

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Electrique
Laboratoire de Haute Tension

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Thèse de Doctorat d'Etat

présentée par Madjid TEGUAR

MODELISATIONS D'ISOLATEURS POLLUES SOUMIS A DIVERS PARAMETRES ELECTROGEOMETRIQUES

Soutenue publiquement le Mardi 29 Avril 2003 devant la commission d'examen :

Président	F. BOUDJEMA	Professeur, E.N.P.
Rapporteurs	A. BOUBAKEUR	Professeur, E.N.P.
	A. MEKHALDI	Maître de Conférences, E.N.P.
Examineurs	M. MEKIDECHE	Professeur, C.U. de Jijel
	A. HELLAL	Maître de Conférences, E.N.P.
	H. MOULAI	Maître de Conférences, U.S.T.H.B.
Invités	A. BADACHE	Directeur D.T.M., SONELGAZ
	M. GHEZAILI	R.D., SONELGAZ

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Haute Tension du Département de génie Electrique de l'Ecole Nationale Polytechnique, sous la Direction Scientifique de Monsieur Ahmed BOUBAKEUR, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique et Monsieur Abdelouahab MEKHALDI, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma très sincère reconnaissance pour leurs précieuses directives, leur très grande disponibilité, leurs fructueux conseils, leur suivi constant, leur courtoisie si raffinée et leurs qualités humaines.

Que Monsieur le professeur Fares BOUDJEMA trouve ici le témoignage de ma sincère gratitude pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence du Jury.

J'adresse mes chaleureux remerciements à Messieurs Mohamed MEKIDECHE, Professeur au Centre Universitaire de Jijel, Abdelhafid HELLAL, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique, Hocine MOULAI, Maître de Conférences à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, Mohamed GHEZAILI, R.D. de la SONELGAZ et Abdelali BADACHE, Directeur D.T.M. de la SONELGAZ, qui ont bien voulu juger mon travail et m'honorer de leur participation dans le Jury.

Mes vifs remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, en particulier : Dalila NAMANE et Slimane BOUAZABIA.

Je tiens à remercier mes parents car ce travail représente un petit fruit de leur souffrance et qui sans eux je ne pouvais traverser ces longues années d'études et de travail.

Je remercie d'une façon très particulière ma femme pour son soutien inconditionnel et sa patience illimitée jusqu'à l'achèvement de ce travail.

Je ne saurais terminer sans remercier mes frères et sœurs ainsi que toute la famille pour leurs encouragements soutenus et surtout pour leur soutien moral.

Je termine enfin par remercier tous mes collègues et amis pour la bonne ambiance qu'ils ont su créer et les idées fructueuses que nous avons échangées.

A mes très chers parents

A ma très chère femme

A mes adorables enfants

A mes frères et sœurs

A toute ma famille particulièrement à mon défunt oncle Ahmed TEGUAR

A tous mes amis qui m'aiment et qui m'apprécient

نحلل في هذا العمل النتائج التجريبية التي تخص تأثير التلوث المتقطع (وجود أشرطة نظيفة) و التلوث غير المنتظم (تلوث مستمر يتكون من أشرطة ذات ناقلية مختلفة) على تصرف مساحات عازلة موضوعة تحت عوامل كهرهندسية مختلفة. سيتم اقتراح خوارزمية الإحاطة لكل تشكيلة للتلوث. في حالة تلوث متقطع، سنعرض أيضا خوارزمية تسمح بمعالجة إشارة التيار المتسرب من أجل تعيين مطالبه، طيفه الارتدادي وكذا فرق طوره بالنسبة إلى التوتر المطبق. كما سيتم اقتراح نموذج ديناميكي يأخذ بعين الاعتبار التطور الزمني لقوس كهربائي على عازل منتظم التلوث تحت توتر مستمر. قصد تقليص زمن التجارب، قمنا بصياغة برامج تنبئية تستعمل الشبكات العصبية الاصطناعية لتعميم بعض الخصائص التي تصف انتشار قوس كهربائي على عوازل ملوثة. من أجل هذا، سيتم عرض ثلاث أشكال من الشبكات بدالة ذات الأساس القطري والممرنة وفق طريقة الاقتصار العشوائية.

