

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Centre Universitaire D'El-Oued
Institut des Sciences Et Technologie
Département de Génie Electrique Et Hydraulique



MEMOIRE

Pour l'Obtention du Diplôme d'ingénieur d'état en Électrotechnique
Option : Réseaux Electrique

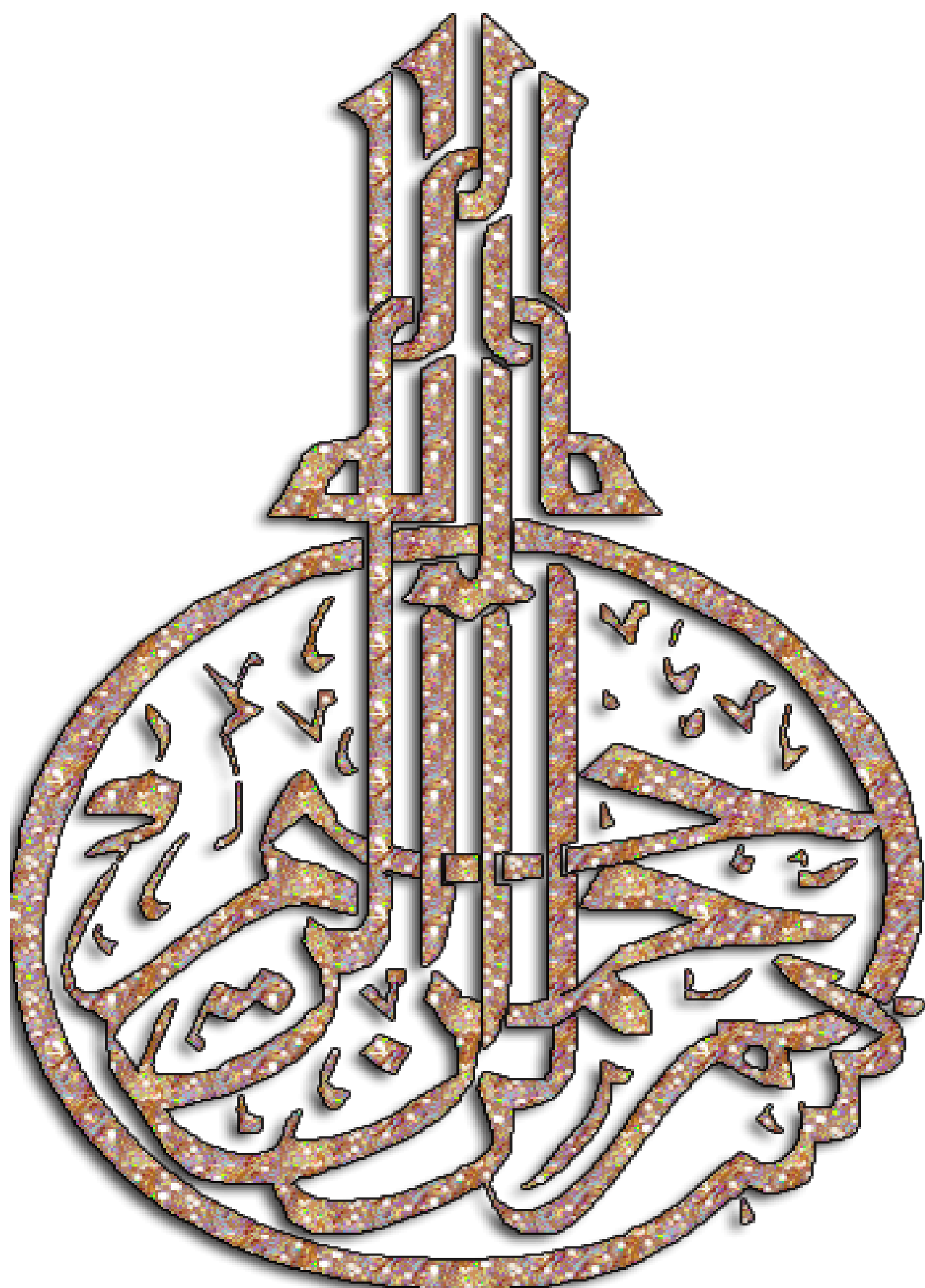
Thème

Etude des Phénomène de Conduction D'un Isolateur Naturellement Pollué

Présenté par :
MEFTAH ZAKARIA

Encadrée par :
M. GUIA TALAL

Promotion 2009



INTRODUCTION GÉNÉRALE	2
------------------------------------	----------

CHAPITRE I

GÉNÉRALITES SUR L'ISOLATEUR DE HAUTE TENSION ET PHÉNOMÈNES DE POLLUTION.

I.1 Introduction.....	5
I.2 Les isolateurs de haute tension	5
<i>I.2.1 Fonctionnement et constitution d'un isolateur</i>	<i>6</i>
<i>I.2.2 Principaux types d'isolateurs</i>	<i>6</i>
<i>I.2.2.1 Isolateurs rigides</i>	<i>6</i>
<i>I.2.2.2 Chaîne d'isolateurs</i>	<i>7</i>
<i>a) Isolateurs capot et tige</i>	<i>8</i>
<i>b) Isolateur à long fût.....</i>	<i>10</i>
<i>I.2.3 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs.....</i>	<i>10</i>
<i>I.2.3.1 Céramique</i>	<i>10</i>
<i>I.2.3.2 Verres</i>	<i>11</i>
<i>a) Le verre trempé</i>	<i>11</i>
<i>b) Le verre recuit</i>	<i>11</i>
<i>c) Matériaux synthétiques</i>	<i>11</i>
<i>I.2.4 Choix des isolateurs</i>	<i>12</i>
I.3 Pollution des isolateurs de haute tension	12
<i>I.3.1 Définition</i>	<i>12</i>
<i>I.3.1.1 Contournement des isolateurs.....</i>	<i>13</i>
<i>I.3.1.2 Tension de contournement</i>	<i>13</i>
<i>I.3.1.3 Tension de tenue</i>	<i>13</i>
<i>I.3.1.4 Courant de fuite</i>	<i>13</i>
<i>I.3.1.5 Courant de fuite critique</i>	<i>13</i>
<i>I.3.1.6 Longueur critique de l'arc</i>	<i>14</i>
<i>I.3.1.7 Conductance superficielle</i>	<i>14</i>
<i>I.3.2 Sources de pollution</i>	<i>14</i>
<i>I.3.2.1 Pollution naturelle</i>	<i>14</i>
<i>a) Pollution marine</i>	<i>14</i>
<i>b) Pollution désertique</i>	<i>14</i>
<i>I.3.2.2 Pollution industrielle</i>	<i>15</i>

I.3.2.3 Pollution mixte.....	15
I.4 Conséquences de la pollution	15
I.4.1 Arc non localisé	15
I.4.2 Arc permanent	15
I.4.3 Contournement des isolateurs.....	16
I.5 Conclusion.....	19

CHAPITRE II

PRINCIPAUX MODELES DU LABORATOIRE SUR L'ISOLATEUR DE HAUTE TENSION.

II.1 Introduction	21
II.2 Modèles d'isolateurs	21
II.3 Principaux modèles	21
II.3.1 Modèle de J.Danis	21
II.3.2 Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh	23
II.3.3 Modèle de P.Claverie et Y.Porcheron	25
II.3.4 Modèle de A.Mekhaldi	25
II.3.5 Modèle de A. Mekhaldi, D. Namane, S. Bouazabia et A. Beroual.....	26
II.3.6 Modèle de Woodson et Mc Elroy	27
II.3.7 Modèle de Wilkins	28
II.4 Conclusion.....	29

Chapitre III

Elaboration D'isolateur Reel Par Femm

III.1. Introduction	30
III.2. Notions fondamentales	30
III.2.1. Relation entre charges et capacités	30
III.2.2. Relation entre résistance et capacité pour un même réseau de lignes de champ	31
III.2.3. Permittivité équivalente	32
III.2.3.1. Exemple d'application pour une ligne bifilaire	34
III.3. Méthodes d'évaluation du champ électrique	35
III.3.1. Méthodes expérimentales	36
III.3.2. Méthodes analogiques	36
III.3.3. Méthodes analytiques et numériques	36
III.4. Simulation du modèle d'isolateur	37
III.4.1. Application du logiciel à des systèmes connus	39

Chapitre IV

Résultats et interprétations

IV.1. Introduction	42
IV.2. Simulation du modèle de laboratoire	42
IV.3. Calcul du champ électrique	42
IV.4. Interprétation des résultats	43

IV.4.2. Répartition (Distribution) du champ électrique	45
<i>IV.4.2.1. La variation du champ électrique en fonction de long de fuite</i>	<i>47</i>
<i>IV.4.3. Répartition de l'induction électrique</i>	<i>48</i>
IV.5. Etude d'influence de pollution sur l'isolateur	51
IV.5.1. l'influence de la permittivité de pollution	51
<i>IV.5.1.1. l'influence de la permittivité sur l'énergie stockée dans la pollution</i>	<i>51</i>
<i>IV.5.1.2. l'influence de la permittivité sur le champ électrique dans la pollution</i>	<i>52</i>
<i>IV.5.1.3. l'influence de la permittivité sur l'induction électrique dans la pollution</i>	<i>53</i>
<i>IV.5.1.4. l'influence de la permittivité de pollution sur la capacité équivalente d'isolateur</i>	<i>54</i>
IV.5.2. l'influence du niveau de pollution	55
<i>IV.5.2.1. l'influence du niveau de pollution sur l'énergie stockée dans la pollution</i>	<i>55</i>
<i>IV.5.1.2. l'influence du niveau de pollution sur le champ électrique</i>	<i>55</i>
<i>IV.5.2.3. l'influence du niveau de pollution sur l'induction électrique dans la pollution</i>	<i>57</i>
<i>IV.5.2.4. l'influence du niveau de pollution sur la capacité équivalente d'isolateur</i>	<i>58</i>
IV.6. Conclusion	58
CONCLUSION GENERALE	60
BIBLIOGRAPHIE	62

INTRODUCTION GENERALE

Pour des raisons technico-économiques, l'énergie électrique est acheminée hors des sites de production principalement au moyen de lignes électriques à haute tension. L'isolement électrique de ces lignes aériennes est réalisé à l'aide des chaînes d'isolateurs en maintenant les conducteurs à une distance suffisante de la masse pour éviter tout risque d'amorçage.[1],[2]

Les isolateurs ou les chaînes d'isolateurs placés sur des pylônes ne tardent pas à se recouvrir de divers types de pollution. Cette pollution est due aux particules emportées par la fumée éjectée par les véhicules et les usines, aux particules salines dans les régions situées au bord de la mer et aux particules de sable dans les régions désertiques. Ces particules, souvent constituées d'une combinaison de plusieurs types de pollution (pollution mixte), portées par les vents et déposées sur les isolateurs peuvent s'accumuler sur une longue période. [3]

A l'état sec, la pollution pose généralement peu de problèmes. Cependant, quand elle est humide, elle provoque la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique à la surface des isolateurs, réduisant ainsi leur rigidité diélectrique. Des courants de fuite prennent alors naissance sur ces mêmes surfaces, provoquant par effet Joule des échauffements locaux, et par la suite l'assèchement progressif de la couche de pollution. Ainsi, la répartition du potentiel est modifiée d'une façon significative, et des arcs partiels peuvent apparaître, et évoluer jusqu'au contournement total de l'isolateur.[4],[5]

Algérien.[7],[8]. Ce modèle est soumis à différentes contraintes électrogéométriques à savoir le niveau de la pollution, la tension appliquée. Notre travail se compose de quatre chapitres.

Nous entamons le premier chapitre, par une présentation d'une synthèse bibliographique sur les isolateurs de haute tension et phénomènes de pollution.

Dans le deuxième chapitre, nous citons les principaux modèles qui traitent la discontinuité de la pollution.

La validation du logiciel FEMM, la représentation bidimensionnelle du modèle d'isolateur étudié, sont représentés dans le troisième chapitre.

Nous analysons dans le quatrième chapitre, la distribution du potentiel, la répartition du champ électrique dans notre modèle en fonction des paramètres électrogéométriques liés à la configuration de couches polluantes.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre étude.



I .1. INTRODUCTION

Le transport de l'énergie électrique nécessite, pour des raisons techniques et économiques l'utilisation de tensions élevées (lignes HT et THT).[9]

Le rôle des isolateurs est de relier les conducteurs aux supports en assurant leur isolation thermique.[10]

Dans la plupart des lignes électriques de haute tension les isolateurs sont menacés par le phénomène de pollution.[11]

En effet, un bon choix de dimensionnement des isolateurs s'avère indispensable pour assurer la fiabilité et la qualité de l'isolement de haute tension. La pollution de ces isolateurs figure comme un vrai problème néfaste à leur bon fonctionnement. La tension de tenue des isolateurs peut diminuer considérablement à cause des dépôts polluants recouvrant leurs surfaces. Ils peuvent même conduire au contournement des isolateurs dans certains cas critiques.[10]

La tension de contournement d'un isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité des dépôts polluants, c'est à dire du degré de pollution, ainsi que de la répartition de cette couche sur les surfaces des isolateurs.[12]

Le présent chapitre porte sur généralité sur l'isolateur de haute tension, sa fonction et sa constitution avec certains types d'isolateur et les matériaux utilisés dans la constitution. La deuxième partie a 'étude des phénomènes de pollution et leur conséquences.

I .2. LES ISOLATEURS DE HAUTE TENSION

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

Les isolateurs des lignes aériennes ont deux fonctions principales. D'une part, ils permettent d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et d'autre part, ils ont un rôle mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dues surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent, etc.[10]

On appelle isolement d'un ouvrage ou d'un appareil électrique, son aptitude à supporter la tension ou plus généralement les contraintes électriques qui lui sont appliquées.[13]

I.2.1. 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).[14], [15]

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement. 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:[16]

- 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.2.2. Principaux types d'isolateurs

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs :

I.2.2.1. Isolateurs rigides

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés entre eux, ils sont fixés aux pylônes par des ferrures de différentes formes (Figure I.1). Ils sont montés sur pylônes soit d'une façon verticale, horizontale ou oblique (inclinée). Mais ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de **60 kV**. [17]

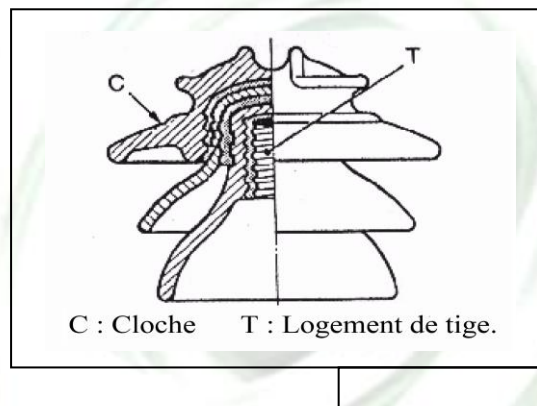


Figure I.1. Isolateur rigide.

La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides. [18]

I.2.2.2 Chaîne d'isolateurs

Une chaîne d'isolateurs est constituée de plusieurs éléments de type capot et tige ou autres (Figure I.2). Ces éléments sont soumis principalement à des efforts de traction. Ils sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (alignement), soit horizontale (ancrage). [18], [16]

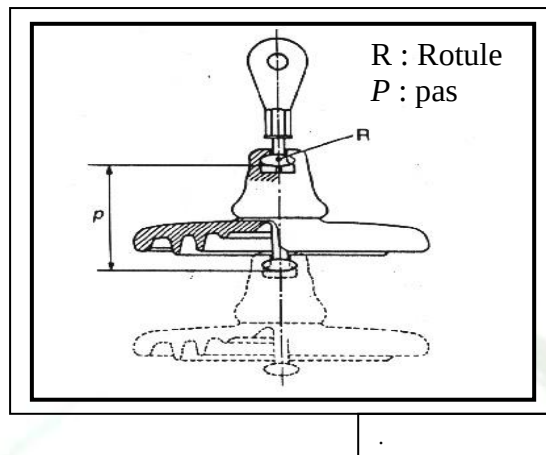


Figure I. 2. Assemblage à rotule.

a) Isolateurs 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.[19],[20] L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique.[20] La coupe de l'isolateur capot-tige est schématisée à la figure I.3.

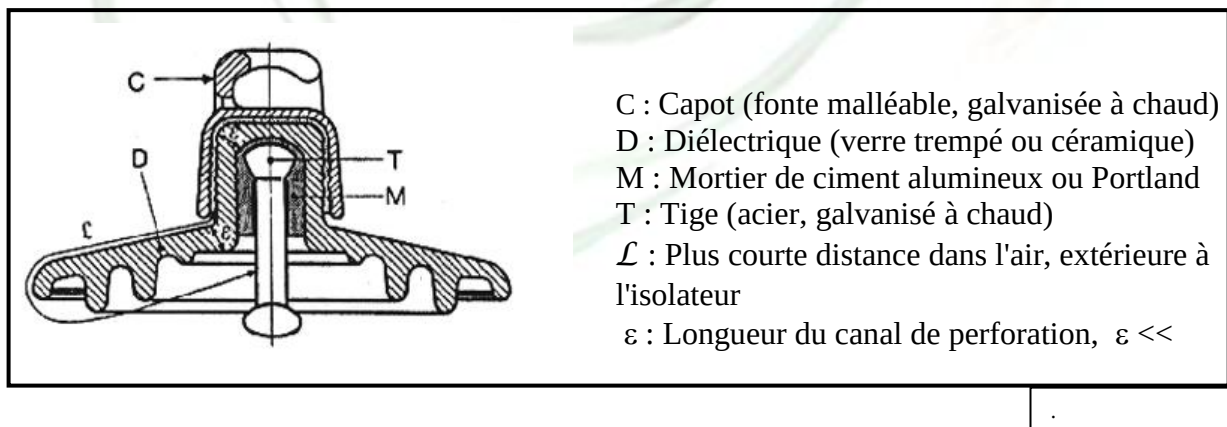


Figure I.3. Isolateur à capot et tige.

Différents profils des isolateurs à capot et tige :

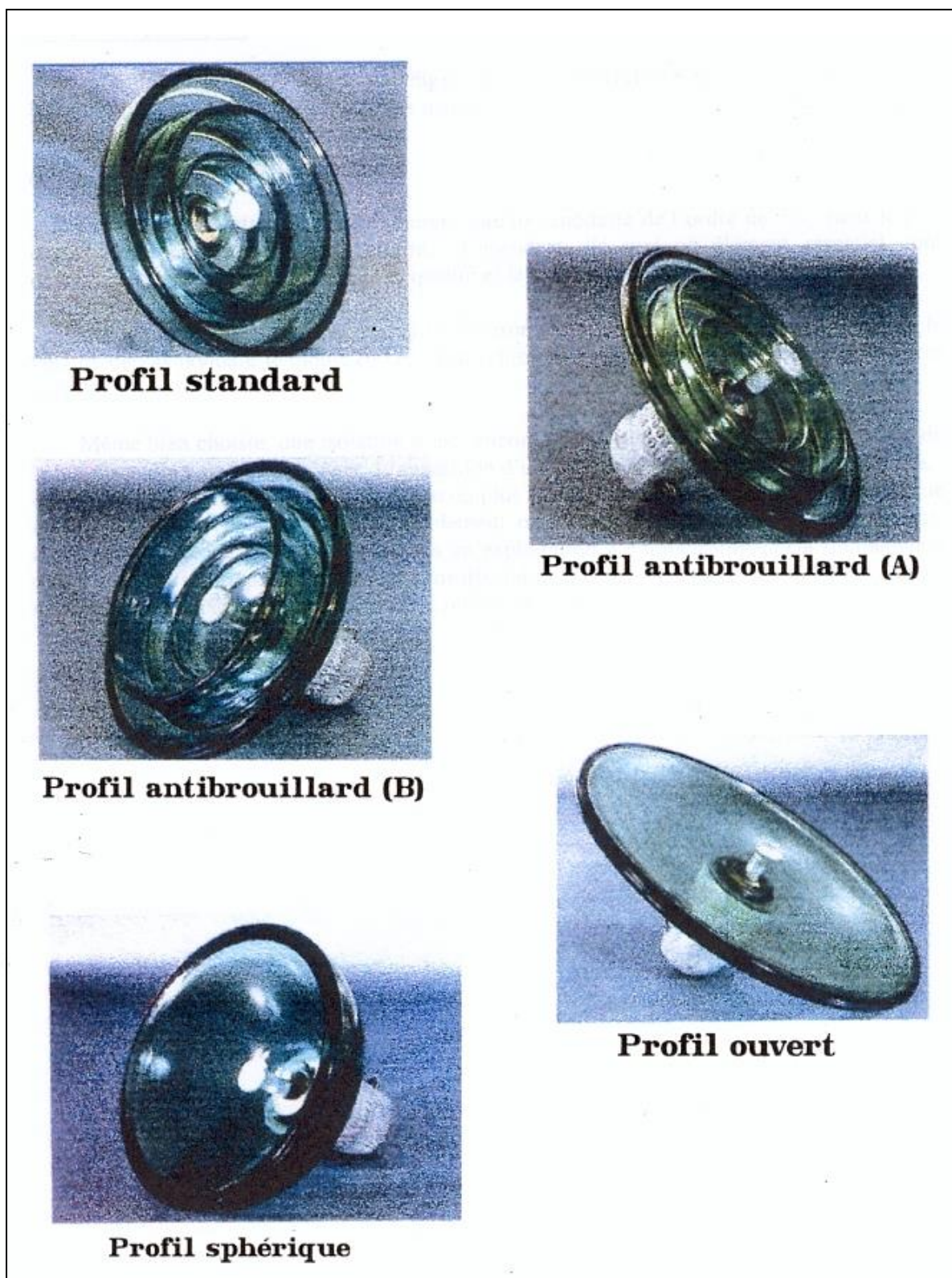


Figure I.4. Différents profils d'isolateurs à capot et tige.

b) Isolateur à long fût

Ils sont constitués d'un cylindre plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes (Figure I.5). A chaque extrémité est fixée une pièce métallique de liaison.[21],[16] Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (**figure I.5.a**), soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (**figure I.5.b**).[22],[17]

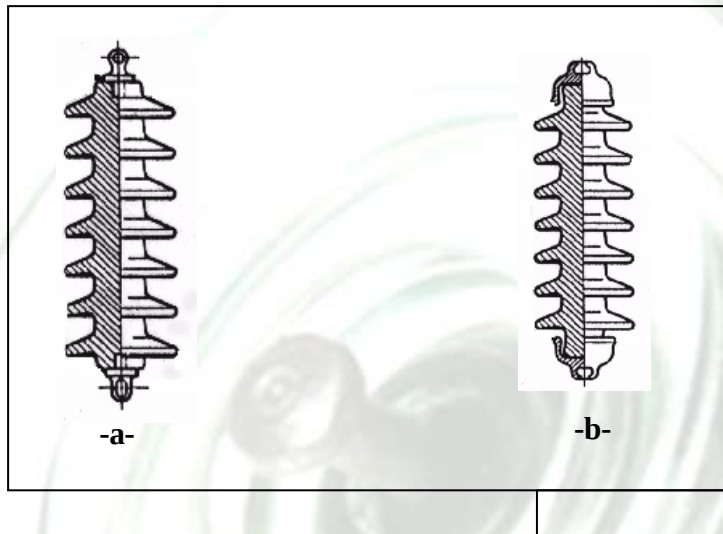


Figure I.5. Isolateur à long fût en porcelaine.

