

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة فرحات عباس - سطيف 1

UNIVERSITE de SETIF1

UFAS (ALGERIE)

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

Mémoire de Magister

Présenté au département d'Electrotechnique

Pour obtenir le diplôme

De Magister En Electrotechnique

Option :

Réseaux électriques

Par :

M. ADEL Kara

Thème

Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué

Soutenu le 18/12/2013 devant la commission d'examen composée de :

M. RADJEL	Hammoud	Maître de Conférences à l'Université de Sétif	Président
M. BAYADI	Abdelhafid	Professeur à l'Université de Sétif	Rapporteur
M. GHERBI	Ahmed	Professeur à l'Université de Sétif	Examineur
M. BOUDISSA	Rabah	Maître de Conférences à l'Université de Béjaïa	Examineur
M. NOURI	Hamou	Maître de Conférences à l'Université de Sétif	Invité

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL,

*A mes chers mère et père que Dieu les protège, plus que jamais les
irremplaçables, pour son amour, ses conseils,
ses encouragements et ses prières.*

A mes très chères frères : Chawki el Salim, Mohammed

A mes très chères sœurs : Nawal et Imane

A ma famille et mes amis Ahmed et Tayeb

Remerciements

Je remercie en premier lieu Dieu puissant pour m'avoir donné la force, le courage et la volonté d'accomplir ce travail.

Je tiens, avant tout, à exprimer ma profonde gratitude à monsieur lieu Pr. BAYADI Abdelhafid, Directeur de ce mémoire, pour m'avoir proposé ce sujet de magister et de m'avoir aidé par ses idées et ses conseils durant toutes les étapes de réalisation de ce travail.

Je remercie vivement tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :

– Dr. RADJEAI Hammond : le chef de département d'électrotechnique, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

– Pr. GHERBI Ahmed pour avoir accepté d'être examinateur de ce mémoire et pour sa participation au jury.

– Dr. BOUDISSA Rabah pour avoir accepté sa participation au jury de ce mémoire

- Dr. NOURI Hamou pour avoir accepté l'invitation.

J'exprime aussi ma gratitude à mes collègues de l'université pour leur soutien et leur aide surtout les membres de l'équipe de recherche dirigé par mon encadreur. Je remercie spécialement mes collègues Fatiba Aouabed, Hocine Terrab, Hasna Boulouar, Fazou Kerouani, Anane Zahira et Yasser Rouag, pour leur aide et soutien et je remercie très spécialement Mahdi Djafari, qui m'a beaucoup aidé dans mon mémoire.

Je remercie également mes enseignants pour leurs efforts durant toutes mes années d'étude à l'université et pour leurs soutiens durant la réalisation de ce mémoire.

Enfin, je remercie toute personne de près ou de loin qui a participé pour rendre ce travail réalisable et présentable.

Sétif, le 18 /12/2013

ADEL.KARA

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	I
<i>Chapitre 01</i>	3
LES METHODES DE CALCULS DU CHAMP ELECTRIQUE LE LONG DES ISOLATEURS.....	3
1.1. Introduction	3
1.2. Définition de l'isolateur	4
1.3. Constitution de l'isolateur et son fonctionnement.....	4
1.4. Quelques définitions concernant les isolateurs	5
1.4.1. Contournement	5
1.4.2. Ligne de contournement	5
1.4.3. Tension de contournement.....	5
1.4.4. Tension de tenue	5
1.4.5. Ligne de fuite.....	6
1.4.6. Courant de fuite.....	6
1.5. Principaux types d'isolateurs	6
1.5.1. Isolateurs de type rigide.....	6
1.5.2. Isolateurs supports.....	6
1.5.3. Isolateurs de traversées	6
1.5.4. Isolateurs de lignes aériennes.....	7
1.6. Choix des isolateurs	9
1.7. Comportement des isolateurs selon le matériau constituant.....	9
1.8. Défauts des isolateurs :	10
1.8.1. Défauts électriques.....	10
1.8.2. Défauts mécaniques	11
1.8.3. Défauts dus à la manipulation.....	12
1.9. Destruction	12
1.10. Vieillessement des matériaux isolants.....	12
1.10.1. Farinage	13
1.10.2. Faiénçage.....	13
1.10.3. Craquelures	13
1.10.4. Erosion	13
1.10.5. Acheminement.....	13
1.11. Comportement des isolateurs sous pollution	14
1.11.1. Types de pollutions et leurs classifications	14

1.11.2. Formation et répartition des couches polluantes	16
1.11.3. Conséquences de la pollution	17
1.12. Méthodes de calculs	19
1.12.1. Méthodes expérimentales.....	20
1.12.2. Méthodes théorique.....	21
1.12.3. Méthodes analytiques.....	24
1.12.4. Méthodes numériques.....	24
1.13. Conclusion.....	32
 <i>Chapitre 02.....</i>	 <i>34</i>
MODELES NUMERIQUES 3D DES ISOLATEURS.....	34
2.1. Introduction	34
2.2. Modélisations des isolateurs	34
2.2.1. Isolateur en silicone	35
2.2.2. Chaînes d'isolateurs	36
2.3. Description du logiciel	39
2.4. Étapes de résolution dans COMSOL Multiphysics.....	40
2.4.1. Choix du modèle	40
2.4.2. Géométrie	41
2.4.3. Introduction des propriétés des domaines	41
2.4.4. Maillage des domaines	41
2.4.5. Résolution du problème	41
2.4.6. Analyse des résultats	41
2.5. Modélisation d'un isolateur propre et sec.....	42
2.5.1. Géométrie des isolateurs utilisés.....	42
2.5.2. Identification des domaines dans le logiciel COMSOL Multiphysics.....	44
2.5.3. Conditions aux limites	47
2.5.4. Maillage des domaines	48
2.5.5. Discussion des résultats	49
2.6. Conclusion	54
 <i>Chapitre 03.....</i>	 <i>55</i>
COMPORTEMENT DES ISOLATEURS POLLUES SOUS DIFFERENTES FORMES DE TENSION	55
3.1. Introduction	55
3.2. Identification des domaines de pollution	55
3.3. Conditions aux limites.....	56

3.4. Tension continu	57
3.4.1. Études de la distribution de tension dans les conditions pollué	57
3.4.2. Études de la distribution du champ électrique dans les conditions pollué	59
3.5. Tension alternative	60
3.5.1. Études de la distribution de tension dans les conditions pollué	60
3.5.2. Études de la distribution du champ électrique dans les conditions pollué	61
3.6. Tension impulsionnelle	63
3.6.1. Études de la distribution de tension dans les conditions pollué	63
3.6.2. Études de la distribution du champ électrique dans les conditions pollué	64
3.7. Conductivité de couche de pollution	65
3.8. Conclusion	66
 <i>Chapitre 04</i>	 <i>68</i>
PERFORMANCES D'UN ISOLATEUR DETRUIT.....	 68
4.1. Introduction	68
4.2. Cause de dysfonctionnement de l'isolateur	68
4.3. Géométrie des isolateurs utilisés.....	69
4.4. Les conditions aux limites	71
4.5. Analyse des résultats.....	71
4.5.1. Études de la distribution de tension.....	73
4.5.2. Études de la distribution du champ électrique.....	79
4.6. Conclusion	81
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES.....	 82

Liste des figures

Figure 1-1 Schéma de mesure directe de la tension.....	20
Figure 1-2 Schéma de mesure par compensation de la tension.....	21
Figure 1-3 Élément de volume bidimensionnel en coordonnées cartésiennes	25
Figure 1-4 Élément de volume bidimensionnel en coordonnées cylindrique	26
Figure 1-5 Réseau d'un maillage différences finis	27
Figure 1-6 Éléments classiques de maillage	31
Figure 2-1 Isolateur en silicone	36
Figure 2-2 Isolateur en verre	38
Figure 2-3 Isolateur en porcelaine	39
Figure 2-4 Dimensions générales de l'isolateur en silicone	42
Figure 2-5 Dimensions générales de l'isolateur en verre	43
Figure 2-6 Dimensions générales de l'isolateur en porcelaine	44
Figure 2-7 Identification des différents domaines de l'isolateur en silicone.....	45
Figure 2-8 Identification des différents domaines de l'isolateur en verre	46
Figure 2-9 Identification des différents domaines de l'isolateur en porcelaine.....	47
Figure 2-10 Maillage des isolateurs.....	49
Figure 2-11 Distribution de la tension.....	50
Figure 2-12 Lignes de référence du potentiel	51
Figure 2-13 Potentiel électrique le long des isolateurs	52
Figure 2-14 Champ électrique le long des isolateurs	53
Figure 3-1 Identification des différents domaines de pollution.....	56
Figure 3-2 La forme de tension appliquée	57
Figure 3-3 Potentiel électrique sous tension continu	58
Figure 3-4 Champ électrique sous tension continu	59
Figure 3-5 Potentiel électrique sous tension alternative.....	60
Figure 3-6 Champ électrique sous tension alternative	62
Figure 3-7 Potentiel électrique sous tension impulsionnel.....	63
Figure 3-8 Champ électrique sous tension impulsionnel.....	64
Figure 3-9 Champ électrique en fonction de la conductivité de la couche de pollution	66
Figure 4-1 Isolateur détruit.....	69
Figure 4-2 Modèle géométrique d'isolateurs imparfait en silicone.....	70
Figure 4-3 Modèle géométrique d'isolateurs imparfait en verre	70

Figure 4-4 Modèle géométrique d'isolateurs imparfait en porcelaine.....	71
Figure 4-5 Les lignes de référence des isolateurs en silicone	72
Figure 4-6 Les lignes de référence des isolateurs en verre.....	72
Figure 4-7 Les lignes de référence des isolateurs en porcelaine	73
Figure 4-8 Potentiel électrique surfacique des isolateurs en silicone	74
Figure 4-9 Potentiel électrique surfacique des isolateurs en verre.....	74
Figure 4-10 Potentiel électrique surfacique des isolateurs en porcelaine	75
Figure 4-11 Distribution de la tension sur la surface	76
Figure 4-12 Potentiel électrique le long de l'isolateur détruit en silicone.....	77
Figure 4-13 Potentiel électrique le long de l'isolateur détruit en porcelaine.....	78
Figure 4-14 Potentiel électrique le long de l'isolateur détruit en verre	78
Figure 4-15 Champ électrique le long de l'isolateur détruit en silicone.....	79
Figure 4-16 Champ électrique le long de l'isolateur détruit en porcelaine.....	80
Figure 4-17 Champ électrique le long de l'isolateur détruit en verre.....	80

Liste des tableaux

Tableau 1-1 Classification de la pollution selon le type d'environnement [17].....	15
Tableau 2-1 Données nécessaires pour isolateur en silicone	45
Tableau 2-2 Données nécessaires pour isolateur en verre.....	46
Tableau 2-3 Données nécessaires pour isolateur en porcelaine	47

Listes des Acronymes et Symboles

Acronymes

H.T	Haute Tension
T.H.T	Très Haute Tension
M.E.F	Méthode des Éléments Finis
M.E.F.F	Méthode des Éléments Finis de Frontière
M.S.C	Méthode de Simulation de Charges
M.D.F	Méthode des Différences Finies
EDP	Equations aux dérivées partielles

Symboles

V	Tension appliquée
T	temps(s)
φ	Potentiel électrique(V)
ω	Pulsation angulaire (radian/s)
div	Divergence
grad	Gradient
J	Densité volumique de courant (A/m^2)
Σ	Conductivité électrique volumique (S/m)
σ_s	Charge superficielle (c/m ²)
λ_l	Charge linéique (c/m).
σ_v	Charge volumique (c/m ³)
ϵ_0	Le constant diélectrique de l'air (F/m)
∇^2	Laplacien
E	Champ électrique (V/m)

INTRODUCTION GENERALE

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. Leur choix est donc de la plus haute importance.

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 H.T ou entre les parties H.T, et les parties mises à la terre. Depuis plusieurs années, l'une des principales cibles dans les travaux de recherche et de développement dans le champ de la transmission et de la distribution électrique a été la diminution du nombre et de la durée des interruptions de l'alimentation en énergie électrique des consommateurs.

Une quantité importante d'isolateurs est utilisée sur les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique et en pratique, ces isolateurs sont employés dans différents environnements tels que tropical, arctique, côtier, atmosphère polluée, etc.

L'objectif principal de cette recherche était de calculer les distributions du potentiel et du champ électrique le long d'un plusieurs types d'isolateurs sous différents contraintes électriques, mécaniques et environnementaux. Comme il était très difficile de mesurer de façon précise la distribution du potentiel et surtout du champ électrique le long d'un isolateur, l'utilisation d'une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel commercial s'est avérée être une des meilleures solutions.

A cet effet, la méthode des éléments finis était la mieux adaptée aux contraintes imposées par le problème.

Le présent travail porte sur la modélisation et la simulation de champs électriques et de potentiels le long d'une plusieurs d'isolateurs de différents types, capot et tige en verre, porcelaine et silicone long fut propre pollué et détruit par la méthode des éléments finis sous différentes contraintes électriques.

Ce mémoire apporte les contributions suivantes :

Le présent travail exposera, dans le premier chapitre, une recherche bibliographique consacrée à la présentation des principaux types d'isolateurs utilisés dans les réseaux électriques, sous les contraintes mécaniques et environnementales, en détaillant leurs conceptions et les matériaux entrent dans leurs fabrications ensuite les différentes méthodes numériques applicables au calcul de la distribution du potentiel et du champ électrique le long des isolateurs sont présentées. Nous avons retenu la méthode des éléments finis du fait de son adéquation avec le problème posé et la disponibilité d'un logiciel commercial (COMSOL Multiphysics version 4.3b).

Le chapitre 2 porte sur les simulations tridimensionnelles (3D) d'un isolateur de haute tension qui ont été effectuées avec le logiciel commercial basé sur la M.E.F.

Dans le troisième chapitre le comportement de chaque type d'isolateurs pollués sous différents forme de tension (continue, sinusoïdale et exponentielle) est analysé.

Le dernier chapitre de ce mémoire est consacré au problème de la détérioration de l'isolateur dont, trois scénarios qui peuvent être prévus (endommagement supérieur, inférieur et alternatif), la tension continue est appliquée au trois type d'isolateurs : isolateur en silicone, en verre et en porcelaine.

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

Chapitre 01

LES METHODES DE CALCULS DU CHAMP ELECTRIQUE LE LONG DES ISOLATEURS

1.1. Introduction

La contrainte électrique dans les circuits électriques est résistée principalement par les isolateurs, ces derniers sont constitués d'un matériau isolant solide, caractérisé par une grande impédance au passage du courant électrique. Son rôle est de séparer deux corps conducteurs, soumis à deux potentiels différents [1].

Dans les réseaux de transport d'énergie électrique, l'isolement pylône-conducteur qui représente les deux parties conductrices, est assuré par une chaîne d'isolateurs. Chaque chaîne est caractérisée principalement par sa longueur de fuite (nombre d'éléments).

Dans les lignes de haute tension, le dimensionnement des isolateurs est déterminé par la surtension de manœuvres. Dans ce cas, la tenue à la tension nominale à 50 Hz des isolateurs propres et secs est excellente. Cependant, en l'absence de surtension de foudre ou de manœuvres, de nombreux défauts sont enregistrés sur les lignes aériennes (contournement électrique, défaillance d'isolateurs, ...), particulièrement par temps humide (rosée, brouillard, pluie fine, ... etc.). [2]

Notre chapitre comporte deux parties

- Dont la première partie, vise sur l'importance des isolateurs, leur utilité et leurs principaux types, profils et matériaux.
- Et la deuxième partie nous présentons de façon les principales méthodes de calculs rapportés dans la littérature sur la détermination de la distribution du champ et du potentiel électrique

1.2. Définition de l'isolateur

L'isolateur est utilisé comme son nom l'indique pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions pour empêcher les courts circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution. L'isolateur est un matériau solide, liquide ou gaz qui a une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle.

Les isolateurs des lignes aériennes ont deux fonctions principales. D'une part, ils permettent d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et d'autre part, ils ont un rôle mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dû surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent, etc. [3]

1.3. Constitution de l'isolateur et son fonctionnement

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur importance est reliée directement au fait de :

- ❖ Réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes.
- ❖ Maintenir les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage).
- ❖ Assurer la transition entre l'isolation interne (huile, SF₆) et l'isolation externe (air atmosphérique).
- ❖ Raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles).
- ❖ Jouer le rôle d'une enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure). [4]

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement [4]. Du point de vue électrique, l'isolateur est considéré comme deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones formant

ainsi trois isolants en parallèle ayant des comportements différents. Ces trois zones sont les suivantes :

- L'intervalle d'air.
- Le matériau diélectrique.
- L'interface air - matériau diélectrique (la longueur de l'interface constitue la ligne de fuite : ligne le long de laquelle circulerait le courant de fuite) [5].

1.4. Quelques définitions concernant les isolateurs

1.4.1. Contournement

C'est une décharge disruptive accompagnée d'étincelles se déplaçant sur l'interface d'un isolateur d'une électrode vers une autre.

1.4.2. Ligne de contournement

La ligne de contournement (L_c) est la distance la plus courte dans un gaz entre deux parties conductrices [6].

1.4.3. Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas à partir duquel tous les arcs joignent les deux électrodes [7]. La tension de contournement dépend :

- ✓ de la résistivité volumique moyenne de la pollution.
- ✓ de la répartition de la couche de pollution.
- ✓ de la longueur de l'isolateur.
- ✓ du profil de l'isolateur.

1.4.4. Tension de tenue

C'est le niveau de tension le plus important, que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive [8].

1.4.5. Ligne de fuite

La ligne de fuite est la distance la plus courte le long de la surface d'un isolant entre deux parties conductrices [6].

1.4.6. Courant de fuite

C'est un courant de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la surface de l'isolateur, son intensité devient importante lorsqu'on s'approche de la tension de contournement. Il dépend de plusieurs facteurs tels que la nature de la couche polluante et de la longueur de la ligne de fuite [1].

Dans les conditions de forte humidité, la dissolution des sels contenus dans la couche polluante, provoque la formation d'une couche électrolytique.

1.5. Principaux types d'isolateurs

L'utilisation des diélectriques solides est très répandue dans les lignes aériennes et les postes. On les rencontre sous ces différentes formes [9] :

1.5.1. Isolateurs de type rigide

Un isolateur rigide est relié au support par une ferrure fixe. Tous les isolateurs rigides normalisés sont livrés avec une douille scellée de telle façon qu'ils puissent être vissés directement sur les ferrures correspondantes [10] [11].

1.5.2. Isolateurs supports

On appelle isolateurs supports, des pièces isolantes destinées à supporter, les éléments conducteurs autres que les lignes.

1.5.3. Isolateurs de traversées

Les isolateurs de traversées sont des pièces isolantes servant à faciliter le passage d'un câble ou d'un conducteur sous tension à travers un obstacle plus ou moins conducteur : mur, paroi, couvercle d'un bac (transformateur).

1.5.4. Isolateurs de lignes aériennes

Les conducteurs des lignes aériennes sont fixés aux supports par l'intermédiaire d'isolateurs. Ils sont, dans la majorité des cas, en porcelaine ou en verre.

Les isolateurs doivent présenter deux qualités :

- Une qualité électrique : posséder une rigidité diélectrique suffisante pour supporter la tension de service.
- Une qualité mécanique : avoir des propriétés mécaniques pour résister aux sollicitations exercées sur eux.

En pratique, on distingue deux types d'isolateurs de lignes aériennes :

1.5.4.1. Isolateurs rigides

La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour ce type d'isolateurs. Ces derniers sont utilisés en basse tension en comportant une cloche double ou même triple, cela a pour but d'allonger la ligne de fuite, et de se protéger contre l'influence du brouillard qui peut être salin sur les surfaces intérieures. En haute tension, les isolateurs rigides sont modifiés vis-à-vis de leur forme permettant ainsi la bonne tenue aux sollicitations électriques et l'allongement de la ligne de fuite en évasant d'avantage le corps de l'isolateur [10].

1.5.4.2. Isolateurs suspendus (éléments de chaîne)

Ils sont utilisés pour des tensions très élevées et sont composés de plusieurs éléments. Le type principal des isolateurs suspendus est celui à capot et tige, dont le nombre utilisé dans une chaîne dépend principalement de la tension de service de la ligne, mais il y a aussi les isolateurs à long fut [12].

a. Isolateur à capot et tige

L'isolateur capot et tige est constitué de trois parties :

- ✓ Bloc isolant ayant à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures.

- ✓ Partie supérieure sous forme d'un capot scellé en fonte malléable dans le verre (ou la porcelaine).
- ✓ L'extrémité inférieure de la tige est arrondie formant ainsi la partie inférieure qui a les dimensions adaptées pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant, ainsi qu'y rester maintenue par une goupille [11].

L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique.

Une chaîne d'isolateurs est constituée de plusieurs éléments de type capot et tige ou autres. Ces éléments sont soumis principalement à des efforts de traction. Ils sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (alignement), soit horizontale (ancrage).

b. Isolateur à long fût

Ce type peut être soit:

- ✓ Constitué d'un cylindre plein en céramique, ou en porcelaine, muni d'ailettes (Figure I.3), avec une pièce métallique de liaison à chaque extrémité. Celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le cylindre, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet. De tels isolateurs peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis
- ✓ Constitué d'un matériau synthétique dont la caractéristique principal est la bonne tenue à la pollution, le faible encombrement, la résistance au vandalisme et la légèreté, en particulier lorsqu'on les compare aux chaînes d'isolateurs pour les lignes de tension électrique élevée [11]

Ce type d'isolateurs est appelé composite, il est constitué de trois parties selon le rôle :

- Un noyau en fibre de verre, imprégnées de résine, capable d'assurer l'isolement et de supporter les efforts mécaniques générés par les conducteurs.

– Un revêtement en élastomère en EPDM (Ethylène Propylène Diène Monomère), vulcanisés à chaud qui donne le profil et précise la ligne de fuite tout en protégeant le noyau contre toute attaque des agents extérieurs en assurant l'étanchéité au raccordement avec les pièces métalliques d'extrémités. Son profil à ailettes alternées permet d'accroître la tenue sous pollution.

– Des pièces métalliques, en fonte malléable ou acier forgé galvanisé à chaud, elles sont nécessaires au montage de l'isolateur et à la transmission des efforts mécaniques [9,10].

1.6. Choix des isolateurs

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils forment une partie essentielle de laquelle dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service [6].

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

1.7. Comportement des isolateurs selon le matériau constituant

Les travaux de Gubanski et al [13] ont été effectués sur principaux types des isolateurs de différents matériaux. Il a basé son étude sur le comportement du courant de fuite. Il conclut que le courant de fuite est souvent capacitif en caractère et sinusoïdal en forme :

Une fois l'hydrophobie perdue, le courant de fuite devient de plus en plus résistif, avec des pics dus aux décharges dans les zones sèches et ceci engendre l'apparition de nouveaux harmoniques.

- Pour les isolateurs qui gardent leur hydrophobicité, le courant de fuite est capacitif, sinusoïdal et de l'ordre du μA .
- Pour les isolateurs dont la surface est complètement mouillée, le courant de fuite est sinusoïdal à caractère résistif d'ordre relativement élevé.

- Pour les isolateurs ayant perdu totalement ou partiellement leur hydrophobicité, le courant de fuite a une forme non linéaire avec une amplitude dont l'ordre de grandeur est relativement élevé [13].

1.8. Défauts des isolateurs :

Les isolateurs composites des générations précédentes ont présenté comme principaux problèmes l'érosion, l'acheminement, la décharge de couronne...etc.

Ces problèmes ont été éliminés par le bon choix des matériaux et le développement de nouvelles techniques de fabrication. L'inconvénient des isolateurs composites est la difficulté d'identifier l'isolateur défectueux de l'isolateur sain, d'où la nécessité de développer une méthode de diagnostic pour différencier entre un isolateur défectueux et un isolateur sain.

On peut distinguer deux types de défauts : défauts électriques et défauts mécaniques. Ces deux types de défauts sont mutuellement dépendants [14].

1.8.1. Défauts électriques

Le vieillissement des isolateurs est causé par les conditions climatiques auxquelles l'isolateur est exposé ainsi que son profil. Un profil qui permet l'accumulation des agents polluants favorise l'apparition des décharges locales menant à l'érosion et par la suite au cheminement.

L'effet de couronne est considéré comme agent principal de vieillissement des Isolateurs. Cet effet se caractérise par la réduction de l'hydrophobie, la décoloration de la surface de l'isolateur ainsi que l'érosion sous l'effet des gaz de décharge.

Les gouttelettes d'eau sur la surface de l'isolateur affectent la distribution du champ sur cette surface (la permittivité relative de l'eau est élevée ce qui augmente l'intensité du champ aux voisinages des gouttelettes), les gouttelettes se déforment dans la direction du champ.

Les étapes de développement du vieillissement et du processus de contournement ont été établies dans des travaux antérieurs [15]. Un excellent

isolateur est caractérisé par son hydrophobicité, cette hydrophobie peut être perdue suite à l'accumulation des agents polluants sur la surface de l'isolant, ou même après avoir subi des chocs électriques (arcs locaux) ; certains isolateurs peuvent réacquérir leurs états hydrophobes après immigration des molécules de faible poids (Low Molar Weight) du centre de l'objet jusqu'à la surface [14].