الكلمات المفتاحية : عازل، تلوث، تيار التسرب، قوس كهربائي، توتر، ناقلية، إحاطة، صياغة، شبكات عصبية اصطناعية.

Résumé :

Dans ce travail, nous analysons les résultats expérimentaux concernant l'influence de la pollution discontinue (présence de bandes propres) et celle non-uniforme (pollution continue constituée par des bandes de différentes conductivités) sur le comportement de surfaces isolantes soumises à divers paramètres électrogéométriques. Pour chaque configuration de la pollution, un algorithme de contournement est présenté. Dans le cas d'une pollution discontinue, nous proposons également un algorithme permettant de traiter le signal du courant de fuite dans le but de déterminer son amplitude, son spectre fréquentiel ainsi que son déphasage par rapport à la tension appliquée. Pour tenir compte de l'évolution temporelle d'un arc électrique sur un isolateur uniformément pollué sous tension continue, un modèle dynamique est développé. Afin de réduire le temps d'expérimentation, nous avons élaboré des programmes de prédiction utilisant les réseaux de neurones artificiels pour généraliser certaines caractéristiques décrivant la propagation d'un arc électrique sur des isolateurs pollués. Pour cela, trois configurations de réseaux à fonction de base radiale entraînés par la méthode d'optimisation aléatoire sont présentées.

Mot clés : Isolateur, pollution, courant de fuite, arc électrique, tension, conductivité, contournement, modélisation, réseaux de neurones artificiels.

Abstract :

In this work, we analyse the experimental results concerning the influence of the discontinuous pollution (presence of clean bands) and the non-uniform one (continuous pollution constituted by bands of different conductivities) on the behaviour of insulating surfaces submitted to different electrogeometrical parameters. For each pollution configuration, a flashover algorithm is presented. In the discontinuous pollution case, we also propose an algorithm allowing to treat the leakage current signal to determine its magnitude, its frequency spectrum as well as its phase angle with respect to the applied voltage. To take into account the electrical arc temporal evolution on an uniformly polluted insulator under dc voltage, a dynamic model is developed. In order to reduce the experiment time, we have elaborated prediction programs using the artificial neural networks to generalise some characteristics describing the electrical arc propagation on polluted insulators. For that purpose, three configurations of networks with radial basic function trained by the random optimisation method are presented.

Key words : Insulator, pollution, leakage current, electrical arc, voltage, conductivity, flashover, modelling, artificial neural networks.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

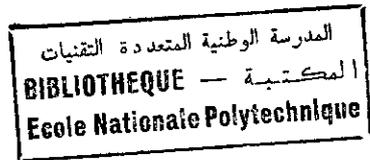
CHAPITRE 1 : CONTOURNEMENT SOUS POLLUTION DISCONTINUE

I.1. INTRODUCTION	4
I.2. PRINCIPAUX TRAVAUX SUR LA DISCONTINUITÉ DE LA POLLUTION	4
I.2.1. Modèle de J.Danis	5
I.2.2. Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh	6
I.2.3. Modèle de D. Namane	7
I.3. TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES	8
I.4. TRAITEMENT NUMERIQUE DU COURANT DE FUITE	12
I.5. SIMULATION NUMERIQUE	13
I.6. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX	13
I.6.1. Contournement	14
I.6.2. Amplitude du courant de fuite	15
I.6.3. Impédance électrique	17
I.7. RÉSULTATS NUMÉRIQUES	18
I.7.1. Evolution du signal et spectre fréquentiel du courant de fuite	18
I.7.2. Filtrage numérique	21
I.7.3. Déphasage courant-tension	22
I.8. ALGORITHME DE CONTOURNEMENT SOUS POLLUTION DISCONTINUE	24
I.8.1 Hypothèses	24
I.8.2. Caractéristiques théoriques de la plaque propre	25
I.8.3. Caractéristiques théoriques de la pollution uniforme sur la surface isolante	27
I.8.4 Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire	27
I.8.5. Simulation numérique	30
I.8.6. Résultats obtenus et interprétations	32
I.8.6.1. Amplitude du courant de fuite – tension appliquée	32
I.8.6.2. Impédance équivalente – conductivité superficielle	34
I.8.6.3. Rapports théoriques d'impédances	34
I.8.6.4. Tension de contournement – conductivité superficielle	36
I.8.6.5. Angle de déphasage – conductivité superficielle	37
I.9. CONCLUSION	38

