

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

THÈME

**Distribution du champ et du potentiel électrique sur
une surface isolante en verre**

Préparé par : soudani abdesselem

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
Mr. I.BEKKI	MAA	Président
Mme. K. BELHACEL	MAA	Examineur
Mr. M. CHAALAL	MAA	Examineur
Mme .H.BOURENANE	MAA	Encadreur

PROMOTION 2019 /2020

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier premièrement Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il m'a donné durant toutes ces longues années.

Ainsi, Je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur «Mme. H. BOURENANE», pour le suivi continu tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de me donner ses conseils.

Mes remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département Génie électrique qui ont contribué à ma formation.

En fin, Je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous mes amis et collègues pour le soutien moral.

Que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail soient assurées de mes plus sincères remerciements.

Nomenclature

E_a	Champ électrique longitudinal
R_{arc}	La résistance d'arc
R_p	La résistance de la couche polluée
V_e	La chute de tension totale aux bornes des électrodes
μ	la mobilité des électrons dans l'arc
b	largeur de la couche de pollution
C_i	la capacité de la décharge
C_p	la capacité de la couche de pollution
E_{arc}	champ à l'intérieur de l'arc
E_p	champ dans la colonne d'eau
F	le facteur de forme
I	courant de fuite
k	constante de Boltzman
L_f	Ligne de fuite
L_i	l'inductance de la décharge
l_i	longueur de la couche polluée
M	nombre de particules neutres dans l'arc
n, A	les constantes de la caractéristique statique de l'arc
P	puissance
P_0	les pertes par unités de longueur (constantes).
r_a	le rayon de la base de l'arc
R_e	la résistance externe
R_i	une résistance interne
r_p	résistance uniforme de la couche polluée
T	la température de l'arc
U	la tension aux bornes de l'isolateur

V	tension appliquée
v	vitesse de propagation de la décharge
V_{arc}	la tension d'arc
W_{th}	l'énergie nécessaire pour maintenir l'arc à sa température
W_{totale}	l'énergie totale fournie
X	longueur de l'arc
Z_{eq}	l'impédance équivalente d'un circuit électrique
γ_p	la conductivité superficielle de la couche polluante
R	la résistivité de la couche de polluée
τ	Constant de temps de l'arc

Liste des figures

Chapitre I: Quelques Travaux Antérieurs sur la Simulation Numérique des Isolateurs HT

Figure I.1. Electrodes disposées dans une configuration plan-plan.....	03
Figure I. 2. Modèles d'isolateur réel utilisés en simulation.....	04
Figure I.3. Comportement des gouttelettes d'eau [4].....	05
Figure I.4. Distribution du champ électrique dans la région inter-électrodes avant le contournement [4].....	05
Figure I.5. Distribution du champ électrique sur a ligne de fuite pour les gouttelettes d'eau déformées et non déformées [4].....	05
Figure I.6. Champ électrique en fonction de la position des gouttes d'eau(déformées et non déformées).....	06
Figure I.7. Comparaison de la distribution du potentiel le long de la surface d'un isolateur avec gouttelettes et sans gouttelettes.....	07
Figure I.8. Comparaison de la distribution du champ électrique le long de la surface d'un isolateur avec des gouttelettes et sans gouttelettes.....	07
Figure I. 9. Répartition du potentiel électrique sur la ligne de fuite avec et sans gouttelettes d'eau.....	08
Figure I. 10. Distribution du champ électrique sur la ligne de fuite avec et sans gouttelettes d'eau.....	09
Figure I.11. Schéma d'un isolant réel en 3D, comprenant une illustration d'un matériau hydrophobe...09	
Figure I.12. Distribution du potentiel électrique à la surface d'isolateur	10
Figure I.13. Distribution du champ électrique à la surface d'isolateur	10
Figure I.14. Paramètres d'isolateur 1512L[5].....	11
Figure I.15. Model d'isolateur 220 kV tracé par le logiciel FEM[5].....	11
Figure I.16 (a) Distribution de potentiel (b) lignes équipotentielles (modèle propre).....	12
Figure I.17 Distribution du potentiel électrique pour différentes conductivités.....	12
Figure I.18. Potentiel électrique en fonction de distance de fuite pour différente conductivités.....	13
Figure I.19. Distribution du potentiel électrique pour différentes tensions appliquées de la ligne.....	13
Figure I.20. Potentiel électrique en fonction de la distance de fuite Pour différente tensions appliquées de la ligne.....	14
Figure I.21. Distribution du champ électrique pour un modèle propre.....	14
Figure I.22. Champ électrique en fonction de la distance de fuite pour différentes conductivités	15

Figure I.23. Distribution du champ électrique pour différentes conductivités	16
Figure I.24. Champ électrique électrique en fonction de la distance de fuite pour différentes tensions appliqués.....	16
Figure.I.25. Distribution du champ électrique pour différentes tensions appliqués	17
Figure I.26. Dimensionnement des nervures de l'isolateur 1512L.....	17
Figure I.27. Distance de fuite de champ électrique pour trois cas étudiés.....	18

Chapitre II : Modèles Statiques et Dynamiques de Contournement

Figure II.1. Circuit électrique équivalent du modèle d'Obenaus.....	20
Figure II.2. Modèle de Danis	22
Figure II.3. Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire selon Tegar	24
Figure II.4. Organigramme du modèle de Anjana et Lakhminarasimha	27
Figure II.5. Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge selon Dhahbi et Al.....	28
Figure II.6. Organigramme du modèle de Dhahbi et Al	29

Chapitre III : Distribution Du Potentiel Et Du Champ Électrique

Figure III.1 Modèle des isolateurs étudiés.....	31
Figure III.2 le modèle réel et le modèle plan tracés en 3D le logiciel« AUTOCAD ».....	33
Figure III.3. Fenêtre de démarrage le logiciel.....	34
Figure III.4. Fenêtre de « SELECT SPCAE DIMENSION».....	34
Figure III.5. Fenêtre de « ADD PHYSICS(MODEL) ».....	35
Figure III.6. Fenêtre “SELECT STUDY TYPE”	35
Figure III.7. Géométrie d'isolateur.....	36
Figure III.8. Matériaux de l'isolateur.....	36
Figure III.9. permittivités relatives et conductivités électriques pour chaque partie de l'isolateur.....	37
Figure III.10. Conditions aux limites.....	37
Figure III. 11. maillage d'isolateur.....	38

Figure III.12. Résultats de simulation.....	38
Figure III.13. Distribution du potentiel électrique en fonction de la largeur de la couche propre (L1), (L2) et (L3).....	39
Figure III.14 : potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur.....	40
Figure III.15. Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur (3 cm).....	41
Figure III.16. Distribution du potentiel électrique en fonction de la tension de la ligne.....	41
Figure III. 17 : Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur.....	42
Figure III.18 : Distribution du potentiel électrique en fonction de la conductivité.....	43
Figure III.19 : Champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur.....	44
Figure III.20 : Distribution du champ électrique en fonction de la largeur des bandes propre (L1), (L2) et (L3).....	44
Figure III.21 : Champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur.....	45
Figure III.22 : Distribution du champ électrique en fonction de la tension de la ligne.....	46
Figure III.23 : Champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur.....	46
Figure III.24 : Distribution du champ électrique en fonction de la conductivité.....	47
Figure III.25 : isolateur réel.....	47
Figure III.26 : Potentiel électrique le long de la ligne de fuite d'isolateur.....	48
Figure III.27 : Distribution du potentiel en fonction de la conductivité.....	49
Figure III.28 : Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de un seul élément d'isolateur.....	50
Figure III.29 : Champ électrique le long de la ligne de fuite d'isolateur en fonction de la conductivité.....	51
Figure III.30 : Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs	51

Liste des tableaux

Chapitre I : Quelques Travaux Antérieurs sur la Simulation Numérique des Isolateurs HT

Tableau .I.1. Résumé des composants de la simulation COMSOL.....	04
Tableau I.2. Paramètres géométrique d'isolateur 1512L [5].....	11
Tableau .I.3. Propriétés d'isolateur capot et tige 1512L [5].....	11
Tableau I.4. Dimensionnement des isolateurs HT proposés.....	18

Chapitre II : Modèles Statiques et Dynamiques de Contournement

Tableau II.1. Différentes valeurs de A et n	21
--	----

Chapitre III : Distribution Du Potentiel Et Du Champ Électrique

Tableau III.1. Isolateur F160D-146DC. Caractéristiques de l'isolateur.....	32
Tableau III.2. : Dimensions du modèle plan étudié.....	32
Tableau III.3. La conductivité et la permittivité de chaque matériau d'isolateur F160D-146DC.....	33

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction Générale	01
------------------------------------	----

Chapitre I : Quelques Travaux Antérieurs sur la Simulation Numérique des Isolateurs HT

I.1. Introduction	03
I.2. Modélisation par éléments finis du distribution de tension et du la champ électrique sur une surface isolante en silicone recouverte de gouttelettes d'eau.....	03
I.2.1. Méthodologie de Recherche	03
I.2.2. Modèle Etudiés et Procédures de Simulation	03
I.2.3. Résultats et Discussions.....	04
I.2.3.1. Système Plan-plan	04
I.2.3.1.1. Effet des Gouttes d'Eau.....	04
I.2.3.1.2. L'influence de la position des gouttes d'eau	05
I.2.3.2. Calcul de la tension et du champ électrique d'un isolateur composite.....	06
I.2.3.2.1. Effet de la forme des gouttes d'eau sur la distribution électrique.....	06
I.2.3.2.2. Effet d'une paire de gouttes sur la distribution électrique.....	08
I.2.3.2.3. Effet de plusieurs gouttelettes sur la distribution électrique....	09
I.3. Simulation de la distribution du champ et du potentiel électrique sur un isolateur haute tension par la méthode des éléments finis.....	10
I.3.1. Méthode de Simulation.....	10
I.3.2. Résultats et Discussion.....	12
I.3.2.1. Influence des conductivités sur la distribution du potentiel électrique.....	12
I.3.2.2. Influence de la tension appliquée de la ligne sur la distribution du potentiel électrique.....	13
I.3. 2. 3. Influence de la conductivité sur la distribution du champ électrique.....	14
I.3.2.4. Influence de la tension appliquée de la ligne sur la distribution du champ électrique	16

I.3.2.5. Influence de la largeur de nervure d'isolateur sur la distribution du champ électrique.....	17
I.4. Conclusion	19

Chapitre II: Modèles Statiques et Dynamiques de Contournement

II .1. Introduction	20
II.2. Modèles statiques de contournement	20
II.2.1. Modèle d'Obenaus	20
II.2.2. Modèle de Danis	21
II.2.3 Modèles de Tegar.....	23
A/ Cas de pollution continue	23
b / Cas de pollution discontinue.....	23
II.3. Modèles dynamiques de contournement.....	25
II.3. 1 Modèle de Rizk	25
II.3.2 Modèle de Anjana et Lakshminarasimha	25
II.3.3 Modèle de Dhahbi et Beroual	27
II.4. Conclusion.....	30

Chapitre III : Distribution Du Potentiel Et Du Champ Électrique

III.1. Introduction	31
III.2. Comsol Multiphysics.....	31
III.3. Modèle des Isolateurs Etudiés	31
III.4. L'Interface Graphique de COMSOL.....	33

III.5. Etude sur le Modèle Plan.....	39
III.5.1. Etude du potentiel	39
III.5.1.1. Influence de la largeur des bandes propres sur le potentiel	39
III.5.1.2. Influence de la tension appliquée sur le potentiel	40
III.5.1.3. Influence de la conductivité sur le potentiel.....	42
III.5.2. Etude du champ électrique	43
III.5.2.1. Influence de la largeur des bandes propres sur le champ.....	43
III.5.2.2. Influence de la tension appliquée sur le champ.....	45
III.5.2.3. Influence de la conductivité sur le champ	46
III.6. Etude du Modèle Réel	47
III.6.1. Etude du potentiel	48
III.6.1.1. Influence de la conductivité sur le potentiel	48
III.6.1.2. Influence de la tension appliquée sur le potentiel	50
III.6.2. Etude du Champ Electrique	50
III.6.2.1. Influence de la conductivité sur le champ	50
III.6.2.2. Influence de la tension appliquée sur le champ.....	51
III.7. Conclusion.....	52
Conclusion générale	53

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale

La production, le transport et la distribution de l'énergie électrique forment la colonne vertébrale de l'économie d'un état industriel moderne. Avec la progression de l'industrialisation, naissent des exigences de plus en plus élevées concernant la mise à disposition de cette énergie.

Pour des raisons économiques, le transport et la distribution de l'énergie électrique s'effectuent généralement par des lignes aériennes. Leur fiabilité dépend donc considérablement du comportement mécanique, électrique et diélectrique des différents composants de ces lignes. Parmi ces composants, on note le rôle primordial que jouent les isolateurs [1].

En effet, le choix du type d'isolateur, les contrôles de réception, la surveillance en exploitation doivent être faite avec un maximum de soin, pour assurer le bon fonctionnement ainsi la continuité de la ligne [2]

La pollution, à l'état sec, n'engendre pas une dégradation de la rigidité diélectrique. Cependant, en s'humidifiant, elle provoque la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique. Cette dernière engendre la naissance d'un courant de fuite qui, par effet Joule, chauffe la couche de pollution qui sèche progressivement [3]. La répartition du potentiel entre électrodes est changée. Ainsi, une partie importante de la tension appliquée se trouve rapportée sur la bande sèche engendrant, si le champ local dépasse un certain seuil, un claquage diélectrique et l'établissement d'une décharge électrique ou d'arcs partiels.

Dans Certaines conditions, cette décharge peut s'allonger jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur. Une connaissance approfondie de la distribution du potentiel et du champ électrique le long des isolateurs, recouverts de couches polluantes, permette de déterminer les valeurs critiques de potentiel et de champ électrique donnant naissance à ces arcs partiels

Avec le développement croissant de l'informatique et de logiciels de calcul électromagnétique de plus en plus puissants, il est maintenant possible d'obtenir des résultats rapides et précis. Parmi les méthodes numériques disponibles et applicables aux calculs électromagnétiques, la Méthode des Éléments Finis. Ainsi, son utilisation, par le

INTRODUCTION GENERALE

biais du logiciel COMSOL Multiphysics 5.4, fut retenue pour réaliser les différentes simulations.

Notre travail comporte trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous citons les travaux antérieurs dans le domaine de la pollution des isolateurs et la simulation numérique.

Le deuxième chapitre présente quelques modèles statiques et dynamiques d'isolateurs pollués.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude, via le logiciel COMSOL Multiphysique 5.4, de la distribution du potentiel et du champ électriques le long :

- D'un modèle plan d'isolateur F160D-146DC en fonction de niveau de la tension appliquée, de la conductivité de la pollution et de la largeur des bandes propres.
- D'un élément réel d'isolateur F160D-146DC en fonction de type de pollution (uniforme, non uniforme), de niveau de la tension appliquée, de la conductivité de la pollution.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre travail et perspectives

Chapitre I

Quelques Travaux Antérieurs
sur la Simulation Numérique
des Isolateurs HT

1. I.1. Introduction

Depuis les dernières décennies, l'intérêt croissant vis-à-vis des phénomènes de contournement des isolateurs sous diverses conditions atmosphériques, a donné lieu à un nombre exhaustif d'études qui ont été publiées à travers le monde. Dans le but de donner plus de détails sur le phénomène de l'étude, une revue de littérature est présentée. Il s'agit de présenter quelques travaux relatifs à la détermination numérique du potentiel et du champ électrique le long des isolateurs pollués.

I.2. Modélisation par éléments finis du distribution de tension et du la champ électrique sur une surface isolante en silicone recouverte de gouttelettes d'eau

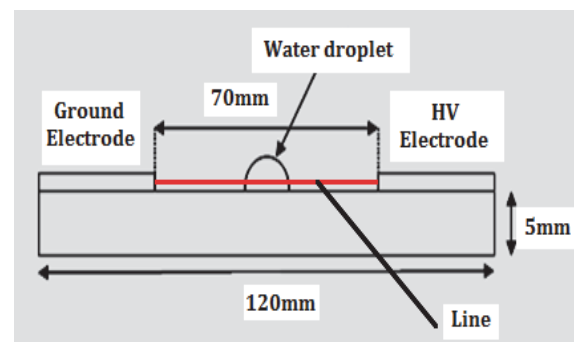
Pour savoir l'influence des gouttelettes d'eau sur la distribution du champ et du potentiel électrique, les chercheurs F. Aoubed, A. Bayadi, A. E. Rahmani et R. Boudissa [01] ont conçu et étudié un modèle géométrique de l'isolateur en utilisant la méthode des éléments finis qui a été implémentée dans COMSOL Multiphysics

I.2.1. Méthodologie de Recherche

Les tests ont été menés avec une tension alternative élevée, en utilisant le modèle expérimental présenté à la figure 1 Une pipette ajustable a été utilisée pour distribuer des gouttes d'eau avec un volume défini de $45 \mu\text{l}$ et une conductivité de $180 \mu\text{S/cm}$, sur la surface de l'échantillon.



a) Photographie des électrodes



b) Schéma des électrodes.

Figure I.1. Electrodes disposées dans une configuration plan-plan.

I.2.2. Modèle Étudiés et Procédures de Simulation

Les chercheurs Aoubed et Al ont simulé deux modèles: le premier concerne le système d'électrodes plan-plan (figure 1) et le deuxième concerne un isolateur réel (figure 2) et ces deux modèles ont été dessinées en Auto-CAD.

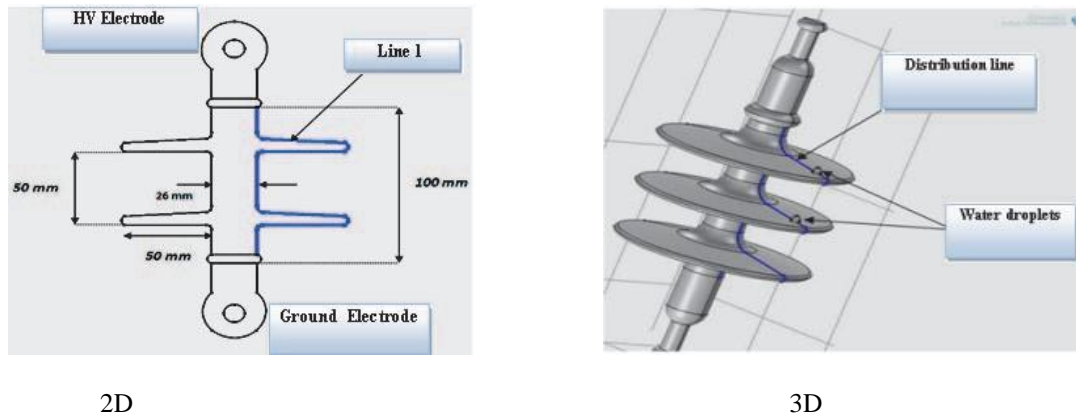


Figure I. 2. Modèles d'isolateur réel utilisés en simulation.

Les caractéristiques des matériaux utilisés dans COMSOL sont définies dans le tableau 1. Une tension de 36 kV a été appliquée à l'électrode haute tension.

Tableau .I.1. Résumé des composants de la simulation COMSOL.

Matériau	Permittivité relative ϵ_r	conductivité σ (S / m)
Silicone	3.9	1×10^{-12}
Fibre de verre	4.2	1×10^{-12}
Acier forgé	1	5.9×10^7
Gouttelettes d'eau	81	$180 \cdot 10^{-6}$

I.2.3. Résultats et Discussions

I.2.3.1. Système Plan-plan

I.2.3.1.1. Effet des Gouttes d'Eau

Les figures 3 et 4 montrent les résultats d'expériences et de simulations analysant le comportement des gouttelettes d'eau dans un champ électrique et leur effet sur la distribution du champ électrique. Les simulations ont été réalisées avec une distribution variable de gouttelettes d'eau dans la zone inter-électrode.

La figure 3 présente une sélection d'images illustrant les changements de forme des gouttelettes d'eau qui étaient distribuées symétriquement dans la zone inter-électrode.

Dans cette partie, des expériences ont été réalisées afin de comprendre l'influence des gouttes d'eau sous contrainte de champ électrique AC sur les phénomènes de déclenchement de la décharge.

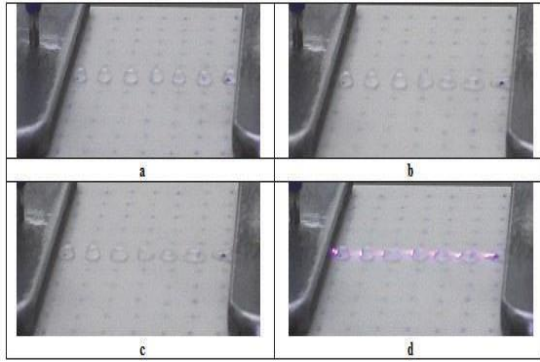


Figure I.3. Comportement des gouttelettes d'eau [4].

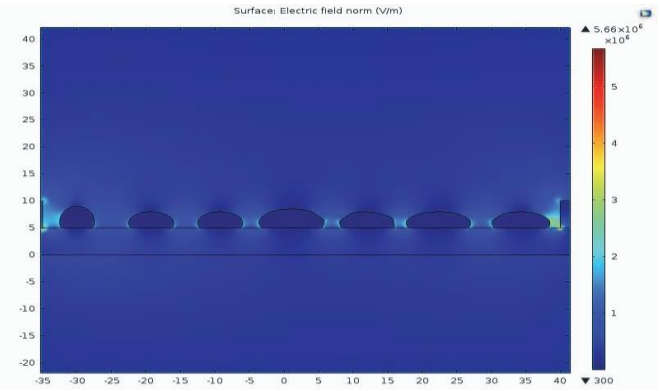


Figure I.4. Distribution du champ électrique dans la région inter-électrodes avant le contournement[4].

La figure I.5 montre l'augmentation de plus de deux fois de l'intensité du champ électrique local entre les résultats mesurés avec des gouttelettes d'eau dans leur état d'origine et ceux qui se sont déformés avant le contournement. Cette augmentation est causée par l'étirement et les changements de forme des gouttelettes. Les valeurs maximales du champ électrique sont aux extrémités des gouttes d'eau au point triple du fait de l'existence de décharges dans cette zone, comme le montre la figure 4.

