



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologies

Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

***Approche Électrostatiques d'une
Chaîne d'Isolateurs de Haute
Tension***

Réaliser par:

Encadreur: GUIA Talal

SOUID Saïd
SOLTANI Chouayeb

Soutenu Juin 2013

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologies

Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

Approche Électrostatiques d'une
Chaîne d'Isolateurs de Haute
Tension

Réaliser par:

Encadreur: GUIA Talal

SOUID Saïd
SOLTANI Chouayeb

Soutenu Juin 2013

Remerciement

Nous rendons grâce à dieu de nous avoir donné le courage et la patience afin de mener ce travail à terme.

Nos vifs remerciements particulièrement à notre encadreur :

GVIA Talal , pour son aide précieuse, pour son aide précieuse, ses conseils constructifs et ses orientations bénéfiques et objectives et surtout sa confiance durant les moments d'efforts pour la réalisation de notre projet.

Nous remercions particulièrement notre prof Monsieur :

*Dr : **BEN ATTOUS Djilani** et Nous remercions également tous les enseignants de l'électrotechnique .*

Mes remerciements vont aussi aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail et d'y apporter leur contributions.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A ma très chère mère : affable , honorable , aimable , tu
représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence , la source
de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de
m'encourager et de prier pour moi.*

*A mon père : qui a tout donné pour me permettre de
réaliser mes rêves.*

*A mes adorables sœurs Maria , Rahma ,
et toute la famille SQUID.*

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

A vous.

Saïd

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A ma très chère mère : affable , honorable , aimable , tu
représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence , la source
de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de
m'encourager et de prier pour moi.*

*A mon père : qui a tout donné pour me permettre de
réaliser mes rêves.*

À mes frères et sœurs et toute la famille SOLTANI

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

A vous.

CHOUAYEB

Liste des abréviations

THT : Très Haute Tension.
 HT : Haute Tension .
 MDF : Méthode Des Différences Finis.
 MEF : Méthode des Eléments Finis.
 MSC : Méthode de Simulation de Charges .
 MEFF : Méthode des Eléments Finis de Frontière.
 RTE : Réseau Transport Electrique.
 FP : Facteur de Profil.
 LP : Ligne de Fuit.
 2D : Deux Dimensions.
 3D : Trois Dimensions.

Liste des symboles

$\nabla^2 \tilde{\phi}$: Gradation du potentiel	V_i : Le potentiel calculée au point i.
ϕ_c : Potentiel calculer.	P_{ij} : Le coefficient de potentiel.
ρ_s : Distribution surfacique.	Q_i : La charge ponctuelle au point j.
ϵ_0 : Permittivité de l'aire.	S : la surface.
ϵ_A : Permittivité de milieu A.	f : facteur de forme.
ϵ_B : Permittivité de milieu B.	ρ : résistivité volumique.
W_n : Fonction de projection.	ϕ_m : diamètre moyenne.
$\vec{n}$: La normale.	
$\tilde{\phi}$: Approximation du potentiel.	
N_i : Fonction d'interpolation .	
N_e : Nombre de nœud d'interpolation.	
ϕ_i : Les valeurs nodales du potentiel.	
G : Fonction de Green .	
Γ_{ij} : Interface diélectrique-diélectrique.	

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1	Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre	6
Figure I.2	Isolateurs à capot et tige	7
Figure I.3	Différents profils d'isolateurs à capot et tige	9
Figure I.4	Isolateurs à long fût	10
Figure I.5	Isolateur composite	12
Figure I.6	Assemblage à rotule	13
Figure I.7	isolateurs en verre trempé et isolateurs rigides	18
Figure I.8	Chaîne d'ancrage	18
Figure I.9	Chaîne en V	19
Figure I.10	Chaîne droite	

Chapitre II

Figure II.1	Définition du facteur de profil	21
Figure II.2	Influence du profil sur la tension de tenue des isolateurs pollués	21
Figure II.3	Approche d'un isolateur réel par un modèle cylindrique	22
Figure II.4	Diamètre moyen des isolateurs IEEE et EPDM	23
Figure II.5	Performance des isolateurs pollués en fonction du diamètre moyen	24
Figure II.6	Tension de tenue par millimètre de distance de fuite en fonction du diamètre (C.A : courant alternatif et C.C : courant continu)	25
Figure II.7	Densité de dépôt de sel en fonction du diamètre moyen	25
Figure II.8	Tension et courant de fuite relevés cas d'isolateur uniformément pollué	26
Figure II.9	Tension et courant de fuite relevés cas d'isolateur non-uniformément pollué	27

Figure II.10.a	Effet de la vitesse du vent sur le contournement des isolateurs	29
Figure II.10.b	Effet de la pollution désertique sur le contournement des isolateurs (A : chaîne d'isolateurs propre et sèche, B : chaîne d'isolateurs en présence du vent, C: chaîne d'isolateurs en présence du vent de sable)	30
Figure II.11	Isolateur réel utilisé (à gauche) et son modèle à droite	31
Figure II.12	Formes d'ondes du courant de fuite du modèle	31
Figure II.13	Formes d'ondes des courants de fuite de l'isolateur réel	32
Figure II.14	Chaînes d'isolateurs de ligne 33kV utilisées	33
Figure II.15	Courant de fuite en fonction de la tension pour chaque type d'isolateur	34
Figure II.16	Tension de contournement en fonction de la concentration du NaCl pour chaque type d'isolateur	34
Figure II.17	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour une simulation 2D	39
Figure II.18	: Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour une simulation 3D	40
Figure II.19	Isolateur BSFT-9336 ; (a) : profil réel, (b) : modèle ouvert	41

Chapitre III

Figure III.1	Maillage carrée	43
Figure III.2	Point central et ses voisins	43
Figure III.3	position des charges fictives	49

Chapitre IV

Figure IV.1	Discretisation en éléments finis de la chaîne 1512L	56
Figure IV.2	Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne	57
Figure IV.3	Distribution (éthogrammes) du potentiel en fonction de la conductivité	58
Figure IV.4	Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne	59
Figure IV.5	Distribution du potentiel en fonction de la tension de la ligne	60
Figure IV.6	Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne	61

Figure IV.7	Influence du nombre d'éléments sur la distribution du potentiel	62
Figure IV.8	Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs	63
Figure IV.9	Distribution (échogrammes) du champ électrique en fonction de la conductivité	64
Figure IV.10	Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs	65
Figure IV.11	Distribution du champ électrique en fonction de la tension de la ligne	66
Figure IV.12	Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs	67
Figure IV.13	Distribution du champ électrique en fonction du nombre d'éléments de la chaîne	68

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------	---

Chapitre I

I.1 Introduction :	3
I.2 Historiquement :	3
I.3 Les isolateurs :	4
I.4 Domaine d'application:	4
I.5 Fonctionnement et constitution d'un isolateur :	5
I.6 Principaux types d'isolateurs:	5
I.6.1 Isolateur de type rigide :	5
I.6.2 Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne :	7
I.6.2.1 Isolateurs à capot et tige :	7
I.6.2.1.a Caractéristiques :	8
I.6.2.1 b Différents profils des isolateurs à capot et tige :	9
I.6.2.2 Isolateurs à long fût :	10
I.6.3 Matériaux utilisés :	10
I.7 Pollution des isolateurs :	13
I.7.1 Sources de pollution :	14
I.7.2 Technique de lutte contre la pollution :	16
I.7.2.1 Allongement de la ligne de fuite :	16
I.7.2.2 Isolateurs plats :	16
I.7.2.3 Graissage périodique :	16
I.7.2.4 Revêtement silicone :	16
I.7.2.5 Les isolateurs composites :	16
I.7.2.6 Nettoyage des isolateurs :	17
I.8 Comment l'isolation électrique des pylônes est-elle assurée :	17
I.8.1 Comment sont installés les isolateurs :	18
I.8.2 Chaîne d'ancrage :	18
I.8.3 Chaîne en V :	18
I.8.4 Chaîne droite :	19
I.9 Conclusion :	19

Chapitre II

II.1 Introduction :	20
II.2 Travaux sur la pollution des isolateurs :	20
II.2.1 Influence de la forme de l'isolateur :	20
II.2.2 Influence du diamètre :	22
II.2.3 Travaux de Bologna, Britten, Mahatho et Reynders :	25
II.2.4 Travaux de Meghnefi, Volat et Farzaneh :	27
II.2.5 Travaux sur la pollution marine :	28
II.2.6 Travaux sur la pollution désertique	28
II.2.7 Travaux de Yong Zhou et al :	30
II.2.8 Travaux de Metwally et al :	32
II.3 Travaux sur les distributions du champ et du potentiel électriques :	35
II.3.1 Travaux expérimentaux :	35
II.3.2 Travaux de simulation numérique :	37
II.4 Conclusion :	41

Chapitre III

III.1 Introduction :	42
III.2 Méthode Des Différences Finis (MDF) :	42
III.2.1 Principe :	42
III.2.2 Avantages de la MDF :	44
III.2.3 Inconvénients de la MDF :	44
III.3 Méthode des Eléments Finis (MEF) :	45
III.3.1 Principe :	45
III.3.2 Avantages de la MEF :	47
III.3.3 Inconvénients de la MEF :	47
III.4 Méthode de simulation de charges :	47
III.4.1 Principe :	47
III.4.2 Application à un problème présentant plusieurs diélectriques :	48
III.4.3 Avantages de la MSC :	50
III.4.4 Inconvénients de la MSC :	50
III.5 Méthode des éléments finis de frontière (MEFF) :	50
III.5.1 Introduction :	50
III.5.2 Formulation indirecte de la MEFF :	51
III.5.3 Résolution des équations intégrales :	52
III.5.4 Avantages de la MEFF :	53
III.5.5 Inconvénients de la MEFF :	53
III.6 Conclusion :	53

Chapitre IV

IV.1.Introduction :	55
IV.2.Simulation :	55
IV.3.Résultats de la simulation :	56
IV.4.Etude du potentiel électrique :	57
IV.5.Distribution du champ électrique :	63
IV.6.Conclusion :	69
 Conclusion Générale	 70

Introduction générale

L'énergie électrique joue un rôle important dans le développement économique et industriel d'un pays. A l'heure de la libéralisation des marchés de l'énergie, il est devenu primordial d'assurer un bon acheminement de l'électricité jusqu'aux consommateurs, en assurant la continuité et la fiabilité du service. C'est pour cela que l'une des principales cibles, dans les travaux de recherche dans le domaine de l'énergie, est la diminution du nombre et de la durée des interruptions de l'alimentation en énergie électrique.

Les équipements de haute tension présents dans les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique, sont supposés opérer de façon fiable, quelles que soient les conditions environnementales. En particulier, les isolateurs constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement des lignes. Ils ont un double rôle mécanique, en reliant les conducteurs sous tension, et électrique, en assurant l'isolement électrique entre les deux parties.

Ces isolateurs sont soumis à différentes contraintes environnementales, dont la plus importante est la pollution. Cette pollution peut avoir plusieurs origines : industrielle, marine, désertique et peut être mixte.

Une connaissance approfondie de la distribution du potentiel et du champ électrique le long des isolateurs, recouverts de couches polluantes, permettrait de déterminer les valeurs critiques de potentiel et de champ électrique donnant naissance à ces arcs partiels [1].

La problématique reliée à une telle étude, se trouve dans la difficulté à déterminer, expérimentalement, de manière précise, la distribution du potentiel et de surcroît, celle du champ électrique le long des isolateurs pollués. En effet, ces mesures, qui ne peuvent être réalisées qu'en laboratoire, requièrent un appareillage lourd et sophistiqué, généralement coûteux.

Toutefois, il existe une alternative aux mesures expérimentales, consistant en l'utilisation d'outils numériques dans le but de déterminer les distributions du potentiel et du champ électriques le long des isolateurs pollués. Avec le développement croissant de l'informatique et de logiciels de calcul électromagnétique de plus en plus puissants, il est maintenant possible d'obtenir des résultats rapides et précis. Parmi les méthodes numériques disponibles et applicables aux calculs électromagnétiques, la Méthode des Éléments Finis. Ainsi, son utilisation, par le biais du logiciel commercial COMSOL Multiphysics 4.2, fut retenue pour réaliser les différentes simulations.

Nous étudions l'influence de quelques paramètres entrant en jeu dans de telles distributions. Ainsi, nous avons réparti notre travail en quatre chapitres distincts.

Le premier chapitre est consacré à la présentation des différents types d'isolateurs, ainsi qu'à la présentation des phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique.

Nous exposons par la suite, certaines méthodes de mesures de la sévérité de pollution des sites, quelques méthodes d'essais sous pollution naturelle et artificielle, ainsi que différentes techniques de lutte contre la pollution.

Le second chapitre est consacré à une revue des principaux travaux antérieurs étudiant les phénomènes de contournement sur les isolateurs réels. Les travaux liés à la détermination du potentiel et du champ électrique par des méthodes numériques y sont également présentés.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons différentes méthodes numériques pour le calcul du champ électrique.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude, via le logiciel commercial COMSOL Multiphysics, de la distribution du potentiel et du champ électriques le long d'une chaîne d'isolateurs 1512L en fonction du niveau de la tension appliquée, de la conductivité de la pollution et du nombre d'éléments dans la dite chaîne.

Nous terminons par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre travail.

I.1 Introduction :

L'isolateur de chaîne est un matériau isolant solide, capable de résister à la contrainte électrique. Il est caractérisé par une grande impédance au passage du courant électrique. Son rôle est de séparer deux corps conducteurs, soumis à deux potentiels différents.

Dans les réseaux de transport d'énergie électrique, l'isolement pylône-conducteur est assuré par une chaîne d'isolateurs. Chaque chaîne est caractérisée principalement par sa longueur de fuite (nombre d'éléments). Cette longueur est adéquate au niveau de tension de service.

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.).

Le présent chapitre porte sur l'étude de l'importance des isolateurs, historiquement, leur utilité et leurs principaux types, profils et matériaux. Et autre partie qui consacrée à l'étude des phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique. Les principaux paramètres associés ainsi que les méthodes de mesure et les moyens de lutte contre ce phénomène, y sont également présentés.

I.2 Historiquement :

Historiquement les isolateurs étaient réalisés en verre, ou céramique (dérivés de stéatite par exemple), on en trouve maintenant en matériau synthétique.

Les isolateurs verre ou céramique des lignes à haute tension ont en général la forme d'une assiette. On les associe entre eux pour former des chaînes d'isolateurs. On trouve aussi des isolateurs sous forme de colonne, avec toujours un profil en ailettes pour allonger la ligne de fuite, c'est-à-dire la distance aux bornes de l'isolateur, mesurée en suivant le profil de l'isolateur.

Depuis la fin du XX^e siècle, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés pour fabriquer des isolateurs : en réalisant un axe central en fibre de verre et en surmoulant par dessus une matière silicone ou EPDM. Les isolateurs composites sont plus légers, en général

moins chers et présentent une excellente hydrophobicité. Ils sont en particulier prisés pour les zones fortement polluées et dans les zones urbaines où ils résistent mieux au vandalisme[9].

I.3 Les isolateurs :

L'isolateur est constitué principalement d'un matériau isolant solide qui présente une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle. Il est utilisé pour isoler les conducteurs ou les pièces sous tension afin d'empêcher les court-circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution.

La fixation et l'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs, ils ont un rôle à la fois mécanique et électrique. Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique[23]. Les isolateurs en verre ou céramique ont en général la forme d'un empilement d'assiettes. Il en existe deux types : les isolateurs rigides (assiettes collées) et les éléments de chaîne (assiettes emboîtées). Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'assiettes est important. Les chaînes peuvent être simples (câbles légers en suspension), doubles droites (horizontales pour les câbles en amarrage et verticales pour les câbles lourds en suspension), doubles en V (câbles en suspension anti-balancement) voire triples (supportant plusieurs câbles).

L'isolateur possède un double rôle

- Rôle mécanique : porte le conducteur
- Rôle électrique : isole le conducteur par rapport au pylône.

I.4 Domaine d'application:

La présente spécification technique s'applique aux isolateurs en verre trempé ou recuit destinés à équiper les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. Elle définit les conditions auxquelles doivent satisfaire lesdits isolateurs, en ce qui concerne la conception, la fabrication, les caractéristiques nominales et les essais de qualification et de réception à réaliser dans le but d'établir leur conformité aux exigences demandées par l'Office National d'Electricité.

I.5 Fonctionnement et constitution d'un isolateur

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

- Ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage) ;
- Ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique), ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure).

Les isolateurs doivent être conçus et fabriqués pour retenir mécaniquement les conducteurs aux supports et à assurer l'isolement électrique entre ces deux éléments.

L'isolateur est constitué:

- d'une partie isolante .
- des pièces métalliques.
- d'un scellement qui assure la liaison mécanique entre les parties isolantes entre elles ou aux pièces métalliques.

Le scellement doit être conçu et fabriqué de façon à satisfaire aux essais d'endurance thermo-mécanique.

I.6 Principaux types d'isolateurs:

On distingue deux principaux types d'isolateurs :

I.6.1 Isolateur de type rigide :

Un isolateur rigide (Figure I.1) est relié au support par une ferrure fixe. Cet isolateur est principalement soumis à des efforts de flexion et de compression, lorsqu'il est placé en position verticale. Il peut, dans certains cas, être placé horizontalement, voire à l'oblique.

Ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 kV.

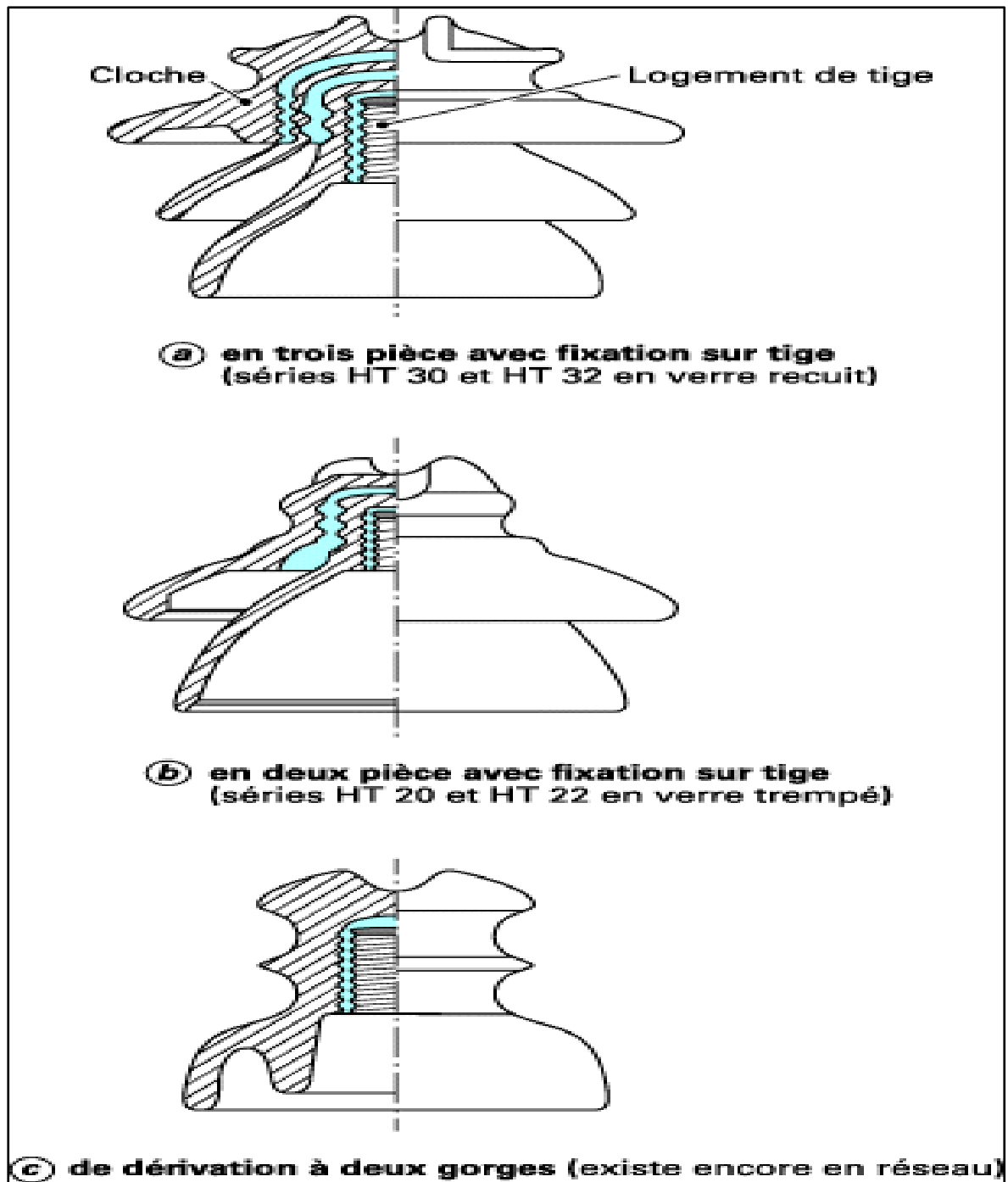


Figure I.1 : Vue en coupe d'un isolateur rigide en verre

Le conducteur étant fixé directement à l'isolateur à l'aide d'un fil d'attache. Les isolateurs rigides à tige, comportent une ou plusieurs pièces en verre recuit, assemblées de façon permanente sur un socle métallique. Ils sont utilisés, en position verticale, horizontale ou oblique, pour les lignes de distribution. les isolateurs rigides équipant les appareils de coupure doivent être calibrés.

I.6.2 Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne :

Ils sont constitués par le matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et à donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs. La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (chaîne d'alignement), soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage).

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

- les isolateurs à capot et tige ;
- les isolateurs à long fût.

I.6.2.1 Isolateurs à capot et tige :

Chaque élément est constitué d'un capot, d'une partie isolante en forme de jupe et d'une tige [3].

La coupe d'un tel isolateur est schématisée sur la (Figure I.2). La forme de la tête est dessinée de sorte que les efforts de traction appliqués à l'isolateur se transforment, autant que possible, en compression des diélectriques sur lesquels apparaissent, toutefois, inévitablement certaines contraintes de cisaillement [4].

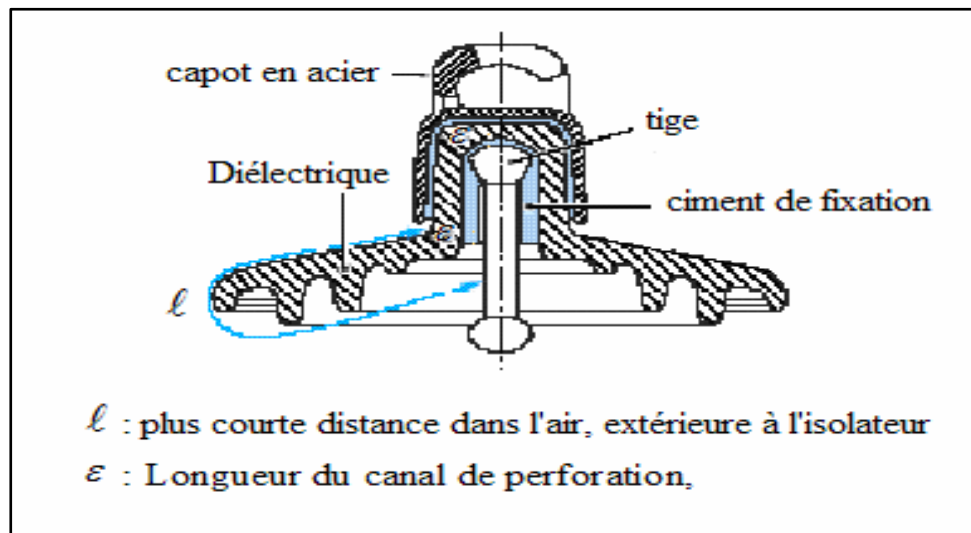


Figure I.2 : Isolateurs à capot et tige

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.

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.

I.6.2.1.a Caractéristiques :

Les isolateurs suspendus du type capot et tige sont caractérisés par :

- La charge mécanique de rupture;
- la tension de tenue à fréquence industrielle à sec;
- la tension de tenue à fréquence industrielle sous pluie;
- la tension de tenue aux chocs de foudre;
- l'effort électromécanique garanti;
- la tenue à la perforation;
- le diamètre nominal de la partie isolante;
- le pas nominal;
- la ligne de fuite nominale;
- la ligne de fuite minimale protégée;

- la ligne de fuite minimale exposée;
- la norme d'assemblage;
- le poids approximatif.

I.6.2.1 b Différents profils des isolateurs à capot et tige :

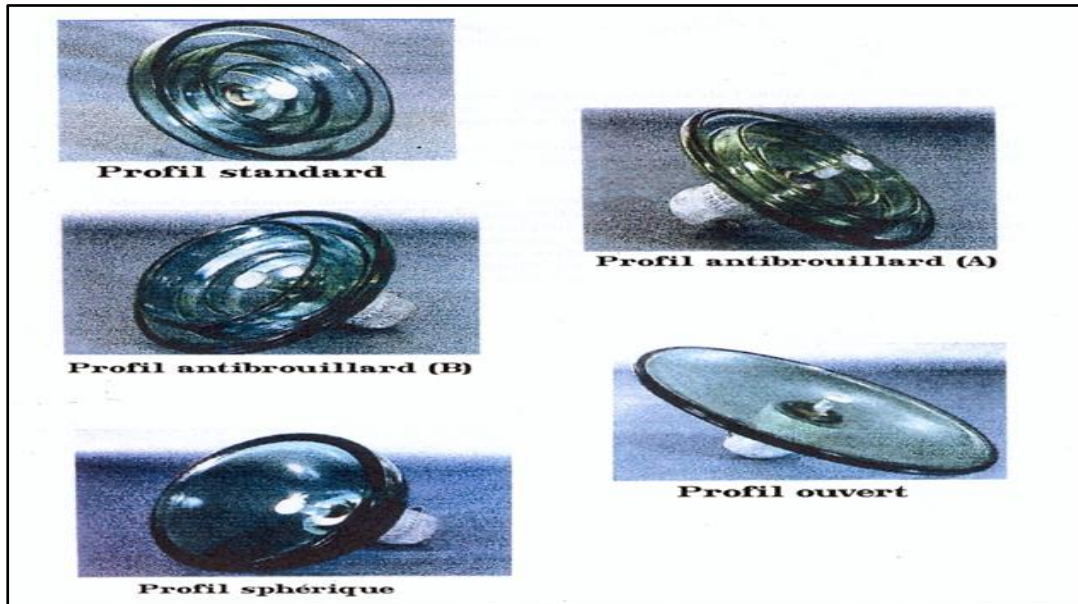


Figure.I.3 :Différents profils d'isolateurs à capot et tige.

a/- Profil standard :

La faible profondeur, l'espacement entre les anneaux (nervures) et la ligne de fuite moyenne permettent l'utilisation de ce profil dans une zone de pollution modérée.

b/- Profil brouillard :

Plus large que le profil standard, l'écartement entre les anneaux permet un bon nettoyage par le vent ou la pluie et facilite le lavage manuel si nécessaire. L'espacement prévient également l'apparition d'arcs entre les anneaux adjacents dans des conditions sévères de pollution.

c/- Profil ouvert :

La suppression complète des anneaux permet de réduire l'accumulation des dépôts polluants. Ce type de profil est particulièrement efficace en régions désertiques où le lavage par pluie est très rare.

d/- Profil sphérique :

Ce type de profil donne une ligne de fuite équivalente au profil standard, mais l'absence d'anneaux facilite le nettoyage manuel.