Le mouillage de la surface favorise l'apparition de l'effet couronne dans les régions de forte intensité de champ, d'où la perte locale de l'hydrophobie ; une quantité de pollution se dissout et forme une couche plus ou moins conductrice, par conséquent une nouvelle distribution du champ s'établit. Ce processus se poursuit et le chemin conducteur mouillé se développe à travers l'isolateur, par la suite le courant circulant à travers ce chemin cause l'assèchement des régions à forte densité de courant ce qui conduit au développement d'un arc local ; celui-ci provoque d'avantage de perte d'hydrophobie, d'érosion de surface et augmente l'amplitude du courant de fuite. Dans le cas d'un isolateur en polymère, le séchage de sa surface lui permet de réacquérir ses propriétés hydrophobes [15].

Dans le cas des isolateurs en verre ou en porcelaine, le mécanisme de décharge est différent de celui des isolateurs en polymère, le mouillage de la pollution accumulée sur la surface des isolateurs en verre ou en porcelaine conduit à l'apparition d'un film d'eau continu, donc l'arc peut se développer directement. Le séchage de la partie restante et l'élongation de l'arc causent le contournement de l'isolateur. Les premières étapes sont similaires à celles des SIR. De plus, la couche de pollution développée est souvent mince, ce qui limite l'intensité du courant de fuite et par la suite, la tension de contournement augmente [15].

1.8.2. Défauts mécaniques

Les défauts mécaniques d'un isolateur peuvent mener à des conséquences fatales. Dans le cas des isolateurs en SIR, la plupart des défauts sont d'ordre mécanique [15].

1.8.3. Défauts dus à la manipulation

Les isolateurs en porcelaine peuvent être endommagés facilement mais le taux de tels endommagements est toujours faible. Les isolateurs composites ne sont pas fragiles mais marquent un taux relativement élevé d'endommagements.

En effet, un nombre d'endommagements plus ou moins important a été constaté dû des manœuvres durant le transport et l'installation. Pour prendre en charge ces problèmes, le groupe CIGRE (Conférence International des Grands Réseaux Electriques) prépara un guide de manipulation qui contient des recommandations relatives aux méthodes de manipulation de ce type d'isolateurs, en commençant de l'endroit de fabrication jusqu'à sa mise sous tension [15].

1.9. Destruction

Elle a pour origine les jets de pierres, tirs de balles, provoquant la destruction de l'isolateur en causant des problèmes majeurs tels que la fracture de l'isolateur. Dans le cas des isolateurs en porcelaine, ce genre d'incidents ne constitue pas un vrai problème car ce type d'isolateurs est caractérisé par une bonne rigidité mécanique [15].

1.10. Vieillessement des matériaux isolants

En génie électrique, le vieillissement électrique est défini comme tout changement des propriétés du matériau qui affecte ses fonctions d'isolation. Il peut donc s'agir d'une modification de nature chimique ou physique induisant une modification des propriétés électriques dans un sens défavorable pour la pérennité des fonctions isolantes [16].

Généralement on accepte de façon intuitive, et l'expérience le montre souvent, que la durée de vie d'un matériau isolant dépend de l'intensité de la contrainte électrique subie par celui-ci mais également de la durée d'application de cette contrainte.

Sous l'effet des contraintes électrique, climatique et de la pollution, plusieurs phénomènes de dégradation peuvent apparaitre au cours du vieillissement des matériels, décrivons les brièvement :

1.10.1. Farinage

Apparition à la surface du matériau synthétique des particules de charge formant une surface rugueuse ou poudreuse [16].

1.10.2. Faïençage

Micro fractures superficielles peu profondes de (0,01 à 0,1mm) [16].

1.10.3. Craquelures

Fractures superficielles de profondeur supérieure à 0,1 mm [16].

1.10.4. Erosion

Dégradation irréversible et non conductrice, qui peut se produire, à la surface de l'isolateur, par perte de matière. Elle peut être uniforme, localisée, ou arborescente. Après des amorçages partiels, il peut se produire sur les isolateurs composites des traces superficielles, en générale arborescentes, comme sur les pièces en porcelaine, tant qu'elles ne sont pas conductrices, ces traces ne sont pas préjudiciables .quand elles sont conductrices, elles se classent dans le phénomène de acheminement [16].

1.10.5. Acheminement

Dégradation irréversible, par formation de chemins qui apparaissent et se développent à la surface d'un matériau isolant. Les chemins sont conducteurs même à sec .le acheminement peut se produire sur des surfaces au contact de l'air et aussi aux interfaces entre matériaux isolants différents .il est en général matérialisé par l'apparition d'une trace de matériau carbonisé [16].

1.11. Comportement des isolateurs sous pollution

La pollution des isolateurs constitue un problème majeur dans la dégradation de l'isolement des ouvrages (postes et lignes) de haute tension [12]. Portés par le vent et déposés sur la surface isolante des chaînes des isolateurs, et en présence d'humidité, les divers dépôts polluants deviennent plus ou moins conducteurs. Ce qui engendre une diminution conséquente de la tension de tenue des isolateurs. Des arcs électriques prennent naissance à la surface isolante et peuvent éventuellement, se développer en provoquant le contournement total des isolateurs.

1.11.1. Types de pollutions et leurs classifications

Par pollution, on entend les particules solides qui se trouvent dans l'atmosphère et qui se déposent sur la surface de l'isolateur. Cette pollution constitue l'origine du problème. A ce titre, des efforts considérables ont été menés afin de la classer quantitativement et qualitativement.

La composition de cette pollution est variable suivant les sources de contamination et les conditions auxquels sont soumis les isolateurs. La norme CET 815 donne le classement de la pollution suivant son origine (Tableau 1-1). Essentiellement, les types de pollution qui existent sont: la pollution naturelle, la pollution industrielle et la pollution mixte [17].

Tableau 1-1 Classification de la pollution selon le type d'environnement [17]

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

1.11.2. Formation et répartition des couches polluantes

Suite à l'écoulement d'un air transportant des poussières diverses, une couche de pollution se forme à la surface des isolateurs. La répartition non-uniforme et non-homogène de cette couche dépend du profil de l'isolateur, de la position de la chaîne par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), du niveau de tension ainsi que du degré de pollution du site où est situé l'isolateur.

Plusieurs travaux d'observation ont montré qu'il existe toujours une distinction nette entre les couches formées à la surface supérieure et celles formées à la surface inférieure d'un isolateur soumis à la pollution naturelle. Cela veut dire que la répartition de la pollution le long de l'isolateur est très peu uniforme; le vent, par exemple, impose des orientations préférentielles pour les dépôts.

- du profil de l'isolateur,
- de la position de l'isolateur,
- du niveau de tension appliqué [18].

La non-uniformité de la pollution peut être classée en trois catégories:

a. Non-uniformité longitudinale par groupe

Elle est caractérisée par un ensemble de groupes d'isolateurs, soumis à différentes conductivités de la couche de pollution, dont la valeur est constante dans chaque groupe. Nous retrouvons ce type de pollution dans les cas suivants :

- temporairement pendant le lavage sous tension.
- dans les chaînes d'isolateurs en forme de « T ».
- par effet du champ électrique où la concentration de la pollution est accentuée sur les isolateurs les plus proches de la borne haute tension [19].

b. Non-uniformité transversale

Ce type est caractérisé par des secteurs ou bandes de différentes conductivités superficielles de la couche polluante. Ces bandes sont réparties transversalement

autour de la surface de chaque isolateur de la chaîne. La conductivité dans chaque secteur est la même le long de la ligne de fuite.

Ce type de pollution est dû principalement à l'existence d'une direction privilégiée des vents et des pluies [19].

c. Non-uniformité longitudinale périodique

Ce type est le plus fréquent. Il est caractérisé par une variation périodique de la conductivité de la couche de pollution le long de la ligne de fuite, mais elle garde une symétrie circulaire. Ces principales spécifications sont :

- la face inférieure de l'isolateur présente une conductivité plus grande que la face supérieure.
- la concentration de la pollution augmente de la zone périphérique vers la zone centrale.
- la pollution est plus accentuée entre les nervures [19].

1.11.3. Conséquences de la pollution

Lorsque l'isolateur est propre ou recouvert d'une couche de pollution sèche, un très faible courant capacitif circule à sa surface. Ceci est dû aux très faibles valeurs des conductivités volumiques de l'air, de l'isolant solide et de la couche de pollution. On obtient ainsi une répartition électrostatique du potentiel électrique. Par contre, lorsque la couche de pollution est humidifiée, elle devient le siège d'un courant de conduction de valeur relativement importante et la répartition du potentiel électrique diffère de la répartition électrostatique.

La rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite. Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur [20].

a. Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçe aléatoirement à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition d'un courant de fuite intermittent entraînant une perte d'énergie relativement faible et généralement supportable par l'installation [20].

b. Arc permanent

L'arc électrique se fixe à la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en se réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant [20].

c. Contournement des isolateurs

Le contournement d'une surface polluée et humidifiée est le résultat d'une évolution qui comprend quatre phases principales.

- dans une première phase, les particules du dépôt sont apportées par le vent et se concentrent entre les nervures ou autour du capot. Les facteurs d'accumulation sont les suivants :
 - La nature, le poids et la taille des particules polluantes.
 - La distance de l'isolateur par rapport à la source de pollution et par rapport au sol d'où peuvent provenir les poussières.
 - La vitesse du vent.
 - L'orientation de la chaîne.
- Le brouillard et la condensation de la petite pluie modifient graduellement et pratiquement sans délavage la surface de l'isolateur pollué. Ces conditions sont dites critiques. Les sels contenus dans le dépôt se dissolvent et créent un électrolyte conducteur sur la surface de l'isolateur. Un courant de fuite prend alors naissance.

Pendant le cycle d'humidification, le courant de fuite augmente jusqu'à une valeur maximale, mais diminue s'il y a séchage. Le niveau de courant de fuite dépend du temps, de la nature et de la quantité des sels solubles et insolubles. Ces derniers

maintiennent par adsorption une certaine quantité d'eau à la surface de l'isolateur, entretenant ainsi l'humidification du dépôt (phase 2).

- La densité du courant de fuite est beaucoup plus importante près des ferrures de l'isolateur. Par effet Joule, la température s'élève, l'eau s'évapore et le dépôt devient moins conducteur. Le courant est alors très réduit en amplitude par la présence d'une «bande sèche». La répartition de potentiel sur l'isolateur est modifiée par cette bande sèche, car la plus grande portion du potentiel électrique se trouve reportée à ses bornes. Si la largeur de cette bande sèche est insuffisante pour supporter la différence de potentiel correspondante, un arc est créé (phase 3).
- La résistance du dépôt humidifié non court-circuité par l'arc limite le courant et la longueur de l'arc. Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra, la bande sèche s'humidifiera à nouveau et le mécanisme se répétera encore. Tant que le courant de fuite n'excède pas ce que l'on appelle le «courant critique » correspondant à une «longueur critique » de l'arc, cette situation reste stable.

Dans le cas contraire, le contournement de l'isolateur peut survenir (phase 4) [18].

1.12. Méthodes de calculs

La détermination de la distribution du champ et du potentiel électrique de tout système haute tension est un problème complexe de calcul à cause de la forme irrégulière des diélectriques, de la proximité de surfaces métalliques aux formes complexes, des lignes de transmission, et dans certains cas, de la présence d'une couche conductrice.

Les progrès de l'informatique ont permis de développer des méthodes numériques de calcul afin de déterminer de façon précise la distribution du champ et du potentiel électrique.

Les méthodes permettant de déterminer la valeur des champs électriques et magnétiques font appel soit à l'expérience, soit au calcul théorique.

1.12.1. Méthodes expérimentales

Parmi les méthodes expérimentales, on peut citer celles basées sur la mesure des équipotentielles à savoir [21]:

- La méthode de mesure directe.
- La méthode par compensation.

1.12.1.1. Méthodes de mesure directe de la tension

En connectant un voltmètre électrostatique (V) entre le point de mesure (p) et la terre figure (1-1).

On lit directement la tension (U).

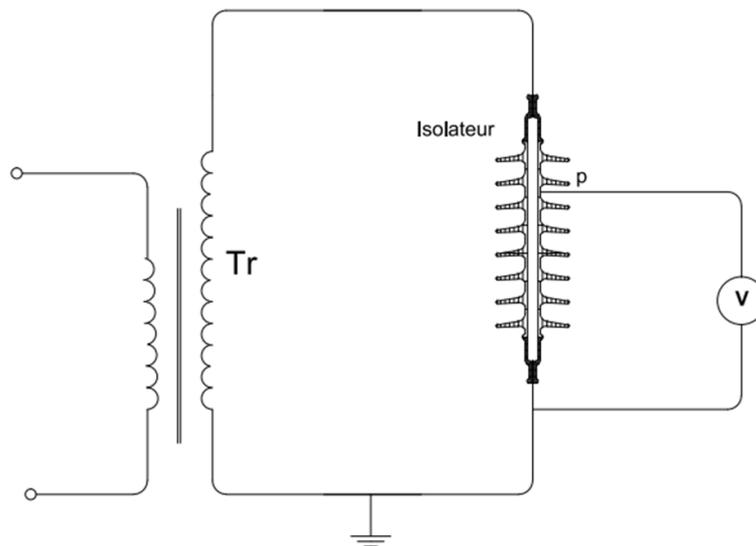


Figure 1-1 Schéma de mesure directe de la tension

L'avantage de cette méthode est le matériel restreint utilisé son inconvénient est la présence d'une sonde de mesure. Dérivant un courant de mesure qui perturbe la forme du champ électrique local.

1.12.1.2. Méthodes de mesure par compensation

Le point (p) dont on veut déterminer la tension est relié à travers un éclateur à gaz au secondaire d'un transformateur à haute tension (T_1). Le primaire de ce

transformateur est alimenté le réseau à travers un régulateur de tension et de phase (RP) figure (1-2).

Lorsque la tension au secondaire du transformateur (T_2) a atteint la valeur et la phase de la tension du point (p) à mesurer l'éclateur à gaz s'éteint, et si l'on connaît le rapport de transformateur de (T_2), on peut lire directement la valeur de la tension (U_p) sur un voltmètre connecté au primaire de (T_2).

L'avantage de cette méthode dite de zéro est qu'elle perturbe peu le champ électrique local. L'inconvénient réside dans la difficulté d'équilibrage nécessitant l'utilisation du régulateur RP.

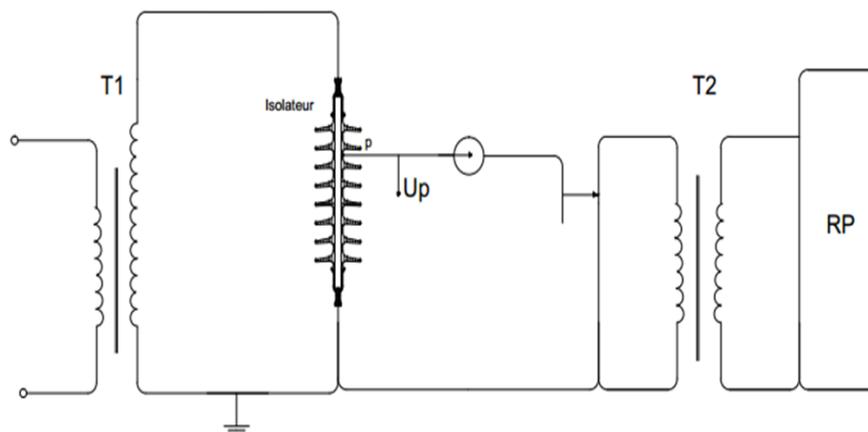


Figure 1-2 Schéma de mesure par compensation de la tension

1.12.2. Méthodes théorique

1.12.2.1. Equation de base

Les équations de base utilisées pour calculer le potentiel (champ électrique), sont les équations de Maxwell [22]:

Pour le model électrostatique, on utilise les équations suivantes :

$$\operatorname{div}\vec{D} = \rho \quad (1.1)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (1.2)$$

$$\vec{E} = -\operatorname{grad}\vec{V} \quad (1.3)$$

La combinaison de ces trois équations donne :

$$\operatorname{div}\varepsilon_0(-\operatorname{grad}\vec{V}) = \rho \quad (1.4)$$

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}\vec{V}) = -\frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (1.5)$$

Dans notre cas nous avons négligé la valeur de la charge d'espace c.à.d. qu'il n'y a pas de charge dans l'air : $\rho = 0$

D'où l'équation précédente devient :

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}\vec{V}) = 0 \quad (1.6)$$

Ou :

$$\nabla \cdot (\nabla V) = 0 \quad (1.7)$$

Avec :

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right) \quad (1.8)$$

L'équation de base pour le calcul électrostatique est donnée par :

L'équation de Laplace :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (1.9)$$

Les composantes du champ peuvent être déduites du potentiel :

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{\partial V}{\partial X} \\ E_y &= \frac{\partial V}{\partial Y} \end{aligned} \quad (1.10)$$

Pour le model magnétostatique :

D'après la loi d'Ampère :

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1.11)$$

Et la relation du milieu :

$$B = \mu_0 \vec{H} \quad (1.12)$$

Et en plus la relation fondamentale suivante :

$$\text{div} \vec{B} = 0 \Rightarrow \nabla \times \vec{A} = \vec{B} \quad (1.13)$$

On peut déduire la forme générale du modèle magnétostatique :

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0} \vec{B} = \vec{J} \quad (1.14)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (1.15)$$

En coordonnées cartésiennes et dans le cas d'une configuration plane (exemple : une ligne rectiligne placée au-dessus du sol), le modèle précédent devient :

$$\nabla A_z = \mu_0 J \quad (1.16)$$

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = \mu_0 J \quad (1.17)$$

Qui est tout simplement l'équation de Poisson.

La résolution de cette équation peut se faire par les méthodes numériques ou analytiques.

1.12.3. Méthodes analytiques

Analytiquement, la résolution peut se faire par l'équation de base suivante :

$$V(p) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\sum_i \frac{q_i}{r_i} + \sum_i \int \frac{\rho_v}{r_i} dv_i + \sum_i \int \frac{\sigma_s}{r_i} ds_i + \sum_i \int \frac{\lambda_l}{r_i} dL \right] \quad (1.18)$$

q_i : Charge ponctuelle (C).

σ_s : Charge superficielle (c/m²).

λ_l : Charge linéique (c/m).

ρ_v : Charge volumique (c/m³).

r_m : (m-i....i j) : désigne de façon évidente des distance (m).

V (p) : potentiel au point p en fonction des charges (v).

La résolution analytique de l'équation de Laplace n'est pas simple sauf si la géométrie du système est symétrique. Parmi les méthodes analytiques utilisées pour le calcul du champ électrique on trouve :

La méthode de séparation des variables.

La méthode des transformées conformes.

La méthode des images électrostatiques.

1.12.4. Méthodes numériques

La détermination du champ électrique à proximité d'un dispositif à haute tension se heurte à deux difficultés fondamentales :

- La forme géométrique (conditions aux limites) compliquée du système.
- L'espace dans lequel le problème est posé s'étend à l'infini.

C'est pourquoi on a recours à des techniques numériques pour déterminer l'intensité du champ électrique.

Les principales méthodes numériques de calcul du champ sont :

- ✓ La méthode des volumes finis.

- ✓ La méthode des différences finies.
- ✓ La méthode des charges fictives.
- ✓ La méthode des éléments finis.

1.12.4.1. Méthodes des volumes finis (MVF)

Dans cette méthode, le domaine d'étude est subdivisé en un nombre fini d'éléments de volume de telle manière que chaque volume entoure un nœud du maillage [23]. L'équation de dériver partielles (EDP) est intégrée sur chaque volume élémentaire.

Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire, la fonction inconnue est présentée à l'aide d'une fonction d'approximation entre deux nœuds consécutifs, ensuite la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude.

Grâce à un libre choix de la fonction de, liaison entre nœuds consécutifs la procédure conduite à une solution plus précise [24].

Sa mise en œuvre est simple si les volumes élémentaires sont des rectangles en 3D. Cependant, cette méthode permet d'utiliser des volumes élémentaires de forme quelconque, donc de traiter des géométries complexes ce qui est un avantage [25].

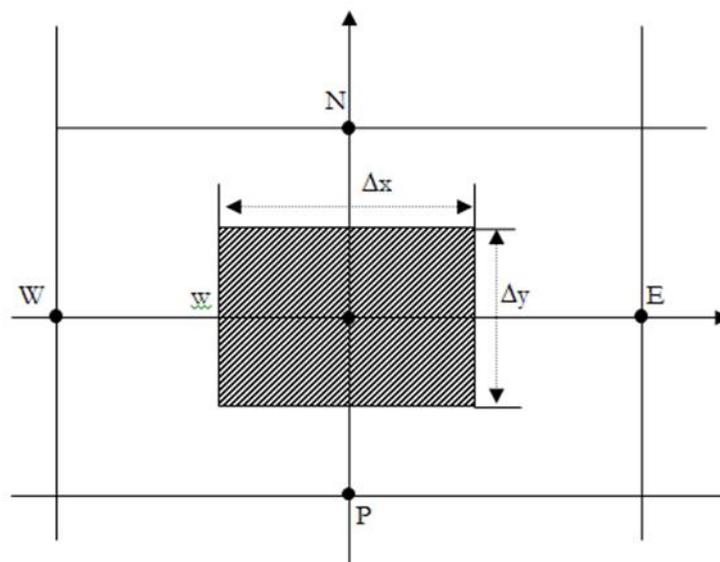


Figure 1-3 Élément de volume bidimensionnel en coordonnées cartésiennes

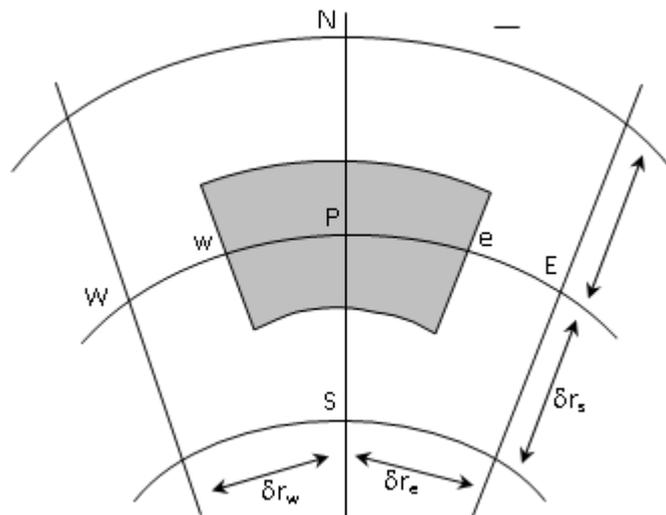


Figure 1-4 Elément de volume bidimensionnel en coordonnées cylindrique

1.12.4.2. Méthodes des différences finies (MDF)

Dans cette méthode, le mode d'approximation est basé sur la transformation de l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences finies, où chaque dérivée est remplacée par une différence de valeur de l'inconnue à déterminer, en un certain nombre de points du domaine de résolution.

Nous considérons ces points à une distance h les uns de l'autre figure (2-6).

Dans ces conditions, et en se limitant au terme d'ordre 2 dans les développements en série (en acceptant une erreur de l'ordre h^2), On peut dresser le tableau des dérivées.

Successives par rapport à x et y :

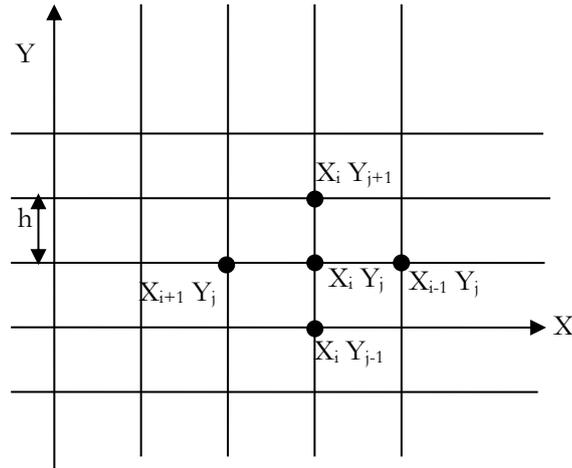


Figure 1-5 Réseau d'un maillage différences finis

$$\left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{X}} \right]_{ij} = \frac{\mathbf{V}_{i+1,j} - \mathbf{V}_{i-1,j}}{2\mathbf{h}} \quad (1.21)$$

$$\left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \mathbf{Y}} \right]_{ij} = \frac{\mathbf{V}_{i,j+1} - \mathbf{V}_{i,j-1}}{2\mathbf{h}} \quad (1.22)$$

$$\left[\frac{\partial^2 \mathbf{V}}{\partial \mathbf{X}^2} \right]_{ij} = \frac{\mathbf{V}_{i+1,j} + 2\mathbf{V}_{ij} + \mathbf{V}_{i-1,j}}{\mathbf{h}^2} \quad (1.23)$$

$$\left[\frac{\partial^2 \mathbf{V}}{\partial \mathbf{Y}^2} \right]_{ij} = \frac{\mathbf{V}_{i,j+1} - 2\mathbf{V}_{ij} + \mathbf{V}_{i,j-1}}{\mathbf{h}^2} \quad (1.24)$$

Le Laplacien discrétise s'écrit donc :

$$(\Delta \mathbf{V})_{ij} = \left(\frac{\partial^2 \mathbf{V}}{\partial \mathbf{x}^2} \right)_{ij} + \left(\frac{\partial^2 \mathbf{V}}{\partial \mathbf{y}^2} \right)_{ij} \quad (1.25)$$

$$(\Delta \mathbf{V})_{ij} = \frac{1}{\mathbf{h}^2} [\mathbf{V}_{i,j-1} + \mathbf{V}_{i+1,j} + \mathbf{V}_{i-1,j} + \mathbf{V}_{i,j+1} - 4\mathbf{V}_{ij}] \quad (1.26)$$

C'est l'équation aux différences finies pour le nœud (i, j).

