

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies  
Département d'automatique et électromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** Automatique

**Spécialité :** *Automatique et système*

**Par : BENHAMDOUNE Abdelmalek**

**Thème**

**Effet de la variation du rayon de courbure des électrodes sur l'évolution des décharges électriques parallèles sur une isolation large et polluée**

**Soutenu publiquement le 30/09/2019**

**Devant le jury :**

<b>ARIF Mohamed</b>	MAA	Université	<b>Président</b>
<b>BOUKHARI Hamed</b>	MCB	Université	<b>Examineur</b>
<b>MEDOUKALI Hamza</b>	MCB	Université	<b>Examineur</b>
<b>BOUCHELGA Fatma</b>	MCB	Université	<b>Encadreur</b>

**Année universitaire 2019/2020**



# Remerciement

*Et après que Dieu nous a aidés à accomplir ce travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Mme **F. BOUCHELGA**, qui a donné tout son intérêt, son temps, son aide et ses conseils pour accomplir ce travail, et elle était présente tout le temps malgré les circonstances cette année, donc mille mercis à elle. Nous remercions également les parents qui nous ont soutenus tout au long des années d'études.*

*Nous tenons également à remercier tous les membres du jury qui ont honoré de juger nos travaux.*

*Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à tous ceux qui ont fourni ou contribué de loin ou de près à notre formation*

# Dédicaces



*Je dédie ce modeste travail*

*A mes chers parents mon père et mon mère pour leur  
patience on et leurs encouragements.*

*A mes frères.*

*A toute la promotion master 2 automatique 2020, à qui  
je souhaite un bon parcours professionnel.*

*Sans oublie tous les professeurs que ce soit du  
primaire, du moyen, du secondaire ou de  
l'enseignement supérieure.*

*\*Benhamdoun\**

## Liste des Tableaux

---

Tableau. I.1 : Valeurs des constantes A et n .....	9
Tableau. II.1 : Résistivités transversales de quelques isolants solides.....	19
Tableau IV.1 : Propriétés des matériaux utilisés pour la modélisation de l'isolation hydrophile .....	40

## Liste des figures

---

Figure. I.1: Organigramme du modèle de Anjana et Lakshminarasimha.....	6
Figure. I.2: Organigramme du modèle de Sundararajan et Gorur.....	7
Figure. I.3: Modèle d'Obenaus.....	8
Figure.I.4 : Modèle d'un isolateur à long fût avec une distribution de la résistance de pollution selon Boheme et Obenaus .....	10
Figure. II.1 : Fabrication des isolants minéraux .....	17
Figure. II.2 : Fabrication des isolants organiques.....	18
Figure. II.3 : Circuit équivalent parallèle représentant un diélectrique.....	20
Figure. II.4: Diagramme de Fresnel correspondant au schéma équivalent parallèle.....	21
Figure. II.5 : Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension .....	23
Figure. II.6 : Représentation schématique simplifiée des structures du verre (gauche) et du SiO <sub>2</sub> cristallin.....	24
Figure. II.7 : Isolateur de profil standard en verre trempée.....	25
Figure. II.8 : Isolateur céramique à 8 ailettes.....	25
Figure. III.1 : Différents types de claquage des isolants solides .....	31
Figure. III.2 : Amorçage de l'air par avalanche primaire.....	32
Figure. III.3 : Claquage de l'air par streamer.....	33
Figure. III.4 : décharge électrique par type leader.....	34
Figure IV. 1 : Configurations des électrodes.....	38
Figure IV. 2 : Différentes électrodes avec rayon de courbure variable.....	39
Figure IV. 3 : Maillage du modèle pour $R_c= 2\text{cm}$ .....	40
Figure IV. 4 : Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour $R_c=0.5\text{cm}$ ....	44
Figure IV. 5 : Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour $R_c= 1 \text{ cm}$ ....	42
Figure IV. 6 : Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour $R_c=2 \text{ cm}$ .....	42
Figure IV. 7 : Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour $R_c= 3.5\text{cm}$ ...43	
Figure IV. 8 : Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour $R_c= 4.5\text{cm}$ ...43	
Figure IV. 9 : Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour $R_c= 6 \text{ cm}$ ....44	
Figure IV. 10 : Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour $R_c=7.5\text{cm}$ ..44	
Figure IV. 11 : Champ électrique en fonction de $R_c$ (cm).....	45
Figure IV.12 : Tension de contournement positive en fonction du rayon de courbure des électrodes.....	46
Figure IV.13 : Effet du rayon de courbure des électrodes du système sur l'initiation des décharges électriques parallèles et séries.....	47

## Liste des figures

---

Figure IV.14 : Chemin de contournement de l'isolation pour différents rayons de courbure des électrodes.....	47
Figure IV. 15 : Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour $R_c=1$ cm....	48
Figure IV. 16 : Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour $R_c=2$ cm...	48
Figure IV. 17 : Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour $R_c=3.5$ cm..	49
Figure IV. 18 : Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour $R_c=4.5$ cm..	49
Figure IV. 19 : Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour $R_c=6$ cm.....	50
Figure IV. 20 : Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour $R_c=7.5$ cm..	50
Figure IV. 21 : Champ électrique en fonction de $R_c$ (cm).....	51
Figure IV. 22 : Distribution du potentiel électrique pour les différents rayons de courbure...	52
Figure IV. 23 : Distribution du champ électrique sur la surface isolante pour $\sigma_v=0$ mS/cm....	53
Figure IV. 24 : Distribution du champ électrique sur la surface isolante pour $\sigma_v=20$ mS/cm..	53

## Liste des Abréviations

---

$C_p$  = chaleur spécifique sous pression constante ;

$J/g$  = Joule/gramme

$k$  = constante de Boltzmann ( $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ )

HT : Haute tension

MT : Moyenne tension

$\mu W$  = Micro-watt

cm = Centimètre

mm = millimètre

s = seconde

$r_p$  = résistance de pollution linéique

$E_{arc}$  : gradient dans l'arc ;

$I_{arc}$  : courant de la décharge ;

$i$  = Courant de fuite.

$u$  = Tension appliquée ;

$L_f$  : longueur de l'isolateur (la longueur de fuite totale) ;

$\theta$  : Angle de phase

$\omega$  = pulsation de la tension appliquée.

$\Omega$  = Ohm

$f$  = fréquence (hertz)

$R_p$  = résistance du circuit équivalent parallèle pour l'isolant considéré

EA : Energie d'activation (joule)

G : Rigidité diélectrique

$\epsilon$  : Permittivité du diélectrique

mV = mega Volts ( $1mV = 10^6$  volts)

kV = kilo Volts ( $1kV = 10^3$  volts)

T : Température ambiante

$E_{max}$  : Valeur maximale du champ appliqué ;

2D = deux dimensions

3D = trois dimensions

$\sigma$  = Conductivité (S/m = siemens par mètre)

$R_c$  = rayon de courbure de l'électrode (cm)

# Table des Matières

INTRODUCTION GENERALE .....	1
<b>Chapitre I : Modèles statiques et dynamiques de contournement</b>	
I.1. Introduction .....	4
I.2. Modèle dynamique des décharges électriques .....	4
I.2.1. Modèle de Rizk et Nguyen .....	4
I.2.2. Modèle de Anjana et Lakshminarasimha .....	5
I.2.3. Modèle de Sundararajan et Gorur .....	6
I.3. Modèle statique des décharges électriques .....	8
I.3.1. Modèle d'Obenaus .....	8
I.3.2. Modèle de Neumarker .....	9
I.3.3. Modèle de la couche mixte .....	10
I.4. Travaux expérimentaux sur les DE (Décharge Electrique) .....	11
I.4.1. Abderrahmane Beroual .....	11
I.4.2. Mohammed ELAMINE SLAMA .....	11
I.4.3. Fatma Bouchelga .....	12
I.4.4. Zhijin Zhang .....	12
I.5 .Conclusion .....	12
<b>ChapitreII: Matériaux diélectriques</b>	
II.1. Introduction .....	15
II.2. Définition .....	15
II.2.1. Isolant.....	15
II.2.2. Isolations .....	15
II.2.3. Diélectrique .....	15
II.2.4. Fonctionnement et constitution d'un isolateur .....	16
II.3. Différents types d'isolants .....	16
II.3.1. Isolants gazeux .....	16
II.3.2. Isolants liquides .....	17
II.3.3. Isolants solides .....	17
II.3.3.1. Isolants inorganiques .....	17
II.3.3.2. Isolants organiques .....	18
II.4. Caractéristiques des matériaux isolants (Diélectrique).....	18
II.4.1. Propriétés électriques .....	18
II.4.1.1 Résistance et résistivité électrique .....	19
II.4.1.1.1 Résistance transversale ou volumique .....	19

## Table des Matières

---

II.4.1.1.2 Résistivité et résistance superficielle ...	19
II.4.1.1.3 Résistance d'isolement ...	19
II.4.1.1.4 Angle de perte et le facteur de dissipation...	20
II.4.1.2 Influence de divers paramètres sur les résistivités ...	21
II.4.1.3 Rigidité diélectrique ...	22
II.4.1.4 Permittivité ...	23
II.4.2. Propriétés thermiques ...	23
II.4.3. Propriétés mécaniques ...	24
II.5. Matériaux utilisés pour les isolants solides ...	24
II.5.1. Verre ...	24
II.5.1.1 Verre recuit ...	25
II.5.1.2 Verre trempé ...	25
II.5.2. Céramique ...	25
II.5.3. Porcelaine.....	26
II.5.4. Silicone...	26
II.6. Conclusion ...	26

### Chapitre III: Mécanismes des décharges électriques

III.1. Introduction ...	29
III.2. Décharge électrique dans le solide ...	29
III.2.1. Mécanisme de claquage des isolants solides ...	29
III.2.2. Claquage thermique ...	29
III.2.3. Claquage électromécanique ...	30
III.2.4. Claquage électrique ...	30
III.3. Décharge électrique dans le gaz ...	31
III.3.1. Amorçage de l'air par avalanche primaire ...	32
III.3.2. Claquage de l'air par streamer ...	32
III.3.3. Disruption de l'air par leader ...	33
III.4. Décharge électrique dans le liquide ...	34
III.5. Conclusion ...	35

### Chapitre IV: Interprétation et Résultats de simulation

IV.1. Introduction ...	37
IV.2. Modèle de simulation ...	37
IV.2.1. Description du logiciel ...	37
IV.2.2. Description du modèle...	38

## Table des Matières

---

IV.3. Résultats et discussions ... ..	41
IV.3.1. Distribution du champ électrique ... ..	41
IV.3.2. Distribution du potentiel électrique ... ..	51
IV.3.3. Effet de la conductivité électrique sur la distribution du champ électrique.....	52
IV.4. Conclusion ... ..	54
CONCLUSION GENERALE.....	56
Références bibliographiques.....	58

**المخلص:** الهدف الرئيسي من هذا العمل هو محاكاة تأثير تغيير نصف قطر انحناء الأقطاب الكهربائية على توزيع المجال الكهربائي والجهد على العزل الزجاجي، والملوث بشكل موحد تحت جهد تيار مستمر موجب. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها انخفاضاً في شدة المجال الكهربائي مع زيادة نصف قطر انحناء الأقطاب الكهربائية، وتؤكد هذه النتائج تلك التي تم الحصول عليها تجريبياً، مما يعني انخفاض عدد التفريغ الكهربائي المتوازي، بالإضافة إلى ذلك تجدر الإشارة إلى وجود تشتت كبير على مستوى مرحلة الولادة من التفريغ الكهربائي الموجب والسالب على التسلسل، حيث يكون توزيع المجال أعلى على مستوى القطب ذي التوتر الشديد مقارنة بالذي بالقرب من القطب الكهربائي الأرضي. أيضاً وجدنا أن تأثير الناقلية الكهربائية المتغيرة لا يكاد يذكر.

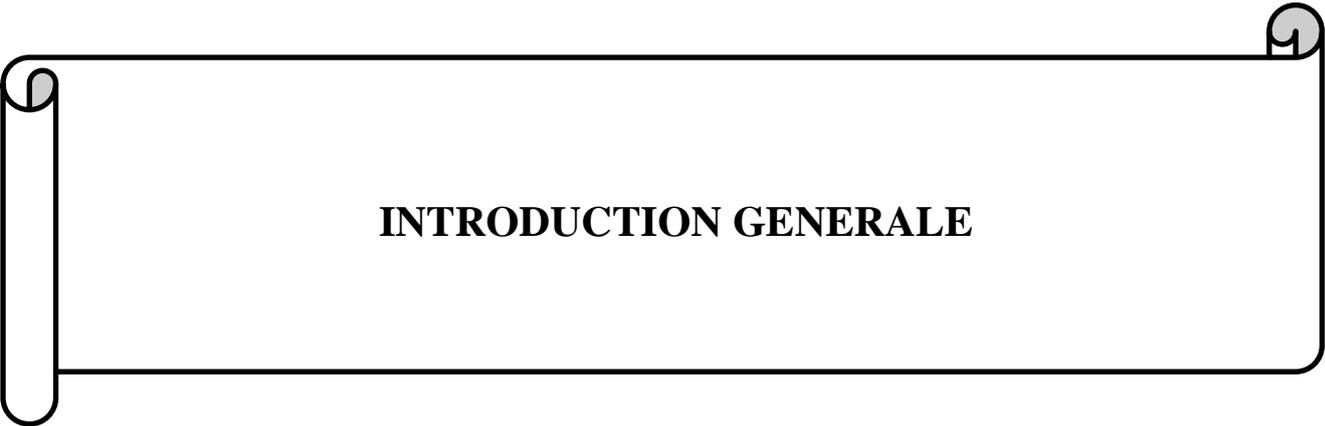
**الكلمات المفتاحية** - عزل زجاجي مسطح، تلوث موحد، تفريغ كهربائي متوازي ومتسلسل، التيار المستمر، نصف قطر انحناء الأقطاب الكهربائية، COMSOL Multiphysics

**Résumé:** L'objectif principal du présent travail consiste en une simulation de l'effet de la variation du rayon de courbure des électrodes sur la distribution du champ et du potentiel électrique sur une isolation en verre large et uniformément polluée mise sous tension continue positive. Les résultats obtenus montrent une diminution de l'intensité du champ électrique avec l'élévation du rayon de courbure des électrodes, ces résultats confirment celles obtenues expérimentalement, ce qui implique la décroissance du nombre de décharges électriques parallèles. De plus, il est à signaler une grande dispersion au niveau de la phase de naissance des décharges électriques positives et négatives en séries puisque la distribution du champ est plus élevée au niveau de l'électrode HT qu'au voisinage de l'électrode terre. Egalement, nous avons constaté que l'effet de la variation de la conductivité électrique est négligeable.

**Mots clés**— Isolation en verre large, pollution uniforme, décharges électriques parallèles et séries, tension continue de contournement, rayon de courbure des électrodes, COMSOL Multiphysics.

**Abstract:** The main objective of this work is to simulate the effect of varying the electrodes' radius of curvature, on the distribution of the electrical field and potential on a large and uniformly polluted glass insulation under positive DC voltage. The results obtained show a decrease in the intensity of the electrical field with the increase in the electrodes' radius of curvature, these results confirm those obtained experimentally, which implies the decrease in the number of parallel electrical discharges. In addition, it should be noted a large dispersion at the birth's level phase of positive and negative electrical discharges in series, since the field distribution is higher at the level of the HV electrode than in the vicinity of the grounded one. Also, we have found that the effect of varying electrical conductivity is negligible.

**Key words**— large glass insulation, uniform pollution, parallel and series electrical discharges, DC flashover voltage, electrodes' radius of curvature, COMSOL Multiphysics.



**INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

---

Nos besoins en énergie électrique sont en constante augmentation, donc réduire la perte de cette énergie est l'une des choses les plus importantes à prévoir entre les points de production et les utilisateurs. L'énergie électrique est principalement transmise par des lignes aériennes à haute tension, ces lignes peuvent couvrir des centaines de kilomètres et ainsi traverser des régions très différentes en termes de climat, de zones industrielles ... etc. Cela conduit à diverses restrictions sur les composants des systèmes de transmission d'énergie électrique. Le changement de topographie dans les zones où se trouvent les réseaux de transport électrique peut provoquer des déséquilibres au niveau des isolateurs électriques, et ce phénomène est appelé pollution, qui est due à l'un des facteurs climatiques tels que le vent, la pluie, le givre, etc., ceux-ci affectent les propriétés des isolants (pouvoir d'isolement), ce qui crée des dangers lors de la transmission de l'énergie.

Les matériaux isolants jouent un rôle essentiel en raison de leurs propriétés telles que la permittivité, la résistance surfacique et la rigidité diélectrique (propriétés électriques). Le choix des matériaux pour fabriquer les isolants est d'une grande importance pour les ingénieurs électriciens.

Le contournement d'un isolateur peut déterminer les conséquences qui provoquent la détérioration de la surface de l'isolant et cela conduit à l'arrêt de la ligne à haute tension. Par ailleurs, les coûts de restauration et de réparation de ces structures après une panne électrique peuvent parfois atteindre des centaines de millions de dollars, cela veut dire que ces pannes peuvent parfois causer des impacts socioéconomiques importants. Par ailleurs, l'étude du profil et des dimensions de ces isolateurs peuvent s'avérer un moyen efficace pour les protéger contre l'apparition des arcs de contournement. Le nombre de ceux-ci est très important, ils peuvent naître en série, en parallèle ou bien mixte ce qui entraîne une influence sur la rigidité diélectrique longitudinale des isolateurs.

L'objectif, recherché dans notre recherche, concerne l'étude de l'influence du rayon de courbure des électrodes sous tension et mise à la terre sur l'apparition et la propagation des décharges électriques parallèles et séries, évoluant sur une isolation en verre uniformément polluée, sous contrainte de tension continue positive. Cette étude est basée sur une approche numérique puisque l'étude expérimentale ne permet pas d'obtenir un calcul précis du champ électrique pour la géométrie particulière des électrodes que nous étudions. Après avoir présenté le modèle numérique utilisé, nous allons dans une première partie étudier la distribution du

## **INTRODUCTION GENERALE**

---

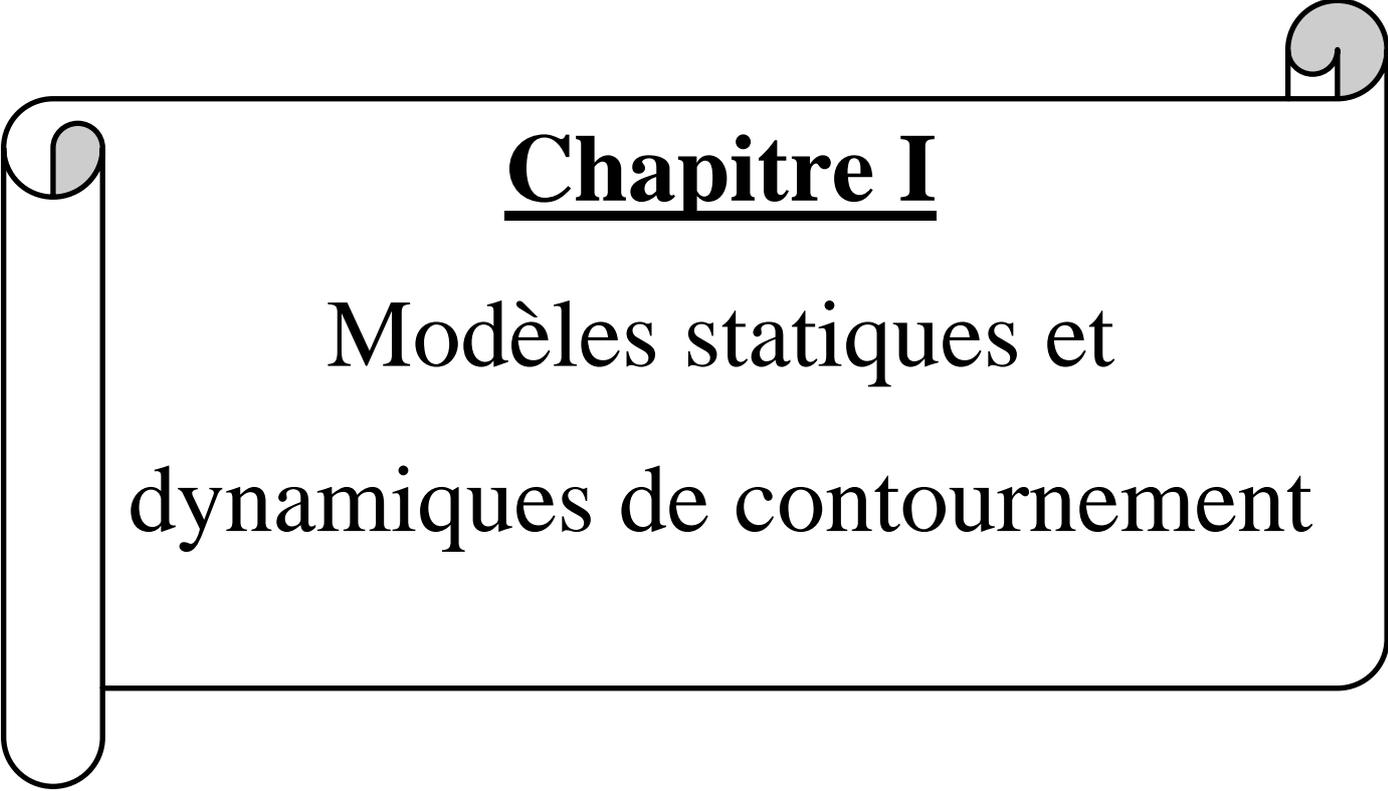
champ électrique pour un modèle sec. Par la suite, l'influence de la présence de la couche de pollution sur le champ électrique est analysée en fonction sa conductivité.

Le présent manuscrit comporte quatre chapitres. Le premier chapitre traite brièvement les modèles statiques et dynamiques effectués par des chercheurs pour comprendre le principe du phénomène de contournement des isolateurs des lignes de haute tension dans divers conditions. De plus, nous avons cité quelques études pratiques réalisées dans le même sens.

Pour le deuxième chapitre, nous avons tenté de présenter les matériaux isolants qui sont utilisés dans les réseaux électriques, et de comprendre les propriétés de ces matériaux qui sont utilisés dans la fabrication des isolants.

Le mécanisme de décharge électrique est un mécanisme complexe, nous avons donc essayé d'allouer le troisième chapitre à l'étude des décharges électriques dans les trois milieux solide, liquide et gaz, et les différents claquages qui peuvent survenir lorsqu'un courant de fuite passe dans l'un de ce types d'isolants.

Le dernier chapitre est dédié à la présentation du modèle étudié, par la suite la simulation de celui-ci on prenant en considération quelques paramètres d'influence. Nous terminons ce chapitre par une analyse des résultats obtenus plus particulièrement la distribution du champ électrique sur la surface isolante dans chaque cas.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and rounded corners on the right. The text is centered within this scroll.

# Chapitre I

Modèles statiques et  
dynamiques de contournement

## I.1 Introduction:

De nombreux travaux ont été menées en vue d'améliorer un modèle mathématique permettant la prédiction du comportement d'un isolateur contourné par les décharges électriques, les résultats de ces recherches ont permis d'établir des modèles donnant les caractéristiques des décharges évoluant sur les surfaces d'isolateurs.