CHAPITRE 2 : CONTOURNEMENT SOUS POLLUTION CONTINUE
NON-UNIFORME

II.1. INTRODUCTION	39
II.2. TYPES DE NON-UNIFORMITE	39
II.3. PRINCIPAUX TRAVAUX SUR LA NON-UNIFORMITE	40
II.3.1. Travaux sur la non-uniformité longitudinale (ou par groupe)	40
II.3.2. Travaux sur la non-uniformité par secteur	41
II.3.3. Travaux sur la non-uniformité longitudinale périodique	41
II.4. MODELE EXPERIMENTAL	42
II.4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS	43
II.4.1. Tension de contournement	44
II.4.2. Amplitude du courant de fuite	45

II.4.3. Longueur d'arc	49
II.5. MODELE THEORIQUE	54
II.5.1. Hypothèses simplificatrices	54
II.5.2. Mise en équations	54
II.5.3. Simulation numérique	57
II.5.4. Résultats obtenus par simulation et validation	59
II.6. CONCLUSION	65



CHAPITRE 3 : MODELE DYNAMIQUE DE CONTOURNEMENT SOUS POLLUTION

III.1. INTRODUCTION	67
III.2. PRINCIPAUX MODELES DYNAMIQUES DE CONTOURNEMENT	67
III.2.1. Modèle de F.A.M.Rizk et D.H.Nguyen	68
III.2.2. Modèle de S.Anjana et C.S.Lakshminarasimha	68
III.2.3. Modèle de N.Dhahbi	69
III.2.4. Modèle de R.Sundararajan et R.S.Gorur	70
III.3. ELABORATION DU MODELE DYNAMIQUE	70
III.3.1. Hypothèses Simplificatrices	70
III.3.2. Circuit électrique équivalent	71
III.3.3. Propagation de la décharge	71
III.3.3.1. Initialisation de la décharge	71
III.3.3.2. Critère de propagation	73
III.3.4. Circuit de propagation	74
III.3.5. Paramètres du circuit électrique	76
III.3.6. Vitesse de propagation	77
III.3.7. Temps au contournement	78
III.3.8. Simulation numérique	81
III.3.9. Validation	83
III.3.10. Application	84
III.3.10.1 Evolution temporelle	92
III.3.10.2. Evolution spatiale	94
III.3.10.3. Tension de contournement et temps au contournement	95
III.3.11. CONCLUSION	

CHAPITRE 4 : UTILISATION DES RNA DANS LE DOMAINE DE LA POLLUTION DES ISOLATEURS

IV.1. INTRODUCTION	96
IV.2. STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT D'UN NEURONE ARTIFICIEL	96
IV.3. ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UN RESEAU DE NEURONES	98
IV.4. APPRENTISSAGE DES RESEAUX DE NEURONES	100
IV.5. RESEAUX DE NEURONES A APPRENTISSAGE SUPERVISE	102
IV.5.1. Perceptron	103
IV.5.2. Adaline, Madaline	103
IV.5.2.1. Apprentissage	104
IV.5.2.2. Méthode de descente de gradient	104
IV.5.3. Réseaux multicouches statiques	105
IV.5.3.1. Réseaux à fonction de base linéaire LBF	106
IV.5.3.1.1. Algorithme de rétropropagation du gradient	106