En généralisant l'approximation à tous les nœuds du maillage, et en tenant compte des conditions aux limites, nous aurons un système de l'équation à n inconnues de formes.

$$[A]\{X\} = \{B\}$$

- Avantages de la méthode :
 - ✓ Mise en œuvre relativement simple.
 - ✓ Prise en considération des non linéarités.
 - ✓ Préparation et introduction des données relativement simple.
- Inconvénients de la méthode :
 - ✓ - Considération des géométries complexes (c'est ce qui explique en partie qu'elle ait été supplantée par la méthode des éléments finis).
 - Taille des systèmes algébriques importante.
 - Temps de calcul relativement important.
 - Précision des calculs coûteuse.

1.12.4.3. Méthodes des charges fictives

La méthode des charges fictives est basée sur une simulation de la distribution superficielle des charges électriques sur la surface des électrodes par une distribution discrète des charges fictives, à l'intérieur de ces dernières l'emplacement et la grandeur de ces charges fictives seront déterminées de manière à ce que leur effet intégré satisfasse aux conditions aux limites du potentiel connu sur la surface des électrodes.

La nature discrète de la méthode des charges fictives impose l'introduction d'un nombre assez élevé de charge pour atteindre une précision raisonnable, c'est pourquoi l'utilisation de l'ordinateur s'avère nécessaire.

Si Q_i étant les charges fictives mises en place, le potentiel V et le champ E en un point quelconque p de l'espace s'expriment alors par :

$$V(p) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i} \quad (1.27)$$

$$\vec{E}(p) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i^3} \vec{r}_i \quad (1.28)$$

Ou

r_i : est la distance entre la charge locale Q_i et le point P.

ε_0 : La constante diélectrique de l'air (F/m).

La méthode de calcul des champs électrique par l'intermédiaire des charges électriques fictives ne nécessite de valeur du potentiel que sur les électrodes, et n'exigeant par la présence de contours fermés.

Elle s'applique donc particulièrement bien au calcul des champs électriques dans les installations extérieures.

1.12.4.4. Méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis a pris un essor considérable avec le développement des moyens informatiques. Dès les années 1960, elle est devenue, par sa souplesse d'emploi et sa très grande généralité, une méthode numérique indispensable pour la résolution des problèmes aux dérivées partielles

a. Principe

La méthode de résolution par éléments finis permet de calculer des grandeurs physiques pour tous les points d'une structure donnée. Pour obtenir un résultat sur un domaine continu, il est nécessaire de discrétiser le volume ou la surface d'étude par un maillage, en la subdivisant en sous éléments : les éléments finis. Tous ces éléments sont interconnectés entre eux par des points particuliers appelés des nœuds [26].

Les solutions sont calculées uniquement pour chaque nœud, et l'approximation de la solution finale est interpolée dans chaque élément en partant des résultats obtenus pour les nœuds les délimitant. On ramène ainsi le problème d'un milieu continu à un ensemble de problèmes discrets contenant un nombre fini d'inconnues, elle permet ainsi de transformer les équations aux dérivées partielles en système d'équations algébriques. Le problème est alors exprimé sous forme matriciel [15].

b. La décomposition de la méthode des éléments finis

Pour une analyse par éléments finis, tout un travail de préparation et de finalisation doit être effectué, c'est ce que nous décrivons dans les étapes suivantes [26] :

1) Première étape : L'équation différentielle

La première étape de la modélisation de tout dispositif consiste à écrire les équations aux dérivées partielles qui décrivent les phénomènes physiques, en y associant des conditions aux limites qui décrivent les interactions entre le système étudié et l'extérieur.

2) Deuxième étape : De l'équation différentielle à une intégrale

La méthode des éléments finis décrite précédemment discrétise une formulation intégrale pour conduire à un système d'équation algébrique qu'on peut résoudre avec des méthodes numériques connues.

3) Troisième étape : Approximation par éléments finis

La méthode d'approximation par éléments finis consiste à:

- ✓ Identifier un ensemble de sous domaine d'étude (discrétisation du domaine).
- ✓ Définir une fonction approchée différente sur chaque sous domaine (l'approximation nodale).

– **Discrétisation du domaine** (le maillage) :

Le domaine de résolution est discrétisé en sous domaines appelés éléments. Ces éléments dans l'analyse en éléments finis sont les briques élémentaires dont le maillage va représenter le système géométrique à simuler. Les éléments sont des primitives géométriques composant plusieurs nœuds, la figure ci-dessous représente des exemples d'éléments classiques à 1D, 2D, et 3D qu'on rencontre généralement dans le maillage éléments finis.

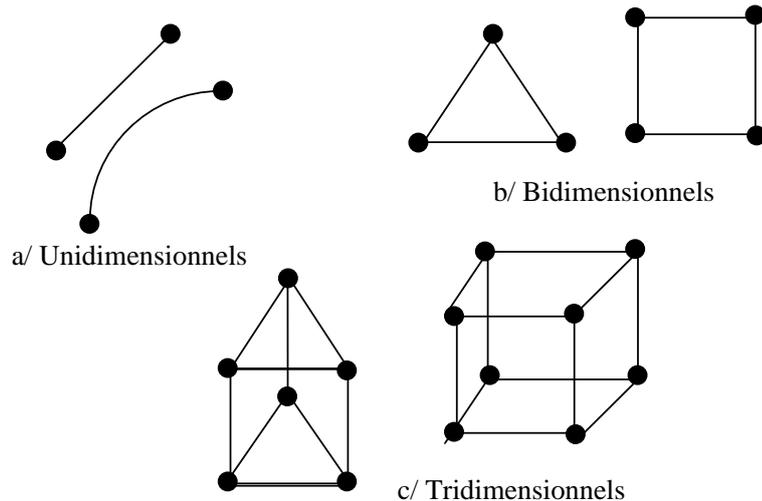


Figure 1-6 Eléments classiques de maillage

– L'approximation nodale

Dans chacun de ces éléments, l'inconnue est généralement approchée par une interpolation polynomiale en fonction des variables nodales de l'inconnue en chacun des nœuds de l'élément. Chaque élément est repéré par les coordonnées de ses sommets.

4) Quatrième étape : Vers une équation matricielle

La transformation en formulation intégrale suivie de discrétisation nous conduisent à trouver un ensemble de valeurs. La manière d'obtenir un système d'équation dépend de la méthode retenue pour se ramener à une intégrale.

5) Cinquième étape : Résolution du système matricielle

Suite à la formulation intégrale et la discrétisation, on obtient un système matriciel. La résolution du système d'équations est la dernière étape dans la méthode des éléments finis. Si le problème est linéaire, autrement dit si la matrice ne dépend pas de la solution, les méthodes de résolution de système peuvent être classées en deux catégories:

- Les méthodes directes (GAUSS, CHOLESKY).
- Les méthodes interactives (JACOBI).

Si le problème est non linéaire, on doit mettre en place un processus interactif qui recalcule la matrice pour chaque nouvelle valeur de la solution (NEWTON, RAPHSON).

c. Avantages et inconvénients de la méthode

La méthode des éléments finis est la plus utilisée car :

- a) Elle peut traiter des problèmes géométriques complexes.
- b) Elle couvre de nombreux domaines de la physique.
- c) Les moyens informatiques actuels (puissance des calculateurs, outils de visualisation) la rende facile de mise en œuvre.
- d) De nombreux logiciels généraux ou dédiés sont disponibles sur le marché.
- e) Le temps de calcul est relativement avantageux.

L'avantage majeur de la méthode des éléments finis, par rapport aux autres méthodes provient du fait que dans cette méthode, chaque élément peut avoir des caractéristiques électriques et géométriques particulières et indépendantes des autres éléments. Ainsi il est possible de résoudre de manière relativement efficace des cas de géométrie complexe présentant des propriétés différentes.

Cependant l'inconvénient majeur de cette méthode est la difficulté à modéliser des systèmes à domaine ouvert.

1.13. Conclusion

Dans le matériel électrique destiné à fonctionner en HT, l'isolation des conducteurs prend une grande importance d'où, les matières isolantes pour chaque type d'isolateur sont choisies en tenant compte de leurs propriétés et les différentes contraintes supportées.

La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension de transport d'énergie électrique.

Nous avons présenté certains types d'isolateur et leur utilisation. Dans la suite du travail nous allons entreprendre un calcul de la distribution du potentiel et la

détection des régions critiques ou la concentration du champ électrique est élevée en utilisant la méthode des éléments finis.

Dans ce chapitre, nous avons mené une recherche bibliographique qui nous a permis de connaître les méthodes les plus utilisées pour la résolution du problème électromagnétique qui sont divisé en méthodes analytiques et méthodes numériques, en détaillant certaines méthodes choisies qui seront utilisées dans le reste de notre étude comme la méthode des éléments finis.

Chapitre 02

MODELES NUMERIQUES 3D DES ISOLATEURS

2.1. Introduction

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.

L'objectif principal de cette simulation est de calculer la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un d'isolateur. Comme il était très difficile de mesurer expérimentalement de façon précise la distribution du potentiel et surtout du 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. À cet 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 et dans certains cas, ils ne répondent pas aux exigences spécifiques du problème. Cependant, ils offrent souvent une interface simplifiant la modélisation du problème (interface de conception et définition des propriétés des matériaux), la résolution du problème (définition des conditions initiales et conditions aux limites, maillage automatique ainsi que différents solveurs) et enfin, la visualisation des résultats (affichage des résultats sous forme de courbes, d'équipotentiels, de vecteurs, etc....).

2.2. Modélisations des isolateurs

Pour la modélisation des isolateurs on se contente de l'étude de ceux qui concernent les lignes de transmission (aériennes).

2.2.1. Isolateur en silicone

La figure (2-1) présente des isolateurs à long fût en silicone pour lignes aériennes de transmission et distribution. Il est constitué de :

1. Noyau

C'est l'élément mécanique porteur de l'isolateur, il est composé d'une tige en résine epoxy renforcée par des fibres de verre disposés dans une matrice à base de résine, la qualité des matériaux utilisés assure une résistance mécanique maximale en traction pour un fonctionnement fiable au cours du temps dans les conditions les plus sévères [28].

2. Revêtement

Constitué d'un caoutchouc élastomère silicone de haute qualité, il offre à l'isolateur une remarquable résistance aux différentes sollicitations atmosphériques et aux intempéries climatiques. Une gaine intermédiaire en matière isolante assurant la liaison entre le revêtement et le noyau [28].

3. Les extrémités métalliques

Ces extrémités sont faites en acier forgé galvanisé à chaud et assemblées par une liaison mécanique à sertissage coaxial pour assurer une haute résistance mécanique et aussi pour éliminer les infiltrations d'eau [28].

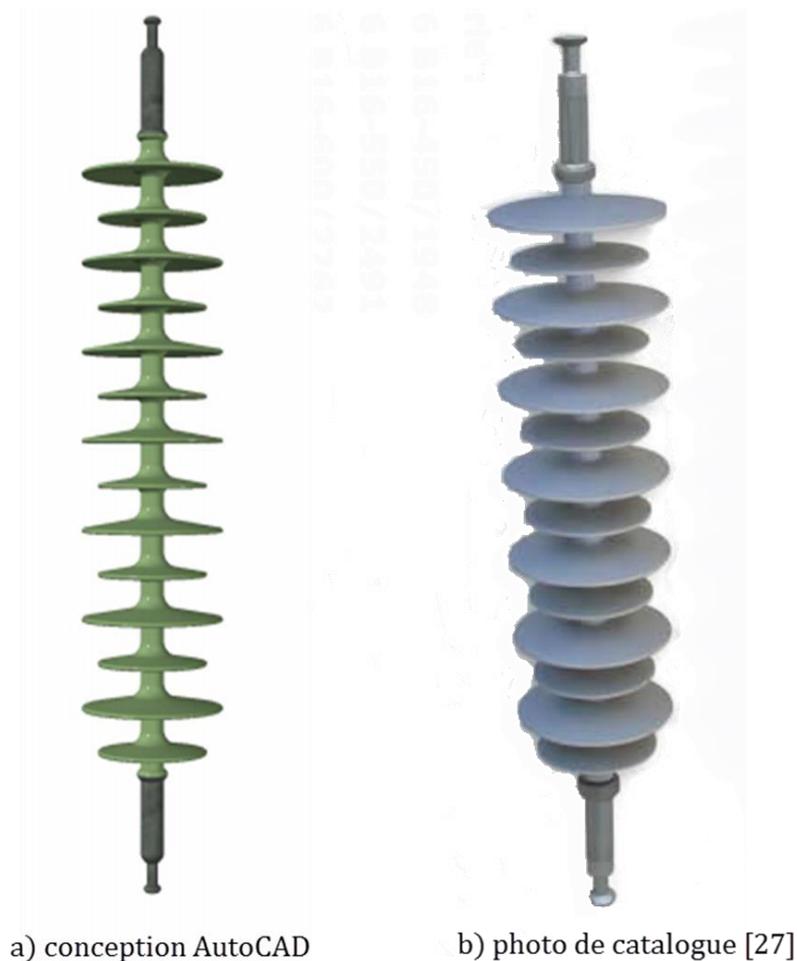


Figure 2-1 Isolateur en silicone

2.2.2. Chaînes d'isolateurs

Les isolateurs de suspension capot et tige : en verre trempé (Figure 2-2), et en porcelaine (Figure 2-3) destinés à équiper les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique, il est constitué par :

❖ **Partie isolante**

a) Verre

La partie isolante doit être fabriquée en verre trempé. Ce verre doit être homogène et correspondre dans la totalité de ses caractéristiques au groupe de matériaux [29]. Elle doit être exempte de défauts qui pourraient affecter les performances mécaniques, électriques ou la durée de vie de l'isolateur. Le verre ne doit pas avoir des bulles d'air de diamètre supérieur à 5 mm. La surface extérieure du verre

ne doit présenter aucun défaut, tel que soufflure ou pli, préjudiciable à une bonne tenue en service [29].

b) porcelaine

Le corps isolant de l'appareil est fabriqué à partir de haute qualité de porcelaine d'oxyde d'aluminium. Vitrage fournit une surface repoussant la saleté. Le vitrage est normalement de couleur brune, mais gris bleu peut aussi être fourni sur demande. Surface semi-conductrice vitrage peut être prévu pour des environnements pollués spéciales [31].

❖ Capot

Le capot de fixation doit être à logement de rotule. Il doit être en fonte malléable ferrique ou en fonte nodulaire et galvanisée à chaud. La résistance à la traction du matériau utilisé doit se situer entre 340 et 700 N/mm².

L'allongement doit être supérieur à 10%. La masse moyenne de revêtement de zinc doit être de 600g/m² (85 micromètres) sur l'ensemble des échantillons avec un minimum de 500 g/m² (70 micromètres) sur chaque échantillon. Cette valeur peut être portée à 790 g/m² (110 micromètres) pour les zones de forte pollution [29].

❖ Goupilles

Le système de verrouillage doit être constitué de goupille en acier inoxydable ou en bronze phosphoreux.

La goupille doit empêcher la rotule d'un isolateur de se détacher involontairement du logement de rotule de l'isolateur adjacent lors de la manutention ou de l'utilisation normale.

Les dimensions d'assemblage doivent correspondre aux dispositions des publications [29].

❖ Tige

La tige de fixation doit être à rotule, en acier forgé ou moulé et galvanisé à chaud. La résistance à la traction du matériau utilisé doit correspondre à la charge minimale de rupture de l'isolateur et à sa norme d'assemblage (diamètre). La masse

moyenne minimale de revêtement de zinc doit être identique à celle indiquée pour le capot[29].

❖ Matériaux descellement

Le scellement du capot et de la tige sur la partie isolante doit être effectué au moyen de ciment alumineux fondu ou de ciment portland permettant de passer avec succès les essais d'endurance thermo - mécanique [29].

❖ Rondelle anti corrosion

Les tiges des isolateurs destinés aux zones de pollution de niveau 3 et plus, doivent être équipées d'une rondelle anticorrosion en zinc pur de 99,7%. La rondelle est fondue sur la tige sans brèche. La surface de l'interface de fusion tige-rondelle doit être supérieure à 80% de la surface de l'interface totale tige-rondelle [29].



a) conception AutoCAD



b) photo de catalogue [30]

Figure 2-2 Isolateur en verre

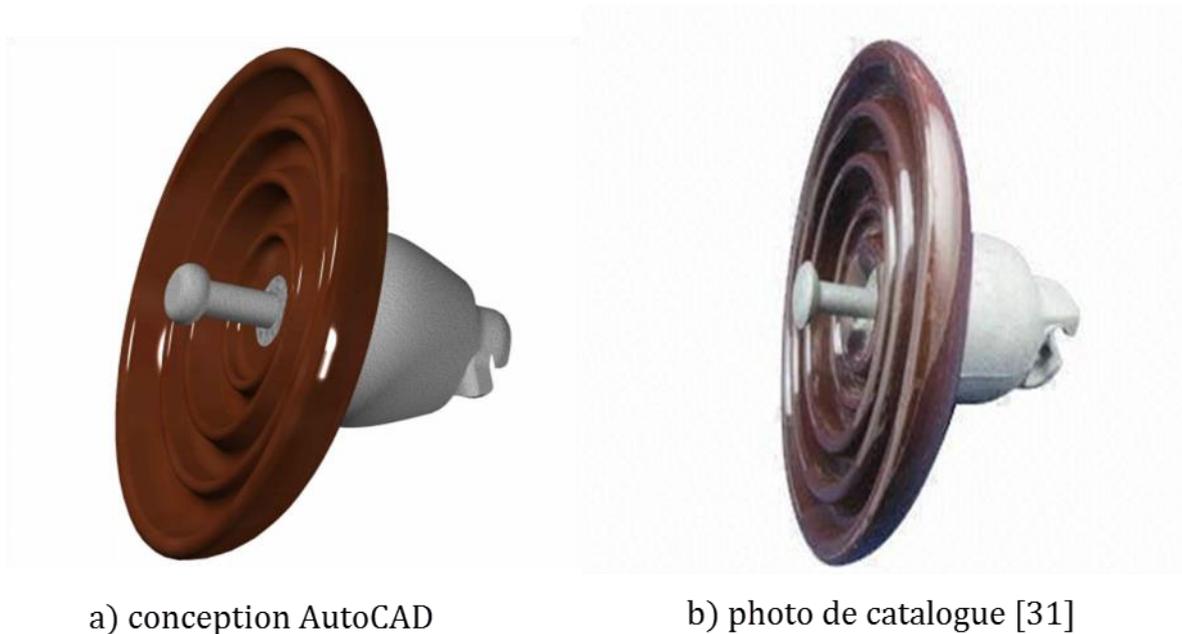


Figure 2-3 Isolateur en porcelaine

2.3. Description du logiciel

Le logiciel COMSOL Multiphysics 4.3b, anciennement appelé FEMLAB, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis.

Développé initialement comme une TOOLBOX de MATLAB, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement.

Sa spécificité est également de permettre de coupler différentes EDP, de manière à décrire des phénomènes Multi physiques, particulièrement adapté au micro-onde [20].

Il a été retenu pour les raisons suivantes :

- il est spécialisé dans la résolution de problèmes électromagnétiques,
- il permet de prendre en compte la présence de plusieurs diélectriques,
- il permet de modéliser une surface conductrice de faible épaisseur (couche de pollution),
- il permet de travailler en régime statique ou quasi-statique (50 Hz)

- enfin, il permet une modélisation rapide du problème.

Ce logiciel utilise la formulation intégrale de la M.E.F. dont le principe a été décrit au chapitre 2.

La modélisation et la simulation d'un isolateur peuvent se résumer en cinq étapes successives suivantes :

- La première étape consiste à définir la géométrie entière de modèle l'isolateur par l'intermédiaire d'une interface graphique de conception.
- La deuxième étape porte sur la définition des propriétés électriques des matériaux présents. Cela consiste à définir les permittivités relatives et les conductivités de chaque domaine. De plus, il faut faire le choix du type d'analyse, c'est-à-dire soit statique ($f=0$ Hz) ou soit quasi-statique ($f=50$ Hz).
- Dans la troisième étape on définit les conditions aux limites qui se traduisent par le potentiel imposé sur chaque électrode et déterminer les frontières de l'isolation électrique c'est-à-dire les frontières où le champ électrique peut être considéré comme nul.
- La quatrième étape consiste en la résolution du problème par l'application de la méthode numérique.

La dernière étape consiste à l'affichage des résultats obtenus parmi lesquels les équipotentielles, la norme du champ électrique et ses composantes normales et tangentielles, etc.

2.4. Étapes de résolution dans COMSOL Multiphysics

2.4.1. Choix du modèle

Nous allons commencer par le choix du modèle. Lancez donc le module électrostatique (es) dans le navigateur de modèle. Nous allons ici nous limiter à une étude à 3D.

2.4.2. Géométrie

La première chose à faire une fois le programme ouvert est de dessiner la géométrie de notre système (isolateur).

2.4.3. Introduction des propriétés des domaines

Le but ici est de définir les paramètres physiques qui définissent le domaine : la constante diélectrique, la conductivité, etc. Les paramètres sont évidemment liés à notre modèle physique étudié.

Pour résoudre les EDP, il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites cohérentes.

A chaque frontière de domaine est associé un segment orienté. Il est possible de donner des valeurs de condition aux limites pour chacun de ces segments. Les options seront différentes suivant qu'il s'agisse ou non d'une frontière intérieure au système.

2.4.4. Maillage des domaines

Le maillage des domaines est automatique. Il est possible de le raffiner globalement ou de manière localisée.

2.4.5. Résolution du problème

Lorsque le problème est complètement défini, il ne reste plus qu'à le résoudre. Il est possible d'accéder à des menus pour modifier la résolution. De même, lors de la résolution d'un problème multi- physique, il est possible de ne résoudre que pour une certaine partie des variables.

2.4.6. Analyse des résultats

Lorsque le programme a convergé vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de post traitement, qui permet d'analyser les résultats.

Il est possible de les visualiser sous forme de remplissage de couleur, de lignes de courant, de champ de flèches, etc...

2.5. Modélisation d'un isolateur propre et sec

2.5.1. Géométrie des isolateurs utilisés

Le COMSOL Multiphysics est un logiciel qui permet de visualiser la distribution des lignes du champ électrique, il nécessite la précision de la géométrie du modèle. Cependant, lorsque le modèle à étudier est compliqué (3D), on a recourt à utiliser les interfaces de liaison avec d'autres logiciels conçus spécialement pour le dessin, comme : l'AUTOCAD, Solide Works, Inventor...etc

Avec la nouvelle LiveLink pour l'interface AutoCAD, l'utilisateur peut transférer une géométrie 3D d'AutoCAD à COMSOL Multiphysics. La géométrie synchronisée dans le modèle COMSOL reste associative avec la géométrie dans l'AutoCAD. Cela signifie que les ajustements appliqués à la géométrie, comme les ajustements physiques ou maille sont retenus après les synchronisations ultérieures.

Dans ce qui va suivre, on présentera les dimensions géométriques des trois types des isolateurs étudiés.

2.5.1.1. Silicone

Les dimensions de l'isolateur en silicone étudié sont montrées dans la figure 2-4.

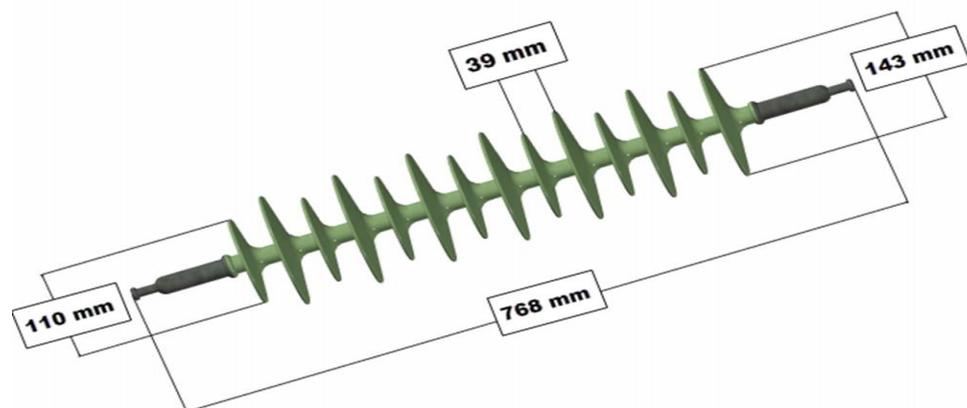


Figure 2-4 Dimensions générales de l'isolateur en silicone

La taille totale de l'isolateur est de 768 mm environ, il est composé de 14 ailettes, et le diamètre de la fibre en verre est environ 16 mm, Le diamètre des grandes ailettes est de 143 mm alors que le diamètre des petites ailettes est de 110 mm, ce qui donne une ligne de fuite d'environ 1948mm.

