

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة فرحات عباس - سطيف

UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF
UFAS (ALGERIE)
Faculté de Technologie

Mémoire de Magister

Présenté au département d'Électrotechnique
Pour obtenir le diplôme

De Magister En Électrotechnique

Option :

Réseaux électriques

Par :

M. ALTI NADJIM

Thème

***Contribution à l'étude de performances électriques des
parafoudres synthétiques sous tension alternative***

Soutenu le 23/10/2012 devant la commission d'examen composée de :

M. BOUKTIR Tarek	Professeur	Université Ferhat Abbas de Sétif	Président
Pr. BAYADI. A	Professeur	Université Ferhat Abbas de Sétif	Rapporteur
M. GHERBI Ahmed	Professeur	Université Ferhat Abbas de Sétif	Examineur
M. BOUDISSA RABAH	MC « A »	Université Mira A. Arrahmen de Bejaia	Examineur

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère et mon très cher père, l'être le plus noble à sacrifier les plus belles années de sa vie pour me voir un jour réussi dans ma vie.

Je les remercie pour toute patience, et qui ont voulu

Toujours que je sois heureux,

Mes frères

Mes sœurs

A toute la famille

A Tous mes Amis:

Khaled, Akrem, Lyamine, Farid, Mohamed, Yaakoub ...

ET à mon rapporteur

A mes professeurs

N.Alti (Issam)

Remerciements

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

Je tiens, avant tout, à exprimer ma profonde gratitude à mon rapporteur Monsieur Pr. BAYADI. A, qui a assumé la direction de ce travail, pour sa disponibilité, pour sa confiance qu'il m'a témoignée, ainsi que ses conseils précieux et ses encouragements qui m'ont beaucoup aidé à mener à bien la réalisation de ces travaux,

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

-Pr. BOUKTIR Tarek (Université de Sétif);

-Pr. Gherbi Ahmed (Université de Sétif);

-Dr. Boudissa Rabah (Université de Bejaia);

Tous les enseignants qui ont participé le long de ces années à ma formation.

J'exprime aussi ma gratitude à mes collègues de l'université pour leur soutien et leur aide.

J'adresse mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

N.Alti (Issam)

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
<i>Chapitre 01</i>	<i>4</i>
GENERALITE SUR LES PARAFONDRES	4
1.1. Introduction.....	4
1.2. Parafoudre à oxyde de zinc	4
1.2.1. Partie active d'un parafoudre à oxyde de zinc	5
1.2.2. Enveloppe.....	7
1.2.3. Application des anneaux de répartition	8
1.3. Principe de fonctionnement des parafoudres ZnO	9
1.4. Paramètres caractéristiques des parafoudres ZnO	9
1.5. Principaux critères de dimensionnement d'un parafoudre	10
1.6. Avantages des parafoudres synthétiques.....	10
1.7. Pollution des parafoudres.....	11
1.7.1. Sources de pollution.....	12
1.7.2. Influence des facteurs climatiques sur les dépôts polluants	12
1.7.3. Conséquences de la pollution	12
1.7.4. Mesure de la Sévérité de pollution d'un site	13
1.7.5. Choix de la méthode de mesure de sévérité de pollution d'un site	17
1.7.6. Classification des sites pollués	17
1.7.7. Ligne de fuite	19
1.7.8. Méthodes d'essais sous pollution.....	20
1.7.9. Critiques de ces méthodes d'essais.....	21
1.8. Conclusion.....	22
<i>Chapitre 02</i>	<i>23</i>
MODELISATION DES PARAFONDRES SOUS POLLUTION	23
2.1. Introduction.....	23
2.2. Modèles des parafoudres sous pollution.....	23
2.3. Modélisation de la bande sèche	30
2.3.1. Principaux modèles statiques de contournement	30
2.3.2. Modèles dynamiques de contournement.....	33

2.3.3. Modèle dynamique utilisé.....	36
2.3.4. Organigramme de calcul	38
2.3.5. Validation du modèle	39
2.4. Conclusion.....	43
<i>Chapitre 03.....</i>	<i>44</i>
CIRCUIT EQUIVALENT DES PARAFONDRES ZNO	44
3.1. Introduction.....	44
3.2. Calcul des paramètres électriques du circuit équivalent.....	44
3.2.1. Méthode analytique	44
3.2.2. Étapes de la méthode des éléments finis (M.E.F).....	46
3.3. Étude de la distribution du potentiel et du champ électrique	47
3.3.1. Description du parafoudre étudié	47
3.3.2. Identification des domaines.....	48
3.3.3. Étude de la distribution du potentiel dans les conditions propres	48
3.3.4. Études de la distribution du potentiel dans les conditions polluées.....	50
3.4. Modèle du parafoudre synthétique	60
3.4.1. Modélisation de la résistance non-linéaire (R_v) des éléments de varistance ZnO.....	61
3.4.2. Modélisation de la couche de pollution.....	63
3.4.3. Modélisation de la bande sèche	63
3.4.4. Identification des paramètres électriques du circuit équivalent	63
3.5. Résultats de simulation et interprétations	66
3.5.1. <i>Cas de l'état propre</i>	66
3.5.2. Performance du parafoudre sous pollution	66
3.6. Conclusion.....	78
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES.....	79

Liste des figures

Fig. 1.1. Structure des parafoudres ZnO (a-enveloppe synthétique; b-enveloppe en porcelaine).....	5
Fig. 1.2. disques de varistances à diamètre différent.....	6
Fig. 1.3. L'enveloppe de type ouvert du parafoudre ZnO.....	8
Fig. 1.4. Développement des zones sèches et apparition d'arcs.....	14
Fig. 1.5. Calcul du diamètre moyen du parafoudre.....	19
Fig. 2.1. Circuit électrique équivalent [7].....	24
Fig. 2.2. Circuit électrique équivalent [8].....	25
Fig. 2.3. Circuit électrique équivalent [38].....	26
Fig. 2.4. Circuit électrique équivalent [24].....	27
Fig. 2.5. Circuit électrique équivalent(a) et (b) [4].....	28
Fig. 2.6. Circuit électrique équivalent [41].....	29
Fig. 2.7. Modèle de Neumarker [43].....	31
Fig. 2.8. Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge selon [23].....	35
Fig. 2.9. Circuit électrique équivalent de la surface isolante polluée.....	36
Fig. 2.10. Organigramme du modèle dynamique.....	39
Fig. 2.11. L'isolateur étudié du premier cas [53].....	40
Fig. 2.12. Tension de contournement en fonction de la résistivité de la pollution.....	41
Fig. 2.13. Courant de fuite en fonction de la résistivité de la pollution.....	41
Fig. 2.14. Tension de contournement en fonction de la concentration de la pollution C.....	42
Fig. 3.1. Modèle du parafoudre ZnO utilisé.....	47
Fig. 3.2. Distribution des lignes équipotentielles pour un parafoudre propre.....	49
Fig. 3.3. Distribution de la tension pour un parafoudre propre.....	49
Fig. 3.4. Répartition longitudinale périodique de la couche de pollution.....	50
Fig. 3.5. Distribution des lignes équipotentielles pour (R.L.P) 50% et 50% (x=0.03m).....	51
Fig. 3.6. Distribution de la tension le long du parafoudre pour (R.L.P) 50% et 50% (x=0.03m).....	51
Fig. 3.7. Distribution du champ électrique le long du parafoudre pour (R.L.P) 50% et 50% (x=0.03m).....	52
Fig. 3.8. Distribution des lignes équipotentielles la R.L.P (grande. A/petite. A).....	53
Fig. 3.9. Distribution de la tension pour la R.L.P (grande. A/petite. A) (x=0.03m).....	53
Fig. 3.10. Distribution du champ électrique pour la R.L.P (grande. A/petite. A) (x=0.03m).....	54
Fig. 3.11. Distribution des lignes équipotentielles pour la R.L.P(F.S/ F.I).....	55
Fig. 3.12. Distribution de la tension pour la R.L.P (F.S/ F.I) (x=0.03m).....	55
Fig. 3.13. Distribution du champ électrique pour la R.L.P (F.S/S.I) (x=0.03m).....	56

Fig. 3.14. <i>Distribution des lignes équipotentielles le long du parafoudre</i>	57
Fig. 3.15. <i>Distribution de la tension le long du parafoudre</i>	58
Fig. 3.16. <i>Distribution du champ électrique le long du parafoudre</i>	59
Fig. 3.17. <i>Schéma de principe de la modélisation</i>	61
Fig. 3.18. <i>Circuit électrique équivalent du parafoudre</i>	65
Fig. 3.19. <i>Formes d'ondes des: courant externe, interne, tension d'application</i>	67
Fig. 3.20. <i>Formes d'ondes des: courant externe, interne, tension d'application</i>	67
Fig. 3.21. <i>Formes d'ondes des: courant externe, interne, tension</i>	68
Fig. 3.22. <i>Formes d'ondes des: courant externe, interne, tension</i>	68
Fig. 3.23. <i>Formes d'ondes des tensions en différents points de la surface du parafoudre (BSS=20mm).</i>	70
Fig. 3.24. <i>Formes d'ondes des: courant externe, interne, tension</i>	70
Fig. 3.25. <i>Formes d'ondes des tensions en différents points de la surface du parafoudre (BSI=20mm).</i>	71
Fig. 3.26. <i>Formes d'ondes des: courant externe, interne, tension</i>	71
Fig. 3.27. <i>Répartition de la tension le long de l'enveloppe du parafoudre</i>	72
Fig. 3.28. <i>Formes d'ondes des courant externe et interne simulés pour des tensions d'application 8.9 kV, 12kV, 15 kV, et 18 kV, où le parafoudre est propre.</i>	73
Fig. 3.29. <i>Formes d'ondes des courant externe et interne simulés pour des tensions d'application 8.9 kV, 12kV, 15 kV, et 18 kV (BS=38mm), où le parafoudre fortement pollué coté HT.</i>	75
Fig. 3.30. <i>Formes d'ondes des courant externe et interne simulés pour des tensions d'application 8.9 kV, 12kV, 15 kV, et 18 kV (BS=38mm), où le parafoudre fortement pollué coté terre.</i>	77
Fig. A.1. <i>: Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent [23]</i>	2

Liste des tableaux

Tableau 1.1. <i>Classification des sites pollués selon CEI 60815 [36].</i>	18
Tableau 1.2. <i>Valeurs du coefficient k</i>	19
Tableau.2.1. <i>les valeurs des paramètres géométriques du deuxième isolateur étudié</i>	42
Tableau 3.1. <i>Paramètres des différents domaines du parafoudre étudié</i>	48
Tableau 3.2. <i>Valeurs des différents paramètres du circuit équivalent obtenues par la MEF (cas propre)</i> ...64	
Tableau 3.3. <i>Valeurs des résistances et des capacités de la couche de pollution</i>	64

Listes des Symboles

Symboles	Signification
R_z	Résistance de la varistance
C_z	Capacité de la varistance
R_s	Résistance de la couche de pollution
C_s	Capacité de la couche de pollution
C_f	Capacité de fibre de verre
C_p	Capacité de l'enveloppe
R_H	Résistance humide
R_{db}	Résistance de la bande sèche
C_{db}	Capacité de la bande sèche
L	Ligne de fuite totale
σ_p	Conductivité superficielle du parafoudre
ε_r	Permittivité relative
A, n	constants de l'arc
X	Longueur de l'arc
r_p	Résistance linéique de la couche de pollution par unité de longueur
U_p	Tension de la couche polluante
U	Tension instantanée appliquée
i	Courant de fuite instantané
E_p	Champ dans la couche de pollution
V_{arc}	Tension de l'arc
R_{arc}	Résistance de l'arc
E_{arc}	Champ dans l'arc
μ	Mobilité des électrons dans l'arc

V	Vitesse de propagation de l'arc
HT	Haute Tension
ω	la pulsation
F	Facteur de forme
MEF	Méthode des Éléments Finis
R.L.P	Répartition Longitudinale Périodique
B.S.S	Bande sèche supérieure
B.S.I	Bande Sèche Inferieure
G.A	Grande Ailette
P.A	Petite Ailette
F.S	Face Supérieure
F.I	Face Inferieure
ZnO	Oxyde de Zinc
U_c	Tension critique de contournement
G	Conductance superficielle de la surface isolante
α	Coefficient de non-linéarité
C	Concentration de la pollution (mg/cm ²)
DDNS	Densité de dépôt non soluble
DDSE	Densité De Dépôt de Sel Équivalent
EPDM	Éthylène Propylène Diène Monomère

INTRODUCTION GENERALE

Dans le monde entier, les réseaux d'alimentation électrique sont soumis à des contraintes de surtension qui peuvent être soit d'origine interne (surtensions de manœuvre), soit d'origine externe (surtensions de foudre).

Sur les réseaux électriques, l'amplitude des surtensions de foudre peut atteindre plusieurs centaines de kilovolts, et ainsi largement dépasser la tenue diélectrique des matériels tels les transformateurs de puissance. Ces surtensions sont très susceptibles de provoquer le contournement et/ou la destruction des équipements sensibles lorsqu'aucune protection adéquate n'est utilisée [1].

Les exploitants des réseaux électriques doivent sans cesse améliorer leur qualité de service à coûts réduits. Dans cette optique, une politique appropriée de protection contre les surtensions est essentielle.

A condition d'être soigneusement sélectionnés et correctement installés, les parafoudres constituent le meilleur investissement pour parvenir aux résultats attendus. Leur impact sur la qualité de l'énergie distribuée est indéniable et ils contribuent fortement à renforcer la sécurité à la fois pour les matériels et les personnes ainsi qu'à diminuer les coûts d'exploitation et de maintenance.

Les parafoudres à oxyde de zinc gagnent actuellement du terrain et sont de plus en plus utilisés au niveau mondial à cause de leurs performances électriques, telle que la forte non-linéarité de la caractéristique (V-I) [2], le faible courant de fuite en régime permanent et le fort pouvoir d'absorption d'énergie électrique ainsi que la facilité d'implantation et le coût compétitif [1]. Par ailleurs, les parafoudres à oxyde de zinc sont utilisés pratiquement dans toute la gamme de tensions allant de la basse tension à la très haute tension.

Les parafoudres sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution qui constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie électrique. En effet par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut alors survenir [3], [4], [5]. L'action de la pollution sur les parafoudres ZnO est très complexe. Pour simplifier, on peut toutefois dire que la pollution ne se dépose

pas uniformément sur l'enveloppe. La répartition de potentiel le long de cette enveloppe dépend de l'emplacement et des caractéristiques des différentes zones de pollution et n'est donc pas uniforme. Nous avons donc, en regard, deux distributions du potentiel, l'une imposée par les varistances à oxyde de zinc, à l'intérieur du parafoudre, et l'autre due à la couche polluante, à l'extérieur [6].

Le phénomène de pollution des parafoudres est un sujet d'actualité important ; car il présente un sérieux problème pour l'exploitation et la sécurité des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique.

Plusieurs travaux expérimentaux et théoriques ont été consacrés pour étudier le comportement des parafoudres sous pollution [5], [7], [8], [9], [10]. Le but de ces travaux est d'élaborer un modèle pouvant tenir compte des paramètres réels caractéristiques du phénomène de pollution.

Le présent travail exposera, dans le premier chapitre, les concepts fondamentaux liés aux parafoudres et au phénomène de pollution de leurs surfaces.

Dans le deuxième chapitre une recherche bibliographique des différents modèles des parafoudres d'oxyde métallique existant dans la littérature et ayant pour but d'étudier leur comportement sous pollution par l'implantation de ces modèles dans les logiciels de simulation, sera présentée. Ainsi, on exposera les principaux modèles rapportés dans la littérature et décrivant les phénomènes de contournement des surfaces isolantes sous pollution. En plus, un modèle dynamique décrivant l'évolution dans le temps du phénomène de propagation de la décharge sera étudié.

Le dernier chapitre sera consacré à la simulation basée sur la méthode des éléments finis ayant pour objectif principal la détermination de la distribution du potentiel et du champ électrique le long du parafoudre. Cette étape, nous permettra de développer un circuit équivalent pour le parafoudre, en tenant compte de la pollution, dont les paramètres seront identifiés en se basant sur l'approche des éléments finis, et sera par la suite implanté dans l'ATP/EMTP. Ce circuit équivalent nous donnera la possibilité de simuler les courants de fuite externe et interne dans le parafoudre synthétique. L'élaboration d'un modèle dynamique de décharge pouvant tenir compte des paramètres réels intervenant dans la génération et la propagation des arcs électriques aux bornes de la bande sèche sera introduit dans ce circuit.

Les différents résultats obtenus seront présentés et interprétés à la fin de ce chapitre.
Ce présent mémoire se termine par une conclusion générale et perspectives.

Chapitre 01

GENERALITE SUR LES PARAFONDRES

1.1. Introduction

Les dispositifs de protection des réseaux électriques à courant alternatif contre les surtensions sont généralement de deux types : l'éclateur et le parafoudre.

L'éclateur est encore utilisé sur les réseaux de distribution et de transport d'électricité. Il est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger, l'autre à la terre. La distance entre ces deux électrodes est réglable et détermine la tension d'amorçage [6], [11]. Malgré l'éclateur est moins cher, très robuste et très facilement réglable de sorte que ses caractéristiques permet être ajustées suivant sa fonction, a de nombreux inconvénients (les éclateurs ne peuvent pas éliminer le courant de suite à fréquence industrielle, niveau d'amorçage est très fluctuant, grande sensibilité aux conditions climatiques,...). Pour cela il est nécessaire en revanche, d'utiliser des parafoudres dès que l'on veut réduire l'isolement des matériels ou améliorer la qualité du service. Ces dispositifs présentent de meilleures caractéristiques de protection, il existe deux types de parafoudres :

- Parafoudre au carbure de silicium.
- Parafoudre à oxyde de Zinc.

Dans ce qui va suivre, nous présenterons les concepts fondamentaux liés aux parafoudres et au phénomène de pollution de leurs surfaces.

1.2. Parafoudre à oxyde de zinc

C'est au cours des années soixante que des varistances constituées d'une céramique à base d'oxyde de zinc sont apparues sur le marché pour la protection des circuits électroniques.

Dès 1970, des constructeurs de parafoudres se sont lancés dans la mise au point de parafoudres utilisant ces céramiques. Pour l'électrotechnicien, ces composants présentent deux avantages essentiels [12] :

- ✓ Un coefficient de non-linéarité très important sur une large plage de courant.
- ✓ Une capacité d'absorption d'énergie très élevée.

Par ailleurs, le temps de réponse des varistances à oxyde de zinc est très court (quelques centaines de nanosecondes au maximum) [6], ce qui rend possible leur utilisation pour la protection de systèmes face à des surtensions transitoires à front rapide.

Les parafoudres à oxyde de zinc, de la moyenne tension aux plus hautes tensions, sont constitués simplement d'un empilage de résistances non linéaires à oxyde de zinc. Parfois, mais uniquement pour les très hautes tensions, ils comportent quelques capacités additionnelles placées en parallèle sur les varistances à la partie supérieure des parafoudres et destinées à améliorer la répartition de tension le long de la colonne de varistance. Le tout est placé dans une enveloppe étanche et isolante généralement en porcelaine ou en matériau synthétique (Fig.1.1). Les dimensions de l'enveloppe doivent tenir en compte des effets de la pollution et du refroidissement [13].

1.2.1. Partie active d'un parafoudre à oxyde de zinc

La partie active, composée d'un empilage de varistances à caractéristique fortement non-linéaire (pour tous les différents types d'enveloppe, les blocs de ZnO sont fabriqués de la même manière). Les varistances sont les résistances variables. Aux valeurs basses de la tension appliquée, une varistance se comporte comme une forte résistance de valeur obéissant à la loi d'ohms mais, au-dessus d'une tension de seuil, le dispositif devient fortement conducteur présentant une basse impédance aux tensions élevées. Quand la varistance devient conductrice, elle maintient la tension appliquée à un maximum indiqué au lequel le système protégé peut résister.

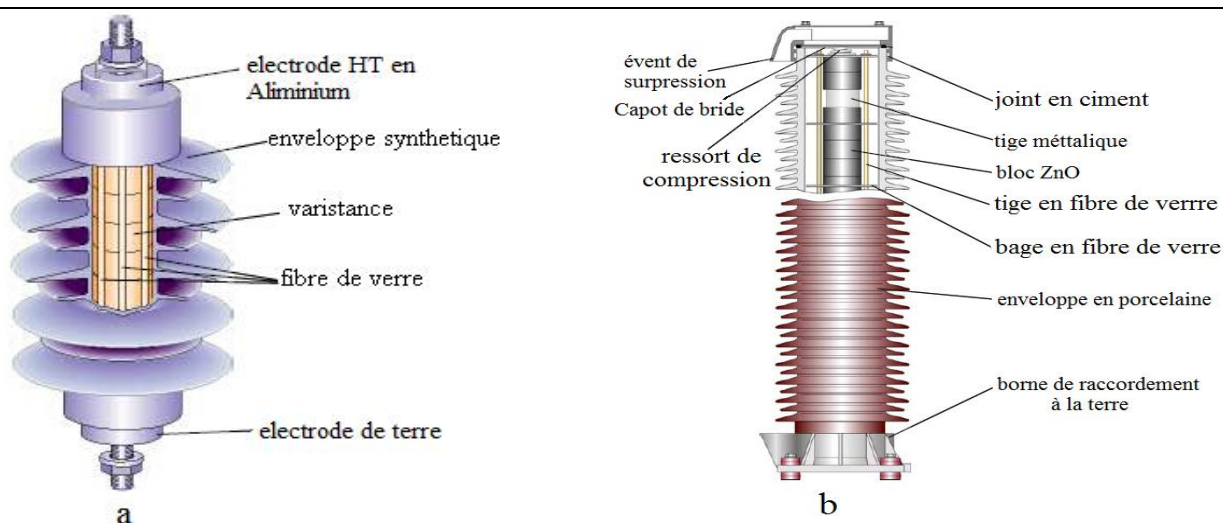


Fig. 1.1. Structure des parafoudres ZnO (a-enveloppe synthétique; b-enveloppe en porcelaine)



Fig. 1.2. *disques de varistances à diamètre différent*

La figure 1.2 présente les disques de varistances à diamètre différent.

Les parties internes diffèrent considérablement entre un parafoudre en porcelaine et un parafoudre synthétique. La seule chose commune entre ces deux conceptions est que toutes les deux incluent un empilage de varistance d'oxyde de zinc connectées en série, ainsi que des composants pour garder la colonne de ZnO ensemble.

Un parafoudre en porcelaine contient une grande quantité d'air sec ou de gaz (azote) [14] alors qu'un parafoudre synthétique normalement n'a pas tout volume inclus de gaz. Ceci signifie que les conditions au sujet des possibilités de court-circuit et de la couronne interne différemment doivent être résolues pour les deux conceptions.

Il y a une possibilité que les parafoudres en porcelaine, contenant un volume inclus de gaz, pourraient éclater en raison de l'augmentation interne de pression par court-circuit. Pour satisfaire cette conception importante, des parafoudres doivent être équipés d'un type de système de décompression (limiteur de pression) [3].

1.2.1.1. Mécanisme de dégradation des varistances à oxyde de zinc

La dégradation des varistances à oxyde de zinc peut intervenir dans différentes conditions [6], [15] :

➤ Le vieillissement naturel du matériau (contraintes de tension par la tension de services à température ambiante :

Ce type de dégradation est une variation lente du matériau granulaire lui-même. Le degré de ce vieillissement dépend de la qualité de la couche granulaire.

➤ Le vieillissement accéléré en présence d'une température ou d'une tension élevée.

- L'application de chocs de courant de forte énergie, etc :
- Réaction chimique avec les matériaux environnants contiennent des molécules de gaz impropres, par exemple des radicaux chimiques, les oxydes dans la couche des varistances réagiront chimiquement avec ces gaz. De tel gaz seront formées en service, par exemple à partir de décharge partielles à l'intérieur de l'enveloppe.

Le phénomène de dégradation des varistances se traduit par la modification des caractéristiques électriques, et en particulier par diverses manifestations telles que [4] :

- l'augmentation du courant de fuite en fonction du temps. Par conséquent, la puissance dissipée dans la varistance par effet joule augmente également et peut entraîner à terme un emballement thermique.
- le percement d'un canal conducteur par fusion du matériau. Essentiellement à la frontière de la métallisation, provoquée par l'absorption d'une forte énergie fournie par un choc de longue durée (quelque ms).
- l'apparition de décharges partielles.

1.2.2. Enveloppe

L'enveloppe doit assurer trois fonctions essentielles [6] :

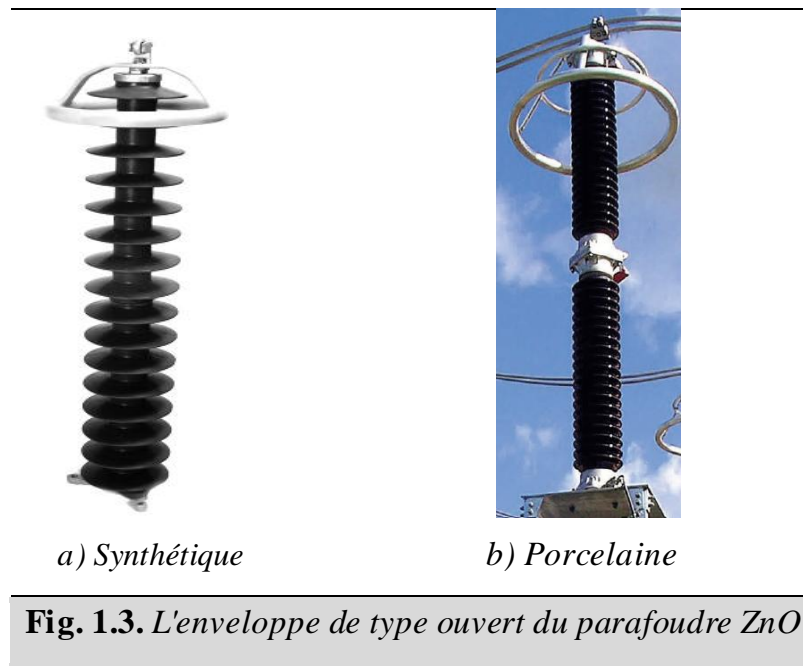
- ✓ l'isolation électrique du parafoudre.
- ✓ Sa tenue mécanique.
- ✓ et son étanchéité.

L'enveloppe peut être de deux types [14]:

- L'enveloppe de type ouvert, est disponible en enveloppe porcelaine, et en enveloppe synthétique (Fig.1.3).
- L'enveloppe de type blindé (enveloppe métallique).

a. L'enveloppe de type ouvert

Les enveloppes des parafoudres traditionnellement on été fait de porcelaine, mais la tendance aujourd'hui vers l'utilisation des isolateurs synthétiques (l'idée de base est de remplacer l'enveloppe en porcelaine par une enveloppe synthétique).



L'enveloppe synthétique est constituée d'un matériau spécial à base de silicone ou d'EPDM (Ethylène Propylène Diène Monomère) [6]. L'enveloppe est directement moulée sur la colonne de varistance (ZnO), soit aménageant une couche d'air entre l'enveloppe et la colonne de varistance. La tenue mécanique de parafoudre est parfois assurée par un enrobage de fibres de verre autour des varistances.

Pour combiner la conception de fibres de verre et l'isolateur, deux possibilités principales existent, premièrement, la conception de fibres de verre peut être moulée directement dans l'isolateur en caoutchouc et deuxièmement, la frontière entre les fibres de verre et l'isolateur en caoutchouc est remplie de graisse ou de gel, généralement du silicone.

b. L'enveloppe de type blindé « enveloppe métallique »

Les parafoudres blindés sont en principe parties intégrantes d'un poste blindé (ne se justifie que dans les postes électriques sous enveloppe métallique). L'atmosphère intérieure est composée de SF₆.

1.2.3. Application des anneaux de répartition

Des parafoudres pour des tensions de système approximativement 145 kV et plus normalement doivent être équipés d'un ou plusieurs anneaux métalliques. La fonction de ces anneaux est modifier la distribution de la tension à travers le parafoudre, et approcher l'état idéal ou la tension serait linéairement distribué (ajouter une capacité à la ligne de potentiel

peut tendre à annuler l'effet de la capacité parasite) [3], [16].

1.3. Principe de fonctionnement des parafoudres ZnO

Sous la tension de service permanent, l'impédance d'un parafoudre ZnO est très élevée et la varistance est parcourue par un courant très faible (inferieur à 1 mA). Lorsqu'une surtension apparaît (surtension de manœuvre ou de foudre), la résistance diminue rapidement, la varistance écrête la surtension de manière à constituer un chemin préférentiel pour écouler l'énergie correspondant vers la terre.

Par suite, la caractéristique V-I de l'appareil est fortement non-linéaire. La non-linéarité est telle que lorsque le courant traversant la varistance passe de 0.1 mA à 1 kA pour les surtensions de manœuvre et 20 kA pour les surtensions de foudre, la tension à ses bornes n'est multipliée que par deux environ, ce qui fait de cet élément un dispositif de protection presque idéal [6].

1.4. Paramètres caractéristiques des parafoudres ZnO

Les principales grandeurs suivantes sont utilisées dans les parafoudres [6], [17], [18] :

➤ **La tension assignée (U_r)**

Est la valeur maximale de la tension efficace à fréquence industrielle admissible entre ses bornes pour laquelle le parafoudre est prévu pour fonctionner correctement dans les conditions de surtension temporaires définies dans les essais de fonctionnement (une surtension à fréquence industrielle de 10 secondes est appliquée au parafoudre. En effet, un parafoudre ne doit pas fonctionner lorsqu'il est soumis à une surtension temporaire, car l'énergie qu'il aurait à dissiper lui serait alors fatale.

➤ **La tension maximale de service permanent (U_c)**

Est la tension maximale que le parafoudre est capable de supporter en permanence dans des conditions ambiantes données.

➤ **Le courant nominal de décharge (I_n)**

Est la valeur de crête d'une onde de courant de forme bi-exponentielle 8/20 μ s, qui sert à classer le parafoudre. En moyenne tension, Il peut prendre la valeur 5 kA ou 10 kA. Le niveau de protection du parafoudre est défini à ce courant.

➤ La tension résiduelle au courant nominal de décharge

Est la tension maximale qui apparaît aux bornes du parafoudre lorsqu'il est traversé par le courant nominal de décharge.

$$U_{ré} = I_{décharge} \cdot R_{tot \text{ parafoudre}} \quad (1.1)$$

➤ La capacité d'absorption énergétique

Est traduite par la tenue aux ondes de courant de forme bi-exponentielle 4/10 et par la tenue aux ondes de courant de forme rectangulaire dont la durée et l'amplitude définissent la sévérité.

➤ Le courant de suite

Est le courant fourni par le réseau et qui subsiste un temps plus ou moins long après le passage du courant de décharge. Il doit s'annuler de lui-même à la fin d'une alternance de la tension [11].

1.5. Principaux critères de dimensionnement d'un parafoudre

Les principaux critères de dimensionnement d'un parafoudre sont [13], [18]:

- ✓ Sa tension maximale permanente **MCOV** (Maximum Continuous Operating Voltage) doit être supérieure à la tension maximale d'exploitation du réseau.
- ✓ Sa tension nominale est fixée à 1.25 x **MCOV**
- ✓ Son niveau de protection.
- ✓ Sa capacité énergétique à supporter des surtensions temporaires, donnée par une courbe amplitude-durée.
- ✓ L'utilisation d'un parafoudre n'est efficace que sous certaines conditions d'implantation, et en particulier selon les distances qui les séparent du matériel à protéger et de sa terre, d'où l'importance de la notion de distance de protection du parafoudre.

1.6. Avantages des parafoudres synthétiques

L'isolation synthétique procure de nombreux avantages par rapport aux autres isolations [6], [19], [20]:

- augmentation de la résistance mécanique (utilisation de structures renforcées de fibre de verre).
- Réduction du poids et des dimensions.

