



CHAPITRE II

Les Modèles Et Les Travaux Antérieurs Dans La Pollution Des Isolateurs De HT

II.1.Introduction

Dans le but de comprendre et d'expliquer les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs pollués nous avons consacré une quantité importante de travaux tant théoriques qu'expérimentaux 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. Et présentons également quelques travaux relatifs à la détermination expérimentale et numérique du potentiel et du champ électriques sur le long des isolateurs pollués.

II.2.Principaux Modèles Statiques De Contournement

Pour adapter plus rationnellement les isolateurs d'un ouvrage à la sévérité de pollution d'un site, ou pour surveiller la qualité de l'isolement et donc d'éviter les éventuelles défaillances, il est impératif de disposer de modèles permettant de prévoir le contournement des isolateurs. C'est dans cette optique que de nombreux modèles empiriques ou semi empirique ont été développés, [5].

II.2.1. Modèle d'Obenaus

De nombreux auteurs ont imaginé de reproduire le phénomène de contournement sur des modèles simplifiés afin de pouvoir le décrire par des équations simples. Le modèle électrique de base a été proposé par Obenaus, qui est à l'origine des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur des surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante, sous tension continue. En effet, partant d'un modèle type circuit électrique équivalent constitué d'un arc de longueur X en série avec une résistance R_p (Fig. II.1), il en a déduit la tension d'arc, [5] :

$$V_{arc} = \frac{NX}{I^n} \quad (II.1)$$

I est le courant de fuite, n et N sont les constantes de la caractéristique statique de l'arc.

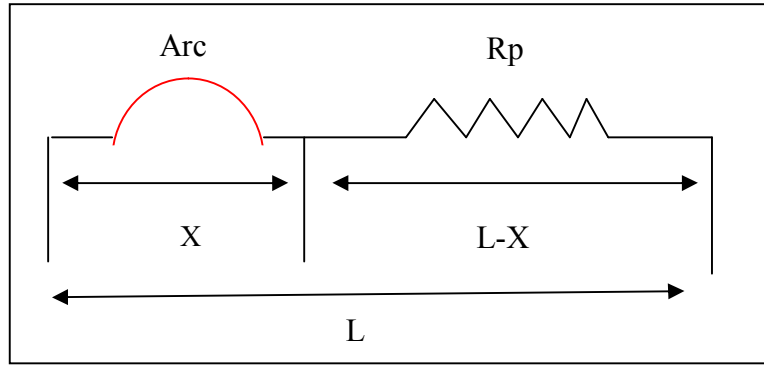


Fig. II.1 circuit électrique équivalent du modèle d'Obenaus

En effet, en appliquant la loi d'Ohm à ce circuit, [5] on peut écrire:

$$V = V_e + V_{arc} + R_p(X) I \quad (\text{II.2})$$

Avec :

V : est la tension appliquée ;

V_e : la chute de tension totale aux bornes des électrodes; cette dernière dépend des conditions expérimentales.

$R_p(X)$: est la résistance de la couche polluée.

V_{arc} : la tension d'arc telle que :

$$V_{arc} = R_{arc}(X) I \quad (\text{II.3})$$

R_{arc} est la résistance d'arc par unité de longueur ;

I le courant qui traverse la couche polluée.

La décharge est caractérisée par la présence d'un champ électrique longitudinal E_a :

$$E_a = \frac{V_{arc}}{X} = N \cdot I^{-n} \quad (\text{II.4})$$

D'où l'équation:

$$V_{arc} = N \cdot X \cdot I^n \quad (\text{II.5})$$

Ainsi, on obtient l'équation de la tension totale appliquée au système:

$$V = V_e + N \cdot X \cdot I^n + R_p(X) \cdot I \quad (\text{II.6})$$

Les valeurs des paramètres n et N dépendent du milieu dans lequel brûle la décharge.

$$0.40 \leq n \leq 1 \text{ et } 3 \leq N \leq 500$$

L : représente la longueur de fuite totale.

A partir de mesures expérimentales sur un canal d'électrolyte, Ghosh et al . ont proposé de prendre des valeurs différentes pour les constantes N et n caractérisant l'équation de la décharge selon la nature de l'électrolyte utilisé. Les résultats de leurs mesures sont donnés dans le tableau (Tab. II.1) [5].