2.5.1.2. Capot et tige en verre

Pour les isolateurs capot et tige, on a étudié une chaîne composée de cinq isolateur en verre type U120B [32] (figure 2-5), chacun d'eux a une pas de 146 mm, et un diamètre de 255 mm, tandis que la ligne de fuite totale de la chaîne est autour de 1575mm.

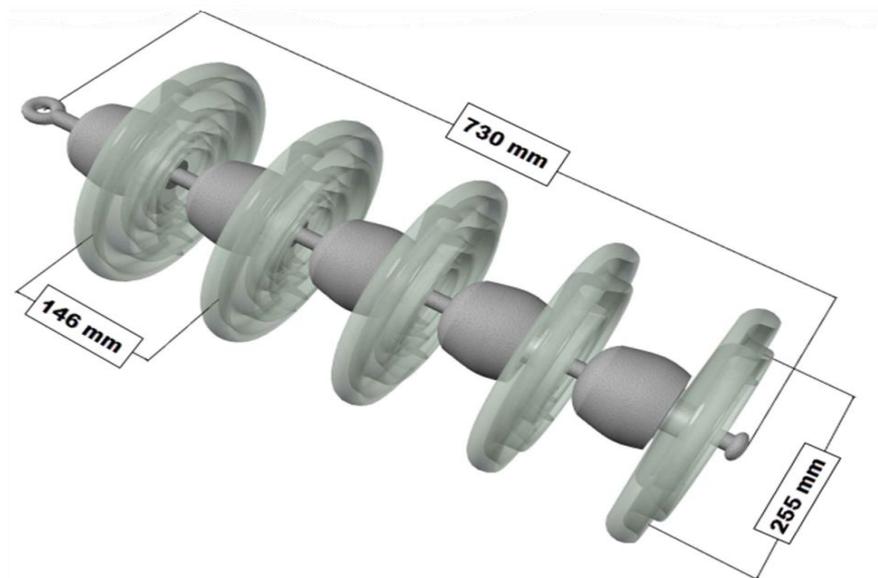


Figure 2-5 Dimensions générales de l'isolateur en verre

2.5.1.3. Capot et tige porcelaine

De même pour le cas d'isolateur capot et tige en porcelaine (figure 2-6), les dimensions sont semblables à celle en verre présentée précédemment.

Le pas de cet élément est de 146 mm, son diamètre est 255 mm, tandis que la ligne de fuite est autour de 315mm.

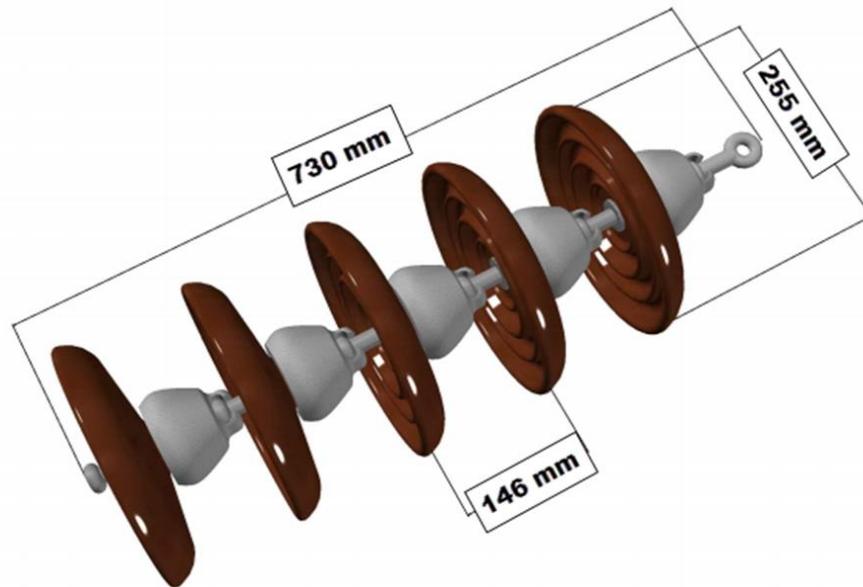


Figure 2-6 Dimensions générales de l'isolateur en porcelaine

2.5.2. Identification des domaines dans le logiciel COMSOL Multiphysics

On a défini les différents domaines de l'isolateur étudié dans COMSOL Multiphysics en introduisant pour chacun d'eux la constante diélectrique relative ϵ_r et la conductivité σ .

2.5.2.1. Silicone

Le domaine des électrodes en acier où la conductivité et le constant diélectrique relatif sont définis directement par les valeurs de σ et ϵ_r d'acier qui existe dans la bibliothèque des matériaux du logiciel. Les constantes diélectriques relatives de domaine de fibre en verre ont été prise égale à 4,2 leur conductivité est très faibles, pour le présent travail la valeur $\sigma = 10^{-14}$ S a été considérée. Les valeurs de la conductivité et le constant diélectrique de domaine de silicone ont été prise égale à 10^{-12} S et 3.9 respectivement.

Le domaine de l'air a été défini par une conductivité nulle et un constant diélectrique relatif égal à 1. Les donner nécessaire sont montré dans le tableau 2-1.

Tableau 2-1 Données nécessaires pour isolateur en silicone

Domaine	Constante diélectrique relative ϵ_r	Conductivité σ (S).
acier	1,0	1.10^{20}
Silicone	3,9	1.10^{-12}
Air	1,0	1,0
Fibres de verre	4,2	1.10^{-14}

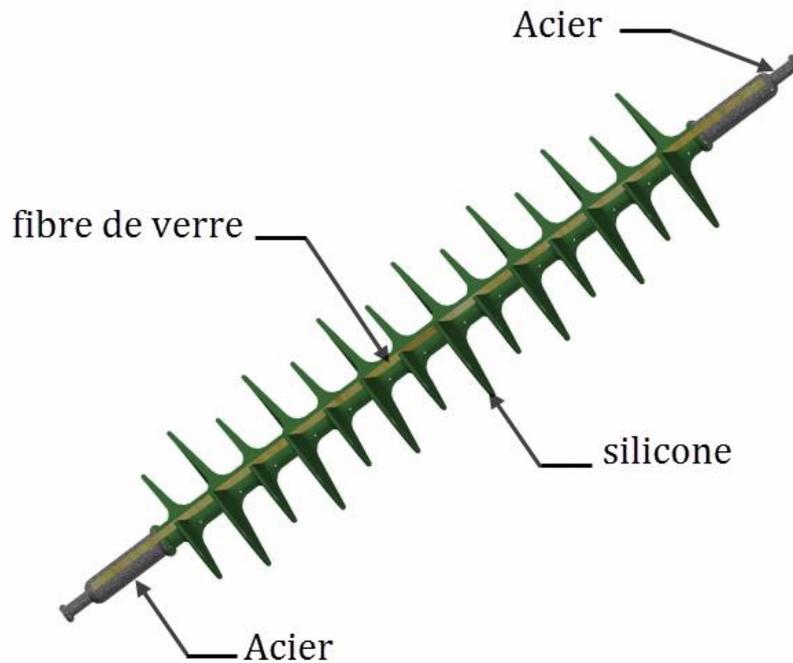


Figure 2-7 Identification des différents domaines de l'isolateur en silicone

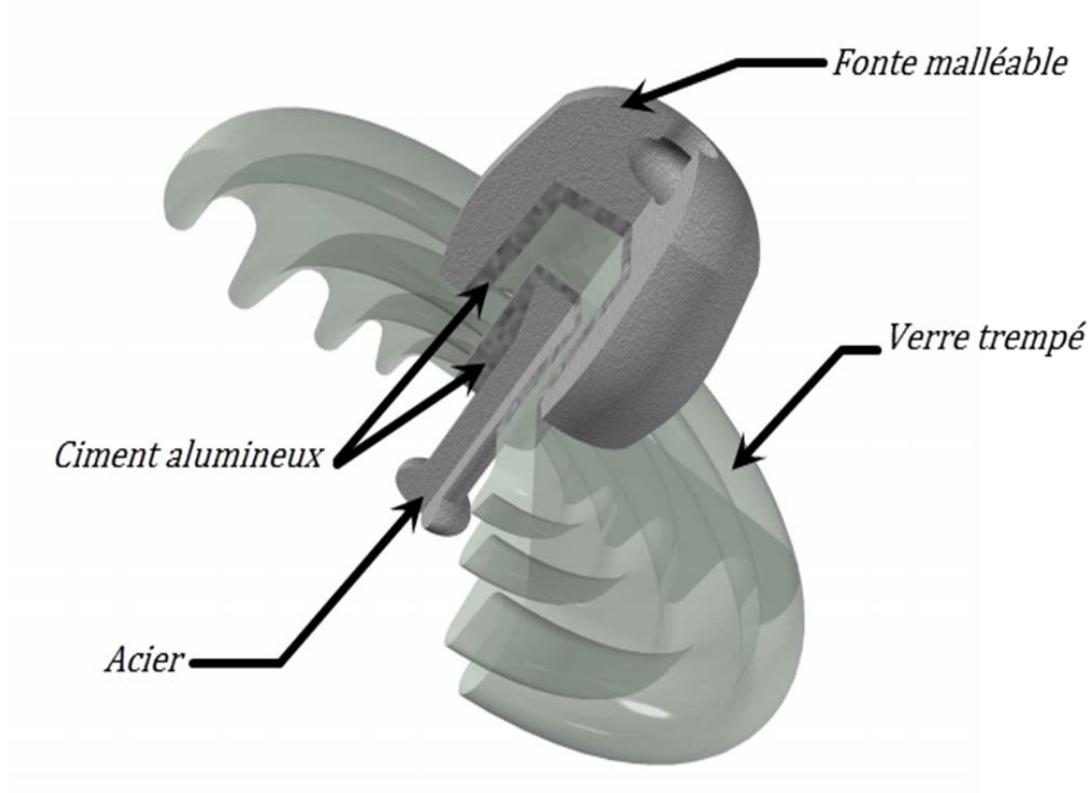
2.5.2.2. Capot et tige en verre

Il existe cinq domaines, chacun est caractérisé par le constant diélectrique relatif ϵ_r et la conductivité σ . On tire ces valeurs à l'aide de la bibliothèque des matériaux s'il existe, sinon on cherche dans les revues bibliographiques.

Les caractéristiques électriques des domaines sont résumées dans le tableau. 2-2

Tableau 2-2 Données nécessaires pour isolateur en verre

Domaine	Constante diélectrique relative ϵ_r	Conductivité σ (S).
<i>Verre trempé</i>	4,20	10-14
<i>Fonte malléable</i>	1,00	$4,03 \cdot 10^6$
<i>Ciment alumineux</i>	5,90	10^{-10}
<i>Acier</i>	1,00	$4,00 \cdot 10^6$
<i>Air</i>	1,00	1,00

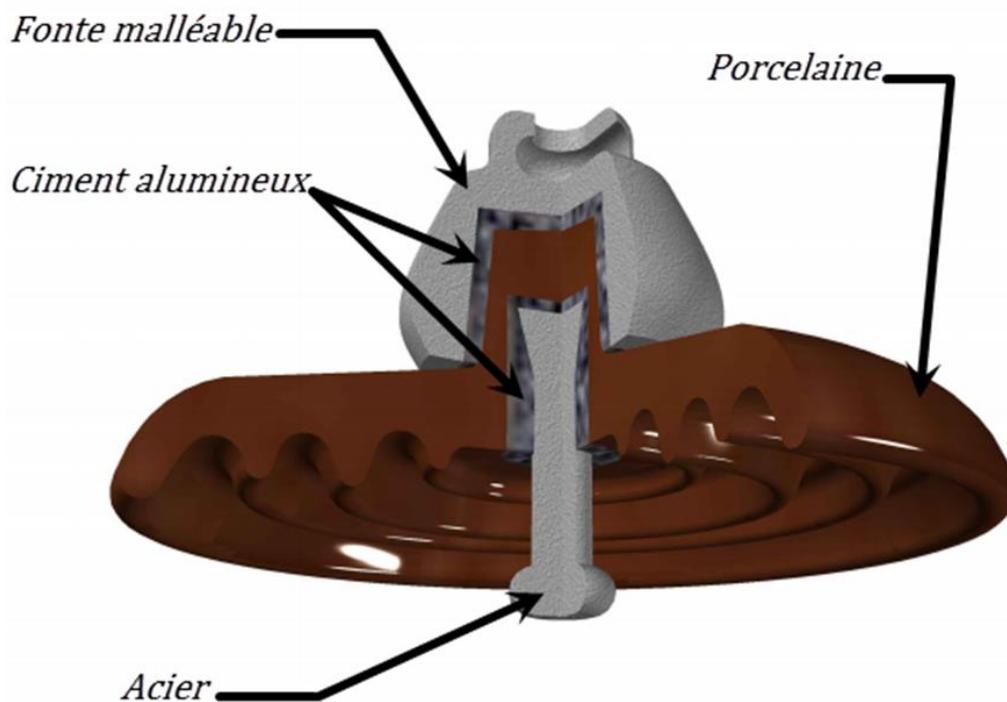
**Figure 2-8 Identification des différents domaines de l'isolateur en verre**

2.5.2.3. Capot et tige en porcelaine

Les différents domaines du modèle étudié ont été identifiés en introduisant le constant diélectrique relatif ϵ_r et la conductivité σ . Les valeurs ϵ_r et σ des différents domaines de notre système sont résumés dans le tableau 2-3.

Tableau 2-3 Données nécessaires pour isolateur en porcelaine

Domaine	Constante diélectrique relative ε_r	Conductivité σ (S).
<i>Porcelaine</i>	6,0	0,044
<i>Fonte malléable</i>	1,00	$4,03 \cdot 10^6$
<i>Ciment alumineux</i>	5,90	10^{-10}
<i>Acier</i>	1,0	$1 \cdot 10^{20}$
<i>Air</i>	1,0	1,0

**Figure 2-9** Identification des différents domaines de l'isolateur en porcelaine

2.5.3. Conditions aux limites

La condition adéquate d'interface aux interfaces entre différents éléments du modèle est comme suite :

$$n_2 \cdot (D_1 - D_2) = \rho_s \quad (2.1)$$

Pour notre étude la charge d'espace ρ_s est nulle. Donc, l'équation (2.1) devient:

$$(D_1 - D_2) = 0 \quad (2.2)$$

On associe aux équations les conditions aux limites sur les frontières du domaine de résolution.

Les conditions aux limites du potentiel électrique sont les suivantes :

Nous avons pris comme conditions aux limites pour l'électrode inférieur du isolateur un potentiel (haute tension) et celui de l'électrode supérieur un potentiel nul ou encore prendre la condition prédéfinie dans le logiciel 'masse'.

Le champ électrique est supposé nul (isolation électrique) suffisamment loin de l'isolateur.

2.5.4. Maillage des domaines

La qualité du maillage est cruciale pour la qualité des résultats.

En 3D, les éléments sont des tétraèdres, pentaèdres ou hexaèdres qui sont déjà présentés dans le chapitre 1.

Le maillage du domaine d'étude en 3D a été affiné au niveau des isolateurs et les pièces métalliques, pour avoir une meilleure précision.

Le choix de maillage de sorte à obtenir un temps de simulation réduit avec un résultat satisfaisant.

Le maillage est illustré dans les figures (2-10).

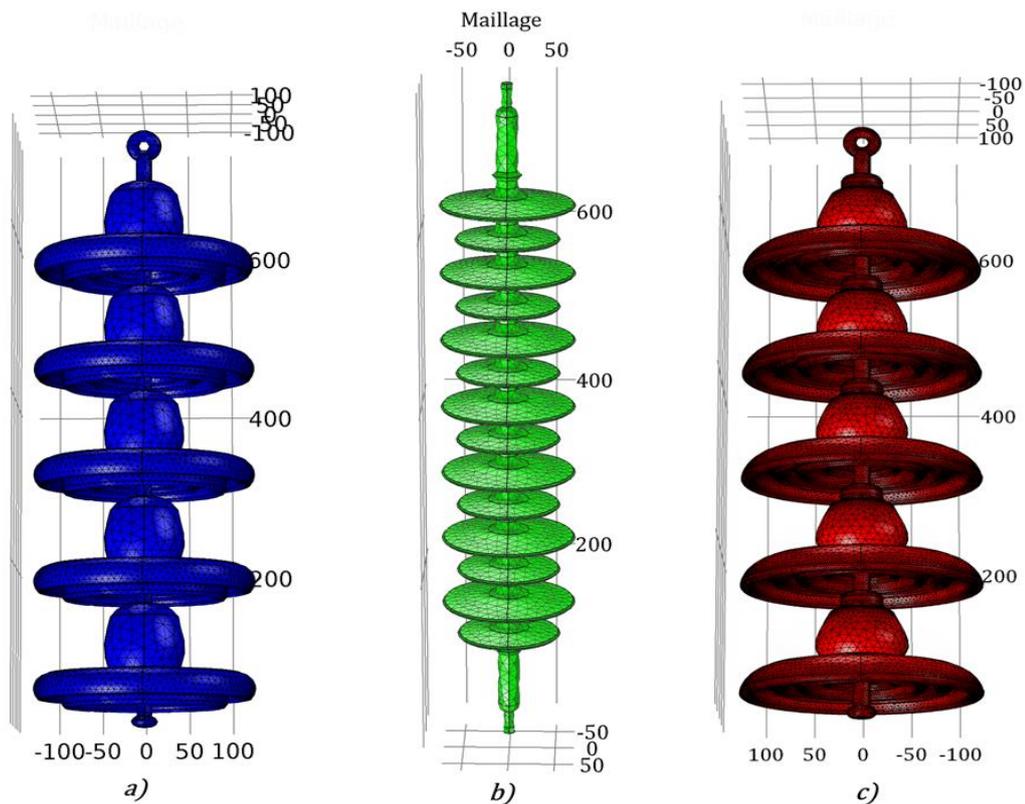


Figure 2-10 Maillage des isolateurs

a) en verre, b) en silicone, c) en porcelaine

2.5.5. Discussion des résultats

2.5.5.1. Études de la distribution de tension dans les conditions propres et sain

Pour étudier l'effet du type d'isolant sur le champ électrique et de la tension, de la simulation de chaînes d'isolateurs dans les différents matériaux a été réalisé par un logiciel de COMSOL basé sur FEM et les résultats ont été présentés.

En raison du grand nombre de simulations effectuées, seuls quelques résultats de type de silicone, porcelaine et verre chaînes de isolateurs ont été extraites à partir du logiciel COMSOL et est présenté ici comme un échantillon. Les résultats d'autres types d'isolant sont discutés à travers des figures suivantes.

La figure (2-12), représente cartographies globales des résultats de simulation de la distribution de tension sur la surface pour un isolateur propre (silicone, verre et porcelaine).

De ces résultats nous pouvons conclure que la répartition de la tension est uniforme et que la zone proche de l'électrode HT est la plus contrainte alors que celle près de l'électrode terre la tension est presque nulle.

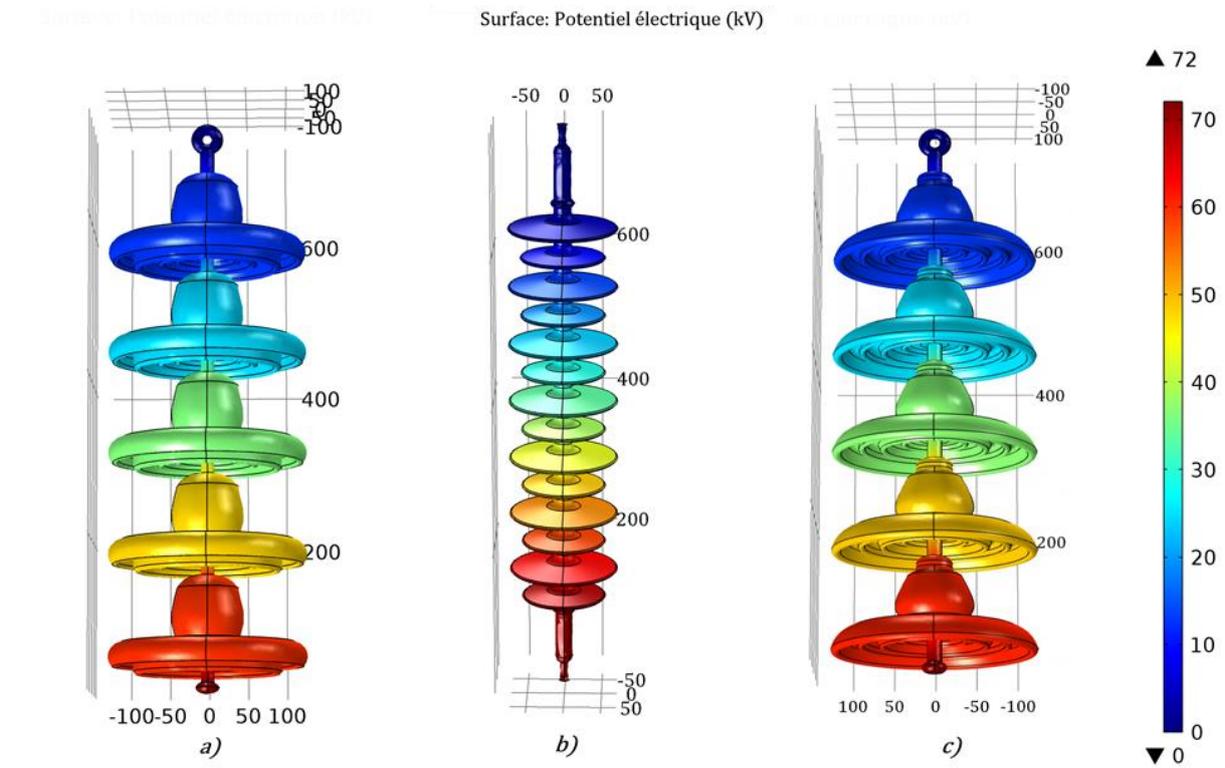


Figure 2-11 Distribution de la tension

a) en verre, b) en silicone, c) en porcelaine

2.5.5.2. Études de la distribution de tension axiale

Les distributions du potentiel et du champ électrique ont été calculées le long d'un axe de référence donnée figure (3-11).

- ✓ L'axe vertical parallèle de distance 5cm par rapport à l'axe d'isolateur en silicone. (l'axe de référence en rouge et l'axe d'isolateur en bleu).
- ✓ L'axe vertical parallèle de distance 10cm par rapport aux axes des isolateurs en porcelaine et en verre. (l'axe de référence en rouge et l'axe d'isolateur en bleu).