I.6.2.2 Isolateurs à long fût :

L'isolateur à long fût est constitué d'un bâton cylindrique en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques muni d'ailettes, à chaque extrémité duquel est fixée une pièce métallique de liaison. Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, soit elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (Figure I.4 (a)), soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (Figure I.4 (b)) [3].

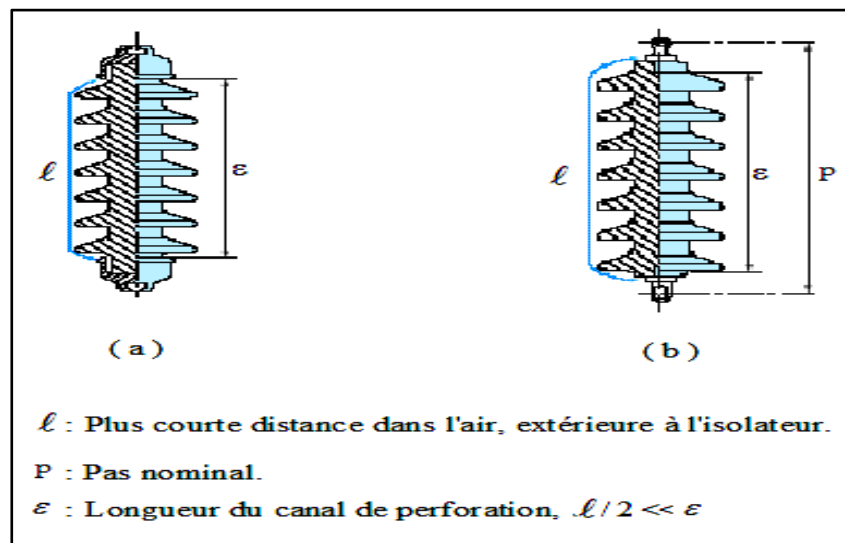


Figure I.4: Isolateurs à long fût

I.6.3 Matériaux utilisés :

Un isolateur est constitué en général de deux parties : une partie isolante et des pièces métalliques de liaison, scellées sur cette partie isolante.

a) Isolants :

Jusqu'aux années quatre-vingt, seuls le verre et la céramique ont justifié d'un bon comportement en exploitation, bien que ces deux matériaux soient, par essence, des matériaux fragiles.

- **Céramiques** : Elles sont actuellement utilisées pour les isolateurs de haute tension et correspondent à des formules voisines, soit de l' Al_2O_3 , SiO_2 (porcelaine traditionnelle), ou de l' Al_2O_3 , 5 SiO_2 (stéatite).

L'isolateur, après usinage de son ébauche cylindrique humide (type à capôt et tige) ou sèche (type à long fût), est cuit dans un four à une température et pendant une durée convenable.

Certaines céramiques à grains très fins sont recommandées pour des isolateurs devant supporter des efforts mécaniques élevés.

- **Verres** : Deux types sont utilisés : le verre recuit et le verre trempé.

Le verre recuit a surtout été utilisé pour les isolateurs rigides. Malheureusement, on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de température. De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension.

Le verre trempé est obtenu par réchauffage de l'isolant retiré du moule à une température d'environ 700°C , puis refroidi par des jets d'air sous pression : les couches extérieures de la pièce isolante acquièrent rapidement une rigidité qui ne leur permet plus aucune déformation.

L'intérieur restant à une température supérieure à celle des couches extérieures, il ne peut se contracter librement, lors de son refroidissement ; il reste donc en extension et crée des contraintes de compression sur les couches superficielles. Le verre trempé présente une contrainte mécanique en traction environ 5 à 6 fois plus grande que celle du verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100°C .

➤ **Matériaux synthétiques :**

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère (Figure I.5). Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique [4].

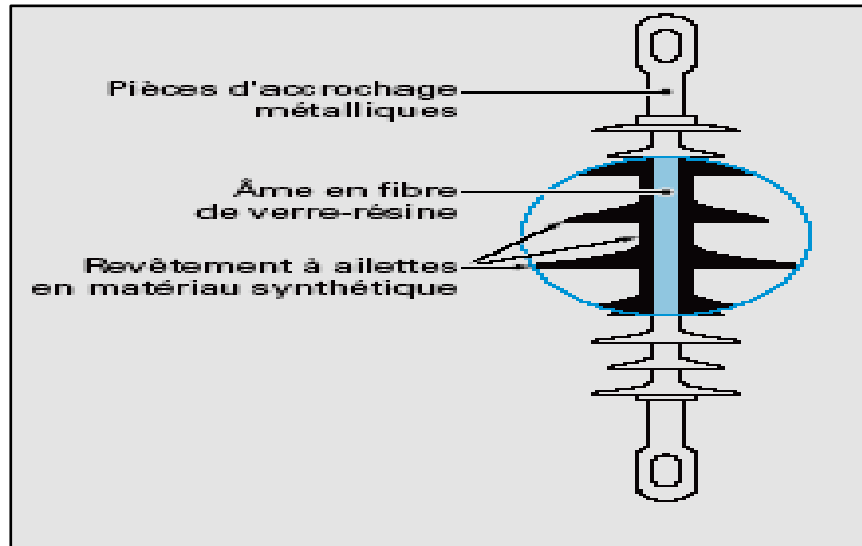


Figure I.5: Isolateur composite

b) Pièces métalliques de liaison :

Les parties isolantes constitutives de l'isolateur sont reliées entre elles ou au support par des pièces métalliques (Figure I.6) réalisées dans différents métaux qui doivent répondre aux contraintes mécaniques et thermiques appliquées à l'isolateur au cours de son exploitation.

Les principaux métaux ou alliages utilisés sont:

- Les fontes malléables, permettant de réaliser des pièces minces et de formes compliquée, par exemple les capots d'isolateurs;
- Les aciers au carbone, de caractéristiques précises (XC des normes NF EN 10084 et NF EN10083), employés pour la réalisation des pièces forgées, en particulier les tiges d'isolateurs
- Les alliages d'aluminium et les alliages de cuivre et de bronze d'aluminium, permettant de fabriquer certains capots;

- Les alliages de zinc du type Z-A4G, qui compte tenue de leur température de fusion, permettent de couler directement les capots sur les diélectriques des isolateurs de faible résistance mécanique.

La liaison entre pièces métalliques et partie isolante est réalisée à l'aide d'un scellement qui peut être fait au mortier de ciment Portland ou alumineux. Des alliages de plomb antimoine, des mélanges de soufre et de poudre céramique sont également utilisés.

De la qualité du scellement et des différents assemblages dépendent, en grande partie, la sécurité d'exploitation et la durée de vie de l'isolateur [2].

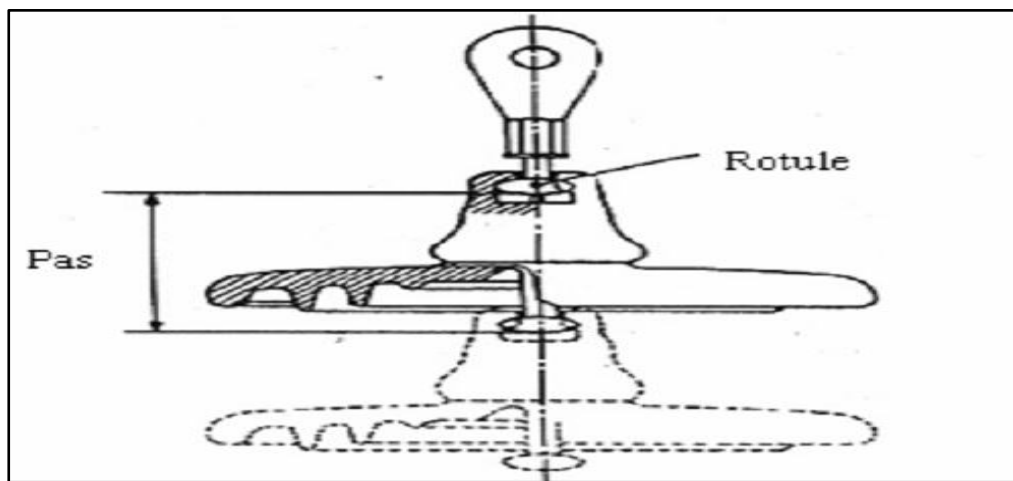


Figure I.6: Assemblage à rotule

I.7 Pollution des isolateurs :

La pollution des isolateurs constitue un problème majeur dans la dégradation de l'isolement des ouvrages (postes et lignes) de haute tension. 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.

La non-homogénéité est due à la présence de différents agents polluants dans une même région, et la non-uniformité de la répartition sur les surfaces des isolateurs est due aux profils des isolateurs, le sens et la direction des vents dans cette région, la pluie, la

position de la chaîne d'isolateurs par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), la position de l'isolateur dans la chaîne, le degré de pollution du site où se trouve les isolateurs ainsi que la surface inférieure ou supérieure de l'isolateur et de l'effet d'inconnu de l'humidité sur la pollution.

I.7.1 Sources de pollution :

La nature de la pollution dépend de la situation géographique et climatique. Les diverses sources de pollution les plus fréquemment observées sur les isolateurs peuvent être regroupées selon leur origine et classées comme suit :

a- Pollution naturelle :

Cette pollution peut être marine, désertique ou autre, provenant des dépôts de poussières véhiculés par les vents.

a-1- Pollution marine :

Dans les installations en bordure de mer, les embruns portés par le vent déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel qui, à plus ou moins longue échéance, recouvre toute la surface de l'isolateur y compris les parties les mieux protégées. Cette couche de sel, humidifiée par les embruns eux même, ou par un brouillard ou simplement par condensation, devient conductrice. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance dans certaines conditions, et se développer jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur[7].

a-2- Pollution désertique :

Dans les régions désertiques, les fréquentes tempêtes de sables déposent progressivement sur les surfaces des isolateurs une couche de pollution contenant des sels. Une fois humidifiée, cette couche devient beaucoup plus conductrice. Un courant de fuite apparaît brusquement accompagné d'arcs partiels, dont la propagation à la surfaces de l'isolateur peut aussi conduire à un contournement total de l'isolateur .

a-3- Autres sources de pollution naturelle :

La pluie est un phénomène naturel propice à l'humidification des isolateurs par excellence. Lorsqu'elle est intense, elle est susceptible de provoquer la désagrégation des dépôts solides. Cependant, cet auto-lavage, favorable à l'amélioration des qualités diélectriques des isolateurs, est contrarié par le phénomène de ruissellement .

En présence d'une pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne ou de colonne isolante. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut entraîner le contournement de la chaîne d'isolateur ; c'est le contournement sous pluie.

b- Pollution industrielle :

La pollution industrielle provient des fumées évacuées à proximité de raffineries, de cimenteries, de complexes sidérurgiques ou même aux abords des centrales thermiques. Pour les régions exemptes des fumées, cette pollution peut être d'origine domestique (appareils de chauffage polluants, véhicules automobiles, ...) ou agricole (engrais). Les isolateurs se recouvrent des poussières faiblement conductrices, mais hygroscopique (absorbe l'humidité). A la présence d'une humidité intense, le sel contenu dans ces poussières abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs et le contournement peut parfois survenir[8].

c-Pollution mixte :

Ce type de pollution résulte de la combinaison entre deux ou plusieurs pollutions précitées, comme exemple les pollutions marine et industrielle lorsque les installations électriques sont situées en bord de mer.

I.7.2 Technique de lutte contre la pollution :

L'augmentation du degré de pollution représente un risque immense pour les installations électriques. Pour cela plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées.

I.7.2.1 Allongement de la ligne de fuite :

Cette méthode permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux techniques sont utilisées :

- Le changement de type d'isolateur (pour rallonger la ligne de fuite) : c'est une technique très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- L'utilisation de prolonger de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [10].

I.7.2.2 Isolateurs plats :

Les isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'autonettoient très bien sous l'effet du vent[11].

I.7.2.3 Graissage périodique :

Par mesure économique, seuls les isolateurs de postes sont concernés. On utilise des graisses silicones. Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs [12].

I.7.2.4 Revêtement silicone :

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Ce revêtement protège les isolateurs et améliore leurs tenues sous pollution.

I.7.2.5 Les isolateurs composites :

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère voient leurs caractéristiques changer au cours du temps ; ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service.

I.7.2.6 Nettoyage des isolateurs :

Le nettoyage manuel et le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde. Néanmoins, l'application de ces méthodes pose des problèmes majeurs à cause des interruptions de service, parfois assez longues. Pour éviter ces coupures, un lavage sous tension des isolateurs est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau du lavage, le processus du lavage et les distances de sécurité, et ce afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

I.8 Comment l'isolation électrique des pylônes est-elle assurée :

Les isolateurs sont fabriqués avec des matériaux isolants d'un point de vue électrique (verre, polymère...). De plus, ils permettent de maintenir une distance d'air suffisante entre le câble et le pylône, de sorte que le courant électrique ne passe pas dans le pylône[6].

NB : Avec l'air est un isolant naturel.

La distance d'air nécessaire pour assurer l'isolement électrique du pylône, augmente avec le niveau de tension de la ligne. Ainsi, la chaîne d'isolateurs est d'autant plus longue, et les isolateurs sont d'autant plus nombreux, que la tension de la ligne électrique est élevée.

D'un coup d'oeil, comptez les isolateurs et reconnaissez la tension des lignes HT et THT :

- 4 à 9 isolateurs pour les lignes HT 63 000 et 90 000 volts
- 8 à 16 isolateurs pour les lignes THT 225 000 volts
- 12 à 19 isolateurs pour les lignes THT 400 000 volts

Les isolateurs sont réalisés en verre, en céramique ou en matériau synthétique. Utilisés en chaîne, ils ont en général, la forme d'un « empilement d'assiettes ». On distingue deux types d'isolateurs sur le réseau RTE :

L'isolateur en verre en trempé qui est le plus répandu sur le réseau RTE aujourd'hui (98%). Les isolateurs en verre s'assemblent les uns aux autres, en chaîne, afin d'obtenir la longueur recherchée, fonction du niveau de tension de la ligne. Ils ressemblent à des « assiettes emboîtées les unes aux autres » [6].

L'isolateur composite que l'on appelle aussi l'isolateur rigide. Il est constitué d'un seul élément de longueur variable selon le niveau de tension de la ligne. Par rapport aux isolateurs en verre, les isolateurs rigides sont capables de tenir des charges mécaniques plus importantes mais sont moins flexibles. Ils ressemblent à des « assiettes collées les unes aux autres »



Figure I.7 en verr: isolateurs e trempé et isolateurs rigides

I.8.1 Comment sont installés les isolateurs :

Les modes de pose des isolateurs sur le réseau dépendent des formats des pylônes.

I.8.2 Chaîne d'ancrage :

Les chaînes d'ancrage sont utilisées dans le cas de pylône d'ancrage. Ce type de chaîne se distingue par sa position quasi horizontale.

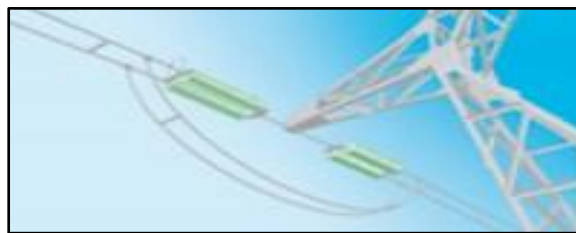


Figure I.8 : Chaîne d'ancrage

I.8.3 Chaîne en V :

Les chaînes d'isolateurs en V sont utilisées pour les pylônes de suspension lorsque que l'on souhaite limiter le balancement latéral des conducteurs.



Figure I.9 : Chaîne en V

I.8.4 Chaîne droite :

Les chaînes de suspension droite sont la solution de base pour les pylônes de suspension. Ce type d'isolation est le plus fréquemment utilisé.



Figure I.10 : Chaîne droite

I.9 Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté certains types d'isolateur et leurs utilisations.

Pour mieux dimensionner les chaînes d'isolateurs, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites et les différents paramètres contribuant à la dégradation de l'état de surface des isolateurs (la pluviométrie, l'humidité, la température, le vent,...).

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépend la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service. 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 les isolateurs qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

La tension de contournement diminue avec la conductivité de l'environnement pollué. En outre, l'isolateur est moins rigide quand la conductivité de la surface augmente ainsi que sa largeur.

II.1 Introduction :

Depuis les dernières décennies, l'intérêt croissant vis-à-vis des phénomènes de contournement des isolateurs sous diverses conditions atmosphériques, a donné lieu à un nombre exhaustif d'études qui ont été publiées à travers le monde. Dans le but de donner plus de détails sur le phénomène étudié, une revue de littérature est présentée. Il s'agit de présenter les principaux travaux sur l'étude du phénomène de contournement et du courant de fuite sur des isolateurs réels sous différentes conditions de pollution.

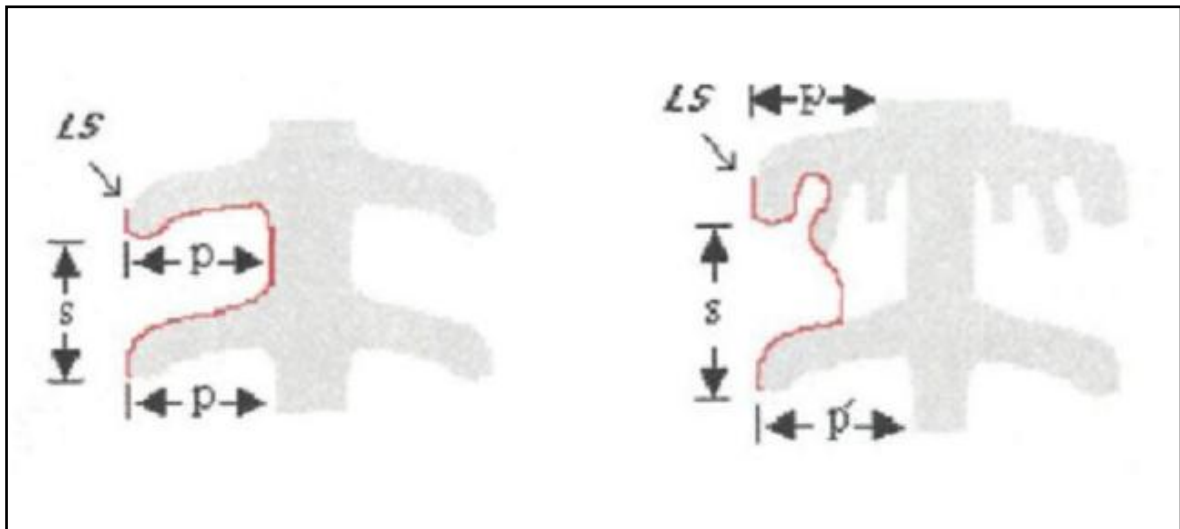
Nous présentons également quelques travaux relatifs à la détermination expérimentale et numérique du potentiel et du champ électriques le long des isolateurs pollués.

II.2 Travaux sur la pollution des isolateurs :**II.2.1 Influence de la forme de l'isolateur (Le Roy et Cie [13]) :**

La longueur de fuite est un paramètre important qui influe sur la tenue diélectrique des isolateurs. Pour améliorer la performance d'un isolateur, on pourrait être tenté d'augmenter la longueur de fuite. En effet, plusieurs formes d'isolateurs sont utilisées.

Un isolateur, dont le profil est simple (Figure II.1 a), possède une ligne de fuite plus petite que celle d'un isolateur comportant de nombreuses nervures comme les isolateurs antipollution (Figure II.1 b), lorsqu'ils sont identiquement pollués. En présence d'une pollution humide sur la surface de l'isolateur, des arcs locaux peuvent se développer sous certaines conditions. Si, les arcs locaux restent sur la surface isolante, la ligne de fuite est complètement utilisée (Figure II.1 a). Par contre, si les arcs adoptent un trajet plus court dans l'air, une partie de la ligne de fuite n'est plus utilisée. On admet que dans ce cas, la tension de contournement est inférieure à celle escomptée. Il est presque impossible de prédire l'amorçage des arcs dans l'air le long de la ligne de fuite, mais il a été observé qu'au de là d'une distance critique un claquage se produit [13]. D'autre part, on peut admettre que si la couche polluante est très conductrice, l'arc adopte un trajet préférentiel de la ligne de fuite. En revanche, une faible conductivité de la couche polluante favorise le claquage dans l'air entre les jupes.

Un facteur empirique appelé facteur de profil, FP, présenté sur la figure (II.1, a), a été introduit. Il représente le rapport entre la ligne de fuite simplifiée ($2P + S$) et celle réelle (LS) pour un pas de l'isolateur, (P) étant la profondeur horizontale maximale des ailettes et (S) la distance entre deux ailettes.



$$a) FP = \frac{2P + S}{LS}$$

$$b) FP = \frac{P + P' + S}{LS}$$

Figure II.1 : Définition du facteur de profil

Les expériences sur les isolateurs contaminés ont montré que, pour un niveau de pollution donné, la tension de contournement des isolateurs est d'autant plus faible que le facteur de profil est plus petit jusqu'à une valeur donnée de salinité (Figure II.2).

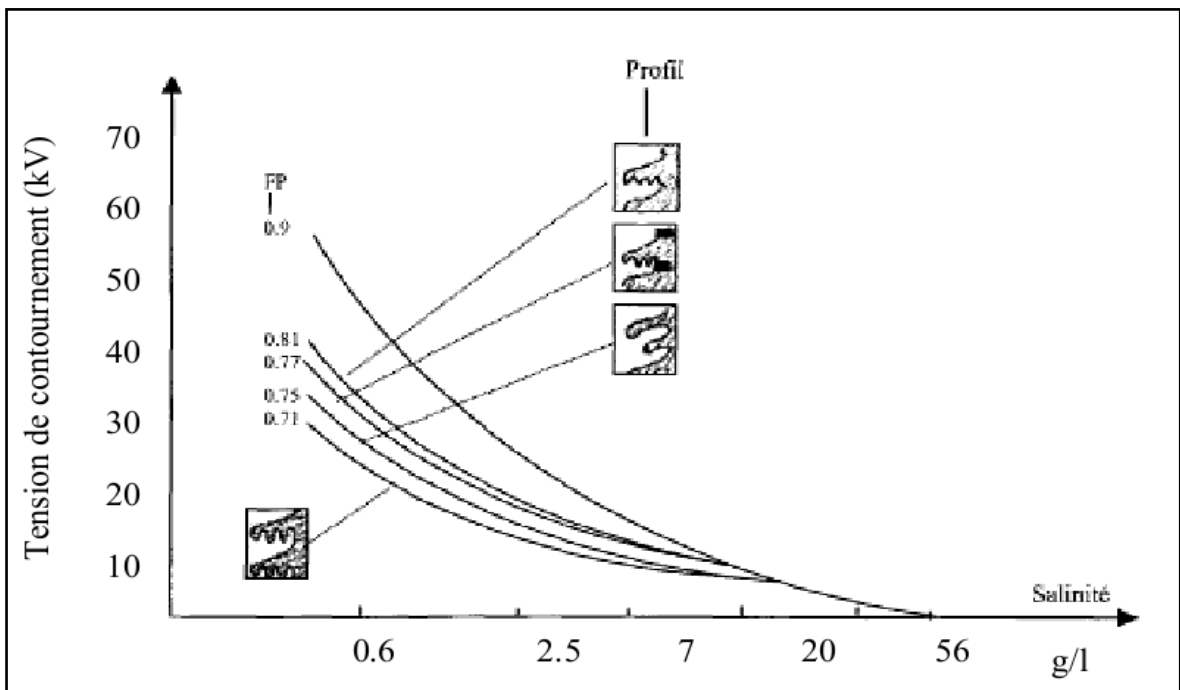


Figure II.2 : Influence du profil sur la tension de tenue des isolateurs pollués

II.2.2 Influence du diamètre :

➤ **Travaux de Le Roy et Cie [13] :**

Par définition, le diamètre moyen d'un isolateur réel correspond au diamètre d'un isolateur qui serait cylindrique et ayant la même ligne de fuite, L , et la même résistance lorsqu'il est recouvert de la même couche polluante qui a pour épaisseur e , (Figure II.3).

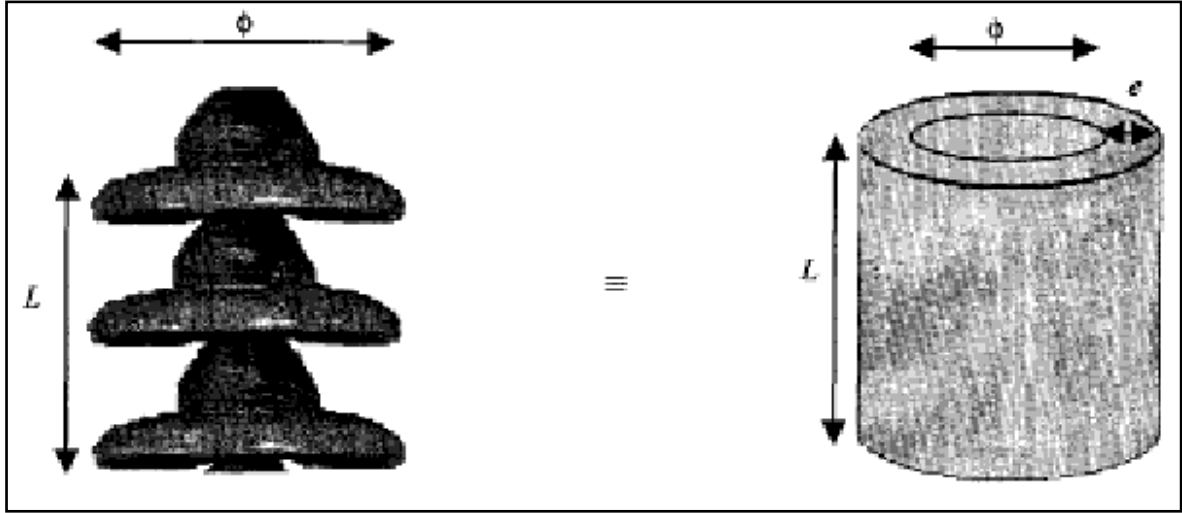


Figure II.3 : Approche d'un isolateur réel par un modèle cylindrique

En effet, la longueur d'un cylindre est donnée par :

$$L = \frac{S}{\pi\phi} \quad \text{II.1}$$

où S est la surface latérale du cylindre et ϕ est le diamètre. Par conséquent, si on intègre L le long du profil de l'isolateur, on aura une approximation de son facteur de forme :

$$f = \int_0^L \frac{dS}{\pi\phi} \quad \text{II.2}$$

où dS est l'abscisse curviligne d'un point de l'isolateur mesuré le long de son profil.