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

Tab. II.1. Valeurs des constantes N et n sur différents électrolytes

II.2.2. 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.2).l'objectif principal 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.2.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 (figure. II.2.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 (figure. II.2.c).
- Le contournement se fait à travers les chemins déjà préétablis par les différents arcs de chaque zone sèche (figure. II.2.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 (figure. II.2.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, [24].

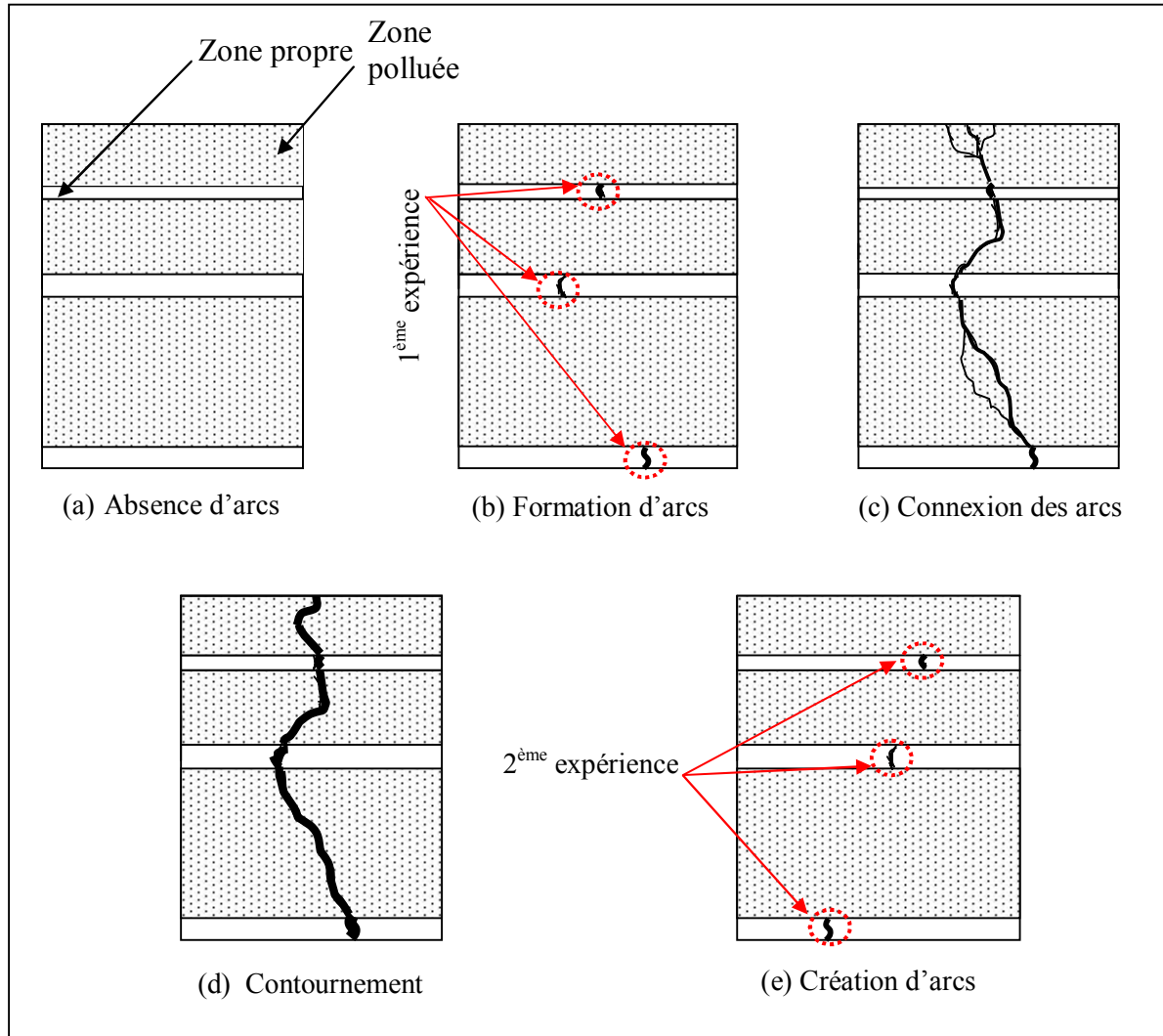


Figure II.2 Modèle de J. Danis.