Ce chapitre sera consacré à la découverte des différents modèles dynamiques et statiques développés, dans ce sens, et des études expérimentales réalisées par certains chercheurs ont étudié la décharge électrique sur une surface isolante.

## I. 2 Modèle dynamique des décharges électriques:

### I. 2. 1. Modèle de Rizk et Nguyen

Afin de caractériser la dynamique de l'arc électrique dans le cas d'une contrainte continue, Rizk et Nguyen [1] ont considéré une résistance d'arc qui varie selon l'équation de Mayer [2] :

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

Avec :

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

$n= 0.8$  et  $N= 60$

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

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

Où :

$\delta$  = la masse volumique de l'électrolyte ;

$h$ = l'épaisseur de la couche de pollution ;

$H$ = l'enthalpie (2260 j/g) ;

$H_c$ = le coefficient de transfert de la chaleur par convection ( $250\mu\text{W}/\text{cm}^2/^\circ\text{C}$ ) ;

$C_p$ = la chaleur spécifique sous pression constante ;

$T_a$ = la température ambiante ;

$S(x)$  = la surface de l'électrolyte non contournée.

## Chapitre I : Modèles statiques et dynamiques de contournement

---

Dans ce modèle, l'augmentation de l'épaisseur de l'électrolyte par humidification ( $h_w$ ) est négligeable devant sa diminution par évaporation ( $h_e$ ), dans le cas d'une durée d'impulsion de courant inférieure à 1s.

Cette équation permet de calculer le facteur  $h_e$  pour une température de  $T=100^\circ\text{C}$  :

$$\frac{dh_e}{dt} = \left( \frac{R_p i^2 / S(x) - H_c(T - T_a)}{\delta[H + C_p(T - T_a)]} \right) \quad (\text{I. 3})$$

Les résultats expérimentaux de ont montré que son modèle reproduit correctement l'influence de la résistance de protection placée en série avec l'électrode haute tension.

### I.2. 2. Modèle de Anjana et Lakshminarasimha

Anjana et Lakshminarasimha [3] ont proposé un modèle dynamique basé sur l'équation de Mayr [2] et sur le modèle statique d'Obenaus [7]. Ils ont supposé que l'isolateur est divisé en un certain nombre de bandes formant des anneaux symétriques par rapport à l'axe de l'isolateur et que l'arc est une colonne de gaz en équilibre thermodynamique dont l'énergie est donnée par :

$$W_{th} = \frac{3}{2} K T M \quad (\text{I. 4})$$

Avec:

$T$ = la température de l'arc ;

$M$ = le nombre de particules neutres dans l'arc ;

$K$ = la constante de Boltzmann ;

Les auteurs ont proposé un modèle, selon lequel l'arc ne se déplace que si son énergie totale  $W_t$  est supérieure ou égale à l'énergie  $W_{th}$  nécessaire pour maintenir l'arc à sa température.  $W_t$  est donné par l'expression suivante:

$$W_t = (E_{arc} I_{arc} - P_0) \Delta t \quad (\text{I.5})$$

Avec :

$E_{arc}$  :le gradient dans l'arc ;

$I_{arc}$  :le courant de la décharge ;

$P_0$  :les pertes par unité de longueur ( constantes).

Si la condition de propagation n'est pas satisfaite, la tension est incrémentée de  $\Delta V_s$  et le programme est repris depuis le début. Par contre, si la condition est satisfaite, la vitesse de propagation de l'arc est calculée par :

$$v = \mu \cdot E_{arc} \quad (\text{I.6})$$

## Chapitre I : Modèles statiques et dynamiques de contournement

Où :

$\mu$  = la mobilité des électrique dans l'arc ;

$v$  = la vitesse de propagation de la décharge ;

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

La multiplication de la vitesse instance par l'intervalle de temps  $dt$  (représentant l'incrémentatation temporelle) permet d'obtenir l'évolution dans l'espace équivalente ( $dx$ ) qui représente l'allongement de la décharge.

Les chercheurs ont déduit la variation de la longueur d'arc  $dx$  ( $dx= v\Delta t$ ). Si la nouvelle valeur de la longueur d'arc ( $x+dx$ ) atteint la dernière bande, il y a un contournement, dans le cas contraire le temps est incrémenté de  $\Delta t$  et les calculs sont repris depuis le début.

Les différentes étapes du programme de calcul peuvent être résumées dans l'organigramme de la figure (I.1).

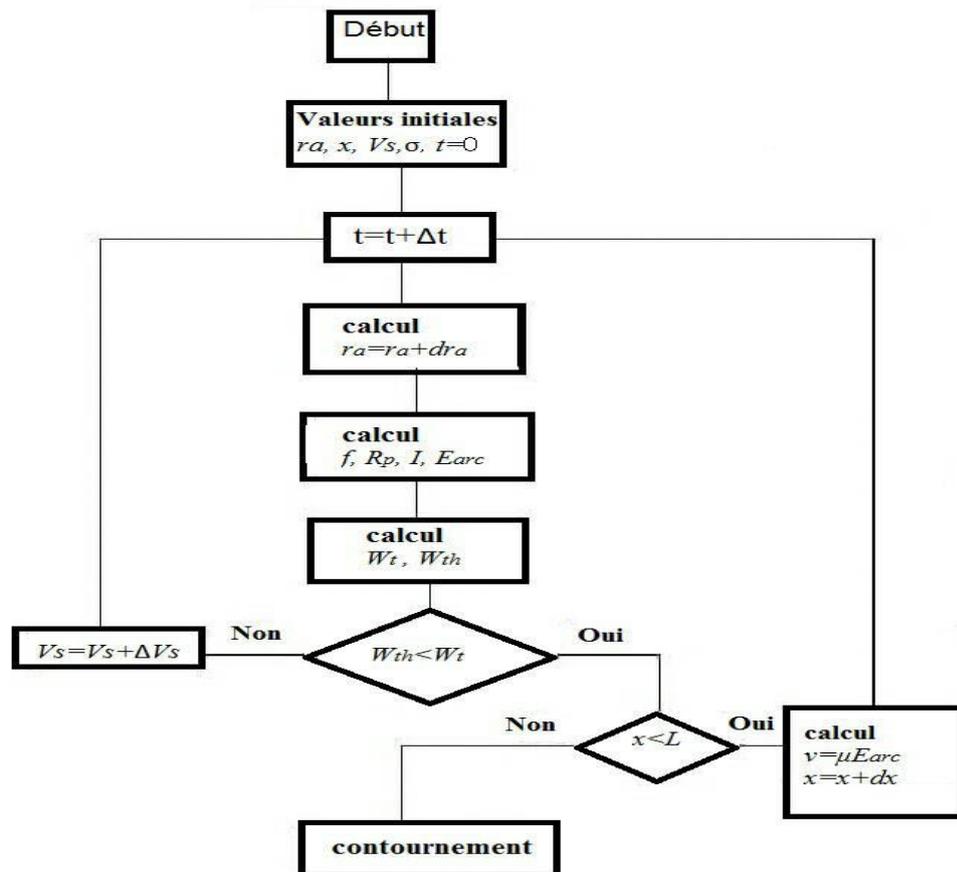


Figure I.1. Organigramme du modèle de Anjana et Lakshminarasimha [4 ]

### I.2. 3. Modèle de Sundararajan et Gorur:

## Chapitre I : Modèles statiques et dynamiques de contournement

Dans le but d'estimer la tension de contournement des isolateurs pollués sous tension continue, Sundarajan et Gorur [5] ont proposé un modèle dynamique, ce modèle est presque identique à celui de Anjana et Lakshminarasimha [3]. La seule différence réside au niveau du critère de propagation utilisée [6].

Les auteurs dans ce cas ont exploité le critère de Hampton (Champ au pied de l'arc inférieur à celui dans la pollution  $E_{arc} < E_p$ ). La formule suivante représente le gradient de la tension dans la couche de pollution utilisé par les auteurs :

$$E_p = N^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (I.7)$$

Avec :

$r_p$  = la résistance de pollution linéique ;

$N = 63$  et  $n = 0,5$  les constantes.

Notons que la valeur de  $E_p$  utilisée par Sundararajan et Gorur est en fait la contrainte critique  $E_c$  établie par Neumarker [12] :

$$E_c = N^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (I.8)$$

Toutes les équations précédentes peuvent être résumées dans un organigramme indiqué dans la figure (I. 2) :

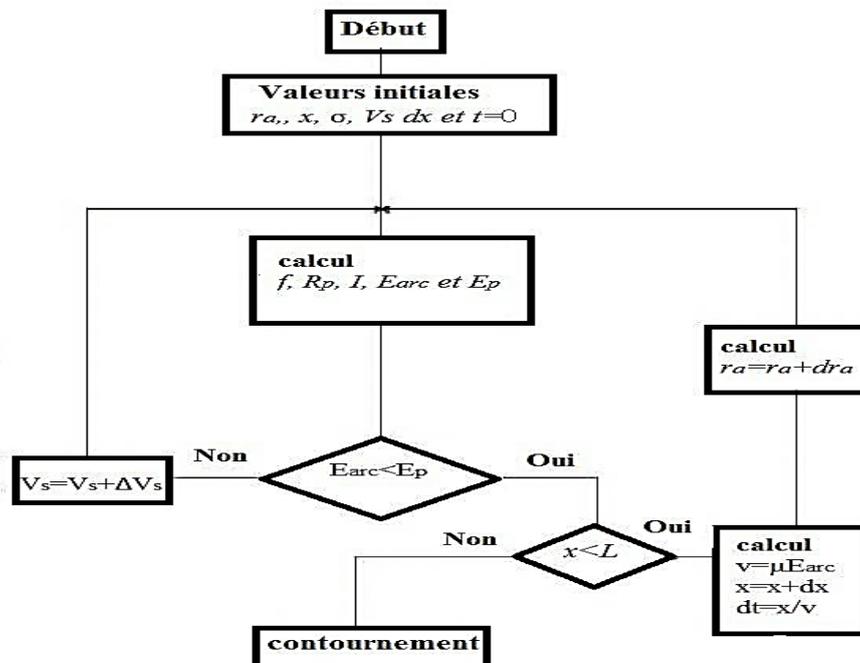


Figure I.2. Organigramme du modèle de Sundararajan et Gorur [4]

### I. 3 Modèles statiques des décharges électriques:

#### I. 3. 1 Modèle d'Obenaus

Le processus de contournement des isolateurs pollués a été soigneusement étudié par plusieurs chercheurs, Obenaus dans la référence [7] a proposé la première théorie de contournement quantitative et a présenté un modèle mathématique pour simuler le phénomène de contournement d'une surface isolante recouverte d'une couche de pollution, sous tension continue. Son modèle présenté dans la figure I. 3 est constitué d'un arc de longueur  $x$  en série avec une résistance  $R_p$  (Représente la résistance de la zone de pollution non encore court-circuité par l'arc) [8].

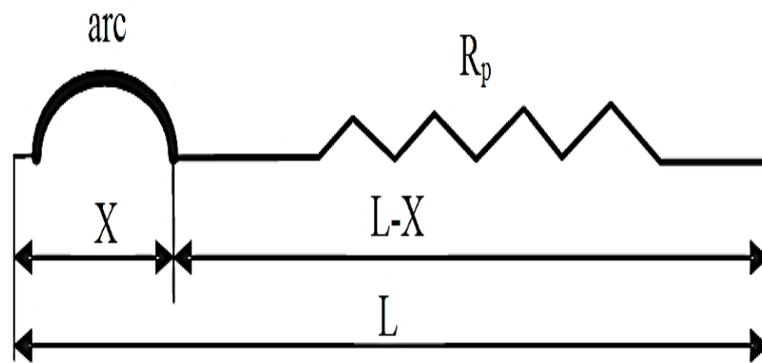


Figure I.3. Modèle d'Obenaus [7]

Après l'application de la loi d'Ohm, l'équation du circuit électrique est donnée sous la forme suivante :

$$u = u_e + u_{arc} + R_p \cdot i \quad (I.9)$$

Avec :

$u$  = Tension appliquée ;

$u_e$  = Chute de tension au niveau des électrodes ;

$R_p$  = Représente la résistance de la couche de pollution ;

$i$  = Courant de fuite ;

L'équation de la tension d'arc donnée est :

$$u_{arc} = A \cdot X \cdot i^{-n} \quad (I.10)$$

Où,  $A$  et  $n$  sont les constantes de la caractéristique statique de l'arc,  $x$  représente la longueur de l'arc.

## Chapitre I : Modèles statiques et dynamiques de contournement

---

Pour obtenir l'égalité (I. 11), Obenaus a substitué l'équation (I.10) dans la formule (I. 9), et il a obtenu:

$$u = u_e + A \cdot i^{-n} + R_p \cdot i \quad (\text{I. 11})$$

Les valeurs des paramètres A et n dépendent du milieu dans lequel la décharge est brûlée. Elles diffèrent selon les auteurs [8,9], de sorte que les valeurs de m sont comprises entre 0,40 et 1, tandis que la valeur de n est supérieure à 3 et inférieure à 500 :

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

Les deux constantes A et n varient en fonction de la nature de l'électrolyte déposé sur la surface d'isolateur [6], et grâce à des mesures expérimentales sur le canal d'électrolyte, Ghose et Chantterjee [10] ont constaté que la variation des deux constants est liée au type du sel constituant la solution polluante.

Les résultats de leurs mesures sont donnés dans le tableau (I.1) :

**Tableau I. 1** : Valeurs des constantes A et n [10]

Nature de l'électrolyte	A	N
NaCl	360	0,59
CaCl <sub>2</sub>	461	0,42
FeCl <sub>3</sub>	270	0,66
CuSO <sub>4</sub>	450	0,49

### I. 3. 2 Modèle Neumarker

A travers le modèle d'Obenaus [7], le chercheur Neumarker [11] a développé son modèle, et ce dernier a ajouté l'hypothèse d'une couche de pollution de résistance  $R_p$  uniforme par unité de longueur de fuite. Il a proposé une expression reliant la résistivité de la surface à la tension critique de contournement.

L'expression de la résistance de pollution  $R_p$  est sous la forme :

$$R_p(X) = r_p(L_f - X) \quad (\text{I.12})$$

Avec :

$L_f$  : Représente la longueur de l'isolateur (la longueur de fuite totale) ;

$r_p$  : La résistance moyenne par unité de longueur.

## Chapitre I : Modèles statiques et dynamiques de contournement

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

$$u = u_{arc} + r_p(L_f - X) \cdot i \quad (\text{I.13})$$

En remplaçant l'équation (I.10) dans l'expression (I.13), le chercheur a obtenu l'égalité (I.14) :

$$u = X \cdot A \cdot i^{-n} + (L_f - X)r_p \cdot i \quad (\text{I.14})$$

Les expressions courant et longueur d'arc selon Neumarker sont de la forme suivante :

$$I_c = \left(\frac{A}{r_p}\right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (\text{I.15})$$

et :

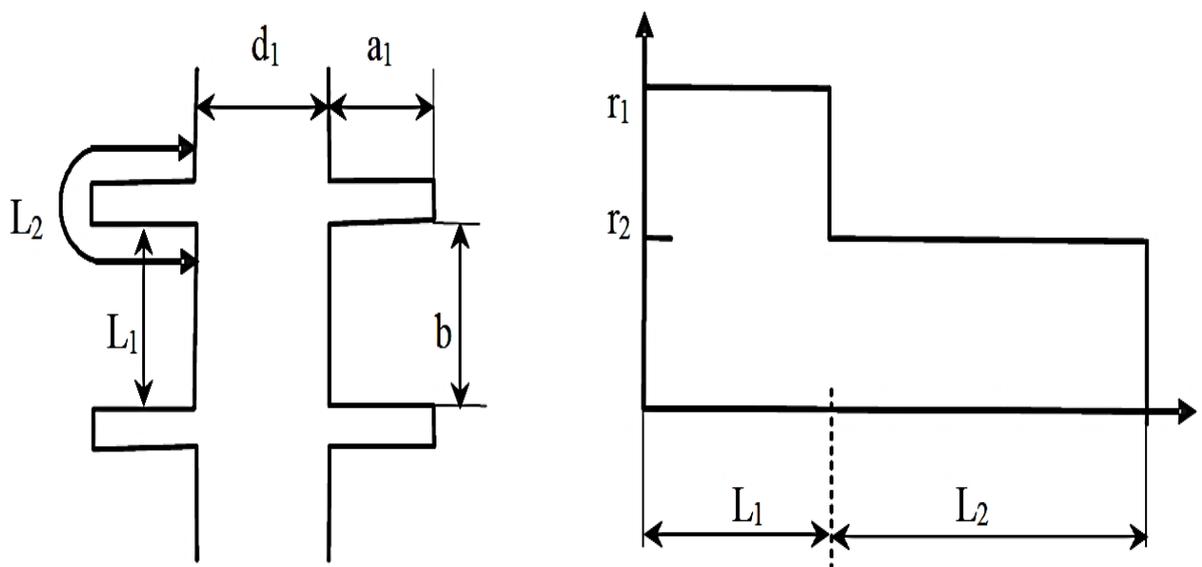
$$x_c = \frac{L_f}{n+1} \quad (\text{I.16})$$

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

$$x_c = L_f \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{I.17})$$

### I. 3. 3 Modèle de la couche mixte

Dans le cas d'un isolateur à long fut ; Obenaus et Boheme [12] ont trouvé que la couche de pollution mixte est équivalente a deux couches résistantes en série[13], de résistances linéique  $r_1$  et  $r_2$  et correspond respectivement à la tige et aux ailettes comme il est montré sur la figure (I.4) .



**Figure I.4.** Modèle d'un isolateur à long fût avec une distribution de la résistance de pollution selon Boheme et Obenaus [12]

## Chapitre I : Modèles statiques et dynamiques de contournement

---

La distance totale de fuite a été divisée en deux parties  $L_1$  et  $L_2$  [13], on Appliquant le critère de Hampton [14]. Ils ont déduit l'expression suivante :

$$\frac{V_c}{L} = 0,8\sqrt{K}\sqrt{r_1} \quad (\text{I. 17})$$

Où, la constante  $K= 80 \text{ VA} / \text{cm}$ .

Après l'application du critère d'Hesketh [15], l'expression (I.18) devient:

$$\frac{V_c}{L} = 0,8(L \cdot r_p \cdot I) \quad (\text{I. 18})$$

Avec:

$r_p$ : Résistance linéique sur une longueur pentielle de fuite  $L_1$  et  $L_2$  .

### I. 4 Travaux expérimentaux sur les DE (Décharge Electrique):

Dans cette partie, nous mentionnons certains chercheurs qui ont étudié les décharges électriques sur différents isolants uniformes et non uniformes :

#### I. 4 .1 Abderrahmane Beroual [16]:

Son étude vise à prédire les caractéristiques de la décharge électrique complète (longueur, courant, résistance de l'arc, vitesse de propagation instantanée, injection de charge, rayon de la décharge et la tension en tête du canal de décharge et la chute de tension à l'intérieur de celui-ci), se propageant sur des isolants non uniformément pollués sous des tensions de déchargent utilisant un modèle dynamique, ce modèle utilise un réseau électrique équivalent et un critère d'impédance analytique.

Les résultats de cette étude ont montré une grande importance pour les spécialistes des lignes de transmission à haut tension et des composants associés.

#### I. 4 .2 Mohammed ELAMINE SLAMA [17]:

Le but de son recherche est l'étude la propagation des décharges Électriques sur une surface isolante, et à la mise au point d'un modèle de contournement analytique dans l'air à la pression atmosphérique, les résultats expérimentant montrent que des conditions critiques de contentement sont supérieures à la moitié de la distance de ligne de fuite. Il a également développé une relation qui donne la tension de contournement ( $U_c$ ). Cette relation suggère que la tension de contournement est fonction des paramètres thermiques de décharge, de la capacité et de la résistance de l'isolant solide et des conditions de propagation de la décharge électrique [19].

## **Chapitre I : Modèles statiques et dynamiques de contournement**

---

Le courant devient plus intense lorsque la décharge dépasse la moitié de la distance totale. Il a été constaté qu'il existe un bon accord entre les tensions de contournement calculée avec ses relations expérimentales.

### **I. 4 .3 Fatma Bouchelga [18]:**

Le chercheur a étudié le développement des décharges électriques parallèles sur une large surface isolante uniformément et non uniformément polluées sous tension continue. Ses tests ont été réalisés sur une surface rectangulaire en verre de différentes dimensions. Les résultats expérimentaux issus de cette étude montrent qu'il existe une longueur de bande limite de pollution à partir de laquelle deux arcs électrique consécutifs peuvent se développer indépendamment jusqu'au contournement de l'isolant avec une tension minimale [18].

La valeur de cette longueur limite est de l'ordre de 12 cm en polarité positive de la contrainte de tension continu et de 20cm en polarité négative. De plus, elle a été remarquée que cette longueur effective n'est pas du tout influencée par la variation de la conductivité volumique de la solution polluante, mais elle engendre une diminution de la performance de l'isolation [19].

### **I. 4 .4 Zhijin Zhang [20]:**

Son expérience a montré que sous des vents unidirectionnel on sur certains terrains, la surface des isolateurs n'est pas uniformément polluée entre les côtés au vent et sous vent, les résultats des recherches menées à l'aide du simulateur (COMSOL Multiphysics) pour déterminer la formule de la résistance de la couche de pollution résiduelle s'accorde bien avec la formule de simulation en particulier lorsque la longueur dépasse 70% de la distance de fuite.

La bonne concordance entre les tensions de contournement théoriques et expérimentales avec une erreur plus ou moins de 10%.

Le degré de réduction est lié au rapport de densité du dépôt de sel du côté au vent au côté sous le vent et à la proportion de la surface du côté sous le vent.