I.2.3. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine.[17],[23]

I.2.3.1. Céramique

Elle est généralement utilisée pour les isolateurs à haute tension et aussi pour les isolateurs support (long fût).

La composition des céramiques et leur fabrication sont longuement développées. Certaines céramiques à grains très fins sont recommandées pour des isolateurs devant supporter des efforts mécaniques élevés.[21]

I.2.3.2. Verres

Outre son bas prix, le verre présente l'avantage de permettre de déceler les défauts par une simple observation.[21] En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présentent le verre, le bas prix et l'observation des défauts est très facile.[17],[23] On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit.[10]

a) Le verre trempé

La résistance à la traction du verre trempé est environ **5 à 6** fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100° C.[10]

b) Le verre recuit

Le verre recuit est utilisé pour la fabrication d'isolateurs rigides, mais présente cependant des inconvénients. Parmi ces inconvénients, nous citons le fait qu'il ne résiste pas aux variations brusques de température et qu'il ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles et c'est pour cette raison qu'il n'est pas utilisé pour la fabrication des isolateurs de suspension.[22],[17],[21]

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.[22],[17],[23]

La figure I.6 ci-dessous représente les isolateurs des matériaux synthétiques.

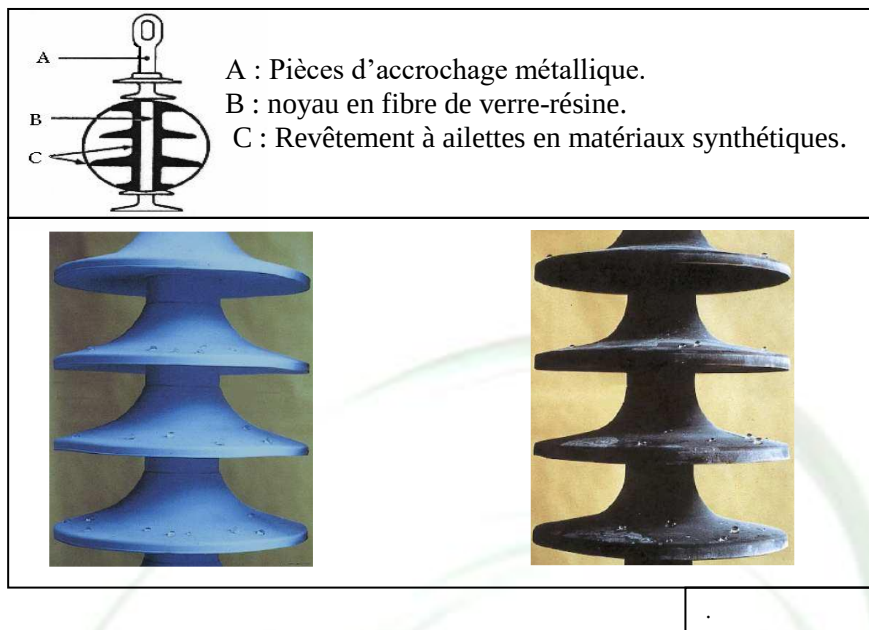


Figure I.6. Isolateurs en matériaux synthétiques.

I.2.4. Choix des isolateurs

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.[16],[20]

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.[24]

I.3. Pollution des isolateurs de haute tension

I.3.1. Définition

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème sur l'isolement des ouvrages de haute tension, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de haute tension.[25]

La pollution provoque la formation d'une couche sur la surface des isolateurs. Ces couches de pollution, quand elles sont humidifiées, réduisent considérablement la résistivité

des isolateurs ce qui conduit à la diminution de leur tension de tenue.

Notons que cette couche de pollution n'est pas homogène et sa distribution n'est pas uniforme. 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 trouvent les isolateurs ainsi que la surface inférieure ou supérieure de l'isolateur.[17],[23]

a) 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'arcs partiels. Un arc peut s'allonger jusqu'au contournement total.[26]

b) Tension de contournement

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas au-delà duquel les arcs électriques joignent les deux électrodes.[18],[13]

c) Tension de tenue (Tension d'essai)

C'est le niveau de tension le plus important que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive. (Contournement dans le cas des isolateurs).[18],[11]

d) Courant de fuite

C'est un courant de faible amplitude circulant à travers la couche polluante humectée le long de la surface isolante. Il est de type électrolytique et peut être un courant résistif pour une isolation totalement polluée ou un courant capacitif dans le cas d'une isolation parfaitement propre.[21]

Il dépend de plusieurs facteurs, entre autres, la nature de la couche de pollution, la longueur de la ligne de fuite et les conditions atmosphériques.[18]

e) Courant de fuite critique

C'est le courant minimal nécessaire pour provoquer le contournement total de l'isolateur.[11]

f) Longueur critique de l'arc

C'est la longueur limite de l'arc partiel, qui au delà de laquelle, l'arc conduira au contournement total.[11]

g) Conductance superficielle

La conductance superficielle est le rapport du courant de fuite circulant à la surface de l'isolateur sur la tension appliquée. Elle caractérise l'état global de la surface isolante.[15]

I.3.2. Sources de pollution

Nous distinguons trois sortes de pollutions : la pollution naturelle, industrielle et mixte.

I.3.2.1. Pollution naturelle

Elle dépend du climat et des facteurs météorologiques des régions. Elle est constituée de dépôts de poussières véhiculées par les vents tels que: sable, embruns marins.[27] Ces dépôts, et selon leur nature, se présentent comme suit :

a) Pollution marine

Les lignes de haute tension qui passent près de la mer dans les zones côtières sont exposées au vent qui vient de la mer et qui porte des embruns causant la formation d'une couche polluante de sel sur les surfaces des isolateurs.[28]

Cette couche peut devenir conductrice lorsqu'elle est humidifiée ou mouillée ce qui conduit à la circulation d'un courant de fuite et par suite, la génération d'arcs électriques ou même la génération d'un contournement.[17],[22]

b) Pollution désertique

Dans les régions désertiques, ou le sable emporté par les vents se pose sur les surfaces des isolateurs. Ces polluants deviennent conducteurs après humidification, engendrant un courant de fuite qui est suivi par l'apparition des arcs partiels, peuvent s'allonger jusqu'au contournement total.[11]

1.3.2.2. Pollution industrielle

Ce type de pollution est fréquent dans les zones industrielles surtout à proximité des usines, entreprises de production éjectant des fumées (raffinerie, cimenterie, ...).

Par ailleurs les gaz d'échappements (centrale thermiques) et les engrais utilisés en agriculture contribuent aussi aux dépôts observés à la surface des isolateurs.

En présence d'une humidité intense, le sel contenu dans ces polluants abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs.[11],[28]

Cette pollution peut aussi être d'origine domestique, quant il s'agit des facteurs tels: fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport.[29]

1.3.2.3. Pollution mixte

Ce type de pollution résulte de la combinaison entre les pollutions précitées, Ce type de pollution est le plus dangereux.[30],[10]

I.4. CONSEQUENCES DE LA POLLUTION

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:[31]

I.4.1. Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorce aléatoirement à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition d'un courant de fuite intermittent entraînant une perte d'énergie relativement faible et généralement supportable par l'installation.[32]

I.4.2. Arc permanent (fixe)

Contrairement aux cas précédent, l'arc électrique se fixe à la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit on s'y réamorçant au même endroit (courant alternatif).

Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation de support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant.[30],[28]

I.4.3. Contournement des isolateurs

Le comportement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en quatre étapes distinctes. Chacune de ces étapes a une importance sur la tenue ou le contournement de la chaîne isolante sous tension de service du réseau.[11]

Etape 1 : Dépôt de la pollution

Les particules du dépôt sont apportées par le vent et se concentrent entre les nervures ou autour du capot (figure I.7).

Les facteurs d'accumulation sont les suivants :

- la nature, le poids et la taille des particules polluantes,
- la distance de l'isolateur par rapport à la source de pollution et par rapport au sol d'où peut provenir des poussières.

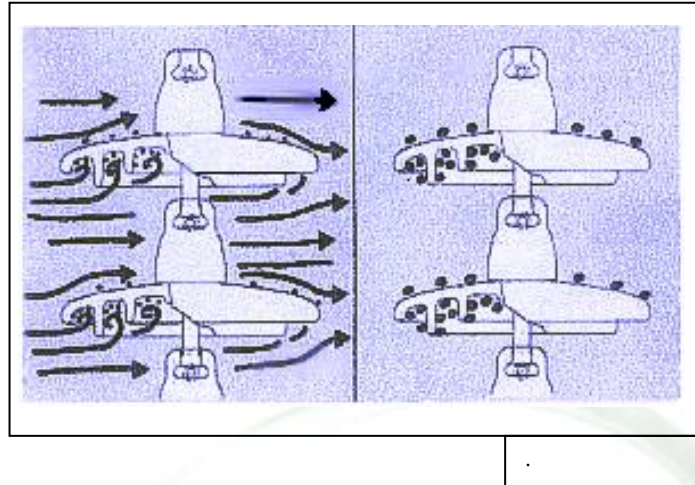


Figure I. 7. Dépôt et évolution de l'agent polluant.

- la vitesse du vent,
- l'orientation de la chaîne, et surtout la forme de l'isolateur et son aptitude à l'auto-nettoyage par les fortes pluies et vents.[33]

Etape 2 : Humidification de la pollution

Le brouillard et la condensation de la petite pluie modifient graduellement et pratiquement sans délavage la surface de l'isolateur pollué. Ces conditions sont dites critiques. Les sels contenus dans le dépôt se dissolvent et créent un électrolyte conducteur sur la surface de l'isolateur. Un courant de fuite prend alors naissance.[11]



Figure I.8. Humidification du dépôt polluant et création d'un courant de fuite.

Pendant le cycle d'humidification, le courant de fuite augmente jusqu'à une valeur maximale, mais diminue s'il y a séchage. Le niveau de courant de fuite dépend du temps, de la nature et de la quantité des sels solubles et insolubles. Ces derniers maintiennent par adsorption une certaine quantité d'eau à la surface de l'isolateur, entretenant ainsi l'humidification du dépôt.[11],[30]

Etape 3 : Développement des zones sèches et apparition d'arcs

La densité du courant de fuite est beaucoup plus importante près des ferrures de l'isolateur. Par effet Joule, la température s'élève, l'eau s'évapore et le dépôt devient moins conducteur. Le courant est alors très réduit en amplitude par la présence d'une «bande sèche».

La répartition de potentiel sur l'isolateur est modifiée par cette bande sèche, car la plus grande portion du potentiel électrique se trouve reportée aux bornes de cette bande sèche. Si la largeur de cette dernière est insuffisante pour supporter le potentiel correspondant, un arc se crée (Figure I.9).[11],[30]

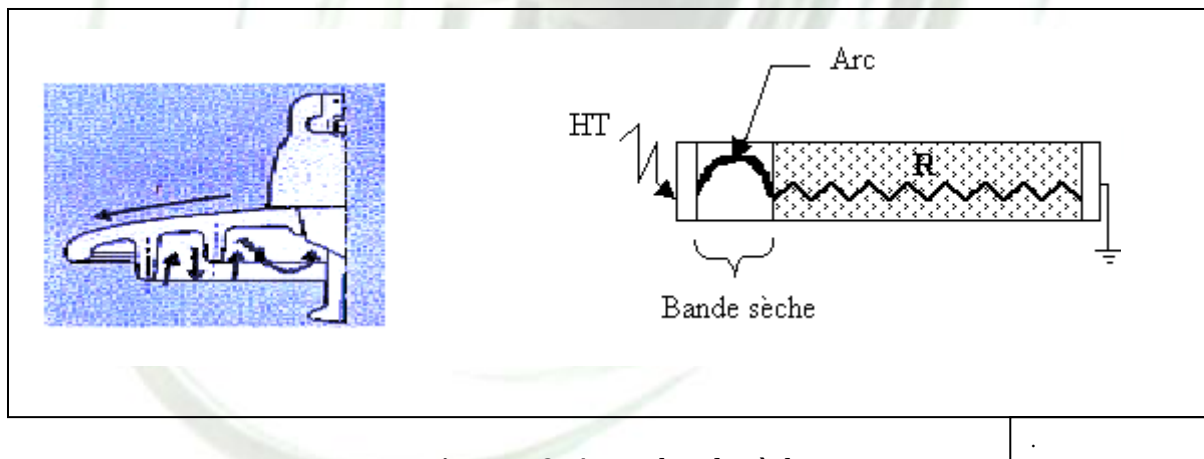


Figure I.9. Arc et bande sèche

Etape 4: Comportement des arcs

La résistance du dépôt humidifié R, en série avec l'arc, limite le courant et la longueur de l'arc (Figure I.9). Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra, la bande sèche s'humidifiera à nouveau et le mécanisme se répétera encore. Tant que le courant de fuite n'excède pas ce

que l'on appelle «courant critique » correspondant à une «longueur critique » de l'arc, cette situation reste stable (Figure I.10). Dans le cas contraire, le contournement de l'isolateur peut survenir.[11],[30],[33]

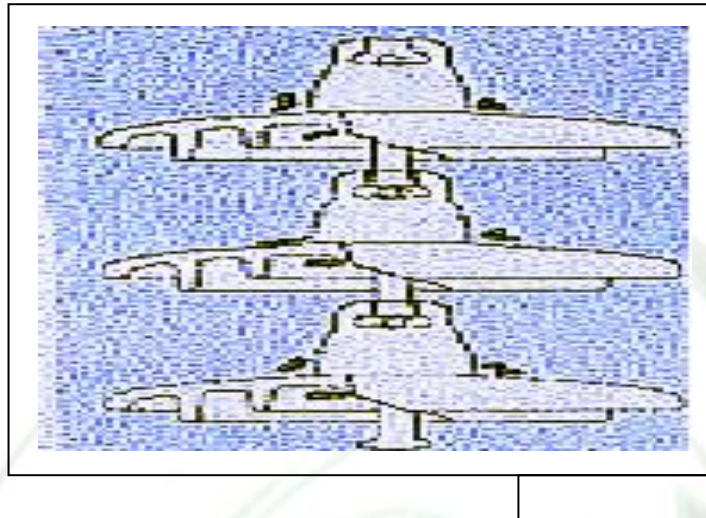


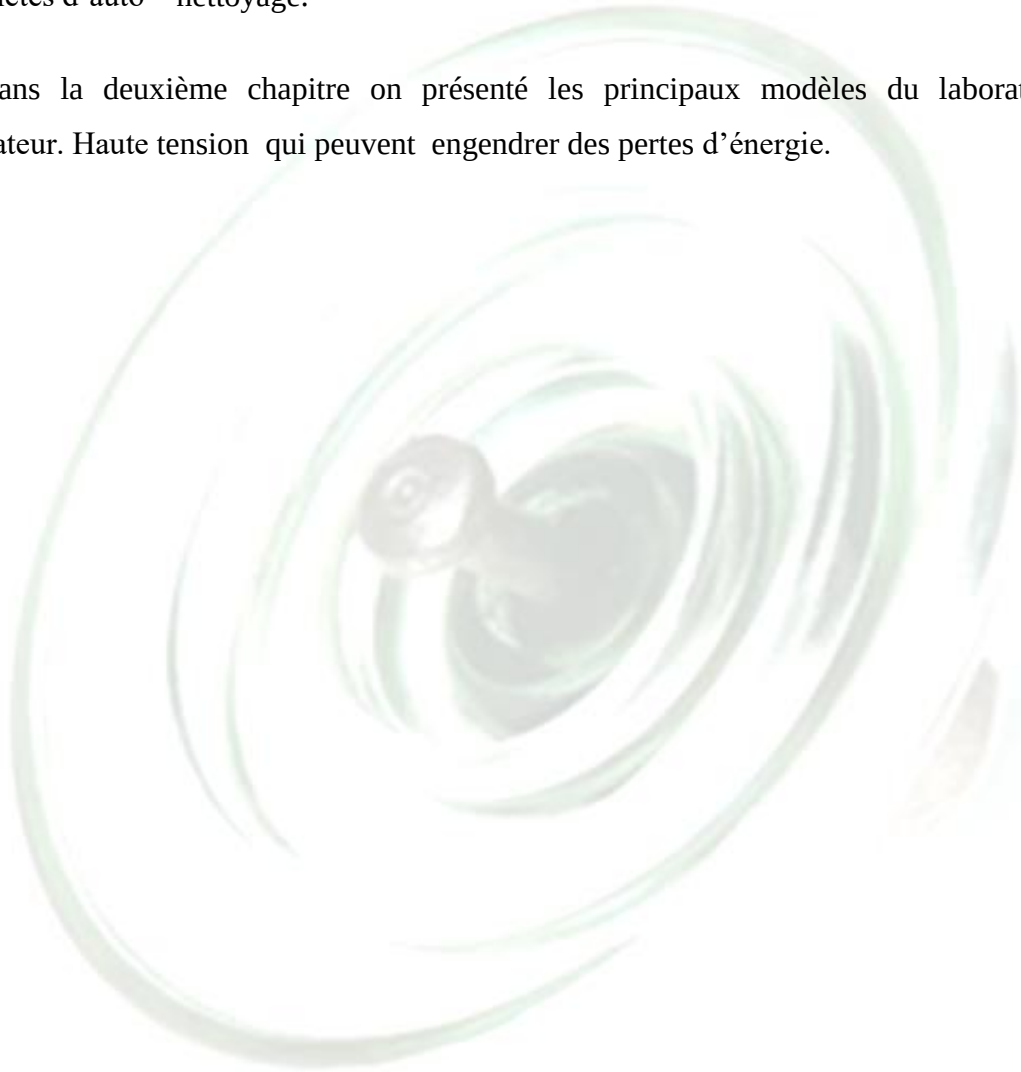
Figure I. 10. Régime d'arcs sous pollution.

I.5. CONCLUSION

dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent 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.

Dans la deuxième chapitre on présenté les principaux modèles du laboratoire sur l'isolateur. Haute tension qui peuvent engendrer des pertes d'énergie.



II.1. INTRODUCTION

Dans le but de comprendre et d'expliquer les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs pollués, on a consacré une quantité importante de travaux tant théoriques qu'expérimentaux, sans pour autant aboutir à l'élaboration d'un modèle pouvant tenir compte simultanément de tous les paramètres réels caractéristiques du phénomène. Il s'agit en particulier des formes géométriques des isolateurs, de la répartition des couches polluantes (continue ou discontinue) et de leur résistivité, des échanges thermiques, de la non uniformité du mouillage et de l'intensité des arcs au voisinage de la surface de l'isolateur, de la formation d'arcs multiples .etc. ainsi que pour la détermination de la tension de contournement des isolateurs pollués.

Dans ce chapitre, nous allons exposer quelques modèles développés dans ce domaine.

II.2. MODELES D'ISOLATEURS

Afin de contourner la difficulté liée à la configuration souvent complexe de l'isolateur, des modèles simples de laboratoire ont été adoptés par un certain nombre de chercheurs.[34],[16],[35],[36],[37]

Si quelques modèles reflètent assez bien le comportement de l'isolateur, d'autres par contre, en restent assez éloignés.[35],[36]

II.3. PRINCIPAUX MODELES

Nous citons brièvement quelques-uns de ces modèles les plus utilisés :

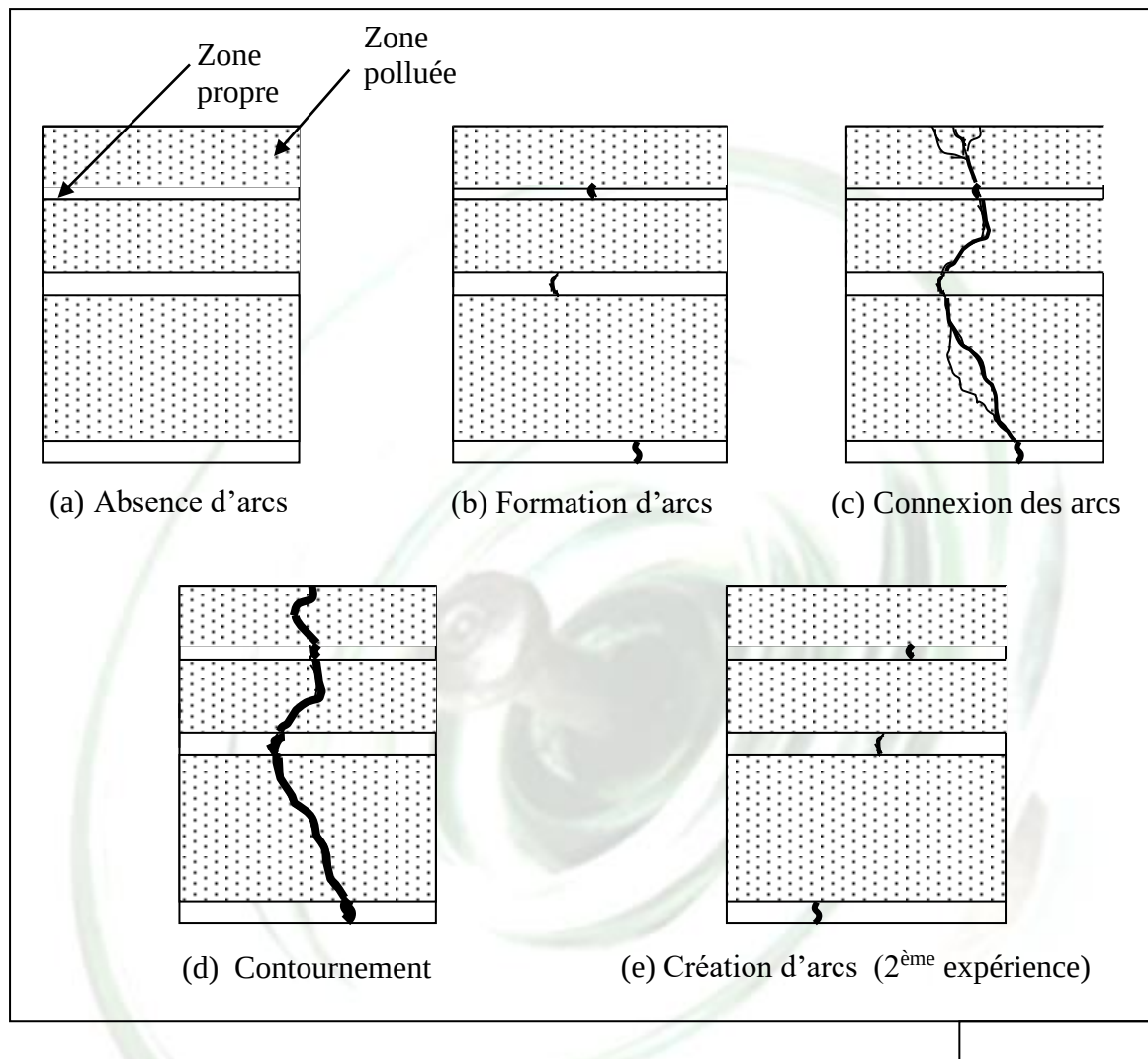
II.3.1. Modèle de J.Danis

Ce modèle est constitué d'une plaque de verre isolante, plane ou cylindrique, munie de deux électrodes rectangulaires identiques et placées aux deux extrémités de la plaque (Fig. II.1). Dans le but de reproduire des couches similaires à celles observées sur des isolateurs naturellement pollués, J.Danis a considéré un modèle constitué de plusieurs zones sèches séparées par des zones humides (Fig. II.1.a). Ainsi, l'auteur a abouti aux résultats suivants :

- L'arc électrique prend naissance dans les zones sèches et se déplace vers les zones humides (Fig. II.1.b).
- Cet arc s'amorce d'une façon aléatoire le long de la zone sèche et aucune position n'est privilégiée par rapport à une autre.
- Dans le cas d'une alimentation continue, l'aspect de l'arc dépend de la polarité de l'électrode qui se trouve juste à proximité de l'arc (en cas de zone humide). Il semblerait que l'anode provoque un arc en forme de simple décharge lumineuse. La cathode, par contre, provoque un arc aux multiples ramifications fines. De plus, le développement de l'arc à proximité de la cathode est plus rapide que celui à proximité de l'anode. Dans le cas d'un arc cathodique, le champ au pied de l'arc dissocie l'eau et les électrons se déplacent de la couche humide vers l'air. Cette charge négative dans l'arc augmente le champ et le claquage diélectrique se produit. Par contre, dans le cas d'un arc anodique, les électrons se déplacent de l'air vers la couche humide en créant une charge positive qui diminue le champ au pied de l'arc. Ainsi, l'allongement de l'arc devient lourd.
- Aux premiers stades du processus, de nombreux arcs partiels peuvent avoir lieu dans la zone sèche. Lorsque le courant augmente, les arcs disparaissent de telle sorte qu'un seul arc dominant persiste. Celui-ci se développe donc, seul, à travers la zone humide.
- Le développement de l'arc d'une zone sèche s'effectue de manière à rejoindre l'arc développé sur la zone sèche voisine (Fig. II.1.c).
- Le contournement se fait à travers les chemins déjà préétablis par les différents arcs de chaque zone sèche (Fig. II.1.d).
- Les positions des arcs développés changent lorsque l'expérience est répétée, et le contournement se fera donc à travers un autre chemin qui n'est pas forcément le plus court (Fig. II.1.e).

