

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'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Électrique

Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

*Caractéristique électrostatique d'un
model d' isolateur*

Dirigé par:

* M.GUIA TALAL

Réalisé par:

- KERMADI AIMANE
- ZEKKOUR FERHAT ALI
- LOBZA ELKHADHIR

Année universitaire : 2013/2014

Remerciements

Nous tenons à remercier vivement Monsieur Guitalale , Chargée de cours à Université d'eloued , pour ses précieux conseils qu'elle ne cessait de nous prodiguer, de même sa grande contribution et son soutien moral apportés tout le long de notre travail.

Nous remercions également tous les enseignants du département des Génie électrique.

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

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

Aimane et Elkhodeire et Ali

Dédicaces

Je dédicace ce travail :

A ma mère, exemple de courage et de sérieux qui m'a tout donné pour me permettre de réaliser mes rêves. En ces quelques mots,

je lui exprime tout mon amour et mon respect pour tout ce qu'elle m'a offert comme soutien, encouragement et aide.

A mes frères et mes chères soeurs, pour leurs aides et leurs précieux conseils.

A mes amis, pour leurs amitiés sincères.

A tous mes camarades de la promotion 2014 pour les bons moments passés ensemble.

Elkhodeire

Dédicaces

Je dédicace ce travail :

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

*A mes très chères frères : mossaiebe et meryame et
abde eljabare et sasi et kawtare et ibrahime et ahmade*

A ma famille et mes amis hichame et Tayeb

Aimane

Dédicaces

Je dédicace ce travail :

A mes parents, exemple de courage et de sérieux qui m'ont tout donné pour me permettre de réaliser mes rêves. En ces quelques mots,

je leur exprime tout mon amour et mon respect pour tout ce qu'ils m'ont offert comme soutien, encouragement et aide.

A mon grand frère, pour son aide et ses précieux conseils.

A toute la famille zekkour ferhat

A mes amis ,pour leurs amitiés sincères.

A tous mes camarades de la promotion 2014 pour les bons moments passés ensemble.

Ali

Sommaire

Sommaire

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

Chapitre I : Introduction

I.1. Introduction.....	2
I. 2.Les Isolateurs de Haute Tension	2
I.2.1 Définition	2
I. 2.2 Fonctionnement et constitution d'un isolateur	2
I. 2. 3 Isolateurs utilisés	3
I. 3. Principaux types d'isolateurs	5
I. 3. 1. Isolateurs de type rigide	5
I. 3. 2. Elément de chaîne	5
I. 3. 2. 1. Isolateurs à capot et tige	6
I. 3. 2. 2. Isolateur à long fût en porcelaine	8
I.4.Pollution des isolateurs	8
I.4.1. Impact de la pollution.....	8
I.4.2. Technique de lutte contre la pollution.....	9
I.5. Domaines de recherche	11
I.5.1. Essais in situ et au laboratoire	12
I.5.2. Modèles de laboratoire	12
I.6. Conclusion.....	16

Chapitre II : Equation de base l'électromagnétisme appliquées sur l'isolateur de hautes tensions

II.1 Introduction	17
II.2 Équations de base de l'électromagnétisme	17

II.2.1 Relations constitutives	17
II.2.2 Équations de Maxwell.....	20
II.2.3 Équations de Laplace et de Poisson	21
II.3 Conditions aux limites à la surface de séparation de deux milieux.....	22
II.3.1 Composantes normales	22
II.3.2 Composantes tangentielles.....	24
II.3.3 Équations aux potentiels	24
II.4 Cas d'un champ sinusoïdal	25
II.4.1 Permittivité complexe	25
II.5 Cas des isolateurs de Haute Tension.....	25
II.5.1 Notions fondamentales	26
II.5.1.1 Relation entre charges et capacités	26
II.5.1.2 Relation entre résistance et capacité pour un même réseau de lignes de champ	27
II.6 Méthodes de calcul du champ et du potentiel électriques.....	29
II.6.1 Méthode des différences finis	29
II.6.2 Méthode des charges équivalentes.....	30
II.6.3 Méthode des éléments finis de frontières.....	30
II.6.4 Méthode des éléments finis.....	30
II.7 Conclusion	32

Chapitre III : simulation et calcul de la capacité équivalente d'une chaîne isolateur

III.1 Introduction.....	33
III.2 Simulation	33
III.3 Distribution de potentiel (cas 40kv)	34
III.4 La répartition du potentiel	35

Sommaire

III.5 Distribution du champ électrique (cas 40kv).....	35
III.6 Répartition du champ électrique.....	36
III.7 Calculé de capacité d'isolateur	37
III.7.1 cas d'un seul élément.....	37
III.7.2 Cas d'un chane d'isolateurs (2elemont).....	37
III.7.3 L'effet de nimber d'élément	38
III.8 Conclusion.....	39
Conclusion générale.....	40

Introduction générale

Introduction générale

Le transport et la distribution de l'énergie électrique s'effectuent souvent par des lignes aériennes. Celles-ci comportent des isolateurs soumis à diverses contraintes, parmi celles-ci l'exposition de ces derniers à différents dépôts polluants.[1]

L'humidification de ces couches de pollution engendre un courant de fuite, conduisant par effet joule à l'échauffement de la couche de pollution, et par conséquent à son assèchement partiel. Une partie importante de la tension appliquée se trouve reportée aux bornes de cette bande sèche engendrant, si le champ local dépasse un certain seuil, la création d'un arc électrique. Sous certaines conditions, cet arc peut s'allonger jusqu'à provoquer le contournement total du système isolant.

Une des méthodes utilisées pour le contrôle du degré de pollution est la mesure du courant de fuite : celui-ci dépend de l'impédance globale apparente de l'isolateur, considérée comme étant le résultat de zones sèches en série avec des zones polluées.[2] Toutefois, il est difficile d'évaluer de manière exacte l'impédance apparente présentée par les zones sèches : celle-ci joue pourtant un rôle capital dans l'impédance globale de l'isolateur. La raison en est que l'on considère souvent que les zones polluées ont une résistance tellement faible, qu'on peut les considérer, dans les cas extrêmes comme de parfaits conducteurs.

Nous nous proposons, dans ce travail, de contribuer à lever cette difficulté, et à établir au moyen de simulation, la relation complexe entre la capacité équivalente d'une ou d'un isolateur.

Notre mémoire est donc structuré en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous rappelons quelques définitions spécifiques correspond l'isolateur de la haute tension pour nous intéresser ensuite aux problèmes liés à la pollution. Nous évoquerons alors quelques méthodes de maintenance et de lutte contre les perturbations causées par ce phénomène.

Le deuxième chapitre sera consacré aux équations de base l'électromagnétisme appliquées sur l'isolateur de hautes tensions. Nous aborderons d'une manière générale l'étude des propriétés principales des diélectriques. Quelques Méthodes de calcul du champ et du potentiel électriques seront présentées à la fin de ce chapitre, vu l'intérêt grandissant porté à ces matériaux .

Dans le dernier chapitre, nous simulerons les différentes configurations d'un isolateur réelle. Nous développerons certaines notions tels qui exprime l'étendue des lignes de champ. Ainsi la répartition du potentiel au borne d'isolateur proposé et en suite nous déterminons la capacité équivalente de cet isolateur en fonction des plusieurs paramètres géométriques

Chapitre I

Introduction

I.1. Introduction

Le phénomène de pollution des lignes aériennes constitue un sujet d'étude d'une importance primordiale. Cela provient du fait que la pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de haute tension. En effet, et suite à l'interaction entre, l'air transportant des grains de poussières et l'isolateur, une couche étrangère se dépose sur les surfaces de celui-ci. Une fois cette couche humidifiée, la tension de tenue peut diminuer considérablement, provoquant des incidents très graves. Cela est lié à plusieurs facteurs dont les plus importants sont la nature de l'agent polluant et le profil de l'isolateur.

I. 2.Les Isolateurs de Haute Tension

I.2.1 Définition

L'isolateur est 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 –circulations, les pertes de courant et les charges d'électrocution [3].

I. 2.2 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 mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes. 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 sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement [4]. Du point de vue électrique, l'isolateur est considéré comme deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents, qui sont les suivants [4]:

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

I. 2. 3 Isolateurs utilisés

On utilise différents types d'isolateurs en verre et en céramique (porcelaine). Néanmoins ceux en verre sont les plus répandus [5]. En MT le verre trempé seul est utilisé.

L'équipement des lignes aériennes en isolateurs porcelaine est de plus en plus abandonné pour les raisons suivantes :

- Isolateur trop lourd,
- Détection difficile de l'amorçage (isolateur en porcelaine perforé n'est pas toujours détecté du sol par l'exploitant).

Depuis la dernière décennie, l'utilisation des isolateurs en matériaux polymère commence à être assez importante.

a) Céramique

La composition des céramiques et leur fabrication ont été longuement développées; certaines céramiques à grains très fins sont recommandées pour des isolateurs devant supporter des efforts mécaniques élevés [4]. Les céramiques sont largement utilisées pour l'isolation des matériels de poste: isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance... Elles sont aussi utilisées dans l'isolation des isolateurs à long fût utilisés comme éléments de chaînes (lignes à extra et ultra haute tension)

b) Verres

- **Le verre recuit**

Le verre recuit a été surtout utilisé pour faire des isolateurs rigides, mais on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de températures. 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**

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 [4].

Outre son bas prix, le verre présente l'avantage de permettre de déceler les défauts par une simple observation .

c) Matériaux synthétiques

Ces isolateurs (Figure I. 1.), dits composites, sont constitués d'un noyau en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Ces isolateurs présentent l'avantage d'une grande légèreté alliée à une haute résistance mécanique que leur confère le noyau. Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères.

Cependant, ces isolateurs vieillissent sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécaniques, atmosphériques...) ce qui constitue un désavantage dans leur utilisation.

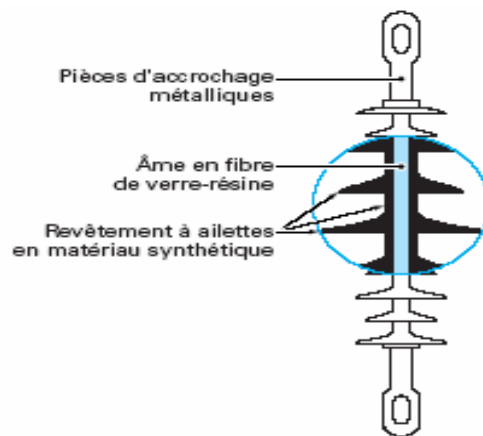


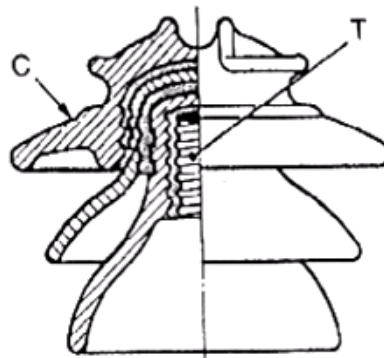
Figure I.1 : Isolateur composite

I. 3. Principaux types d'isolateurs

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs :

I. 3. 1. Isolateurs de type rigide

Un isolateur rigide (Figure I. 2.), est relié au support par une ferrure fixe. Tous les isolateurs rigides normalisés sont livrés avec une douille scellée de telle façon qu'ils puissent être vissés directement sur les ferrures correspondantes. La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides [3].



C : Cloche T : Logement de tige

Figure I.2 : Isolateur rigide en verre

I. 3. 2. Élément de chaîne

C'est un isolateur constitué par un matériau isolant équipé de pièces métalliques de liaison, nécessaires pour le relier de façon flexible à d'autres éléments de chaîne (Figure I.3.), à la pince de suspension du conducteur ou au support. Ces éléments sont soumis principalement à des efforts de traction. Ils sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (chaînes d'alignement), soit horizontale (chaînes d'ancrage) [4].

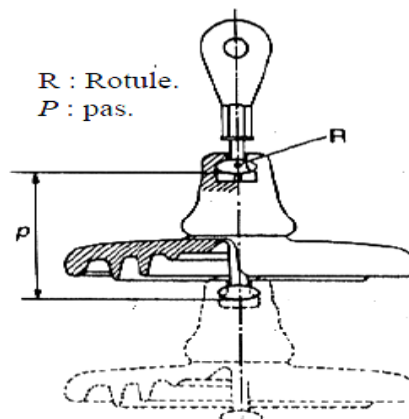


Figure I.3 : Assemblage à rotule.