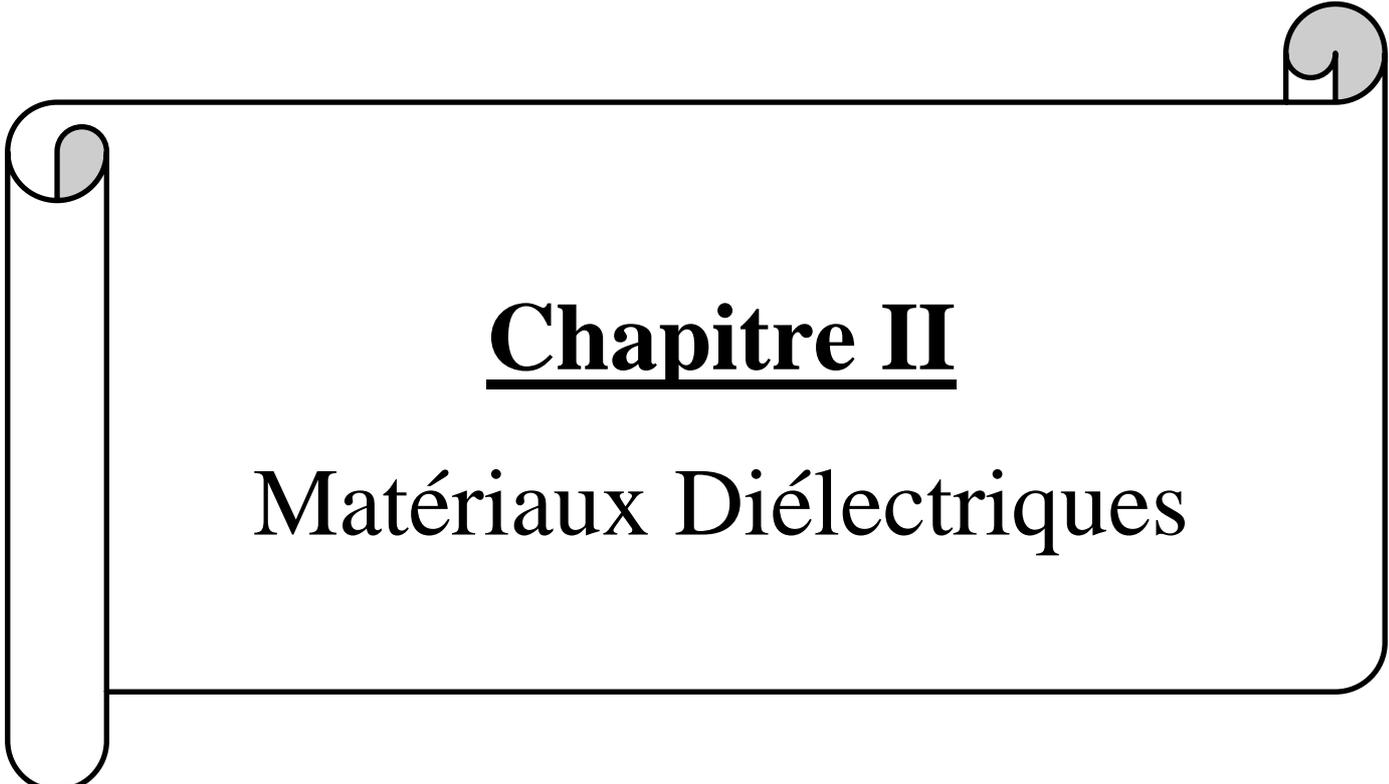
## **I.5. Conclusion :**

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté quelques modèles statiques et dynamiques excitants dans la littérature pour comprendre le processus de contournement diélectrique d'une surface contaminée. Différentes expériences sont exprimées par des équations caractérisant la tension aux bornes de la déchargée, ces modèles traitent le phénomène de contournement sous un aspect global en lui associant un critère d'extension.

## **Chapitre I : Modèles statiques et dynamiques de contournement**

---

Quant aux études expérimentales de la deuxième partie, elles sont consacrées à la caractérisation de la décharge électrique dans devers isolantes polluée comme le verre par exemples sous l'influence de différents paramètres.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and rounded corners on the right, all in black outline with a light gray shadow effect.

# **Chapitre II**

## Matériaux Diélectriques

### **II.1 Introduction**

Le rôle joué par les matériaux diélectriques dans le développement des équipements électriques, est d'une grande importance dans les progrès qu'ils ont réalisés dans ce domaine car ils ont été développés sur une période d'un siècle, bien que cette évolution soit lente, elle a été excellente en termes de qualité.

Les isolants ou matériaux diélectriques sont des matériaux de très haute résistance pour contenir très peu d'électrons libres grâce à leurs propriétés mécaniques, thermiques et chimiques. Ils empêchent également le passage du courant lors d'une exposition à une haute tension continue, c'est-à-dire que sa résistance à cette dernière est infiniment grande. Les isolants sont utilisés pour assurer la déconnexion électrique entre les conducteurs et pour protéger les personnes, mais la défaillance de l'isolation entraîne de graves conséquences économiques.

Dans ce chapitre, nous donnerons un aperçu des matériaux isolants et de leurs propriétés isolantes.

### **II.2. Définitions**

#### **II.2 .1 Isolant [21]**

C'est un matériau qui ne conduit pas l'électricité contrairement au conducteur, il a pour but d'éviter le contact entre les pièces métalliques. Il se caractérise par une résistance électrique très élevée contrairement aux autres métaux, et sa résistance diminue avec l'augmentation de sa température.

#### **II.2 .2 Isolations**

C'est un système constitué par des matériaux isolants ou un assemblage des matériaux isolants à considérer avec les parties conductrices associées.

#### **II.2 .3 Diélectrique [21- 22]**

Le fait que le matériau ne contienne pas de charges électriques le rend diélectrique et polarisable, c'est-à-dire lorsqu'il y a des dipôles électrostatiques (polarité diélectrique) ou ils se forment sous l'effet d'un champ électrique (dipôles induits). Autrement dit, le diélectrique peut être défini comme un milieu physique dans lequel la bande de conduction se sépare à propos de la plage de parité avec une énergie supérieure à 5 eV. Ces milieux comprennent : le vide, le verre et de nombreux plastiques.

### II.2 .4 Fonctionnement et constitution d'un isolateur

Pour la distribution et la transmission de l'énergie électrique, les isolants sont une composante indispensable en cela. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes ,et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux parties constitutives de la ligne. Ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe, ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure).

Les isolateurs [6, 23] sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement. Du point de vue électrique, l'isolateur est considéré comme étant deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents, qui sont les suivants :

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

### II.3 Différents types d'isolants

Les isolants sont classés en trois types :

#### II.3 .1 Isolants gazeux [24]

L'air et les gaz secs, sont considérés comme des bons isolants, ils sont dotés des propriétés suivantes :

- Rigidité diélectrique variable suivant la nature de gaz ;
- Permittivité faible, les gaz sont auto-générateurs ;
- Phénomène d'ionisation des gaz;
- Légers et inflammables ;

Les principaux isolants gazeux sont : l'air atmosphérique, l'azote, gaz rares de l'air et l'hydrogène.

### II.3 .2 Isolants liquides

Il existe quelques liquides diélectriques, mais ils sont souvent utilisés avec des solides (transformateurs, condensateurs et câbles). Ils ont pour rôle de se substituer aux vacuoles qui sont le siège de décharges partielles.

### II.3 .3 Isolants solides

Les isolants solides sont regroupés en deux groupes principaux :

#### II.3 .3.1 Isolants inorganiques [25]

- Les verres : Ils sont souvent utilisés pour l'isolement des lignes électriques aériennes et sous forme de fibres, les isolations composites, ses avantages incluent l'amélioration des propriétés mécaniques des pièces isolantes en plastique.

- Les céramiques et oxydes : sont utilisées dans les isolateurs des lignes aériennes et d'antennes, ainsi que dans les hautes ou basses tensions, haut fréquence, dans l'isolation sous vide et dans les condensateurs.

- Les micas et produits micacés : sont utilisés pour l'isolation à haute température des radiateurs de composants de puissance et ils sont particulièrement importants dans le secteur de l'isolation à la masse des bobinages des stators de machines tournantes de tension nominale comprise entre 1 et 30 kV.

Les étapes nécessaires à la fabrication des isolants inorganiques (Figure II. 1) sont illustrées dans la figure suivante :

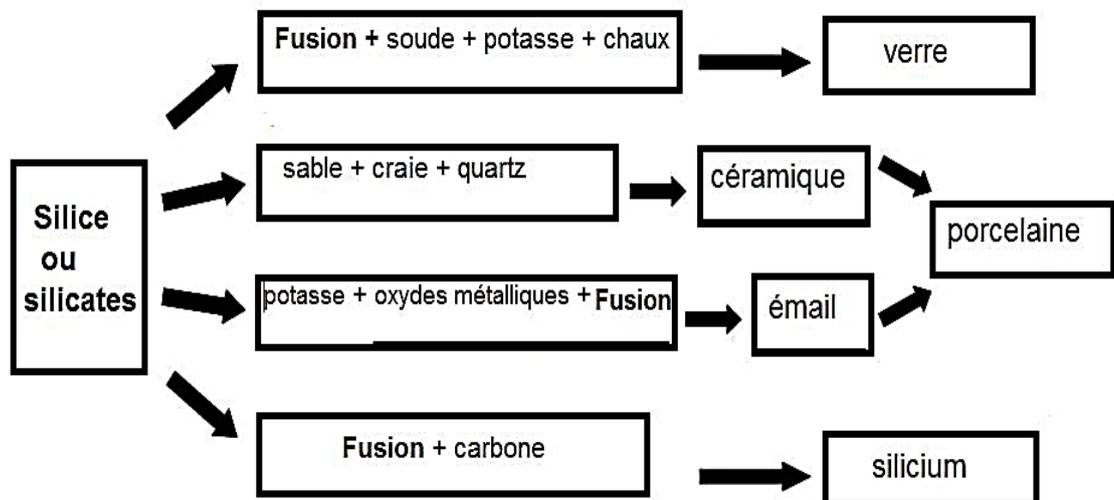


Figure II. 1. Fabrication des isolants minéraux [26]

## Chapitre II : Matériaux diélectriques

### II.3 .3.1 Isolants organiques [25]

On distingue deux catégories des isolants organiques, à savoir (Figure II. 2) :

- Matériaux naturels : tels que, les caoutchoucs, paraffine, Textiles et papier.
- Matériaux synthétiques : Caoutchoucs synthétiques et les élastomères, polymères et composites divers, ces derniers étant de plus en plus utilisés

La procédure de fabrication des isolants organiques est présentée sur la figure suivante :

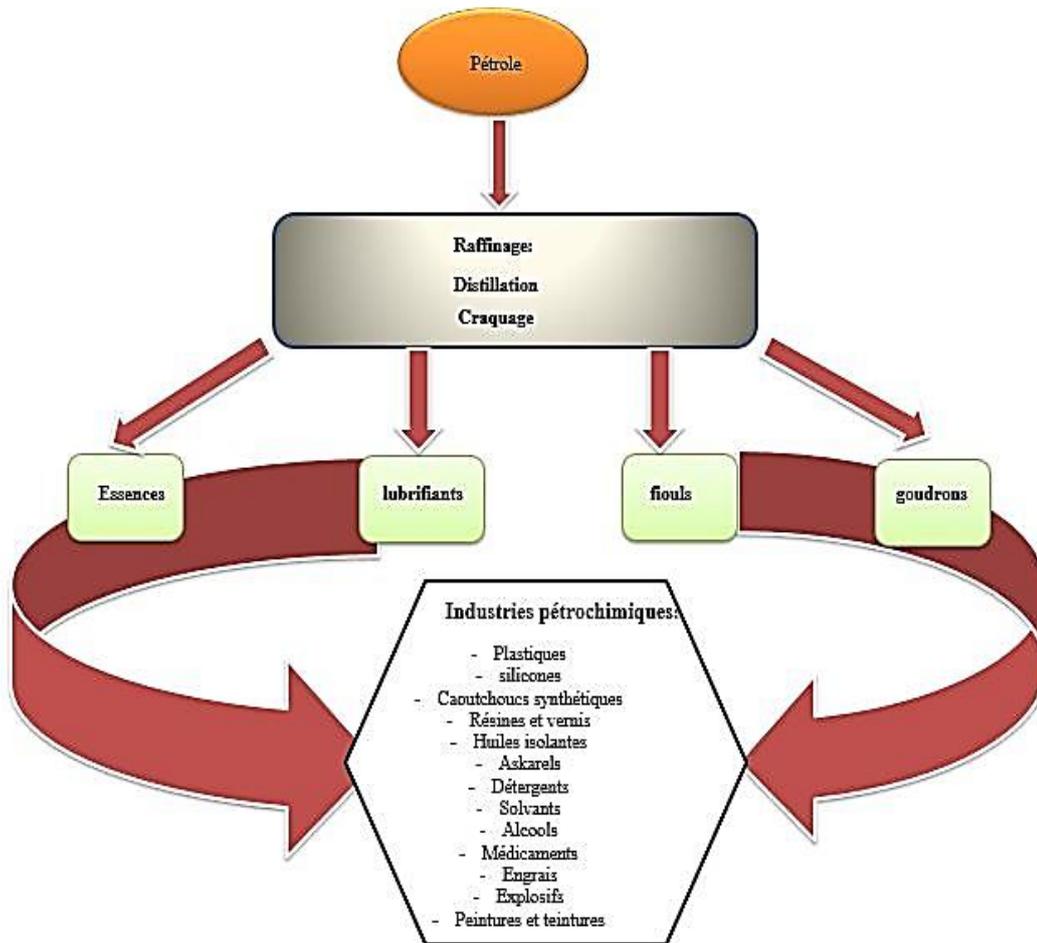


Figure II. 2. Fabrication des isolants organiques [26]

## II.4. Caractéristiques des matériaux isolants (Diélectrique)

### II.4.1 Propriétés électriques

Les propriétés électriques de l'isolation des conducteurs ou du stockage d'énergie sont d'une grande importance dans ses fonctions, et parmi ces propriétés nous mentionnons ici la permittivité diélectrique, la rigidité et la résistivité.

## Chapitre II : Matériaux diélectriques

---

### II.4.1.1 Résistance et résistivité électrique

#### II.4.1.1.1 Résistance transversale ou volumique

Cette résistance est le quotient de la tension continue appliquée entre deux électrodes placées sur les deux faces opposées d'une éprouvette, par le courant circulant en régime établi entre ces électrodes, elle est liée aux propriétés internes du matériau [27]. L'unité SI de résistivité transversale est l'Ohm  $\times$  mètre mais, en pratique, on utilise très souvent l'Ohm  $\times$  centimètre.

#### II.4.1.1.2 Résistivité et résistance superficielle

Cette résistance est celle qui se produit entre deux conducteurs sur la même surface isolante après une certaine période d'application de tension continue [27].

La résistivité superficielle est le quotient du gradient de potentiel en surface par le courant par unité de largeur.

#### II.4.1.1.3 Résistance d'isolement

C'est le quotient de la tension continue appliquée entre deux électrodes en contact avec l'échantillon, par le courant total qui parcourt à un moment donné après l'application de cette tension. Cette résistance d'isolement comprend à la fois la résistance transversale et la résistance de superficielle.

La résistance d'isolement n'est pas une caractéristique intrinsèque du matériau mais elle présente un intérêt pratique pour la comparaison de différents matériaux isolants [6].

**Tableau II. 1:** Résistivités transversales de quelques isolants solides [28]

Isolant	Résistivité transversales (en $\Omega \cdot \text{cm}$ )
PTFE: Poly – tétra – fluoro – éthylène	$10^{18}$
FEP: Éthylène - propylène – perfluoré	$> 10^{17}$
PCTFE : Poly – chloro – trifluoro - éthylène	$10^{18}$ à $10^{19}$
Silicone	$10^{15}$
Porcelaine	$10^{11}$
Bakélite	$10^{10}$ à $10^{12}$
Polyéthylène	$10^{16}$

## Chapitre II : Matériaux diélectriques

### II.4.1.1.4 Angle de perte et le facteur de dissipation

Soumettre l'isolant à un champ électrique alternatif au moyen de courants de conduction et d'absorption peut entraîner des pertes diélectriques. Le courant déphasé avant l'application de la tension est inférieur à l'angle de  $90^\circ$ , c'est-à-dire  $\varphi < \pi/2$ , et cela est dû aux pertes diélectriques et des courants de fuite reliés à la conductivité. Comme le montrent les schémas équivalents suivants (Figure II. 3 et II. 4) .Sont complément  $\delta$  est appelé angle de pertes. La tangente de cet angle est appelée facteur de dissipation (ou de pertes).

La tangente de cet angle est donnée par l'expression suivante :

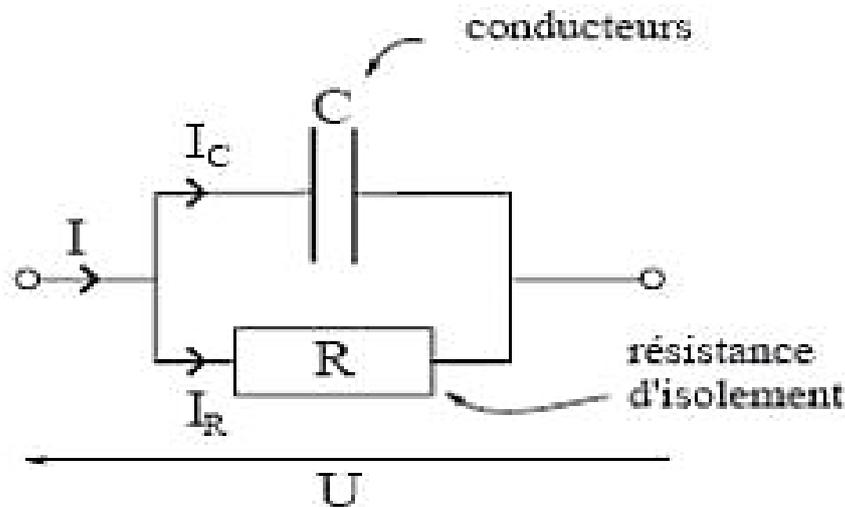
$$\tan \delta = \frac{1}{\tan \theta} = \frac{1}{\omega \cdot R_p \cdot C_p} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$\omega = 2\pi f$ , représente la pulsation de la tension appliquée ;

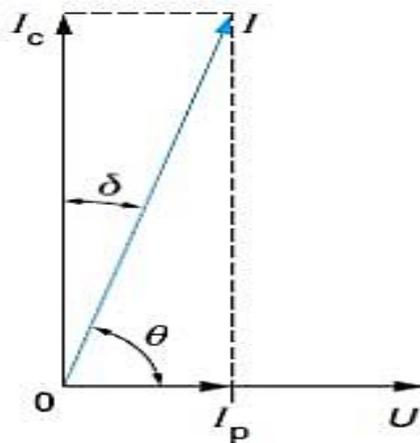
$C_p$  : est la capacité du circuit équivalent parallèle pour l'isolant considéré ;

$R_p$  : est la résistance du circuit équivalent parallèle pour l'isolant considéré.



**Figure II. 3.** Circuit équivalent parallèle représentant un diélectrique [22]

La valeur du facteur de dissipation est déterminée à l'aide du diagramme de Fresnel comme indiqué sur la figure (II. 4) :



$I$ (A)	courant résultant
$I_c$ (A)	courant de charge
$I_p$ (A)	courant de pertes
$U$ (V)	tension
$\delta$ (rad)	angle de pertes
$\theta$ (rad)	angle de phase

Figure II. 4. Diagramme de Fresnel correspondant au schéma équivalent parallèle [31]

### II.4.1.2 Influence de divers paramètres sur les résistivités

La température, l'humidité et le champ appliqué et le temps d'application de la tension peuvent affecter la résistance, de même que cette dernière peut être affectée par la nature et la géométrie des électrodes.

#### ➤ Température

La résistivité dépend de la température selon une loi du type [30] :

$$\rho = \rho_0 \exp \frac{E_A}{kT} \quad (\text{II.2})$$

Où :

T : température absolue (°K) ;

k : Constante de Boltzman ( $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ) ;

$\rho_0$  = facteur pré-exponentiel ;

$E_A$  : Energie d'activation (J) ;

$E_A$  est l'énergie d'activation du mécanisme de conduction, donnée par la pente de la droite :

$$\ln \rho = f\left(\frac{1}{T}\right) \quad (\text{II.3})$$

L'énergie d'activation dépend du matériau, lorsque l'on sort de l'intervalle de linéarité, on constate une rupture de pente qui traduit un changement dans le mécanisme de conduction prépondérant.

#### ➤ Humidité [30]

La résistivité dépend principalement de l'humidité relative de l'air ambiant, mais dans la

## Chapitre II : Matériaux diélectriques

---

résistivité de surface dépend de la teneur en eau du matériau, ainsi des changements de résistance de surface sont observés avec un facteur de 100 à 10 % d'humidité relative.

Dans le cas de la résistivité transversale, elle est exprimée en pourcentage de la teneur en eau du matériau à saturation.

### ➤ Champ électrique appliqué [29- 30]

L'injection d'électrons dans les électrodes avec la présence d'impuretés et de défauts du matériau peut conduire à la création d'un champ électrique, et ce champ diffère là où dans les champs faibles les matériaux isolants suivent la loi d'Ohm, en d'autres termes leur résistivité est indépendante du champ appliqué, et dans le champ fort il y a une diminution de la résistivité lorsque le champ appliqué augmente. La limite entre la zone de champ faible et celle de champ fort est voisine de 1 à 10 MV/m à la température ambiante [6].

### ➤ Nature des électrodes [6- 29]

La largeur et l'écartement des électrodes influent la résistivité superficielle, elle devient indépendante que si leur écartement est très faible. Par conséquent, pour que les mesures de résistivité soient valables, les électrodes doivent adhérer complètement à la surface du matériau, et tout espace d'air entre la surface et l'électrode peut changer le résultat. Cela est dû à la très haute résistivité à l'air.

### II.4.1.3 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique du matériau isolant représente la valeur maximale du champ électrique que le matériau endure avant l'apparition de l'arc électrique, en pratique, la rigidité diélectrique est définie comme le rapport entre la tension à laquelle une perforation se produit dans les conditions de test spécifiées et la distance entre les deux électrodes auxquelles la tension est appliquée, la rigidité diélectrique  $G$  d'un isolant est définie par :

$$G = \frac{U}{L} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$L$  : Distance entre électrodes (m ou mm) ;

$U$  : Tension pour laquelle le claquage se produit (mV ou kV) ;

$G$  : Rigidité diélectrique (mV/m ou kV/mm).

Deux types de rigidité peuvent être distingués, en fonction des positions relatives des conducteurs et des surfaces des matériaux :

## Chapitre II : Matériaux diélectriques

- La rigidité diélectrique transversale (RDT), pour laquelle le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces principales du matériau ;
- La rigidité diélectrique longitudinale (RDL), obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface de d'isolant ;

### II.4.1.4 Permittivité

L'exposition de l'isolant diélectrique à l'effet d'un champ électrique entraîne des modifications au niveau moléculaire qui ont pour effet de créer un champ électrique propre ( $E_p$ ) à l'intérieur du matériau qui s'oppose à l'application du champ électrique externe ( $E_{ext}$ ) (Figure II.5). Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative  $\epsilon_r$ , donc la permittivité est une caractéristique importante de l'isolation électrique [6,30].