- leur comportement en zones polluées est encore amélioré en raison de l'hydrophobicité de leur enveloppe, notamment lorsqu'elle est en gomme silicone.
- l'absence d'intervalle d'air entre l'enveloppe et la colonne de varistances réduit considérablement les phénomènes de décharges partielles sous l'effet de la pollution externe.
- Ils ont un comportement très sain en cas de défaillance (mise en court-circuit), ce qui garantit un excellent niveau de sécurité à la fois pour les personnes et les équipements à proximité.

Presque toutes les premières conceptions synthétiques ont inclu le caoutchouc d'EPDM comme matériau isolateur, mais pendant les années 1990 de plus en plus les fabricants ont changé en caoutchouc de silicone, qui est moins affecté par des conditions environnementales, par exemples rayonnement solaire et pollution.

1.7. Pollution des parafoudres

La pollution constitue un problème majeur dans la dégradation de l'isolement des ouvrages électriques [5], [21]. Portés par le vent et déposés sur la surface isolante des parafoudres, et en présence d'humidité, les divers dépôts polluants deviennent plus ou moins conducteurs et par la suite, le courant de fuite extérieure devient relativement important.

Le réamorçage de la décharge sur l'enveloppe du parafoudre 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 isolantes [8], [22]. La couche de pollution se concentre en général, dans les parties protégées contre les facteurs de nettoyage naturel (vent violent, pluie abondante,...). La répartition de la pollution est loin d'être uniforme et homogène et dépend essentiellement [21], [6]:

- du profil de l'enveloppe du parafoudre (forme géométrique de la surface) ;
- de l'orientation (verticale ou inclinée) du parafoudre par rapport au sol ;
- de la distance à la source de la pollution ;
- de la nature des dépôts, poids et taille des particules ;
- des caractéristiques climatiques du site (vent, pluie, givre,...) ;
- des caractéristiques géographiques du site zone urbaine, industrielle, littoral, Sahara,...etc.

1.7.1. Sources de pollution

La nature de la pollution dépend des facteurs géographiques et climatiques. Dans ce cas, les diverses sources de pollution peuvent être regroupées selon leurs origines en trois catégories; pollution naturelle, pollution industrielle, et pollution mixte qui est la forme la plus sévère de pollution car elle résulte de l'association d'une pollution naturelle et d'une ou plusieurs pollution(s) industrielle(s) [23], [24].

1.7.2. Influence des facteurs climatiques sur les dépôts polluants

Parmi les facteurs climatiques et météorologiques essentiels on distingue [25]:

a) Le vent

Il constitue l'agent qui assure le transport des poussières et des sels marins ainsi que la distribution des dépôts polluants formés sur les surfaces des parafoudres. D'autre part, il peut être considéré comme un agent d'auto nettoyage dans le cas où sa vitesse est importante.

b) La température

Pour les surfaces polluées, les hautes températures ont une influence positive, car elles séchent les dépôts et augmentent leur résistivité. Cependant, la différence de température entre le jour et la nuit peut provoquer le phénomène de condensation et l'humidification de la pollution.

c) L'humidité

Elle agit négativement sur la surface contaminée de l'enveloppe du parafoudre car elle engendre l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution, surtout pendant les premières heures du matin.

d) La pluie

Les fortes pluies ont un effet bénéfique car elles permettent le nettoyage des surfaces polluées. Cependant, les fines pluies humidifient les surfaces polluées, donc favorisent l'adhérence de la pollution, ce qui augmente le risque de contournement.

1.7.3. Conséquences de la pollution

Lorsque l'enveloppe du parafoudre est propre ou recouverte d'une couche de pollution sèche, la résistivité à la surface est très grande et le courant capacitif circulant à la surface

est très faible. Cependant, le dépôt de pollution accumulé à la surface du parafoudre provoque, en présence de l'humidité, la formation d'une couche électrolytique augmentant ainsi la conductivité superficielle. Cette couche devient, par la suite, le siège d'un courant de conduction de valeur relativement importante. Ce qui peut conduire à la formation et au développement d'arcs électriques le long de la surface du parafoudre. Selon les conditions aux quelles est soumis le parafoudre, trois cas peuvent se présenter comme illustre la figure 1.4 [4], [26], [27].

1.7.4. Mesure de la Sévérité de pollution d'un site

Le dimensionnement de l'isolation externe vis-à-vis de la pollution pose un certain nombre de problèmes spécifiques. L'un des plus fondamentaux est la détermination de la sévérité de la pollution là où l'isolation doit être installée.

La mesure de la sévérité est généralement basée sur la détermination expérimentale de la conductance superficielle de la couche polluante ou la détermination au laboratoire du courant de fuite d'un parafoudre pollué artificiellement

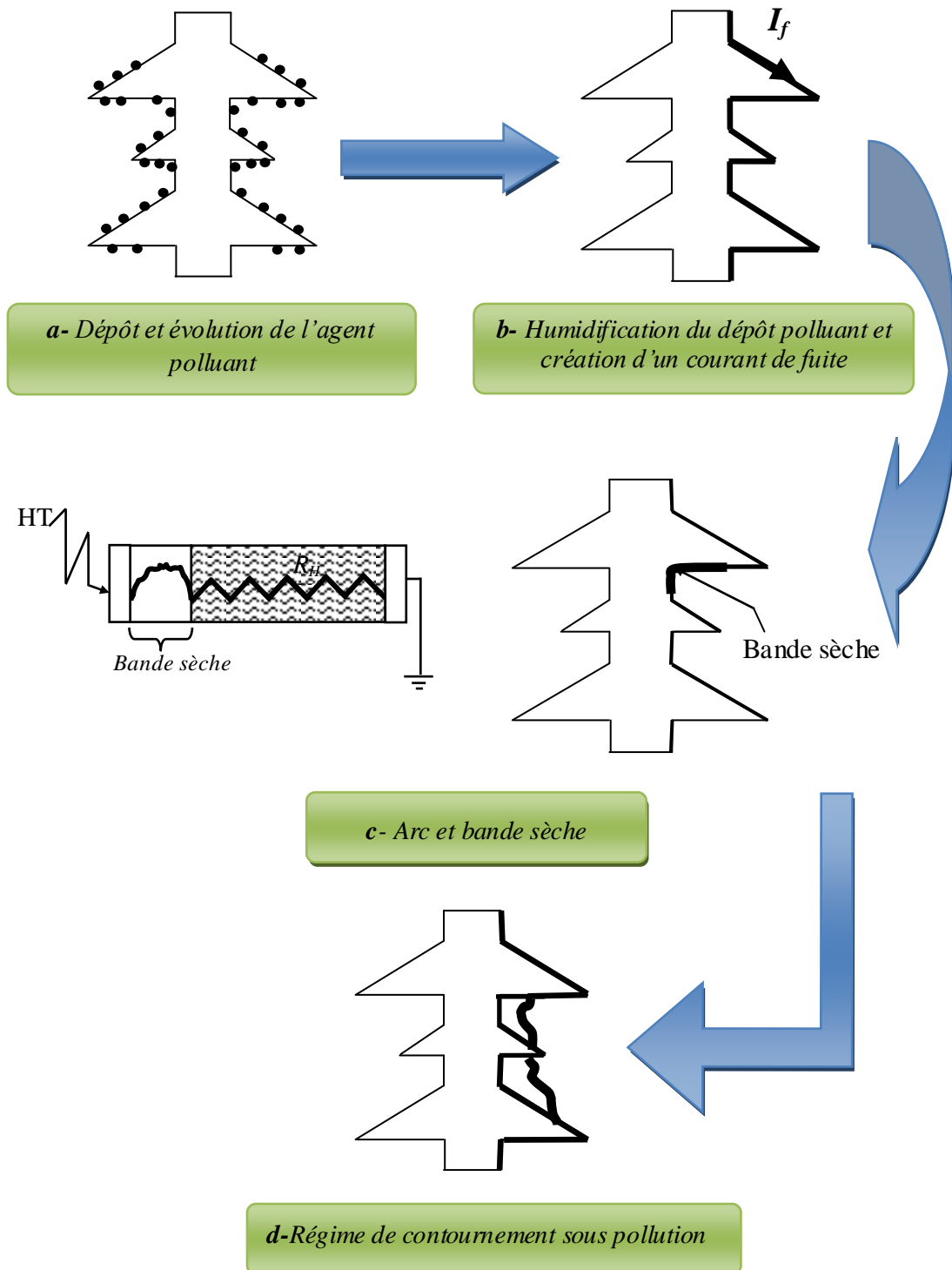
La mesure de cette sévérité est indispensable pour assurer un service sans défaillance dans un site pollué.

Dans ce qui suit, nous passerons en revue différentes méthodes de mesure largement employées, basées sur des théories et des données expérimentales. Dans ce cas, les principales méthodes qui ont été proposées pour mesurer la sévérité d'un site sont [28], [25] [29], [30]:

1.7.4.1. Méthode de la densité de dépôt de sel équivalent (DDSE)

La DDSE est utilisée comme un paramètre de base pour l'évaluation du comportement d'isolateurs et des parafoudres sur site. Elle est le dépôt équivalent exprimé en mg de NaCl par cm^2 de la surface d'un isolateur ou de l'enveloppe du parafoudre, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel, lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau [26], [31].

Des échantillons de pollution sont prélevés à la surface des isolateurs. Le dépôt est récupéré par lavage en utilisant un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier,...) et de l'eau distillée. A partir de la conductivité de la solution obtenue, on peut donc calculer la DDSE.



R_H : La résistance du dépôt humidifié.

I_f : courant de fuite

Fig. 1.4. Développement des zones sèches et apparition d'arcs

On calcule la DDSE suivant l'expression donnée par la norme CEI-507 [29]:

$$DDSE = S_a \cdot \frac{V_s}{S_i} \quad [\text{mg/cm}^2] \quad (1.2)$$

Où

La salinité S_a en $[\text{kg/m}^3]$ calculée par :

$$S_a = (5,6 \cdot \sigma_{20})^{1,03} \quad (1.3)$$

σ_{20} : est la conductivité volumique de la pollution en $[\text{S/m}]$ ramenée à une température de référence de 20°C , V_s le volume de la solution en cm^3 et S_i la surface de l'isolateur en cm^2 .

1.7.4.2. Méthode de la conductance superficielle

La conductance superficielle caractérise l'état global de la surface isolante (niveau de pollution et degré d'humidification de la couche). Elle représente le rapport du courant électrique qui circule sur l'enveloppe du parafoudre, à la tension appliquée [32]:

$$G = I/V \quad [\Omega^{-1}] \quad (1.4)$$

La tension utilisée est inférieure à la tension de service et est appliquée pendant quelques périodes. Par contre, la conductivité superficielle K_s du parafoudre ou de l'isolateur peut être obtenue en multipliant la conductance superficielle G par le facteur de forme F du parafoudre :

$$K_s = F \cdot G \quad [\Omega^{-1}] \quad (1.5)$$

Dans le cas de couches polluantes non homogènes, la conductivité locale peut être obtenue en mesurant la conductance d'une partie de la surface à l'aide d'électrodes auxiliaires. La mesure de la conductance superficielle est une méthode satisfaisante pour évaluer la sévérité de pollution d'un site.

Les mesures analogues peuvent être effectuées au laboratoire en utilisant la méthode de pollution artificielle, il est donc possible d'exprimer la sévérité de pollution d'un site en fonction de la sévérité équivalente mesurée au laboratoire.

1.7.4.3. Méthode du courant de fuite

C'est un courant de faible amplitude, circulant à travers la couche polluante le long de la

surface de l'enveloppe du parafoudre, son intensité devient importante lorsqu'on s'approche de la tension de contournement. Il dépend de plusieurs facteurs tels que la nature de la couche polluante et de la longueur de fuite [21], [33].

Par la mesure du courant de fuite à la surface d'un parafoudre donné, on peut déterminer la sévérité du site qui donne le même courant de fuite sur la surface du même parafoudre soumis à la même tension au laboratoire.

La mesure du courant de fuite s'effectue de deux manières : par le comptage du nombre d'impulsions et par l'amplitude des ces dernières.

a. Comptages d'impulsions

Par comptage d'impulsions, on enregistre pendant une période donnée, sur un parafoudre soumis à sa tension de service, le nombre d'impulsions du courant de fuite dépassant une certaine amplitude fixée. Généralement, la fréquence et l'amplitude de ces impulsions croissent lorsqu'on s'approche du contournement sous pollution.

Pour l'enregistrement, on utilise un parafoudre en service et un dispositif permettant de compter les impulsions du courant de fuite.

b. Courant de fuite de la plus forte crête (I_{fC})

On enregistre, pendant une période relativement longue sur un parafoudre réel continuellement soumis à sa tension de service, les amplitudes des impulsions de courant de fuite. La plus forte valeur de crête du courant est exploitée pour la détermination de la sévérité de pollution du site.

Cette méthode est simple et tient compte de l'effet combiné des conditions atmosphériques et de la tension appliquée sur la couche polluante. Mais le coût, relativement élevé, de l'équipement de mesure contrebalance les avantages de cette méthode.

1.7.4.4. Méthode optique (sans contact)

Dans le but de déterminer l'épaisseur de la couche polluante disposée sur la surface de l'enveloppe du parafoudre, un dispositif à rayon laser permet à partir de rayons réfléchis (amplitude, décalage de phase, etc.) de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche. La mesure de sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche [33], [34].

1.7.4.5. Méthode de la densité de dépôt non soluble (DDNS):

Elle correspond à la quantité de dépôts polluants non solubles présents dans une couche de pollution. Elle s'exprime en mg/cm^2 . La mesure de la DDNS s'accompagne souvent d'une analyse physico-chimique de la pollution, au terme de laquelle les sources polluantes peuvent être identifiées.

La détermination de la DDNS s'effectue comme suit :

La solution polluée obtenue est filtrée à l'aide d'un papier filtre. Le dépôt non soluble restant après filtrage est séché puis pesé.

La DDNS peut être calculée par la formule suivante [33] :

$$DDNS = \frac{(m_f - m_i)}{(S)} \quad [\text{mg}/\text{cm}^2] \quad (1.6)$$

Où

$DDNS$: est la densité de dépôt non soluble.

m_f : est la masse du papier filtre contenant la pollution après séchage en mg.

m_i : est la masse initiale du papier filtre en mg.

S : est la surface lavée de l'enveloppe du parafoudre en cm^2 .

1.7.5. Choix de la méthode de mesure de sévérité de pollution d'un site

D'après la littérature [28], [25], [30], il est impossible de définir une méthode universelle pour l'évaluation de la sévérité de pollution. Les trois méthodes les plus utilisées sont : la mesure de la DDSE, de la conductance superficielle, et du courant de fuite. Actuellement, l'utilisation de la sonde mobile est devenue très répandue car elle offre d'autres avantages. En effet, elle est alimentée par une batterie et elle est portable, donc les mesures peuvent être effectuées sur les parafoudres et/ou sur les isolateurs réels en service [35].

1.7.6. Classification des sites pollués

Pour définir l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la salinité et les niveaux de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été définies selon la norme CEI 60815 [36], qui sont : faible, moyenne, forte et très forte (Tab. 1.1)).

Tableau 1.1. Classification des sites pollués selon CEI 60815 [36]			
Niveau de pollution	DDSE	Origines et sources de pollution	
Faible	0,06 mg/cm ²	Pollution d'origine naturelle (Sauf marine)	<ul style="list-style-type: none"> • Elle concerne généralement des zones non industrielles ayant une faible densité d'habitations, situées loin de la mer. • Zones avec faible densité d'industries ou d'habitations mais soumise fréquemment aux vents et/ou pluies. • Régions montagneuses. <p>Toutes ces zones doivent être situées à des distances d'au moins 10 à 20 km de la mer et ne doivent pas être exposées aux vents venant directement de la mer.</p>
Moyenne	0,20 mg/cm ²	Pollution d'origine naturelle (Sauf marine)	<ul style="list-style-type: none"> • zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ou ayant une densité moyenne d'habitation équipées d'installations de chauffage et situées loin de la mer. • Zones à forte densité d'habitation et/ou d'industries mais soumises fréquemment à des chutes de pluies. • zones exposées au vent de mer, mais pas trop proches de la côte (distantes d'au moins quelques kilomètres).
Forte	0,60 mg/cm ²	Pollution naturelle marine et industrielle	<ul style="list-style-type: none"> • zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes villes à forte densité d'installations de chauffage polluantes. • Zones à forte densité d'habitation et près de la mer. • Zones situées près de la mer, ou en tout cas exposées à des vents relativement forts venant de la mer.
Très forte	>0,60mg/cm ²	Pollution naturelle, industrielle ou mixte	<ul style="list-style-type: none"> • Zones généralement peu étendues, soumises à des fumées industrielles produisant des poussières conductrices. • Zones généralement peu étendues, très proches de la côte et exposées aux embruns ou au vent fort et polluant venant de la mer. • Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant de sable et du sel soumis à une condensation régulière.

1.7.7. Ligne de fuite

La tenue sous pollution d'un parafoudre caractérise la capacité qu'il a de tenir, en milieu pollué, les contraintes électriques qui apparaissent sur le réseau. Cette tenue sous pollution est caractérisée par la longueur de la ligne de fuite minimale L_f de ce parafoudre placé entre phase et terre. Cette longueur (exprimée en mm) est obtenue en faisant le produit [37]:

$$L_f = l \cdot U_s \cdot k \quad [mm] \quad (1.7)$$

l : est la longueur de la ligne de fuite minimale spécifique (exprimée en mm/kV).

Quatre classes de pollution sont définies. Pour chacune de ces classes, on définit une longueur de ligne de fuite minimale spécifique.

U_s : est la tension la plus élevée pour les matériels (exprimée en kV). Elle est définie par la tension maximale entre phases (ou tension composée la plus élevée) pour chacune des valeurs de tensions nominales d'exploitation du réseau.

k : est un coefficient qui dépend du diamètre moyen (D_m) de l'enveloppe (tableau 1.2).

Tableau 1.2. Valeurs du coefficient k			
D_m (cm)	$D_m < 30$	$30 < D_m < 50$	$D_m > 50$
k	1	1.1	1.2

Le diamètre moyen (D_m) est calculé comme suit :

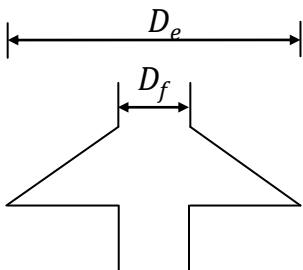
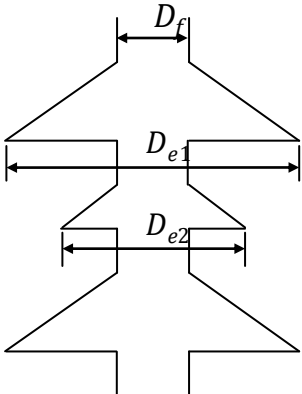
Ailettes simples	Ailettes alternées
	
$D_m = \frac{D_f + D_e}{2}$	$D_m = \frac{2D_f + D_{e1} + D_{e2}}{2}$

Fig. 1.5. Calcul du diamètre moyen du parafoudre

1.7.8. Méthodes d'essais sous pollution

Avant de mettre en service un parafoudre quelconque, il faut bien comparer les performances de divers types d'enveloppes et sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution pour chaque site. Pour cela, il est nécessaire de les soumettre à des essais. Ces derniers peuvent être réalisés sous conditions naturelles (sur site) ou au laboratoire. D'où on distingue deux types d'essais sur les parafoudres pollués [9]:

- Essais sous pollution naturelle.
- Essais sous pollution artificielle.

1.7.8.1. Essais sous pollution naturelle

Ils consistent à installer, dans les différents sites pollués, des stations dans lesquelles on observe le comportement d'un certain nombre d'isolateurs de longueurs ou de profils différents. Les qualités respectives de ces isolateurs, placés sous la même tension, sont appréciées en fonction du courant de fuite, de la conductivité superficielle ainsi qu'en fonction du temps au contournement. Ces essais ont l'avantage de tenir en compte de l'effet de toutes les contraintes, dans toutes leurs complexités sur un site donné [9], [21], [30].

L'inconvénient majeur de ces essais est la durée des expériences qui est relativement longue (l'essai sous pollution naturelle peut prendre jusqu'à deux ans ou trois ans), pour pouvoir étudier valablement les performances des isolateurs, C'est pourquoi des méthodes de laboratoire furent proposées et sont largement utilisées [26].

1.7.8.2. Essais sous pollution artificielle:

Ils consistent à reproduire en laboratoire les conditions de la pollution naturelle. Ils sont aujourd'hui largement utilisés et ont l'avantage d'être rapides et leurs coûts relativement bas.

Les méthodes d'essais des isolateurs sont parfois adoptées pour les parafoudres et qui peuvent être classées en trois grandes catégories [6], [29], [30]:

- Méthodes de la couche solide.
- Méthode du brouillard salin.
- Méthode de la pollution liquide.

a. Méthode des couches solides

Dans ces méthodes la surface isolante est recouverte par pulvérisation d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte, généralement le kaolin. La conductivité de cette suspension est ajustée par réglage de la concentration de chlorure de sodium (par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium). Les isolateurs sont alors séchés afin que la couche polluante se stabilise.

Si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérité est défini comme étant la densité de dépôt de sel en mg/cm^2 . Par ailleurs, si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini comme étant la conductivité de la couche polluante [21], [38].

b. Méthode du brouillard salin

L'isolateur est alimenté par une tension de service, maintenue constante durant tous les essais et soumis à un brouillard salin. La solution saline utilisée dans la méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière insoluble. Elle est également valable pour représenter de nombreux dépôts de pollution industrielle ayant une couche de pollution relativement mince [6], [21].

Le degré de salinité exprimé en kg de sel par m^3 de solution, définit le paramètre de sévérité.

c. Méthode de la pollution liquide

Cette méthode s'apparente à la méthode de la couche solide lorsqu'un mélange liquide est déposé sur l'isolateur avant l'essai ; cependant, la pollution reste humide durant l'essai. Elle est constituée d'eau, de craie et de méthylcellulose ou de kaolin. La conductivité désirée est obtenue par addition de chlorure de sodium.

Après quelques minutes d'égouttages, on applique la tension d'essai au parafoudre. Il est important de signaler que la couche polluante n'est pas humidifiée en cours d'essai. Ainsi, après quelques minutes d'essai, les courants de fuite assèchent la couche et la probabilité de contournement décroît rapidement [6], [26].

1.7.9. Critiques de ces méthodes d'essais

La méthode du brouillard salin est d'une grande facilité de mise en œuvre et permet

d'obtenir une bonne reproductibilité des essais est donc la plus utilisée. En outre, la méthode du brouillard salin est la seule qui assure un renouvellement de la couche polluante au cours de l'essai.

La méthode de brouillard salin nécessite une installation fixe assez importante, à l'encontre, des autres méthodes qui ne nécessitent pas d'installations fixes aussi complexes. Cependant, la préparation des agents polluants pour ces derniers est plus délicate et le temps d'essai est généralement plus long.

Les trois méthodes font appel au chlorure de sodium pour ajuster la conductivité de la pollution. On peut admettre que ces méthodes simulent de plus, la pollution marine et même la pollution industrielle.

Par contre, ces méthodes sont moins représentatives pour simuler la pollution désertique qui est très contraignante dans les pays qui possèdent des lignes dans des régions désertiques (Algérie, Égypte,... etc.) [39].

1.8. Conclusion

Dans ce chapitre introductif on a donné des informations d'ordre général sur les parafoudres et sur le phénomène de pollution de leurs surfaces.

La pollution est un facteur essentiel dont il faut tenir compte pour le fonctionnement normal des parafoudres, et pour mieux étudier leurs comportements sous pollution, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés. La connaissance de cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation.

La méthode d'essai sous pollution artificielle est largement utilisée. Elle consiste à reproduire au laboratoire les conditions de la pollution naturelle, ainsi qu'elle possède l'avantage d'être rapide.

Chapitre 02

MODELISATION DES PARAFONDRES SOUS POLLUTION

2.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons les différents modèles des parafoudres à oxyde métallique existant dans la littérature. Nous présenterons aussi la modélisation de la bande sèche, qui s'appuie sur le concept des modèles de contournement dynamique des surfaces isolantes.

2.2. Modèles des parafoudres sous pollution

La pollution provoque dans la plus part du temps des défauts dans les parafoudres, donc c'est important aux utilisateurs et aux fabricants de tenir compte ce type de problème pour éviter la destruction inattendue du parafoudre.

Dans ce qui va suivre; nous allons exposer les différents modèles des parafoudres d'oxyde métallique existant dans la littérature, ayant pour but d'étudier le comportement du parafoudre d'oxyde métallique sous pollution par l'implantation de ces modèles dans les logiciels de simulation.

❖ Un modèle de parafoudre ZnO sous pollution a été développé par : K.Feser, W. Kohler, D. Qiu et K. Chrzan [7]. Pour le calcul du courant interne et externe, le circuit équivalent montré dans la figure 2.1 à été utilisé. Toute l'unité du parafoudre est modélisée par raccordement de 5 éléments simple de varistance en série, considérant les caractéristiques électriques du matériau d'oxyde métallique ($R(i), C_a$), les capacités d'accouplement entre la couche de pollution et la colonne de varistance (C_p, C_k) et les influences de la couche de pollution et de la bande sèche (R_p, R_c).

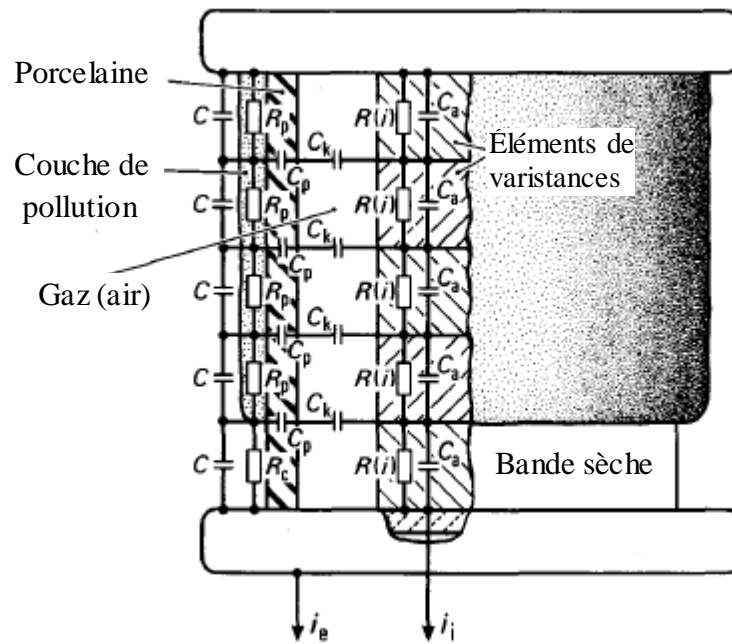


Fig. 2.1. Circuit électrique équivalent [7]

$R(i)$: Résistance non-linéaire.

C_a : Capacité du matériau de varistance.

C_k : Capacité d'accouplement du système d'isolation interne (air).

C_p : Capacité d'accouplement de l'enveloppe en porcelaine.

R_p : Résistance de pollution.

R_c : Résistance de la zone (bande) sèche.

C : Capacité longitudinale.

Les courants internes et externes du parafoudre sont calculés et comparés aux courants mesurés. Les auteurs affirment que les distributions de champ et de la tension dépendent de la position de la bande sèche.

❖ L'auteur de la référence [8], Dr. Ahmed Zahadi propose un circuit équivalent du parafoudre en porcelaine pollué illustré sur la figure 2.2. Le modèle proposé décrit les éléments qui ont été évalués à partir des mesures et à des résultats décrits dans les littératures. R_c est une résistance caractéristique et est le paramètre dépendant de la température, C_c est la capacité de bloc de varistance, les deux paramètres (R_c, C_c) sont liés au grain de ZnO.

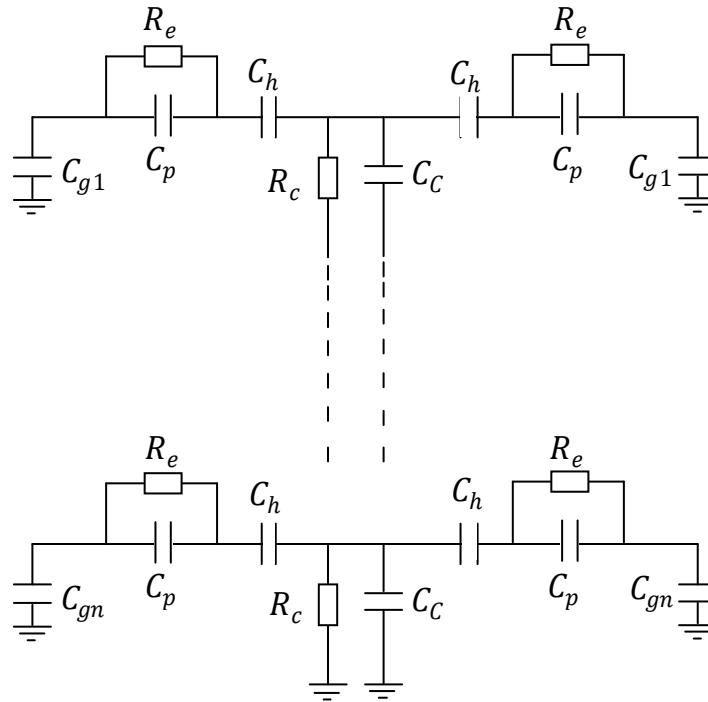


Fig. 2.2. Circuit électrique équivalent [8]

R_e est la résistance de la surface conductrice de la couche extérieure qui décrit l'état extérieur du parafoudre. C_h est la capacité d'accouplement d'isolation interne (par exemple l'air). C_p est capacité de l'enveloppe en porcelaine, et $C_{g1} \dots \dots, C_{gn}$ sont les capacités entre les isolateurs et la terre.

Le circuit équivalent proposé a été simulé par un ordinateur qui permet l'étude de performance sous divers conditions environnementales. Il représente aussi la distribution de tension interne et externe à travers le parafoudre en présence de la bande sèche.

L'auteur affirme que la distribution de tension dépend de la position de la bande sèche.

❖ Dans la référence [38], un modèle PSPICE d'un parafoudre pollué a été développé par Krystian Chrzan, Zbigniew Pohl, et Wolfgang Kohler (Fig.2.3). Il se compose de huit parties, chacune est composée d'un bloc de varistance avec une capacité d'accouplement entre la couche de pollution et la colonne de varistance C_{1i} (où $i = 1,2,\dots,8$) et la résistance R_{1i} de couche de pollution. Les varistances à oxyde métallique ont été considérées comme résistance non linéaire (deux diodes Zener) parallèle à une capacité C_i ; et une résistance R_i en série. Les résistances R_{21} et R_{22} sont représentées par l'auteur come les shunts pour la

mesure du courant. la capacité d'accouplement entre la couche de pollution et la colonne de varistance a été estimée. La capacité de varistance a été calculée à partir d'une mesure courante à une tension de 77 kilovolts (AC). Les valeurs des résistances de la couche de pollution ont été calculées en utilisant la conductivité extérieure et le facteur de forme de l'enveloppe de porcelaine. Finalement, la tension de diode zener des varistances et ses résistances ont été estimées en utilisant la caractéristique tension/courant de varistance.

❖ Un modèle électrique a été développé par F.S. Benzaoua [40] (Fig.2.4). Les éléments de varistances ont été modélisés en tant que cinq sections de longueur égale et chaque section est représentée par une capacité linéaire C_z parallèlement à une résistance R_z . C_f est la capacité de fibre de verre, et C_p est la capacité de l'enveloppe synthétique. La couche de pollution a été modélisée par une résistance R_s en parallèle avec une capacité C_s . Les valeurs des éléments de circuit équivalent ont été calculées à partir des mesures expérimentales des courants de fuites externes et internes.