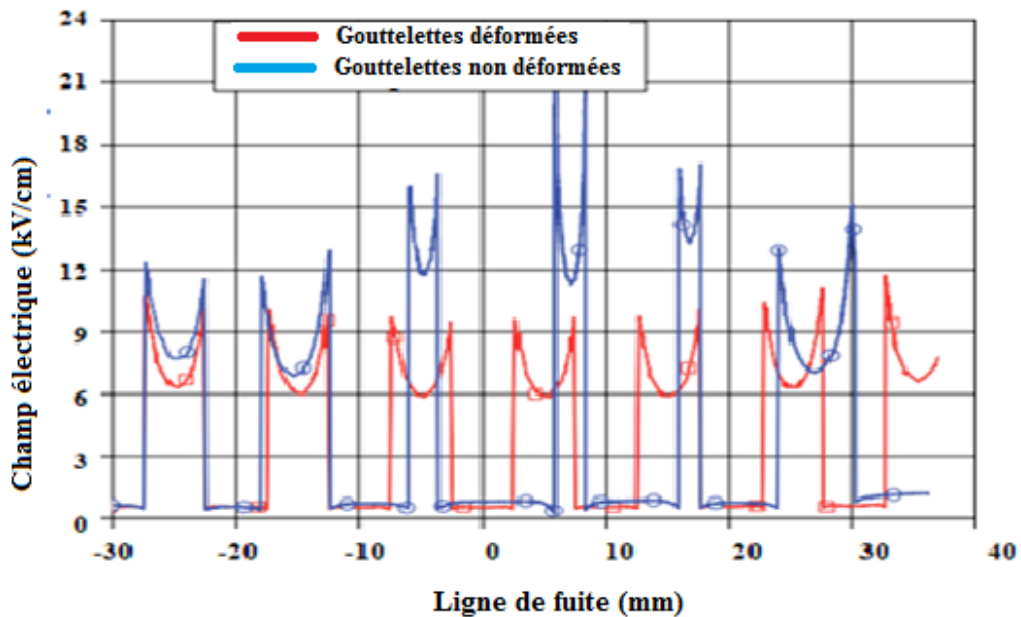


Figure I.5. Distribution du champ électrique sur a ligne de fuite pour les gouttelettes d'eau déformées et non déformées[4]

I.2.3.1.2. L'influence de la position des gouttes d'eau

Pour étudier l'influence de la position des gouttes d'eau sur la distribution du champ et de

potentiel électrique, les auteurs F. Aoubed et Al ont placé les gouttelettes d'eau à proximité de l'électrode de masse dans le premier cas et dans le second cas les gouttelettes d'eau étaient placées près de l'électrode haute tension.

La figure 6 montre la répartition du champ électrique le long d'une surface hydrophobe revêtue de gouttes d'eau déformées et non déformées pour les deux positions des gouttes

- L'intensité maximale du champ électrique apparaît au point triple eau-gaz-solide. Avec une valeur de 20 kV/cm, l'intensité maximale du champ électrique est plus grande dans le second cas que dans le premier cas.

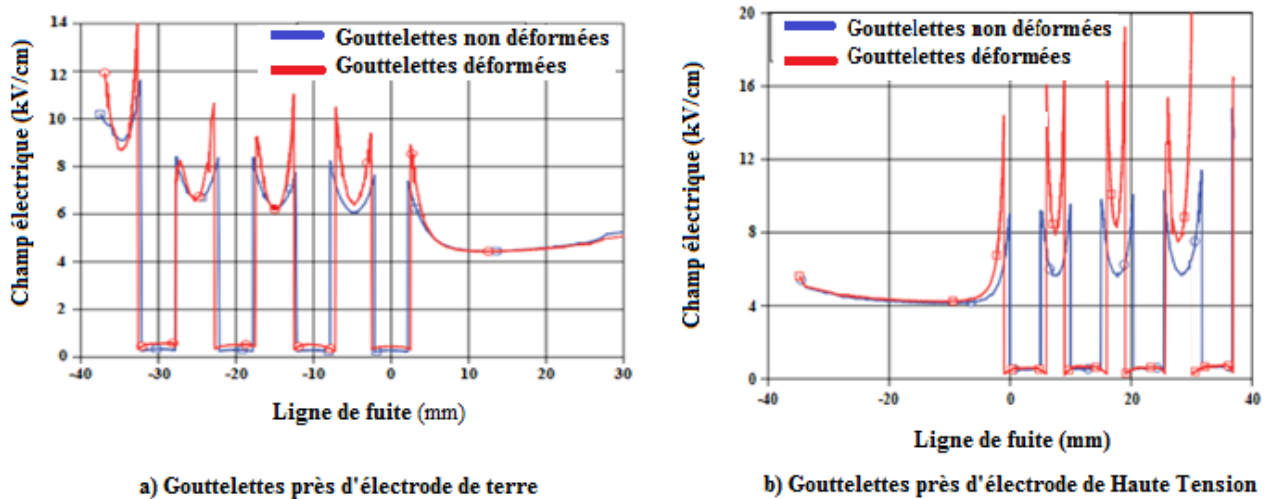


Figure I.6. Champ électrique en fonction de la position des gouttes d'eau(déformées et non déformées)

I.2.3.2. Calcul de la tension et du champ électrique d'un isolateur composite

I.2.3.2.1. Effet de la forme des gouttes d'eau sur la distribution électrique

Pour analyser l'effet de la forme de gouttelettes sur la distribution de potentiel et du champ électrique, ils ont étudié trois cas: sans gouttelettes, avec de gouttelettes uniformes et avec des gouttelettes d'eau non uniformes à la surface de l'isolateur (réel 2D). Une tension de 15 kV a été appliquée à l'électrode haute tension.

la figure I.7 montre que les gouttelettes d'eau n'ont pas d'effet sur la distribution de potentiel le long de la surface d'isolateur.

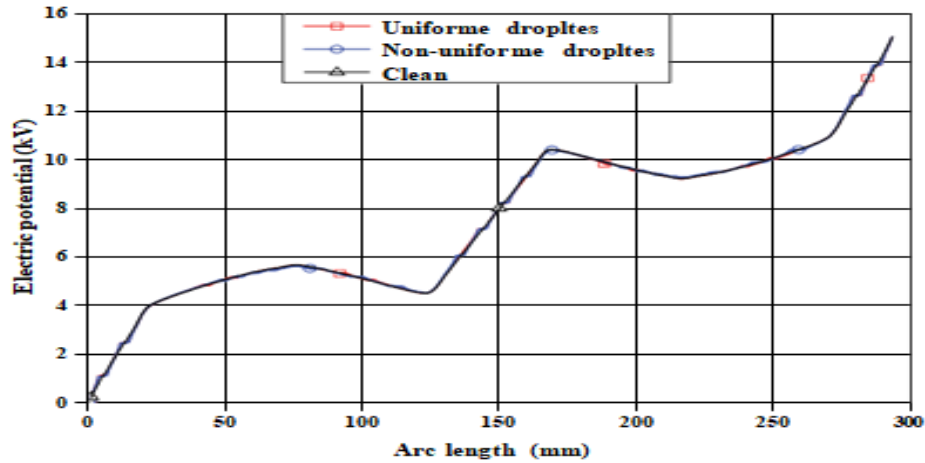


Figure I.7. Comparaison de la distribution du potentiel le long de la surface d'un isolateur avec gouttelettes et sans gouttelettes.

La figure 8 présente la variation de la distribution du champ électrique pour les trois cas considérés. La magnitude du champ électrique est élevée dans le deuxième comme dans le troisième cas. Les gouttelettes d'eau non uniformes (troisième cas) provoquent une augmentation plus importante de magnitude du champ électrique que les gouttelettes uniformes (deuxième cas). Dans les deux derniers cas, les valeurs maximales du champ se situaient aux extrémités des gouttes au point triple (air, surface isolante et gouttelettes d'eau)

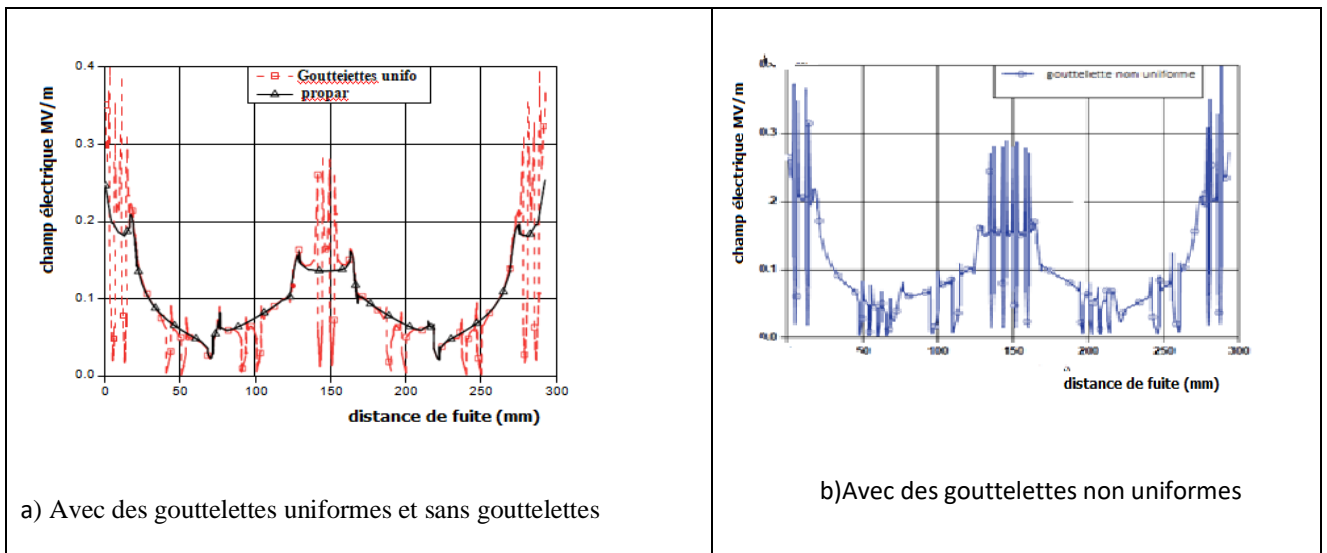


Figure I.8. Comparaison de la distribution du champ électrique le long de la surface d'un isolateur avec des gouttelettes et sans gouttelettes.

I.2.3.2.2. Effet d'une paire de gouttes sur la distribution électrique

Les auteurs de cet article ont créé un modèle pour simuler le comportement d'un isolateur réel en 3D (Figure 2b). Deux cas ont été considérés dans cette simulation. Le premier concerne une surface propre (pas de gouttelettes d'eau) et le second concerne le cas où il y a une paire de gouttelettes sur la surface de l'isolateur.

La figure I.9. montre qu'il n'y a pas de différence évidente de potentiel électrique à une distance de 175 mm sur la ligne de distribution. En revanche, une chute de tension est observée à une distance de 275 mm sur la même ligne en raison de la présence des gouttes d'eau à la surface de l'isolant. Cette baisse de tension confirme l'effet des gouttelettes sur la distribution du potentiel électrique.

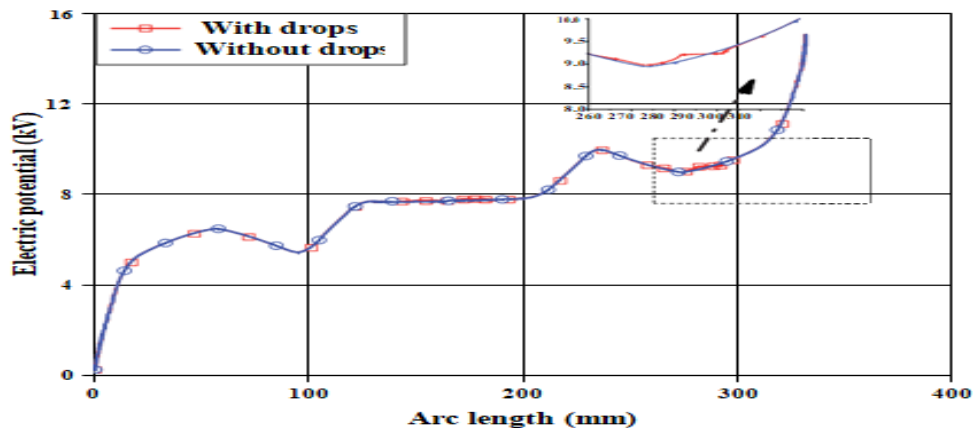


Figure I. 9. Répartition du potentiel électrique sur la ligne de fuite avec et sans gouttelettes d'eau.

D'après la figure I.10, le champ électrique sur la ligne de distribution est différent dans les deux cas considérés. Dans le deuxième cas, la magnitude du champ électrique augmente à 1×10^5 V/m à la première distance (175 mm) et à 2×10^5 V/m à la seconde (275 mm) depuis ce point est proche de l'électrode haute tension.

L'écart entre les deux cas est provoqué par la présence de gouttelettes à la surface de l'isolateur, ce qui illustre les effets d'une contamination sur la distribution d'un champ électrique réel, comme des décharges électriques aux extrémités de ces gouttelettes.

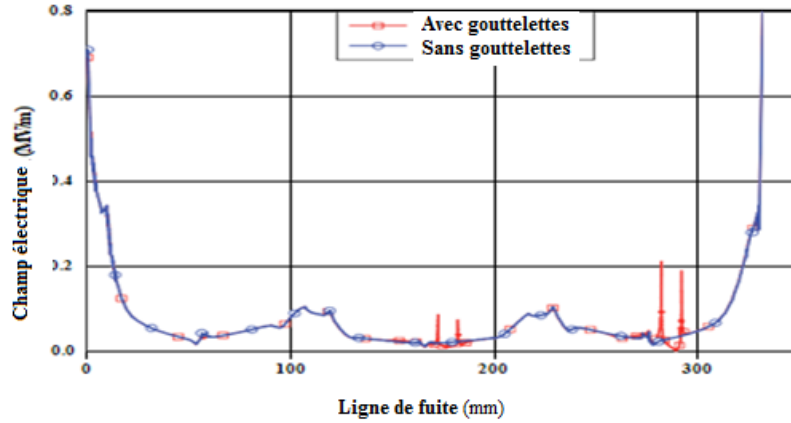


Figure I. 10. Distribution du champ électrique sur la ligne de fuite avec et sans gouttelettes d'eau.

I.2.3.2.3. Effet de plusieurs gouttelettes sur la distribution électrique

Ils ont créé un modèle en utilisant le matériau hydrophobe HC2, comme le montre la figure I.11a et b pour voir l'influence de plusieurs gouttelettes avec différents volumes et formes sur la distribution du champ et du potentiel électrique.

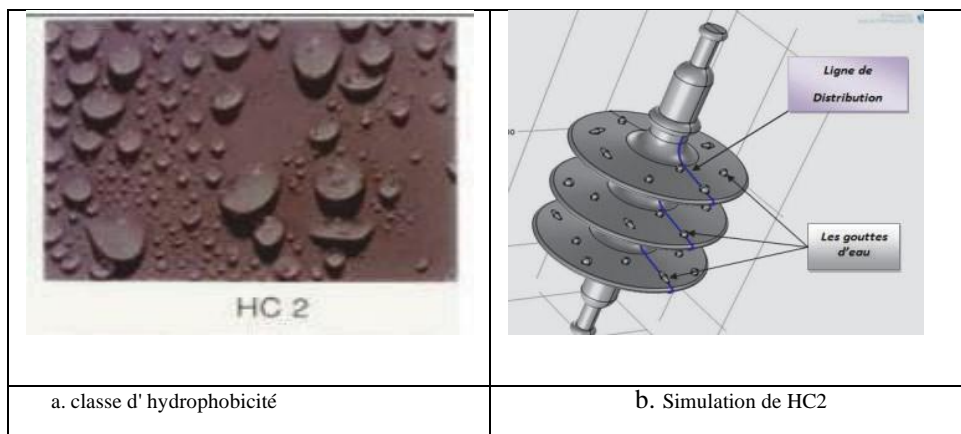


Figure I.11. Schéma d'un isolant réel en 3D, comprenant une illustration d'un matériau hydrophobe.

La figure I.12 montre que la distribution du potentiel électrique le long de la surface de l'isolateur en silicone est non linéaire.

La figures I.13 montre que la distribution du champ électrique n'est pas uniforme, en particulier aux extrémités des électrodes. Cela est dû à la différence entre l'air autour de l'isolateur et le matériau diélectrique

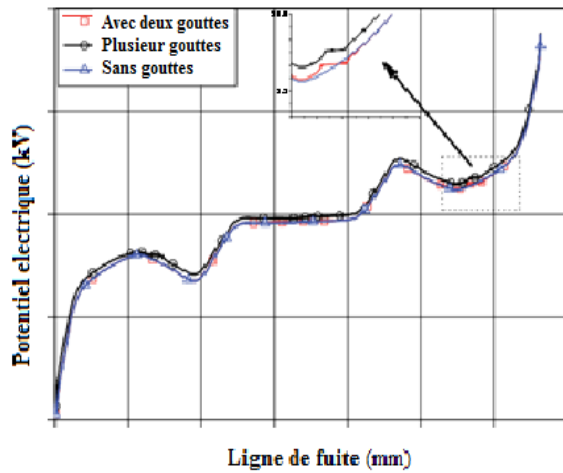


Figure I.12. Distribution du potentiel électrique à la surface d'isolateur

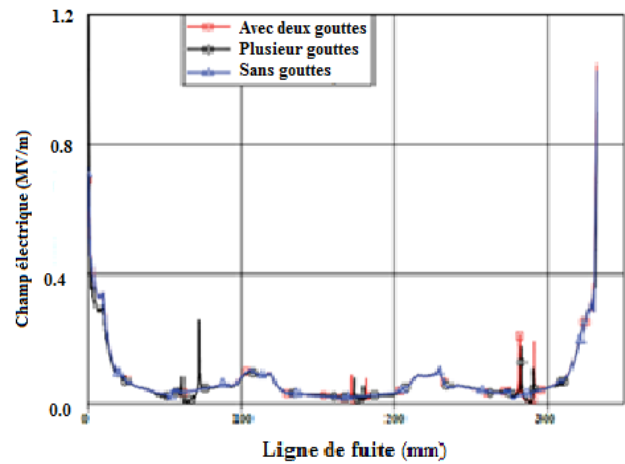


Figure I.13. Distribution du champ électrique à la surface d'isolateur

Aouabed et les autres ont conclu que plusieurs propriétés des gouttelettes d'eau sur une surface diélectrique, telles que leur volume, leur nombre et leur forme, peuvent influencer la distribution du champ et du potentiel électrique.

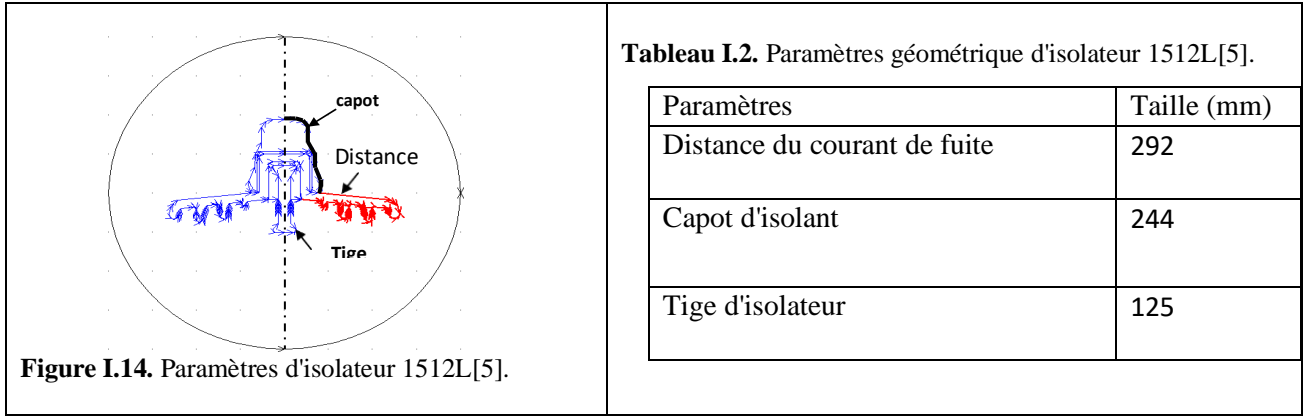
Les gouttelettes d'eau seront déformées et allongées le long de la direction des lignes de champ électrique. Les déformations provoqueront des intensifications locales du champ électrique; le point critique sera le point triple entre la goutte d'eau, l'air et le matériau isolant. Ce sera un point de départ pour les décharges partielles, conduisant finalement à une détérioration du matériau.

I.3. Simulation de la distribution du champ et du potentiel électrique sur un isolateur haute tension par la méthode des éléments finis

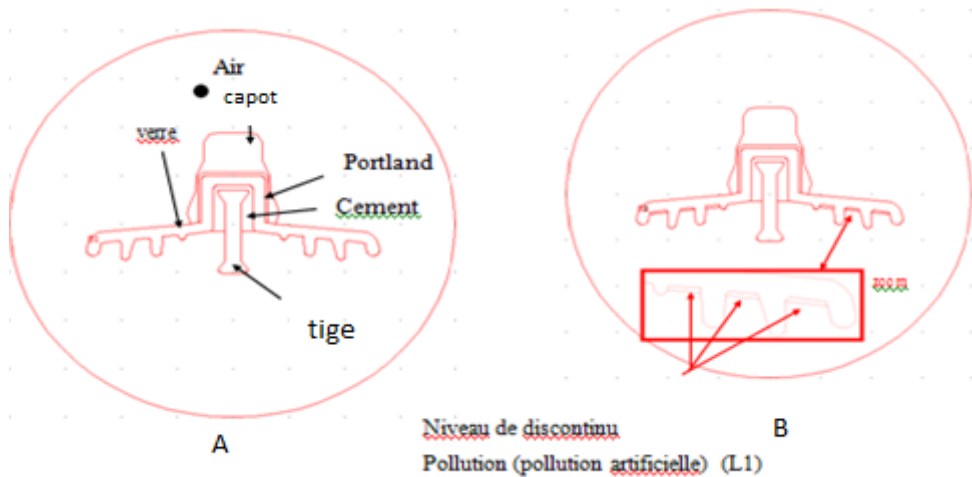
Les chercheurs H. Benguesmia, N. M'ziou, A. Boubakeur [5] ont étudié la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'isolateur haute tension 1512L à l'aide d'une méthode numérique sous logiciel Comsol Multiphysics 5.0.

I.3.1. Méthode de Simulation

Les distributions de potentiel et de champ électrique le long de cet isolateur sont simulées dans différentes conditions: isolateurs propres et isolateurs pollués en appliquant différentes valeurs de conductivité. Cette étude est effectuée sur l'isolateur des lignes aériennes 220kV, sa figure et ses paramètres réels sont présentés par la figure I.14 et le tableau I.2.



Le modèle du réel d'isolateur 1512L tracé par logiciel FEM est présenté par la figure I.15, la permittivité et la conductivité de chaque matériau sont définis par le tableau I.3.



(A) Modèle propre

(B) Modèle non uniformément pollué

Figure I.15. Model d'isolateur 220 kV tracé par le logiciel FEM[5].

Tableau I.3. Propriétés d'isolateur capot et tige 1512L[5]

Propriétés	Capot & Tige	Verre	Portland & Ciment	Air	Pollution artificielle
Permittivité relative ϵ_r	10^6	6	5	1.0005	80
Conductivités ($\mu\text{S/cm}$)	10^6	$1.e^{-12}$	$1.e^{-12}$	$1.e^{-14}$	0,70,700, 1200,3000

I.3.2. Résultats et Discussion

I.3.2.1. Influence des conductivités sur la distribution du potentiel électrique

Les figures 16, 17 et 18 montrent lignes équipotentielles de modèle propre, la distribution du pour différents valeur de conductivités 0, 70, 700, 1200, 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et la variation du potentiel électrique le long de la distance du courant de fuite. La tension appliquée de la ligne a été fixée à 30 kV.

Le potentiel est très important au voisinage de l'électrode haute tension ensuite il dimunu en s'éloignant jusqu'au électrode basse tension. La conductivité n'a pas d'influence sur la répartition du potentiel électrique .