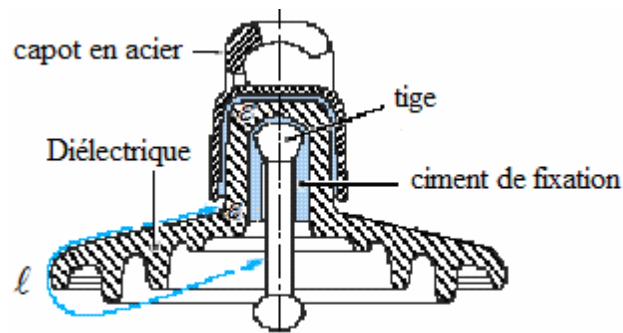
I. 3. 2. 1. Isolateurs à capot et tige

L'isolateur capot et tige est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre (ou la porcelaine).

L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille .

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

La coupe de l'isolateur capot-tige est schématisée à la (Figure I. 4)



ℓ : plus courte distance dans l'air ; extérieure à l'isolateur

ε : longueur du canal de perforation

Figure I.4 : Isolateurs à capot et tige.

La (Figure I. 5) présente les différents profils des isolateurs à capot et tige qui sont:

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

Il est 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.

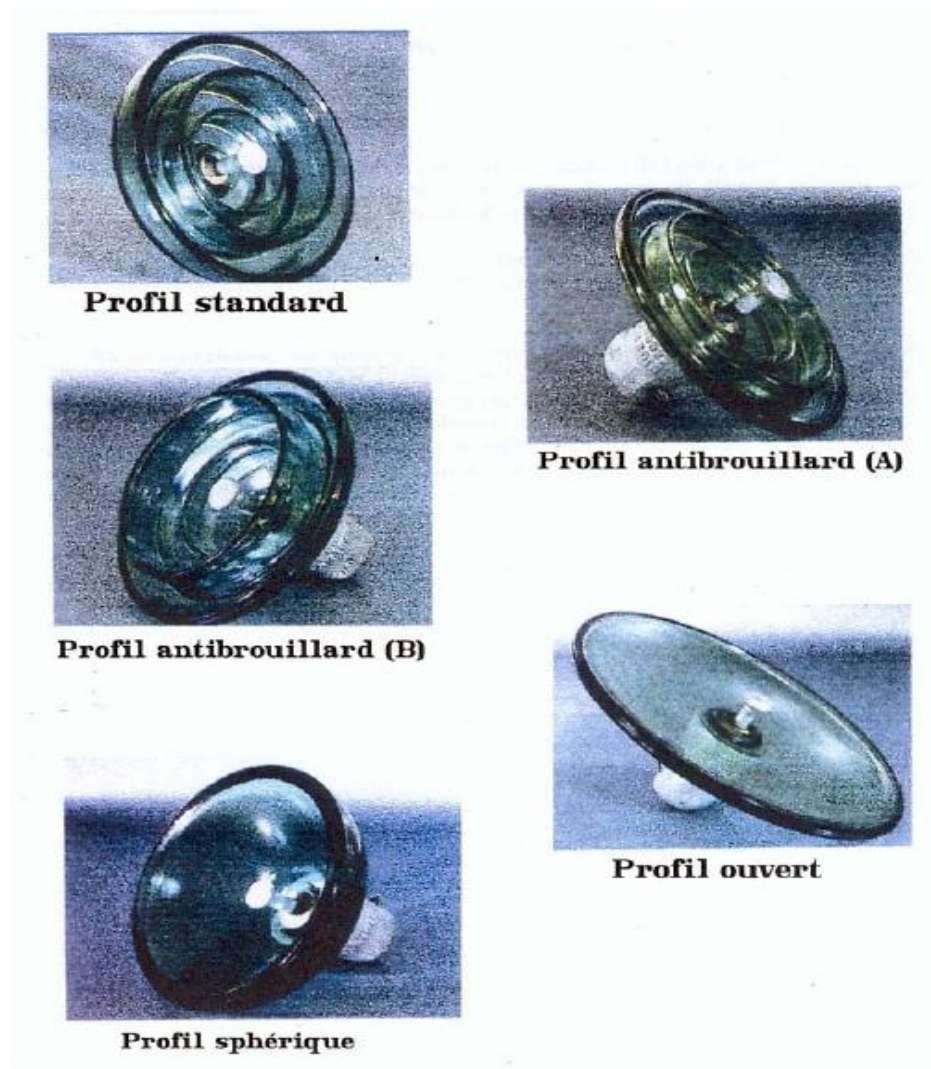


Figure I. 5 Différents profils d'isolateurs à capot et tige

I. 3. 2. 2. Isolateur à long fût en porcelaine

Ils sont constitués d'un cylindrique plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes (Figure I.6). A chaque extrémité est fixée une pièce métallique de liaison ; celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le cylindre, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet.

De tels isolateurs peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis [4].

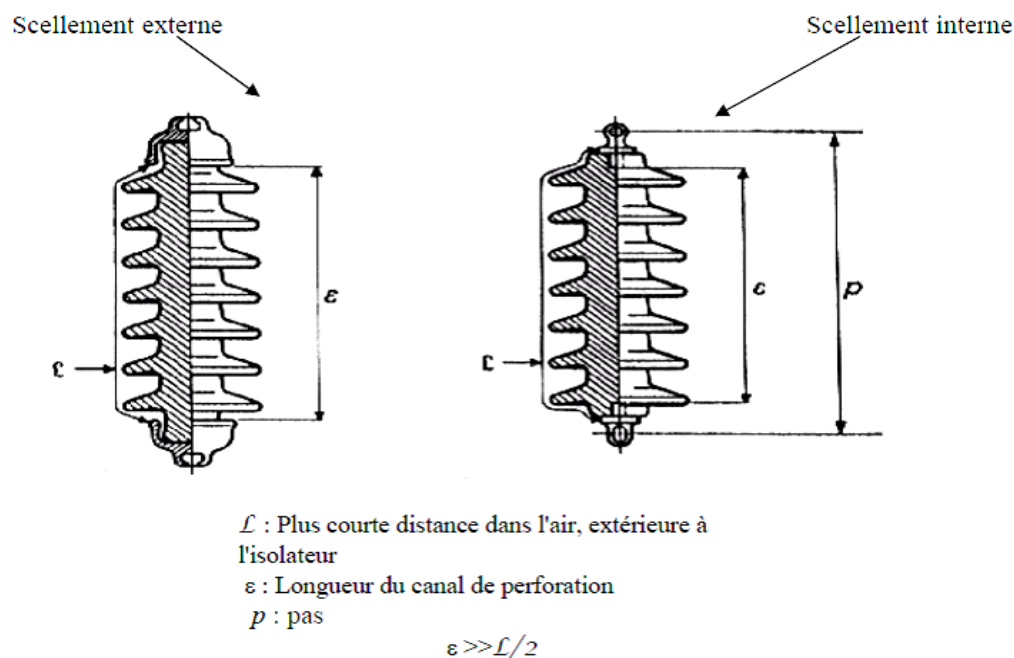


Figure I.6 Isolateur à long fût en porcelaine.

I.4. Pollution des isolateurs

I.4.1. Impact de la pollution

Lorsque l'isolateur est propre ou recouvert d'une couche de pollution sèche, un très faible courant capacitif circule à sa surface. Ceci est dû aux très faibles valeurs des conductivités volumiques de l'air, de l'isolant solide et de la couche de pollution. On obtient ainsi une répartition électrostatique du potentiel électrique.

Par contre, lorsque la couche de pollution est humidifiée, elle devient le siège d'un courant de conduction de valeur relativement importante et la répartition du potentiel électrique diffère de la répartition électrostatique [7].

La rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur.

➤ Arc non localisé : L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorce à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courants de fuite entraînant une faible perte d'énergie, généralement supportable par l'installation.

➤ Arc fixe : L'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en se réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation du support isolant de l'élément défaillant.

➤ Contournement des isolateurs : Le contournement d'un isolateur pollué est en général précédé par l'apparition brutale d'un courant de fuite accompagné de la formation d'une bande sèche et d'arc partiels. Un arc peut s'allonger jusqu'au contournement total.

I.4.2. Technique de lutte contre la pollution

Pour un niveau de pollution donné, une bonne conception des lignes basée sur des mesures de sévérité de pollution permet de prévenir, autant que possible, les incidents lorsque la ligne est en service. Mais un changement dans les données d'un site est toujours possible, c'est-à-dire même un dimensionnement initialement correct peut s'avérer insuffisant dans certaines conditions.

Dans ces circonstances, on utilise des techniques comme l'allongement de la ligne de fuite, l'adaptation d'un autre type des isolateurs capable de résister aux contraintes de la pollution [8].

Par contre, certaines zones très localisées sont soumises à un niveau de pollution exceptionnel. Dans ce cas, la simulation de laboratoire n'est pas recherchée, car aucun isolateur de dimensionnement raisonnable n'est en mesure de résister à ces contraintes [6]. On préfère, généralement, utiliser d'autres types des techniques de lutte contre la pollution. Plusieurs moyens sont utilisés afin de prévenir, autant que possible, les incidents lorsque une ligne est en service.

Ces moyens de lutte doivent tenir compte des données propres au site considéré et au changement possible de la sévérité de pollution dû à de nouveaux facteurs (apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste,.). Les différentes méthodes utilisées consistent à:

a) Allongement de la ligne de fuite

Il permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution. Deux techniques sont employées :

- Le changement de type d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite) : c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [12].

b) Isolateurs plats

Tandis que les deux précédentes méthodes conduisent à allonger la ligne de fuite des isolateurs, l'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminuer. En effet, ces isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont principalement utilisés dans les régions désertiques et soumises à des tempêtes de sable où la principale source d'humidification est la condensation .

c) Graissage périodique

Grâce à ses propriétés hydrophobes, le graissage protège temporairement les isolateurs. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement comprise entre 1 et 4 ans. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de graissage est pénible, longue et coûteuse. Elle nécessite, par ailleurs, une interruption de service.

d) 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. Comme pour le graissage grâce à ses propriétés hydrophobes, ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre sa longévité est, en général, nettement supérieure à celle du graissage [13].

e) Les isolateurs composites

Ils sont constitués d'un noyau en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Ces isolateurs présentent l'avantage d'une grande légèreté alliée à une haute résistance mécanique que lui confrère le noyau. Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères [9]. Cependant, ces isolateurs présentent le désavantage de vieillir sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électrique et mécanique).

f) Nettoyage des isolateurs

➤ Le nettoyage manuel (essuyage à sec de l'isolateur) ou le **lavage hors tension**, peuvent être utilisés de façon périodique, en particulier dans les postes. Comme ces méthodes sont utilisées hors tension, elles entraînent nécessairement des interruptions de service parfois assez longues. Aussi, il faut limiter, autant que possible, leur utilisation.

➤ Le lavage sous tension permet d'éviter ces coupures. Dans son principe, ce type de lavage permet de garder propre l'isolateur. Ce dernier est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans ces cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau de lavage, le processus de lavage et les distances de sécurité à respecter afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

➤ Le nettoyage des isolateurs à l'aide d'un abrasif pulvérisé sous pression est une technique utilisée dans certain pays (Amérique du Nord en particulier). Cette technique permet le nettoyage d'isolateurs recouverts de pollution très adhérente (ciment, par exemple) et peut être utilisée pour dégraisser les isolateurs.

I.5. Domaines de recherche

Afin de mieux comprendre le comportement des isolateurs sous pollution, plusieurs travaux ont été effectués. Ils comprennent les essais sur isolateurs réels, effectués in situ (pollution naturelle); ou alors au laboratoire (pollution artificielle).

D'autres sont effectués sur des modèles de laboratoire. Ils présentent l'avantage de contourner les difficultés liées aux configurations géométriques complexes des isolateurs.