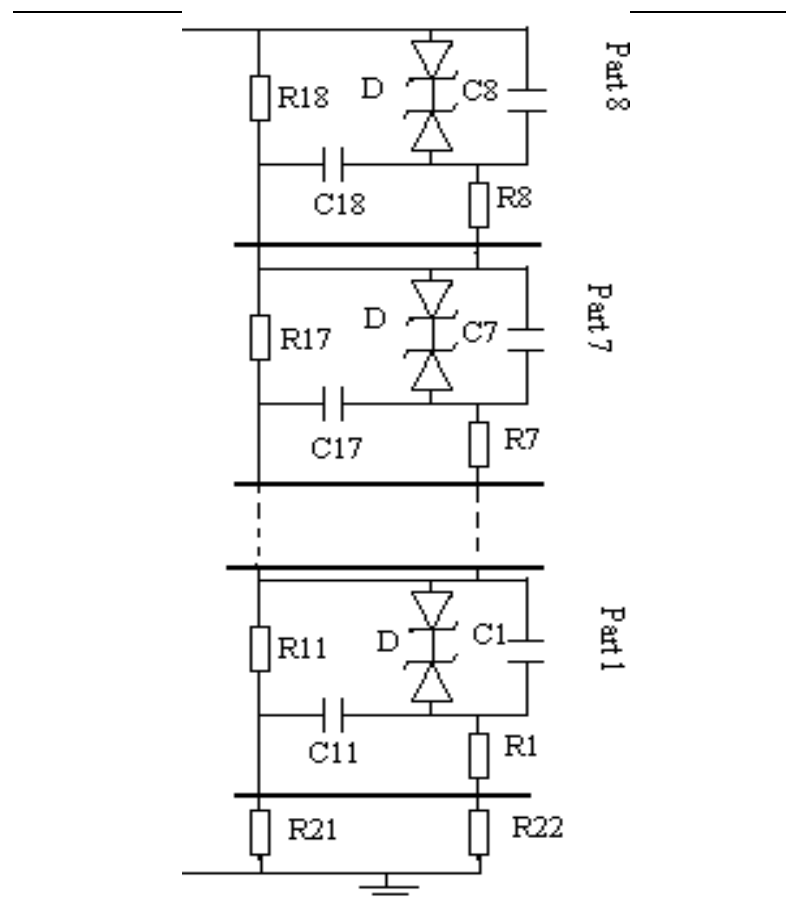


Fig. 2.3. Circuit électrique équivalent [38]

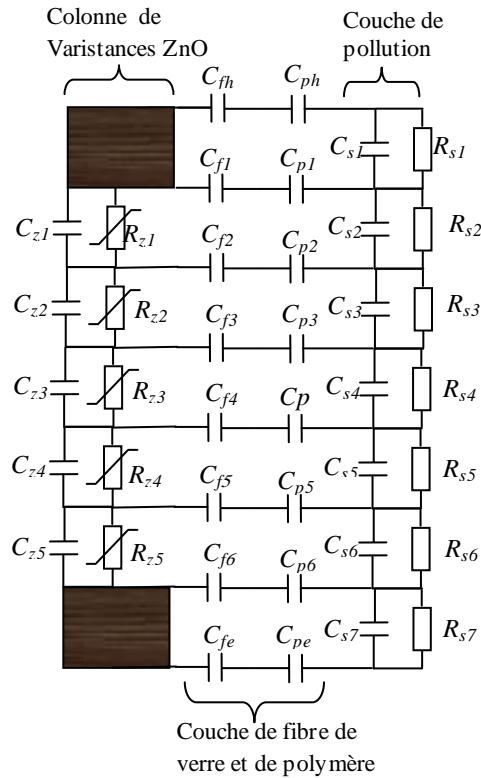


Fig. 2.4. Circuit électrique équivalent [40]

R_{zi}, C_{zi} : Résistance et capacité des varistances

C_{fi} : Capacité de fibre de verre.

C_{pi} : Capacité de l'enveloppe en polymère.

R_{si}, C_{si} : Résistance et capacité de la couche de pollution.

Le circuit équivalent a été simulé via un logiciel SPICE, qui permet l'étude de comportement du parafoudre synthétique sous pollution. Il représente aussi la distribution de la tension à travers le parafoudre en présence de la bande sèche. Cette dernière a été modélisée par une résistance en parallèle avec une capacité, dont ces valeurs sont fixes et elles sont calculées dans l'état sec.

❖ Dans la référence [4], Ravindra P. Singh et T.V.Singh montrent un circuit équivalent d'un parafoudre pollué illustré sur la figure 2.5 (a). Le parafoudre se compose d'un empilage de disques de varistances (représenté par un circuit parallèle $(R_{ni} - C_B)$ rencontrés à l'intérieur de l'enveloppe en porcelaine ou en verre. L'air sec sépare l'empilage de varistance (partie active) de l'enveloppe et fournit une capacité d'accouplement C_c . Avec les capacités d'évaluations additionnelles C_g parallèles aux blocs d'oxyde métallique, une amélioration de la distribution de tension à travers le parafoudre peut être réalisée. Cependant, c'est un circuit très complexe à analyser.

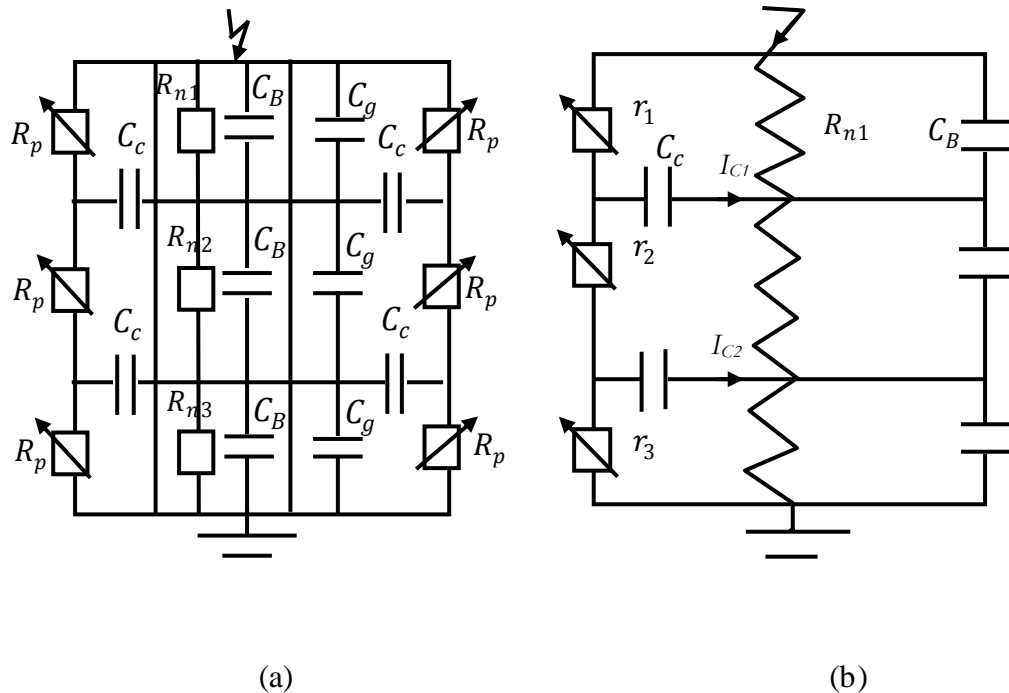


Fig. 2.5. Circuit électrique équivalent (a) et (b) [4]

Les mêmes auteurs [4] ont montré un circuit équivalent simplifié (figure 2.5(b)) après avoir négligé les capacités longitudinales et d'accouplement de l'enveloppe en porcelaine, et avoir pris au départ l'hypothèse que la résistance de pollution et la résistance de la bande sèche sont les mêmes ($r_{i=1,2,3}$).

❖ Le même modèle développé par F.S. Benzaoua [40] a été utilisé par Tighilt [13] pour étudier la distribution de la tension le long du parafoudre synthétique dans les conditions polluées. La méthode des éléments finis a été employée via le logiciel FEMLAB pour déterminer les différents paramètres du circuit équivalent. La bande sèche a été modélisée comme une résistance non linéaire basée sur le concept du modèle statique d'Obenaus en parallèle avec une capacité. Pour simuler la décharge à travers cette bande sèche, l'auteur a utilisé un interrupteur statique placé aux bornes de cette bande. La fermeture de cet interrupteur simule la décharge.

❖ Dans la référence [41], un modèle électrique a été développé par Jinliang He, et Jun Hu, et Bo Zhang. Pour l'étude de la distribution de la tension, le circuit équivalent montré dans la figure 2.6 a été utilisé. Le parafoudre modélisé est un parafoudre 1000 kV (très haute tension). Afin d'améliorer la distribution du potentiel du parafoudre et diminuer de ce fait la chute de tension maximale sur les disques de ZnO, généralement, des anneaux de répartition

externes et des condensateurs parallèles internes sont ajoutés au parafoudre. Quand les anneaux de répartition sont fixes, quatre bancs des condensateurs seraient ajoutés aux quatre sections hautes du parafoudre pour ajuster les rapports de tension de chaque section, c-à-d pour ajuster le potentiel de chaque bride et d'être plus près de la valeur idéale.

Le parafoudre est constitué de 5 sections connectées par des brides métalliques, et de 3 anneaux de répartition. A l'intérieur de l'enveloppe 4 colonnes de varistances sont montées en parallèles (Fig.2.6).

Avec les paramètres obtenus des capacités et des résistances (par la MEF), l'auteur simule le circuit équivalent du parafoudre montré dans figure 2.6. R_i est la résistance de la section de varistance, C_{ij} est la capacité mutuelle entre les brides, C_i est la capacité des condensateurs parallèles supplémentaires à la section, C_{ii} est la capacité entre le bride et la terre.

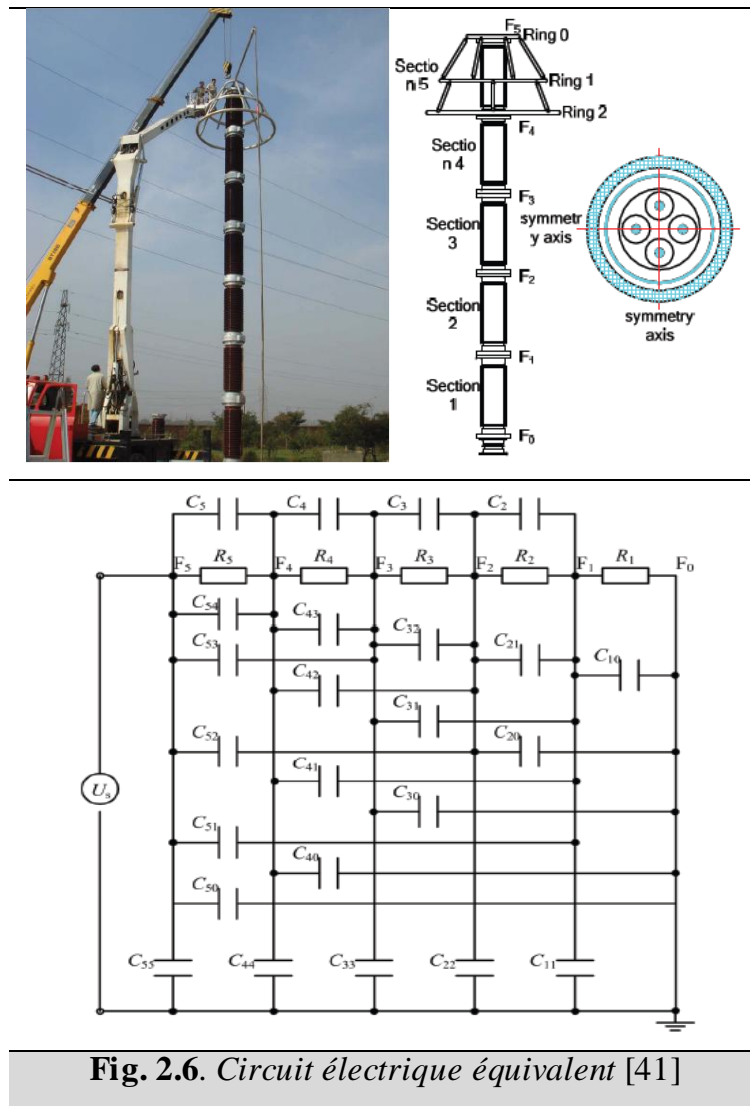


Fig. 2.6. Circuit électrique équivalent [41]

2.3. Modélisation de la bande sèche

La formation de la bande sèche sur l'enveloppe du parafoudre cause un fort champ électrique. Par suite, la tension de 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.

La dynamique de l'arc électrique est décrite en tenant compte des évolutions temporelle (dans le temps) et spatiale (suivant la longueur d'arc), des différents paramètres régissant le comportement de la bande sèche. La décharge à travers cette bande sèche sera simulée en adoptons un modèle de contournement dynamique des surfaces isolantes (selon le risque de contournement, les parafoudres doivent être traités de la même manière que les isolateurs haute tension). A cet effet, nous allons exposer une recherche bibliographique des principaux travaux sur le contournement des surfaces isolantes sous pollution.

2.3.1. Principaux modèles statiques de contournement

Le premier chercheur qui était à l'origine des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante, sous tension continue est Obenaus [42]. Partant d'un modèle type circuit électrique équivalent, constitué d'un arc de longueur x en série avec une résistance R_p représentant la résistance de la pollution, il en a déduit la tension d'arc :

$$V_{arc} = \frac{Ax}{In} \quad (2.1)$$

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

Et x présente la longueur de l'arc.

En se basant sur les travaux d'Obenaus, Neumarker [43] suppose que la résistance de la couche de pollution est uniforme par unité de longueur (Fig.2.7). La résistance $R_p(x)$ peut être donnée par :

$$R_p = r_p(L - x) \quad (2.2)$$

Où

r_p : est la résistance moyenne par unité de longueur ;

$(L - x)$: la longueur de la zone non court-circuitée par l'arc.

En introduisant cette expression dans le modèle d'Obenaus et en négligeant les chutes de

tension cumulées aux électrodes, la tension V aux bornes de l'isolateur sera :

$$V = V_{arc} + r_p(L - x) \quad (2.3)$$

Ou encore :

$$V = \frac{AX}{I^n} + r_p(L - x) \quad (2.4)$$

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

$$I_c = \left(\frac{A}{r_p} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (2.5)$$

Et

$$x_c = \frac{L}{n + 1} \quad (2.6)$$

En remplaçant dans la première équation, la tension critique de contournement peut s'écrire alors comme suit :

$$U_c = A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_p^{\frac{n}{n+1}} \cdot L \quad (2.7)$$

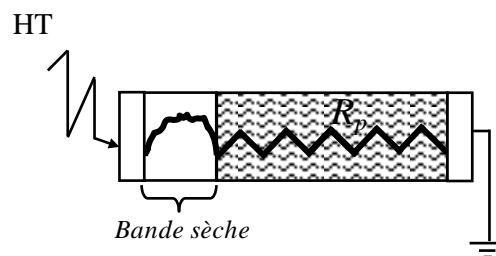


Fig. 2.7. *Modèle de Neumarker [43]*

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

A partir d'une analyse théorique, Rizk [43] a décrit le phénomène d'entretien de l'arc et le mécanisme de rupture diélectrique. Il a mis en évidence l'expression de la rigidité de l'espace résiduel et établit une relation entre la tension de contournement U_c , la résistance de pollution linéique et la longueur de fuite L .

Cette relation peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{U_c}{L} = 23 \cdot r_p^{0.4} \quad (2.8)$$

Plusieurs modèles expérimentaux ont été proposés pour le cas d'une tension alternative. Le plus connu est celui de Claverie et Porcheron [44] [45]. Ces auteurs ont montré que, pour un modèle d'isolateur plan, la tension d'arc est de la forme :

$$U_{arc} = 100 \frac{x}{\sqrt{I}} \quad (2.9)$$

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

$$U_{cx} = 80 \frac{x}{\sqrt{I}} \quad (2.10)$$

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

$$U_{cx} = (n + 1) (Ax)^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{r_p (L-x)}{n} \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (2.11)$$

Avec

x : la longueur d'arc.

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

Dans cette partie, nous avons rappelé les principaux modèles statiques rapportés dans la littérature. Ces modèles traitent le phénomène de contournement sous un aspect global. Il s'agit de modèles statiques qui photographient la situation à un instant donné, et ne permettent guère que la recherche de la condition de rupture d'un état d'équilibre. Ils décrivent l'état électrique statique du phénomène de contournement et ne donnent aucune explication sur le mécanisme physique de l'élongation de la décharge.

Par ailleurs, l'utilisation des modèles statiques pour la prédiction des tensions de contournement n'est pas globalement satisfaisante en comparaison avec les résultats expérimentaux. C'est pourquoi, la connaissance des phénomènes physiques impliqués dans l'élongation d'une décharge sur une surface isolante est nécessaire afin d'améliorer sa modélisation.

2.3.2. Modèles dynamiques de contournement

Alors que les paramètres caractérisant la propagation des décharges électriques évoluent dans le temps, l'étude du phénomène de contournement a été souvent effectuée en utilisant des modèles statiques. Afin d'être conforme à la réalité, de nouveaux modèles ayant pris en considération la variation dans le temps de certains paramètres, ont été développés. Ainsi, les critères de propagation et l'étude de la dynamique de l'arc sont régis par des lois physiques.

2.3.2.1. Modèle de Rizk

Pour caractériser la dynamique de l'arc pour le cas continu, Rizk et Nguyen [47] ont considéré que la résistance de l'arc varie selon l'équation de Mayr [48] donnée par:

$$\frac{dR_{arc}}{dt} = \frac{R_{arc}}{\tau} - \frac{R_{arc}^2 \cdot I^{n+1}}{A\tau} \quad (2.12)$$

Avec:

$\tau = 100 \mu s$, constante de temps de l'arc.

$n = 0,8$ et $A = 60$; constantes de la caractéristique statique de l'arc.

2.3.2.2. Modèle de Anjana et Lakshminarasimha

En se basant sur l'équation de Mayr et le modèle statique d'Obenaus, Anjana et Lakshminarasimha [49] ont supposé que la surface isolante est divisé en un certain nombre de bandes, formant des anneaux symétriques par rapport à l'axe de l'isolateur et que l'arc est une colonne de gaz en équilibre thermodynamique dont l'énergie est donnée par :

$$W_{th} = \frac{3}{2} KTM \quad (2.13)$$

Avec:

T : la température de l'arc,

M : le nombre de particules neutres dans l'arc,

K : la constante de Boltzman.

La variation de la résistance de l'arc par unité de longueur (ohm/cm) est donnée par l'expression suivante:

$$r_{arc} = r_{arc} + dr_{arc} \quad (2.14)$$

Pour que l'arc se propage il faut que son énergie totale W_t soit supérieure ou égale à l'énergie W_{th} nécessaire pour le maintenir à sa température. Cette énergie W_t est donnée par l'expression suivante:

$$W_{totale} = (E_{arc} I_{arc} - P_0) dt \quad (2.15)$$

avec :

E_{arc} : le gradient de la décharge,

I_{arc} : le courant de la décharge,

dt : l'incrément de la longueur de la décharge,

P_0 : les pertes par unité de longueur (constantes).

La température de l'arc et la température ambiante sont supposées constantes et sont égales respectivement à 3000 °K et 300 °K.

Si la condition de propagation n'est pas satisfaite, la tension est incrémentée de ΔU_s et le programme est repris depuis le début. Par contre, si la condition est satisfaite, la vitesse de propagation de l'arc est calculée par :

$$v = \mu E_{arc} \quad (2.16)$$

où μ est la mobilité de l'arc.

On déduira la variation de la longueur d'arc (dx) grâce au pas de temps Δt , tel que ($dx = v \cdot \Delta t$).

Donc la nouvelle longueur est ($x + dx$). Si, cette dernière atteint la longueur totale de fuite, il y a contournement. Dans le cas contraire, le temps est incrémenté et les calculs sont repris depuis le début.

2.3.2.3. Modèle de Sundararajan et Gorur

Sundararajan et Gorur [50] ont proposé un modèle dynamique en continu, qui ressemble à celui de Anjana et Lakhminarasimha, mais basé sur le critère de propagation de Hampton [51].

Pour le gradient de la tension dans la couche de pollution, ils ont utilisé l'expression :

$$E_p = A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (2.17)$$

Avec

r_p : la résistance linéique de la couche de pollution,

$A = 63$ et $n = 0.5$: les constantes de la caractéristique statique de l'arc.

Notons que la valeur de E_p utilisée par Sundrarajan et Gorur est en fait la contrainte critique:

$$E_c = A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (2.18)$$

Celle-ci a été établie par Neumarker [43].

2.3.2.4. Modèle de Dhahbi et Beroual

Ces deux chercheurs [23] considèrent que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure 2.10. Sachant que pour chaque saut de l'arc, on obtient une nouvelle cellule ayant les paramètres suivants : R_i , C_i , L_i et U_i .

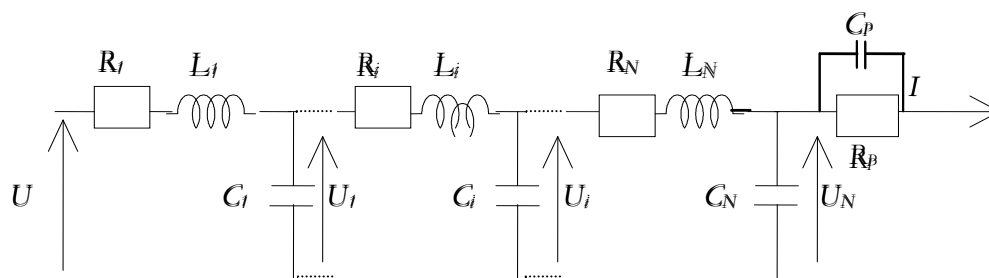


Fig. 2.8. Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge selon Dhahbi et A [23]

où

R_p : la résistance de la pollution,

C_p : la capacité de la couche de pollution,

R_i : la résistance de l'arc,

C_i : la capacité de la décharge,

L_i : l'inductance de la décharge.

Ce modèle permet de calculer la tension de contournement, le temps au contournement ainsi que certains paramètres caractérisant la propagation de la décharge électrique le long d'une surface isolante polluée. Il utilise le critère d'impédance comme critère de propagation. Ainsi, ces auteurs ont trouvé que les effets de l'inductance du canal de la décharge sont négligeables, et que la forme d'onde de la tension appliquée a une influence directe sur les paramètres régissant le phénomène de contournement.

2.3.3. Modèle dynamique utilisé

Dans cette partie nous allons décrire le modèle dynamique utilisé et qui est basé sur celui d'Obenaus. Ce modèle permet de prédire le comportement d'une surface isolante polluée soumise à une tension alternative. Il utilise le critère de propagation de Hampton [51] et l'expression de la vitesse de l'arc développé par Rahal [52].

Selon ce modèle une surface isolante polluée et partiellement contournée par une décharge électrique, peut être représentée par un circuit électrique équivalent constitué de deux résistances en série. La première R_{arc} représente le canal de décharge, et la seconde résistance R_p représente la couche de pollution non court-circuitée par la décharge (Fig.2.9).

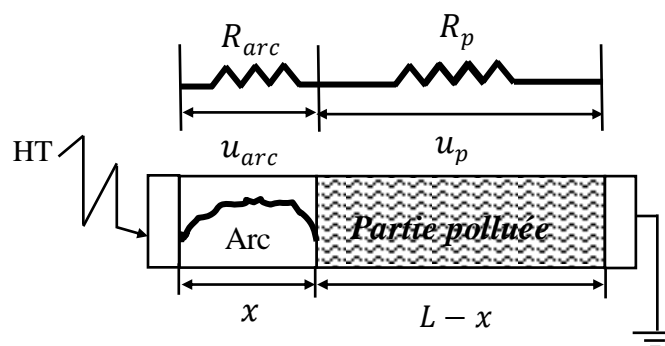


Fig. 2.9. Circuit électrique équivalent de la surface isolante polluée

2.3.3.1. Critère de propagation de l'arc de contournement

Lorsque la tension appliquée est suffisamment élevée entre les deux électrodes, il y aura apparition d'une première décharge de longueur x_0 . Cette décharge ne peut s'allonger que si le critère de propagation est vérifié (Annexe. A).

Dans la présente modélisation le critère de propagation proposé par B.F.Hampton [51] est adopté. Selon cet auteur, la décharge évolue si le champ dans la pollution (E_p) est supérieur à celui au pied de la décharge (E_{arc}).

2.3.3.2. Paramètres du circuit électrique équivalent

a. Équation du circuit

En négligeant la chute de tension aux électrodes, environ 800 V selon Chung et Nour [53], la tension d'alimentation est répartie entre l'arc et la couche de pollution.

En effet:

$$u = u_{arc} + u_p = (R_{arc} + R_p).i \quad (2.19)$$

Avec:

u : la tension instantanée appliquée.

u_{arc} : la tension de la décharge et R_{arc} sa résistance.

u_p : la tension de la couche polluante et R_p sa résistance.

i : le courant de fuite instantané.

b. Caractéristiques de la couche de pollution

Pour représenter la pollution, le modèle linéaire est adopté. Il considère une répartition uniforme de la pollution et exprime, par conséquent, la résistance de la couche de pollution comme une fonction linéaire de la longueur de fuite de l'équation (2.2).

En se basant sur le modèle de Renyu et Zhicheng [53], une structure complexe d'une surface isolante polluée peut être ramenée à un modèle plan équivalent, dont la résistance R_p de la pollution peut s'écrire sous la forme suivante:

$$R_p = \frac{1}{\pi \sigma_p} \frac{L - x}{r_{eq}} \quad (2.20)$$

avec:

$$D_{eq} = \frac{L}{\pi \cdot F} \quad (2.21)$$

Où σ_p est la conductivité superficielle de la pollution et r_{eq} le rayon équivalent (effectif) de l'isolateur.

F : facteur de forme

La résistance linéique de la pollution peut être formulée par :

$$r_p = \frac{1}{\pi \sigma_p r_{eq}} \quad (2.22)$$

Le champ dans la pollution est donné par :

$$E_p = \left| \frac{du_p}{dx} \right| = r_p \cdot i \quad (2.23)$$

c. Caractéristiques de l'arc

La relation approximative de la tension aux bornes de l'arc est donnée, selon F. Obenaus [42], par la l'expression empirique suivante :

$$u_{arc} = \frac{Ax}{i^n} = E_{arc} \cdot x \quad (2.24)$$

A et n constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc,

x : la longueur d'arc,

i : le courant d'arc.

La résistance de l'arc peut s'écrire sous la forme suivante :

$$R_{arc} = \frac{u_{arc}}{i} = \frac{Ax}{i^{n+1}} \quad (2.25)$$

d. Vitesse de propagation

Dans ce modèle il est accepté que le déplacement de la décharge est gouverné par les ions qui sont extraits et que la vitesse moyenne de ces ions est proportionnelle au champ E_p dans la pollution [52]. De plus, une force de rappel provenant de la colonne de la décharge, s'exerce sur ces ions. Le champ total s'exerçant sur ces derniers est alors égal à la différence entre E_p et E_{arc} et la vitesse aura pour expression (Annexe. B) :

$$V = \frac{dx}{dt} = \mu(E_p - E_{arc}) \quad (2.26)$$

μ : désigne la mobilité des électrons dans l'arc.

2.3.4. Organigramme de calcul

En tenant compte de ce qui précède et du fait que le contournement immédiat, pour une résistivité de la couche de pollution quasiment constante, nécessite une seule alternance [52], un organigramme de calcul est élaboré dans le logiciel ATP-EMTP (Fig. 2.10).

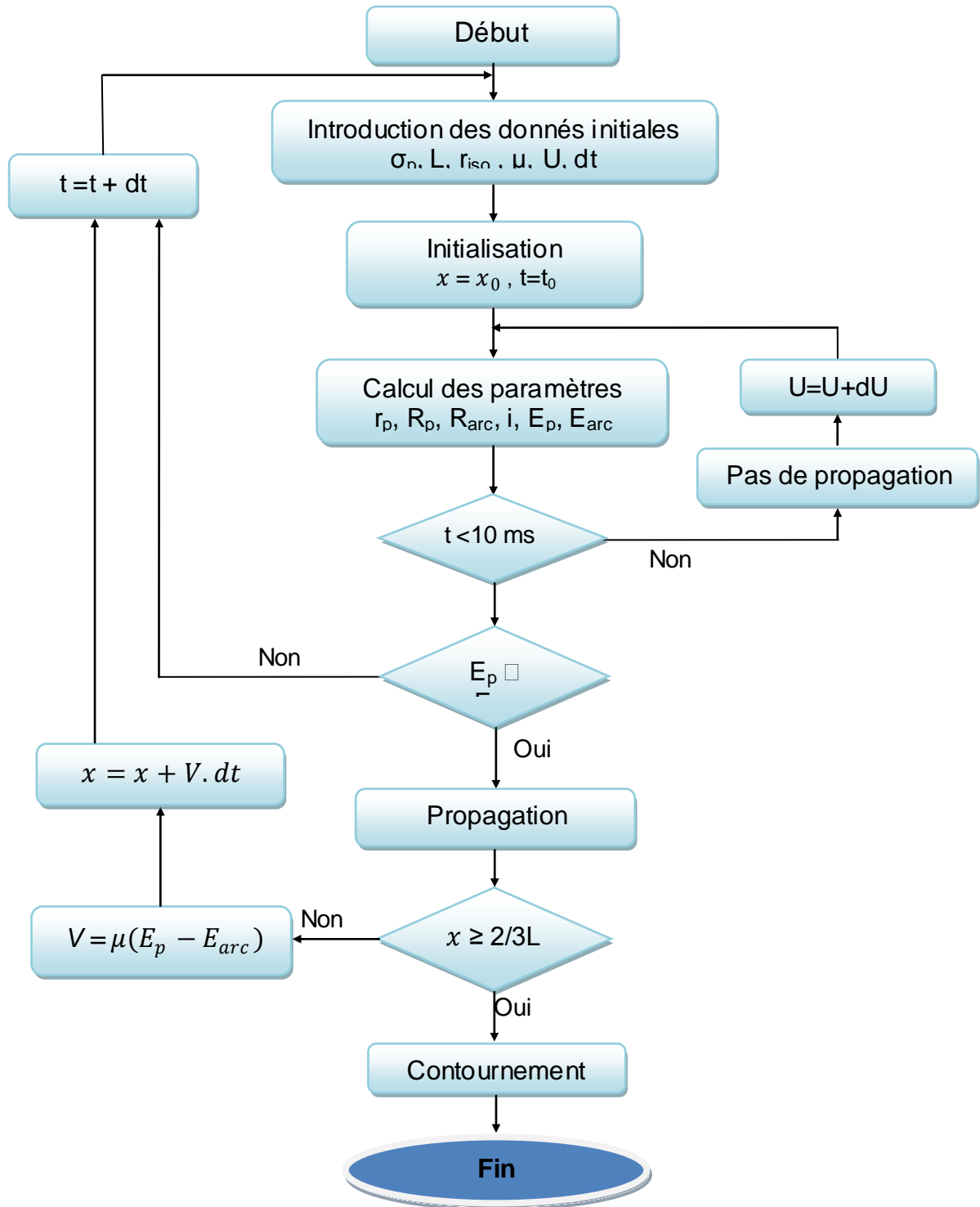


Fig. 2.10. Organigramme du modèle dynamique

2.3.5. Validation du modèle

a. Premier cas

En tension alternative, Guehrar [53] a considéré un modèle dynamique permettant de calculer la tension de contournement et le courant de la décharge pour différentes

résistivités de la couche de pollution (50, 100, 200 et 400 Ω .cm).

L'isolateur en question est constitué d'une plaque rectangulaire de porcelaine vernie, munie de deux électrodes en cuivre, l'une circulaire mise à la haute tension et l'autre rectangulaire mise à la terre (Fig. 2.11).