A partir de ces considérations, l'auteur a conclu que le lieu, la forme et la propagation des arcs partiels sont déterminés à partir de plusieurs facteurs qui sont dépendants entre eux. Comme il est impossible de déterminer l'effet instantané de tous ces facteurs, le comportement macroscopique de ces arcs a une nature aléatoire.

Ainsi, la rupture des zones sèches survient d'une manière aléatoire. Comme la tension de contournement dépend de la rupture de ces zones sèches, celle-ci possède également le même caractère, c'est à dire qu'elle obéit aux lois statistiques.[34]



II.3.2. Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh

Ce modèle 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 $L-S$ de la terre (Fig. II.2). Une tension alternative de fréquence 50 Hz est appliquée au modèle.

Les auteurs se sont 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.

Ils ont abouti aux résultats suivants :

- La tension de contournement U_c en fonction de la distance S atteint un minimum, correspondant à une largeur S_{min} située à environ 45-50 % de la longueur totale, ce sont des courbes en forme de V.
- Pour une même largeur de la zone sèche, la tension de contournement diminue lorsque la conductivité des couches polluantes augmente.
- La tension de contournement de l'ensemble zone sèche-zone polluée semble être confondue avec celle de la zone polluée lorsque $S < S_{min}$, et avec celle de la zone sèche pour $S > S_{min}$.
- La tension de contournement de l'isolateur dépend du rapport des largeurs des zones sèche et polluée.
- La tension de contournement totale ne représente pas la somme des tensions de contournements partiels zone sèche-zone polluée.
- La rigidité augmente lorsque la largeur de la zone sèche préétablie devient supérieure à la largeur critique, à partir de laquelle aucun arc stable ne peut être observé.[38]

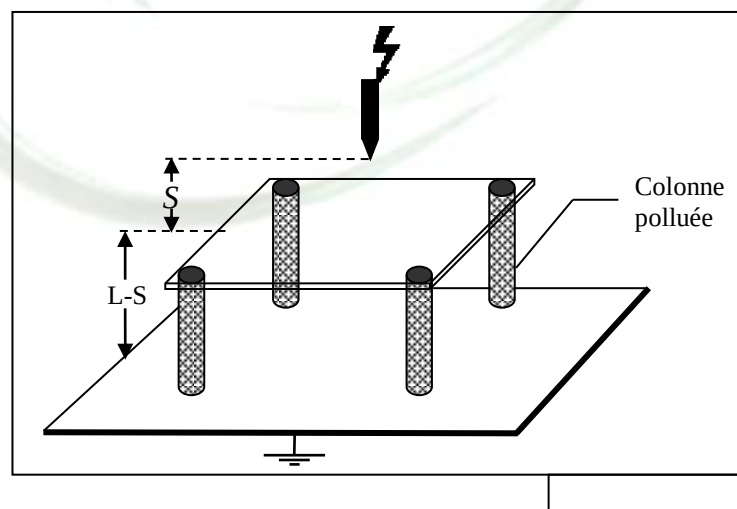


Fig. II.2. Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh.

II.2.3. Modèle de P.Claverie et Y.Porcheron

Plusieurs modèles expérimentaux ont été proposés pour le cas d'une tension alternative. Le plus connu est celui de Claverie et Porcheron. Ces auteurs ont montré que, pour un modèle d'isolateur plan (Figure II.3), la tension d'arc est de la forme :[39]

$$U_{arc} = 100 \frac{x}{\sqrt{I}} \quad (\text{kV}) \quad (\text{II.01})$$

Et la tension minimale d'entretien de l'arc :

$$U_{cx} = 800 \frac{x}{\sqrt{I}} \quad (\text{kV}) \quad (\text{II.02})$$

x : la longueur d'arc. (m)

I : le courant de la longueur d'arc.(mA)

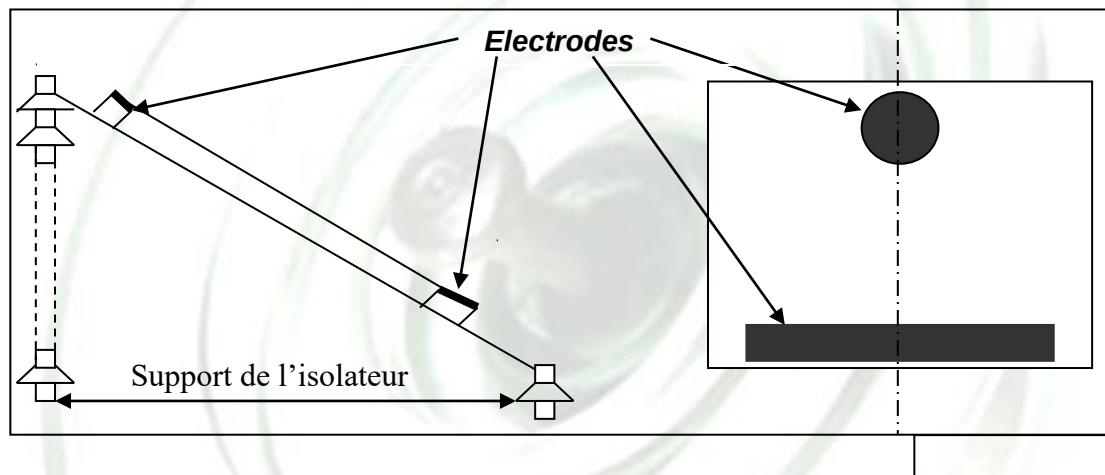


Figure II.3. Modèle expérimental de Claverie et Porcheron.

A partir de ces études, les résultats tirés sont les suivants :

Le courant de fuite diminue avec la distance inter électrodes, augmente avec le rayon de l'électrode circulaire, augmente avec la conductivité et augmente aussi avec l'épaisseur de la couche de pollution.[11]

II.2.4. Modèle de A.Mekhaldi

A. Mekhaldi a utilisé un modèle plan et rectangulaire similaire à celui considéré par P.Claverie et Y.Porcheron. Il s'intéresse surtout à l'évolution du courant de fuite ainsi que la longueur de l'arc électrique en fonction de la conductivité de la couche de pollution, du rayon

de l'électrode de haute tension, de la distance inter-électrodes, de l'épaisseur de la couche de pollution et de la répartition discontinue de la couche de pollution.

A partir de ces études, les résultats tirés sont les suivants :

- Le courant de fuite et la largeur de l'arc diminuent avec la distance inter-électrodes, augmentent avec le rayon de l'électrode circulaire, augmentent avec la conductivité et augmentent aussi avec l'épaisseur de la couche de pollution.[40]

II.2.5 Modèle de A. Mekhaldi, D. Namane, S. Bouazabia et A. Beroual

Ces auteurs ont étudié l'influence de la répartition discontinue de la couche de pollution sur le comportement d'un modèle plan de laboratoire.[41]

Ce modèle est soumis à des différentes contraintes bien définies, à savoir la discontinuité de la pollution en variant de manière régulière la largeur de la pollution de 0 à L (L étant la longueur de fuite totale, égale à 40 cm), la position de la pollution, ainsi que la conductivité de la couche polluante.

En effet, deux configurations de la pollution ont été considérées, à savoir, la pollution côté électrode circulaire de haute tension et la pollution côté électrode rectangulaire de terre (Figure II.4).

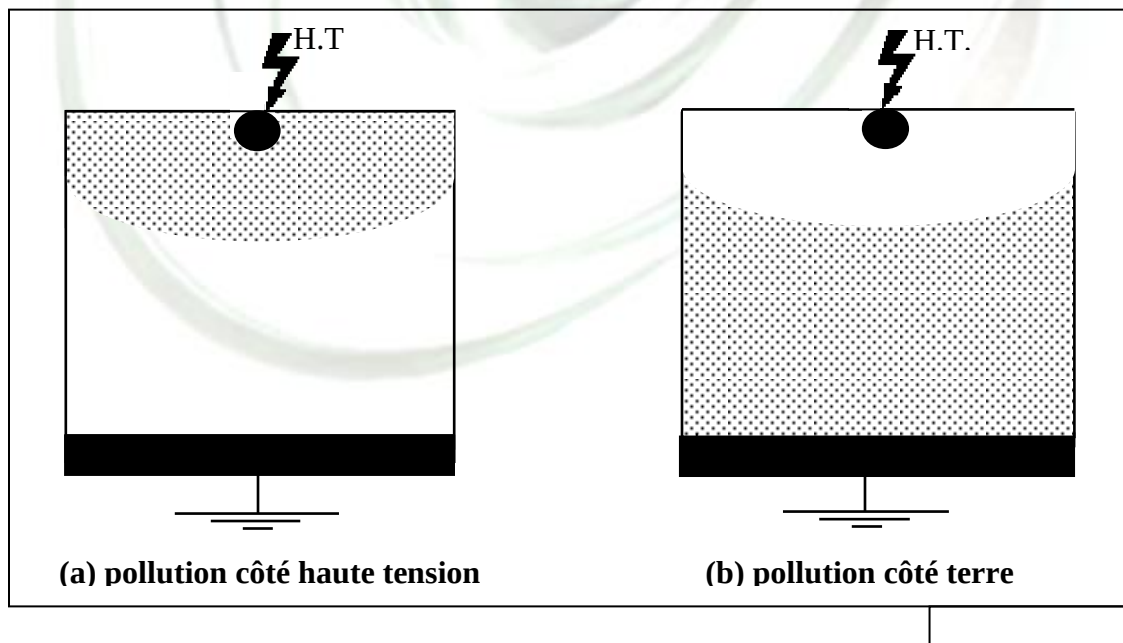


Figure II. 4. Modèle de A. Mekhaldi, D. Namane, S. Bouazabia et A. Beroual.

Les principaux résultats qui ont été obtenus sont les suivants :

- Il existe un régime critique à partir duquel on obtient une hausse brutale du courant. Ce régime est atteint pour les grandes largeurs de la couche polluante, lorsque la tension et/ou la conductivité sont élevées.
- Le courant de fuite est toujours plus élevé lorsque la couche polluante est du côté de l'électrode rectangulaire, mise à la terre.
- La conductivité favorise la circulation du courant de fuite, surtout lorsque la couche de pollution est établie côté terre.
- La position de la pollution n'a apparemment pas d'influence sur la tension de contournement.
- Il existe une longueur critique de la zone sèche à partir de laquelle aucun arc stable ne se propage. Cette longueur, évaluée au tiers de la longueur de la ligne de fuite totale, diffère considérablement de la longueur critique d'arc obtenue par P. Claverie et Y. Porcheron dans le cas de pollution continue.
- La longueur critique de la zone sèche est toutefois indépendante de la conductivité.[21]

II.2.6. Modèle de Woodson et Mc Elroy

En utilisant une configuration géométrique circulaire, Woodson et Mc Elroy ont essayé de reproduire d'une façon idéale, la surface d'un isolateur (Fig. II. 2).

Ce modèle n'a pas donné de résultats satisfaisants. Cela a été imputé à la non uniformité de la résistivité superficielle de l'isolateur.[36]

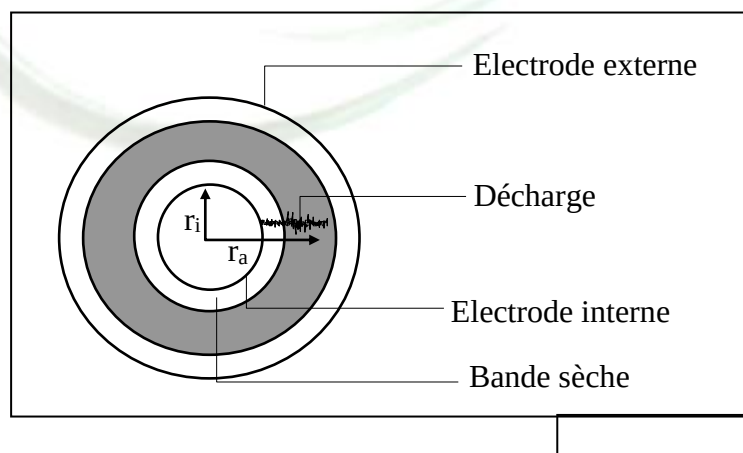


Figure II. 5. Modèle de Woodson et McElroy.

II.2.7. Modèle de Wilkins

Celui-ci [13] est constitué d'une électrode mise sous tension et située au-dessus d'un bac rempli d'eau additionnée de sel, permettant de simuler la zone polluée. La zone sèche étant considérée comme l'espace compris entre l'électrode et l'eau (Fig. II.6). Ce modèle est très utilisé pour étudier le critère de propagation de l'arc.[42]

Tous ces modèles de laboratoire ont permis par la simplicité de leur configuration, d'examiner aisément l'influence de nombreux paramètres sur le comportement de l'isolateur (courant de fuite, contournement, tension d'entretien de l'arc, etc.).[43],[44],[45]

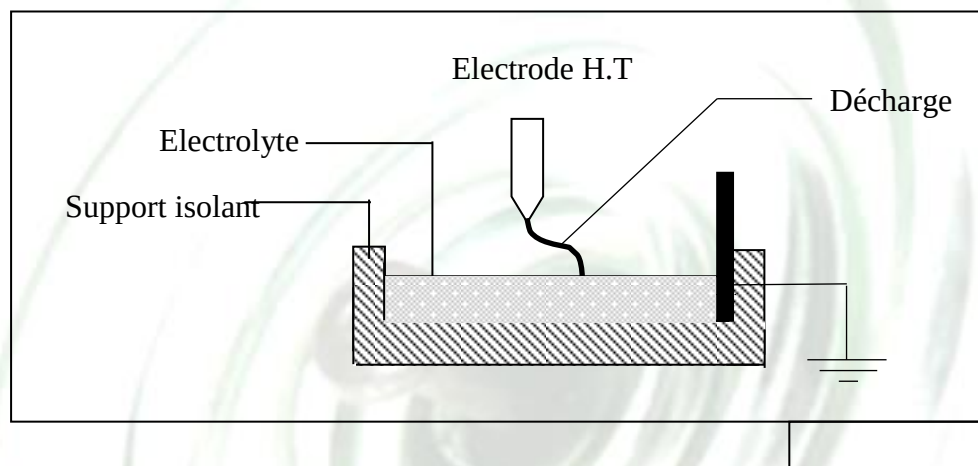


Figure. II.6. Modèle de Wilkins.

II.2.8. Modèle d'Alston et Zoledziowski

En tenant compte de l'hypothèse de Neumarker et pour une tension d'application dépassant quelques kilovolts, Alston et Zoledziowski ont déterminé la condition de maintien de l'arc électrique, dans le cas d'un isolateur cylindrique de longueur L (Figure II.7) :[46]

$$U_{cx} = (n+1)(Ax)^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{r(L-x)}{n} \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{kV}) \quad (\text{II.03})$$

Avec :

x : la longueur d'arc. (m)

A et n : les constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc.

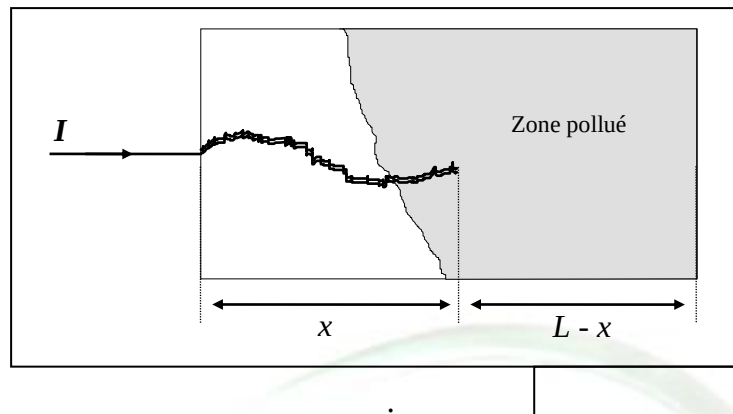


Figure II.7. Modèle cylindrique utilisé par Alston et Zoledowski.

Note :

Neumarker déduit le courant et la longueur d'arc critiques :

$$I_c = \left(\frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad () \quad (\text{II.04})$$

Et :

$$x_c = \frac{L}{n+1} \quad (\text{II.05})$$

L'expression de la tension critique de contournement est par conséquent :

$$U_c = A^{\frac{1}{n+1}} r_p^{\frac{n}{n+1}} L \quad () \quad (\text{II.06})$$

III.4. CONCLUSION

Cette brève synthèse bibliographique touche l'ensemble des préoccupations des chercheurs dans le domaine de la pollution, car regroupant des aspects aussi variés que la surveillance sur site des isolateurs ou la recherche purement théorique des modèles mathématiques liés à la pollution.

Loin d'être approfondie, car elle n'entre pas dans le cadre précis du sujet traité dans cette thèse, cette synthèse nous a tout de même apporté un grand nombre de connaissances qui nous serviront dans les prochains chapitres.

Nous avons choisi délibérément de ne pas présenter les équations mathématiques liées aux différents modèles présentés, afin de ne pas alourdir le texte, et de considérer uniquement l'aspect essentiel de ce qui touche au domaine de la pollution.



III.1. Introduction

Dans cette partie, nous avons tenté une approche d'isolateur réel, à l'aide d'une méthode numérique. Ceci nous a permis une meilleure compréhension des phénomènes liés aux systèmes comprenant une interface air - matériau diélectrique, notamment, la répartition du potentiel et du champ électrique.

Nous avons ainsi simulé les variations de la capacité équivalente, l'énergie stockée par les agents pollués, champ électriques et d'induction crée dans la pollution du système en fonction des différents paramètres électro-géométriques.

III.2. Notions fondamentales

III.2.1. Relation entre charges et capacités

Considérons deux conducteurs isolés A et B et supposons qu'une charge $+Q$ a été enlevée de l'un d'eux pour être déposée sur l'autre. Si les deux conducteurs étaient initialement neutres, on obtient ainsi deux conducteurs de charges égales et de signes opposés.

Comme on le voit sur la figure IV.1, les lignes de champ partent du conducteur chargé positivement pour rejoindre celui de charge négative.

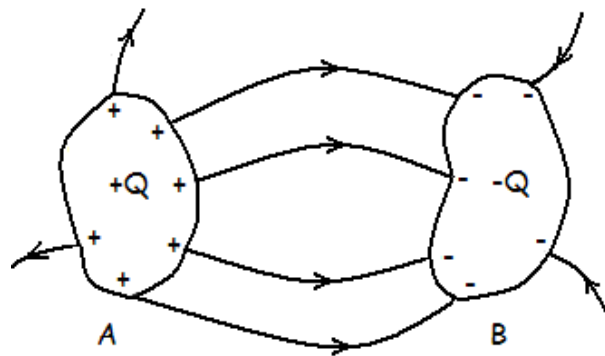


Fig. III.1 : Lignes de champs entre deux conducteurs chargés

Les charges $+Q$ et $-Q$ sont stationnés à la surface des conducteurs.

Une telle configuration est appelée condensateur, les deux conducteurs qui la constituent étant les armatures du condensateur.

La figure III.1 représente un condensateur de forme complexe et la répartition de la charge Q sur la surface dépendra de la forme de l'armature, de sa position par rapport à la deuxième armature, ainsi que du milieu dans lequel sont placés les conducteurs.

On appelle tension aux bornes du condensateur la différence de potentiel entre les armatures et, bien que les deux armatures portent chacune une charge de valeur absolue Q (mais de signes opposés), on appelle charge du condensateur la valeur positive Q et on appelle capacité du condensateur la valeur :

$$C = \frac{Q}{V} \quad (\text{III.1})$$

Q étant par définition la charge positive et V la différence de potentiel entre l'armature positive et la négative, C est une grandeur par définition positive.

Remarque : La capacité C d'un condensateur est, théoriquement, indépendante de la tension et de la charge : elle constitue seulement le facteur de proportionnalité (constant) entre les deux.

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.

La disposition la plus simple est celle du condensateur plan où deux électrodes planes et parallèles sont séparées par une faible épaisseur "d" de diélectrique. Les surfaces équipotentiels sont alors des plans parallèles aux armatures et les lignes de champ se dirigent perpendiculairement d'une armature vers l'autre. Cette disposition est d'autant plus rigoureuse que l'épaisseur est plus faible devant les dimensions transversales.

La section de l'ensemble des lignes de déplacement est donc égale à la surface (S) des armatures. Comme la répartition du flux de déplacement y est uniforme, l'application du théorème de Gauss nous conduit facilement à la détermination de l'induction:

$$D = \frac{Q}{S} \quad (\text{III.2})$$

A l'intérieur du diélectrique, le potentiel varie linéairement quand on va d'une électrode à l'autre, le champ électrique y est donc :

$$E = \frac{V}{d} \quad (\text{III.3})$$

Ces relations donnent :

$$Q = \frac{\epsilon S}{d} V \quad (\text{III.4})$$

La capacité est ainsi :

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (\text{III.5})$$

Ce résultat reste valable pour des armatures non planes, dont la distance par rapport au rayon de courbure est assez petite pour que le champ électrique entre elles soit sensiblement uniforme. Ce cas se présente par exemple pour les condensateurs au papier, très largement utilisés, dont les armatures sont enroulées en forme de bobine.

