



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



UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN  
U.S.T.O - MOHAMED BOUDIAF

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

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

**SPECIALITE :** Electrotechnique

**OPTION :** Haute Tension et Environnement

PRESENTE PAR

**M<sup>elle</sup> HAMZA Slamet Amina**

Intitulé du mémoire

---

# Contribution à l'étude du modèle développé d'un isolateur pollué

---

Soutenu le 20/01/2013 devant le jury composé de :

Mr A.T.BRAHIMI	Professeur	USTO-MB	PRESIDENT
Mr H.HADI	Professeur	USTO-MB	RAPPORTEUR
Mr S.FLAZI	Professeur	USTO-MB	EXAMINATEUR
Mr A.HAMID	Professeur	USTO-MB	EXAMINATEUR

# REMERCIEMENTS

---

Mes premiers mots de remerciement s'adressent au bon Dieu tout puissant qui nous a inspiré de santé, volonté et patience pour achever ce travail.

Je tiens à exprimer mon profond remerciement au professeur Mr H. HADI, mon encadreur de thèse et responsable du Laboratoire Haute Tension et Décharge Electrique à l'université des sciences et de la technologie d'Oran pour m'avoir proposé ce sujet de magister, l'avoir dirigé, ses conseils avisés tout au long de la réalisation de ce travail et les meilleures conditions possibles qui a assuré.

Mes plus sincères remerciements à Mr. BENALI. Mourad, Chef subdivision à SONELGAZ, pour son aide, ses conseils, ses encouragements, ses qualités humaines et sa présence dans les moments difficiles de la recherche et surtout la confiance qu'il m'a témoigné pour réaliser cette thèse.

Mes remerciements les plus respectueux aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Mr. T.BRAHIMI, Président du jury, Mr. FLAZI et Mr. HAMID les examinateurs.

Et Aux deux plus chères personnes, qui m'ont donné l'amour, l'affection, qui ont fait tous leurs possible pour me voir réussir,...toutes les gestes et expressions ne permettent pas d'exprimer mon amour et ma gratitude : Mon père et ma mère.

A tous les membres de ma famille, en particulier mes frères et mes sœurs pour leur amour et encouragement incessant, Ainsi que mes petites nièces Noura, Roumaissa, Djamila son oublier mes neveux Miloud et Mohamed el Amin.

# RÉSUMÉ

Les réseaux de transport d'énergie électrique peuvent être exposés, durant l'année, à l'accumulation de pollution. La présence de pollution entraîne la dégradation des propriétés électriques de l'isolateur des lignes de transport, et favorise l'apparition de l'arc de contournement.

A travers cette contribution, nous avons présenté un résumé sur la littérature du phénomène de contournement et les matériaux constituant l'isolateur tel que (Verres, Céramiques, polymère). Par la suite, nous avons entrepris l'étude de développement d'un isolateur réel. Notre travail a pour finalité la mise en place d'une modélisation et d'une simulation portées sur les isolateurs pollués de laboratoire Haute Tension. Les modèles développés à partir du logiciel FLUX3D (modèles électrocinétique) permet l'étude bidimensionnelles (2D) et tridimensionnelle (3D). Une étape de comparaison de la distribution de potentiel, champ électrique et résistance totale de la couche de pollutions accompagnée d'une analyse personnelle a mené à l'amélioration d'un modèle développée qu'on a appelé zone d'influence. Ce modèle a été validé analytiquement et expérimentalement en utilisant une couche de pollutions solide en PVA qui permet d'effectuer des mesures sur les différents modèles (2D-3D).

**Mots clés :** isolateur, pollution, contournement, modélisation 2D/3D.

## ملخص

يمكن أن تتعرض شبكات النقل الطاقة الكهربائية إلى تراكم التلوث خلال العام. وجود التلوث يسبب تدهور الخواص الكهربائية لعازل خطوط النقل، ويشجع على ظهور قوس الالتفافية من خلال هذه المساهمة قدمنا بملخص عن دراسة ظاهرة الالتفافية و المواد التي تشكل العازل مثل (الزجاج، السيراميك و البوليمرات). بعد ذلك، قمنا بدراسة تطوير عازل الحقيقي. مهمتنا تهدف إلى إقامة النمذجة و المحاكاة التي تقوم على العوازل الملوثة في مخبر التوتر العالي. النماذج المتطورة من خلال البرنامج flux3d (نماذج الكهروحركية) تستخدم لدراسة ثنائية الأبعاد (2D) و ثلاثية الأبعاد (3D). و ثمة المقارنة بين توزيع الجهد، الحقل الكهربائي و المقاومة الكلية لطبقة التلوث مرافقة بتحليل شخصي أدى إلى تحسين نموذج المطور، سميناه المنطقة المؤثر عليها. تم التحقق من صحة هذا النموذج تحليليا و تجريبيا باستخدام طبقة صلبة من التلوث PVA التي تسمح بأجراء قياسات على نماذج مختلفة (2D, 3D).  
كلمات البحث: عازل، التلوث، الالتفافية، والنمذجة 3D/2D.

---

# *SOMMAIRE*

---

---

## INTRODUCTION GENERALE

---

Introduction.....	1
Problématique des contournements des isolateurs pollués.....	3
Objectifs de cette recherche.....	3
Structure de la thèse.....	4

---

## CHAPITRE I : REVUE DE LITTÉRATURE

---

INTRODUCTION.....	6
1. LES ISOLATEURS .....	8
1.1. Caractéristiques d'un isolateur .....	8
1.2 Différent types d'isolateurs .....	9
2. LA POLLUTION.....	12
2.1 Classification de la pollution selon son origine .....	13
2.2 Niveau et types de pollution .....	14
2.3 Sévérité de la pollution .....	15
3. LE CONTOURNEMENT ELECTRIQUE.....	16
3.1. Le processus de contournement électrique .....	16
3.2 Arc de contournement .....	18
4. PRESENTATION DES DIFFERENTS MODELES.....	18
4.1. Le modèle d'Obénaus .....	18
4.2 Modèle bi contournable .....	19
4.3 Modèle du disque circulaire (2D).....	20
4.4 Modèle du disque (3D) .....	20
4.5 Modèle développé du disque (2D).....	21
4.6 Modèle ouvert (2D).....	21
5. CRITERES DE PROPAGATION DE DECHARGE.....	22
CONCLUSION.....	23

---

## CHAPITRE II : LES MATÉRIAUX CONSTITUANT LES ISOLATEURS

---

INTRODUCTION.....	24
2. TYPE DES MATERIAUX ISOLANT .....	25
3. CARACTERISTQUE DES MATERIAUX .....	26
3.1. Chaleur spécifique des matériaux .....	26
3.2. Coefficient de dilatation volumique.....	27
3.3. Conductivité thermique .....	27
4. PROPRIETE ELECTRIQUE DES MATERIAUX.....	28
CONCLUSION .....	29

---

## CHAPITRE III : MODELISATION ET SIMULATION TRIDIMENSIONNELLES ET BIDIMENSIONNELLES D'UN ISOLATEUR HT POLLUE

---

INTRODUCTION.....	32
1. MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN ISOLATEUR RÉEL.....	33
2. METHODE DE CALCUL .....	34
2.1. Formulations mathématiques des paramètres des isolateurs .....	34
2. 2.Détermination de la résistance de pollution par Superviseur flux3D.....	36
3. MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE - 3D.....	37
3.1. Détermination de la géométrie.....	37
3.1. Choix du maillage .....	38
3.3. Choix de modèle physique.....	38
3.4. Résolution .....	39
3.5. Résultats et Exploitation.....	39
4. MODÉLISATION BIDIMENSIONNELLE - 2D.....	42
4.1. Détermination des géométries.....	42
4.2. Choix de maillage .....	44

4.3. Choix de modèle physique.....	45
4.4. Résultats et exploitations.....	45
4.5. L'influence des différents paramètres sur la résistance de la couche de pollution.....	47
4.5. 1.L'influence de l'épaisseur sur le modèle développé.....	47
4.5. 2.L'influence de la résistivité sur le modèle développé.....	48
5. RESULTATS DE CALCUL .....	49
5.1. Distribution du potentiel.....	49
5.2. Distribution du champ électrique.....	50
5.3. L'évolution du potentiel dans la couche de pollution uniforme.....	51
5.4. L'évolution du champ électrique dans la couche de pollution uniforme.....	52
6. ANALYSE LES RESULTATS DE SIMULATION 2D ET 3D.....	53
6.1. Etude comparative de la résistance .....	53
6.2. Etude comparative de la distribution de potentiel.....	53
6.3. Etude comparative de la distribution du champ électrique.....	54
6.4. Ligne de densité de courant.....	54
CONCLUSION.....	55

---

#### CHAPITRE IV : AMELIORATION DU MODELE DEVELOPPE

---

INTRODUCTION.....	56
1. ETUDE COMPLEMENTAIRE DU MODELE DEVELOPPE .....	57
2. VALIDATION DE LA ZONE D'INFLUENCE .....	58
2.1. Etude sur l'isolateur disque.....	58
2.2. Etude sur l'isolateur réel - U40 .....	65
3. RESULTAS ET EXPLOITATION .....	67
3. 1.Calcul de la résistance de la couche de pollution.....	67
3.2. Distributions de potentiel et du champ électrique.....	68
3.3. L'évolution de potentiel dans la couche de pollution .....	69

3.4. L'évolution du champ électrique dans la couche de pollution .....	70
3.5. Etude comparative .....	71
4. EFFET DU FACTEUR CORRECTIF DANS LE CALCUL DE LA RESISTANCE.....	72
CONCLUSION.....	74

---

## CHAPITRE V : VALIDATION DU MODÈLE AMÉLIORÉ

---

INTRODUCTION.....	75
1. VALIDATION EXPÉRIMENTALE .....	76
1.1. Mesures préliminaires.....	77
1.2. Appareillage utilisé .....	78
1.3. Description du modèle expérimental .....	79
2. PRÉSENTATIONS DES MODÈLES EXPERIMENTAUX .....	79
2.1. Mesure de la résistance de la couche de pollution.....	79
2.2. L'influence des différents paramètres sur la résistance de pollution.....	80
2.2.1. L'influence de l'épaisseur .....	80
2.2.2. L'influence de la résistivité.....	83
CONCLUSION.....	86

---

## CONCLUSION GENERALE

---

Conclusion générale.....	87
--------------------------	----

---

## ANNEXES

---

Annexe A.....	89
Annexe B.....	90
Annexe C.....	91

---

## BIBIOGRAPHIE

---



# LISTE DES FIGURES

---

<b>Figure I.1:</b> Les caractéristiques d'un isolateur.....	8
<b>Figure I.2:</b> Isolateur rigide à tige.....	9
<b>Figure I.3 :</b> Isolateurs suspendus.....	10
<b>Figure I.4 :</b> Les facteurs influençant la nocivité de pollution.....	15
<b>Figure I.5</b> Etapes du contournement sur une surface polluée.....	17
<b>Figure I.6 :</b> Le montage expérimental du modèle d'Obenaus.....	19
<b>Figure I.7:</b> Modèle bi contournable.....	19
<b>Figure I.8 :</b> Modèle du disque circulaire (2D).....	20
<b>Figure I.9 :</b> Le modèle disque (3D).....	20
<b>Figure I.10.</b> Le modèle développé équivalent.....	21
<b>Figure I.11.</b> Le modèle Ouvert.....	22
<b>Figure III.1 :</b> Géométrie du l'isolateur.....	33
<b>Figure III.2 :</b> Dimensions de l'isolateur étudié.....	33
<b>Figure III.3 :</b> Isolateur disque.....	37
<b>Figure III.4:</b> Maillage de la géométrie.....	38
<b>Figure III.5:</b> Comparaison entre les résultats de calcul et logiciel.....	40
<b>Figure III.6:</b> L'influence de l'épaisseur sur la résistance de pollution.....	40
<b>Figure III.7:</b> L'influence de la résistivité sur la résistance de pollution.....	41
<b>Figure III.8 :</b> Configuration en 2D axisymétrique dérivées de la configuration 3D.....	42
<b>Figure III.9:</b> Modèle ouvert d'un isolateur disque.....	43
<b>Figure III.10 :</b> Maillage surfacique (configuration axisymétrique).....	44
<b>Figure III.11 :</b> Maillage surfacique (configurations en 2D).....	44
<b>Figure III.12:</b> Résistance total de pollution.....	46
<b>Figure III.13 :</b> Résistance total de pollution.....	47
<b>Figure III.14:</b> L'influence de l'épaisseur sur la résistance de pollution.....	48
<b>Figure III.15 :</b> L'influence de la résistivité sur la résistance de pollution.....	48
<b>Figure III.16 :</b> Distribution de potentiel pour le modèle disque et sa configuration axisymétrique.....	48
<b>Figure III.18 :</b> Distribution de champ pour le modèle disque .....	50
<b>Figure III.19 :</b> Distribution de champ pour le modèle développé.....	50
<b>Figure III.20 :</b> L'évolution de potentiel dans l'isolateur disque.....	51
<b>Figure III.21 :</b> L'évolution de potentiel dans le modèle développé.....	52

<b>Figure III.22 :</b> L'évolution du champ électrique dans l'isolateur disque et le modèle développé.....	52
<b>Figure III.23 :</b> Résistance total de l'isolateur disque et le modèle développé.....	53
<b>Figure III.24:</b> Distribution de potentiel de l'isolateur disque et le modèle développé.....	53
<b>Figure III.25 :</b> Distribution du champ électrique de l'isolateur disque et le modèle développé.....	54
<b>Figure III.26 :</b> Ligne de densité de courant pour les deux modèles.....	54
<b>Figure III.27 :</b> Ligne de densité de courant pour les deux modèles.....	55
<b>Figure IV.1 :</b> La répartition des lignes de courant.....	57
<b>Figure IV.2 :</b> Représente la zone d'influence du modèle disque et son modele développé.....	60
<b>Figure IV.3 :</b> Comparaison entre l'isolateur disque et son modèle développé.....	61
<b>Figure IV.4 :</b> 4 Vues de l'isolateur disque.....	62
<b>Figure IV.5 :</b> 4 Vues de modèle développé.....	62
<b>Figure IV.6 :</b> Comparaison entre l'isolateur disque et son modèle développé.....	63
<b>Figure IV.7 :</b> Comparaison entre l'isolateur disque et son modèle développé.....	64
<b>Figure IV.8 :</b> Isolateur Réel U40.....	65
<b>Figure IV.9 :</b> Model développé U40.....	65
<b>Figure IV.10 :</b> Comparaison entre l'isolateur Réel U40 et son modèle développé.....	66
<b>Figure IV.11 :</b> Zone d'influence pour un angle de 45° (1/8 de disque).....	67
<b>Figure IV.12 :</b> Résistance de l'isolateur disque et du modèle développé pour $\theta = 45^\circ$ .....	67
<b>Figure IV.13 :</b> Distributions de potentiel.....	68
<b>Figure IV.14 :</b> Distributions du champ électrique.....	68
<b>Figure IV.15 :</b> L'évolution du potentiel dans la zone d'influence de l'isolateur disque.....	69
<b>Figure IV.16 :</b> L'évolution du potentiel dans la zone d'influence du modèle développé.....	69
<b>Figure IV.17:</b> L'évolution du champ électrique dans la zone d'influence de l'isolateur disque.....	70
<b>Figure IV.18:</b> L'évolution du champ électrique dans la zone d'influence du modèle développé.....	70
<b>Figure IV.19 :</b> Comparaison de la distribution du potentiel du modèle disque et la zone d'influence .....	71
<b>Figure IV.20 :</b> Comparaison de la distribution du champ électrique du modèle disque et la zone d'influence.....	71
<b>Figure IV.21:</b> Valeurs de la résistance totale calculée et expérimentale pour différentes épaisseurs de la couche de pollution.....	73
<b>Figure IV.22 :</b> Valeurs de la résistance totale calculée et expérimentale pour différentes résistivités de la couche de pollution.....	74

<b>Figure V.1</b> : Mesure "locale" de la conductivité surfacique.....	77
<b>Figure V.2</b> : Appareillage utilisé .....	78
<b>Figure V.3</b> : Les modèles expérimentaux .....	79
<b>Figure V.4</b> : L'influence de l'épaisseur sur la résistance du modèle disque .....	81
<b>Figure V.5</b> : L'influence de l'épaisseur sur la résistance du modèle développée.....	82
<b>Figure V.6</b> : L'influence de l'épaisseur sur la résistance de la zone d'influence du modèle disque.....	82
<b>Figure V.7</b> : L'influence de l'épaisseur sur la résistance de la zone d'influence du modèle développé.....	82
<b>Figure V.8</b> : L'influence de l'épaisseur sur la résistance .....	83
<b>Figure V.9</b> : Mesure de la résistance de l'électrolyte par OHMMETRE.....	83
<b>Figure V.10</b> : L'influence de la résistivité sur la résistance du modèle disque.....	84
<b>Figure V.11</b> : L'influence de la résistivité sur la résistance du modèle développé.....	85
<b>Figure V.12</b> : L'influence de la résistivité sur la résistance de la zone d'influence du modèle disque.....	85
<b>Figure V.13</b> : L'influence de la résistivité sur la résistance de la zone d'influence du modèle développé.....	86

# LISTE DES TABLEAUX

---

<b>Tableau I.1</b> : Classification de la pollution selon le type d'environnement.....	14
<b>Tableau II.1</b> : Durée de vie de différents matériaux.....	26
<b>Tableau II.2</b> : Chaleur spécifique des matériaux à 25°C (CP).....	26
<b>Tableau II.3</b> : Coefficient de dilatation volumique.....	27
<b>Tableau II.4</b> : Conductivité thermique $\lambda$ (W m-1 K-1).....	27
<b>Tableau II.5</b> : Constante diélectrique relatives à 25°C .....	29
<b>Tableau III.1</b> : Résistance du l'isolateur disque pour une épaisseur 1 mm.....	39
<b>Tableau III.2</b> : Résistance de la configuration axisymétrique pour une épaisseur mm.....	45
<b>Tableau III.3</b> : Résistance de modèle développée pour une épaisseur 1 mm.....	46
<b>Tableau IV.1</b> : Comparaison entre l'isolateur disque et son modèle développé pour différents angles.....	61
<b>Tableau IV.2</b> : Etude de Comparaison entre l'isolateur disque et son modèle développé pour différents angles.....	63
<b>Tableau IV.3</b> : Etude de Comparaison entre l'isolateur disque et son modèle développé pour différents angles.....	64
<b>Tableau IV.4</b> : Comparaison entre l'isolateur disque et son modèle développé pour différents angles.....	66
<b>Tableau IV.5</b> : Résistance de l'isolateur disque et du modèle développé pour $\theta= 45^\circ$ .....	67
<b>Tableau IV.6</b> : Valeurs de la résistance totale trouvée par logiciel Flux3D pour différentes épaisseurs de la couche de pollution.....	72
<b>Tableau IV.7</b> : Rapport entre les valeurs des résistances trouvées par logiciel Flux3D (modèle disque et son modèle développé).....	73
<b>Tableau V.1</b> . Comparaison des valeurs de résistance de la couche de pollution pour une épaisseur de 1mm.....	80
<b>Tableau V.2</b> . L'influence de l'épaisseur sur la résistance.....	81
<b>Tableau V.3</b> . L'influence de la résistivité sur la résistance .....	84
<b>Tableau V.4</b> . L'influence de la résistivité sur la résistance .....	84

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

Les équipements haute tension présents dans les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique sont supposés opérer de façon fiable quelles que soient les conditions environnementales. En particulier, les isolateurs, qui représentent relativement un faible pourcentage dans le prix des lignes aériennes, constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement de ces lignes. Leur rôle est d'assurer l'isolement électrique entre les parties portées à la haute tension ou entre les parties haute tension, et les parties mises à la terre

Ces isolateurs se couvrent d'une couche de pollution qui provient de l'atmosphère. Associée à la rosée de matin, à la pluie, ou au brouillard, cette couche de pollution devient conductrice et sera le siège de passage d'un courant de fuite vers la masse des pylônes. Dans certaines conditions favorables il y aura l'apparition des décharges partielles sur la surface de l'isolateur qui s'allongent et mènent au contournement complet de l'isolateur.

Le champ de recherche concernant le contournement électrique des isolateurs pollués est assez important mais l'intérêt qu'il suscite se fait sentir dans de plus en plus de pays touchés par ce problème. En effet, plusieurs interruptions électriques sur les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique ont été observées dans divers pays.

Les conséquences économiques et humanitaires consécutives à ces interruptions justifient l'étude et la compréhension de ces phénomènes perturbateurs.

Cependant, les coupures engendrées par les contournements électriques des isolateurs pollués sont souvent difficiles à identifier après coup et de plus, certains de ces contournements se produisent dans des lieux très éloignés et inhabités. Par conséquent, ceci rend leur observation très aléatoire et difficile. Il est donc primordial de réaliser des tests en laboratoire afin de récolter le plus de données possibles sur les causes de ces contournements et d'approfondir les connaissances sur le sujet tant au point de vue théorique que pratique.

Depuis plusieurs d'années, un nombre important de recherches et d'études ont été menées dans différents laboratoires sur la problématique du contournement des isolateurs pollués. Malgré le grand intérêt porté à la compréhension et à la modélisation des phénomènes de contournement des isolateurs pollués, il existe à notre connaissance très peu d'études relatives à la détermination de la résistance de la couche de pollution, la distribution du potentiel et du champ électrique le long des isolateurs pollués, que ce soit de façon expérimentale ou numérique. Pourtant, la détermination de résistance de pollution, du potentiel et du champ électrique le long des isolateurs pollués est d'une importance capitale dans la compréhension des phénomènes de pré-contournement.

Une connaissance approfondie de la distribution du potentiel et du champ électrique le long des isolateurs pollués permettrait de déterminer la valeur de la résistance et les valeurs critiques de potentiel et de champ électrique donnant naissance à ces arcs partiels.

La problématique reliée à une telle étude se trouve dans la difficulté à mesurer de manière précise la valeur de la résistance, la distribution du potentiel et la distribution du champ électrique le long des isolateurs pollués.

De plus, ces mesures se faisant en présence de pollution sur l'isolateur, cela demande une procédure expérimentale longue et fastidieuse afin d'obtenir des résultats convenables.

Généralement les isolateurs réels avec leurs formes géométriques complexes ont été convertis en un modèle équivalent à deux dimensions où un côté égal à la longueur de la ligne de fuite de l'isolateur et l'autre côté est obtenu par le rapport entre le diamètre de l'isolateur et le facteur de forme. Son modèle électrique équivalent est un simple circuit électrique pour déterminer les grandeurs critiques des contournements. Mais, cependant ce modèle ne peut pas montrer l'influence de la géométrie complexe de l'isolateur sur la tension de contournement. C'est pourquoi une approche est adoptée pour essayer de représenter la forme ouverte de la surface d'un isolateur réel et avec le développement croissant de l'informatique et de logiciels de calcul de plus en plus puissants, il est maintenant possible d'obtenir des résultats rapides et précis.

Notre travail va donc avoir pour objectif final de faire une étude comparative géométrique entre le modèle réel de laboratoire en 3D et son modèle développé «ouvert» en configuration 2D. Il a pour but d'accroître les connaissances sur les processus de pré-contournement des isolateurs pollués et donc de déterminer la résistance et la distribution du potentiel, du champ électrique et la densité de courant le long des surfaces de pollution par l'utilisation d'outils numériques.

Parmi les méthodes numériques disponibles et applicables aux calculs électrocinétique, c'est la Méthode des Éléments Finis qui nous semble être la mieux adaptée au problème posé. Ainsi, son utilisation par le biais d'un logiciel commercial (FLUX3) fut retenue pour réaliser les différentes simulations aussi bien en bidimensionnel qu'en tridimensionnel.

Plus précisément, il s'agit d'étudier principalement ce qui se passe avant que le contournement ne survienne, c'est-à-dire avant l'établissement de l'arc électrique total à la surface de la pollution. Cela consiste à déterminer les paramètres pouvant influencer les distributions du potentiel et du champ électrique le long du dépôt de pollution et donc pouvant initier ou inhiber l'apparition des arcs électriques partiels.

Les objectifs spécifiques de notre démarche peuvent être résumés comme suit :

- Modélisation et simulation électrocinétique d'un isolateur HT en 2D et 3D
- Etude comparative (2D et 3D) des valeurs des résistances totales, des potentiels, du champ électrique, le long de la ligne de fuite.
- Analyse des différents paramètres pouvant influencer sur la tension de contournement.
- Amélioration de modèle développé afin d'obtenir un modèle qui donne la même résistance de la couche conductrice de pollution calculé et déterminé par logiciel FLUX3D.
- validation expérimentale de modèle réel et de modèle améliorés et comparaison aux résultats de calcul déterminés par logiciel FLUX3D.

Notre mémoire est structuré en cinq chapitres qui sont les suivantes:

Le chapitre I est consacré à la revue de la littérature afin de déterminer les conditions atmosphérique les plus sévères auxquelles peuvent être soumis les isolateurs, les principaux critères qui régissent le phénomène de contournement, ainsi que les différents modèles de laboratoire pour représenter les isolateurs soumis à la pollution atmosphérique

Le chapitre II présente l'étude matériaux constituant l'isolateur tel que (Verres, Céramiques, polymère), ainsi que les phénomènes physiques, électriques et chimiques qui déterminent les propriétés diélectriques des isolants.



Le chapitre III auquel nous avons effectué une simulation bidimensionnelle et tridimensionnelle par l'intermédiaire du logiciel FLUX3D sur le modèle de laboratoire. Cette simulation porte sur le calcul de la résistance, du potentiel et du champ électrique, afin de déterminer les paramètres pouvant provoquer ou inhiber le processus de contournement.

Le chapitre VI aussi consacré à l'amélioration de modèle développé afin d'obtenir un modèle qui donne la même résistance de la couche conductrice de pollution calculée et déterminée par logiciel FLUX3D.

Le chapitre V porte la validation expérimentale de modèle réel et de modèle améliorés et comparaison aux résultats de calcul et déterminé par logiciel FLUX3D.

# CHAPITRE I

## REVUE DE LITTÉRATURE

---

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

Les isolateurs haute tension se couvrent d'une couche de pollution qui provient de l'atmosphère. Associée à la rosée de matin, à la pluie, ou au brouillard, cette couche de pollution devient conductrice et sera le siège de passage d'un courant de fuite vers la masse des pylônes. Dans certaines conditions favorables il y aura l'apparition des décharges partielles sur la surface de l'isolateur qui s'allongent et mènent au contournement complet de l'isolateur.

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude bibliographique concernant, Le phénomène du contournement. Les différents modèles théoriques et expérimentaux trouvés dans la littérature et les principaux critères de propagation rencontrés pour la modélisation du phénomène de contournement.

## 1. LES ISOLATEURS

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison entre des conducteurs HT et la terre.

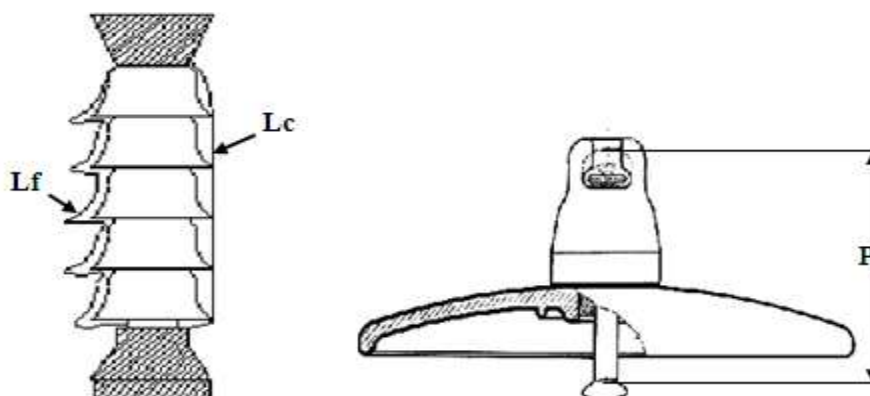
### 1.1. Caractéristiques d'un isolateur : [1,2]

Parmi les valeurs spécifiées dans les normes d'essais d'isolateurs, nous pouvons citer :

**Le pas P** : C'est la distance séparant deux parties homologues de deux isolateurs consécutifs dans une chaîne. La détermination de ce paramètre nous permet donc de connaître la longueur d'une chaîne ayant un nombre donné d'isolateurs.

**La ligne de fuite  $L_f$**  : C'est la plus courte distance, suivant les contours de la surface extérieure des parties isolantes, mesurée entre les parties métalliques.

**La ligne de contournement  $L_c$**  : C'est la distance la plus courte dans l'air entre deux parties conductrices.



**Figure 1:** Les caractéristiques d'un isolateur

## 1.2 Différent types d'isolateurs : [3,4]

Les principaux types d'isolateurs sont :

### 1.2.1 Isolateur rigide :

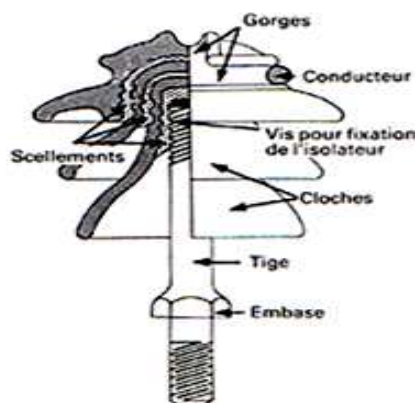
Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'une ou de plusieurs pièces isolantes encastrées et scellées les unes dans les autres.

Ces isolateurs sont fixés au pylône par des ferrures de forme diverses. Ils sont principalement utilisés dans les lignes aériennes pour des tensions ne dépassant pas généralement 60 kV. Les isolateurs rigides peuvent être placés en position horizontale, verticale ou oblique.

Il existe deux types principaux d'isolateurs rigides : les isolateurs rigides à tige et les isolateurs rigides à socle.

**Isolateur rigide à socle :** Isolateur rigide qui comporte une ou plusieurs pièces en céramique ou en matériau synthétique, assemblées de façon permanente sur un socle métallique, et qui est destiné à être monté sur un support au moyen d'une tige centrale ou de boulons solidaires du socle.

**Isolateur rigide à tige :** Isolateur rigide qui comporte une ou plusieurs pièces en céramique en forme de cloche, assemblées de façon permanente, et qui est destiné à être monté sur un support au moyen d'une tige à visser à l'intérieur de l'isolateur.



**Figure 2:** Isolateur rigide à tige.

### 1.2.2. Isolateur suspendu :

Il est constitué de matériaux isolants équipés de pièces métalliques de liaison. Ces derniers sont nécessaires afin de pouvoir les relier à d'autre élément de la chaîne, tout en leur assurant une certaine flexibilité.

Ces éléments sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (chaîne d'alignement), soit horizontales (chaîne d'encrage). La liaison entre deux éléments successifs est réalisée par des systèmes métalliques.