Si, on assimile la couche polluante à un film régulier d'épaisseur e et de résistivité volumique ρ , la résistance de l'isolateur sera :

$$R = \int_0^L \frac{dS}{\pi\phi_e} = \frac{\rho}{e} f \quad \text{II.3}$$

où f est le facteur de forme de l'isolateur.

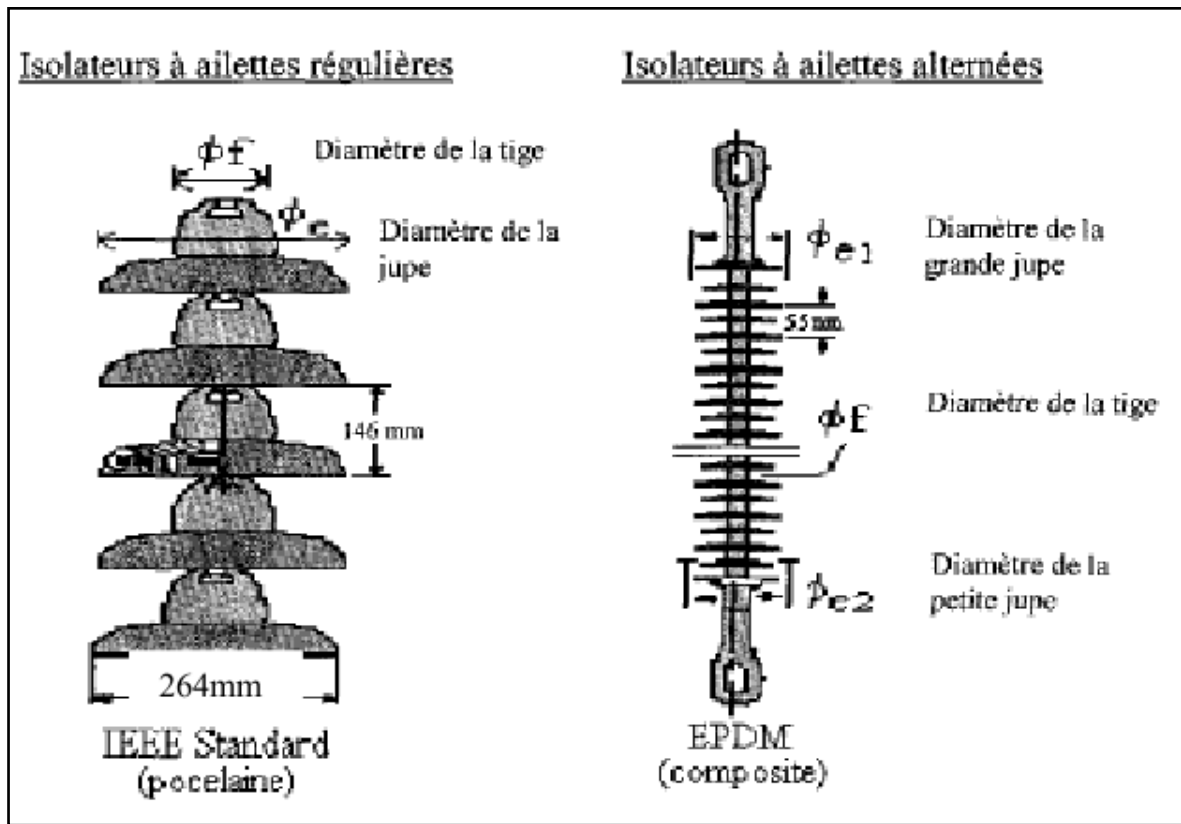
D'autre part, la résistance du cylindre équivalent est :

$$R = \rho \frac{L}{\pi \phi_e} \quad \text{II.4}$$

En conclusion, en assimilant l'isolateur réel à un isolateur cylindrique (Figure II.3) ayant une même ligne de fuite L_p et une même couche polluante, le diamètre moyen s'écrit [13] :

$$\phi_m = \frac{Lf}{\pi \phi_e} \quad \text{II.5}$$

Pour les isolateurs de gros diamètre, on peut résumer le diamètre moyen comme suit :



$$\phi_m = \frac{\phi_e + \phi_f}{2}$$

$$\phi_m = \frac{2\phi_f + \phi_{e1} + \phi_{e2}}{4}$$

Figure II.4 : Diamètre moyen des isolateurs IEEE et EPDM

Il a été démontré que, pour une certaine densité de contamination, la tension critique de contournement diminue au fur et à mesure que le diamètre augmente et ce, jusqu'à une certaine valeur où la tension de contournement cesse de diminuer [13]. Ce phénomène s'explique par le fait qu'un large diamètre ϕ signifie une plus grande

exposition de la surface à la pollution, diminuant ainsi la résistance et réduisant, par conséquent, la tension de contournement. Par contre, une augmentation relative du diamètre peut causer un supplément d'arcs locaux provoquant une baisse de tension aux bornes de l'électrode. Cette baisse de tension compense partiellement la baisse de la tension de contournement. De plus, l'augmentation du diamètre peut impliquer l'augmentation de la distance de fuite qui atténue la diminution de la tension de contournement. La figure (II.5) exprime les résultats d'essais par le rapport entre la tension de contournement mesurée (V_c) et la tension de contournement moyenne des isolateurs de petit diamètre (V_{c^*}).

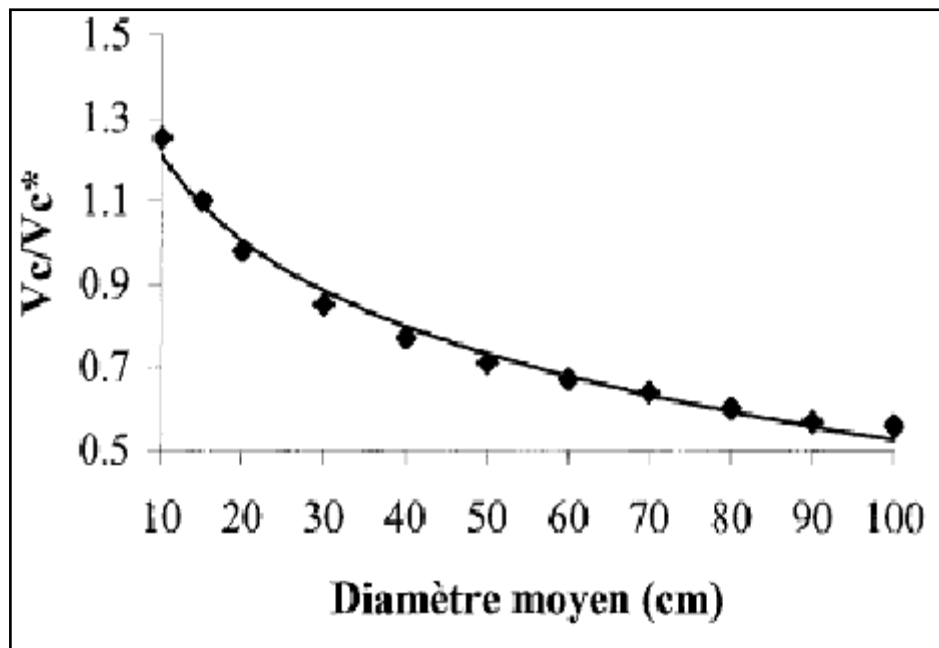


Figure II.5 : Performance des isolateurs pollués en fonction du diamètre moyen

➤ **Travaux de Matsuoka et al., [14] :**

Les expériences de Matsuoka et al [14], ont montré que la tension de tenue diminue au fur et à mesure que le diamètre augmente (Figure II.6). La variation du diamètre affecte aussi la densité du dépôt de contamination sur l'isolateur : plus le diamètre augmente, plus la densité du dépôt contaminant diminue (Figure II.7).

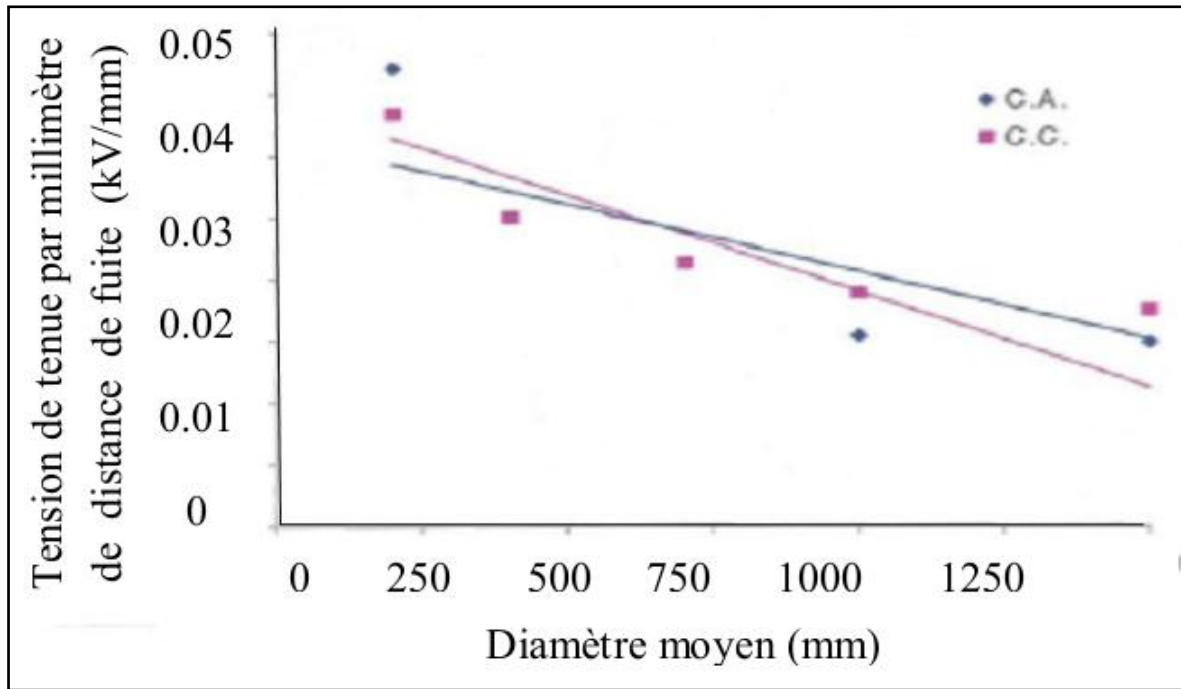


Figure II.6 : Tension de tenue par millimètre de distance de fuite en fonction du diamètre (C.A : courant alternatif et C.C : courant continu)

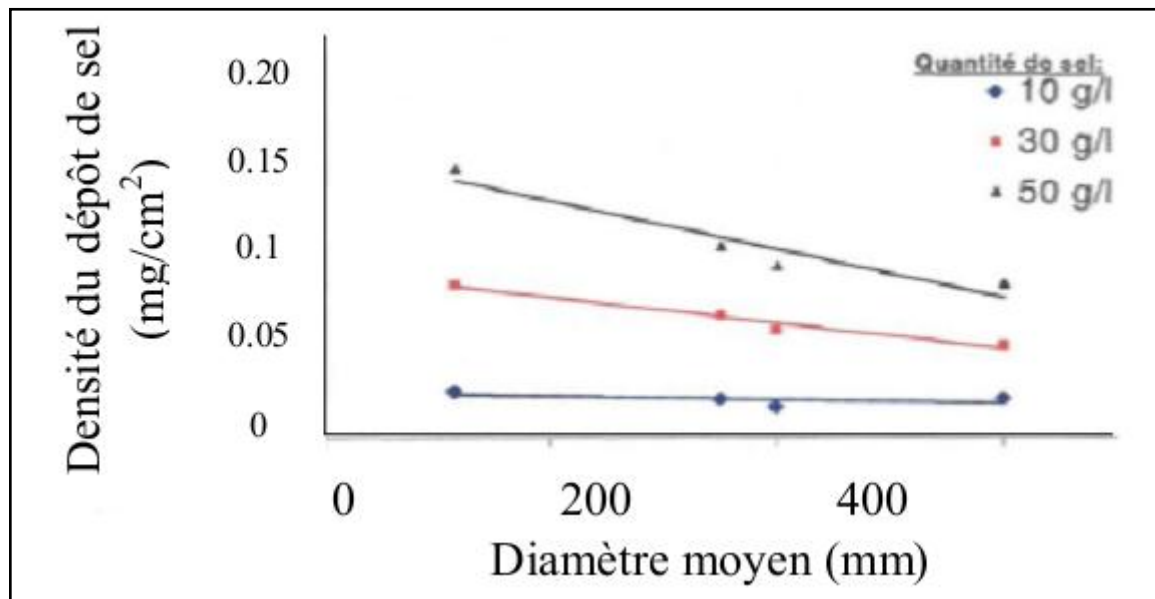


Figure II.7 : Densité de dépôt de sel en fonction du diamètre moyen

II.2.3 Travaux de Bologna, Britten, Mahatho et Reynders [15] :

Ont effectué des essais sur des isolateurs légèrement pollués au laboratoire et en service. Leurs études ont montré que la majorité des contournements ont lieu entre 20h00 et 06h00. Ce mécanisme doit être lié à la combinaison du léger mouillage dû à la condensation et la légère couche de pollution, probablement non uniforme, déposée sur

l'isolateur. Dans ces conditions, un courant de fuite s'établit sur la surface de l'isolant, ce qui provoque un contournement. Les investigations se sont basées sur des tests réalisés sur des isolateurs de 400 kV en service et au laboratoire, en mesurant l'amplitude du courant de fuite et en analysant sa forme. Les isolateurs des lignes de 400 kV comportaient 23 disques en verre. Les données ont été relevées en continu (sans interruption) durant une période de 8 mois. Une analyse des données a montré la relation entre les conditions environnementales (généralement l'humidité) et l'amplitude du courant de fuite. Il a été remarqué, effectivement, que le courant de fuite est fonction de la sévérité de la pollution sur la surface des isolateurs caractérisée par l'ESDD (Equivalent Salt Deposit Density) utilisée pour l'évaluation de la sévérité de la pollution.

Pour les tests au laboratoire, les isolateurs ont été pollués artificiellement. La sévérité de la pollution utilisée durant l'expérimentation est de 5 g de sel pour un litre d'eau. Celle-ci est considérée comme une pollution légère [16]. La tension est la même qu'en service soit 15.33 kV/mm. Les paramètres de surveillance sont le courant de fuite (amplitude et forme d'onde) et la tension.

Dans le cas d'un mouillage uniforme, il a été remarqué, une minute approximativement après la mise sous tension, l'apparition de micro-étincelles sur les éléments. Le plus loin du bout de la chaîne (côté terre) a marqué le plus d'activité. Le courant de fuite a été trouvé en phase avec la tension, ce qui correspond à la présence d'une couche de pollution répartie uniformément sur la surface (Figure II.8).

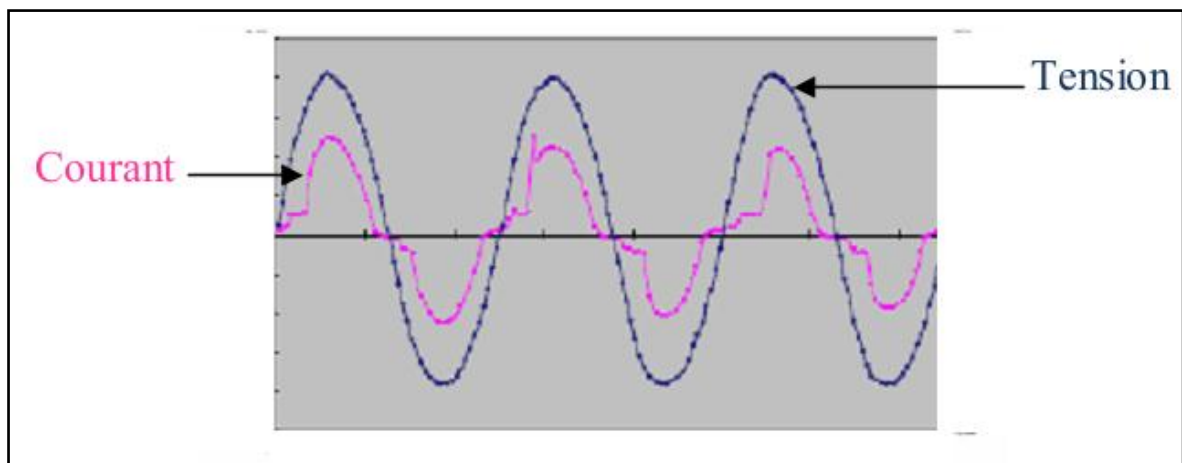


Figure II.8 : Tension et courant de fuite relevés cas d'isolateur uniformément pollué

Dans le cas d'une humidification non uniforme, le côté bas de chaque élément de l'isolateur est mouillé, le haut est gardé propre. Des micro-étincelles sont remarquées sur les deux côtés de l'élément (bas et haut), les éléments loin de la borne HT marquant le plus d'activité en termes d'apparition d'étincelles.

Ainsi, l'amplitude du courant de fuite était faible (25 mA). Le courant était en avance par rapport à la tension (Figure II.9). Cela veut dire que c'est la composante capacitive du courant de fuite qui domine (la capacité est créée par la zone propre du haut de l'élément). La forme du courant contient aussi des pics qui sont dus aux étincelles.

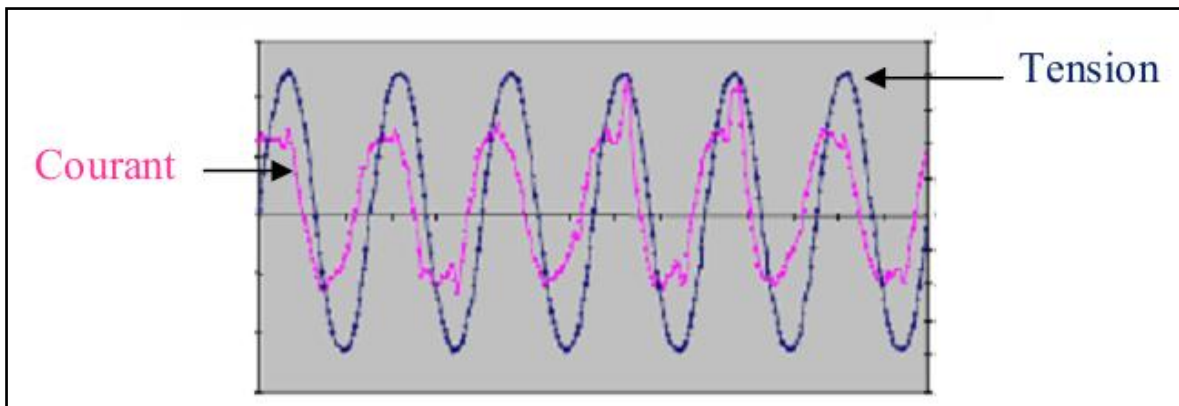


Figure II.9 : Tension et courant de fuite relevés cas d'isolateur non-uniformément pollué

II.2.4 Travaux de Meghnefi, Volat et Farzaneh [17] :

Ces chercheurs ont fait une analyse, en temps et en fréquence, du courant de fuite circulant sur la surface de l'isolateur pendant l'accumulation de la glace sur celle-ci. Leur travail a montré la variation du courant de fuite (en forme et en amplitude) en fonction du temps d'application de la tension. Cette variation, qui a eu lieu sous la contrainte climatique (dépôt de la glace), présente deux zones distinctes, caractérisées chacune par une forme et un spectre particuliers du courant de fuite. La première zone est caractérisée par une amplitude de courant de fuite quasi constante et relativement faible ; ce courant garde une forme sinusoïdale en avance par rapport à la tension. Le déphasage est principalement dû à la phase initiale du dépôt de la glace sur la surface isolante.

Une phase de transition entre les deux zones était marquée par des décharges électriques autour des assiettes ; au fur et à mesure que la sévérité augmente (augmentation de la quantité de la glace), l'amplitude du courant de fuite augmente ainsi que le nombre de pics de courte durée. Durant cette phase, la forme du courant de fuite commence à marquer des distorsions et tend à devenir en phase avec la tension ; ainsi l'analyse spectrale montre l'augmentation de l'amplitude des harmoniques (les plus

importants sont le cinquième et le troisième). Il a été remarqué que la durée de la première phase dépend du taux de formation de la glace.

II.2.5 Travaux sur la pollution marine :

Keller-Jacobsen [18] a effectué des travaux sur site, dans plusieurs stations de mesure placées à différentes distances de la mer. Ces travaux lui permettent d'évaluer, d'une part, le degré de pollution et d'autre part, d'établir une distinction entre la pollution sur la surface supérieure et la surface inférieure de l'isolateur.

Les résultats obtenus montrent que :

- les isolateurs du type capot et tige anti-brouillard reçoivent le dépôt maximal.
- les isolateurs à long fût avec les dessous de la surface de l'isolateur nervuré recevront plus de dépôts par rapport aux isolateurs dont les dessous sont lisses.

Une autre étude, très précise, est effectuée bien plus tard par **Swift** [19] sur la pollution marine. Il résulte de l'étude de **Swift**, que la trop grande concentration des particules polluantes autour de la tige est due, non seulement aux mauvaises propriétés d'auto-nettoyage de la surface inférieure de l'isolateur, mais également à la nature "rugueuse" du ciment compris entre la tige et la porcelaine, lequel a donc le défaut de "retenir" les particules de sel.

Cette rétention provoque alors la corrosion de la tige, laquelle peut, à la longue, conduire au claquage de la porcelaine. L'auteur préconise alors, entre autres, de diminuer la proportion de sable dans le mortier utilisé, ou alors de recouvrir, par exemple, la zone de scellement par une fine couche de bitume afin de lisser l'espace tige-porcelaine.

II.2.6 Travaux sur la pollution désertique :

M.A.B. El Koshairy et ses collaborateurs [20], dans des conditions de pollution désertique, ont observé, après une exposition de six mois de chaînes d'isolateurs, une densité de pollution maximale sur les isolateurs situés le plus près des conducteurs sous tension, alors qu'elle est minimale sur les éléments reliés aux consoles.

Par ailleurs, la quantité de pollution déposée sur un isolateur augmente, lorsque la tension qui lui est appliquée, augmente. Lorsque la chaîne devient plus longue, le rapport entre la densité maximale et la densité minimale du dépôt de pollution augmente. Ce qui accentue encore davantage la non-uniformité de la répartition de la pollution le long de la chaîne.

Le travail de M. Awad et al. [21] porte sur l'étude de l'effet du vent, sa vitesse et les particules de sable, sur la tension de contournement des chaînes d'isolateurs. Par ailleurs, des essais expérimentaux sont effectués sur des chaînes d'isolateurs en

laboratoire, en simulant la tempête de sable, avec une vitesse variable, sous une tension alternative et continue. Les mêmes essais ont été faits sous des conditions naturelles.

Les résultats obtenus à partir de cette investigation, ont permis à l'auteur de conclure que :

- La tension de contournement augmente avec l'augmentation de la vitesse du vent (Figure II.10 (a)).
- La présence des particules de sable diminue la rigidité diélectrique des isolateurs

(Figure II.10 (b)).

- De plus, cette diminution sera plus importante en appliquant une tension continue.

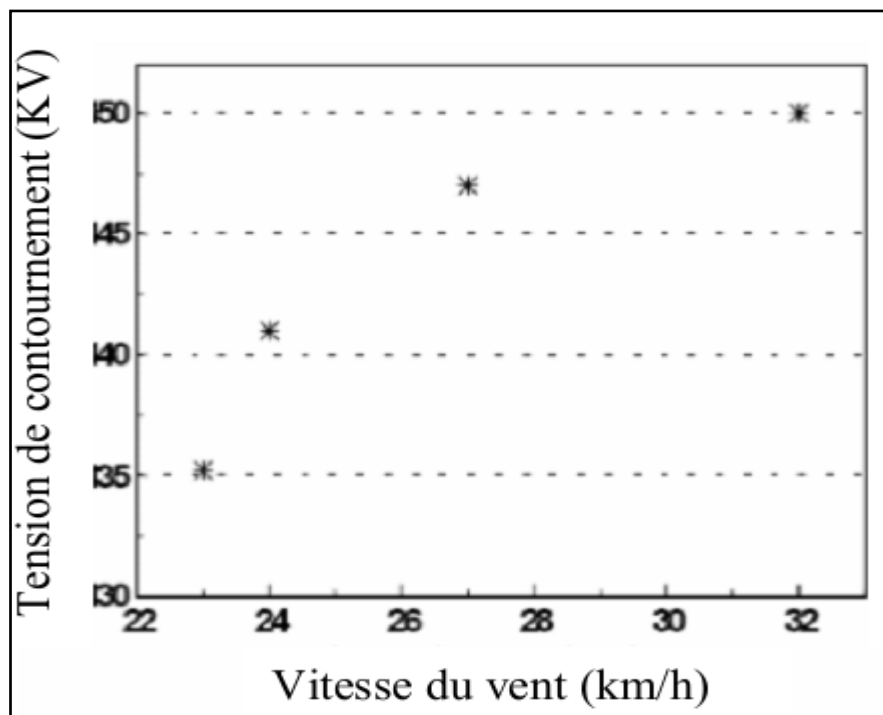


Figure II.10.a : Effet de la vitesse du vent sur le contournement des isolateurs

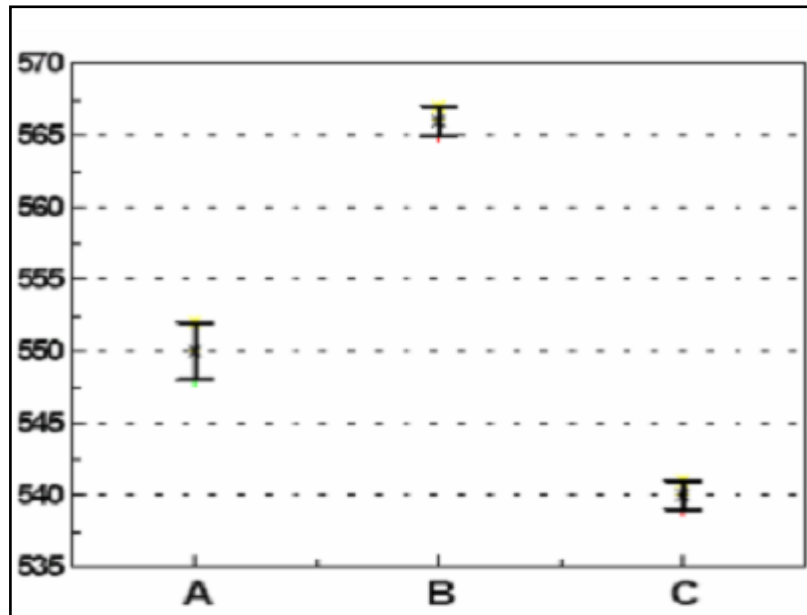


Figure II.10.b: Effet de la pollution désertique sur le contournement des isolateurs (A : chaîne d'isolateurs propre et sèche, B : chaîne d'isolateurs en présence du vent, C: chaîne d'isolateurs en présence du vent de sable)

II.2.7 Travaux de Yong Zhou et al [22] :

Ces auteurs ont exploité les informations procurées par le signal du courant de fuite, pour caractériser l'état de surface d'un isolateur SIR de type EVA. Les résultats ainsi obtenus ont été comparés à ceux trouvés sur un modèle de laboratoire développé par ces mêmes chercheurs. Le diagnostic à partir du courant de fuite a été pris en considération, suite à l'intérêt porté par l'équipe sur les propriétés hydrophobes du matériau et l'évaluation des dégradations occasionnées sur les propriétés d'isolations [23].

