.

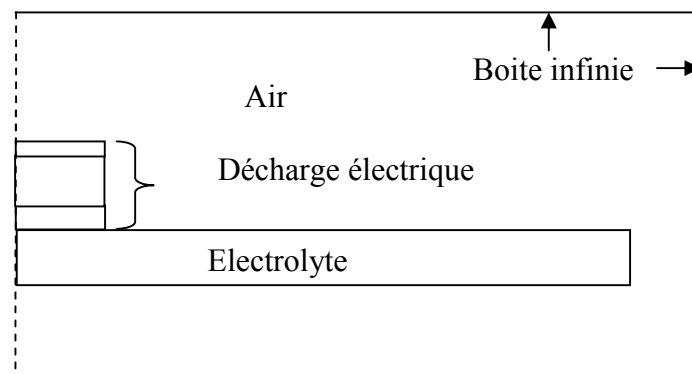


Figure V-9 : Géométrie de la couche électrolytique et les différentes zones de la décharge électrique en 2D

Rappel (déjà mentionné au chapitre précédent (§ IV-3-3-2-1)) : Les trois zones de la décharge électrique sont représentées par un ensemble de trois cylindres posés l'un sur

l'autre dont la hauteur globale est 3mm.

La hauteur de la zone cathodique h_c est de 0.35mm. Elle correspond à la distance entre la colonne positive de la décharge et l'électrolyte en polarité positive, et à la distance entre l'électrode haute tension et la colonne positive en polarité négative.

La hauteur de la zone anodique h_a est égale à 0.15 mm et la hauteur de la colonne positive est égale à 2.5mm pour les deux polarités. Le rayon de la décharge (r_d) est fonction du courant de cette dernière (I_d).

$$r_d = \sqrt{\frac{I_d}{J \cdot \pi}} \dots \dots \dots (V-1)$$

Où

J : densité du courant de la décharge (égale 1.45 A.cm⁻²)

La différence de tension aux bornes de la décharge électrique est donnée par la relation suivante :

$$V_d(x) = x A I_d^{-n} + V_e \dots \dots \dots (V-2)$$

x: longueur de la décharge (3mm).

A. I_d^{-n} : le gradient de tension dans la colonne positive de la décharge.

A: constant égale à 63, n : constant égale à 0.76.

V_e : chute de tension cumulée des deux électrodes (égale à 840V).

$$V_e = V_a + V_c \dots \dots \dots (V-3)$$

V_a : chute de tension anodique (égale à 240V).

V_c : chute de tension cathodique (égale à 600V).

V-3-2-3 Description des propriétés physiques

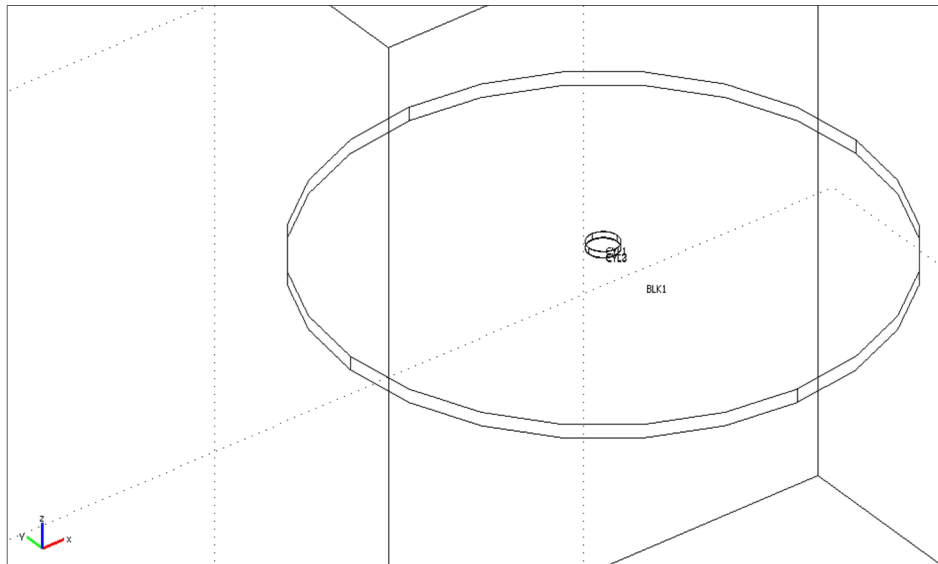
Les différents matériaux et leurs propriétés physiques sont introduits dans le modèle et reportés dans le tableau V-1.

Tableau V-1

Conductivités et permittivités adoptées pour la simulation

| Modèle Circulaire | Matériaux | | Conductivité σ (mS/cm) | Permittivité relative ϵ_r |
|----------------------|------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| Electrocinétique | Décharge électrique | Gaine anodique | $J \cdot h_a / V_a$ | 1 |
| | | Colonne positive | $J / A \cdot I_d^{-n}$ | 1 |
| | | Gaine cathodique | $J \cdot h_c / V_c$ | 1 |
| | Electrolyte | | 0.4; 0.2; 0.1; 0.05 | 80 |
| Electrostatique | Air | | - | 1 |

Les Figures V-10 et V-11 présentent respectivement la description géométrique et le maillage du modèle secteur circulaire (solution électrolytique + décharge électrique).

**Figure V-10** : Description géométrique du modèle secteur circulaire en 3D

Afin d'obtenir une meilleure précision des résultats, nous étions amenés à effectuer un maillage extrêmement fin.