Puisque l'unité de la constante diélectrique est le *Farad /mètre (F/m)* l'unité de la capacité est le *Farad* conformément à l'équation (III.5). L'unité de la capacité (1F) est la capacité d'un condensateur qui emmagasine une charge de 1C quand il est soumis à une tension de 1V.

III.2.2. Relation entre résistance et capacité pour un même réseau de lignes de champ

La différence de potentiel est obtenue par la circulation du champ :

$$V_1 - V_2 = \int_{A_1}^{A_2} \vec{E} d\vec{l} \quad (\text{III.6})$$

Pour l'interprétation de la figure en résistance, on a :

$$i = \iint_{(S_1)} \vec{j}_1 \cdot \vec{n} d\vec{s} \quad (\text{III.7})$$

Puisque cette intensité est conservatrice, est indépendante de la section, ce qui justifie le choix arbitraire de (S₁). Si la figure présente un condensateur alors sa charge est :

$$Q = \iint_{S_1} \sigma_1 dS_1 \quad (\text{III.8})$$

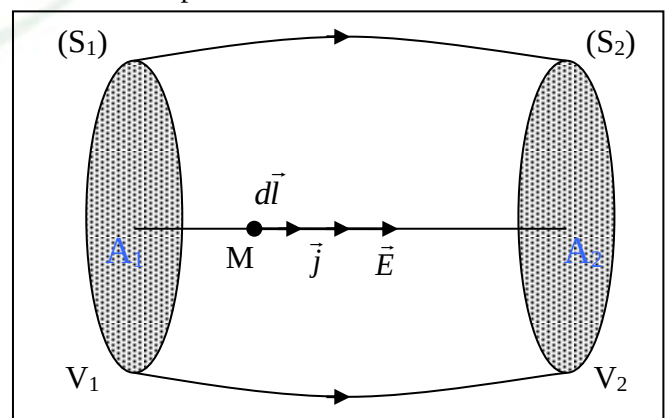


Fig. III.2 : Les surfaces équipotentiels (S₁) et (S₂) sont les armatures du condensateur ou les sections extrêmes de la

A partir des deux égalités suivantes :

$$\begin{cases} \vec{j}_1 = \sigma \vec{E}_1 & \text{Loi d'Ohm locale} \\ \sigma_1 = \epsilon \vec{E}_1 \cdot \vec{n}_1 & \text{Théorème de Coulomb} \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{(III. 9)} \\ \text{(III.10)} \end{matrix}$$

Nous obtenons :

$$i = \iint_{S_1} \sigma \vec{E}_1 \cdot \vec{n} d\vec{S}_1 \quad \text{et} \quad Q = \iint_{(S_1)} \epsilon \vec{E}_1 \cdot \vec{n} dS_1 \quad \text{(III.11)}$$

et donc :

$$\frac{i}{\sigma} = \frac{Q}{\epsilon} \quad \text{Comme} \quad \begin{cases} i = \frac{V_1 - V_2}{R} \\ Q = C(V_1 - V_2) \end{cases} \quad \text{(III.12)}$$

Nous obtenons :

$$RC = \rho \epsilon \quad \text{(III.13)}$$

Avec : $\rho = \frac{1}{\sigma}$ ρ étant la résistivité.

Ce résultat peut être étendu à toutes les structures –condensateur ou résistance– présentant le même réseau de lignes de champ électrique.

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

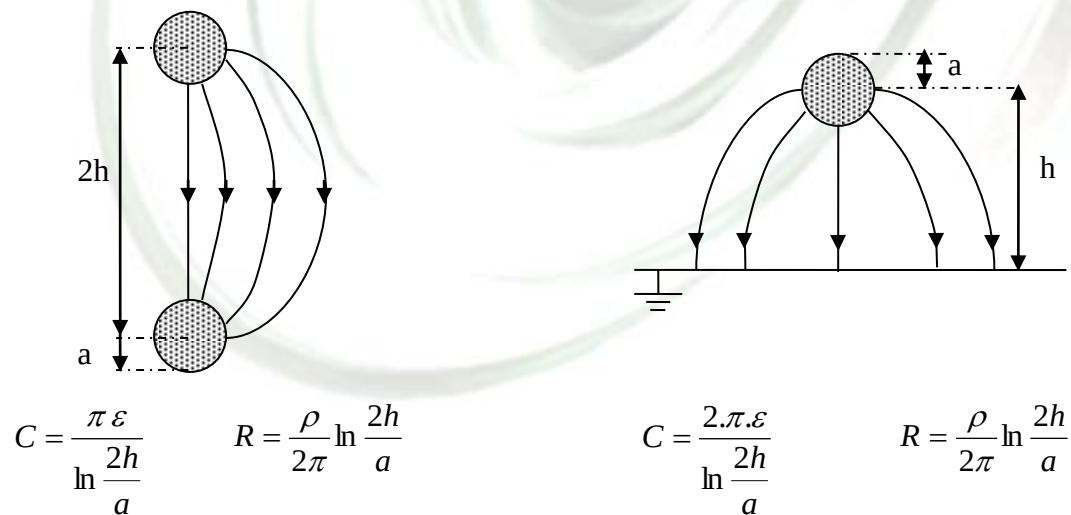


Fig. III.3 : Relation entre capacité et résistance pour des modèles simples

III.2.3. Permittivité équivalente

Nous nous proposons d'établir la notion de permittivité relative *équivalente* pour des systèmes à champ non uniforme pouvant comporter une interface composée de deux milieux diélectriques différents (cas de notre modèle d'isolateur).

Nous supposons le système étudié axisymétrique selon l'axe Oz, de manière à établir un système équivalent en 3 dimensions : en d'autres termes, si on effectue une coupe transversale, le système est identique.

Il s'agit alors de trouver le système correspondant en champ uniforme, soit de trouver un système équivalent comportant deux plaques parallèles séparées par un diélectrique de permittivité relative équivalente, formant ainsi un condensateur plan (Fig. III.4).

En gardant la même distance inter électrodes "d" et la longueur "D" pour les deux systèmes (à champ non uniforme et son équivalent en champ uniforme),

Cette équivalence se fera en égalant les capacités des deux systèmes, ce qui conduit à une largeur "e" variable et, dans le cas de plusieurs diélectriques à une permittivité *équivalente*. Nous procéderons alors comme suit :

La formule théorique correspondante au condensateur plan étant $C_{plan} = \epsilon_0 \frac{(\epsilon_r e)_{équivalente} D}{d}$; celle du système à champ non uniforme $C_{système}$ sera trouvée à l'aide du logiciel ou de sa formule théorique (si celle-ci est connue), par conséquent on déduira le produit (relation III.14) de la permittivité équivalente ($\epsilon_r.équivalente$) par la largeur équivalente (e).

Cette dernière représentant la distance sur laquelle s'établira le champ uniforme du système équivalent qui à la même capacité du système initial.

$$C_{système} = C_{équivalent} \quad \text{d'où} \quad (\epsilon_r e)_{équivalente} = \frac{C_{système} . d}{\epsilon_0 D} \quad (III.14)$$

Nous établirons donc les variations de la distance équivalente (e) en fonction de la distance inter électrodes.

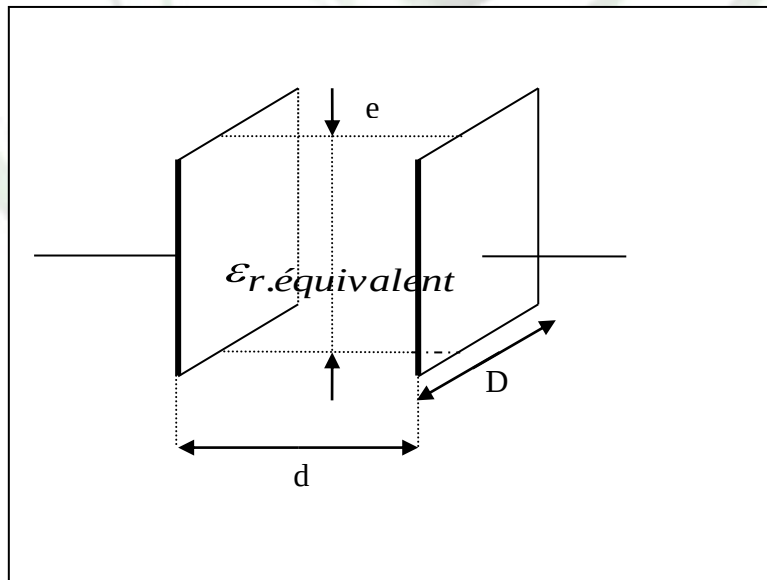


Fig. III.4 : Modèle équivalent en champ uniforme

III.2.3.1. Exemple d'application pour une ligne bifilaire

Appliquons la notion de permittivité équivalente à un modèle simple composé de deux fils conducteurs (ligne bifilaire), comprenant un seul milieu diélectrique (l'air).

Il s'agit d'un système qui conduit à une répartition du champ électrique qui est loin d'être uniforme (Fig. III.5).

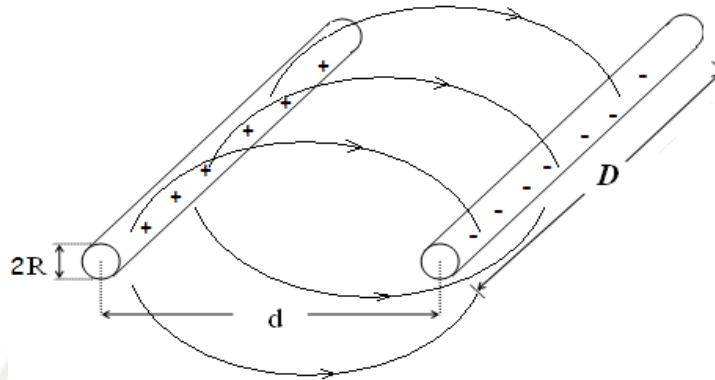


Fig. III.5 : Condensateur à deux fils parallèles

L'expression théorique de la capacité de ce système est donnée par la formule :

$$C_{\text{système}} = \frac{\varepsilon \pi D}{\ln \frac{d}{R}} \quad (\text{III.15})$$

où : C : capacité, en farads (F)
 D : diamètre du conducteur (m)
 d : distance séparant les conducteurs (m)

A partir de l'expression (III.14), nous établirons les variations de capacité du condensateur plan équivalent (Fig. III.6), ce qui nous conduit à établir $(\varepsilon_r e)_{\text{équivalent}}$ en fonction de la distance inter (dans ce cas précis $\varepsilon_{r,\text{équivalente}} = \varepsilon_r = 1$ car il n'y a qu'un seul milieu qui est l'air) :

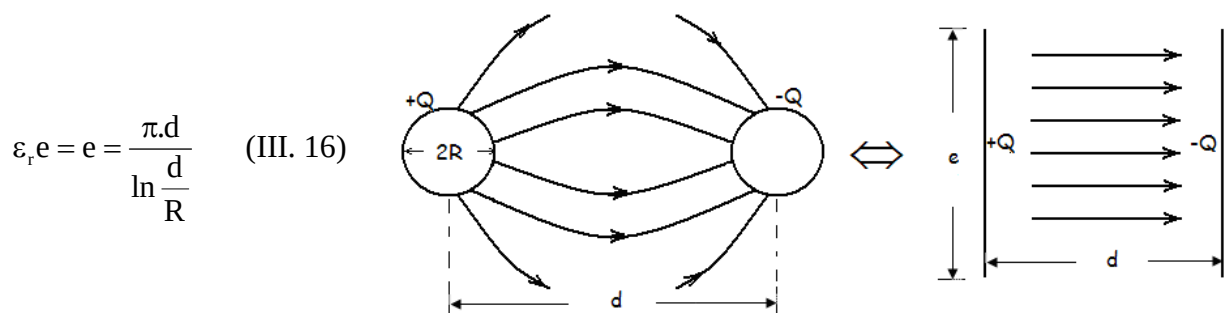


Fig. III.6 : Capacité équivalente d'une ligne bifilaire

Les résultats sont reportés sur le tableau ci-dessous pour un rayon $R = 0,5\text{cm}$ et une longueur de la ligne $D = 50\text{cm}$.

d (cm)	5	10	15	20	25	30	45
$C_{\text{système}}(\text{pF})$	6.040	4.643	4.089	3.770	3.555	3.397	3.091
$(\epsilon_r \cdot e)_{\text{équivalent}}(\text{cm})$	6.82	10.49	13.85	17.03	20.08	23.02	31.42

La figure III.7 représente la variation $e(d)$ de la ligne bifilaire. Nous voyons bien que les variations de e en fonction de la distance inter électrodes présentent une allure croissante.

Cela signifie que les lignes de champ se répandent de manière beaucoup plus large quand la distance inter électrodes augmente. Le condensateur plan équivalent possède donc une largeur qui augmente avec d : il en résulte une capacité qui diminue très modérément avec la distance d .

A titre d'exemple, pour une distance de 5 puis de 45 (rapport de 9), la capacité n'est réduite que de moitié.

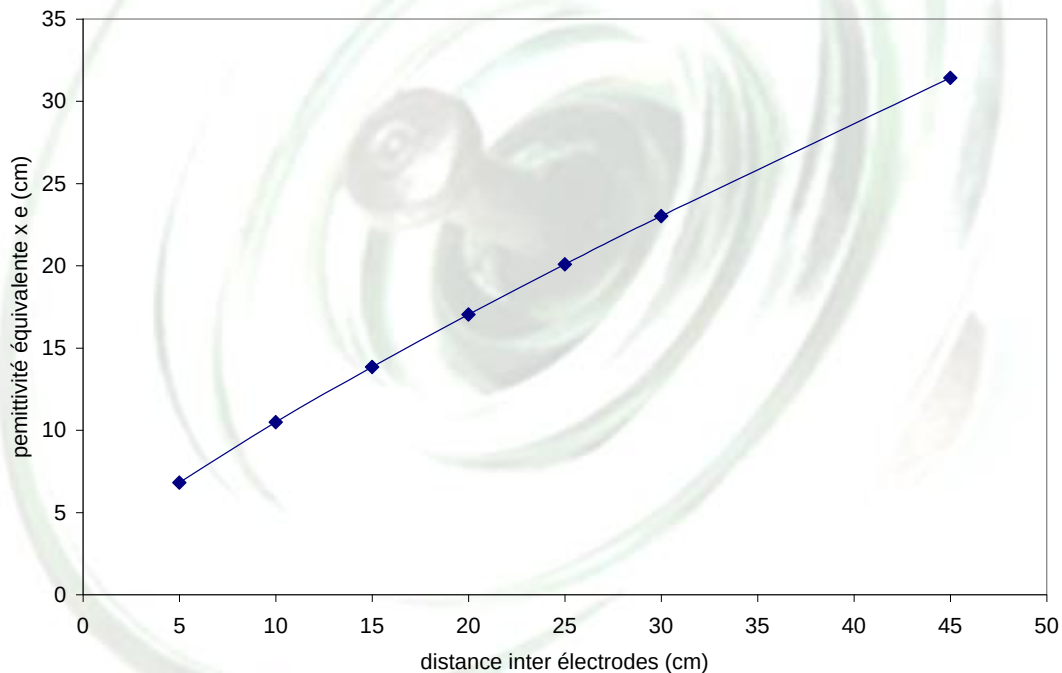


Fig. III.7 : Variation de "e" équivalent en fonction de la distance inter électrodes

III.3. Méthodes d'évaluation du champ électrique

Lorsque les méthodes analytiques deviennent impossibles à appliquer pour certains problèmes de calculs de champ, il est nécessaire d'avoir recours aux méthodes numériques. Celles-ci présentent l'avantage de résoudre d'innombrables problèmes, impossibles à résoudre autrement.

Citons pour mémoire les autres méthodes existantes :

III.3.1. Méthodes expérimentales

Au moyen d'un voltmètre électrostatique (sondes de champ), promené aux alentours de l'objet sous tension. L'objet doit évidemment être déjà fabriqué. Cette méthode est cependant utilisée pour des vérifications dans le contexte réel. Il faut prendre garde à ce que la mesure ne déforme pas le champ.

III.3.2. Méthodes analogiques

Les plus connues sont :

- Les méthodes graphiques, par lesquelles on trace un ensemble de lignes orthogonales.
- La cuve électrolytique; des électrodes ayant la forme de l'objet sont immergées dans un liquide semi-conducteur. L'objet est mis sous tension ($\leq 50V$), la cuve à la terre et les champs sont relevés au moyen de sondes.
- Les réseaux d'impédances dans lesquels le "fluide de la cuve rétro statique" est remplacé par un réseau de résistances; ces tensions sont mesurables aux noeuds.

III.3.3. Méthodes analytiques et numériques

- **Transformations conformes**; méthodes utilisant des passages d'un plan complexe, dans lequel les champs sont simples, à un autre plan complexe représentant les champs réels. Les formules de passage sont difficiles à trouver.

- **Principe des charges fictives**, basé sur la simulation de la distribution superficielle de charges électriques à la surface des électrodes. La résolution implique le calcul de coefficients de potentiel, donc ici également calculs matriciels.

- **Différence finie**; méthode numérique basée sur la dérivée du potentiel. Le système d'équation résultant est traité sous forme matricielle. Cette méthode n'est pas pratique ou peu précise lorsque les champs ne sont pas homogènes.

- **Eléments finis**. Parente proche de la différence finie, cette méthode consiste à "minimiser l'énergie" dans la région d'intérêt. Celle-ci est découpée en petits éléments (*triangles, rectangles, ...*) dans chacun duquel on admet une variation linéaire ou quadratique du champ, ce qui permet une résolution matricielle simple.

Pour une bonne précision, il est cependant nécessaire de diviser une région comportant de grandes variations de champ en de plus nombreux éléments (Fig. IV.8).

Cette méthode est très utilisée, car les mêmes algorithmes sont valables pour toutes sortes de champs (magnétiques, thermiques, ...).

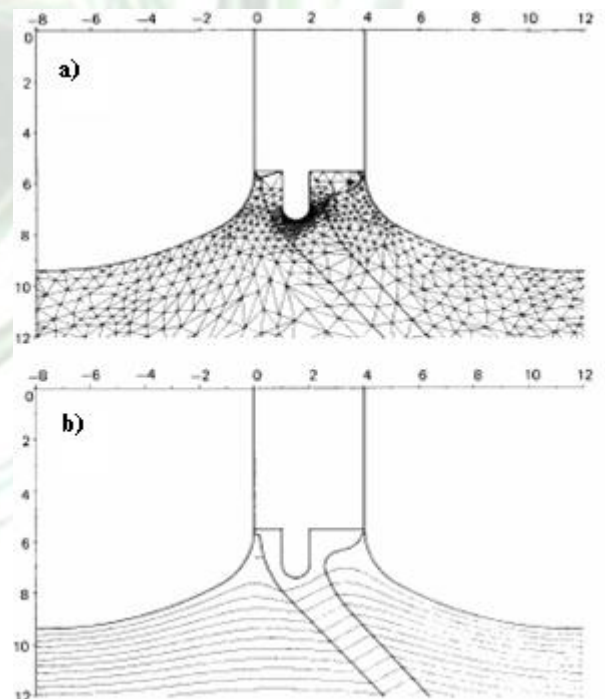


Fig. IV.8 : (a) Découpage en éléments triangulaires (b) résultat

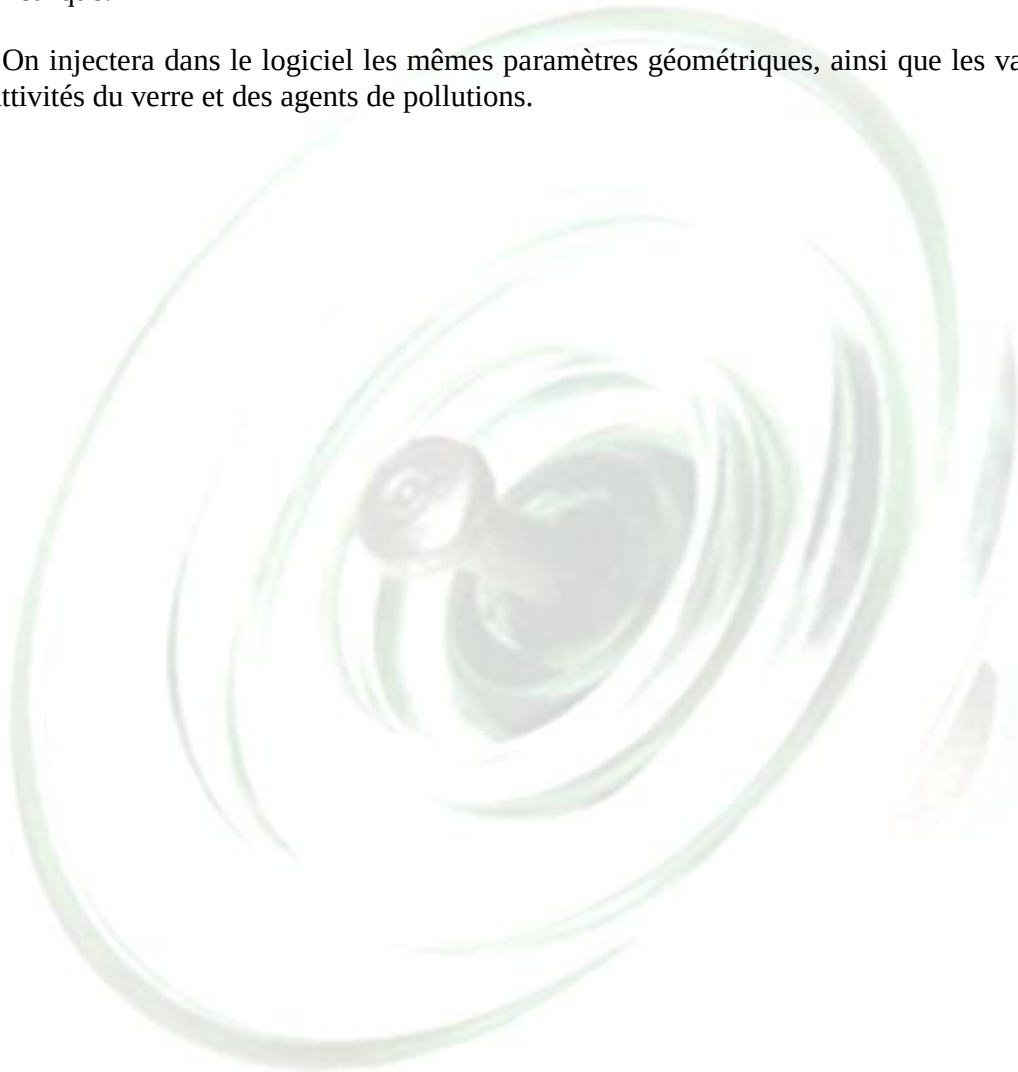
III.4. Simulation du modèle d'isolateur

L'approche par simulation de notre modèle a été faite à l'aide d'un logiciel à deux dimensions 'FEMM 4.2 ' utilisant la méthode des éléments finis.