Cette étude a également tenu compte du comportement des décharges électriques qui ont lieu à la surface des polymères :

- Les arcs locaux qui surviennent dans les bandes sèches.
- Les décharges partielles qui sont provoquées par la triple jonction entre les gouttelettes d'eau, le polymère et l'air à cause de la différence de la permittivité de chacun d'entre eux.

Le mode expérimental a pris en considération la pollution par humidification, vu qu'elle est largement utilisée dans les recherches, pour l'étude des performances électriques des polymères sous haute tension.

La pollution des isolateurs, réel et modèle (Figure II.11), est faite avec une solution de 3 litres d'eau distillée qui contient 40 g/l de Tonoko et 12 g/l de NaCl. Les mesures effectuées avec l'ESDD indiquent 0.03 mg/cm^2 pour cette solution. La pollution des surfaces est effectuée par pulvérisation et la tension appliquée est de 4.8 kV et 13.3 kV respectivement pour le modèle et l'isolateur réel. Une caméra sert à suivre le phénomène de décharge et un oscilloscope relié à un PC permet l'acquisition des signaux du courant de fuite. L'évaluation du champ électrique, en utilisant la méthode des éléments finis, indique les zones de fortes intensités.

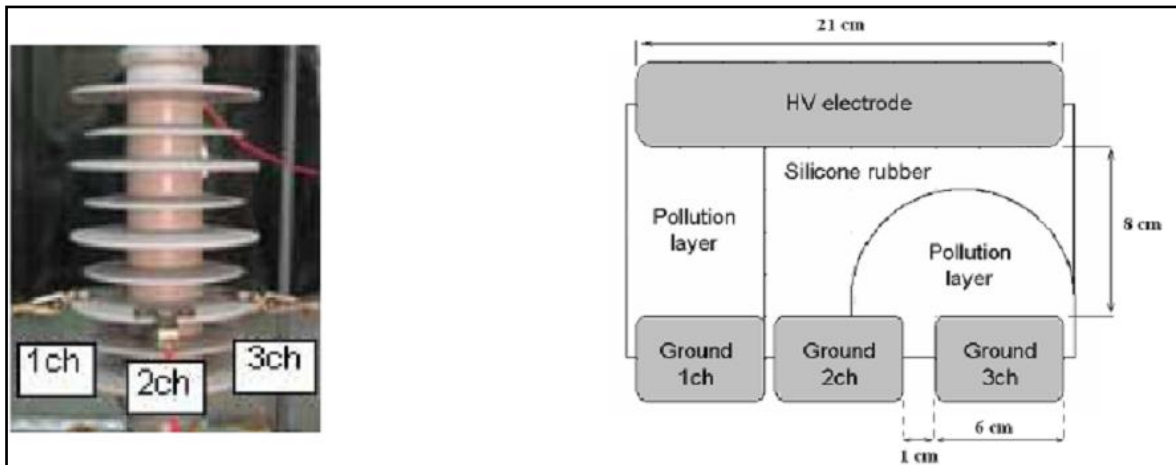


Figure II.11 : Isolateur réel utilisé (à gauche) et son modèle à droite

Les résultats obtenus lors de l'analyse des courants (modèle plan) 1ch, 2ch et 3ch montrent que 1ch a une forme parfaitement sinusoïdale due à l'uniformité de la couche de pollution (caractère parfaitement résistif) ; 2ch et 3ch ont une forme distordue due, d'une part à l'activité intense des décharges, et d'autre part, à la non-uniformité de la couche de pollution (Figure II.12). Ces décharges sont le résultat d'une valeur du champ électrique qui dépasse celle de la rigidité diélectrique du système ainsi formé.

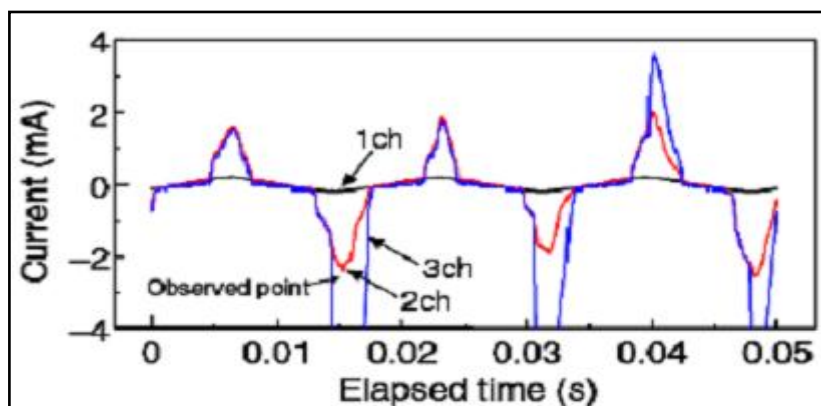


Figure II.12 : Formes d'ondes du courant de fuite du modèle

Pour l'isolateur de type EVA, les trois signaux du courant de fuite ont une densité non-uniforme (Figure II.13). Ce phénomène est le résultat de l'irrégularité du profil de l'isolateur.

L'apparition d'arcs locaux est causée par l'assèchement de certaines zones, dû à cette densité de courant non-uniforme. La surveillance par caméra de l'activité des décharges, a permis de détecter la position de celles-ci en fonction de la variation d'amplitude de 1ch, 2ch et 3ch :

- Une décharge apparaît à 37 ms sur 1ch.
- Le déplacement de cette décharge de 1ch à 2ch à 38ms est caractérisé par l'augmentation de l'amplitude des courants 1ch et 2ch.
- L'apparition de la décharge entre 2ch et 3ch, après 1 ms, engendre une augmentation de l'amplitude du courant 3ch.

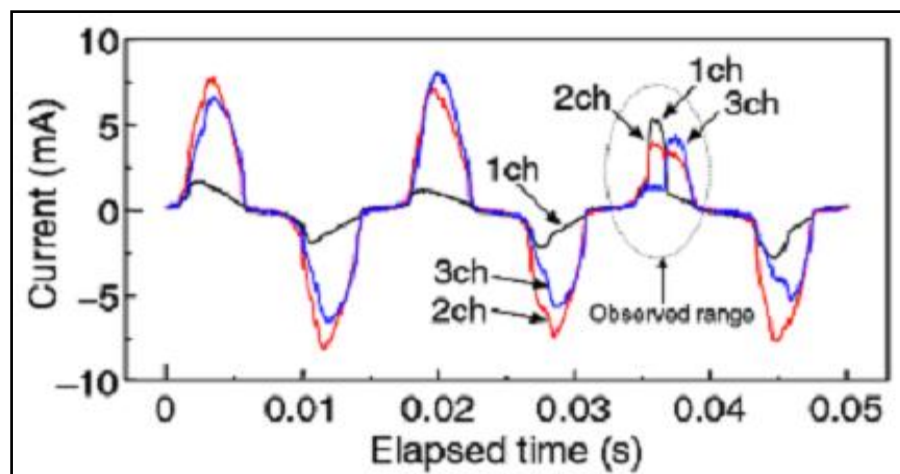


Figure II.13 : Formes d'ondes des courants de fuite de l'isolateur réel

Cette étude permet de conclure que le courant de fuite peut être utilisé comme moyen de détection des positions des décharges partielles, et qu'il identifie l'état de surface de l'isolateur, compte tenu de l'irrégularité de son profil.

II.2.8 Travaux de Metwally et al [24] :

Ces auteurs ont conduit une série d'essais expérimentaux sur des chaînes isolateurs 33 kV de formes et composantes différentes. Pour cela, trois chaînes d'isolateurs de ligne et de poste ont été utilisées: la première, propre, revêtue en silicone (Figure II.14.a), la deuxième en porcelaine déjà exploitée (Figure II.14.b) et la troisième propre en polymère (Figure II.14.d).

Une quatrième chaîne d'isolateur a été aussi utilisée. Elle est composée de quatre éléments capôt et tige propres (Figure II.14.c). Les quatre chaînes d'isolateurs sont représentées par la Figure suivante :

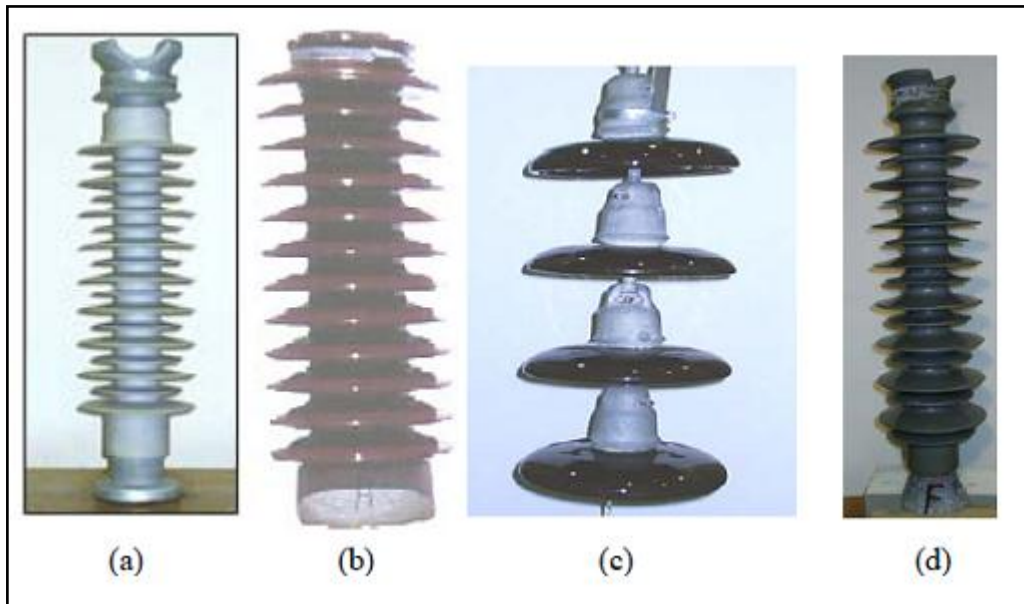


Figure II.14 : Chaînes d'isolateurs de ligne 33kV utilisées

Ces chercheurs ont étudié le comportement de ces isolateurs sous les conditions suivantes:

pollution sous brouillard salin et pollution humide sous différentes conductivités.

Le dispositif expérimental est constitué d'un transformateur HT 380V/400kV, de l'isolateur, et d'une résistance shunt de 10 kv afin de mesurer le courant de fuite. Les essais du brouillard salin étaient conduits dans une chambre spéciale (2m×2m×2.5m) avec un contrôle total de la température à 25° et de l'humidité à 100%.

La figure II.15 illustre la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, dans le cas d'une pollution sous brouillard salin, et cela pour les différents types d'isolateurs.

La figure II.16 représente la variation de la tension de contournement en fonction de la concentration du NaCl, pour le cas de la pollution humide et pour les différents isolateurs.

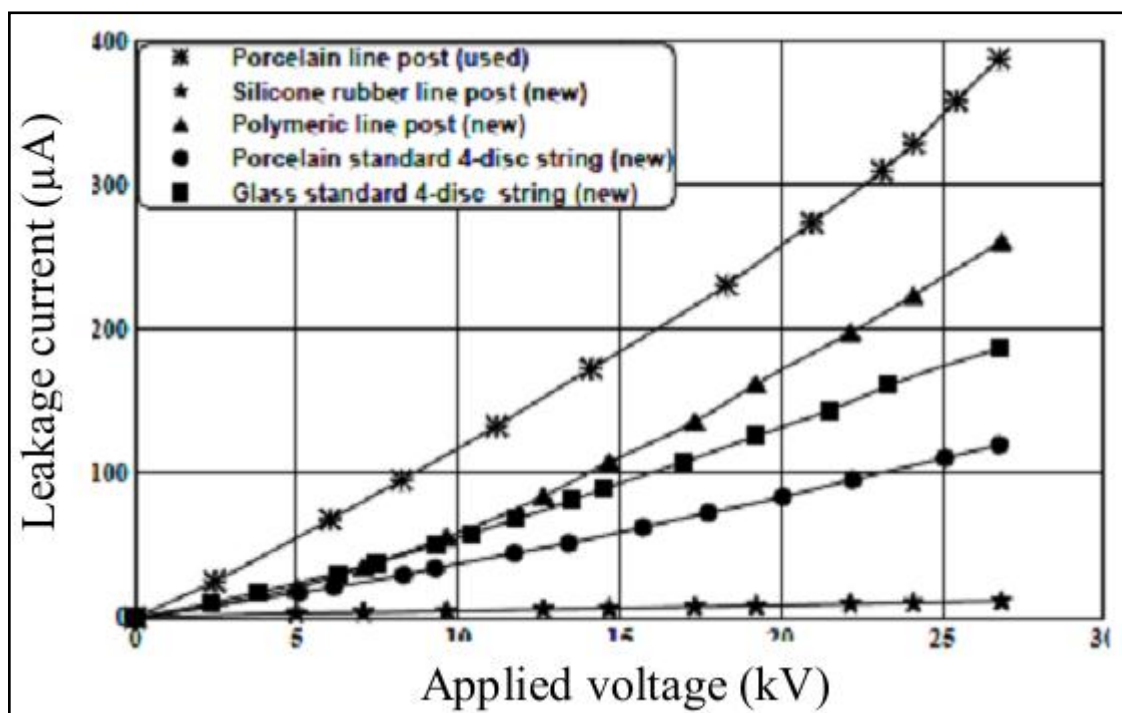


Figure II.15 : Courant de fuite en fonction de la tension pour chaque type d'isolateur

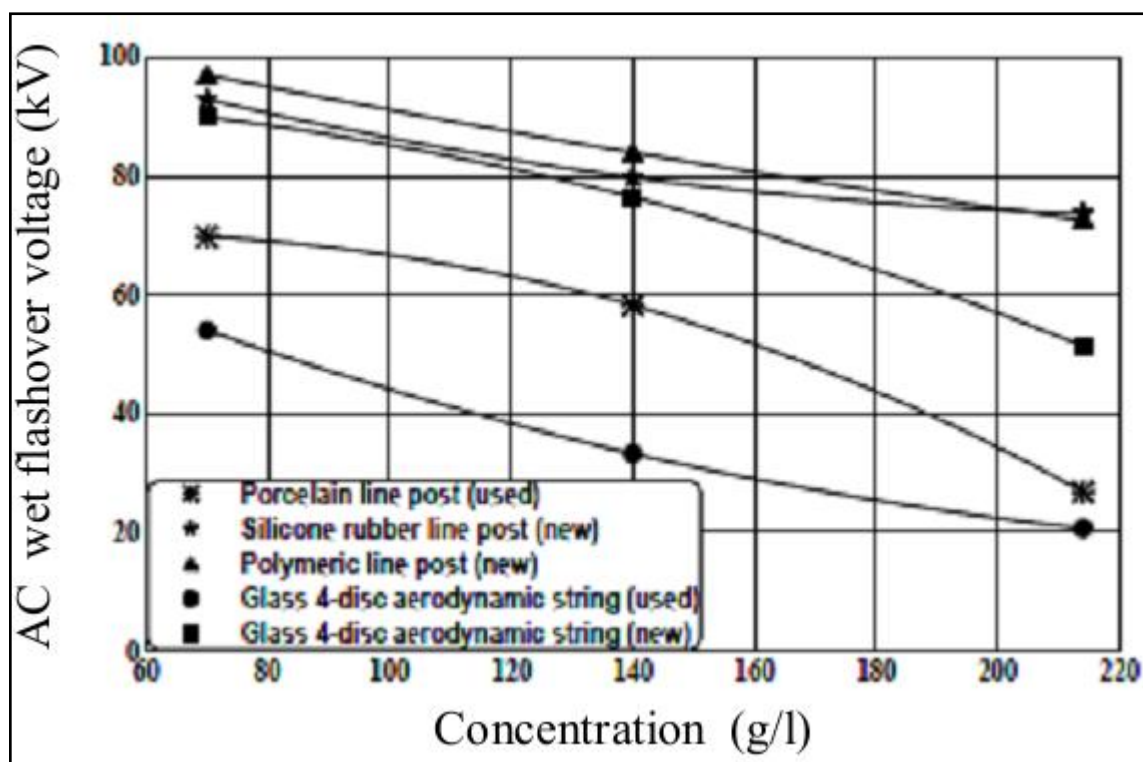


Figure II.16 : Tension de contournement en fonction de la concentration du NaCl pour chaque type d'isolateur

Metwally et al ont conclu que l'isolateur revêtu en silicone (silicon rubber SIR) possède une performance supérieure à celle des isolateurs en verre et en porcelaine de différents designs.

Dans le cas sec, tous les isolateurs ont des valeurs de courant de fuite basses et proches les unes des autres.

Le courant de fuite dans l'isolateur SIR est le plus petit, dans le cas sec et dans le cas du brouillard salin, grâce à son excellent profil hydrophobe.

II.3 Travaux sur les distributions du champ et du potentiel électriques :

II.3.1 Travaux expérimentaux :

➤ **Travaux de Brettschneider [25] :**

Dans cette étude, les mesures ont été effectuées sur une chaîne de six isolateurs de type capôt et tige suspendus, recouverte de glace. Les isolateurs constituant la chaîne, sont reliés entre eux par des parties métalliques ; les rotules, qui se comportent en fait, comme des électrodes portées à un potentiel flottant. Ainsi, en mesurant le potentiel de ces parties métalliques par rapport à la terre à l'aide d'un voltmètre électrostatique, il est possible de déterminer ainsi la distribution du potentiel le long de la chaîne d'isolateurs recouverte de glace. Cette méthode a donné de bons résultats pour des tensions continues et alternatives, ainsi que pour des dépôts de glace présentant ou non un film d'eau conducteur à leur surface. Les résultats obtenus montrent que la présence d'un film d'eau à la surface du dépôt de glace pendant la fonte, entraîne une augmentation considérable de la chute de tension le long des intervalles d'air par rapport au cas où le film d'eau n'est pas présent.

➤ **Travaux de Kaana-Nkusi, Alexander and Hackam [26] :**

Ils ont déterminé le potentiel et le champ électriques le long d'un isolateur à ailettes. Le système a été modélisé avec 146 anneaux de charges, où 30 charges modélisent chaque électrode. Plusieurs critères ont été appliqués dans le but d'évaluer la qualité des résultats calculés sur le potentiel, la divergence du potentiel, la densité normale du flux électrique et la composante tangentielle du champ électrique. Les résultats montrent que les valeurs maximales du champ électrique le long de la surface augmentent avec celles de la permittivité diélectrique des matériaux isolants.

Diminuer le rayon de courbure de l'ailette de l'isolateur a pour conséquence l'augmentation des composantes normale et tangentielle du champ électrique.

➤ **Travaux de Hartings [27] :**

Hartings a introduit plusieurs techniques expérimentales pour étudier le phénomène de décharge sur la surface des isolateurs. Il a utilisé une sonde AC à deux dimensions, disponible à swedish transmission research institute (STRI) qui a été développée par Hornfeldt. Deux voltmètres électro-optiques étaient placés à l'intérieur d'une sphère de 50 mm de diamètre, qui a été divisée en quatre quarts isolés galvaniquement. Les voltmètres électro-optiques modifient la polarisation de la lumière des lames appropriées qui est convertie en volts.

Hartings a aussi lancé une série d'expériences pour étudier le comportement hydrophile et hydrophobe de l'isolateur sous la pluie. Les composantes radiale et axiale du champ électrique le long d'un isolateur sec et sous pluie ont été mesurées.

Dans le cas de l'isolateur sec, aucun effet couronne n'a été observé à 50kV. A 85kV le phénomène de décharge commence à apparaître dans le côté HT.

Dans le cas d'un isolateur sous pluie et pour un profil hydrophile, une distribution capacitive du champ électrique été obtenue seulement dans le cas d'une intensité de pluie modérée (0,4mm/min) et une faible conductivité de la pluie (50 μ S/cm). Une distribution résistive du champ électrique peut être obtenue à des niveaux inférieurs ou égaux à 85kV, pour une intensité de pluie égale à 1,6mm/min et 50 μ S/cm.

Pour un isolateur hydrophobe, une distribution capacitive du champ électrique a été observée dans tous les essais sous les différentes conditions atmosphériques. A 50kV, la distribution du champ électrique a été similaire à celle obtenue dans le cas d'un isolateur sec.

➤ **Travaux de Eklund et Hartings [28] :**

Eklund et Hartings ont étudié la distribution du champ électrique le long des isolateurs de type composite et de type céramique sous pollution. Pour cela la même sonde décrite dans les travaux de Hartings [27], a été utilisée. Cette fois-ci, la sonde a été placée à environ 0,2 m loin de l'isolateur, pour éviter l'effet de la décharge. Les composantes radiale et axiale du champ électrique ont été obtenues pour des isolateurs en porcelaine, les isolateurs enrobés RTV, et les isolateurs en composite.

Dans le cas d'un isolateur en porcelaine hydrophile, l'augmentation de la composante axiale du champ électrique a été accompagnée par l'augmentation du courant de fuite de plus de plusieurs centaines de mA.

Dans le cas d'un isolateur composite hydrophobe, la composante axiale du champ électrique est proportionnelle à la quantité de dépôt de la pollution sur la surface de l'isolateur.

II.3.2 Travaux de simulation numérique :

➤ Travaux de Zhao et Comber [29] :

Leurs travaux consistent à étudier les distributions du potentiel et du champ électriques le long des isolateurs non céramiques par le biais du logiciel « Coulomb ».

L'isolateur, la tour et les conducteurs ont été pris en considération dans les calculs. Les résultats ont montré que la longueur des conducteurs à un effet de blindage très significative sur l'isolateur ; le maximum du champ électrique diminue lorsque la longueur des conducteurs augmente.

➤ Travaux de Chakravorti et Mukherjee [30] :

Ils ont développé un algorithme basé sur la méthode de simulation de charges, pour calculer la distribution du champ électrique sur un isolateur de haute tension, sous pollutions uniforme et non-uniforme. Le produit de la résistivité électrique du contaminant (Ω/m) et l'épaisseur de la couche de pollution (m) donne un seul paramètre ρ_s , appelé la résistivité surfacique.

Ils ont trouvé que pour des $\rho_s \geq 10^{11} \Omega$, le champ est capacitif. Alors que pour $\rho_s \leq 10^8 \Omega$, il est résistif. Pour des valeurs intermédiaires, le champ est capacitif-résistif. La valeur maximale du champ électrique résistif est deux fois plus grande que celle correspondante au champ capacitif. Ce maximum se produit dans la pointe de la plus haute ailette.

Pour la pollution non-uniforme, une très grande surtension est apparue dans les jonctions de deux milieux avec deux résistivités surfaciques différentes. Une pollution partielle de la surface de l'isolateur proche des électrodes, mène vers une surtension supérieure à celle dans le cas de la pollution uniforme.

L'effet des zones sèches a été aussi étudié. Plus la zone sèche est large, moins il y aura une surtension au niveau des frontières de la zone sèche. La position de la zone sèche n'a pas une grande influence sur le champ électrique au niveau des frontières de cette zone.

➤ **Travaux de El-Kishky et Gorur [31] :**

El- Kishky et Gorur ont utilisé la méthode de simulation de charge modifiée pour le calcul du champ et potentiel électriques le long des isolateurs de haute tension.

Un modèle exacte de l'isolateur peut être réalisé avec une réduction significative du nombre de charges utilisées dans cette méthode. Ils ont étudié la distribution du champ électrique et de l'énergie des isolateurs humides.

La surface humide du modèle de l'isolateur est une plaque rectangulaire de 2cm*25cm, avec des différentes gouttelettes d'eau de 50 mm³ jusqu'à 900 mm³. La relation entre la valeur maximale du champ électrique et la taille, la distance et la localisation des gouttelettes ont été étudiée. L'augmentation du nombre de gouttelettes diminue la valeur maximale du champ électrique. L'éloignement des gouttelettes les unes par rapport aux autres, mène à la réduction du champ électrique maximum. Les gouttelettes situées à proximité de l'électrode HT étaient soumises à une intensification remarquable du champ électrique.

➤ **Travaux de Volat [32] :**

L'objectif principal du travail de **Volat** [32] consiste en le calcul des distributions du potentiel et du champ électriques, le long d'un isolateur de poste standard, recouvert de glace accumulée en régime humide.

Il s'agit alors, pour l'auteur, de comprendre les phénomènes précédant les contournements électriques des isolateurs de poste qui se produisent généralement en période de fonte. Une étude numérique a été utilisée par l'intermédiaire d'un logiciel de simulation, basé sur la méthode des Éléments Finis de Frontière, bidimensionnel puis tridimensionnel.

Les différents résultats obtenus à partir des simulations 2-D, ont permis de mettre en évidence l'influence des paramètres, tels que la présence d'un film d'eau conducteur à la surface du dépôt de glace, la position et la longueur d'un intervalle d'air, la conductivité du film d'eau et la présence d'un arc électrique partiel le long d'un intervalle d'air unique, sur la distribution du potentiel et du champ électriques.

Les deux distributions du potentiel obtenues numériquement et expérimentalement ont été comparées. L'auteur a observé une différence importante obtenue entre les résultats expérimentaux et numériques (Figure II.17), confirmant ainsi que la modélisation bidimensionnelle n'est pas vraiment adaptée à la configuration géométrique de l'isolateur.

L'erreur relative moyenne est de 33%. Ce qui démontre la nécessité des simulations tridimensionnelles, afin d'obtenir des résultats plus précis.