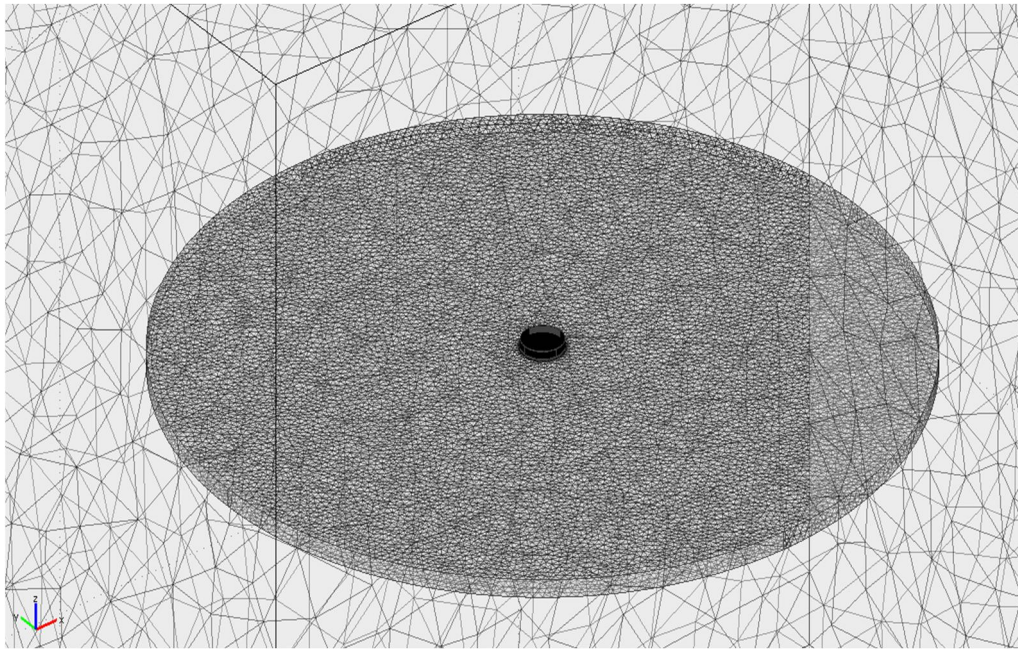


Figure V-11 : Maillage extrêmement fin du modèle secteur circulaire

V-3-3 Résultats de la simulation

V-3-3-1 Distribution du potentiel et des lignes de champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge électrique

La Figure V-12 présente la distribution du potentiel dans le liquide et dans la décharge ainsi que les lignes de champ électrique dans l'air entre la décharge et l'électrode de masse du modèle circulaire. Nous observons clairement que les lignes équipotentielles sont concentriques autour du pied de la décharge et coaxiales par rapport au centre du modèle.

Également, sur ce modèle, les lignes de champ électrique dans l'air issues de la décharge pour rejoindre l'électrode de masse forment deux intervalles (Figure V-13). La même distribution a été observée dans le modèle rainure étroite étudié au chapitre précédent.

A la Figure V-13, nous observons le premier intervalle(I), limité par le triangle $h\ell\Delta d$, est entre la décharge électrique et la surface de l'électrolyte, il est constitué par les lignes de champ électrique qui pénètrent la solution électrolytique. Le second intervalle (II) est constitué par les lignes de champ électrique qui se propagent dans l'air pour rejoindre l'électrode de masse sans passer par l'électrolyte.

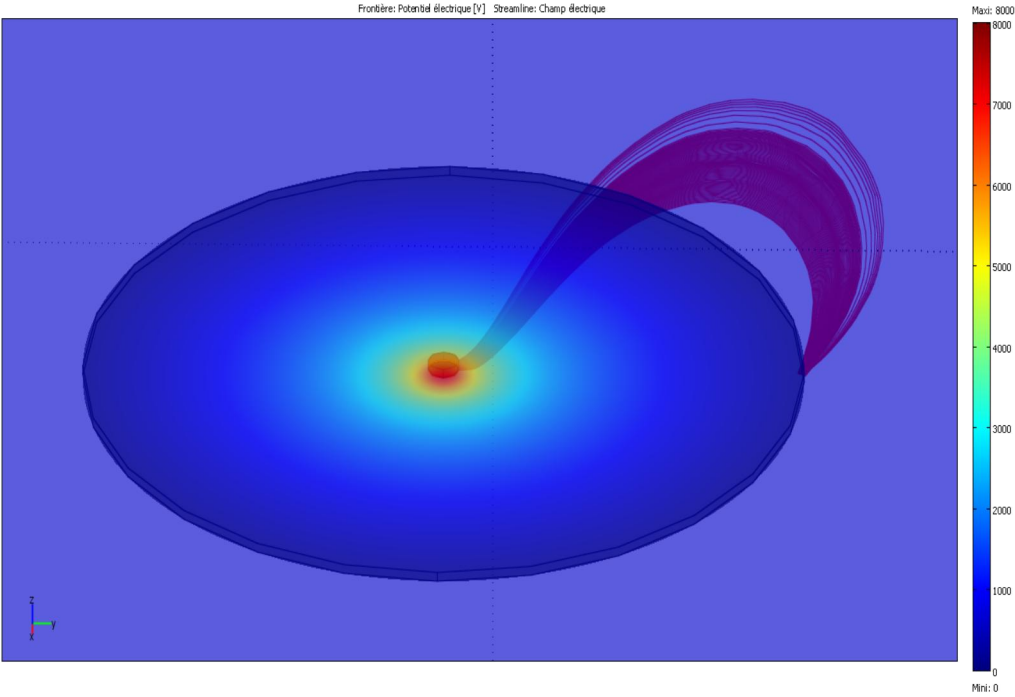


Figure V-12: Distribution du potentiel et des lignes de champ électrique entre la décharge et l'électrode de masse

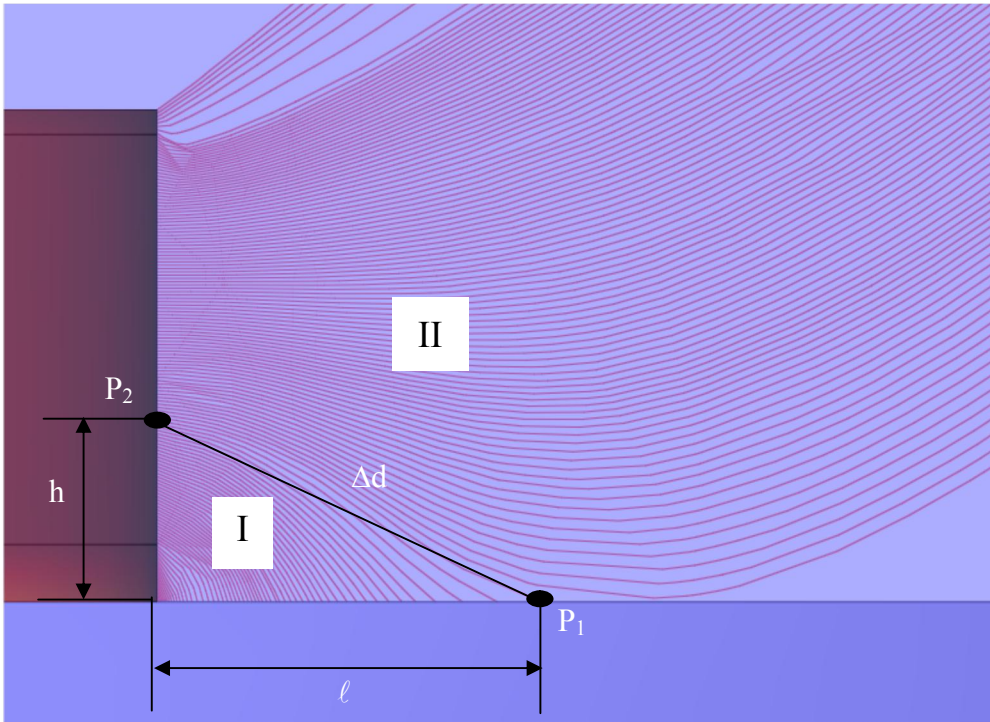


Figure V-13: Zoom de la Figure V-12

Avec :

h: hauteur de la décharge appartenant au premier intervalle qui regroupe l'ensemble des lignes de champ électrique qui pénètrent la solution électrolytique.