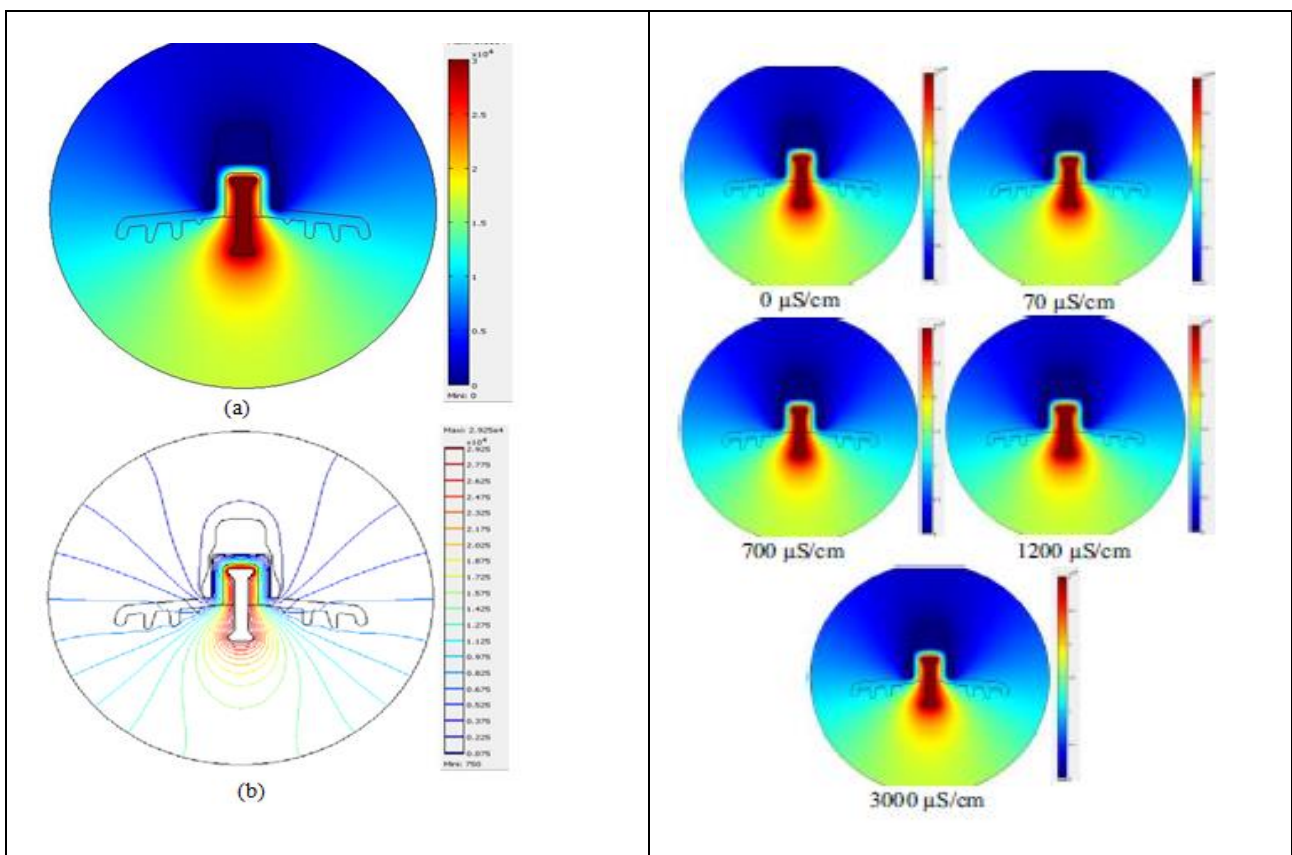


Figure I.16 (a) Distribution de potentiel
(b) lignes équipotentielles (modèle propre)

Figure.I.17 Distribution du potentiel
électrique pour différentes conductivités

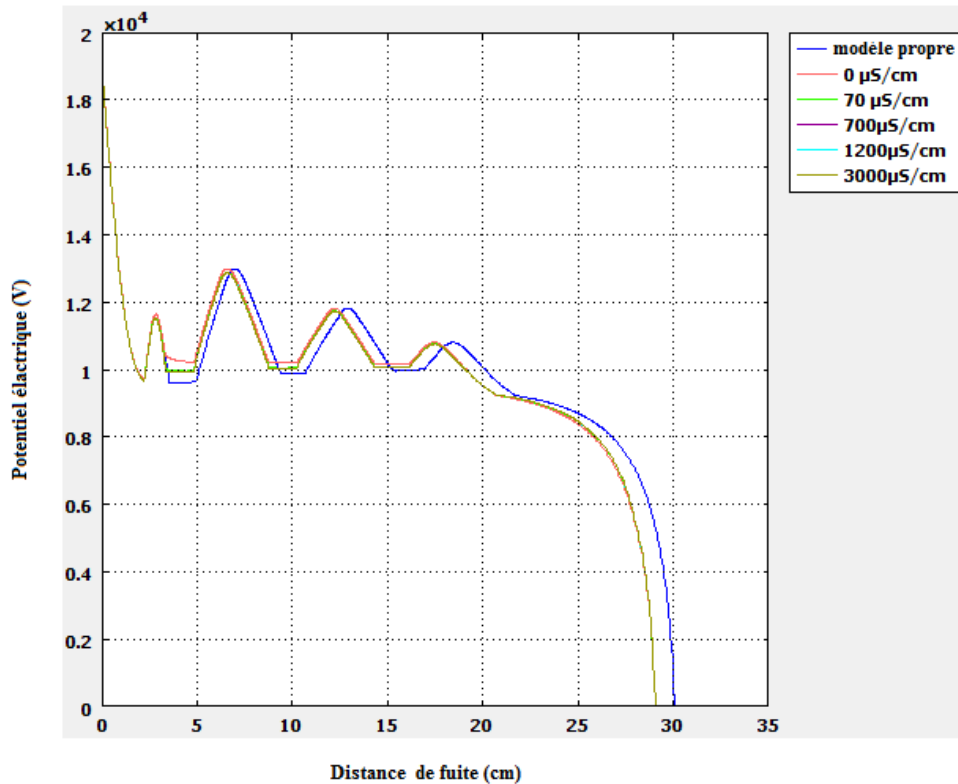


Figure I.18. Potentiel électrique en fonction de distance de fuite pour différentes conductivités

I.3.2.2. Influence de la tension appliquée de la ligne sur la distribution du potentiel électrique

La figure I.19 et I.20 présentent la distribution du potentiel en fonction de la distance de fuite pour différentes tensions appliquées. Ils montrent que seules les valeurs de potentiel changent mais la forme reste la même.

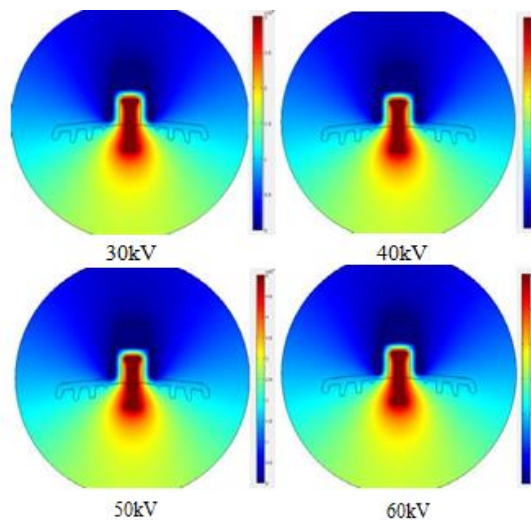


Figure I.19. Distribution du potentiel électrique pour différentes tensions appliquées de la ligne

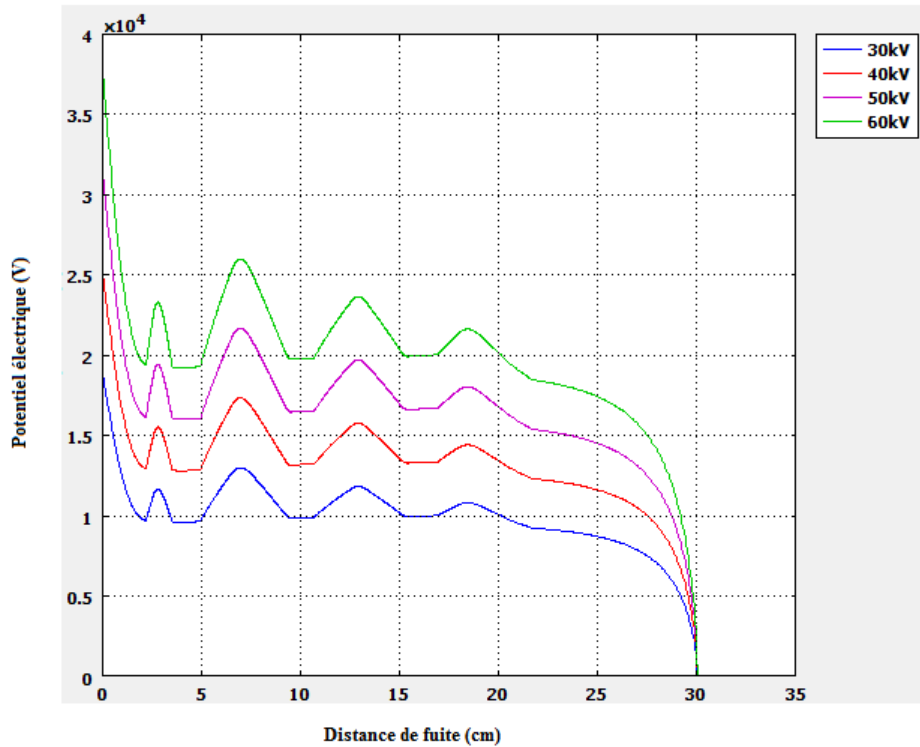


Figure I.20. Potentiel électrique en fonction de la distance de fuite Pour différente tensions appliquées de la ligne

I.3. 2. 3. Influence de la conductivité sur la distribution du champ électrique

La distribution du champ électrique sur le modèle d'isolateur propre est présenté par la figure I. 21. le champ électrique est nul au niveau d'électrode haute tension et basse tension. le vecteur du champ est émergé de l'électrode haute tension vers l'électrode basse tension.

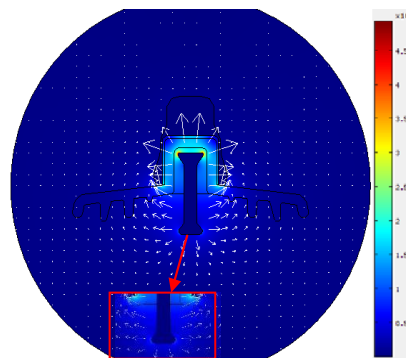


Figure I.21. Distribution du champ électrique pour un modèle propre

Pour une tension constante de 30 kV, la figure I.22 affiche les variations de l'intensité du champ électrique le long de la distance de fuite de l'isolateur pour différentes conductivités.

Dans les couches propres à la surface d'isolateur, le champ électrique est plus intense, ce qui explique expérimentalement, l'apparition des arcs électriques aux niveaux des couches propres avant le contournement de l'isolateur.

Proche d'électrode haute tension, le champ électrique est intense et diminue en s'éloignant de l'électrode active jusqu'à l'électrode passif.

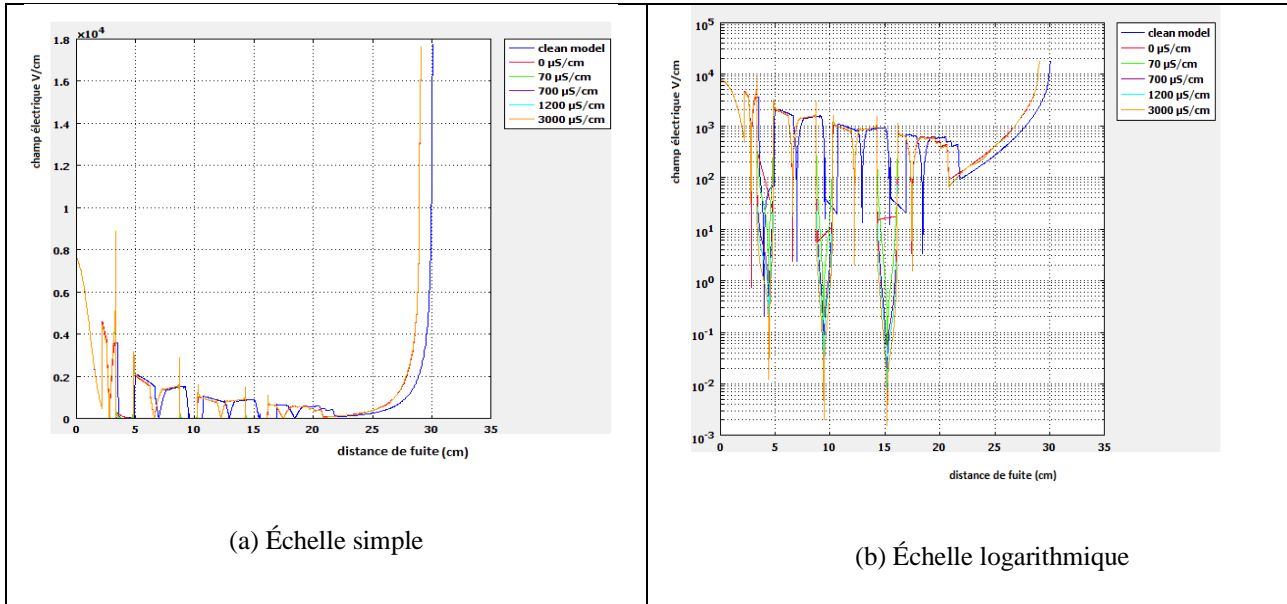


Figure I.22. Champ électrique en fonction de la distance de fuite pour différentes conductivités

la figure 23 montre que les conductivités n'ont aucune incidence sur la distribution du champ électrique.

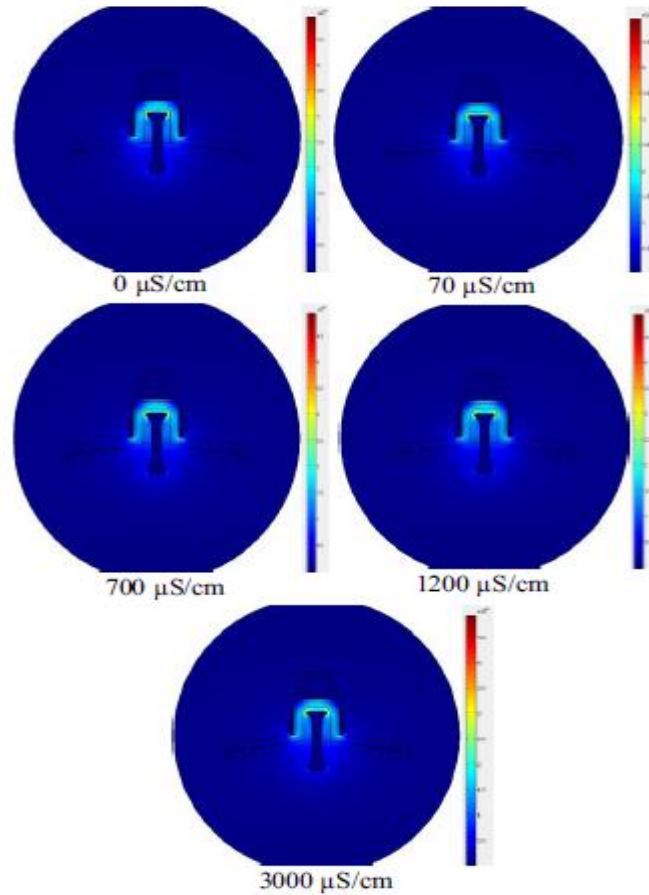


Figure.I.23. Distribution du champ électrique pour différentes conductivités

I.3.2.4. Influence de la tension appliquée de la ligne sur la distribution du champ électrique

Les figures I.24 et I.25 montrent que le champ électrique augmente en fonction de la tension appliquée mais la forme reste la même.

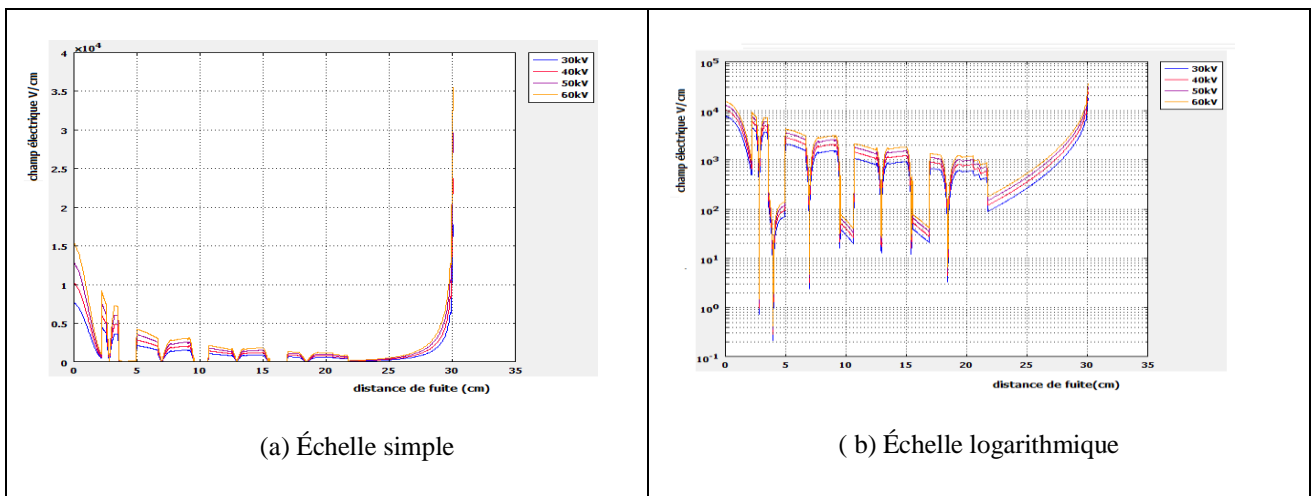


Figure I.24. Champ électrique électrique en fonction de la distance de fuite pour différentes tensions appliquées

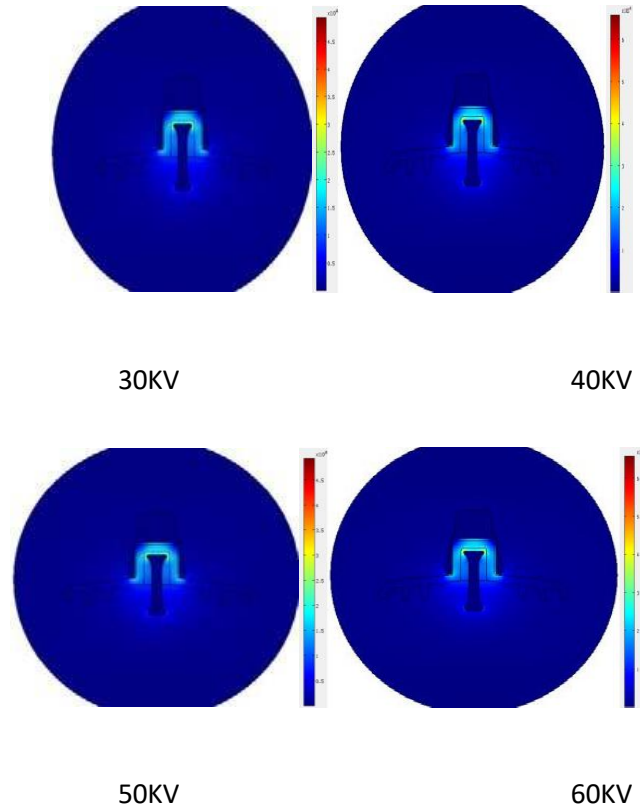
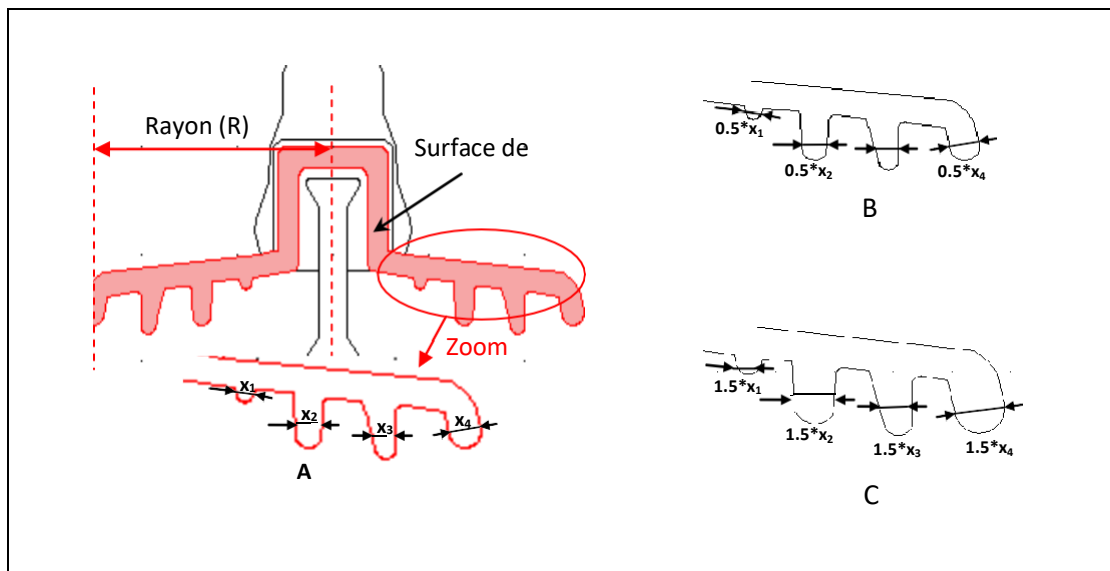


Figure.I.25. Distribution du champ électrique pour différentes tensions appliqués

I.3.2.5. Influence de la largeur de nervure d'isolateur sur la distribution du champ électrique

Dans cette partie, il faut bien estimer les modèles avec le même rayon et pratiquement la même forme que le modèle réel mais en variant la largeur des nervures comme indique la figure I.26 et le tableau I.4. .



(a) Modèle réel, (b) Modèle _02, (c) Modèle_01

Figure I.26. Dimensionnement des nervures de l'isolateur 1512L.

La figure I.27((a) échelle simple, (b) échelle logarithmique) montre la fluctuation du champ électrique sur l'isolateur le long de la distance de fuite pour les trois cas étudiés (modèle réel, model_01, model_02)

Tableau I.4. Dimensionnement des isolateurs HT proposés

Étude du modèle	Dimension	Rayon, R (cm)	Surface du verre (cm ²)
Modèle réel	$X''' = X = [x_1, x_2, x_3, x_4]$ (fig. 15. -a-)	13.1	47.949
Modèle 01	$X' = 1.5 * X = 1.5 * [x_1, x_2, x_3, x_4]$ (fig. 15. -c-)	13.1	53.873
Modèle 02	$X'' = 0.5 * X = 0.5 * [x_1, x_2, x_3, x_4]$ (fig. 15. -b-)	13.1	42.7028

La figure I.27 présente plusieurs locaux maximum qui expliquent l'apparition d'arcs localisés à la surface d'isolateur. la répartition du champ électrique sur la distance de fuite suit les mêmes variations de modèle réel avec un décalage spatial dû à la différence des longueurs de distance D'après ces résultats, le modèle réel est le modèle qui optimise la valeur du champ électrique au niveau du capot.