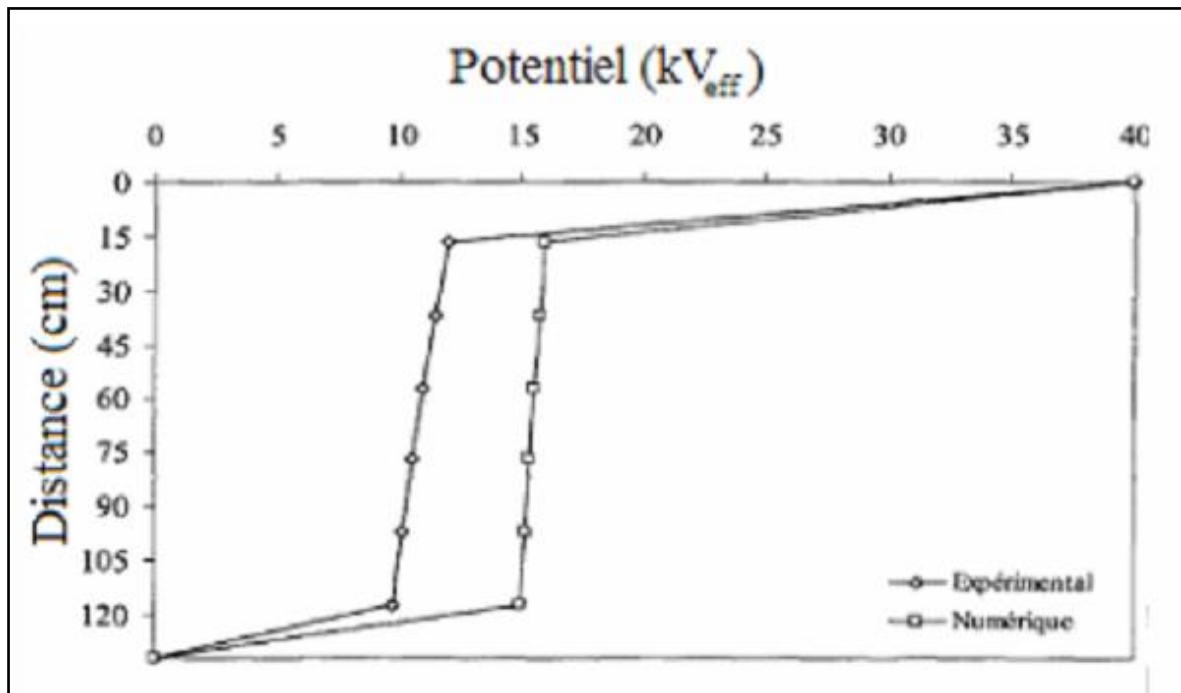


Figure II.17 : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour une simulation 2D

Les simulations tridimensionnelles ont été réalisées avec le logiciel Coulomb (utilisant toujours la méthode des éléments finis de frontière). La comparaison des résultats numériques, obtenus par le biais du logiciel, avec les résultats expérimentaux, a montré une très bonne concordance (Figure II.18). Cela a ainsi permis de valider la modélisation utilisée en 3-D de l'isolateur de poste recouvert de glace présentant un film d'eau conducteur à la surface du dépôt de glace, lorsque aucun arc électrique partiel n'était présent le long des intervalles d'air.

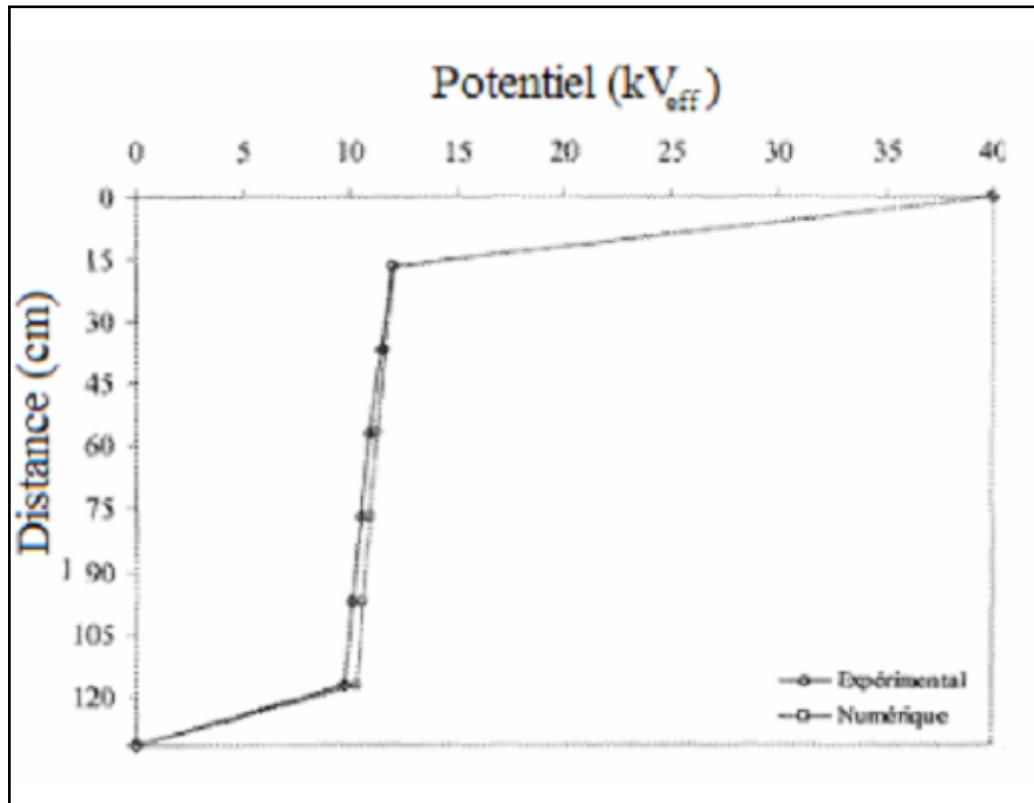


Figure II.18 : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour une simulation 3D

Travaux de Aydogmus et Cebeci [33] :

Un modèle dynamique basé sur le critère du champ a été développé par Aydogmus et Cebeci pour étudier le phénomène de contournement d'un isolateur HT, en présence d'une couche de pollution à sa surface, sous tension alternative.

Les valeurs du champ et du potentiel électriques ont été déterminées en utilisant la méthode des éléments finis (FEM). Un modèle bidimensionnel (dit 'ouvert') d'un isolateur capôt et tige de type BSFT-9336 antibrouillard (ligne de fuite L=288mm, facteur de forme F=1,09, hauteur H=140mm) (Figure II.19 (a) et (b)), a été utilisé pour le calcul de la résistance en série avec l'arc.

L'auteur a développé un algorithme appelé NFDM (New Flashover Dynamic Model) pour simuler la formation et la propagation de l'arc électrique sur la surface de l'isolateur, en considérant différentes conductivités surfaciques et longueurs de fuites.

Les résultats du NFDM sont comparés aux résultats théoriques et expérimentaux obtenus par d'autres chercheurs. Une bonne concordance a été observée.

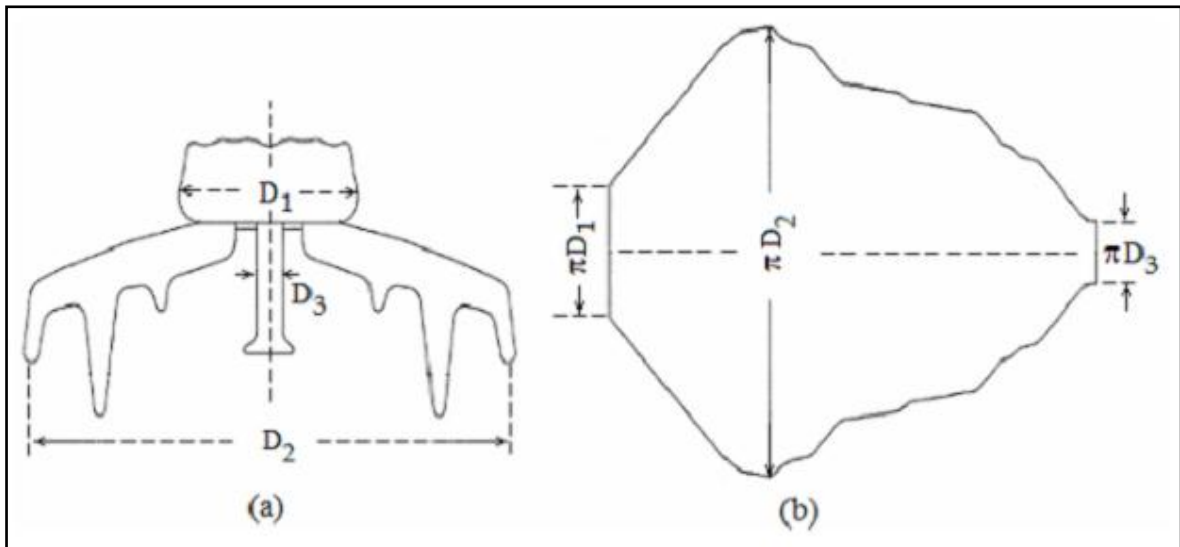


Figure II.19 : Isolateur BSFT-9336 ; (a) : profil réel, (b) : modèle ouvert

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons résumé un certain nombre de travaux de recherche qui préoccupent les chercheurs, dans le domaine de la pollution des isolateurs réels.

En effet, nous avons rappelé les principaux travaux rapportés dans la littérature, en vue de décrire les phénomènes de contournement et du courant de fuite. Nous avons également cité les travaux antérieurs sur la détermination expérimentale et numérique du champ et du potentiel électriques.

III.1 Introduction :

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

Pour remédier à ce problème, des méthodes de calculs ont été développées. Ces méthodes peuvent être classées en deux groupes : les méthodes numériques et les méthodes analogiques. Ces dernières ne sont plus utilisées de nos jours, car elles sont peu commodes et inadéquates pour les problèmes à trois dimensions [34]. Les méthodes numériques sont essentiellement de type différences finies, éléments finis, charges équivalentes et éléments finis de frontières. Ces méthodes, dont le principe et les caractéristiques sont développés dans ce chapitre, sont basées sur la résolution de l'équation de Laplace en imposant les conditions aux frontières adaptées à chaque problème.

Dans ce chapitre, les différentes formulations et les équations qui en résultent. Nous évoquons, par la suite, chaque méthode numérique à part, en citant leurs avantages et leurs inconvénients.

III.2 Méthode Des Différences Finis (MDF) :**III.2.1 Principe :**

L'idée principale de la MDF est de fournir une approximation des dérivées partielles qui régissent les problèmes par des « différences » entre les valeurs nodales qui sont séparées par une distance finie. Elle est, historiquement, la première méthode connue pour calculer, sur ordinateur, la solution d'une équation différentielle [35]. Elle consiste à décomposer le domaine d'étude en une grille rectangulaire uniforme dont chaque nœud est à équidistance de son voisin suivant les axes x et y et en chaque nœud, le système différentiel est satisfait. L'utilisation d'un maillage régulier permet d'avoir, en tout point, la même forme pour les équations [36]. Le plus simple de ces maillages réguliers est le maillage carré, (Figure III .1).

L'équation aux dérivées partielles est alors remplacée par un système d'équations algébriques pour les valeurs nodales. Dans le calcul du potentiel et du champ électrique, ces équations sont linéaires et la solution de chaque valeur nodale est obtenue par itération

ou inversion de matrice. Une illustration de cette présentation est donnée en prenant l'équation de Laplace (III.1) en 2 dimensions définie dans un domaine donné (Figure III .1).

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{III.1}$$

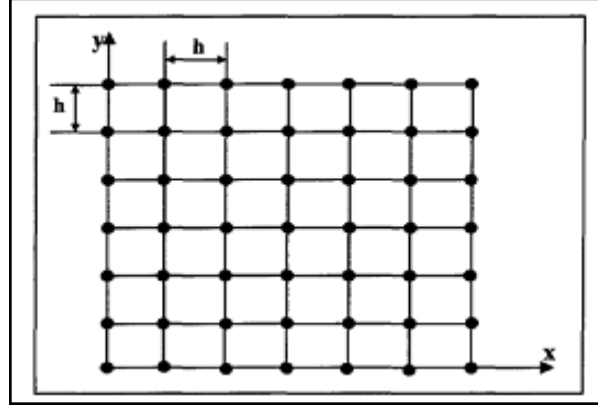


Figure III.1 : Maillage carré

Soient les indices i et j , les coordonnées de la position d'un nœud quelconque, voir figure III.2 avec $\Delta x = \Delta y = h$ dans le cas d'un maillage carré, et $\phi_{i,j}$ la valeur du potentiel en ce nœud qui est donné par : $\phi_{i,j} = \phi(x_0 + i \Delta x, y_0 + j \Delta y)$ ou x_0 et y_0

sont les conditions initiales. Comme sur la Figure III.2 l'approximation algébrique de la dérivée $\frac{\delta \phi}{\delta x}$ est donnée par :

$$\frac{\delta \phi}{\delta x} = \frac{1}{\Delta x} (\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j})$$

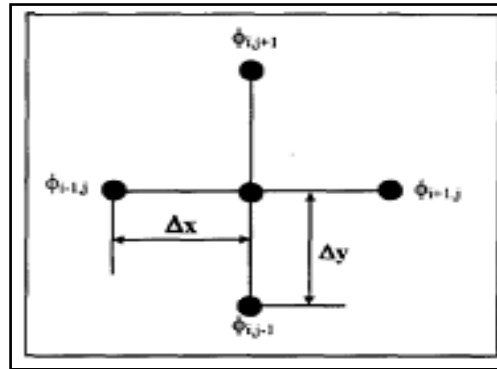


Figure III.2 : Point central et ses voisins

Une approximation similaire donne :

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \cong \frac{1}{\Delta x^2} \cdot (\phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j} - \phi_{i-1,j}) \quad \text{III.2}$$

De manière identique, on peut écrire les expressions équivalentes suivant la direction y, ce qui donne :

$$\frac{\partial \phi}{\partial x^2} \cong \frac{1}{\Delta y} \cdot (\phi_{i,1+j} - \phi_{i,j}) \quad \text{III.3}$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \cong \frac{1}{\Delta y^2} \cdot (\phi_{i,1+j} - 2\phi_{i,j} - \phi_{i,j-1}) \quad \text{III.4}$$

L'utilisation de la notation indicielle permet une programmation et une évaluation directe des expressions ainsi obtenues. Lorsque les équations (III. 2) et (III.4) sont substituées dans l'équation de Laplace, nous obtenons la formulation algébrique suivante :

$$2 \cdot \left(1 + \left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)^2\right) \cdot \phi_{i,j} \cong -\phi_{i,1-j} + \phi_{i,1+j} + \left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)^2 \cdot (\phi_{i,j-1} + \phi_{i,1+j}) \quad \text{III.5}$$

Où $\frac{\Delta x}{\Delta y}$ dépend du choix de la taille du maillage.

On obtient ainsi, un système d'équations linéaires implicites lorsque les formulations analytiques sont considérées à chaque nœud. À partir du système d'équations, on obtient un système algébrique qui peut s'écrire sous forme matricielle :

$$[A] \{\phi\} = \{B\} \quad \text{III.6}$$

Où $\{\phi\}$ est le vecteur formé par les inconnues en potentiel de tous les points intérieurs au domaine et $\{B\}$ le vecteur des conditions aux limites. La résolution du système (III.8) permet ainsi d'évaluer le potentiel en chacun des nœuds.

III.2.2 Avantages de la MDF :

- La méthode des différences finies est une méthode simple à appliquer lorsque la géométrie le permet.
- De plus, elle se programme facilement et nécessite peu de mémoire pour le stockage des données.

III.2.3 Inconvénients de la MDF :

- Lorsque la géométrie est de frontière courbée, le schéma ne peut s'appliquer près des frontières irrégulières, cette méthode devient, par conséquent, difficilement applicable. On doit alors chercher à la place, une méthode qui est valide indépendamment de la géométrie [37].
- Elle n'est pas applicable pour des problèmes en 3 dimensions.
- Enfin, cette méthode nécessite la connaissance du potentiel, sur toute la frontière entourant le domaine étudié. Ce qui n'est pas toujours le cas.

III.3 Méthode des Eléments Finis (MEF) :

III.3.1 Principe :

Le principe de cette méthode consiste à diviser le domaine d'étude en plusieurs éléments finis (appelé maillage). C'est une étape très importante, puisque le choix de la forme de l'élément de maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus. Il est donc nécessaire de trouver la forme et le degré d'approximation de celui-ci, qui soient les plus adaptés à la géométrie du domaine d'étude. Il existe un grand nombre de formes géométriques pour les éléments de maillage tels que :

- Des triangles, des rectangles, des quadrilatères arbitraires pour les problèmes à deux dimensions.
- Des tétraèdres, des hexaèdres, des cubes, des prismes pour des problèmes à trois dimensions.

Sur chacun des éléments issus de la subdivision, la fonction qui modélise le phénomène est définie par une fonction d'interpolation. Souvent, on choisit des polynômes comme fonction d'interpolation pour les variables, car ceux-ci sont faciles à intégrer ou à différencier. Le degré du polynôme dépend du nombre de nœuds assignés à chaque élément [38], de la nature et du nombre d'inconnues à chaque nœud, et surtout du degré de dérivabilité des variables apparaissant dans la forme variationnelle associée aux équations aux différences partielles du problème avec conditions aux limites.

Ces fonctions d'interpolation permettent alors de donner une approximation du potentiel $\tilde{\phi}$ notée $N_i \phi_i$, sur chaque élément en fonction de ses valeurs aux nœuds de l'élément comme suit:

$$\tilde{\phi} = \sum_{i=1}^{N_e} N_i \phi_i \quad \text{III.7}$$

avec N_e le nombre de nœud d'interpolation, N_i les fonctions d'interpolation et ϕ_i les valeurs nodales du potentiel. Pour illustrer le principe de la MEF, on reprend l'exemple de l'équation de Laplace (III. 1) et on cherche à minimiser la quantité R tel que :

$$R = (\nabla^2 \tilde{\phi}) \quad \text{III.8}$$

Parmi toutes les méthodes qui permettent d'annuler une grandeur dans un domaine D , la méthode des résidus pondérés est bien connue et souvent utilisée [39]. Elle consiste à choisir un ensemble de fonctions linéairement indépendantes W_n ,

appelées fonctions de projection, et annuler ainsi toutes les intégrales de R sur chacun des éléments finis.

$$I_n = \int_{\Omega} W_n R d\Omega \quad \text{III.9}$$

On obtient ainsi une formulation intégrale de la méthode des éléments finis. Par la suite, une intégration par partie permet de diminuer le degré de dérivabilité de potentiel dont on cherche la solution approchée et d'augmenter celui du champ de pondération. Le choix du degré d'approximation sur l'élément sera alors sur le niveau de continuité requis par cette forme intégrale obtenue par intégration par partie que l'on appelle forme variationnelle ou faible.

La méthode des résidus pondérés conduit à des sous méthodes (collocation par point, collocation par sous domaine, Galerkinge, moindre carré, ...), selon le choix de la grandeur de pondération. Parmi toutes ces méthodes, la méthode de Galerkinge [39] est la plus utilisée.

Elle consiste à prendre les mêmes expressions pour les fonctions de projection et les fonctions d'interpolation, $N_i = W_i$

L'intégration par partie de l'équation (III.9) donne:

$$I_n = - \int_{\Omega} \overrightarrow{\text{grad}} \tilde{\phi} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} W_n d\Omega + \int_{S_e} (\overrightarrow{\text{grad}} \tilde{\phi} \cdot \vec{n}) W_n dS_e \quad \text{III.10}$$

Pour chaque élément, on annule les n intégrales de I_n (III.10) qui correspondent aux n fonctions de projection. On obtient un ensemble de n équations à n inconnues formant ainsi un système élémentaire pouvant s'écrire sous la forme matricielle suivante:

$$[A_e] \{\varphi_e\} = \{B_e\} \quad \text{III.11}$$

$[A_e]$ est la matrice associée à l'élément considéré. Ces coefficients sont fonctions des coordonnées des nœuds de l'élément. Les composantes de $\{\varphi_e\}$ sont les inconnues du potentiel aux nœuds du même élément. Le vecteur $\{B_e\}$ tient compte des éventuelles conditions aux limites présentes sur certains nœuds de l'élément considéré. En écrivant (III.10) pour tous les éléments constituant le maillage, on obtient un système d'équations algébriques dont la solution fournit la distribution du potentiel dans le domaine étudié. La résolution du système final est simple, puisque les équations obtenues sont linéaires et les matrices ainsi formées sont

symétriques. Pour déterminer la distribution du champ électrique, il faut calculer la dérivée du potentiel par une méthode numérique adaptée.

III.3.2 Avantages de la MEF :

La flexibilité est l'un des plus importants avantages de la MEF. Les éléments peuvent avoir plusieurs formes variées et peuvent donc s'adapter facilement à n'importe quelles formes géométriques complexes, et aussi tenir compte des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux.

- Les matrices formant le système final d'équations sont symétriques. Ce qui simplifie grandement la résolution de celui-ci.
- La programmation de la méthode est assez simple surtout lorsqu'il s'agit de tenir compte de l'introduction des conditions aux limites.
- La MEF a fait ses preuves dans beaucoup de domaines en ingénierie. De plus, avec son développement important, il existe de très bons logiciels commerciaux qui sont basés sur cette méthode et qui la rendent très accessible. Et par conséquent, elle est applicable à beaucoup de problèmes sans que nous connaissions nécessairement la MEF en détail.

III.3.3 Inconvénients de la MEF :

- La solution calculée reste toujours dépendante des données numériques initiales (caractéristiques des matériaux, ...) conditions aux limites. En ce sens, l'influence de ces paramètres sur les résultats requiert un nouveau calcul avec d'autres valeurs.
- La modification d'une partie de la géométrie entraîne un nouveau maillage et, donc, une remise à zéro dans les calculs.
- Un mauvais choix du maillage proposé automatiquement par les logiciels, limite la précision des résultats. L'utilisateur doit donc porter une attention particulière lors de cette étape.
- Le traitement d'une problématique par la MEF implique une connaissance parfaite du domaine géométrique et des conditions aux limites. Ce qui complique la mise en œuvre de ce traitement lorsque ce n'est pas le cas.

III.4 Méthode de simulation de charges :

III.4.1 Principe :

Dans la MSC, le champ électrique est simulé par un champ électrique engendré par un nombre de charges discrètes qui sont placées en dehors de la région dans laquelle le champ électrique doit être calculé [40]. Les valeurs affectées aux

charges discrètes sont déterminées par la satisfaction des conditions aux limites à des points de contour bien déterminés. Une fois que les valeurs et les positions des différentes charges de simulation sont connues, le potentiel et le champ électriques peuvent être calculés n'importe où dans l'espace considéré.

Le principe de la méthode est simple. Si, plusieurs charges discrètes, de formes différentes, sont présentes dans une région, le potentiel électrostatique, à n'importe quel point C appartenant à cette région, peut être déterminé par la sommation des potentiels résultant des charges ponctuelles (application du théorème de superposition), tant que le point C n'est pas situé sur aucune charge ponctuelle. On peut donc écrire l'équation suivante :

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j \quad \text{III.12}$$

Où

- P_{ij} représente le coefficient de potentiel, dépendant du type de charges utilisées et qui peut être évalué analytiquement par résolution de l'équation de Laplace ou de Poisson,

- Q_j représente la charge ponctuelle au point j .

Une fois que le type et la position des charges définis, il est possible de déterminer φ_i et Q_i en tout point de la frontière du domaine étudié. Dans la MSC, les charges de simulation sont placées à l'extérieur de l'espace dans lequel on veut connaître le champ électrique, si, le point C est situé sur la surface d'un conducteur, alors φ_i en ce point sera égal au potentiel du conducteur. Lorsque cette procédure est appliquée à m points situés sur le contour de T espace considéré, nous obtenons un système de m équations linéaires pour n charges connues, c'est-à-dire :

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \cdots & P_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \vdots \\ \Phi_m \end{bmatrix} \quad \text{III.13}$$

III.4.2 Application à un problème présentant plusieurs diélectriques :

Le calcul du champ électrique pour des problèmes ayant plus de un diélectrique devient plus compliqué. Ceci est dû au fait que, sous l'influence d'une tension appliquée, une charge nette apparaît à la surface du diélectrique sous l'effet du réalignement des dipôles à l'intérieur de celui-ci [41]. Alors, en plus des électrodes, chaque interface diélectrique-diélectrique doit être simulée par des charges discrètes.

Pour illustrer ce problème, on considère l'exemple décrit par la Figure III.3. Sur cette figure, les charges 1 à 3 sont utilisées pour simuler l'électrode, tandis que les charges 4 à 7 sont utilisées pour simuler l'interface diélectrique-diélectrique. Les points de contour 1 à 3 sont sélectionnés à la surface de l'électrode et les points 4 à 5 sur l'interface du diélectrique.

Dans le but de déterminer les charges de simulation, un système d'équations est obtenu en imposant les conditions aux frontières suivantes :

1 - Sur chaque électrode, le potentiel doit être égal au potentiel connu du conducteur.

2 - À l'interface diélectrique-diélectrique, le potentiel et sa dérivée normale doivent être continus au travers celle-ci.

Lorsque l'on formule les équations pour un point de contour donné, les charges présentes dans le même diélectrique que le point de contour considéré, sont ignorées. Par exemple, sur la figure III.3, le potentiel au point de contour n° 1 est calculé par superposition des charges 1 à 5 seulement. Similairement, le potentiel et le champ électriques au point de contour n°5, lorsqu'il est vu depuis le diélectrique A, seront déterminés par superposition des charges 1 à 3 et 6 à 7. De plus, lorsque la condition aux frontières 1 est appliquée aux points de contour 1 à 3, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^5 P_{ij} Q_j &= \phi_c \quad (i=1) \\ \sum_{j=1}^3 P_{ij} Q_j + \sum_{j=6}^7 P_{ij} Q_j &= \phi_c \quad i=2,3 \end{aligned} \quad \text{III.14}$$

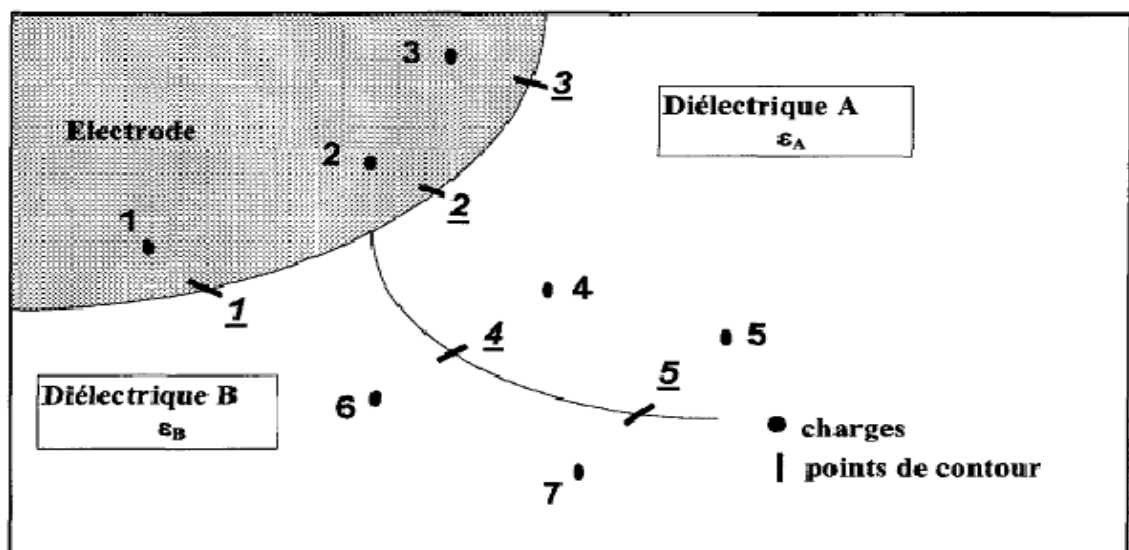


Figure III.3 : position des charges fictives

Lorsque la condition aux frontières 2 est appliquée pour les points de contour 4 et 5, les équations obtenues sont :

$$\sum_{j=4}^5 P_{ij} Q_i - \sum_{j=6}^7 P_{ij} Q_i = 0 \quad \text{III.15}$$

$$(\varepsilon_A - \varepsilon_B) \sum_{j=1}^3 f_{ij} Q_i + \varepsilon_A \sum_{j=6}^7 f_{ij} Q_i - \varepsilon_B \sum_{j=4}^5 f_{ij} Q_i = 0 \quad \text{III.16}$$

pour $i = 4$ à 5 , f_{ij} sont les coefficients de champ dans la direction normale à la surface du diélectrique au point de contour considéré, ε_A et ε_B sont les permittivités des milieux A et B respectivement. Les équations (III.14) et (III.15) sont résolues afin de déterminer la valeur des charges inconnues.