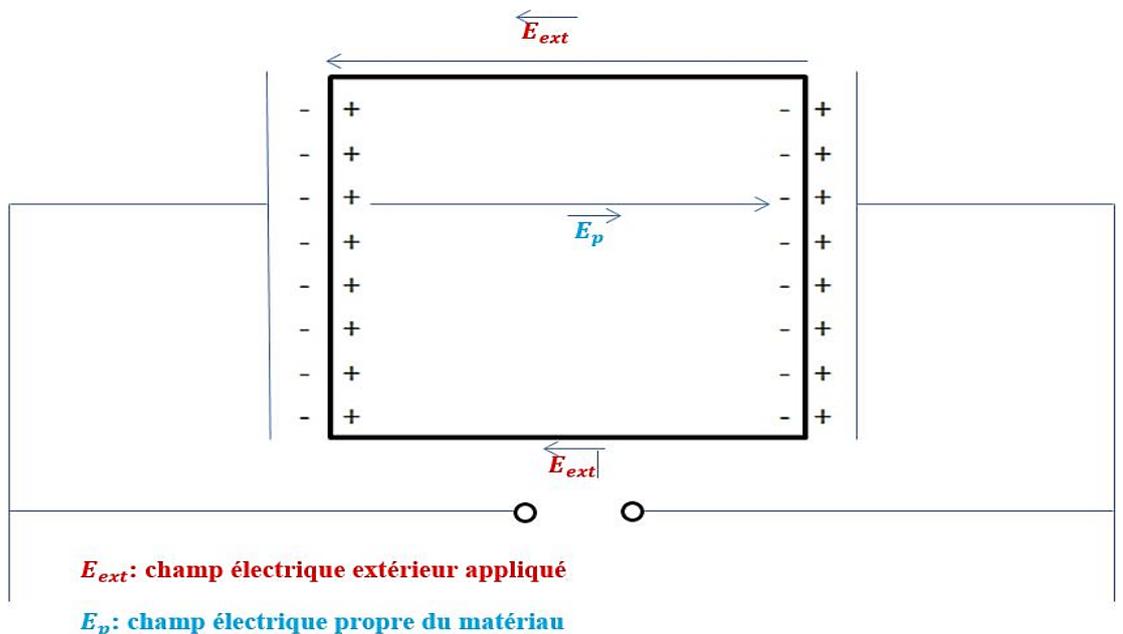


Figure II. 5. Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

### II.4.2 Propriétés thermiques [31]

Les propriétés thermiques des matériaux sont les grandeurs qui caractérisent le comportement des matériaux, et les propriétés thermiques sont liées à la capacité du matériau à absorber et à résister à l'énergie thermique. L'absorption de cette énergie conduit à élever la température du matériau pour le modifier (modification des propriétés physiques ou de l'état du matériau).

## Chapitre II : Matériaux diélectriques

---

Toutes les propriétés thermiques des matériaux sont dépendantes de la nature du corps et de sa température. La mesure de ces propriétés est donc indissociable de la mesure de la température et de la connaissance de la nature du matériau.

### II.4.3 Propriétés mécaniques

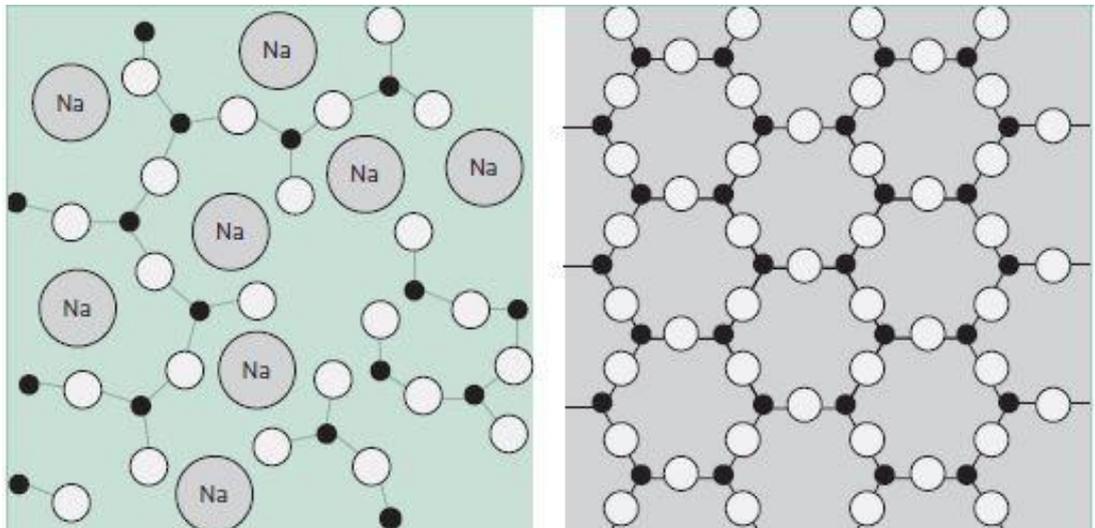
Les propriétés mécaniques les plus importantes sont la résistance du matériau à divers agents chimiques es: acides, les sels et les bases, la résistance aux agents atmosphériques, l'humidité, aux huiles...ect.

### II.5. Matériaux utilisés pour les isolants solides

Le verre, la céramique, silicone et la porcelaine sont l'un des isolants solides les plus importants dans la fabrication d'isolateurs haute tension et largement utilisés. Dans cette partie, nous allons découvrir certains de ces isolants solides.

#### II.5.1. Verre

Le verre est un matériau inorganique qui n'est pas un solide mais plutôt un liquide solidifié constitué de dioxyde de silicium thermoplastique ( $\text{SiO}_2$ ), et il est disponible dans la nature sous forme de quartz. Chaque atome de silicium est placé au centre d'un tétraèdre et lié à quatre atomes d'oxygène (Figure II. 6) [32].



**Figure II. 6.** Représentation schématique simplifiée des structures du verre (gauche) et du  $\text{SiO}_2$  cristallin

Le verre est utilisé dans les isolateurs de lignes à haute et moyenne tension et ses avantages sont que ses défauts peuvent être facilement détectés, en raison de sa transparence à la lumière visible.

## Chapitre II : Matériaux diélectriques

---

Il existe deux principaux types de verre utilisés dans la fabrication des isolateurs:

### II.5.1.1. Verre recuit

Le verre recuit peut être utilisé dans les isolateurs solides, mais l'un de ses inconvénients est qu'il ne résiste pas aux changements brusques de température et qu'il ne supporte que des contraintes mécaniques relativement faibles [6]. Par conséquent, il a été interdit de son utilisation dans les isolateurs de suspension.

### II.5.1.2. Verre trempé

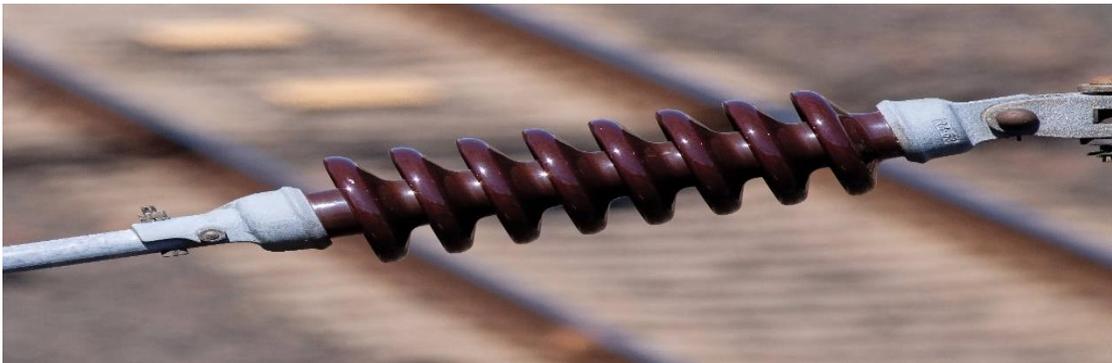
Le verre trempé a une grande résistance à toutes les contraintes mécaniques des isolateurs suspendus, en raison de sa capacité à résister aux changements brusques de température (plus de 100 ° C), il a donc un haut niveau de protection et de sécurité [32].



**Figure II. 7.** Isolateur de profil standard en verre trempée [33]

### II.5.2. Céramique

La céramique est utilisée dans les isolateurs haute tension pour leur capacité à résister à des contraintes mécaniques très élevées. Les isolateurs céramiques pour lignes haute tension sont généralement en forme de plaque. Ils sont reliés les uns aux autres pour former des chaînes d'isolateurs. Et il remonte à longtemps, il est donc devenu utilisé dans l'industrie électrique jusqu'à présent.



**Figure II. 8.** Isolateur céramique à 8 ailettes [34]

## Chapitre II : Matériaux diélectriques

---

### II.5.3. Porcelaine

La porcelaine est considérée comme des isolateurs solides, car elle se compose principalement de kaolin fin et de quartz, ils sont cuits à une température pouvant dépasser 1400 C° pour la dureté de ses composants, puis recouverts d'émail au silicate et recuits au four pour obtenir une glaçure à chaud qui le rend imperméable à l'eau.

Certaines de ses propriétés électriques, mécaniques et thermiques sont [19]:

- Rigidité diélectrique élevée, 25 à 35 kV/mm ; permittivité relative  $\epsilon_r = 6$  à 7 ;
- Grande résistivité, environ  $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  à 20°C ;
- Manque de pertes électrique en basse fréquence et en haute tension ;
- Résistance mécanique 2500 à 4000 N/mm.

### II.5.4. Silicone

Le silicone est un excellent isolant dans les applications haute et moyenne tension du fait de sa structure partielle, car il s'agit de polymères inorganiques constitués d'une chaîne silicium oxygène (...- Si-O-Si-O-Si-O- ...) et dont les groupes sont liés aux atomes de silicium. Il est considéré comme incombustible car il n'y a pas de carbone dans ses molécules.

Les isolateurs en silicone recouverts d'une couche de pollution ont une résistance plus élevée aux courants de fuite, permettant ainsi d'éviter les décharges électriques même dans des conditions de pollution extrêmes.

## II.6. Conclusion

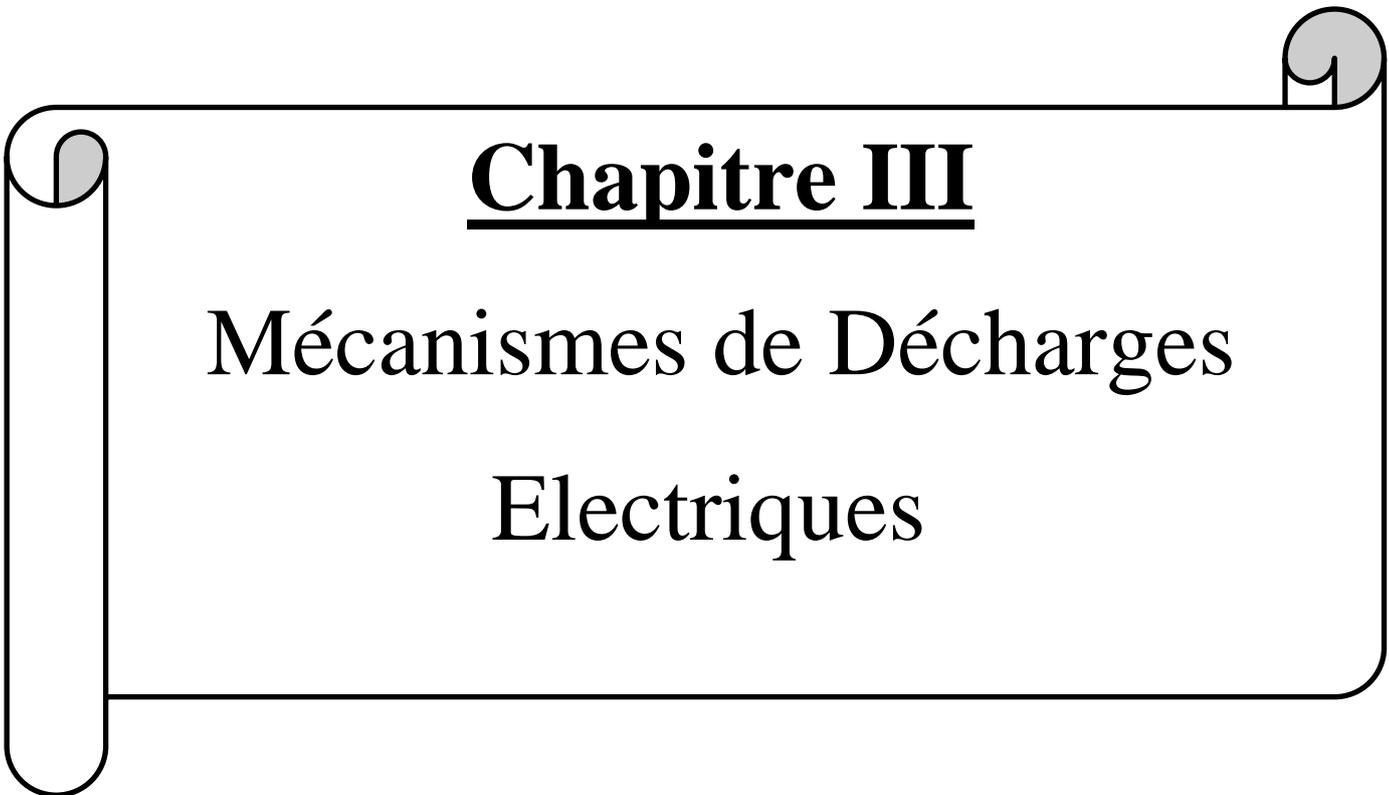
À travers ce que nous avons présenté dans ce chapitre, il a été montré que les matériaux isolants, en particulier les solides, ont une grande importance dans la fabrication des isolants, car les systèmes de transmission et de distribution d'énergie électrique dépendent de la qualité de ces matériaux isolants solides en raison de leurs installations partielles et de leur résistance à des courants violents.

Le choix des matériaux isolants se fait en fonction de leur rigidité, permittivité et résistance longitudinale ou transversale sous tension continue, on peut donc distinguer si l'isolateur est de bonne qualité.

## **Chapitre II : Matériaux diélectriques**

---

Le verre est utilisé dans la fabrication des isolants en raison de son faible prix, comme en Algérie il dépend de ce dernier.



# **Chapitre III**

Mécanismes de Décharges

Electriques

### III.1 Introduction

L'étude de phénomène des décharges électriques a été toujours l'objet de recherches scientifiques, et cela confirme qu'il s'agit d'un phénomène complexe et de la difficulté des mécanismes qui le constituent. L'étude scientifique des décharges électriques a commencé depuis le XVIII<sup>ème</sup> siècle et s'est poursuivie jusqu'à nos jours.

Une décharge électrique est un canal conducteur se forme, sous certaines conditions entre deux électrodes à travers un milieu normalement isolant [35]. Les décharges électriques se produisent sous différentes manières. Dans ce chapitre, nous allons présenter les mécanismes de décharge dans l'air, solide et liquide.

### III.2 Décharge électrique dans le solide

#### III.2.1 Mécanisme de claquage des isolants solides

L'étude du claquage des isolants solides n'est pas moins importante dans les études de l'isolation. Parce que les solides peuvent être endommagés directement après la survenue du claquage, par conséquent, il y aura possibilité de fusion, brûlure ou perforation du diélectrique. Ces problèmes peut rester et donner une forme irrégulière à l'isolant, ce qui ne pas le cas dans les autres isolants gazeux et liquides qui ont la capacité de régénération et de restauration partielle de leur résistance après avoir supprimé le champ électrique appliqué, puisque la grande mobilité des particules permet à la trace du canal de décharge à disparaître.

Par conséquent, nous pouvons dire que le mécanisme du claquage dans le matériau solide est un peu plus complexe et peut varier avec la nature de la tension appliquée.

#### III.2.2 Claquage thermique

Le passage du courant à travers un matériau isolant solide augmente la conductivité du courant, ce qui à son tour conduit à une augmentation de la température en raison de l'effet joule (énergie), cette augmentation peut provoquer le claquage d'un matériau. Ce phénomène est donc appelé le claquage thermique comme il été expliqué par Coelho et Aladenize [36].

Lorsque la température du matériau atteint une valeur critique, cela entraîne une augmentation de la vitesse du courant. Le courant électrique pour ce claquage est calculé par l'équation aux dérivées partielles qui réduit le bilan énergétique :

$$\delta E^2 = Cv \frac{\delta T}{\delta t} - div(K \nabla T) \quad (\text{III. 1})$$

## Chapitre III : Mécanismes de décharges électriques

---

Avec :

$\delta$ : Conductivité électrique ;

$C_v$  : Capacité thermique (chaleur) ;

$K$  : Conductivité thermique ;

$t$  : Temps d'application du champ électrique.

La résolution de cette équation donne la température en fonction du temps de chaque point dans l'échantillon. Cependant, dans le cas d'un échantillon de grande surface [38], la tension critique de claquage est donnée par la relation suivant [39] :

$$V_c \approx \left( \frac{8K.kT^2}{\delta.W} \right)^2 \exp\left(\frac{E_A}{2kT}\right) \quad (\text{III. 2})$$

Où :

$E_A$  : Energie d'activation ;

$k$  : Constant de Boltzman ;

$T$  : Température ambiante ;

### III.2.3 Claquage électromécanique

L'exposition d'un isolant solide à des pressions électrostatique dues au champ électrique entraîne des déformations au niveau du matériau. Le claquage est appelé électromécanique en raison d'une combinaison d'effets mécaniques et électriques sur l'isolant. La pression qui s'exerce sur le diélectrique lorsque les électrodes sont fixes [37], ou force de compression de Maxwell est de la forme [38] :

$$P = \frac{1}{2} \varepsilon E_{max}^2 \quad (\text{III. 3})$$

Où :

$\varepsilon$  : Permittivité du diélectrique ;

$E_{max}$  : Valeur maximale du champ appliqué ;

### III.2.4 Claquage électrique

Grace aux études de certains chercheurs sur le claquage électrique, il peut être divisé en deux groupes [39] :

- Claquage électrique intrinsèque : cela se produit en raison de la collision d'électrons par le champ électrique avec les particules de l'isolant, ce qui conduit à l'instabilité du champ, provoquant le claquage intrinsèque ou (le claquage de l'électrique pur).

## Chapitre III : Mécanismes de décharges électriques

- Claquage électrique par avalanche : dans ce claquage, le matériau diélectrique peut être conducteur afin de doubler l'électron du diélectrique à des valeurs inacceptables, ce qui augmente l'intensité du courant électrique.

Les mécanismes de claquage sont principalement liés à la rigidité diélectrique en fonction de la durée d'application de la tension (figure III. 1).

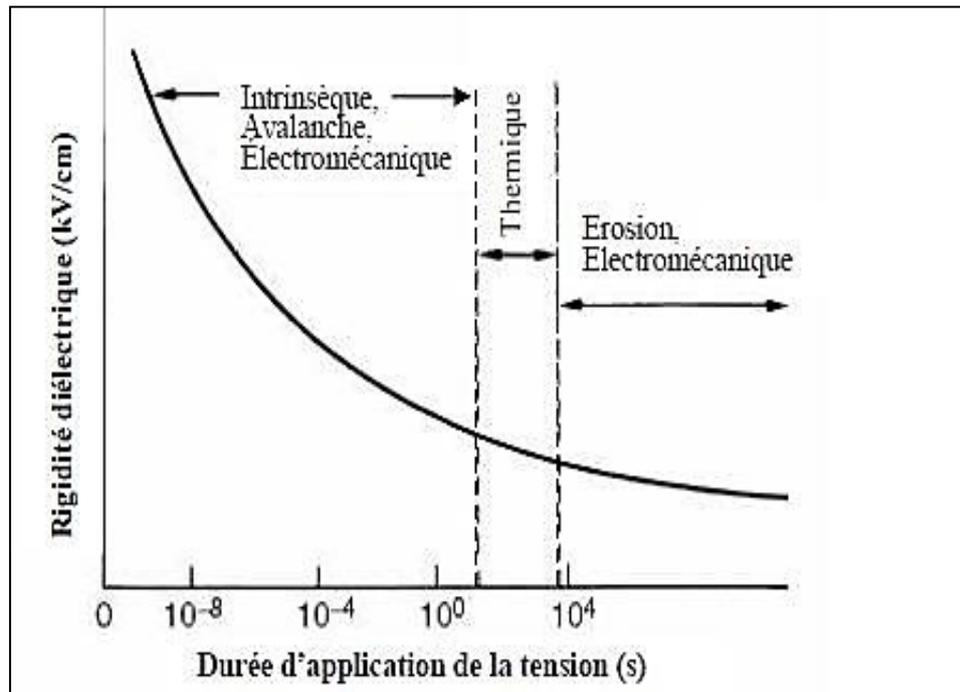


Figure III. 1. Différents types de claquage des isolants solides [22]

### III.3 Mécanisme de décharge dans le gaz

Le claquage des gaz dépend principalement de la nature des gaz diélectriques et de la polarité de l'électrode dans laquelle le claquage a commencé. Si le claquage de la cathode commence, l'apport d'électrons élémentaires provient de l'électrode elle-même, ce qui conduit à son accélération et donc à un claquage. Cependant, si le claquage commence au niveau de l'anode, l'alimentation en électrons élémentaires se fait par le même gaz que l'air et le gaz SF<sub>6</sub>. Une petite pointe pointue dans le gaz peut également être la cause de la décharge de l'espace de gaz, cela se produit à la suite de processus de claquage étape par étape. Il s'agit en fait d'une courte libération d'énergie (décharge) et se traduit par de faibles canaux de gaz ionisés. Lorsque le champ est très élevé.

### III.3.1 Amorçage de l'air par avalanche primaire [40]

Ce type de claquage ne peut pas être trouvé dans des champs homogènes, donc on peut avoir ce type de claquage dans les champs non homogènes (aiguilles, fils fins). Il peut également se produire de claquage lors de l'application de haute tension continue et de tension alternative à fréquence industrielle.

Après l'application champ électrique, les électrons sont accélérés par celui-ci pour produire d'autres électrons par des collisions, qui à leur tour acquièrent par le champ électrique assez d'énergie pour ioniser d'autres atomes, et ainsi de suite, et le nombre d'électrons libres continuera à augmenter comme il continuera à se déplacer sous l'action du champ électrique. La quantité d'électrons et d'ions positifs produits de cette façon s'appelle une avalanche électronique. C'est ce phénomène, qui provoque un accroissement exponentiel de la densité de charge électronique lorsqu'on s'éloigne de l'électrode sous tension. Le claquage donc aura lieu du fait du phénomène d'avalanche (Fig. III. 2)

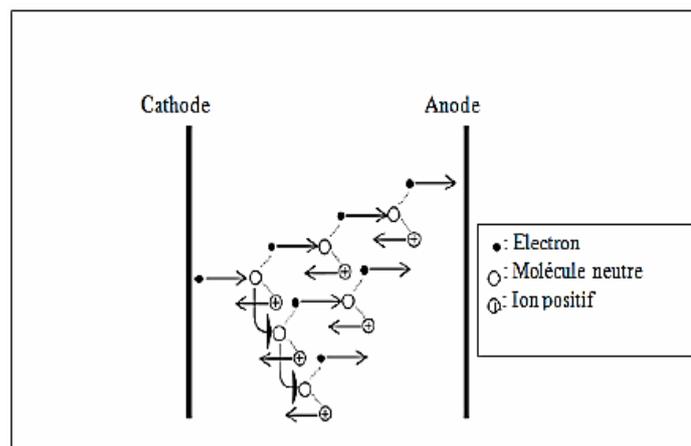


Figure III.2. Amorçage de l'air par avalanche primaire

### III.3.2 Claquage de l'air par streamer

Ce type de claquage est lié à la tension impulsionnelle, cette dernière étant appliquée dans le temps de front TF allant de 100 à 1000 $\mu$ s. Cela provoque des avalanches électroniques créées dans l'intervalle d'air interélectrode atteignent leur taille critique de telle sorte que les streamers prennent naissance dans l'espace d'air et progressent vers les électrodes. Si le champ résultant dépasse celui des streamers ( $ES_{\pm}=4$  à 5kV/cm), les streamers se multiplient et peuvent se propager jusqu'à contact du plan mis à la terre. A ce moment-là, du fait de la contribution de l'électrode à la terre phénomène. La forte densité de courant engendrée au niveau de l'électrode sous tension provoque la thermo-ionisation.