ℓ: longueur de la surface de pénétration de l'ensemble des lignes de champ électrique appartenant au premier intervalle.

V-3-3-2 CHAMP ELECTRIQUE MOYEN DANS L'INTERVALLE DECHARGE-ELECTROLYTE (INTERVALLE I)

Nous avons calculé le champ électrique moyen en utilisant les valeurs critiques mesurées expérimentalement, en polarité positive et négative, sous l'influence des différents paramètres géométriques et électriques du modèle secteur circulaire.

La valeur maximale du champ électrique moyen dans ce modèle est calculée par la même méthode utilisée dans le modèle rainure étroite, elle correspond à la ligne la plus près de l'angle droit du triangle $h\ell\Delta d$, cette valeur diminue en allant vers l'hypoténuse Δd (Figure V-13). La valeur la plus faible du champ électrique moyen correspond à la ligne de champ électrique la plus près de l'hypoténuse Δd , cette valeur moyenne la plus faible a été calculée par l'équation (V-4).

$$E_{\text{moy}} = (V_{p2} - V_{p1})/\Delta d \dots\dots\dots(V-4)$$

Où :

V_{p1} : le potentiel au point P_1 .

V_{p2} : le potentiel au point P_2 .

Δd : hypoténuse du triangle $h\ell\Delta d$ (cm)

V-3-3-2-1 Influence de rayon du modèle et de la profondeur de l'électrolyte

Nous présentons à la Figure V-14, les valeurs calculées du champ électrique moyen, en deux polarités pour : deux rayons du modèle $R=100$ et 137mm et deux profondeurs de l'électrolyte $e=3$ et 6mm . D'après les courbes nous avons remarqué que :

- Le champ électrique moyen est proportionnel à la variation du rayon du secteur circulaire, il augmente en augmentant le rayon.
- Le champ électrique moyen est inversement proportionnel à la variation de l'épaisseur de l'électrolyte. Il diminue lorsque l'épaisseur augmente.

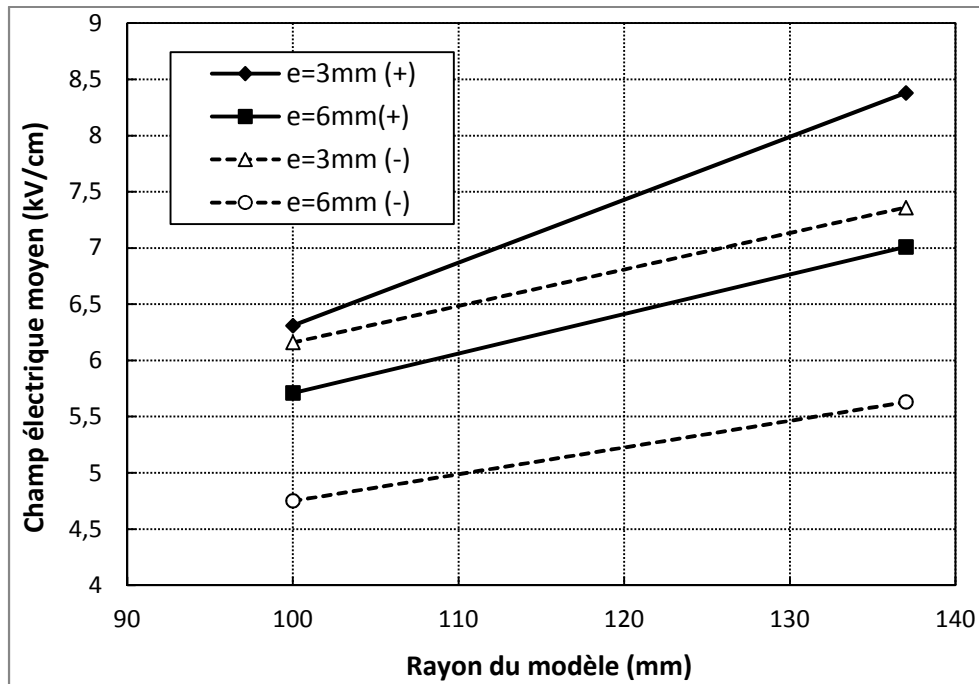


Figure V-14 : Champ électrique moyen en fonction de rayon du modèle et la profondeur d'électrolyte pour $\rho=5\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ et $e=3$ et 6mm

V-3-3-2-2 Influence de la résistivité de l'électrolyte et de la polarité de la tension appliquée

Pour montrer l'influence de la résistivité de l'électrolyte ainsi que la polarité de la tension appliquée sur le champ électrique moyen dans l'intervalle étudié, nous avons présenté à la Figure V-15 les valeurs calculées du champ électrique moyen, en deux polarités, en fonction de la résistivité de l'électrolyte pour les profondeurs 3 et 6mm et les deux rayons du secteur circulaire.

Les résultats présentés à la Figure V-15 montrent qu'en deux polarités, le champ moyen augmente avec l'augmentation de la résistivité de l'électrolyte. Pour les deux profondeurs, ce champ moyen est plus élevé en polarité positive qu'en négative.