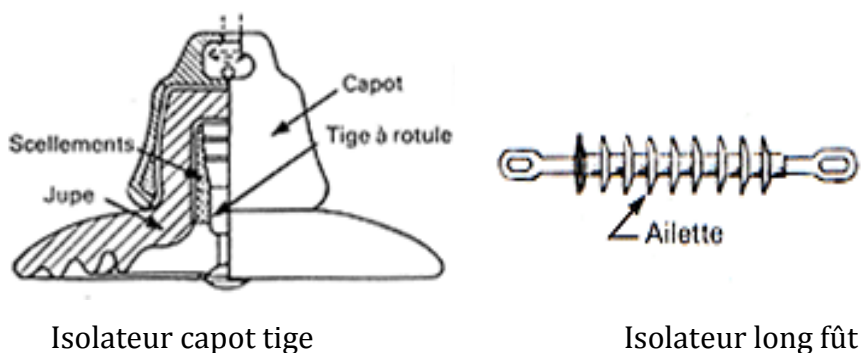
Il existe deux types principaux d'élément de chaîne :

- Les isolateurs capot tige.
- Les isolateurs longs fût.

Isolateur long fût : Il est constitué d'un bâton cylindrique plein en céramique muni d'ailettes. A chaque extrémité, est fixée une pièce métallique de liaison. Celle ci est en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le bâton, ou bien en forme de tige scellé dans une cavité prévue à cet effet.

Les systèmes de liaison des isolateurs entre eux, aux pylônes ou aux câbles sont constitués des rotules ou des chapes.

Isolateur capot tige : C'est un isolateur constitué d'un capot, une tige et le diélectrique (jupe), le matériau de liaison est un mortier en ciment alumineux. Généralement le capot est en fonte malléable ou acier forgé, la tige et en acier.



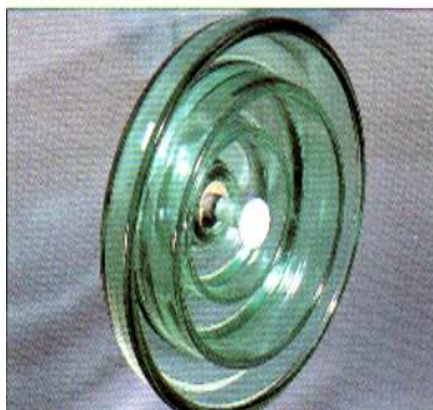
**Figure 3 :** Isolateurs suspendus

### 1.3. Les différents profils des isolateurs capot tige: [5]

Afin d'améliorer le fonctionnement des isolateurs dans les régions polluées, la CEI (comité international d'électrotechnique) a proposé plusieurs profils. Nous pouvons citer :



**Profil standard** : La forme et les dimensions sont en accord avec la normalisation internationale (CEI 305 1978), à cause de leur planéité, les rainures internes bien espacées et la longueur de la ligne de fuite supérieure à la demande standard. Ce type est très utilisé dans les endroits à pollution moyenne.



**Profil antibrouillard (forme A)** : Il est de conception avec un diamètre plus grand que le type de profil standard muni de deux ou trois rainures à grande profondeur.. Cette conception permet également un lavage manuel facile si c'est nécessaire et empêche le claquage entre rainures voisines quand il y a une pollution sévère et tout le profil intérieur simplifie la maintenance.



**Profil antibrouillard (forme B)** : Dans cette conception, l'épaisseur de la rainure extérieure agit comme une barrière contre l'action du brouillard et le dépôt des sels minéraux sur la surface de l'isolateur, empêchant alors la formation d'un électrolyte conducteur sur la surface. Ce type d'isolateur est efficace dans les zones côtières.



**Profil sphérique**: La forme sphérique permet une longueur de fuite équivalente à celle de profil standard, l'absence de rainures internes permet un lavage manuel facile et efficace.



**Profil plat**: L'élimination complète des rainures internes réduit grandement l'accumulation de pollution sur la surface basse, grâce au courant d'air. Cette conception est particulièrement efficace dans les zones désertiques où l'auto lavage est peu fréquent par pluie.

## 2. LA POLLUTION

Un isolateur placé à l'extérieur est exposé aux différents agents constituant l'atmosphère qui le contamine. Cette contamination se manifeste par l'accumulation d'un dépôt de pollution à sa surface. Son importance dépend de :

- La géométrie et la position de l'isolateur
- Les conditions du milieu.
- La durée d'exposition de l'isolateur.

Cette pollution est généralement constituée de matières solubles et insolubles :

- Matières solubles [1, 6, 7,8]: Elles sont composées essentiellement de sels ioniques tels que : Na Cl, Na<sub>2</sub> So<sub>4</sub>, Ca So<sub>4</sub>, Ko<sub>3</sub>, CaCl<sub>2</sub>, CaCo<sub>3</sub>. [6]
- Matières insolubles [9,10,11,12]: caractérisées par leur faible conductivité sont de nature minérale inorganique solide, Les plus rencontrés sont d'origine minérale cristallisée ou les atomes sont régulièrement distribués comme dans le quartz SiO<sub>2</sub> et le mica.

## 2.1 Classification de la pollution selon son origine :

### 2.2.1 Pollution d'origine naturelle : [1, 7, 14, 15, 16, 17,18]

Cette pollution peut affecter d'importantes parties du réseau, Elle se répartit en trois types :

**a-Pollution marine** [1, 7,15] : Ce type de pollution touche les installations électriques à proximité de la mer, constituées d'embruns marins qui se déposent sur la surface de l'isolateur et forment une couche de sels qui devient conductrice en présence de l'humidité. La particularité de cette pollution est qu'elle est exclusivement constituée de sels ioniques, notamment le NaCl, et de peu des matières insolubles.

**b-Pollution désertique** [16,17] : Ce genre de pollution est constitué par les particules de sable, terre, poussière, et est accentué surtout par les facteurs climatiques :

- Le vent en assurant le transport de ces particules arides et finit par les déposer sur l'isolateur en formant une couche qui recouvre toute la surface de l'isolateur.

- La température, par ses variations entre le jour et la nuit implique le phénomène de condensation donnant au dépôt une certaine conductivité.

**c- Poussière du sol et zones agricoles** [14,18] : Les poussières du sol constituent des agents de pollution dans les régions à climat aride.

L'utilisation d'engrais par pulvérisation, ou le labourage des terres conduit lui aussi à la constitution de la couche de pollution à la surface d'un isolateur placé dans ces régions.

### 2.2.2 Pollution d'origine industrielle : [8, 18,19]

Cette pollution est observée au voisinage des usines métallurgiques, chimiques ou même au bord des centrales thermiques où les isolateurs se recouvrent de poussière faiblement conductrice, mais très hygroscopique. Le dépôt de pollution peut se constituer par la fixation de particules solides telles que les dépôts ferromagnétiques issus des usines métallurgiques et de l'absorption de gaz présent dans les fumées. Dans des conditions de forte humidité, la dissolution des sels contenus dans la poussière provoque la formation d'une couche conductrice.



### 2.2.3 Pollution mixte :

C'est une combinaison entre la pollution naturelle et industrielle. Elle présente le cas le plus nocif, par exemple une usine industrielle au bord de la mer.

### 2.2 Niveau et types de pollution :

L'identification des substances de la pollution est impérative pour le choix de l'isolateur d'une ligne électrique. La norme CEI 815 [14] donne les quatre niveaux de pollution et leur classement dans le tableau 1.

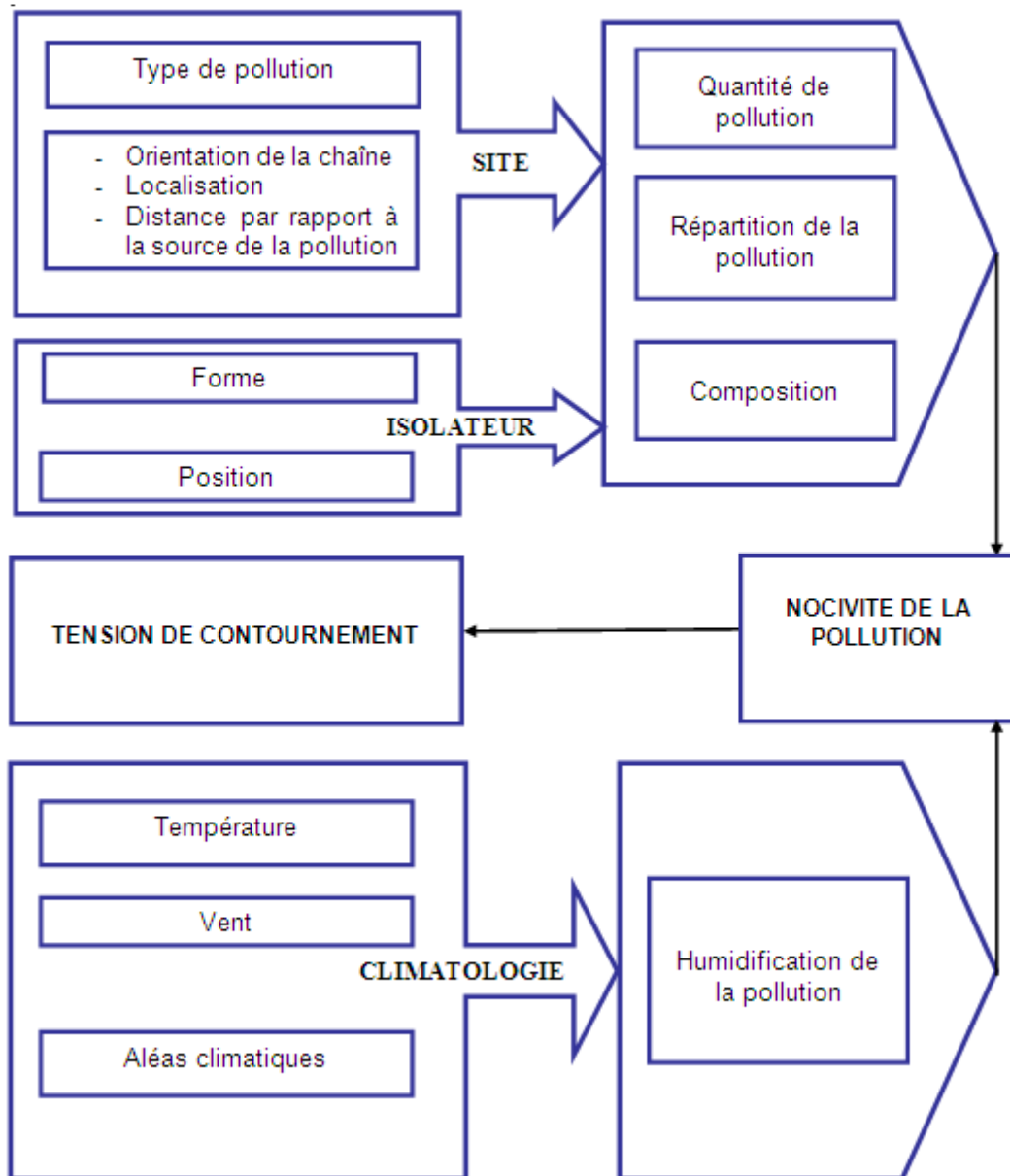
Niveau de pollution	Exemples d'environnements typiques
<b>I</b> <b>Faible</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zones sans industries et avec faible densité d'habitations équipées d'installation de chauffage.</li> <li>- Zones avec faible densité d'industries ou d'habitations mais soumise fréquemment aux vents et / ou pluies.</li> <li>- Régions agricoles</li> <li>- Régions montagneuses.</li> </ul>
<b>II</b> <b>Moyen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ ou avec une densité moyenne d'habitations équipées d'installations de chauffage.</li> <li>- Zone à forte densité d'habitations et/ ou d'industries mais soumises fréquemment aux vents et / ou à des chutes de pluies.</li> <li>- Zones exposées aux vents de mer, mais trop proches de la cote.</li> </ul>
<b>III</b> <b>Fort</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes villes avec forte densité d'installations de chauffage polluantes.</li> <li>- Zones situées près de la mer, ou en tout cas exposées à des vents relativement forts venant de la mer.</li> </ul>
<b>IV</b> <b>Très fort</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zones généralement peu étendues, soumises à des poussières conductrices et à des fumées industrielles produisant des dépôts conducteurs particulièrement épais.</li> <li>- Zones généralement peu étendues, très proches de la cote et exposées aux embruns ou au vent très fort et polluant venant de la mer.</li> <li>- Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant du sable et du sel et soumises à une condensation régulière</li> </ul>

**Tableau 1 :** Classification de la pollution selon le type d'environnement

### 2.3 Sévérité de la pollution :

La sévérité de la pollution dépend de plusieurs facteurs dont les plus importants sont liés au site d'exploitation.

Elle est schématisée par la CEI [14] comme s'est indiqué sur la figure 5 :



**Figure 4 :** Les facteurs influençant la nocivité de pollution

### 3. LE CONTOURNEMENT ELECTRIQUE

Le contournement électrique d'un isolateur est l'extension sur sa surface d'une décharge électrique jusqu'à ce qu'elle mette en court circuit la haute tension et la masse qui a pour conséquence grave l'interruption de la distribution de l'énergie électrique.

Le contournement des isolateurs pollués est un phénomène de rupture diélectrique provoqué par le dépôt de la pollution sur une surface d'isolateur. Pour étudier ce phénomène beaucoup d'essais de tension de tenue au contournement ont été effectués dans des conditions normales ou artificielles de dépôt pollution, respectivement dans une station de pollution ou dans un laboratoire. La Commission Electrotechnique International a établi une série de la norme standard internationale pour les essais artificiels de pollution sur les isolateurs.

#### 3.1. Le processus de contournement électrique :

Le contournement d'une surface isolante polluée est le résultat d'une évolution que l'on peut schématiser par la figure 5 :

L'écoulement du courant de fuite à travers l'électrolyte qui recouvre l'isolement provoque un échauffement qui accroît la conductivité du milieu.

L'échauffement croissant provoque une sorte de resserrement circulaire des lignes de courant, une zone sèche se produit.

La tension se trouve reportée aux bornes de la zone sèche et les arcs locaux sont susceptibles d'apparaître; la zone sèche s'élargit.

Le contournement est un phénomène aléatoire. En effet, à partir de ce développement :

- L'arc peut s'éteindre ou trouver une position plus stable.
- L'arc peut atteindre les électrodes et provoquer le contournement.

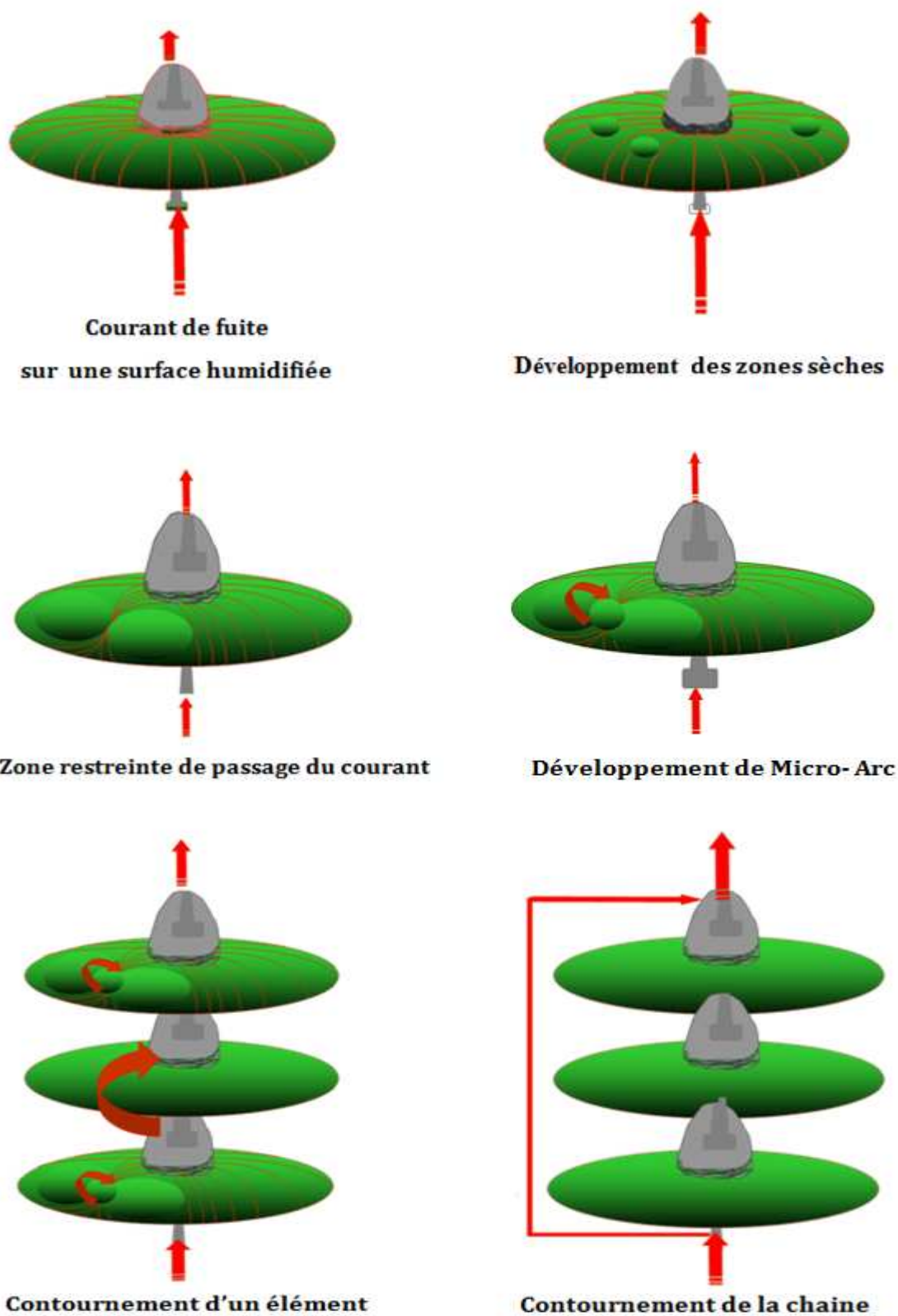


Figure 5 Etapes du contournement sur une surface polluée

### 3.2 Arc de contournement :

L'arc de contournement est un phénomène complexe puisqu'il met en jeu différents processus de décharge électriques dans l'air ainsi qu'à la surface du milieu sur lequel il évolue. Il s'agit en fait d'un arc électrique établi entre les électrodes de l'isolateur dont l'une est portée à la haute tension et l'autre est mise à la terre, entraînant ainsi un court-circuit. Cet arc de contournement peut se produire sous différentes conditions atmosphériques telles que la pluie, la neige ou le verglas. De plus la présence d'une couche de pollution peut grandement contribuer au contournement des isolateurs.

Enfin ces contournements peuvent se produire sous tension de service, mais aussi lors de chocs de foudre ou de manœuvre qui induisent une surtension sur le réseau électrique.

Pour éviter des contournements sous pollution, la ligne de fuite d'un isolateur (ou d'une chaîne) peut être très longue par exemple 10.50 mètres en 420KV. Sans l'existence des ailettes ou des nervures, les isolateurs seraient beaucoup trop longs et entraîneraient une surélévation des ouvrages tout à fait inacceptable. C'est pourquoi les fabricants d'isolateurs ont proposé des profils plus ou moins complexes.

- La ligne de fuite est la distance la plus courte le long de la surface de l'isolateur entre deux parties conductrices.
- Le courant de fuite d'un isolateur pollué est le courant qui traverse la couche de pollution humide lorsque l'isolateur est sous tension de service.

## 4. PRESENTATION DES DIFFERENTS MODELES

### 4.1. Le modèle d'Obénaus :

Le dispositif expérimental d'Obénaus, représenté sur la figure 6, est constitué d'une plaque isolante creusée d'une rainure de longueur  $L$ , de largeur  $b$  et de profondeur  $e$ . Cette dernière est remplie d'un électrolyte constitué de l'eau distillée et de chlorure de sodium ( $\text{Na Cl}$ ) pour simuler la couche de pollution.

Une électrode H.T surplombe l'électrolyte à une hauteur «  $h$  ». A l'une des extrémités de la rainure est placée une électrode de masse (figure 6).

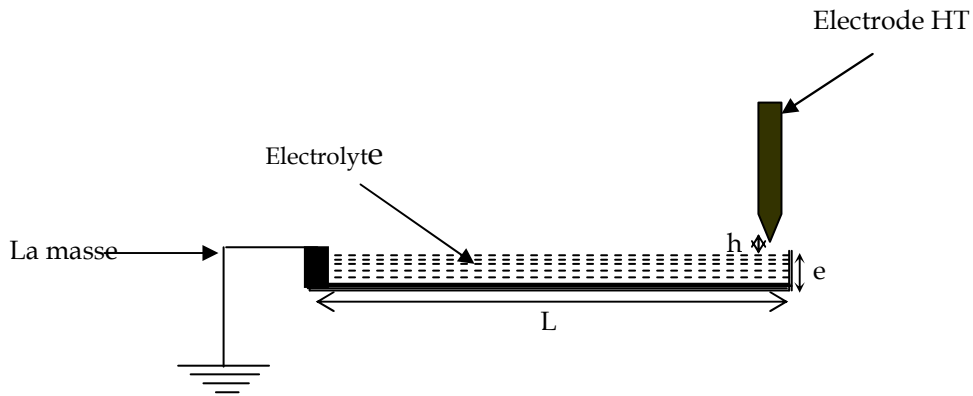


Figure 6 : Le montage expérimental du modèle d'Obenaus

#### 4.2 Modèle bi contournable

Dans ce modèle, le contournement peut se développer soit à droite soit à gauche de l'axe de la décharge, selon les conditions critiques expérimentales.

La cellule expérimentale est conçue, en creusant une rainure dans une plaque de plexiglas. Cette rainure est remplie d'un électrolyte et possède deux électrodes de masse à ses extrémités, une électrode haute tension surmontant la rainure à une hauteur « h » au dessus de la solution, et à mi-distance des extrémités (figure 7).

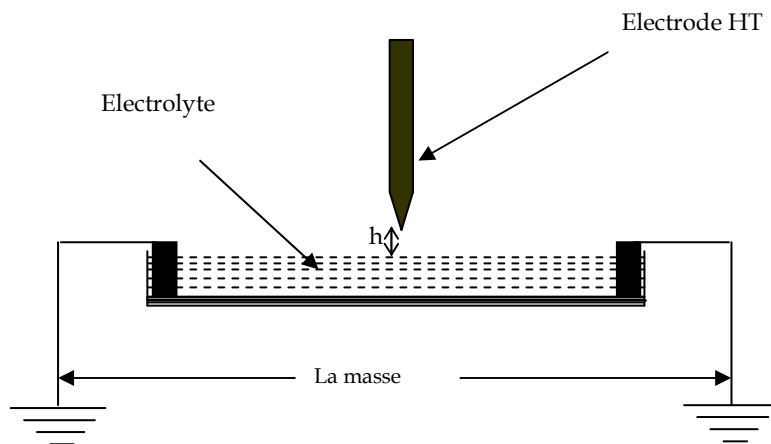
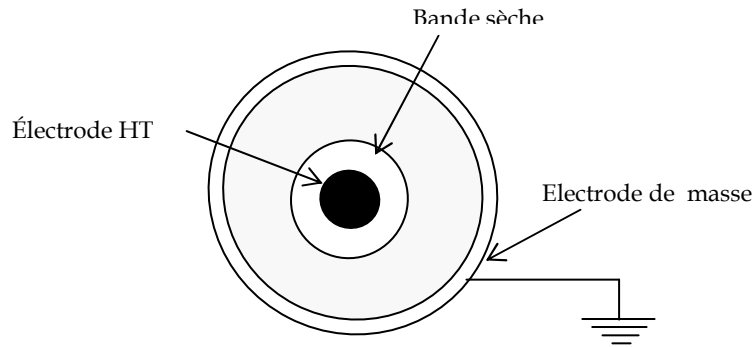


Figure 7 : Modèle bi contournable

### 4.3 Modèle du disque circulaire (2D)

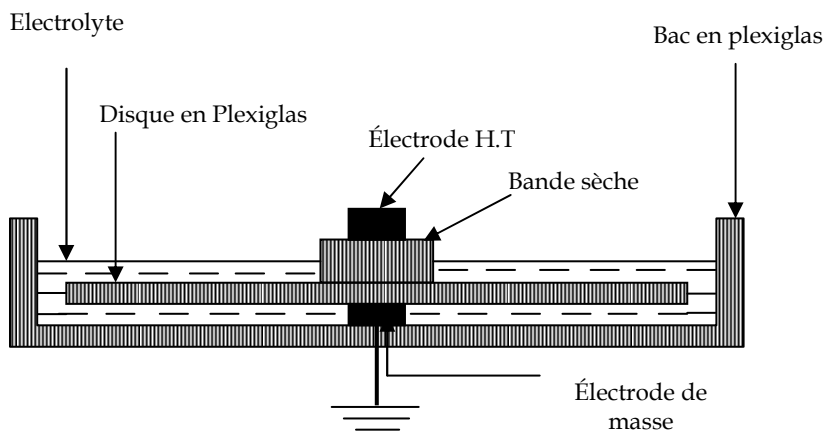
Woodson et McElroy ont imaginé une configuration géométrique qui représenterait d'une façon idéale la surface d'un isolateur à disque. L'électrode haute tension se trouve au centre du disque et la masse entoure toute la périphérie du modèle (figure 8).



**Figure 8 :** Modèle du disque circulaire (2D)

### 4.4 Modèle du disque (3D)

Ce modèle a été élaboré au sein du laboratoire de la haute tension et des décharges électriques de l'USTO. Il se rapproche au maximum de la forme de l'isolateur réel (isolateur capot et tige), comme le montre la figure 10. Il est constitué d'un disque circulaire complètement plongé dans un support isolant rempli de l'électrolyte. Au milieu du disque sur la surface supérieure se trouve l'électrode haute tension et sur la surface inférieure se trouve l'électrode de masse (figure 9).

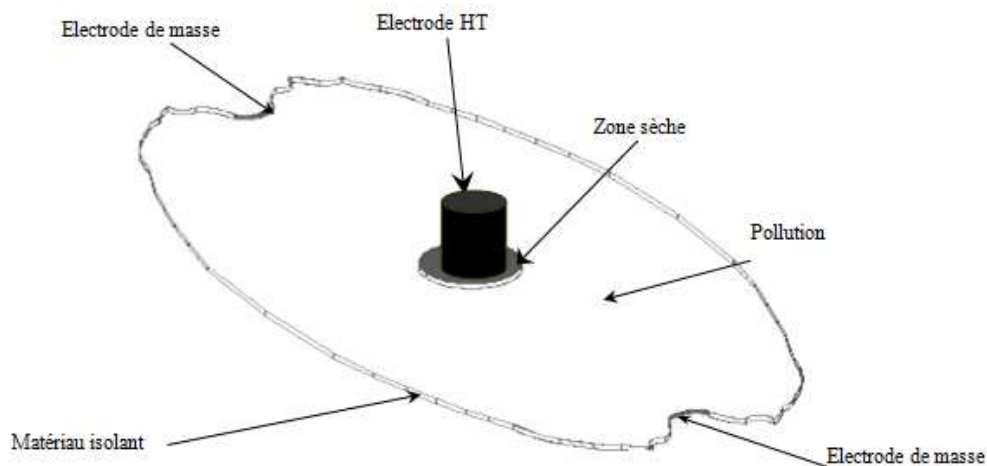


**Figure 9 :** Le modèle disque (3D).

#### 4.5 Modèle développé du disque (2D)

Ce modèle conçu au laboratoire de la haute tension et décharges électriques, est obtenu par la transformation d'un isolateur réel de type disque (3D) en un modèle équivalent plat.

Le principe de transformation est de procéder à relever les distances entre le capot et la masse, point par point sur une feuille millimétrée collée sur la surface de l'isolateur disque, puis dessiner la surface plate équivalente sur une plaque en plexiglas en la limitant par une matière isolante. Ce modèle plat est constitué par un chapeau qui représente l'électrode haute tension et deux demi-cercles qui représentent l'électrode de masse (figure 10).



**Figure 10.** Le modèle développé équivalent.

#### 4.6 Modèle ouvert (2D)

Un idéal modèle permet de convertir la surface complexe de l'isolateur réel de 3D en un modèle ouvert en 2D. Ce modèle est aussi conçu au laboratoire de la haute tension et décharges électriques. Les résultats de la détermination de la résistance de la couche polluante relevés expérimentalement et ceux calculés par le logiciel Flux3D s'accordent bien. Cependant il y a une divergence importante entre mesurées et celles calculées. Cette divergence impose de mieux adapter le modèle, et de chercher à déterminer d'où proviennent les causes de divergence, et de quelle façon elles pouvaient être prises en compte dans le modèle qui fera l'objet de notre travail.



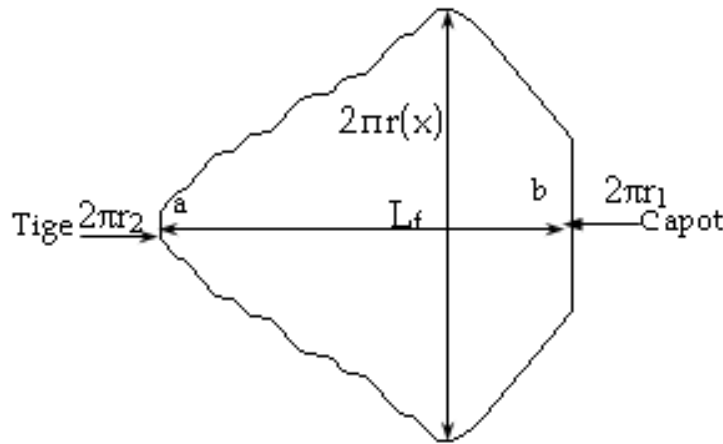


Figure 11. Le modèle Ouvert.

## 5. CRITERES DE PROPAGATION DE DECHARGE

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

A partir d'une étude expérimentale, Hampton [15] a déterminé les conditions critiques de propagation de l'arc. En remplaçant la couche de pollution en série avec l'arc par une colonne d'eau uniforme présentant une résistance linéique constante, il a pu établir que la condition nécessaire pour que le contournement se produit, est que le champ dans la colonne d'eau dépasse le champ à l'intérieur de l'arc.

$$E_a < E_p \quad (\text{II.1})$$

En supposons que l'arc en série avec la couche de pollution mouillée se modifie de façon à rendre maximal le courant qu'il tire de la source d'alimentation, Hesketh [33] à établi un critère de propagation de l'arc, exprimé par la relation :

$$\frac{di}{dx} > 0 \quad (\text{II.2})$$

Où  $i$  étant le courant de l'arc

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

$$\frac{dP}{dx} > 0 \quad (II.3)$$

En assimilant l'arc à une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, Anjana et Lakshminarasimha [16] ont établi une condition nécessaire à la propagation de l'arc, basée sur des considérations énergétiques :

L'énergie totale fournie  $W_{\text{tota}}$  doit être supérieure ou égale à l'énergie  $W_{\text{th}}$  nécessaire pour maintenir l'arc à sa température.

En considérant une série d'arcs multiples parallèles Ghosh et al ont établi le critère de propagation suivant [34] :

$$\frac{dR(x)}{dx} > 0 \quad (II.4)$$

Où  $R(x)$  est la résistance d'arc totale et  $x$  représente la longueur d'arc.

## CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre un résumé d'une étude bibliographique sur les isolateurs en précisant leur rôle et leurs différents types, ainsi que la pollution qui représente l'une des contraintes auxquelles sont soumis les isolateurs des réseaux électriques en présentant ses différents niveaux, ainsi que les principaux critères qui régissent le phénomène de contournement.

# CHAPITRE II

## LES MATÉRIAUX CONSTITUANT LES ISOLATEURS

---

Les matériaux isolants occupent une place importante dans les applications électriques. On les retrouve partout où il y a des conducteurs électriques. Chaque conducteur électrique se doit d'être entouré d'isolant, afin de :

- Protéger les utilisateurs contre les chocs électriques
- Protéger l'équipement électrique contre les risques de court-circuit.

Dans les lignes de transport électrique, l'isolant principal est l'air. Cependant, on utilise des isolateurs attachés à des pylônes afin de maintenir les câbles suspendus dans l'air. Dans ce cas, l'isolant joue un rôle essentiellement mécanique. Il n'en demeure pas moins que le matériau utilisé doit posséder d'excellentes propriétés d'isolation électrique.

## 2. TYPE DES MATERIAUX ISOLANT

Le choix du matériau d'un isolateur se fait principalement en fonction de sa capacité à éviter que ne se fixent les particules aériennes sur sa surface. Les concepteurs choisiront ainsi les matériaux les plus lisses possibles, c'est-à-dire ceux qui présentent des porosités les plus petites possibles à leur surface. De même, on choisira des matériaux qui possèdent des résistances électriques les plus élevées possibles.

La porcelaine est utilisée depuis plus d'un siècle dans ce domaine, car elle offre des surfaces très lisses, avec peu de porosités et une grande constance de ses propriétés sur de longues périodes de temps. Cependant, depuis quelques années, le développement des polymères a rendu possible l'utilisation de matériaux à base de polymères présentant d'excellentes performances de courants de fuite et de contournement, Ce type de matériau ayant été principalement utilisé par l'industrie jusqu'à une époque récente pour des applications où une conductivité électrique serait une gêne : matières plastiques pour les besoins ménagers, isolants pour câbles électriques, etc.

Les procédés de fabrication des matières plastiques sont principalement basés sur des traitements à haute température, sous des pressions élevées [36].

### a) Caractéristiques des matières plastiques :

- très bonne rigidité diélectrique : toujours  $\geq 10$  kV/mm.
- résistivité élevée :  $10^8 \leq \rho \leq 10^{17}$   $\Omega$  m.
- faibles pertes diélectriques.
- propriétés mécaniques inférieures à celles des métaux mais pouvant être améliorées par les procédés de fabrication (charges).

### b) Matières plastiques utilisées en électrotechnique

- Bakélite, Epoxydes, PVC, Polyéthylène, Téflon.

Le tableau suivant illustre la durée de vie de différents matériaux à base de polymères.

Matériel	Durée de vies prédites (année)	dommages observés
PTFE	20	légère érosion
Silicone élastomère meilleur	25	Pistes et crevaisons
Silicone élastomère le pire	2-6	pistes
Polyoléfine, meilleur	5	crevaisons
Polyoléfine, le pire	1	pistes

Tableau 1 : Durée de vie de différents matériaux [35]

### 3. CARACTERISTIQUE DES MATERIAUX

#### 3.1. Chaleur spécifique des matériaux :

La **chaleur spécifique** d'un matériau indique la quantité de chaleur (énergie) nécessaire pour élever d'un degré centigrade (ou kelvin) une masse d'1 kg de ce matériau.

Plus la chaleur spécifique d'un matériau est élevée, plus il peut fournir ou absorber de chaleur sans que sa température ne varie beaucoup [37].

Matériau	$C_p$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) (chaleur spécifique)	$C_p$ (J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) (chaleur molaire)
<b>Polymères thermoplastiques:</b>		
- Polyéthylène(PE)	1600-2200	44-60
-Polychlorure de vinyle (PVC)	960- 1100	60- 68
- Polystyrène (PS)	1220	128
-Poly-méthacrylate de méthyle(PMMA)	1400	140
- Polycarbonate(PC)	1200	300
<b>Polymère thermodurcissable:</b>		
- Résine époxyde (EP)	1700- 2000	-
<b>Elastomères:</b>		
- Caoutchouc (poly-isoprène ; polybutadiène)	1600	100
	800-1000	-
<b>Verre:</b>	800	-
<b>Céramique:</b> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	400-900	-
<b>Métaux:</b> Fe ; Cu ; Al ; Ni ; Zn		

Tableau 2 : Chaleur spécifique des matériaux à 25°C (CP)

### 3.2. Coefficient de dilatation volumique

Matériaux	$\alpha$ ( $10^{-5} \text{ K}^{-1}$ )	Tg ( $^{\circ}\text{C}$ )
<b>Polymères thermoplastiques :</b>		
- Polyéthylène (PE)	$\begin{cases} 30 \text{ à } 40 & T < T_g \\ 130 & T < T_g \end{cases}$	80 (environ)
- Polychlorure de vinyle (PVC)	$\begin{cases} 20 & T < T_g \\ 52 & T < T_g \end{cases}$	81
- Polystyrène (PS)	$\begin{cases} 18 \text{ à } 25 & T < T_g \\ 55 & T < T_g \end{cases}$	100
- Poly méthacrylate de méthyle (PMMA)	$\begin{cases} 15 \text{ à } 30 & T < T_g \\ 50 & T < T_g \end{cases}$	105-110
- Polycarbonate (PC)	21 $T < T_g$	141
<b>Polymères thermodurcissables :</b>		
- Résine époxyde (EP)	7 $T < T_g$	100 à 220
<b>Elastomères :</b>		
- Caoutchoucs (polybutadiène)	$\begin{cases} 20 & T < T_g \\ 78 & T > T_g \end{cases}$	-100
<b>Verre :</b> (borosilicaté)	1,2	
<b>Céramique :</b> $\text{Al}_2\text{O}_3$	2,5	
<b>Métaux :</b> Fe, Al, Ni, Cu ...	3 à 7	
<b>Diamant :</b>	0,3	

Tableau 3 : Coefficient de dilatation volumique.

### 3.3. Conductivité thermique $\lambda$ ( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

Matériau	$\lambda$
<b>Polymères thermoplastiques :</b>	
Polyéthylène (PE) $\begin{cases} \text{Basse densité} \\ \text{Haute densité} \end{cases}$	0.33 0.63
Polychlorure de vinyle (PVC)	0.15
Polystyrène (PS)	0.15
Poly-méthacrylate de méthyle (PMMA)	0.2
Polycarbonate (PC)	0.2
<b>Polymères thermodurcissable :</b>	
Résine époxyde (EP)	0.2 à 0.5
<b>Elastomère :</b>	
Caoutchoucs (polybutadiène, poly-isoprène)	0.15
<b>Mousse :</b>	
Polystyrène	0.03
<b>Verre</b>	1

Tableau 4 : Conductivité thermique  $\lambda$  ( $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

#### 4. PROPRIÉTÉ ÉLECTRIQUE DES MATÉRIAUX

Les propriétés électriques d'un corps sont déterminées par sa réponse, lorsqu'il est soumis à un champ électrique extérieur. Le matériau est conducteur si le champ crée un mouvement de charges électriques provoquant un flux au sein du matériau appelé courant (très souvent il s'agit d'un mouvement d'électrons, mais aussi parfois d'ions positifs ou négatifs). Ce dernier disparaît lorsque le champ s'annule. C'est le cas des métaux.

A l'opposé, dans les isolants électriques ou diélectriques, un champ électrique imposé peut provoquer seulement localement la séparation entre les charges positives et négatives, ce qui conduit à la formation de dipôles électriques qui s'orientent dans le sens du champ. Il se peut que des dipôles électriques permanents préexistent avant l'application du champ électrique. Dans ce cas, ils s'orientent dans le sens de ce dernier. Ce mécanisme d'orientation est appelé la polarisation électrique; elle disparaît à la suppression du champ. C'est le cas de beaucoup de céramiques, de verres ou de polymères.

Les polymères sont généralement des isolants ou diélectrique; en effet les liaisons chimiques au sein des molécules sont covalentes; comme dans ce type de liaison les électrons sont liés aux noyaux, il n'y a pas «d'électron libre» et donc pas de mécanisme de conduction de l'électricité comme dans les métaux. Cependant, comme tout isolant, ces polymères diélectriques sont susceptibles de conduire faiblement le courant; ils ont une très faible conductivité électrique [40] [38].

La présentation des propriétés électriques des polymères se fera selon l'ordre suivant

- L'origine de la polarisation électrique des diélectriques.
- La permittivité électrique et la constante diélectrique.
- Les pertes diélectriques.
- La rigidité électrique et le claquage.
- La conductivité électrique

**Constante diélectrique relatives à 25°C :**

Matériau	Constante diélectrique $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$
<b>Polymère thermoplastique</b>	
Polyéthylène (PE)	2,3
Polychlorure de vinyle (PVC)	3,7
Polystyrène(PS)	2,5
Poly-méthacrylate de méthyle (PMMA)	3.7
Polycarbonate (PC)	2.9
<b>Polymère thermodurcissable</b>	
Résine époxyde	2,8 à 4,7
<b>Élastomères</b>	
Caoutchouc	2,6
<b>Verre</b>	
Pyrex	4 à 6
Verre au plomb	19
<b>Céramique</b>	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8 à 10
Porcelaine	6 à 7
<b>Diamant</b>	5.5
<b>Eau</b>	80

**Tableau 5 :** Constante diélectrique relatives à 25°C

**CONCLUSION**

Dans ce chapitre nous avons fait une étude sur les matériaux constituant l'isolateur tel que (Verres, Céramiques, polymère). Au cours des dernières décennies, l'emploi des polymères a considérablement progressé, remplaçant souvent des matériaux traditionnels (métaux, bois) ou des textiles naturels (coton, laine, etc.).

De très nombreux phénomènes physiques, électriques et chimiques déterminent les propriétés diélectriques des isolants et des composants ou équipements qui les utilisent. On appelle facteurs d'influence sur les essais de rigidité et d'isolement, tous les éléments qui peuvent modifier ces propriétés.

Parmi les facteurs d'influence on peut citer :

**a) les facteurs physiques :**

- température,
- humidité,
- contraintes mécaniques : vibrations, chocs, déformations, pression...

**b) les facteurs électriques :**



- tensions,
- courant continu : polarité,
- courant alternatif: fréquence,
- chocs électriques : impulsions,

c) les facteurs chimiques :

- impuretés,
- oxydation, ... ect

Il est important de noter qu'en pratique ces facteurs n'agissent jamais seuls (sauf en laboratoire au cours d'expériences spécialement mises en œuvre pour étudier un facteur particulier),

Les polymères ayant de bonnes propriétés mécaniques et un faible prix de revient. Ils remplacent avantageusement les matériaux traditionnels, comme le bois ou les métaux. Les cinq familles les plus utilisées sont les polyvinyles ou PVC (pièces rigides, tuyauterie, films d'étanchéité) ; les polyéthylènes ou PE (emballages transparents, pièces rigides) ; les polypropylènes ou PP et les polystyrènes ou PS (pièces rigides, fibres) ; les polyesters saturés (cosmétiques, revêtements de surface, peintures, vernis, plastifiants pour autres polymères) ; les polyesters insaturés (films, fibres textiles, matériaux composites) ; les polyuréthanes ou PU. La production de ces derniers est bien inférieure aux autres familles citées, mais les polyuréthanes présentent une grande facilité d'expansion .

Si les polymères ont pris une si grande importance dans la vie quotidienne, c'est en raison de leur très grande versatilité, de leur faible prix de revient et de leur légèreté par rapport aux matériaux traditionnels qu'ils remplacent. L'avenir semble se profiler vers des matériaux « à la carte », de plus en plus complexes et qui allient les propriétés des différents composants de départ.

Les avantages des polymères de type organique (donc constitués principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène) sur les matériaux minéraux classiques (acier, cuivre, aluminium, zinc, silicium...) résident en leur faible poids à volume donné et leurs bonnes propriétés mécaniques (élasticité, ductilité, résistance à la rupture) pour toutes les applications avec pièces mobiles. Cependant, le principal inconvénient de beaucoup de ces polymères est une grande sensibilité à certains agents extérieurs (rayonnements

visible ou ultraviolet, milieux acide ou basique, chaleur, contact mécanique avec des corps durs) qui détériorent leurs propriétés intéressantes et leur confèrent une durée de vie assez limitée. Parmi les matériaux de ce genre le plus connus, citons les polymères saturés comme le polyéthylène, le polystyrène, le polychlorure de vinyle et le polypropylène

Le comportement électrique d'un polymère caractérise sa réponse à l'application d'un champ électrique statique ou alternatif. Les gammes de fréquences et de champs appliqués dans ce domaine sont très variables conduisant ainsi à la mise en jeu de divers phénomènes principalement conduction et relaxation qui peuvent être mis en relation avec la nature, l'organisation à longue ou courte distance des matériaux mais aussi avec leur cycle de vie [39]. Les matériaux polymères sont généralement non conducteurs de l'électricité et de nombreuses applications électroniques ou électrotechniques reposent sur cette propriété. Cette qualité d'isolation de la plupart des polymères a été exploitée depuis de nombreuses années conjointement à leurs bonnes propriétés mécaniques ainsi qu'à leur facilité de mise en œuvre par exemple pour la réalisation de câble basse ou haute tension et haute fréquence, de connecteurs, de condensateurs à hautes performances en films minces, de substrats de circuits intégrés, de couches de passivation etc.... [41]

# CHAPITRE III : MODELISATION ET SIMULATION TRIDIMENSIONNELLES ET BIDIMENSIONNELLES D'UN ISOLATEUR HT POLLUE

---

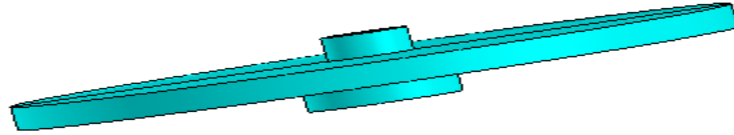
La modélisation est une étape importante dans toute simulation numérique. En particulier, elle permet, en définissant et en étudiant les caractéristiques géométriques et physiques du problème étudié, de proposer un modèle simplifié qui soit le plus proche de la réalité.

De tout système haute-tension la détermination de la distribution du champ et du potentiel électrique est un problème complexe de calcul non pas par la simplicité des équations aux dérivées partielles qui les décrivent mais plutôt à cause de la forme irrégulière des diélectriques.

Dans ce contexte, les progrès de l'informatique ont permis de développer des codes de calcul afin de déterminer de façon précise la distribution du champ et du potentiel électrique. Parmi ces codes de calcul, le logiciel FLUX3D a été choisi pour faire nos simulations.

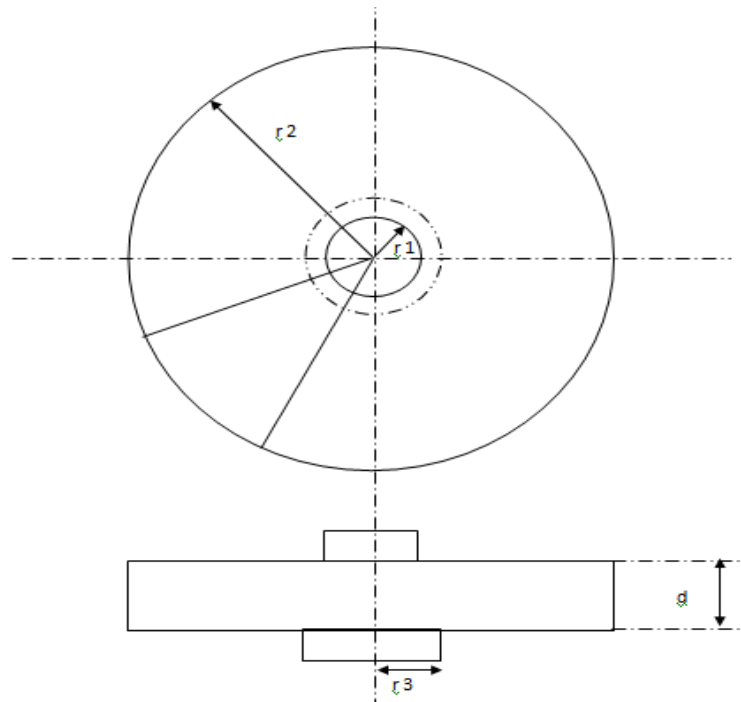
## 1. MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN ISOLATEUR RÉEL

### 1.1. Géométrie du l'isolateur :



**Figure 1** : Géométrie du l'isolateur

Les dimensions géométriques de l'isolateur disque sont les suivantes :



**Figure 2** : Dimensions de l'isolateur étudié

Où

$r_1 = 12.5\text{mm}$  (rayon de l'électrode haute tension (Tige)),  
 $r_2 = 105\text{mm}$  (rayon de disque)  
 $r_3 = 22.5\text{mm}$  (rayon de l'électrode basse tension (Capot)),  
 $d = 10\text{mm}$  (l'épaisseur du disque).

## 2. METHODE DE CALCUL

### 2.1. Formulations mathématiques des paramètres des isolateurs :

L'étude de l'influence de la pollution sur le comportement des isolateurs des lignes haute tension nécessite la détermination du facteur de forme de l'isolateur qui est défini par la relation suivante [34]:

$$f = \int_0^l \frac{dl}{2\pi \cdot x(l)} \quad \text{IV-1}$$

Où  $l$  est l'abscisse curviligne au point de l'isolateur ou longueur de fuite et  $x(l)$  est le rayon au point d'abscisse  $l$ . On peut déterminer la résistance de la couche de pollution comme suite:

$$dR = \frac{\rho}{s} dl = \frac{\rho}{2\pi x(l) \cdot e} dl \quad \text{IV-2}$$

$dR$  : est la résistance de la boucle élémentaire de pollution

$\rho$  : est la permittivité de la pollution dans la boucle.

$l$  : est l'abscisse curviligne de la boucle élémentaire, ou longueur de la ligne de fuite jusqu'à le point considère, de rayon  $x(l)$

On obtient :

$$R = \frac{\rho}{e} \int_0^l \frac{dl}{2\pi \cdot x(l)} = f \cdot \frac{\rho}{e} \quad \text{IV-3}$$

$e$  : épaisseur de la couche de pollution.

Pour calculer la fonction  $y=f(x)$ , pour la longueur totale de la ligne de fuite, il faut déterminer l'ensemble des segments entre deux nœuds consécutifs qui constituent la ligne de fuite totale de l'isolateur.

Pour cela il faut utiliser la méthode d'interpolation cubique appelée « Spline Cubique » entre deux nœuds de coordonnées  $(x_i, y_i)$  et  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  qui constituent la géométrie de l'isolateur.

La détermination de  $dl$  se fait de la manière suivante : Soit  $f(x)$  la fonction qui représente la courbe de segment du profile de la surface de l'isolateur entre les deux point  $i$  et  $i+1$  de la manière suivante

$$dl = \sqrt{dy^2 + dx^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad \text{IV-4}$$

$$dl = \sqrt{1 + f'(x)^2} dx$$

En remplaçant (IV.3) en (IV.1) on obtient :

$$R_i = \frac{\rho}{2\pi e} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{\sqrt{1+f'(x)^2}}{x_i(l)} dx \quad \text{IV-5}$$

$$R_t = \sum_{i=1}^m \frac{\rho}{2\pi e} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{\sqrt{1+f'(x)^2}}{x_i(l)} dx \quad \text{IV-6}$$

On peut calculer la longueur de segment (i) de la ligne de fuite entre les points  $i$  et  $i+1$  par la relation :

$$L_{i+1} - L_i = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \sqrt{1 + f'(x)^2} dx \quad \text{IV-7}$$

La longueur totale de la ligne de fuite, qui est la somme de tous les segments, est donnée donc par la relation :

$$L_f = \sum_{i=1}^m \int_{x_i}^{x_{i+1}} \sqrt{1 + f'(x)^2} dx \quad \text{IV-8}$$

L'intensité du courant de fuite  $I_f$  est calculée à partir de la tension appliquée  $U$  et de la résistance totale de la pollution  $R_t$  en utilisant la formule :

$$I_f = \frac{U}{R_t} \quad \text{IV-9}$$

Nous pouvons maintenant calculer le potentiel  $V_i$  dans n'importe quel point formant la surface de l'isolateur par la formule suivante :

$$V_n = I \sum_{i=1}^n R_i \quad \text{IV-10}$$

## 2. 2.Détermination de la résistance de pollution par Superviseur flux3D

### 2.2.1. Présentation générale du logiciel Superviseur Flux\_9.3.1:

FLUX3D est un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) destiné à l'électrotechnique, permettant de modéliser des phénomènes tridimensionnels et bidimensionnels par la méthode des éléments finis, il comprend :

- **Un descripteur géométrique** qui consiste à définir la géométrie entière de l'isolateur .
- **Un descripteur des propriétés physiques** qui porte sur la définition des propriétés électriques des matériaux présents, cela consiste à définir les permittivités relatives ordinaires et les conductivités volumiques, de plus, il faut définir les conditions aux limites qui se traduisent par le potentiel imposé sur chaque électrode (condition de Dirichlet).
- **Un mailleur automatique tridimensionnel** : La résolution d'un problème par la méthode des éléments finis nécessite le découpage du domaine d'étude en éléments finis tout en respectant les interfaces de la géométrie. Réaliser ce découpage en éléments finis est l'objet de la commande.
- **Un solveur** qui consiste en la résolution du problème par l'application de la méthode numérique.
- **Un module d'exploitation des résultats** : Le module d'exploitation permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles à l'ingénieur comme le potentiel et le champ électrique.

### 3. MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE - 3D

#### 3.1. Détermination de la géométrie [42]

- Créations des points constituant la géométrie (point défini par coordonnées paramétrées xyz, point défini par propagation d'un autre point)
- relier les points avec des lignes (segment défini par points extrémités, arc défini par angle et points extrémités, arc défini par coordonnées centre et point extrémités, arc défini par rayon et point extrémités, arc défini par point extrémités et centre, arc défini par point origine intermédiaire, extrémité, propagée à partir d'une ligne, extrudée à partir d'un point).
- Création de la transformation rotation (translation définie par un vecteur, translation définie par deux points et un rapport, rotation définie par angles et les coordonnées du point pivot, rotation définie par angles et un point pivot existant, rotation définie par trois points et un angle, homothétie par rapport à un point, affinité par rapport à une droite décrite par deux points, affinité par rapport à un plan décrit par trois points).
- Extruder les lignes (c'est-à-dire faire une rotation avec la transformation créée tout en reliant automatiquement les lignes entres elles).
- Création des faces et des volumes, faire propager n fois les volumes avec la même transformation tout en vérifiant la condition que  $n \Theta = 360^\circ$

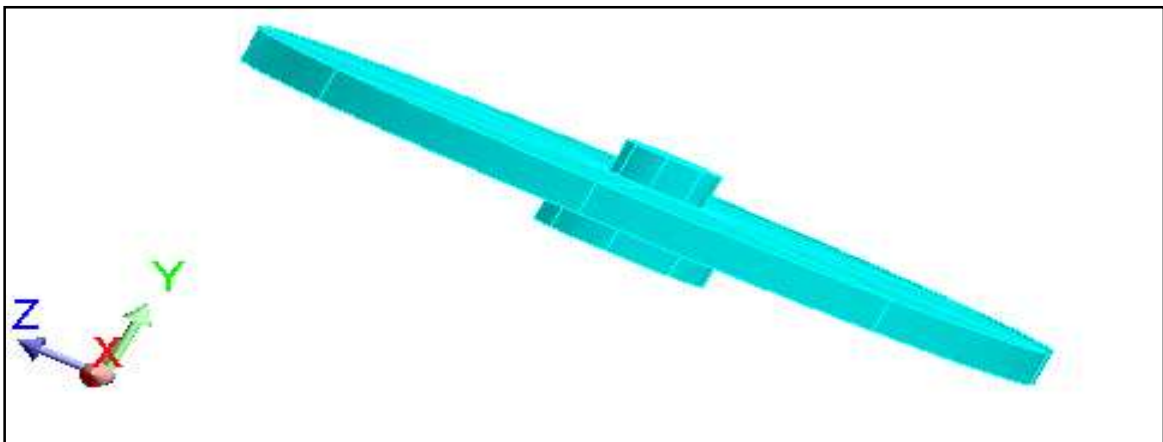


Figure 3 : Isolateur disque



### 3.1. Choix du maillage

La qualité des résultats dépend du maillage ,Pour cette raison nous avons affecté les discrétisations aux points ou discrétisations aux lignes pour mieux régler la taille des mailles,puis lancer le maillage automatique des lignes des faces et des volumes.

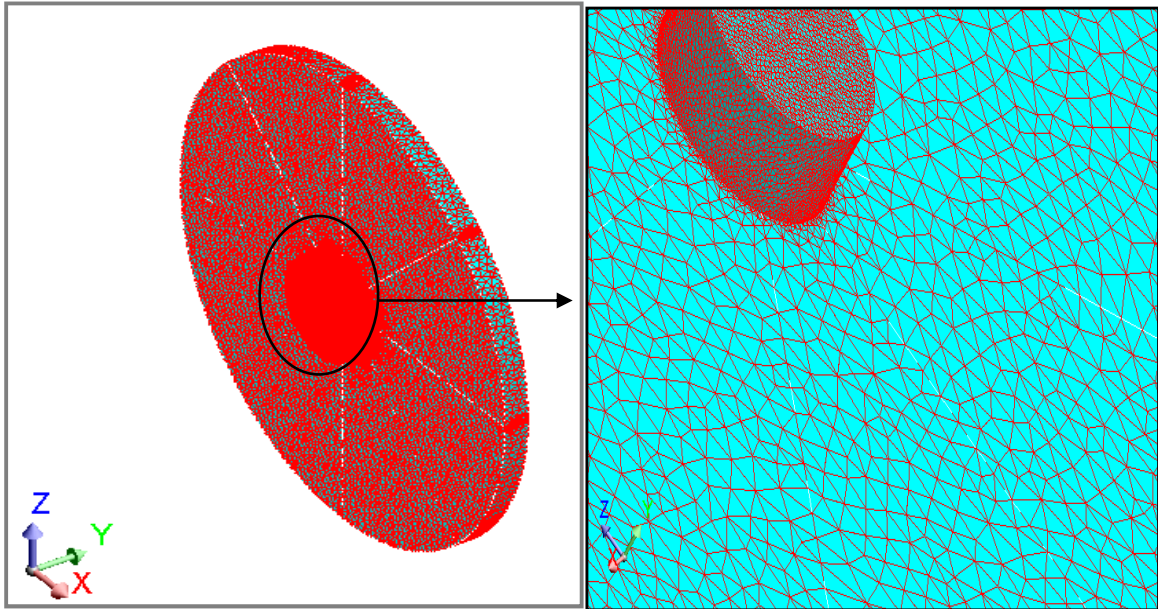


Figure 4: Maillage de la géométrie

### 3.3. Choix de modèle physique

Afin de pouvoir définir le phénomène physique il est nécessaire d'imposer des contraintes surfaciques sur les différents conducteurs.

Contraintes imposées :  $V(1) = 10000V$ ,  $V(0) = 0V$

Vu que notre travail consiste à déterminer le potentiel électrique en chaque point de la ligne de fuite ,nous avons pris le modèle électrocinétique.

Tout d'abord il faut créer les matériaux que l'on affectera aux régions physiques que le dispositif peut comprendre et cela dans la banque de matériaux (possibilité de les créer directement dans le module physique).

Les propriétés physiques des matériaux dans notre application sont la résistivité (isotrope) et la permittivité (isotrope).

Pour les régions, nous avons utilisé des régions surfaciques pour modéliser la couche de pollution et parties conductrices (capot et tige) et des régions volumiques pour représenter les parties isolantes

### 3.4. Résolution

Elle consiste en la résolution du problème par l'application de la méthode numérique.

### 3.5. Résultats et Exploitation

Le module d'exploitation permet de calculer et de visualiser les grandeurs utiles comme le potentiel et le champ électrique.

#### 3.5. 1. Résultats de Calcul de la résistance sur l'isolateur disque

Pour le calcul de la résistance avec le logiciel FLUX3D, nous avons affecté à la région surfacique qui représente la couche de pollution, une résistivité donnée, pour une épaisseur désignée (1mm).les valeurs obtenues du calcul sont représentées dans le tableau suivant :

Résistivité de la Pollution $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Resistance de la Pollution R ( $K\Omega$ )	
	Calcul Analytique (Annexe A)	Calcul flux3D (Annexe C)
20	11.987	11.889
30	17.980	17.833
40	23.974	23.778
50	29.967	29.722
60	35.961	35.666
70	41.954	41.610
80	47.948	47.555
90	53.941	53.499
100	59.934	59.444

**Tableau.1** : Résistance du l'isolateur disque pour une épaisseur 1 mm.

Les résultats de la comparaison sont très satisfaisants. En effet, nous avons constaté une très bonne concordance entre les deux manières de calcul de la résistance totale pour toutes les valeurs de la résistivité de la pollution (figure.5).

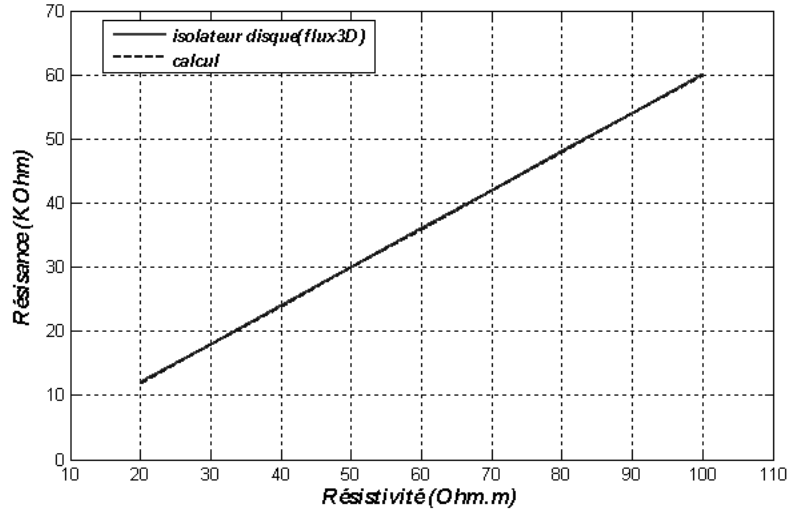


Figure 5: Comparaison entre les résultats de calcul et logiciel

### 3.5. 2.L'influence des différents paramètres sur la résistance de pollution

#### 3.5. 2.1.L'influence de l'épaisseur

Pour évaluer l'influence de la variation de la profondeur de pollution sur la valeur de la résistance mesurée à l'aide de flux3D, nous avons utilisé une couche de pollution de résistivité 10 ( $\Omega.m$ ) et d'une épaisseur qui varie de 1 à 10 mm. Nous avons relevé la valeur de la résistance correspondante à chaque profondeur. Les résultats obtenus sont représentés par la courbe de la figure 6.