Les figures 2.12 et 2.13 illustrent la variation de la tension de contournement et le courant de la décharge en fonction de la résistivité de la couche polluante obtenue par le modèle utilisé ainsi que celle trouvée par Guehrrar [53]. Pour l'isolateur considéré et les résistivités prises par cet auteur, une bonne concordance entre les deux modèles a été obtenue.

Il est à signaler qu'avec l'augmentation de la résistivité, la tension de contournement augmente et le courant de la décharge diminue. Ceci est évident, car la réduction de la résistivité (qui se traduit par l'augmentation de la conductivité superficielle) de la pollution engendre la diminution de la tension de tenue.

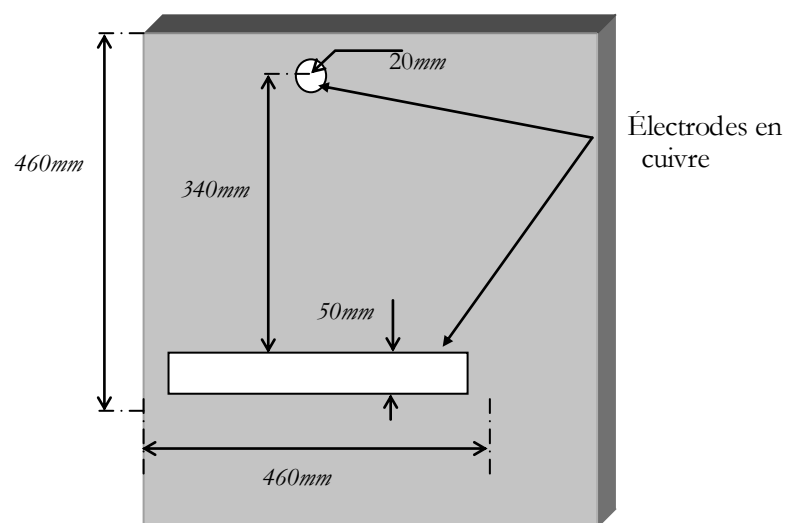


Fig. 2.11. L'isolateur étudié du premier cas [53]

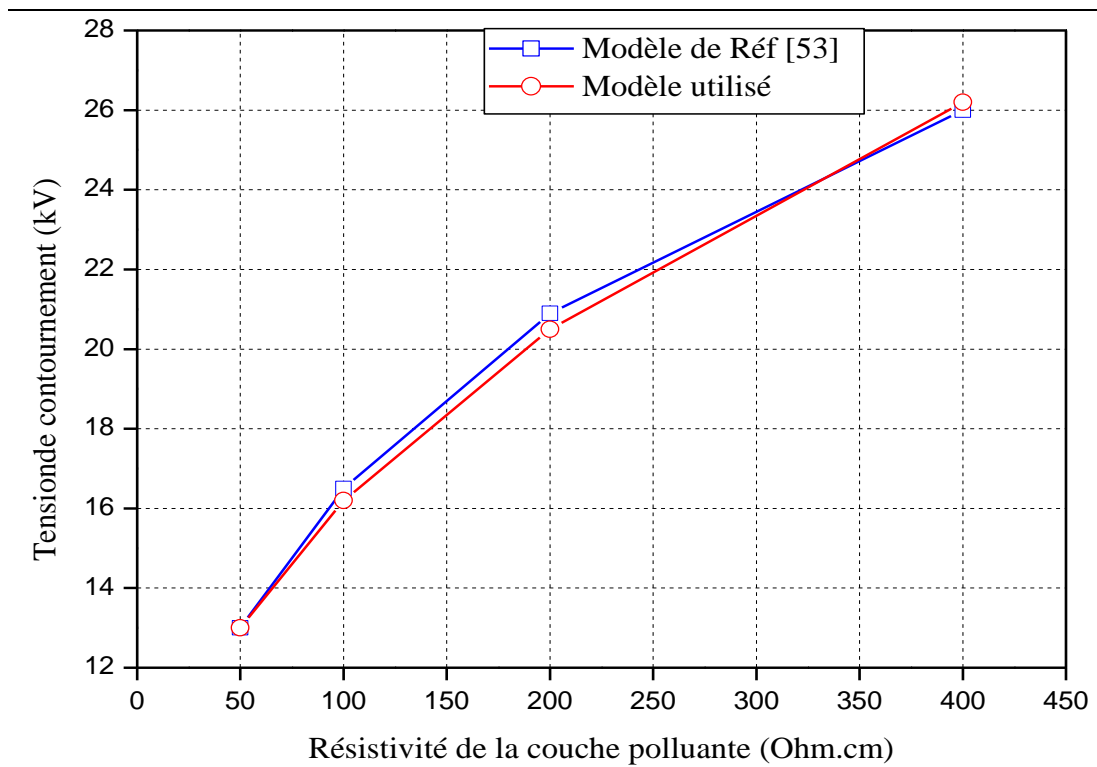


Fig. 2.12. Tension de contournement en fonction de la résistivité de la pollution

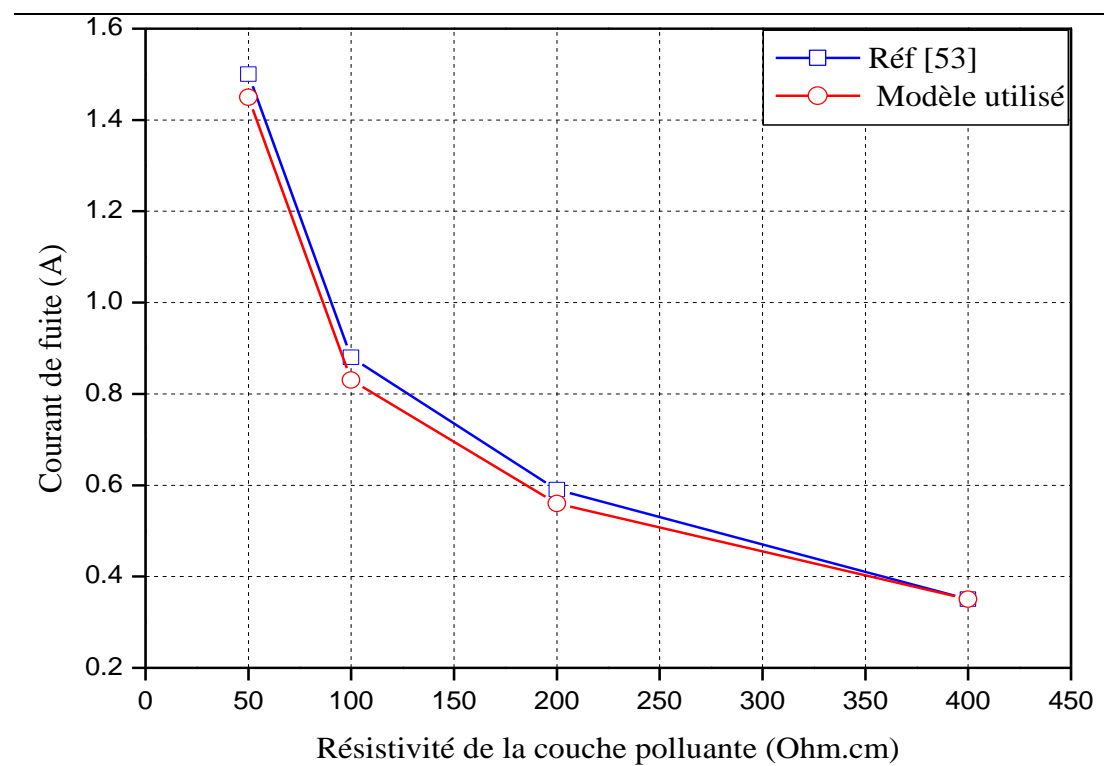


Fig. 2.13. Courant de fuite en fonction de la résistivité de la pollution

b. Deuxième cas

Afin de comprendre mieux, une deuxième simulation a été entamée. La validation est effectuée sur un deuxième isolateur, en comparant la tension de contournement estimée par simulation, et celle obtenue expérimentalement [54]. Le tableau 2.1 donne les valeurs des paramètres géométriques de l'isolateur étudié.

Le figure 2.14 illustre la variation de la tension de contournement en fonction de la concentration de la pollution C par le modèle utilisé ainsi que celle trouvée par la référence [54]. La conductivité de la couche de pollution σ_s est calculée en utilisant l'équation suivante [54]:

$$\sigma_s = (369,05 \cdot C + 0,42)10^{-6} \quad (2.28)$$

D'après les résultats obtenus par le modèle électrique équivalent, nous remarquons que la tension de contournement diminue en augmentant la concentration de la pollution C (la conductivité de la couche polluante), ce qui est en accord avec la réalité physique.

Tableau.2.1. les valeurs des paramètres géométriques du deuxième isolateur étudié		
D_m (cm)	L_f (cm)	F
22.4	43.2	1.38

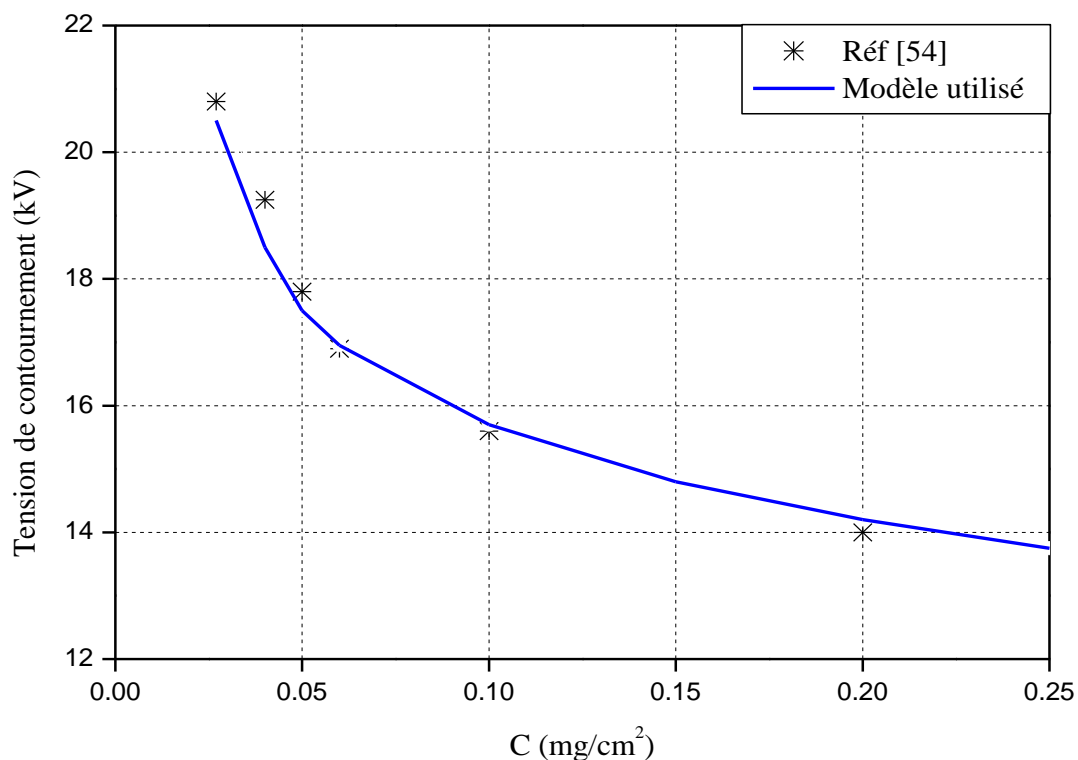


Fig. 2.14. Tension de contournement en fonction de la concentration de la pollution C

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique des différents modèles des parafoudres d'oxyde de zinc est présentée.

Devant le nombre des différents paramètres pouvant intervenir dans le comportement des bandes sèches, des modèles de contournement dynamique des surfaces isolantes sont parfois adoptés. Nous avons cité brièvement une recherche bibliographique des principaux travaux sur le contournement des surfaces isolantes sous pollution. La plupart de ces modèles traitent le problème de manière statique. Par ailleurs, tous les modèles dynamiques ont un aspect commun: ils sont basés sur le modèle statique d'Obenaus et sur le modèle de Mayr pour le comportement dynamique de l'arc.

Pour le cas d'une tension alternative, Le modèle dynamique que nous avons utilisé donne des résultats très proches de ceux rapportés par d'autres chercheurs ou effectués en laboratoire, notamment pour la tension de contournement critique et le courant de la décharge.

Ce modèle, représente un bon outil pour prédire la dynamique de l'arc et décrire l'évolution de différentes grandeurs électriques caractéristiques d'un système d'isolation soumis à une tension alternative.

Chapitre 03

CIRCUIT EQUIVALENT DES PARAFONDRES ZNO

3.1. Introduction

La présence d'une couche de faible épaisseur, isolante ou conductrice, à la surface d'un parafoudre peut avoir une influence significative sur la distribution du potentiel de celui-ci.

La modélisation des parafoudres à oxyde métallique est nécessaire pour plusieurs raisons, et un progrès considérable dans ce domaine a été fait. Il est très difficile de construire un modèle général des parafoudres ZnO dans lequel on prend en compte tous les facteurs tels que la pollution, les processus thermiques, la réponse aux contraintes rapides et harmoniques. En effet, chaque phénomène peut avoir son propre modèle [6], [18].

Le présent chapitre commencera par une brève description des méthodes utilisées pour le calcul des paramètres du circuit équivalent existantes dans la littérature, Dans la deuxième partie de ce chapitre et dans le but de comprendre mieux l'effet de la couche de pollution sur la distribution du potentiel et du champ électrique le long du parafoudre, une série des cas de répartition de la couche de pollution et pour plusieurs valeurs de la conductivité sera faite. Le logiciel COMSOL Multiphysics sera utilisé à cet effet.

Dans la partie suivante de ce chapitre ; nous présenterons le circuit équivalent complet développé pour la simulation des performances électriques du parafoudre en polymère sous pollution, les détails de modélisation des différentes parties de ce circuit, enfin nous terminerons ce chapitre par la présentation des résultats de simulation et interprétations.

3.2. Calcul des paramètres électriques du circuit équivalent

Deux méthodes ont été employées pour calculer les paramètres électriques du circuit équivalent du parafoudre [13], [38], [40], Il s'agit de la:

3.2.1. Méthode analytique

Cette méthode est basée sur des mesures expérimentales. Elle combine les valeurs de la tension appliquée avec les valeurs des courants de fuite mesurés pour la détermination des

diverses capacités et résistances du circuit équivalent. Une brève description de la méthode est la suivante:

-Si la tension appliquée s'annule le courant de fuite est à caractère capacitif. Dans ce cas on écrit:

$$I_f = I_c \quad (3.1)$$

-Si maintenant la tension appliquée est maximale le courant de fuite est à caractère résistif. Dans ce cas on écrit:

$$I_f = I_R \quad (3.2)$$

En tenant compte de l'équation 3.2 les différentes résistances peuvent être calculées par:

$$R = \frac{V_{app}}{I_R} \quad (3.3)$$

Sachant que pour déterminer les capacités des varistances et les capacités de la couche de pollution, on a:

$$V_{app} = V_{max} \cdot \sin(\omega t) \quad (3.4)$$

$$I_c = C \frac{dV_{app}}{dt} = \omega \cdot C \cdot V_{max} \quad (3.5)$$

Ce qui donne:

$$C = \frac{I_c}{\omega \cdot V_{max}} \quad (3.6)$$

Les valeurs des capacités de la partie interne (fibre de verre et l'enveloppe) sont déterminées en utilisant la définition de la capacité du câble coaxiale suivante:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (3.7)$$

Avec:

r_1 : rayon interne

r_2 : rayon externe

➤ Méthode numérique.

Les méthodes numériques les plus connues et les plus utilisées dans ce type de problème sont donc la méthode des Éléments Finis (M.E.F), la méthode des Différences Finies (M.D.F), la méthode de Simulation de Charges (M.S.C) et la méthode des Éléments Finis de Frontière (M.E.F.F) [55].

L'idée de la méthode des éléments finis est de chercher une solution approchée à une équation différentielle après une reformulation sous forme d'identité intégrale appelée forme faible ou variationnelle. Au lieu de chercher à satisfaire l'équation aux nœuds, on décompose ici le domaine en sous domaines appelés éléments finis (maillage), et on impose la satisfaction des équations par sous domaine. C'est une étape très importante puisque le choix de la forme de l'élément de maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus. L'introduction d'une approximation locale par sous domaine (dit élément fini) permet de contourner le problème de complexité des géométries car il suffit alors de choisir une approximation ou une décomposition qui respecte la géométrie.

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

1. des triangles, des rectangles, des quadrilatères arbitraires pour les problèmes à deux dimensions;
2. des tétraèdres, des hexaèdres, des cubes, des prismes pour des problèmes à trois dimensions.

L'utilisation des éléments finis nécessite d'une part, la subdivision du domaine étudié en des petits éléments, et d'autre part, la limitation de celui-ci par une frontière où l'on suppose connue la valeur du potentiel. La résolution de l'équation de Laplace revient à minimiser une fonctionnelle, correspondant à l'énergie électrostatique emmagasinée dans l'espace, par rapport aux valeurs du potentiel aux nœuds des éléments du maillage.

L'utilisation de la méthode des Éléments Finis par l'intermédiaire d'un logiciel (COMSOL Multiphysics, Maxwell, Flux2D et FEMM...) s'est avérée être une des meilleures solutions compte tenu de la difficulté des mesures. Dans ce travail, nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics version 3.2.

3.2.2. Étapes de la méthode des éléments finis (M.E.F)

Les étapes de résolution de la méthode des éléments finis utilisées dans le COMSOL Multiphysics peuvent être résumées comme suit:

- Introduction de la géométrie du modèle;
- Identification des domaines;
- Introduction des conditions aux limites;
- Résolution;

- Visualisations des résultats ;

3.3. Étude de la distribution du potentiel et du champ électrique

3.3.1. Description du parafoudre étudié

Dans ce travail, le parafoudre utilisé est un parafoudre de réseau de distribution 11kV à enveloppe en polymère, type (EGA 15). L'enveloppe en polymère est faite en Éthylène Propylène Diène Monomère (EPDM). La partie active de ce parafoudre est constituée de trois varistances à oxyde de zinc ayant une constante diélectrique relative ($60 < \epsilon_r < 1000$) [56]. Ces varistances sont montées en série entre deux blocs d'alliage d'aluminium qui forment deux électrodes. Un lien homogène de fibre de verre emballe la colonne d'éléments d'oxyde de zinc pour fournir une haute résistance mécanique entre la colonne de varistances et l'enveloppe.

La figure 3.1 montre le modèle du parafoudre utilisé. La taille totale du parafoudre est environ 30 cm.

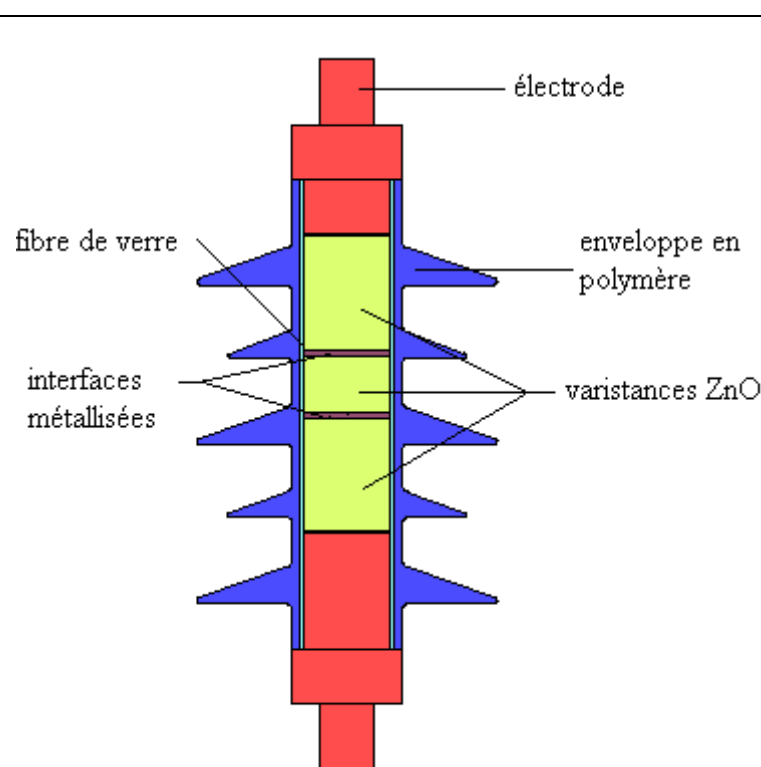


Fig. 3.1. *Modèle du parafoudre ZnO utilisé*

3.3.2. Identification des domaines

Dans cette simulation, le mode d'application est l'électrostatique généralisé. Les paramètres nécessaires pour ce modèle sont résumés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1. Paramètres des différents domaines du parafoudre étudié		
Domaine	Constante diélectrique relative ϵ_r	Conductivité $\sigma(S)$
Surface extérieure(EPDM)	3,9	10^{-14}
Electrodes (en Aluminium)	1	$3,77.10^7$
Varistances ZnO	100	pV^{q-1}
Fibre de verre	4,6	10^{-14}
L'air	1	0
Les interfaces métallisées	10^6	10^6

V : Tension [V]; p et q sont des constantes.

Dans les conditions polluées, deux cas ont été considérés à savoir :

- Le cas de l'absence de la bande sèche où le domaine de la pollution peut être représenté en introduisant la valeur de la conductivité et celle de la constante diélectrique.
- Le second concerne la formation de la bande sèche, où la conductivité suivra la loi suivante [13]:

$$\sigma = \frac{(X.A)^{1/n}}{V^{\frac{(n+1)}{n}}} \quad (3.8)$$

Avec ;

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

A et n: sont des constantes.

X : largeur de la bande sèche en (m).

Nous notons que la constante diélectrique relative du domaine de la bande sèche est prise égale à 1 [56].

3.3.3. Étude de la distribution du potentiel dans les conditions propres

En première étape on va simuler le parafoudre synthétique dans les conditions où la surface isolante est propre. L'électrode haute tension est portée à un potentiel de 8,9 kV tandis que l'autre électrode portée à 0 kV. Les résultats de simulation sont montrés dans les figures 3.2 et 3.3. D'après ces résultats il est clair que la distribution du potentiel est uniforme. De plus

la zone proche de l'électrode HT est la plus contraignée alors que celle près de l'électrode terre le potentiel est presque nul.

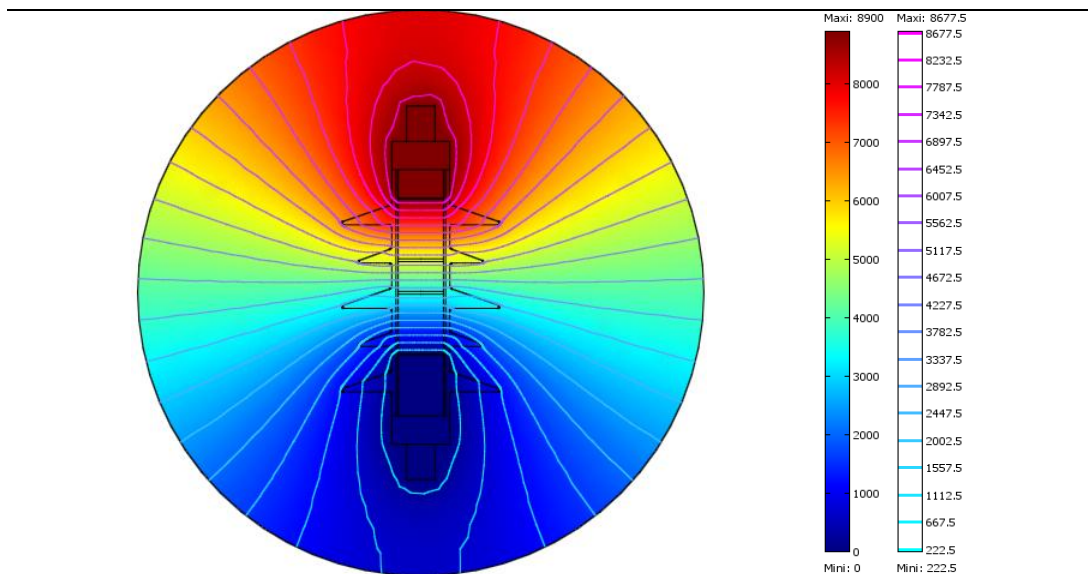


Fig. 3.2. Distribution des lignes équipotentiellles pour un parafoudre propre

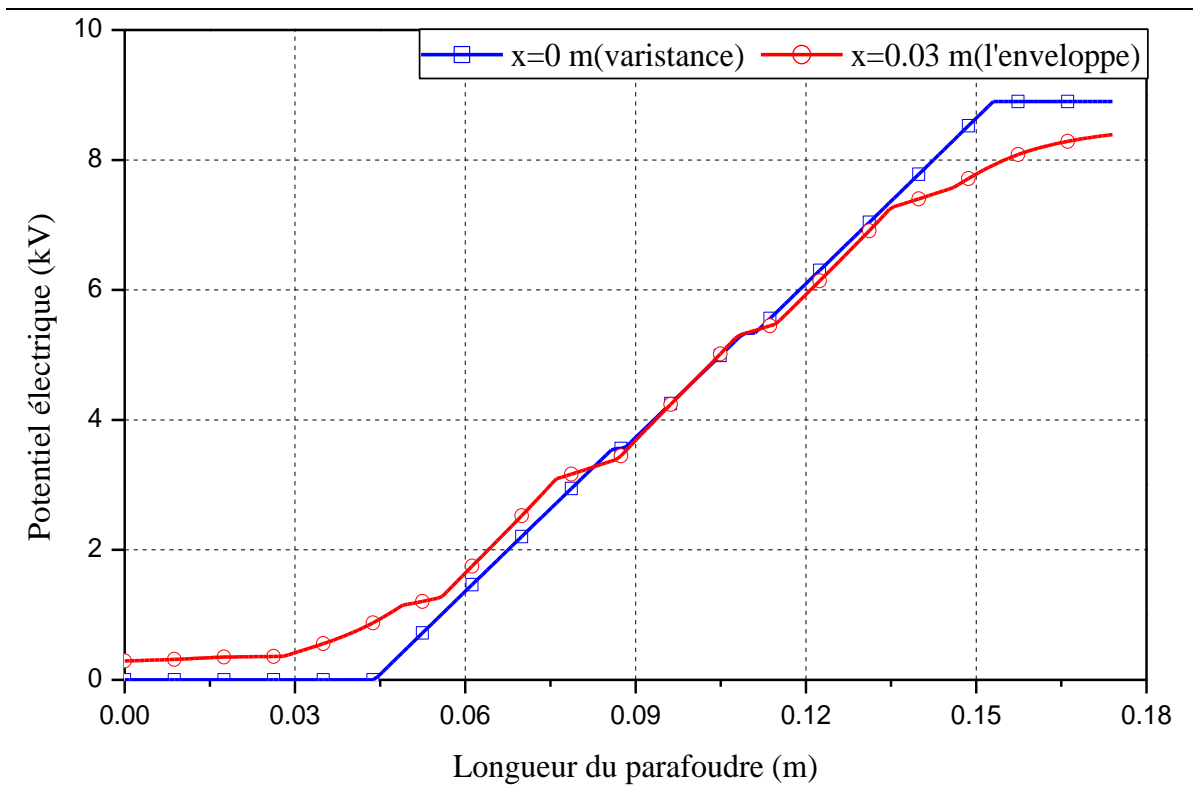


Fig. 3.3. Distribution du potentiel pour un parafoudre propre

3.3.4. Études de la distribution du potentiel dans les conditions polluées

La formation et la répartition de la couche de pollution sur la surface des parafoudres dépendent du profil, de la hauteur et de la disposition des parafoudres par rapport au sol. L'action de la pollution sur les parafoudres est très complexe. Le cas d'une pollution uniforme a été déjà étudié par l'auteur de la référence [13]. Dans le présent travail et tenant compte que la pollution n'est pas uniforme, une série de scénarios sera effectuée pour élucider l'effet de la conductivité de la pollution sur la répartition du potentiel et du champ électrique.

a. 1^{ère} investigation

Répartition longitudinale périodique (R.L.P): 50% et 50%

Dans cette première investigation, on a choisi de faire une répartition longitudinale périodique à 50%. C'est-à-dire, les 50 % de la ligne de fuite sont fortement pollués avec une conductivité $\sigma_1 = 200 \mu\text{S}$ et le reste avec une conductivité faible $\sigma_2 = 80 \mu\text{S}$ (Fig.3.4(a)), puis on procède au cas inverse. Les résultats obtenus sont montrés dans les figures 3.5, 3.6 et 3.7. Dans la figure 3.5 on présente la distribution des lignes équipotentielles, où on peut remarquer qu'un changement important en comparaison avec les cas sans pollution (figure 3.2) particulièrement dans le cas où ($\sigma_1 = 200 \mu\text{S}$, $\sigma_2 = 80 \mu\text{S}$). Cette différence est plus claire en examinant les courbes de la figure 3.6 qui donne la répartition axiale du potentiel. De plus on remarque, comme il était attendu que les valeurs maximales des potentiels sont près de l'électrode haute tension et commence à décroître jusqu'à son annulation quand on se rapproche de l'électrode de masse. Ce constat est en accord avec la distribution du champ électrique montré dans la figure 3.7.