## Chapitre III : Mécanismes de décharges électriques

Ce phénomène donne naissance à un leader instable se développant dans l'intervalle d'air considéré., et un arc se forme résultant de la conduction de l'amorce entre les deux électrodes, ce qui se traduit par la circulation d'un courant de court-circuit.

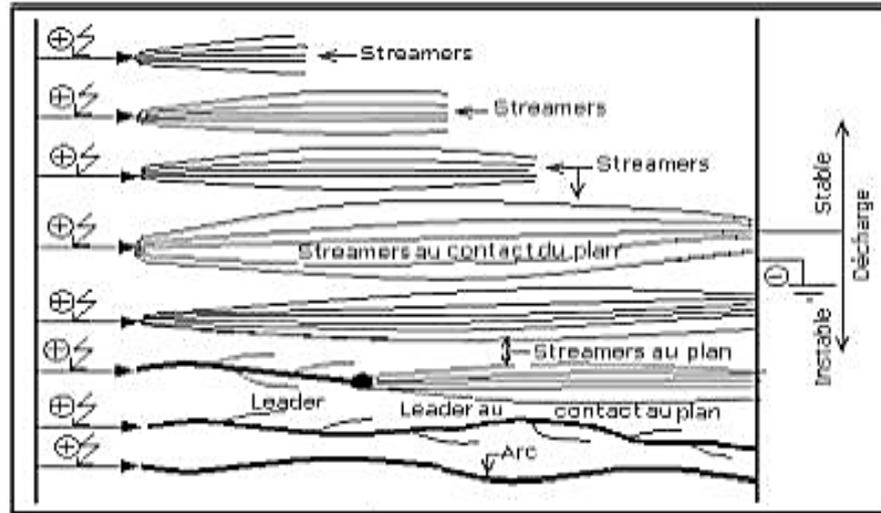
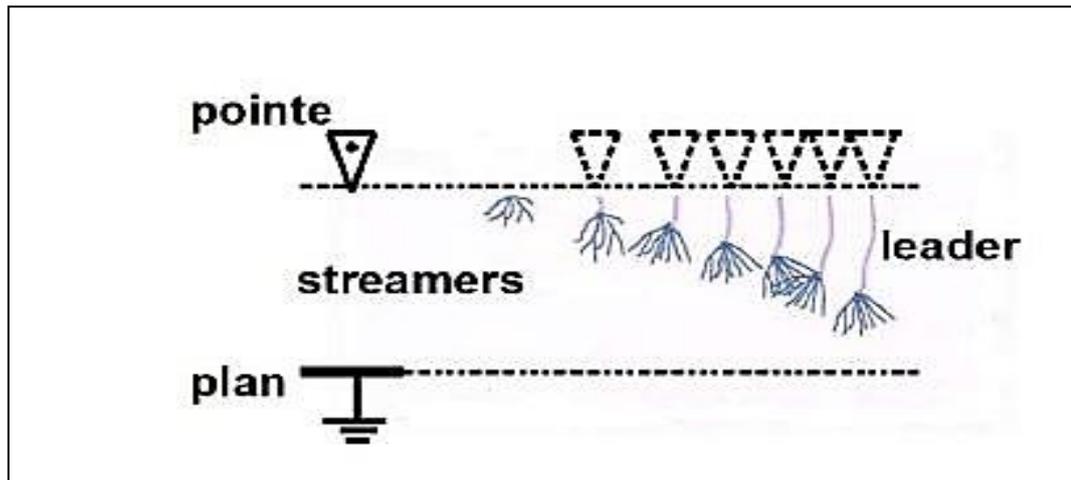


Figure III.3. Claquage de l'air par streamer

### III.3.3 Disruption de l'air par leader

Grâce à des observations expérimentales, il a été constaté que le leader a l'aspect d'un filament de trajet irrégulier (soit tortueux), il se propage souvent dans une direction faisant un certain angle par rapport à la direction du champ appliqué [41].

La vitesse de sa propagation dépend principalement de la géométrie de l'espace et de la tension appliquée, A la tête du canal de leader, une couronne de streamers se présente comme une décharge volumineuse de structure filamentaire qui ionise l'air au front du canal. C'est le mécanisme selon lequel le courant circulant dans la décharge qui se développe, entretient ou modifie la distribution du champ électrique dans l'espace [42]. Les filaments de couronnes ont une origine commune au niveau de l'électrode à partir de laquelle sont émis tous les streamers. Ce point de rencontre des streamers est appelé « stem cathodique ». Son évolution en leader négatif s'explique de la même manière que pour le leader positif dans le cas d'une pointe de polarité négative.



**Figure III.4.** décharge électrique par type leader

La naissance d'un leader peut avoir lieu sans la contribution de l'électrode opposée. Dans ce cas le leader est stable et c'est au niveau du long intervalle d'air, Dès que les streamers issus de la tête du leader atteignent l'électrode opposée, dans ce cas le leader devient instable. Ce processus peut ressembler à processus précédente, et nous pouvons le voir à travers la (figure III.4) .

### III.4 Décharge électrique dans liquide

Les décharges dans les liquides diélectriques sont des décharges partielles; par conséquent, la rigidité diélectrique dans un liquide est liée aux propriétés physiques du fluide, à la force de tension appliquée, à la valeur d'impulsion et à la durée, la géométrie des électrodes et à la distance entre elles. Le phénomène de claquage dans un liquide est plus complexe que celui des gaz, car de nombreux processus physiques peuvent se produire simultanément et dépendent de processus de volume et de processus intermédiaires.

Les processus volumiques sont généralement liés à la nature du liquide (nature des molécules, résistivité, polarité, etc.)[43] tandis que les processus interfaciaux dépendent de la nature des interfaces présentes (interface électrode-liquide, plasma-liquide et électrode-plasma).

Le mécanisme de claquage dans les liquides peut être classé en trois types:

- Le claquage par les bulles ;
- Le claquage par les particules en suspension;
- Le claquage par streamer ;

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons mis en lumière le phénomène des décharges électriques dans divers milieux isolants (gaz, liquide et solide), car il a été constaté que l'application d'un champ électrique sur ces isolateurs implique l'apparition du phénomène de claquage électrique, ce phénomène est le résultat d'apparition et de développement d'un arc électrique dans les isolants électrique misent sous contrainte de tension de nature quelconque.

# **Chapitre IV**

Interprétation des résultats de  
simulation

### **IV.1. Introduction**

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté une analyse du comportement des surfaces isolantes sous la présence des décharges électriques. Dans ce chapitre, est présenté un modèle qui permet de mettre en évidence le phénomène de contournement des isolations et d'évaluer l'impact de la variation des divers paramètres sur la fiabilité de l'isolation en verre, ainsi que l'apparition et la propagation des décharges électriques parallèles et séries, évoluant sur une isolation en verre uniformément polluée, sous contrainte de tension continue positive.

Jusqu'à présent, il n'existe aucune norme permettant de standardiser l'étude du comportement des surfaces isolante soumises à un champ électrique. Les dispositifs expérimentaux et la simulation ainsi que les conditions d'essais varient d'une équipe de recherche à une autre. Le but de la simulation suivante est de caractériser la réponse de la surface isolante hydrophile en verre sous un champ électrique. En particulier, l'effet de la variation du rayon de courbure des électrodes, ainsi que les conditions de contournement de l'isolation avec et sans la présence de la couche de pollution. L'étude a été réalisée avec un modèle d'isolateur plan réalisé dans le logiciel COMSOL Multiphysics.

### **IV.2. Modèle de simulation**

#### **IV.2.1. Description du logiciel**

Nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics 5.0, ce dernier est un logiciel de simulation polyvalent utilisé pour la modélisation de designs, de dispositifs et de procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la production et de la recherche scientifique. En plus d'utiliser la modélisation multiphysique pour des divers projets, à l'aide de ce dernier nous pouvons également transformer nos modèles en applications de simulation et en jumeaux numériques pour d'autres équipes de conception, pour des départements de production, laboratoires de test, et plus encore.

Ce logiciel est un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis. Développé initialement comme une TOOLBOX de MATLAB, et il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement. Nous avons choisi ce logiciel pour les raisons suivantes :

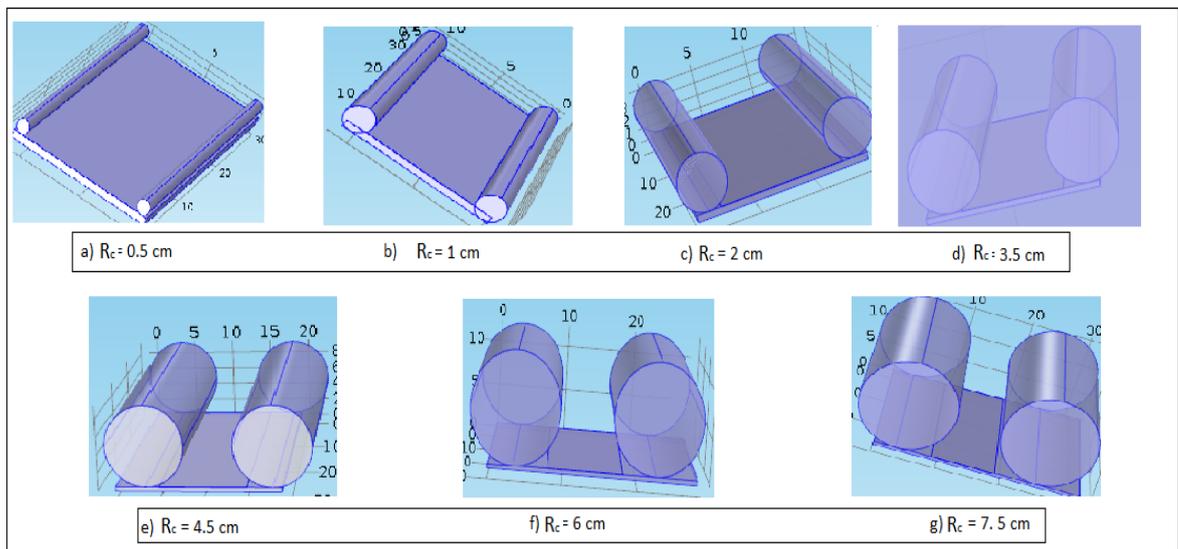
- La facilité de modélisation des surfaces conductrices minces ;
- La résolution des problèmes électromagnétiques ;
- La possibilité de prendre en considération de nombreux diélectriques ;

## Chapitre IV : Interprétation et résultats de simulation

- La modélisation sous régime statique ou temporelle.

### IV.2.2. Description du modèle

Le modèle réalisé est constitué d'une surface isolante en verre de forme rectangulaire, sur cette dernière sont déposées deux électrodes de forme cylindrique, avec des dimensions variables (0.5, 1, 2, 3.5, 4.5, 5, 6, 7.5 cm) (Figures IV.1 et IV. 2). De plus, une couche de pollution uniforme très fine de forme rectangulaire a été aussi dessinée dans l'espace interélectrode, celui-ci est gardé fixe pour tous les simulations, il est de l'ordre de 10 cm. Le potentiel électrique appliqué à la première électrode est de nature continue de l'ordre de 36 kV, par contre, la deuxième électrode est mise au potentiel nul (0 V). La simulation a été réalisée sous deux sortes de dimensions 2D et 3D.



**Figure IV. 1.** Configurations des électrodes

L'étude exploitée dans ce travail est réalisée sur la base d'une autre expérimentale effectuée auparavant dans la référence [44], dans la figure 2 sont présentées les électrodes en fer réalisées dans le laboratoire LGEB de l'université de Bejaia.

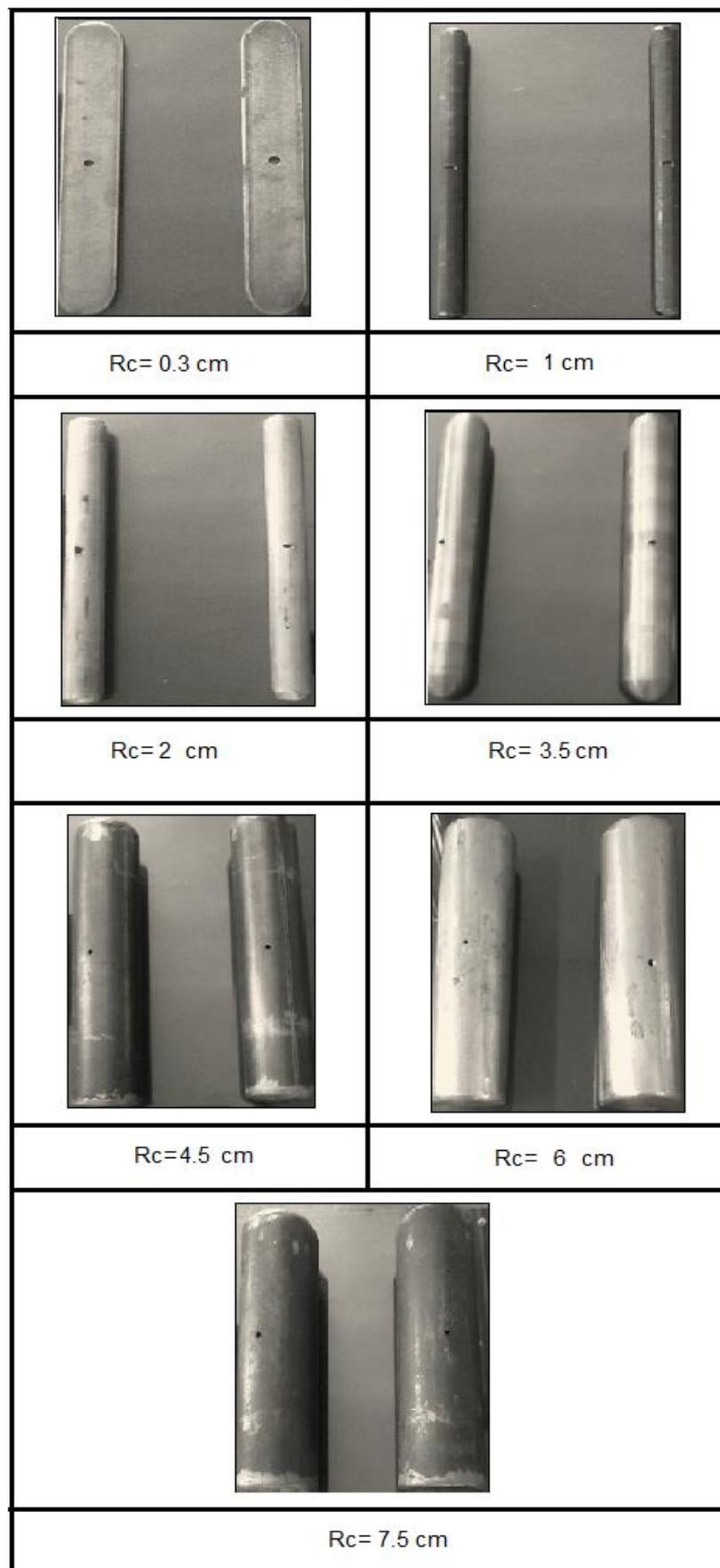


Figure IV. 2. Différentes électrodes avec rayon de courbure variable [44]

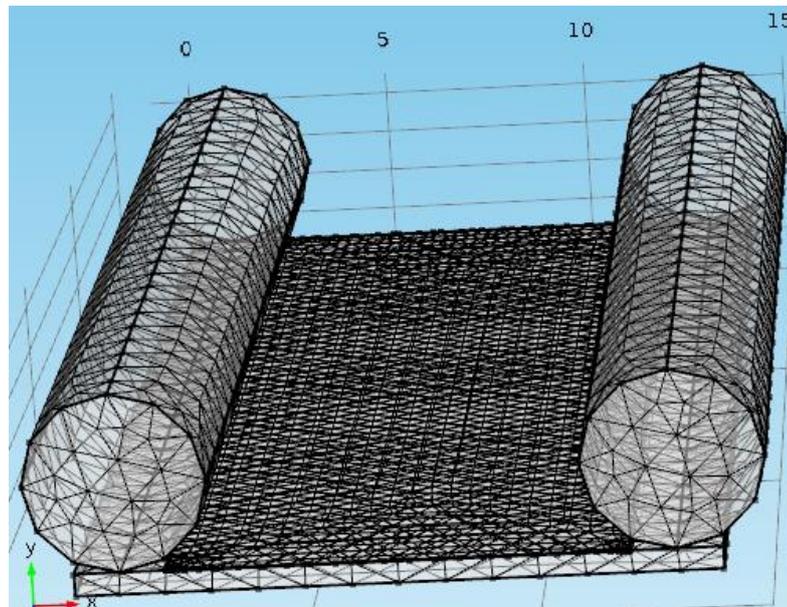
## Chapitre IV : Interprétation et résultats de simulation

Le tableau suivant résume les différentes dimensions des géométries présentées dans le modèle.

**Tableau IV. 1.** Propriétés des matériaux utilisés pour la modélisation de l'isolation hydrophile

Domaine	Dimensions	Conductivité $\sigma$ (S/m)	Constante diélectrique relative $\epsilon_r$
Isolation en Verre	12 cm de longueur, 0.5 cm d'épaisseur	1e-14	4.2
Electrodes en cuivre	0.5, 1, 2, 3.5, 4.5, 5, 6, 7.5 cm	5.998e7	1
Couche de pollution	10 cm de longueur, 0.01 cm d'épaisseur	3e-3	81
Air	20 cm de longueur	0	1

La discrétisation en éléments finis de type tétraèdre durant la phase du maillage des domaines étudiés, est étape très importante avant de passer à l'étude. Le rôle du raffinement est d'améliorer la précision des résultats de simulation calculés (Figure IV. 3), il est aussi réalisé pour augmenter le nombre d'éléments de maillage le long de la surface de l'isolant.



**Figure IV. 3.** Maillage du modèle pour  $R_c = 2$  cm

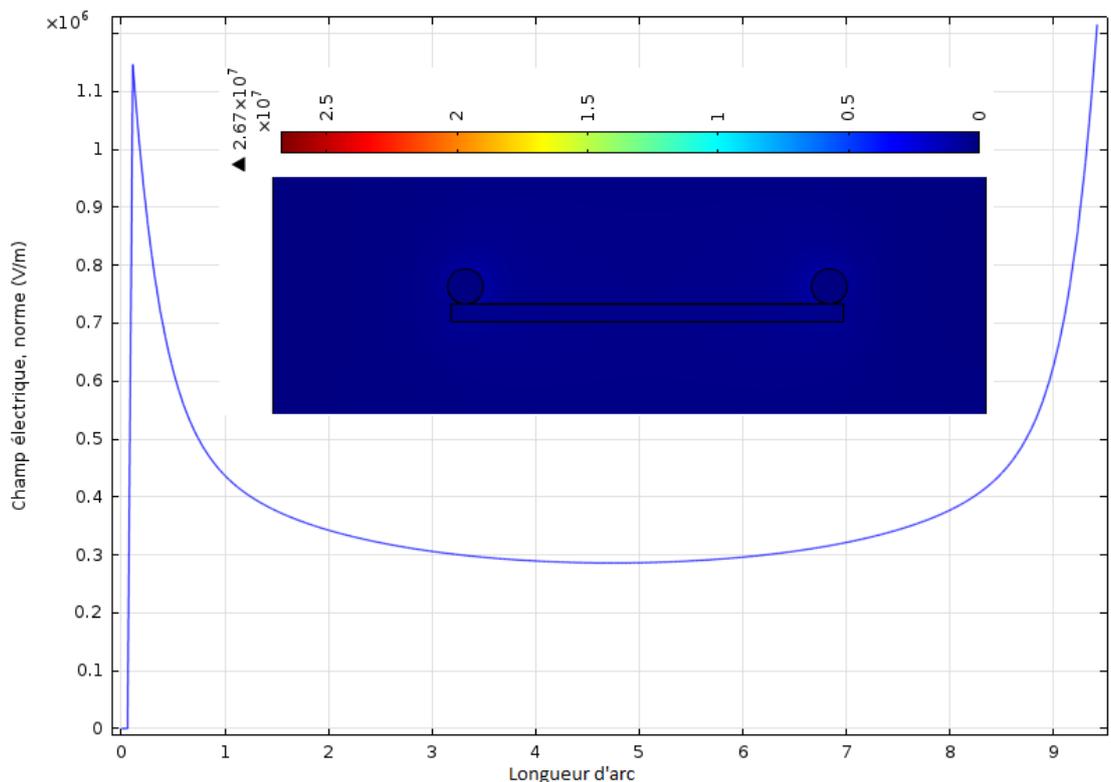
### IV.3. Résultats et discussions

#### IV.3.1. Distribution du champ électrique

Pour comprendre le comportement d'une isolation hydrophile contaminée, nous avons fait une analyse de la distribution du champ électrique au niveau de l'espace interélectrode.

Deux positions des points de simulation ont été choisis dans le cas des grands rayons de courbure, afin de bien distinguer la différence entre les différents rayons.

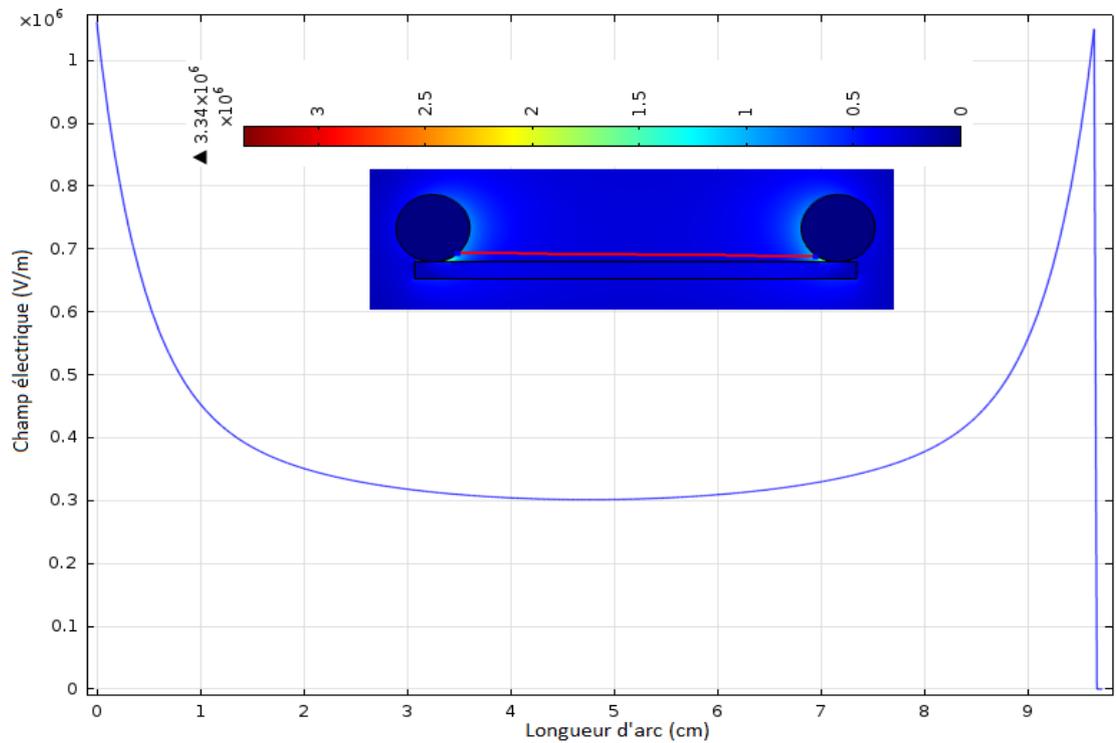
La figure IV. 4 illustre la distribution du champ électrique sur l'isolation pour le rayon de courbure le plus faible  $R_c = 0.5$  cm. On remarque que le champ électrique est très intense à proximité des électrodes sous tension et mise à la terre donc il atteint sa valeur maximale aux points triples électrode- solide diélectrique- air, ce qui est traduit par l'apparition des décharges électriques en parallèle qu'elles développent en série les unes vers les autres, par contre la valeur de celui-ci est plus faible dans le centre de l'espace interélectrode. Il est à signaler que la valeur de l'intensité du champ électrique est plus grande dans le côté HT que dans le côté terre.