IV.5.3.1.2. Méthode d'optimisation aléatoire (ROM)	109
IV.5.3.2. Réseaux à fonction de base radiale (RBF)	109
IV.5.3.2.1. Principe de base	109
IV.5.3.2.2. Architecture et fonctionnement des réseaux RBF	110
IV.5.3.2.3. Apprentissage des réseaux RBF	111
a. Méthode de centrage adaptative	112
b. Méthode basée sur l'algorithme de regroupement	113
c. Apprentissage de regroupement hiérarchique	114
d. Réseaux RBF et approximation de fonctions	114
IV.5.4. Etude critique	114
IV.6. CHOIX DU RESEAU UTILISE	115
IV.7. ARCHITECTURE DES RESEAUX ELABORES	118
IV.7.1. Configuration 1 : RBF avec une entrée et une sortie de natures différentes	118
IV.7.2. Configuration 2 : RBF avec une entrée et une sortie de même nature	118
IV.7.3. Configuration 3 : RBF avec deux entrées	119
IV.8. RESULTATS ET DISCUSSIONS	120
IV.9. CONCLUSION	123
CONCLUSION GENERALE	125

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

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

Placés dans leur environnement naturel, les isolateurs de haute tension ne tardent pas à se recouvrir de différents types de pollution dépendant en grande partie de la localisation géographique de l'ouvrage électrique [1-5]. Quelle que soit leur nature, les polluants n'engendrent généralement pas de dégradation de la rigidité diélectrique lorsqu'ils sont secs. Cependant, l'humidification d'un dépôt solide accumulé à la surface des isolateurs provoque la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique caractéristique du phénomène de pollution [2]. Dans ces conditions, un courant de fuite prend naissance suite à une mise sous tension, conduisant par effet Joule à l'échauffement de la couche de pollution et par conséquent à son assèchement partiel. Traversant des zones de résistivités très différentes, ce courant de fuite modifie la répartition du potentiel entre électrodes. Une partie importante de la tension appliquée se trouve reportée sur la bande sèche engendrant ainsi, si le champ électrique local qui en résulte dépasse un certain seuil, le claquage diélectrique et l'établissement d'une décharge électrique. En fonction des différents paramètres (nature de l'atmosphère, niveau de tension appliqué, profil d'isolateur, conductivité de pollution,) et quand certaines conditions sont remplies, la décharge peut s'allonger et mettre en court-circuit l'électrode de haute tension et la masse ; c'est le phénomène du contournement qui peut engendrer la mise hors service de l'ensemble de l'installation électrique [3-5]. Le contournement représente en fait, l'ultime étape liée à la génération et la propagation d'une décharge électrique disruptive à la surface de l'isolateur.

Les performances des isolateurs installés en régions polluées représentent les facteurs de première importance dans l'architecture, le dimensionnement, la qualité et la fiabilité de l'isolement de haute tension. Afin de surveiller la qualité d'isolement d'un ouvrage, il est impératif de connaître réellement les mécanismes conduisant au contournement sous pollution. Malgré le nombre considérable de travaux, aussi bien théoriques qu'expérimentaux, ces mécanismes de contournement restent insuffisamment compris, à cause du grand nombre de paramètres difficiles à cerner et qui interviennent simultanément dans la génération et la propagation des décharges électriques [4, 5].

Le recours aux essais expérimentaux est indispensable pour juger les performances de différents types d'isolateurs. Ces essais sont effectués en préférence sous conditions naturelles de pollution (essais in situ) ayant l'avantage de prendre en considération toutes les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur avec toute leur complexité. Cependant, les essais in situ ont l'inconvénient de nécessiter plusieurs années pour permettre d'étudier le comportement des isolateurs essayés. A cet égard, on a désormais cherché à reproduire artificiellement au laboratoire les conditions naturelles de pollution, afin d'obtenir des résultats et d'effectuer des comparaisons plus rapidement, plus facilement et à moindre coût que dans des stations sur sites.