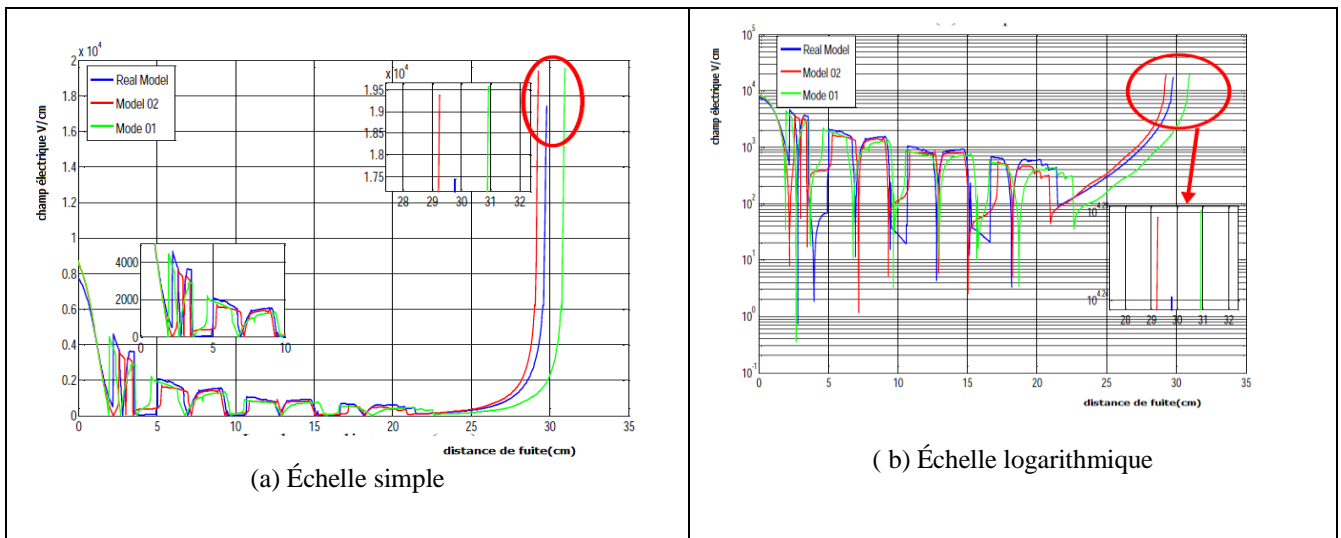


Figure I.27. Distance de fuite de champ électrique pour trois cas étudiés

Les auteurs H. Benguesmia et Al ont conclu que L'état de surface qui affecte la distribution du potentiel et du champ électriques et n'est pas la conductivité de la pollution, les parties proches

d'électrode active sont les plus exposées aux contraintes électriques, le potentiel et le champ électriques augmentent avec l'augmentation de la tension appliquée mais la forme du champ électrique et du potentiel reste la même, La modification de la forme géométrique de l'isolateur génère une augmentation du champ électrique puis une réduction de la tension du contournement.

Les auteurs de cet article ont constaté l'efficacité de Comsol Multiphysics pour étudier le comportement d'isolateur pollué et la distribution du potentiel et du champ électrique le long de la distance de fuite d'isolateur.

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons résumé un certain nombre de travaux de recherche qui préoccupent les chercheurs dans le domaine de la pollution des isolateurs. En effet, nous avons rappelé les principaux travaux rapportés dans la littérature en vue de décrire la distribution du potentiel et du champ électrique.

Chapitre II

Modèles Statiques et

Dynamiques de

Contournement

II.1. Introduction

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

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

II.2. Modèles statiques de contournement

Pour adapter plus rationnellement les isolateurs d'un ouvrage à la sévérité de pollution d'un site ou pour surveiller la qualité de l'isolement et donc d'éviter les éventuelles défaillances, il est impératif de disposer de modèles permettant de prévoir le contournement des isolateurs. C'est dans cette optique que de nombreux modèles analytiques, empiriques ou semi-empiriques ont été développés [6].

II.2.1. Modèle d'Obenaus

C'est Obenaus [7] qui, dans un travail de pionnier, est à l'origine des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante, sous tension continue. En effet, partant d'un modèle type circuit électrique équivalent, constitué d'un arc de longueur X en série avec une résistance R_p représentant la résistance de la pollution (Figure II.1), il en a déduit la tension d'arc :

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

Où I est le courant de fuite, n et A sont les constantes de la caractéristique statique de l'arc :

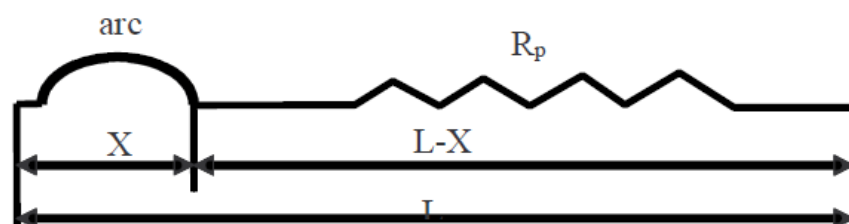


Figure II.1. Circuit électrique équivalent du modèle d'Obenaus[7].

Les valeurs des paramètres n et A dépendent du milieu dans lequel s'amorce la décharge. Selon certaines auteurs [8- 9] : $0.4 \leq n \leq 1$ et $3 \leq A \leq 500$.

A partir de mesures expérimentales sur un canal d'électrolyte, Ghosh et al [9] ont proposé de prendre des valeurs différentes pour A et n caractérisant l'équation de la décharge selon la nature de l'électrolyte utilisé. Les résultats de leurs mesures sont donnés dans le tableau II.1.

Tableau II.1. différentes valeurs de A et n

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

II.2.2. Modèle de Danis

Afin de reproduire des couches similaires à celles observées sur les isolateurs pollués dans les conditions naturelles, Danis [10] a utilisé un modèle de forme géométrique simple (plan ou cylindrique) possédant plus d'une zone sèche (Figure II.2.a). La rupture des zones sèches survient alors d'une manière aléatoire (Figure II.2.b). Le lieu d'apparition des arcs partiels, la forme et le mouvement des racines des arcs sur une surface polluée (Figure II.2.c) dépendent ainsi de plusieurs facteurs, dont on ne peut déterminer leurs effets instantanés. Par conséquent, le comportement macroscopique de ces arcs a une nature stochastique. La tension de contournement est donc une variable aléatoire et a une fonction de distribution.

Une simulation numérique des observations expérimentales, utilisant des photographies à grande vitesse (3000 images par seconde), a été effectuée pour déterminer cette tension.

En considérant que la résistance de la couche polluante est linéaire par rapport à la longueur, l'équation qui régit le modèle est

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

(II.2)

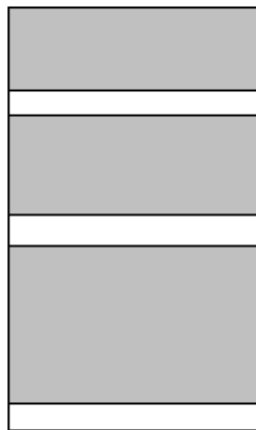
Avec $n \geq 0.5$ et $200 \leq A \leq 400$,

r_p est la résistance linéique .

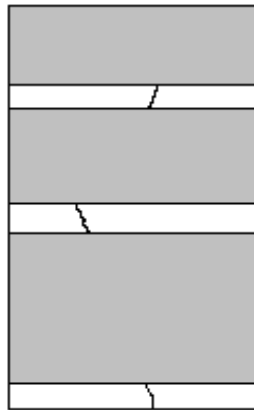
Le courant et la tension critique déduites par l'auteur [7] sont donnés par les expressions :

$$I_c = \left(\frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \tag{II.3}$$

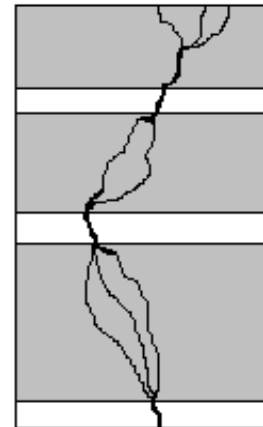
$$U_c = L(Ar_p)^{\frac{1}{n+1}} = AI_c^{-1} \tag{II.4}$$



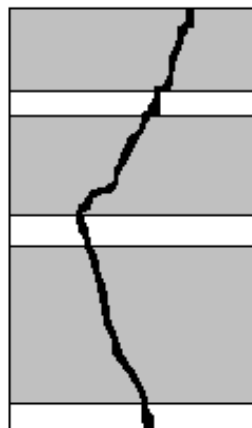
a- Absence d'arcs



b- Formation d'arcs



c- Connexion d'arcs



d- Contournement

Figure II.2. Modèle de Danis [10]

II.2.3 Modèles de Tegar

A/ Cas de pollution continue

Tegar [11] a élaboré un modèle statique en tension alternative. Son modèle est basé sur celui d'Obenaus [7] et permet d'avoir les différentes caractéristiques concernant le développement de l'arc électrique sur une surface isolante uniformément polluée.

En se basant sur l'équation du circuit et sur la condition limite de réamorçage [6], [12], il a déterminé l'expression donnant la résistance de pollution en série avec l'arc, en fonction de la tension appliquée et le courant de fuite :

$$R_p = \frac{1}{\rho} \frac{K - 100U}{K} \frac{U}{I} = \rho F_p \quad (\text{II.5})$$

où ρ représente la résistivité de la couche de pollution et K la constante de la caractéristique statique de l'arc.

Cette équation lui a permis d'évaluer la longueur critique de l'arc et par suite tous les paramètres caractérisant les phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes uniformément polluées.

Un modèle amélioré a été mis au point par Tegar [13] pour caractériser la propagation d'une décharge électrique sur des surfaces isolantes soumises à une pollution continue non uniforme.

b / Cas de pollution discontinue

Tegar [13] a élaboré un algorithme qui permet d'obtenir les différentes caractéristiques des phénomènes de conduction sur les surfaces isolantes sous pollution discontinue. Les bandes propres et polluées sont représentées par des circuits électriques. Les composants de ces circuits sont déterminés à partir des essais effectués sur la plaque propre et celle uniformément polluée. Le courant de fuite critique et la tension de contournement sont calculés à partir de la connaissance de la tension de contournement obtenue expérimentalement dans le cas où les couches de la pollution discontinue sont remplacées par du papier aluminium.

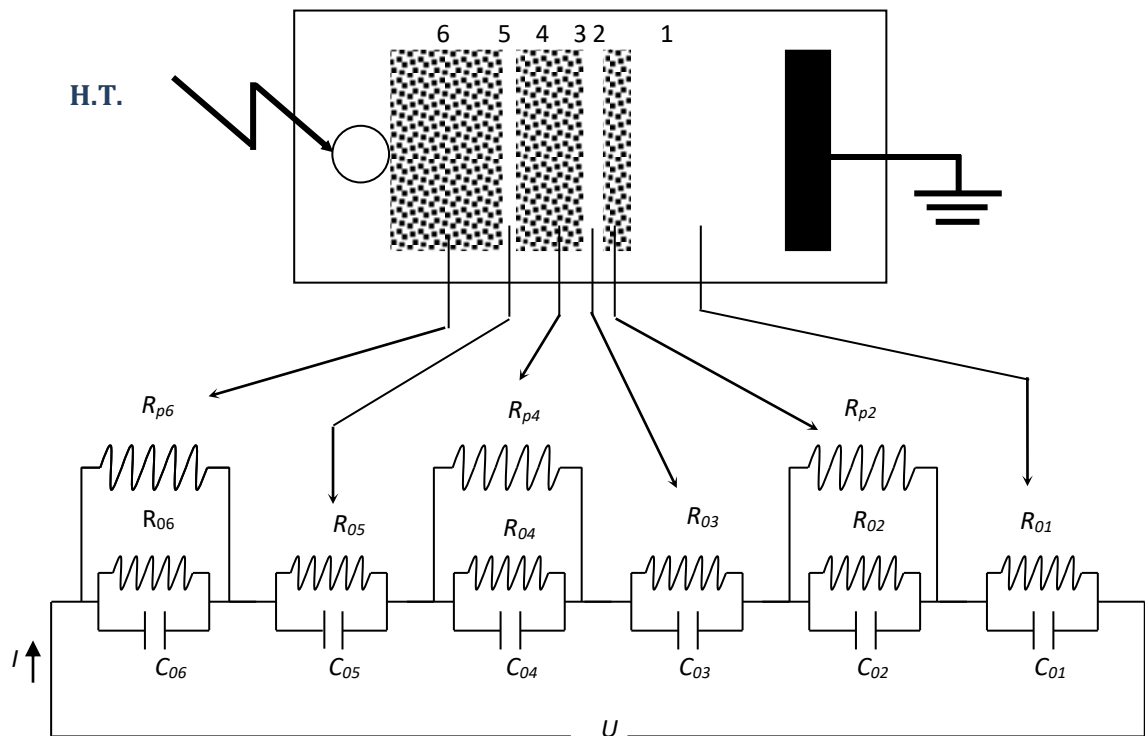


Figure II.3. Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire selon Tegar [13]

La figure II.3 représente le circuit électrique équivalent au modèle de laboratoire sous pollution discontinue. Dans ce circuit, chaque bande i ($i=1$ à 6) est constituée d'une résistance R_{0i} en parallèle avec une capacité C_{0i} . Pour chaque bande polluée i ($i=2, 4, 6$), ces circuits sont shuntés par une résistance R_{pi} représentant la couche de pollution (peinture semi-conductrice à base de graphite)

Le fait que les couches polluantes possèdent des formes rectangulaires et selon la recommandation de la CEI 60-1 [14], l'expression de la résistance pour chaque bande polluée i peut être formulée par :

$$R_{pi} = R_{sp} \int_0^{L_i} \frac{dl}{b} = R_{sp} \frac{L_i}{b} = R_p f \frac{L_i}{b} \quad (\text{II.6})$$

avec $i=2, 4, 6$, R_{pi} la résistance de la couche de pollution, dl élément de longueur, L_i la longueur de la pollution, b la largeur de la couche de pollution et f le facteur de forme.

Les résultats simulés concordent assez parfaitement avec ceux obtenus expérimentalement pour les grandes largeurs de couches polluantes.

II.3. Modèles dynamiques de contournement

Alors que plusieurs paramètres évoluent dans le temps, l'étude du phénomène de contournement a été souvent effectuée en utilisant des modèles statiques. Afin d'être conforme à la réalité, de nouveaux modèles ayant pris en considération la variation dans le temps de certains paramètres ont été développés.

II.3. 1 Modèle de Rizk

Pour caractériser la dynamique de l'arc pour le cas continu, Rizk et Nguyen [15] ont considéré une résistance d'arc qui varie selon l'équation de Mayr [16] :

$$\frac{dR_{arc}}{dt} = \frac{R_{arc}}{\tau} - \frac{R_{arc}^2 I^{n+1}}{A\tau} \quad (\text{II.7})$$

avec

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

$n = 0,8$ et $A = 60$; constantes de la caractéristique statique de l'arc.

II.3.2 Modèle de Anjana et Lakshminarasimha

Anjana et Lakshminarasimha [17] ont proposé un modèle basé sur l'équation de Mayr [16] et sur le modèle statique d'Obenaus [7]. Ils ont proposé que l'isolateur est divisé en un certain nombre de bandes, formant des anneaux symétriques par rapport à l'axe de l'isolateur, et que l'arc est une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, dont l'énergie est donnée par :

$$W_{th} = \frac{3}{2} K.T.M \quad (\text{II.8})$$

avec

T : la température de l'arc,

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

K : la constante de Boltzman.

Pour la propagation de l'arc, Anjana et Al [17] proposent leur propre modèle, selon lequel l'arc ne se déplace que si son énergie totale W_{totale} est supérieure ou égale à l'énergie W_{th} nécessaire pour maintenir l'arc à sa température, où W_{totale} est donnée par l'expression suivante :

$$W_{totale} = (E_{arc} I_{arc} - P_0) dt \dots\dots\dots (\text{II.9})$$

avec :

E_{arc} : le gradient de la décharge,

I_{arc} : le courant de la décharge,

dx : l'incrément de la longueur de la décharge,

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

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

$$v = \mu E_{arc} \quad (\text{II.10})$$

où

μ : est la mobilité de l'arc.

On déduira la longueur d'arc $dx = v dt$

Donc la nouvelle longueur est $(x+dx)$. Si, cette dernière atteint la longueur totale de fuite, il y a contournement. Dans le cas contraire, le temps est incrémenté et les calculs sont repris depuis le début. Les différentes étapes du programme de calcul sont données dans l'organigramme de la figure I.10.

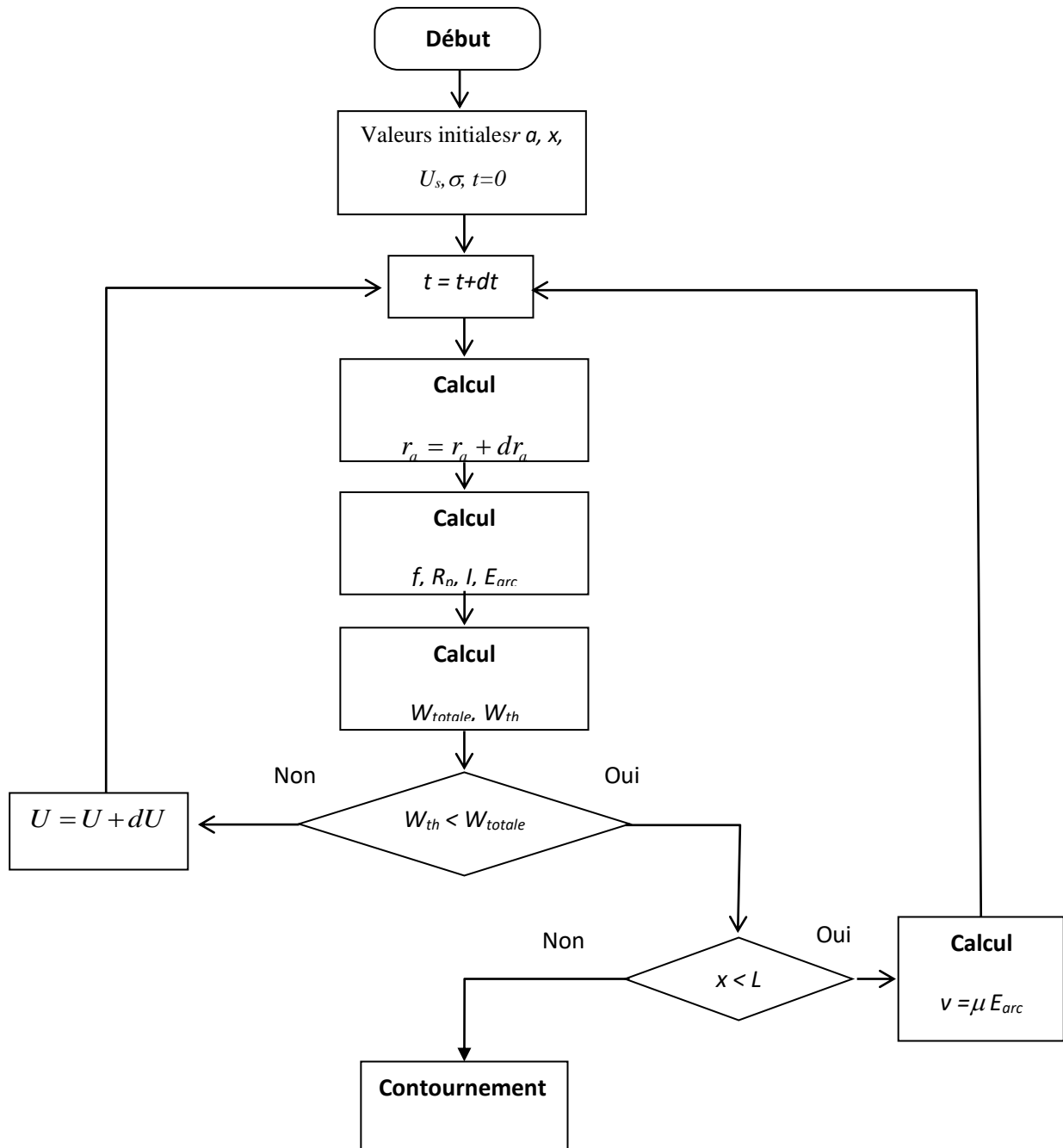


Figure II.4. Organigramme du modèle de Anjana et Lakhminarasimha [17]

II.3.3 Modèle de Dhahbi et Beroual

Ces deux chercheurs [18] [19] considèrent que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure (I.12). Sachant que pour chaque saut de l'arc, on obtient une nouvelle cellule ayant les paramètres suivants : R_i , C_i , L_i et U_i .

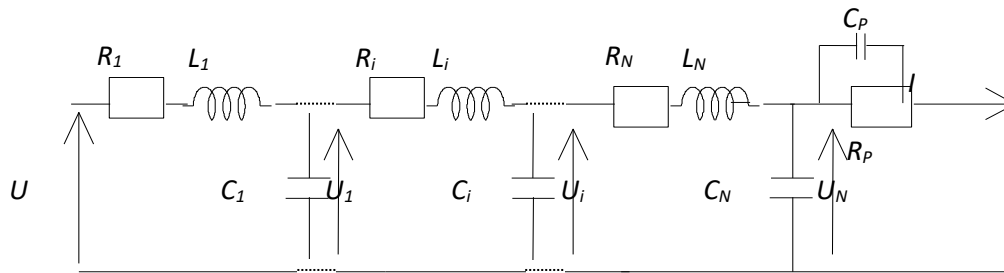


Figure II.5. Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge selon Dhahbi et Al. [18][19].

où

R_p : la résistance de la pollution,

C_p : la capacité de la couche de pollution,

R_i : la résistance de l'arc,

C_i : la capacité de la décharge,

L_i : l'inductance de la décharge.

Ce modèle permet de calculer la tension de contournement, le temps au contournement ainsi que certains paramètres caractérisant la propagation de la décharge électrique le long d'une surface isolante polluée. Il utilise le critère d'impédance comme critère de propagation. Ainsi, ces auteurs ont trouvé que les effets de l'inductance du canal de la décharge sont négligeables, et que la forme d'onde de la tension appliquée a une influence directe sur les paramètres régissant le phénomène de contournement.

L'organigramme suivant représente le modèle dynamique de Dhahbi pour la tension continue. Pour les cas alternative et impulsionnelle ils rajoutèrent des boucles permettant de calculer l'évolution des différents paramètres des modèles sur un intervalle de temps fixé à l'avance.