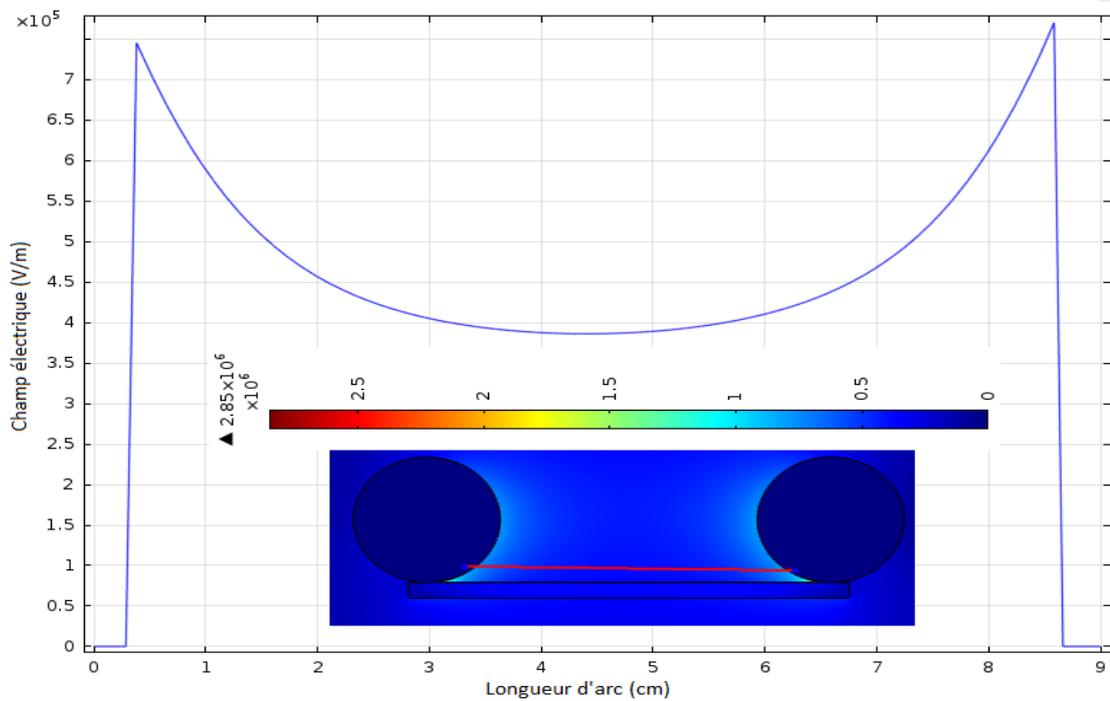
**Figure IV. 4.** Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour  $R_c = 0.5$  cm

## Chapitre IV : Interprétation et résultats de simulation

Les figures IV. 5, 6, 7, 8, 9, 10 illustrent les résultats obtenus pour les rayons 1, 2, 3.5, 4.5, 6, 7.5, la distribution du champ électrique est simulée au niveau de la surface isolante contaminée avec une hauteur faible ( $y = 0.75$  cm).

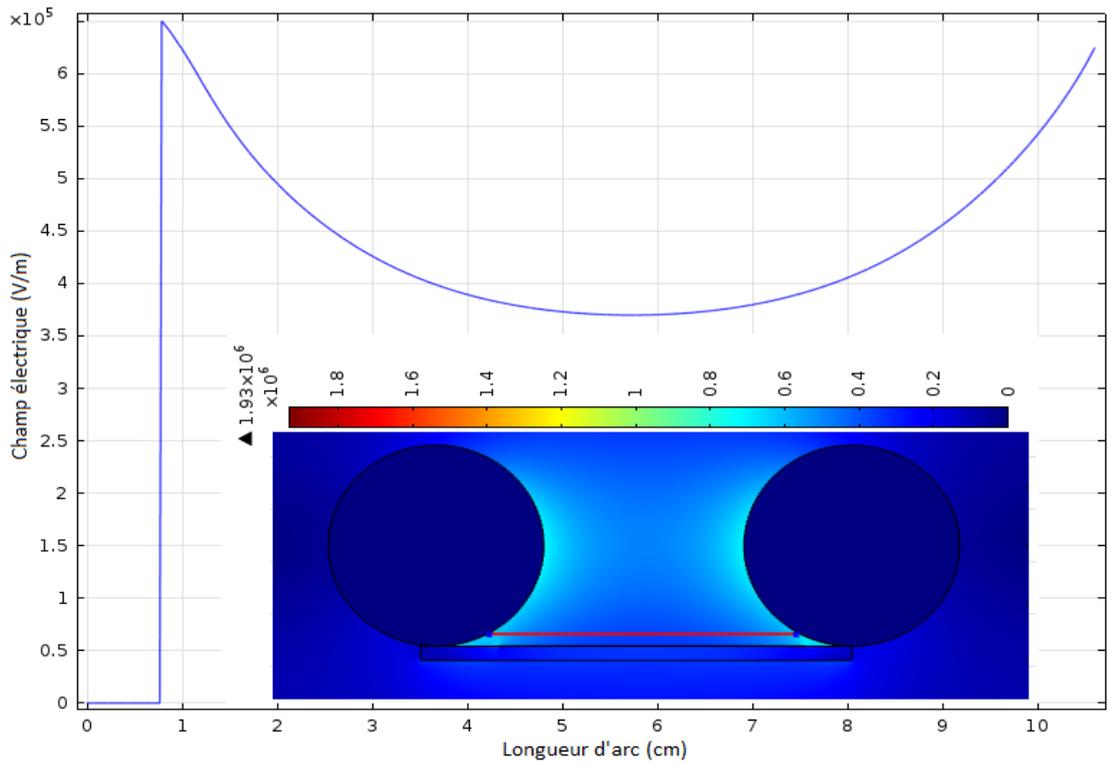


**Figure IV. 5.** Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour  $R_c = 1$  cm

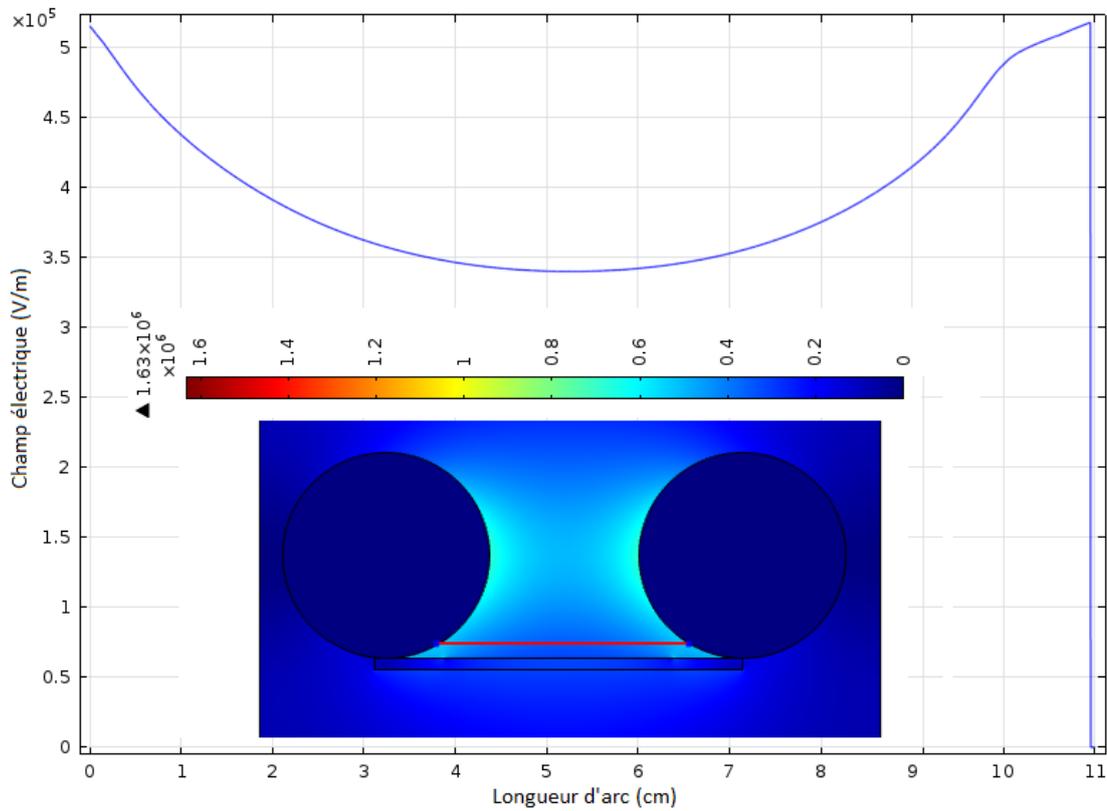


**Figure IV. 6.** Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour  $R_c = 2$  cm

## Chapitre IV : Interprétation et résultats de simulation



**Figure IV. 7.** Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour  $R_c= 3.5$  cm



**Figure IV. 8.** Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour  $R_c= 4.5$  cm

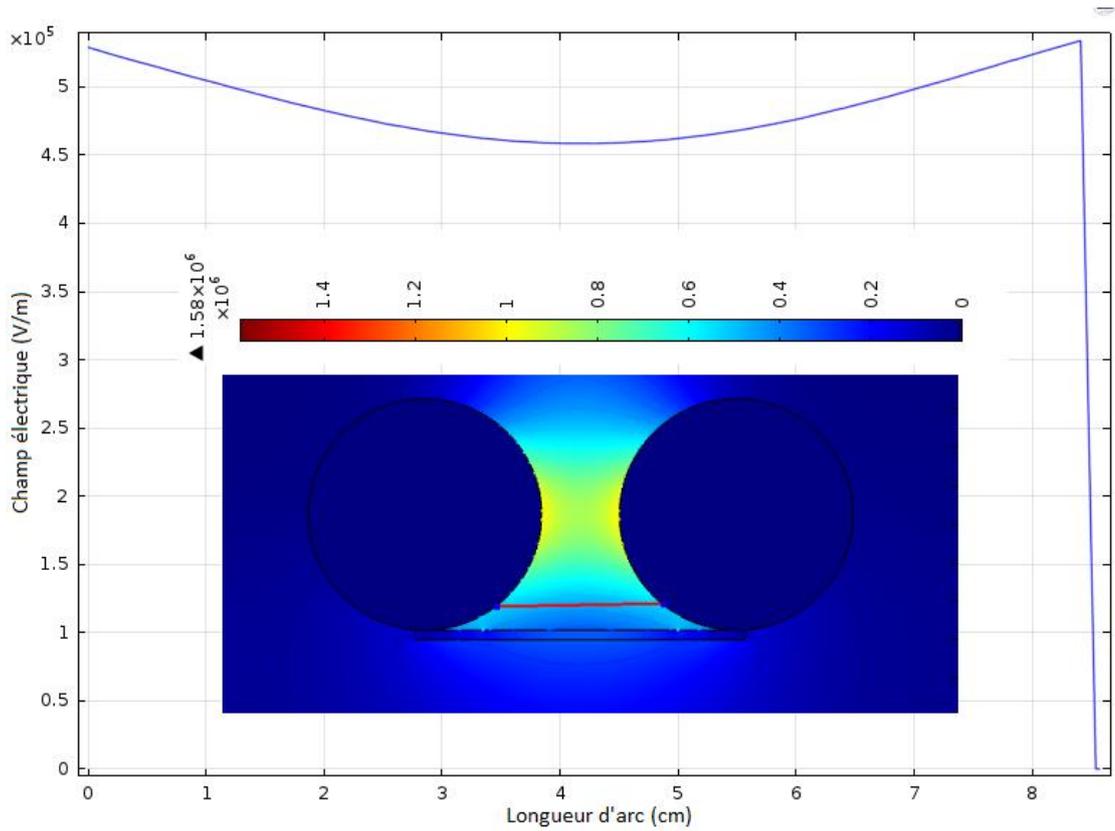


Figure IV. 9. Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour  $R_c= 6$  cm

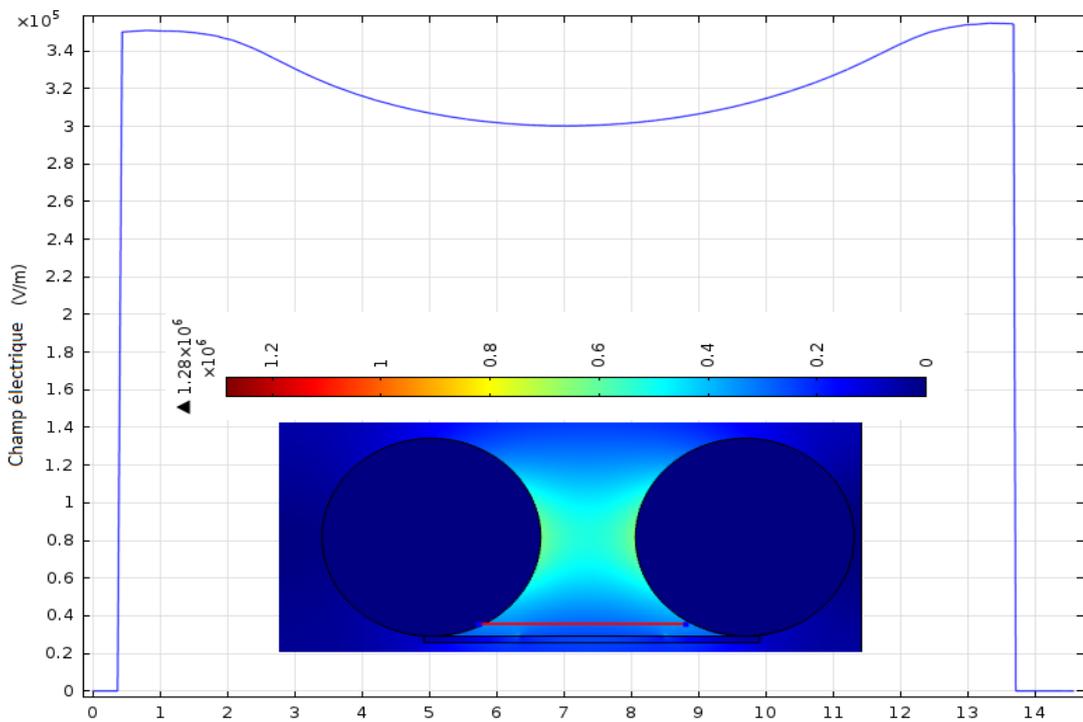
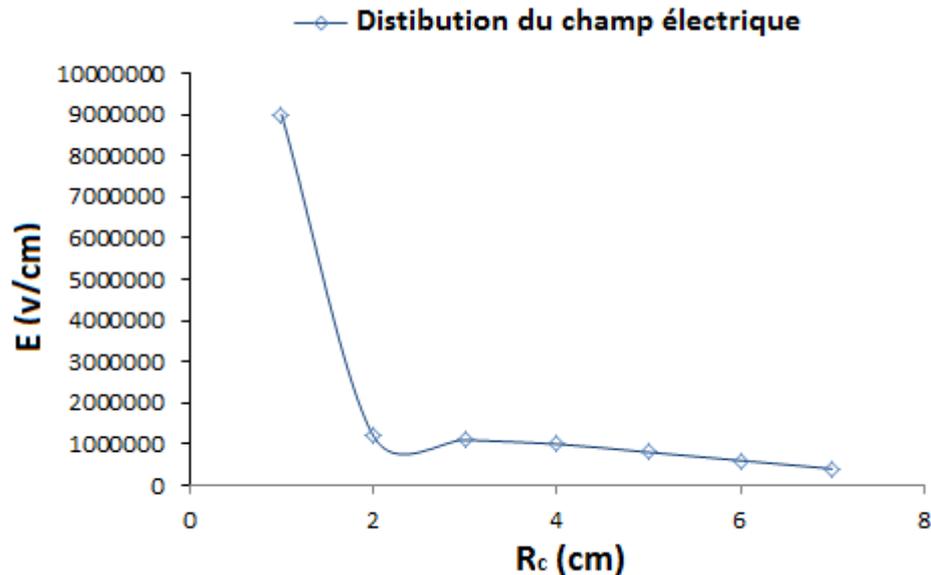


Figure IV. 10. Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour  $R_c= 7.5$  cm

## Chapitre IV : Interprétation et résultats de simulation

Il en résulte la décroissance de la concentration du champ électrique en fonction d'élévation de la courbure des électrodes, aux points triples électrode- solide diélectrique- air (Figure IV. 11).



**Figure IV. 11.** Champ électrique en fonction de  $R_c$  (cm)

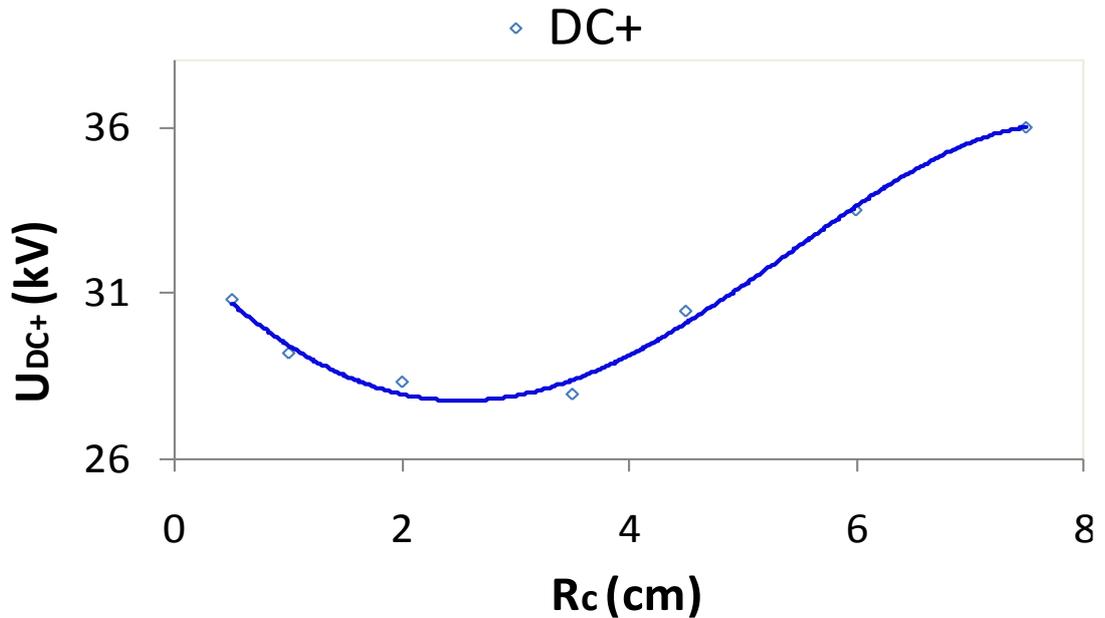
La décroissance du champ électrique peut être expliquée par l'effet de pointe, plus le rayon de courbure est faible, plus l'accumulation de charge est forte, et donc plus le champ électrique créé par ces charges est important.

Ce résultat est déjà confirmé expérimentalement par la référence [44], la courbe d'évolution de la tension de contournement de l'isolation en verre uniformément contaminée en fonction de la croissance du rayon de courbure des deux électrodes est illustrée par la figure IV. 12. Elle indique une diminution de la valeur de la tension positive de contournement en fonction de l'élévation du rayon de courbure des électrodes jusqu'à une valeur limite qui correspond à un rayon de courbure de l'ordre de  $R_c = 3.5$   $cm$ . A partir de celle-ci la performance électrique de l'isolation augmente de nouveau.

La décroissance de la tension de contournement dans la première partie peut être expliquée par le fait que le point de naissance des décharges électriques n'est pas le même, comme il est montré sur la figure IV.13. Plus le rayon de courbure des électrodes est grand plus la hauteur entre la surface polluée et le point d'initiation de l'arc électrique est grande. Il est à souligner que pour un rayon de courbure égale à 0.3  $cm$ , les décharges électriques parallèles prennent naissance au voisinage des électrodes sous tension et terre après l'assèchement de la

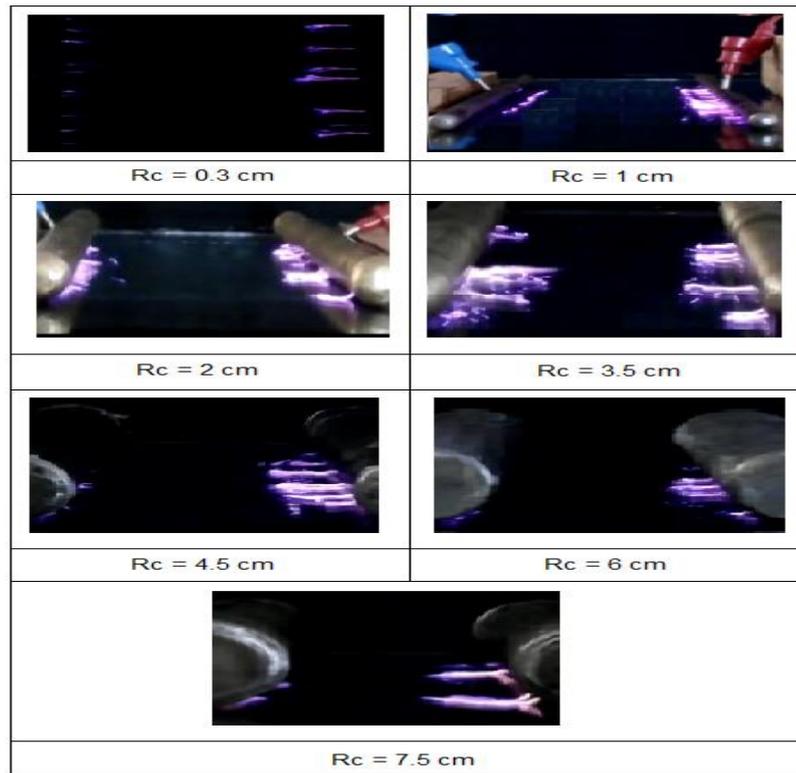
## Chapitre IV : Interprétation et résultats de simulation

couche de pollution par le passage du courant électrique dans celle-ci. Ce qui n'est plus le cas pour le reste des rayons de courbures (2, 3, 4.5 cm). Nous observons l'absence de zones sèches après le court-circuit de l'isolation [12]. Dans ce cas la décharge électrique glisse sur la surface en formant une courbure. Cette dernière augmente avec l'élévation du rayon des électrodes [44].