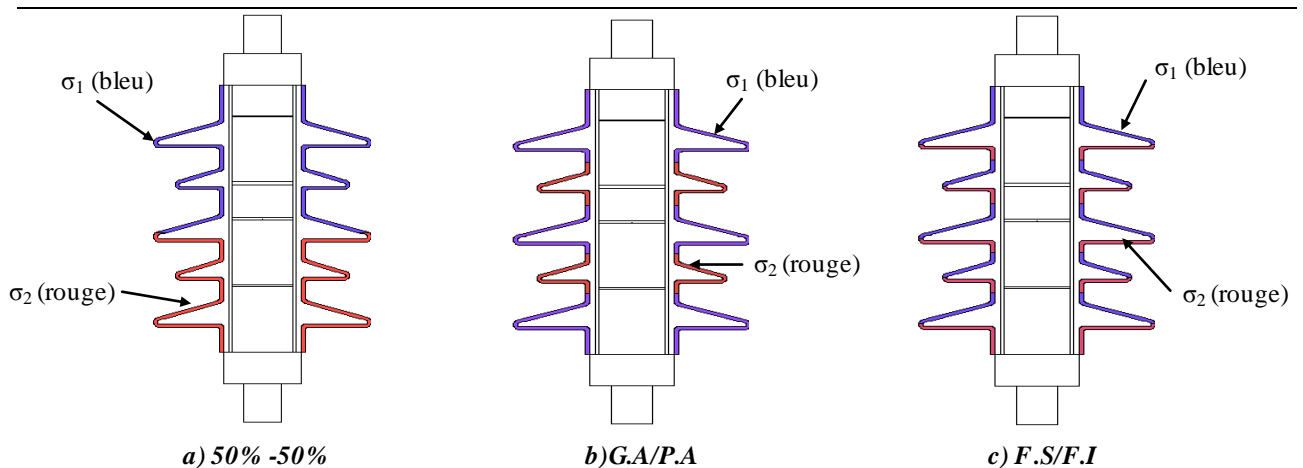


Fig. 3.4. Répartition longitudinale périodique de la couche de pollution

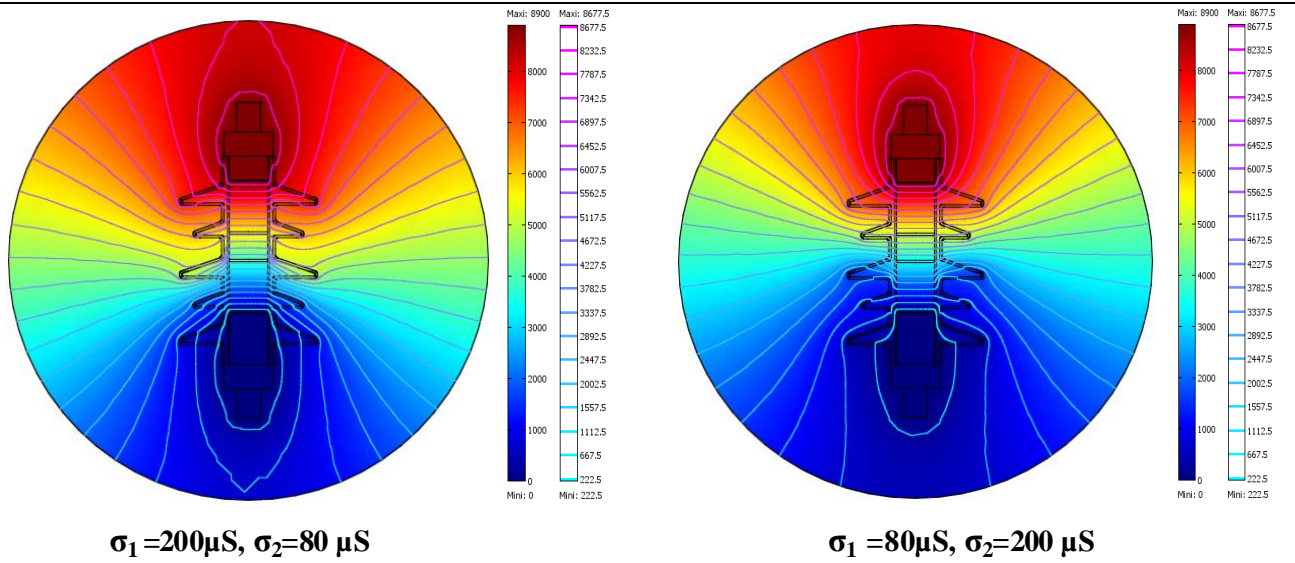


Fig. 3.5. Distribution des lignes équipotentielles pour (R.L.P) 50% et 50% ($x=0.03\text{m}$)

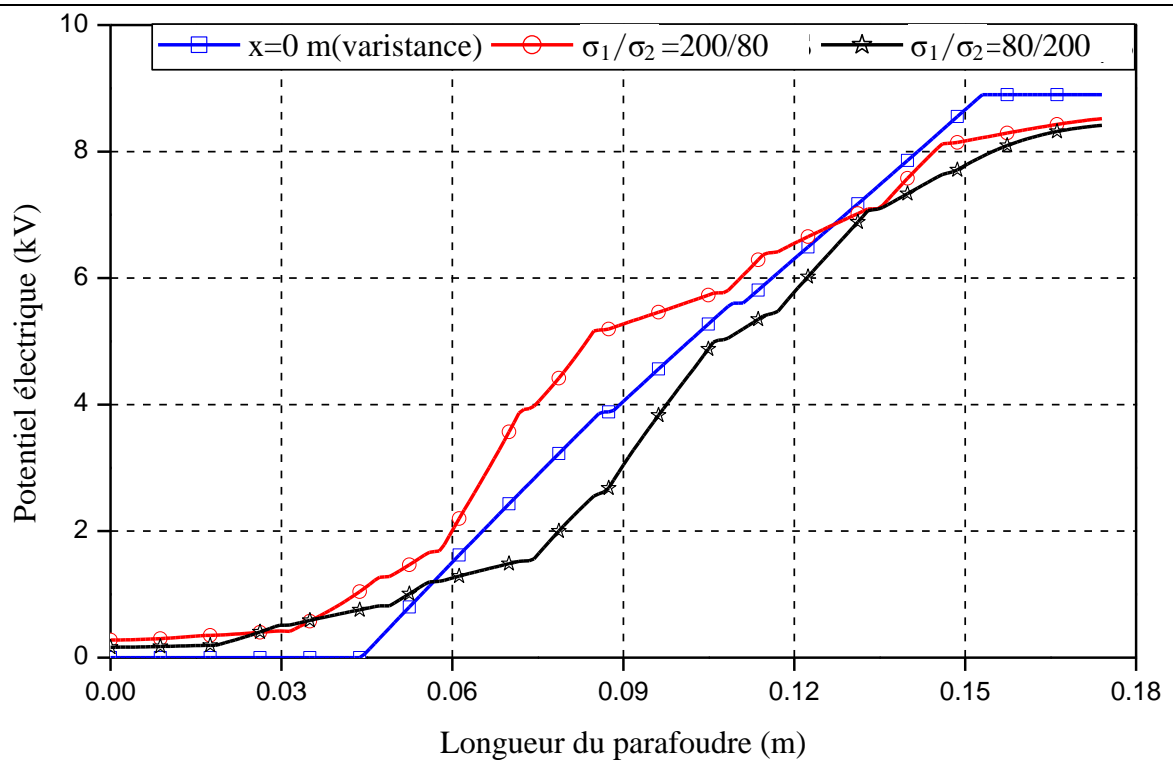


Fig. 3.6. Distribution du potentiel le long du parafoudre pour (R.L.P) 50% et 50% ($x=0.03\text{m}$)

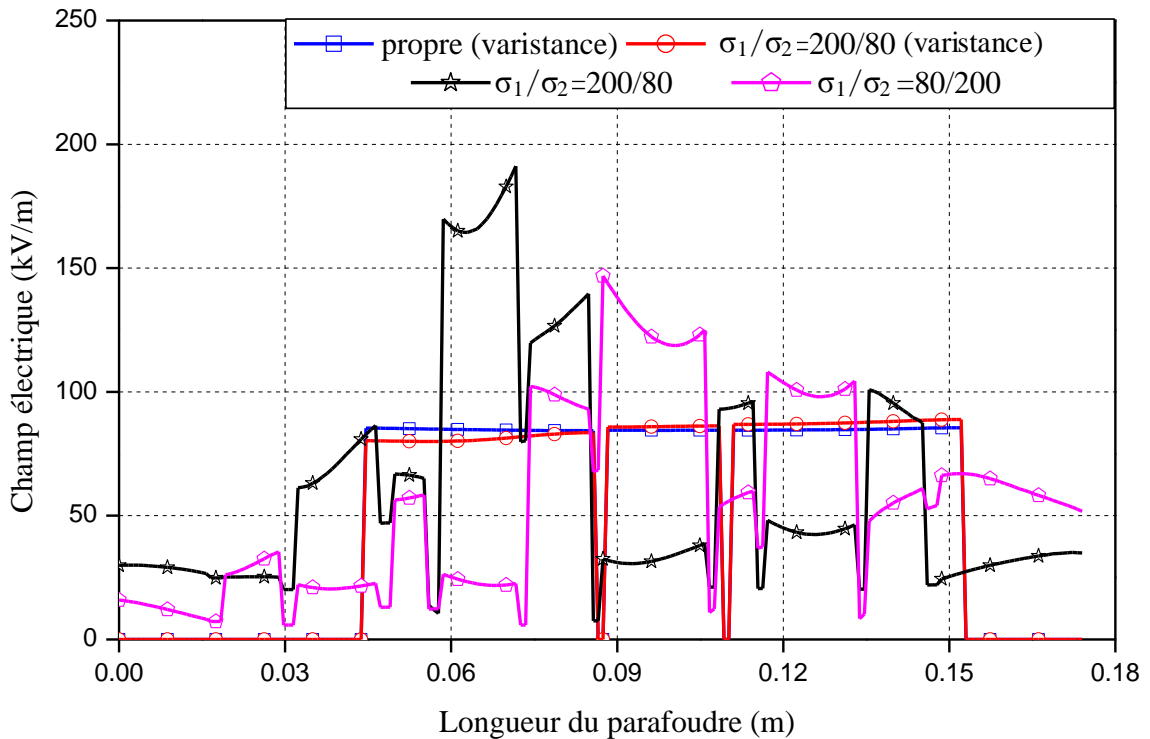


Fig. 3.7. Distribution du champ électrique le long du parafoudre pour (R.L.P) 50% et 50% ($x=0.03m$)

b. 2^{ème} investigation

Répartition longitudinale périodique (R.L.P): grande. Ailette et petite. Ailette

Dans cette deuxième investigation une couche de pollution non-uniforme ayant une conductivité $\sigma_1 = 80\mu S$ est appliquée à la surface des grandes ailettes et une conductivité $\sigma_2 = 200\mu S$ est appliquée à la surface des petites ailettes (Fig.3.4(b)), puis on procède au cas inverse. Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures 3.8, 3.9 et 3.10. De ces résultats, on peut remarquer qu'un changement minime apparaît. D'après ces résultats, on constate que le parafoudre est légèrement affecté par ce type de pollution.

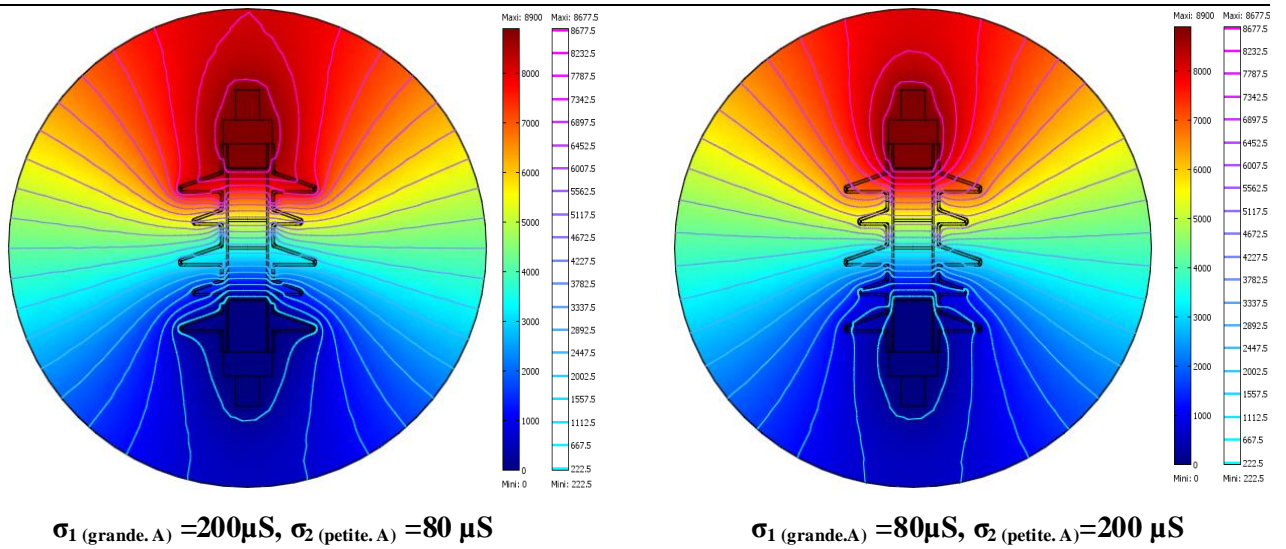


Fig. 3.8. Distribution des lignes équipotentielles la R.L.P (grande. A/petite. A)

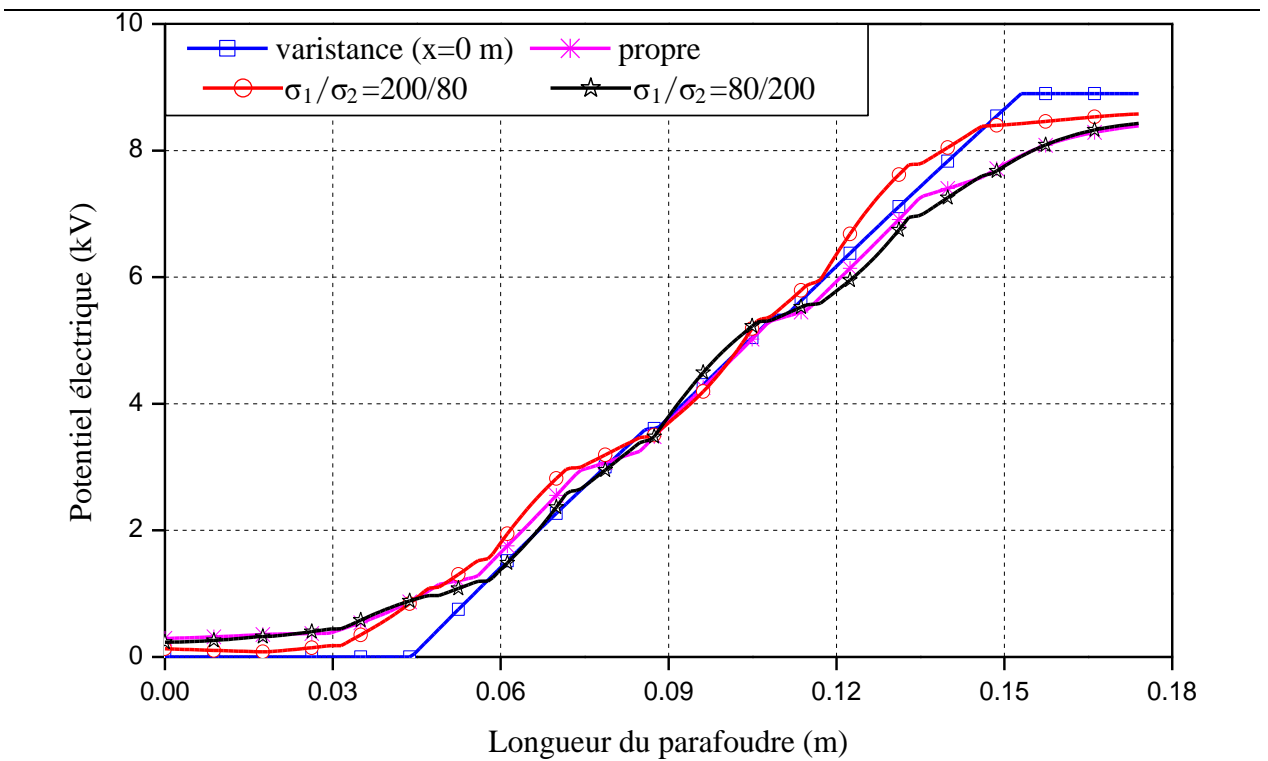


Fig. 3.9. Distribution du potentiel pour la R.L.P (grande. A/petite. A) ($x=0.03\text{m}$)

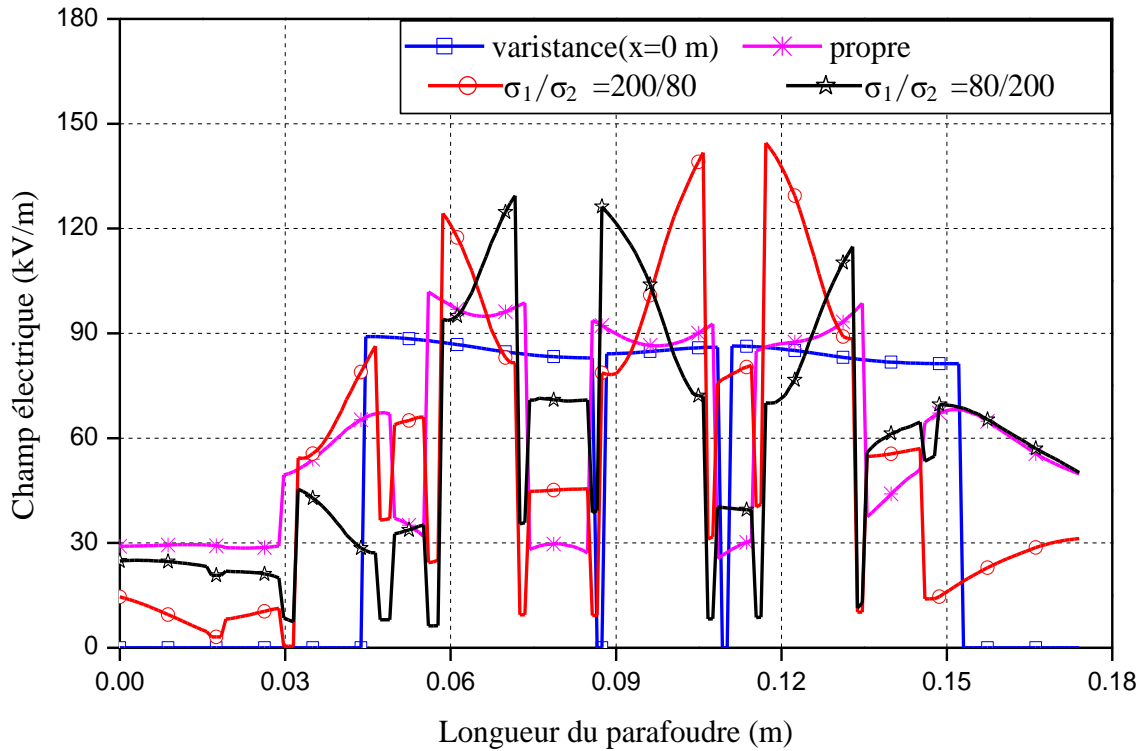


Fig. 3.10. Distribution du champ électrique pour la R.L.P (grande. A/petite. A)
($x=0.03m$)

c. 3^{ème} investigation

Répartition longitudinale périodique (R.L.P): la face supérieure de l'ailette et la face inférieure de l'ailette

Elle consiste de réaliser une distribution non-uniforme de la couche de pollution en fixant la valeur de la conductivité sur la face supérieure de l'ailette à $\sigma_1 = 80 \mu S$ et en fixant la valeur de la conductivité sur la face inférieure de l'ailette à $\sigma_2 = 200 \mu S$ (Fig.3.4(c)), puis on procède au cas inverse. Les résultats obtenus sont montrés dans les figures 3.11, 3.12 et 3.13. Dans la figure 3.11, on présente la distribution des lignes équipotentielles, où on peut remarquer que ces dernières sont concentrées dans les surfaces à une conductivité inférieure. Ce qui permet de dire, que l'enveloppe du parafoudre n'est pas contrainte de la même manière et ce qui conduit à une distribution du potentiel non-uniforme. D'après ces résultats, nous remarquons que l'augmentation de la conductivité de la couche polluée favorise la distribution non uniforme du potentiel le long de la surface du parafoudre.

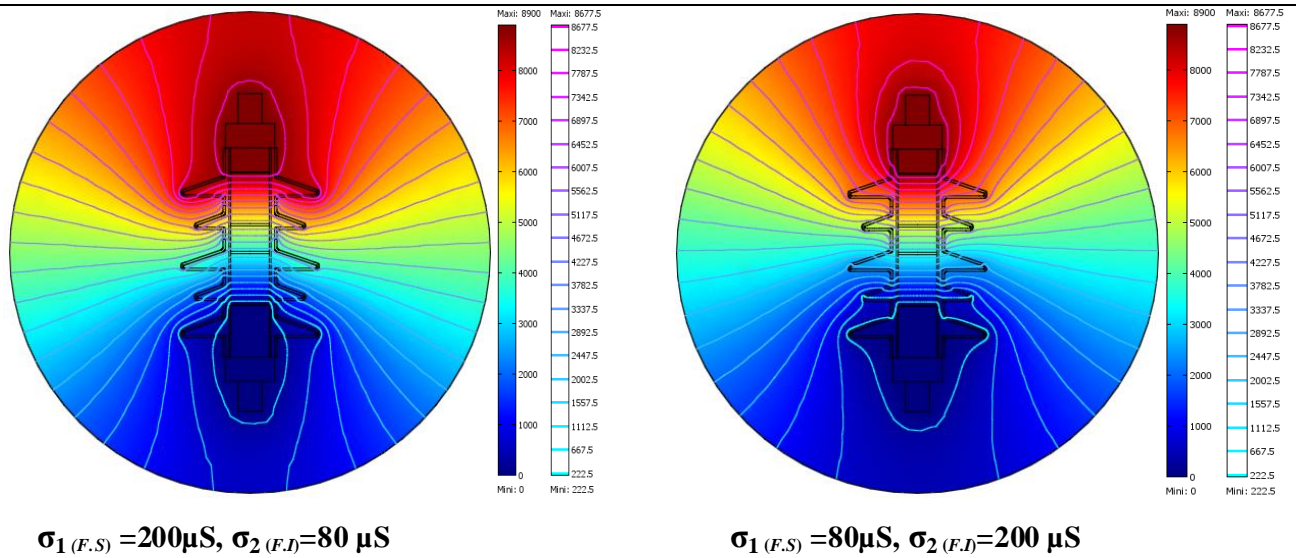


Fig. 3.11. Distribution des lignes équipotentielles pour la R.L.P(F.S/ F.I)

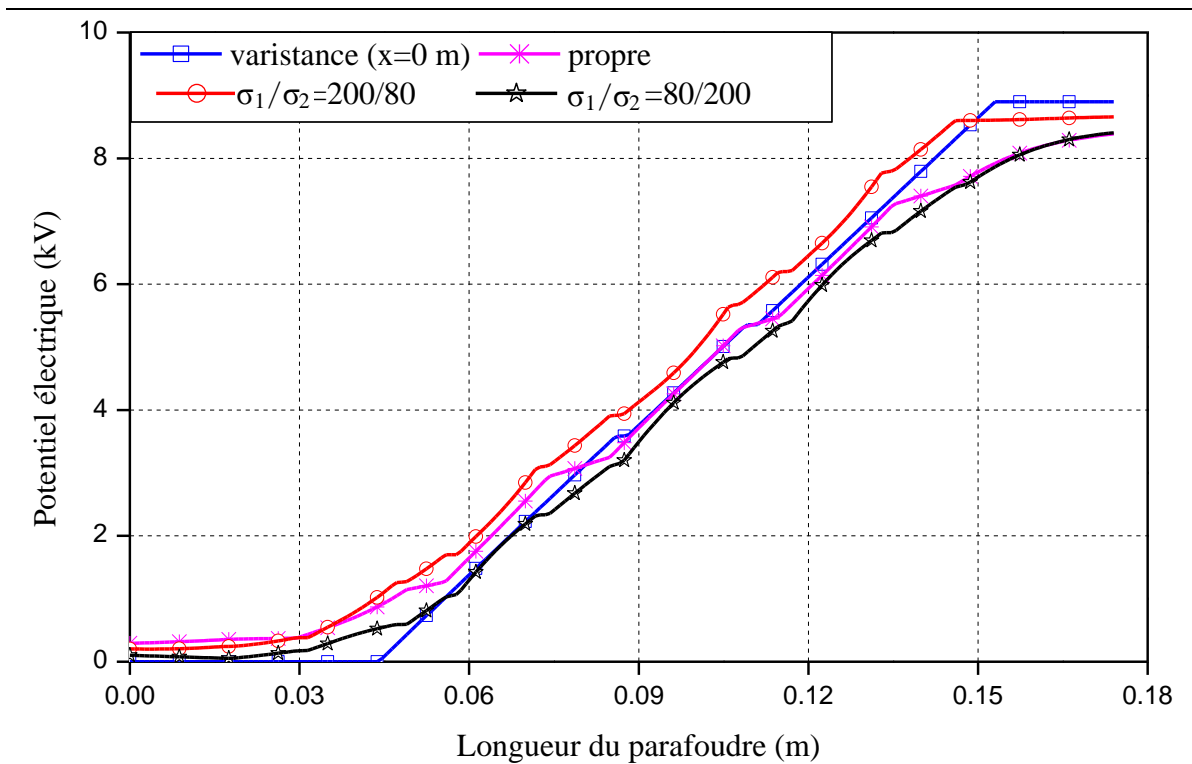


Fig. 3.12. Distribution du potentiel pour la R.L.P (F.S/ F.I) ($x=0.03m$)

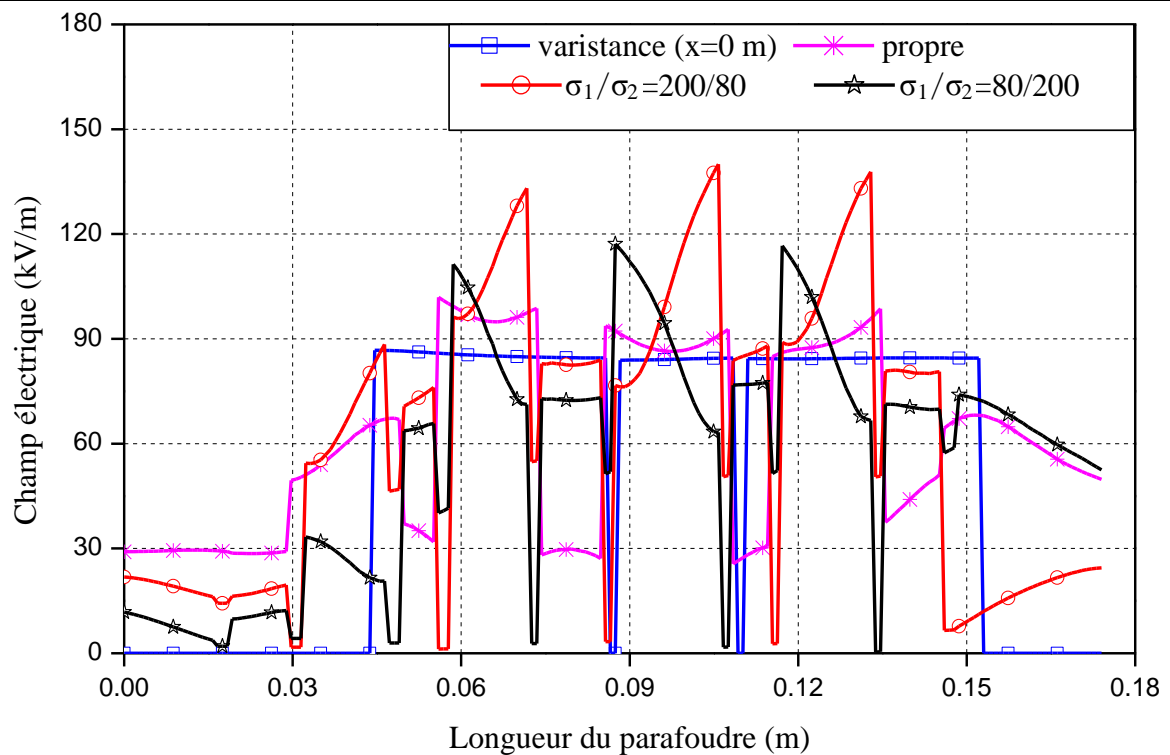


Fig. 3.13. Distribution du champ électrique pour la R.L.P (F.S/S.I) ($x=0.03m$)

d. 4 ème investigation

Formation de la bande sèche

Comme il a été dit le type de pollution influe énormément sur la distribution du potentiel et la rend non-uniforme le parafoudre est alors contraint de façons différentes, ce qui favorise l'apparition des bandes sèches.

Dans le présent scénario, on considère que le parafoudre est fortement pollué sur le coté HT dont la surface comporte deux bandes de conductivités $\sigma_1=80 \mu S$ et $\sigma_2=200 \mu S$. La première bande de conductivité σ_1 et celle se trouvant du coté de l'électrode haute tension; sa longueur égale à 50 % de la ligne de fuite totale du parafoudre. La deuxième bande de conductivité σ_2 , à une longueur égale à 50 % restant de la ligne de fuite totale.

Dans ce scénario, la bande sèche est supposée apparaitre sous la première ailette (dans la zone supérieure du parafoudre) puis sous la troisième ailette (dans la zone inférieure du parafoudre) pour une largeur égale à 1cm. Les résultats de simulation sont présentés dans les figures 3.14, 3.15, et 3.16.

L'examen de ces courbes permet de voir que:

- Les lignes équipotentiels sont concentrées dans la bande sèche (figure 3.14).
- la plus grande portion du potentiel électrique se trouve reportée aux bornes de cette bande sèche (la chute de tension à travers la bande sèche est très grande), (figure 3.15).
- La formation de la bande sèche dans la zone inférieure du parafoudre (Fig.3.16(b)) cause un champ électrique un peu plus intense que le cas où la bande sèche est formée dans la zone supérieure du parafoudre (Fig.3.16(a)). La tension de 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. Le réamorçage fréquent au même endroit entraîne par effet thermique la dégradation de la surface isolante et l'échauffement des varistances.
- La formation de la bande sèche cause un fort champ électrique radial (Nous notons que le champ électrique a atteint sa valeur maximale à travers la bande sèche), qui peut mener à soumettre à une contrainte de dégradation interne du matériau et aussi peut conduire à une décharge interne (Fig.3.16).