La configuration simple de notre modèle d'isolateur nous a permis une représentation relativement aisée (Fig. III.9).

En procédant à une 'coupe' transversale, on démontre un élément d'isolateur axisymétrique.

On injectera dans le logiciel les mêmes paramètres géométriques, ainsi que les valeurs des permittivités du verre et des agents de pollutions.



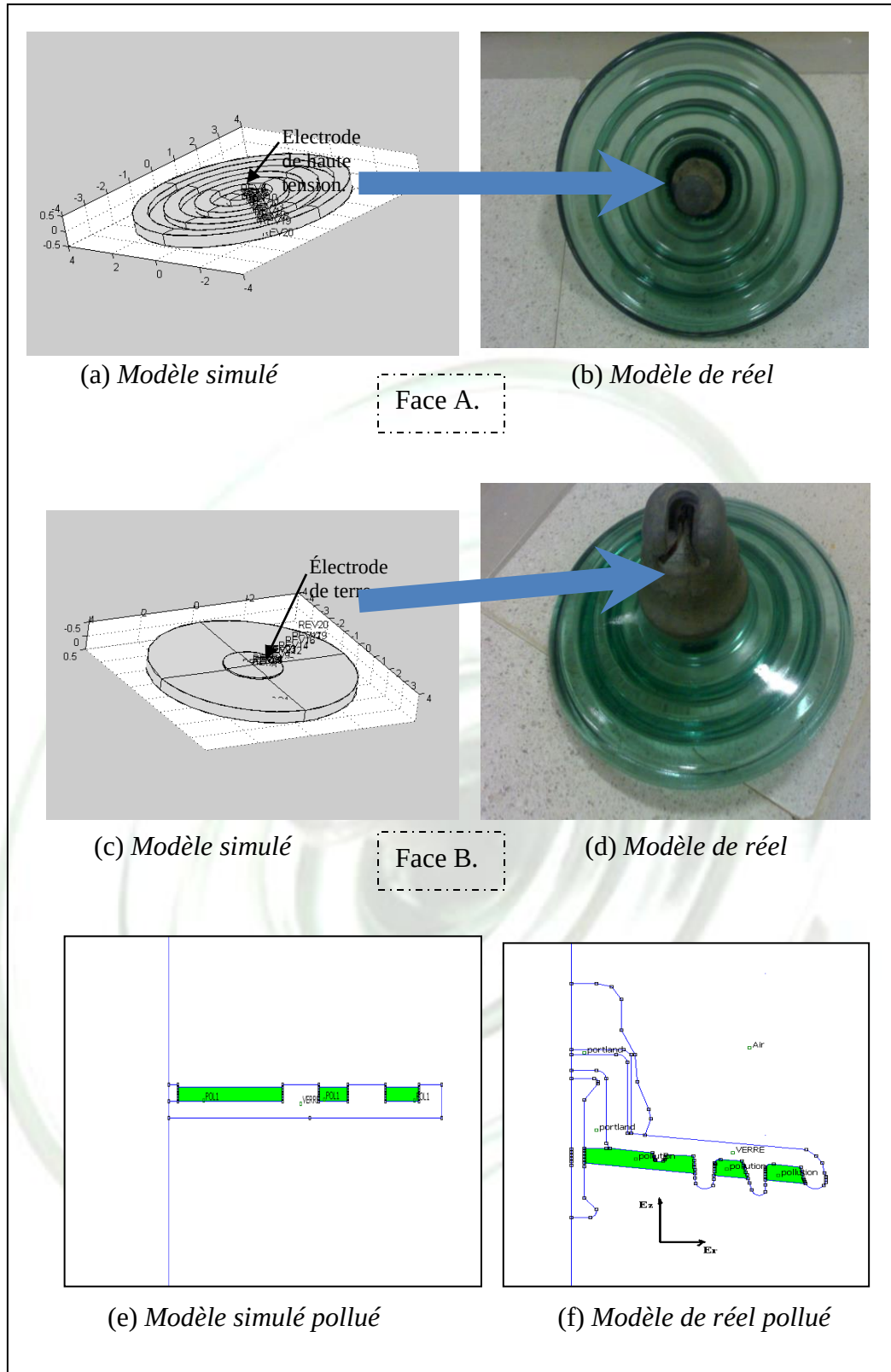


Fig III.5. Modèle et photo de l'isolateur 1512L a l'état propre et pollué.

L'utilisation du logiciel nous a permis de voir la distribution du champ électrique, du vecteur déplacement ainsi que la répartition du potentiel.

De plus, nous l'avons exploité pour déterminer la capacité du système et l'énergie dissipé par les zones de pollution.

Le modèle schématisé ainsi en deux dimensions prendra sa troisième dimension (axisymétrique par rapport à l'axe Oz). L'analyse de la répartition du champ électrique ou du potentiel sera perçue sur une *section plane* du modèle, ce qui sous-entend que la répartition est la même sur toute l'espace d'un même point symétrique du système, ce qui a pour conséquence de négliger les effets aux bords.

III.4.1. Application du logiciel à des systèmes connus

Afin de valider le modèle d'isolateur par la simulation nous avons appliqué les mêmes paramètres (conditions aux limites, dimensions des éléments de découpage des différentes régions,...) sur deux modèles connus.

Le premier choix s'est porté sur un condensateur plan composé de deux électrodes planes en parallèles, le deuxième sur la ligne bifilaire.

Les expressions théoriques des capacités des deux systèmes étant connues, les résultats obtenus par simulations sont comparés avec les calculs théoriques.

Remarque :

La capacité est calculée à partir du rapport entre la charge sur l'une des électrodes (donnée par le logiciel) et la différence de potentiel établie entre les deux électrodes du système.

a- Condensateur plan

Le condensateur le plus simple est composé de deux plaques métalliques séparées par un isolant ou un diélectrique (Fig. III.10 a). On utilise donc la formule théorique déjà établie (III.5) :

$$C_{théorique} = \frac{\epsilon_0 S}{d}$$

En prenant les dimensions suivantes : D = 100 cm, e = 20 cm, d = 0.05 cm.

La capacité obtenue sera :

$$C_{théorique} = 3,542 \text{ nF}$$

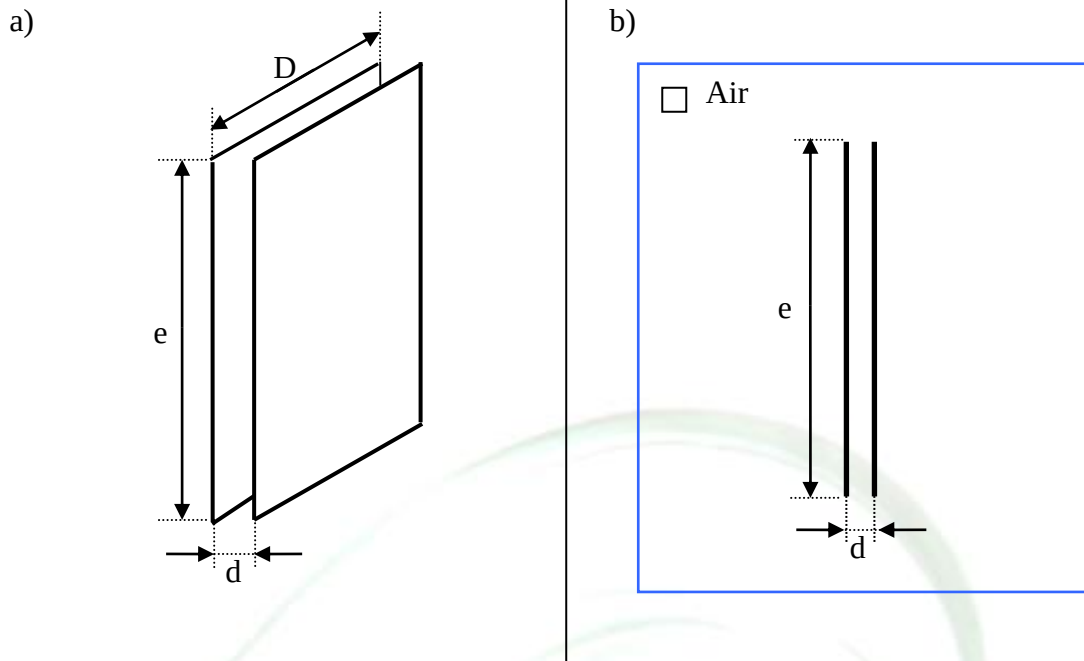


Fig. III.10 : Simulation d'un condensateur plan

Afin de simuler la même capacité calculée théoriquement, nous traçons deux lignes parallèles de longueur $e = 20$ cm distantes de $d = 0.05$ cm, nous choisissons une profondeur du modèle (Depth) $D=100$ cm, l'une des plaques portée sous une tension de 1 V, l'autre sous 0 V. Le milieu choisi qui est l'air, dont nous avons fixé la permittivité relative ϵ_r à 1, (Fig. III.10 b). Les dimensions des éléments triangulaires de découpage sont ceux pris par le logiciel par défaut, pour les conditions aux limites (trait en bleu) nous avons pris une densité de charge nulle sur tout le pourtour.

La capacité du système ainsi défini, obtenue à l'aide du logiciel est :

$$C_{\text{simulée}} = 3,579 \text{ nF}$$

• Remarque

-Les deux capacités obtenues sont presque identiques, cependant la différence de 1% peut être expliquée par les effets de bords pris en compte par le logiciel, et non considérés par l'expression théorique qui suppose des plaques infiniment grande, ainsi qu'une répartition uniforme du champ électrique entre les deux plaques. C'est pourquoi $C_{\text{théorique}}$ et $C_{\text{simulée}}$ seront d'autant plus proches que la distance inter électrodes ' d ' sera très petite devant les dimensions des plaques ($d \ll e$ et $d \ll D$).

b- Capacité de deux fils parallèles

Deux fils conducteurs parallèles (Fig. III.11a) forment un condensateur dont la capacité est donnée par la formule :

$$C = \frac{\epsilon \pi D}{\ln \frac{d}{R}} \quad (\text{III.17})$$

En prenant les dimensions suivantes : $R = 0.5$ cm, $d = 15$ cm, $D = 50$ cm.

$$C_{théorique} = 4.089 \text{ pF}$$

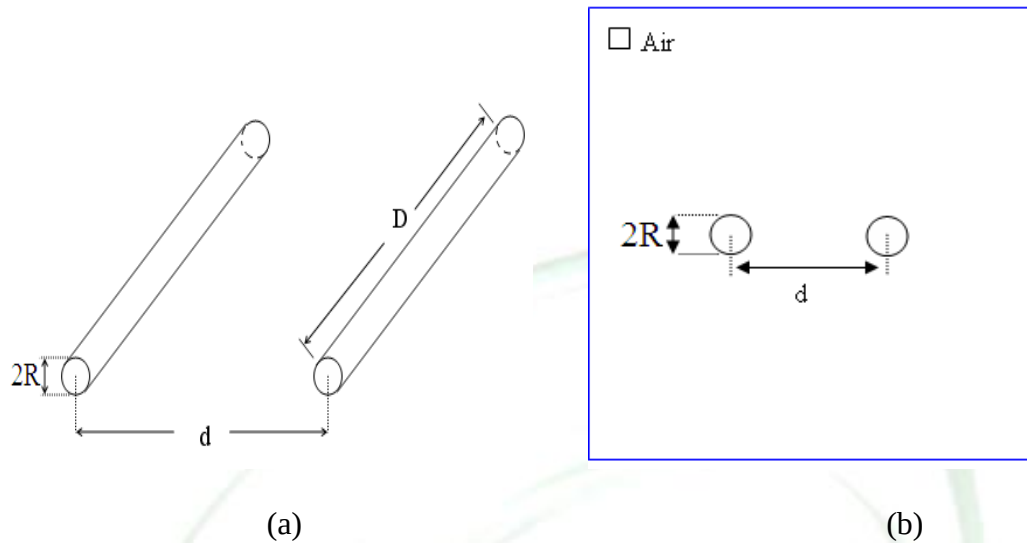


Figure III.11 : Simulation de la capacité de deux fils parallèles

Pour simuler le système comportant deux fils conducteurs parallèles, nous traçons deux cercles identiques d'un diamètre $2R = 1$ cm, espacés d'une distance inter électrodes $d = 15$ cm. Nous choisissons une profondeur du modèle (Depth) $D=50$ cm qui représentera la longueur des conducteurs. Le milieu choisi est l'air ($\epsilon_r=1$), un conducteur mis sous une tension de 1 V, l'autre sous 0 V, les mêmes conditions décrites dans le modèles plan-plan sont considérées (Fig. III.11 b).

La capacité du système ainsi définit, obtenue à l'aide du logiciel est :

$$C_{simulée} = 4.080 \text{ pF}$$

Nous remarquons, dans ce cas de figure, que la capacité obtenue par le logiciel est remarquablement proche de celle calculée théoriquement. Une meilleure précision pourrait être obtenue en augmentant le nombre d'éléments de découpage, mais le maillage pris par le logiciel par défaut donne déjà des résultats très acceptables.

Conclusion:

Les résultats obtenus pour les deux modèles précédents, confirme la bonne représentation d'un modèle réel à trois dimensions (3D) à l'aide du logiciel à deux dimensions (2D). De plus nous nous sommes assuré que nous avons utilisé correctement les paramètres du logiciel : nous pouvons par conséquent l'utiliser pour le modèle d'isolateur.

IV.1. INTRODUCTION

Dans cette dernière partie, nous avons adoptés une approche du modèle d'isolateur, Ceci nous a permis une meilleure compréhension des phénomènes liés aux systèmes comprenant une interface air - matériau diélectrique (verre), notamment. La répartition du Potentiel, champ électrique et l'induction électrique.

IV.2. SIMULATION DU MODELE DE LABORATOIRE

L'approche par simulation de notre modèle a été faite à l'aide d'un logiciel à deux dimensions "FEMM 4.2" utilisant la méthode des éléments finis.

La configuration simple de notre modèle nous a permis une représentation relativement aisée (Figure IV.1)

On injecte dans le logiciel les mêmes paramètres géométriques considérés lors des expérimentations, ainsi que les valeurs des permittivités du verre et des agents pollués.

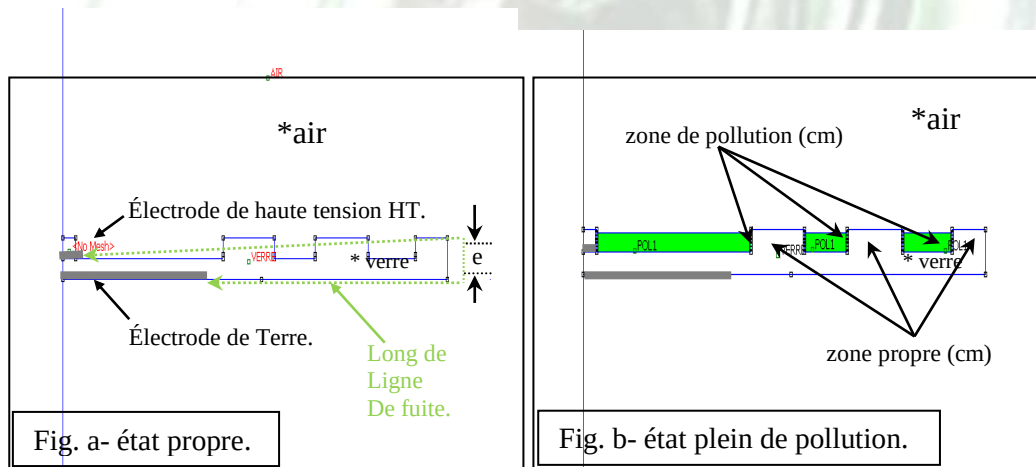


Figure IV.1. Représentation du modèle de laboratoire.

IV.3. CALCUL DU CHAMP ÉLECTRIQUE

Afin de calculer le champ électrique, nous avons utilisé le logiciel FEMM. Ce dernier est une suite des programmes permettant de donner la répartition du champ électrique en deux dimensions.

Pour cela, nous avons introduit, dans ce logiciel, notre modèle avec toutes ses spécifications (formes et nature des électrodes, nature et dimensions de la pollution, permittivité des différents milieux, tension appliquée, conditions aux limites,...).

IV.4. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

V.4.1. Distribution de potentiel

Nous visualisons la répartition de potentiel (figure (IV.2, IV.3)), et on tracé aussi la variation de ses grandeur sur le long de ligne de fuite (figure (IV.4, IV.5)), dans les deux cas propre et plein de pollution.

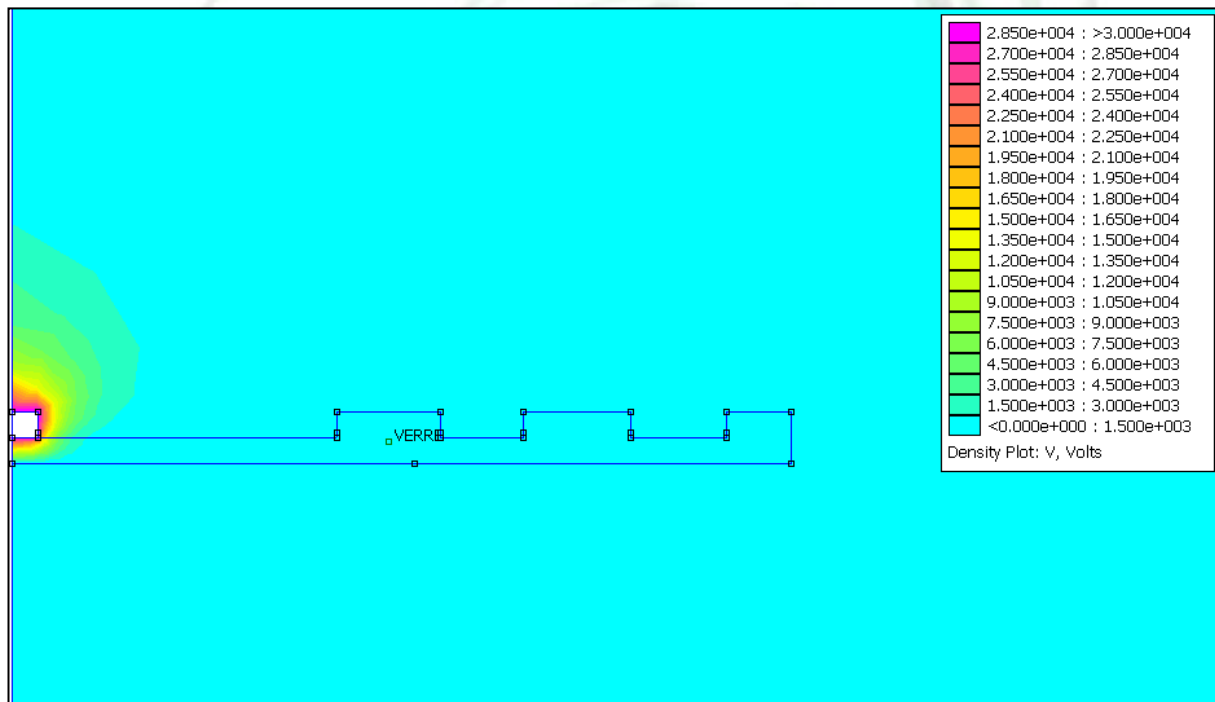


Figure IV.2. Distribution de potentiel à l'état propre.

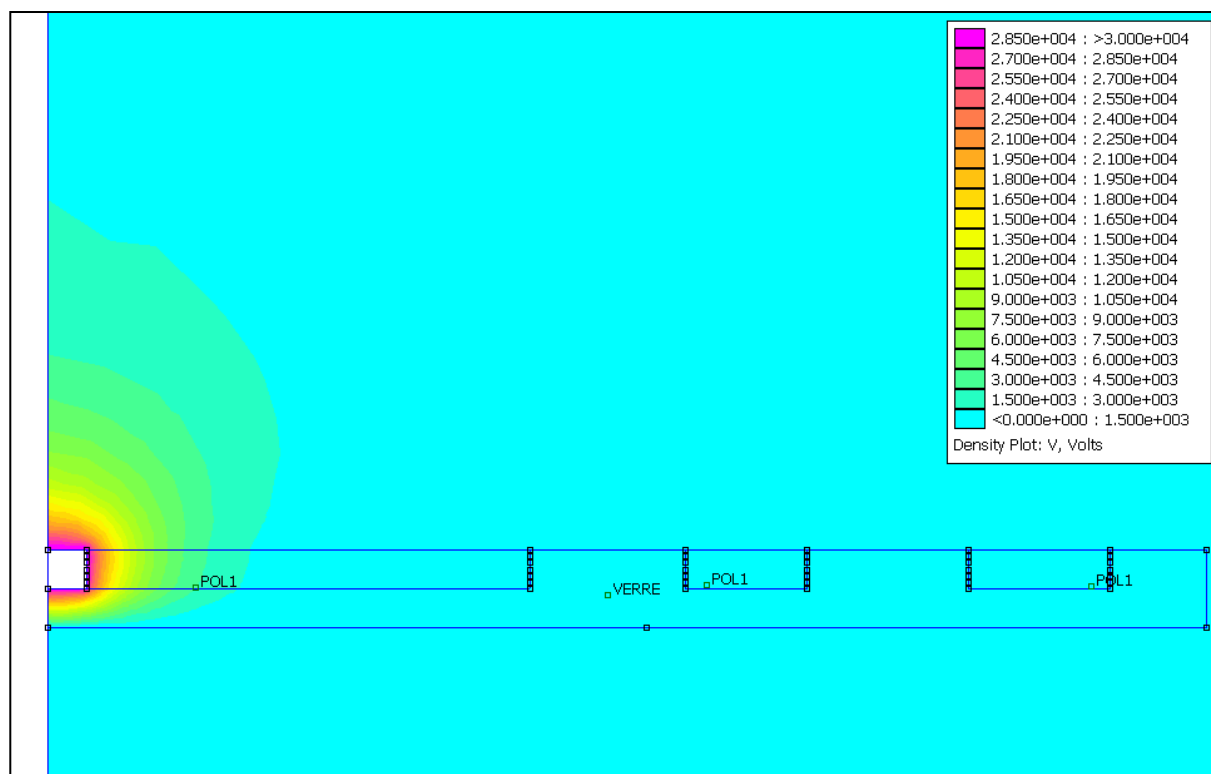


Figure V.3. Distribution de potentiel à l'état plein de pollution
permittivité égale à 15.