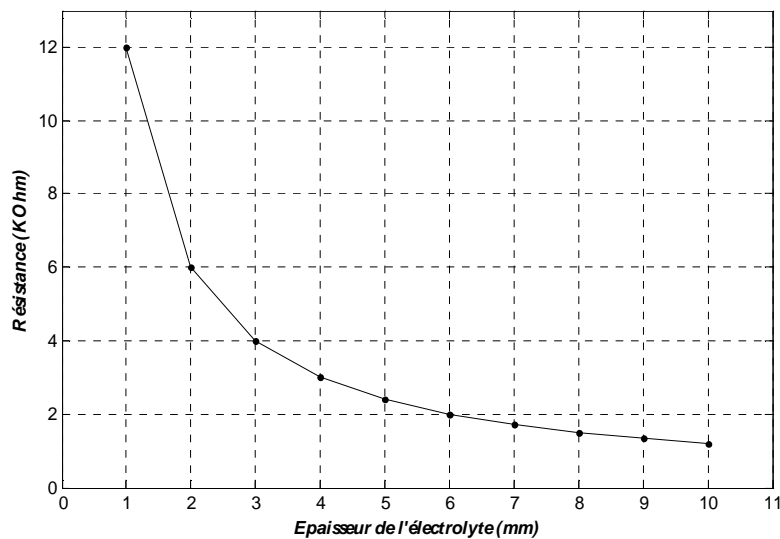
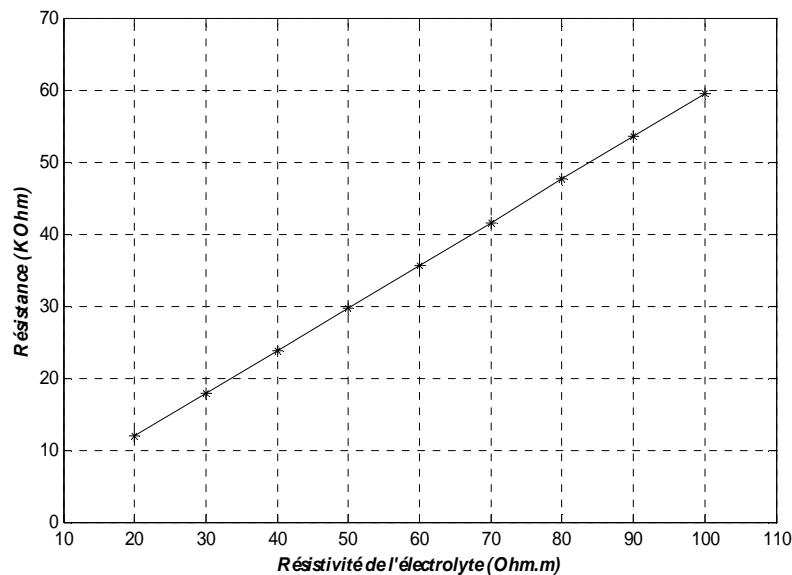


Figure 6: L'influence de l'épaisseur sur la résistance de pollution

Nous constatons l'influence de la profondeur de pollution sur la résistance, l'augmentation de l'épaisseur entraîne une diminution de la résistance.

### 3.5. 2.2.L'influence de la résistivité

Afin de montrer l'effet de la variation de la résistivité sur la résistance totale de pollution nous avons utilisé des pollutions ayant des résistivités qui varient entre 10 et 100  $\Omega.m$  et d'une profondeur  $e=1$  mm. Nous avons relevé la valeur de la résistance correspondante à chaque résistivité. Les résultats obtenus sont présentés par la courbe de la figure 7



**Figure 7:**L'influence de la résistivité sur la résistance de pollution

La figure 7 présente les résultats de la résistance obtenus par Flux3D pour différentes valeurs de la résistivité. Dans tous les cas, la résistance de la couche de pollution varie d'une manière linéaire avec la résistivité de pollution.

Il est pratiquement difficile de mesurer la résistance de la pollution qui couvre la surface complexe de l'isolateur. A cet effet certains chercheurs proposent un nouveau modèle basé sur le développement de la géométrie extérieure d'un isolateur en une surface équivalent plate.

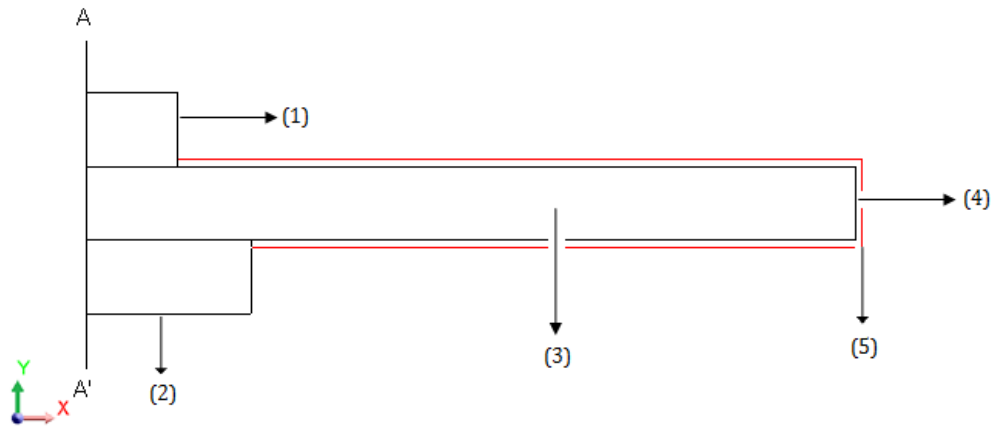
## 4. MODÉLISATION BIDIMENSIONNELLE - 2D

### 4.1. Détermination des géométries

#### 4.1.1. Axisymétrie d'un isolateur disque :

Pour les simulations bidimensionnelles d'un isolateur disque, il a été supposé que la pollution s'accumule uniformément sur la surface de l'isolateur comme le montre la figure 8.

Avec cette configuration, il est possible de définir une symétrie suivant le plan A A' coupant verticalement l'isolateur et la couche de pollution en deux parties égales. C'est donc suivant ce plan vertical que les modélisations et les simulations ont été réalisées et les distributions du potentiel et du champ électrique calculées.



**Figure 8 :** Configuration en 2D axisymétrique dérivées de la configuration 3D

(1) : l'électrode haute tension.

(2) : l'électrode basse tension.

(3) : disque.

(4) : rayon de disque.

(5) : pollution.

#### 4.1.2. Le modèle développé (ouvert) d'un isolateur disque :

Le modèle ouvert est un isolateur plat en deux dimensions qui représente un autre isolateur réel en trois dimensions et qui possède la même surface extérieure et la même ligne de fuite [26]

La figure 9 représente le modèle ouvert obtenu par la conversion de l'isolateur disque. Le principe de la transformation est basé sur la relation suivante :

$$Y(x) = 2\pi r(x) \quad \text{IV-11}$$

Et par la rotation d'un angle  $\theta$  qui varie entre 0 et 360° des points  $(x_i, y_i)$  relevés sur la surface de l'isolateur.

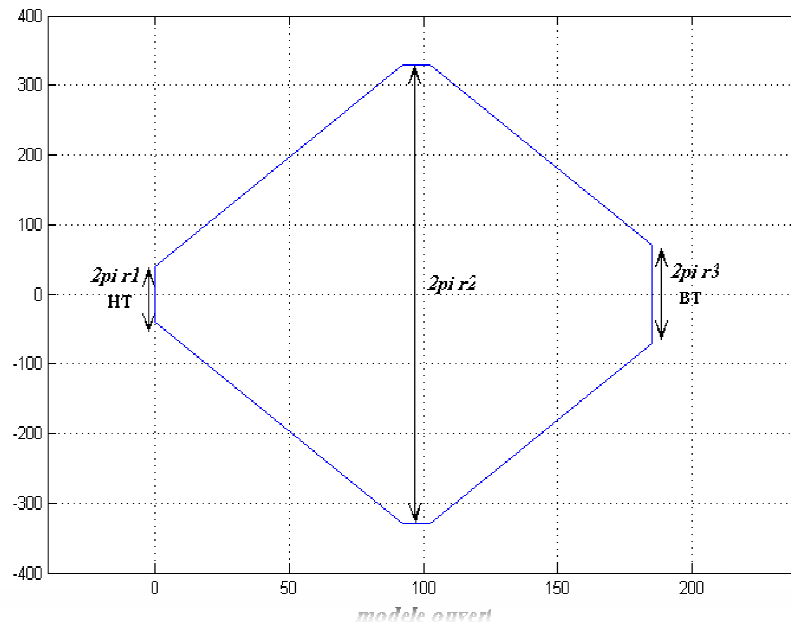
Avec :

$x$  : est la distance entre l'électrode haute tension et un point sur la ligne de fuite.

$r(x)$  : est le rayon d'un cercle passant par un point sur la ligne de fuite.

$Y(x)$  : est la distance verticale dans le modèle ouvert figure 9.

$r_1$  et  $r_3$  sont respectivement le rayon de l'électrode BT et HT.



**Figure 9:** Modèle ouvert d'un isolateur disque

#### 4.2.Choix de maillage :

Le maillage est une opération très importante pouvant influencer la qualité des résultats de la simulation. En effet, il s'agit de l'opération qui crée les éléments finis en fonction des nœuds considérés. Dans notre cas, ces éléments sont des tétraèdres dont la taille est définie par l'utilisateur.

La figure 10 et 11 permettent de visualiser les éléments surfaciques obtenus dans le cas d'étude considérée et permettent d'apprécier les différentes tailles des éléments ainsi créés.

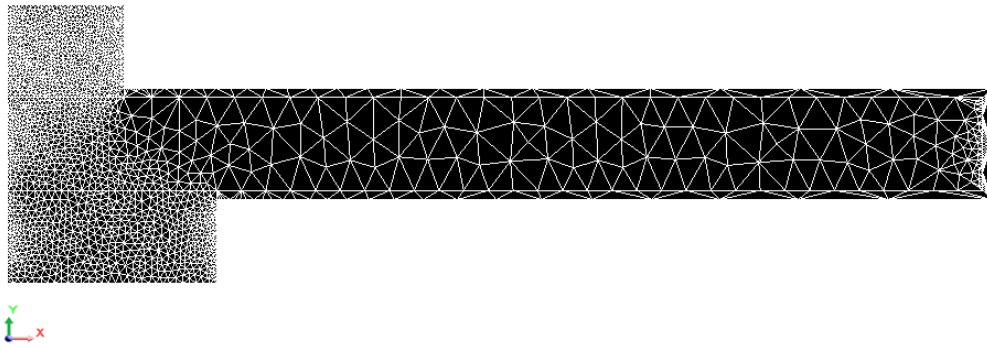


Figure 10 : Maillage surfacique (configuration axisymétrique)

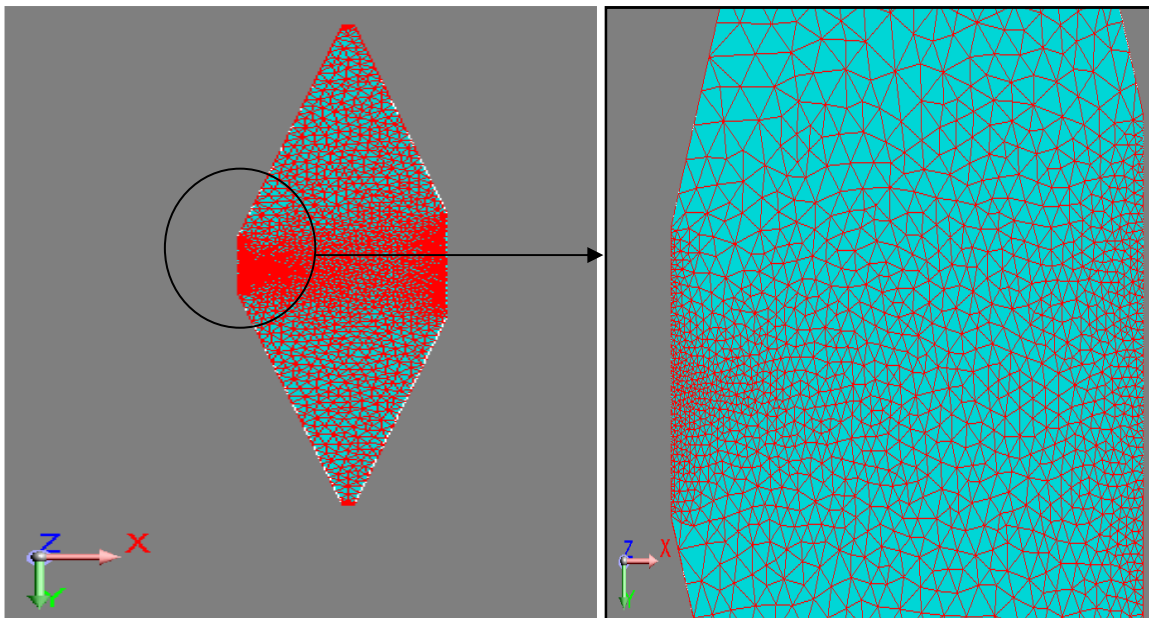


Figure 11 : Maillage surfacique (configurations en 2D)

### 4.3. Choix de modèle physique

Afin de pouvoir définir le phénomène physique il est nécessaire d'imposer des contraintes linéiques sur les différents conducteurs :

$$V(1) = 10000V$$

$$V(0) = 0V$$

### 4.4. Résultats et exploitations

Nous avons effectué une simulation en électrocinétique par logiciel FLUX2D sur nos configurations. Cette étude porte sur le calcul de la résistance, le potentiel, le champ électrique et la densité de courant dans la couche de pollution.

Nous avons modélisé la région de pollution par une couche électrolytique pour des résistivités qui varient entre 2...10 K $\Omega$ .cm.

#### 4.4. Calcul de la résistance

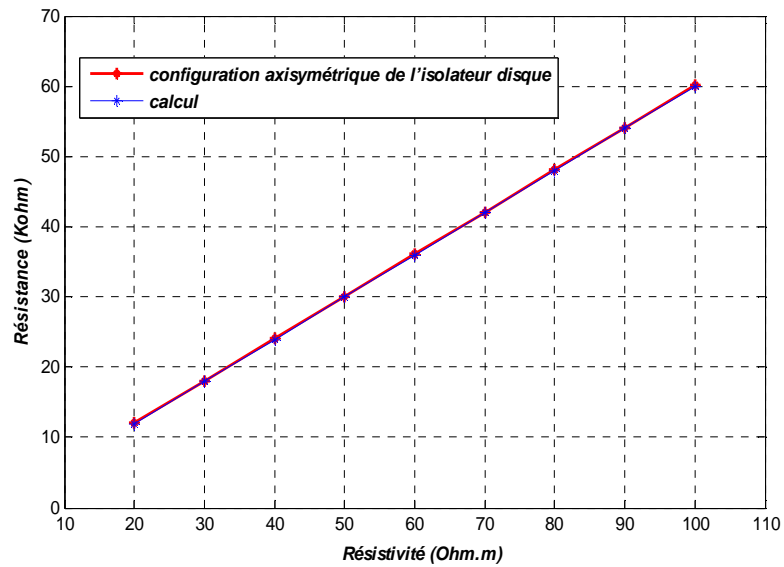
##### 4.4. 1. Configuration axisymétrique

Le tableau 2 représente les résultats de calcul de la résistance totale pour différentes résistivités utilisées dans le calcul analytique (annexe B) et par le logiciel Flux2D.

Résistivité de la Pollution $\rho$ ( $\Omega$ m)	Resistance de la Pollution R (K $\Omega$ )	
	Calcul Analytique (Annexe B)	Calcul flux 2D (Annexe C)
20	11.987	12.008
30	17.980	18.012
40	23.974	24.016
50	29.967	30.020
60	35.961	36.024
70	41.954	42.028
80	47.948	48.032
90	53.941	54.036
100	59.934	60.040

**Tableau.2** : Résistance de la configuration axisymétrique pour une épaisseur 1 mm.





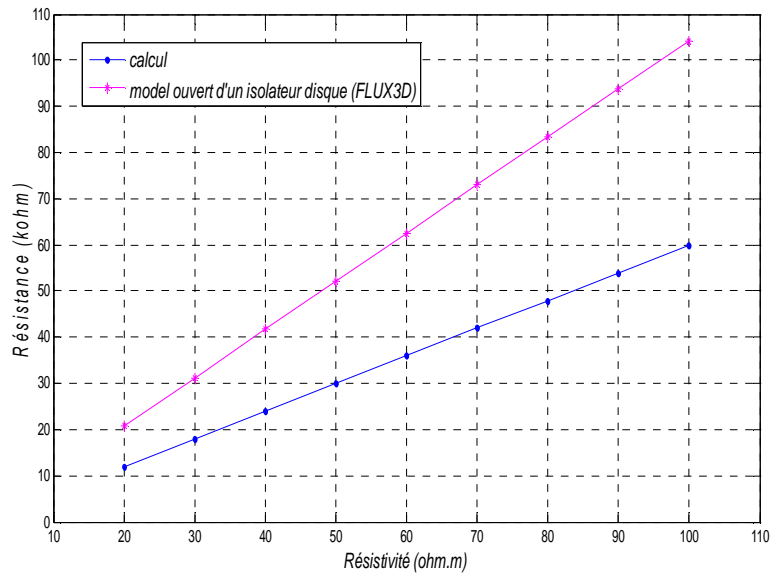
**Figure 12:** Résistance total de pollution.

Les résultats de la comparaison entre l'isolateur disque et sa géométrie axisymétrique sont très satisfaisants en matière de calcul.

#### 4.4. 2.Modèle développé (ouvert) d'un isolateur disque

Résistivité de la Pollution $\rho$ ( $\Omega m$ )	Resistance de la Pollution R (K $\Omega$ )	
	Calcul Analytique (Annexe B)	Calcul flux 2D (Annexe D)
20	11.987	20.850
30	17.980	31.276
40	23.974	41.701
50	29.967	52.126
60	35.961	62.552
70	41.954	72.977
80	47.948	83.403
90	53.941	93.828
100	59.934	104.253

**Tableau.3 :** Résistance de modèle développée pour une épaisseur 1 mm.



**Figure 13 :** Résistance total de pollution

La figure 13 représente les résultats de calcul de la résistance de la couche conductrice de pollution obtenus par le calcul analytique (annexe B) et ceux trouvés par logiciel pour différentes résistivités.

On remarque qu'il y a un écart important qui évolue avec l'augmentation de la résistivité entre les valeurs de la résistance mesurée et celles calculées analytiquement. La résistance calculée analytiquement est plus faible que la résistance déterminée par logiciel.

#### 4.5. L'influence des différents paramètres sur la résistance de la couche de pollution

##### 4.5. 1.L'influence de l'épaisseur sur le modèle développé

Pour évaluer l'influence de la variation de la profondeur de l'électrolyte sur la valeur de la résistance mesurée à l'aide de flux2D, nous avons utilisé un électrolyte de résistivité 1Kohm et d'une épaisseur qui varie de 1 à 10mm.

Nous avons relevé la valeur de la résistance correspondante à chaque profondeur. Les résultats obtenus sont représentés par la courbe de la Figure 14.

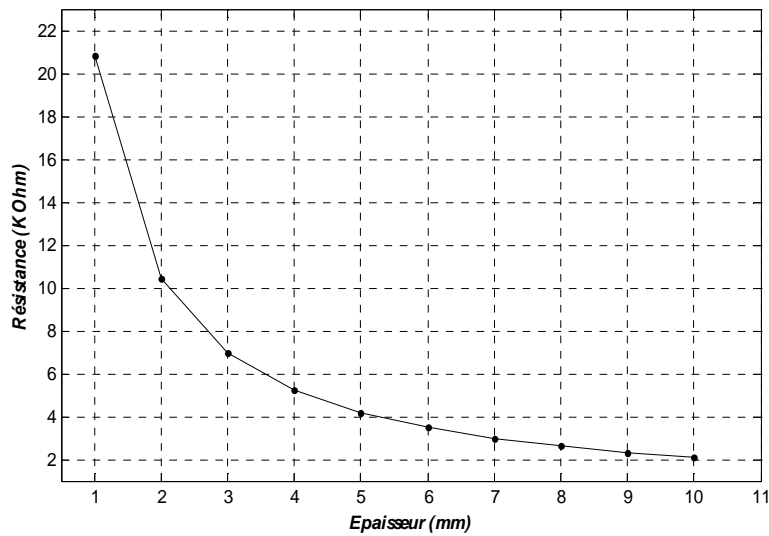


Figure 14: L'influence de l'épaisseur sur la résistance de pollution

#### 4.5. 2. L'influence de la résistivité sur le modèle développé

Afin de montrer l'effet de la variation de la résistivité sur la résistance totale de l'électrolyte nous avons utilisé des électrolytes ayant des résistivités qui varient entre 10 et 100  $\Omega.m$  et d'une profondeur  $e=1$  mm. Nous avons relevé la valeur de la résistance correspondante à chaque résistivité. Les résultats obtenus sont présentés par la courbe de la Figure 15.

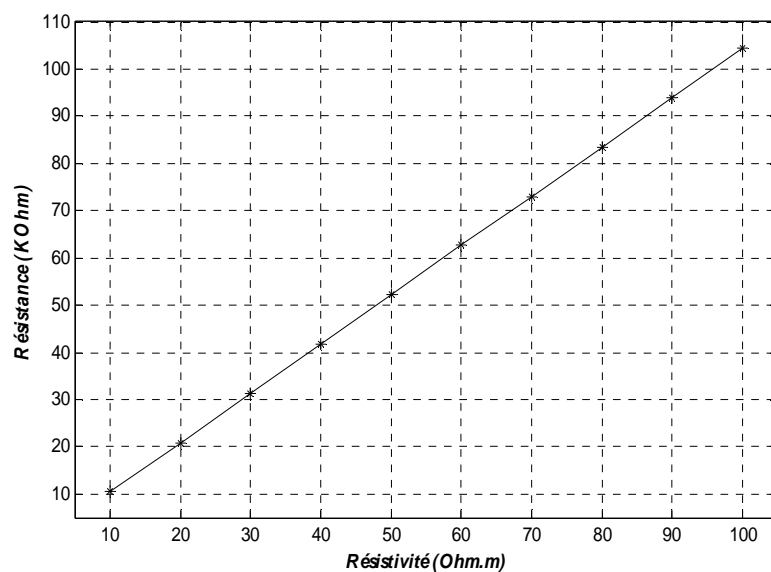
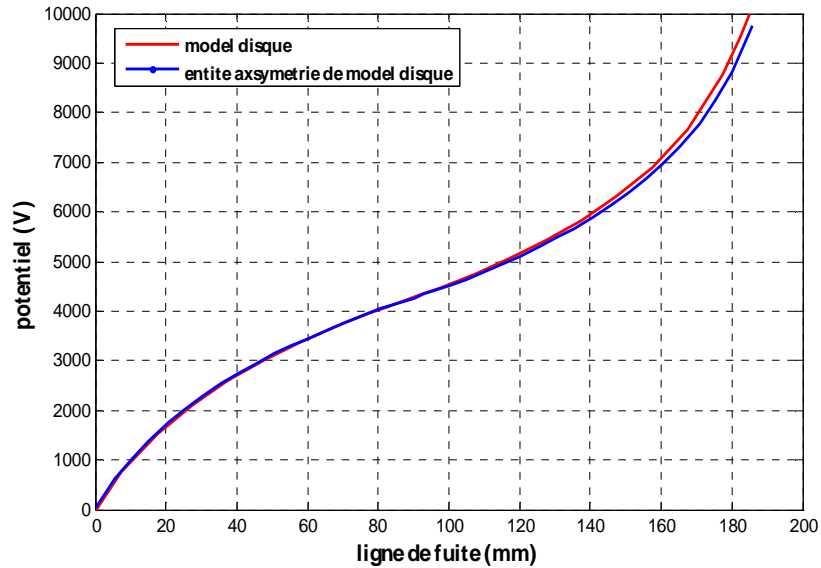


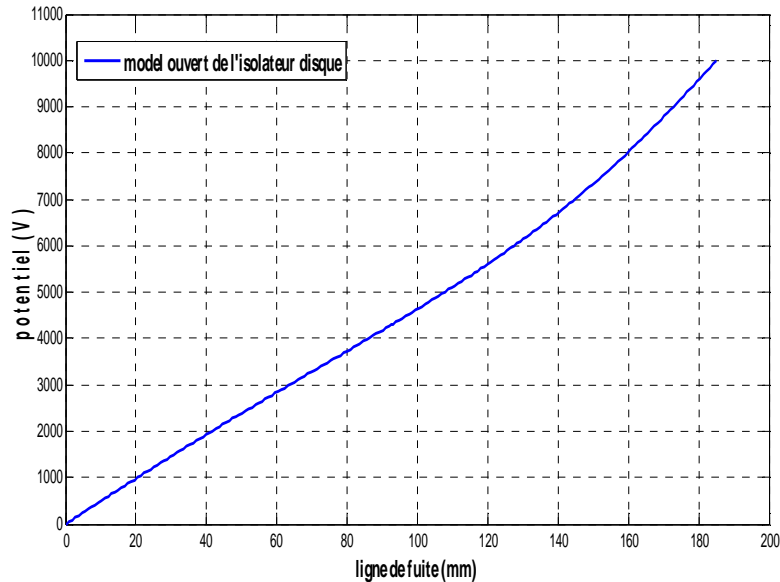
Figure 15 : L'influence de la résistivité sur la résistance de pollution

## 5. RESULTATS DE CALCUL

### 5.1. Distribution du potentiel



**Figure 16 :** Distribution de potentiel pour le modèle disque et sa configuration axisymétrique



**Figure 17 :** Distribution de potentiel pour le modèle développé.

Nous remarquons clairement que le potentiel sur la surface de l'isolateur le long de ligne de fuite augmente d'une manière régulière, avec une des tensions relativement élevées au fur et à mesure qu'on s'approche des électrodes haute tension et de base tension.

## 5.2. Distribution du champ électrique

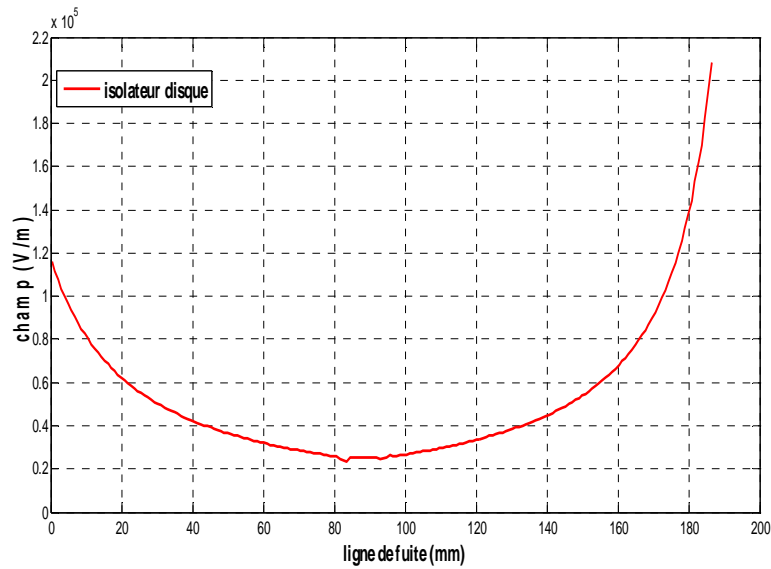


Figure 18 : Distribution de champ pour le modèle disque

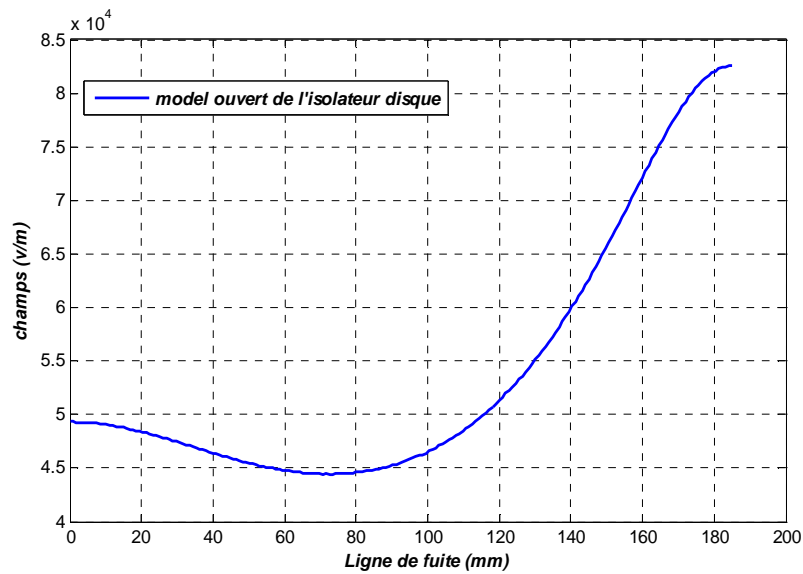


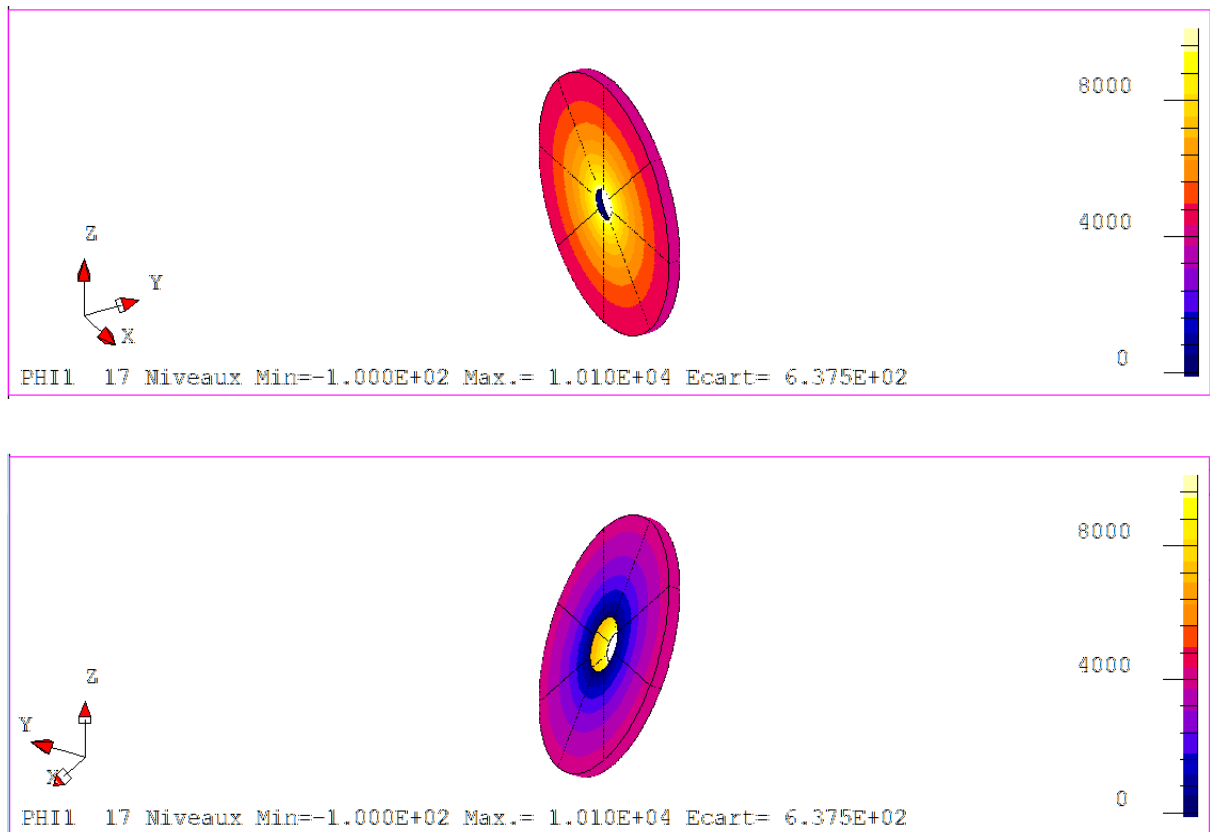
Figure 19 : Distribution de champ pour le modèle développé.