I.5.1. Essais in situ et au laboratoire

Il est clair qu'il serait plus rigoureux d'effectuer des essais sur les isolateurs dans les conditions naturelles locales, plutôt que d'avoir recours à des essais artificiels. Cependant les temps nécessaires à l'observation des différents paramètres influençant le bon fonctionnement de l'isolateur demeurent longs. De plus, ce type de travaux peut être sujets de résultats capricieux. Par conséquent, l'approche par des techniques de pollution artificielle s'est avérée nécessaire. Néanmoins, ce type d'essais doit répondre à certaines normes bien définies, afin de reproduire les mêmes conditions de travail pour l'ensemble des chercheurs, et par la même, permettre une exploitation valable des résultats. C'est ainsi que des résultats de diverses méthodes de pollution artificielle sont parfois comparés aux résultats de pollution naturelle [14].

I.5.2. Modèles de laboratoire

Parallèlement, des modèles simples de laboratoire ont été adoptés par un certain nombre de chercheurs [15]. Ces modèles ont permis par la simplicité de leurs configurations, d'examiner aisément l'influence de divers paramètres sur le comportement de l'isolateur (courant de fuite, contournement, tension d'entretien de l'arc, etc.). Cependant si quelques modèles reflètent assez bien le comportement de l'isolateur, d'autres par contre en restent assez éloignés [16]. Toutefois il est évident que ces modèles ne sont pas destinés à se substituer à l'isolateur, ils permettent par contre, de mieux observer les différents phénomènes de contournement.

Notons que des travaux actuels utilisant des formulations mathématiques ont permis d'élaborer des modèles théoriques [11] permettant de simuler le comportement de l'isolateur ainsi que des modèles empiriques [10, 11, 17] établis exclusivement à partir de résultats expérimentaux.

a). En 1970, Wooson et Mc Elroy ont tenté une approche des isolateurs, en proposant un modèle plan à géométrie circulaire (Fig. I.7), celui-ci ne donna pas de résultats satisfaisants, en vue de l'éloignement de la configuration proposée et celle de l'isolateur.

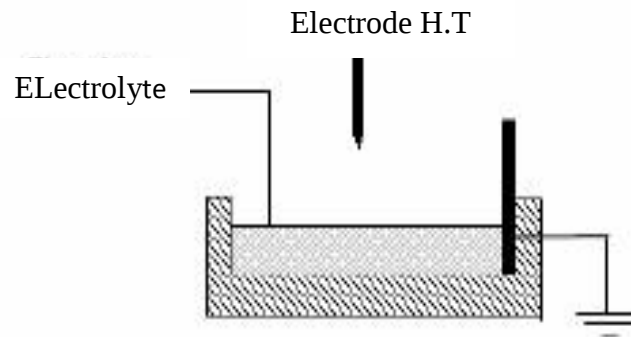


Figure. I.7 : Modèle de Woodson Mc Elroy

b). Un autre modèle reposant sur une configuration plane sera proposé ultérieurement par Claverie et Percheron [18] (1973), ce modèle comprend deux électrodes l'une circulaire mise sous tension et l'autre rectangulaire mise à la terre, une couche de pollution continue séparant les deux électrodes.

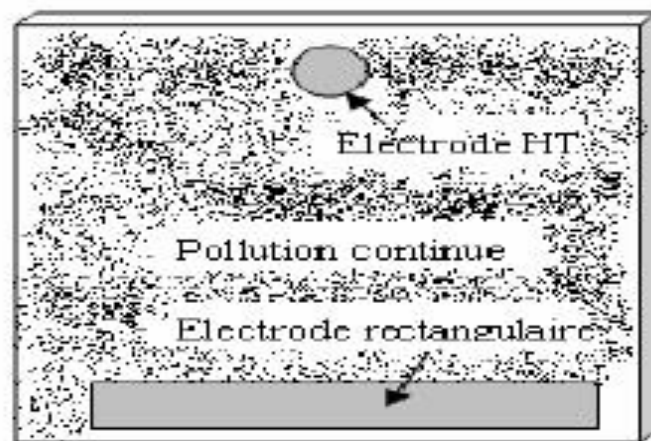


Figure. I.8 : Modèle de Claverie et Percheron

c). Plus tard, J.Danis [10](1983) tiendra compte de la discontinuité de la couche de pollution à la surface d'un isolateur réel, en proposant un modèle comportant des zones sèches en alternance avec d'autres polluées, en utilisant deux électrodes identiques, rectangulaires placées aux extrémités d'une plaque isolante.

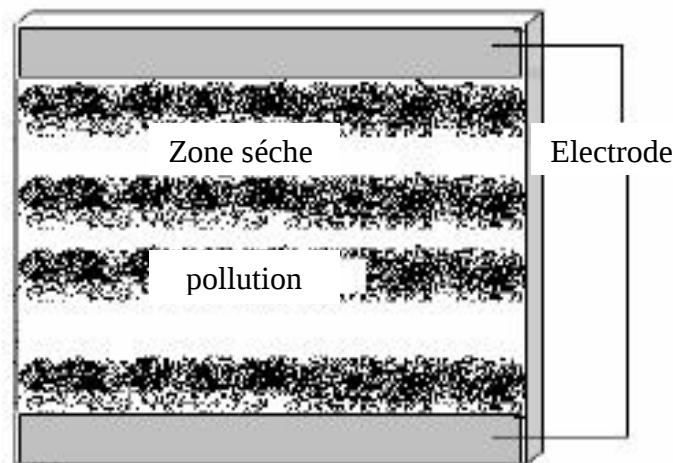


Figure. I.9 : Modèles de J. Danis

d). Un autre modèle, élaboré ultérieurement et présentant des similitudes avec le modèle précédent mais présentant une configuration cylindrique fut établi par Alston et Zoledzowski (1963). Ce modèle comprend deux électrodes disposées tout autour des extrémités du cylindre (Fig. I.10). Il sera adopté plus tard par d'autres auteurs [19]. Fig. I.6 : Modèle d'Alston et Zoledzowski



Figure. I.10 : Modèle d'Alston et Zoledzowski

e). Utilisé également par d'autres auteurs, le modèle de Wilkins est constitué d'une électrode mise sous tension et située au dessus d'un bac rempli d'eau additionnée de sel représentant la zone polluée, l'espace compris entre l'électrode et l'eau sera considéré comme étant la zone sèche (Fig. I.11). Ce modèle est très utilisé pour étudier le critère de propagation de l'arc [20].

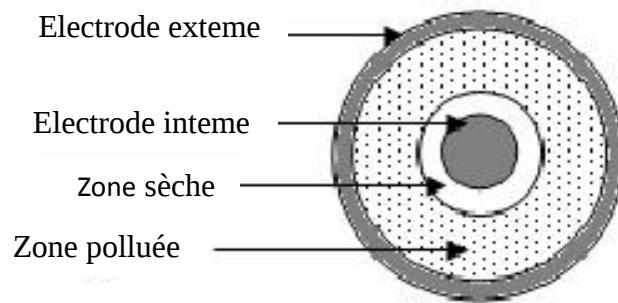


Figure. I.11 : Modèle de Wilkins

f). Le modèle proposé M.N.Rayes et M.Zhirh [21] (1991) est constitué d'une électrode placée au-dessus d'une plaque isolante, à une distance variable s , considérée égale à la largeur de la zone sèche. Cette plaque est placée sur quatre colonnes uniformément polluées et situées à une distance $1-s$ de la terre. Une tension alternative de fréquence 50 Hz est alors appliquée au modèle. Les auteurs se sont alors intéressés à la variation de la tension de contournement en fonction de la largeur s de la zone sèche, pour plusieurs conductivités de la pollution appliquées aux colonnes.

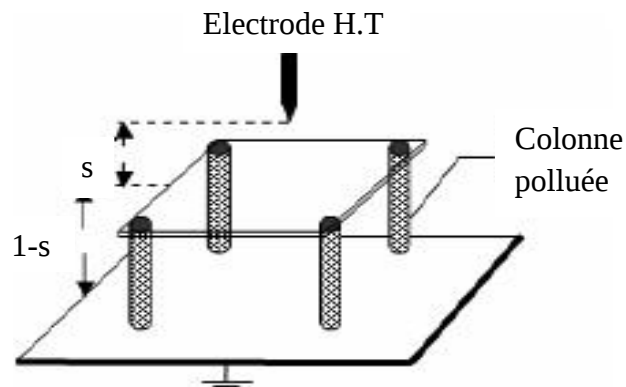


Figure. I.12 : Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh

I.6. Conclusion

Une ligne aérienne est constituée d'un agencement judicieux de matériaux conducteurs qui servent à transporter l'énergie électrique là où elle doit être utilisée et de matériaux isolants qui permettent d'empêcher celle-ci de se perdre en empruntant le plus court chemin d'un potentiel à un autre. Outre leur fonction première qui est de s'opposer au passage du courant, les isolateurs ont également le rôle de maintenir mécaniquement les conducteurs dans des conditions prédéterminées.

Cependant, la pollution se présente comme un ensemble de facteurs, tout aussi complexes les uns que les autres et pouvant provoquer par leurs actions communes de nombreuses perturbations dans le fonctionnement des réseaux électriques. Par conséquent, un bon dimensionnement des isolateurs dans les lignes de haute tension ne se fera qu'en tenant compte du facteur de pollution.

Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (graissage, lavage, nouveaux types d'isolateurs, revêtements hydrophobes...), permettant de disposer aujourd'hui de solutions curatives à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants sur le réseau. Les difficultés rencontrées aujourd'hui pour arriver à une bonne maîtrise de la tenue des isolateurs montrent que des efforts en matière de recherche restent indispensables.

De plus une bonne connaissance du matériau diélectrique peut s'avérer nécessaire pour comprendre le comportement des isolateurs. Dans le prochain chapitre, nous aborderons justement l'étude, d'une manière générale, équation de base l'électromagnétisme appliquées sur l'isolateur de hautes tensions: ceci nous permettra une meilleure approche du comportement des matériaux dont est constitué l'isolateur.

Chapitre II

Equation de base l'électromagnétisme
appliquées sur l'isolateur de hautes
tensions

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux équations de base de l'électromagnétisme appliquées aux diélectriques. Celles-ci débouchent sur des équations aux dérivées partielles classiques connues sous le nom d'équations de Laplace et de Poisson.

Associées aux conditions aux limites établies pour le champ et l'induction électrique, la résolution de ces équations permet de déterminer les contraintes électriques à travers la détermination du champ et du potentiel.

Les méthodes de résolution peuvent être analytiques si les lignes de champ possèdent un parcours simple. Dans la plupart des cas concrets rencontrés, les méthodes analytiques ne sont pas applicables et il est fait appel aux méthodes numériques.

Plusieurs méthodes numériques sont alors proposées pour la résolution des problèmes posés. Ces méthodes sont adaptées aux différentes formes complexes et irrégulières des isolants afin de les identifier. Elles sont essentiellement de type différences finies, éléments finis, charges équivalentes et éléments finis de frontières.

II.2 Équations de base de l'électromagnétisme

II.2.1 Relations constitutives

Une description des phénomènes électromagnétiques peut être effectuée à l'aide de l'induction magnétique $\vec{B}$, l'excitation magnétique (ou champ magnétique) $\vec{H}$, l'induction électrique $\vec{D}$, et du champ électrique $\vec{E}$.

Ces vecteurs sont liés entre eux par des équations aux dérivées partielles : les équations de Maxwell, et dépendent du milieu matériel dans lequel se trouve le champ électromagnétique. Le milieu est caractérisé par sa perméabilité, sa permittivité ainsi que sa conductivité.

On a alors les relations :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (\text{II.1})$$

$$\vec{J} = \gamma \vec{E} \quad (\text{II.2})$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (\text{II.3})$$

Avec

$\vec{J}_c$ étant la densité du courant de conduction $\iint_s \vec{J}_c \cdot d\vec{S}$ tel que I_c est le courant de conduction

γ : la conductivité du matériau.

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m : la perméabilité du vide ; μ_r : la perméabilité relative du matériau ;

$\epsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12}$ F/m : la permittivité du vide ; ϵ_r : la permittivité relative du matériau.