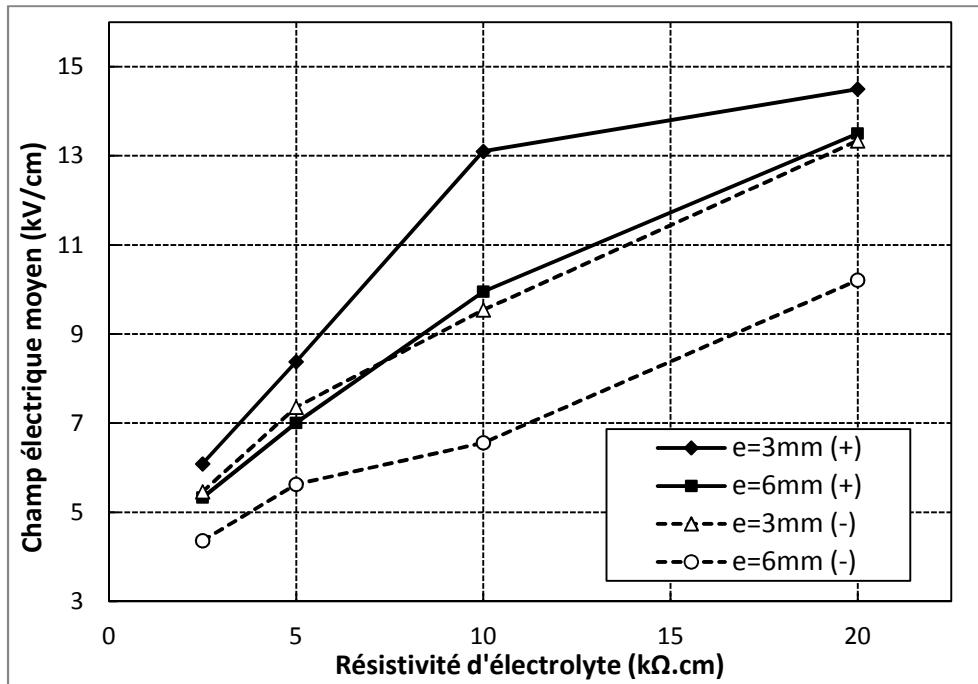


Figure V-15 : Champ électrique moyen en fonction de résistivité d'électrolyte et la polarité de la tension appliquée pour $R=137\text{mm}$ et $e=3$ et 6mm

V-3-3-3 CHAMP ELECTRIQUE MAXIMUM DANS L'AIR AU VOISINAGE DE LA DECHARGE ELECTRIQUE

V-3-3-3-1 Influence de rayon du modèle et de la profondeur de l'électrolyte

Le champ électrique maximum, en polarité positive et négative, est calculé sous l'influence de la variation du rayon du modèle et de l'épaisseur de l'électrolyte, les valeurs calculées du champ électrique maximum au voisinage de la décharge en polarité positive et négative sont présentées à la Figure V-16, pour une résistivité $\rho=2.5 \text{ k}\Omega.\text{cm}$.

Nous avons constaté que l'augmentation de rayon du secteur circulaire provoque un accroissement de la valeur du champ électrique maximum dans l'air au voisinage de la décharge, pour les deux polarités. Cette valeur du champ maximum augmente aussi avec l'augmentation de la profondeur de l'électrolyte.

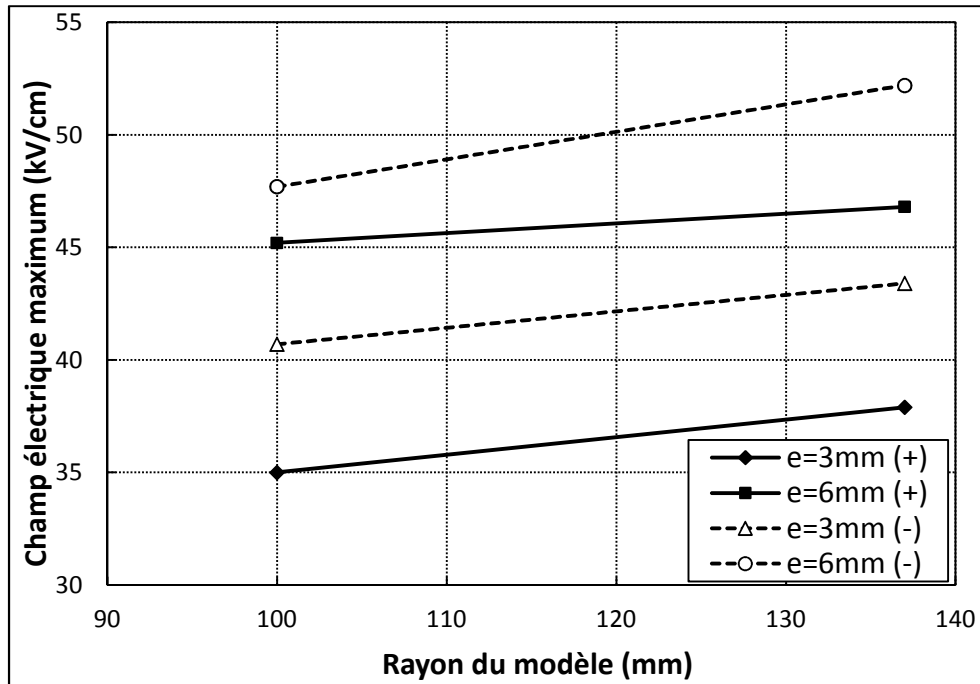


Figure V-16 : Champ électrique maximum en fonction de rayon du modèle et la profondeur d'électrolyte pour $\rho=2.5\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ et $e=3$ et 6mm

Les valeurs du champ électrique maximum varient entre environ 35kV/cm et 46.8kV/cm en polarité positive, 40.7kV/cm et 52.2kV/cm en polarité négative. Sur ce modèle aussi, on remarque les valeurs du champ électrique maximum sont supérieures à la valeur du champ disruptif de l'air à pression atmosphérique.

V-3-3-3-2 Influence de la résistivité de l'électrolyte et de la polarité de la tension appliquée

Nous présentons à la Figure V-17 les valeurs calculées du champ électrique maximum en fonction de la polarité de la tension appliquée et de la résistivité de l'électrolyte, pour un secteur circulaire de rayon 137mm rempli d'un électrolyte de résistivités variables 2.5 , 5 , 10 et $20\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ et une profondeur égale à 3 et 6mm .

Nous avons remarqué à la Figure V-17 qu'en deux polarités, le champ électrique maximum dans l'air au voisinage de la décharge électrique augmente avec l'augmentation de la résistivité d'électrolyte. Sa valeur maximale est plus importante en polarité négative.