En vue d'apporter des compléments valables aux résultats expérimentaux, des modèles mathématiques ont été élaborés pour décrire les phénomènes d'arcs sur des surfaces polluées

[5, 6]. Etant donné que leur nature est forcément idéalisée, principalement à cause des hypothèses simplificatrices rendues nécessaires dans le calcul analytiques, ils ne peuvent en aucun cas se substituer au travail expérimental. Néanmoins, ce type de modèle est un outil permettant de faire des estimations préliminaires, de rationaliser les expériences conçues pour explorer le mécanisme de contournement, d'interpréter et de généraliser les résultats d'essais en un temps réduit.

Le présent travail consiste à mettre en évidence l'impact de la pollution sur le comportement de surfaces isolantes. Il comporte quatre chapitres distincts.

Nous commençons le premier chapitre par un rappel des principaux travaux sur la discontinuité de la pollution rapportés dans la littérature. Nous examinons ensuite, l'effet de la pollution discontinue observée sur un isolateur capot et tige (type 1512L), exploité pendant une dizaine d'années dans la région électrique de Hassi R'mel au Sahara Algérien, en effectuant des essais sur un modèle plan rectangulaire équivalent soumis à une tension alternative 50 Hz [4, 6].

Les impulsions et les distorsions observées sur le signal du courant de fuite, dès l'apparition de l'effet de couronne, rendent imprécise la détermination de l'amplitude du courant ainsi que son déphasage par rapport à la tension d'alimentation. De ce fait, le recours aux méthodes de traitement numérique de signal contribue certainement à l'amélioration de la précision souhaitée ainsi que la manière d'exploitation des mesures requises. C'est dans cette optique que nous avons élaboré un algorithme permettant de traiter, en temps réel, le signal du courant de fuite dans le but d'obtenir son amplitude, son spectre fréquentiel et son déphasage par rapport à la tension appliquée. Le modèle expérimental est soumis à différents paramètres électrogéométriques à savoir le niveau de la tension appliquée, la largeur et la conductivité superficielle de la pollution. Nous nous sommes intéressés aux évolutions des caractéristiques (amplitude, déphasage et spectres fréquentiels) du courant de fuite, de l'impédance électrique équivalente ainsi que de la tension de contournement en fonction des paramètres auxquels est soumis le modèle de laboratoire.

Nous avons développé aussi un algorithme qui permet de simuler le comportement de ce modèle de laboratoire. Dans cette simulation, les bandes propres et polluées sont représentées par des circuits électriques. Leurs composants sont déterminés à partir des essais expérimentaux. L'effet de la conductivité superficielle sur l'amplitude du courant de fuite, sur le déphasage courant-tension ainsi que sur la tension de contournement et l'impédance entre électrodes sont évalués et comparés aux résultats expérimentaux.

Dans le deuxième chapitre, nous citons les différents types de non-uniformité des couches de pollution rencontrés sur sites ainsi que les principaux travaux sur des isolateurs réels ou sur des modèles de laboratoire soumis à une telle répartition de la pollution. Ce chapitre porte également sur l'étude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des surfaces isolantes non-uniformément polluées, sous tension alternative 50 Hz. Il y est mis en évidence l'influence de la longueur ainsi que la position par rapport aux électrodes des couches de conductivités différentes sur le comportement d'un modèle de laboratoire. Les essais expérimentaux concernent les évolutions du courant de fuite, de la longueur de l'arc électrique et de la tension de contournement en fonction des paramètres susmentionnés.

Pour contrôler la sévérité de la pollution, nous avons conçu un algorithme de calcul permettant l'obtention des différentes grandeurs caractérisant la propagation d'un arc électrique sur une surface non-uniformément polluée. Une comparaison des résultats de simulation avec ceux obtenus expérimentalement y est présentée.