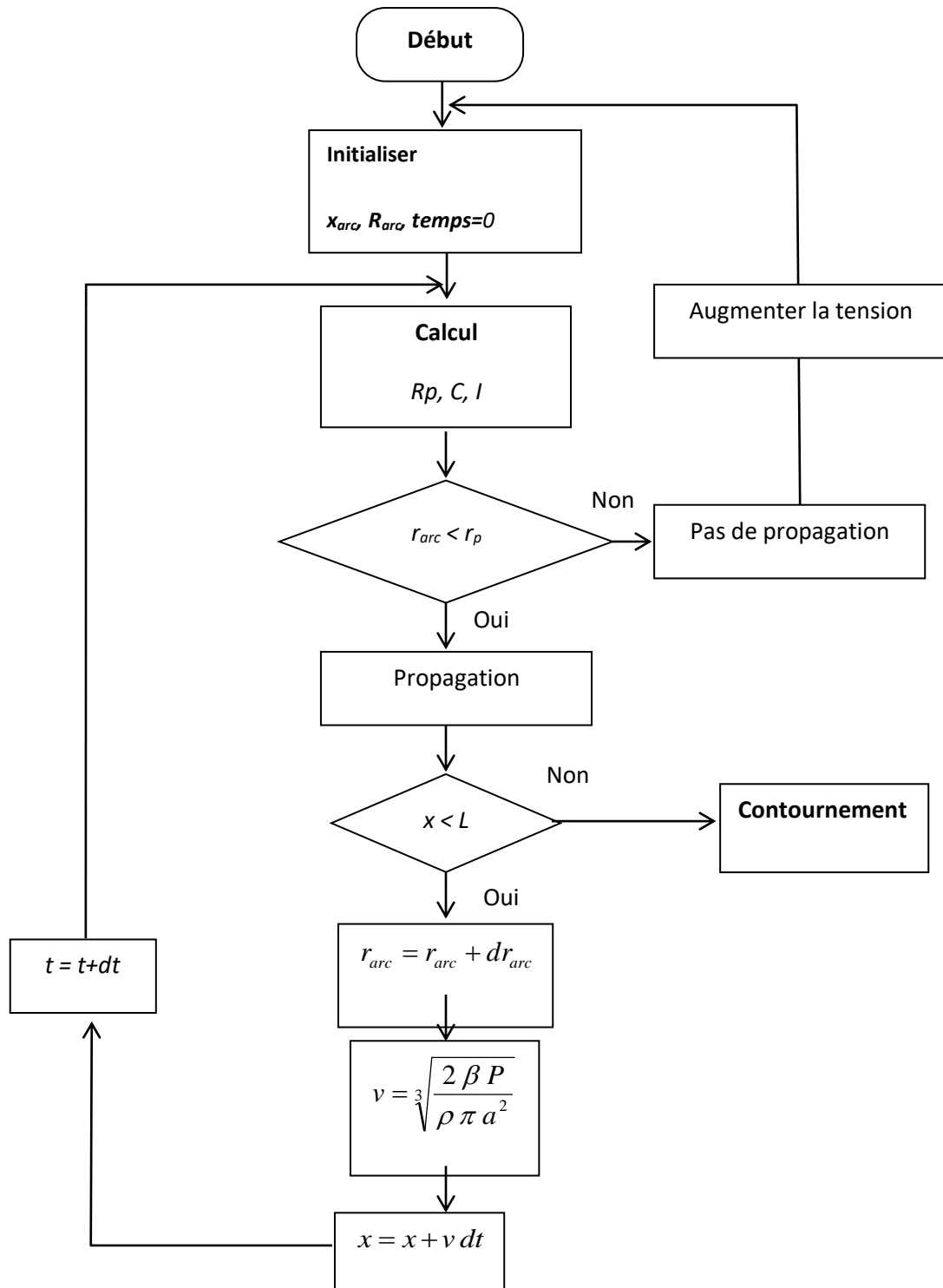


Figure II.6. Organigramme du modèle de Dhahbi et Al [18][19].

II.4. Conclusion

Tous les modèles de laboratoire cités précédemment ont permis par la simplicité de leur configuration, d'examiner aisément l'influence de nombreux paramètres sur le comportement de l'isolateur à savoir le courant de fuite, la tension de contournement, la tension d'entretien de l'arc,.... etc.

Les principaux modèles statiques, rapportés dans la littérature, traitent le phénomène de contournement sous un aspect global en lui associant un critère d'extension.

Par ailleurs, tous les modèles dynamiques ont un aspect commun: ils sont basés sur le modèle statique d'Obenaus et sur le modèle de Mayr pour le comportement dynamique de l'arc.

Chapitre III
Distribution Du Potentiel
Et Du Champ Électrique

III.1. Introduction

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

L'objectif principal de cette simulation est d'étudier la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur. Comme il était très difficile de mesurer expérimentalement la distribution du potentiel et le champ électrique le long d'un isolateur, l'utilisation d'une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel s'est avérée être une des meilleures solutions.

En effet, la méthode des éléments finis est la mieux adaptée au problème posé. Les logiciels basés sur cette méthode numérique couvrent généralement un domaine plus vaste que le problème étudié, parmi ces logiciels le Comsol Multiphysics.

III.2. Comsol Multiphysics

Le COMSOL Multiphysics 5.4, est un outil très employé dans des secteurs divers de recherche, car il facilite les étapes de modélisation et de simulation, soit : la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats (sous forme de courbes, d'équipotentiels, de vecteurs, etc...). Par ailleurs, l'utilisation de logiciel ne demande pas de connaissances approfondies dans les mathématiques ou les analyses numériques [20].

III.3. Modèle des Isolateurs Étudiés

Les deux modèles étudiés (plan et réel) d'isolateur F160D-146DC, qui est utilisé par la SONELCAZ Algérienne dans les lignes de transport 400 kV sont présentés par la figure III.1



Modèle plan.



Isolateur réel F160D-146DC.

Figure III.1. Modèle des isolateurs étudiés

Les principales dimensions du modèle plan étudié et de l'isolateur réel F 160D-146DC sont données dans les tableaux III.1 et III.2 après avoir mesuré les différentes grandeurs à l'aide d'un mètre ruban.

Tableau III.1. Isolateur F160D-146DC. Caractéristiques de l'isolateur CEI 60305

Caractéristiques de l'isolateur	Grandeurs
Charge minimum de rupture mécanique	160 KN
Diamètre du disque	420 mm
Poids	8 Kg
Dimension de fixation métallique, IEC 60120	20
Longueur de fuite	375 mm
Pas	146 mm

Tableau III.2 : Dimensions du modèle plan étudié.

Grandeurs	Longueurs (mm)
Longueur de la Plaque	435 mm
Largeur de la Plaque	435 mm
Épaisseur de la plaque	5mm
Distance de fuite	375 mm

La figure III.2 présente le modèle réel et le modèle plan tracés en 3D par le logiciel

COM SOL 5.4.

La conductivité et la permittivité de chaque matériau d'isolateur F160D-146DC sont définis par le tableau III.3

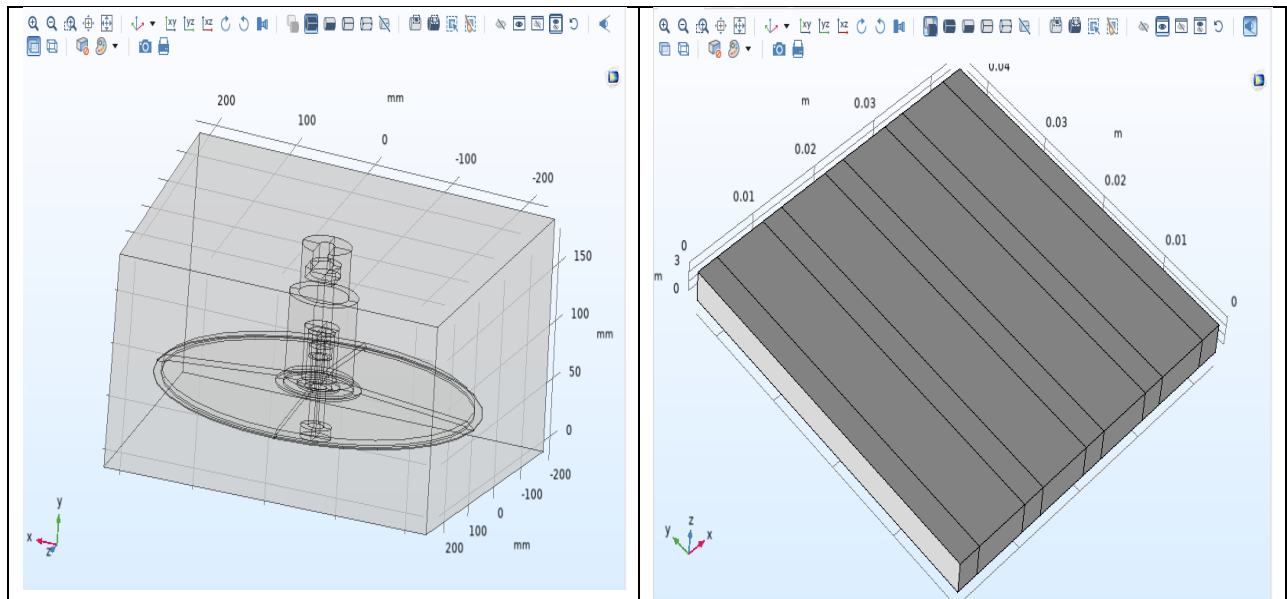


Figure III.2. Le modèle réel et le modèle plan tracés en 3D par le logiciel « COMSOL 5.4 ».

Tableau III.3 La conductivité et la permittivité de chaque matériau d’isolateur F160D-146DC

Proprietes	la pollution Artificiel	Air	Verre	Portlan et Ciment	Capot et tige
Permittivité Relative ϵ_r	80	1.005	6	5	10^6
Conductivite ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0,70,700,1200,3000	10^{-12}	10^{-12}	10^{-12}	10^6

III.4. L’Interface Graphique de COMSOL

Au démarrage du logiciel COMSOL 5.4, le navigateur de modèle apparait. En sélectionnant l’option (Model Wizard) pour construire une géométrie surfacique et spécifier les conditions aux limites et les propriétés physiques de l’isolateur, COMSOL procède à l’exécution des étapes[21].

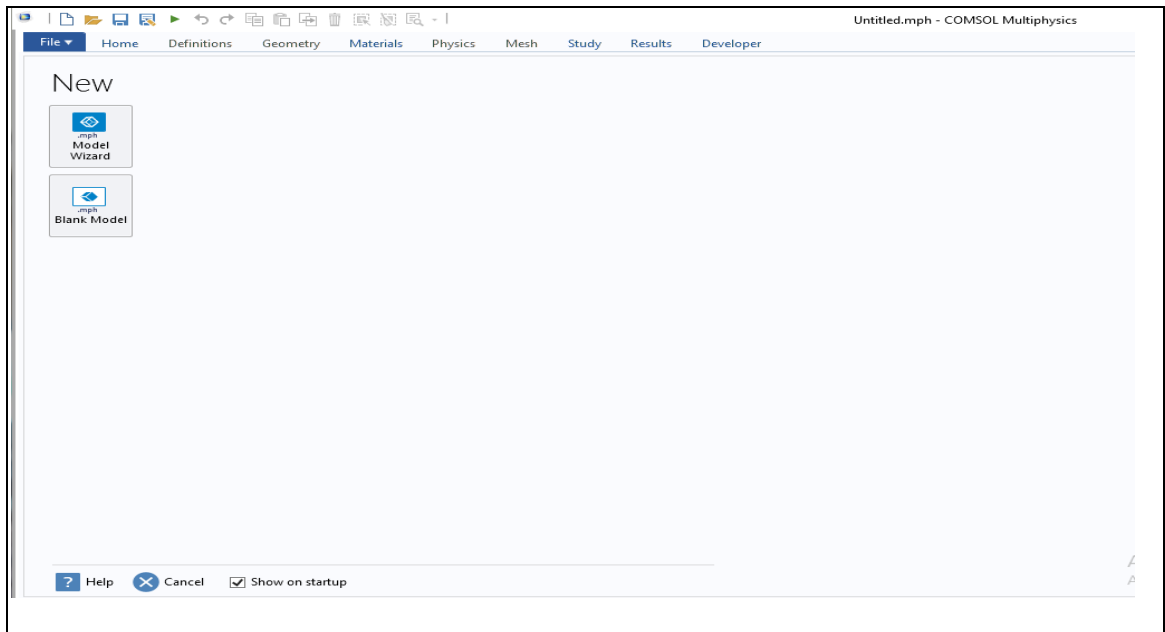


Figure III. 3. Fenêtre de démarrage de COMSOL

Le choix (select space dimension) pour préciser les dimensions du travail (0D, 1D ,1D Axisymétrique, 2D, 2D axisymétrique ou encore en 3D).

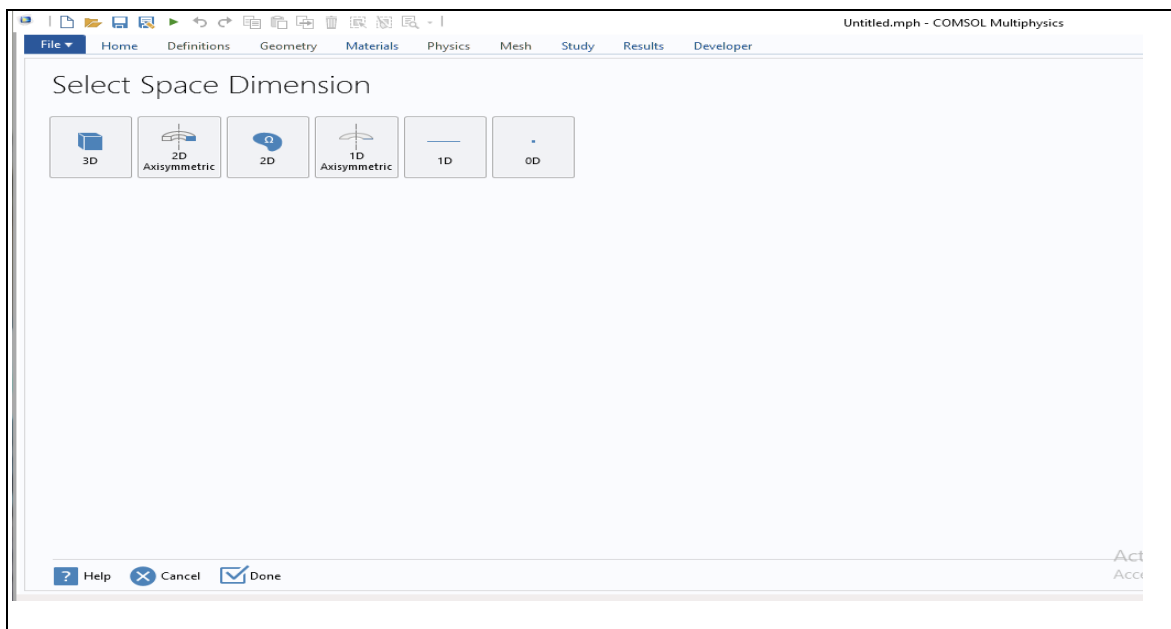


Figure III.4. Fenêtre de «Choix de dimension de travail»

L'étape suivante est de choisir le type du champs modèle physique (PHYSICS). Pour notre cas on a choisi « AC/DC » et « electrostatics (es) ».

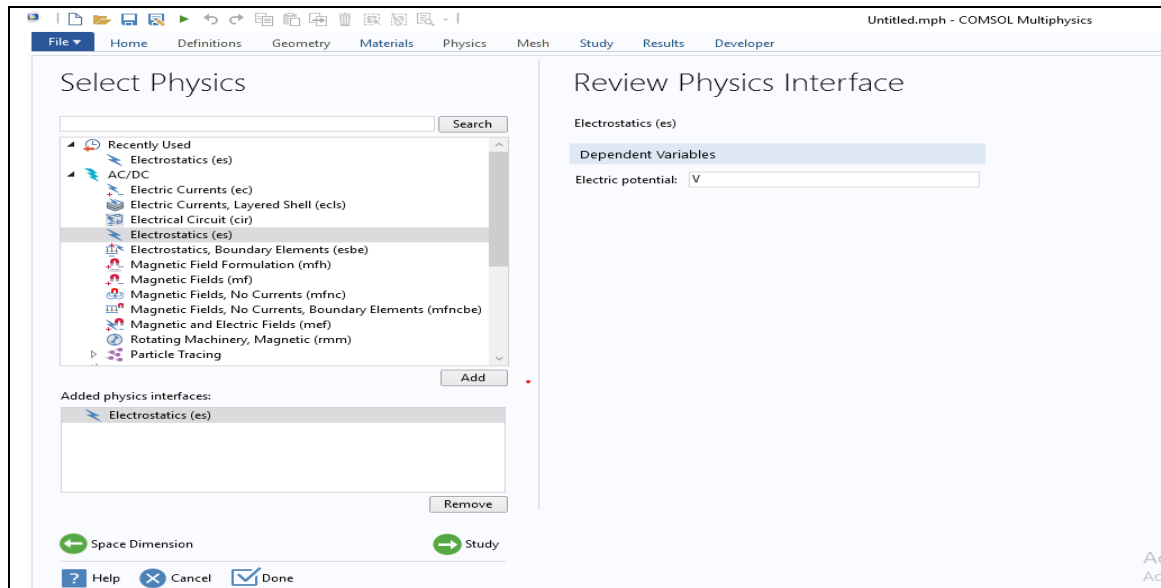


Figure III.5. Fenêtre de «Ajouter le modèle physique»

La prochaine étape est de sélectionner le type d'étude qu'on doit appliquer « SELECT STUDY ». Dans cette étude on choisit le type « STATIONARY ».

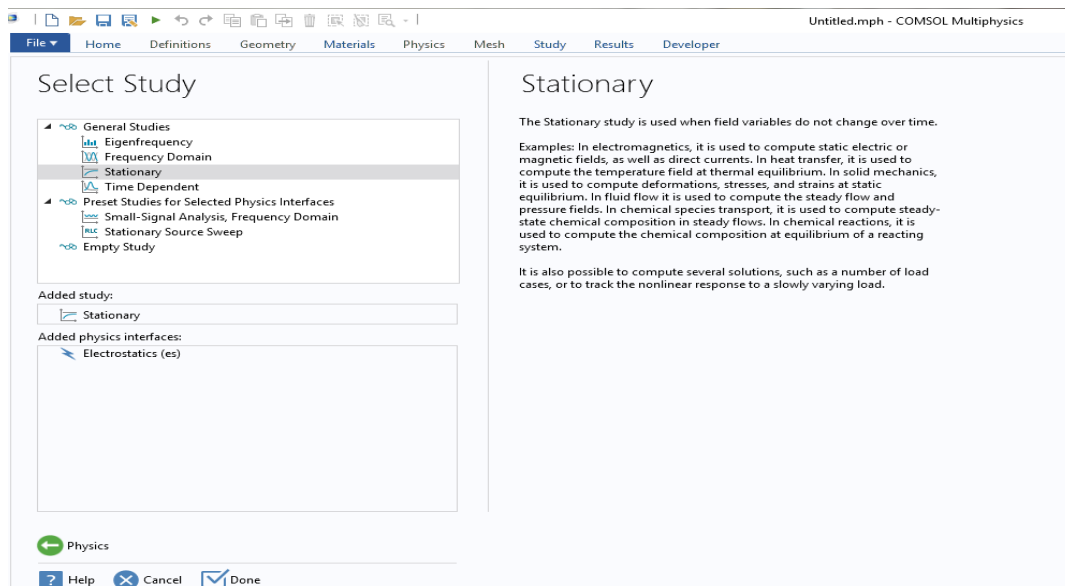


Figure III.6. Fenêtre “selection type d'étude”

Ce logiciel utilise la méthode des éléments finis, la simulation de l'isolateur (F 160D-146DC) peut se résumer dans les étapes successives suivantes :

La première étape consiste à racer l'isolateur en 3D par le logiciel COMSOL

Multiphasiques 5.4

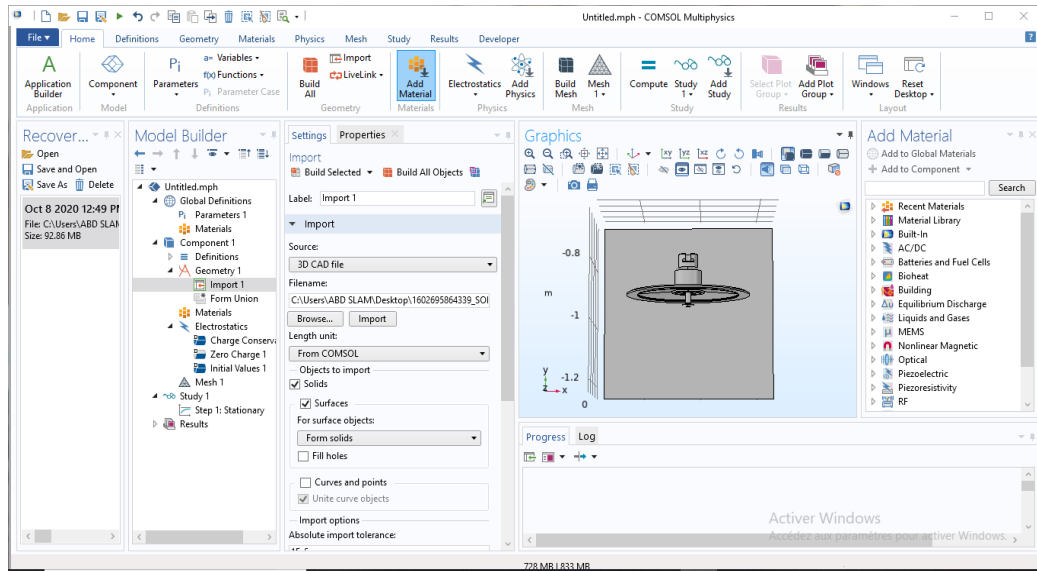


Figure III.7. Géométrie d'isolateur

La deuxième étape porte sur la définition des propriétés électriques des matériaux présents.

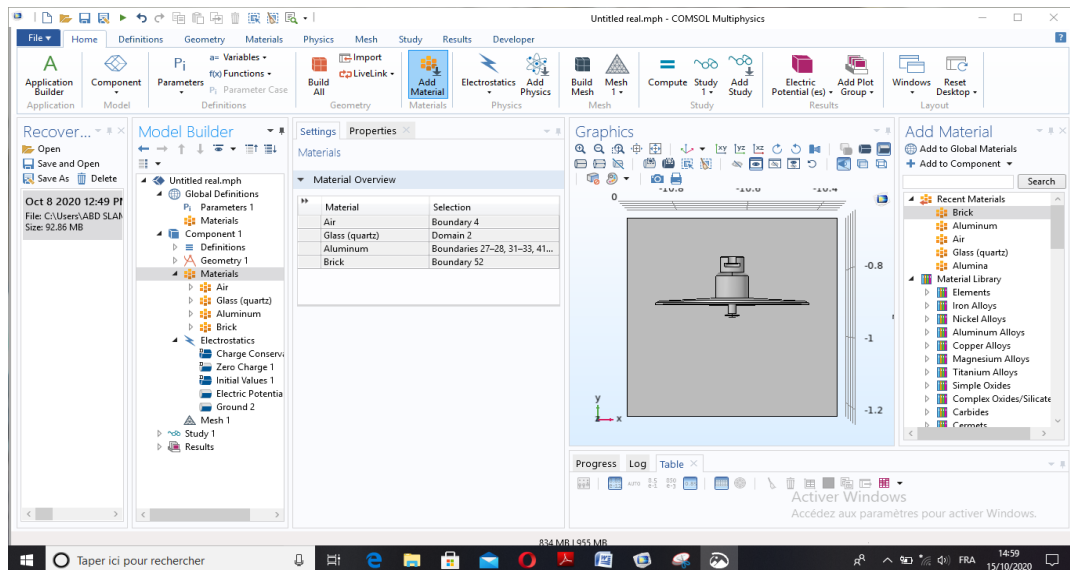


Figure III.8. Matériaux de l'isolateur

Cela consiste à définir les permittivités relatives et les conductivités électriques pour chaque partie de l'isolateur.