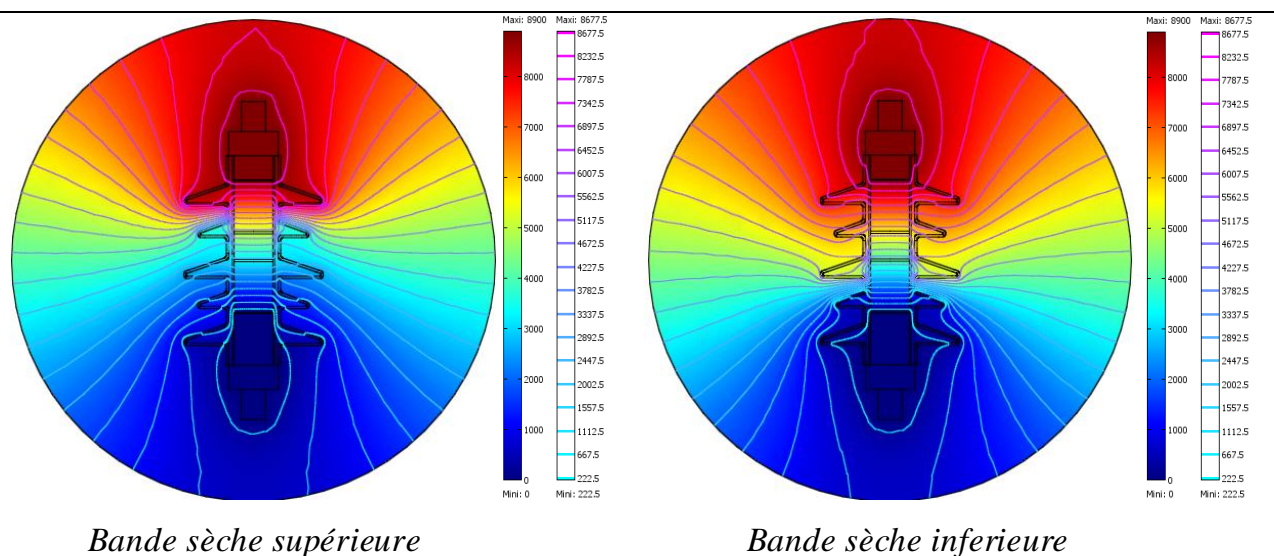
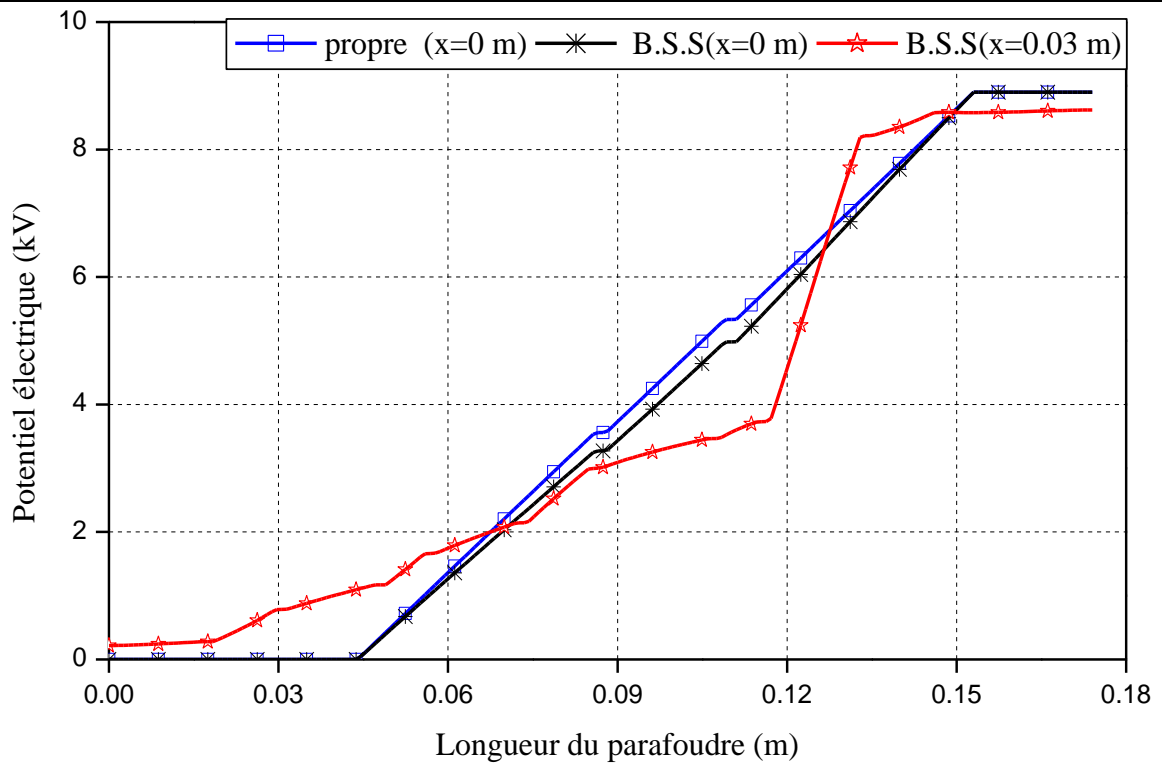
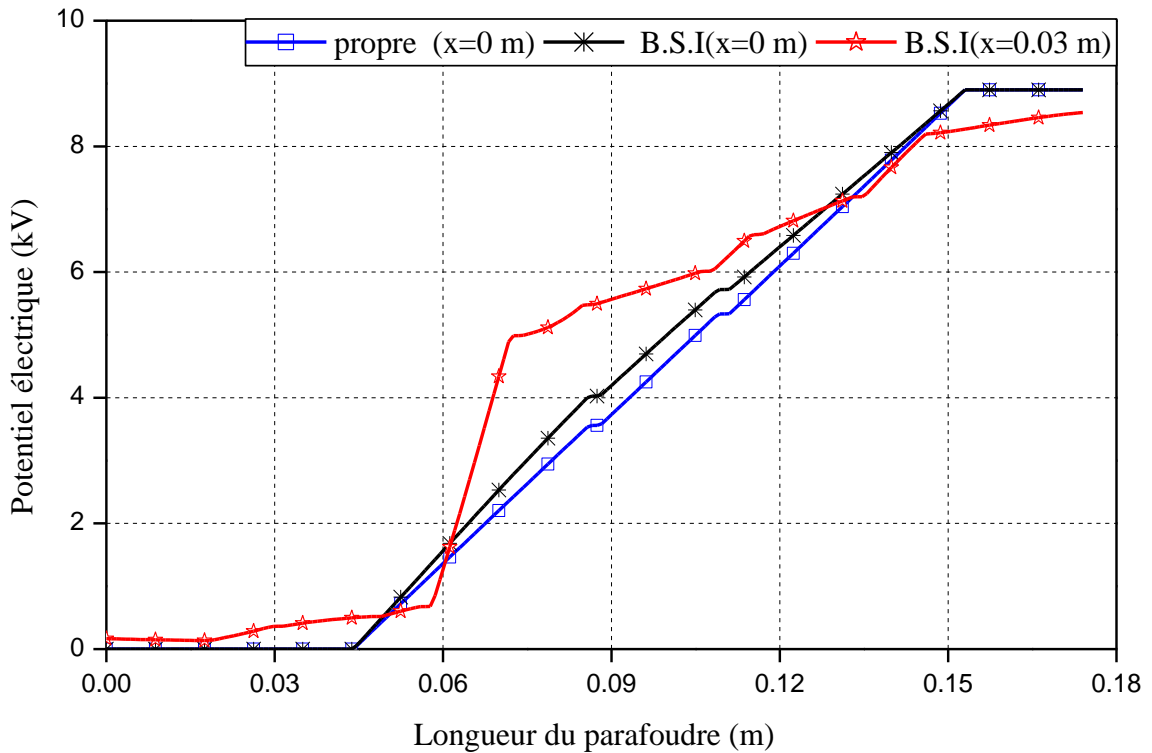


Fig. 3.14. *Distribution des lignes équipotentiels le long du parafoudre*

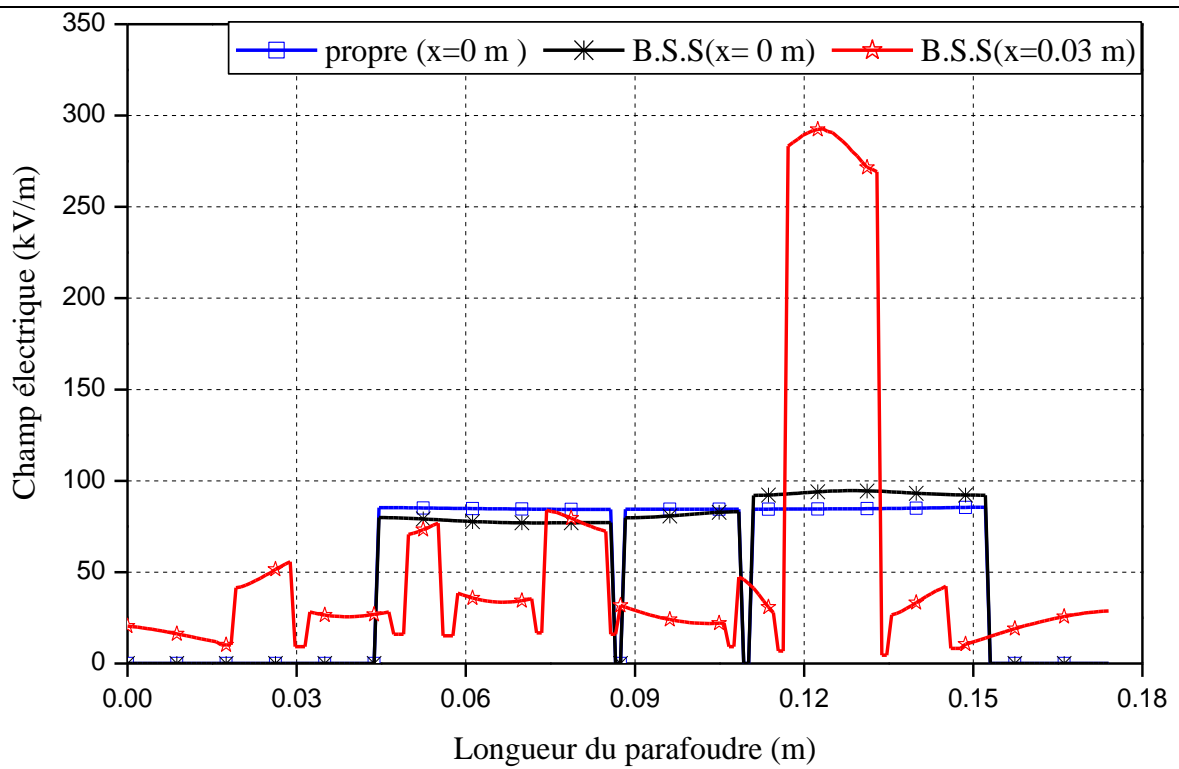


a) *Bande sèche supérieure*

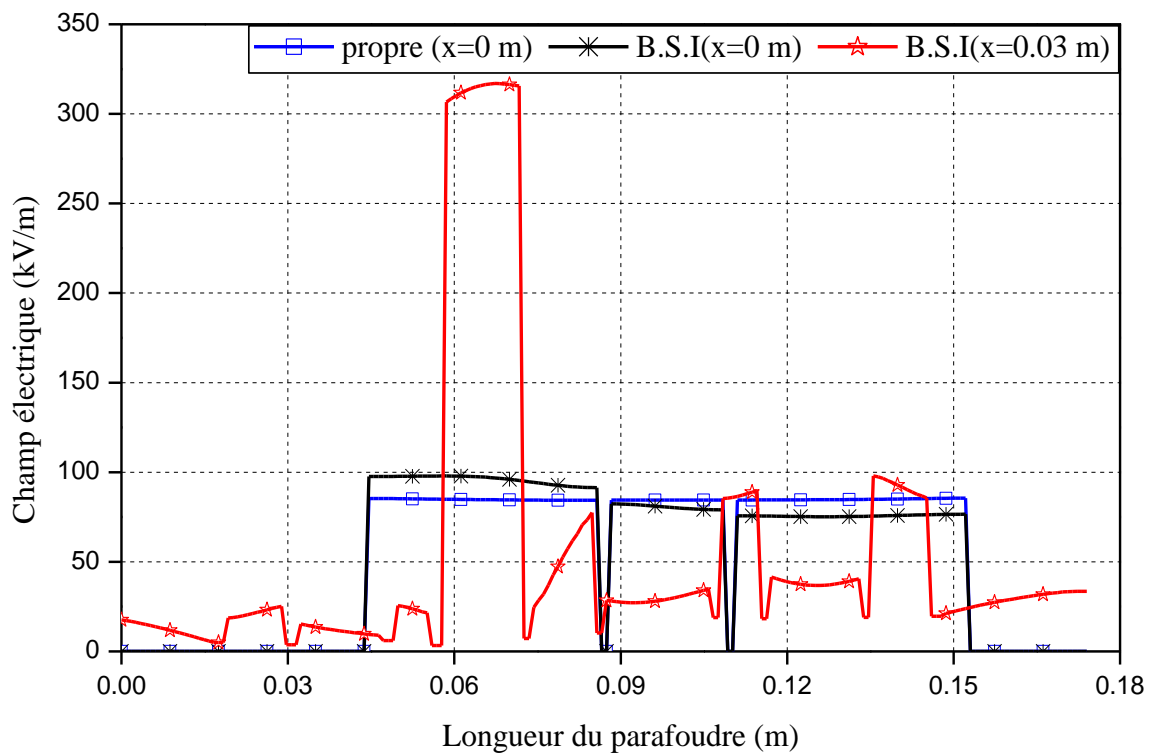


b) *Bande sèche inférieure*

Fig. 3.15. *Distribution du potentiel le long du parafoudre*



a) Bande sèche supérieure



b) Bande sèche inférieure

Fig. 3.16. *Distribution du champ électrique le long du parafoudre*

3.4. Modèle du parafoudre synthétique

Un modèle électrique a été développé pour représenter le comportement du parafoudre synthétique sous pollution. La figure 3.17 présente l'idée fondamentale derrière la modélisation des éléments du parafoudre. Le parafoudre est divisé en sept sections. Pour cette simulation, les éléments de varistance ZnO ont été modélisés en tant que cinq sections de longueur égale et chaque section est représentée par une capacité linéaire C_z parallèlement à une résistance non linéaire R_z .

La partie interne du parafoudre (fibre de verre et l'enveloppe en polymère) a été modélisée par deux capacités séries horizontale. Un circuit (R-C) parallèle représente la surface isolante à l'état propre.

La méthode d'éléments finis a été employée via le logiciel COMSOL Multiphysics pour calculer les paramètres électriques du circuit équivalent. Les valeurs d'énergie combinées avec les potentiels et les courants calculés permettent la détermination des diverses capacités et résistances du circuit équivalent.

Par définition, la capacité est donnée par l'expression suivante:

$$C = \frac{2W_e}{V^2} \quad (3.9)$$

V : tension entre conducteurs.

W_e : l'énergie emmagasinée dans un condensateur.

Pour calculer la résistance de la couche externe de pollution on applique la loi d'ohm.

La valeur de la résistance est très grande alors le courant qui passe à sa dernière est très faible, et on peut écrire :

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.10)$$

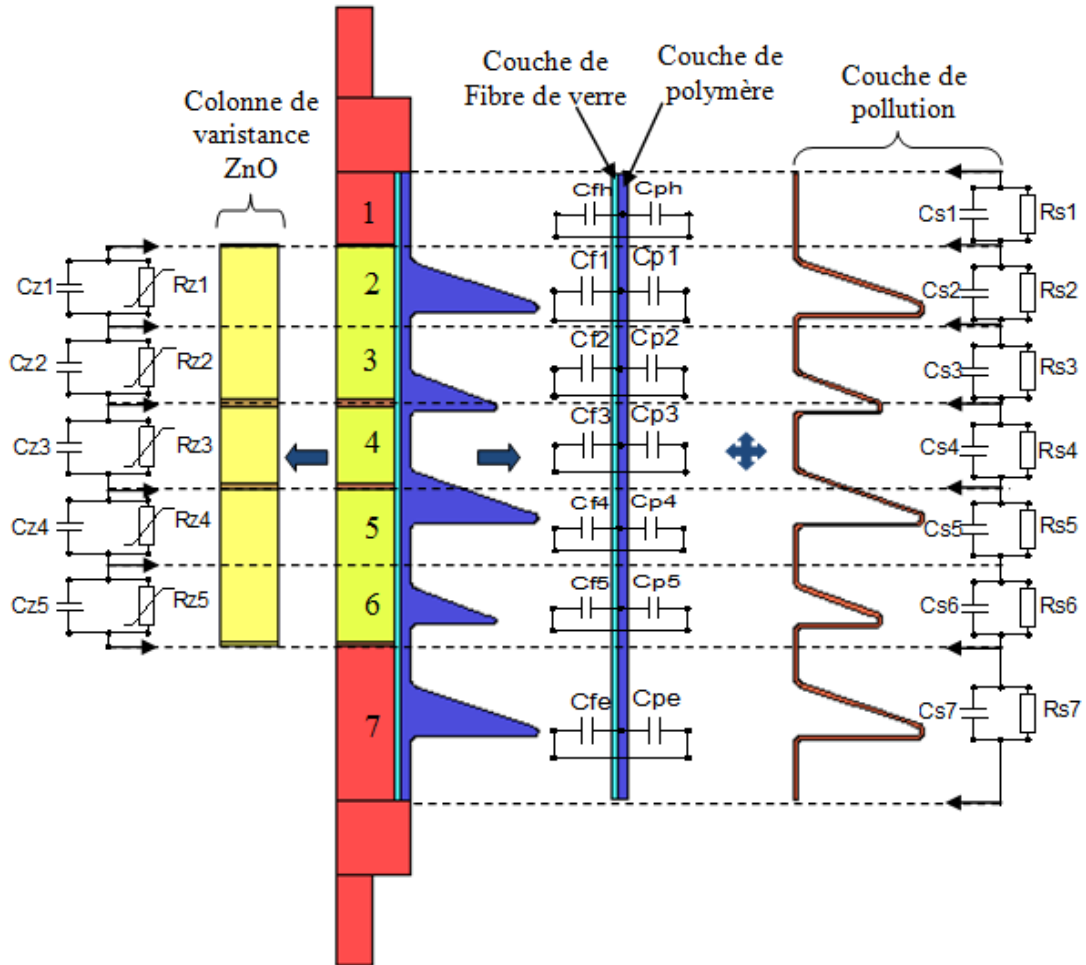


Fig. 3.17. Schéma de principe de la modélisation

3.4.1. Modélisation de la résistance non-linéaire (R_z) des éléments de varistance ZnO

Le comportement de la résistance non-linéaire des éléments varistance ZnO est représenté par une expression de courant en fonction de tension ($I = F(V)$), extraire dans la caractéristique tension-courant du parafoudre. En basant sur les résultats expérimentaux obtenus par Mr .F.S. Banzaoua [40].

Le comportement non-linéaire des éléments ZnO du parafoudre peut être représenté par l’expression suivante :

$$I = K_1 V^{\alpha_1} + K_2 V^{\alpha_2} \tag{3.11}$$

Avec,

I : Courant (mA).

V : Tension (kV).

$K_1, K_2, \alpha_1, \alpha_2$: Constantes qui ont été déterminés expérimentalement [40].

Plusieurs chercheurs [40], [56] ont été représenté la résistance non linéaire des éléments actifs du parafoudre (varistance ZnO) par l'expression (V-I) suivant :

$$I = KV^\alpha \quad (3.12)$$

Avec :

I : Courant de fuite interne.

V : Tension à travers du parafoudre.

α, K : Constants.

Et nous savons que :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}V \quad (3.13)$$

$$E = V/d \quad (3.14)$$

Avec :

E : champ appliqué sur la colonne ZnO.

d : Longueur de la colonne ZnO qui est constant.

Donc, l'expression (3.10) devient :

$$I = K(d \cdot E)^\alpha \quad (3.15)$$

Puisque la tension est uniformément distribuée sur la colonne des éléments de varistance ZnO, la distribution de champ électrique sur la surface de la colonne ZnO est également uniforme. Si nous considérons deux points (le point n et le point m) sur la surface de la colonne ZnO, avec la distance entre n et m est 1/5 de la longueur totale (d) des éléments de ZnO alors nous pouvons représenter le champ électrique entre n et m comme suit :

$$E = \frac{(V_m - V_n)}{d/5} \quad (3.16)$$

Où,

V_m : Tension au point m.

V_n : Tension au point n.

Donc:

$$I = K(d \cdot E)^\alpha = K \cdot \left[d \cdot 5 \frac{(V_m - V_n)}{d} \right]^\alpha = K \cdot [5(V_m - V_n)]^\alpha \quad (3.17)$$

L'expression V-I générale employé pour modeler les cinq sections égales de la colonne ZnO est comme suit :

$$I = K_1 \cdot [5(V_m - V_n)]^{\alpha_1} + K_2 \cdot [5(V_m - V_n)]^{\alpha_2} \quad (3.18)$$

3.4.2. Modélisation de la couche de pollution

Dans cette simulation, la couche de pollution est représentée par un circuit $R-C$ parallèle (Fig. 3.17). Le condensateur représente la capacité parasite dans l'enveloppe. Les valeurs de la capacité de chaque section dans la couche polluée ont été obtenues en utilisant le même concept basé sur la MEF. Il est à noter que la répartition de pollution à l'état humide est considéré uniforme. La valeur de la résistance de la couche de pollution devient faible à l'état humide. Elle augmente à fur à mesure que la température dans le parafoudre en polymère augmente jusqu'à ce que la surface polluée soit totalement séchée.

3.4.3. Modélisation de la bande sèche

Dans le but de prendre en compte l'apparition des bandes sèches suite aux assèchements locaux, un modèle basé sur le concept de Neumarker est développé dans lequel la résistance non-linéaire de la bande sèche prend la forme:

$$R_{db} = A \cdot I^{-(n+1)} \cdot x \quad (3.19)$$

La partie humide sera donc :

$$R_H = \frac{r_p(L-x)}{L} \quad (3.20)$$

A , n : Sont des constants. Leurs valeurs d'après les auteurs des références [54], [57] sont comme suit :

$$0 < A < 500 \quad \text{et} \quad 0 < n < 1$$

R_{db} : Résistance de la bande sèche.

Ce modèle est implanté dans l'EMTP puis introduit dans le circuit équivalent montré dans la figure 3.18. La variation du nombre de la bande sèche est laissée à l'utilisateur ainsi que la position de cette bande sur la surface du parafoudre.

3.4.4. Identification des paramètres électriques du circuit équivalent

Les paramètres électriques du circuit équivalent sont calculés en se basant sur les formules (3.9), (3.10) et à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics.

Les résultats obtenues sont résumées dans les tableaux 3.2 et 3.3

Tableau 3.2. Valeurs des différents paramètres du circuit équivalent obtenues par la MEF (cas propre)					
Sections du parafoudre	C_{zi} [pF]	C_{fi} [pF]	C_{pi} [pF]	C_{si} [pF]	R_{si} [Ω]
Section 1	219,32	309,38	27,23	$C_{p1}=80,00$	$1,79.10^{16}$
Section 2	217	168,46	29,48	$C_{p2}= 40,89$	$1,22. 10^{16}$
Section 3	219	13,10	22,53	$C_{p3}=6,07$	$3,12. 10^{16}$
section 4	219,40	12,46	19,19	$C_{p4}= 2,74$	$2,55. 10^{16}$
Section 5	220,61	13,53	24,18	$C_{p5}=20,36$	$1,37. 10^{16}$
Section 6	222	15,90	26,83	$C_{p6}=15,52$	$2,06. 10^{14}$
Section 7	223	475,33	186,06	$C_{p7}=685,82$	$2,59. 10^{14}$

Les résultats obtenus pour le cas pollué sont représentés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3. Valeurs des résistances et des capacités de la couche de pollution obtenus par la MEF (cas pollué)			
Sections	Longueur [cm]	Résistance [$M\Omega$]	Capacité [μF]
Section 1	22	2,37	62,76
Section 2	78	1,527	90,80
Section 3	38	3,03	30,20
section 4	56,5	2,58	26,17
Section5	62,5	2,19	62,78
Section6	60,5	2,11	51,30
Section7	102,5	0,53	459,61

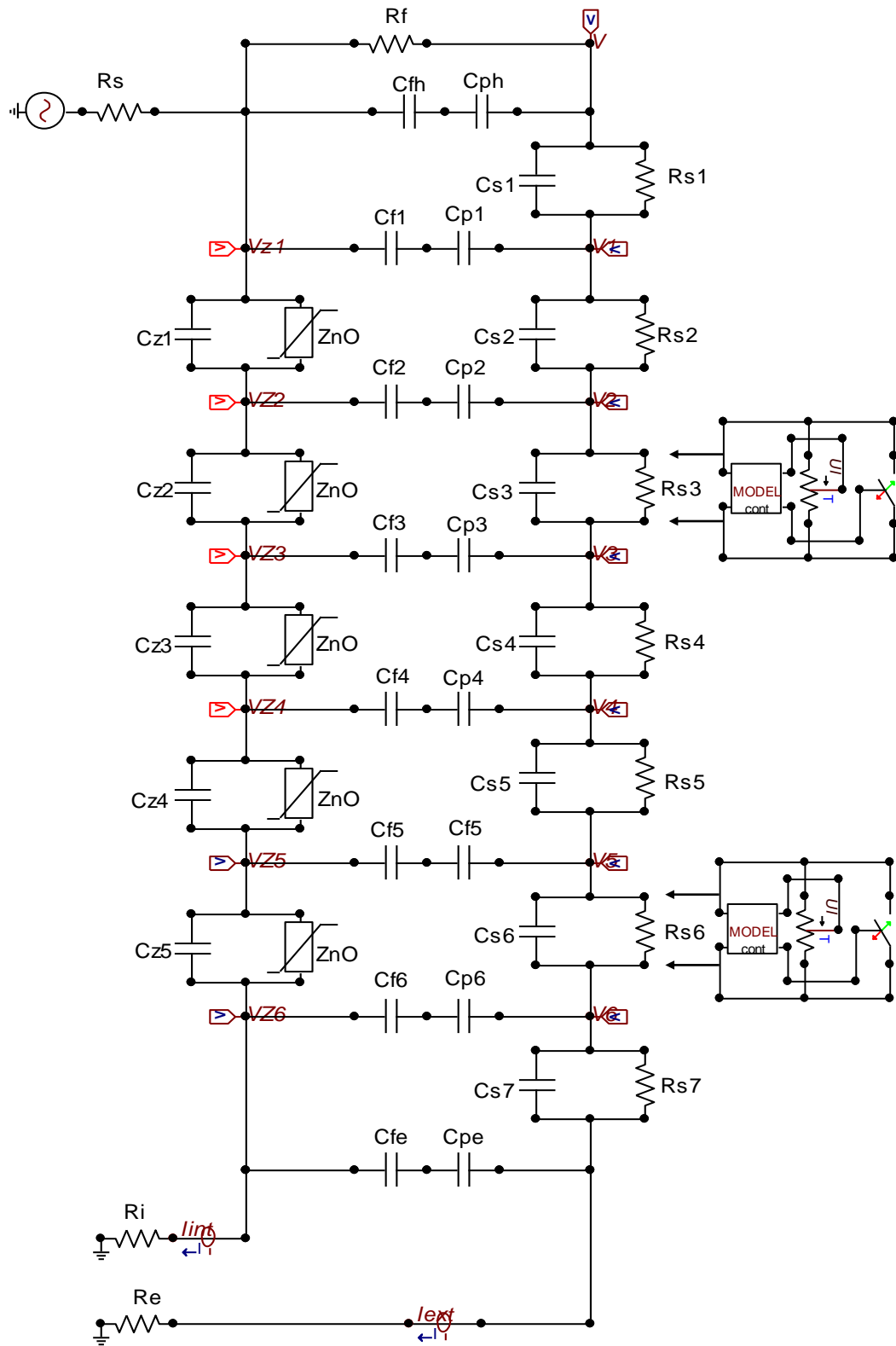


Fig. 3.18. Circuit électrique équivalent du parafoudre

3.5. Résultats de simulation et interprétations

3.5.1. Cas de l'état propre

En première étape on va simuler le parafoudre en polymère pour une tension d'application de 8900 V, et en conditions propres. Les figures 3.19 et 3.20 présentent respectivement les formes d'ondes mesuré et simulé du courant de fuite interne et externe. On peut clairement voir que le courant de fuite interne est supérieur au courant externe (il y a un très faible courant de fuite extérieur qui écoule sur l'enveloppe extérieur du parafoudre). Le courant intérieur est purement capacitif.

3.5.2. Performance du parafoudre sous pollution

3.5.2.1. Cas de l'état humide

En deuxième étape on va simuler numériquement le parafoudre en polymère pour une tension d'application de 8900 V, et en conditions humides.

Les figures 3.21 et 3.22 montrent respectivement les formes d'ondes mesuré et simulé du courant de fuite interne et externe du parafoudre pollué. Comme on peut le voir :

- d'une part le courant de fuite externe est plus importants au fur est à mesure que le courant interne.
- Le courant de fuite externe est purement résistif(en phase avec la tension appliquée), puisque la surface polluée humide offre une résistance plus faible que celle du cas propre.
- Une bonne concordance entre les deux résultats a été obtenue.

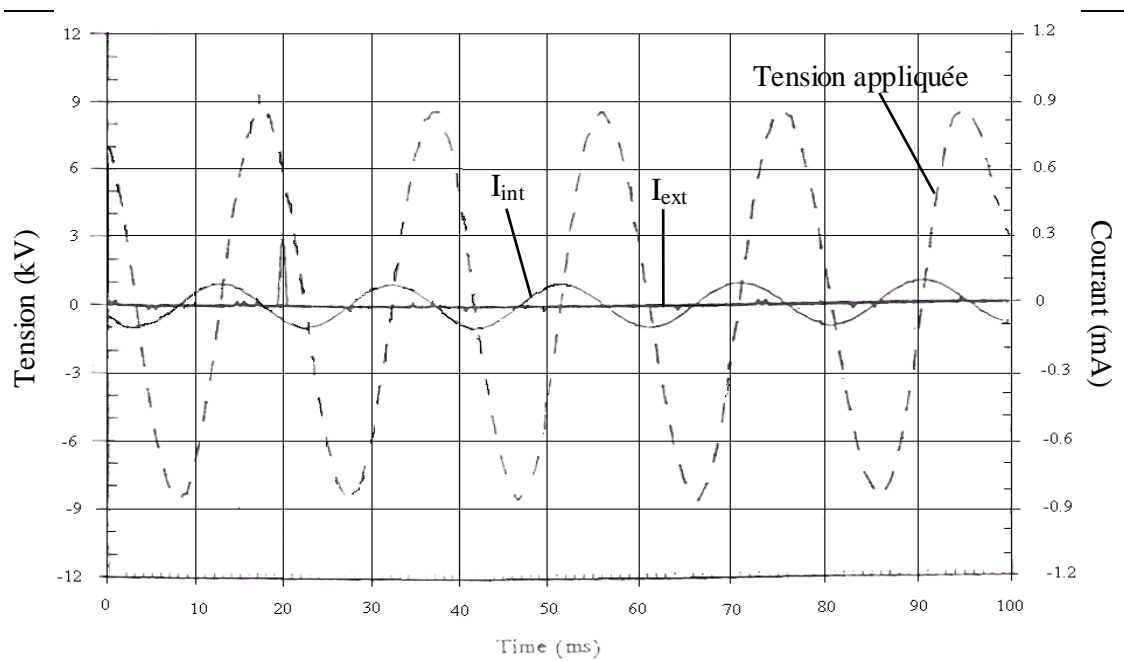


Fig. 3.19. Formes d'ondes des: courant externe, interne, tension d'application mesurés du parafoudre propre [40]

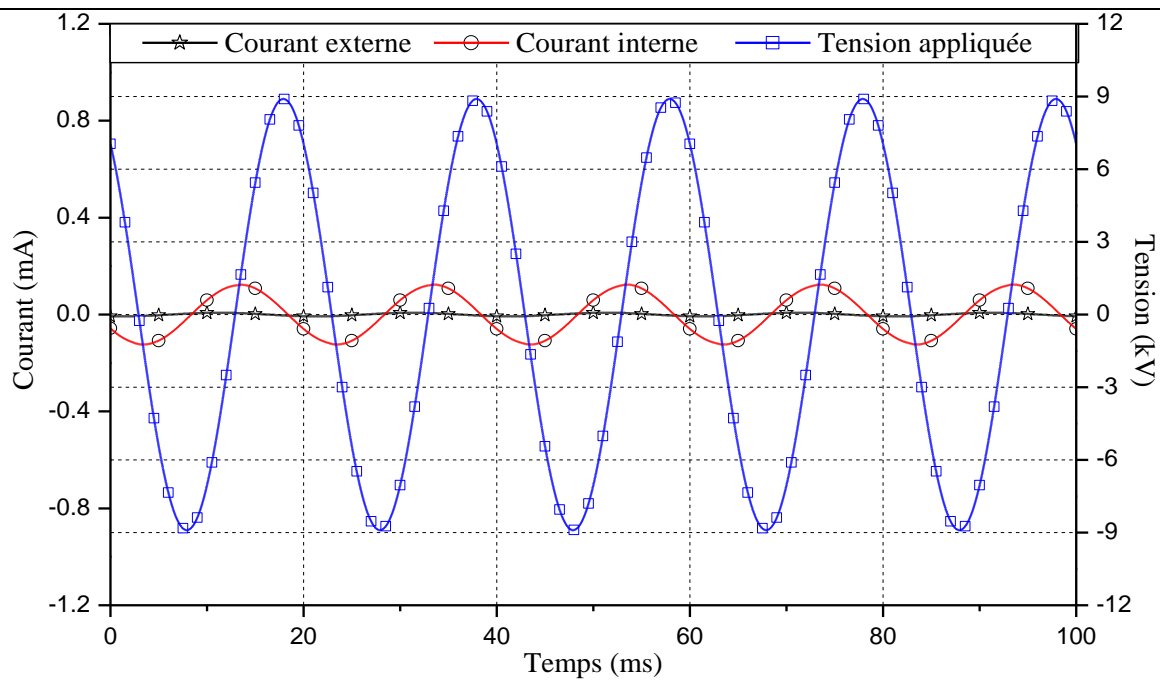


Fig. 3.20. Formes d'ondes des: courant externe, interne, tension d'application simulés du parafoudre propre

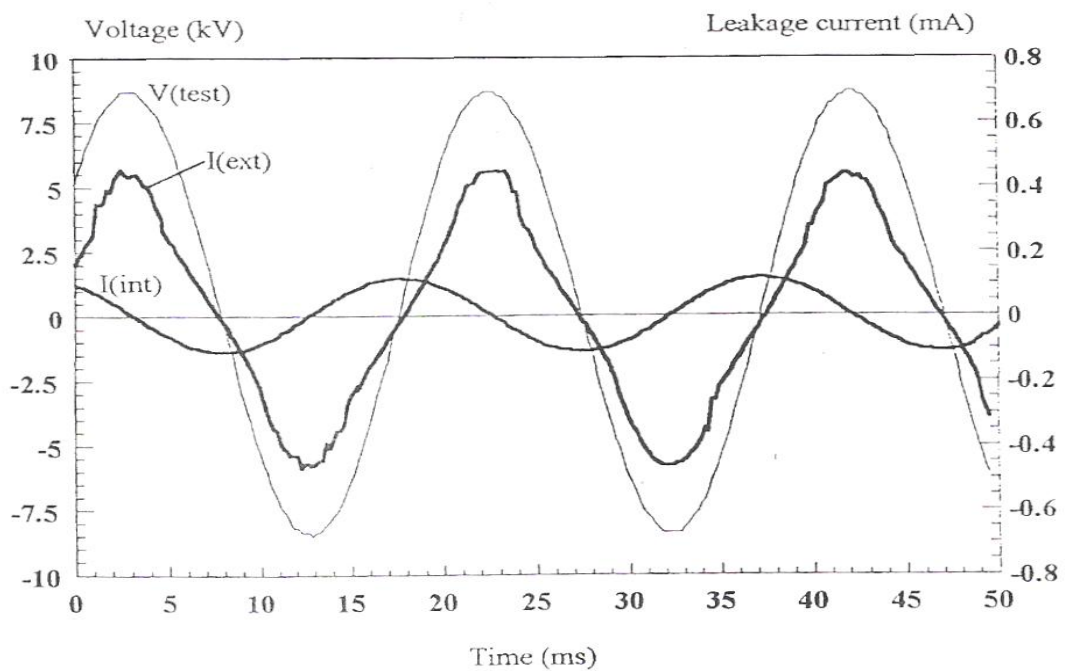


Fig. 3.21. Formes d'ondes des: courant externe, interne, tension d'application mesurés du parafoudre humide [40]

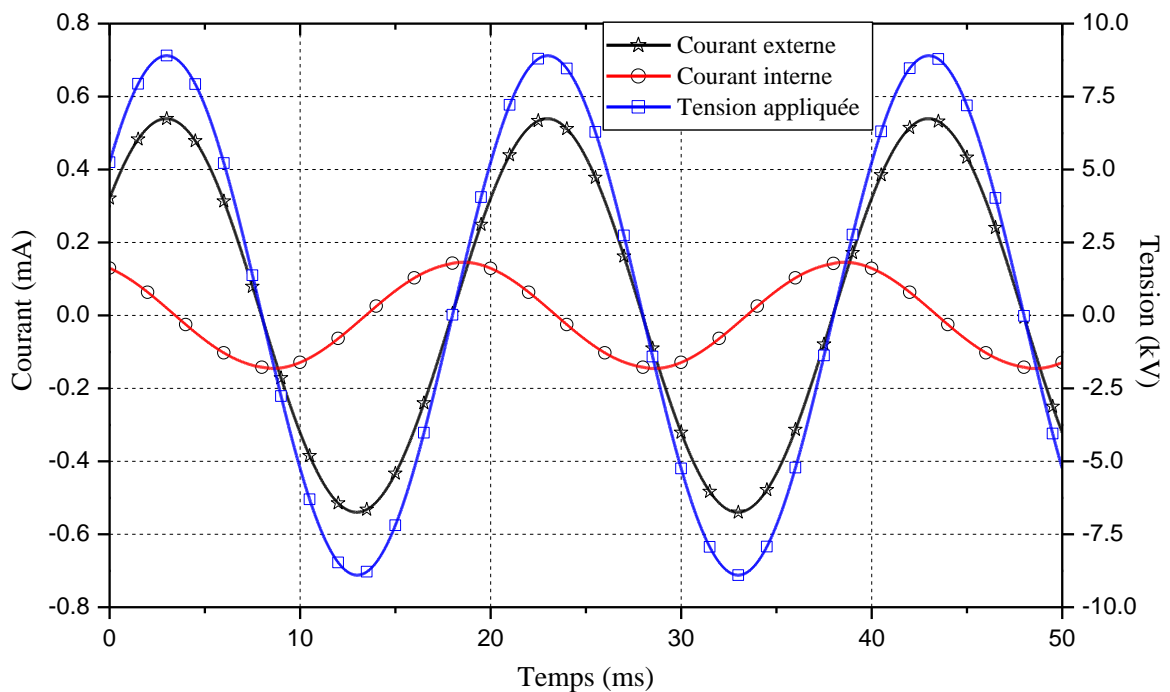


Fig. 3.22. Formes d'ondes des: courant externe, interne, tension d'application, simulés du parafoudre humide

3.5.2.2. Cas de la bande sèche

Comme déjà mentionné précédemment, la bande sèche est représentée par deux résistances série en parallèle avec une capacité. En raison du grand nombre de résultats que l'on peut avoir par simulation nous ne présentons là que quelques exemples.

a. Variation de la position de la bande sèche

La simulation pour les deux positions de la bande sèche correspondent à une largeur égale à 20 mm est représentée. Les résultats obtenus sont montrés dans les figures 3.23 à 3.27.