II.2.3.Modèle de Neumarker

En reprenant les travaux d'Obenaus, et en y ajoutant l'hypothèse d'une couche de pollution de résistance r_p uniforme par unité de longueur de fuite, Neumarker propose l'expression suivante pour la résistance de pollution R_p ;

$$R_p = r_p(L - X) \quad (\text{II. 7})$$

En introduisant cette expression dans le modèle d'Obenaus, la tension U aux bornes de l'isolateur sera :

$$U = V_{arc} + r_p(L - X)I \quad (\text{II.8})$$

Ou encore:

$$U = \frac{NX}{I^n} + r_p(L - X)I \quad (\text{II.9})$$

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

$$I_c = \left(\frac{NX}{I^n} \right)^{1/n+1} \quad (\text{II.10})$$

Et

$$X_c = \frac{L}{n+1} \quad (\text{II.11})$$

D'où l'expression de la tension critique de contournement (équation II.12):

$$U_c = N^{\frac{1}{1+n}} \cdot r_p^{\frac{1}{1+n}} \cdot L \quad (\text{II.12})$$

Les modèles établis en courant continu ci dessus, ont été étendus au cas d'une tension alternative en y apportant certaines modifications, [25].

II.2.4.Modèle de Claverie et 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, [5] :

$$U_{arc} = 100 \frac{x}{\sqrt{I}} \quad (\text{kV}) \quad (\text{II.13})$$

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

$$U_{cx} = 800 \frac{x}{\sqrt{I}} \quad (\text{kV}) \quad (\text{II.14})$$

x : la longueur d'arc. (m)

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

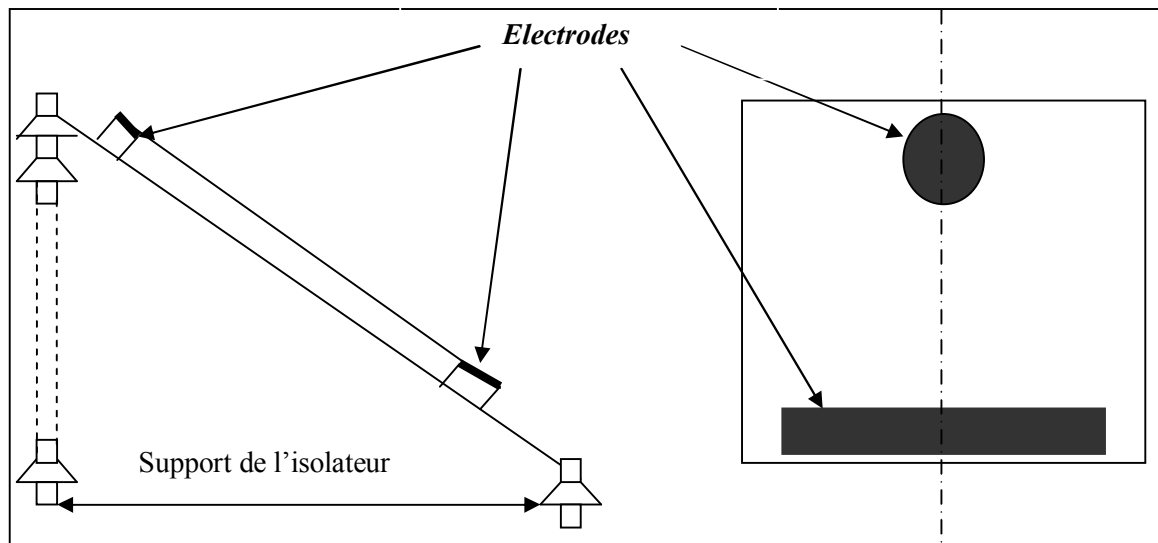


Figure II.3 Modèle expérimental de Claverie et Porcheron , [5] .

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, [5].

II.2.5.Modèle de Wilkins

Celui-ci 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 (figure .II.4). Ce modèle est très utilisé pour étudier le critère de propagation de l'arc, [14].

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.), [22].