Dans le troisième chapitre, nous rappelons les principaux modèles dynamiques de contournement. Nous y avons développé un modèle dynamique décrivant la propagation temporelle de la décharge électrique sur une surface polluée sous tension continue. Notre modèle se base sur un circuit électrique équivalent et utilise un critère de propagation. Il permet d'évaluer la tension de contournement et le temps au contournement et de décrire la dynamique de l'arc en tenant compte du profil de l'isolateur et des variations instantanées d'un certain nombre de grandeurs importantes. Parmi celles-ci, nous citons le courant de fuite, la vitesse de propagation, la puissance et l'énergie fournies par la source, le champ dans la pollution et au pied de l'arc, la résistance de la pollution et du canal conducteur de l'arc, le rayon de ce canal, sa longueur, sa résistance linéique, sa résistivité, sa tension ainsi que la puissance et l'énergie qui lui ont été transférées. Les résultats de simulation sont comparés à ceux trouvés par d'autres chercheurs.

Nous présentons, dans le quatrième et dernier chapitre, une synthèse bibliographique sur la théorie des réseaux de neurones artificiels (RNA) supervisés où nous citerons les différents types de réseaux et d'algorithmes d'apprentissage. Afin de réduire la durée des essais, nous avons élaboré, dans ce même chapitre, des programmes de prédiction des caractéristiques de l'arc utilisant les réseaux de neurones artificiels. Trois configurations de réseaux à fonction de base radiale sont utilisées. L'apprentissage est effectué en utilisant la méthode d'optimisation aléatoire. Une discussion afin de déterminer la meilleure configuration y est présentée.

CHAPITRE I

CONTOURNEMENT SOUS POLLUTION DISCONTINUE

1.1. INTRODUCTION

Des observations sur site ont montré que les dépôts, constitués de couches de sable, sur les isolateurs capot et tige (type 1512 L), installés dans les régions désertiques algériennes, se concentrent dans les parties les plus protégées contre les facteurs autonettoyants. La répartition ainsi discontinue des couches de pollution dépend principalement du profil d'isolateurs, de la direction du vent et des tempêtes de sable, du taux de pluie ainsi que de la disposition des chaînes d'isolateurs et de leurs distances par rapport au sol.

Les enregistrements des oscillogrammes du courant de fuite, par le biais d'un oscilloscope digital, sur un modèle de laboratoire ayant le même état de surface que celui de l'isolateur 1512L, exploité pendant une dizaine d'années dans la zone SONELGAZ de Hassi R'mel au Sahara Algérien, montrent que son signal comporte trop de fluctuations à fréquences élevées accompagnées par un certain nombre d'impulsions ayant des amplitudes parfois excessives. La détermination des caractéristiques du signal tels que l'amplitude et le décalage de phase est rendue donc imprécise. Pour cette raison, nous avons élaboré un premier algorithme permettant de traiter, en temps réel, le signal du courant de fuite dans le but d'obtenir son spectre fréquentiel (en amplitude et phase) et son déphasage par rapport à la tension appliquée. Ce spectre est obtenu à l'aide de la transformée de Fourier discrète, en convertissant les enregistrements des signaux de domaine temporel en d'autres de domaine fréquentiel. D'autre part, le déphasage représente la différence entre les spectres de phase du courant et de la tension à la fréquence du fondamental ou alors la différence de phase entre les signaux de leurs fondamentaux enregistrés dans le domaine temporel.

La présente étude porte, en fait, sur l'analyse du courant de fuite, du déphasage courant-tension, des caractéristiques fréquentielles du courant, de la tension de contournement et de l'impédance électrique entre électrodes. Plusieurs niveaux de tension et différentes largeurs et conductivités superficielles de la couche polluante ont été considérés. La distance inter-électrodes du modèle expérimental est maintenue constante. Elle représente la longueur totale de la ligne de fuite de l'isolateur réel. La représentation de l'isolateur 1512L par ce modèle expérimental a été discutée antérieurement [7, 8].