Nous avons déterminé les valeurs du champ électrique sur la surface le long de la ligne de fuite pour le cas d'une pollution uniforme. D'après les résultats obtenus nous avons tracé la courbe exprimant le gradient de potentiel en fonction de la ligne de fuite. Nous avons constaté que le champ est important du côté haute tension.

### 5.3. L'évolution du potentiel dans la couche de pollution uniforme

La distribution du potentiel sur la surface d'un isolateur pollué joue un rôle très important dans les différentes étapes du contournement qui est caractérisé par le dépôt de pollution, l'humidification de la couche polluante, circulation de courant de fuite, le séchage suivi par l'apparition des zones et des bandes sèches, puis l'amorçage des décharges électriques aux bornes de la bande sèche et finalement l'évolution de la décharge jusqu'au contournement total de l'isolateur.

Les résultats obtenus par le logiciel Flux3D sur nos géométries, sont présentés par la distribution du potentiel électrique de l'électrode Haute Tension passant par la couche de pollution à l'électrode basse tension. Cette distribution est montrée par la dégradation des couleurs.



**Figure 20** : L'évolution de potentiel dans l'isolateur disque.

On voit clairement que les lignes équipotentielles dans le modèle disque sont concentriques autour d'électrode haute tension et d'électrode basse tension.

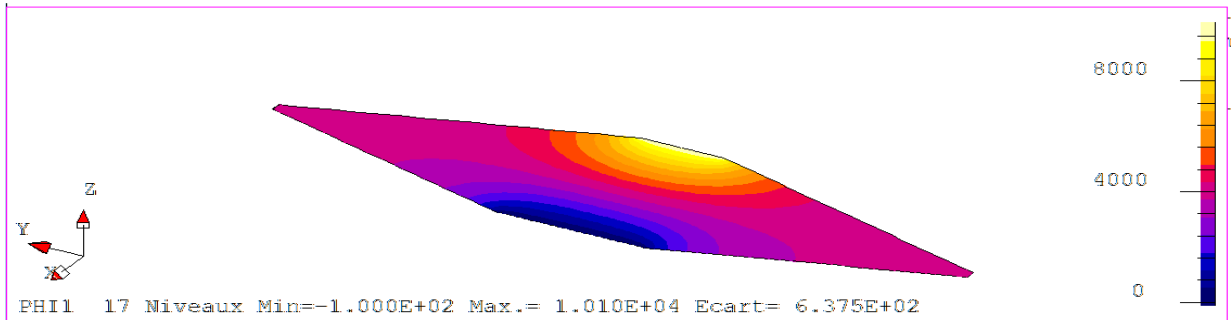


Figure 21 : L'évolution de potentiel dans le modèle développé.

On voit clairement que dans le modèle développé les équipotentielles représentées en dégradé ne sont pas coaxiales avec le centre du modèle développé. Cette déformation est causée par la géométrie elle-même.

#### 5.4. L'évolution du champ électrique dans la couche de pollution uniforme

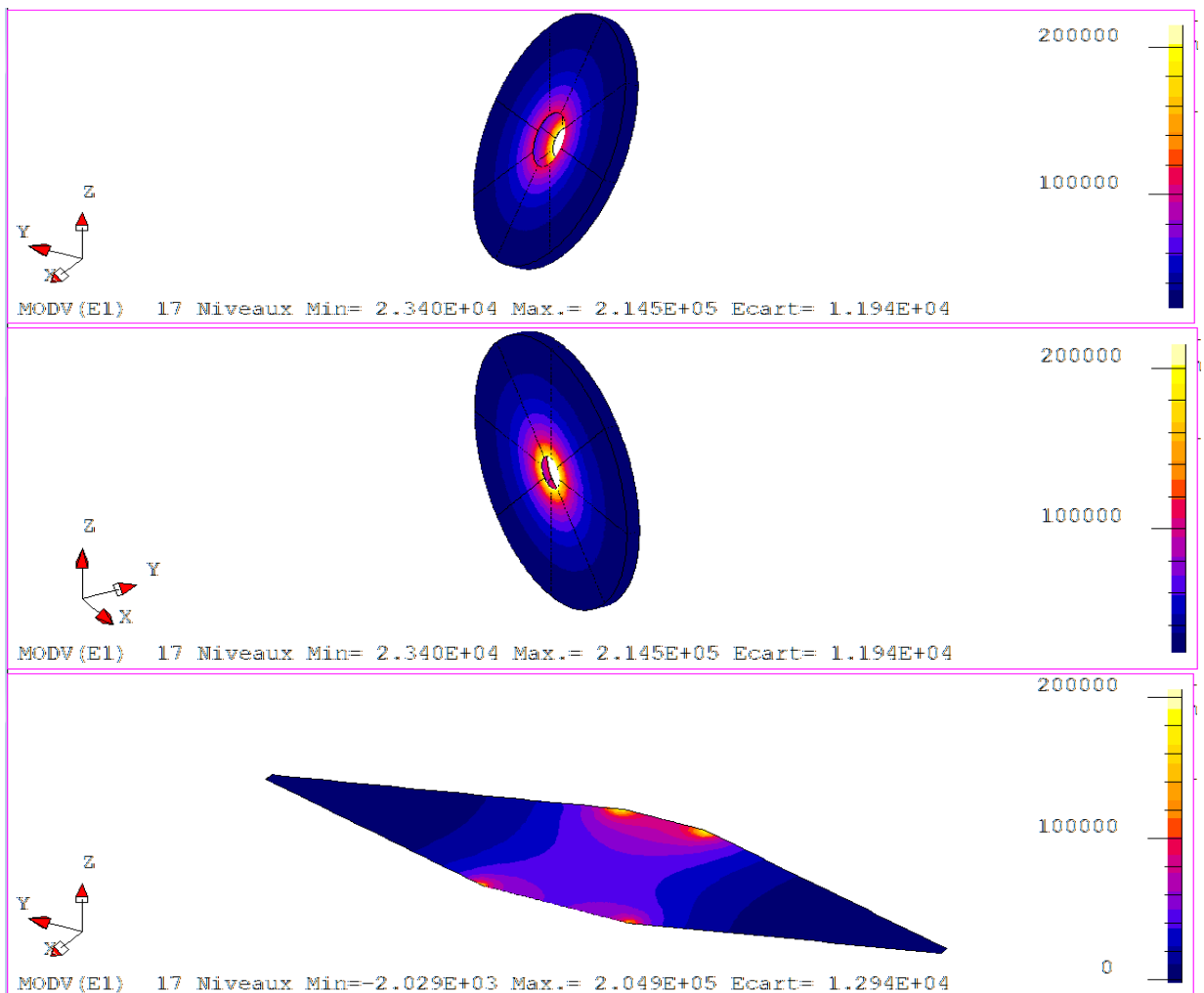


Figure 22 : L'évolution du champ électrique dans l'isolateur disque et le modèle développé.

## 6. ANALYSE LES RESULTATS DE SIMULATION 2D ET 3D

Nous consacrons cette partie aux comparaisons de nos calculs avec des résultats trouvés.

En analysant les résultats obtenus, nous avons cherché à savoir à quoi est due la différence entre les valeurs de la résistance de la couche de pollution pour les deux modèles, Cela est expliqué par le fait que la distribution du potentiel, du champ et des lignes de densité de courant, sont différent pour les deux modèles.

### 6.1. Etude comparative de la résistance :

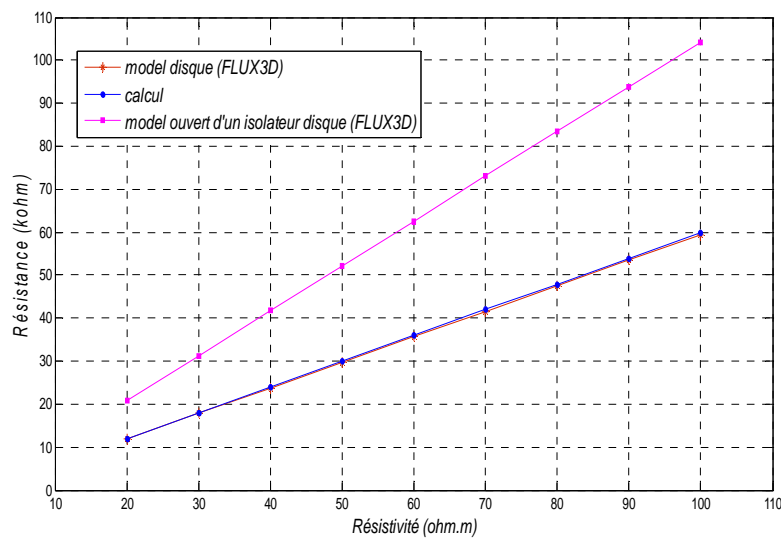


Figure 23 : Résistance total de l'isolateur disque et le modèle développé.

### 6.2. Etude comparative de la distribution de potentiel

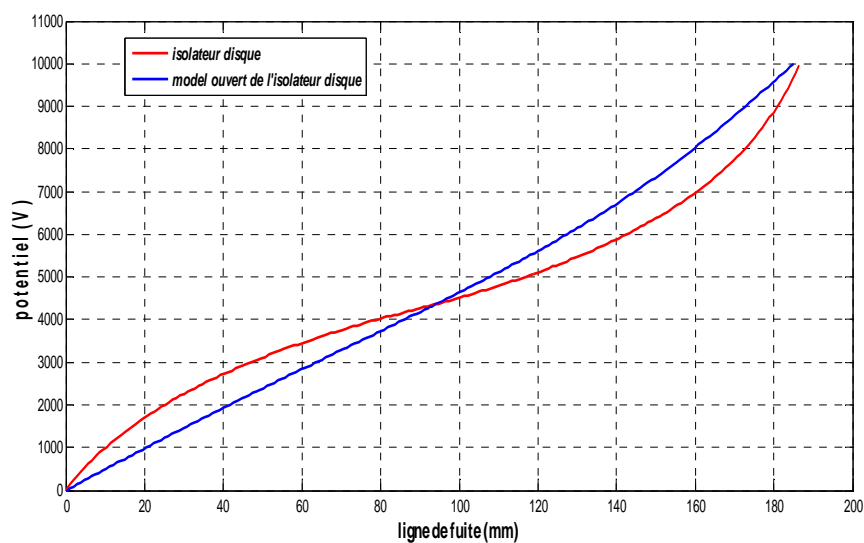


Figure 24: Distribution de potentiel de l'isolateur disque et le modèle développé.



### 6.3. Etude comparative de la distribution du champ électrique

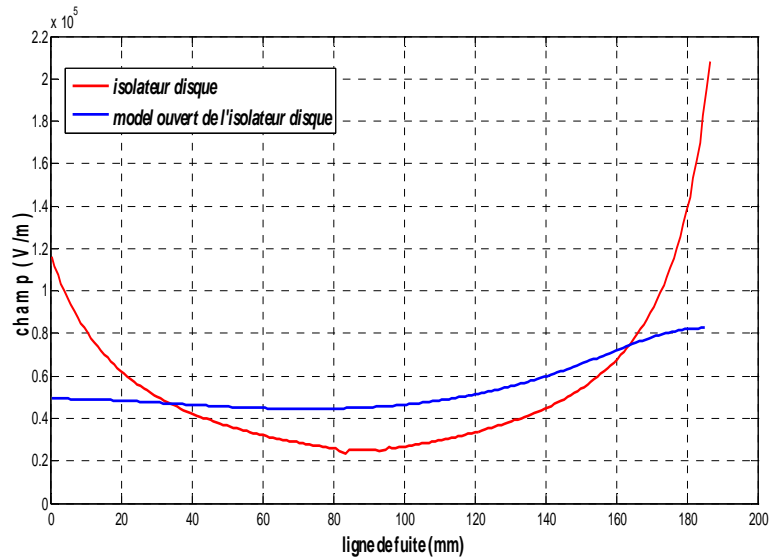


Figure 25 : Distribution du champ électrique de l'isolateur disque et le modèle développé.

### 6.4. Ligne de densité de courant

Les figures 26 et 27 présentent la répartition des lignes de densité de courant dans la couche de pollution pour le modèle disque avec deux vues différentes et une seule vue pour le modèle développé.

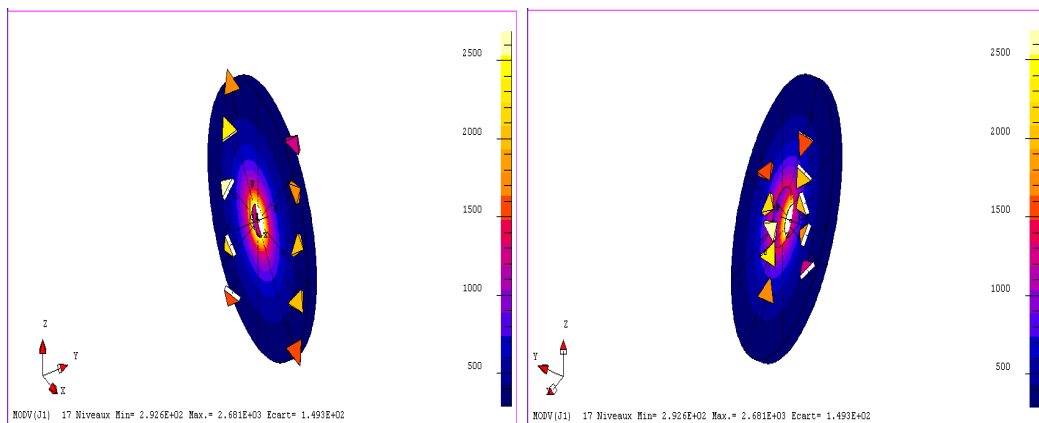
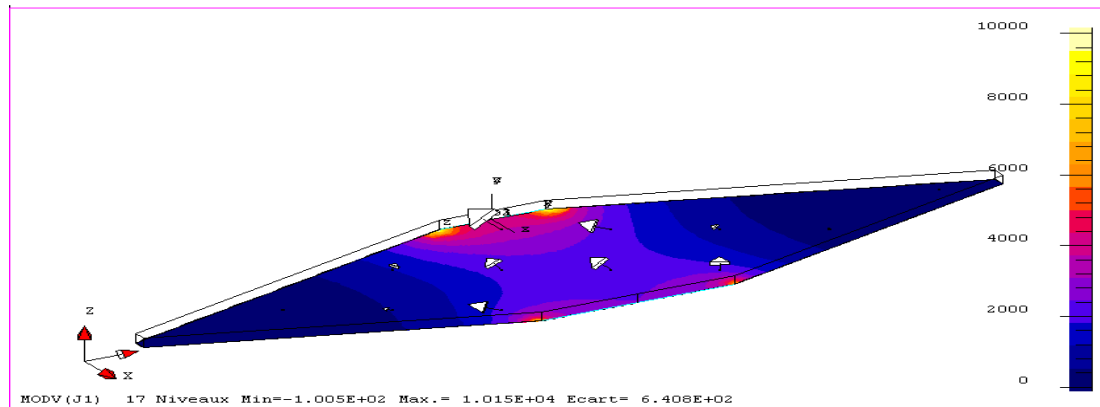


Figure 26 : Ligne de densité de courant pour le modèle disque.



**Figure 27 :** Ligne de densité de courant pour le modèle développée.

Nous savons bien que le courant électrique est le produit de la densité de courant par la surface à travers laquelle circulent les charges électriques.

Le calcul analytique suppose une distribution uniforme des lignes de courant et toute la surface de l'électrolyte est utilisée, c'est le cas de la figure 26. On voit que les lignes de courant traversent toute la surface de conduction de la couche de pollution. C'est la raison pour laquelle on a trouvé une bonne concordance entre le calcul et le modèle disque (Flux3D). Par contre dans la deuxième configuration figure 27, on constate qu'il y a une partie de la couche de pollution dont les lignes de courant ne traversent pas, et c'est la raison pour laquelle la résistance dans ce cas est plus importante.

## CONCLUSION

D'après la modélisation des deux dispositifs par le logiciel FLUX3D, nous avons pu comprendre que la distribution des lignes de courant dans l'électrolyte pour les deux modèles était différente, la résistance électrique est liée au nombre des lignes de courant qui traversent la surface de conduction. Cela explique pourquoi les valeurs de la résistance sont différentes. On peut dire que le modèle ouvert représente bien le modèle disque du point de vue surface extérieure et la même ligne de fuite.

# CHAPITRE IV : AMELIORATION DU MODELE DEVELOPPE

---

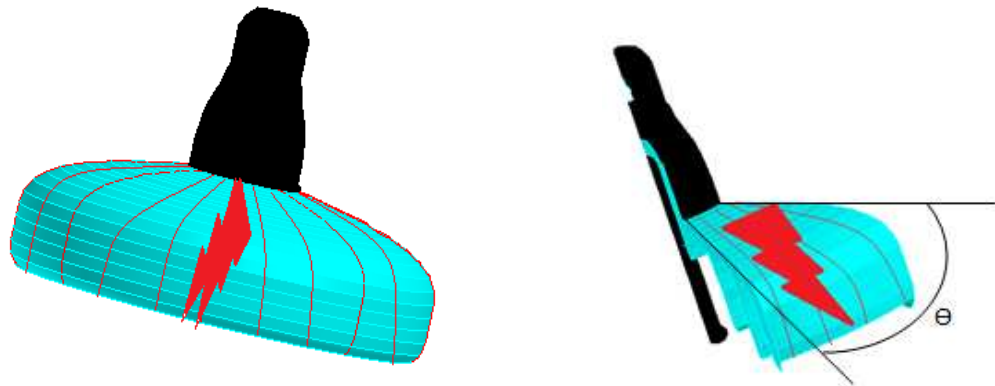
Toute modélisation et calcul des grandeurs caractérisant le contournement passe par la détermination des paramètres géométriques et le calcul de la résistance de la pollution de l'isolateur.

Le calcul analytique donnant la résistance totale de pollution utilisée par la plus part des chercheurs n'est pas correcte en présence d'une décharge électrique. Par contre elle reste valable dans le calcul de la résistance totale de pollution sans la présence de la décharge électrique.

L'objet principal du présent chapitre est de trouver un modèle, qui donne la même résistance de la couche de pollution calculée et déterminée par logiciel FLUX3D.

### 1. ETUDE COMPLEMENTAIRE DU MODELE DEVELOPPE :

Les isolateurs des équipements des lignes aériennes se couvrent progressivement des couches de pollution, Ces couche lorsqu'elles sont humidifiées deviennent conductrices et laissent passer un courant de fuite. Ce qui engendre un échauffement non uniforme, d'où une formation des bandes sèches dans les régions à plus forte densité de courant. Lorsque plusieurs bandes sèches se forment en même temps, après quelques secondes, une de ces bandes va prédominer. La chute de tension aux bornes de la bande sèche est égale à la tension qui à été appliquée initialement aux bornes des électrodes de l'isolateur. Ce qui conduit à une augmentation du champ au niveau de la bande sèche à un amorçage d'arc et l'allongement d'une décharge électrique sur sa surface jusqu'à relier ses deux extrémités [29]. Cette décharge en réalité passe par une partie de la surface totale de l'isolateur. Que nous appelons la zone d'influence.



**Figure.1** : La répartition des lignes de courant

Cette zone est définie par l'angle inconnu  $\theta = \frac{2\Pi}{n}$  représentant la zone active de la couche de pollution. C'est la zone où la densité de courant est importante. Au voisinage de cet angle le reste de la surface totale est parcourue par des courants faibles.

## 2. VALIDATION DE LA ZONE D'INFLUENCE

Pour valider notre proposition concernant la zone d'influence, nous avons étudié plusieurs types des isolateurs dans le but de déterminer l'angle qui vérifie l'égalité sur la détermination de la résistance de pollution entre le calcul et logiciel.

### 2.1. Etude sur l'isolateur disque

#### Etude 1 :

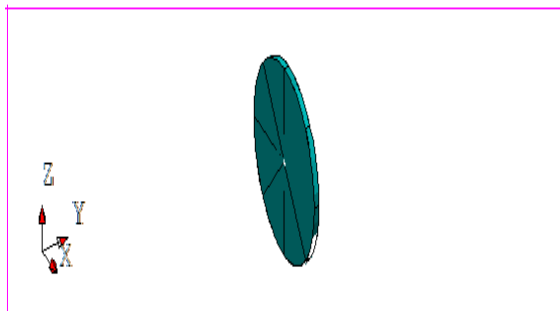
r HT:12.5 mm

r BT:22.5 mm

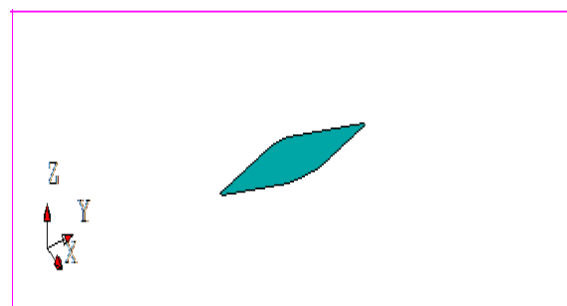
r Disque:105 mm

Ligne de fuite:185 mm

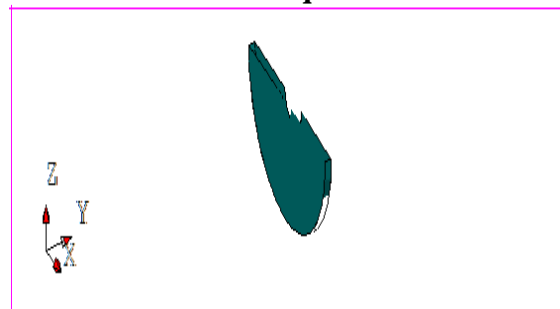
#### Modélisation de l'isolateur disque et son modèle développé :



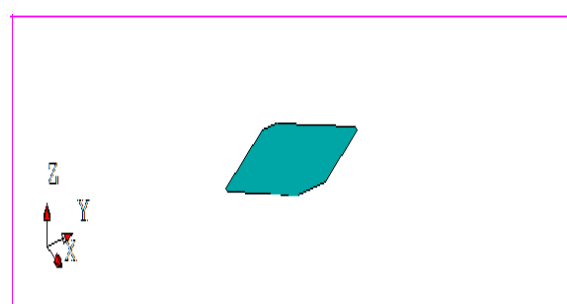
disque



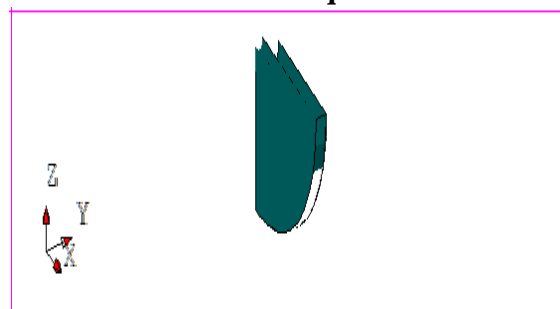
Développé



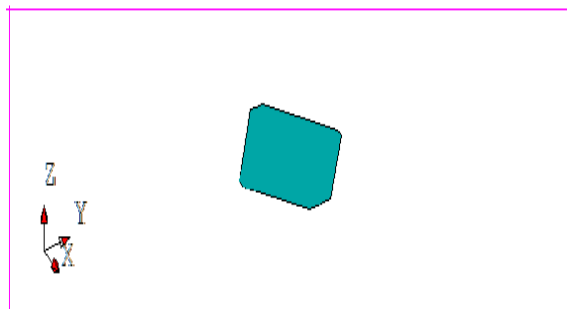
1/2 disque



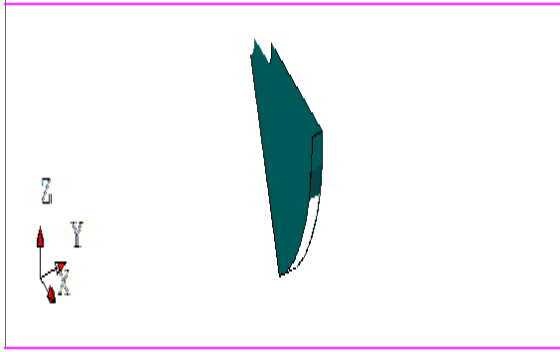
1/2 Développé



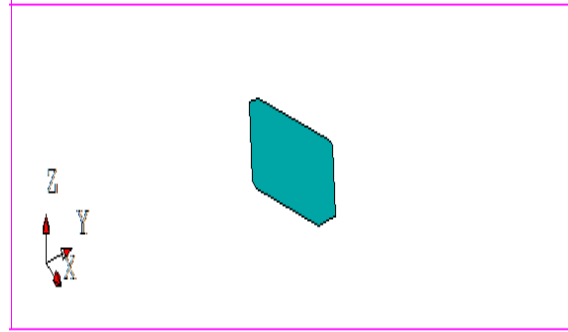
1/4disque



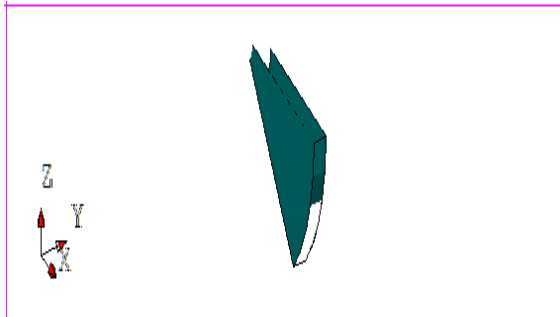
1/4 Développé



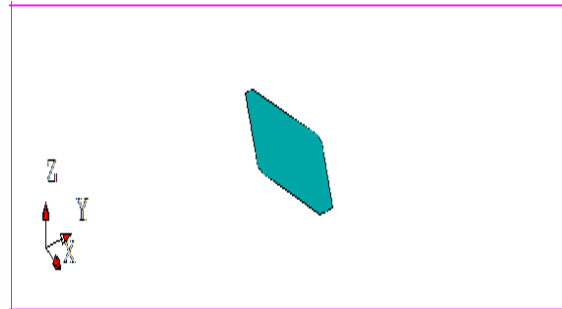
**1/6 disque**



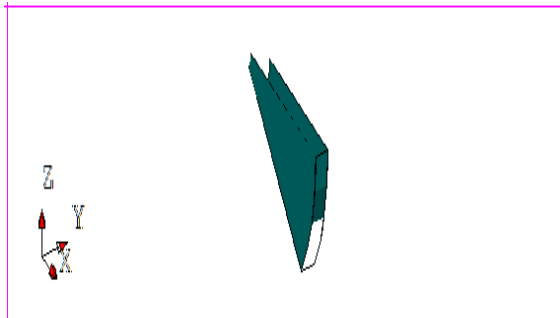
**1/6 Développé**



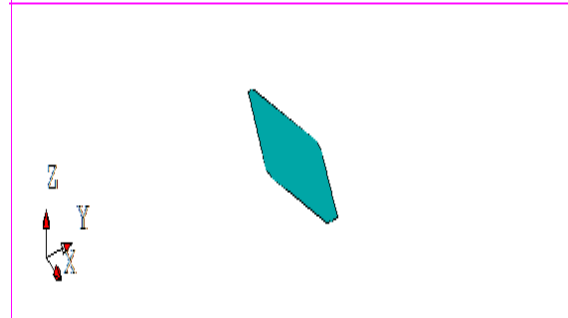
**1/8 disque**



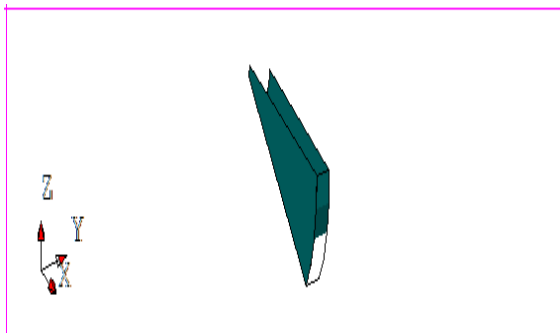
**1/8 Développé**



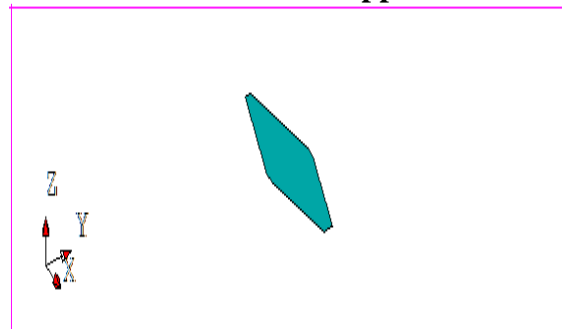
**1/10 disque**



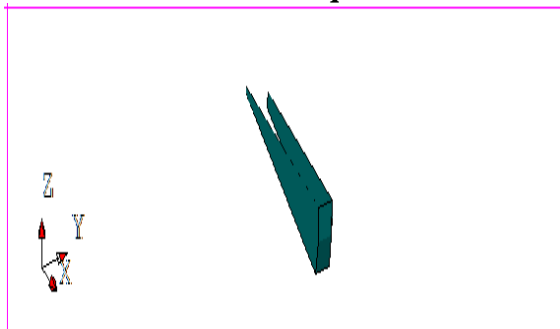
**1/10 Développé**



**1/12 disque**



**1/12 Développé**



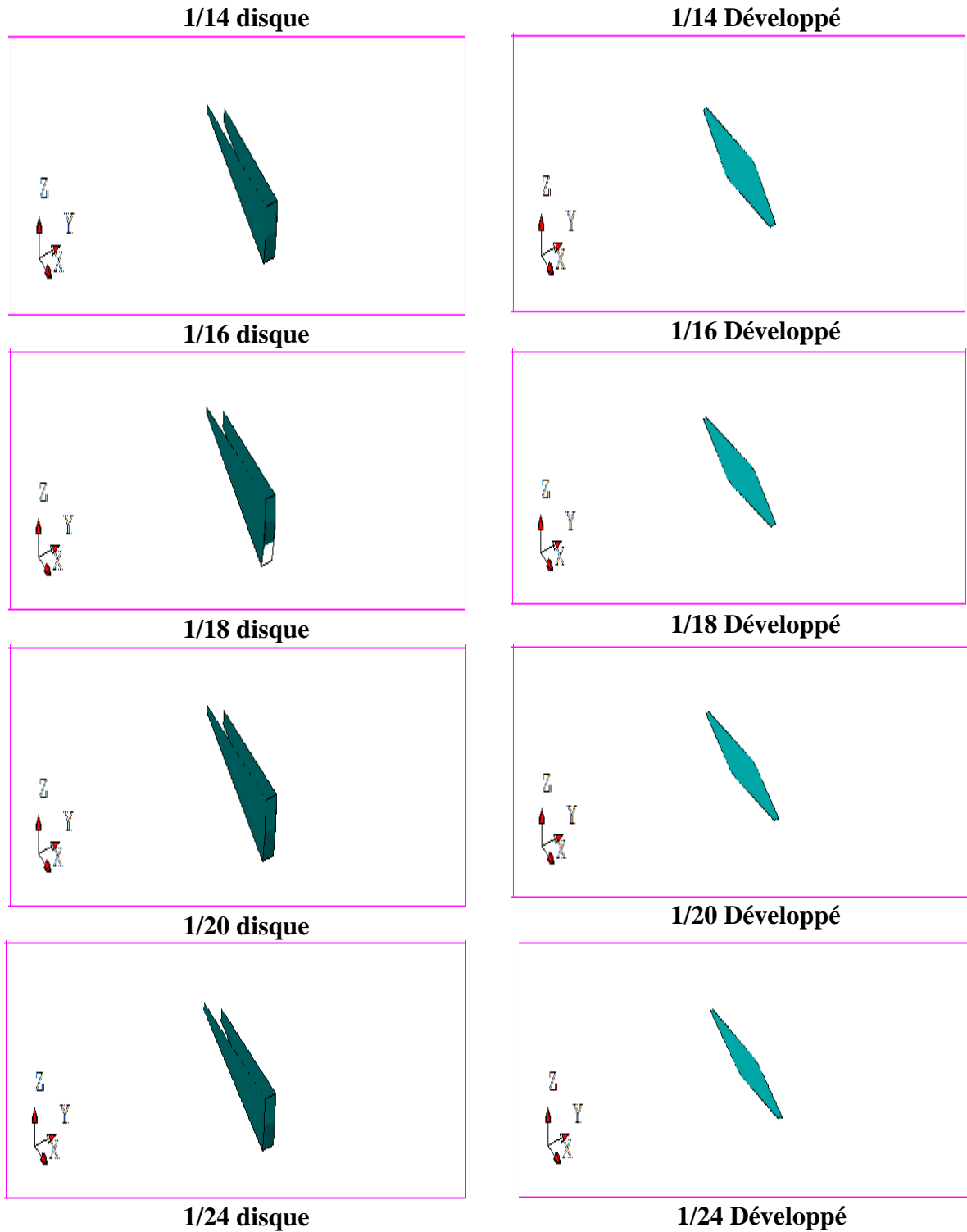


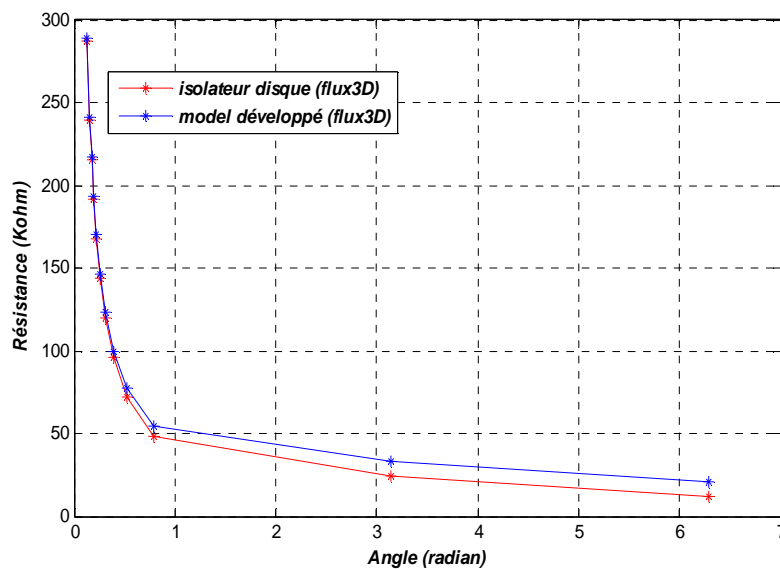
Figure 2 :Représente la zone d'influence du modèle disque et son modele développé.