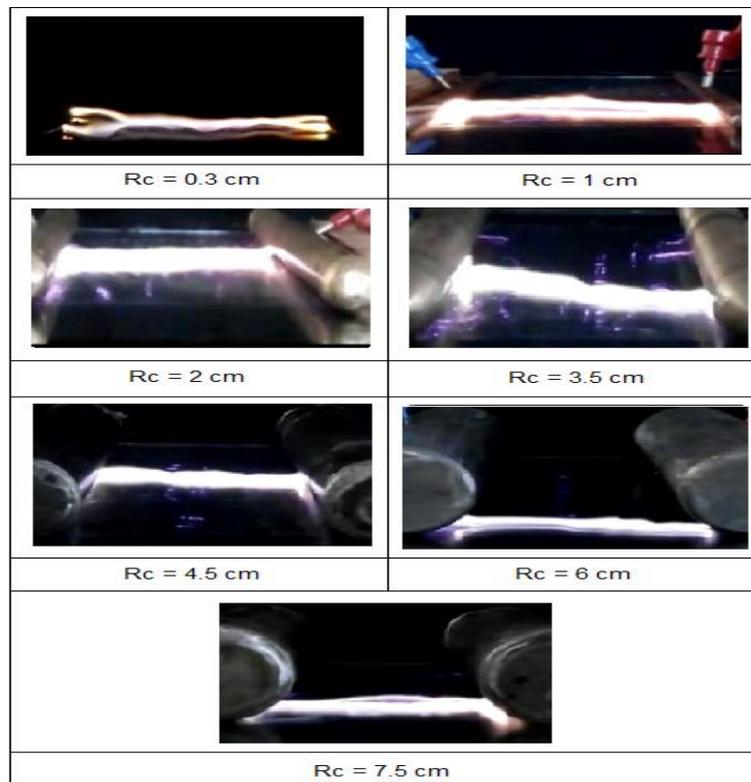


**Figure IV. 12.** Tension de contournement positive en fonction du rayon de courbure des électrodes

Par contre, à partir de la limite  $R_c = 3.5$  cm la tension commence à s'accroître ce qui se traduit par un changement dans le trajet choisi par l'arc qui court-circuite l'isolation en verre, puisque la connexion entre la décharge positive émanant du côté HT et celle négative du côté terre s'effectue à travers un chemin plus long ce qui implique l'augmentation de la tension de contournement comme il est souligné pour les rayons de courbures supérieure à 3.5 cm (Figure IV. 14) [44]. Cette dernière partie a été étudiée sous Comsol on change le  $y$  d'une valeur faible mentionnée auparavant à une valeur plus grande qui correspond le point milieu des électrodes on prenant en considération le rayon de ces dernières.



**Figure IV. 13.** Effet du rayon de courbure des électrodes du système sur l'initiation des décharges électriques parallèles et séries



**Figure IV. 14.** Chemin de contournement de l'isolation pour différents rayons de courbure des électrodes

## Chapitre IV : Interprétation et résultats de simulation

Il est à souligné que plus le rayon de courbure est grand plus les lignes du champ du côté HT se rapprochent à celle du côté terre, et malgré la distance interélectrode est gardé toujours fixe ( $L_f = 10$  cm), on remarque que la distance au milieu de ces électrodes se diminue en fonction de l'élévation du rayon, ce qui implique l'apparition des décharges électriques dans l'air (sans passer par la surface polluée). De plus, la distribution du champ électrique au niveau des électrodes dans ce niveau est plus intense figures IV.15, 16, 17, 18, 19, 20.

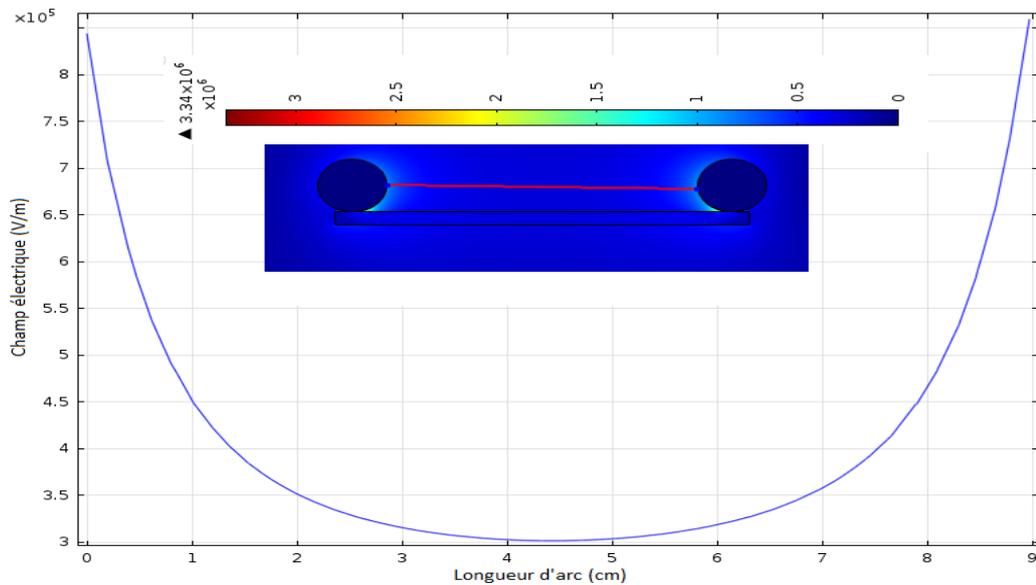


Figure IV. 15. Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour  $R_c = 1$  cm

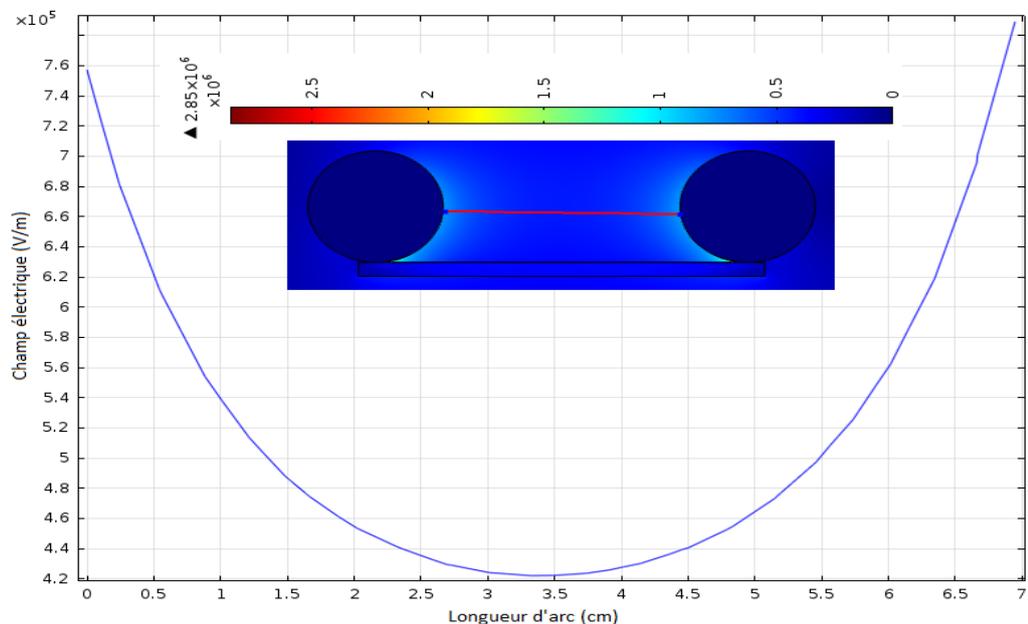
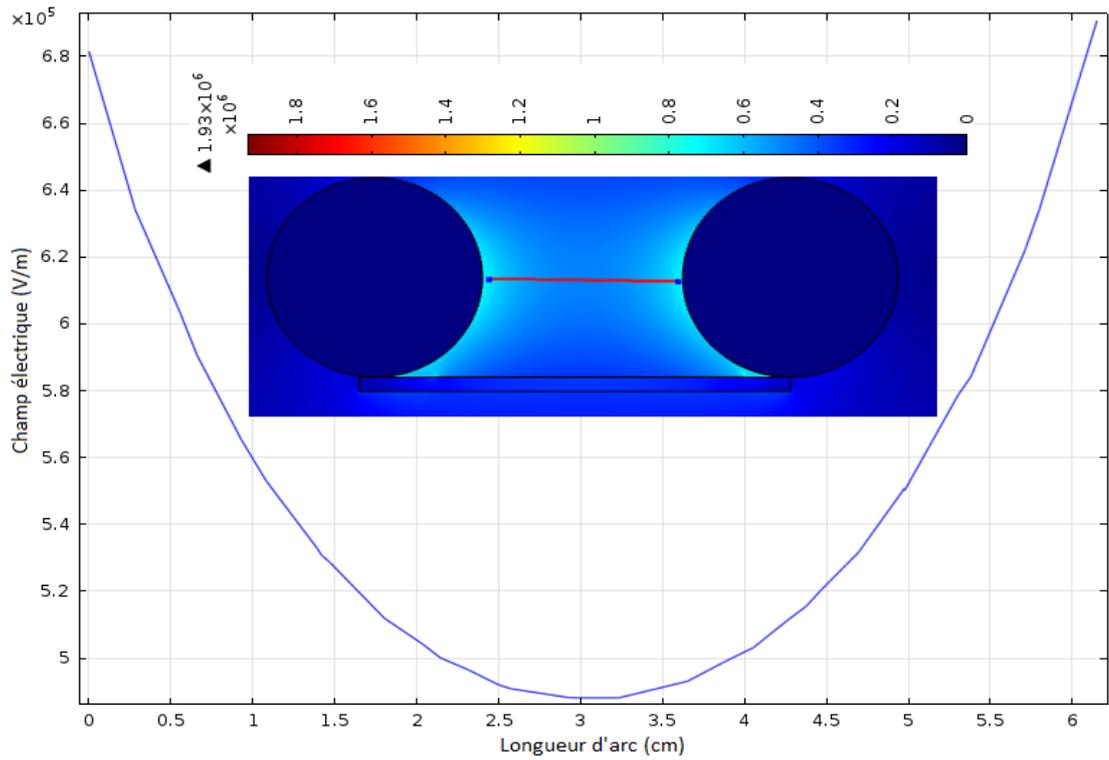
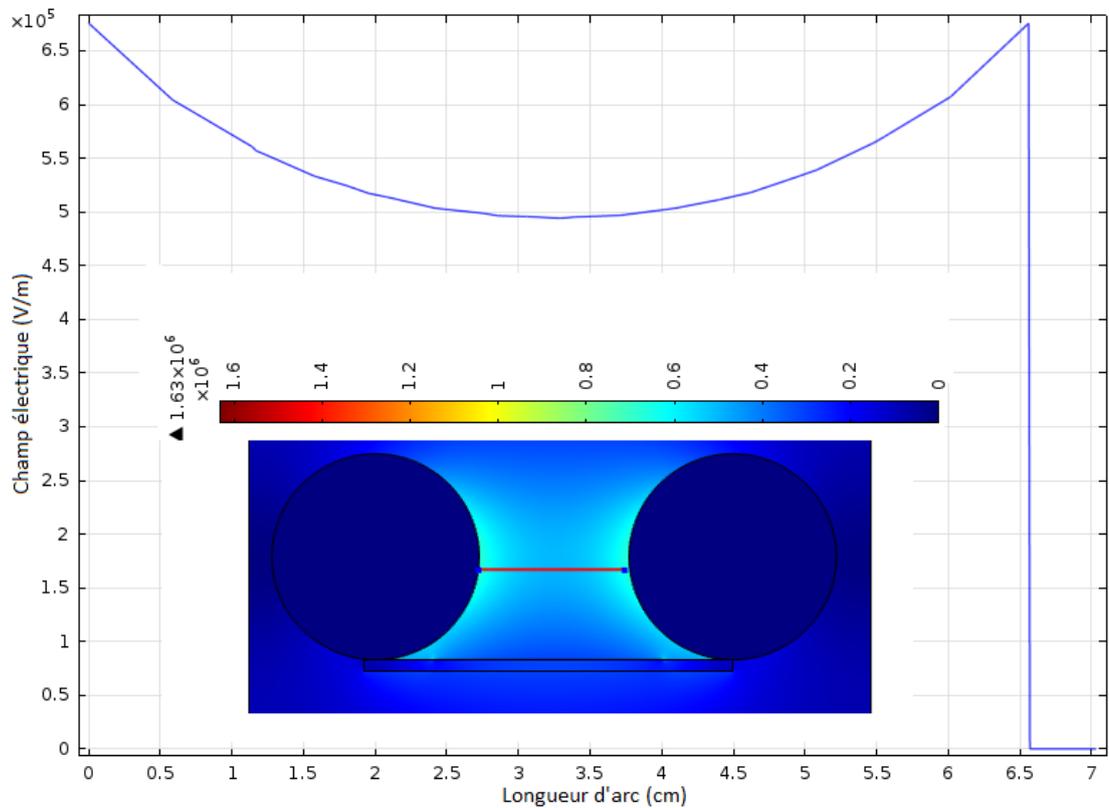


Figure IV. 16. Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour  $R_c = 2$  cm

## Chapitre IV : Interprétation et résultats de simulation



**Figure IV. 17.** Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour  $R_c = 3.5$  cm



**Figure IV. 18.** Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour  $R_c = 4.5$  cm

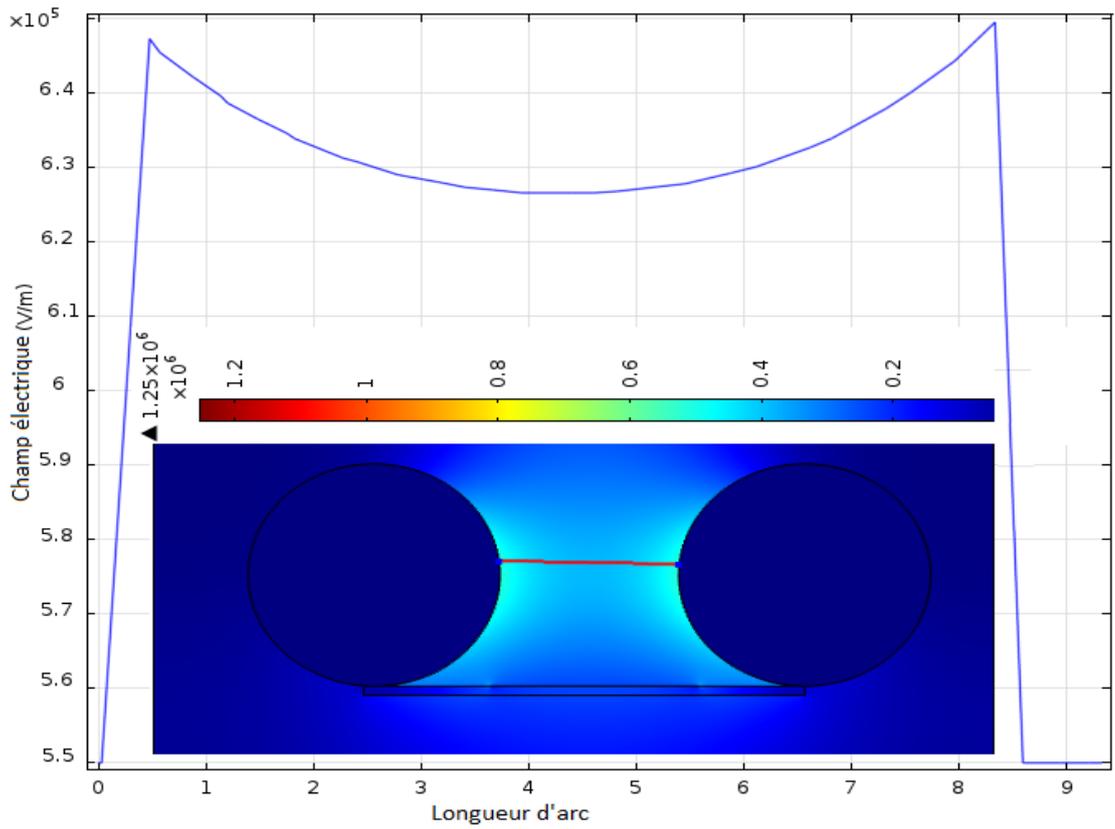


Figure IV. 19. Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour  $R_c = 6$  cm

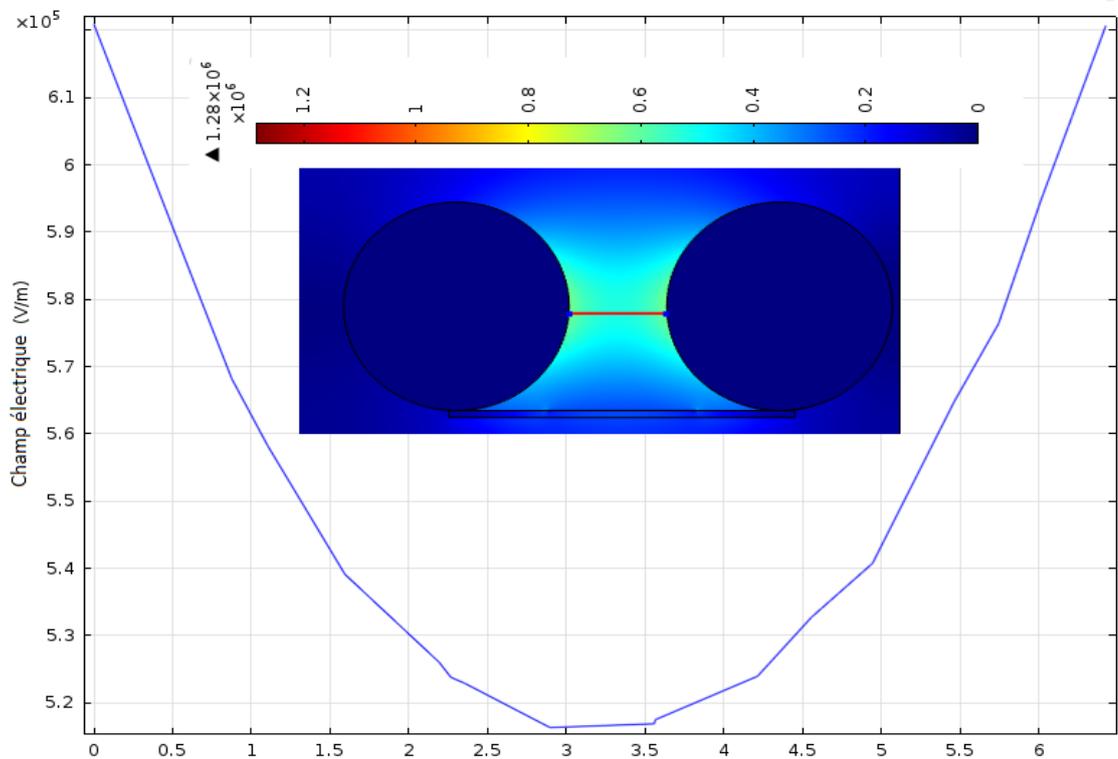


Figure IV. 20. Distribution du champ électrique sur l'isolation hydrophile pour  $R_c = 7.5$  cm

## Chapitre IV : Interprétation et résultats de simulation

La figure IV.21 montre la caractéristique du champ électrique en fonction de l'augmentation du rayon de courbure pour une hauteur des électrodes plus grande. Il en résulte une décroissance du champ électrique, ce qui facilite le court-circuit entre les électrodes dans l'air, puisque le point d'initiation de décharge électrique se change du point plus bas à un point plus haut des électrodes.

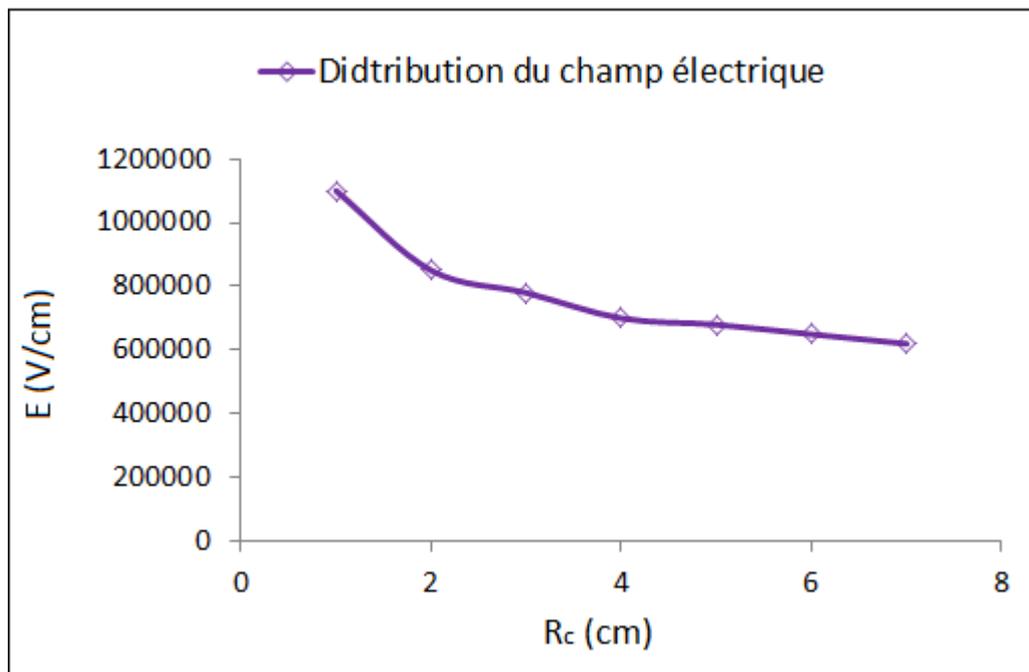
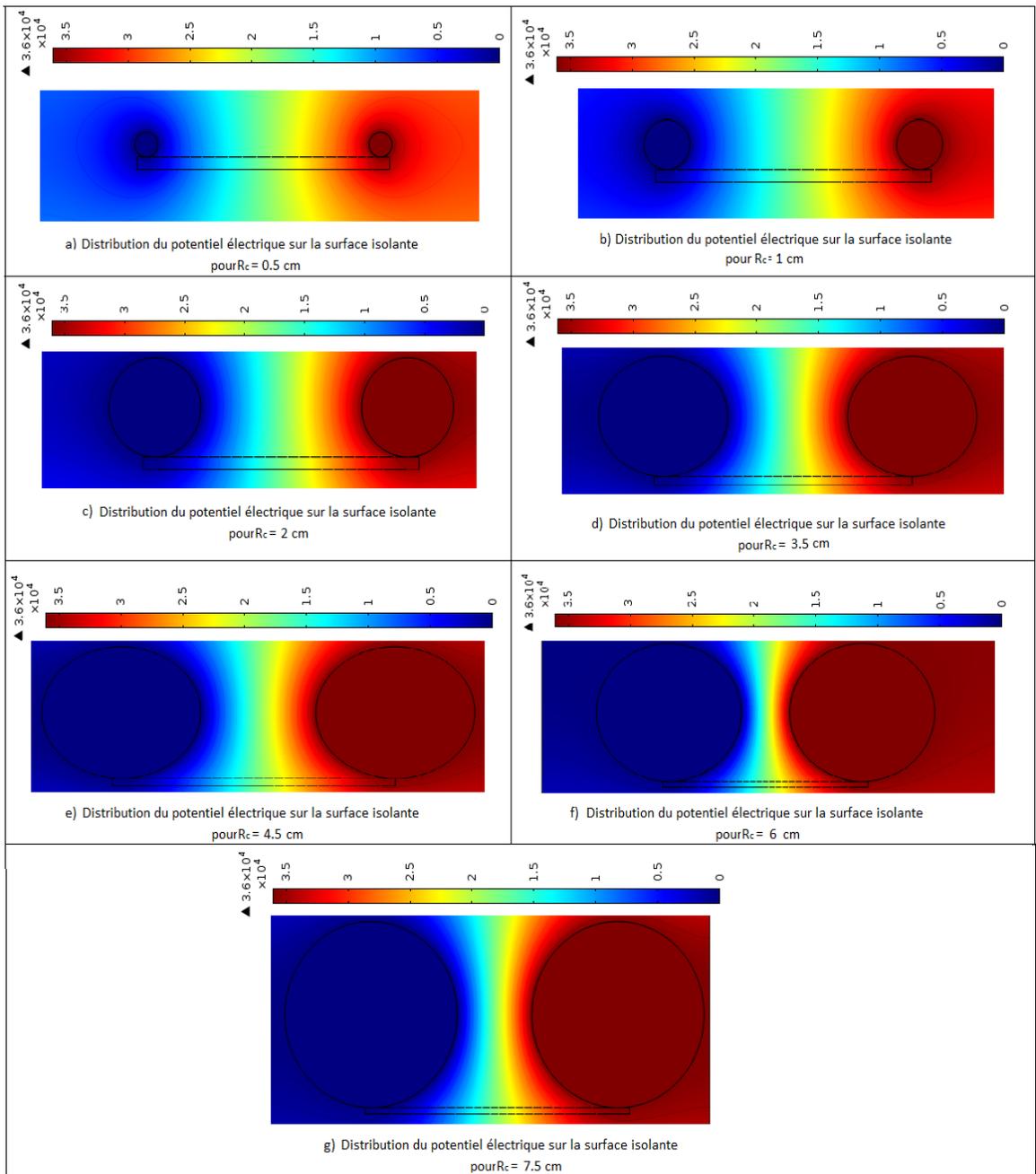