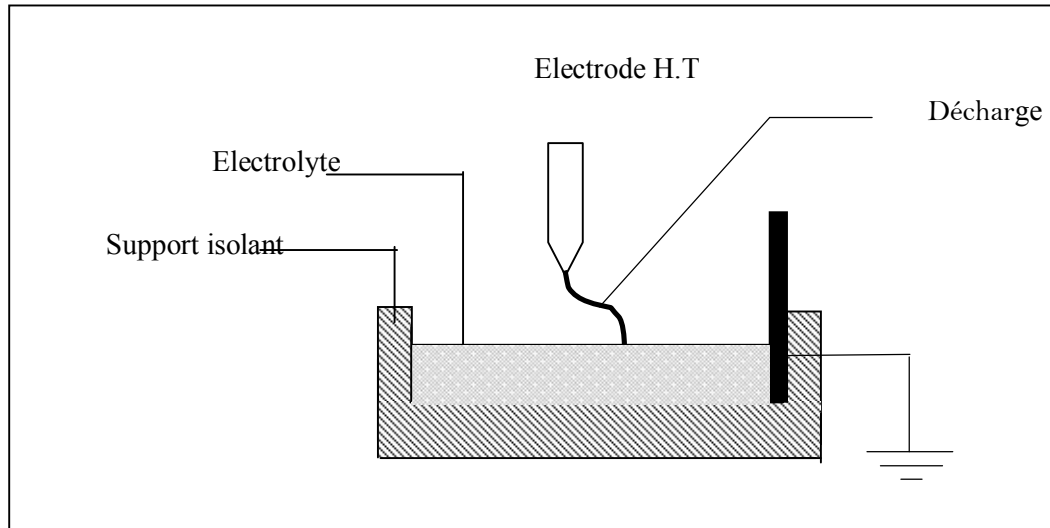


Figure. II.4 Modèle de Wilkins.

II.2.6.Modèle de Rizk

A partir d'une analyse théorique, Rizk a décrit le phénomène d'entretien de l'arc par le mécanisme de la rupture diélectrique. Il a mis en évidence l'expression de la rigidité diélectrique de l'espace résiduel et établi une relation entre la tension minimale U_c (tension de contournement minimale) nécessaire à l'entretien de l'arc, la résistance de pollution linéique r_p et la longueur de fuite L de la forme (équation II.15) , [26] :

$$\frac{U_c}{L} = 23 r_p^{0.4} \quad (\text{II.15})$$

II.2.7.Modèle de Rao et Gopal

D'après Rao et Gopal , l'équation de la tension:

$$V_{arc} = \frac{XN}{I^n} \quad (\text{II.16})$$

n'est valable que pour une décharge de type intermédiaire entre la luminescence et l'arc ; ce type d'équation peut être contesté lorsque la décharge se réamorce périodiquement. Ainsi, ces auteurs ont essayé d'expliquer les écarts entre les prédictions des modèles et les valeurs mesurées pendant le

contournement, en introduisant une nouvelle équation exprimant le champ dans la colonne de la décharge (équation II.17):

$$U = \alpha + (\beta + x)v \left(\ln \frac{I}{\delta} \right)^{-3} \quad (\text{II.17})$$

α , β , v et δ sont des constantes qui dépendent de la nature des électrodes entre lesquelles s'amorce la décharge. Cette équation a été établie par Reider . Elle exprime la caractéristique $U(I, x)$ d'un arc de faible intensité brûlant dans l'atmosphère [25] .

II.2.8. Modèle d'Alston et Zoledziowski

En tenant compte de l'hypothèse de Neumarker et pour une tension d'application dépassant quelques kilos volts. 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.5) , [5] :

$$U_x = (n + 1)(NX)^{\left(\frac{1}{n+1}\right)} \left(\frac{r(L-x)}{n} \right)^{\left(\frac{n}{n+1}\right)} \quad (\text{II.18})$$

avec X : la longueur d'arc.

N et n : les constante empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc.