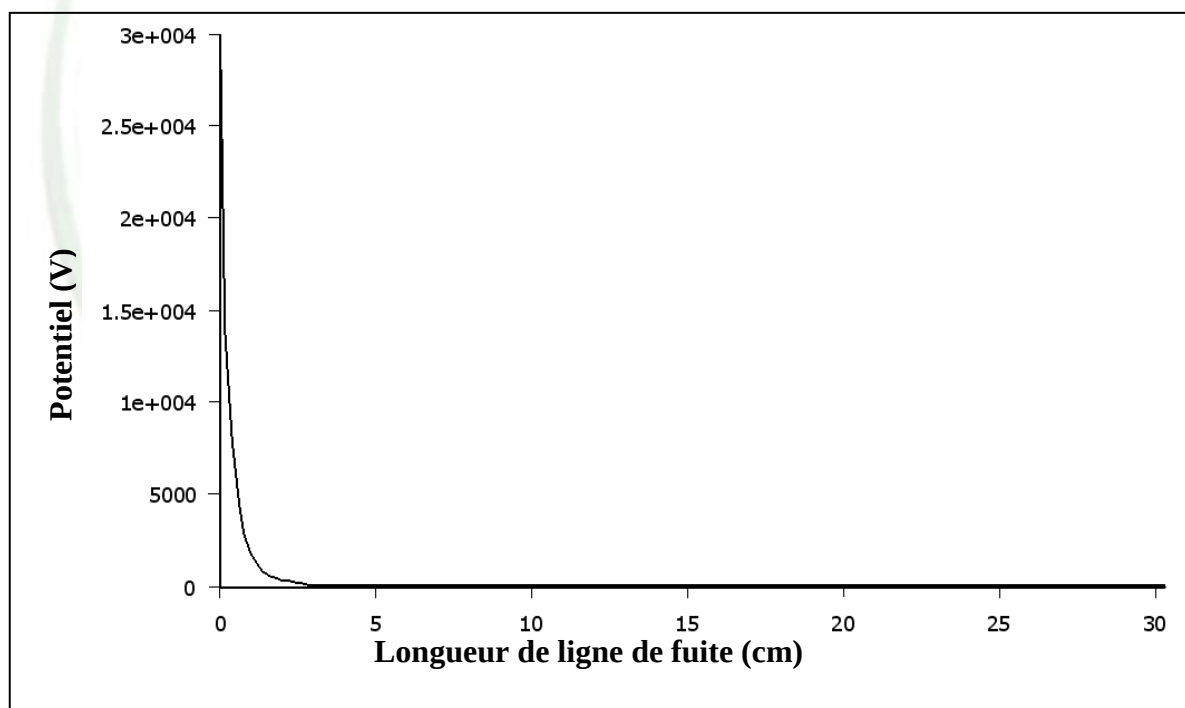


Figure IV.4. Variation de potentiel sur le long de ligne de fuite à l'état propre.

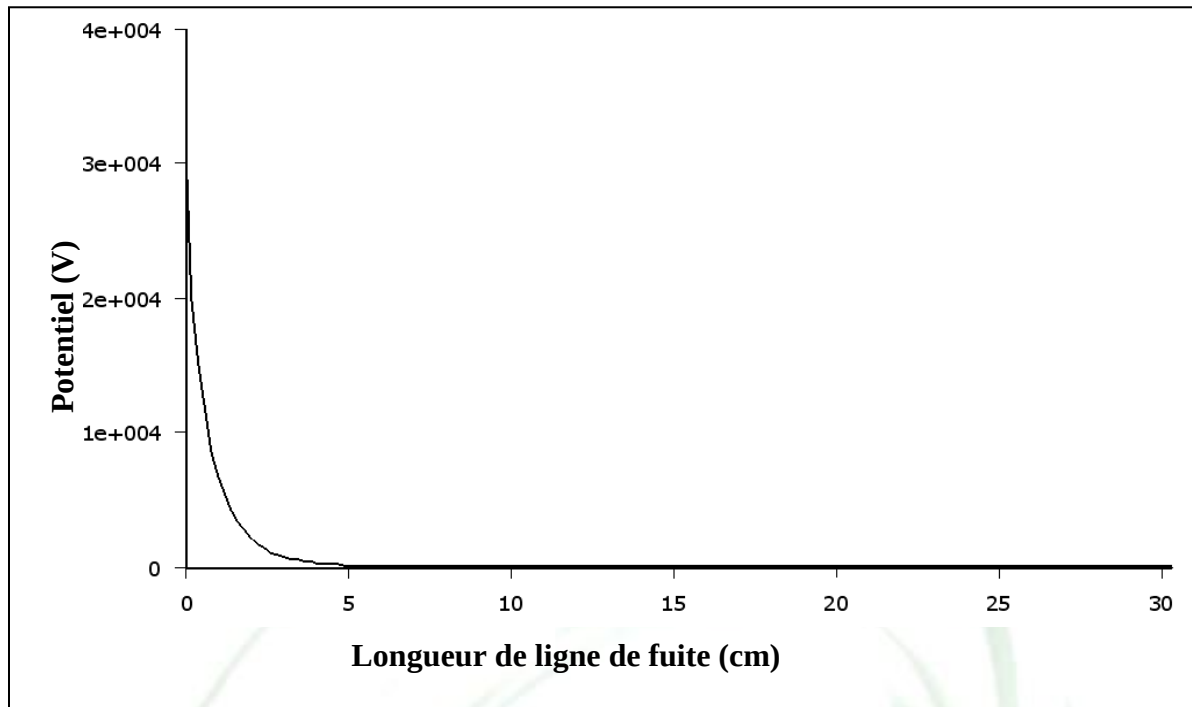


Figure IV.5. Variation de potentiel sur le long de ligne de fuite à l'état plein pollution permittivité égale à 15.

Nous remarquons que les surfaces équipotentiellles sont des surfaces cylindriques présentant des profils elliptiques (Figure (IV.2, IV.3)), elles sont plus important que la plaque et sous pollution.

IV.4.2. Répartition (Distribution) du champ électrique

Dans le cas de la plaque propre (figure IV.6), le champ électrique est intense près de l'électrode active (haute tension). Il diminue directement vers l'électrode de terre.

La figure IV.7, nous montrant l'influence de la pollution, il ressort de ces caractéristiques les remarques suivant :

- Le champ électrique est important dans la zone près de l'électrode active.
- Le champ électrique est pratiquement nul à l'intérieur des deux électrodes.
- Le champ électrique est plus important du côté intérieur des électrodes.
- Le champ électrique est nul dans les zones propres.
- La première zone de pollution sere a augmenté l'électrode de haute tension par contre elle diminue la ligne de fuite.

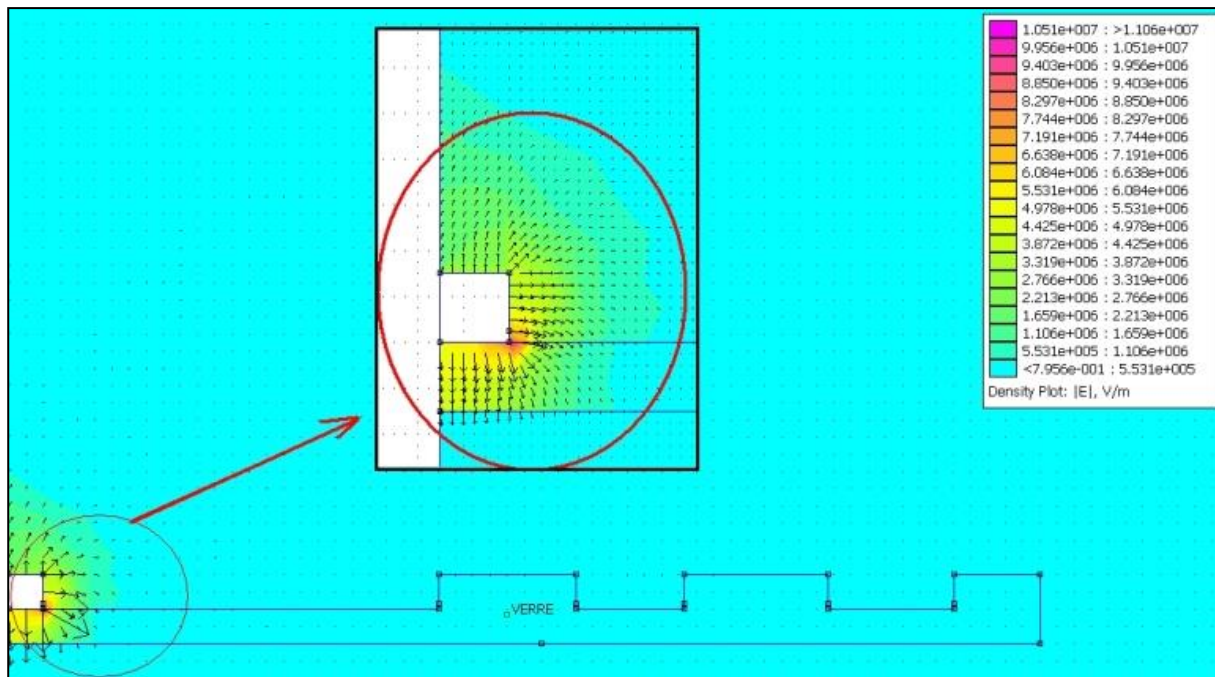


Figure IV.6. Répartition du champ électrique à l'état propre.

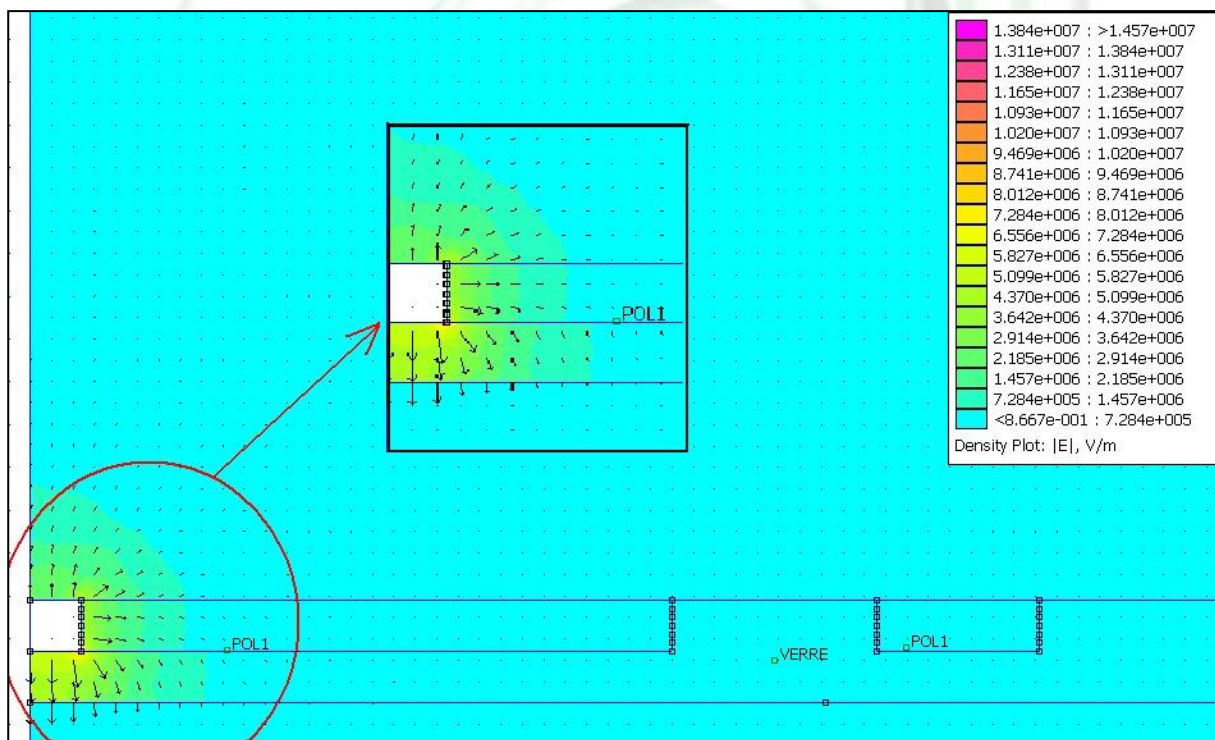


Figure IV.7. Répartition du champ électrique à l'état plein de pollution permittivité égale à 15.

IV.4.2.1. La variation du champ électrique en fonction de long de fuite

Les figures (IV.8, IV.9), présente la variation du champ électrique en fonction de longueur de fuite, dans le cas d'une plaque propre (figure IV.8), le champ électrique atteint sa valeur maximale à l'extrémité de l'électrode de haute tension, et diminue rapidement jusqu'à l'annulation pour les distances supérieures à 4 cm (de l'électrode de haute tension).

Dans le cas de plaque pollué (figure IV.9), le champ électrique est un peu intense le long de premier zone propre.

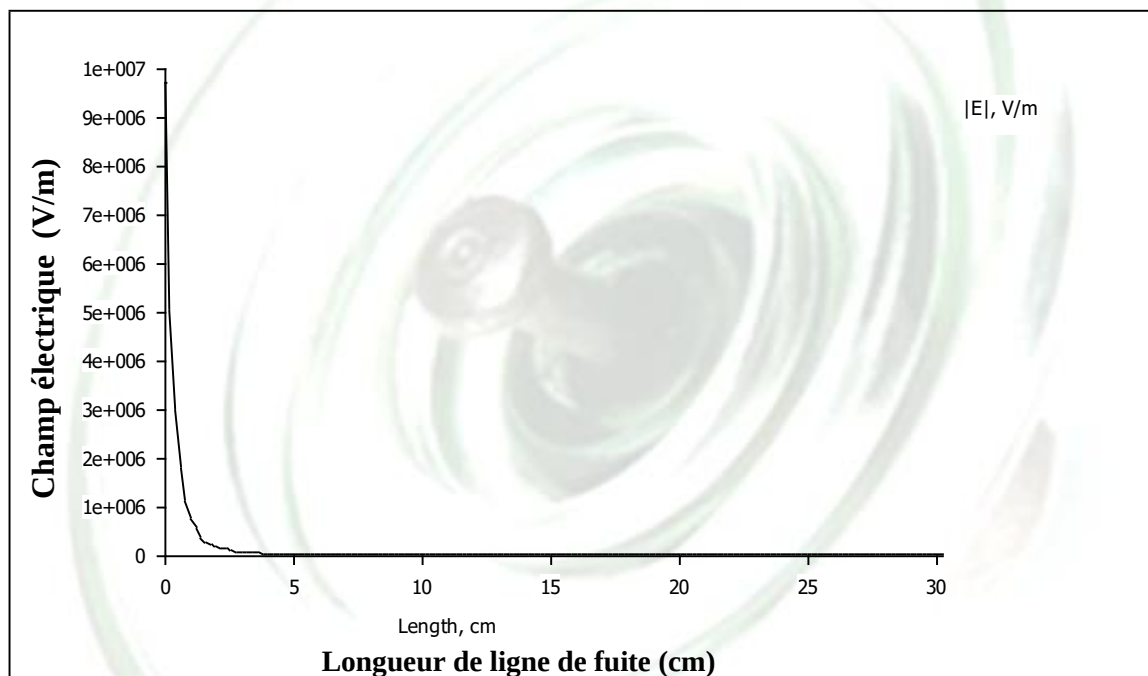


Figure IV.8. Variation du champ électrique sur le long de ligne de fuite l'état propre.

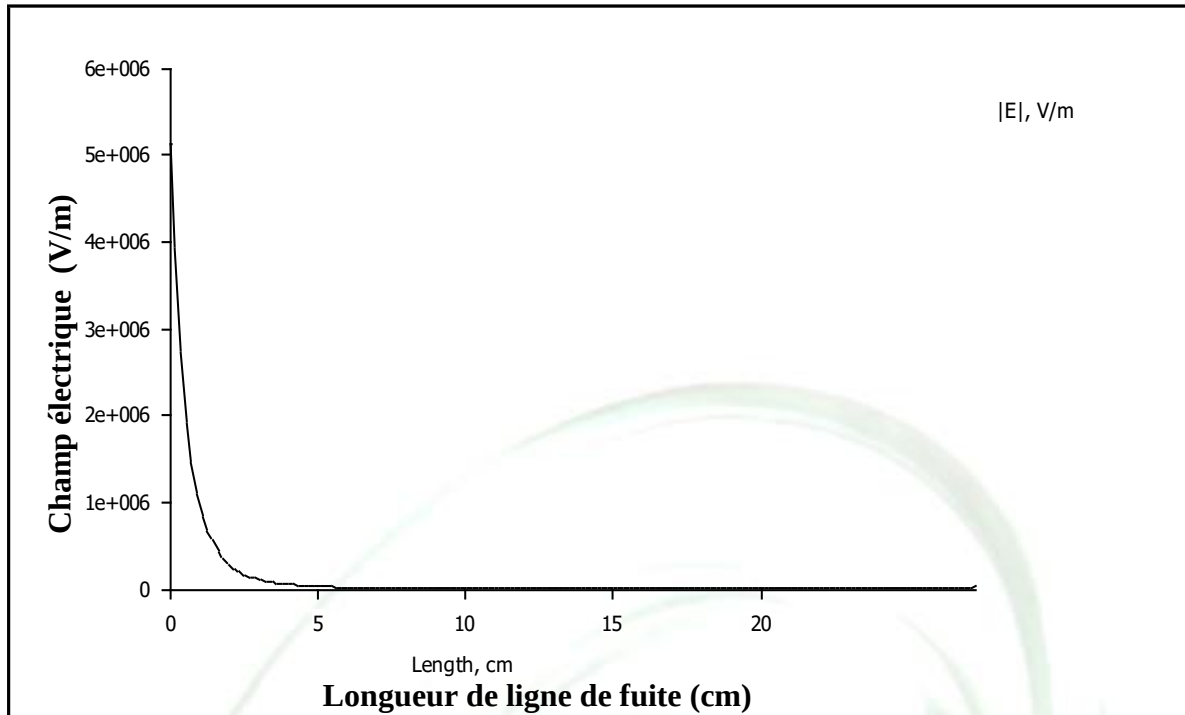


Figure V.9. Variation du champ électrique sur le long de ligne de fuite l'état plein pollution permittivité égale à 15.

IV.4.3. Répartition de l'induction électrique

La répartition de l'induction électrique D , montre qu'elle est concentrée d'une manière plus importante dans le verre pour les deux cas (propre et pollué), (figure(IV.10, IV.11)) celle-ci dépend du milieu, elle est plus important dans les diélectriques de permittivité plus grand, les variations de sa composante (permittivité) normale à la surface de la plaque (ligne de fuite).

Aussi on remarque que l'induction en cas polluée se prend en naissance dans la première zone polluée et se dirige parallèlement à la surface de pollution.

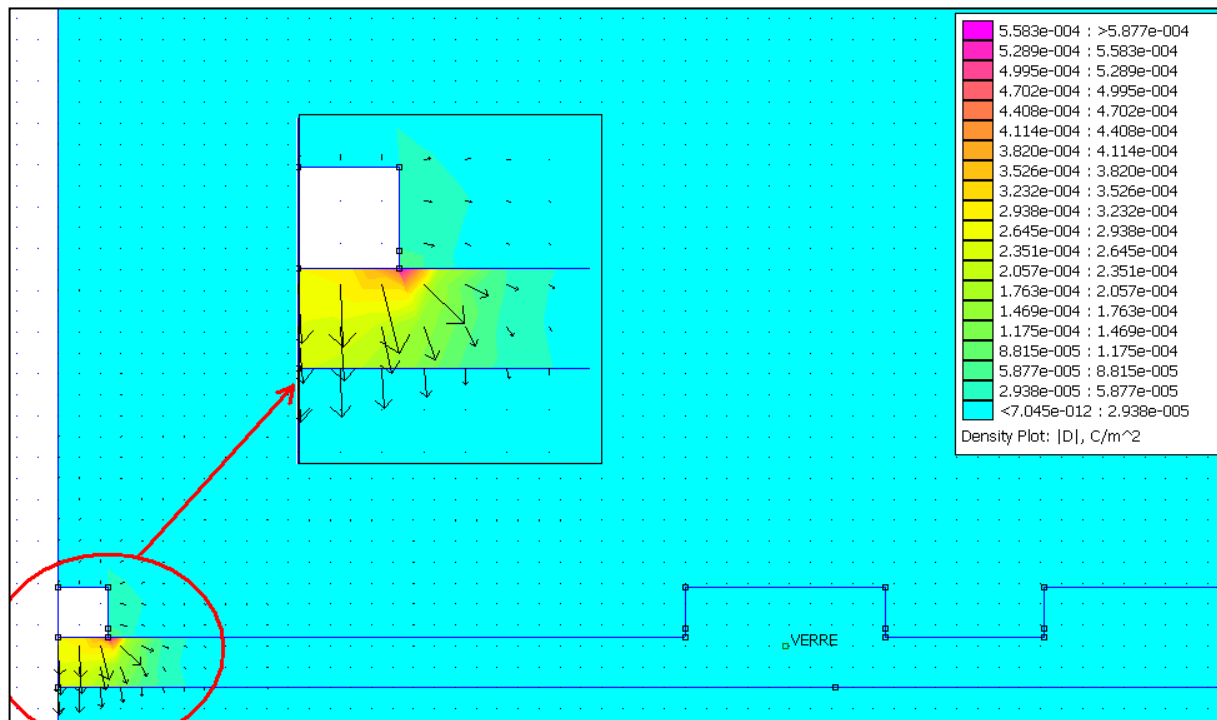


Figure IV.10. Répartition de l'induction électrique à l'état propre.

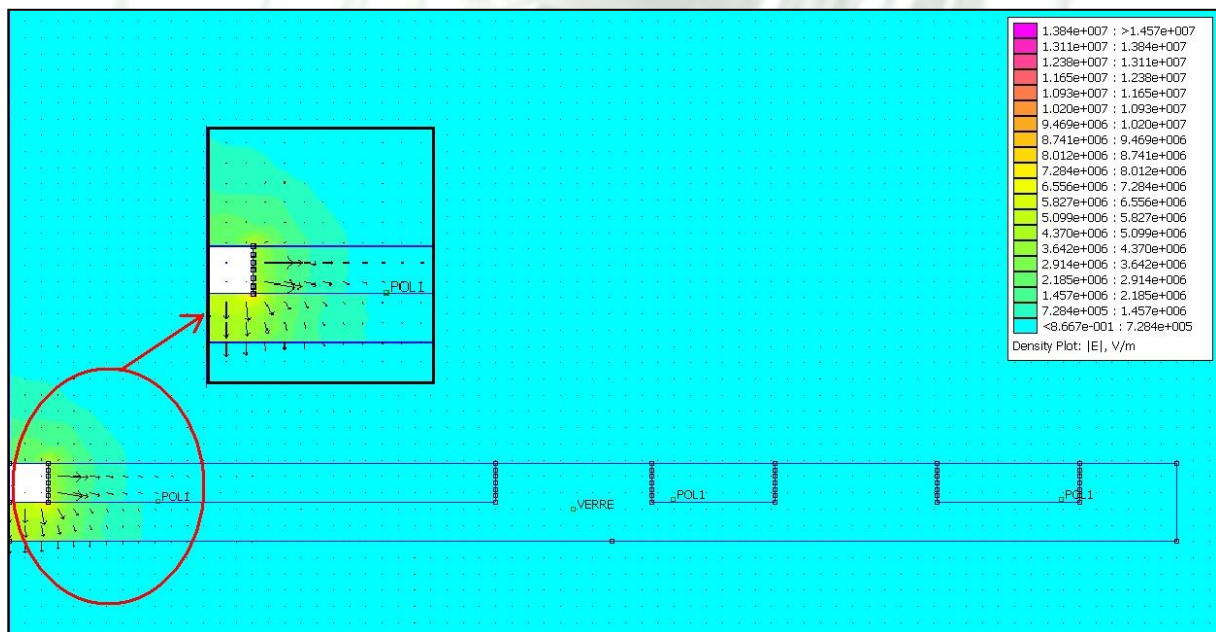


Figure IV.11. Répartition de l'induction électrique à l'état plein pollution permittivité égale à 15.