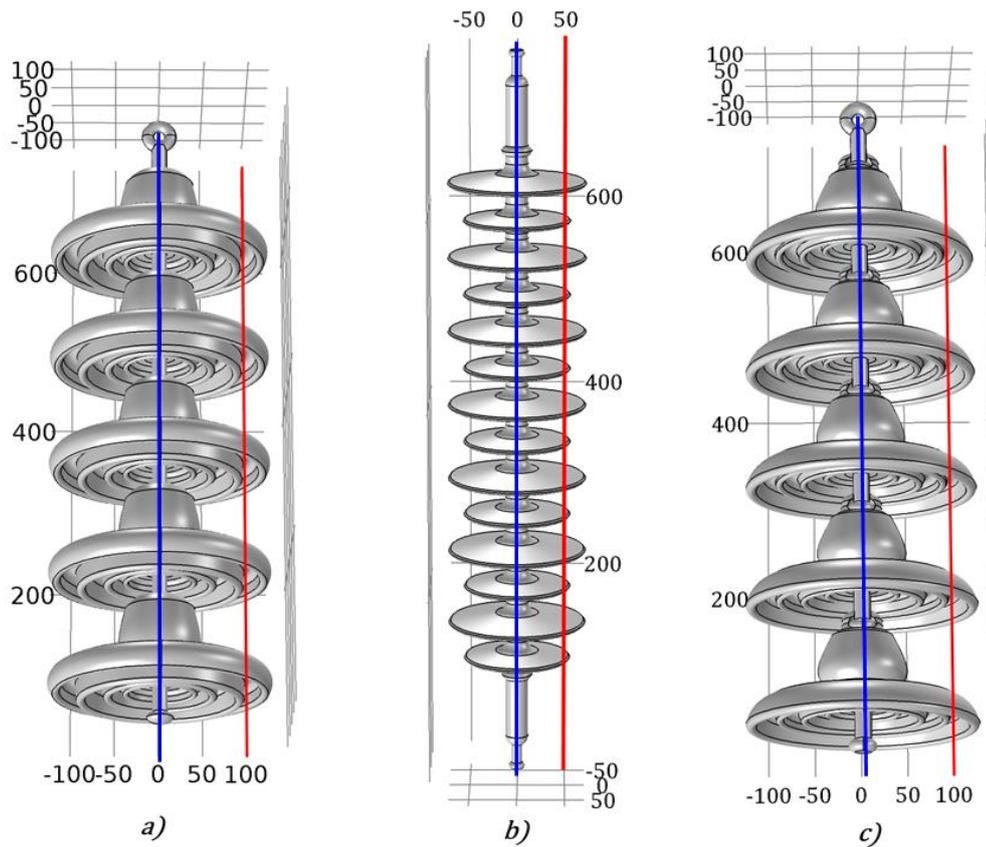
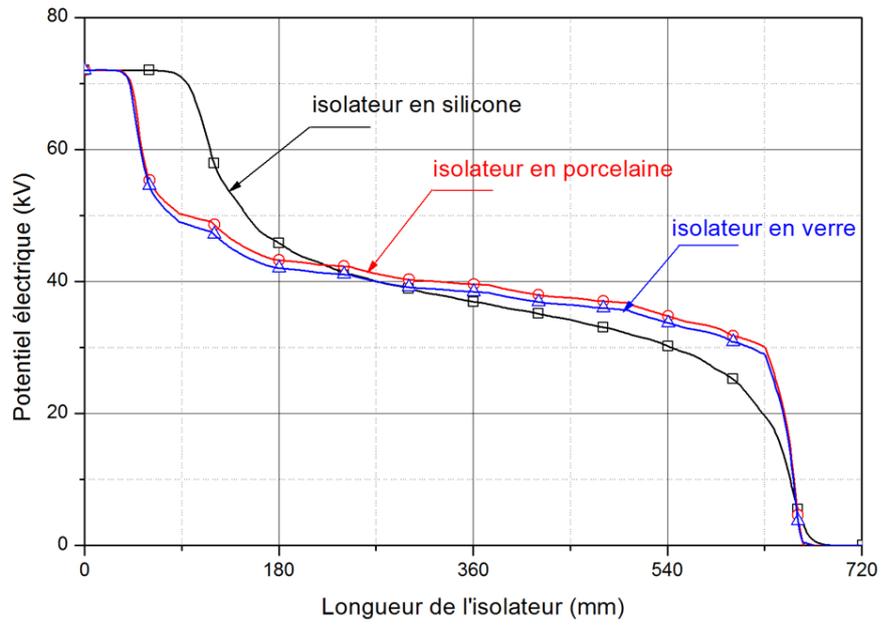


Figure 2-12 Lignes de référence du potentiel

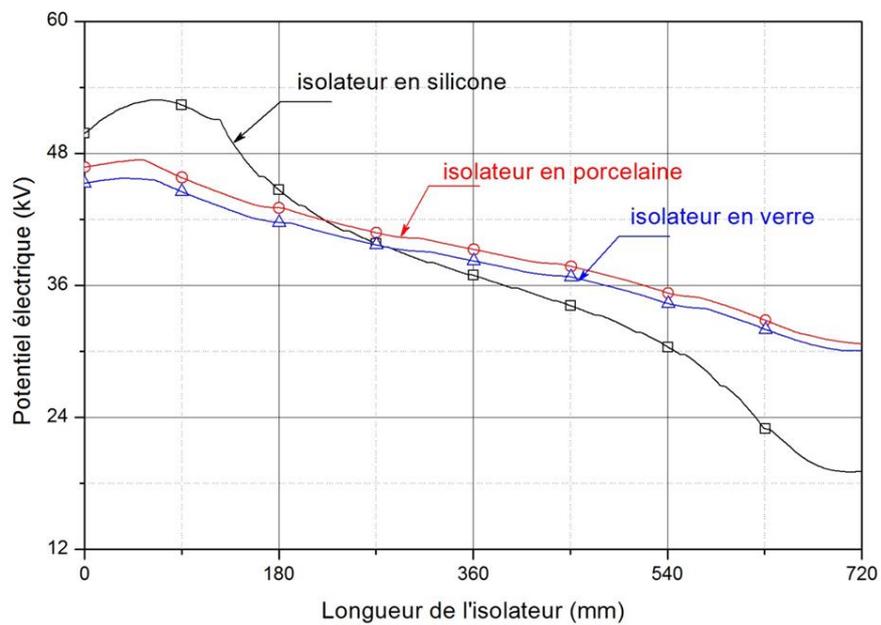
a) en verre b) en silicone c) en porcelaine

La figure (2-13) représente la répartition de la tension des isolateurs en fonction de longueur de l'isolateurs pour les deux axes de référence choisis ; on remarque, comme il était attendu que les valeurs maximales des potentiels sont près de l'électrode haute tension et commence à décroître jusqu'à son annulation quand on se rapproche de l'électrode de masse.

On observe que les répartitions de la tension dans les deux isolateurs (verre, porcelaine) est presque les mêmes, mais la répartition de la tension dans l'isolateur en silicone représente une différence remarquable (la plus élevées et la plus faible).



a) l'axe de référence centré (x=0)



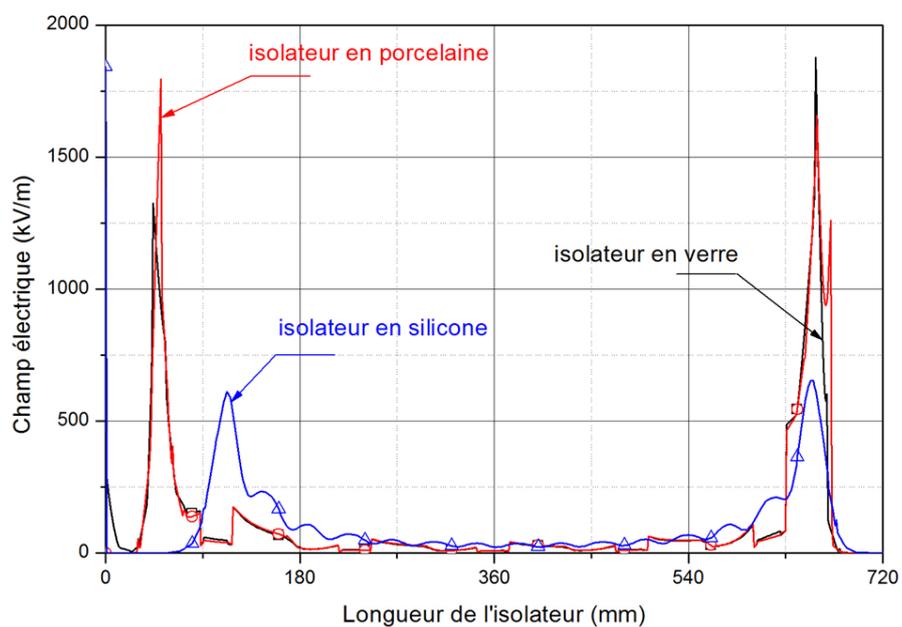
b) l'axe de référence à distance

Figure 2-13 Potentiel électrique le long des isolateurs

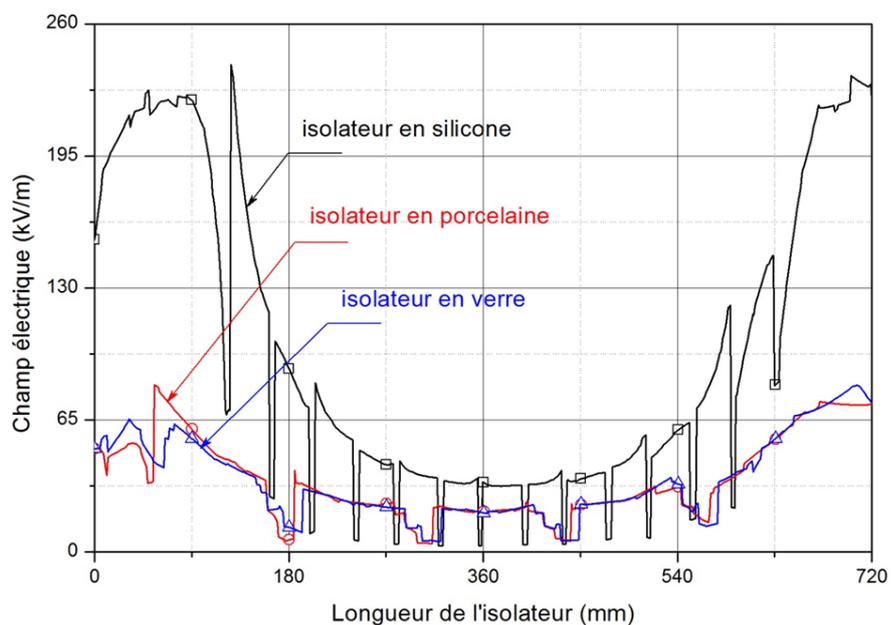
2.5.5.3. Étude de la distribution du champ électrique dans les conditions propres

Figures 2.14 a et 2.14 b montrent la variation du champ électrique des trois isolateurs (verre, silicone et porcelaine) en fonction de la longueur des isolateurs

pour les axes de référence centré et à distance respectivement.



a) l'axe de référence centré ($x=0$)



b) l'axe de référence à distance

Figure 2-14 Champ électrique le long des isolateurs

On constate que le champ électrique pour un axe à distance est intense près de l'électrode active, il diminue au fur et à mesure qu'on se dirige dans l'intervalle [180 : 540] et augmente rapidement vers l'électrode de terre. D'autre part, le champ électrique est maximal pour l'isolateur en silicone par rapport aux isolateurs en verre et en porcelaine.

Dans le cas où l'axe de référence est centré, le champ électrique s'annule autour de cet axe néanmoins, aux électrodes le champ électrique devient maximal

2.6. Conclusion

L'objectif fondamental de ce chapitre est la modélisation des différents isolateurs pour calculer la distribution de tension tout au long.

Pour mieux représenter les isolateurs, la simulation 3D est faite en tenant compte de : la géométrie de son design, l'introduction des propriétés des matériaux le constituant et les conditions aux limites (masse et potentiel) ainsi que le maillage, en terme de ce chapitre nous avons présenté les résultats obtenus.

Chapitre 03

COMPORTEMENT DES ISOLATEURS POLLUES SOUS DIFFERENTES FORMES DE TENSION

3.1. Introduction

L'expérience a montré que le pouvoir isolant des isolateurs des lignes aériennes est considérablement réduit par la présence d'une couche conductrice étrangère qui recouvre pratiquement toute la surface de l'isolateur [17].

Dans cette partie du travail, l'étude de la répartition de la tension et la distribution du champ électrique en présence d'une couche de pollution à la surface de l'isolateur a été faite. Il est important de préciser les trois types d'isolateur qui ont été utilisés : isolateur de suspension en silicone, celui en verre et l'isolateur extérieur en porcelaine.

Ainsi, les formes de tension appliquée dans les tests s'étale entre la continue, l'alternative et l'impulsionnelle.

Elle aura pour objectifs de voir l'effet de la nature de pollution sur la distribution de tension.

3.2. Identification des domaines de pollution

Dans le but de l'identification du domaine pollue, des tests de simulation ont été effectués sur des différents modèles numériques des isolateurs avec une couche de pollution non uniforme, dont les caractéristiques des couches de pollution de l'ailette supérieur et inférieur sont respectivement: la conductivité égale à $5,15 \cdot 10^{-4}$ S/m, et la permittivité égales à 81, conductivité égale à $5,15 \cdot 10^{-4}$ S/m, et la permittivité égales à 40, est appliquée sur les trois différents types des isolateurs : porcelaine, silicone et verre. La figure 4-1 montre la couche de pollution à la surface des isolateurs étudiés.

Pour le reste du domaine, les conditions sont définies automatiquement par le COMSOL Multiphysics, et c'est ce qu'on appelle les conditions de continuité.

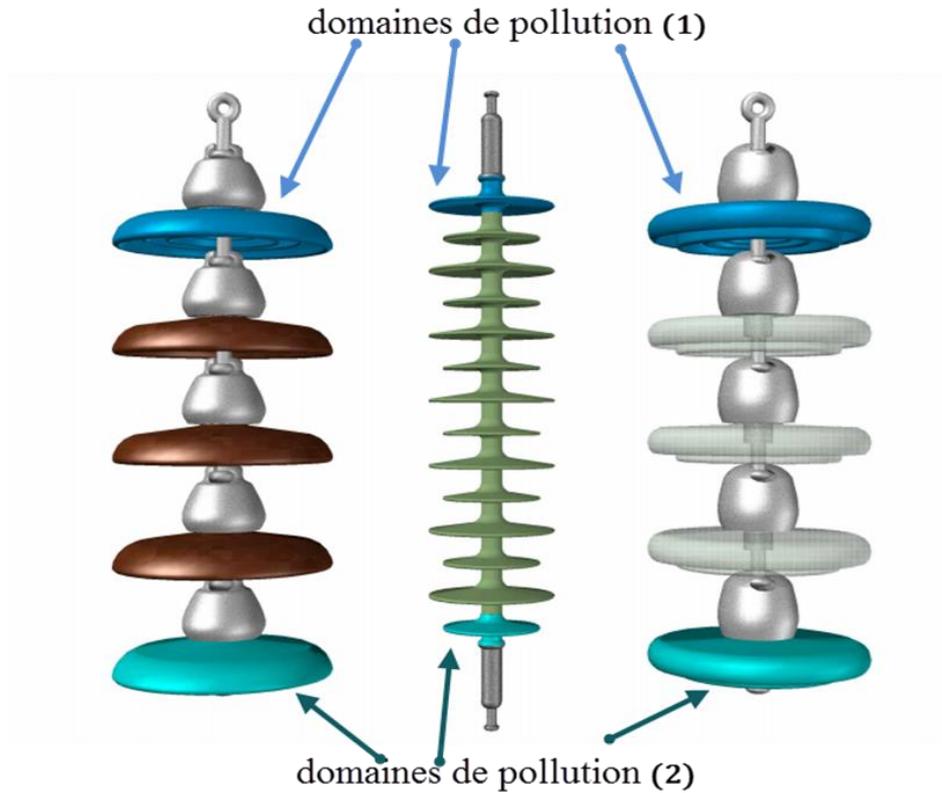


Figure 3-1 Identification des différents domaines de pollution

3.3. Conditions aux limites

Vu l'importance des conditions aux limites, il est impératif de les préciser pour le bon fonctionnement du modèle :

Pour les électrodes des trois types d'isolateur: une tension nulle pour l'électrode supérieure (prise comme terre pour le logiciel utilisé). Et trois types de tension pour celle inférieure.

- $V = 72 \text{ kV}$ pour la tension continue.
- $V = 72. \sin(314. t) \text{ kV}$ pour la tension sinusoïdal.
- $V = 1800. (e^{-0.01486.10^{-6}.t} - e^{-2.80145.10^6.t}) \text{ kV}$ pour la tension l'impulsionnelle.

La figure (3-2) illustre l'allure des tensions appliquées.

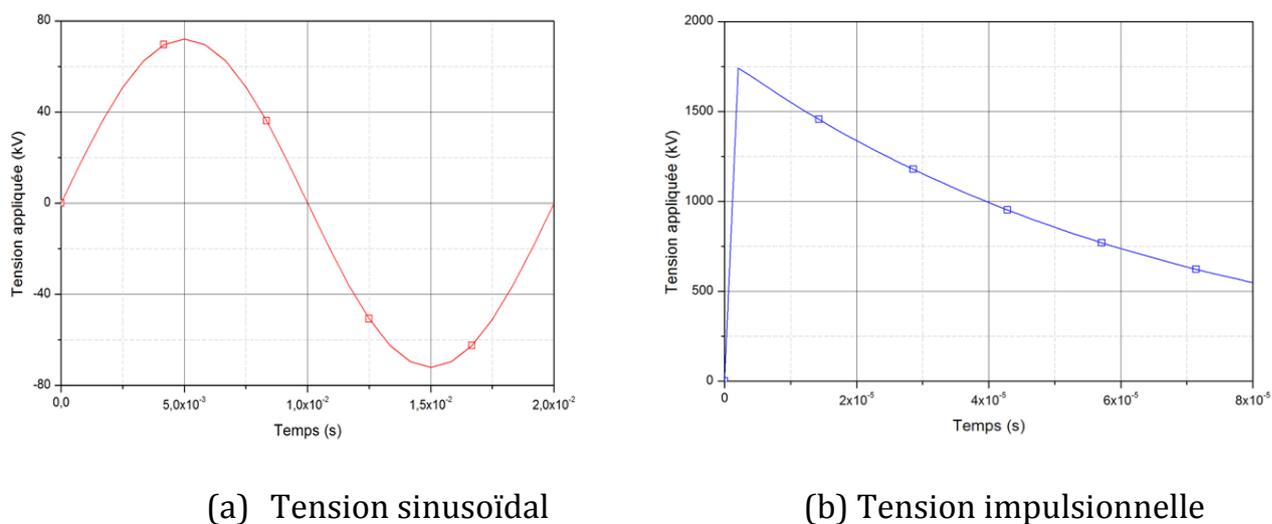


Figure 3-2 La forme de tension appliquée

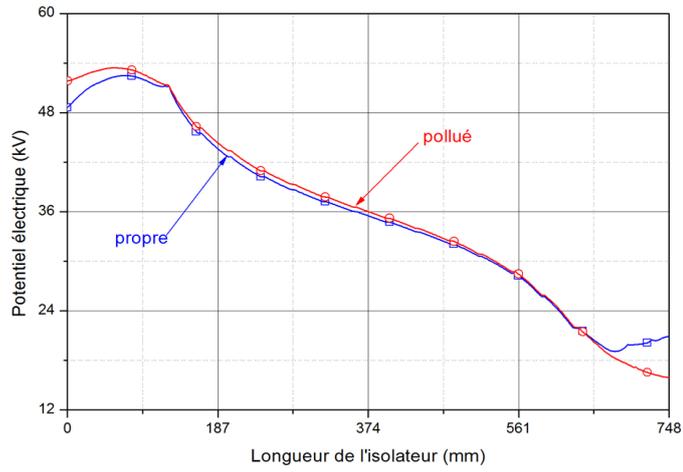
Comme il a été signalé la pollution joue un rôle important dans la détermination de la répartition de la tension le long de l'isolateur. Pour élucider cet effet, trois cas de la forme de tension ont été appliqués. Le cas sans pollution a été aussi introduit pour but de comparaison.

3.4. Tension continu

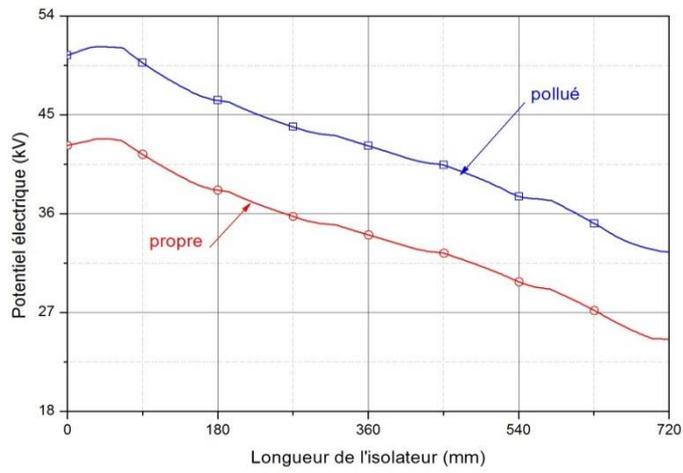
3.4.1. Études de la distribution de tension dans les conditions pollué

Dans cette partie du travail, l'étude de la répartition de la tension en présence d'une couche de pollution à la surface de l'isolateur se fait sous tension continu. On présente la répartition axiale de la tension le long des isolateurs dans la figure (3-3).

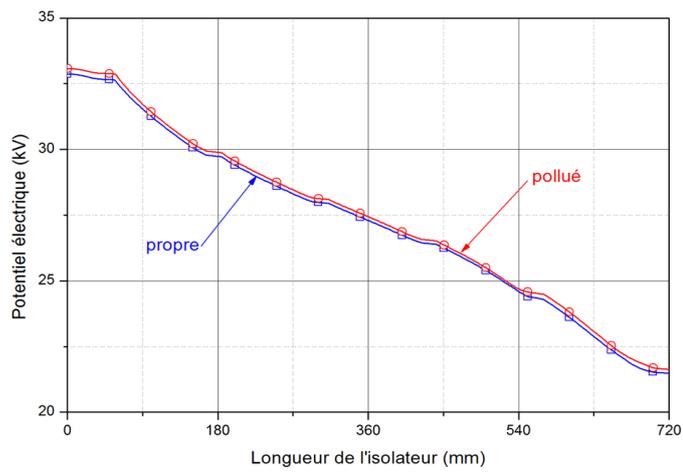
On remarque que le potentiel électrique est uniformément distribué sur le long de l'isolateur, le potentiel maximal est remarqué sur l'électrode de l'alimentation. Une légère déformation entre le cas pollué et propre due à l'effet des caractéristiques électrique de la couche de pollution, l'augmentation de la conductivité de la pollution rend toujours le potentiel électrique plus faible que dans le cas d'une surface propre et sec.



a) Isolateur en silicone



b) Isolateur en verre



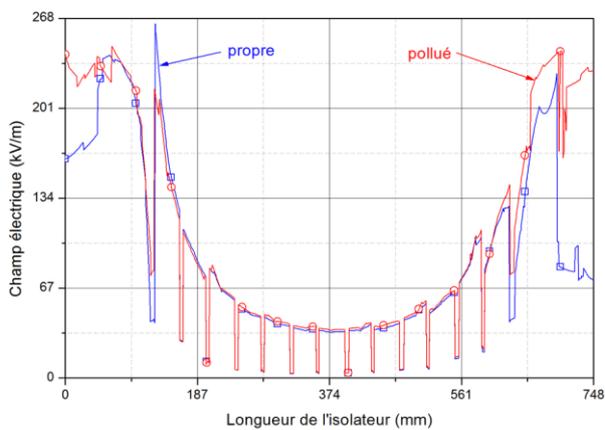
c) Isolateur en porcelaine

Figure 3-3 Potentiel électrique sous tension continu

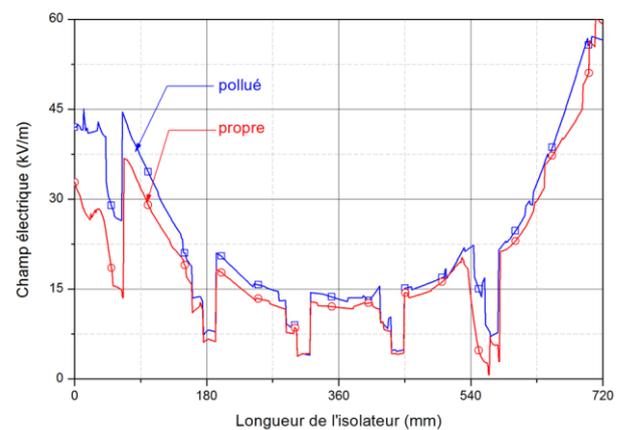
3.4.2. Études de la distribution du champ électrique dans les conditions polluées

La Figure (3-4) représente la distribution du champ électrique autour d'isolateur pour le cas propre et pollué, ce résultat est obtenu par l'application d'une tension continue.

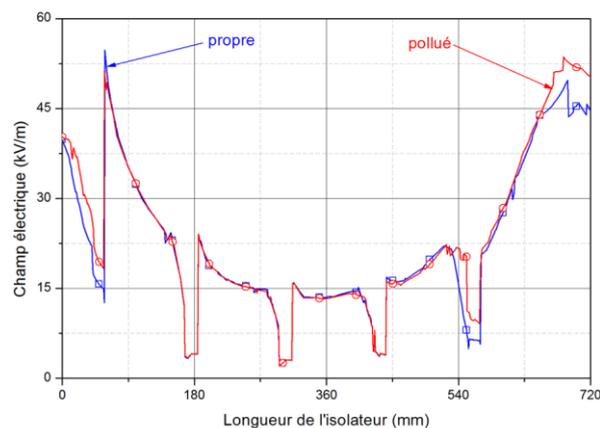
La déformation du champ est causée par l'effet de la différence entre les permittivités des matériaux isolants (silicone, porcelaine et verre) et l'air. La comparaison entre les deux cas montre que le champ électrique est plus grand dans le cas pollué. Le champ est concentré dans les deux électrodes et son valeur est minimale au milieu d'isolateur.



a) Isolateur en silicone



b) Isolateur en verre



b) Isolateur en porcelaine

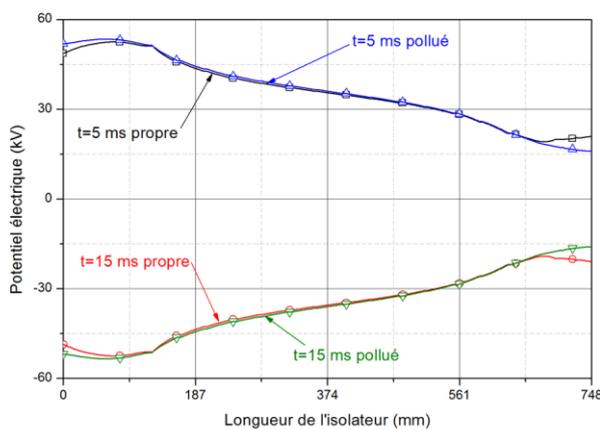
Figure 3-4 Champ électrique sous tension continu

3.5. Tension alternative

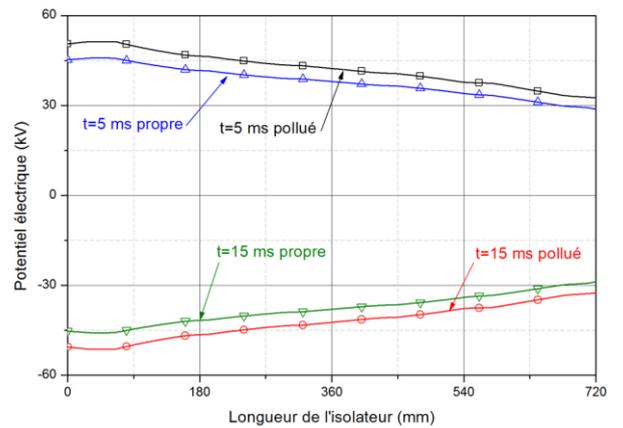
3.5.1. Études de la distribution de tension dans les conditions polluée

La Figure (3-5) représente la distribution du potentiel électrique le long d'un axe vertical parallèle de l'axe d'isolateur pollué et propre. (Silicone, porcelaine et verre).