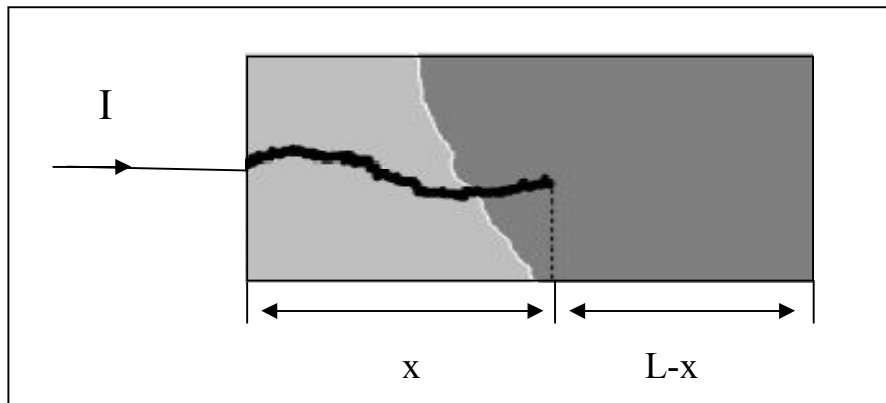


Figure .II.5 Modèle cylindrique utilisé par Alston et Zoledziowski

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

II.3.1. Travaux expérimentaux

II.3.1.1. Travaux de Brettschneider

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

Les résultats obtenus montrent que la présence d'un film d'eau à la surface du dépôt de glace pendant la fonte, entraîne une augmentation considérable de la chute de tension le long des intervalles d'air par rapport au cas où le film d'eau n'est pas présent, [2].

II.3.1.2. Travaux de Kaana-Nkusi, Alexander and Hackam

Ils ont déterminé le potentiel et le champ électriques le long d'un isolateur à ailettes. Le système a été modélisé avec 146 anneaux de charges, où 30 charges modélisent chaque électrode. Plusieurs critères ont été appliqués dans le but d'évaluer la qualité des résultats calculés sur le potentiel, la divergence du potentiel, la densité normale du flux électrique et la composante tangentielle du champ électrique. Les résultats montrent que les valeurs maximales du champ électrique le long de la surface augmentent avec celles de la permittivité diélectrique des matériaux isolants. Diminuer le rayon de courbure de l'ailette de l'isolateur a pour conséquence l'augmentation des composantes normale et tangentielle du champ électrique, [2].

II.3.1.3. Travaux de Hartings

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

Hartings a aussi lancé une série d'expériences pour étudier le comportement hydrophile et hydrophobe de l'isolateur sous la pluie. Les composantes radiale et axiale du champ électrique le long d'un isolateur sec et sous pluie ont été mesurées. Dans le cas de l'isolateur sec, aucun effet couronne n'a été observé à 50kV. A 85kV le phénomène de décharge commence à apparaître dans le côté HT.

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

Pour un isolateur hydrophobe, une distribution capacitive du champ électrique a été observée dans tous les essais sous les différentes conditions atmosphériques. A 50kV, la distribution du champ électrique a été similaire à celle obtenue dans le cas d'un isolateur sec, [2].

II.3.1.4. Travaux de Eklund et Hartings

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

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

Dans le cas d'un isolateur composite hydrophobe, la composante axiale du champ électrique est proportionnelle à la quantité de dépôt de la pollution sur la surface de l'isolateur, [2].

II.3.2. Travaux de simulation numérique

II.3.2.1. Travaux de Zhao et Comber

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

L'isolateur, la tour et les conducteurs ont été pris en considération dans les calculs. Les résultats ont montré que la longueur des conducteurs a un effet de blindage très significative sur l'isolateur ; le maximum du champ électrique diminue lorsque la longueur des conducteurs augmente, [2].

II.3.2.2. Travaux de Chakravorti et Mukherjee

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

Ils ont trouvé que pour des $\rho_s \geq 10^{11} \Omega$, le champ est capacitif. Alors que pour $\rho_s \leq 10^8 \Omega$, il est résistif. Pour des valeurs intermédiaires, le champ est capacitif-résistif.

La valeur maximale du champ électrique résistif est deux fois plus grande que celle correspondante au champ capacitif. Ce maximum se produit dans la pointe de la plus haute ailette.

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

L'effet des zones sèches a été aussi étudié. Plus la zone sèche est large, moins il y aura une surtension au niveau des frontières de la zone sèche. La position de la zone sèche n'a pas une grande influence sur le champ électrique au niveau des frontières de cette zone, [2].

II.3.2.3.Travaux de El-Kishky et Gorur

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

Un modèle exacte de l'isolateur peut être réalisé avec une réduction significative du nombre de charges utilisées dans cette méthode. Ils ont étudié la distribution du champ électrique et de l'énergie des isolateurs humides, [2].

II.3.2.4.Travaux de Volat

L'objectif principal du travail de **Volat** consiste en le calcul des distributions du potentiel et du champ électriques, le long d'un isolateur de poste standard, recouvert de glace accumulée en régime humide. Il s'agit alors, pour l'auteur, de comprendre les phénomènes précédant les contournements électriques des isolateurs de poste qui se produisent généralement en période de fonte. Une étude numérique a été utilisée par l'intermédiaire d'un logiciel de simulation, basé sur la méthode des Éléments Finis de Frontière, bidimensionnel puis tridimensionnel, [2].