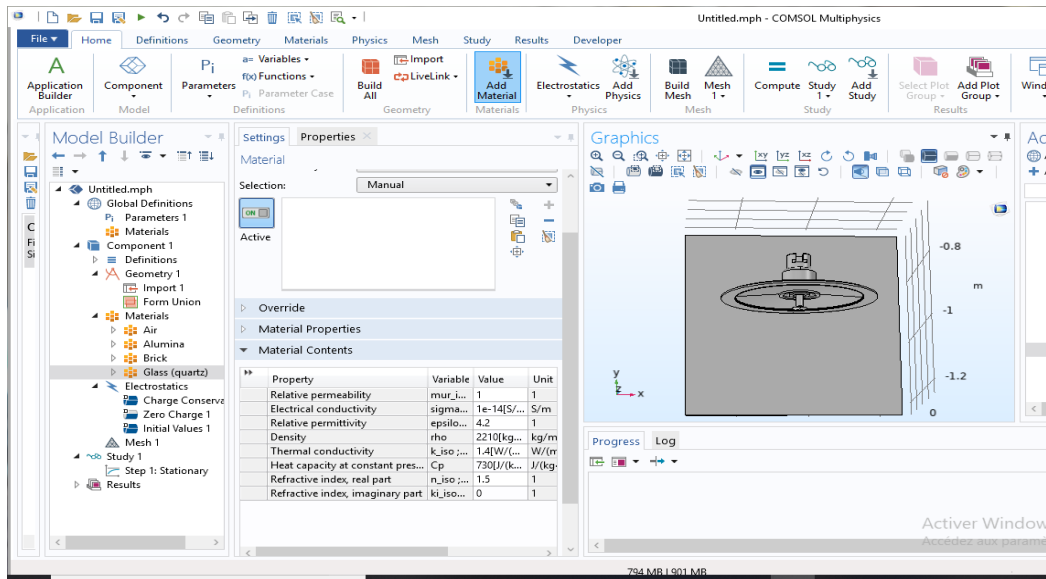


Figure III.9. Permittivités relatives et conductivités électriques pour chaque partie de l'isolateur.

Après, on sélectionne le Type de champs physique à utiliser 'electrostatic'. Dans ce cas on doit préciser l'emplacement de la mise à terre 'ground', et la borne de tension « electric potentiel » où la tension est appliquée.

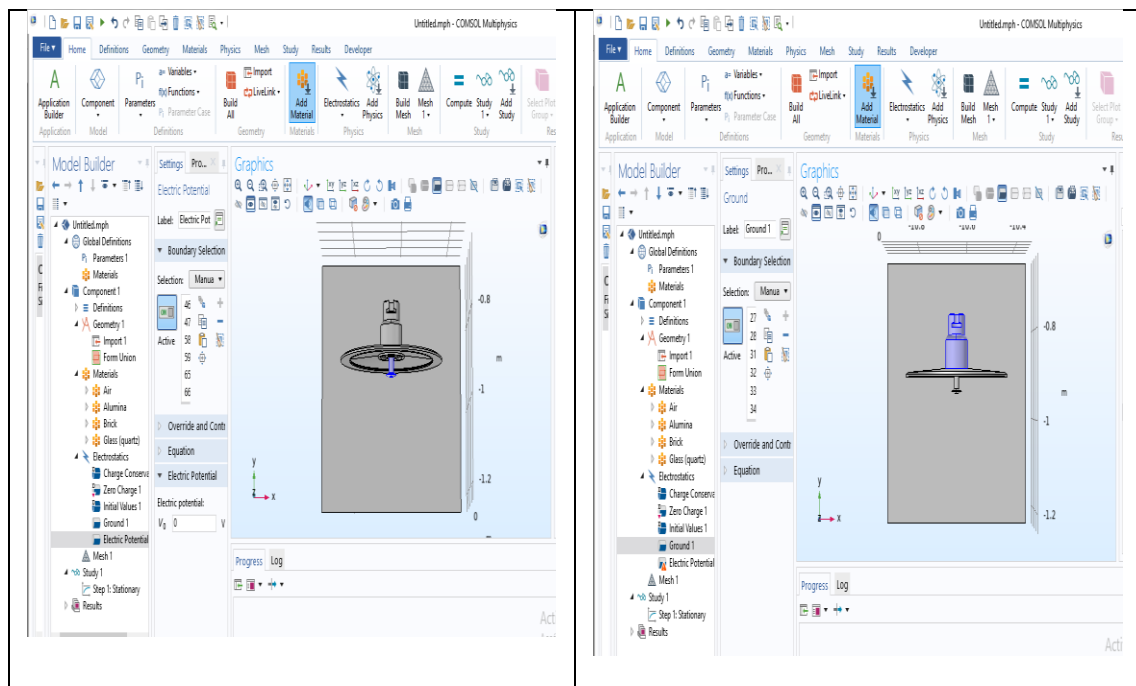


Figure III.10. Conditions aux limites

COMSOL propose un maillage adéquat qui est plus dense autour des formes de petite dimension et un maillage moins dense ailleurs. Les dimensions de maillage peuvent aussi être modifiées manuellement selon le choix de l'utilisateur.

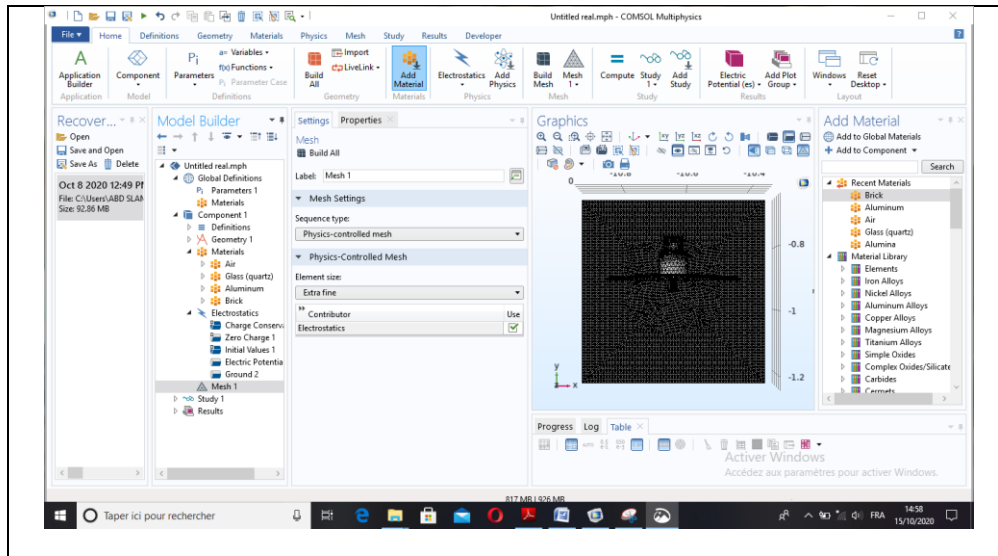


Figure III.11. Maillage d'isolateur

La dernière étape consiste à l'affichage des résultats comme le potentiel et le champ électriques avec leurs modules, suivant chaque partie de l'isolateur et leurs répartitions spatiales.

[14]

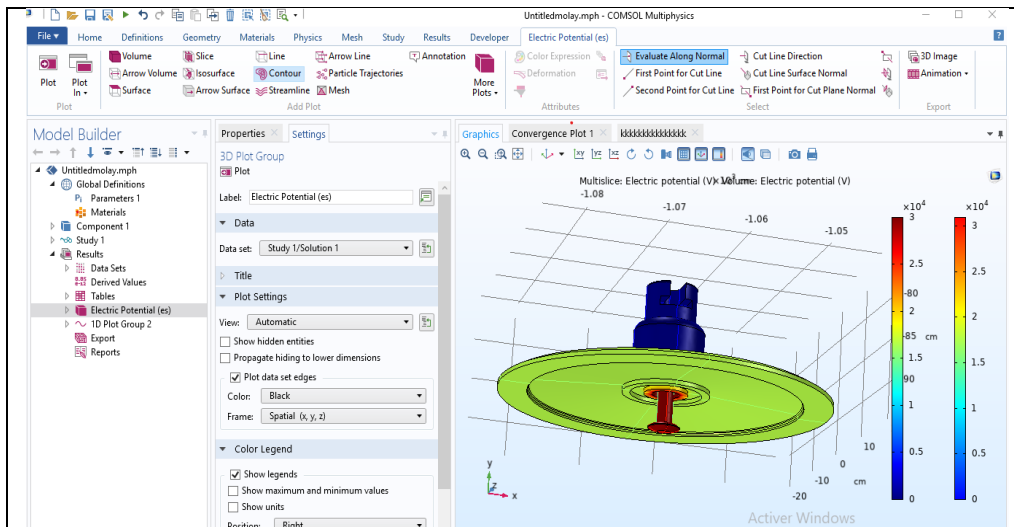


Figure III.12. Résultats de simulation

III.5. Etude sur le Modèle Plan

III.5.1. Etude du potentiel

III.5.1.1. Influence de la largeur des bandes propres sur le potentiel

Nous sommes intéressés à la détermination de la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite de l'isolateur en fonction de la largeur. Pour cela nous avons introduit dans le logiciel des différentes largeurs des bandes propres : ($L_1 = 1\text{ cm}$, $L_2 = 3\text{ cm}$, $L_3 = 5\text{ cm}$). Une tension constante de 30 kV et une conductivité de $1000\ \mu\text{S/cm}$.

D'après les figures III.13 et III.14, nous remarquons que pour le cas où $L_1 = 1\text{ cm}$, $L_2 = 3\text{ cm}$, le potentiel diminue brusquement au niveau des bandes propres et lentement au niveau des bandes polluées.

La variation de la largeur de la bande propre a une influence légère sur la répartition du potentiel au niveau de la bande propre. La forme reste la même.

Pour le cas $L_3 = 5\text{ cm}$ (c'est-à-dire $3 * L_3 > 1/3 L_f$), la répartition du potentiel est plus proche que celle de l'état propre. C'est résultats sont en bon concordance avec des résultats El Mihoub [22].

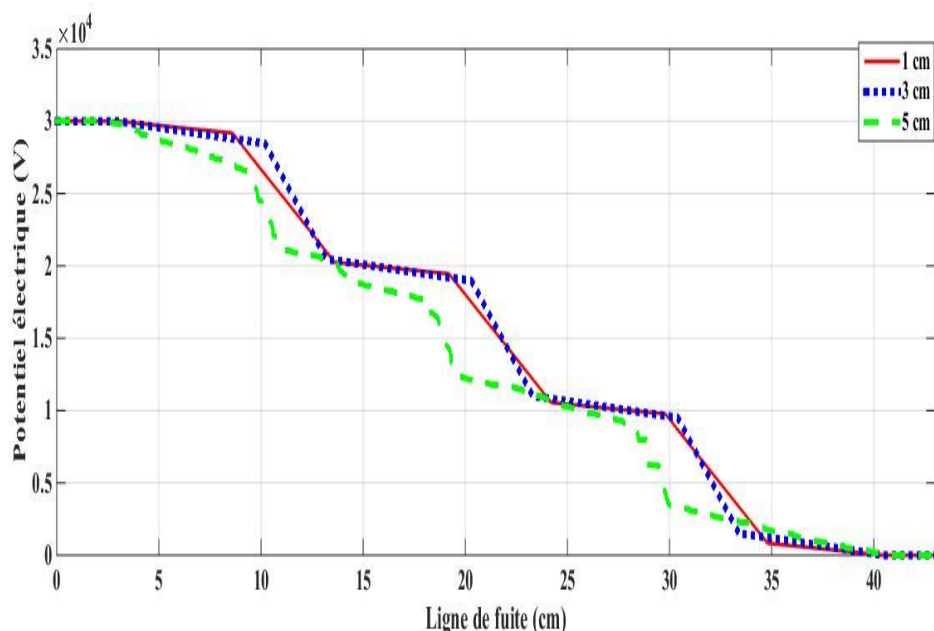


Figure III.13. Potentiel électrique pour différentes valeurs de la largeur des bandes propres (L_1), (L_2) et (L_3).

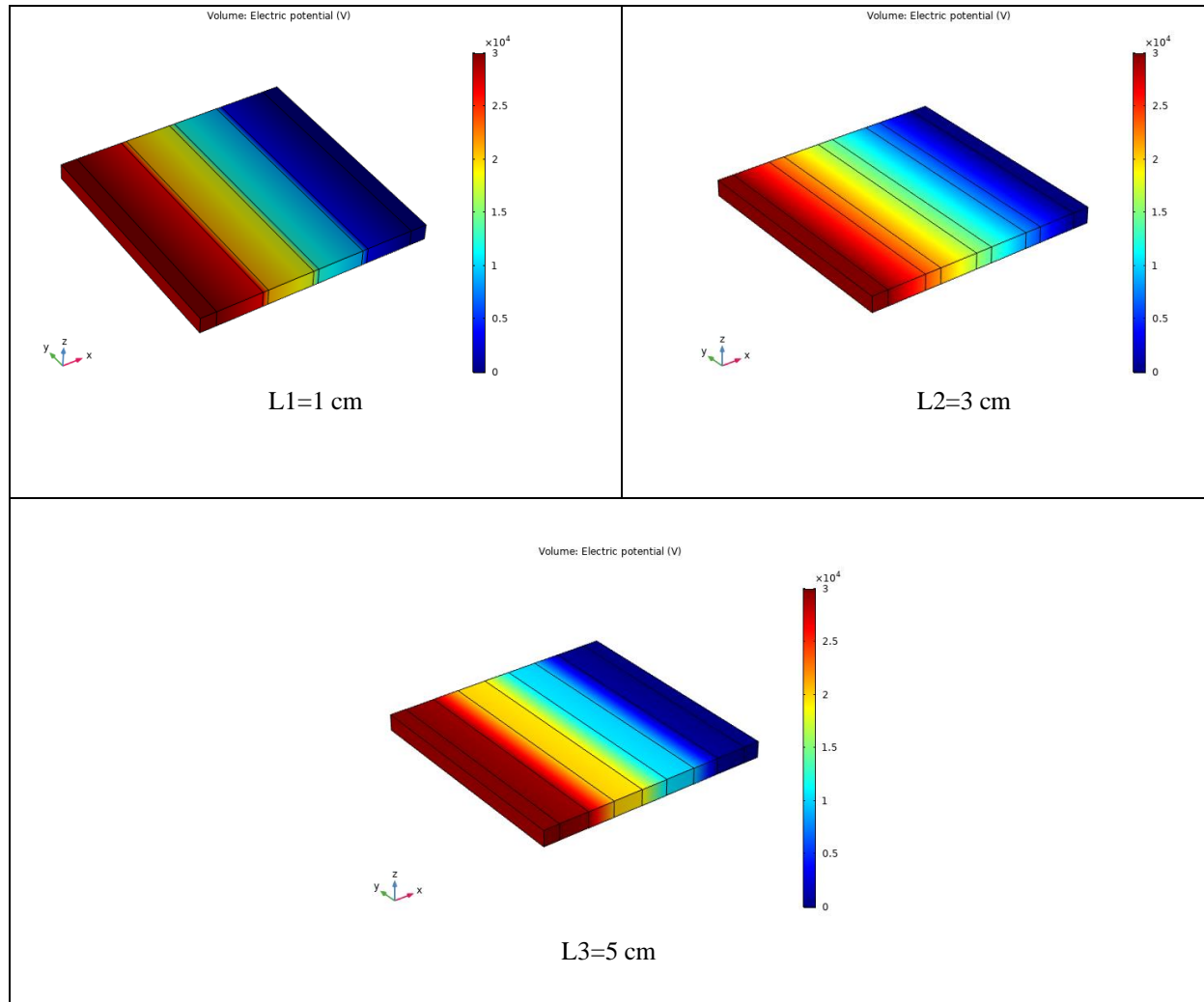


Figure III.14. Distribution du potentiel électrique le long de la ligne de fuite pour différentes valeurs de la largeur des bandes propres.

III.5.1.2. Influence de la tension appliquée sur le potentiel

Afin d'étudier l'influence de la tension de la ligne sur la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite de l'isolateur, nous avons introduit dans le logiciel trois valeurs de tension de ligne (10, 30, 50 kV), une conductivité de $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ et une largeur de la couche propre de 3cm.

La figure III.15 donne la variation du potentiel en fonction de tension le long de la ligne de fuite, nous remarquons que les trois courbes passent également par des régions où le potentiel reste constant. Il s'agit des électrodes et des couches polluées de l'isolateur.

La figure III.16 montre qu'en fonction de la tension, seules les valeurs du potentiel changent, la forme demeure la même.

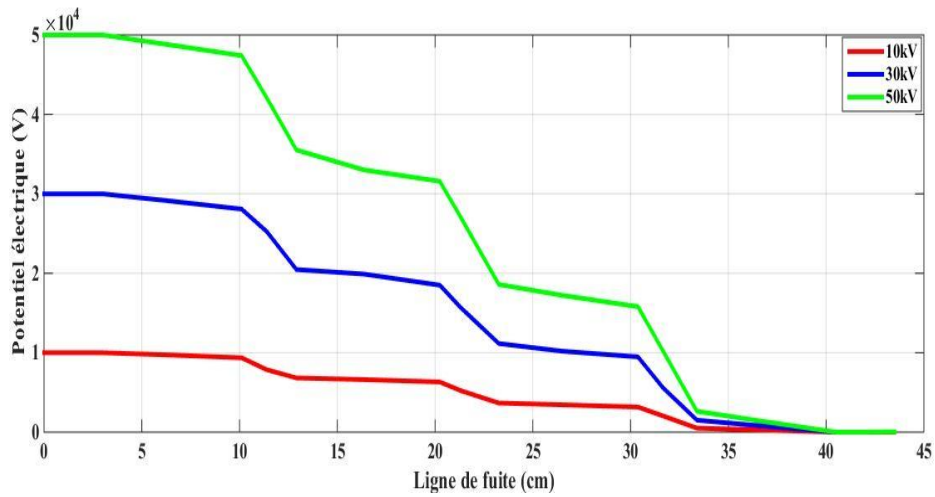


Figure III.15. Potentiel électrique le long de la ligne de fuite pour différentes valeurs de la tension appliquée.

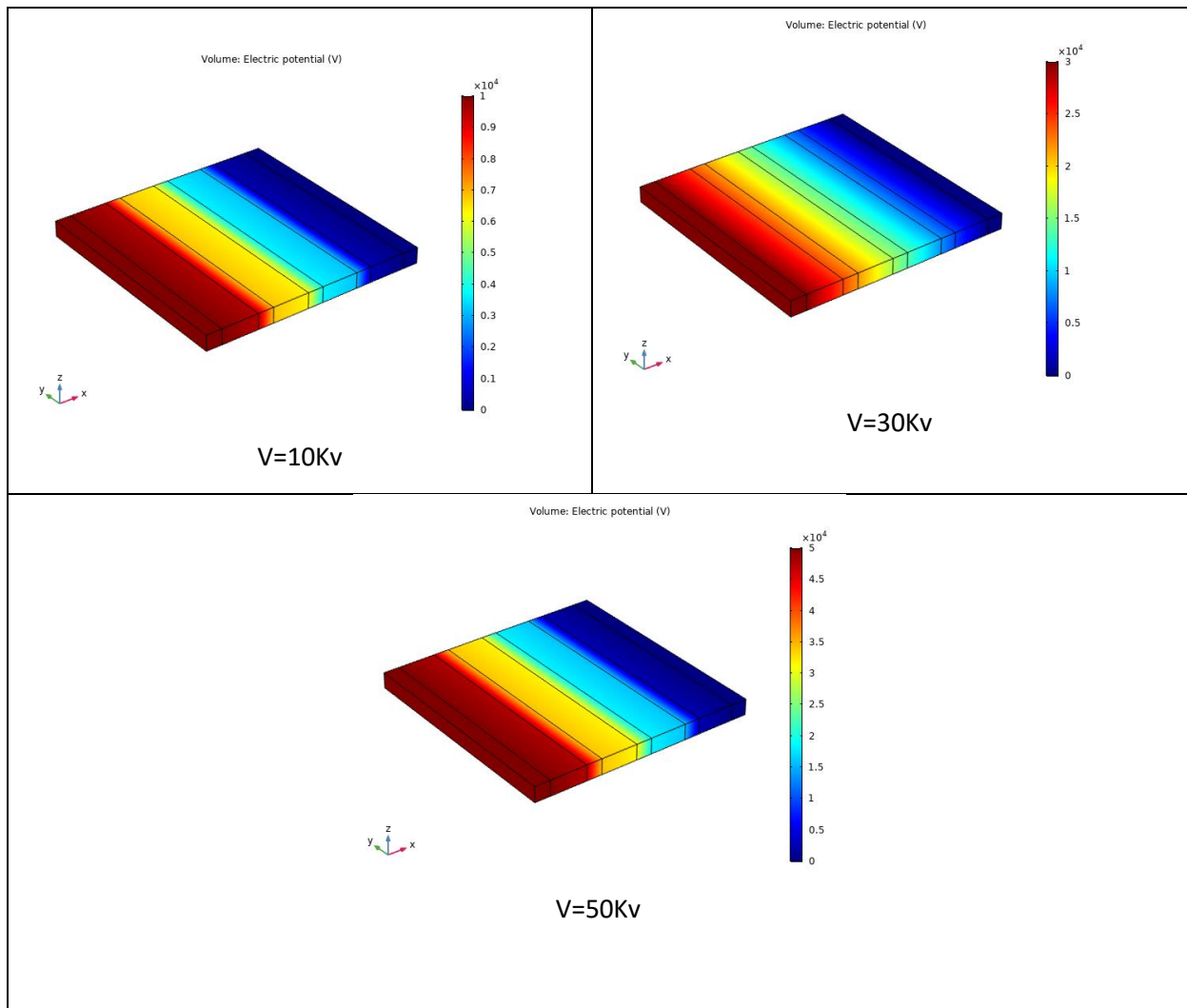


Figure III.16. Distribution du potentiel électrique pour différentes valeurs de la tension appliquée.

III.5.1.3. Influence de la conductivité sur le potentiel

Pour déterminer la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite du modèle plan d'isolateur en fonction de la conductivité, nous avons introduit dans le logiciel des différentes valeurs de conductivité (0, 5000, 10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) pour une tension appliquée constante 30kv et pour une largeur de bande propre fixe 3cm.

D'après la figure (III.17) et (III.18) nous constatons que :

La variation de la conductivité (0, 5000, 10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) de la bande polluante n'a pratiquement pas d'effet sur le potentiel le long de la ligne de fuite d'isolateur.

Le potentiel est très important au niveau de l'électrode de haute tension et de la première bande polluée puis diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'électrode active.

Les trois courbes passent également par des régions où le potentiel reste constant, il s'agit des bandes polluées de modèle d'isolateur.

Pour l'état sec, le potentiel prend la valeur maximale 30 kV au niveau de l'électrode active puis décroît d'une manière linéaire au fur et à mesure qu'on s'éloigne de cette électrode jusqu'à l'atteinte de l'électrode de masse où le potentiel s'annule.