- **Permittivité et champ électrique**

Le rapport entre l'induction électrique $\vec{D}$ et le champ $\vec{E}$, illustré par la permittivité absolue $\epsilon_0 \epsilon_r$ (équation II.1), est lié à la **polarisabilité** du milieu. Celle-ci est associée aux charges dites 'liées', parce qu'elles sont rattachées à la molécule polarisée, par opposition aux charges dites 'libres' qui se déplacent dans le matériau.

Ainsi, la polarisation d'un milieu assure la création d'un champ local (moment dipolaire) au niveau moléculaire qui se superpose au champ extérieur.

Si on prend, par exemple, le cas simple d'un condensateur plan possédant une charge Q et $-Q$ sur chacune des armatures (Figure II.1), la polarisation se manifeste par une diminution du champ global qui existait avant l'introduction du matériau. Cette diminution, due au champ 'dépolarisant' du matériau, conduit à une diminution de la différence de potentiel ΔV inter armatures ($\Delta V = Ed$, d étant la distance inter armatures).

Ceci a pour conséquence une augmentation de la capacité $C = Q / \Delta V$ du condensateur.

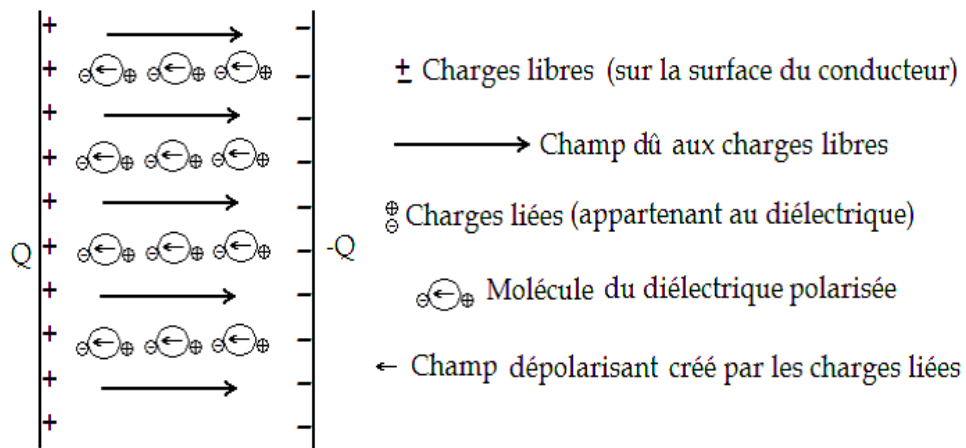


Figure II.1 : déplacement des charges libres dans un condensateur plan

Il s'agit, dans cet exemple, d'une situation où la charge Q déposée sur l'armature métallique est constante.

On peut imaginer (c'est peut être un peu plus courant), que ce soit la tension ΔV qui soit maintenue constante grâce à une source de tension. Puisque la tension est imposée, le champ résultant l'est aussi : cela se traduit par un apport plus important de charges fournies par la source sur la surface du conducteur lors de l'introduction du diélectrique :

on voit bien que, dans ces conditions, la capacité est augmentée puisque ΔV reste constant tandis que Q augmente.

Lorsque, pour une faible excitation, la polarisation est intense, cela signifie que la permittivité relative est élevée : cette propriété est utilisée pour réaliser, par exemple, des capacités de faible encombrement. On renforce ainsi l'énergie réactive fournie à un circuit électrique.

Notons que le champ résultant à l'intérieur du diélectrique ne donne lieu à aucune consommation active, sauf s'il existe un retard entre l'excitation extérieure et la réponse illustrée par $\vec{D}$. La fréquence joue donc un rôle dans le comportement du matériau lorsque le champ est alternatif, car elle peut conduire à un échauffement.

Par ailleurs, il faut bien faire la distinction entre les deux phénomènes de **polarisation**, associée à la permittivité, et d'**ionisation** associée aux charges '**libres**' et à la conductivité. Ainsi, si les charges restent toujours liées à la molécule, on parle d'un courant de **déplacement** ($\partial D / \partial t$). Au contraire, si les charges sont libres de se déplacer et sont dissociées de la molécule, il s'agit d'un phénomène de conduction (équation II.2).

D'une manière générale, la permittivité relative des isolants (tableau II.1) ne dépasse pas la dizaine d'unités, excepté pour les matériaux ferroélectriques, qui possèdent des analogies remarquables avec les matériaux ferromagnétiques.

Matériau	Air	Téflon	Huile	Nylon	Porcelaine	Mica	Verre
Permittivité relative	1.006	2.1	2.4	3.5	6.0	6.0	5 à 10

Tableau II.1 : permittivité relative des isolants.

- **Conductivité et champ électrique**

La relation entre la conductivité et le champ électrique peut être donnée par l'équation (II.2). Par définition, un conducteur contient une grande quantité de charges dites '**libres**'. Ces charges sont constituées d'électrons qui, par leur faible couplage aux atomes auxquels ils appartiennent, peuvent passer d'atomes en atomes. Cependant, les charges responsables du phénomène de

Chapitre II Equation de base l'électromagnétisme appliquées sur l'isolateur de HT

conduction dans un matériau quelconque, ne sont pas forcément des électrons. Ainsi, les porteurs de charges peuvent être aussi des anions ou des cations. De plus, l'application d'un

champ très élevé peut conduire à l'ionisation des molécules, qui renforce le flux de porteurs de charges, et par la même la conductivité.

Notons que, même les isolants (ou diélectriques) les plus parfaits, possèdent toujours une conductivité résiduelle plus ou moins élevée, suivant la composition, la pureté ou les conditions d'application du champ extérieur. En courant continu, un échauffement est alors observé. En courant alternatif, un autre phénomène d'échauffement (autre que le phénomène de conduction) peut avoir lieu, et qui est dû à l'hystérésis électrique.

II.2.2 Équations de Maxwell

Il s'agit des équations fondamentales pour tout électrotechnicien. Appliquées sous leur forme locale, elles conduisent le plus souvent à des équations différentielles qui, une fois résolues, permettent de connaître le champ électromagnétique en tout point de l'espace. Heureusement, on peut les utiliser sous leur forme intégrale, dans de nombreux cas pratiques, quand la simplicité du circuit le permet.

On rappelle les quatre équations de Maxwell :

	Forme locale	forme intégrale	
Théorème d'Ampère-rot	$\vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint_c \vec{H} d\vec{l} = \sum_{i=0}^n I_i$	(II.4)

Théorème de conservation du flux	$\text{div} \vec{B} = 0$	$\oiint_s \vec{B} d\vec{s} = 0$	(II.5)
----------------------------------	--------------------------	---------------------------------	--------

Loi de Lenz	$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\mathcal{E} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$	(II.6)
-------------	---	---	--------

Avec $\Phi = \oiint_s \vec{B} d\vec{s}$; $\mathcal{E}$ = Fem induite

Théorème de Gauss	$\text{div} \vec{D} = \rho_{\text{libre}}$	$\oiint_s \vec{D} d\vec{s} = Q_{\text{int}}$	(II.7)
-------------------	--	--	--------

$$\text{Avec } Q = \iiint_{\tau} \rho_{\text{liber}} d\tau = \text{charge}$$

On remarque dans la première équation de Maxwell l'existence de deux 'sortes' de courants :

$\vec{J}_c$ et $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ Ceux-ci représentent respectivement les courants de conduction ($\vec{J}_c = \gamma \vec{E}$) et le

$$\text{courant de déplacement} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

La somme des deux courants $\vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ constitue le courant total $\vec{J}_t$.

Dans le cas où on a affaire à des conducteurs alimentés à des fréquences basses (par exemple, à la fréquence industrielle de 50 Hz), un simple calcul permet de montrer que le courant de conduction est très nettement supérieur au courant de déplacement et le terme $\partial \vec{D} / \partial t$ peut être négligé.

Par contre, dans le cas des **diélectriques**, c'est la conductivité qui devient négligeable, on alors affaire à un courant de déplacement.

Dans la plupart des situations, il est toujours possible de négliger un terme par rapport à l'autre selon le milieu ou le régime fréquentiel dans lequel on est : il ne faut cependant oublier que, dans les cas des fréquences très élevées, les deux courants peuvent coexister si par exemple, le produit $\omega \epsilon$ devient assez élevé pour être du même ordre de grandeur que la conductivité γ

II.2.3 Équations de Laplace et de Poisson

Il peut être intéressant de définir d'autres grandeurs électriques liées au champ électromagnétique pour, d'une part, simplifier les calculs associés à des résolutions vectorielles, et, également pour illustrer les propriétés remarquables de certaines configurations.

Pour cela, on introduit la notion de potentiel scalaire V pour le champ électrique.

En appliquant les équations de Maxwell au domaine quasi stationnaires, on peut considérer

que $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$, et on a donc: $(\text{rot}) (\vec{E}) = 0$. Or, on sait que le rotationnel d'un gradient est toujours

nul ($\overrightarrow{rot}(\overrightarrow{grad} V) = 0$) : on peut alors définir un potentiel V comme étant un scalaire satisfaisant la relation :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad} (V) \quad (II.8)$$

En utilisant le théorème de gauss, on obtient :

$$\text{div} \epsilon \vec{E} = -\epsilon \text{div}(\overrightarrow{grad} (V)) = -\epsilon \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} V = \rho \text{ ce qui nous donne } \Delta V = -\frac{\rho_{\text{libre}}}{\epsilon}$$

Cette dernière équation représente l'équation de Poisson.

En l'absence de charges, on aura l'équation de Laplace :

$$\Delta V = 0 \quad (II.9)$$

II.3 Conditions aux limites à la surface de séparation de deux milieux

Les équations de Maxwell permettent de déterminer la manière dont les champs se conservent (ou non) à l'interface de 2 milieux présentant des propriétés diélectriques ou magnétiques différentes. Il est alors d'usage de décomposer le champ électrique (ou magnétique) en deux composantes particulières : l'une tangente à la surface de séparation et l'autre normale à cette même surface.

Ce procédé a permis de dégager des résultats importants à propos des conditions aux limites à la surface de séparation des deux milieux. Ces résultats concernent les composantes tangentielles et normales, à la surface de séparation du champ électromagnétique.

II.3.1 Composantes normales

Pour établir les conditions sur les composantes normales, on peut considérer un cylindre circulaire droit, fermé, et de petites dimensions. Une partie du cylindre, de surface de base S est plongée dans le milieu 1, et l'autre dans le milieu 2 (Figure II.2).

Les dimensions sont choisies de manière à considérer la hauteur δh du cylindre très petite devant le rayon du cercle de base.

On peut alors estimer que, s'il existe des charges à l'intérieur du cylindre de volume τ ,

elles peuvent être considérées comme étant des charges superficielles. La charge intérieure peut alors s'exprimer comme :

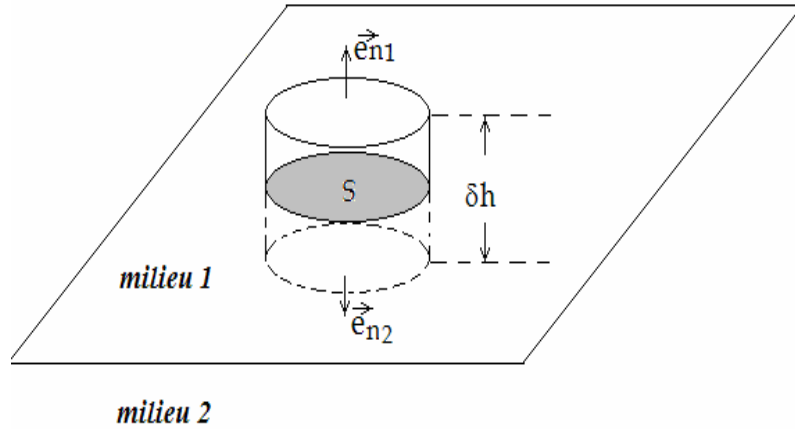


Figure II.2 : Cylindre plongé dans deux milieux

$$Q_{int} = \iiint_{\tau} \rho d\tau = \iint_S \rho \delta h dS = \iint_S \sigma_s ds \quad (II.10)$$

ρ Étant la densité volumique de charge.

La quantité $\sigma_s = \rho \delta h$ est alors définie comme étant la **densité superficielle** de charge.