Les différents résultats obtenus à partir des simulations 2-D, ont permis de mettre en évidence l'influence des paramètres, tels que la présence d'un film d'eau conducteur à la surface du dépôt de glace, la position et la longueur d'un intervalle d'air, la conductivité du film d'eau et la présence d'un arc électrique partiel le long d'un intervalle d'air unique, sur la distribution du potentiel et du champ électriques. Les deux distributions du potentiel obtenues numériquement et expérimentalement ont été comparées. L'auteur a observé une différence importante obtenue entre les résultats expérimentaux et numériques (Figure II.6), confirmant ainsi que la modélisation bidimensionnelle n'est pas vraiment adaptée à la configuration géométrique de l'isolateur. L'erreur relative moyenne est de 33%. Ce qui démontre la nécessité des simulations tridimensionnelles, afin d'obtenir des résultats plus précis, [2].

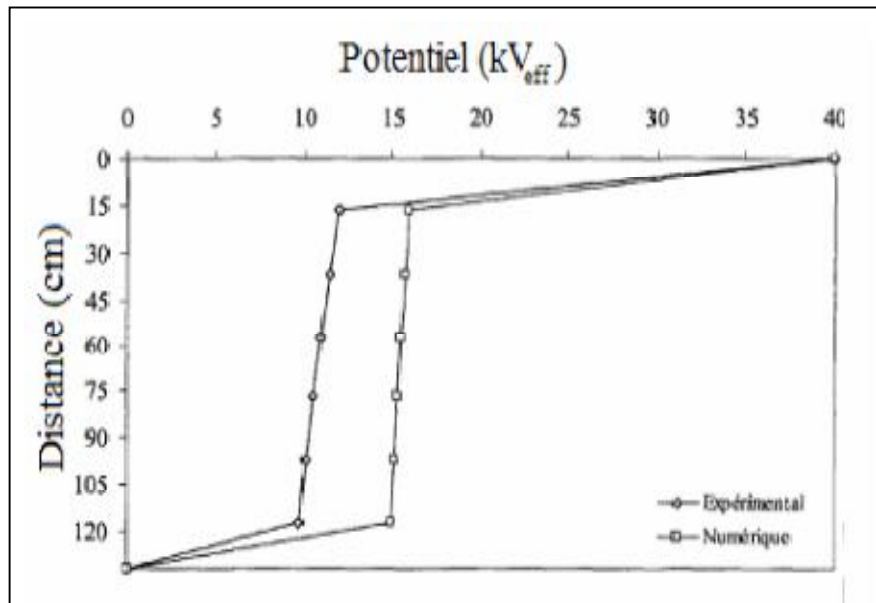


Figure II.6 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour une simulation 2D, [2].

Les simulations tridimensionnelles ont été réalisées avec le logiciel Coulomb (utilisant toujours la méthode des éléments finis de frontière). La comparaison des résultats numériques, obtenus par le biais du logiciel, avec les résultats expérimentaux, a montré une très bonne concordance (Figure II.7). Cela a ainsi permis de valider la modélisation utilisée en 3-D de l'isolateur de poste recouvert de glace présentant un film d'eau conducteur à la surface du dépôt de glace, lorsque aucun arc électrique partiel n'était présent le long des intervalles d'air, [2].