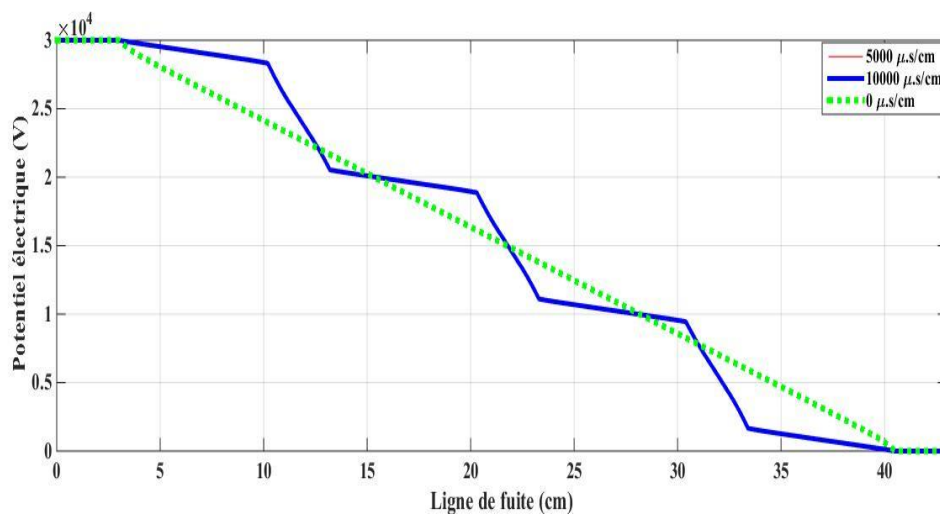


Figure III.17. Potentiel électrique le long de la ligne de fuite pour différentes valeurs de conductivité.

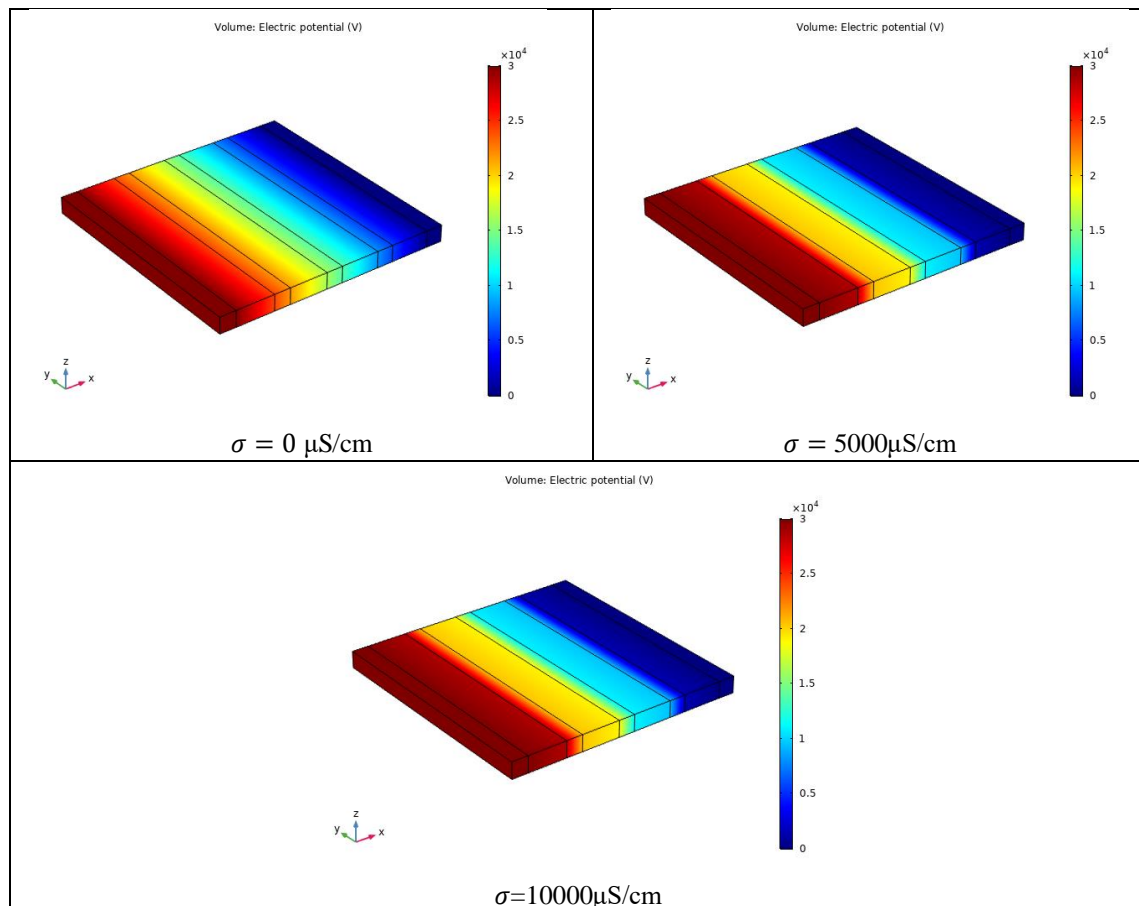


Figure III.18. Distribution du potentiel électrique pour différentes valeurs de conductivité.

III.5.2. Etude du champ électrique

III.5.2.1. Influence de la largeur des bandes propres sur le champ

D'après les Figures III .19 et III.20, nous constatons que :

Le champ électrique est plus intense aux niveaux des couches propres ce qui explique expérimentalement l'apparition des arcs électriques aux niveaux des couches propres avant le contournement de modèle plan d'isolateur.

l'intensité du champ est inversement proportionnelle à la largeur des couches propres, ces résultats sont pareilles à ceux trouvés par Chakravorti [20].

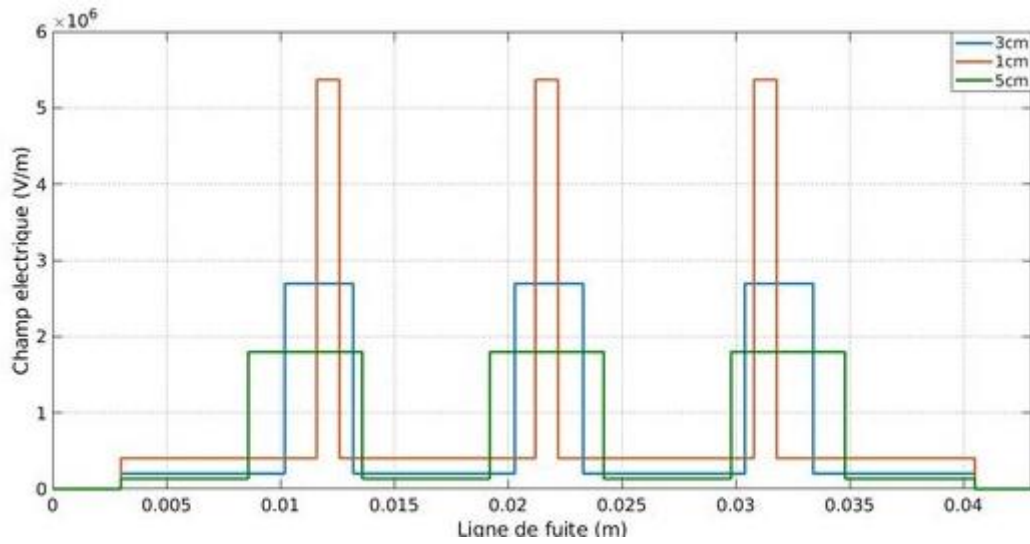


Figure III.19. Champ électrique le long de la ligne de fuite pour différente largeur des bandes propres.

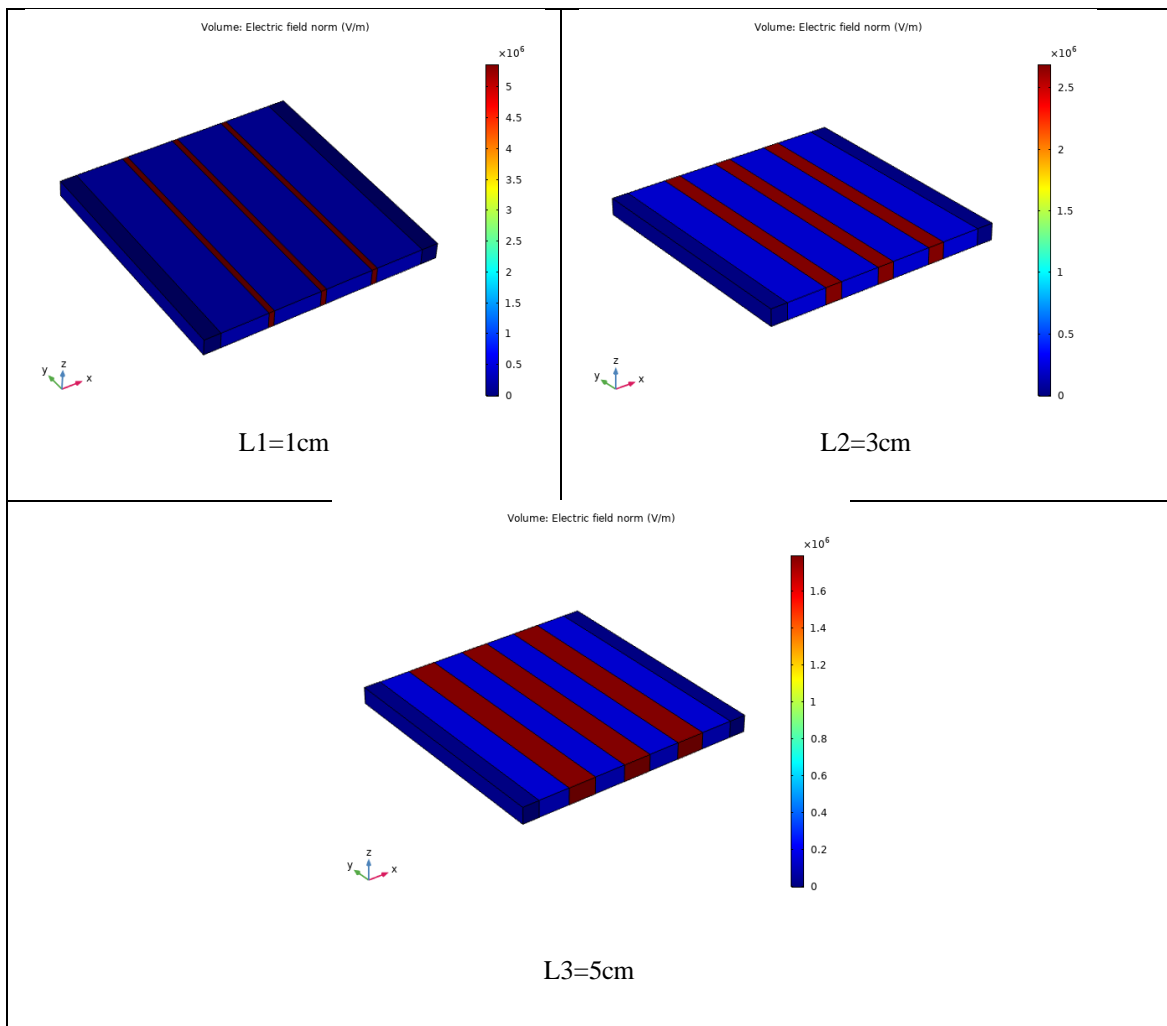


Figure III.20. Distribution du champ électrique pour différentes largeurs des bandes propres (L1), (L2) et (L3).

III.5.2.2. Influence de la tension appliquée sur le champ

Aux niveaux des figures III.21 et III.22 nous représentons le champ électrique le long de la ligne de fuite pour différentes valeurs de tension appliquée. Selon ces figures, l'accroissement de la tension appliquée entraîne l'augmentation de l'intensité du champ au niveau des bandes propres.

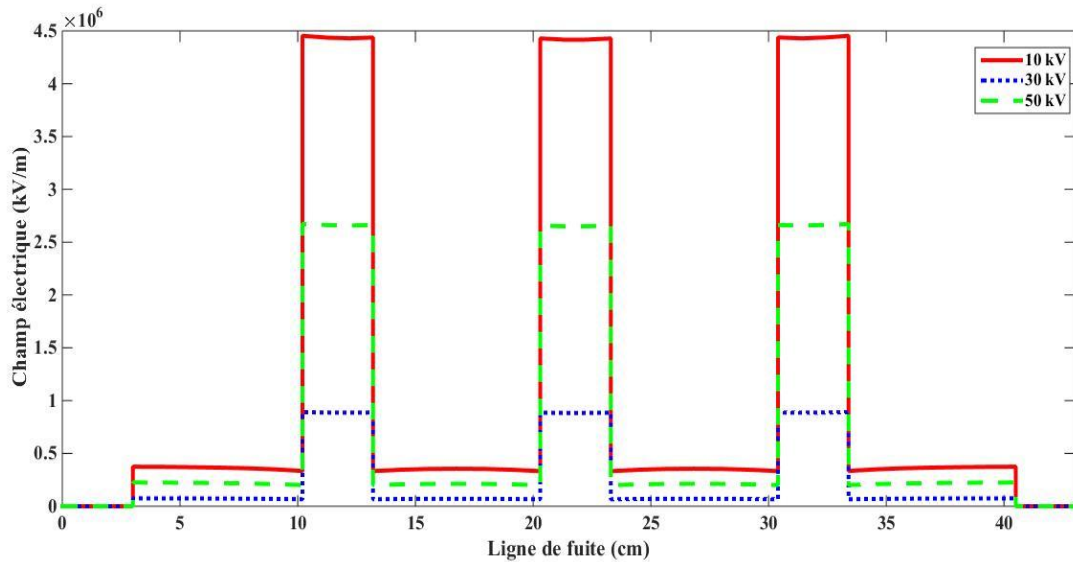
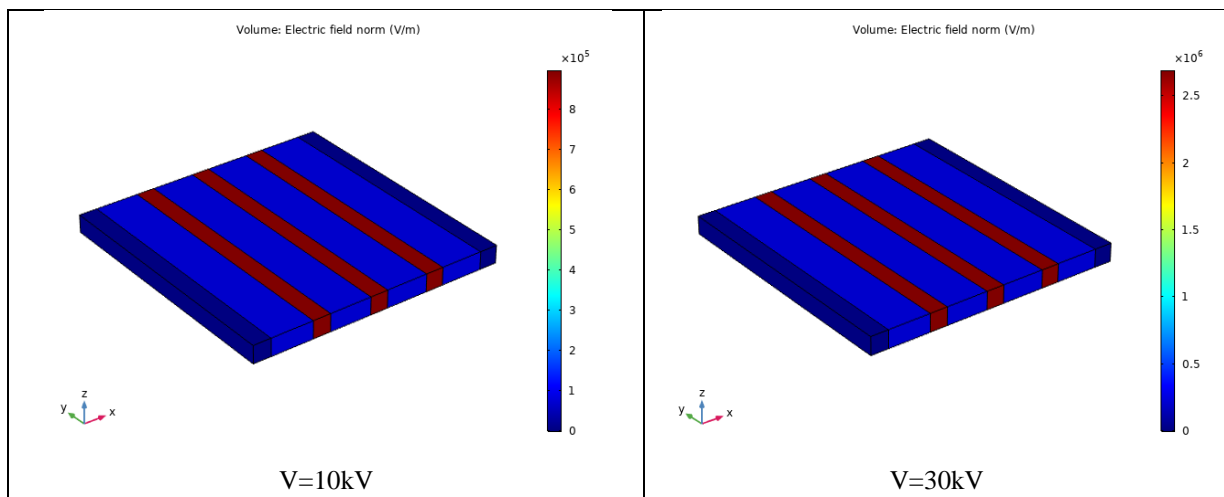


Figure III.21. Champ électrique le long de la ligne de fuite pour différentes valeurs de tension appliquée.



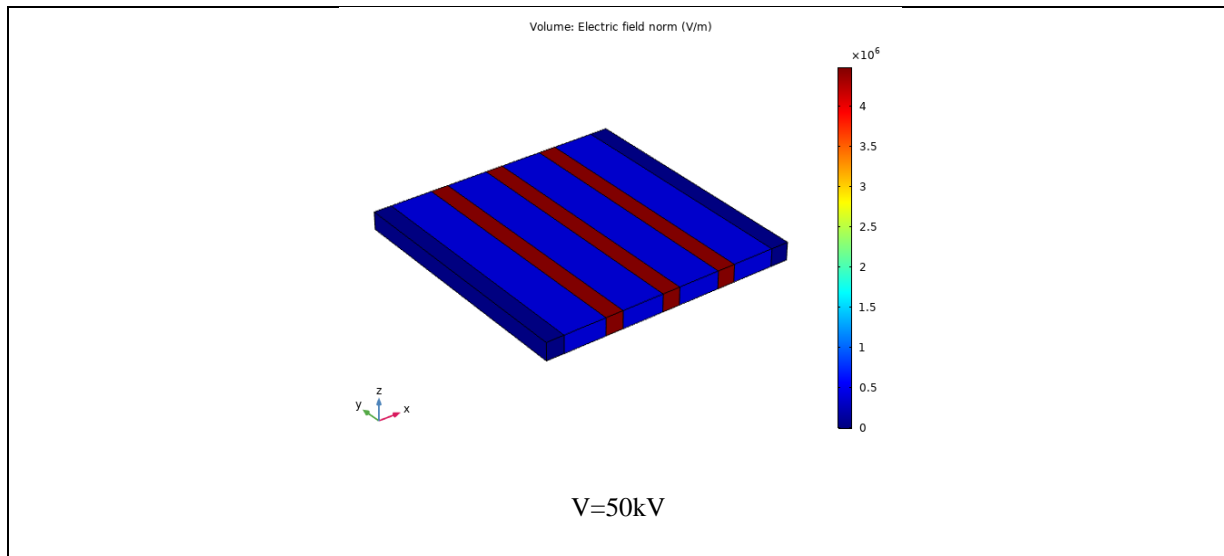


Figure III.22. Distribution du champ électrique pour différentes valeurs de tension appliquée.

III.5.2.3. Influence de la conductivité sur le champ

Les figures III.23 et III.24 montrent l’influence de la conductivité sur la distribution du champ électrique la long de la ligne de fuite de l’isolateur, d’après ces figures nous constatons que la variation de la conductivité n’a aucune influence sur l’intensité du champ électrique.

Pour le cas sec ($\sigma = 0 \mu\text{S/cm}$) le champ est nul à l’intérieur des électrodes et il prend une valeur de (700 kV/m) à l’extrémité intérieur d’électrode active, l’intensité du champ reste constante le long de la ligne de fuite jusqu’ à l’atteinte de l’extrémité intérieur de l’électrode de masse ou le champ s’annule.

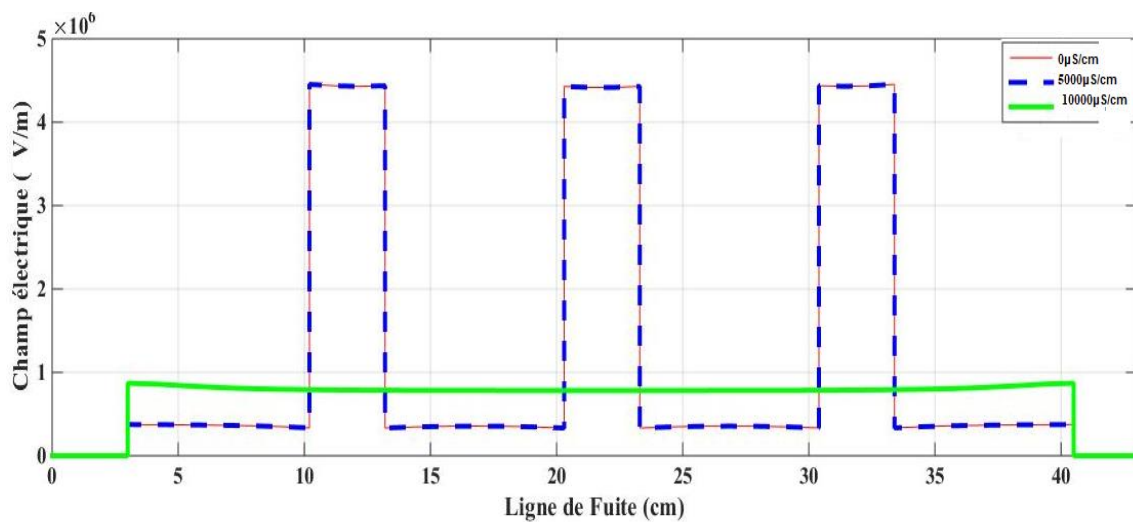


Figure III.23. Champ électrique le long de la ligne de fuite pour différentes valeurs de conductivité.

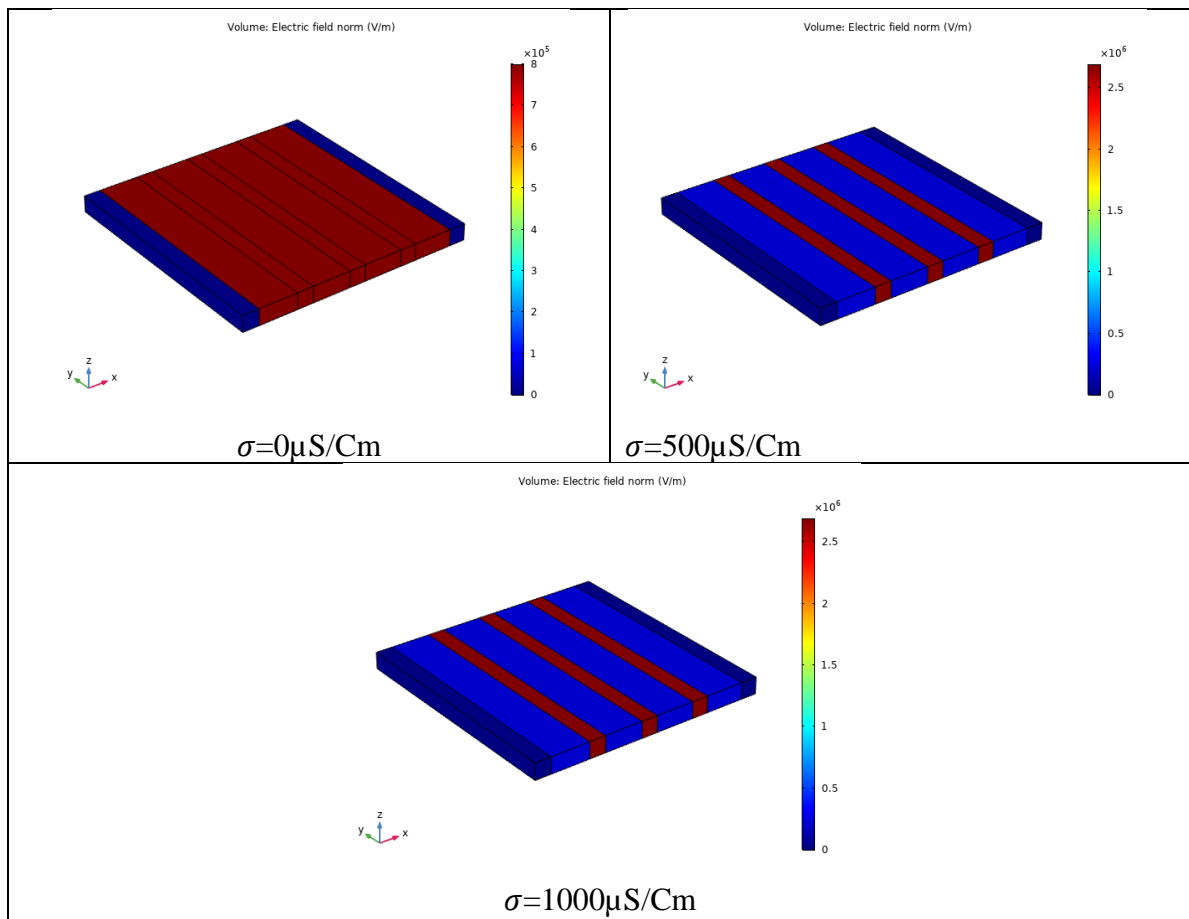


Figure III.24. Distribution du champ électrique pour différentes valeurs de conductivité.