En appliquant à la surface cylindrique fermée le théorème de gauss, on peut établir, compte tenu de la très faible dimension de la hauteur (la surface latérale est négligée) la relation :

$$D_{n1} - D_{n2} = \sigma_s \quad (II.11)$$

Cette dernière relation exprime la **discontinuité** de la composante normale de l'induction électrique $\vec{D}$, si la densité surfacique de charge σ_s est non nulle, à la surface de séparation des deux milieux.

La distribution réelle de charges est volumique. Si, l'épaisseur de la distribution δh est suffisamment faible pour être négligée, on parle alors d'une distribution surfacique.

II.3.2 Composantes tangentielles

Pour établir les conditions sur les composantes tangentielles, on considère un contour fermé, rectangulaire et de très petites dimensions, une partie du contour est plongée dans le milieu 1, et l'autre dans le milieu 2 (Figure II.3)

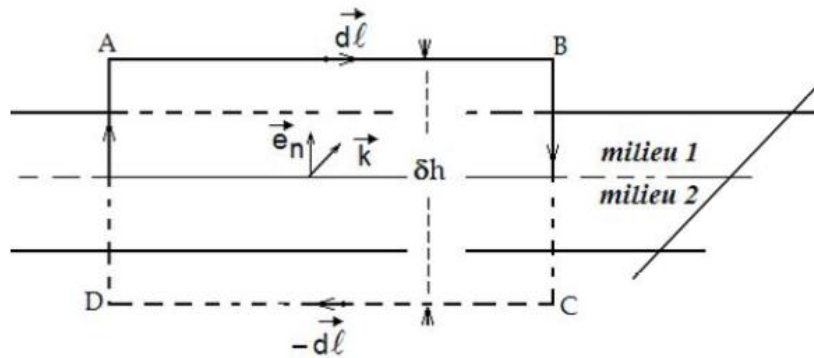


Figure II.3 : Contour d'intégration

Les dimensions sont choisies de manière à considérer que la largeur $\delta h = AD = BC$ du rectangle est infiniment petite devant sa longueur $L = AB = CD$.

Si, on applique alors au contour fermé la loi de Lenz ($\oint_{ABCD} \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = 0$), on peut établir les relations de passage d'un milieu à un autre pour le champ électrique, à savoir :

$$\vec{E}_{t1} - \vec{E}_{t2} = 0 \quad (\text{II.12})$$

Ce qui montre que la composante tangentielle du champ électrique $\vec{E}$ est **toujours** conservée à la surface de séparation des deux milieux.

II.3.3 Équations aux potentiels

Il peut être utile d'établir les équations aux potentiels pour résoudre les problèmes comprenant plusieurs milieux. Même si les potentiels sont toujours déterminés à une constante près, il est bon de rappeler qu'il y a toujours continuité des potentiels. On peut donc aboutir à une ou plusieurs équations supplémentaires permettant de résoudre un problème d'électrostatique.

II.4 Cas d'un champ sinusoïdal

II.4.1 Permittivité complexe

Quand on applique une tension sinusoïdale d'une pulsation ω à un condensateur constitué d'un diélectrique autre que le vide, on observe un dégagement de chaleur qui se superpose à l'effet Joule et qui constitue les pertes diélectriques.

Ces pertes sont dues aux phénomènes de relaxation qui conduisent à un retard de l'induction électrique $\vec{D}$ sur l'excitation. Dans le cas d'une excitation sinusoïdale, les vecteurs excitation et induction ne sont donc plus en phase, on aura donc :

$$\begin{cases} E(t) = E_{eff} \sqrt{2} \cos(\omega t - \varphi) & (II.13) \end{cases}$$

$$\begin{cases} D(t) = \varepsilon E_{eff} \sqrt{2} \cos(\omega t - \varphi - \delta) & (II.14) \end{cases}$$

L'angle δ exprime alors le retard de l'induction sur l'excitation.

Si, on développe ces grandeurs sous leur forme complexe, on aura :

$$\vec{E} = E_{eff} e^{-j\varphi} \quad (II.15)$$

$$\vec{D} = \varepsilon E_{eff} e^{-j\varphi} e^{-j\delta} \quad (II.16)$$

Si, on effectue le rapport des deux vecteurs, on obtient une permittivité complexes $\bar{\varepsilon}$ donnée par:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\vec{D}}{\vec{E}} = \frac{\varepsilon \cdot E \cdot e^{-j\varphi} \cdot e^{-j\delta}}{E_{eff} \cdot e^{-j\varphi}} = \varepsilon \cdot e^{-j\delta} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (II.17)$$

avec $\varepsilon' = \varepsilon \cos \delta$, $\varepsilon'' = \varepsilon \sin \delta$

Il est à noter qu'à partir de ε' et ε'' , on peut établir la relation : $\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$. Il s'agit de. Il s'agit de l'angle de pertes diélectriques.

II.5 Cas des isolateurs de Haute Tension

L'isolateur est constitué principalement d'un matériau isolant solide ; son identification passe par la connaissance de ses caractéristiques électriques, en particulier son impédance et donc sa capacité, en présence ou non d'agents polluants sur sa surface. Il s'agit alors d'une impédance (capacité) 'vue' de deux électrodes, dont la dimension et la disposition sur l'isolateur influe sur l'impédance (capacité) apparente. Celle-ci est liée aux lignes de champ imposées par l'ensemble du dispositif conducteur -isolant. Par ailleurs, si l'isolant présente une conductivité résiduelle, on peut établir le lien entre la capacité et la résistance présentées.

Chapitre II Equation de base l'électromagnétisme appliquées sur l'isolateur de HT

Ce paragraphe aborde les relations fondamentales entre les charges induites sur les conducteurs (électrodes) et la capacité d'un isolant. Dans les systèmes aussi complexes que ceux que l'on rencontre dans les isolateurs HT, ces notions de bases sont généralement appliquées, à partir de logiciels de calcul de champ, pour établir par simulation les contraintes propres d'un tel isolant.

II.5.1 Notions fondamentales

II.5.1.1 Relation entre charges et capacités

Soit un conducteur à l'équilibre électrostatique (Figure I.4), isolé dans l'espace, chargé avec une distribution surfacique σ et porté au potentiel V . Celui-ci s'écrit :

$$V(M) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint_{\text{surface}} \frac{\sigma(P)ds}{PM} \quad (II.18)$$

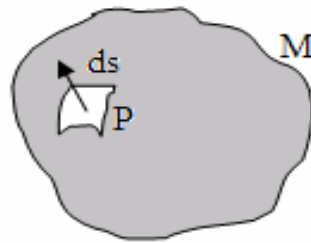


Figure II.4 : Conducteur en équilibre électrostatique

Par ailleurs, la charge électrique totale portée par ce conducteur est donnée par :

$$Q = \iint_{\text{surface}} \sigma dS \quad (II.19)$$

Si, on multiplie la densité surfacique par un coefficient constant a , on obtient une nouvelle charge totale $Q'=aQ$ et un nouveau potentiel $V'=aV$. On a ainsi un nouvel état d'équilibre électrostatique, parfaitement défini. On voit donc que, quoi qu'on fasse, tout état d'équilibre d'un conducteur isolé (caractérisé par Q et V) est tel que le rapport Q/V reste constant, (cela résulte de la linéarité de Q et V en fonction de σ); d'où la notion de la capacité électrostatique.

La capacité électrostatique d'un conducteur à l'équilibre est définie par :

$$C = \frac{Q}{V} \quad (II.20)$$

où Q est la charge électrique totale du conducteur porté au potentiel V .

Dans le domaine des isolateurs HT, la capacité calculée entre l'électrode de Terre et celle de HT est complexe. C'est pourquoi, les méthodes analytiques habituellement utilisées pour les condensateurs classiques ne peuvent plus être appliquées. Il est alors d'usage de passer par des méthodes numériques de calcul de champ, pour ensuite, identifier l'isolant à travers sa capacité. Celle-ci peut être ainsi calculée dans le domaine de l'électrostatique, puis utilisée en régime quasi stationnaire ($f=50$ Hz).

Théoriquement, la capacité ne dépend que des caractéristiques géométriques et du matériau diélectrique. Pratiquement, dans le domaine des tensions élevées, la capacité peut changer du fait d'un changement des caractéristiques du milieu diélectrique et ce, en raison des fortes contraintes électriques imposées.

II.5.1.2 Relation entre résistance et capacité pour un même réseau de lignes de champ

La figure (II.5) illustre le cas d'un isolant placé entre deux surfaces conductrices de section S_1 et S_2 . Celles-ci sont donc des surfaces équipotentielles et les points A_1 et A_2 , appartenant à ces surfaces, peuvent être pris de manière tout à fait arbitraire.

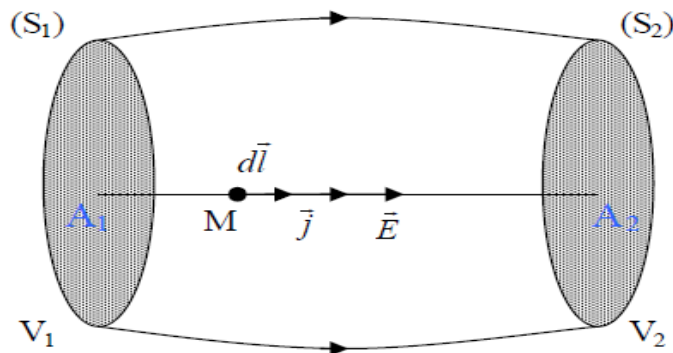


Figure II.5 : un diélectrique placé entre deux armatures

Si, l'isolant possède une conductivité γ et une permittivité ϵ , on peut établir une relation simple entre la capacité présentée et la résistance. En effet, on peut exprimer la différence de potentiel ΔV comme :

$$\Delta V = \int_{A_1}^{A_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (II.21)$$

Par ailleurs, la charge Q induite sur la surface S_1 , si on considère qu'elle possède la densité surfacique σ_1 , s'écrit :

$$Q = \iint_{S_1} \sigma_1 ds \quad (II.22)$$

Comme la densité de surface est égale à la composante normale de l'induction, on peut aussi exprimer la charge par :

$$Q = \iint_{S_1} \vec{D}_1 d\vec{s} = \varepsilon \iint_{S_1} \vec{E}_1 d\vec{s} \quad (II.23)$$

En outre, le courant de conduction s'écrit:

$$I = \iint_{S_1} \vec{J}_c d\vec{s} = \gamma \iint_{S_1} \vec{E}_1 d\vec{s} \quad (II.24)$$

On peut donc exprimer respectivement la résistance et la capacité par :

$$R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{\int_{A_1}^{A_2} \vec{E} dI}{\gamma \iint_{S_1} \vec{E}_1 d\vec{s}} \quad (II.25)$$

et

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\varepsilon \iint_{S_1} \vec{E}_1 d\vec{s}}{\int_{A_1}^{A_2} \vec{E} dI} \quad (II.26)$$

On obtient, si on effectue le produit RC :

$$RC = \frac{Q}{I} = \frac{\varepsilon}{\gamma} = \rho \varepsilon \quad (II.27)$$

$\rho = \frac{1}{\gamma}$ étant la résistivité du matériau.

Le produit RC peut être étendu à toutes les structures (condensateur ou résistance) présentant le même réseau de lignes de champ électrique.

On peut ainsi expliciter sans difficulté la résistance de fuite entre deux fils conducteurs parallèles, ou entre un fil et le sol.