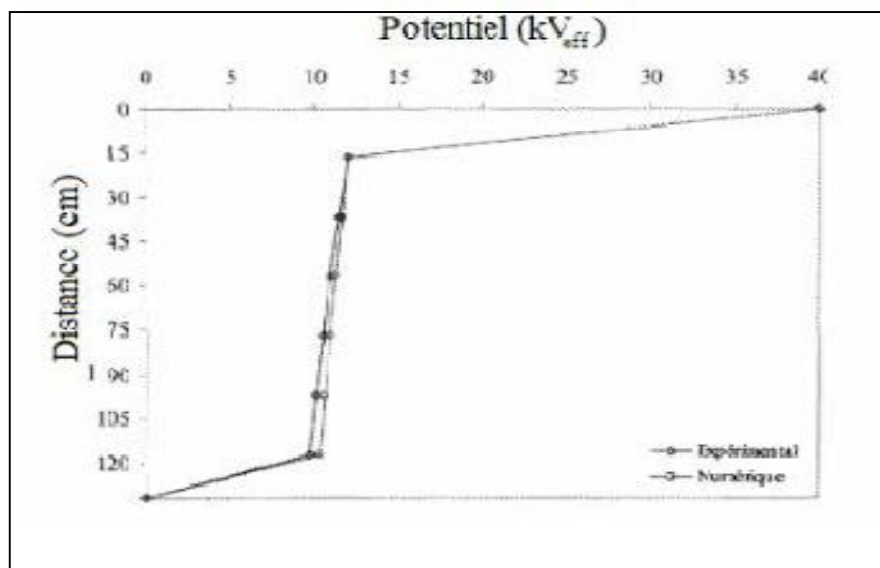


Figure II.7 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques pour une simulation 3D, [2].

II.3.2.5. Travaux de Aydogmus et Cebeci

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

Les valeurs du champ et du potentiel électriques ont été déterminées en utilisant la méthode des éléments finis (FEM). Un modèle bidimensionnel (dit 'ouvert') d'un isolateur capôt et tige de type BSFT-9336 antibrouillard (ligne de fuite $L=288\text{mm}$, facteur de forme $F=1,09$, hauteur $H=140\text{mm}$) (Figure II.8 (a) et (b)), a été utilisé pour le calcul de la résistance en série avec l'arc.

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

Les résultats du NFDM sont comparés aux résultats théoriques et expérimentaux obtenus par d'autres chercheurs. Une bonne concordance a été observée, [2].

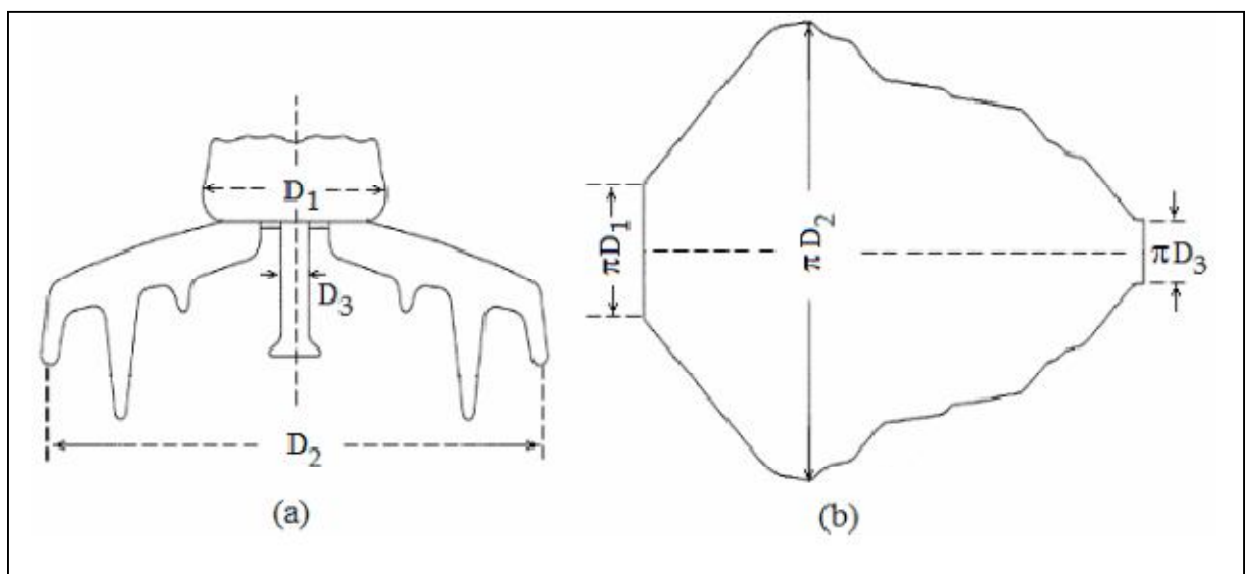


Figure II.8 Isolateur BSFT-9336 ; (a) : profil réel, (b) : modèle ouvert, [2].

II.4.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les principaux modèles statiques qui préoccupent les chercheurs, dans le domaine de la pollution des isolateurs. En effet, nous avons rappelé les principaux travaux rapportés dans la littérature, en vue de décrire les phénomènes de contournement. Nous avons également cité les travaux antérieurs sur la détermination expérimentale et numérique du champ et du potentiel électriques.

Dans le dernier chapitre, nous allons présenter les résultats de simulation numérique obtenus ainsi leurs interprétations.