Il est à noter que le choix du type de charges dans l'utilisation de la MSC est un facteur très important [42]. De manière générale, les types de charges les plus couramment utilisés sont les charges ponctuelles, les lignes chargées de longueur infinie ou semi-finie et les charges en anneau.

III.4.3 Avantages de la MSC :

- La MSC permet de calculer le potentiel et le champ électriques pour des problèmes à plusieurs diélectriques présentant des formes géométriques complexes (comme par exemple les isolateurs de haute tension).
- Cette méthode ne nécessite aucune discrétisation du domaine d'étude ; on ne travaille seulement qu'au voisinage de la frontière de celui-ci.

III.4.4 Inconvénients de la MSC :

- Lorsque le problème à étudier présente plus de deux diélectriques, l'utilisation de la MSC devient alors complexe et la programmation d'un tel modèle s'en trouve détériorée.
- La M.S.C est une méthode numérique simple par son expression, mais tout de même assez difficile à mettre en œuvre, en ce qui concerne la précision à atteindre. En effet, la précision requise dépend de nombreux paramètres (comme le type de charges utilisées, leur localisation, leur nombre et le nombre de points de contour).

III.5 Méthode des éléments finis de frontière (MEFF) :

III.5.1 Introduction :

L'utilisation des équations intégrales de frontière dans la résolution des problèmes de calcul de distribution de champ électrique, est assez récente. Cette

méthode s'est avérée très efficace dans la résolution des problèmes de champ magnétique et dans le calcul de la distribution du champ électrique, autour des isolateurs pollués [43].

Le principe de cette méthode est la reformulation des équations aux dérivées partielles qui décrivent le problème sous forme d'équations intégrales qui ne font intervenir que des inconnues sur la frontière du domaine. La solution de ces équations est obtenue par la méthode des éléments de frontière qui est basée sur l'application de la technique des éléments finis sur le contour du domaine étudié [44].

En général, dans les problèmes de calcul de potentiel et de champ électriques, nous trouvons deux formulations différentes pour la MEFF : la formulation indirecte et la formulation directe. Pour la formulation directe, on évalue directement le potentiel et le champ électrique normal. Alors que pour la formulation indirecte, la distribution de charges est évaluée dans un premier temps et on en déduit, ensuite, le potentiel et le champ électrique. Nous présenterons la formulation indirecte qui est utilisée jusqu'à maintenant pour le calcul de champ et du potentiel en tenant compte de la pollution [45].

III.5.2 Formulation indirecte de la MEFF :

Une expression par formulation indirecte peut être obtenue si, les conditions aux frontières peuvent s'exprimer sous forme de potentiel de simple couche en tout point [46]. Pour la formulation indirecte, on part de l'équation suivante :

$$\phi_c = \int_S \frac{\rho_s}{\epsilon_0} G dS \quad \text{III.17}$$

où ρ_s est la distribution de charges surfaciques et G la fonction de Green, ϕ est le potentiel à calculer, ϵ_0 est la permittivité de l'air [45].

En prenant la dérivée de l'équation (III.17) suivant la normale $\vec{n}$, on obtient :

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \int_S \frac{\rho_s}{\epsilon_0} \frac{\partial G}{\partial n} dS \quad \text{III.18}$$

Soit un point situé sur une interface diélectrique-diélectrique Γ_{ij} où la normale $\vec{n}$ est dirigé du diélectrique (i) vers le diélectrique (j). En considérant un point appartenant au diélectrique (j) et approchant la surface Γ_{ij} le long de la normale $\vec{n}$, on obtient :

$$\epsilon_0 \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_j = -\frac{1}{2} \rho_s + \int_{\Gamma} \rho_s \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma \quad \text{III.19}$$

En répétant le procédé pour un point appartenant au diélectrique (i), on obtient :

$$\epsilon_0 \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_i = +\frac{1}{2} \rho_s + \int_{\Gamma} \rho_s \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma \quad \text{III.20}$$

Le terme $\pm \frac{1}{2} \rho_s$ de (II.19) et (II.20) est dû à la discontinuité de la composante normale du champ électrique $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ à travers l'interface Γ_{ij} , à cause de la présence des charges de polarisation.

En multipliant (III.19) par ε_j et (III.20) par ε_i , en les additionnant, on obtient donc:

$$\rho_s = -2 \left(\frac{\varepsilon_i + \varepsilon_j}{\varepsilon_i - \varepsilon_j} \right) \int_{\Gamma} \rho_s \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma \quad \text{III.21}$$

L'équation (II.21) est valide pour tous les points situés sur les interfaces diélectriques diélectriques.

Pour les points situés sur les électrodes, on utilise l'équation suivante :

$$V_i = \int_{\Gamma} \frac{\rho_s}{\varepsilon_0} G d\Gamma \quad \text{III.22}$$

où V_i est le potentiel calculée au point i.

Les équations (III.21) et (III.22) permettent de calculer la densité de charges équivalentes à la surface des conducteurs et du diélectrique.

III.5.3 Résolution des équations intégrales :

Le traitement numérique des équations intégrales se fait par application de la méthode des éléments finis sur la frontière du domaine étudié (frontière sur laquelle sont évaluées les équations intégrales) Pour ce faire, la frontière est discrétisée en éléments géométriques sur lesquels sont évalués les différents noyaux $\int_{\Gamma} G d\Gamma$ et $\int_{\Gamma} \frac{\partial G}{\partial n} d\Gamma$ par une méthode numérique adaptée, en général par quadrature de Gauss [47].

Les éléments géométriques utilisés sont de type segments de droite (discrétisation d'une courbe) pour un problème en deux dimensions, et pour des problèmes en trois dimensions, les éléments utilisés lors de la discrétisation, sont de type triangulaire ou quadrilatère (discrétisation d'une surface). En fait, ce sont les mêmes types d'éléments que l'on retrouve dans la MEF pour des problèmes à une et deux dimensions respectivement.

Une fois la transformation sur l'espace de référence effectuée, il ne reste plus qu'à évaluer les noyaux sur tous les éléments de discrétisation en chaque point de collocation. Cela permet d'obtenir un système d'équations linéaires, qui est ensuite résolu par la méthode d'élimination de Gauss. Le système ainsi obtenu est de la forme suivante :

$$[A] \{ \rho_s \} = \{ B \} \quad \text{III.23}$$

où $\{ \rho_s \}$ représente le vecteur d'inconnues de charges, $[A]$ la matrice des coefficients relatifs au calcul des différents noyaux et $\{ B \}$ le vecteur contenant les différentes conditions aux limites. Après avoir résolu le système de matrice (III.23) et ainsi déterminé la densité de charges équivalentes, le potentiel et le champ électriques peuvent alors être calculés en tout point du domaine d'étude.

III.5.4 Avantages de la MEFF :

- La discrétisation du milieu infini ne cause plus de problème, puisque tout est ramené sur la frontière du milieu étudié.
- La transformation des équations aux dérivées partielles en équations intégrales, réduit de un la dimension du problème, et même de deux si le problème présente une symétrie de révolution.
- Lorsqu'une modification au niveau de la géométrie intervient, il n'est pas nécessaire de reconsidérer tout le maillage comme pour la MEF. Il suffit seulement de modifier les paramètres de la portion de la frontière considérée, puisque la formation de base des équations intégrales est exempte de toute référence à des géométries particulières.
- Par rapport aux autres méthodes numériques, le nombre d'inconnues à déterminer est moindre pour un problème équivalent, d'où un gain en temps de calcul.

III.5.5 Inconvénients de la MEFF :

- La méthode indirecte ne permet pas de calculer directement le potentiel et le champ électrique. Cela nécessite donc des calculs supplémentaires qui peuvent s'avérer coûteux pour des problèmes de grandes tailles.
- L'extension de la MEFF aux problèmes non linéaires est difficile. Dans ces conditions, on doit discrétiser la totalité du domaine où se produit la non linéarité matérielle ou géométrique, perdant ainsi l'avantage de la MEFF d'une discrétisation de la frontière uniquement.

III.6 Conclusion :

L'étude des notions de base de l'électromagnétisme sur les diélectriques, est primordiale pour l'engineering de haute tension, vu leurs rôles dominants dans la conception des isolateurs.

Dans ce chapitre, nous avons introduit différentes relations de l'électromagnétisme caractérisant le comportement électrique des matériaux diélectriques.

Les équations qu'on obtient par la modélisation des phénomènes électromagnétiques, ont une forme simple. Cependant, elles n'ont le plus souvent pas de solution analytique lorsqu'on les applique à des situations réelles. On a alors recours aux méthodes numériques pour les résoudre.

Les méthodes des différences finies et des éléments finis de frontières présentent l'inconvénient d'utiliser un nombre élevé d'inconnues. Lorsqu'il s'agit de travailler sur des configurations de formes complexes en deux ou trois dimensions pour lesquelles, le maillage régulier de la MDF n'est pas adapté. De plus, pour ces deux méthodes, les approximations sont faites dans tout l'espace, et cela constitue un handicap pour la résolution de problèmes non bornés.

La méthode de simulation de charges pose un problème de localisation des charges fictives. Par contre, elle est très bien adaptée pour la modélisation de configurations complexes comme des isolateurs. La méthode des éléments finis semble présenter des avantages importants par rapport aux précédentes. C'est en particulier la prise en compte d'une surface conductrice qui devient intéressante avec cette méthode, comme dans le cas d'isolateurs pollués. C'est pourquoi cette méthode a été retenue pour réaliser les différentes simulations dans la dernier chapitre, par le biais du logiciel commercial COMSOL.

IV.1. Introduction :

Dans ce dernier chapitre, nous nous sommes intéressés à la détermination des répartitions du potentiel et du champ électriques le long des isolateurs 1512L. Pour cela, le code de calcul COMSOL Multiphysics 4.2, basé sur la méthode des éléments finis, a été utilisé.

Plusieurs paramètres ont été variés à savoir, la conductivité de la couche polluante, le niveau de tension de la ligne, le nombre d'éléments de la chaîne.

IV.2. Simulation :

COMSOL Multiphysics est un outil très employé dans des secteurs divers de recherche, car il facilite amplement les étapes de modélisation et de simulation, soit : la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats. Par ailleurs, le logiciel ne demande pas de connaissances approfondies dans les mathématiques ou les analyses numériques. En effet, toutes les équations nécessaires à la résolution sont déjà prédéfinies. Il suffit alors de préciser dans quel domaine (électromagnétisme, transfert de chaleur, acoustique,...) et dans quel régime (stationnaire, temporel, ...), le modèle doit être construit.

Ce logiciel utilise la méthode des éléments finis dont le principe est décrit au Chapitre III, la modélisation et la simulation de l'isolateur 1512L peuvent se résumer dans les quatre étapes successives suivantes :

- La première étape consiste à définir la géométrie entière en deux dimensions de l'isolateur par l'intermédiaire d'un programme FEMM 4.2 qui sera ensuite emporté vers COMSOL et en trois dimensions.
- La deuxième étape porte sur la définition des propriétés électriques des matériaux présents. Cela consiste à définir les permittivités relatives et les conductivités volumiques pour chaque partie de l'isolateur. De plus, il faut définir les conditions aux limites qui se traduisent par le potentiel imposé sur chaque électrode (conditions de Dirichlet).
- La troisième étape est consacrée à la résolution du problème par l'application de la méthode numérique et par la construction du système d'équations, et cela en introduisant les facteurs de chaque partie de l'équation.

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

Dans notre simulation, nous avons choisi l'isolateur 1512L. Ce dernier est constitué de trois parties ayant des propriétés différentes : le verre ayant une permittivité relative de 6, le capôt et la tige en métal de permittivité relative de 1000000 et de conductivité de 1000000, rattachés entre eux par du ciment ayant une permittivité relative de 5. L'air entourant l'isolateur a une permittivité de 1,0005.

Afin de simuler la couche polluante, nous avons rajouté une fine couche au-dessus du verre dans les dépôts les plus attaquées par la pollution en réalité qui a une permittivité relative de 50 (représentant une solution saline), et dont nous varierions la conductivité.

Concernant le maillage, la densité des éléments finis est important pour les régions critiques (proches de la surface de l'isolateur) où une plus grande précision est exigée, car les propriétés électriques des matériaux sont très changeantes. En effet, nous avons considéré 66053 éléments dans le cas d'un isolateur propre et sèche, et 96250 éléments lorsqu'il est pollué.

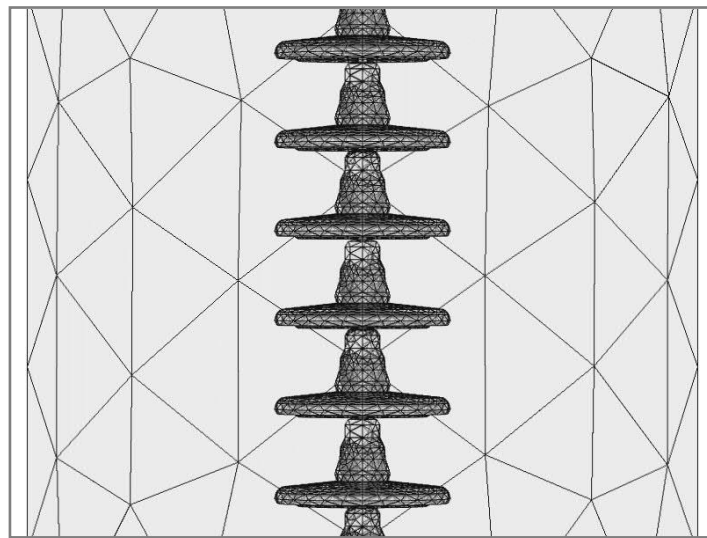


Figure IV.1 : Discrétisation en éléments finis de la chaîne 1512L

IV.3. Résultats de la simulation :

Cette section est consacrée à l'étude des distributions du potentiel et du champ électriques le long d'une chaîne d'isolateurs 1512L.

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

IV.4. Etude du potentiel électrique :

➤ Influence de la conductivité :

Nous nous sommes intéressés à la détermination de la répartition du potentiel le long de la chaîne d'isolateurs 1512L, composée de deux éléments, en fonction de la conductivité. Pour cela, nous avons introduit dans le logiciel, outre des valeurs de la conductivité déjà considérées lors des essais (0, 70, 210, 700 $\mu\text{S/cm}$). La tension a été maintenue constante et égale à 40 kV. Ceci permet de simuler le comportement d'une chaîne d'isolateurs de ligne 40 kV.

Les figures IV.2 et IV.3 illustrent respectivement la variation du potentiel le long de la ligne de fuite et la distribution du potentiel le long d'un isolateur, pour les conductivités considérées. Nous remarquons que la variation de la conductivité de la couche polluante n'a pratiquement pas d'effet sur le potentiel le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs. Aucune différence remarquable n'est observée.

En comparant les résultats relatifs aux potentiels obtenus lorsque la chaîne est propre et lorsqu'elle est polluée, aucune différence remarquable n'a été observée.

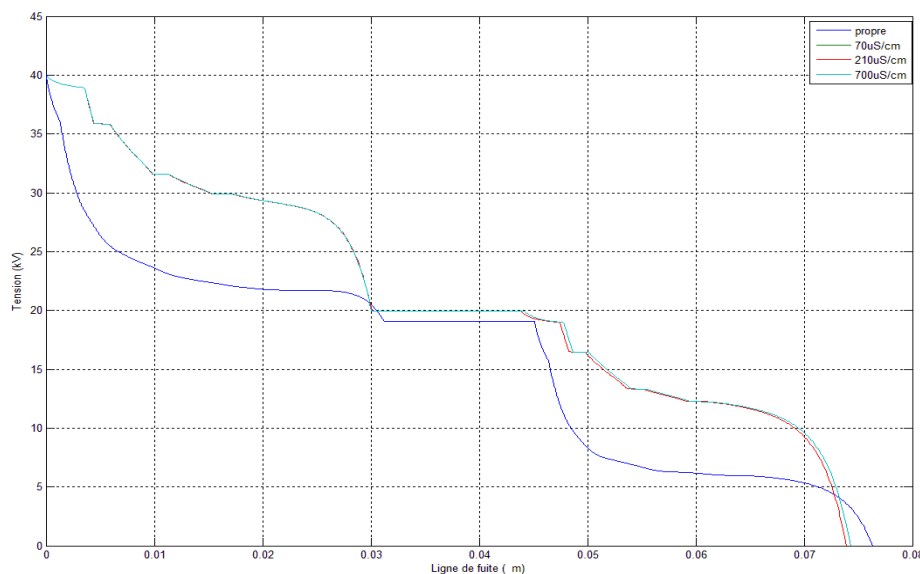


Figure IV.2 : Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne

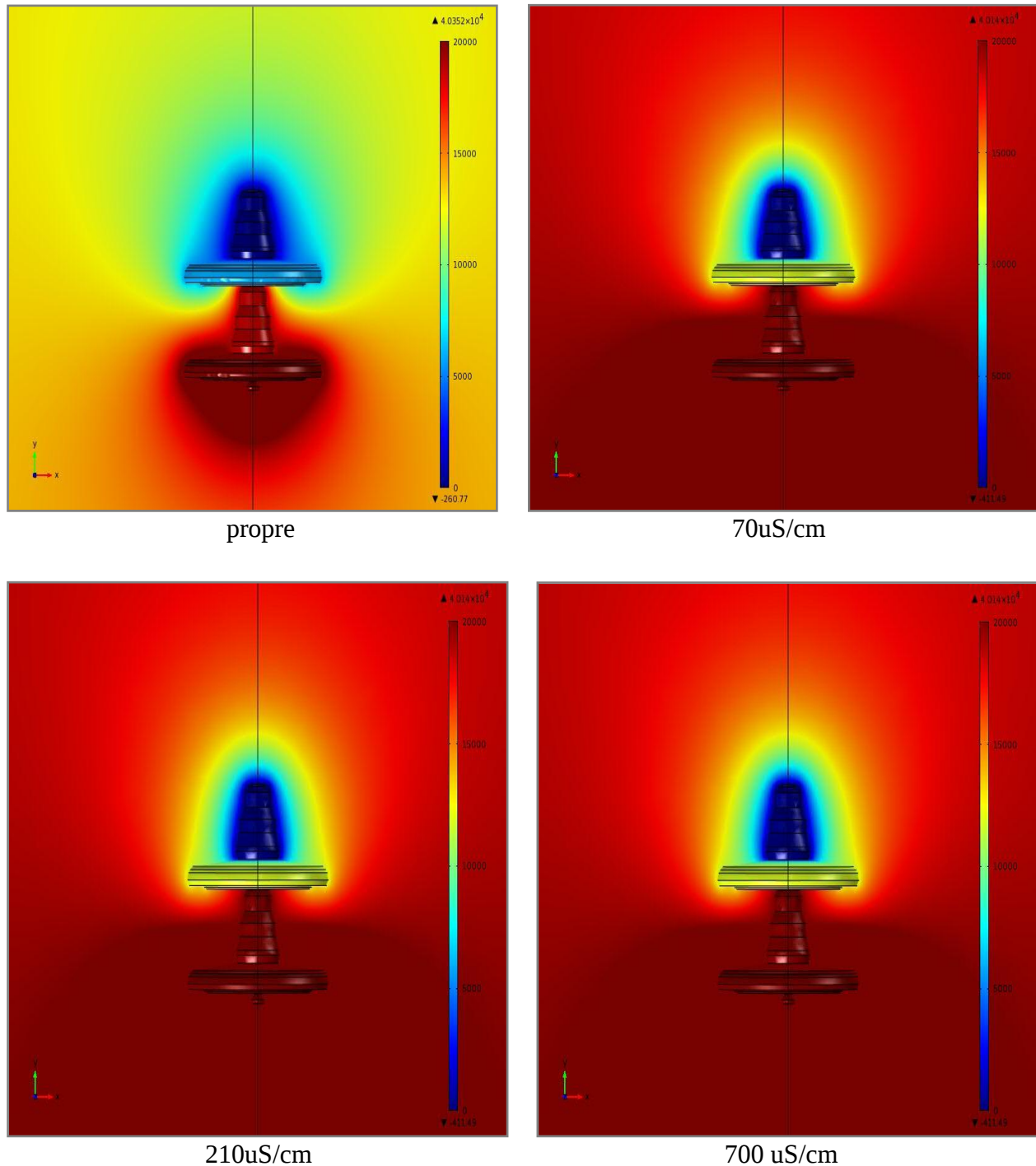


Figure IV.3 : Distribution (échogrammes) du potentiel en fonction de la conductivité

➤ **Influence de la tension de la ligne :**

La figure IV.4 donne la variation du potentiel en fonction de la ligne de fuite, pour différentes tensions. Trois niveaux de tensions ont été considérés. Nous constatons qu'en fonction de cette tension, le potentiel se distribue de manière équitable, le long de la ligne de fuite, sur les trois éléments (un tiers de la tension appliquée sur chaque élément). Les trois

courbes passent également par trois régions où le potentiel reste constant. Il s'agit des parties métalliques de la chaîne d'isolateurs (capôts et tiges).

La figure IV.5, donnant la distribution du potentiel le long de la chaîne d'isolateurs, montre qu'en fonction de la tension, seules les valeurs du potentiel changent. La forme demeure la même.

Les capôt et les tiges étant des éléments métalliques, la tension à leurs niveaux reste constante ; ce sont les parties équipotentielles.

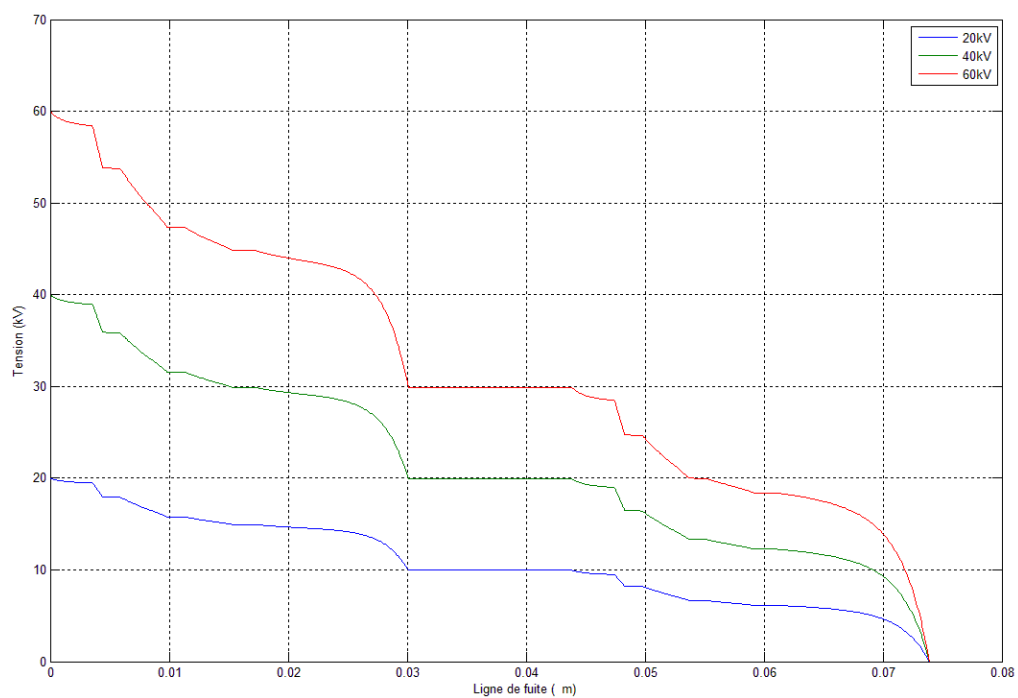


Figure IV.4 : Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne

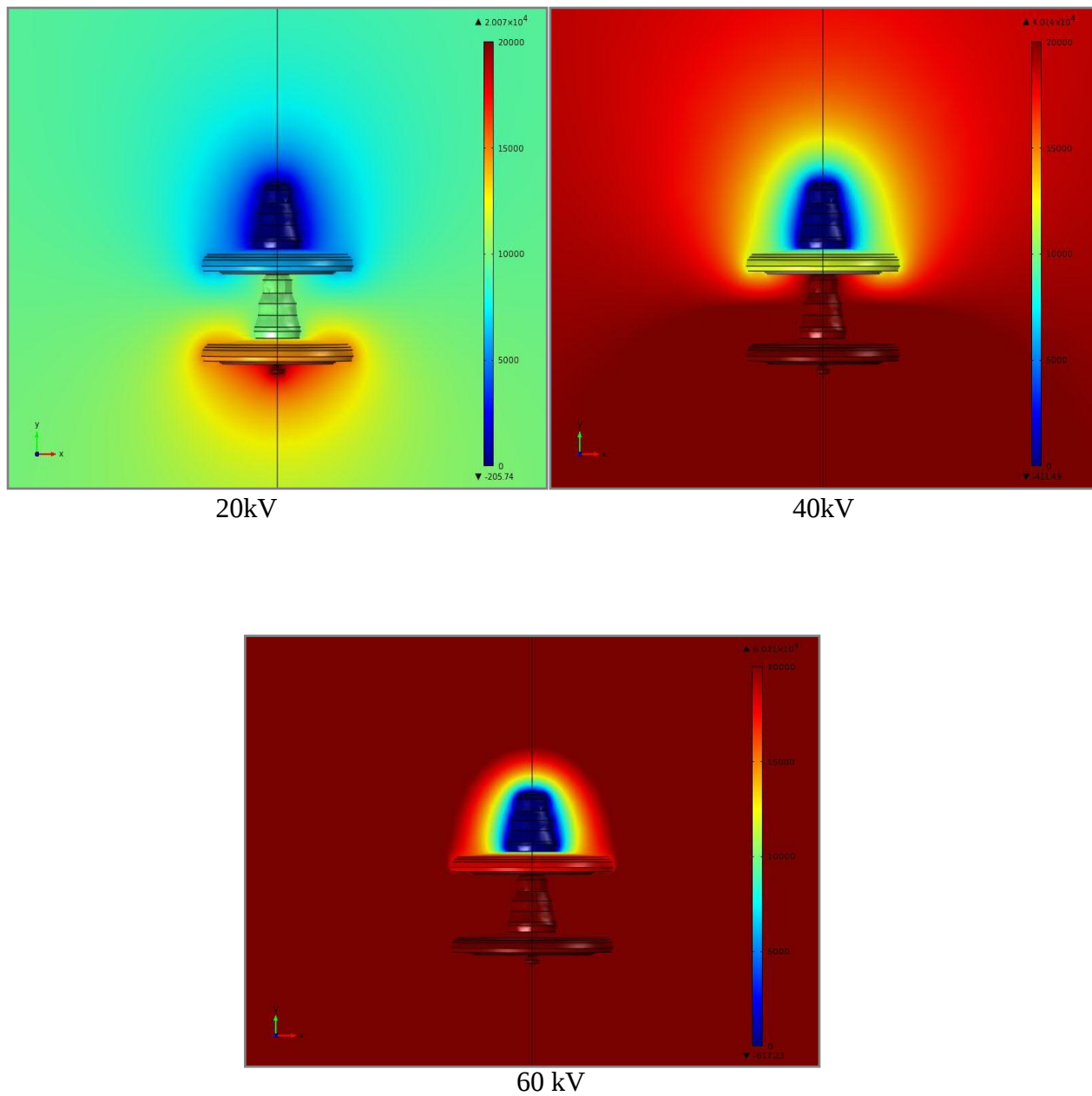


Figure IV.5 : Distribution du potentiel en fonction de la tension de la ligne

➤ **Influence du nombre d'éléments :**

Dans le cas où un ou deux éléments de la chaîne sont endommagés (éléments cassés), la tension sera alors appliquée sur les éléments restants de la chaîne.