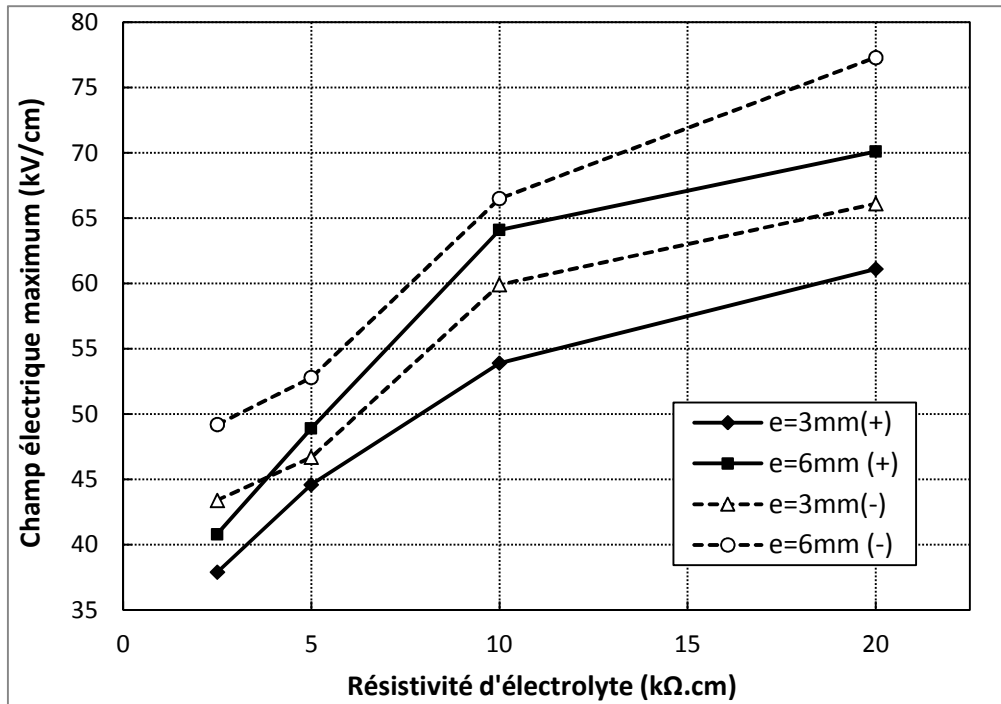


Figure V-17 : Champ électrique maximum en fonction de la résistivité et la polarité de la tension appliquée pour $R=137\text{mm}$, $e=3$ et 6mm

Les valeurs de champ électrique maximum varient entre environ 37.9kV/cm et 70.1kV/cm en polarité positive, 46.7kV/cm et 77.3kV/cm en polarité négative. Les valeurs du champ électriques sont supérieures à la valeur du champ disruptif de l'air à pression atmosphérique ($\approx 30\text{kV/cm}$).

V-4 ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

L'étude expérimentale que nous avons effectuée sur le modèle circulaire, afin de déterminer les conditions critiques du contournement sous l'influence de la variation des paramètres géométriques et électriques, a montré que :

La tension critique et le courant par unité d'angle sont presque constants pour différents angles du modèle circulaire, à condition d'avoir la même valeur de résistivité et de profondeur d'électrolyte. De ce fait la tension critique et le courant par unité d'angle sur le modèle circulaire sont déterminés par la résistance par unité d'angle et non pas par la résistance par unité de longueur, comme sur le modèle rainure étroite. L'augmentation de la résistance par unité d'angle du modèle

circulaire comme l'augmentation de la résistance par unité de longueur du modèle rainure étroite entraîne une diminution de la valeur du courant critique, nécessitant ainsi un accroissement de la valeur de la tension critique. Cet accroissement de tension critique est indispensable pour assurer un champ électrique suffisant dans l'air au voisinage de la décharge, pour qu'elle puisse évoluer jusqu'au contournement total.

Également sur ce modèle circulaire, les conditions critiques du contournement tels que tension et courant critique sont moins importantes en polarité négative qu'en polarité positive, et ce pour la même raison expliquée dans le modèle rainure étroite.

L'étude théorique que nous avons effectuée, afin de calculer le champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge qui correspond aux valeurs critiques mesurées de la tension et du courant électrique, a montré que : Les valeurs du champ électrique moyen ainsi que les valeurs du champ électrique maximum sont assez suffisantes pour produire la rupture de l'intervalle décharge-électrolyte, comparées à celles trouvées dans l'étude de la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique [61]. Les valeurs du champ électrique moyen de ces deux intervalles sont inférieures à la valeur du champ moyen de l'intervalle entre une électrode métallique pointue et une surface électrolytique [64].

Le tableau V-2 indique les valeurs calculées du champ électrique moyen et du champ électrique maximum dans deux intervalles différents. Le premier correspond à un intervalle d'air entre une décharge électrique en série avec l'électrolyte (cellule de contournement Figure II-4) alors que le deuxième intervalle d'air est entre une décharge en parallèle avec un électrolyte (rupture de l'air au voisinage d'une décharge Figure II-5). En comparant les valeurs du champ électrique moyen et les valeurs du champ électrique maximum du modèle rainure étroite avec celles du modèle secteur circulaire, nous avons confirmé que le contournement devient de plus en plus difficile lorsque la distribution des lignes de champ électrique le long de la distance entre la décharge électrique et l'électrode de masse devient de plus en plus non uniforme.

Tableau V-2

Champ électrique moyen et champ électrique maximum de deux intervalles différents

| I _d (mA) | Champ électrique E _{moy} (kV/cm)/E _{max} (kV/cm) | | |
|---------------------|---|----------------|-----------------------------------|
| | Intervalle de contournement (Figure II-4) | | Rupture de l'air (Figure II-5) |
| | Modèle circulaire | Modèle rainure | |
| 300 (+) | 14.5/61.1 | 7.08/57.4 | 7.85/34.21 |
| 300 (-) | 9.54/59.9 | 4.55/44 | 5.64/32.95 |

Sur ce modèle aussi, en polarité positive ou en négative, les valeurs du champ électrique maximum dans l'intervalle décharge-électrolyte, sont supérieures à la valeur du champ disruptif de l'air à pression atmosphérique (≈ 30 kV/cm). Donc dans tous les cas, au voisinage la décharge électrique, il existe un champ électrique suffisant pour l'ionisation de l'air provoquant ainsi la rupture de l'intervalle d'air entre la décharge et le liquide (électrolyte).

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail nous a permis d'analyser le circuit électrique équivalent au phénomène du contournement et les différents paramètres géométriques et électriques pouvant avoir une influence sur les conditions critiques du contournement et ainsi de mieux comprendre le mécanisme de l'évolution de la décharge électrique et l'aspect dynamique de cette dernière.

Après avoir présenté au premier chapitre le phénomène du contournement et son circuit électrique équivalent, nous avons rappelé les différents travaux qui ont été menés par différents chercheurs pour déterminer les conditions critiques du contournement. Ces études qui reposent sur plusieurs hypothèses, différentes par leurs bases physiques ou par leurs méthodes d'exploitation, aboutissent aux mêmes grandeurs critiques. Nous avons pensé que cet accord dans les résultats n'est dû qu'à la particularité du modèle d'Obenaus, c'est-à-dire une décharge électrique en série avec une résistance de pollution :

Premièrement, la décharge électrique dans son état dynamique est considérée de forme tubulaire et de diamètre constant, tandis que l'évolution de cette dernière est simplement un déplacement de son pied sur la surface de la résistance de pollution, tout en maintenant sa forme tubulaire durant toute son évolution.

Deuxièmement, nous avons remarqué que la forme géométrique de la pollution, et par conséquent la distribution du courant, de la tension et de son gradient, sont très différents entre ceux sur un isolateur réel et ceux de son circuit électrique équivalent. Nous pouvons également remarquer que le courant dans la direction de propagation de la décharge est très différent du courant total.