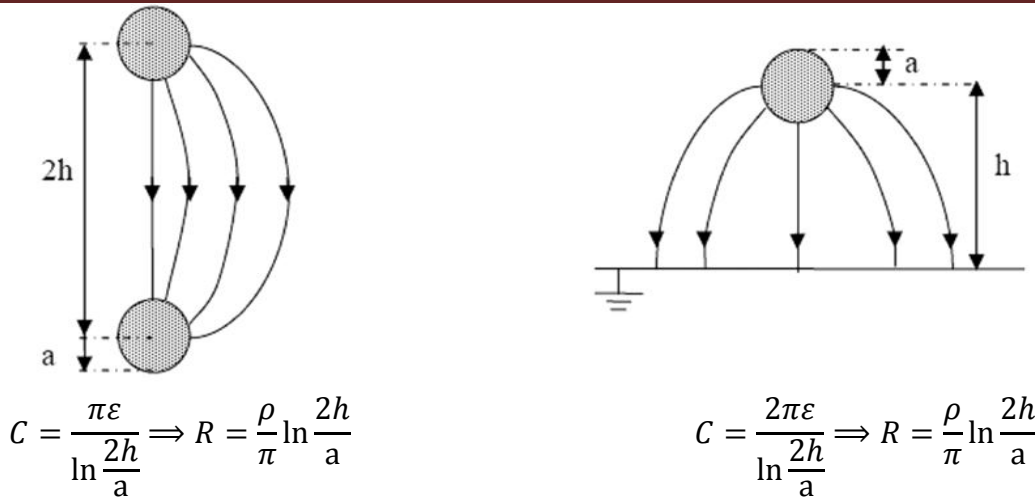


Figure II.6 : Relation entre capacité et résistance pour des modèles simples

II.6 Méthodes de calcul du champ et du potentiel électriques

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

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

Les méthodes numériques les plus connues et les plus utilisées dans ce type de problème sont donc la Méthode des Différences Finies (M.D.F), la Méthode des Éléments Finis (M.E.F), la Méthode des Charges équivalentes (M.C.E) et la Méthode des Éléments Finis de Frontière (M.E.F.F). Ces méthodes sont basées sur la résolution de l'équation de Laplace en imposant les conditions aux frontières adaptées à chaque problème.

II.6.1 Méthode des différences finies

L'idée principale de la M.D.F 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 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.

Cette méthode nécessite la connaissance du potentiel, sur toute la frontière entourant le domaine étudié. Elle devient difficilement applicable, lorsque la géométrie est de frontière courbe, car le schéma ne peut s'appliquer près des frontières irrégulières.

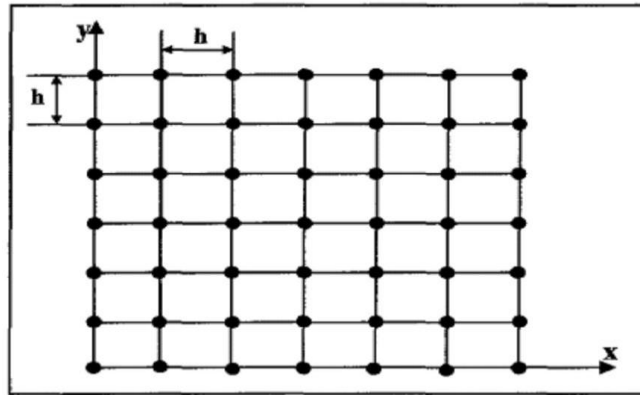


Figure II.7 : Maillage rectangulaire

II.6.2 Méthode des charges équivalentes

La méthode utilisant des charges équivalentes consiste à chercher une distribution de charges discrètes, à valeurs complexes inconnues, dont le type et la position sont choisis. Pour un ensemble de charges $Q(j)$ donné, les expressions du potentiel et du champ en un point i sont données

respectivement par :

$$\left. \begin{aligned} V_i &= \sum_j P(i,j) Q(j) \\ E_i &= \sum_j F(i,j) Q(j) \end{aligned} \right\} \quad (II.28)$$

Où $P(i,j)$ et $F(i,j)$ sont des coefficients qui dépendent du type de charge et de la distance entre les points i et j . Les $Q(j)$ peuvent être des charges ponctuelles, des densités linéiques de charges réparties sur des segments de droite ou des anneaux.

II.6.3 Méthode des éléments finis de frontières

Quelle soit directe ou indirecte, la méthode des éléments de frontières consiste à résoudre le problème aux frontières des différents milieux. Pour la méthode directe, on travaille directement avec le potentiel et le champ, alors que pour celle indirecte, on travaille avec les charges. Après détermination de celles-ci, on calcule les valeurs du potentiel et du champ.

II.6.4 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis, outil numérique très puissant, est très utilisée dans la résolution des problèmes à domaine spatial fini [22]. Le principe de cette méthode consiste à diviser le domaine d'étude en plusieurs éléments finis. C'est une étape très importante, puisque

le choix de la forme des éléments de maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus.

Il existe un grand nombre de formes géométriques pour les éléments de maillage tels que :

- Triangulaires, rectangulaires, quadrilatérale arbitraires pour les problèmes à deux dimensions ;
- Tétraédrales, hexaédrales et sous formes de prismes pour des problèmes à trois dimensions [22].

La méthode des éléments finis est flexible, car elle s'adapte facilement aux différentes géométries et tient compte aussi des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux. Dans le calcul du champ électrique présentant un domaine spatial infini, l'établissement de la frontière artificielle peut causer certaines difficultés dans la réalisation d'un programme simple. D'une part, celle-ci doit être beaucoup plus vaste que le domaine d'étude, ce qui engendre un temps de calcul (notamment pour le maillage) beaucoup plus important que pour des domaines finis. D'autre part, le choix de cette frontière a une grande importance dans la précision des calculs, et son influence sur celle-ci doit être prise en compte dans tout programme de ce type.

Dans le calcul de la capacité d'un système, Andersen [23] utilise une méthode hybride utilisant à la fois les éléments finis et les réseaux de capacités et de résistances. Cet auteur part des deux constatations suivantes :

- la minimisation de l'énergie électrostatique conduit à une relation linéaire entre la valeur du potentiel d'un nœud donné et celles des autres nœuds qui l'entourent :

$$V_0 = \sum_{i=1}^n V_i \quad (II.29)$$

Si, on remplace l'élément de maillage triangulaire (Figure II.8(a)) par un réseau de capacités (Figure II.8.b) et si, on utilise la loi de Kirchhoff (la somme algébrique des intensités des courants qui passent par un nœud est nulle), on obtient une autre relation linéaire liant la valeur du potentiel au nœud 0 et celles de ces voisins immédiats

$$j \omega \sum_{i=1}^6 (V_n - V_0) C_n = 0 \quad (II.30)$$

où C_n est la capacité qui lie le nœud 0 au nœud n. Ce qui donne par identification :

$$C_n = K_n \sum_{i=1}^6 C_i \quad (II.31)$$

Pour trouver la somme des capacités, on met un potentiel fictif de 1 V au nœud o et 0V aux nœuds voisins. En calculant l'énergie emmagasinée dans les six triangles (d'épaisseur égale à l'unité pour les géométries planes et sur un angle de 1 radian pour les géométries axisymétriques) et en l'égalisant avec la somme d'énergie emmagasinée dans les six capacités, on obtient la somme des six capacités. L'utilisation de l'équation (II.31) donne la valeur de chaque capacité.

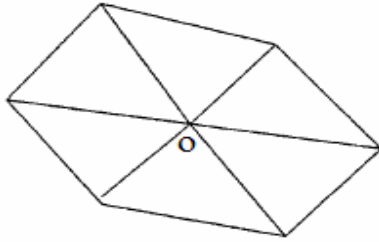


Figure II.8.a : Maillage utilisé

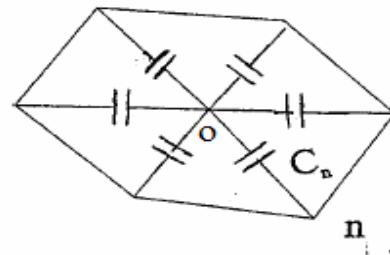


Figure II.8.b : Réseau de capacités

II.7 Conclusion

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

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

Nous avons aussi établi qu'en régime sinusoïdal la permittivité d'un diélectrique peut être complexe. L'existence d'une partie imaginaire de la permittivité s'accompagne par une dissipation d'énergie, appelée pertes diélectriques.

Vu la complexité de calcul du champ et du potentiel électriques sur la surface des isolants possédant des formes irrégulières et complexes, par les méthodes analytiques, il est fait recours à des méthodes numériques. Ils sont essentiellement de type différences finies, éléments finis, charges équivalentes et éléments finis de frontières.

Chapitre III

simulation et calcul de la capacité
équivalente d'une chaîne isolateur

III.1 Introduction

Nous sommes intéressés Dans ce dernier chapitre à la détermination des répartitions du potentiel et du champ électriques le long des isolateurs 1512L. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel Multiphysics COMSOL 4.2.

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

III.2 Simulation

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.

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 polluée.

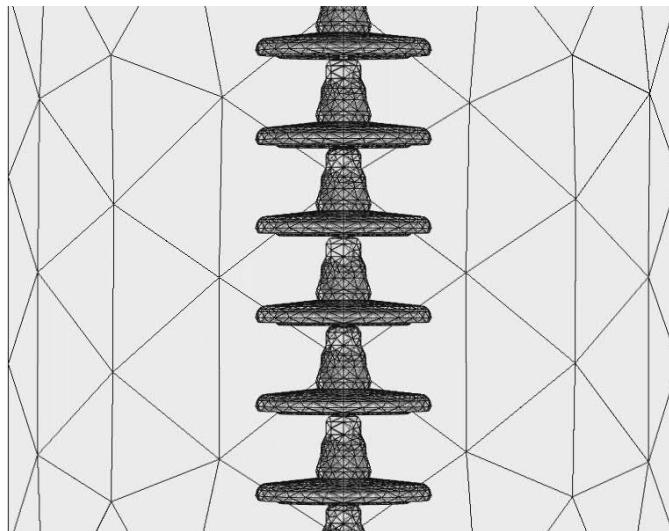
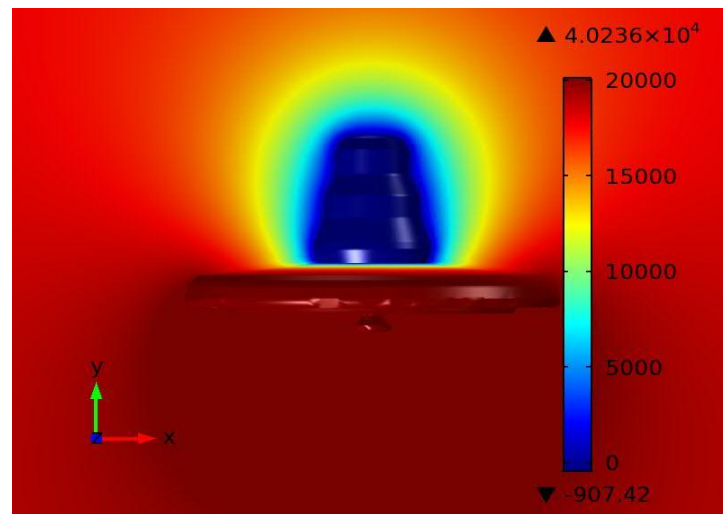
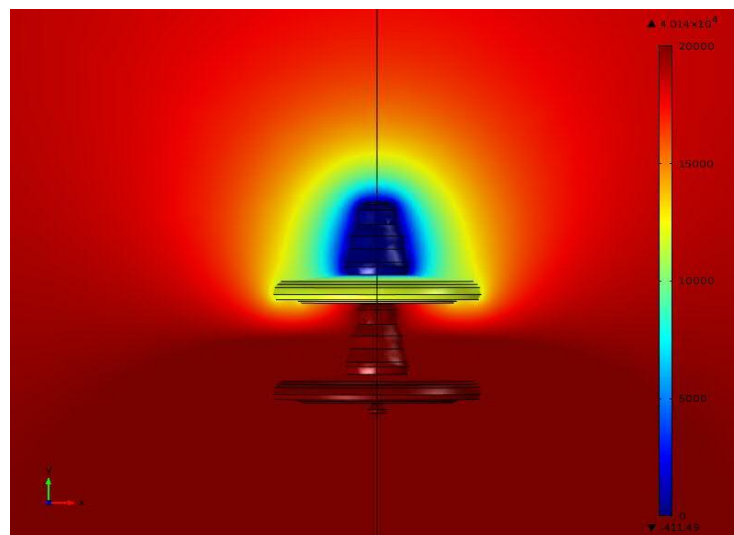


Figure III.1 : Discrétisation en éléments finis de la chaîne 1512L

III.3 Distribution de potentiel (cas 40kv)