La figure IV.6 montre le potentiel le long de la ligne de fuite de la chaîne d'un ou deux isolateurs, pour un niveau de tension constant (40 kV). Nous constatons que la tension au niveau des parties métalliques est fixe, tandis qu'elle chute brusquement au contact des parties isolantes (verre et ciment). Cela est nettement visible dans le cas d'un seul élément.

En observant la répartition du potentiel présenté sur la figure IV.7, nous remarquons une modification de la distribution du potentiel ainsi que la répartition des lignes équipotentielles qui se concentrent naturellement sur les éléments non-défaillants.

Un tel cas de figure (isolateurs endommagés) représente un vrai danger pour la ligne de 40kV.

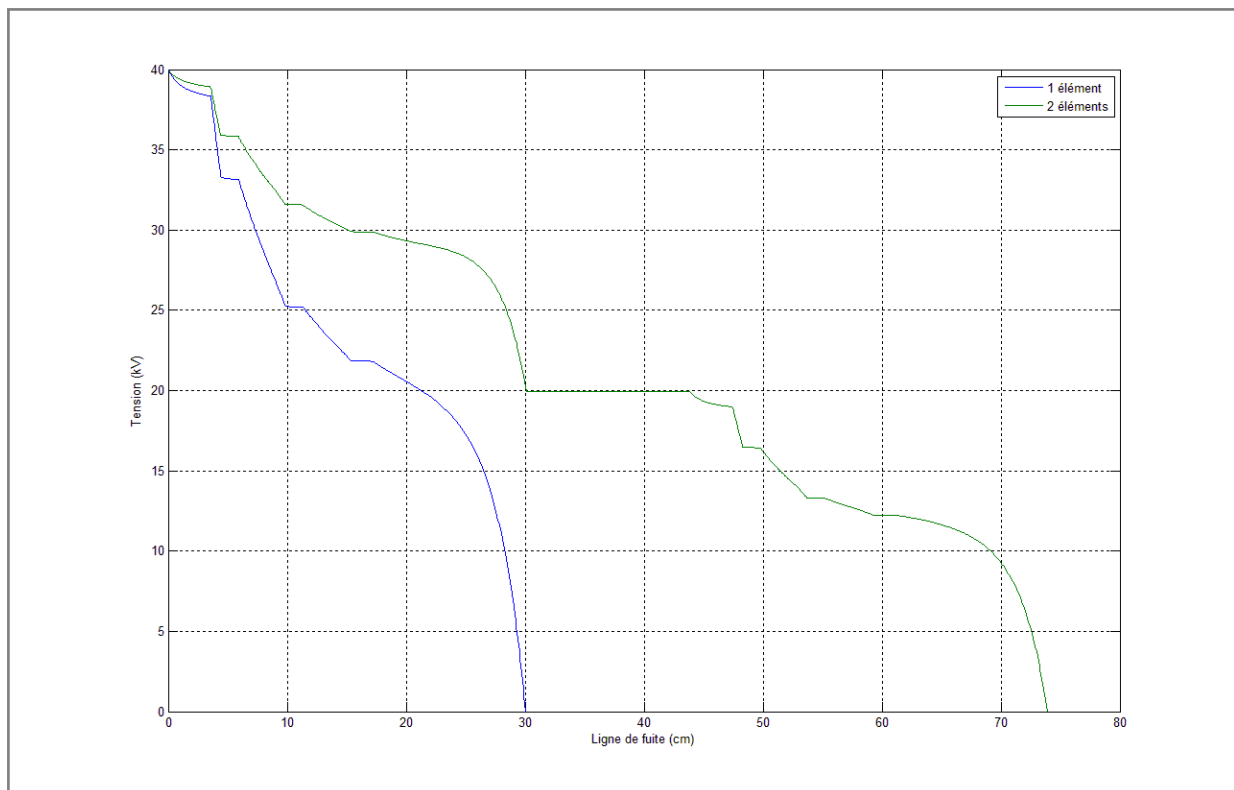
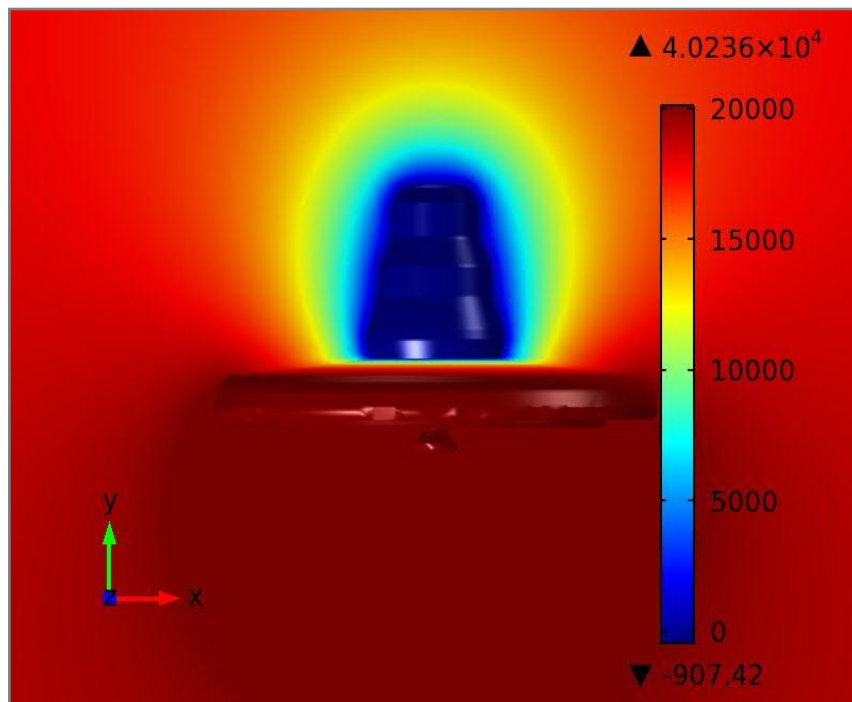
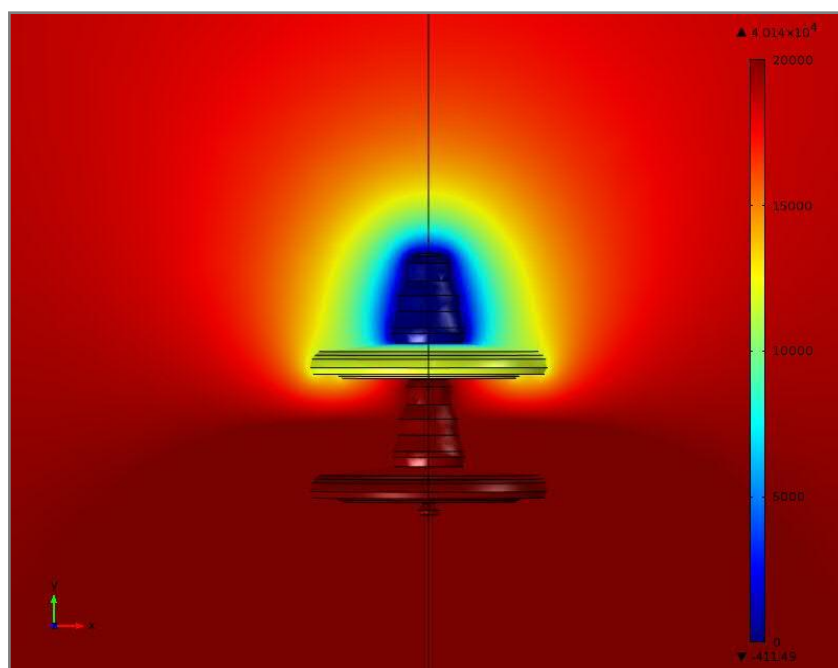


Figure IV.6 : Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne



1 seul élément



2 éléments

Figure IV.7 : Influence du nombre d'éléments sur la distribution du potentiel

IV.3. Distribution du champ électrique :

➤ **Influence de la conductivité :**

Pour la même tension (40 kV), la figure IV.8 montre la variation de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne. A l'exception du capôt relié à la terre, où l'intensité du champ électrique est très élevée notamment lorsque la chaîne est polluée, le champ électrique n'est pratiquement pas affecté par l'état de surface (pollué ou propre) de l'isolateur. En outre, la figure IV.9 montre que la conductivité n'a pratiquement aucune incidence sur la distribution du champ électrique.

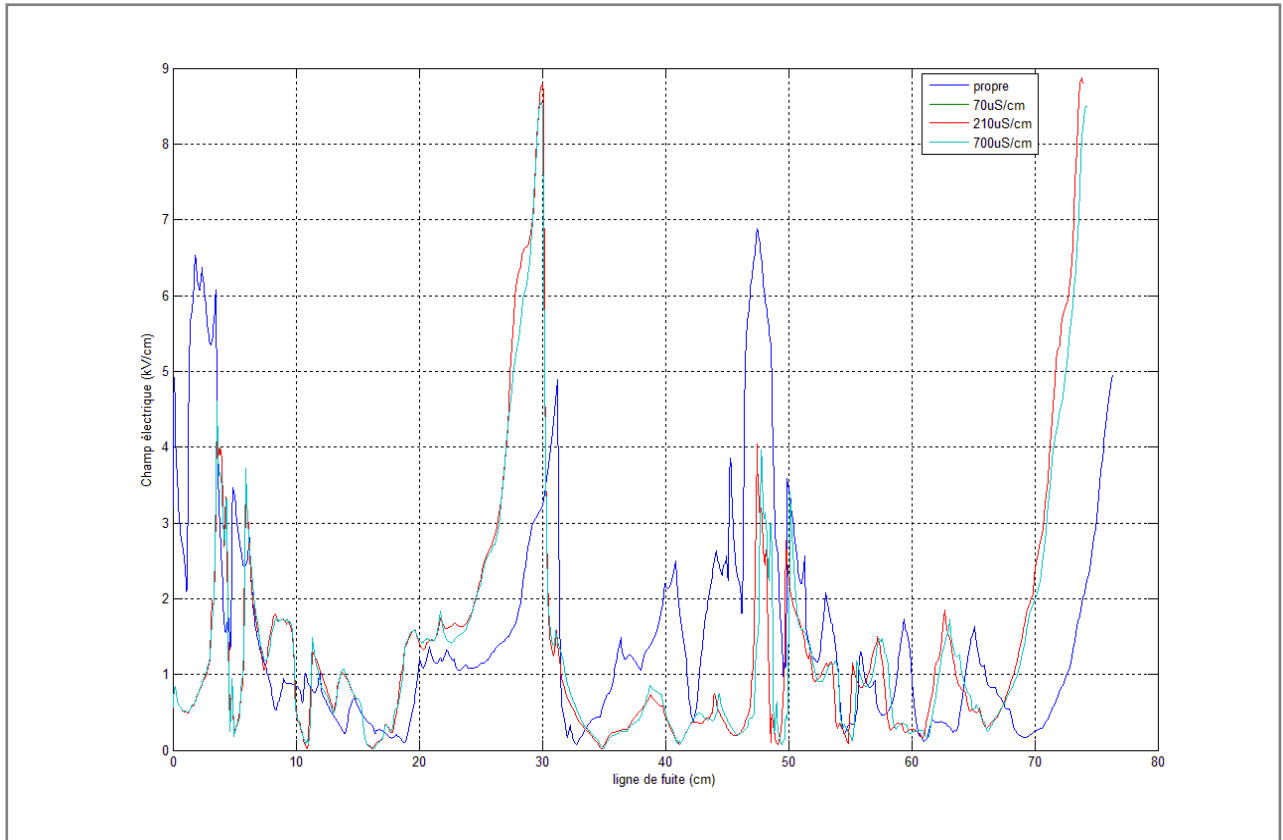


Figure IV.8 : Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs

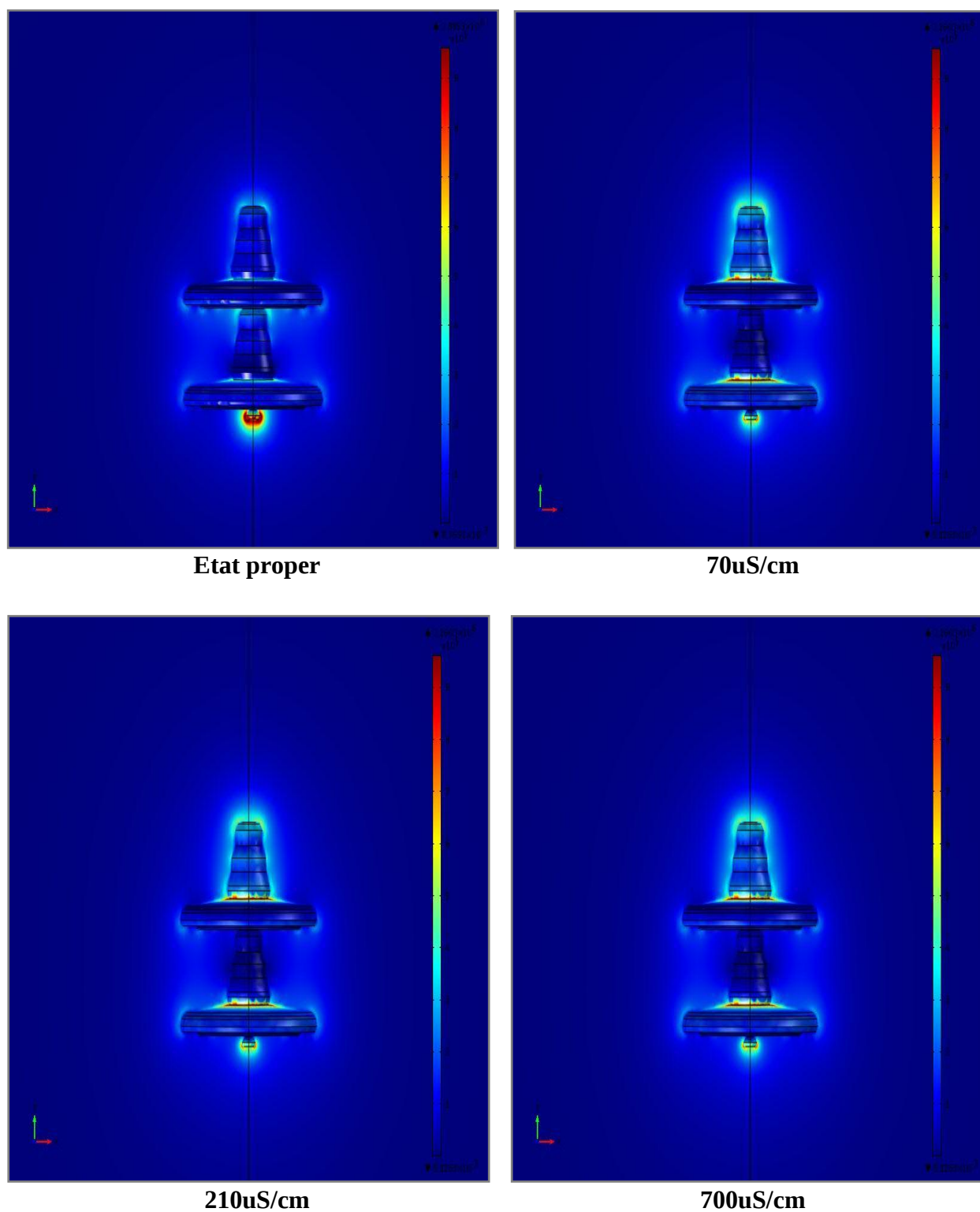


Figure IV.9 : Distribution (échogrammes) du champ électrique en fonction de la conductivité

➤ **Influence de la tension de la ligne :**

Sur la figure IV.10, nous présentons le champ électrique le long de la ligne de fuite, pour différentes tensions. Selon cette figure, l'accroissement de la tension de la ligne entraîne l'augmentation de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs à l'état propre. Nous remarquons également que le champ électrique atteint ses valeurs maximales aux extrémités de la chaîne (électrodes HT et de mise à la terre).

La figure IV.11 montre la distribution du champ électrique le long de la chaîne d'isolateurs. Il est évident, comme illustré sur cette figure, que le champ s'intensifie avec l'augmentation de la tension appliquée.

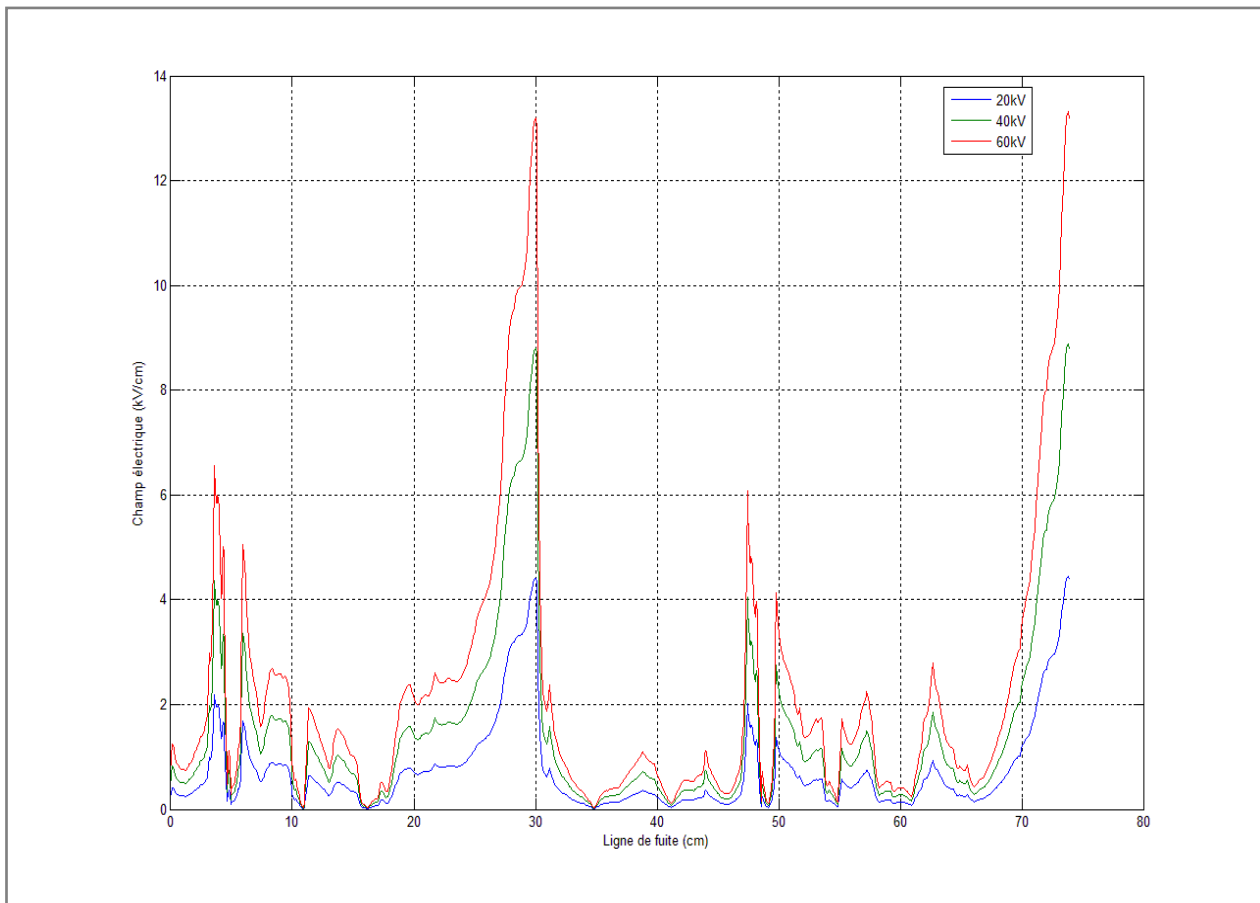


Figure IV.10 : Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs

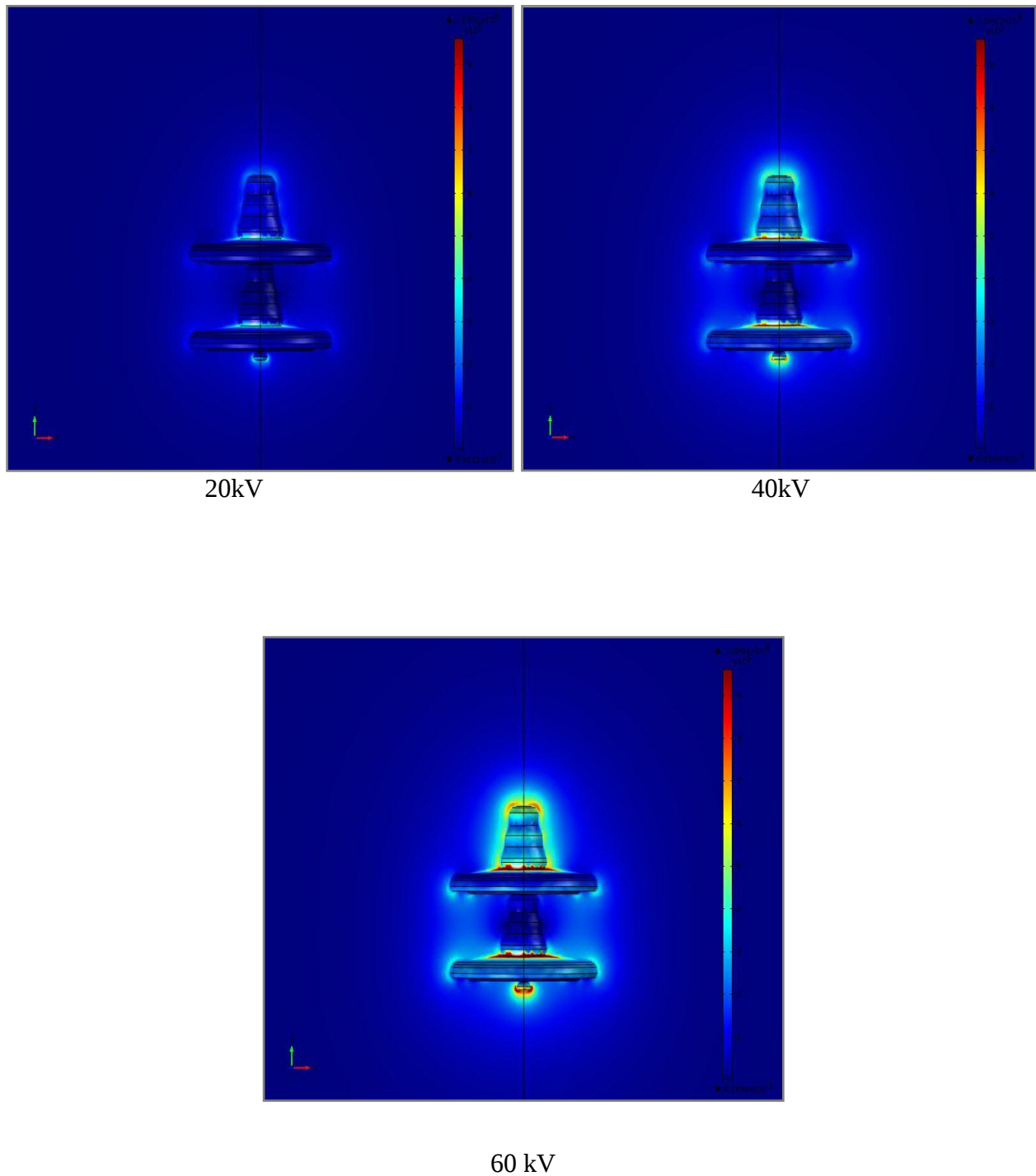


Figure IV.11 : Distribution du champ électrique en fonction de la tension de la ligne

➤ **Influence du nombre d'éléments :**

La figure IV.12 montre l'évolution de l'intensité du champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs en fonction du nombre d'isolateurs. Nous observons que le champ électrique est intense au niveau des électrodes. Ceci confirme les résultats obtenus

précédemment. Dans le cas d'un seul élément, l'intensité du champ électrique au niveau des électrodes dépasse largement le seuil recommandé (500 kV/cm [23]).

La figure IV.13 illustre la distribution du champ électrique le long de la chaîne d'isolateurs. Nous voyons clairement que le champ électrique se concentre uniquement sur les éléments soumis à une tension (électrodes HT et terre). Par ailleurs, l'intensité du champ électrique augmente avec la diminution du nombre d'éléments.