En réalité, le circuit électrique équivalent au contournement ne permet d'étudier que l'influence de la valeur de la résistance de pollution, ou bien, la valeur du courant total, sans tenir compte de la forme géométrique de la pollution et de la distribution de ce courant autour du pied de la décharge.

L'analyse critique du circuit électrique équivalent, basée sur des études expérimentales effectuées sur plusieurs modèles de laboratoire touchant les deux éléments importants du circuit, la résistance de la pollution et l'aspect dynamique de la décharge électrique a montré que :

Concernant la résistance de la pollution, les résultats obtenus sur les modèles multidirectionnels nous ont permis de conclure que l'isolateur réel est équivalent à un système multidirectionnel, constitué d'un nombre infini de lignes de courant électrique qui se distribuent non uniformément et que chaque ligne représente une rainure, sa valeur critique dépend de la résistivité de l'électrolyte. Pour que la décharge s'allonge selon un certain sens, il faut que les lignes de courant dans ce sens atteignent la valeur critique. Les lignes de courant en valeur et en forme sont déterminées par : La forme géométrique de la pollution, la position de la décharge et par la forme de l'électrode de masse.

Rassemblant les résultats obtenus sur le modèle circulaire, nous pouvons constater que les conditions critiques du contournement sont déterminées par la valeur critique du courant par unité d'angle et par unité de profondeur d'électrolyte ($A/^\circ/mm$). Cette condition critique est exigée pour que le contournement se produise mais, elle ne peut pas représenter le critère du contournement car elle n'a pas une signification physique directe. Elle participe à la création d'un autre paramètre qui a une signification physique et une contribution dans l'évolution de la décharge. Ce paramètre est le champ dans l'air à proximité de la surface d'électrolyte entre la décharge et l'électrode de masse.

En se basant sur ces résultats, on déduit que le contournement est possible si la distribution du champ le long de la distance entre la décharge et l'électrode de masse est suffisante pour l'évolution de la décharge. C'est pour cette raison que la tension de contournement est influencée non seulement par la distance de fuite mais également par le profil des lignes de fuite. Pour une tension appliquée, la distance de fuite et le profil des lignes de fuite déterminent le champ électrique près de la surface d'isolateur.

Concernant l'aspect dynamique de la décharge, nous avons précisé ce qui suit: La forme tubulaire de la décharge utilisée dans toutes les études de modélisation du contournement est une hypothèse valide seulement quand la décharge est à l'état statique, ou quand la décharge s'élargit avec la bande sèche. Sa forme dynamique est comme un pied élargi, où l'avant-pied se propage sur la surface de l'électrolyte.

Ainsi, la relation analytique de la tension de la décharge dans le circuit équivalent électrique basé sur la forme tubulaire ne s'applique pas à la forme de pied élargi. Ceci cause un échec dans l'étude analytique du contournement. La modélisation de ce dernier doit tenir compte de l'aspect dynamique non tubulaire de la décharge.

Les caractéristiques dynamiques théoriques calculées en utilisant l'aspect dynamique tubulaire de la décharge sont la somme des décharges statiques indépendantes. Ils sont complètement différents de la caractéristique dynamique expérimentale. « L'aspect de pied élargi » peut expliquer les vraies caractéristiques dynamiques et statiques ainsi que la transition de l'état statique à l'état dynamique ou vice-versa.

Au deuxième chapitre, nous avons résumé les différents mécanismes d'évolution d'une décharge électrique sur une couche de pollution faiblement conductrice, ainsi que les résultats des travaux antérieurs effectués sur la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique. Ces derniers ont conduit à l'établissement de plusieurs théorèmes. Nous avons remarqué qu'il n'existe aucun théorème dans la littérature permettant de décrire avec exactitude le mécanisme de la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique.

Les résultats obtenus à partir de l'étude expérimentale et théorique, présentée au troisième chapitre, effectuée dans le but d'expliquer le mécanisme de la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique ont montré que : Le mécanisme de la rupture de l'air de l'intervalle entre la décharge et l'électrolyte se fait par une rupture classique de l'air connue par le mécanisme de Streamer à partir de la décharge. Cette dernière affaiblit la rigidité diélectrique de l'air à son voisinage et facilite la rupture

en polarité négative par rapport à la polarité positive, car l'émission électronique est plus importante en polarité négative. Ces résultats clarifient le phénomène physique responsable de l'évolution de la décharge dans l'air.

Pour vérifier si c'est le même mécanisme qui se reproduit dans le phénomène du contournement, nous avons effectué aux quatrième et cinquième chapitres une étude expérimentale et théorique sur deux modèles de laboratoire de forme différente : Rainure rectangulaire étroite et secteur circulaire, afin de déterminer l'influence des paramètres géométriques et électriques sur les conditions critiques du contournement, tels que la tension et le courant critique, ainsi que la distribution du champ électrique au voisinage de la décharge qui correspond aux conditions critiques et calculer la valeur du champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge du contournement, en prenant en compte l'anatomie de la décharge: la région anodique, la région cathodique et la colonne positive.

Les résultats expérimentaux obtenus sur le modèle rainure étroite nous permettent de conclure que : La variation des grandeurs géométriques et électriques de la pollution influe sur les conditions critiques du contournement par leurs actions directes et simultanées sur la résistance par unité de longueur de la pollution et sur la distribution des lignes de champ électrique le long de la distance entre la décharge électrique et l'électrode de masse. Également les résultats expérimentaux obtenus sur le modèle secteur circulaire ont montré que les conditions critiques du contournement sont déterminées par la résistance par unité d'angle de la pollution ainsi que la distribution du champ électrique entre la décharge et l'électrode de masse.

Les résultats de l'étude théorique nous permettent de déduire que la décharge du contournement évolue par rupture progressive de l'intervalle d'air entre la décharge et l'électrolyte par le mécanisme de Streamer, de façon similaire dans le cas de la rupture des intervalles d'air entre deux électrodes métalliques.

Ce résultat peut être justifié par deux raisons : D'abord la valeur du champ électrique moyen dans l'espace décharge-électrolyte qui est élevée par rapport à la

valeur du champ électrique moyen obtenue dans les travaux consacrés à l'étude de la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique, et d'autre part, les valeurs du champ électrique maximum dans l'intervalle décharge-électrolyte, qui sont supérieures à la valeur du champ disruptif de l'air à pression atmosphérique ($\approx 30\text{kV/cm}$). Donc dans tous les cas, devant la décharge électrique, il existe un champ électrique suffisant pour l'ionisation de l'air à son voisinage provoquant ainsi la rupture de l'intervalle d'air entre la décharge et le liquide (électrolyte).