En vue de formuler un modèle représentatif du mécanisme de contournement, nous présentons un deuxième algorithme permettant la simulation du comportement du modèle de laboratoire. Des circuits électriques, équivalents à une capacité et une résistance en parallèle pour chaque bande partielle, avec une résistance shunte pour représenter chaque bande polluée, ont été utilisés. Nous déterminons les composants de ces circuits électriques en se basant sur des essais expérimentaux. Ces derniers sont effectués sur la plaque propre, la plaque recouverte d'une pollution uniforme et celle dont les bandes polluées sont constituées de papier aluminium. Cet algorithme permet l'évaluation de la tension de contournement, le courant de fuite, son déphasage par rapport à la tension, l'impédance équivalente entre électrodes, et les impédances équivalentes des bandes propres et polluées. Les valeurs obtenues par simulation sont comparées à celles obtenues expérimentalement.

1.2. PRINCIPAUX TRAVAUX SUR LA DISCONTINUITÉ DE LA POLLUTION

La plupart des travaux considèrent des modèles expérimentaux de géométries simples et rarement le profil d'un isolateur réel. Cependant, si ces modèles équivalents ne reflètent pas exactement le comportement des isolateurs réels, ils permettent par contre, une meilleure visualisation du phénomène des décharges électriques.

Dans ce qui va suivre, nous exposons les principaux travaux examinant l'effet de la discontinuité de la pollution sur le comportement des surfaces isolantes.

I.2.1. Modèle de J.Danis

Ce modèle est constitué d'une plaque de verre isolante, plane ou cylindrique, munie de deux électrodes rectangulaires identiques et placées aux deux extrémités de la plaque (Fig. I.1). Dans le but de reproduire des couches similaires à celles observées sur des isolateurs naturellement pollués, J.Danis [9] a considéré un modèle constitué de plusieurs zones sèches séparées par des zones humides (Fig. I.1.a). Ainsi, l'auteur a abouti aux résultats suivants :

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

A partir de ces considérations, l'auteur a conclu que le lieu, la forme et la propagation des arcs partiels sont déterminés à partir de plusieurs facteurs qui sont dépendants entre eux. Comme il est impossible de déterminer l'effet instantané de tous ces facteurs, le comportement macroscopique de ces arcs a une nature aléatoire. Ainsi, la rupture des zones sèches survient d'une manière aléatoire. Comme la tension de contournement dépend de la rupture de ces zones sèches, celle-ci possède également le même caractère, c'est à dire qu'elle obéit aux lois statistiques.