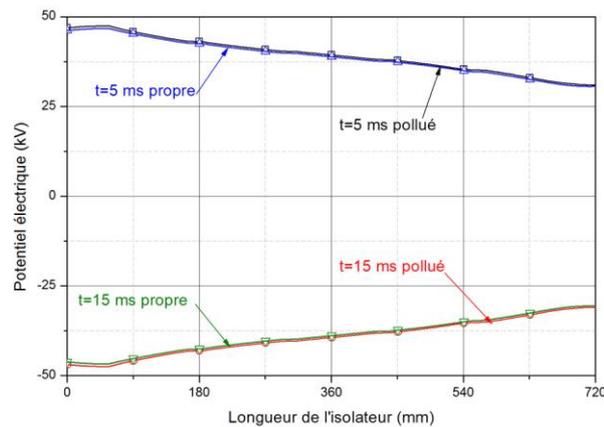
Les courbes sont obtenues par l'application d'une tension alternative dans différent instants.



a) Isolateur en silicone



b) Isolateur en verre



a) Isolateur en porcelaine

Figure 3-5 Potentiel électrique sous tension alternative

On observe que le potentiel électrique est uniformément distribué sur le long de l'isolateur.

Il atteint son valeur maximal dans l'électrode de l'alimentation ($L=0$) et se diminuer uniformément quand on se rapproche de la masse.

On remarque une légère déformation dans la distribution du potentiel entre le cas d'un isolateur propre et polluée, le potentiel est toujours plus grand sur la surface propre que sur les surfaces polluées à cause des caractéristiques électriques de la couche de pollution telle que la permittivité.

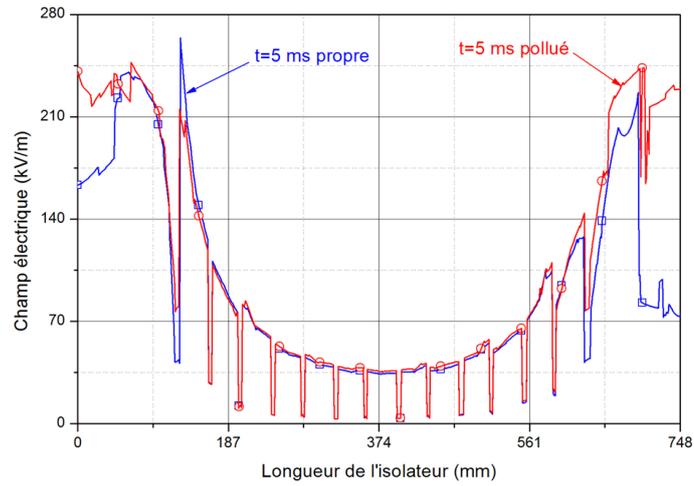
D'après les résultats on remarque que le potentiel sur la surface d'isolateur varie en fonction de la forme d'onde de la tension appliqué. Pour une tension sinusoïdale, le potentiel est maximal dans les instants 5 et 15 ms, Et il devient minimal ou bien nul dans les instants 0, 10 et 20 ms. Les instants 5 ms et 15 ms ont été choisis pour bien illustrer la variation du potentiel en fonction de l'amplitude instantané de la tension alternative appliquée.

3.5.2. Études de la distribution du champ électrique dans les conditions pollué

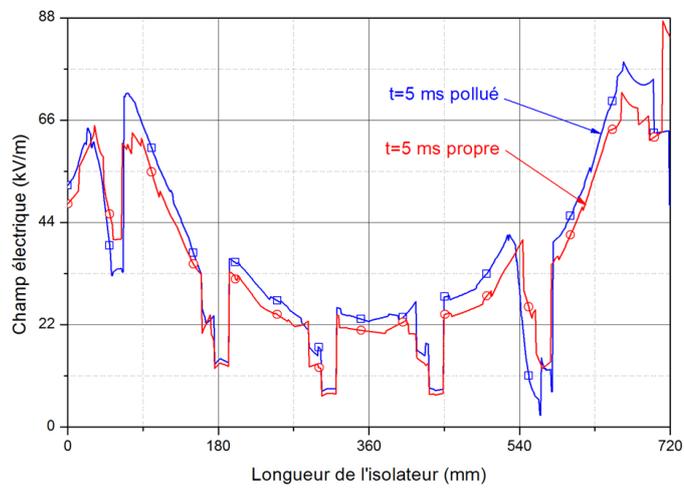
La Figure (3-6) représente la distribution du champ électrique autour des isolateurs étudié sur le même précédent axe pour le cas propre et pollué,

Ce résultat est obtenu par l'application d'une tension sinusoïdale. Cette allure du champ est causée par l'effet de la permittivité des matériaux traversé par le champ électrique dans l'interface (silicone, air), (porcelaine, air), (verre, air). La comparaison entre les deux cas montre que le champ électrique est plus grand dans le cas pollué.

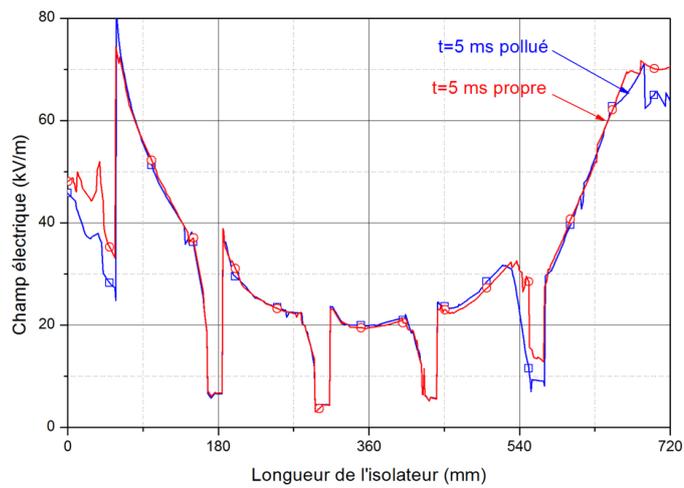
Le champ est concentré dans les deux électrodes et son valeur est minimale au milieu d'isolateur. le champ atteint son valeur maximal à l'instant $t= 0.015s$.



a) Isolateur en silicone



b) Isolateur en verre



c) Isolateur en porcelaine

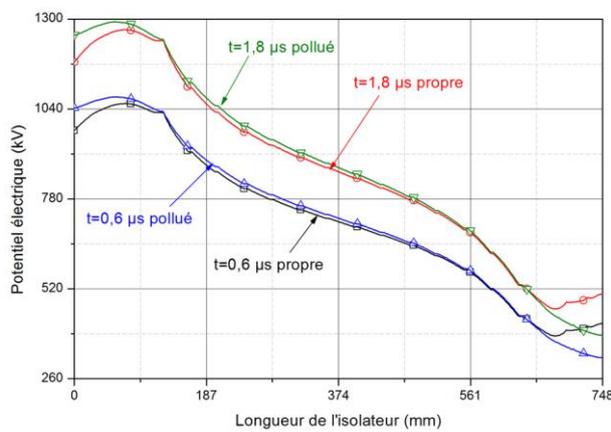
Figure 3-6 Champ électrique sous tension alternative

3.6. Tension impulsionnelle

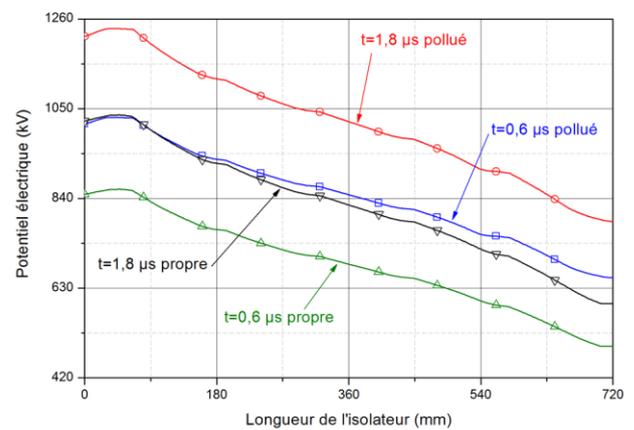
3.6.1. Études de la distribution de tension dans les conditions polluée

La Figure (3-7) représente la distribution du potentiel électrique le long d'un axe vertical parallèle de l'axe d'isolateur (propre et polluée). Les courbes sont obtenues par l'application d'une tension de choc dans différents instants. On remarque que le potentiel est maximal au point d'alimentation (1800kV) et minimal dans la masse.

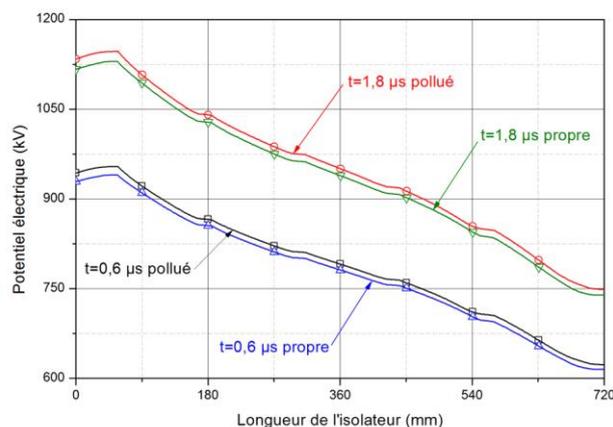
On remarque que le potentiel est plus grand sur la surface propre que sur la surface polluée à cause des caractéristiques électriques de la couche de pollution telle que la conductivité.



a) Isolateur en silicone



b) Isolateur en verre



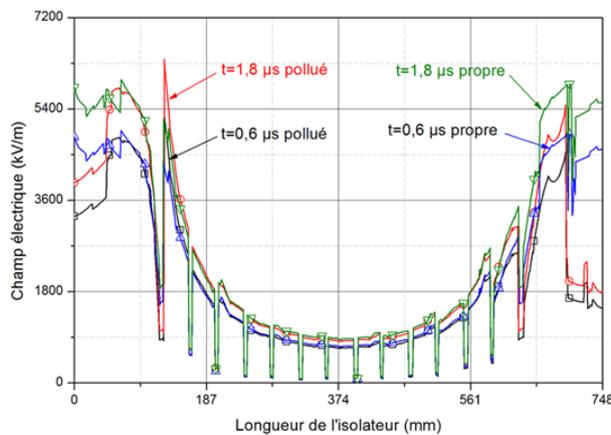
b) Isolateur en porcelaine

Figure 3-7 Potentiel électrique sous tension impulsionnelle

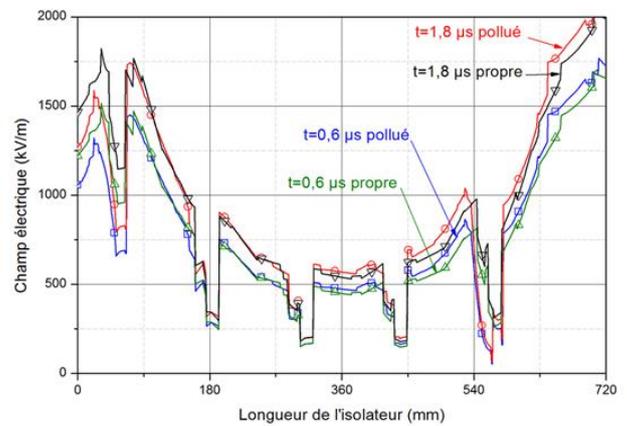
3.6.2. Études de la distribution du champ électrique dans les conditions polluées

La Figure (3-8) représente la distribution du champ électrique autour d'un isolateur pollué et propre.

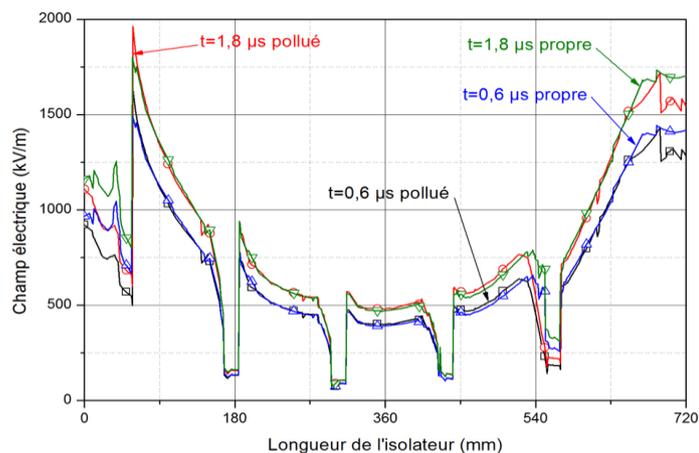
Ce résultat est obtenu par l'application d'une tension impulsionnelle. Cette allure du champ est le résultat de l'effet de la conductivité des matériaux traversés par le champ électrique dans l'interface diélectrique (silicone, air), (porcelaine, air), (verre, air). La comparaison entre les deux cas montre que le champ électrique est plus grand dans le cas pollué. Le champ est concentré dans les deux électrodes et sa valeur est minimale au milieu d'isolateur.



a) Isolateur en silicone



b) Isolateur en verre



b) Isolateur en porcelaine

Figure 3-8 Champ électrique sous tension impulsionnelle

3.7. Conductivité de couche de pollution

La plupart des modèles rapportés dans la littérature, sont des modèles statiques. Ces modèles ne prennent pas en compte l'évolution dans le temps des différents paramètres (électriques, thermiques, géométriques,...) impliqués dans le processus du contournement, d'où l'intérêt à développer un modèle dynamique.

Le modèle dynamique proposé, il se base sur le modèle statique d'Obenaus pour le comportement dynamique de l'arc. Le modèle d'Obenaus décrit l'état électrique statique du phénomène de contournement. Ce modèle ne donne aucune explication sur le mécanisme physique de l'élongation de la décharge.

Cette conductivité électrique particulière a fait l'objet d'un nombre important d'études expérimentales et théoriques depuis près d'une centaine d'années. Ainsi, la littérature fournit plusieurs valeurs de conductivité, ce qui traduit la difficulté d'une telle mesure.

La variabilité de la résistivité superficielle découlant de l'existence d'échanges thermiques: un courant de fuite à la surface d'un isolateur pollué provoque un échauffement de l'électrolyte qui recouvre l'isolant. Cette chaleur a pour effet d'accroître la conductivité du milieu, engendrant ainsi une augmentation du courant de fuite.

Pour le modèle dynamique utilisée de contournement. La conductivité de la couche conductrice varie en fonction du temps suivant la loi: (on a supposé que tous les conditions sont vérifiées pour l'apparition de l'arc électrique).

$$\sigma(t) = \frac{(X(t) \cdot A)^{\frac{1}{n}}}{V(t)^n} \quad (3.1)$$

Avec :

V : Tension à travers la bande sèche en (kV)

A et n : sont des constantes

X : longueur de la bande sèche en (mm).

La vitesse de propagation de l'arc est calculée par:

$$v = \mu \cdot E$$

Où μ est la mobilité de l'arc.

On en déduira, grâce au pas de temps Δt , la variation de la longueur d'arc dx .

Donc

$$X = v \cdot \Delta t$$

La constante diélectrique relative du domaine de la bande sèche est prise égale à 81.

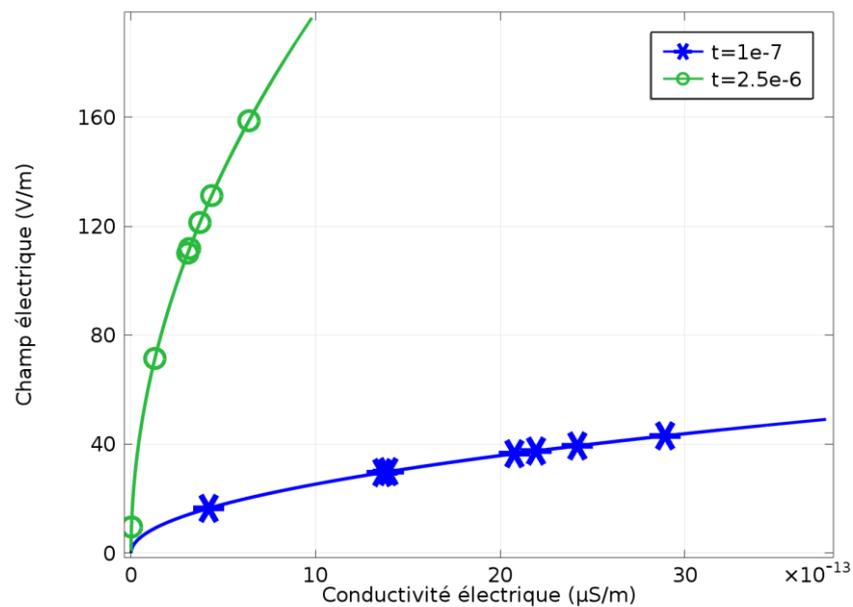


Figure 3-9 Champ électrique en fonction de la conductivité de la couche de pollution

3.8. Conclusion

La simulation du comportement des isolateurs étudiés sous l'effet d'une couche de pollution non uniforme, dans trois contraintes de tension (continu, sinusoïdal et impulsionnel).

On a trouvé que la distribution du potentiel et du champ électriques fortement influence par les caractéristiques électriques de la couche de pollution. La concentration du champ électrique est remarquée dans les électrodes HT et masse.

L'allure de distribution du potentiel et du champ électriques pour les trios contraintes de tension continu, alternatif et impulsionnel a été étudiée et représentée. Nous avons prouvé que la modélisation en 3D peut être un outil intéressant pour le calcul du champ et potentiel électrique autour des isolateurs pollués.

Chapitre 04

PERFORMANCES D'UN ISOLATEUR DETRUIT

4.1. Introduction

La répartition de la tension autour d'un isolateur est évidemment liée à la géométrie d'isolateur et les propriétés électriques des matériaux constituants.

Bidimensionnelle, le calcul de la tension et du champ électrique est valide pour le cas géométrie symétrique, mais par contre, si la géométrie présente un dissymétrique l'analyse 2D n'est pas suffisant. L'utilisation un modèle 3D est nécessaire pour avoir une meilleure exactitude.

Dans ce chapitre nous présenterons la distribution de la tension pour un isolateur avec la destruction certain ailettes.

4.2. Cause de disfonctionnement de l'isolateur

L'isolateur durant son service subit a plusieurs contraintes : mécaniques, électriques et environnementaux. Ces contraintes peuvent affecter la performance de plusieurs manière tel que :

- Perd de hydrophobicité de la surface.
- Vieillessement de matériaux constituant.
- Destruction des nervures à cause de force mécanique agit sur l'isolateur.

Dans ce chapitre on s'intéresse à l'étude d'un isolateur détruit perd une partie des ailettes ce qui provoque la réduction de la ligne de fuite. Cette réduction influe fortement sur la distribution du potentiel et du champ électrique.

Les origines de ces endommagements sont :

- ✓ Les jets pierre et tire de balle pour les isolateurs en porcelaine et en verre.

- ✓ Détériorations des extrémités des ailettes de silicone par les pics des oiseaux.

La figure 4-1 représente un isolateur réel détruit en service



Figure 4-1 Isolateur détruit

4.3. Géométrie des isolateurs utilisés

On a proposé trois cas différents d'endommagements, le premier scénario consiste à endommager les isolateurs en partie supérieure (du côté de la masse), et le deuxième scénario c'est l'endommagement inférieur (du côté de l'électrode) finalement troisième scénario c'est endommagement alternatif.

Les figures (4-2), (4-3), (4-4), montrent les cas étudiés pour les trois isolateurs

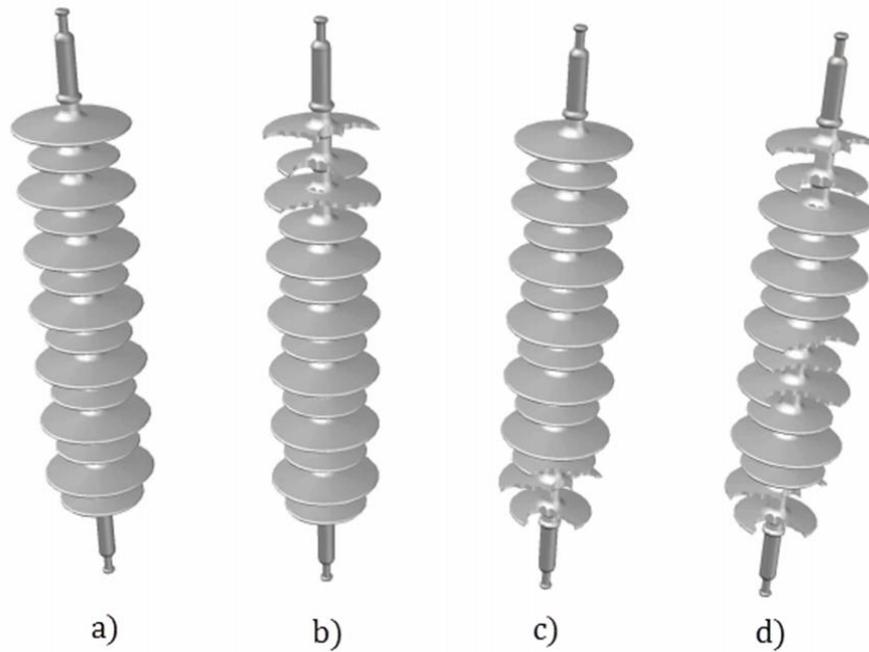


Figure 4-2 Modèle géométrique d'isolateurs imparfait en silicone

a) Non endommagement b) Endommagement supérieure c) Endommagement inférieure
d) Endommagement alternatif

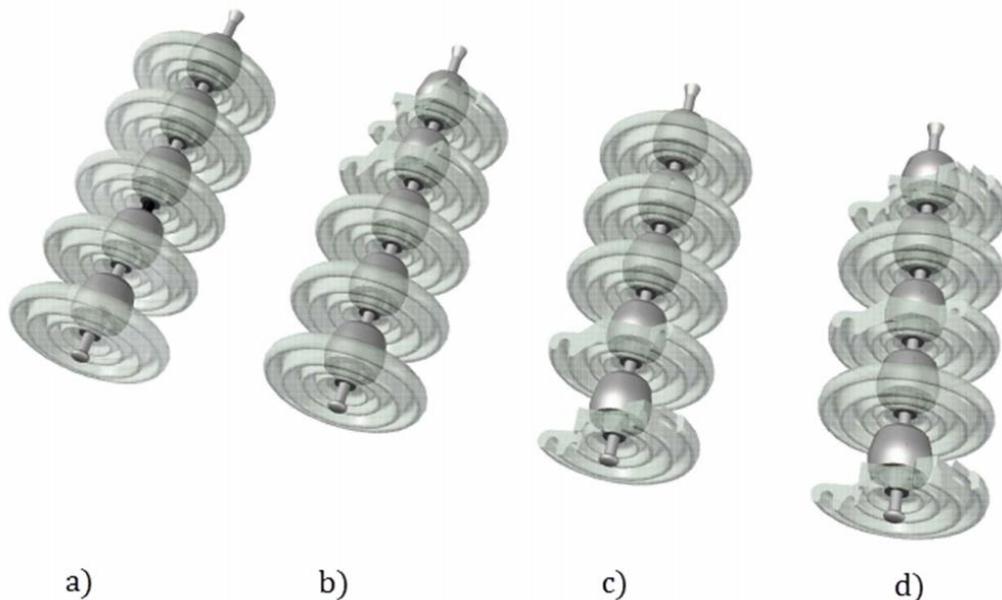


Figure 4-3 Modèle géométrique d'isolateurs imparfait en verre

a) Non endommagement b) Endommagement supérieure c) Endommagement inférieure
d) Endommagement alternatif

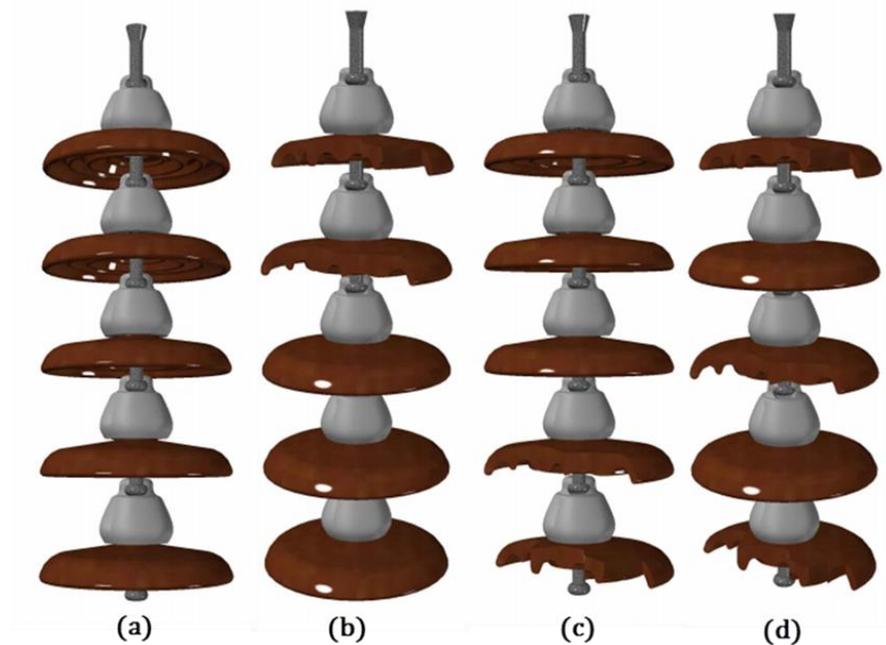


Figure 4-4 Modèle géométrique d'isolateurs imparfait en porcelaine

a) Non endommagement b) Endommagement supérieure c) Endommagement inférieure d) Endommagement alternatif

4.4. Les conditions aux limites

Les conditions aux limites du potentiel électrique sont les suivantes :

Nous avons pris comme conditions aux limites pour l'électrode inférieure du isolateur un potentiel (haute tension) et celui de l'électrode supérieure un potentiel nul ou encore prendre la condition prédéfinie dans le logiciel 'masse'.