Donc, le contournement est possible si le critère est vérifié, c'est-à-dire, si le champ électrique dans l'air au voisinage de la décharge est suffisant pour l'évolution de la décharge par le mécanisme de Streamer, de façon similaire à la rupture des intervalles d'air entre électrodes métalliques.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 H.H. Woodson and A.J. Mc Eloroy: '*Insulators with contaminated surfaces, Part III: Modeling of dry zone formation*', IEEE, Vol. PAS-89, No.8, Nov/Dec 1970, pp.1868-76.
- 2 K.C. Holte, J.H. Kim, T.C. Cheng, Y.B. Kim and Y. Nitta: '*Dependence of flashover voltage on the chemical composition of multi-component insulator surface contamination*', IEEE, Vol. PAS-95, No.2, March/April 1976, pp.603-09.
- 3 F.A.M. Rizk: '*Electrical resistance of an insulating surface under artificial rain*', PROC. IEE, Vol.121, No.2, Feb 1974, pp.154-60.
- 4 R.G. Olsem, B.C. Furumasu and D.P. Hartmann: '*Contamination mechanism for H.V.D.C. insulators*', A77 035-9, recommended and approved by the IEEE made available for printing, Nov 1976.
- 5 E. Nasser: '*Some physical properties of electrical discharge on contaminated surface*', IEEE, Vol. PAS-87, No.4, April 1968, pp.957-63.
- 6 E.C. Salthous: '*Dry-Band formation and flashover in uniform field gaps*', PROC. IEE, Vol. 118, No.3/4, March/April 1971, pp. 360.
- 7 E. Nasser: '*Contamination flashover of outdoor insulation* ', ETZ-A Bd. 93 H.G., pp.321-325, 1972.
- 8 F.Obenaus: '*Die Überschlagspannung verschmutzter isolatoren*', 1935, ETZ, vol.56, p.p.369-370.
- 9 R.Wilkins, A.J Albaghdadi: '*Arc Propagation along an electrolyte surface*', Proc. IEE, 1971, Vol.118, No.12, pp. 1886-92.
- 10 B.F. Hampton: '*Flashover mechanism of polluted insulation*', Proc IEE, May 1964, Vol. III, No.5, pp. 985-900.

- 11 J.C Labadie : '*Etude de la validité du modèle électrique du contournement des isolateurs haute tension pollués*', Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse 1977.
- 12 A.M. Rahal and C. Huraux: '*Flashover mechanism of high voltage insulators*', IEEE Trans. on PAS vol. PAS-98, No.6, Nov/Dec 1979, pp. 2223-31.
- 13 T.C. Cheng, Y.C. Wu, H. Nour: '*DC interfacial breakdown on contaminated electrolytic surfaces*', 1984 IEEE Transaction on Electrical Insulation, vol 19, p.p 536-542.
- 14 S. Flazi : '*Modélisation d'une décharge électrique sur une surface isolante polluée recouverte d'une couche conductrice. Application au contournement des isolateurs HT*', Thèse de Docteur-Ingénieur. Université Paul Sabatier Toulouse 1980.
- 15 S. Flazi, C. Huraux, M. Izzularab: '*Flashover voltage on polluted insulating surfaces coated with a slightly conductive films*', IEEE International symposium on electrical insulation, 11-13 June Montreal 1984.
- 16 S. Flazi : '*Etude du contournement électrique des isolateurs haute tension pollues critère d'élongation de la décharge et dynamique du phénomène*', Thèse de docteur d'état. Université Paul Sabatier, Toulouse 1987.
- 17 A. Boudjella, H. Hadi, S. Flazi, M. Yumoto, T. Sakai, T. Hosokawa: '*Study of the discharge propagation direction on two electrolyte water channels (part I)* ', 17-22 July 1997, XXIIIrd International conference on phenomena in Ionized Gases, Toulouse.
- 18 M. Farzaneh and J. Zhang: '*Modelling of DC arc discharge on ice surfaces*', IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 147, N°2, p.p 81-86, March 2000.
- 19 D. Mahi : '*Observation de l'élongation d'une décharge électrique sur des surfaces faiblement conductrices et corrélation avec les modèles de contournement électrique d'isolateurs H.T. pollués*', Thèse de Docteur d'Etat de l'Université Djilali Liabès de Sidi Belabès -Algérie- 2001.

- 20 F. Pissolato : '*analyse de contournement d'une surface faiblement conductrice par une décharge électrique alimenté en courant continu*', 1986, thèse de docteur de l'université Paul Sabatier, Toulouse.
- 21 Ahmet Rumeli: '*Flashover of polluted insulation having a uniform and time-invariant pollution resistivity*', Bulletin of the Technical University of Istanbul, vol. 25, n°1, 1972.
- 22 E. Rahal : '*Sur les mécanismes physiques du contournement des isolateurs Haute - tension*', Thèse de doctorat es. Sciences Physiques. Université Paul Sabatier, Toulouse, 1979, France.
- 23 L. Alston and S. Zoledziowski: '*Growth of discharges on polluted insulation*', Proc. IEE, vol. 110, n°7, pp. 1260-66, July 1963.
- 24 S. Heskeith: '*General criterion for the prediction of pollution flashover*', Proc IEE, Vol. 114, n° 4, pp. 531-32, Avril 1967.
- 25 Wilkins : '*Flashover of high voltage insulators with uniform surface pollution films*', IEE proc, vol 116, N°3, pp457-465, 1969.
- 26 C.Hurax and A.M. Rahal: '*Analyse de l'instabilité d'une décharge électrique d'un isolant à partir du modèle unidimensionnel d'Obenaus*', IEEE Trans. on PAS vol. PAS-98, N° 6, p.p. 2223-31, Nov/Dec 1979.
- 27 S. Flazi, N. Boukhenoufa, H. Hadi and F. Taleb: '*The criterion of DC flashover on a circular sector models*', 19–22 October / 2003, IEEE/CEIDP'2003, Albuquerque, New Mexico, USA.
- 28 G.Peyregne, A.M. Rahal and C.Hurax: '*Flashover of liquid conducting film. Part I: flashover voltage*', IEEE Trans on Electrical Insulation, vol E-17, N°1, p.p. 10_14, Feb. 1982.