De cette manière et à chaque diminution de la surface on compare les résultats déterminés par logiciel FLUX3D et ceux calculés analytiquement jusqu'à où nous trouvons à un certain nombre de divisions correspondant à un certain angle que les résultats du calcul par logiciel et le calcul analytique sont identiques.

**Calcul de la résistance :**

surface	n	$\theta = \frac{2\pi}{n}$	Radian	R disque (flux3D) (Annexe C)	R développé (flux3D) (Annexe C)
disque	1	360	6.28	11.98	20.866
1/2 disque	2	180	3.14	23.9	32.929
1/4 disque	4	90	1.57	47.864	54.729
1/6 disque	6	60	1.046	71.794	77.014
1/8 disque	8	45	0.785	95.7	99.848
1/10 disque	10	36	0.628	119.635	123.036
1/12 disque	12	30	0.523	143.541	146.452
1/14 disque	14	25.71	0.448	167.474	169.969
1/16 disque	16	22.5	0.392	191.397	193.589
1/18 disque	18	20	0.348	215.305	217.253
1/20 disque	20	18	0.314	239.218	241.09
1/24 disque	24	15	0.261	287.107	288.535

**Tableau 1:** Comparaison entre l'isolateur disque et son modèle développé pour différent angles



**Figure 3 :** Comparaison entre l'isolateur disque et son modèle développé



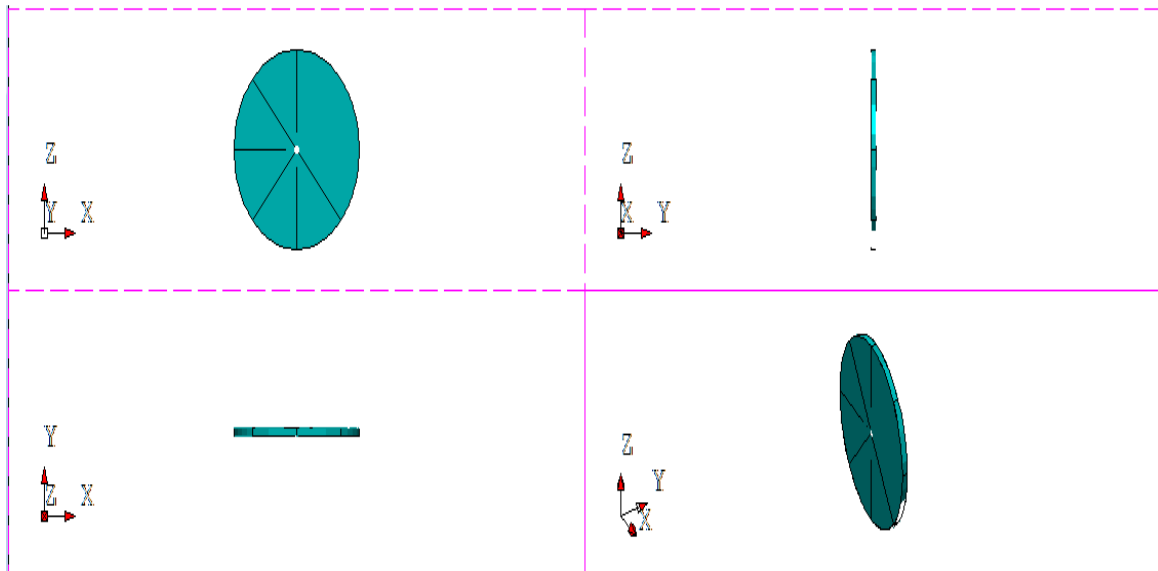
**Etude 2 :**

r HT:20 mm

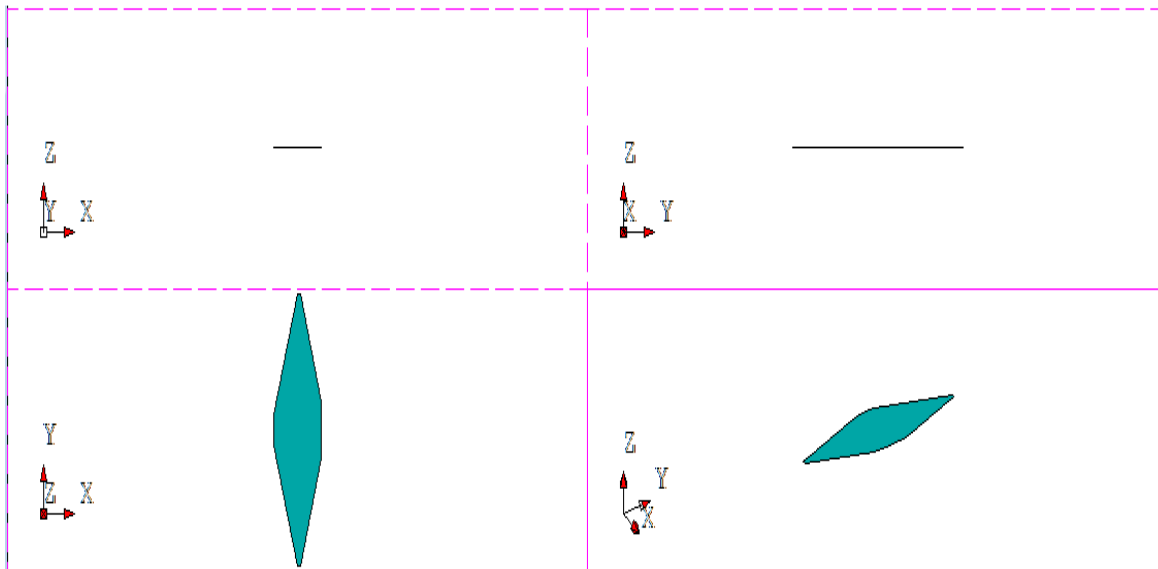
r BT:35 mm

r Disque:200 mm

Ligne de fuite:355 mm



**Figure 4 :4 Vues de l'isolateur disque**



**Figure 5 :4 Vues de modèle développé**

Calcul de la résistance :

surface	n	$\theta = \frac{2\pi}{n}$	Radian	R disque (flux3D) (Annexe C)	R développé (flux3D) (Annexe C)
disque	1	360	6.28	13.464913	24.819031
1/2 disque	2	180	3.14	26.951613	37.39693
1/4 disque	4	90	1.57	53.864696	61.55948
1/6 disque	6	60	1.046	80.788461	86.54415
1/8 disque	8	45	0.785	107.63412	112.24836
1/10 disque	10	36	0.628	134.56724	138.27678
1/12 disque	12	30	0.523	161.48871	164.75062
1/14 disque	14	25.71	0.448	188.24463	190.92253
1/16 disque	16	22.5	0.392	215.18284	217.62522
1/18 disque	18	20	0.348	242.15955	244.29577
1/20 disque	20	18	0.314	269.12897	271.03374
1/24 disque	24	15	0.261	323.05868	324.53859

Tableau 2 : Etude de Comparaison entre l'isolateur disque et son modèle développé pour différents angles

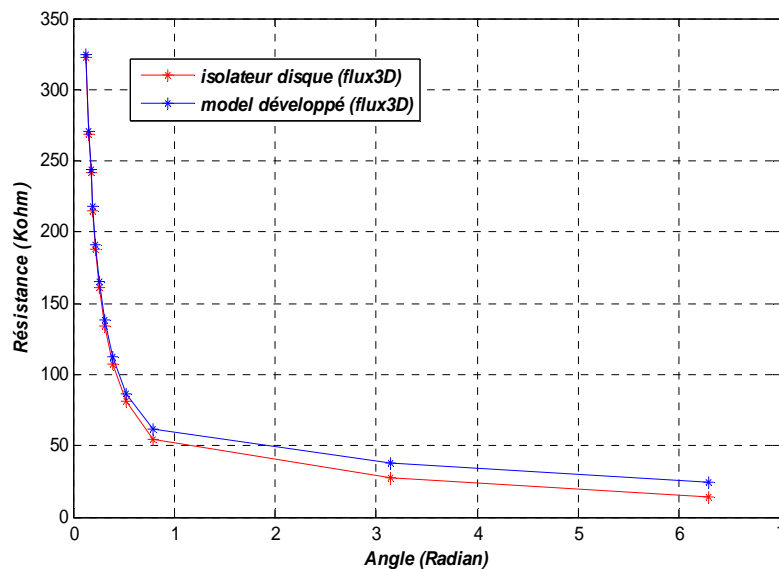


Figure 6 : Comparaison entre l'isolateur disque et son modèle développé

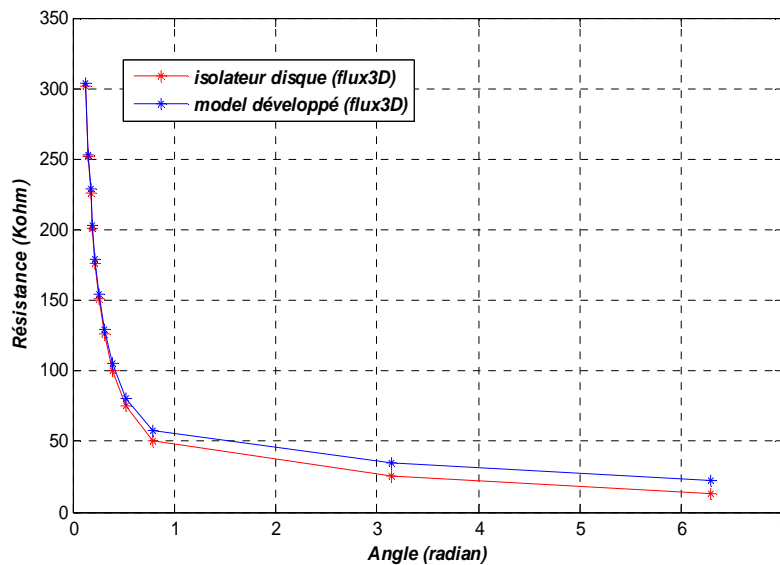
**Etude 3 :**

r HT:6.5 mm  
 r BT:12.5 mm  
 r Disque:60 mm  
 Ligne de fuite:111 mm

**Calcul de la résistance :**

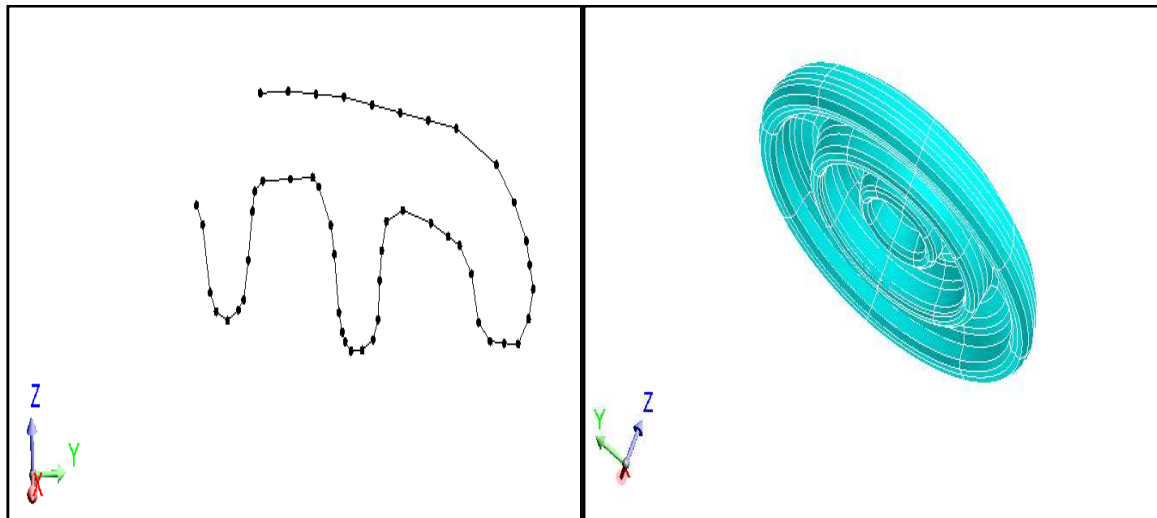
surface	n	$\theta = \frac{2\pi}{n}$	Radium	R disque (flux3D) (Annexe C)	R développé (flux3D) (Annexe C)
disque	1	360	6.28	12.6	22.3
1/2 disque	2	180	3.14	25.1	34.8
1/4 disque	4	90	1.57	50.3	57.6
1/6 disque	6	60	1.046	75.5	80.9
1/8 disque	8	45	0.785	100.6	105.0
1/10 disque	10	36	0.628	125.8	129.3
1/12 disque	12	30	0.523	150.9	153.9
1/14 disque	14	25.71	0.448	176.0	178.7
1/16 disque	16	22.5	0.392	201.2	203.5
1/18 disque	18	20	0.348	226.4	228.5
1/20 disque	20	18	0.314	251.5	253.2
1/24 disque	24	15	0.261	301.8	303.3

**Tableau 3 :** Etude de Comparaison entre l'isolateur disque et son modèle développé pour différents angles



**Figure 7 :** Comparaison entre l'isolateur disque et son modèle développé

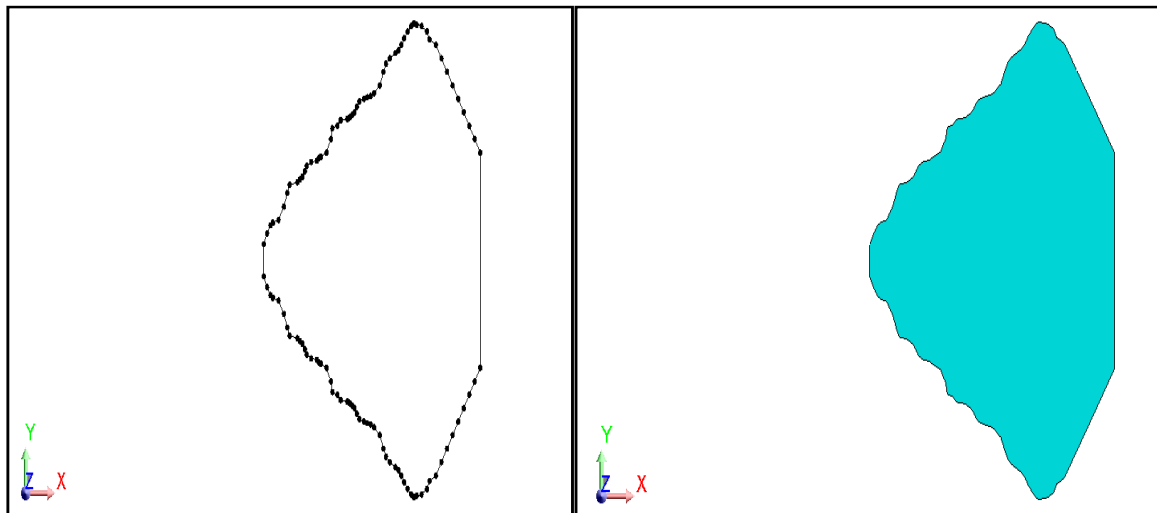
## 2.2. Etude sur l'isolateur réel - U40



a : Introduction des coordonnées

b : Visualisation de la région surfacique

**Figure 8** : Isolateur Réel U40



a : Introduction des coordonnées

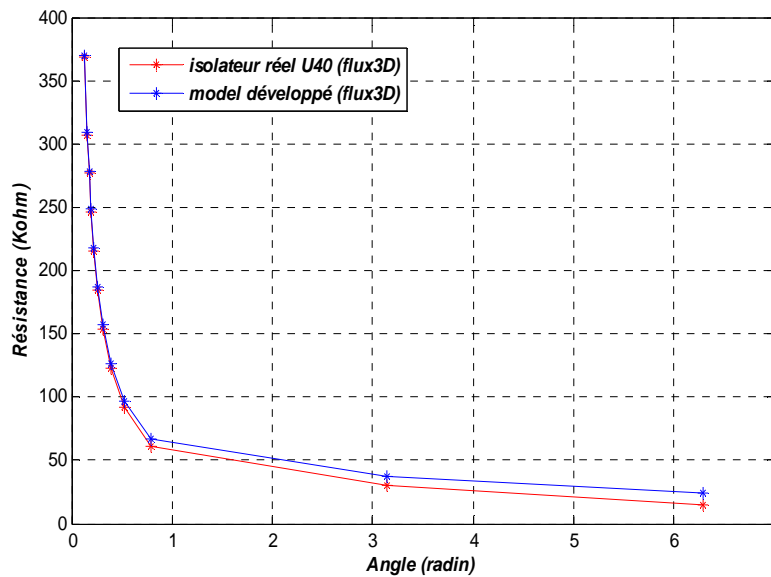
b : Visualisation de la région surfacique

**Figure 9** : Model développé U40

Calcul de la résistance :

surface	n	$\theta = \frac{2\pi}{n}$	R disque (flux3D) (Annexe C)	R développé (flux3D) (Annexe C)
disque	1	360	15.400	23.947
1/2 disque	2	180	30.791	37.827
1/4 disque	4	90	61.653	66.985
1/6 disque	6	60	92.434	96.666
1/8 disque	8	45	123.292	126.773
1/10 disque	10	36	153.961	156.928
1/12 disque	12	30	184.467	187.022
1/14 disque	14	25.71	215.066	217.317
1/16 disque	16	22.5	246.373	248.382
1/18 disque	18	20	276.811	278.590
1/20 disque	20	18	307.3623	308.900
1/24 disque	24	15	368.343	369.252

**Tableau 4 :** Comparaison entre l'isolateur disque et son modèle développé pour différents angles



**Figure 10 :** Comparaison entre l'isolateur Réel U40 et son modèle développé

Les figures (3, 6, 7,10) rassemblent les deux résistances du modèle disque 3D et son modèle développé 2D. A la suite de notre étude on a montré que pour un angle  $\theta$  qui varie de  $45^\circ \dots 15^\circ$  les résistances du modèle ouvert et du modèle disque sont égales.

3. RESULTAS ET EXPLOITATION :

3. 1. Calcul de la résistance de la couche de pollution:

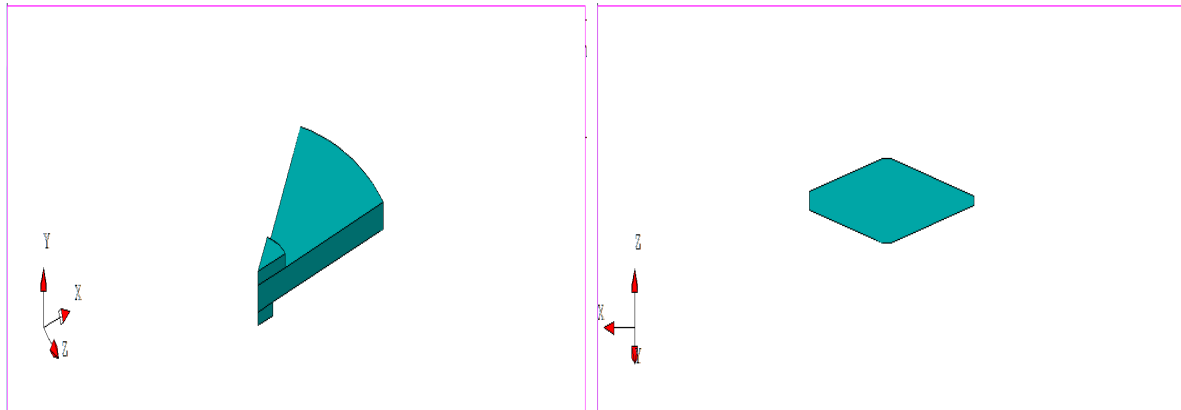


Figure 11 : Zone d'influence pour un angle de 45° (1/8 de disque).

Résistivité (Ω.m)	R disque (flux3D) (Annexe C)	R développé (flux 3D) (Annexe C)
20	95.70	95.093
30	143.55	142.640
40	191.40	190.187
50	239.25	237.734
60	287.10	285.281
70	334.95	332.828
80	382.80	380.375
90	430.65	427.922
100	478.50	475.469

Tableau 5 : Résistance de l'isolateur disque et du modèle développé pour  $\theta = 45^\circ$

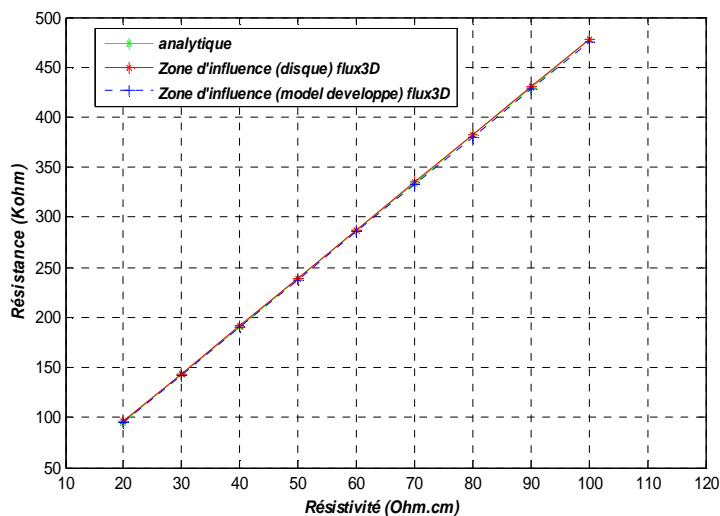
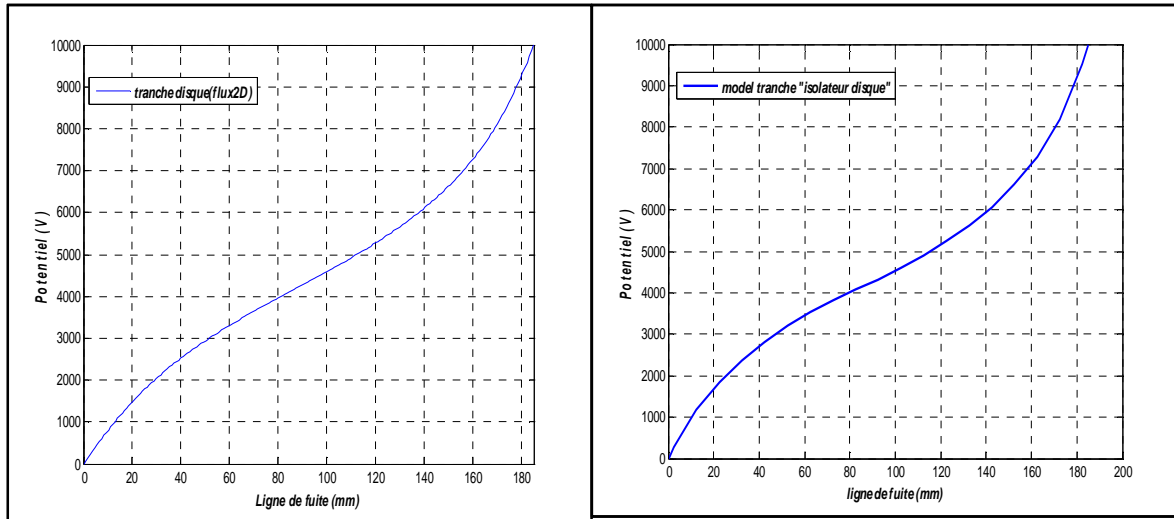


Figure 12 : Résistance de l'isolateur disque et du modèle développé pour  $\theta = 45^\circ$

Les résultats de l'analyse des deux modèles montrent qu'il y a une très bonne concordance entre les deux manières de calcul de la résistance totale pour toutes les valeurs de la résistivité de la pollution.