III.6. Etude du Modèle Réel

Cette section est consacrée à l’étude de la distribution du potentiel et du champ électrique le long de la ligne de fuite d’isolateur réel F160D-146DC.

Pour illustrer l’impact d’un paramètre quelconque noté x, nous traçons le potentiel et le champ en fonction de la ligne de fuite de l’élément pour différents x.

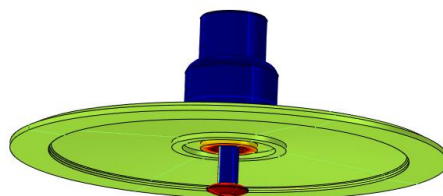


Figure III.25. Isolateur réel.

III.6.1. Etude du potentiel

III.6.1.1. Influence de la conductivité sur le potentiel

Nous nous sommes intéressés à la détermination de la répartition du potentiel le long d'un seul élément d'isolateur F160D-146DC en fonction de la conductivité. Pour cela, nous avons introduit dans le logiciel des valeurs de la conductivité ($\sigma = 0, 5000 \mu\text{S/cm}$) le cas dont la pollution se concentre dans les parties protégées contre les facteurs d'auto nettoyage et aussi un isolateur pollué uniformément avec conductivité de $5000\mu\text{S/cm}$. La tension a été maintenue constante et égale à 30 kV.

D'après la figure III.26, nous constatons que les courbes de potentiel du modèle propre et celui de modèle uniformément pollué ($5000\mu\text{S/cm}$) sont confondues, les trois courbes diminuent brusquement au niveau de l'interface tige-ciment et lentement le long du reste de la ligne de fuite, pour la pollution non uniforme l'augmentation de la conductivité conduit à l'augmentation du potentiel électrique.

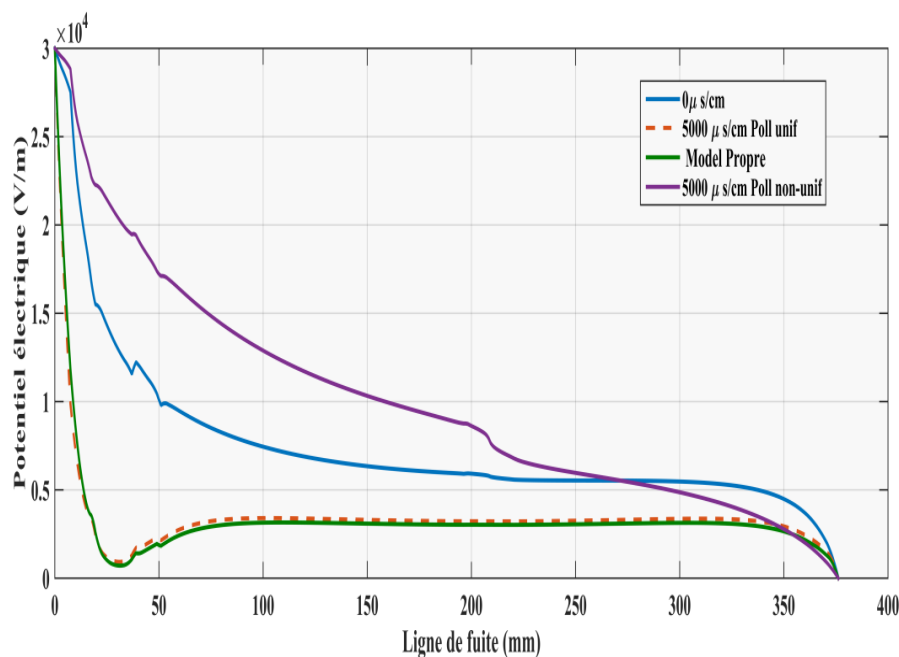


Figure III.26. Potentiel électrique le long de la ligne de fuite pour différentes pollutions

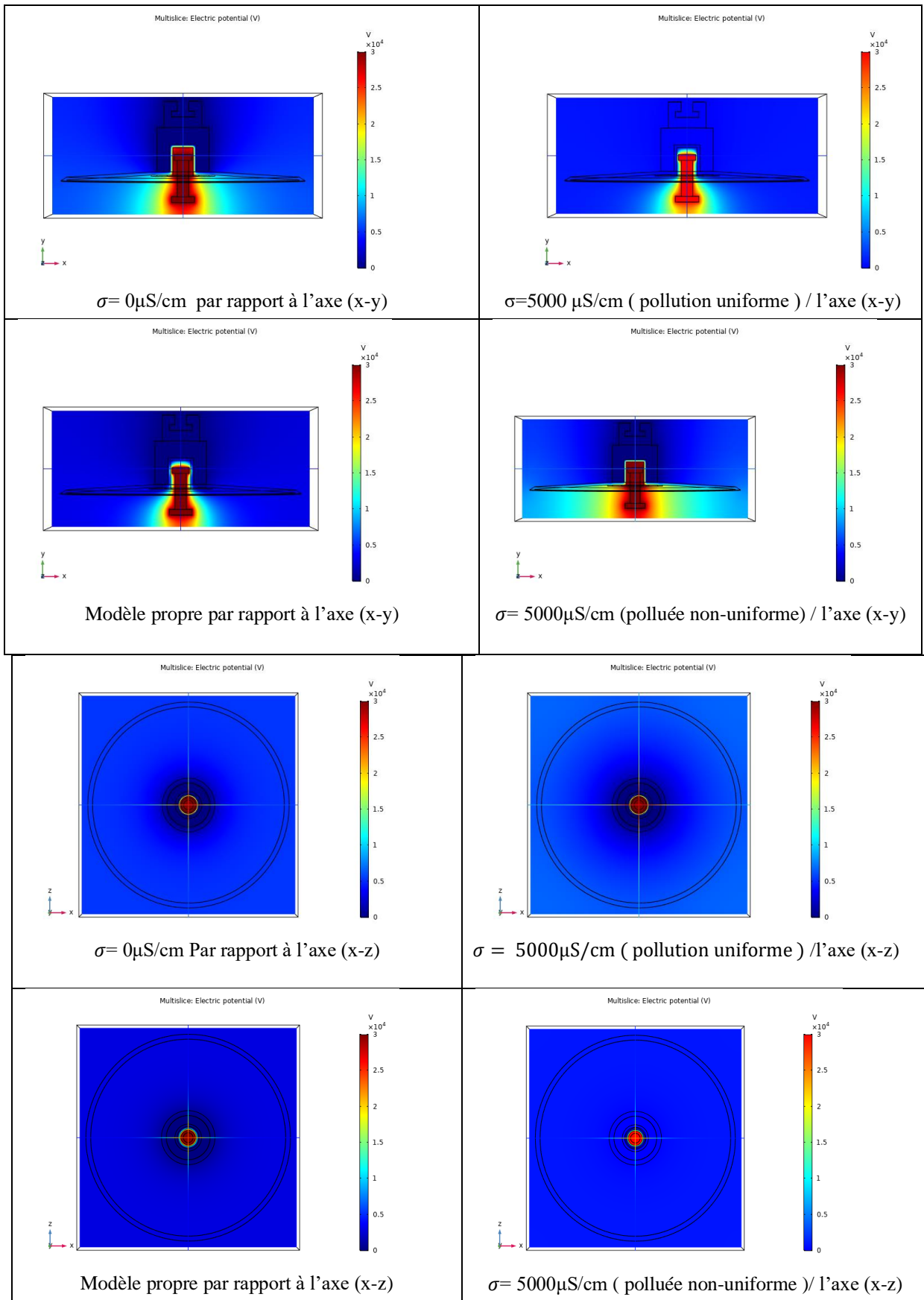


Figure III.27. Distribution du potentiel pour différentes pollutions.

III.6.1.2. Influence de la tension appliquée sur le potentiel

Les figures III.27 et III.28 donnent la variation du potentiel en fonction de la ligne de fuite, pour différentes valeurs de tension appliquée. Trois niveaux de tension ont été considérés. D'après ces figures, nous constatons que le potentiel se distribue de manière équitable le long de la ligne de fuite et que les trois courbes du potentiel ont la même forme avec une différence des valeurs.

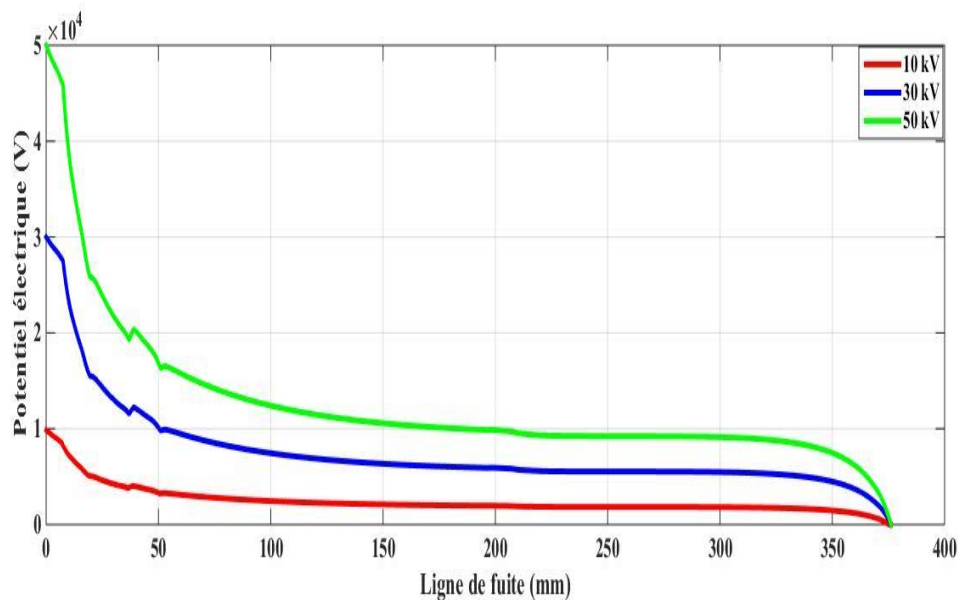


Figure III.28. Potentiel électrique le long de la ligne de fuite d'isolateur pour différentes tensions appliquées.

III.6.2. Etude du Champ Electrique

III.6.2.1. Influence de la conductivité sur le champ

D'après la figure III.29, nous constatons que la variation de la conductivité n'influe pas sur le champ électrique (les courbes du champ pour $\sigma=5000, 10000, 15000\mu\text{S/cm}$ sont confondues) mais l'état de surface d'isolateur (propre, isolateur uniformément pollué ou non uniformément pollué) montre la variation du champ électrique le long de la ligne de fuite d'isolateur.

La variation aléatoire du champ au niveau de l'interface tige-ciment est très remarquable ainsi le changement du champ au niveau de la partie commune entre la bande propre et la bande polluée.

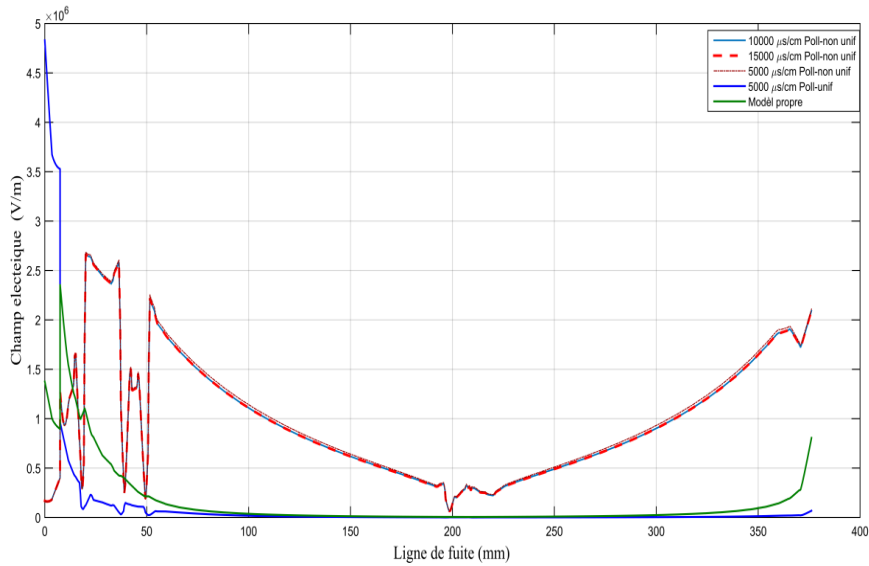


Figure III.29. Champ électrique le long de la ligne de fuite pour différentes valeurs de conductivité

III.6.2.2. Influence de la tension appliquée sur le champ

Sur la figure III.30, nous présentons le champ électrique le long de la ligne de fuite pour différentes valeurs de tensions appliquées. Selon cette figure, l'accroissement de la tension de la ligne n'influe pas sur le champ électrique le long de la ligne de fuite d'isolateurs sauf aux extrémités d'isolateur où le champ électrique atteint ses valeurs maximales

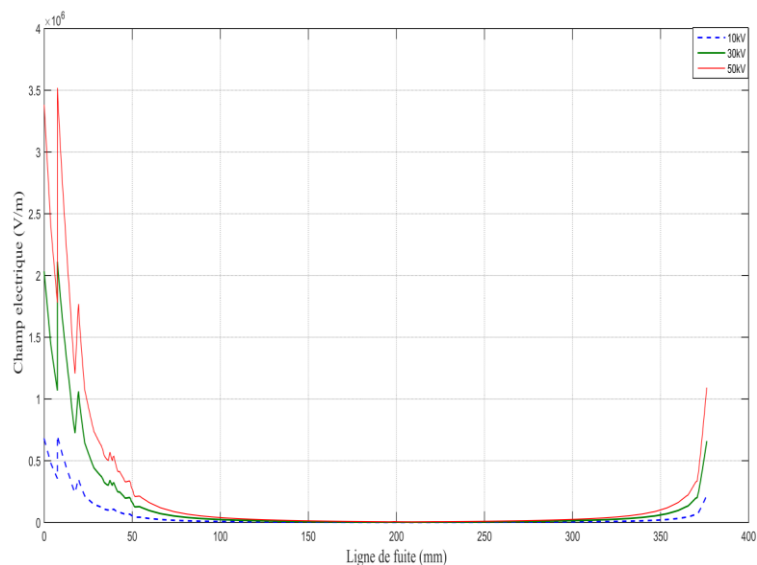


Figure III.30. Champ électrique le long de la ligne de fuite pour différentes tensions appliquées.

III.7. Conclusion

Utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics 5.4, basé sur la méthode des éléments finis, nous avons pu analyser la distribution du potentiel et du champ électrique le long de la ligne de fuite de l'isolateur F160 D-146 DC, soumise à différents paramètres électro-géométriques, à savoir la conductivité de la couche polluante, la tension de la ligne, la largeur des couches propres et type de pollution (uniforme, non-uniforme).

Comme principaux résultats, nous pouvons dire que la conductivité de la couche polluante n'a pratiquement pas d'effet sur les répartitions du potentiel et du champ électriques. Par contre l'état de surface de l'isolateur influe sur la répartition du champ électrique. Ce dernier est plus élevé dans le cas où l'isolateur est pollué. Par ailleurs, les parties près du conducteur sont les plus exposées aux contraintes électriques, à savoir la différence de potentiel et le champ électrique.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Cette étude nous a permis, dans un premier temps, d'acquérir des connaissances sur les phénomènes de conduction et de décharges électriques sur les surfaces isolantes contaminées, et de contribuer, par la suite, à l'étude du comportement des isolateurs pollués,

Notre travail a porté sur l'étude de la distribution du potentiel et du champ électriques le long de la ligne de fuite d'isolateur **F160D-146DC**. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Mutliphysics 5.4, basé sur la méthode des éléments finis. Cette étude nous a permis de conclure que ;

- c'est l'état de surface qui influe sur la répartition du potentiel et du champ électrique et non pas la conductivité de la pollution.
- La valeur maximale du champ est obtenue dans le cas où l'isolateur est pollué.
- Les électrodes de modèle plan d'isolateur sont des équipotentiels où la valeur du potentiel est toujours fixe.
- Le champ et le potentiel électriques augmentent avec la tension appliquée. Cependant, la forme de leurs courbes restent les mêmes. En d'autres termes, la différence est dans les valeurs et non pas dans la forme.
- La valeur maximale du champ électrique est obtenue dans les couches propres de plus faible largeur de modèle plan d'isolateur.

D'après ce travail, nous avons constaté l'efficacité de Comsol Multiphasiques pour étudier le comportement d'isolateur pollué et la distribution du potentielle et du champ électrique le long de la distance de fuite d'isolateur.

Le travail élaboré dans notre étude, laisse les portes ouvertes devant d'éventuelles recherches futures. Ainsi, nous proposons nos perspectives de recherche sure :

- Prédiction de la tension de contournement par la technique des machines à vecteurs de support à moindres carrés (LS-SVM).
- Modélisation expérimentale du contournement par la méthodologie des plans d'expériences.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- [1] **A. Kara**, « contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué » mémoire de magister, département de génie électrique, Université de SETIF 2013.
- [2] **M. B. Sayah**, « Prédiction du Contournement d'une Chaîne d'isolateur MT 175 CTV Polluée Artificiellement Par La Logique Floue », PFE Master, Département de Génie Electrique, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [3] **J. Y. Saison**, « Etude du phénomène d'humidification des dépôts naturels et artificiels de pollution sur des isolateurs électriques », Thèse de Doctorat En Sciences, Université de Strasbourg, France, 1992.
- [4] **F. Aoubed, A. Bayadi, A. E. Rahmani et R. Boudissa**, « Finite Element Modelling of Electric Field and Voltage Distribution on a Silicone Insulating Surface Covered with Water Droplets », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 25, No. 2; April 2018. PP. 413-420
- [5] **H. Benguesmia, N. M'ziou, A. Boubakeur**, « Simulationn of the potential and electric field distribution on high voltage insulator using the finite element method ». Diagnostyka. 2018; 19(2): PP. 41-52,
- [6] **P. Claverie**, « Predetermination of the Behaviour of Polluted Insulators », IEEE Trans. PAS, Vol. 90, N° 4, Juillet 1971, PP. 1902 - 1908.
- [7] **Obenaus**, « Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge », Deutsche Elektrotechnik, Vol. 4, 1958, PP. 135 - 136,
- [8] **F. Rizk**, « Mayhematical Modeles for Pollution Reignition », Electra, Vol. 78, 1981, PP. 71 - 103.
- [9] **P. S. Gosh, S. Chakravorti and N. Chatterjee**, « Estimation of Time to Flashover Characteristics of Contaminated Electrolytic Surfaces Using a Neural Network », IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul., Vol. 2, N° 6, December 1995, PP. 1064 - 1076.

[10] **J. Danis**, « A Stochastic Pollution Flashover Model », 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 - 12, Septembre 5 - 9, 1983, Athènes, Grèce.

[11] **M. Tegar**, « Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Électriques sur des Isolateurs Installés en Régions Polluées », mémoire de Magister, Juillet 1993

[12] **P. Claverie and Y. Porcheron**, « How to Choose Insulators for polluted Areas », IEEE Trans. PAS, Vol. 92, N° 3, 1973, PP. 1121 - 1131.

[13] **B. F. Hampton**, « Flashover Méchanism of Polluted Insulation », Proc. PIEEE, Vol. 111, N° 5, Juillet 1964, PP. 985 - 990.

[14] **M.Tegar**, « Modélisations d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro- géométriques », Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Nationale Polytechnique, Avril 2003.

[15] **CEI 60-1**, « Techniques des Essais à Haute Tension », Définitions et Prescriptions Générales Relatives aux Essais, Deuxième Edition, 1989.

[16] **S. Anjana and C. S. Lakshminarasmha**, « Computed of Flashover Voltages of Polluted Insulators using Dynamic Arc Model », 6th International Symposium on high voltage Engineering, New Orleans, USA, 1989, PP. 30 - 09.

[17] **F. A. M. Rizk and D. H. Nguyen**, « Digital Simulation of Source Insulator Interaction in HVDC Pollution Tests », IEEE Trans. on Power Delivery, 1988, PP. 405 - 410,

[18] **O. Mayr**, « Beitrag zur Theorie der Statischen und der Dynamishchen Litchbogens », Arch. f. Elecktrotechnik, Vol. 37, 1943, PP. 588 - 608.

[19] **N. Dhahbi - Megriche and A. Beroual**, « Flashover Dynamic Model of Polluted Insulators Under AC Voltage », IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul.Vol. 7, N° 2, April 2000, PP. 283 - 289.

[20] **Comsol Multiphysics User's guide, version 5.4.** [Logiciel], Burlington, ma : Comsol, Inc., Octobre 2018.

[21] **A. Kara,** « Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué>> Mémoire de Magister, département d'Electrotechnique, Université de stif1 ,2013.

[22] **N. ELMIHOUB, A.HAKMI**«Comportement d'Un Modèle d'Isolateur HT Pollué Sous Tension Alternative 50Hz >>, Mémoire de fin d'étude, Département de génie électrique, Université –Ibn Khaldoun-Tiaret, 2013-2014.

[23] **Zhao, and M. G. Comber,** « Calculation of Electric Field and Potential Distribution along Non-Ceramic Insulators Considering the Effects of Conductors and Transmission Towers», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, January 2000, PP. 313-318.

ملخص

باستعمال برنامج COMSOL Multiphysique 5.4 الذي يعتمد على طريقة العناصر المنتهية قمنا بدراسة توزيع الكمون و الحقل الكهربائي على طول خط التسرب لعوازل التوتر العالي من نوع F160 D- 146 DC المستعملة من طرف الشركة الجزائرية سونلغاز SONELGAZ ملوث طبيعيا تحت توتر متناوب 400 كيلوفولط وتواتر 50 هرتز اخذين بعين الاعتبار تأثير بعض العوامل المتمثلة في التوتر المطبق, قيمة الناقلية , عرض المناطق النقية و نوعية التلوث.

الكلمات المفتاحية: العوازل , تلوث, ناقلية , كمون , حقل كهربائي.

Résumé

En utilisant le logiciel COMSOL Multiphasiques 5.4, basé sur la méthode des éléments finis, nous avons étudié la répartition du potentiel et du champ électrique, le long de la ligne de fuite d'un isolateur de type F160 D-146 DC naturellement pollué sous tension alternative 400 kV et fréquence 50 Hz.

Nous avons pris en considération l'influence de la tension appliquée, la conductivité des couches polluées, la largeur des couches propres et le type de pollution uniforme et non uniforme.

Mots clés: isolateurs, pollution, conductivité, potentiel, champ électrique.

Abstract:

Using COMSOL Multiphysics 5.4 software, based on the finite elements method, our work presents the repartition of the electric potential and field along of the leakage distance of the polluted insulator under alternating voltage 400 KV, 50Hz, Taking into account some of parameters, such as the applied voltage, the pollution layer's conductivity, the width of the clean layer and the type of pollution (uniform and non-uniform pollution).

Key words: insulators, pollution, conductivity, potential, field electric.