- 29 D. Mahi and C. Huraux: '*Surface flashover of a channel filled with an electrolyte*', CEIDP. V.B. Colombia, Canada, Oct. 15-18, 2000.
- 30 H. Matsuo, T. Yamashita and W.D. Shi: '*Electrical contact between a local discharge on an electrolyte solution and the solution surface*', IEEE Trans. Dielectrics Electr. Insul., Vol. 7, pp. 360-365, 2000.
- 31 J. Zhang and M. Farzaneh: '*Propagation of AC and DC arcs on ice surfaces*', IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation vol. 7, N° 2, p.p. 269-276, April 2000.
- 32 S. Flazi, **A. Ouis**, N. Boukhenoufa : '*Resistance of pollution in equivalent electric circuit of flashover*', IET Generation, Transmission & Distribution -- January 2007 -- Volume 1, Issue 1, p. 183-188.
- 33 S. Flazi, N. Boukhenoufa and **A. Ouis**: '*Influence of leakage current distribution and pollution resistivity on DC flashover*', 5 –10 September / 2004, XV International Conference on Gas Discharges, GD2004, Toulouse.
- 34 S. Flazi, **A. Ouis** and K.L. Rabah: '*Critical Study of Equivalent Electric Circuit Used in the Modelling of Flashover*', 7th The Regional Conference and Exhibition of CIGRE National Committees in Arab Countries in JORDANIE (Amman) 3-5 September 2007.
- 35 S. Flazi, N. Boukhenoufa and **A. Ouis**: '*Critical condition of DC flashover on a circular sector model*', IEEE Transactions on Dielectrics and Insulation, December 2006, volume 13, Issue 6, p. 1335-1341.
- 36 S.Flazi, H.Hadi, K.L.Rabah, M.Hamouda and A.Boudjella: '*Dynamique aspect of the direct current flashover on rectangular and new disk models*', IEEE/ CEIDP'2001, Kitchener, On, Canada, oct.14-17, 2001.

- 37 S. Flazi, **A. Ouis**, M. Hamouda, H. Hadi: '*Dynamic features of DC flashover on polluted insulators*', IET Generation, Transmission & Distribution -- January 2007 -- Volume 1, Issue 1, p. 8-12.
- 38 H. P. Mercure and M. G. Drouet: '*Dynamic measurements of the current distribution in the foot of an arc propagating along the surface of an electrolyte*', IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. pas-101, N° 3, pp. 725-736, March 1982.
- 39 S. Li: '*The Mechanism of the Flashover on a Polluted Dielectric Surface under AC Voltage*', Dissertation of Ph. D., Tsinghua University, 1988.
- 40 P. Claverie: '*Predetermination of the Behavior of Polluted Insulators*', IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, No. 4 P. 1902-1908, July 1971.
- 41 D.C. Jolly: '*Physical process in the flashover of insulators with contaminated surfaces*', PhD thesis MIT, USA, May 1971.
- 42 D. C. Jolly: '*Contamination Flashover, Part I: Theoretical Aspects*', IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Volume: PAS-91, pp. 2437-2442, Dec 1972.
- 43 A. Rumeli: '*Flashover along a water column*', IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 11, No.4, pp. 115-120, December 1976.
- 44 N.L. Allen: '*Streamer propagation along insulating surfaces*', IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, Vol. 6, No. 3, pp. 357-362, June 1999
- 45 D. El Hachem, M. Boucheta : '*Etude de la rupture de l'air entre une décharge cylindrique et une électrode métallique plane*', PFE Ingénieur, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-USTO-MB, 1987.
- 46 R. Ouiddir, A. Hamid : '*Etude sur le mécanisme de rupture de l'air entre une décharge cylindrique et une électrode plane*', PFE Ingénieur, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-USTO-MB, 1988.

- 47 A. Settaouti : '*Etude de l'influence d'une décharge électrique sur la rigidité diélectrique de l'air*', Thèse de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-USTO-MB, 1989.
- 48 M. Rezouga : '*Contribution à l'étude de mécanisme de claquage au voisinage d'une décharge électrique (influence de la deuxième électrode)*', Thèse de Magister, Université des sciences et de la technologie d'Oran-USTO-MB, 1991.
- 49 **A. Ouis** : '*Etude de l'influence de la résistivité et la forme de pollution sur le contournement*', Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-USTO-MB, 2004.
- 50 M. Talhi: '*Etude du contournement sur une surface isolante recouverte par un électrolyte ou de givre*', Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-USTO, 2005.
- 51 Flazi S., Talhi M. and Hadi H.: '*Factors affecting the breakdown of air gap between a discharge and ice-plane or wet-plane surfaces*', In: 11th International Conference on Atmospheric Icing of Structure, IWAS'05, June 12-16, 2005, Montreal, Canada.
- 52 **A. Ouis**, S. Flazi and H. Hadi : '*The influence of the electric field distribution on flashover*', In: 5th National Conference of High Voltage CNHT'03, December 01-03, 2003, USTO-MB, Oran, Algeria, p. 93.
- 53 Gary C. and Moreu M. : '*Effet couronne en tension alternative*', Edition Eyrolles, Paris 1976.
- 54 Yuri P. Raizer: '*Gaz Discharge Physics*', Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany 1991.

- 55 Le Roy G., Gary C., Hutzler B., Lalot J. and Dubanton C.: '*Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions*', Collection of the direction of the studies and searches for electricity of France, Edition Eyrolles, Paris 1984.
- 56 Loeb L. B.: '*Electrical coronas*', In: Their Basic Physical Mechanisms. University of California Press, US, 1965.
- 57 J. Dupuy and A. Gibert: '*Comparison of point-to-plane discharge in air and SF6*', In: J. Phys. D: Appl. Phys, Vol.15, 1982, p.655-664.
- 58 **A. Ouis**, N. Naoui and S. Flazi : '*Etude de la rupture de l'air d'un intervalle Décharge-Electrolyte*', In: 6th National Conference of High Voltage CNHT'07, November 05-07, 2007, Taghit Algeria, p.181-184.
- 59 **A. Ouis**, N. Naoui, S. Flazi and H. Hadi: '*La rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique*', In: 5th International Conference on Electrical Engineering, October 27 – 29, 2008, Batna, Algeria.
- 60 Houari T.A.: '*Etude des paramètres influençant la rupture de l'air au voisinage d'une décharge électrique*', Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-USTO-MB, Algeria, 2011.
- 61 **A. Ouis**, S. Flazi, H. Hadi : '*Air breakdown in the vicinity of flashover discharge*', JEE Journal of Electrical Engineering, Volume 13 / 2013 – Edition: 4, p. 29-36.
- 62 **A. Ouis**, S. Flazi, M. Bardadi Bendaha: '*Le champ électrique et les conditions critiques du contournement*', International Conference on Electrical Engineering, CIGE'2013, at Béchar University, Algeria, 17-19 November 2013.
- 63 **A. Ouis**, S. Flazi: '*DC flashover criterion and discharge elongation mechanism in an air-electrolyte interval*', IET Generation, Transmission & Distribution, Volume 9, Issue 1, January 2015, p.53-60.

64 P. Bruggeman, L. Graham, J. Degroote, J. Vierendeels and C. Leys: '*Water Surface Deformation in Strong Electrical Fields and its Influence on Electrical Breakdown in a Metal Pin – Water Electrode System*', J.Phys.D: Appl. Phys, Vol.40, 2007, pp.4779-86.