Figure IV. 21. Champ électrique en fonction de  $R_c$  (cm)

### IV.3.2. Distribution du potentiel électrique

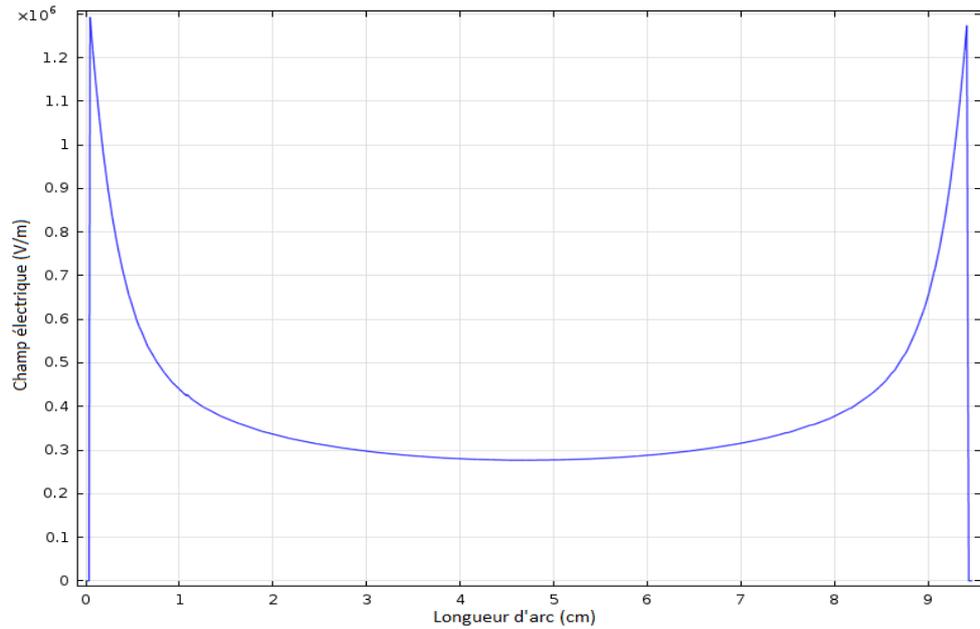
L'observation de la distribution du potentiel électrique à la surface isolante en verre polluée dans la figure IV. 22 montre clairement que la concentration du potentiel est importante au niveau de l'électrode sous tension ce qui n'est pas le cas au niveau de l'électrode à la terre. De plus, il est à souligner que la valeur du potentiel est indépendante du rayon des électrodes, celle-ci est de l'ordre de  $3.5 \times 10^4$  V au voisinage de l'électrode HT, les environs de 1.5 à 2.3 V au milieu de la ligne de fuite et entre 0 à 0.5 V à proximité de l'électrode terre.



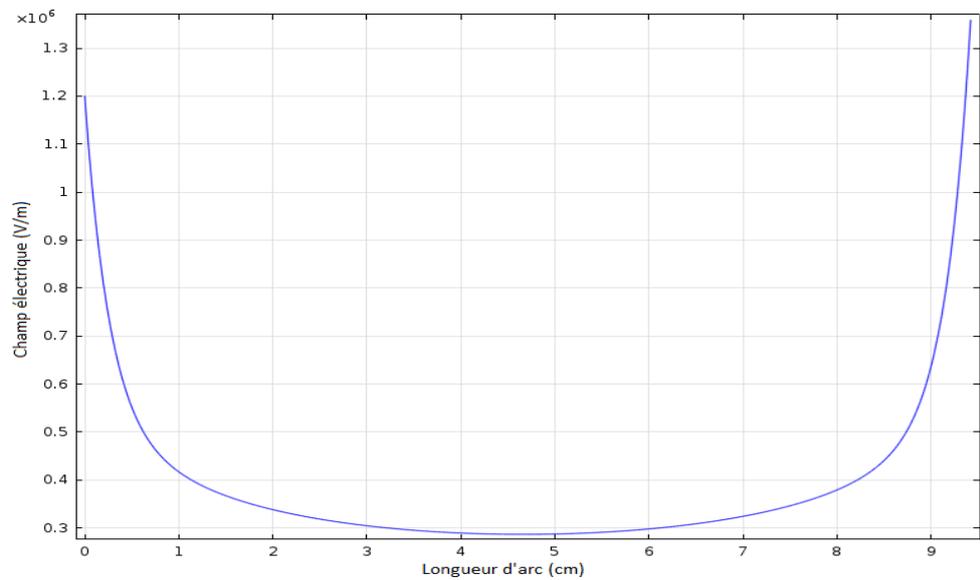
**Figure IV. 22.** Distribution du potentiel électrique pour les différents rayons de courbure

### IV.3.3. Effet de la conductivité électrique sur la distribution du champ électrique

Les résultats des modèles relatifs à l'estimation de la distribution des lignes du champ électrique à la surface isolante, pour des différentes conductivités électriques sont présentés dans les figures IV. 4, 23, 24, nous avons choisi trois valeurs de conductivité électrique, à savoir, 0, 3 et 20 mS/cm, pour un rayon de courbure de l'ordre de 0.5 cm.



**Figure IV. 23.** Distribution du champ électrique sur la surface isolante pour  $\sigma_v = 0$  mS/cm



**Figure IV. 24.** Distribution du champ électrique sur la surface isolante pour  $\sigma_v = 20$  mS/cm

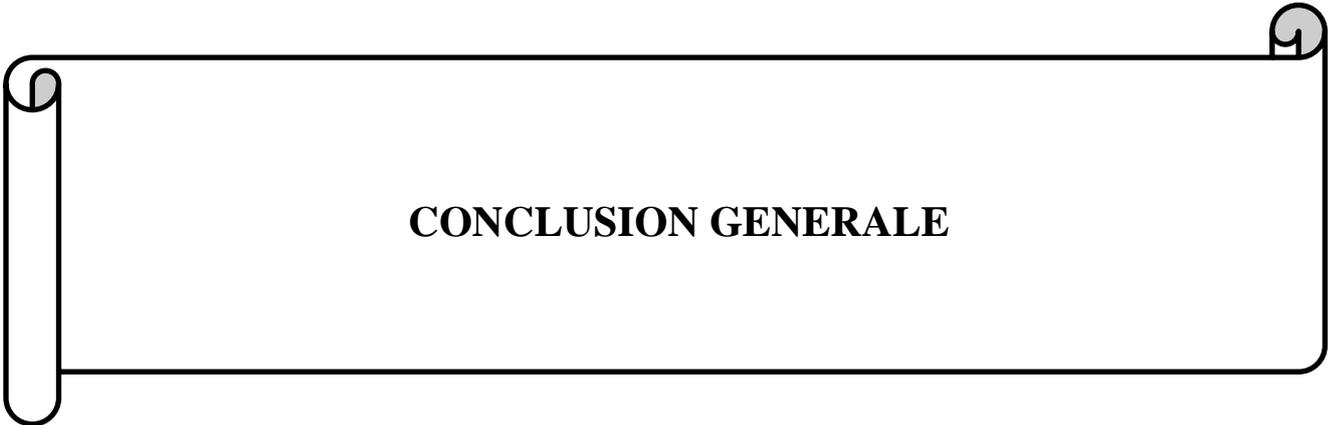
L'observation de la distribution du champ électrique à la surface du solide diélectrique montre que quoique ce soit la valeur la conductivité électrique de la couche de pollution recouvrant la surface de l'isolation hydrophile, la valeur du champ électrique reste toujours fixe, elle est de l'ordre de 0.3 V/cm au niveau de la surface.

### IV.4. Conclusion

Cette étude nous a permis de quantifier numériquement l'effet de la variation des rayons de courbure des électrodes sur la distribution du champ et du potentiel électrique. De plus, une comparaison avec des résultats expérimentaux a été effectuée.

A la lumière des résultats des essais effectués sur le modèle d'isolateur plan en verre sec ou contaminé soumis à un potentiel continu, les conclusions suivantes peuvent être retirés :

- Le modèle numérique développé dans notre étude nous a permis de bien analyser la répartition du champ électrique, aussi bien dans le cas sec que le cas polluée, les résultats ont montré des régions sur la surface de l'isolation où la contrainte électrique est très importante notamment au niveau des électrodes HT et terre, la concentration des lignes du champ électrique est plus élevée au voisinage de l'électrode HT que dans l'autre côté, ce qui implique l'échauffement de la surface et par conséquent, il0 facilite la formation des bandes sèches sur la lignes de fuite, et par résultats la propagation des décharges électrique sur l'isolation en verre.
- Il est à souligner aussi qu'à la surface d'une sphère, portée à un potentiel donné, le champ électrique et d'autant plus grand que le rayon de la sphère est plus petit, ceci est traduit par la décroissance de la valeur de l'intensité du champ électrique au fur et à mesure que le rayon de courbure des électrodes est grand.
- La conductivité électrique de la couche de pollution n'a pas un effet significatif sur l'amplification du champ électrique.
- La diminution du nombre de décharges électriques parallèles positives et négatives au fur et à mesure que le rayon de courbure est grand.
  - Plus le rayon de courbure des électrodes est grand plus l'intervalle du temps de naissance de décharges parallèles au voisinage de l'électrode terre est grand.
  - L'élévation du rayon de courbure des électrodes implique l'augmentation de la performance électrique de notre isolation.



**CONCLUSION GENERALE**

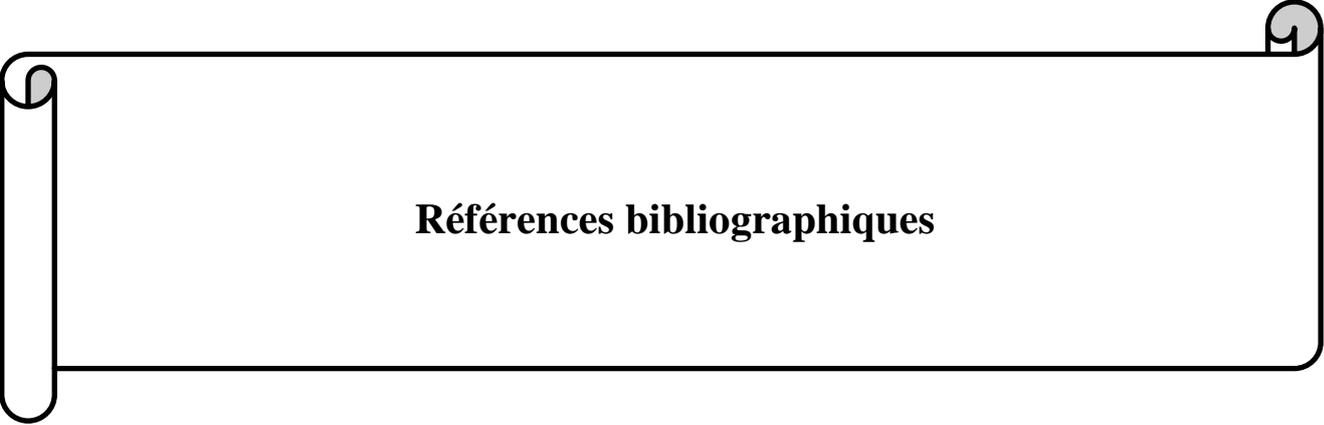
## CONCLUSION GENERALE

---

La compréhension du mécanisme d'apparition et de propagation des décharges électriques sur les surfaces des isolateurs de haute tension, n'est pas un processus facile, plusieurs études ont été réalisées dans ce sens par des chercheurs. Ce phénomène est expliqué par différentes équations et modèles pour obtenir des résultats qui permettent de bien caractériser le comportement des différents matériaux isolants utilisés comme isolateurs des lignes aériennes.

L'objectif principal de notre étude était d'examiner l'effet du rayon de courbure des électrodes sous tension et mise à la terre, sur la naissance et l'évolution des décharges électriques parallèles et séries, propagées sur une isolation en verre uniformément polluée, lorsque 'elle est mise sous contrainte de tension continue positive, et à l'aide d'un modèle simulé sous Comsol Multiphysics, nous avons arrivé aux conclusions suivantes :

- La contrainte électrique appliquée à la surface de l'isolant, peut provoquer la création d'un champ électrique intense au niveau des deux électrodes haute tension et terre, ce qui conduit à une augmentation de la température de cette surface isolante, et implique l'échauffement de cette dernière ce qui favorise la formation des zones sèches par le passage des lignes du courant électrique, sur lesquelles se propage des décharges électriques parallèles à la rencontres d'autre décharges en série.
- Le rayon de courbure des électrodes joue un rôle important sur la distribution du champ électrique au niveau des électrodes et sur l'isolation en verre, par conséquence, il détermine le nombre des décharges électriques formées sur la surface isolante.
- Pour une meilleure performance électrique d'une isolation en verre, nous recommandons l'utilisation des électrodes avec des grands rayons de courbure.
- La conductivité électrique de la solution polluante, formée sur la surface de l'isolation en verre, n'affecte pas la procédure de formation et de développement des décharges électrique parallèles et série, ce résultats est confirmé par la constance de la valeur du champ électrique quoique ce soit la valeur de la conductivité électrique.



**Références bibliographiques**

- [1] F. A. M. Rizk and D. H. Nguyen, "Digital Simulation of Source Insulator Interaction in HVDC Pollution Tests", IEEE, Trans. On Power Delivery, pp. 405-410, 1988.
- [2] D. Mayer, "Beitrag Zur Theorie der Statischen und der Dynamischen Litchbogens", Arch. F. Electrotechnick, Vol. 37, pp. 558-608, 1943.
- [3] S. Anjana and C. S. Lakshminarasma, "Computed of Flashover Voltages of Polluted Insulators Using Dynamic Arc", Model, 6th International Symposium on High Voltage Engineering, paper 30.09, New Orleans, USA, 1989.
- [4] N. Dhahbi, "Modélisation Dynamique des Décharges sur les Surfaces d'Isolateurs Pollués sous Différentes Formes de Tensions : Elaboration d'un Critère Analytique de Propagation", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Ecole Centrale de Lyon, France, 1998.
- [5] R. Sundararajan and R.S. Gorur, "Dynamic Arc Modelling of Pollution Flashover of Insulators under dc Voltage", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 28 N° 2, pp. 209-219, April 1993.
- [6] F. Bouchelga, "Etude du développement des décharges électriques parallèles sur une surface isolante large et polluée sous tension continue», thèse de doctorant ,université de Bejaia, 2016.
- [7] F. Obenaus, "Fremdschichtüberschlag und Krichweglänge", Deutsche. Electrotechnick, Vol. 12, pp. 135-136, 1958.
- [8] F. Rizk, "Mathematical Models for Pollution Flashover", Electra, Vol. 78, pp. 71-103, 1981.
- [9] P. Claverie and Y. Porcheron, "How to Choose Insulators for Polluted Areas", IEEE Trans. PAS, Vol. 92, n° 3, pp. 1121-1131, 1973.
- [10] P. J. Ghosh and N. Chatterjee, "Polluted Insulators Flashover for AC Voltage", IEEE Trans, Vol. 2, pp 128136, 1995.
- [11] G. Neumarker, "Contamination state and creepage path", Deustsche Akad., Berlin, vol. 1, pp. 352-359, 1959.
- [12] H. Boeme and F. Obenaus, "Pollution Flashover Test and Insulators in Laboratory and in Systems and Model Concept of Creepage Path Flashover", CIGRE, 1485. 11, n° 406, June 1966.
- [13] S. Diampeni Kimbakala, "Modélisation dynamique des décharges se propageant sur des surfaces isolantes polluées avec des dépôts discontinus sous différentes formes de tension", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2007.
- [14] B. F. Hampton, "Flashover Mechanism of Polluted Insulation", Proc. IEE, Vol. 111, n° 5, pp. 985-990, May 1964.
- [15] S. Hesketh, "General Criterion for the Prediction of Pollution Flashover", Proc. IEE, Vol. 114, n° 4, pp. 531-532, April 1967.

- [16] A. Beroual and S. Diampeni, "Modeling of discharges propagating over non-uniformly polluted insulators under impulse voltages", annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena, Quebec, Qc,2008, pp.200-203.
- [17] M. Slama, "Experimental Characterization and Mathematical Modelling of Surface Flashover of Solid Insulator in Air", the 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28, 2015.
- [18] F. Bouchelga and R. Boudissa, "Effect of the Development of Electrical Parallel Discharges on Performance of Polluted Insulators under DC voltage", in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation ,Vol. 22, No. 4; August 2015.
- [19] E. Benrahal, " Etude du comportement des gouttelettes d'eau déposées sur une surface isolante superhydrophobe", thèse master, université de Ghardaia,2019.
- [20] Z.Zhang ,C.Yang ,X Jiang,Y.Xiang,D.Zhang, "DC Flashover Dynamic Model of post insulator under non-uniforme pollution between windward and leeward sides",Energies.12.2345,June 2019.
- [21] J. Martinez,vega "Matériaux diélectriques pour le génie électrique",la voisier ,2007.
- [22] A. Tilmatine, "[http://www.univ-sba.dz/fsi/downloads/ETL437\\_Chapitre\\_7.pdf](http://www.univ-sba.dz/fsi/downloads/ETL437_Chapitre_7.pdf)"tension alternative" PFE Ingénieur, UAM Béjaïa, juin 2004.
- [23] S.Hai,R. Messouaf, "Effet de l'inclinaison sur le contournement d'une surface silicone hydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension continue",thèse master, Université A.Mira de Bejaia,2014.
- [24] M. Nemamcha, " cours sur claquage des isolants hautes tensions", 2001.
- [25] C. L. Wadhwa, "High Voltage Engineering", New Age International (P) Ltd, New Delhi, 2007.
- [26] M. Stolidi, "Matériaux En Electrotechnique", IUFM AIX - Marseille – Préparation CAPET et PLP2 Electrotechnique.
- [27] CEI 93, "Méthodes pour la mesure de la résistivité transversale et de la résistivité superficielle des matériaux isolants électriques solides", 1982.
- [28] T. Wildi, " Electrotechnique", 3<sup>ème</sup> Edition de Boeck Université rue des Minimes, Bruxelles, 1999.
- [29] B. Fallou, J.J. Blanchard, "Matériaux isolants solides. Caractéristiques électriques", Techniques de l'ingénieur. Génie Electrique, D 285, juin 1983.
- [30] J-C. Dubois, "Propriétés diélectriques des polymères", Techniques de l'Ingénieur, E1 850, 1998.

- [31] [https://metrologie-francaise.lne.fr/sites/default/files/media/document/03\\_proprietes-thermiques-materiaux.pdf](https://metrologie-francaise.lne.fr/sites/default/files/media/document/03_proprietes-thermiques-materiaux.pdf).
- [32] “Le verre et ses applications”, Glas Trösch Holding AG, Conseil, Bützberg, 4<sup>ème</sup> Edition, 385, Avril 2013.
- [33] <https://studylibfr.com/doc/2858496/glass-insulators-isolateurs-en-verre>
- [34] <https://qastack.fr/electronics/94819/why-do-ceramic-insulators-have-a-stacked-disc-structure>
- [35] <http://www.surprises.ch/HT/chapitres/Ch-4.pps>, “la décharge électrique”, EPFL-STI-SEL. Cours haut tension, master semestre 1 .
- [36] R. Coelho, B. Aladenize, “Les diélectriques : Propriétés diélectriques des matériaux isolants ”, Edition Hermès, Paris, 1993.
- [37] S. Abella, “Vieillissement électrique du polyester-imide sous tension continue ”, thèse magister, Université M. Mammeri de Tizi Ouzou.
- [38] J. J O'Dwyer “the theory of electrical conduction and breakdown of solids”, clarendon press, oxford, 1937.
- [39] M. Coulibaly, “caractérisation des décharges électrique se propageant aux interfaces gaz/solide-Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale” , thèse de doctérant, Ecole centrale de Lyon ECL, 2009.
- [40] A. Boubakeur, “FOUDRE – zone d’attraction d’un paratonnerre”, support pour conférence, Alger, 2004.
- [41] Le Groupe des Renardières: “L’amorçage en polarité positive des grands intervalles d’air aux Renardières”, Electra , Vol. 53, n ° 91, pp. 31-153, 1977.
- [42] Gallimberti. I, “the mechanism of long spark formation”, j.phy N°7, tome40, pp.193-250, 1979.
- [43] A. Hamdan, “Microdécharges dans l’heptane liquide : caractérisation et applications au traitement local des matériaux et à la synthèse de nanomatériaux’ ’ thèse doctorant, Ecole doctorale EMMA, Université de Lorraine, 2013.
- [44] F. Bouchelga, R. Boudissa, S. Kornhuber, K. D. Haim, “Effet du rayon de courbure des électrodes sur l’évolution des décharges électriques parallèles sur une isolation polluée sous tension continue positive”, 11 ème CNHT, 2019, 29-30 avril 2019 Oran, Algérie.