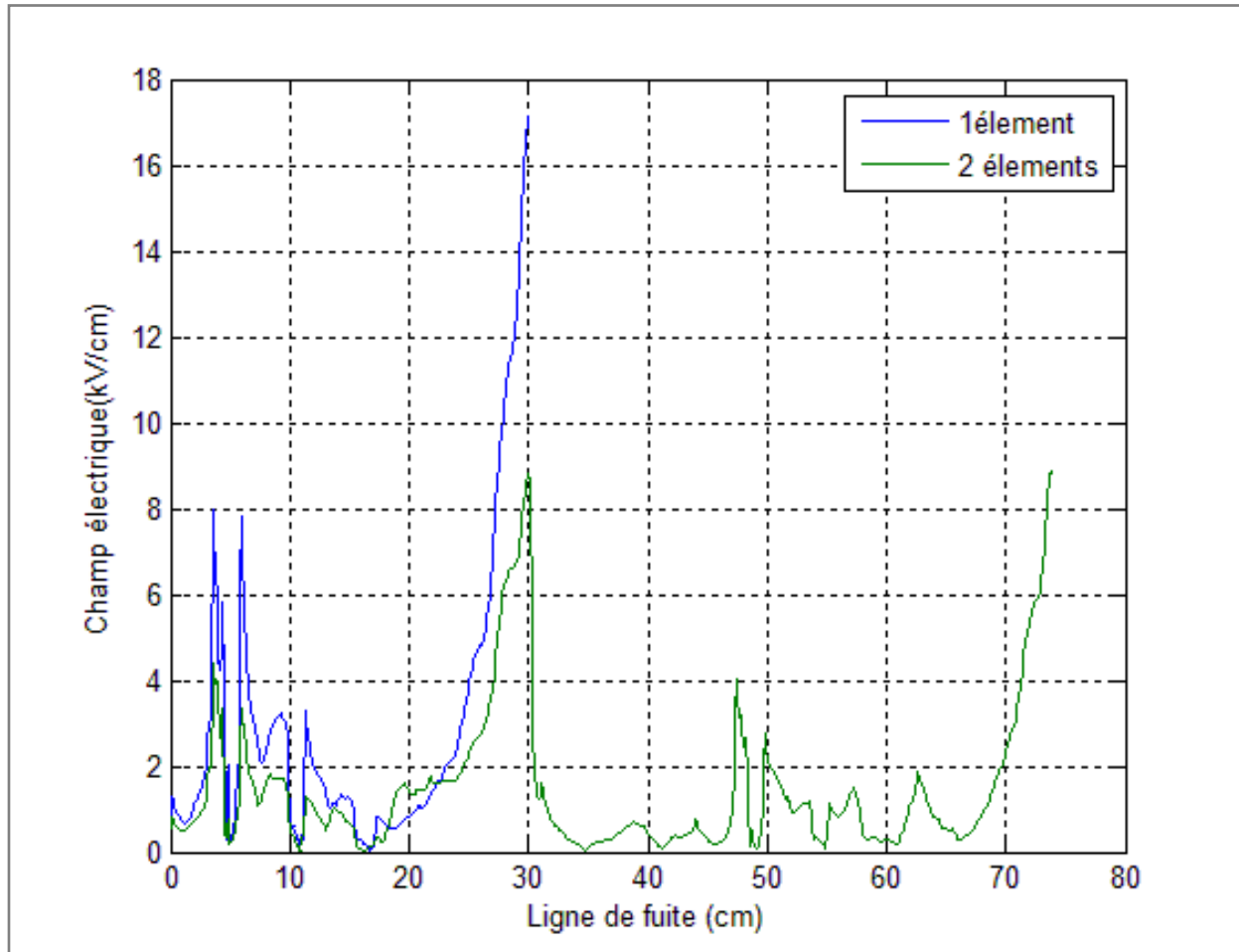
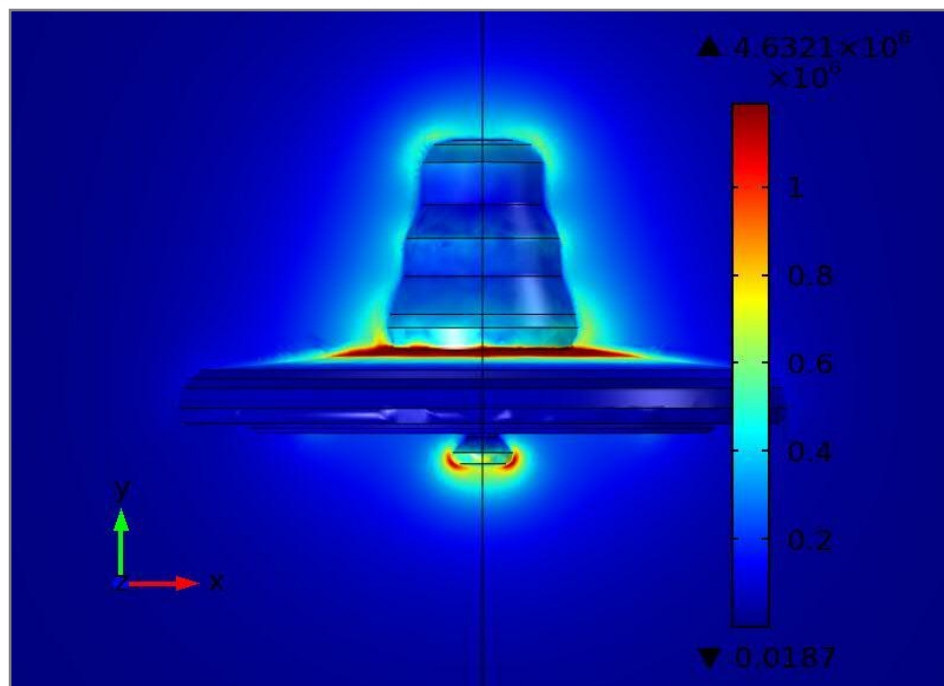
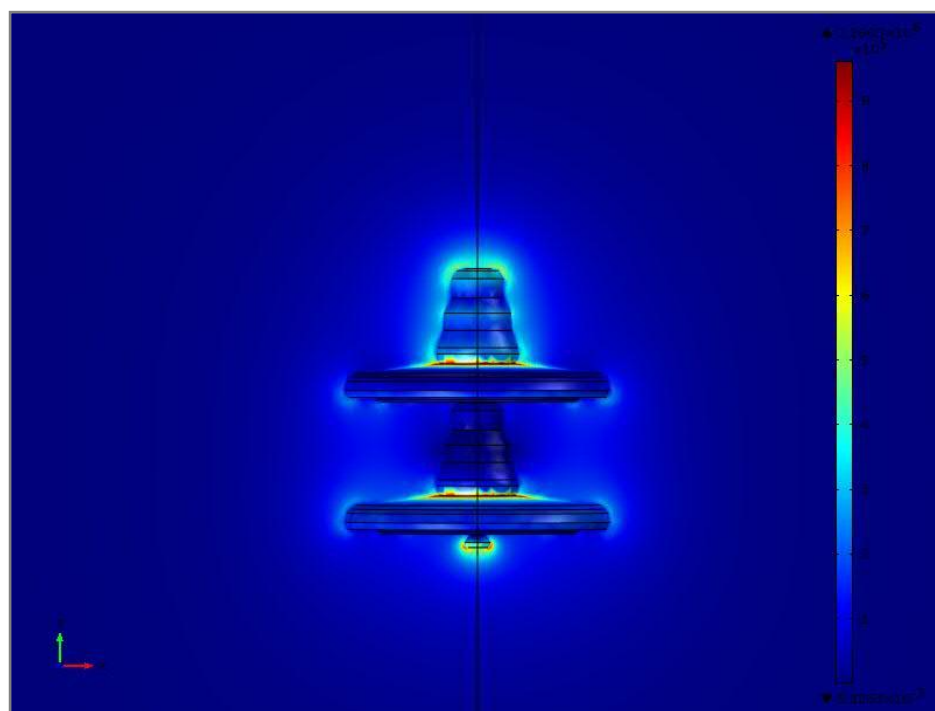


Figure IV.12 : Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs



1 élément



2 éléments

Figure IV.13 : Distribution du champ électrique en fonction du nombre d'éléments de la chaîne

IV.4. Conclusion :

Utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics, basé sur la méthode des éléments finis, nous avons pu analyser les distributions du potentiel et du champ électriques le long d'une chaîne d'isolateurs 1512L, soumise à différents paramètres électro-géométriques, à savoir la conductivité de la couche polluante, la tension de la ligne et le nombre d'isolateurs. Comme principaux résultats, nous pouvons dire que la conductivité de la couche polluante n'a pratiquement pas d'effet sur les répartitions du potentiel et du champ électriques. Par contre l'état de surface de l'isolateur influe sur la répartition du champ électrique. Ce dernier est plus élevé dans le cas où la chaîne est polluée. Nous avons vu également que la distribution du potentiel le long d'une chaîne d'isolateurs est pratiquement identique à chaque élément de la chaîne. Par ailleurs, les parties près du conducteur sont les plus exposées aux contraintes électriques, à savoir la différence de potentiel et le champ électrique. Les parties métalliques de l'isolateur, en l'occurrence le capôt et la tige, sont le siège aux équipotentiels, représentant les régions à potentiel fixe. La tension appliquée affecte uniquement les valeurs du potentiel et du champ électriques, mais pas leurs formes.

Dans le cas de chaînes moignons (éclatement d'un ou deux éléments), les éléments restants subissent tout le niveau de tension. Ce qui augmente le champ électrique. La ligne peut être mise en danger si le champ dépasse le seuil accepté (500 kV/cm). Les valeurs du potentiel et du champ électriques diminuent au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'axe principal de l'isolateur. La valeur maximale du champ électrique est obtenue à proximité des nervures de l'isolateur.

Conclusion générale

Notre présente étude nous a permis, dans un premier temps, d'acquérir des connaissances sur les phénomènes de conduction et de décharges électriques sur les surfaces isolantes contaminées, et de contribuer, par la suite, à l'étude du comportement des isolateurs pollués, en vue de prédéterminer leur tenue au contournement, afin d'éviter les coupures de l'alimentation en électricité. Afin, de bien mener ce travail, nous avons jugé nécessaire de le développer suivant :

Une partie de simulation permettant la détermination des distributions du potentiel et du champ électriques le long de la chaîne d'isolateurs.

Dans notre travail a porté sur l'étude de la distribution du potentiel et du champ électriques le long de la chaîne d'isolateurs 1512L. Pour se faire, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Mutliphysics, basé sur la méthode des éléments finis. Cette étude nous a permis de conclure que c'est l'état de surface qui influe sur la répartition du champ électrique et non pas la conductivité de la pollution. La valeur maximale du champ est obtenue dans le cas où la chaîne soit polluée. Par contre, l'effet de l'état de surface et de la conductivité de la pollution est très négligeable sur la répartition du potentiel. Ce dernier reste presque fixe, même avec des conductivités très élevées.

La répartition du potentiel est pratiquement équitable puisque tous les éléments, dans une chaîne d'isolateurs, recevront une différence de potentiel très proche. Par ailleurs, les parties près du conducteur sont les plus exposées aux contraintes électriques, à savoir, la différence de potentiel et le champ électrique. Les parties métalliques de l'isolateur, en l'occurrence, le capôt et la tige, sont des équipotentielles où la valeur du potentiel est toujours fixe.

Le champ électrique augmente avec la tension appliquée. Cependant, la forme du champ et du potentiel électriques restent les mêmes. En d'autres termes, la différence est dans les valeurs et non pas dans la forme.

Les valeurs du potentiel et du champ électriques diminuent au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'axe principal de l'isolateur. La valeur maximale du champ électrique est obtenue dans les nervures de l'isolateur près de la tige. Dans le cas de l'éclatement (cassure) d'un élément voire deux, l'élément (ou les éléments) restant reçoivent tout le niveau de tension. Ceci a pour effet d'augmenter le champ électrique. Si ce dernier dépasse le seuil accepté de 500 kV/cm, il mettra, sans doute, la ligne en danger ; ce cas de figure doit être évité.

Annexe

Annexe A : Equations de base de l'électromagnétisme :

A.1 Relations constitutives :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad \text{A.1}$$

$$\vec{J}_c = \gamma \vec{E} \quad \text{A.2}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad \text{A.3}$$

Avec

$\vec{J}_c$ étant la densité du courant de conduction

γ : la conductivité du matériau.

A.1.1 Permittivité et champ électrique :

Matériau	Air	Téflon	Huile	Nylon	Porcelaine	Mica	Verre	Eau
Permittivité Relative	1,0006	2,1	2,4	3,5	6,0	6,0	5à 10	80,0

Tableau A.1 : permittivité relative des isolants.

A.1.2 équations de Maxwell :

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \oint_c \vec{H} d\vec{l} = \sum_{i=1}^n I_i \quad \text{A.4}$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad \oint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad \text{A.5}$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad \text{A.6}$$

$$\text{div} \vec{D} = \rho_{\text{libre}} \quad \oint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q_{\text{int}} \quad \text{A.7}$$

A.1.3 Equations de Laplace et de Poisson :

$$[\text{div}(\overrightarrow{\text{grad}} V)] = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad \text{A.8}$$

A.2 Conditions aux limites à la surface de séparation de deux Milieu :

A.2.1 Composantes normales :

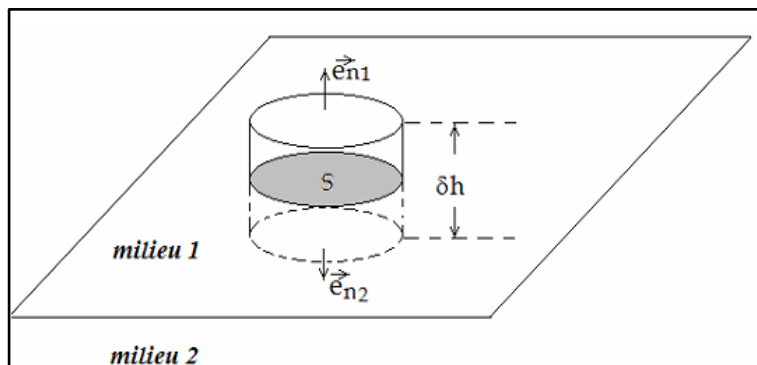


Figure A.2 : Cylindre plongé dans deux milieux

$$Q_{\text{int}} = \iiint_{\tau} \rho \, d\tau = \iint_S \rho \, \delta h \, dS = \iint_S \sigma \, dS \quad \text{A.9}$$

$$D_{n1} - D_{n2} = \sigma_s \quad \text{A.10}$$

A.2 Composantes tangentielles :

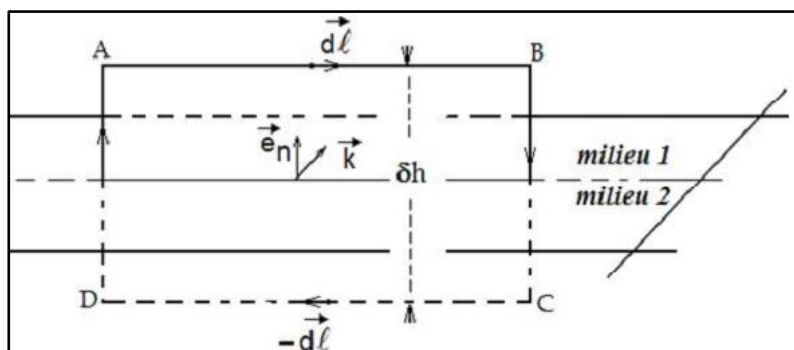


Figure A.3 : Contour d'intégration

$$\vec{E}_{t1} - \vec{E}_{t2} = 0 \quad \text{A.11}$$

A.3 Cas d'un champ sinusoïdal :**A.3.1 Permittivité complexe :**

$$E(t) = E_{eff}\sqrt{2} \cos(\omega t - \varphi) \quad A.12$$

$$E(t) = \varepsilon E_{eff}\sqrt{2} \cos(\omega t - \varphi - \delta) \quad A.13$$

$$\bar{\varepsilon} = \bar{D}/\bar{E} = \frac{\varepsilon E_{eff} e^{-j\varphi} e^{-j\delta}}{E_{eff} e^{-j\varphi}} \quad A.14$$

Les références bibliographiques

[1] **Mohamed Oussama MEFTAH, Mourad RAHAL**, « Performances d'Isolateurs HT Pollués sous Tension Alternative 50Hz et Distributions du Champ et du Potentiel ». Mémoire du Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique. Electriques utilisant COMSOL

[2] **D.Dumora**, "Matériaux isolants cramiques en électrotechnique", Techniques de l'ingénieur D275-1975

[3] http://www.hydroquebec.com/terminologie/chroniques/chro_isolateur.html.

[4] **X.Ducouret**, "Lignes aériennes : matériels, isolateurs", Techniques de l'ingénieur D4423-2006.

[5] **M.Teguar, A.Boubakeur**, "Pollution des isolateurs de haute tension", Cours de Graduation, Laboratoire de Haute Tension, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Janvier 2004.

[6] <http://www.audeladeslignes.com/isolateurs-electriques-courant-18527>

[7] **A. MEKHALDI**, « Etude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz », Thèses de Doctorat, ENP, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Septembre 1999.

[8] **W. HEISE, G.F. LUXA, G.REVRERY et M. P. VERMA**, « Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide », CIGRE, Rapport 33-09, Paris, France, 1982.

[9] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Isolateur>

[10] **C. H. A. ELY, P. J. LAMBETH, J. S. T. LOOMS et D. A. SWIFT, C.E.G.B** « Contournement des polymères humides et pollués l'ailette BOOSTER », CIGRE, Rapport 15 - 02, Paris, France, 1978.

[11] **A. CIMADOR, M. COJAN, P. HAUTEFEIULLE et M. MOREAU**, « Méthodes de dimensionnement des isolateurs de Lignes Aériennes en régions polluées », CIGRE, Rapport 33-04, Paris, France, 1978.

[12] **A. CIMADOR, S. VITET**, « La pollution des isolateurs », EDF-Epure, No. 27, Juillet 1990.

[13] **Le Roy, Cie**, «Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions», Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, Paris, 1984.

[14] **R. Matsuoka, S. Ito, K. Sakanishi, K. Naito**, « Flashover on Contaminated Insulators with Different Diameters», IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 26 No. 6, pp. 1140 – 1146, Décembre 1991.

[15] **F. F. Bologna, A. C. Britten, N. Mahatho, J. P Reynders**, « Light Pollution and light wetting on Ceramic (Glass) Insulators as a Cause of Unknown Flashover on Transmission Lines », pp. 4-6, South African High Voltage Engineering Center (SAHVEC) TSI, ESKOM Enterprises, South Africa, 2001.

[16] **Commission Électrotechnique Internationale**, « Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés aux réseaux à courant alternatif » Norme Internationale CEI 507, Avril 1991.

[17] **F. Meghnefi, C. Volat, M. Farzaneh**, « Temporal and Frequency Analysis of the leakage Current of a Station Post Insulator during Ice Accretion », IEEE Trans. Vol. 14, No. 5, pp.1381-1389, Décembre 2007.

[18] **J. Keller-Jacobsen, A. Pedersen, J. K. Rasmussen, A. Henriksen, C. Lindqvist, S. Smedsfelt**, « Essais au laboratoire et en plein air pour dimensionner correctement les isolateurs exposés à la pollution saline », CIGRE, Rapport 33-11, 1978

[19] **D. A. Swift**, « AC disc insulators: accumulation of pollution within and around the pin cavity », 7th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 44-22, pp. 26-30, Août 1991, Dresde, Allemagne.

[20] **M. El-Koshairy, E. El-Sharkawi, M. M.Awad, H. Zarzoura, M. Khalifa, A. Nosseir**, « Performances de chaînes d'isolateurs haute tension soumises à la pollution du désert », CIGRE, Rapport 33-09, 1982.

[21] **M. Awad, M. Said, A. Arafa, A. Sadeek**, « Effect of sandstorms with charged particles on the flashover and breakdown of transmission lines », CIGRE, Rapport 15-306, 2002, Paris, France.

[22] **Y. Zhu, K. Haji, H. Yamamoto, T. Miyake, M. Otsubo, C. Honda**, « Distribution of Leakage Current on Polluted Polymer Insulator Surface », Annual Report for Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.397-400, 15-18 October 2006, Kansas city, USA.

[23] **M. Otsubo, T. Hashiguchi, C. Honda, O. Takenouchi, T. Sakoda, Y. Hashimoto**, «Evaluation of insulation performance of polymeric surface using a novel separation technique of leakage current », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 10, pp. 1053-1060, December 2003.

- [24] **A. Metwally, M. Abdus Salam, A. Al-Maqrashi, S. Sumry, S. Al-Harthi**, «Electrostatic and Electrodynamic Field Analyses of 33kV Line Insulators», *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, volume 7, article 3, September 2006, Oman.
- [25] **S. Brettschneiders**, « Effects of Atmospheric Ice on the Maximum Withstand Voltage of High Voltage Insulators », Thèse de Doctorat, Université de Karlsruhe, Allemagne, Décembre 1996.
- [26] **S. Kaana-Nkusi, P. H. Alexander, and R. Hackam**, « Potential and Electric Field Distributions at a High Voltage Insulator Shed» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 23, No. 2, pp. 307-318, April 1988.
- [27] **R. Hartings**, «Modern Experimental Techniques to Study the Discharge Phenomena on Outdoor Insulators», *Proceedings of the Seventh International Symposium on High Voltage Engineering*, Dresden, Paper No. 72.100. August 1991.
- [28] **A. Eklund, R. Hartings**, «Electric Field Measurements on Composite and Ceramic Insulators During Pollution Testing » *Proceedings of CIGRE 97*, June 1997, IEE Conference Publication No. 438, pp. 32-35, June 1997, Birmingham, UK.
- [29] **T. Zhao, and M. G. Comber**, « Calculation of Electric Field and Potential Distribution along Non-Ceramic Insulators Considering the Effects of Conductors and Transmission Towers», *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 1, pp. 313-318, January 2000.
- [30] **S. Chakravorti, and P. K. Mukherjee**, « Power Frequency and Impulse Field Calculation Around a HV Insulator with Uniform or Non-uniform Surface Pollution », *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 28, No. 1, pp. 43-53, February 1993.
- [31] **H. El-Kishky, and R. S. Gorur**, « Electric Potential and Field Computation Along AC HV Insulators », *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 1, No. 6, pp. 982-990, December 1994.
- [32] **C. Volât**, « Modélisation physique 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 735 kV recouvert de glace », Thèse de Doctorat en Ingénierie, Département de Génie Electrique, Université du Québec à Chicoutimi, Juin 2002.
- [33] **Z. Aydogmus, M. Cebeci**, «A New Flashover Dynamic Model of Polluted HV Insulators», *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation DEI*, Vol. 11, No. 4, pp. 577-584, Aout 2004.
- [34] **M. D. R. Beasley, J. H. Pickles, L. Beretta, G. d'Amico, M. Fanelli, G. Giuseppetti, M. Morin, J. P. Grégoire, G. Gallet**, « Etude comparative de trois méthodes de calcul automatique du champ électrostatique », *RGE*, Tome 88, Vol. 1, pp.7-18, Janvier 1979.

- [35] **G. Chavent**, « Méthodes aux différences finies », Technique de l'ingénieur, A550, 1993.
- [36] **K. J. Binns, P. J. Lawrenson**, « Analysis and computation of electric and magnetic field problems », Pergamon Press Ltd, 1973.
- [37] **E. Asenjoe, N. Morales**, « Low Frequency Complex Fields In Polluted Insulators », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. El-17, No. 3, pp. 262-267, Juin 1982.
- [38] **G. Dhatt, G. Touzot**, « Une présentation de la méthode des éléments finis » Maloine S. A. Editeur, Paris, 1984.
- [39] **N. Fujimoto, J. M. Braun**, « Critical Fields in Composite Insulators Effect of Voids and contaminants », 9th International Symposium on High-Voltage engineering, pp. 8845-1 à 8845-4, Septembre 1995. Graz, Autriche.
- [40] **H. Singer, H. Steinbigler, P. Weiss**, « A charge simulation method for the calculation of high voltage field », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Pass 93, pp.1660-1668, Septembre-Octobre 1974.
- [41] **M. J. Khan, P. H. Alexander**, « Charge Simulation Modeling of Practical Insulator Geometries », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. El-17, no. 4, pp. 325-332, Août 1982.
- [42] **H. El-Kishky, and R. S. Gorur**, « Electric Potential and Field Computation Along AC HV Insulators », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No. 6, pp. 982-990, December 1994.
- [43] **T. Misaki, H. Tsuboi**, « Computation of 3-Dimensional Eddy Current Problems by Using Boundary Element Method », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. MAG-21, No. 6, pp. 2227-2230, Novembre 1985.
- [44] **A. Skopec, J. G. Wankowicz et B. Sikorski**, « Electric Field Calculation for an Axiallysymmetric Insulator with Surface Contamination », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No.2, pp. 332-339, Avril 1994.
- [45] **T. H. Fawzi, Y. A. Safar**, « Boundary Methods for the Analysis and Design of High-Voltage Insulators », Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol 60, issue 3, pp. 134-369, February 1987.
- [46] **J. Daffe, R. G. Olsen**, « An integral equation method for solving rotationally symmetric electrostatic problems in conducting and dielectric material », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 98, pp. 1609-1616, Septembre-Octobre 1979.
- [47] **C. A Brebbia, J. Telles et L. Wrobel**, « Boundary Element Techniques », Springer, Berlin, 1984.

الملخص

نقترح في هذا العمل 'دراسة تصرف عوازل التوتر العالي نوع 1512 L الملوثة اصطناعيا تحت تيار متناوب 50 هرتز. التجارب التي أجريناها وذلك بتغيير عدة عوامل كهروهندسية : التوتر المطبق، ناقلية الطبقة الملوثة وعدد العوازل المطبقة في السلسلة باستعمال برنامج COMSOL Multiphysics 4.2 الذي يعتمد على طريقة العناصر المنتهية ' قمنا بدراسة توزيع الكمون والحقل الكهربائيين على طول سلسلة العوازل 1512L وذلك بتغيير العوامل المذكورة سابقا .

كلمات مفتاحية : تلوث، عازل، ناقلية، محاكاة، كمون، حقل كهربائي.

Résumé

Dans ce travail, nous étudions le comportement des isolateurs de haute tension types 1512L et artificiellement pollués sous tension alternative 50Hz. Les essais en fonction de différents paramètres électro-géométriques, à savoir : la tension appliquée, la conductivité de la couche polluante et le nombre d'isolateurs dans une chaîne. En utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics 4.2, basé sur la méthode des éléments finis, nous sommes intéressés par la suite, à l'étude des répartitions du potentiel et du champ électriques, le long de la chaîne d'isolateurs 1512L, en fonction des paramètres susmentionnés.

Mots clés : pollution, isolateur, conductivité, simulation, potentiel, champ électrique.

Abstract

In this work, we study the behavior of outdoor insulators types 1512L which were polluted artificially under AC voltage and 50 Hz. The tests with the variation of the different electro-geometrical parameters such as: the applied voltage, the pollution layer's conductivity and the number of insulators employed in each string. Using COMSOL Mutliphysics 4.2 software, based on the finite elements method, we studied the repartition of the electric potential and field along the 1512L insulators, by keeping the same precedent parameters .

Key words: pollution, insulator, conductivity, simulation, potential, electric field.