Le champ électrique est supposé nul (isolation électrique) suffisamment loin de l'isolateur.

4.5. Analyse des résultats

La distribution du potentiel est calculée le long de la ligne de fuite totale (Ligne de référence en bleu) et le long d'un axe vertical parallèle de l'axe d'isolateur (l'axe en rouge). Donnée figures (4-5), (4-6), (4-7).

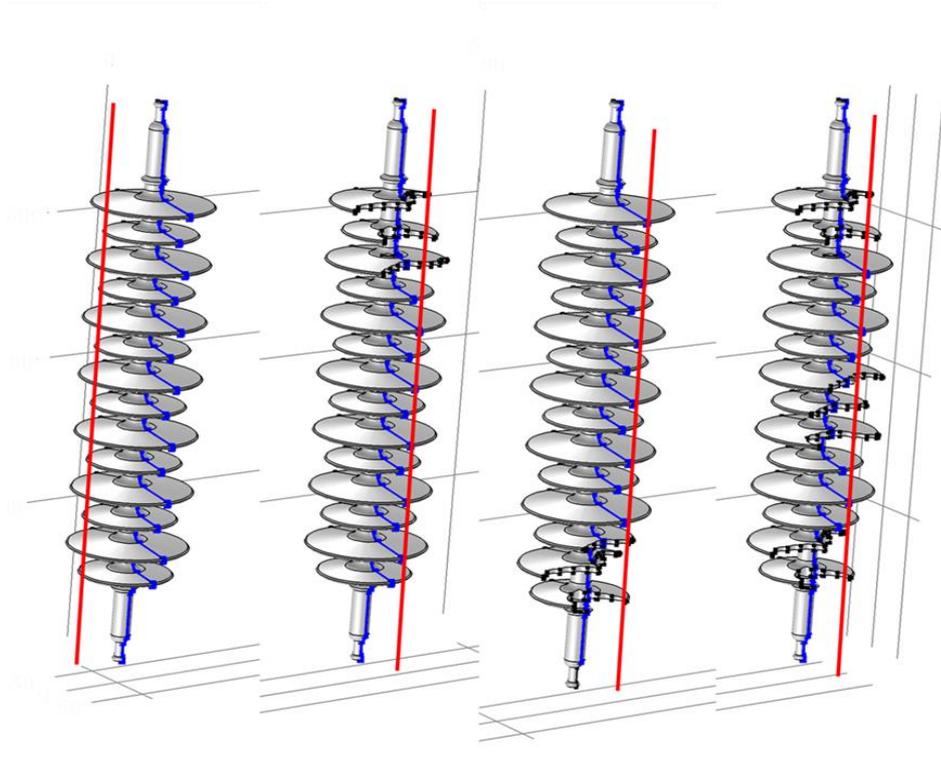


Figure 4-5 Les lignes de référence des isolateurs en silicone

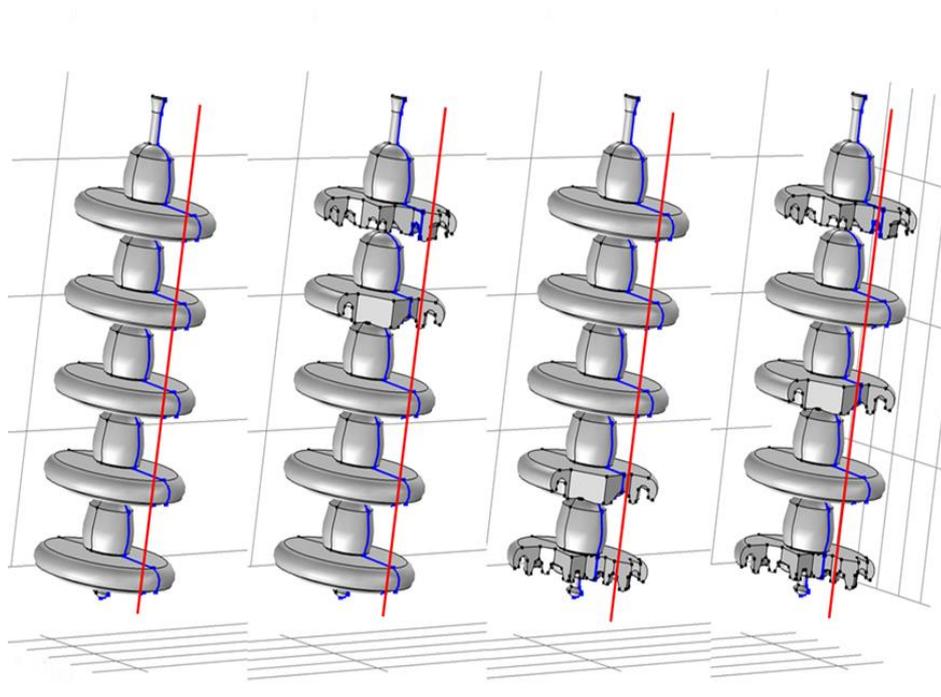


Figure 4-6 Les lignes de référence des isolateurs en verre

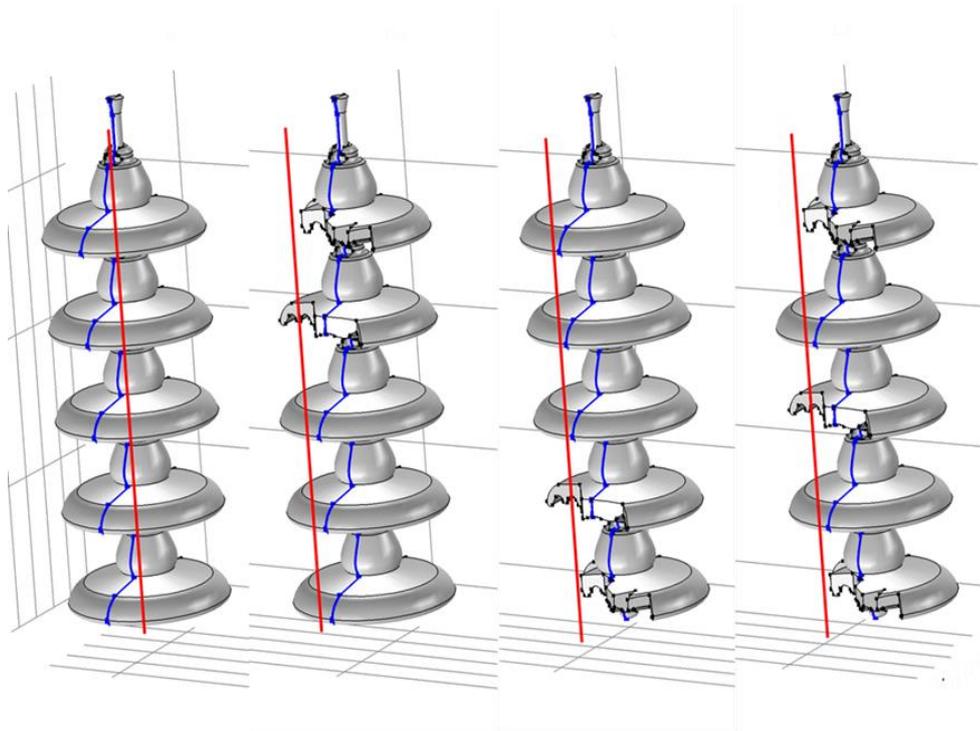


Figure 4-7 Les lignes de référence des isolateurs en porcelaine

4.5.1. Études de la distribution de tension

4.5.1.1. Distribution de tension surfacique

Les cartographies globales du potentiel obtenu par COMSOL Multiphysics sont représentées sur les figures (4-8), (4-9), (4-10) qui montrent la distribution de potentiel électrique sur la surface des isolateurs étudiés.

Dans la zone qui se trouve entre l'électrode et la terre la distribution de tension est uniforme. On remarque aussi, que les valeurs maximales des potentiels sont près de l'électrode haute tension et commence à décroître jusqu'à son annulation quand on se rapproche de l'électrode de masse.

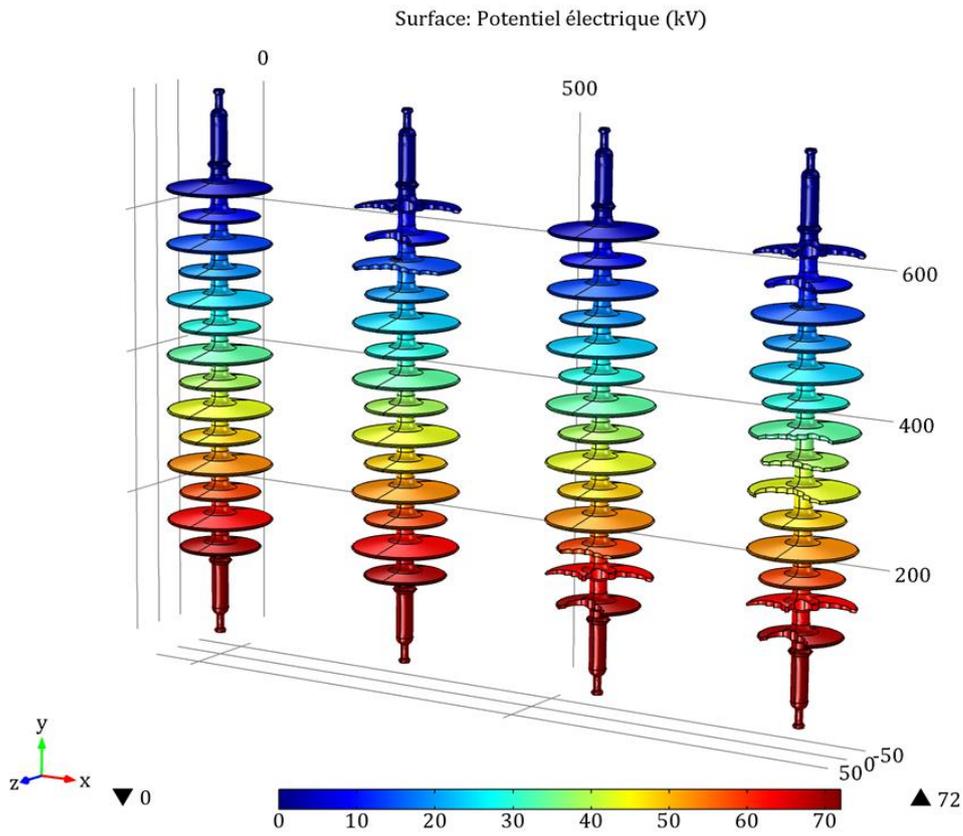


Figure 4-8 Potentiel électrique surfacique des isolateurs en silicone

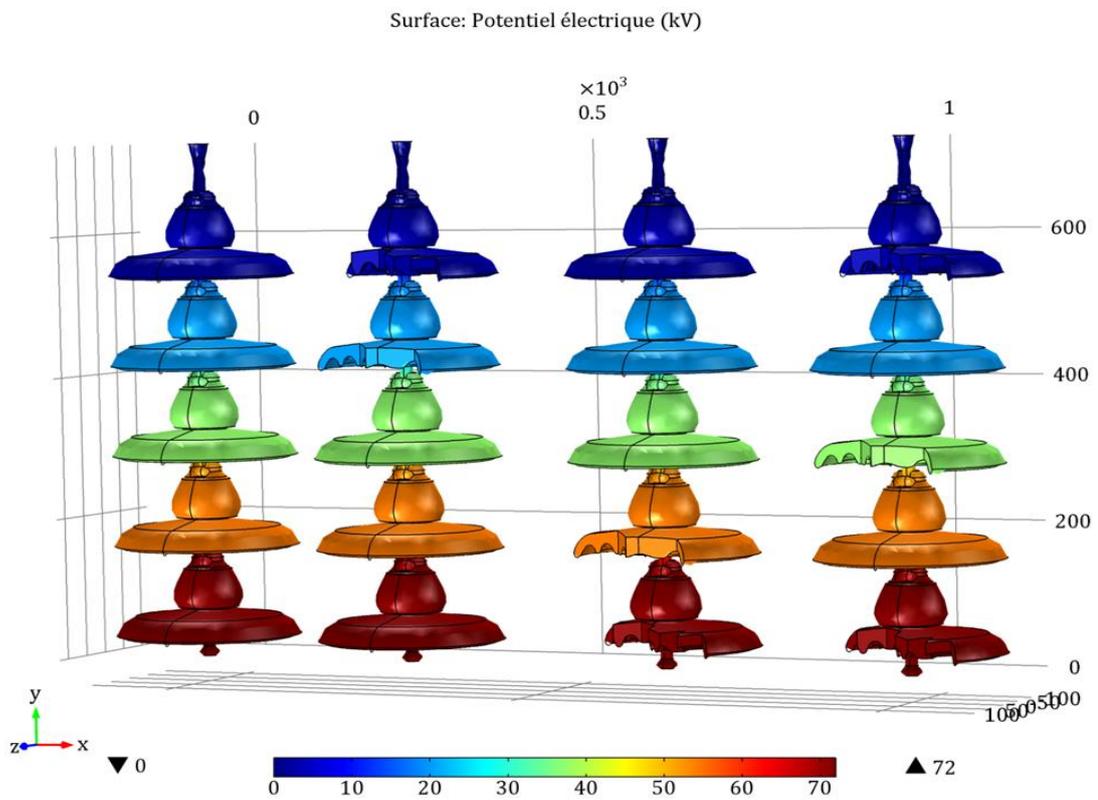


Figure 4-9 Potentiel électrique surfacique des isolateurs en verre

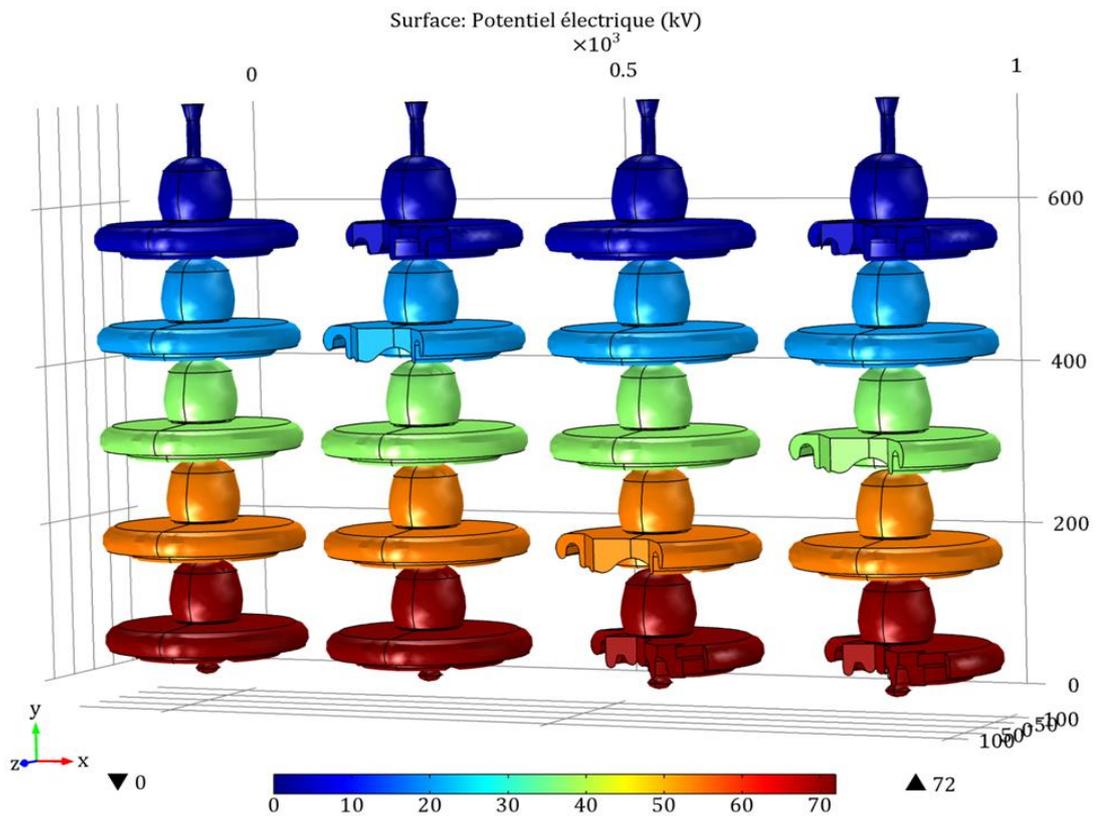
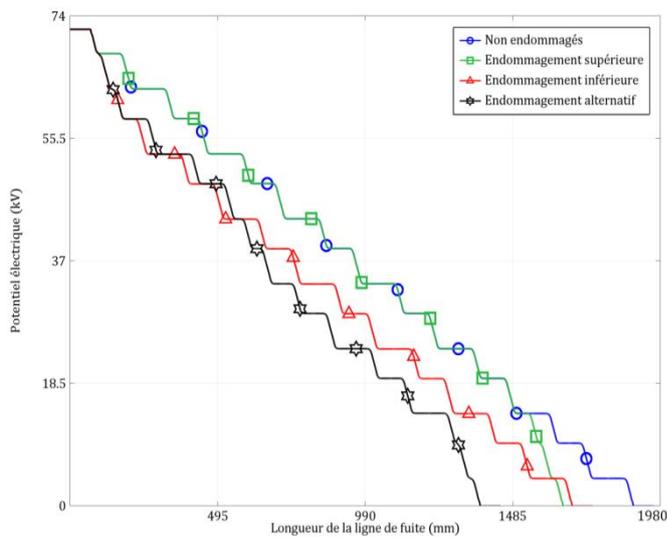


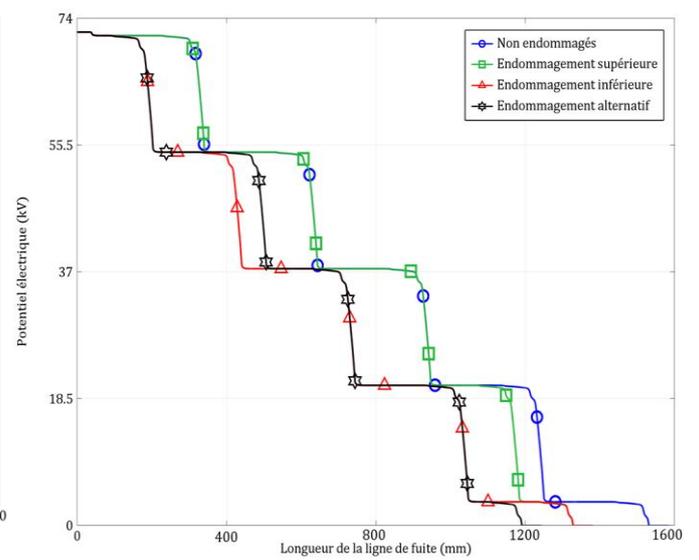
Figure 4-10 Potentiel électrique surfacique des isolateurs en porcelaine

Dans ce qui suit nous allons convertir les résultats obtenus par COMSOL Multiphysics, sous forme des courbes. Ces courbes représentent la variation du potentiel électrique sur le long de la ligne de fuite totale des isolateurs détruits et un isolateur sain pour la comparaison. Figure (4-11).

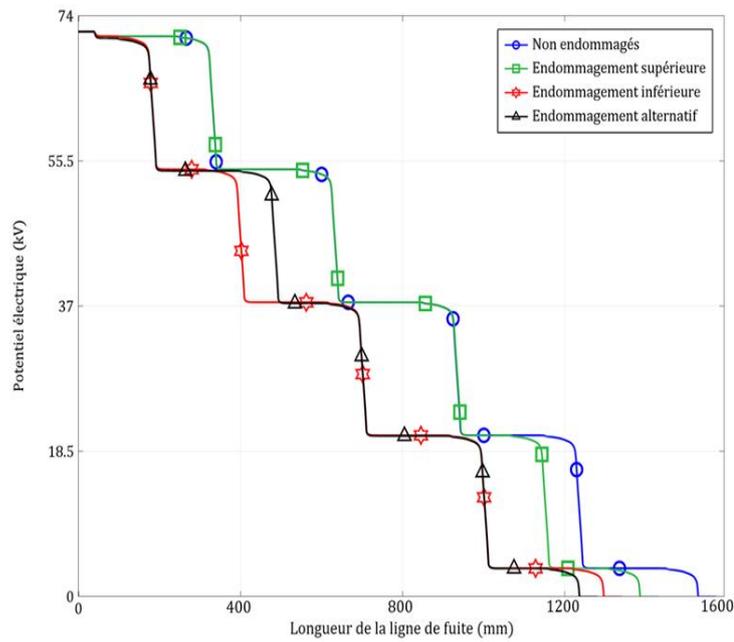
Quatre cas sont étudiés ; isolateur sain en bleu, isolateur avec une partie supérieure détruit en couleur vert, isolateur endommagé du coté inférieure en rouge et isolateur endommagée alternativement en noir. On remarque que l'influence de l'endommagement des ailettes sur la distribution du potentiel est plus grande dans la partie inférieure d'isolateur. Le potentiel est plus grand dans le cas sain et partie supérieure détruit que le cas d'une partir inférieure endommagé. La destruction de la partie supérieure n'a pas une vraie influence sur le potentiel. La destruction des ailettes d'isolateur provoque la diminution de la longueur de fuite totale ce qui réduit la rigidité diélectrique d'isolateur.



a) Isolateurs en silicone



b) Isolateurs en porcelaine



c) Isolateurs en verre

Figure 4-11 Distribution de la tension sur la surface

4.5.1.2. Distribution de tension axial

Figures (4-12), (4-13) et (4-14) représentent la variation du potentiel électrique sur un axe parallèle à l'axe d'isolateur. Quatre cas sont étudiés ; isolateur sain en bleu, isolateur avec une partie supérieure détruit en couleur vert, isolateur endommagé du côté inférieure en rouge et isolateur endommagement alternatif en noir.

On remarque une faible influence de l'endommagement des ailettes sur la distribution axiale du potentiel. La différence de distribution de potentiel entre les quatre cas due à la réduction de la longueur de ligne de fuite totale dans les cas Endommagés.