1 seul élément



2 élément

Figure III.2 : Distribution du potentiel en fonction de la tension de la ligne

III.4 La repartition du potentiel

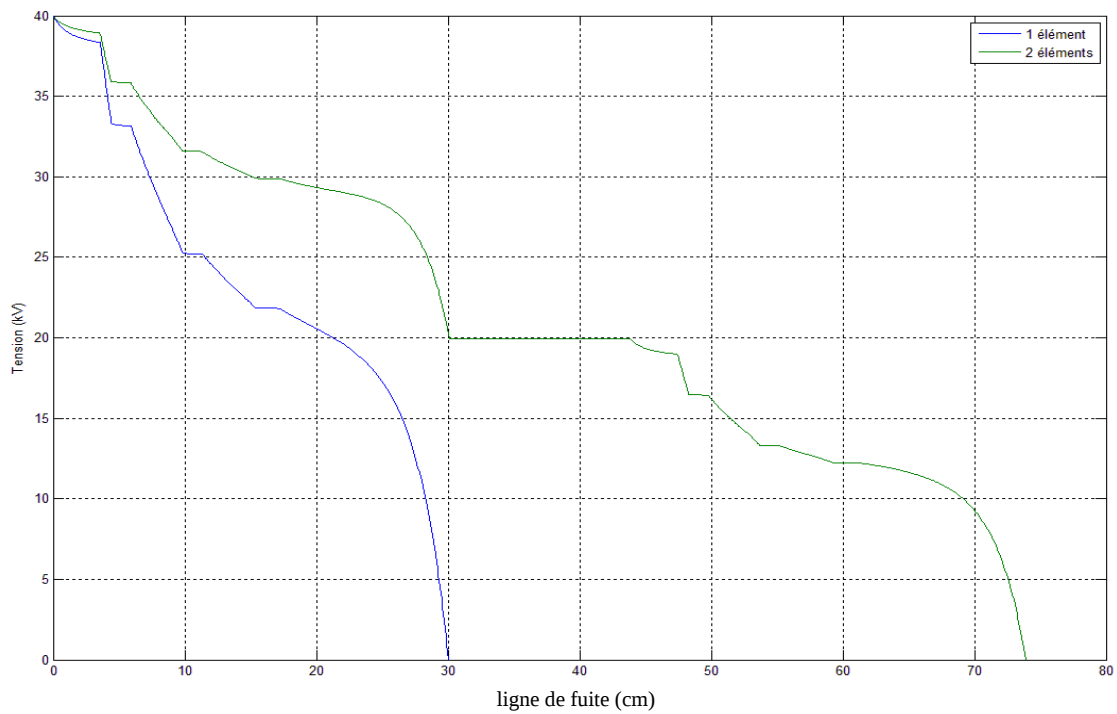
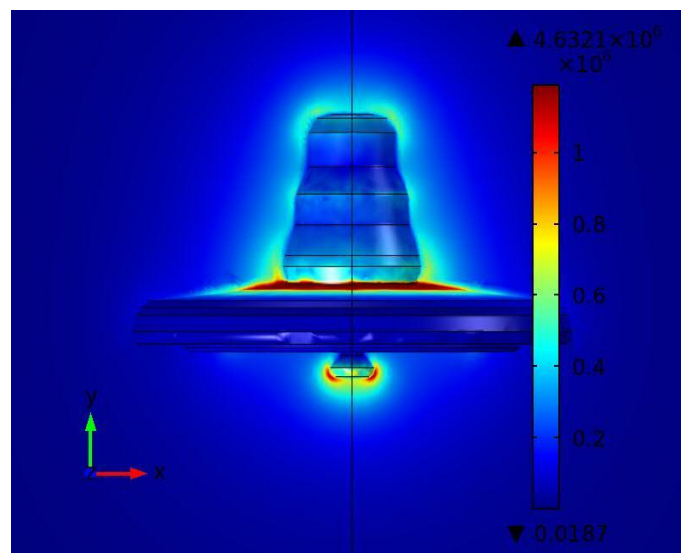
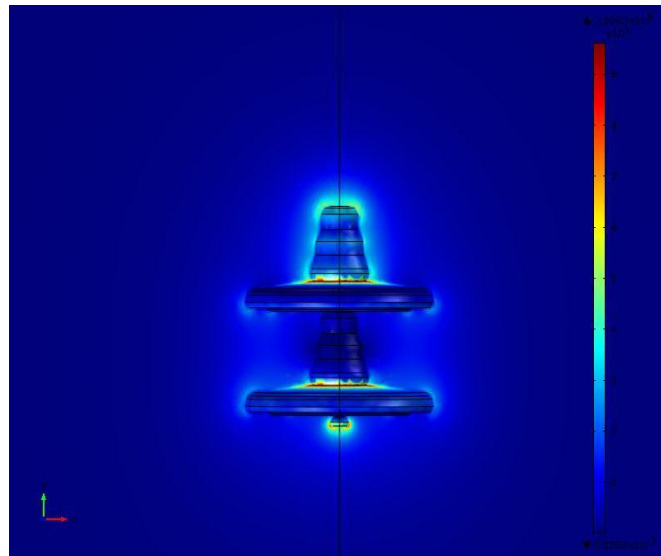


Figure III.3 : Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne

III.5 Distribution du champ électrique (cas 40kv)



1 seul élément



2 élément

Figure III.4 : Distribution du champ électrique en fonction de la tension de la ligne.

III.6 Répartition du champ électrique

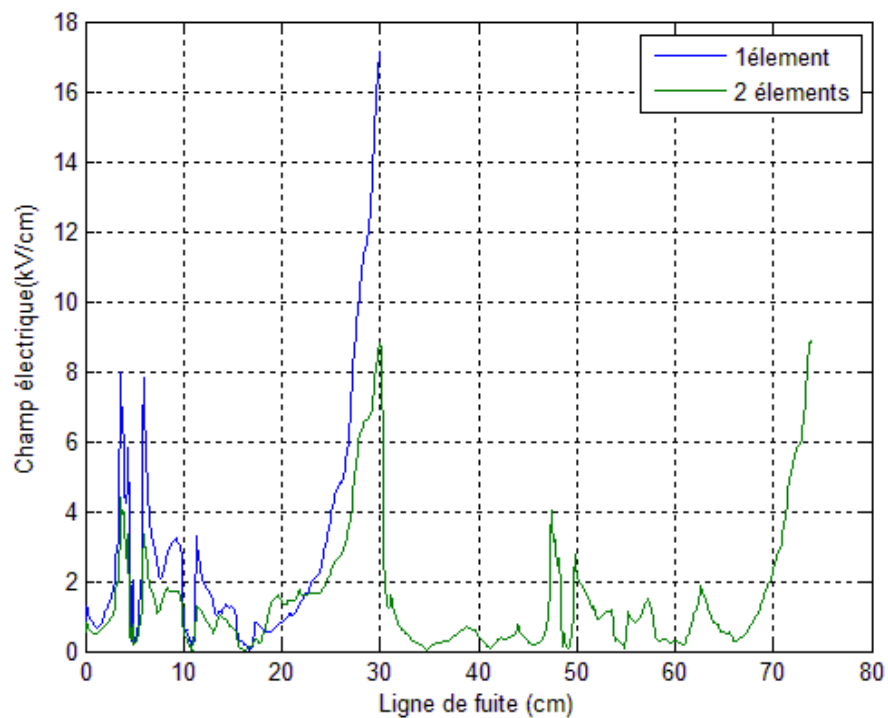


Figure III.5 : Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs.

III.7 Calculé de capacité d'isolateur

III.7.1 cas d'un seul élément

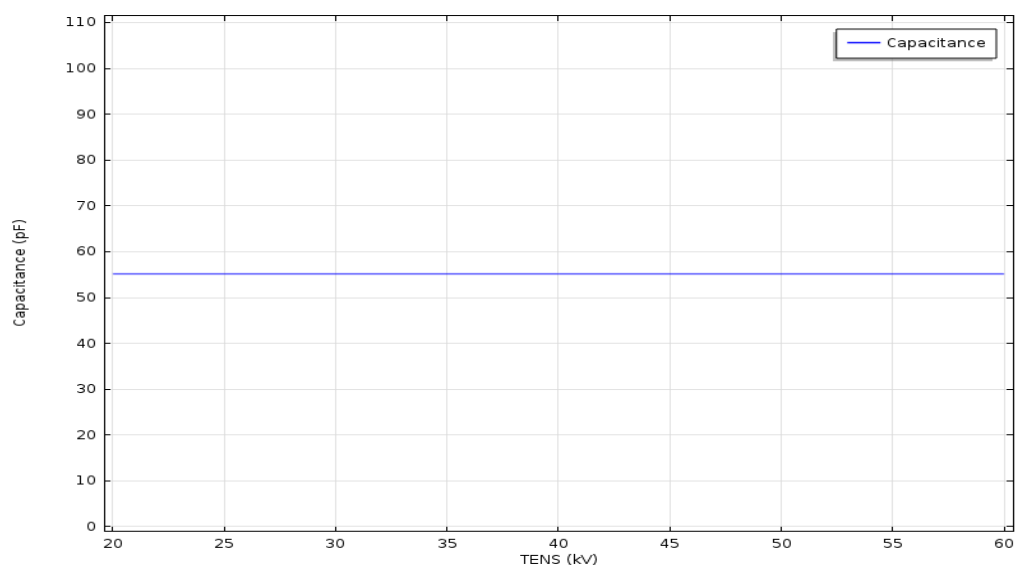


Figure III .6 : la variation de la capacité équivalent en fonction de la tension applique pour un seul élément

$$C = 55.1610 \text{ pF}$$

III.7.2 Cas d'un chaîne d'isolateurs (2element)

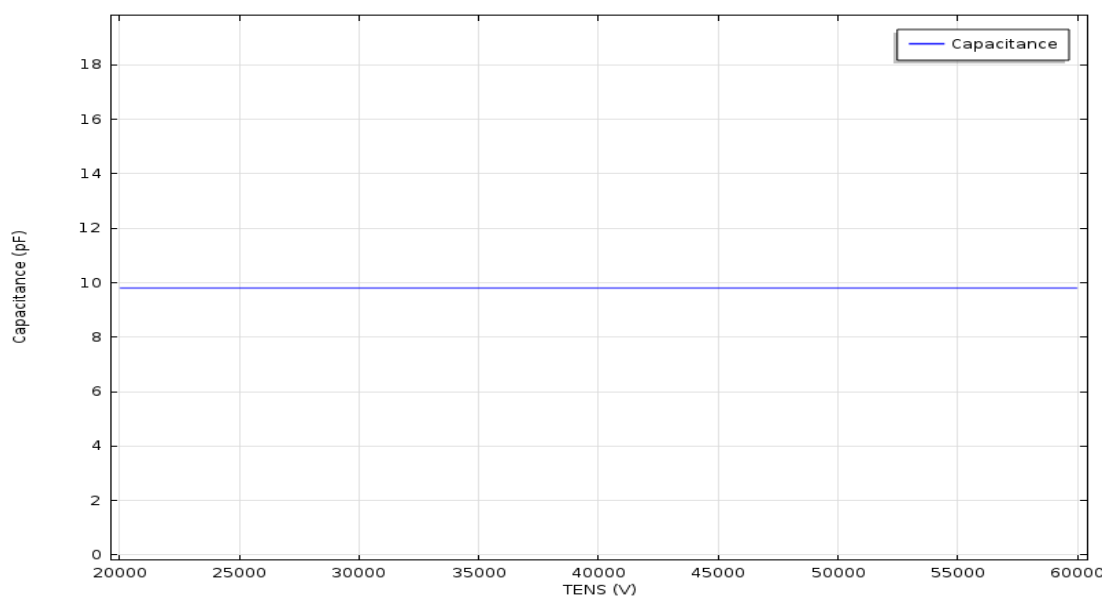


Figure III .7: la variation de la capacité équivalente en fonction de la tension applique pour deux éléments