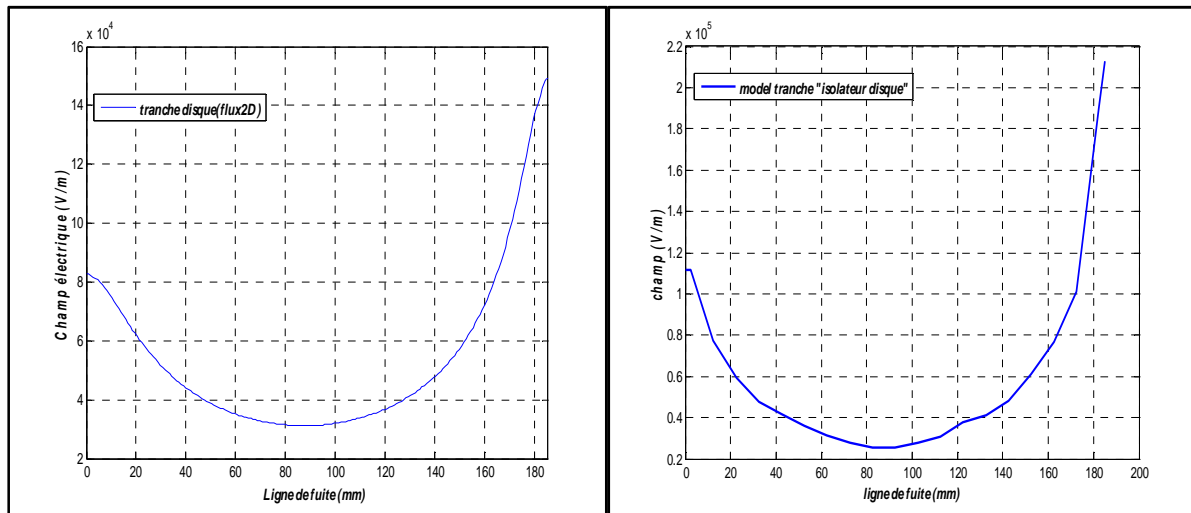
### 3.2. Distributions de potentiel et du champ électrique



**a** : Distribution de potentiel  
(Zone d'influence de modèle développé)

**b** : Distribution de potentiel  
(Zone d'influence de modèle disque)

**Figure 13** : Distributions de potentiel

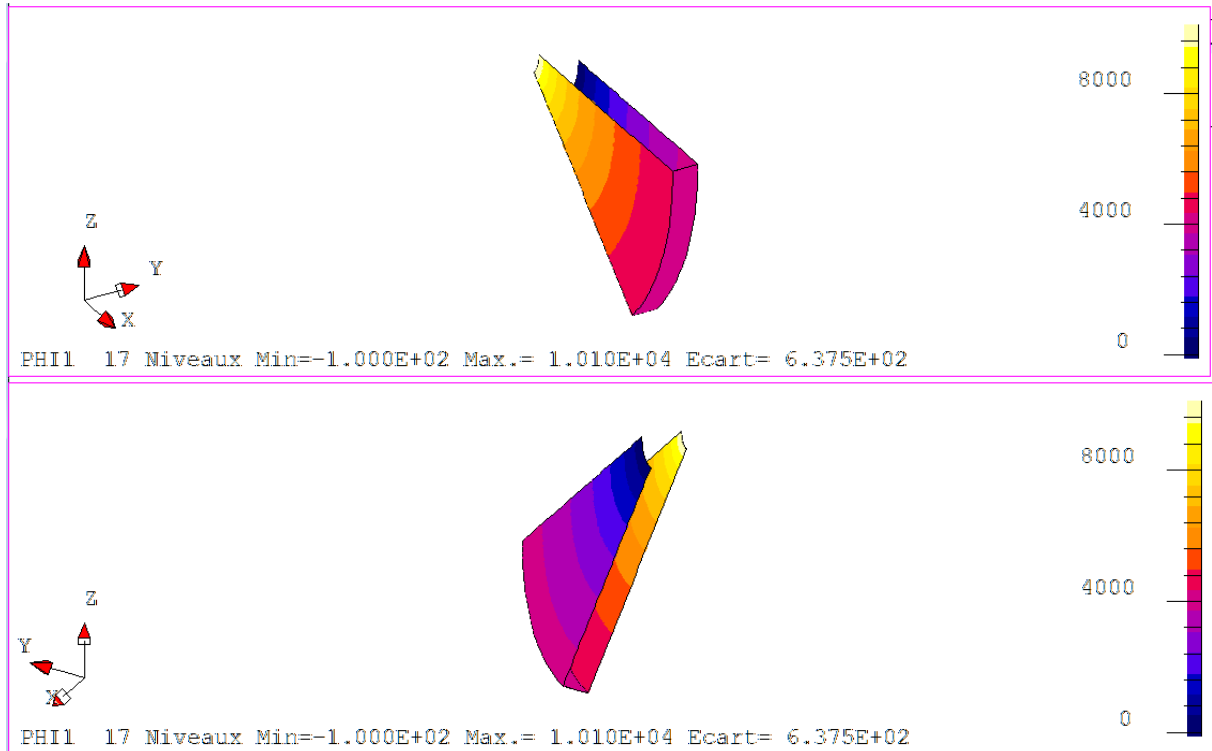


**a** : Distribution du champ électrique  
(Zone d'influence de modèle développé)

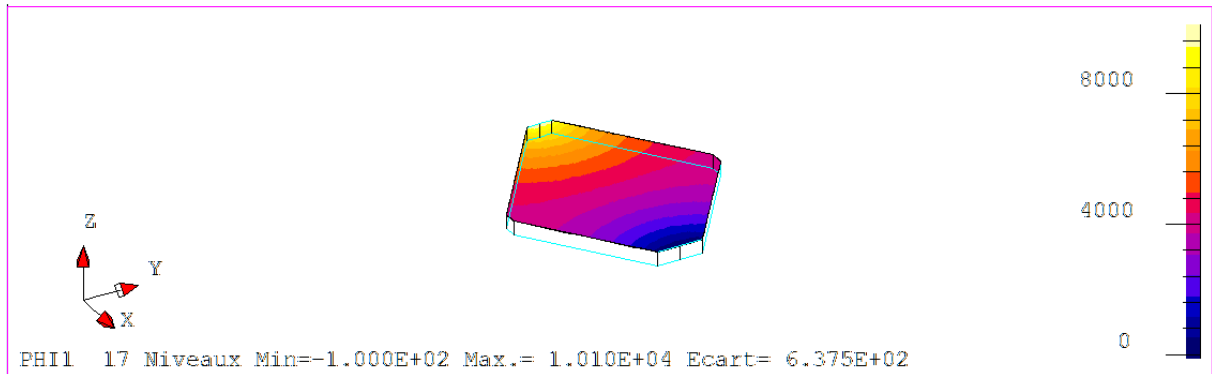
**b** : Distribution du champ électrique  
(Zone d'influence de modèle disque)

**Figure 14** : Distributions du champ électrique.

### 3.3. L'évolution de potentiel dans la couche de pollution :



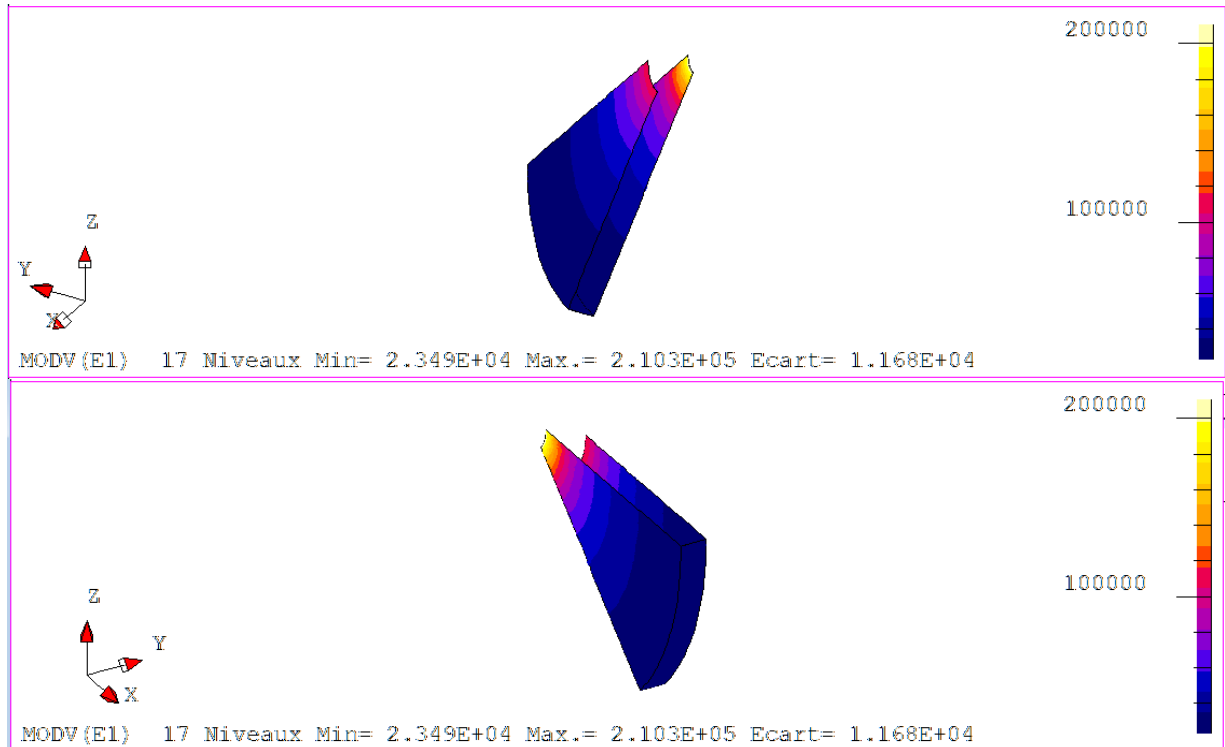
**Figure 15 :** L'évolution du potentiel dans la zone d'influence de l'isolateur disque.



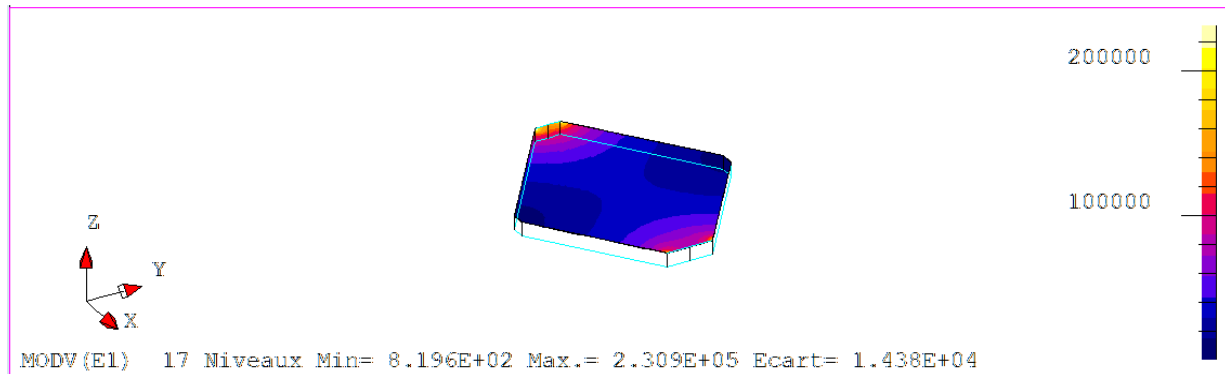
**Figure 16 :** L'évolution du potentiel dans la zone d'influence du modèle développé.



### 3.4. L'évolution du champ électrique dans la couche de pollution



**Figure 17:** L'évolution du champ électrique dans la zone d'influence de l'isolateur disque.



**Figure 18 :** L'évolution du champ électrique dans la zone d'influence du modèle développé.

### 3.5. Etude comparative

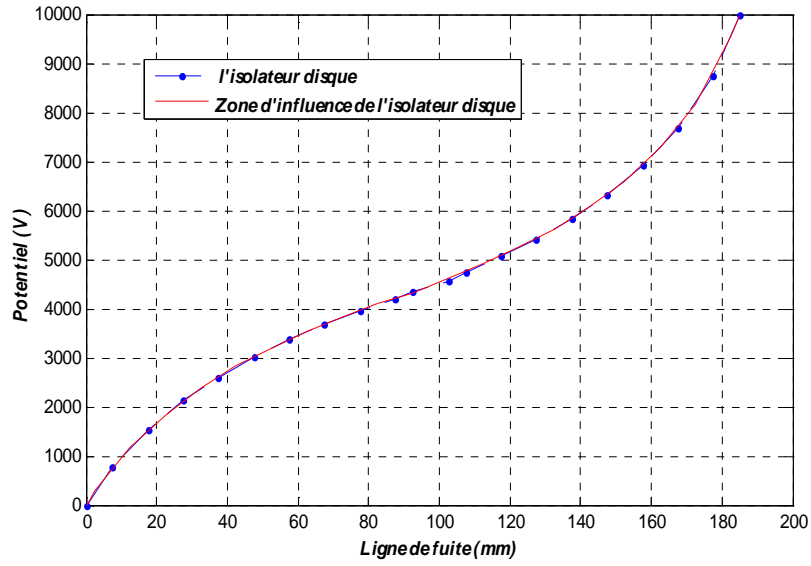


Figure 19 : Comparaison de la distribution du potentiel du modèle disque et la zone d'influence

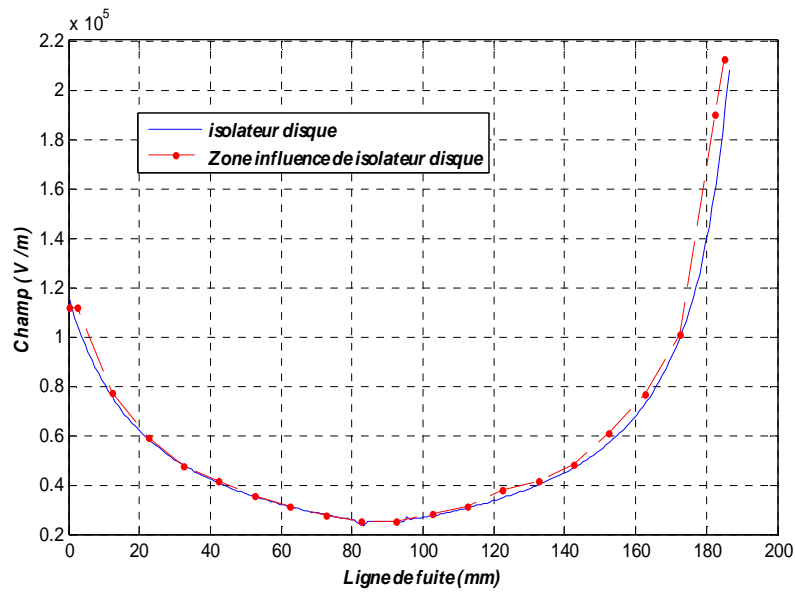


Figure 20 : Comparaison de la distribution du champ électrique du modèle disque et la zone d'influence

#### 4. EFFET DU FACTEUR CORRECTIF DANS LE CALCUL DE LA RESISTANCE

En première étape nous avons analysé les résultats de variation de la résistance totale trouvés par logiciel Flux3D avec l'épaisseur de pollution, nous avons pu introduire un facteur correcteur qui prend en considération l'effet de constriction des lignes de courant.

Le tableau 6 présente le rapport entre les valeurs de la résistance totale trouvée par logiciel Flux3D sur le modèle disque et son modèle ouvert pour différentes épaisseurs de l'électrolyte.

$$e_{\text{développé}} = 1.75 \times e_{\text{disque}}$$

e (mm)	R disque (flux3D)	R développé (flux 3d)	K	$e_{\text{développé}} = 1.75 \times e_{\text{disque}}$	R développé Corrigé (flux 3d)
1	11.88	20.85	1.75	1.75	12.02
2	6.47	11.63	1.75	3.5	6.54
3	4.31	7.75	1.75	5.25	4.43
4	3.23	5.81	1.75	7	3.32
5	2.59	4.65	1.75	8.75	2.65
6	2.16	3.87	1.75	10.5	2.21
7	1.85	3.32	1.75	12.25	1.89
8	1.62	2.90	1.75	14	1.66
9	1.44	2.58	1.75	15.75	1.47
10	1.29	2.32	1.75	17.5	1.32

**Tableau 6 :** Valeurs de la résistance totale trouvée par logiciel Flux3D pour différentes épaisseurs de la couche de pollution.

En deuxième étape nous avons analysé les résultats de variation de la résistance totale trouvés par logiciel FLUX3D avec la variation de la résistivité de pollution.

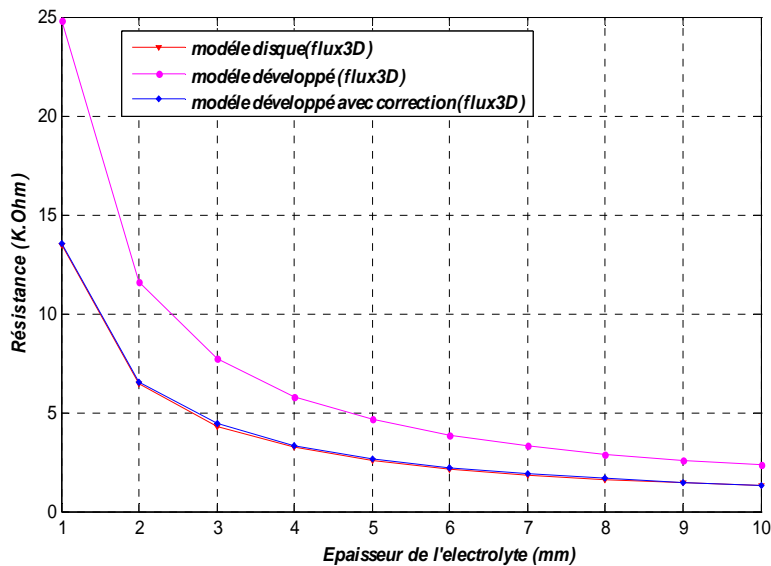
Le tableau 7 présente le rapport entre les valeurs de la résistance totale trouvée par logiciel Flux3D sur le modèle disque et son modèle ouvert.

$$R_{\text{développé}} = 1.75 \times R_{\text{disque}}$$

$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	R ( $K\Omega$ )		K=R2/R1
	R1: model disque flux3D	R2: model ouvert flux3D	
20	11.987	20.95	1.75
30	17.98	31.376	1.75
40	23.974	41.871	1.75
50	29.967	52.326	1.75
60	35.961	62.752	1.75
70	41.954	73.577	1.75
80	47.948	83.903	1.75
90	53.941	94.528	1.75
100	59.934	105.053	1.75

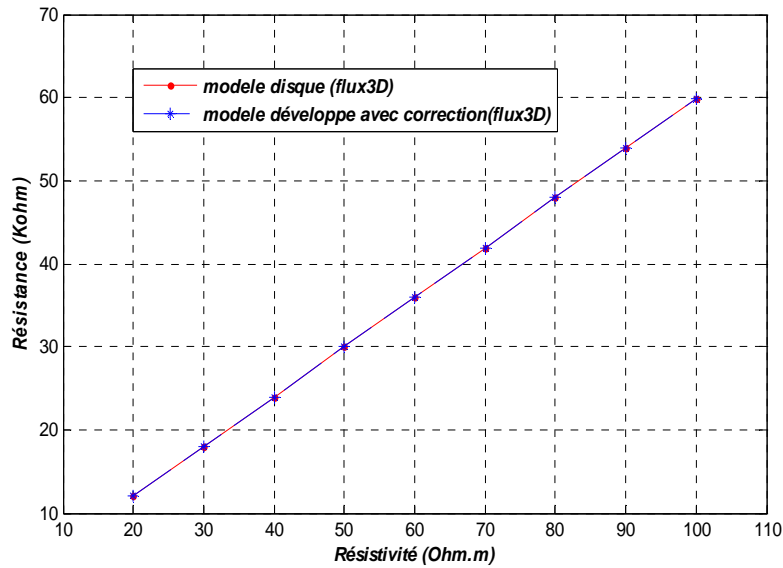
**Tableau 7 :** Rapport entre les valeurs des résistances trouvées par logiciel Flux3D (modèle disque et son modèle développé)

Notre comparaison a permis de démontrer qu'il est possible d'établir un rapport relativement constant entre les deux modèles pour toutes les valeurs des résistances de la couche de pollution.



**Figure 21:** Valeurs de la résistance totale calculée et expérimentale pour différentes épaisseurs de la couche de pollution.

La figure 19 montre la comparaison des résultats de la résistance totale de la couche de pollution obtenus par l'introduction d'un rapport (K) avec ceux obtenus par logiciel pour différentes épaisseurs.



**Figure 22 :** Valeurs de la résistance totale calculée et expérimentale pour différentes résistivités de la couche de pollution.

La figure 20 montre la comparaison des résultats de la résistance totale de la couche de pollution obtenus par l'introduction d'un rapport (K) avec ceux obtenus par logiciel pour différentes résistivités.

Nous constatons clairement d'après ces figures que l'introduction d'un rapport correcteur (K) a amélioré beaucoup nos résultats de calcul, et qui nous permet ainsi de surmonter l'écart qui était entre ces résultats.

## CONCLUSION

Nous avons analysé cette proposition et nous avons trouvé qu'il y a une partie du modèle ouvert qui vérifie l'égalité sur la détermination de la résistance de pollution entre le calcul et mesure qui coïncide bien avec FLUX3D.

L'introduction d'un rapport correcteur (K) a un effet positif pour nos calculs, aussi bien pour les résistances totales

# CHAPITRE V : VALIDATION DU MODÈLE AMÉLIORÉ

---

Nous présenterons dans ce chapitre les résultats de validation que nous avons effectuée au Laboratoire de la Haute Tension et Décharges Électriques d'USTO, cette validation consiste à comparer les résultats de nos calculs à ceux mesurés au laboratoire. Ces comparaisons sont faites pour les valeurs de la résistance. Notre but est de confirmer les résultats théoriques obtenus dans les chapitres précédents concernant les grandeurs critiques de contournement et l'influence de divers paramètres électriques et géométriques sur ce dernier.

## 1. VALIDATION EXPÉRIMENTALE

Les essais sous pollution naturelle consistent à installer divers isolateurs dans différents sites de pollution et d'observer leur comportement. On peut par exemple, comparer les temps au bout desquels les isolateurs sont contournés, mesurer les courants circulant à la surface des isolateurs, la durée que nécessitent ces essais constitue toutefois le principal inconvénient. On s'est donc orienté vers des essais sous pollution artificielle. Ces essais peuvent être classés en trois catégories principales :

- La méthode du brouillard propre ou de la couche solide
- La méthode du brouillard salin
- La méthode de la pollution liquide

Ces différentes méthodes sont fondées sur la simulation de la couche de pollution naturelle par des solutions déposées sur l'isolateur et dont la conductivité électrique est réglée par la quantité de sel (Na Cl) contenue. Ces essais en laboratoire consistent à trouver une relation entre le degré de pollution et la tension de contournement. Comme les essais sur site, les essais en laboratoire posent de problèmes pratiques : reproductibilité, durée et coût des essais, etc.

Notre travail expérimental sera basé sur la validation du modèle proposé. Sur ce modèle nous avons étudié expérimentalement la variation de la résistance totale de la couche de pollution sous l'influence de grandeurs suivantes :

- L'épaisseur de la couche de pollution
- La résistivité de la couche de pollution

Pour représenter la couche de pollution qui couvre la surface des isolateurs, nous avons utilisé le PVA (Polymère de vinylpyrrolidone fabriquée par la société VERTEX).

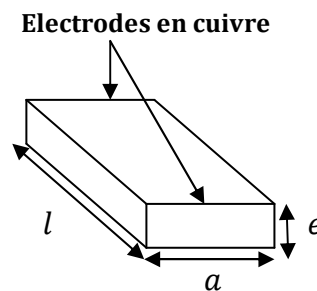
Le choix du PVA est dans le but de réaliser une couche de pollution solide, qui permet d'effectuer des mesures sur les différents modèles (2D-3D).

La nécessité des valeurs de conductivité qui vont nous servir dans les calculs nous amènent à faire des mesures préliminaires de résistances. Nous présenterons en

détail ces mesures préliminaires avant de passer à la validation expérimentale proprement dite.

### 1.1. Mesures préliminaires

Pour cette validation expérimentale nous avons utilisé un échantion en matière isolante (plastique) munie de deux électrodes en cuivre.



**Figure 1** : Mesure "locale" de la conductivité surfacique.

Le choix d'un parallélépipède a été effectué pour avoir une couche de pollution uniforme. La mesure de la conductivité de la couche de pollution est moins délicate sur une surface plane que sur une surface balourde.

Pour avoir une variation de conductivité de la couche de pollution qui couvre la surface de l'isolateur, nous avons réalisé des résistances solides à base de poudre d'aluminium où de carbone ajouté avec le PVA.

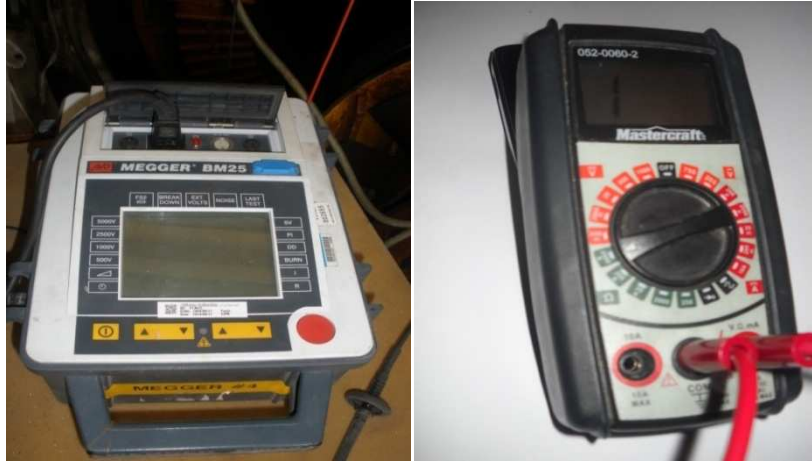
Dans l'hypothèse d'une couche uniforme, la valeur de la conductivité s'exprime en fonction de la résistance  $R$  de la couche de pollution étalée entre les deux électrodes, de la longueur  $l$  de la couche et de sa largeur  $a$  par la relation.

$$R = \frac{\rho l}{s}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{R \times s} \quad \text{où} \quad s = e \times a$$



## 1.2. Appareillage utilisé :



a : MEGGER

b: OHMMETRE

Figure 2 : Appareillage utilisé

**MEGGER** : utilisé pour mesurer l'isolement entre les deux électrodes des modèles des isolateurs utilisé dans le travail expérimental.

**OHMMETRE** : utilisé pour mesurer les petites valeurs de la résistance comme la couche de pollution qui couvre l'isolateur.

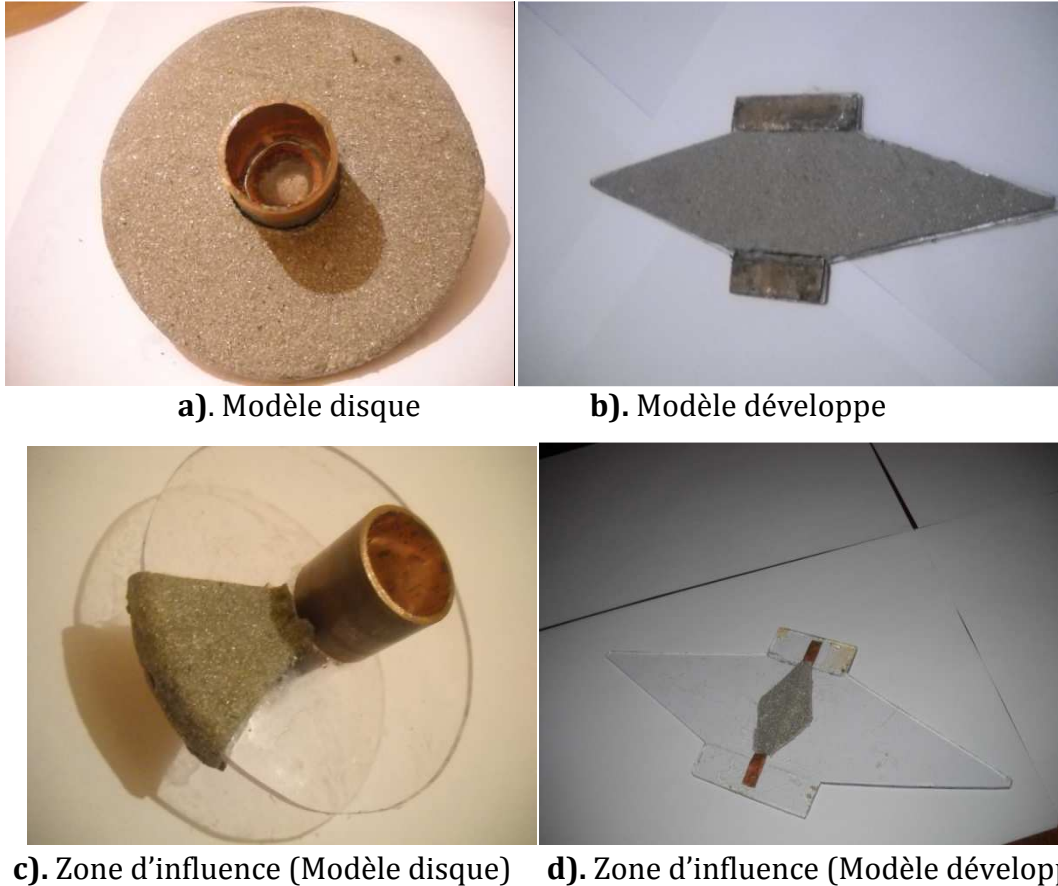
## 1.3. Description du modèle expérimental :

Notre travail expérimental sera basé sur le choix et la validation des modèles proposés. Les modèles que nous avons utilisés sont montrés dans la figure 3. Ils s'agissent :

- D'un modèle disque et d'un modèle développé (plat) suivant les dimensions du modèle calculé (fig.3) (a), (b).
- Zone d'influence d'un modèle disque et d'un modèle plat suivant les dimensions du modèle calculé (fig.3) (c), (d).

Ils sont munis de deux électrodes l'une mise sous HT et l'autre mise à la terre.

## 2. PRÉSENTATIONS DES MODÈLES EXPERIMENTAUX



**Figure 3** : Les modèles expérimentaux

### 2.1. Mesure de la résistance de la couche de pollution

La résistance de la couche de pollution représente un élément très important dans la modélisation du phénomène de contournement durant l'évolution de la décharge.

Nous avons mesuré expérimentalement la variation de la résistance de la couche de pollution pour l'isolateur disque et son modèle développé et pour les Zones d'influence du modèle disque et son modèle développé (ouvert).

Pour mesurer la résistance de la couche de pollution entre l'électrode HT et l'électrode de masse le long de la ligne de fuite, on a utilisé un OHMMETRE.

Les mesures ont été faites sur les modèles d'isolateurs utilisés précédemment (figure 3). Ceux-ci sont soumis à une pollution artificielle (PVA+poudre d'aluminium).

La comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées est reportée sur le tableau .1

Pour $\rho = 2.47\Omega.m$	R (KOhm) flux3D	R(KOhm) mesuré
<b>Modèle disque</b>	1.206	1.180
<b>Modèle développé</b>	1.960	1.753
<b>Zone d'influence (disque)</b>	9.621	9.571
<b>Zone d'influence (développé)</b>	9.722	9.541

**Tableau 1.** Comparaison des valeurs de résistance de la couche de pollution pour une épaisseur de 1mm.

Les résultats de comparaison sont meilleurs pour les différents modèles de la figure 4. Le modèle disque et son modèle développé, les résultats expérimentaux et ceux déterminés par FLUX3D sont pratiquement confondus, pour la zone d'influence de modèle disque et son modèle développé, On constate une bonne coïncidence entre les valeurs calculées (FLUX3D) et ceux mesurés. D'autre part les résultats de deux modèles sont pratiquement identiques.

## 2.2. L'influence des différents paramètres sur la résistance de pollution

### 2.2.1. L'influence de l'épaisseur

Pour évaluer l'influence de la variation de l'épaisseur de la couche de pollution sur la résistance mesurée à l'aide d'un ohmmètre, nous avons relevé la valeur de la résistance correspondant à chaque épaisseur.

Le tableau.2 présente les résultats de la résistance de la couche polluée et ceux trouvés par logiciel FLUX3D, et expérimentalement.