La variation de l'induction électrique sur le long de ligne de fuite montre, que tant que le champ s'annule, il apparaitre donc des charges égales et des signes opposées sur les électrodes, a l'état propre (Figure(IV.12)).

A l'état plein pollution, la ligne de fuite sera diminuée a cause de l'augmentation du niveau de pollution, on remarque qu'il y'a une diminution importante de la composante normale de l'induction électrique entre 0 et 2 cm dépend essentiellement de l'accélération du champ électrique, puis s'annule hors de cette zone jusqu'à le point de contact avec l'électrode de masse. (Figure(IV.13)).

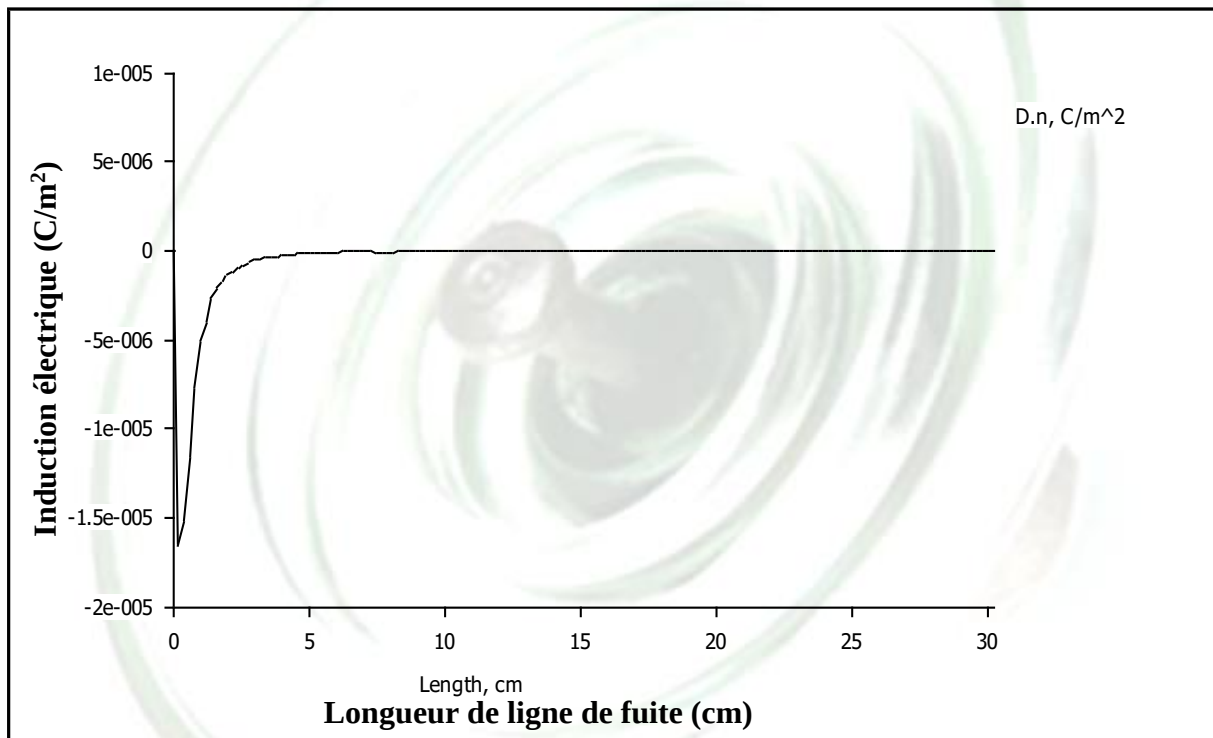


Figure IV.12. Variation du l'induction électrique sur le long de ligne de fuite l'état propre.

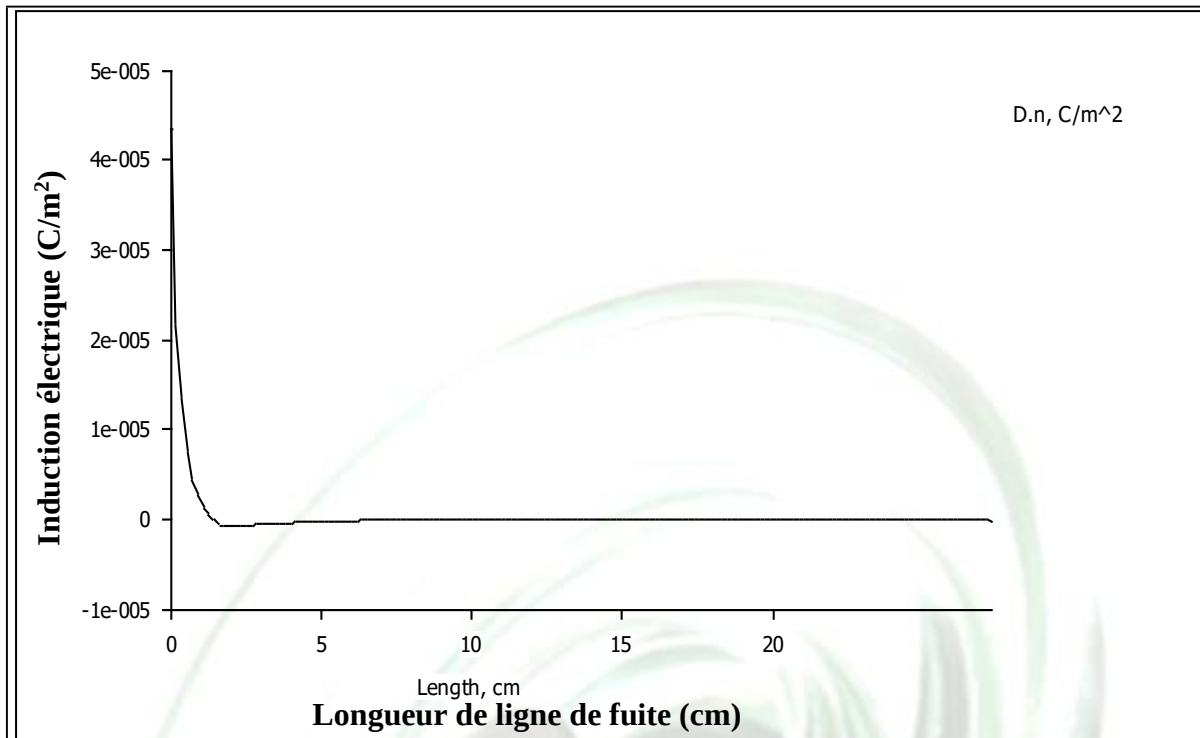


Figure IV.13. Variation du l'induction électrique sur le long de ligne de fuite l'état plein pollution permittivité égale à 15.

IV.5. ETUDE D'INFLUENCE DE POLLUTION SUR L'ISOLATEUR :

IV.5.1. l'influence de la permittivité de pollution :

Des études antérieurs à confirmer que la variation de la permittivité des différentes sources de pollution (sable, ciment, etc.) faire varie en fonction de humidification de ces derniers, cette variation de permittivité est entre 3 et 15 pour cela on a pris 5 valeurs de permittivité comme suit : 3, 6, 9, 12 et 15.

IV.5.1.1. l'influence de la permittivité sur l'énergie stockée dans la pollution :

L'énergie électrique c'est l'image de la résistance électrique équivalente des zones polluées dans chaque configuration (niveau de pollution dans les dépôts). La figure IV.14 présente la variation de l'énergie électrique stockée dans les zones polluées. Nous remarquons

que l'énergie électrique stockée dans la pollution augmente avec l'augmentation de la permittivité, ce dernier due a l'augmentation de l'induction de la pollution, on prévoit que la tension de contournement et proportionnelle à la permittivité

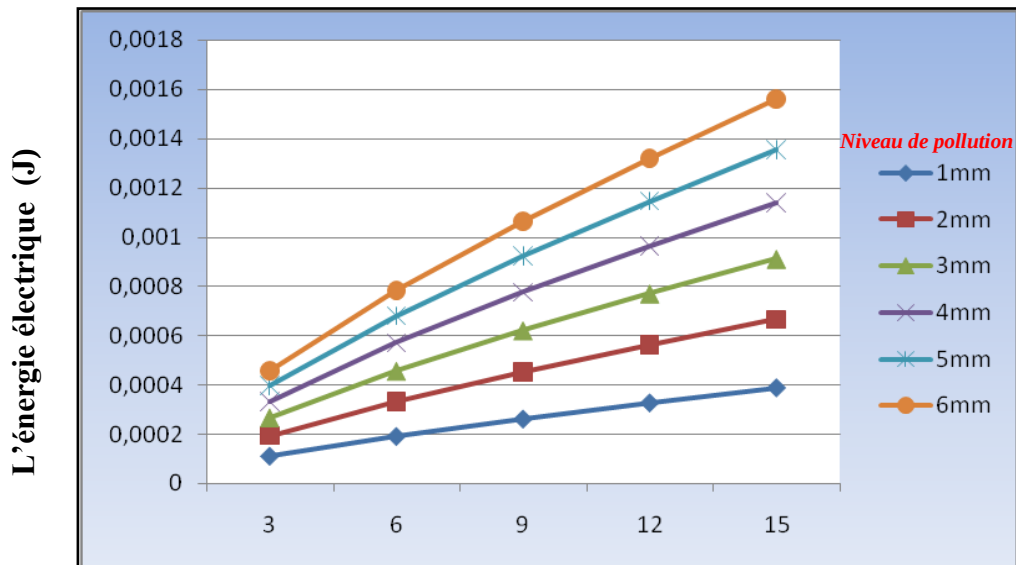


Figure IV.14. Variation de l'énergie électrique stockée dans la pollution en fonction de la permittivité.

IV.5.1.2. l'influence de la permittivité sur le champ électrique dans la pollution :

D'après les figures IV.15 et IV.16, on illustre que avec l'augmentation de la permittivité, la valeur absolue du champ électrique radiale augmente linéairement avec la permittivité par contre la valeur absolue du composante axiale diminue qui signifie que la conduction du courant de fuite se dirige vers la surface des agents pollués, en conséquence le contournement d'isolateur se fait ^{superficiel}.

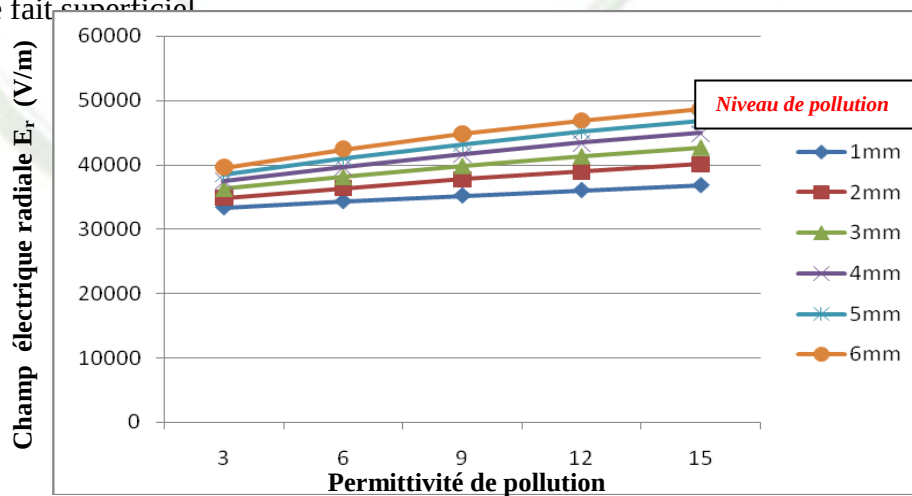


Figure IV.15. Variation de la composante radiale E_r du champ électrique dans la pollution en fonction de la permittivité.

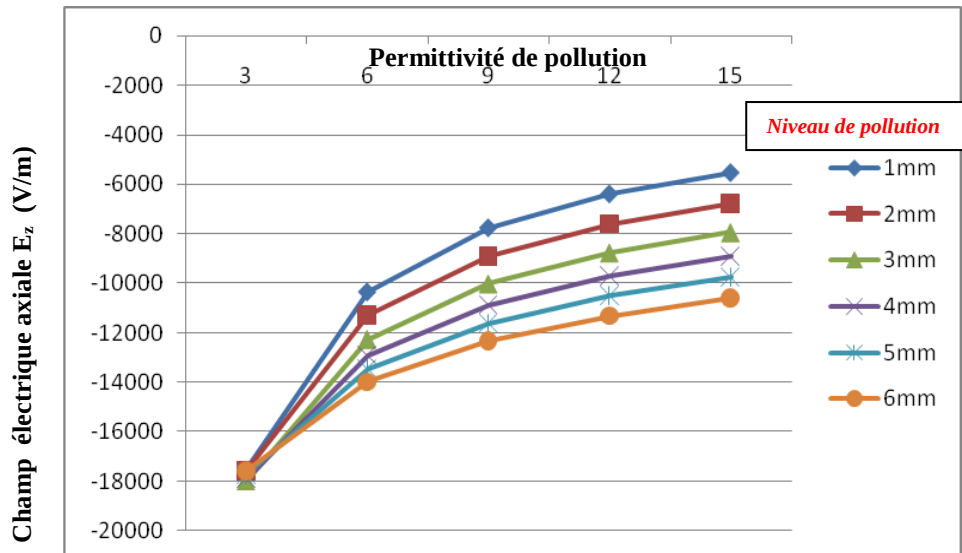


Figure IV.16. Variation de la composante axiale E_z du champ électrique dans la pollution en fonction de la permittivité.

IV.5.1.3. l'influence de la permittivité sur l'induction électrique dans la pollution :

L'induction présente une allure linéaire (figure IV.17 et IV.18), croissante en composante radiale et décroissante en axiale, ceci résulte par l'augmentation de la permittivité du milieu qui parcouru par les charges volumiques, ces zones de pollution deviennent comme un conducteur avec une résistance électrique faible.

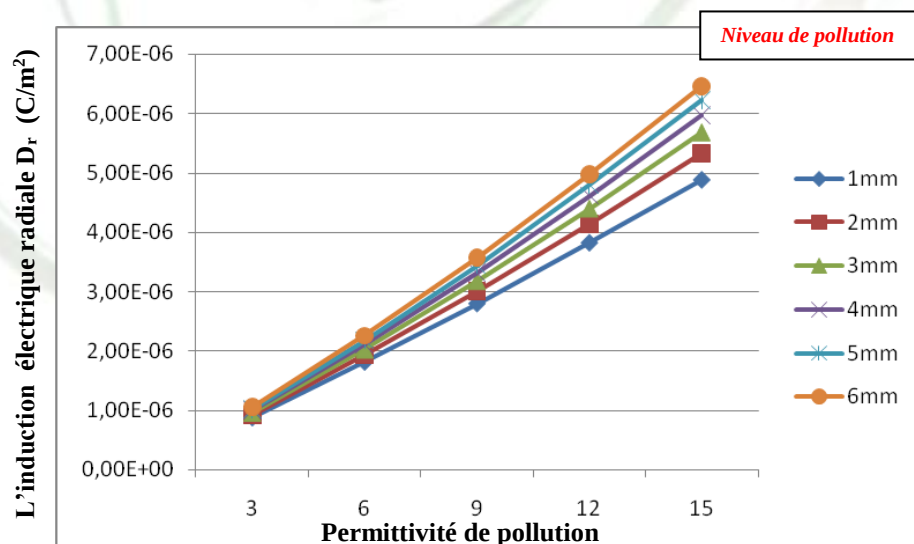


Figure IV.17. Variation de la composante radiale D_r de l'induction électrique dans la pollution en fonction de la permittivité.

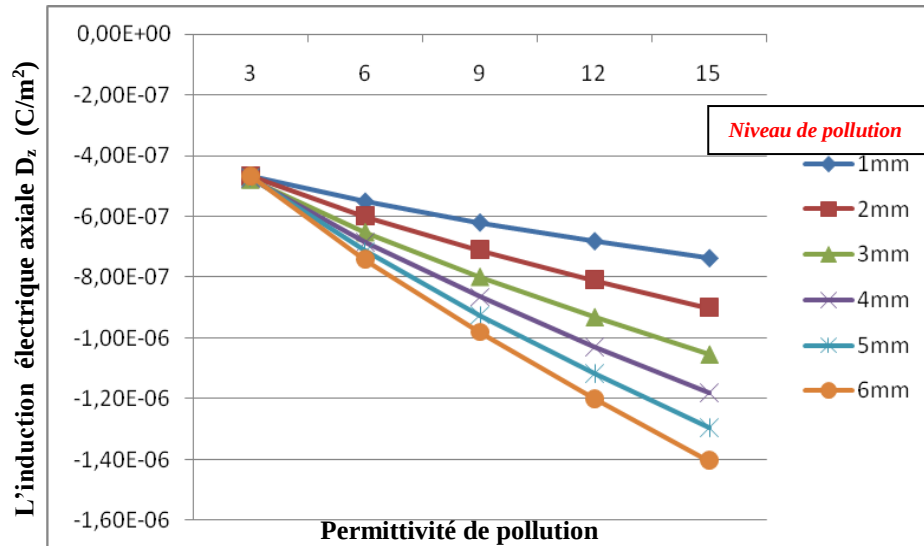


Figure IV.18. Variation de la composante axiale D_z du l'induction électrique dans la pollution en fonction de la permittivité.

IV.5.1.4. l'influence de la permittivité de pollution sur la capacité équivalente d'isolateur:

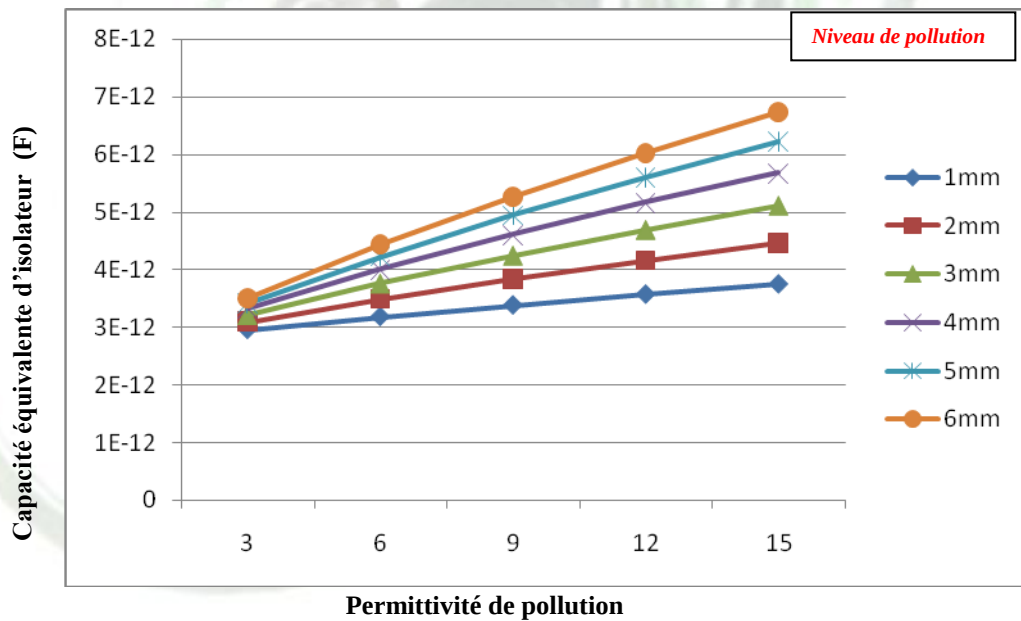


Figure IV.19. Variation de la capacité équivalente d'isolateur en fonction de la permittivité.

D'après la figure IV.19, nous remarquons que la capacité de système augmente quand la permittivité de pollution augmente et donc C est proportionnel à la permittivité de pollution ϵ_r .

IV.5.2. l'influence du niveau de pollution :

Dans notre simulation on a choisie 6 niveaux de pollution suivant l'épaisseur du verre qui est de 6 mm, pour cela on a varie le niveau de pollution de 1mm jusqu'à 6mm.

IV.5.2.1. l'influence du niveau de pollution sur l'énergie stockée dans la pollution :

Nous remarquons que la pente d'augmentation de l'énergie électrique stockée (figure VI.20) dans la pollution prend une petite croissance d'une permittivité à une autre, cette augmentation de l'énergie sera exprimée par l'agrandissement de la surface d'accumulation de l'énergie.

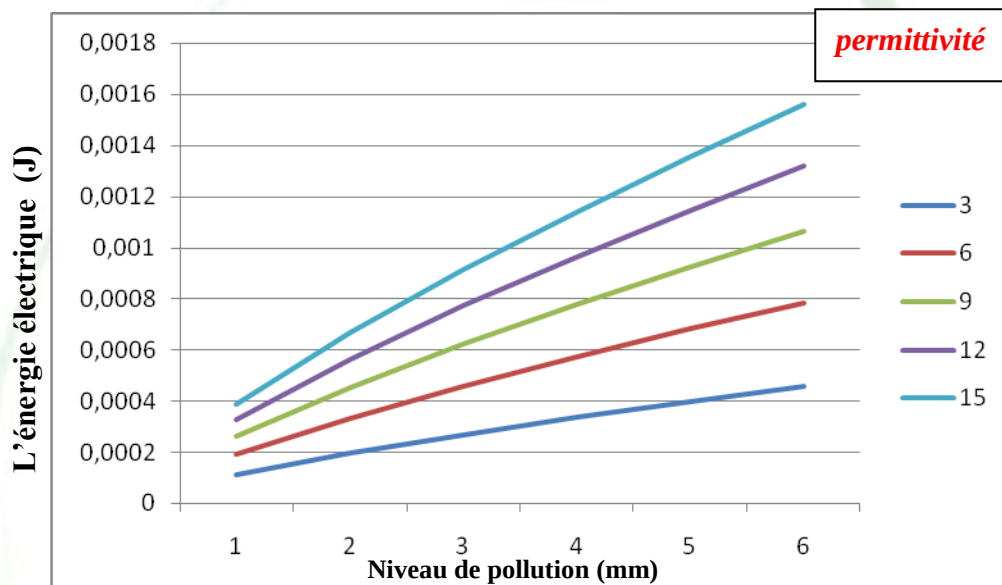


Figure IV.20. Variation de l'énergie électrique stockée dans la pollution en fonction du niveau de pollution.

IV.5.1.2. l'influence du niveau de pollution sur le champ électrique :

Nous traçons alors la variation du champ électrique en fonction du niveau de pollution soit le radiale ou en axiale situe dans les zones de pollution, nous remarquons que les deux composantes du champ électrique augmentent avec le niveau de pollution, ceci se signifie que l'augmentation du niveau provoque une élévation des lignes du champ radiale et en axiale comme valeur absolue surtout dans la zone qui est en contact avec l'électrode de haute tension.