$$C = 9.8060\text{pF}$$

III.7.3 L'effet de nombre d'élément

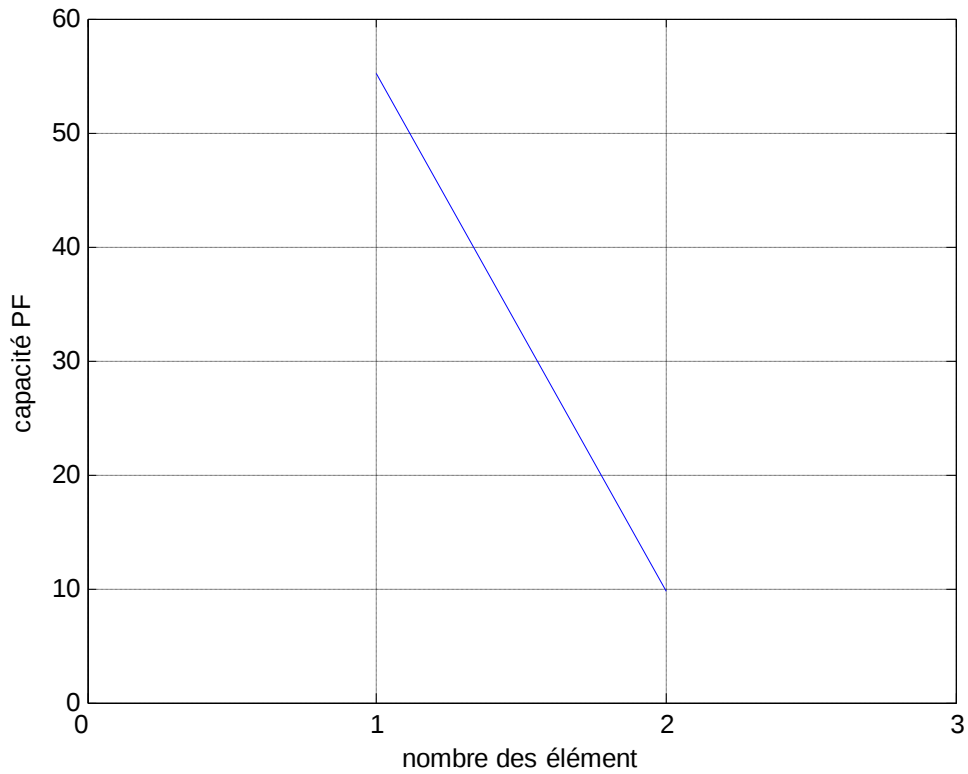


Figure III .8 : la variation de la capacité équivalente en fonction de nombre des élément

III.8 Conclusion

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, la tension de la ligne et le nombre d'isolateurs. Comme principaux résultats, nous pouvons dire que la l'état de surface de l'isolateur influe sur la répartition du champ électrique. 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/m). 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.

la capacité équivalente calculé a l'aide du COMSOL d'un seul élément est 55.1611pF par contre elle diminue pour deux éléments 9.806pF qu'il nous donne une bonne approximation par ce que la valeur d'impédance équivalente augmente avec le nombre des éléments.

Conclusion générale

Conclusion générale

Une ligne aérienne est constituée d'un agencement judicieux de matériaux conducteurs qui servent à transporter l'énergie électrique là où elle doit être utilisée et de matériaux isolants qui permettent d'empêcher celle-ci de se perdre en empruntant le plus court chemin d'un potentiel à un autre. Outre leur fonction première qui est de s'opposer au passage du courant, les isolateurs ont également le rôle de maintenir mécaniquement les conducteurs dans des conditions prédéterminées.

Cependant, la pollution se présente comme un ensemble de facteurs, tout aussi complexes les uns que les autres et pouvant provoquer par leurs actions communes de nombreuses perturbations dans le fonctionnement des réseaux électriques. Par conséquent, un bon dimensionnement des isolateurs dans les lignes de haute tension ne se fera qu'en tenant compte du facteur de pollution.

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

Nous avons introduit différentes relations de l'électromagnétisme caractérisant le comportement électrique des matériaux diélectriques.

Nous avons aussi établi qu'en régime sinusoïdal la permittivité d'un diélectrique peut être complexe. L'existence d'une partie imaginaire de la permittivité s'accompagne par une dissipation d'énergie, appelée pertes diélectriques.

Vu la complexité de calcul du champ et du potentiel électriques sur la surface des isolants possédant des formes irrégulières et complexes, par les méthodes analytiques, il est fait recours à des méthodes numériques. Ils sont essentiellement de type différences finies, éléments finis, charges équivalentes et éléments finis de frontières.

à partir de la simulation nous avons conclu que la distribution du potentiel le long d'une chaîne d'isolateurs est pratiquement identique à chaque élément de la chaîne, 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/m). 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 capacité équivalente calculé d'un seul élément est 55.1611pF et pour deux éléments 9.806pF qui implique l'augmentation d'impédance équivalente avec le nombre des éléments.

Bibliographie

Références Bibliographiques

- [1] **A.Tilmatine** " Isolateurs des lignes aérienne haute tension " juin 2002 .
- [2] **M.teguer** "comportement d'un isolateur de haute tension sous tension alternative 50Hz"
Hese de dectorot, 2003 ENP , Algeries
- [3] **D. Dumora**, " Matériaux isolants céramiques en électrotechnique", Technique de l'ingénieur D275.
- [4] **Y. Porcheron**, "Lignes aériennes : Matériels entrant dans la constitution d'une ligne aérienne", Technique de l'ingénieur D4425.
- [5] **A.Mekhaldi**, « Modèle de Contournement d'Isolateurs Pollués dans les Conditions Désertiques du Sahara Algérien », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 1990.
- [6] **G. Leroy, C. Gary**, "les propriété diélectrique de l'air et les très hautes tensions", **Eyrolles**, paris 1984.
- [7] **M. Tegar, A. Boubakeur** «Pollution des Isolateurs de Haute Tension» Laboratoire de Haute Tension, Département de Génie Electrique Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P.) janvier 2004
- [8] **D. Namane**, "Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateurs haute tension , sous la fréquence 50Hz", Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute.
- [9] **G. Riquel, E. Span genberg**, "De la céramique au synthétique", EDE-Epure, N° 58, Avril 1998.
- [10] **J. Danis**, "A Stochastic Pollution Flashover Model", 4e International Symposium on High Voltage Engineering, rapport 46-12, **Athènes**, 5-9 September 1983.
- [11] **R. Sundararajan and R. S. Gorur**, "Dynamic Arc Modelling of Pollution Flashover of Insulators under DC Voltage", IEEE Trans, on Elect. Insul., Vol. 28, pp 209-219, April 1993.
- [12] **C. H. A. Ely, P. J. Lambeth, J. S. T. Looms**, D. A. Swift, C.E.G.B "Contournement des polymères humides et pollués: l'ailette BOOSTER ", CIGRE, rapport 15 - 02, 1978.
- [13] **A. El-Arabaty, A. Nosseir, S. El-Debeiky, E. Nasser, El-Sharky**, "Choix d'Isolateurs Utilisables dans des Ambiances Polluées et Notamment dans des Régions désertiques", CIGRE, rapport 33 - 11, Paris, France,1980.

- [14] **H.P. Zhong, Xu Cheng-Dong** "Résultats d'essais et de recherches sur le dimensionnement et le contrôle de l'isolation" CIGRE, rapport 33-07, 1982.
- [15] **W. HEISE, M. P. VERMA, H. NIKLASH, H. LIPKEN, H. SCHRIEBER, G. F. LUXA**, " Critères de Contournement par Pollution et ses Applications pour le Dimensionnement et le Contrôle de l'Isolation ", CIGRE, rapport 33-09, 1978, Paris, France.
- [16] **O. Fouathia, S. Houache**, "Approche d'un isolateur de haute tension par un modèle de laboratoire", PFE, ENP Juin 1996.
- [17] **F.M. Rizk**, 'Modèles mathématiques du contournement des isolateurs sous pollution', ELECTRA N°78 Octobre 1981,p.71-103.
- [18] **P.Claverie, Y.Porcheron** "How to choose insulators for polluted areas", IEEE, Trans.PAS, Vol.92, N°3, Mai-Juin 1973, p.1121-11131
- [19] **J.P. Holtzhausen**, "The relationship between the parameters effecting the Acpollution performance of a cylindrical insulator", 9e International symposium on high voltage engineering, rapport 3233, Autriche, 28 Août -1er Septembre 1995.
- [20] **C. Huraux, A.M. Rahel**, "Le contournement des isolateurs haute tension : approche à l'aide d'un modèle de laboratoire", RGE, Juin 1975, p.425-429.
- [21] **M.N. Rayes, M. Zhirh**, "Investigation about flashover performance of insulators under uniform and non uniform contamination", 7e International symposium on high voltage.
- [22] **K.Nassour, M.Braham, M.Rahli, A.Bendaoud, M.Miloudi** "Modélisation numérique par la méthode des éléments finis de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur haute tension", Conférence Nationale sur la Haute Tension, Taghit 5-7 Novembre 2007.
- [23] **O.W.Andersen** "Finite element solution of complex potential electric fields", IEEE Trans. PAS, Vol. 96, Juillet-Aout 1977, p. 1156-1161

Listes des Acronymes et Symboles

Acronymes

H.T	Haute Tension
M.E.F	Méthode des Éléments Finis
M.E.F.F	Méthode des Éléments Finis de Frontière
M.D.F	Méthode des Différences Finies
M.C.E	Méthode des Charges équivalentes

Symboles

$^{\circ}\text{C}$: Degré celsius

ℓ : plus courte distance dans l'air ; extérieure à l'isolateur

$\mathcal{E}$: longueur du canal de perforation (m)

γ : la conductivité du matériau (s/m)

μ_0 : la perméabilité du vide(H/m)

μ_r : la perméabilité relative du matériau(H/m)

ϵ_0 : la permittivité du vide(F/m)

ϵ_r : la permittivité relative du matériau.(F/m)

ρ : Étant la densité volumique de charge (C/m³)

σ_s : densité surfacique de charge (C/m²)

D : l'induction électrique (H)

V : Tension appliquée (V)

T : temps(s)

E : Champ électrique (V/m)

B : l'induction magnétique (T)

H : champ magnétique (A/m)

τ : volume (m³)

ω : Pulsation angulaire (radian/s)

Q : charge électrique (C)

r : Rayon (m)

R : Résistance (Ω)

C : capacité (F)

J : est le courant de conduction (A/m^2)

Liste de figure

Chapitre I: Introduction

Figure I.1 :	Isolateur composite	4
Figure I.2 :	Isolateur rigide en verre	5
Figure I.3 :	Assemblage à rotule.	5
Figure I.4 :	Isolateurs à capot et tige.	6
Figure I. 5 :	Différents profils d'isolateurs à capot et tige	7
Figure I.6 :	Isolateur à long fût en porcelaine.	8
Figure. I.7 :	Modèle de Woodson Mc Elroy	13
Figure. I.8 :	Modèle de Claverie et Percheron	13
Figure. I.9 :	Modèles de J. Danis	14
Figure. I.10 :	Modèle d'Alston et Zoledzowski	14
Figure. I.11 :	Modèle de Wilkins	15
Figure. I.12 :	Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh	15

Chapitre II : Equation de base l'électromagnétisme appliquées sur l'isolateur de hautes tensions

Figure II.1 :	déplacement des charges libres dans un condensateur plan	18
Figure II.2 :	Cylindre plongé dans deux milieux	23
Figure II.3 :	Contour d'intégration	24
Figure II.4 :	Conducteur en équilibre électrostatique	26
Figure II.5 :	un diélectrique placé entre deux armatures	27
Figure II.7 :	Maillage rectangulaire	29
Figure II.8.b :	Réseau de capacités	32
Figure II.8.a :	Maillage utilisé	32

Chapitre III : simulation et calcule de la capacité équivalente d'une chaine isolateur

Figure III.1 :	Discrétisation en éléments finis de la chaîne 1512L	33
Figure III.2 :	Distribution du potentiel en fonction de la tension de la ligne	34
Figure III.3 :	Potentiel électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne	35
Figure III.4 :	Distribution du champ électrique en fonction de la tension de la ligne.	36
Figure III.5 :	Champ électrique le long de la ligne de fuite de la chaîne d'isolateurs.	36
Figure III .6 :	la variation de la capacité équivalent en fonction de la tension applique pour un seul élément	37
Figure III .7 :	la variation de la capacité équivalent en fonction de la tension applique pour un des éléments	37
Figure III .8 :	la variation de la capacité équivalent en fonction de nombre des élément	38