Résistance mesurée

Pour $\rho = 2.47\Omega.m$	e=1mm	e=2mm	e=3mm
R (K $\Omega$ ) Modèle disque	1.180	0.512	0.372
R (K $\Omega$ ) Modèle développé	1.753	0.843	0.620
R (K $\Omega$ ) Zone d'influence (disque)	9.571	4.753	3.185
R (K $\Omega$ ) Zone d'influence (développé)	9.541	4.752	3.042

Résistance calculé (FLUX3D)

Pour $\rho = 2.47\Omega.m$	e=1mm	e=2mm	e=3mm
R (K $\Omega$ ) Modèle disque	1.206	0.603	0.402
R (K $\Omega$ ) Modèle développé	1.960	0.980	0.653
R (K $\Omega$ ) Zone d'influence (disque)	9.621	4.810	3.207
R (K $\Omega$ ) Zone d'influence (développé)	9.722	4.861	3.240

Tableau 2. L'influence de l'épaisseur sur la résistance

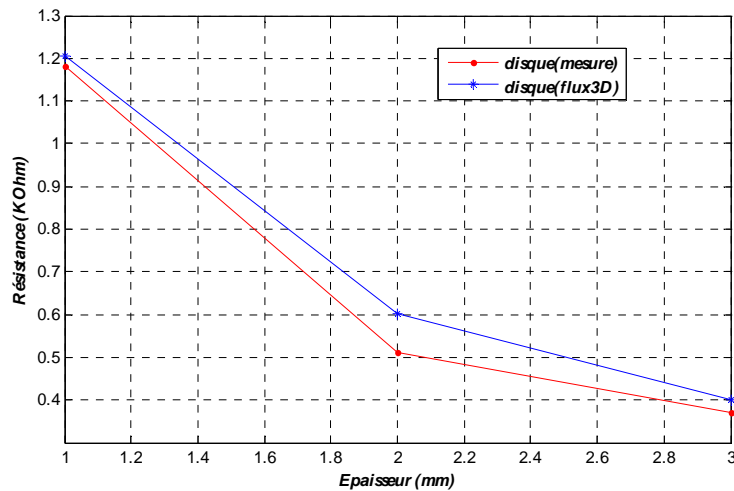


Figure 4 : L'influence de l'épaisseur sur la résistance du modèle disque

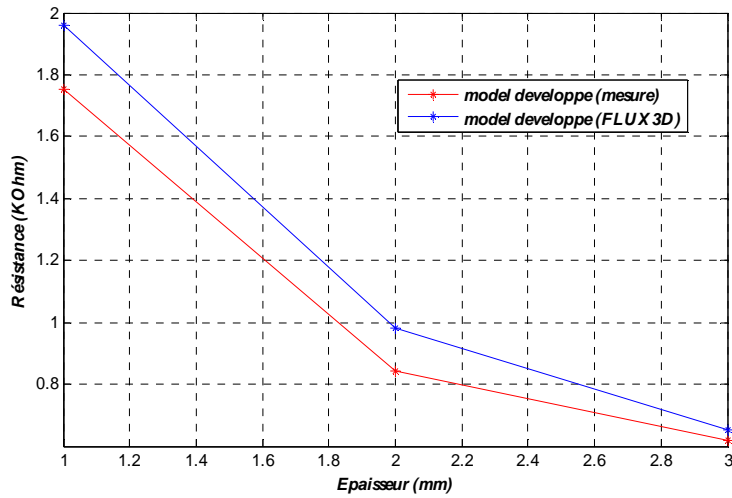


Figure 5 : L'influence de l'épaisseur sur la résistance du modèle développé

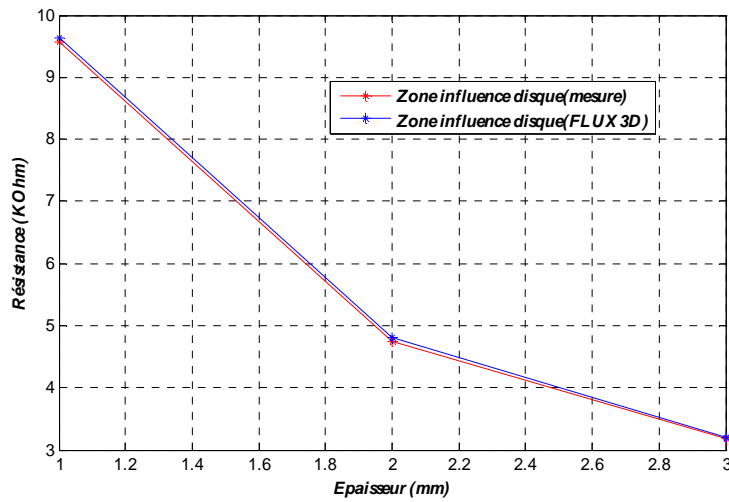


Figure 6 : L'influence de l'épaisseur sur la résistance de la zone d'influence du modèle disque

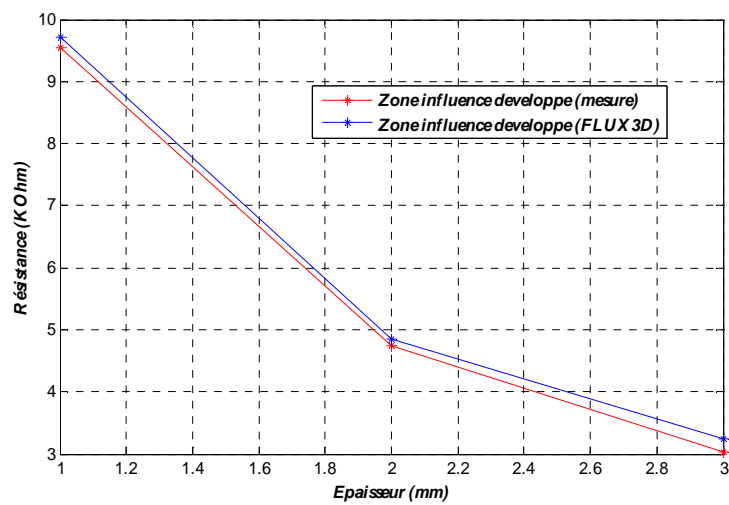


Figure 7 : L'influence de l'épaisseur sur la résistance de la zone d'influence du modèle développé

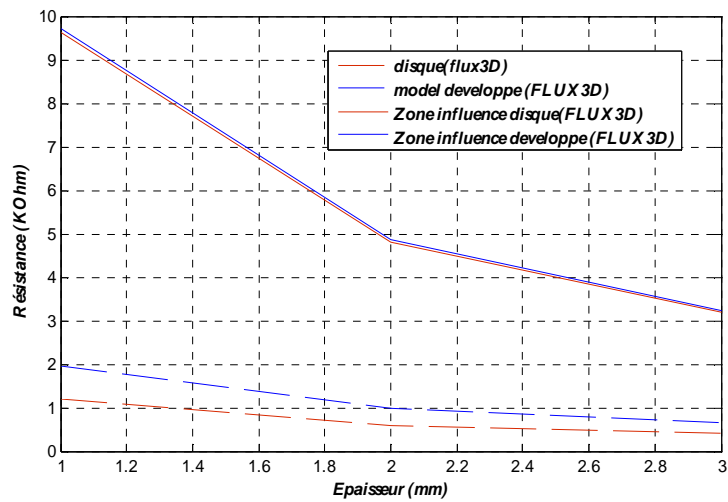


Figure 8 : L'influence de l'épaisseur sur la résistance

Pour différentes valeurs de l'épaisseur, la variation de la résistance de la couche polluante en fonction de l'épaisseur s'accorde bien entre logiciel FLUX3D et la mesure expérimentale. L'augmentation de l'épaisseur entraîne une diminution de la résistance.

### 2.2.2. L'influence de la résistivité

Afin de montrer l'effet de la variation de la résistivité sur la résistance totale de la couche de pollution nous avons utilisé des couches de pollution ayant des résistivités qui varient entre 0.12 et 1  $\Omega.m$  et de profondeur 3mm.

Pour avoir cette variation de la résistivité, nous avons réalisé des résistivités à base de poudre de carbone ajoutée avec le PVA.



a). (Modèle disque)

b). (Modèle développé)

Figure 9 : Mesure de la résistance de l'électrolyte par OHMMETRE

Résistance mesurée

Pour e = 3mm	$\rho = 0.122$ $\Omega .m$	$\rho = 0.27$ $\Omega .m$	$\rho = 0.45$ $\Omega .m$	$\rho = 1$ $\Omega .m$
R ( $\Omega$ ) Modèle disque	20.27	45.061	74.10	166.32
R ( $\Omega$ ) Modèle développé	30.80	68.97	113.12	252.68
R ( $\Omega$ ) Zone d'influence (disque)	153.95	359.35	602.14	1323
R ( $\Omega$ ) Zone d'influence (développé)	157.6	357.02	602.20	1354

Tableau 3. L'influence de la résistivité sur la résistance

Résistance calculé (FLUX3D)

Pour e = 3mm	$\rho = 0.122$ $\Omega .m$	$\rho = 0.27$ $\Omega .m$	$\rho = 0.45$ $\Omega .m$	$\rho = 1$ $\Omega .m$
R ( $\Omega$ ) Modèle disque	19.86	43.96	73.26	162.80
R ( $\Omega$ ) Modèle développé	32.28	71.44	119.06	264.57
R ( $\Omega$ ) Zone d'influence (disque)	158.41	350.58	584.30	1298.45
R ( $\Omega$ ) Zone d'influence (développé)	160.07	354.24	590.41	1312.01

Tableau 4. L'influence de la résistivité sur la résistance

Les tableaux 3 et 4 présentent les résultats de la résistance totale obtenue par logiciel FLUX3D et ceux mesurés expérimentalement pour différents valeurs de la résistivité.

Dans tous les cas, la résistance de la couche de pollution varie d'une manière linéaire avec la résistivité.

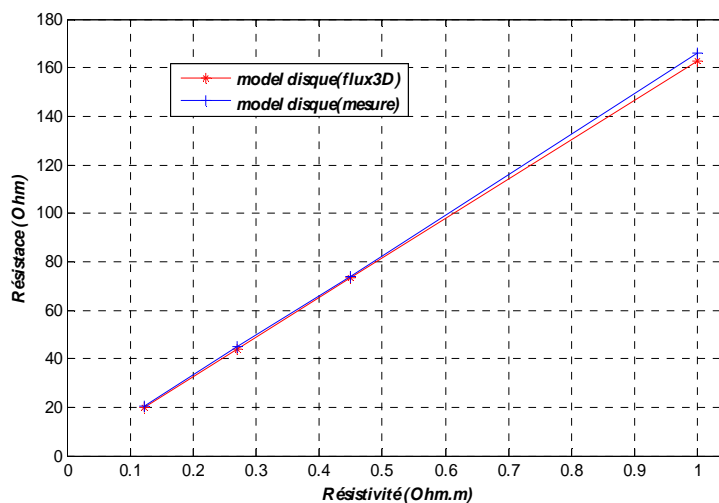


Figure 10 : L'influence de la résistivité sur la résistance du modèle disque

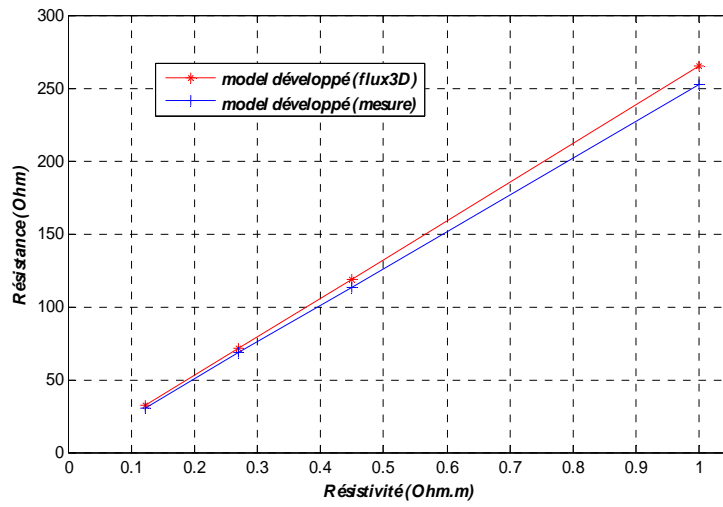


Figure 11 : L'influence de la résistivité sur la résistance du modèle développé

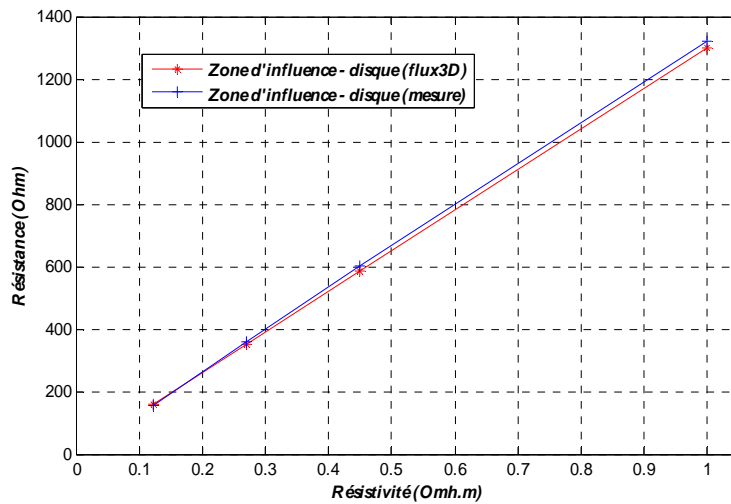
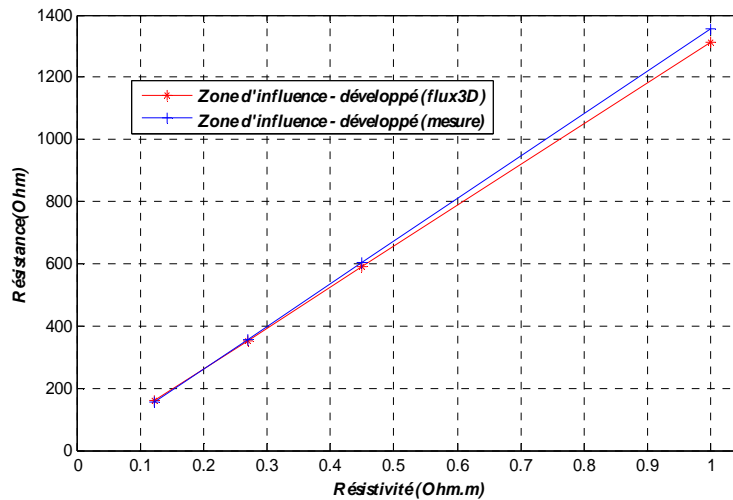


Figure 12 : L'influence de la résistivité sur la résistance de la zone d'influence du modèle disque





**Figure 13 :** L'influence de la résistivité sur la résistance de la zone d'influence du modèle développé

## CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons mesuré la résistance totale de la couche de pollution, d'après ces mesures nous constatons clairement que :

La variation de la résistance de la couche polluante en fonction de l'épaisseur s'accorde bien entre logiciel FLUX3D et la mesure expérimentale pour différentes valeurs de la résistivité.

La résistance de la couche de pollution varie d'une manière linéaire avec la résistivité.

La comparaison des résultats obtenus par la zone d'influence de l'isolateur confirme la validité du modèle établi. Les résultats sont meilleurs pour différentes valeurs de la résistivité, et différentes valeurs de l'épaisseur.

La validation analytique et la validation expérimentale utilisées ici ont joué des rôles complémentaires. La première nous a permis de connaître l'ensemble des valeurs de résistivité qu'on peut utiliser dans les calculs. La deuxième renforce la fiabilité du modèle numérique.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

---

La présence d'une couche de pollution à la surface d'un isolateur modifie complètement ses répartitions du champ et du potentiel électriques.

Les travaux présentés dans ce mémoire avaient pour but d'atteindre une meilleure approche basée sur l'ouverture de la surface polluée de l'isolateur de haute tension en 2D pour faciliter l'étude des paramètres qui influent sur le contournement, vu la complexité de la géométrie de l'isolateur.

La distribution des lignes de courant sur le modèle ouvert déterminée par la méthode des élément finis MEF nous a conduit à conclure que la concentration des lignes de courant a été observée sur la partie centrale du modèle ouvert, l'autre partie de la surface n'est parcourue par aucun courant, par contre le calcul analytique suppose une distribution uniforme des lignes de courant et toute la surface du modèle ouvert est utilisée.

Nous avons analysé cette proposition et nous avons trouvé qu'il y'a une partie du modèle ouvert qui vérifie l'égalité sur la détermination de la résistance de pollution entre le calcul analytique et mesure et qui coïncide avec le calcul par FLUX3D (MEF).

Ce modèle a été validé analytiquement et expérimentalement. Les résultats de ces différentes validations ont montré que pour les valeurs de conductivités surfaciques et pour différentes épaisseurs, le modèle donne des résultats corrects.

---

# *ANNEXES*

---

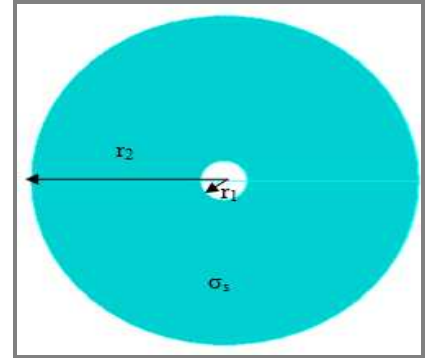
# Annexe A

**CALCUL DE R1 :** Vue supérieure de l'isolateur disque pour  $\theta = [0, 2\Pi]$

La résistance du disque de rayon intérieur  $r_1$  et de rayon extérieur  $r_2$  est donnée

$$\text{par : } dR_1 = \frac{1}{\theta \sigma_s} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}$$

$$\text{D'où } R_1 = \frac{1}{\theta \sigma_s} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$



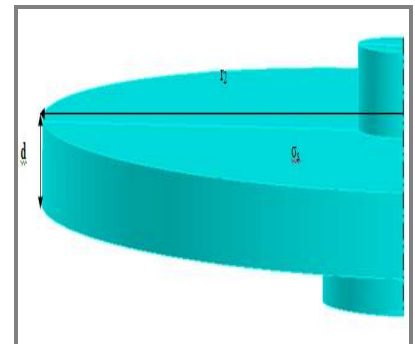
**CALCUL DE R2 :** Vue latérale de l'isolateur disque

La résistance du cylindre de rayon  $r_2$  et de hauteur  $h$  est :

$$dR_2 = \frac{1}{\sigma_s} \int \frac{dl}{y(l)}$$

D'où

$$R_2 = \frac{1}{\sigma_s \theta} \frac{d}{r_2}$$



**CALCUL DE R3 :** Vue inférieure de l'isolateur disque pour  $\theta = [0, 2\Pi]$

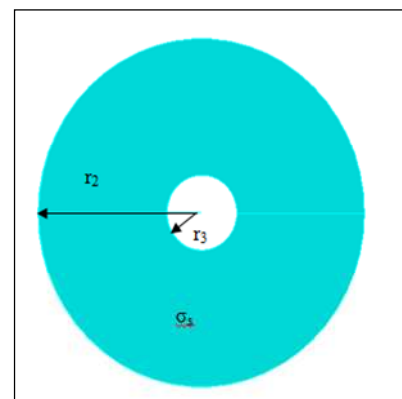
Cette résistance est la résistance du disque de rayon intérieur  $r_3$  et de rayon extérieur

$r_2$ .

$$dR_3 = \frac{1}{\theta \sigma_s} \int_{r_3}^{r_2} \frac{dr}{r}$$

D'où

$$R_3 = \frac{1}{\theta \sigma_s} \ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right)$$



# Annexe B

**CALCUL DE R1 :** Cette résistance représente une surface trapézoïdale pour  $\theta = [0, 2\Pi]$  (figure.1)

on a :

$$R_1 = \frac{1}{\theta \sigma_s} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

**CALCUL DE R2 :**

La résistance du rectangle de longueur  $\theta$ ,  $r_2$  et largeur  $d$  est donnée par (figure.2) :

$$dR_2 = \frac{1}{\sigma_s} \int \frac{dl}{y(l)}$$

D'où

$$R_2 = \frac{1}{\sigma_s \theta} \frac{d}{r_2}$$

**CALCUL DE R3 :**

Cette résistance représente une surface trapézoïdale (figure.3):

$$R_3 = \frac{1}{\theta \sigma_s} \ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right)$$

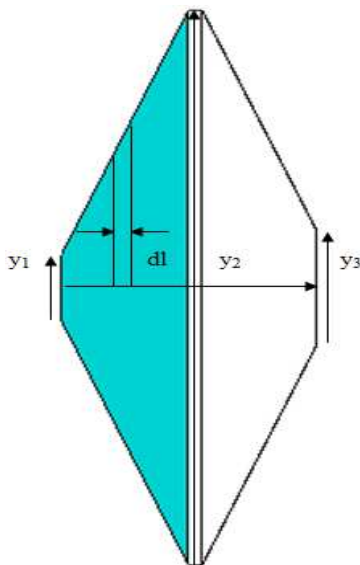


Figure.1

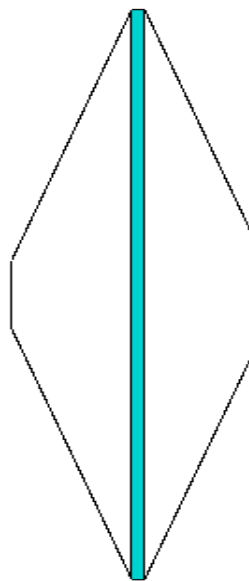


Figure.2

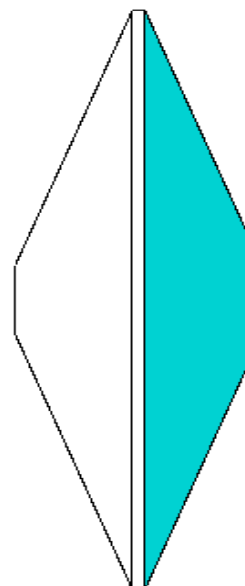
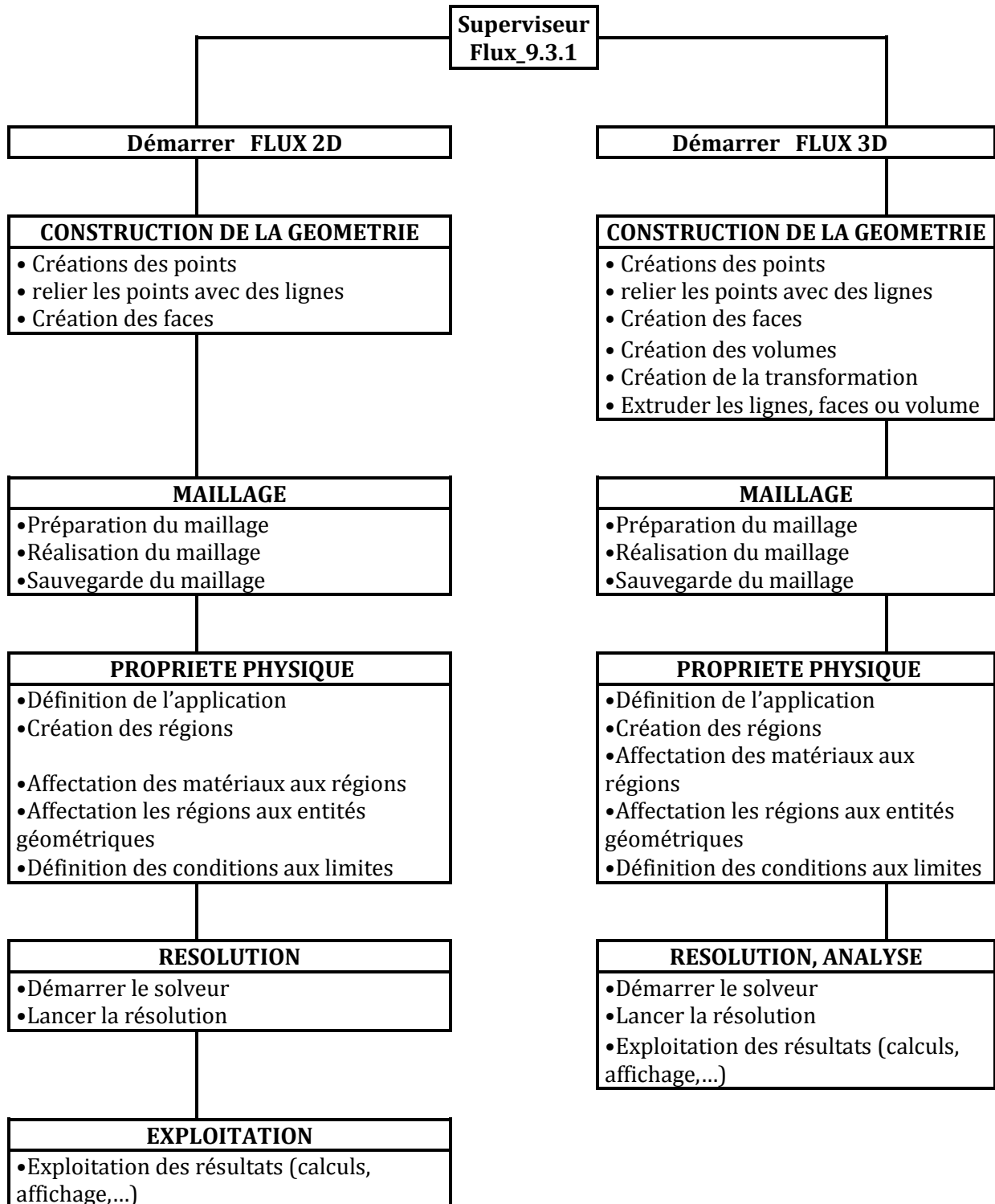


Figure.3

# Annexe C

## LE LOGICIEL FLUX (2D, 3D)

On peut résumer les principales étapes de ce logiciel par l'organigramme suivant :



---

# *BIBLIOGRAPHIE*

---

# BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] C. Gary : « Les propriétés diélectriques de l'air et les très haute tension. », collection de la direction des études et recherches d'électricité de France. Edition EYROLLES, 1984.
- [2] M. Aguet et M. Lanoz : « Isolant, isolation et système d'isolation, Traité d'électricité. ». Volume XXII, Haute Tension, presses polytechniques et universitaires romandes ; 1990
- [3] C. Avril et M. Mafez : « Les isolateurs et leurs accessoires, deuxième partie, construction des lignes aériennes à haute tension. », édition EYROLLES, Paris, France, 1974.
- [4] M. Archambault : « Les isolateurs. », deuxième partie, chronique pour bien ce comprendre, Hydro presse, mi novembre 1979.
- [5] « Toughened glass insulators ideal for contaminated area applications. », catalogue de SEDIVER.
- [6] J.P. Detrie et P. Jarrault : « La pollution atmosphérique. », Dunod, Paris, France, 1969.
- [7] K. Naito: « Insulator pollution. Part 1: General aspect. » Séminaire des isolements des lignes et des postes HT, Casablanca, March, 1989.
- [8] P. J. Lambeth, H. Auxel et M. P. Verma : « Méthode de mesure de la sévérité de la pollution naturelle compte de son influence sur le comportement des isolateurs à HT », Electra, n° 20, 1972.
- [9] K. Taskasu, T. Shindo et N. Arai: « Natural contamination test of insulators with DC voltage energization at inland areas », IEEE Trans on P.D., Vol. 3, n°4, October 1988.
- [10] X. Lin and All: « Natural insulator contamination test results on various shed shapes in heavy industrial contamination areas », IEEE Trans on E.I, Vol. 27, n°3, June, 1992.
- [11] M. Zedan and All: « Performances of HV transmission line insulators in desert conditions », IEEE. Trans. on EI, Vol EI- 18, n°2, April, 1983.



- [12] J. L. Fierro-Chavey and All: « On line leakage current monitoring of 400 kV insulator strings in polluted areas», IEE. Proc- Gener. Transm. Distrib, Vol. 143, n°6, 1996.
- [13] H. Von Cron et H. Dorsch : « Détermination de l'isolement des réseaux de transport par rapport à la fréquence de service et aux surtensions transitoire compte tenu de la diminution du pouvoir isolant due à des couches étrangères superficielles », Cigré, 1958.
- [14] CEI 815 : « Guide pour le choix des isolateurs sous pollution », 1986.
- [15] P. Claverie et Y. Porcheron : «La pollution des isolateurs, les phénomènes de pollution des isolateurs et l'isolement des ouvrages en régions polluées». RGE, tome 82, n°3, Mars 1973.
- [16] M. A. B. El-Koshairy et F. A. M. Rizk : « Comportement des isolateurs des lignes de transport à THT dans des conditions de pollution désertique», Cigré, 33-05, 1978.
- [17] A. El- Sulaiman and M. I. Qureshi : « Effect of contamination on the leakage current of inland desert insulators», IEEE. Trans. On E.I, Vol. E.I-19, n°4, August, 1984.
- [18] F. Frifra et N. Rezak : « Etude physico-chimique du dépôt de pollution sur la surface des isolateurs haute tension ». PFE, Département de la chimie industrielle, USTO MB, 1998-1999.
- [19] K. Chrzan : « Conductivity of aqueous dust solutions », IEEE. Trans. On E.I, Vol E.I-22, n°3, June, 1987.
- [20] F.Obenaus , «Die uberschlagspannung vrschmutzter isolatoren »; ETZ, vol56,pp369-70,1935.
- [21] L.L Alston, S .Zoledziowski, « Growth of discharge on polluted insulation »; Proc.IEE, pp.1260-1266, 1963.
- [22] M. A. M. Piah et A. Darus, « Effect of electrolyte resistivity and flow-rate on the leakage Current of Polymeric material », XIII the International Symposium on Hight Voltage Engineering Netherlands 2003.
- [23] M. A. Salam , H. Ahmad, T. Tamsir, «Calculation of time to flashover of contaminated Insulator by Dimensional Analysis Technique » Journal of Computers and electrical Engineering, vol.27, pp.419-427, 2001.
- [24] Hanch-Olsen, Harold, Buckingham's pi-theorem», version 2001, <http://www.math.ntnu.no/hanche/notes/buckingham/buckingham-a5.pdf>.1998.

- [25] Lay, David C, « Linear Algebra and It's applications », third edition, Pearson Education, Inc, 2003.
- [26] M. Marich, H.Hadi, « Calcul de la tension de contournement par la méthode de l'analyse dimensionnelle » Icel'05,2005, USTO, Oran, Algérie.
- [27] S. Flazi, « Etude du contournement électrique des isolateurs haute tension pollués, Critères d'élongation de la décharge et dynamique du phénomène » ; thèse de Docteur d'Etat, Université Paul Sabatier de Toulouse 1987.
- [28] R.Chaarani, « Détermination de la tension de tenue maximale des isolateurs composites en EPDM », Thèse de maîtrise, Automne 1996, Québec, Canada.
- [29] Jean-Claude Labadie, « Etude de la validité du modèle électrique de contournement des isolateurs pollués », thèse de spécialité, UPS-Toulouse, 1977.
- [30] T.C.Cheng, Y.C.Wu, H.Nour, « DC interfacial breakdown on contaminated electrolytic surface » IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol.19, pp.536-542, 1984.
- [31] S. Hesketh, « General criterion for the prediction of polluted flashover », IEE Proc, vol.114, n°4, pp.985-990, Avril 1967.
- [32] Z. Aydogmus, M. Cebeci « A New Flashover Dynamic Model of Polluted HV Insulators ». IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 11, No. 4, pp. 577-584; August 2004.
- [33]G. Peyregne, « Etude en régime dynamique du contournement par décharges de surfaces rendues faiblement conductrices » thèse de docteur ingénieur à UPS-Toulouse ,1981.
- [34]A.Derkaoui, « Etude de la validité d'un nouveau modele expérimental du contournement des isolateurs haute tension polluée »USTO, 2004.
- [35] MEC-200-technologie des matériau université du Québec Ecole de technologie supérieure
- [36] H.H. KAUSCH, N. HEYMANS, CJ. PLUMMER, P .DECROLY – Traité des matériaux, (Physique des matériaux et matériaux polymères). Edition : Presses Polytechnique et Universitaires Romandes (2001).
- [37] D.W, 'Van KREVELEN - Properties of Polymers. 3<sup>eme</sup> Ed.Elsevier, Amsterdam. 1990
- [38] R. BARTNIKAS et R.M, EICHLORN -Engineering Dielectrics.IIA ASTM special tchnical publication 783, ASTM PhiladeIpia I983.

- [39] J.C. DUBOIS et P. MICHEL. - Technique de l'ingénieur. E 1860. Volume EAB, 1963.  
A). ATTLAS - Technique de l'ingénieur. E 1862 Volume EAB, 2002.
- [40] Livre PHYSIQUE DES POLYMERES
- [41] Matériaux polymères (propriétés mécaniques et physique) par NICOLE Heymans. Publié par PPUR presses polytechnique 2001
- [42] User Guide, Flux931 :vol1, vol2, vol3, vol4, vol5.
- [43] F2D75 Tutorial-Electric Flux2D.