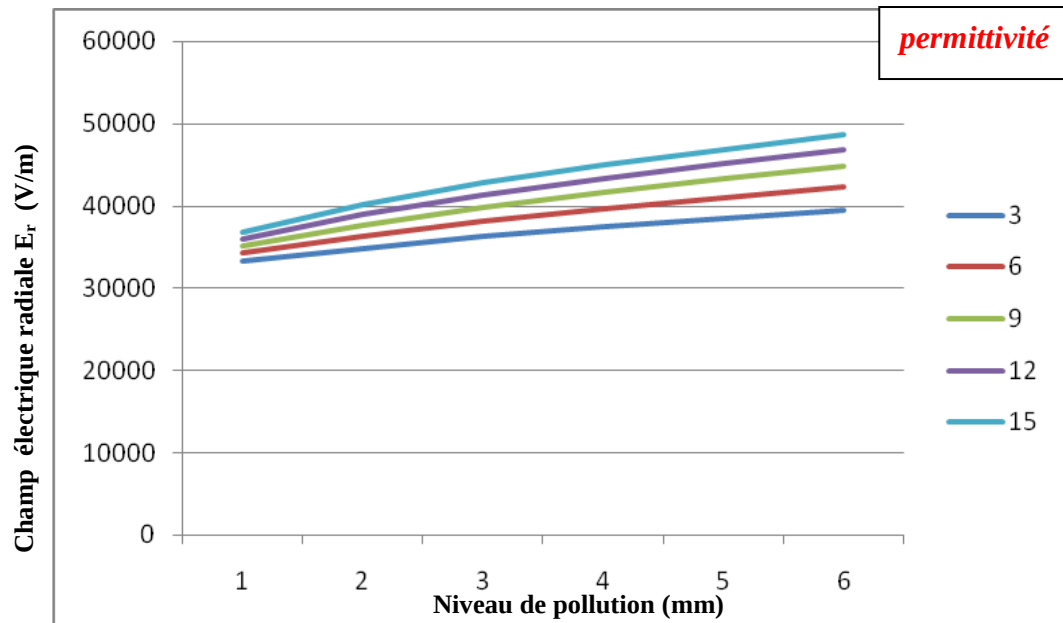


Figure IV.21. Variation de la composante radiale E_r du champ électrique dans la pollution en fonction du niveau de pollution.

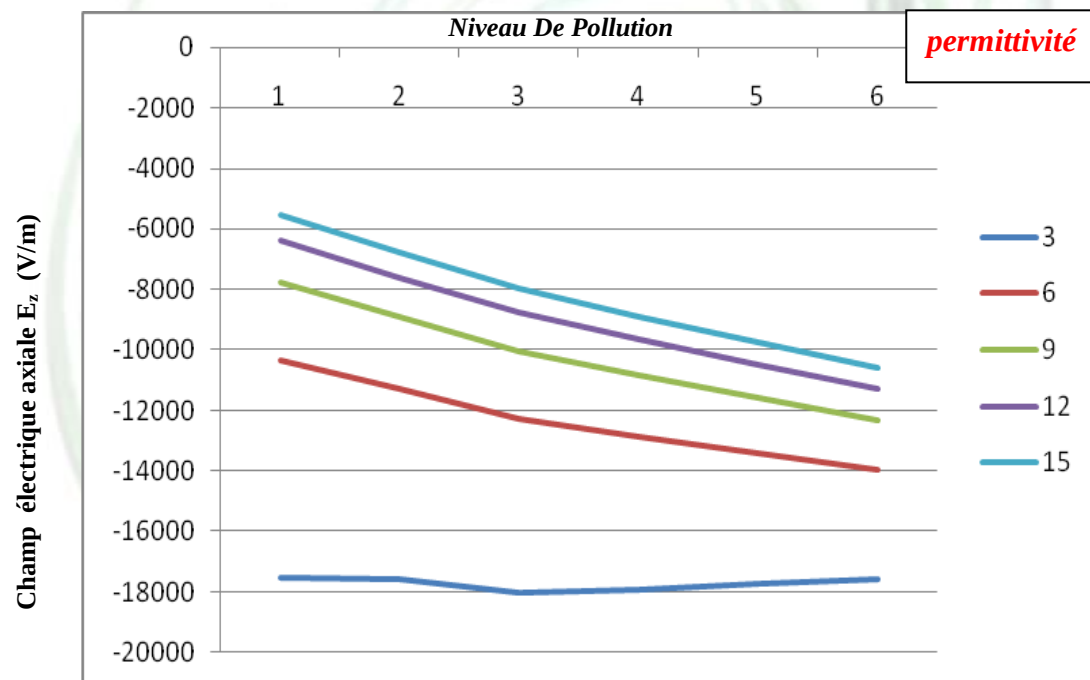


Figure IV.22. Variation de la composante axiale E_z du champ électrique dans la pollution en fonction du niveau de pollution.

IV.5.2.3. l'influence du niveau de pollution sur l'induction électrique dans la pollution :

Nous pouvons dire d'après les figures IV.23 et IV.23 que l'induction électrique est presque constante pour les permittivités faibles (3 et 6) et augmente haut de la légèrement, alors que le niveau de pollution n'a pas une grande influence sur le vecteur d'induction électrique.

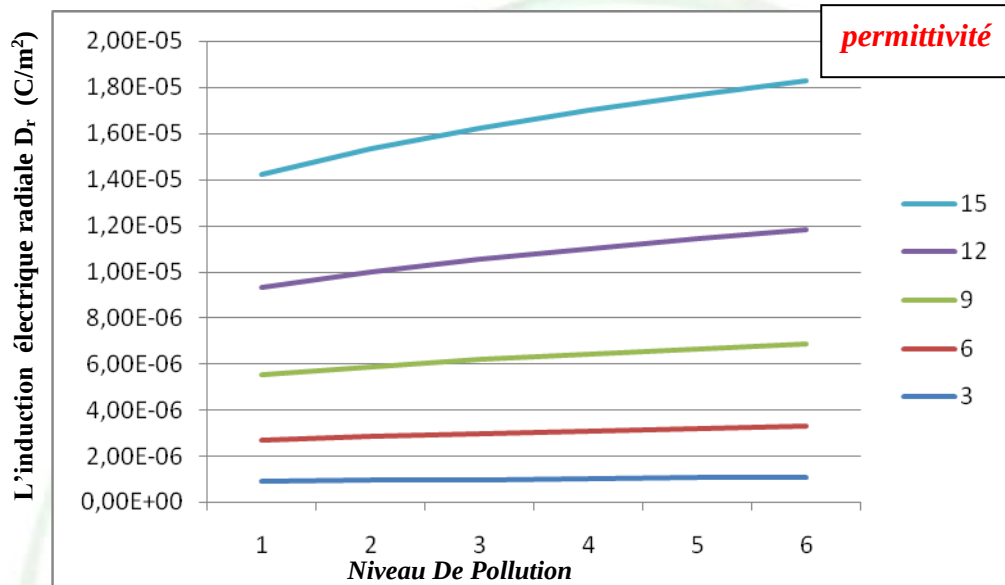


Figure IV.23. Variation de la composante radiale D_r de l'induction électrique dans la pollution en fonction du niveau de pollution.

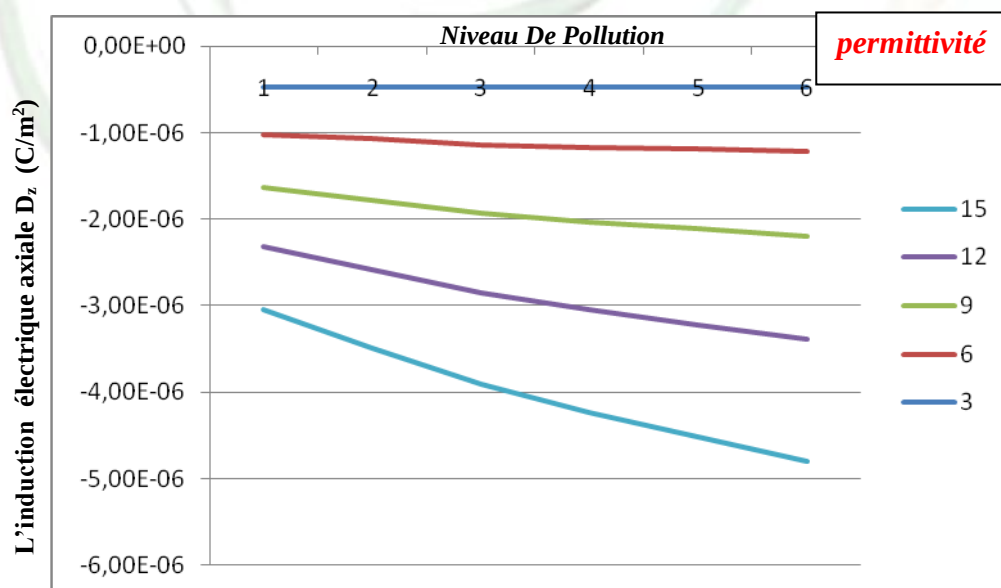


Figure IV.24. Variation de la composante axiale D_z de l'induction électrique dans la pollution en fonction du niveau de pollution.

IV.5.2.4. l'influence du niveau de pollution sur la capacité équivalente d'isolateur:

La quantité de la pollution sere a augmente la capacité de système qui nous implique que la pollution a un aspect capacitif et faire varie le déphasage entre le courant et la tension

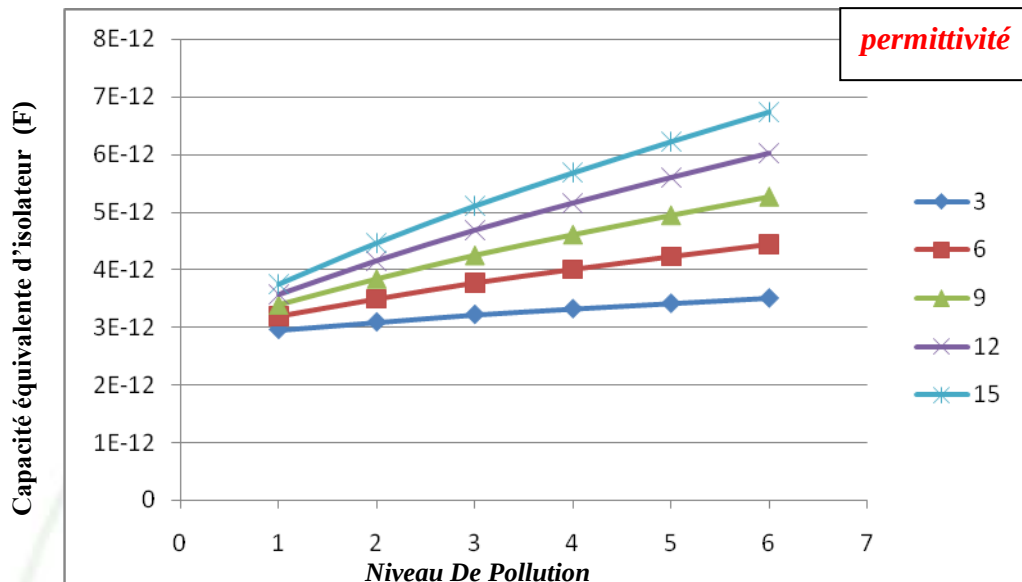


Figure IV.25. Variation de la capacité équivalente d'isolateur en fonction du niveau de pollution.

IV.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, la simulation effectuée pour le modèle d'isolateur, nous ont permis de visualisé la répartition (distribution) des différentes grandeurs (potentiel, champ et induction).

- La distribution de potentiel est maximale avec l'augmentation de l'électrode de haute tension.
- A l'état propre, le champ électrique atteint sa valeur maximale à l'extrémité de l'électrode de haute tension, et s'annule pour des distances supérieures 4cm de l'électrode active.
- Le champ électrique à l'état pollué (plein pollution) est intense le long des zones polluées.
- Le champ électrique maximal le long de ligne de fuite, et diminue avec l'augmentation de la longueur de pollution.
- La répartition de l'induction électrique dépend essentiellement de l'accélération du champ électrique.

- L'énergie électrique c'est l'image de la résistance électrique équivalente des zones polluées.
- la valeur absolue du champ électrique radiale augmente linéairement avec la permittivité par contre la valeur absolue du composante axiale diminue qui signifie que la conduction du courant de fuite se dirige vers la surface des agents pollués.
- les zones de pollution deviennent comme un conducteur avec une résistance électrique faible.
- La capacité du système est proportionnel à la permittivité de pollution ϵ_r .
- l'augmentation du niveau provoque une élévation des lignes du champ radiale et en axiale comme valeur absolue.
- La quantité de la pollution sera augmentée la capacité de système.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

En général, la pollution pose d'immenses problèmes contraignants au bon fonctionnement et à la fiabilité de service des réseaux de transport d'électricité. Ceci conduit à intensifier les recherches concernant ce problème afin de proposer et de trouver des solutions efficaces pour éviter les contournements des isolateurs sous pollution.

Les conditions climatologiques ont une influence fondamentale sur l'état des dépôts polluants accumulés sur les surfaces des isolateurs, donc sur la tension de tenue de ces isolateurs. Après traitements des incidents qui ont eu lieu sur le réseau de 220 kV et qui sont dus à la pollution des isolateurs, et en tenant compte des conditions climatologiques, nous pouvons dire que la saison où le réseau est le plus exposé à ce problème est l'été. A partir de là, nous suggérons aux exploitants des réseaux de transport d'électricité, comme première possibilité, un lavage manuel des isolateurs vers l'été de chaque année surtout pour les zones trouvées polluées.

Les principaux résultats que nous pouvons donner sur la base de la recherche bibliographique et la simulation effectuée sur les isolateurs sous différentes conditions aux limites sont les suivants :

- ❖ Le degré de pollution influe directement sur la tension de contournement des isolateurs. En effet, l'augmentation du degré de pollution des isolateurs diminue énormément la tension de contournement, donc la tension de tenue.
- ❖ L'état de la surface (sec ou humidifié) agit fortement sur la tension de contournement des isolateurs, l'humidification des polluants diminue cette tension notablement.
- ❖ Les valeurs du champ électrique, induction et la capacité augmentent avec l'augmentation du degré de la pollution, principalement lorsque celle-ci est humidifiée.
- ❖ L'augmentation de l'humidification influe directement sur la permittivité de la pollution proportionnellement.
- ❖ La zone de pollution près de l'électrode de haute tension devine en grande humidification une partie de l'électrode de HT (même milieu).
- ❖ L'augmentation de la pollution dans les dépôts implique la diminution du longueur de

fuite.

- ❖ Le profil de l'isolateur aussi à une répercussion intéressante sur la valeur de la capacité. En particulier, si la longueur de fuite diminue, la valeur de la capacité augmente et l'inverse est juste.
- ❖ la conduction du courant de fuite se dirige vers la surface des agents pollués.
- ❖ les zones de pollution avec grande permittivité deviennent comme un conducteur avec une résistance électrique très faible.
- ❖ L'augmentation de l'énergie est exprimée par l'agrandissement de la surface d'accumulation de l'énergie.
- ❖ le niveau de pollution n'a pas une grande influence sur le vecteur d'induction électrique.
- ❖ la pollution avait un aspect capacitif et faire varier le déphasage entre le courant et la tension.



BIBLIOGRAPHIE



- [1] **A.CIMADOR, M.COJAN, P.HAUTEFEUILLE, M.MORCEAU**, « Méthode de Dimensionnement des Isolateurs de Lignes Aériennes en Régions Polluées », CIGRE, Rapport No. 33-04, 30 Août-7 Septembre 1978, Paris, France.
- [2] **F.A.M.RIZK**, « Méthodes Mathématiques du Contournement des Isolateurs sous Pollution », Electra No. 78, pp. 71-103, Octobre 1981, Paris, France.
- [3] **M. DOBARZIC**, « Station d'essais de choc de laboratoire haute tension », Mémoire Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, juin 1972.
- [4] **M.TEGUAR**, « Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Electrique sur des Isolateurs Installé en Régions Polluées », Thèse de Magister Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Juillet 1993.
- [5] **A.S.A.FARAG, F.M.ZEDAN, T.CHENG**, «Analytical Studies of HV Insulators in Saudi Arabia Theoretical Aspects», IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28 N°3, pp. 379-392, June 1993.
- [6] **Y. GUEHRAR**, « Elaboration d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative ou impulsionnelle », Mémoire de Magistère, Laboratoire Haute tension, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2004
- [7] **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.[8] **A.MEKHALDI, M.TEGUAR, A.BEROUAL**, « Algorithm for pollution flashover calculations », Archives of Electrical Engineering, Vol. XLV, No. 4, pp. 385-397
- [9] **A.BOUAROURI, R.LADJAL**, « Comportement et Caractérisation Electriques d'un Modèle d'Isolateur sous Tension Alternative », Projet de Fin d'Etude, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2006.
- [10] **B.HAMOUM, A.KERBOUCHE**, « Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien », Projet de Fin d'Etude, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2007.

- [11] **M.BENAKOUCHE, R.TIMGHELLETTE**, «Comportement d'un modèle d'isolateur sous tension impulsionnelle », Projet de Fin d'Etude, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2005.
- [12] **A.K.MUJUNDAR, N.VASUDEV, K.N.RAVI CHANNAKESHA**, «Pollution Test Method of Insulators Under DC Voltage Using Dust Chamber», Ninth international symposium on high voltage engineering, 28 Aout –1 September 1995.
- [13] **S.BOUAZABIA, T.CHIKHAOUI**, « Méthodes d'essais sur des isolateurs pollués dans les conditions désertiques », Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 1988.
- [14] **G.RIQUEL, E.SPAN GENBERG**, «De la céramique au synthétique », EDF-Epure, N° 58, Avril 1998.
- [15] **M.SOUFI, M. ZEMIRLINE**, «Conception d'un Modèle Dynamique de Contournement d'un Isolateur Pollué sous Tension Alternative 50 Hz», Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 2004.
- [16] **Y.PORCHERON**, « Lignes aériennes : Matériels entrant dans la constitution d'une ligne aérienne », Technique de l'ingénieur D4425.
- [17] **M.TERKMANI, M.BABOUAMER**, «Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension », PFE, USTO, juin 2005.
- [18] **D.DUMORA**, « Matériaux isolants céramiques en électrotechnique », Technique de l'ingénieur D275.
- [19] **M.A.B.EL KOSHAIRY,F.A.M.RIZK**, « Comportement des isolateurs des lignes de transport à très haute tension dans les conditions de pollution désertiques », CIGRE, Rapport 33 - 05, Paris, 1970.
- [20] **F. AMIDI, K. OUERDANE**, « Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30kV en régions littorales », Projet de Fin d'Etude, Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, juin 1998.
- [21] **P.CLAVERIE, Y.PORCHERON**, « Les phénomènes de pollution des isolateurs et l'isolement des ouvrages en régions polluées », RGE, Tome 82, No. 3, pp. 166-194, Mars 1973, Paris, France.
- [22] **M.TEGUAR, A.BOUBAKEUR**, « Pollution des Isolateurs de Haute Tension », Laboratoire de Haute Tension, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P.).
- [23] **L.ARRABIY**, " Visualisation et Traitement de Signal de Courant de Fuite sur une

Surface Isolante Polluée ", PFE, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (E.N.P.), 1999.

[24] **A. CIMADOR, S. VITET**, «La pollution des isolateurs », EDF-Epure, N°. 27, Juillet 1990.

[25] **M.TEGUAR**, « Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées », Thèse de Magister Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juillet 1993.

[26] **A. CIMADOR, S. VITET**, «La Pollution des Isolateurs», EDF-Epure, No. 27, Juillet 1990.

[27] **A.MEKHALDI**, «Etude du Développement d'un Arc Electrique sur des Surfaces Isolantes Contaminées par la Pollution Désertique», Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Juin 1990.

[28] **B.M'HAMDI**, «Modélisation D'un Isolateur Naturellement Pollue Sous Tension Impulsionnelle Utilisant Des Circuits Electriques Equivalents», Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Promotion 2008.

[29] **G.LEROY, C.GARY**, «Les Propriétés Diélectriques de L'air et les très Hautes Tensions», Edition Eyrolles, Paris 1984.

[30] **T.GUIA**, «Comportement d'un modèle Isolateur sous à une Tension Impulsionnelle», Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de HauteTension, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, Mai 2004.

[31] **P. J. LAMBETH, H. AUXEL, M. P. VERMA**, «Méthode de mesure de la sévérité de la pollution compte tenu de son influence sur le comportement des isolateurs à haute tension», Electra N°. 20, pp 95-100, Janvier 1972.

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

[33] **W.TAIBI, K.ABDELI**, «Modèle d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz », Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Bab Ezzouar, Juin 2002, Alger, Algérie.

[34] **J. DANIS**, « A stochastic pollution flashover model », 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 46 - 12, Septembre 5 – 9, Athènes, Grèce, 1983.

- [35] **L. L.ALSTON, S. ZOLEDZIOWSKI**, « Growth of discharges on polluted insulators », IEEE, Trans. PAS, Vol. 110, N°. 7, pp. 1260–1266, Juillet 1963.
- [36] **H. H. WOODSON, A. J. MCELROY**, « Insulators with contaminated surfaces part II: modelling of discharge mechanisms », IEEE Trans., Vol. Pas-89, N°. 8, pp. 858-867, November- December 1970.
- [37] **R. WILKINS**, «Flashover voltage of high voltage insulators with Unite en Surface pollution films », Proc. IEE, 116, No3, MARS 1969.
- [38] **M. N. RAYES, M. ZHIRH**, «Investigation about flashover performance of insulators under uniform and non uniform contamination», 7e International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 43-08, Dresde, Allemagne, 26-30, Août 1991.
- [39] **P. CLAVERIE AND Y. PORCHERON**, «How to Choose Insulators for polluted Areas», IEEE Trans. PAS, Vol. 92, N° 3, pp. 1121 - 1131, 1973.
- [40] **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, Septembre1999.
- [41] **A. MEKHLADI, D. NAMANE, S. BOUAZABIA et A. BEROUAL**, «Flashover of discontinuous pollution layer on high voltage insulators », IEEE, Trans, on Dielectrics and electric insul. vol. 6, N° 6 pp 900-906, Dec, 1999.
- [42] **C.HURAUX, A.M. RAHAL**, « Le contournement des Isolateurs de haute tension approche à l'aide d'un modèle de laboratoire », RGE, Tome 84, N°. 6, pp. 425 - 429, Juin 1975.
- [43] **D. NAMANE**, « Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateur de haute tension, sous la fréquence 50Hz », Thèse de Magister Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, Février 1998.
- [44] **A. MEKHALDI, S. BOUZABIA**, « Etude de courant de fuite sur les isolateurs pollués » Spécial Issue of AJOT, Proceedings of 2nd CEA Alger, Nov. 29-30 1994 / vol 1.
- [45] **S. HELIS, A. MEDDOUR**, « Etude du contournement d'un isolateur pollué », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique Septembre 1996.
- [46] **L.L.ALSTON, S.ZOLEDZIOWSKI**, «Growth of Discharges on Polluted Insulators», IEEE, Trans. PAS, Vol. 110, N° 7, pp. 1260 - 1266, Juillet 1963.