Les figures 3.23, 3.25 représente la variation des tensions maximales en différents points de la surface du parafoudre; la première correspond à une bande sèche supérieure égale à 20 mm (bande sèche situé dans la troisième section du parafoudre), et la deuxième correspond à une bande sèche inférieure égale à 20 mm (bande sèche situé dans la sixième section du parafoudre).

D'après ces figures, on peut voir que la présence de la bande sèche rendre la distribution de la tension non-uniforme (la présence de la bande sèche a comme conséquence une différence de phase entre la tension à ses bornes et la tension d'alimentation). Ainsi la résistance qui représente la section de la bande sèche devient plus grande, ce qui a conduit à des courants plus faibles et déphasés en retard par rapport à la tension d'alimentation, mais n'influe pas sur le courant interne comme montrés dans les figures 3.24 et 3.26.

La figure 3.27 représente la répartition de la tension le long de l'enveloppe du parafoudre dans les deux cas; bande sèche supérieure et inférieure. La formation de la bande sèche dans la zone inférieure du parafoudre mise l'enveloppe du parafoudre à une tension plus importante que la bande sèche supérieure. En conséquence, certaines section de l'enveloppe synthétique du parafoudre se trouve soumise à un champ électrique un peu plus intense que le cas de la bande sèche supérieure. La tension de 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. Le réamorçage fréquent au même endroit entraîne par effet thermique la dégradation de la surface isolante et l'échauffement des varistances.

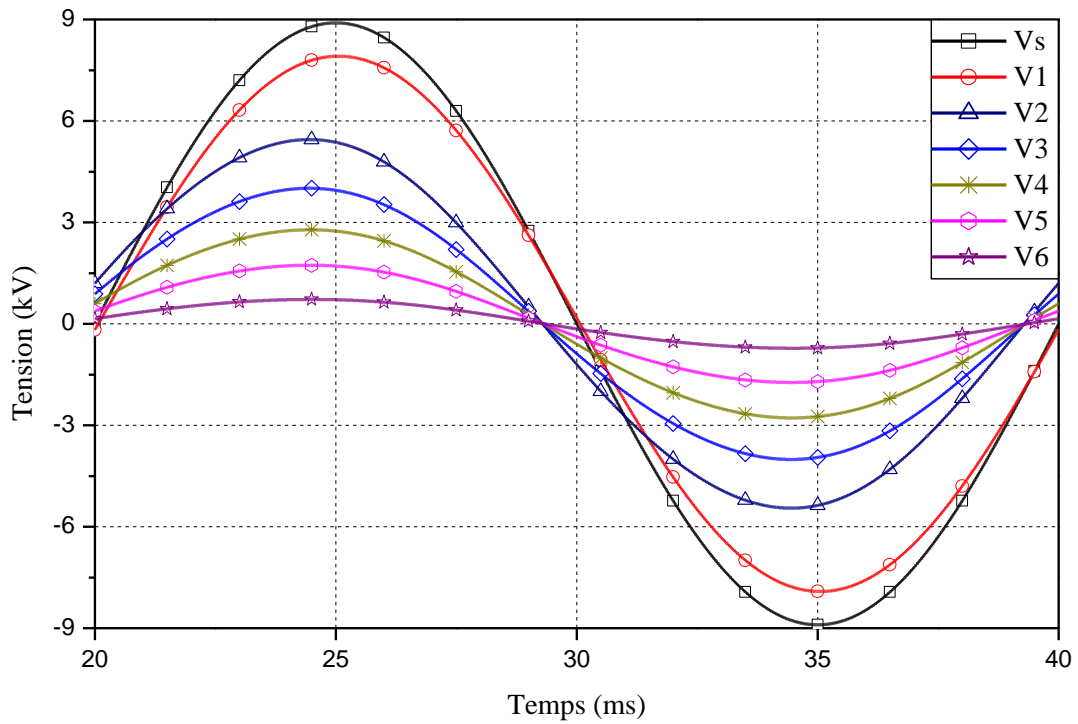


Fig. 3.23. Formes d'ondes des tensions en différents points de la surface du parafoudre (BSS=20mm)

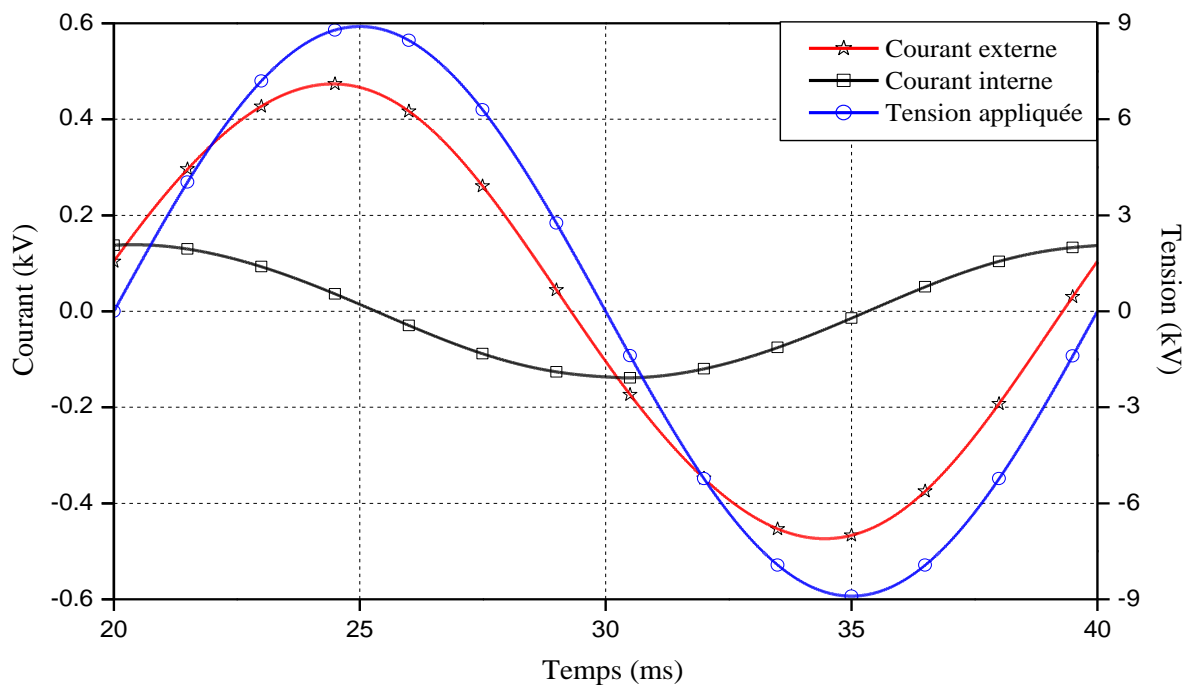


Fig. 3.24. Formes d'ondes des: courant externe, interne, tension d'application du parafoudre (BSS=20mm)

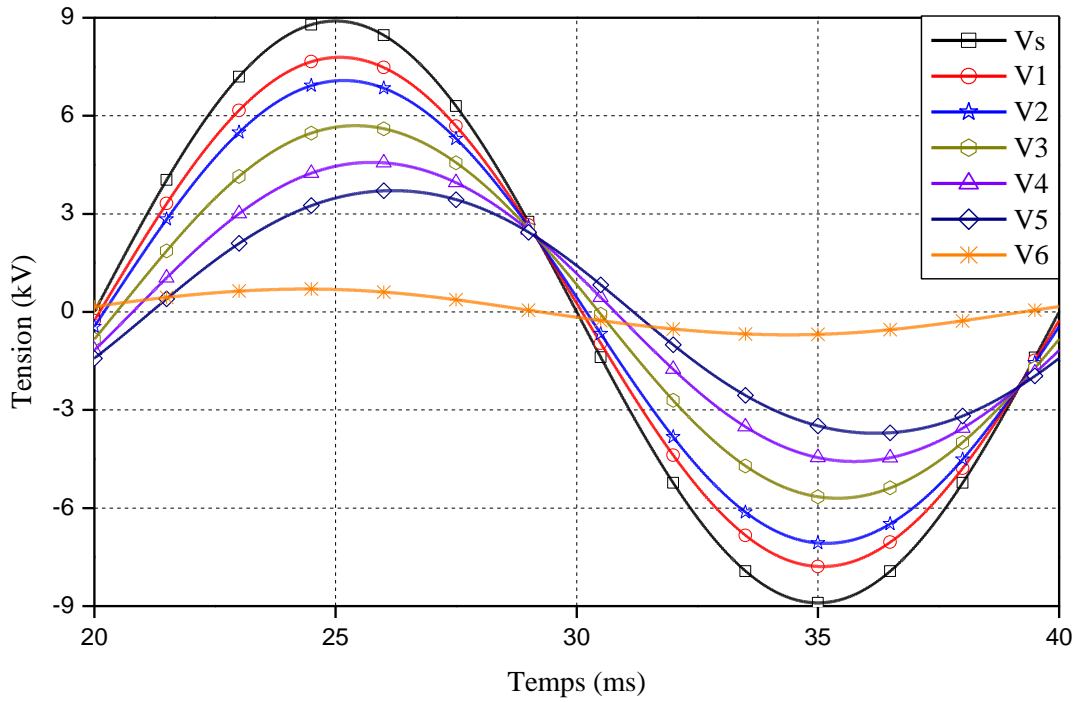


Fig. 3.25. Formes d'ondes des tensions en différents points de la surface du parafoudre (BSI=20mm)

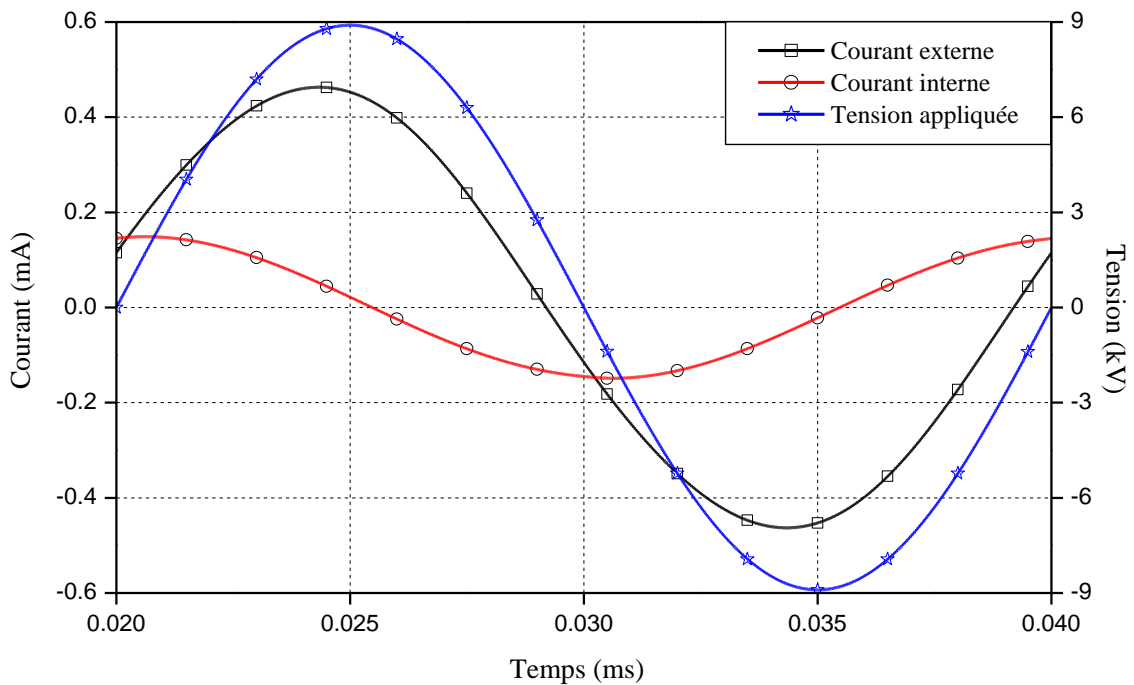


Fig. 3.26. Formes d'ondes des: courant externe, interne, tension d'application du parafoudre (BSI=20mm)

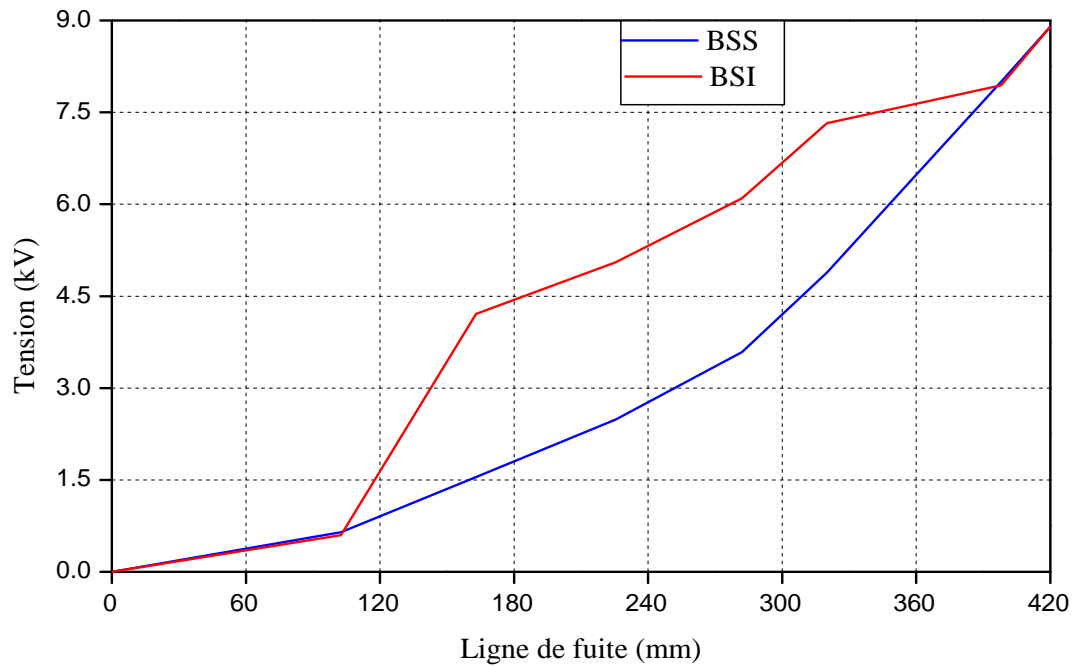


Fig. 3.27. Répartition de la tension le long de l'enveloppe du parafoudre (avec formation de la bande sèche)

3.5.2.3. Décharge à travers la bande sèche

L'évaluation convenable du risque d'amorçage permettrait de ne pratiquer cette opération, coûteuse et souvent gênante pour l'exploitation, que lorsqu'elle est nécessaire. La connaissance du courant de fuite traversant l'isolement et son évolution dans le temps permettrait d'atteindre ce but.

Dans l'intention d'étudier l'influence de réamorçage de la décharge sur le comportement du parafoudre, quelques scénarios sont proposés en variant la répartition de la couche de pollution ainsi la position du modèle de décharge par rapport aux électrodes en adoptant deux cas de figures. La décharge à travers la bande sèche a été simulée en adoptant le même modèle dynamique de décharge considéré précédemment (chapitre 2).

a. Cas où le parafoudre fortement pollué coté HT

Dans ce cas, on considère un parafoudre fortement pollué sur le coté HT dont la surface comporte deux bandes de conductivités $\sigma_1=200 \mu\text{S}$ et $\sigma_2=80 \mu\text{S}$. La première bande de conductivité σ_1 et celle se trouvant du coté de l'électrode haute tension; sa longueur égale à 50 % de la ligne de fuite totale du parafoudre. La deuxième bande de conductivité σ_2 , à une longueur égale à 50 % restant de la ligne de fuite totale.

Dans un premier scénario, la bande sèche est supposée apparaître dans la première ailette (section trois), en y introduisant le cas propre pour but de comparaison comme illustre la figure 3.28. D'après cette figure, on peut clairement voir que le courant de fuite interne et externe augmente au fur et à mesure que la tension appliquée augmente. Cependant, le taux d'incrément de courant interne est beaucoup plus haut que celui du courant externe. Quand la tension d'alimentation est au-delà de 15kV, on peut voir que la forme d'onde du courant de fuite interne n'est plus purement résistive. Ceci se produit parce que la résistance non linéaire dans les éléments de ZnO diminue. En conséquence, un courant résistif important traverse la colonne d'éléments de ZnO. Ainsi, l'amplitude de la forme d'onde du courant résistif augmente lorsque la tension d'alimentation augmente.

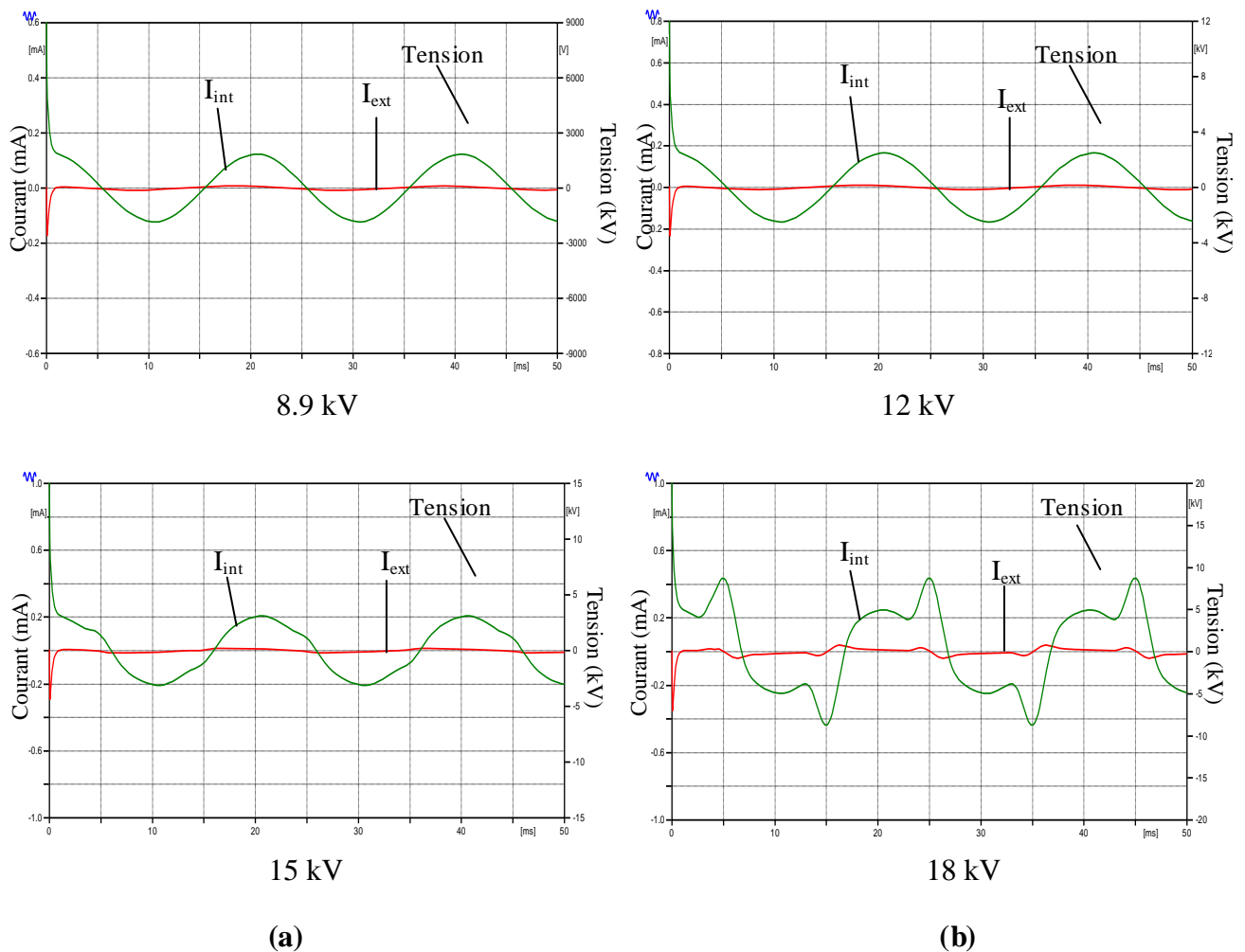


Fig. 3.28. Formes d'ondes des courant externe et interne simulés pour des tensions d'application 8.9 kV, 12kV, 15 kV, et 18 kV, où le parafoudre est propre

Les résultats de simulation dans le cas où la bande sèche est supposée apparaître dans la première ailette sont représentés dans la figure 3.29(a). Sous la tension d'alimentation 8,9 kV, aucune décharge a été observée. D'après cette figure, nous constatons qu'avant que le critère de propagation ne soit vérifié, la forme du courant de fuite externe suit la tension appliquée. Quand cette dernière est au-delà de 12 kV, une décharge est constatée. Durant la phase de propagation, le courant augmente jusqu'au contournement de la bande sèche où cette augmentation devient brutale.

On peut clairement voir que le courant de fuite interne et externe, et aussi le nombre de décharge augmente au fur et à mesure que la tension d'alimentation augmente.

Dans un deuxième scénario, la bande sèche est supposée apparaître dans la sixième section (sur le tronc du parafoudre). Les résultats de simulation dans ce cas sont présentés dans la figure 3.29(b). Cette figure montre que la décharge ne réamorçait pas aux tensions 8,9 kV et 12 kV.

Lorsque la tension appliquée est suffisante pour réamorcer une décharge (15 kV et plus) et lorsque la condition de propagation est vérifiée ($E_p > E_{arc}$), l'arc électrique prend naissance et court-circuite la bande sèche. On constate que la valeur du courant de décharge dans ce cas est supérieure au cas précédent où la décharge apparaît sous la première ailette.

Les deux résultats (a) et (b) de la figure 3.29 prouvent que les courants internes et externes sont accompagnés par des pics (transitoires) de polarité semblable.

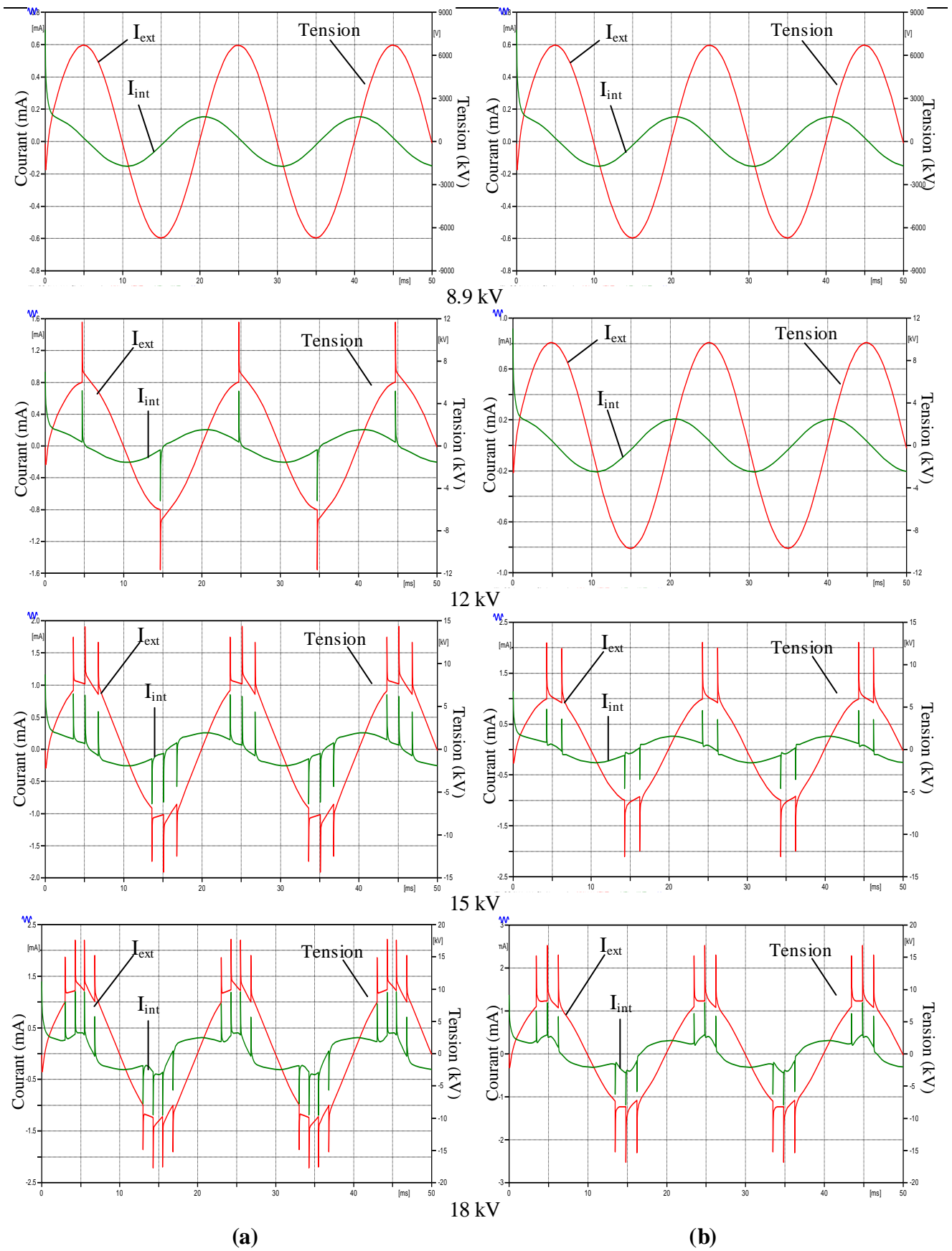


Fig. 3.29. Formes d'ondes des courant externe et interne simulés pour des tensions d'application 8.9 kV, 12kV, 15 kV, et 18 kV (BS=38mm), où le parafoudre fortement pollué coté HT

b. Cas où le parafoudre fortement pollué coté terre

Dans ce cas, le parafoudre est fortement pollué sur le coté terre et faiblement sur le côté HT dont les conductivités de la couche polluante $\sigma_1=80 \mu\text{S}$ et $\sigma_2=200 \mu\text{S}$ (50%-50%). On procède à la l'implantation du modèle de décharge (bande sèche) dans la troisième section puis dans la sixième section (la bande sèche est supposée apparaitre dans la zone supérieure puis dans la zone inferieure du parafoudre).

La figure 3.30 (a) montre les résultats de simulation pour le cas où la bande sèche est supposée apparaitre dans la première ailette.

Une fois que la tension d'alimentation de 8,9 kV est appliquée au parafoudre, le courant de fuite externe apporte une contribution au soutien et au développement d'une décharge aux bornes de la bande sèche sur la surface du parafoudre (lorsque la tension appliquée égale à 8,9 kV et plus, les conditions de propagation sont vérifiés et la décharge aura lieu).

On constate, que la valeur du courant de décharge externe et interne, et aussi le nombre d'amorçage de l'arc proportionnel à la tension appliquée. Plus la tension est élevée plus le courant de décharge est important.

La figure 3.30 (b) montre les résultats de simulation pour le cas où le modèle de décharge à été implanté dans la zone inferieure du parafoudre (la sixième section du parafoudre). D'après cette figure, aucune décharge n'a été observée puisque les conditions de propagations ne sont pas vérifiées.

D'après l'analyse du courant de fuite, nous avons constaté que ce dernier peut donner des informations sur l'état de la surface isolante polluée. Nous avons montré que l'apparition de la décharge est liée à la répartition de la couche de pollution. Le réamorçage de la décharge est localisé surtout auprès de l'électrode HT (Ce comportement dynamique de la longueur des intervalles d'air, qui a lieu généralement près de l'électrode HT où le champ électrique est plus élevé), tandis que la valeur crête de ce courant est supérieure dans le cas où la décharge localisé auprès de l'électrode de terre.