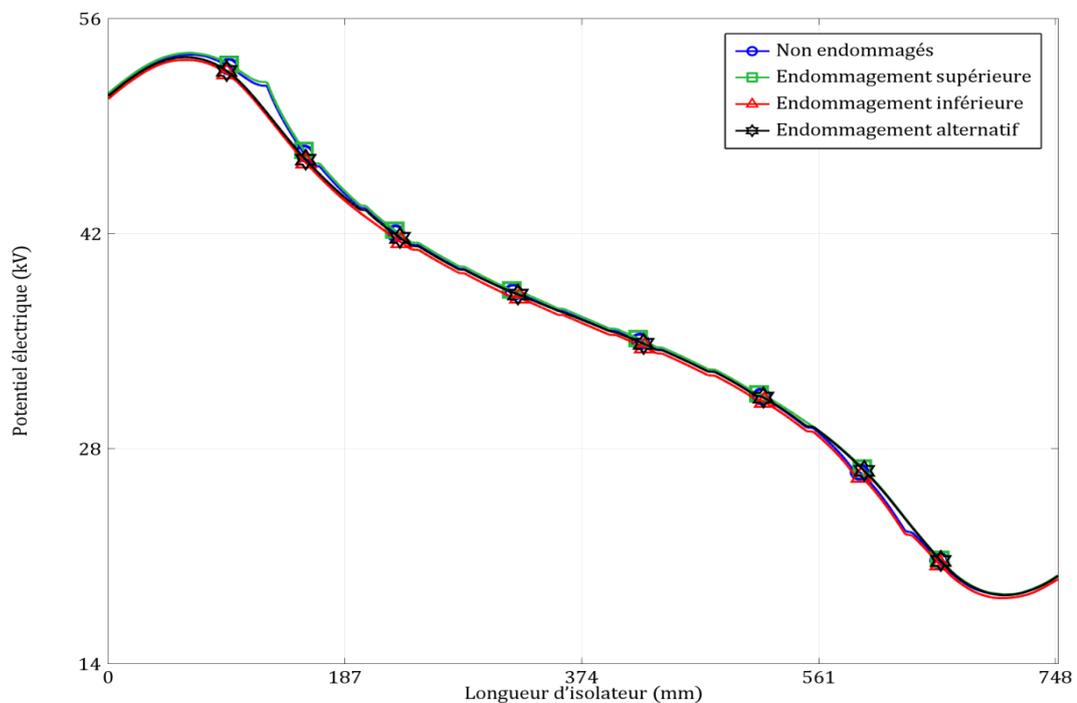


Figure 4-12 Potentiel électrique le long de l'isolateur détruit en silicone

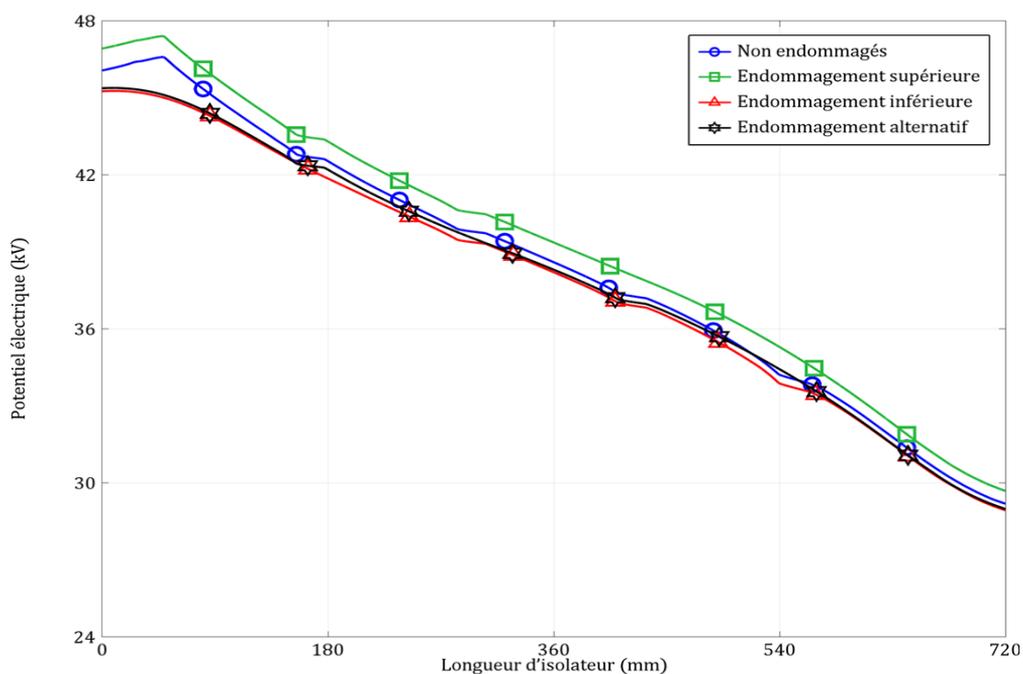


Figure 4-13 Potentiel électrique le long de l'isolateur détruit en porcelaine

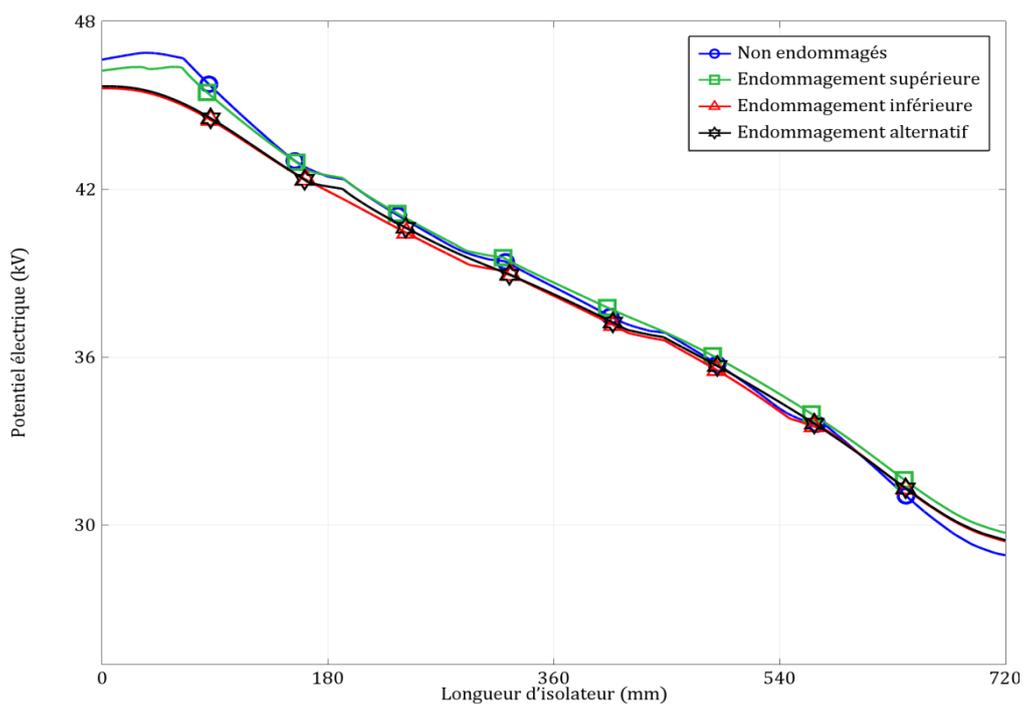


Figure 4-14 Potentiel électrique le long de l'isolateur détruit en verre

4.5.2. Études de la distribution du champ électrique

Figures (4-15), (4-16) et (4-17) représentent la répartition du champ électrique sur un axe parallèle à l'axe d'isolateur. Quatre cas sont étudiés ; isolateur sain en bleu, isolateur avec une partie supérieure détruit en couleur vert, isolateur endommagé du côté inférieure en rouge et isolateur endommagé alternativement en noir. On remarque une grande influence de l'endommagement des ailettes sur la distribution axiale du champ électrique. La différence de distribution du champ électrique entre les trois cas due à l'élimination de l'interface (silicone, air) (porcelaine, air) (verre, air) dans la partie où les ailettes sont détruites. La fluctuation de distribution du champ électrique est éliminée dans la partie endommagée parce que le champ devient appliqué juste dans l'air.

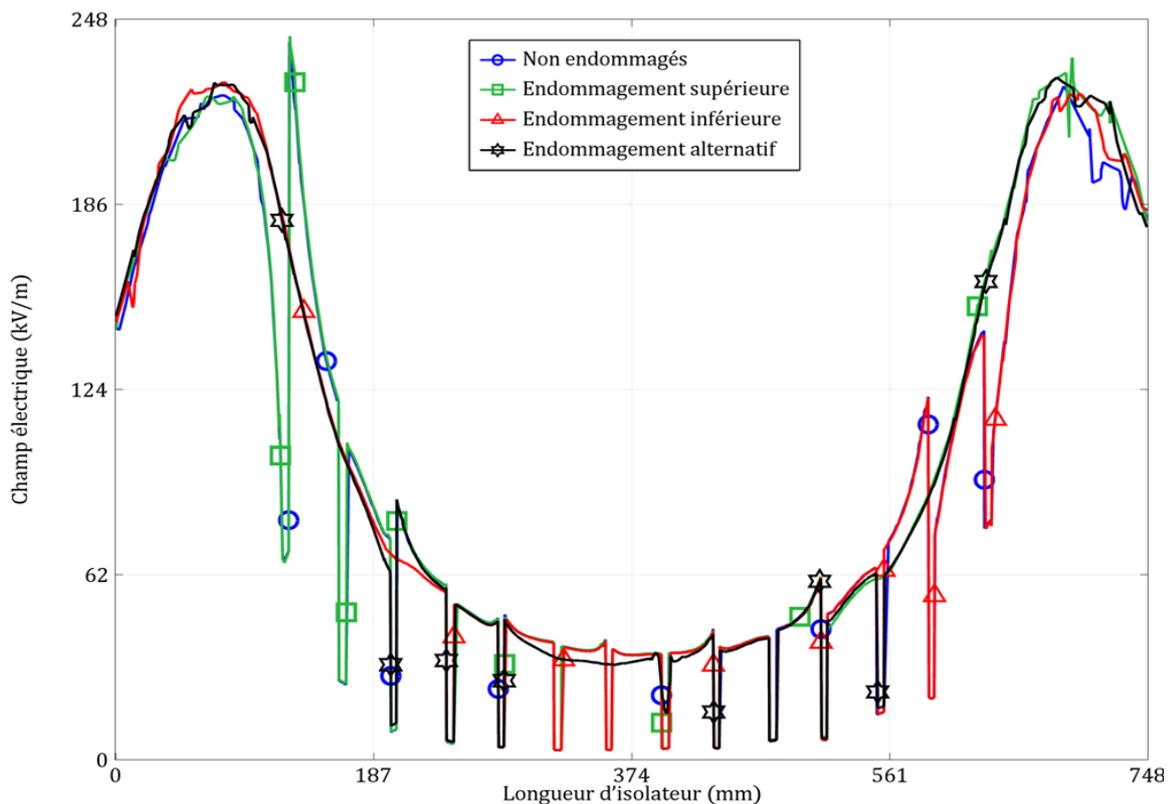


Figure 4-15 Champ électrique le long de l'isolateur détruit en silicone

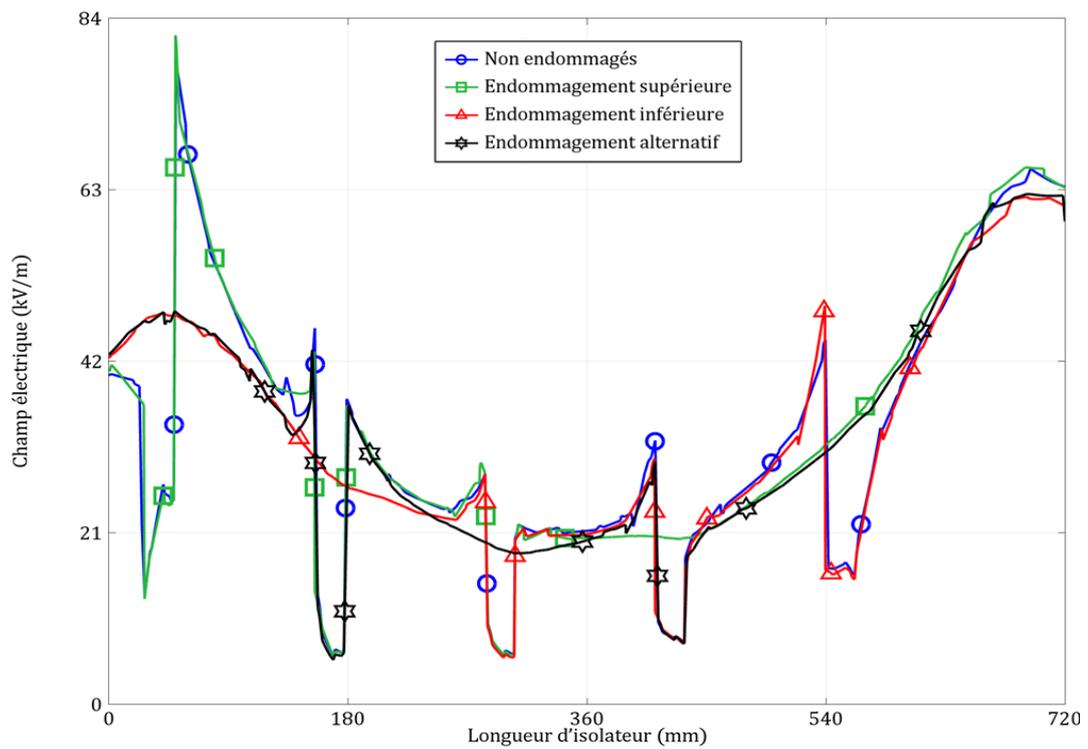


Figure 4-16 Champ électrique le long de l'isolateur détruit en porcelaine

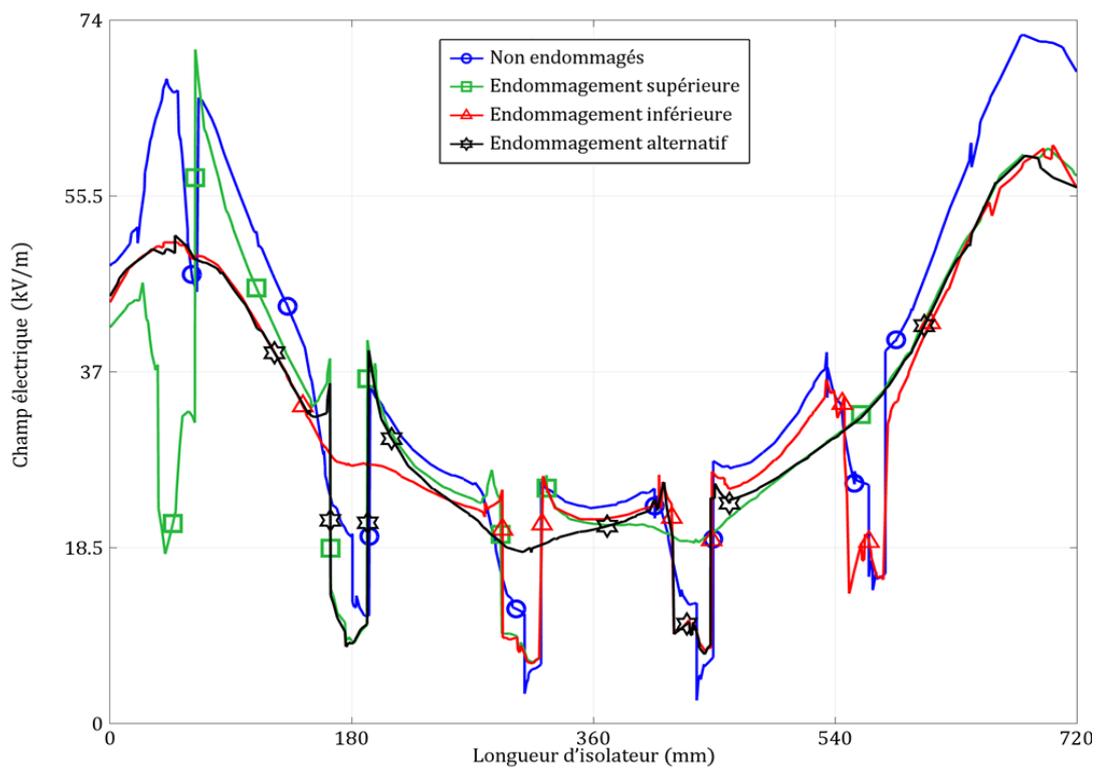


Figure 4-17 Champ électrique le long de l'isolateur détruit en verre

4.6. Conclusion

Dans ce chapitre on étudier l'effet de l'endommagement des ailettes d'isolateur sur la distribution du champ et du potentiel électrique suivant un axe centré $x=0$ et un axe de distance x par rapport le centre.

On a trouvé que la répartition de la tension dépend de la géométrie des isolateurs, ainsi que les propriétés électriques des matériaux constitutants. Nous avons montré que l'analyse en 3D est l'outil le plus adapté pour traiter les problèmes de dissymétrie de la géométrie du l'isolateur.

Enfin, nous nous sommes inities a l'utilisation d'un logiciel COMSOL Multiphysics qui permet d'établir un maillage et de déterminer le potentiel et le champ électrique dans le cas de phénomènes électrostatiques.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

La méthode des éléments finis s'est avérée être un bon choix parmi les différentes méthodes numériques proposées. Cette méthode, qui permet de se contenter d'une description surfacique des objets modélisés, présente les avantages importants par rapport aux différentes méthodes existantes du point de vue du nombre d'inconnues mis en jeu, de la prise en compte des domaines infinis.

L'objectif principal de ce travail était l'étude de la distribution de tension le long des trois types d'isolateurs dans les cas propres, pollués sous différente forme de tension et le cas des isolateurs endommagé dans trois scénarios le premier concerne la partie supérieure, le deuxième concerne la partie inférieure et le dernier scénario concerne endommagement alternatif.

Pour cette étude nous avons fait une simulation en 3D des isolateurs à l'aide d'un logiciel commercial COMSOL Multiphysics ce dernier est basé sur la méthode des éléments finis (MEF).

La représentation graphique des isolateurs étudié (silicone, verre et porcelaine) c'est fait par le baie d'un logiciel de dessin AutoCAD.

Nous nous sommes initié à l'utilisation d'un logiciel qui permet d'établir un maillage et de déterminer le potentiel et le champ électriques dans le cas de phénomènes électrostatiques.

Les résultats de simulation obtenus dans le cadre de cette étude peuvent être résumés de la façon suivante :

- ✓ La distribution de la tension et le champ électrique le long d'isolateur est uniforme à cause de l'absence de la couche polluante conductrice.
- ✓ Dans les régions humides la distribution de tension le long de l'isolateur est non uniforme.
- ✓ La répartition de la tension est dépendent de la géométrie des isolateurs

Les résultats obtenus sont en concordance avec les résultats publiés dans la littérature l'approche décrite dans le présent travail va, sans doute, nous permettre dans le futur de réaliser des études plus avancées sur des isolateurs en 3D avec plusieurs scénarios de pollution et d'endommagements. Aussi le comportement des isolateurs en service sur un pylône triphasé toujours en simulation 3D.

Bref, Les résultats de cette investigation sont prometteurs, de plus ils nécessitent une étude plus approfondie. Cette étude aboutira sans doute à des résultats importants et économiquement justifiables pour les différentes sociétés de d'électricités. La pollution et la destruction d'une partie ou plusieurs parties de l'isolateur sont des facteurs essentiels dont il faut tenir compte dans la conception des équipements électriques de haute tension.

Pour mieux dimensionner les isolateurs, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés.

Références bibliographiques

- [1] C. LEROY, Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions, paris: collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, 1984.
- [2] M. SLAMA, Etude expérimentale et modélisation de l'influence de la constitution chimique et de la répartition de la pollution sur le contournement des isolateurs haute tension, Lyon: l'école doctorale d'électronique, 2011.
- [3] S. VITET, «La pollution des isolateurs,» EDF-Epure, Juillet 1990.
- [4] J. DUNLAP, «Performances des isolateurs pollués pour les lignes de haut tension,» chez CIGRE, *Rapport 33-05*, France, 1996.
- [5] S. GENBERG, «Isolateur en céramique et en synthétique,» EDF-EPURE, avril 1998.
- [6] K. OUERDANE, Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30kV en régions littorales, alger: projet de fin d'études, département d'électrotechnique, université des sciences et technologies houari boumediene, bab Ezzouar, juin 1998.
- [7] D.DUMORA, «Matériaux isolants cramiques en électrotechnique,» *Techniques de l'ingénieur*, p. D275, 1975.
- [8] «Insulation co-ordination,» *IEC*, pp. 71-1, 1993.
- [9] Y. PORCHERON, «lignes aériennes: matériels entrant dans la constitution d'une Ligne aérienne,» *technique de l'ingénieur*, vol. D, n° %14425.
- [10] M. TEGUAR, Etude mathématique des mécanismes de développement, alger: Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, Juillet 1993.
- [11] S. TOUNSI, Influence du sol sur le comportement d'un modèle d'isolateur sous tension, alger: Mémoire du projet de fin d'études laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger., Juin 2008.
- [12] R. BOUZEROURA, Etude du développement d'arcs électriques parallèles sur une surface isolante non uniformément polluée sous tension continue, Bejaia: Mémoire de magister, Université de Bejaia, 2009.
- [13] Fernando, «Leakage Current Patterns on Contaminated,» *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, vol. 6, n° %15, October 1999.
- [14] S. Gubanski, «Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 14, n° %15, October 2007.
- [15] A. S. BOUHADJAR, Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur par technique d'ondelettes et modélisation, alger: Mémoire du projet de fin d'études laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger, Juin 2008.
- [16] F. ROBERT, Les isolateurs en electrochimique.
- [17] M. SLAMA, Contribution a l'étude de l'influence de la non-uniformite de la pollution basee sur la methode de la d.d.s.e pour le dimensionnement des isolateurs des lignes t.h.t a courant alternatif, oran: these de Magister, 29 juin 2002.
- [18] K. BELHOUCHE, Estimation des paramètres de l'arc de contournement des isolateurs pollués en utilisant l'approche génétique, setif: universite ferhat abbas, 2011.
- [19] S. SATTI, contribution a l'étude de l'influence de la pollution discontinue sur le comportement des isolateurs : experimentation et simulation, setif: universite ferhat abbas, 2011.
- [20] F. AOUABED, Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP, setif: universite ferhat abbas, 2011.
- [21] F. ZITOUNI, «Calcul du champ électrique et magnétique produits par les lignes de transport,» chez *conférence de sonalgaz*, Alger, 1999.
- [22] L. ALLOUI, Modelisation magnetique tridimensinnelle du problem par la methode des volume finis, biskra: universite de biskra, 2001.
- [23] A. KACL, Calcul du champ electromagnetique 2D et 3Dl par une technique de Monte Carlo, jijel: these

- ingenieur d'etat de l' universite jjel, 2002.
- [24] F. KEBBAB, Calcul du champ electromagnetique bidimensionnel par une technique de Monte Carlo, setif: these ingenieur d'etat de l' universite Ferhat Abbas, 2005.
- [25] J. HERVE, «Mathematiques pour l'electricien methode numerique,» vol. D1, pp. 36-2.
- [26] D. CHRISTIAN, Méthode des éléments finis, France: Département de mathématique, Cergy-Pontoise, 2006.
- [27] M. KERN, Introduction à la méthode des éléments finis, paris: École Nationale Supérieure des mines de Paris, 2004-2005.
- [28] Matériels de ligne, MAROC: Catalogue ines MAX, 2009-2010.
- [29] Matériaux isolants à base de céramique ou verre, Partie 3: Spécifications pour matériaux particulier.
- [30] T. Specification, Isolateurs en verre, Maroc: Direction Approvisionnements et Marchés Division Etudes et Normalisation, décembre 2003.
- [31] C. Volât, Modélisation phsysique et numérique par la méthode des éléments finis de frontière de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur standard de poste 735kv recouver tde glace, Canada: université du Quebec, juin 2002.
- [32] GROUP.GLOBAL.INSULATOR, Isolateurs pour lignes de transmission et stations de distribution à tension de 0,4 à 1150 KV, Catalogue des produits, 2012.
- [33] COMPANY.LAAP.INSULATOR, Porcelain suspension and strut insulator, catalog 10B.

ان الهدف الرئيسي لهذا البحث هو محاكاة توزيع الكمون و مجال الحقل الكهربائي على طول سطح عدة أنواع من عوازل الجهد العالي؛ من الزجاج، والخزف والسيليكون، وذلك في مستوي ثلاثي الأبعاد في ظل ظروف عمل مختلفة : كهربائية، ميكانيكية وبيئية. استخدمنا طريقة العناصر المنتهية لأنها الأكثر ملائمة لحساب الجهد والحقل الكهربائي في العوازل وحولها، وأثبتنا ان استخدام الطريقة العددية بواسطة برنامج تجاري COMSOL Multiphysics من أفضل الحلول. وتحقيقا لهذه الغاية، تم تكيف طريقة العناصر المنتهية مع الظروف التشغيلية للعوازل.

كلمات مفتاحية: العوازل ، التلوث، المحاكاة، الحقل الكهربائي، FEM، COMSOL Multiphysics

Résumé :

L'objectif principal de cette recherche est de simuler en 3D la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un plusieurs types d'isolateurs de haute tension ; capot et tige en céramique , et long fut en silicone, sous différents contraintes : électriques, mécaniques et environnementaux, on a calculé la répartition de potentiel et du champ électrique autour des chaines isolateurs, en utilisant une méthode numérique par l'intermédiaire d'un logiciel commercial COMSOL Multiphysics qui s'est avérée être une des meilleures solutions. A cet effet, la méthode des éléments finis était la mieux adaptée aux contraintes imposées par les conditions de fonctionnement des isolateurs.

Mots Clés : isolateur, pollution, champ électrique, simulation, MEF, COMSOL Multiphysics, 3D.

Abstract:

The principal objective of this research is to simulate the distribution of the potential and the electrical field along several kinds of high voltage insulators using 3D modeling for: cap and pin ceramics, and silicone, under different constraints: electrical, mechanicals and environmental. We calculate the potential and the electrical field distribution around the insulators using a numerical method by the intermediary of commercial software COMSOL Multiphysics proved to be one of the best solutions. To this end, the Finite element method was adapted best to the constraints imposed by the operating conditions of the insulators.

Key Words : Insulator, pollution, simulation, , MEF, COMSOL Multiphysics, 3D