Le réamorçage fréquent de la décharge aux bornes de la bande sèche entrainant par effet thermique la dégradation de la surface isolante et l'échauffement des varistances.

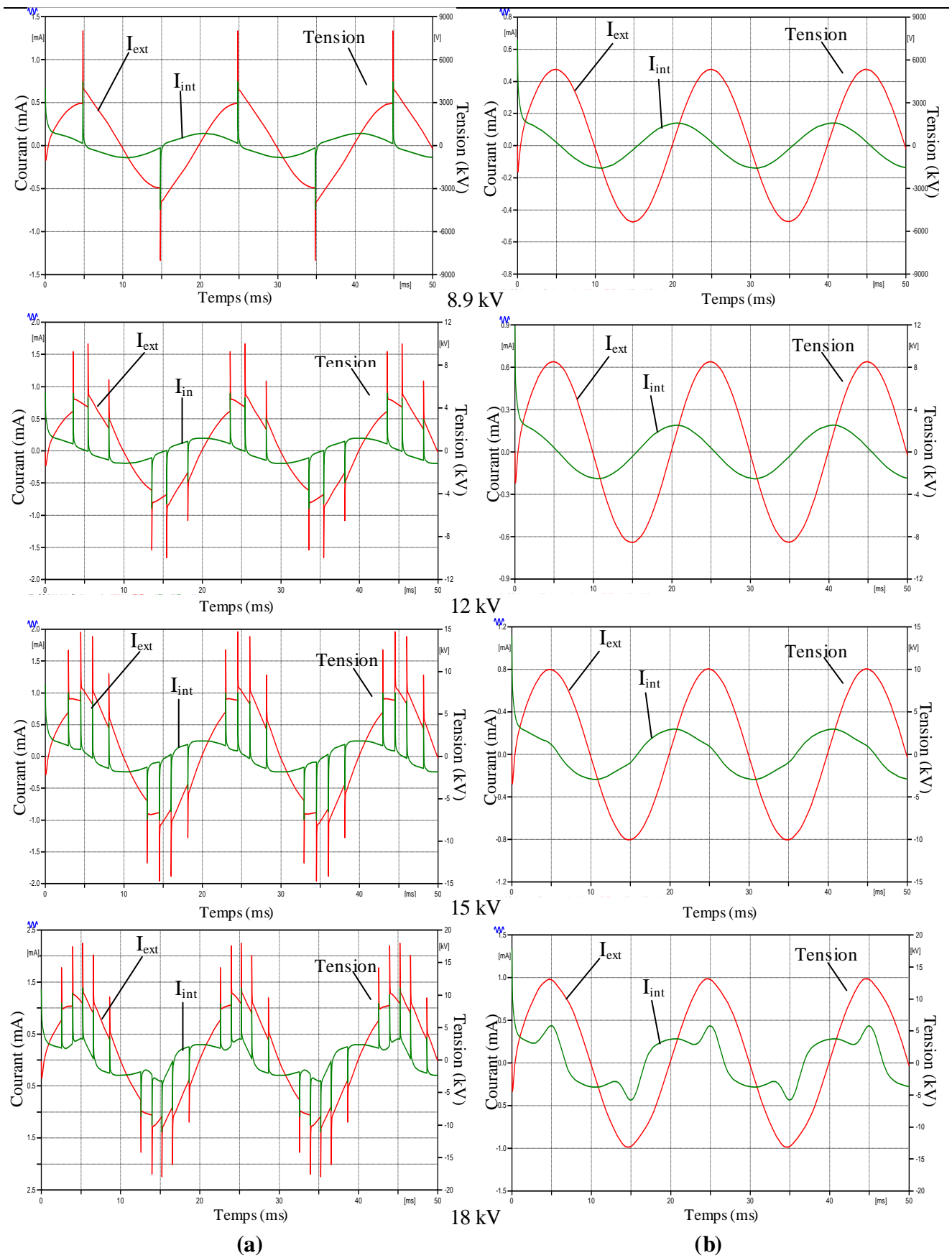


Fig. 3.30. Formes d'ondes des courant externe et interne simulés pour des tensions d'application 8.9 kV, 12kV, 15 kV, et 18 kV (BS=38mm), où le parafoudre fortement pollué coté terre

3.6. Conclusion

La présence de la pollution à la surface du parafoudre peut avoir une influence significative sur la distribution du potentiel et du champ électrique de celui-ci. Afin de quantifier cette influence, la méthode des éléments finis (FEM) a été réalisée. Le logiciel COMSOL Multiphysics a été utilisé à cet effet. On a aussi présenté un circuit équivalent du parafoudre qui nous a permis de simuler les courants de fuite externe et interne dans le parafoudre synthétique sous des conditions polluée et propres. Ses paramètres ont été identifiés en se basant sur l'approche des éléments finis. Par ailleurs, un modèle de décharge dynamique basé sur le modèle d'Obenaus en tenant compte des évolutions temporelle (dans le temps) et spatiale (suivant la longueur d'arc) est introduit dans le circuit. Nous avons implanté ce circuit équivalent dans logiciel de simulation ATP/EMTP. Des résultats satisfaisant ont été obtenus. La disposition des dépôts de pollution influe sur le comportement de la décharge. Nous avons montré que l'apparition de la décharge est liée à la répartition de la couche de pollution. Le réamorçage de la décharge est localisé surtout auprès de l'électrode HT où le champ électrique est plus élevé, tandis que la valeur crête de ce courant est supérieure dans le cas où la décharge localisé auprès de l'électrode de terre.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Lorsque les parafoudres sont installés dans régions exposées à la pollution, les particules solides polluantes se déposent sur la surface extérieure de l'enveloppe. Aux conditions humides, les divers dépôts polluants deviennent plus ou moins conducteurs et par la suite, un courant de fuite prend naissance et circule dans cette couche conductrice qui sèche irrégulièrement. On assiste alors au phénomène de formation de la bande sèche autour de la surface extérieure.

Ce travail avait pour but d'étudier l'effet de la pollution sur le comportement du parafoudre synthétique. Nous nous sommes intéressés essentiellement à l'influence de la formation de la bande sèche et au réamorçage de la décharge sur les courants de fuite externe qui circule dans la surface contaminée et le courant interne qui circule à travers la colonne de varistances. L'évaluation convenable du risque d'amorçage permettrait de ne pratiquer cette opération, coûteuse et souvent gênante pour l'exploitation, que lorsqu'elle est nécessaire. La connaissance du courant de fuite traversant l'isolement et son évolution dans le temps permettrait d'atteindre ce but.

Après avoir examiné les concepts fondamentaux, les informations d'ordre générales sur les parafoudres et le phénomène de pollution sur ces derniers, nous avons mené une présentation des différents modèles des parafoudres à oxyde métallique existant dans la littérature. Nous avons présenté aussi la modélisation de la décharge à travers la bande sèche, qui s'appuie sur le concept des modèles de contournement dynamique des surfaces isolantes. A cet effet, nous avons rappelé les principaux modèles statiques et dynamiques rapportés dans la littérature. Nous avons proposé par la suite, un modèle dynamique représentatif de l'arc électrique. Ce modèle utilise le critère de propagation de Hampton et se base sur le circuit électrique équivalent d'Obenaus. Il permet d'évaluer la tension de contournement, le temps de contournement et les différentes grandeurs caractérisant l'arc (le courant de l'arc, sa longueur, la vitesse de propagation,...). Un bon accord a été obtenu en comparant nos résultats à ceux rapportés dans la littérature.

Dans ce travail et dans le but de mieux comprendre l'effet de la couche de pollution sur la distribution du potentiel et du champ électrique le long du parafoudre synthétique, une série

de cas de répartition de la couche de pollution et pour plusieurs valeurs de la conductivité a été faite. Le logiciel COMSOL Multiphysics a été utilisé à cet effet. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la conductivité de la couche polluante favorise la distribution non uniforme de la tension et du champ électrique le long du parafoudre. Par la suite, nous avons présenté un circuit équivalent qui tient compte les capacités d'accouplement de la couche de pollution sur l'enveloppe du parafoudre ZnO. Les paramètres électriques du circuit sont déterminés par la méthode des éléments finis.

Nous avons implanté le circuit équivalent dans le logiciel de simulation l'ATP/EMTP dans le but de simuler les courants de fuite interne et externe du parafoudre. Les résultats de simulation obtenus dans le cadre de cette étude montrent que l'état humide de la pollution influe sur la forme du courant de fuite externe, mais n'influe pas sur le courant de fuite interne qui traverse la colonne de varistances ZnO. Le courant de fuite externe dans ce cas est purement résistif. La décharge à travers la bande sèche a été simulée en adoptant le même modèle dynamique de décharge des surfaces isolantes. Ce modèle a été implanté dans le circuit équivalent du parafoudre. Il ressort de différentes simulations de ce dernière partie de travail que, la présence de la décharge externe à travers la bande sèche influe sur la forme des deux courants de fuite externe et interne. De plus, le réamorçage de la décharge sur l'enveloppe du parafoudre pollué dépend essentiellement de la conductivité du dépôt polluant ainsi que de la répartition de la couche de polluante sur la surface isolante. Par conséquent, la connaissance de ce degré de pollution est une condition préalable et indispensable pour apprécier le niveau de l'isolement des parafoudres installés sur site, en vue de dimensionner convenablement leurs isolations. Aussi, pour éviter la destruction inattendue des parafoudres (la connaissance de cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation).

Comme perspective de ce présent travail, on propose:

- La mesure de courant de fuite dans le laboratoire qui est fortement recommandée pour être comparé avec les résultats de circuit équivalent.
- L'optimisation des paramètres de l'arc qui consiste le contournement dynamique des parafoudres.
- L'utilisation des techniques d'intelligences artificielles et le profil thermique pour diagnostiquer les parafoudres.

Annexe A- Critères de propagation de la décharge

Les principaux critères de propagation rencontrés dans la littérature ont été établis sur la base de conditions faisant intervenir soit le champ électrique, soit le courant, soit la puissance, soit l'énergie fournie par la source ou encore les impédances.

1) Critère de Hampton

A partir d'une étude expérimentale, Hampton [51] a déterminé les conditions critiques de propagation de l'arc, en remplaçant la couche de pollution en série avec l'arc par une colonne d'eau uniforme présentant une résistance linéique constante. Il a pu établir que la condition pour que le contournement se produise, est que le champ E_p dans la colonne d'eau dépasse le champ E_{arc} à l'intérieur de l'arc :

$$E_{arc} < E_p \quad (A.1)$$

2) Critère de Hesketh

En supposant que l'arc en série avec la couche de pollution mouillée se modifie de façon à rendre maximale le courant I qu'il tire de la source d'alimentation, Hesketh [53] a établi un critère de propagation de l'arc, exprimé par la relation :

$$\frac{dI}{dx} > 0 \quad (A.2)$$

Cette relation montre, par conséquent, que la propagation de la décharge est possible, si elle provoque l'augmentation du courant circulant sur la surface isolante.

3) Critère de Wilkins

En considérant qu'un système se place dans la configuration qui lui permet de dissiper le maximum d'énergie, Wilkins [23], [53] a généralisé la condition énoncée par Hesketh [53] et établit un critère de propagation utilisant la puissance P fournie par la source :

$$\frac{dP}{dx} > 0 \quad (A.3)$$

Lorsque la tension appliquée au système est constante, le critère de Wilkins se réduit à la condition établie par Hesketh.

4) Critère de Anjana et Lakshminarasimha

En assimilant l'arc à une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, Anjana et Al [49] ont établi une condition nécessaire à la propagation de l'arc, basée sur des conditions

énergétiques : l'énergie totale fournie W_{totale} doit être supérieure ou égale à l'énergie W_{th} nécessaire pour maintenir l'arc à sa température :

$$W_{totale} \geq W_{th} \quad (A.4)$$

5) Critère de Dhahbi, Beroual et Krahenbul

Ces auteurs [23] ont proposé un nouveau critère analytique de propagation de la décharge en faisant intervenir l'impédance équivalente Z_{eq} d'un circuit électrique (Figure B.1), simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite.

En utilisant la condition nécessaire à la propagation de l'arc, donnée par :

$$\frac{d|Z_{eq}|}{dx} \leq 0 \quad (A.5)$$

Ces auteurs ont abouti à un critère qui est :

$$E_{arc} \geq \frac{E_p}{\sqrt{a}} \quad (A.6)$$

Où

$$a = 1 + \omega^2 \rho_p^2 \varepsilon^2 \text{ (Sous tension continue } a=1)$$

ω : la pulsation,

ρ_p : la résistivité de la pollution,

ε : la permittivité de la pollution.

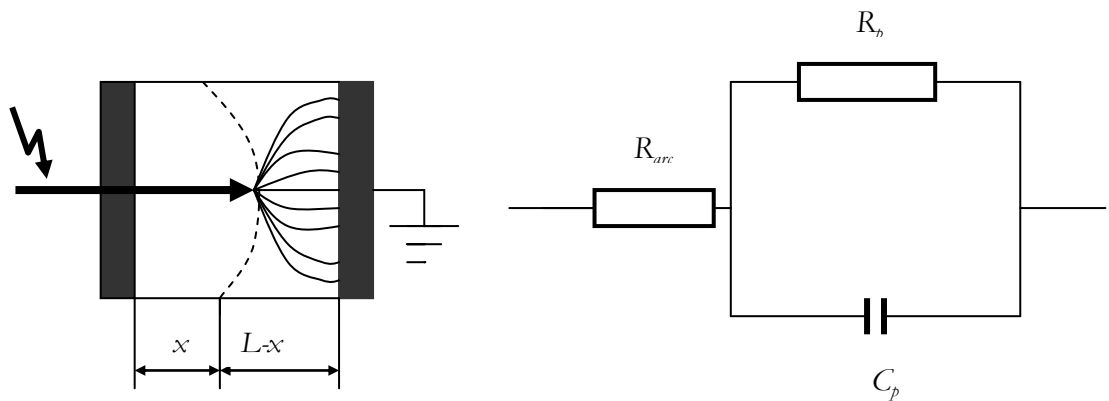


Fig. A.1. Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent [23].

Annexe B- Vitesse de propagation

De nombreux mécanismes ont été proposés pour expliquer la propagation de la décharge sur les surfaces isolantes polluées, mais on ne trouve que peu de relations permettant d'évaluer la vitesse avec laquelle la décharge se déplace.

En faisant l'hypothèse que l'allongement de la décharge est lié à la puissance P disponible à la naissance de la décharge et à l'énergie nécessaire pour l'obtenir, Zoledziowski [46] a établi la relation suivante:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{U^2}{\sigma \cdot r_p (L-x)^2 Q} \quad (\text{B.1})$$

où σ désigne la conductance de la décharge, Q la densité d'énergie linéique de la décharge, x la longueur et r_p la résistance de pollution.

Matsuo et al [23] abordent de façon directe l'étude de la variation de la vitesse de propagation. En utilisant des fibres optiques placées sur le chemin de la décharge à des distances données les unes des autres et en mesurant les intervalles de temps entre les signaux lumineux détectés par les fibres optiques, ils déduisent la vitesse moyenne de propagation de la décharge.

A l'aide d'une camera ultra rapide, Al Baghdadi [43] a pu établir une relation empirique donnant la vitesse:

$$v = 1.5410^{-4} r_p^{2.5} (i^4 - i_c^4) \text{ [cm/s]} \quad (\text{B.2})$$

Où i_c est le courant critique en A et r_p la résistance linéique de pollution s'exprime en Ω/cm .

Rizk [43] a trouvé que cette formule concorde avec son analyse dimensionnelle et l'a utilisée dans son modèle dynamique [47].

Rahal [52] suppose que le déplacement de la décharge est gouverné par les ions qui sont extraits et que la vitesse moyenne de ces ions est proportionnelle au champ E_{pr} existant à la racine de l'arc. De plus, une force de rappel provenant de la colonne de la décharge, s'exerce sur ces ions. Le champ total s'exerçant sur les ions est alors égal à la différence entre E_{pr} et E_{arc} , et la vitesse aura pour expression:

$$v = \frac{dx}{dt} = \mu(E_{pr} - E_{arc}) \quad (\text{B.3})$$

Où μ désigne la mobilité des électrons dans l'arc.

Références Bibliographiques

- [1] C. GAZZOLA and B. VUILLET, "Protection avale et pure pour les postes MT/BT haut de poteau," *Système d'énergie électrique – Guide de référence; ELEC International symposium*, pp. 2-12, 1998.
- [2] G. R. S. Lira, E. Costa, and C. w. D. Almeida, "Self Organizing Meps Applied to Monitoring and Diagnosis of Zno Surge Arresters," *IEEE*.
- [3] M. Mobedjina, B. Johnnerfelt, and L. Stenstrom, "Design and testing of polymer housed surge arresters," in *GCC CIGRÉ 9th Symposium*, Abu Dhabi, 1998.
- [4] P. S. Ravindra and T. V. P. Singh, "Influence of pollution on the performance of metal oxide surge arresters," in *Conference on Electrical & Computer Engineering*, Canadian, 2002.
- [5] O. O. Filho, F. B. Barbosa, R. M. de Azevedo, W. A. S. Cruz, and S. G. Carvalho, "Performance Evaluation of 20 years Old Zno surge arresters Breded on laboratory Tests," *International conference on high voltage engineering and application-IEE*, pp. 641-644, 2008.
- [6] F. MACIELA, "Parafoudres à moyenne tension HT et à haute tension HTB," *Technique de l'ingénieur*, vol. 2, pp. D4755-1-D4755-11, 2009.
- [7] K. Feser, W. Kohler, and D. Qiu, "Behaviour of zinc oxide surge arresters under pollution," *IEEE*, 1991.
- [8] D. A. zahedi, "Effect of dry Band on a performance of uhv surge Arrester and leakage Current Monitoring, using new developed Model," *IEEE*, pp. 888-883, 1994.
- [9] S. Vitet, M. Louis, A. Schei, L. Tenstom, and J. Lundquist, "Thermal Behaviour of Zno Surge Arresters in polluted conditions," *cigre rapport scientifique*, 1992.
- [10] E. A. Cherney, B. Biglar, and S. Jayaram, "Selt Forg Testing of polymer Housed Surge Arresters," *IEEE*, vol. 16, no. 2, pp. 252-258, 2001.
- [11] J.-F. Affolter. (2000, Oct.) Haute tension. court destiné aux étudiants; Ecole d'ingénieur du CANTON DE VAUD.
- [12] T. Kawamura, "Application des parafoudres à oxide métallique aux lignes aériennes," in *Electra no186*, 1999.
- [13] F. Tighilt, "contribution à l'étude de la distribution de tension dans les parafoudres ZnO," université Ferhat Abbas, Setif, Algerie, mémoire de magister, 2008.
- [14] G. LEBOYER, A. GIRODET, and J.-C. V. BOUNEZOU, "Les postes THT / HT," *Système d'énergie électrique-Guide de référence; ELEC International symposium*, p. 37, 1998.
- [15] A. Schei and K. H. Weck, "Parafoudres à oxide métallique dans les reseaux alternatif," in *Electra no128*, 1990.
- [16] R. Karhik, "A novel analysis of voltage distribution in zinc oxide arrester using finite element method," *International Journal of Recent Trends in Engineering*, vol. 1, no. 4, May 2009.
- [17] "Céramiques à base d'oxyde de zinc utilisées dans les parafoudres des réseaux à moyenne, haute et très haute tension," EDF/Centre de Normalisation rapport scientifique, 1990.
- [18] A. BAYADI, "Contribution à l'étude des performances des parafoudres à base d'oxyde de zinc soumis à des contraintes transitoires rapides dans les systèmes électriques," *Eelectrotechnique*, Université FERHAT Abbas Sétif thèse de doctorat, 2005.
- [19] M. Hassanzadeh, F. Malpière, and C. Bilhère, "Ecological design applied to polymer housed surge arresters," *CIREC, Conference Publication IEE*, no. 482, 2001.
- [20] M. de Nigris, et al., "Most recent developments in surge arresters technology and testing," pp. 0-7803-4754-4, 1998.
- [21] M. Ben alia, "modélisation d'un isolateur naturellement pollué sous tension impulsionnelle utilisant des circuits électriques équivalents," laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger mémoire de magister en génie électrique, 2008.
- [22] S. D. Kimbakala, "Modélisation dynamique des décharges se propageant sur des surfaces isolantes polluées avec des dépôts discontinus sous différentes formes de tension," Ecole doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon Thèse de Doctorat, 18/12/2007.

-
- [23] N. Dhahbi, "Modélisation dynamique des décharges sur les surfaces d'isolateurs pollués sous différentes formes de tension; Elaboration d'un critère analytique de propagation," L'école Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique de LYON Thèse de Doctorat, 1998.
- [24] A. Tilmatine, "Chapitre6: Isolateurs des lignes.," cour de A.Tilmatine, 2006.
- [25] F. Aoubed, "Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTP," Institut d'Electrotechnique, Université Ferhat Abbas Setif Mémoire de magister en réseaux électriques, 2010.
- [26] N. Khairoune E and A. D. Zellote, "Essais sur isolateurs pollués et modélisation," école nationale polytechnique d'Alger Mémoire du projet de fin d'étude, 2008.
- [27] G. Talal, "Comportement d'un modèle d'isolateur sous tension impulsionnelle," laboratoire de haute tension, école nationale polytechnique d'Alger mémoire de magister en génie électrique, 2006.
- [28] S. M. H. Nabavi, A. Gholami, and A. K. M. A. Shercat MASOUM, "Evaluation of leakage Current Measurement for site pollution severity Assessment," *Iran Leonardo Electronic journal of practices and Technologies*, vol. ISSN 1583-1078, pp. 39-54, Jan. 2007.
- [29] CEI 1991, "Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés à courant alternatif", norme internationale CEI 507. Deuxième édition, 1991.
- [30] H. Kado, k. Izumi, and S. Shirakawa, "Artificial Pollution Tests on Porcelain-housed Metal-Oxide Surge Arresters for 275kV Power Systems," *IEEE*, no. 0-7803-5935-6, pp. 2087-2092, 2000.
- [31] M. Slama, "contribution a l'étude de l'influence de la non uniformité de la pollution basée sur la méthode de la D.D.S.E pour le dimensionnement des isolateurs des lignes THT a courant alternatif," université Mohamed Boudiaf Oran mémoire de magister, promotion 2002.
- [32] X. Ducouvert, "lignes aériennes; matériels," *technique de l'ingénieur*, p. D4423, 2009.
- [33] G. G. Karraday, "Electric transmission line flashover prediction system," Arizona State University, Arrizona 2, Final Project Report, May 2001.
- [34] M. Tegar, "Etude mathématique des mécanismes de développement des décharge electriques sur des isolateurs installés en région polluées," Ecole Nationale Polytechnique, Département de genie électrique, laboratoire Haute Tension thèse de doctorat, Juillet, 1993.
- [35] B.-H. Lee and S.-M. Kang, "A new on-line leakage current monitoring system of ZnO surge arresters," in *Materials Science and Engineering B* 119, 2005, pp. 13-18.
- [36] CEI 1991, "Guide pour le choix des isolateurs sous pollution", Norme internationale CEI 608150.
- [37] CAHIER DES CHARGES POUR LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES DU RESEAU DE TRANSPORT D'ELECTRICITE HT ET THT. Algerie: SONELGAZ-DGE; Direction Générale de l'Engineering, TOME 1, CAHIER DES CHARGES GENERAL (CC-G), V0.12.
- [38] K. Chrzan, P. Zbigniew, and S. Grzybowski, "Pollution performance of 110 kV metal oxide arresters," *IEEE*, vol. 12, no. 02, pp. 728-733, 1997.
- [39] Mekhaldi and A. Mekhaldi, "Etude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des surfaces isolante polluées sous tension alternative 50Hz," ENP, Département de Genie Electrique, Laboratoire haute tension Thèse de doctorat, septembre, 1999.
- [40] F. S. Benzaoua, "Modelling of pollution performance of ZnO polymeric surge arresters," Electrical Engineering Division, School of Engineering, University of Wales Cardiff scientifique ;Page 688-691.
- [41] H. Jinliang, H. Jun, G. Shanqiang, Z. Bo, and Z. Rong, "Analysis and Improvement of Potential Distribution of 1000-kV Ultra-High-Voltage Metal-Oxide Arrester," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 24, no. 03, pp. 1225-1233, Jul. 2009.
- [42] F. Obenaus, "fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge," *Deutsche Elektrotechnik*, vol. 4, pp. 135-136, 1958.
- [43] F. Rizk, "Mathematical Models for Pollution Flashover," *Electra*, vol. 78, pp. 71-103, 1981.
- [44] P. Claverie, "Predetermination of the Behaviour of Polluted Isulators," *IEEE Trans. PAS*, vol. 90, no. 4, pp. 1902-1908, 1971.
- [45] P. Claverie and Y. Porcheron, "How to Choose Insulators for Polluted Areas," *IEEE Trans*, vol. 92, no. 3, pp. 1121-1131, 1973.
- [46] L. L. Alston and S. Zoledziowski, "Growth of Discharges on Polluted Insulators," *IEEE, Trans PAS*, vol. 110, no. 7, pp. 1260-1266, 1963.

-
- [47] F. A. M. Rizk and D. H. Nguyen, "Digital Simulation of Source Insulator Interaction in V V D C Pollution Tests," *IEEE Trans. on Power Delivery*, pp. 405-410, 1988.
- [48] O. May, "Beitrag zur Theorie der Statischen und der Dynamishchen Litchbogens," *Arch. f. Electrotechnik*, vol. 37, pp. 588-608, 1943.
- [49] S. Anjana and C. S. Lakshminarasmha, "Computed of Flashover Voltages of Polluted Insulators Using Dynamic Arc Model," in *6th International Symposium on High Voltage Engineering*, New Orleans, 1989, p. 3009.
- [50] R. Sundararajan and R. S. Gorur, "Computer Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Conditions," *IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul.*, vol. 2, no. 1, pp. 121-127, 1995.
- [51] B. F. Hampton, "Flashover Méchanism of Polluted Insulation," *Proc.PIEE*, vol. 111, no. 5, pp. 985-990, 1964.
- [52] E. H. A. M. Rahal, "sur les Mécanismes Physiques du Contournement des Isolateurs Haute Tension," Université Paul Sabatier Thèse Sciences Physiques,, 1979.
- [53] y. Guehrar, "Elaboration d'un Modèle Dynamique de Contournement d'un Isolateur Pollué sous Tensions Alternative et Impulsionnelle," Ecole Nationale Polytechnique Mémoire de magister, 2004.
- [54] F. V. Topalis, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, "Dielectric behaviour of polluted porcelain insulators," *IEE Proc.-Gener. Transm.Distrib*, vol. 148, no. 4, pp. 269-274, Jul. 2001.
- [55] L. Ouchen, "Modélisation et simulation des isolateurs par la méthode des éléments finis," Département d'electrotechnique, Université Frehat Abbes Mémoire de magister, 2010.
- [56] A. Haddad and P. Naylor, "Finite-element computation of capacitance networks in multiple-electrode systems: application to ZnO surge arresters," *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, vol. 145 , no. 4, pp. 129-135, Jul. 1998.

ملخص : يقوم هذا العمل بدراسة أثر التلوث على سلوك مانعة الصواعق المطاطية. حيث نهتم أساسا بمعالجة تأثير تكوين الشريط الجاف والتفريغ الكهربائي على التيارات الهاربة الخارجية التي تجري على المساحة الملوثة و الداخلية التي تجري في عمود أكسيد الزنك (ZnO). التقييم اللائق لخطر التفريغ يسمح لنا بعدم ممارسة هذه العملية المكلفة و غالبا مضايقة للاستغلال لما تكون ضرورية. معرفة التيار الهارب الذي يعبر العازل و ارتفاعه مع الوقت يسمح ببلوغ هذا الهدف. حتى نفهم أفضل أثر التلوث على توزيع التوتر و الحقل الكهربائي على طول مانعة الصواعق المطاطية، قمنا في المرحلة الأولى بإجراء سلسلة من حالات توزيع الطبقة الملوثة و باستعمال عدة قيم للناقلية. وقد استعملنا لهذا الغرض برنامج COMSOL Multiphysics. النتائج المحصل عليها في برنامج العناصر المتناهية سمحت لنا بالتعرف على مكونات الدارة المكافئة لممانعة الصواعق المطاطية و المكونة من مكثفات و مقاومات والتي قمنا بإدخالها في البرنامج الخاص بالظواهر العابرة ATP/EMTP لغرض محاكاة التياران الهاربان الداخلي و الخارجي. عدة نتائج مرضية تحصلنا عليها قمنا بمحاكاة التفريغ الكهربائي بين طرفي الشريط الجاف و ذلك باستعمال نموذج إحاطة ديناميكي للمساحات العازلة، والتي تستعمل معيار انتشار Hampton و عبارة سرعة القوس ل' Rahal. في الأخير ادخلنا هذا النموذج في الدارة المكافئة لممانعة الصواعق المطاطية لمحاكاة التفريغ.

كلمات مفتاحية: مانعة الصواعق, التلوث, محاكاة, تفريغ كهربائي, COMSOL Multiphysics, ATP/EMT

Résumé : Ce travail avait pour but l'étude de l'effet de la pollution sur le comportement du parafoudre synthétique. Nous nous sommes intéressés essentiellement à l'influence de la formation de la bande sèche et au réamorçage de la décharge sur les courants de fuite externe qui circule dans la surface contaminée et le courant interne qui circule à travers la colonne de varistances. L'évaluation convenable du risque d'amorçage permettrait de ne pratiquer cette opération, coûteuse et souvent gênante pour l'exploitation, que lorsqu'elle est nécessaire. La connaissance du courant de fuite traversant l'isolement et son évolution dans le temps permettrait d'atteindre ce but.

Afin de comprendre mieux l'effet de la pollution sur la distribution du potentiel et du champ électrique le long du parafoudre synthétique, une série de cas de répartition de la couche de pollution et pour plusieurs valeurs de la conductivité a été faite dans une première étape. Le logiciel COMSOL Multiphysics a été utilisé à cet effet. Par la suite, un circuit équivalent formé de capacité et de résistance a été dérivé et ses paramètres sont identifiés par la méthode des éléments finis. Le circuit équivalent a été implanté dans l'ATP/EMTP dans le but de simuler les courants de fuite interne et externe du parafoudre, et des résultats satisfaisants ont été obtenus. La décharge à travers la bande sèche a été simulée en adoptant un modèle de contournement dynamique des surfaces isolantes, qui utilise le critère de propagation de Hampton et l'expression de la vitesse de l'arc développé par Rahal. Ce modèle a été implanté dans le circuit équivalent du parafoudre pour simuler la décharge.

Mots Clés : Parafoudre, Pollution, Modélisation, Décharge électrique, COMSOL Multiphysics, ATP/EMTP,...

Abstract: The purpose of this work is the study of the effect of pollution on the behavior of synthetic surge arrester. We are primarily interested on the influence of the dry band formation and with the restarting of the discharge on the external leakage currents which flow in the contaminated surface and the internal current which flows across the varistors column. The suitable evaluation of the risk of starting would allow not to practice this operation, expensive and often awkward for the exploitation, that when it is necessary. The knowledge of the leakage current crossing insulation and its time evolution would allow achieving this goal.

In order to better understand the effect of pollution on the electrical field and stress distribution along the synthetic surge arrester, a series of layer pollution case distribution and for several values of conductivity was made in a first stage. COMSOL Multiphysics Software was used for this purpose. After that, a formed equivalent circuit of capacity and resistance was derived and its parameters are identified by the finite element method. The equivalent circuit was implemented in the ATP/EMTP to simulate the internal and external leakage currents of the surge arrester, and satisfying results were obtained. The discharge across the dry band was simulated by adopting an insulators flashover dynamic model, which uses the Hampton's propagation criterion, and the Rahal's speed expression. This model was established in the equivalent circuit of the surge arrester to simulate the discharge.

Key Words: Surge arrester, Pollution, Modeling, Electric discharge, COMSOL Multiphysics, ATP/EMTP,...