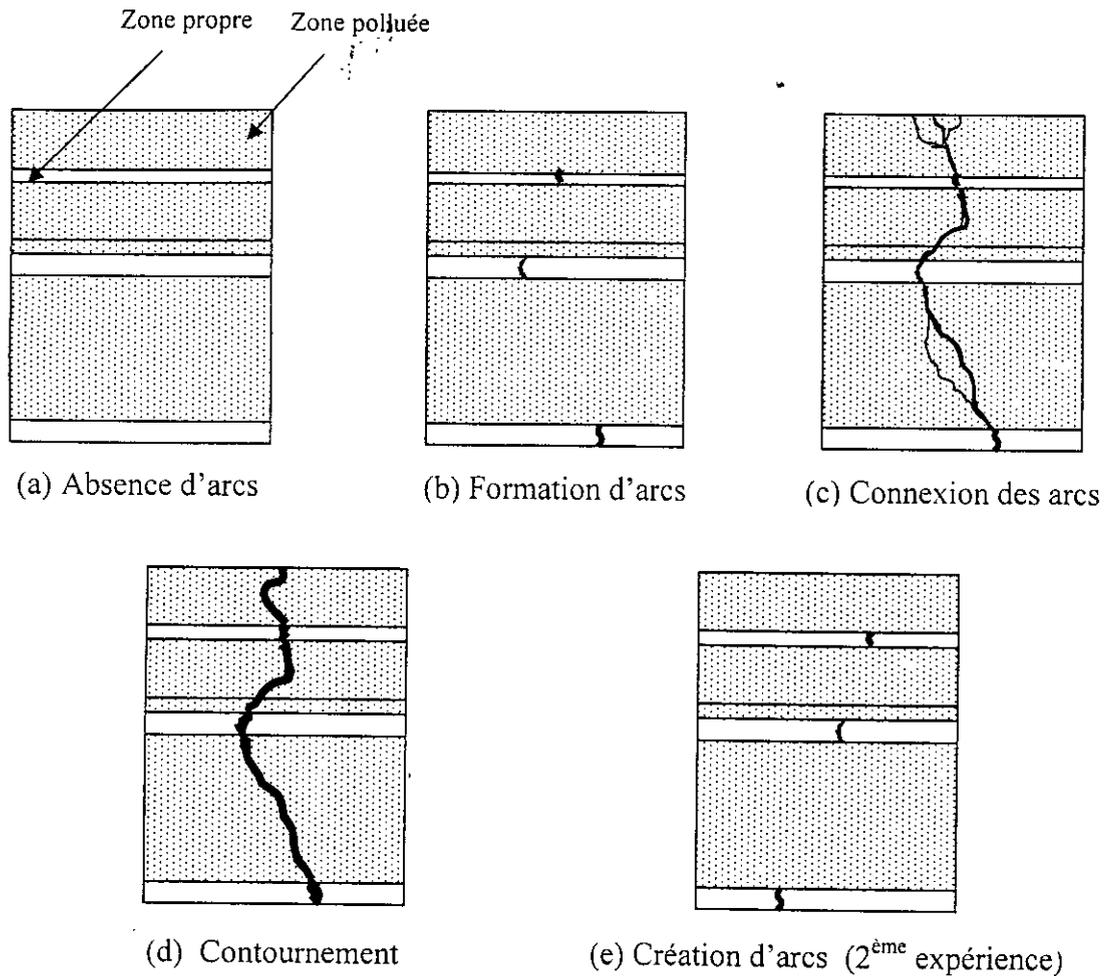


Fig. I.1 : Modèle de J. Danis

I.2.2. Modèle de M.N. Rayes et M. Zhirh

Ce modèle est constitué d'une électrode placée au-dessus d'une plaque isolante, à une distance variable S , considérée égale à la largeur de la zone sèche [10]. Cette plaque est placée sur quatre colonnes uniformément polluées et situées à une distance $L-S$ de la terre (Fig. I.2). Une tension alternative de fréquence 50 Hz est appliquée au modèle. Les auteurs se sont intéressés à la variation de la tension de contournement en fonction de la largeur S de la zone sèche, pour plusieurs conductivités de la pollution appliquées aux colonnes. Ils ont abouti aux résultats suivants :

- La tension de contournement U_c en fonction de la distance S atteint un minimum, correspondant à une largeur S_{min} située à environ 45-50 % de la longueur totale, ce sont des courbes en forme de V .
- Pour une même largeur de la zone sèche, la tension de contournement diminue lorsque la conductivité des couches polluantes augmente.

- La tension de contournement de l'ensemble zone sèche-zone polluée semble être confondue avec celle de la zone polluée lorsque $S < S_{min}$, et avec celle de la zone sèche pour $S > S_{min}$.
- La tension de contournement de l'isolateur dépend du rapport des largeurs des zones sèche et polluée.
- La tension de contournement totale ne représente pas la somme des tensions de contournement partiels zone sèche-zone polluée.
- La rigidité augmente lorsque la largeur de la zone sèche préétablie devient supérieure à la largeur critique, à partir de laquelle aucun arc stable ne peut être observé.

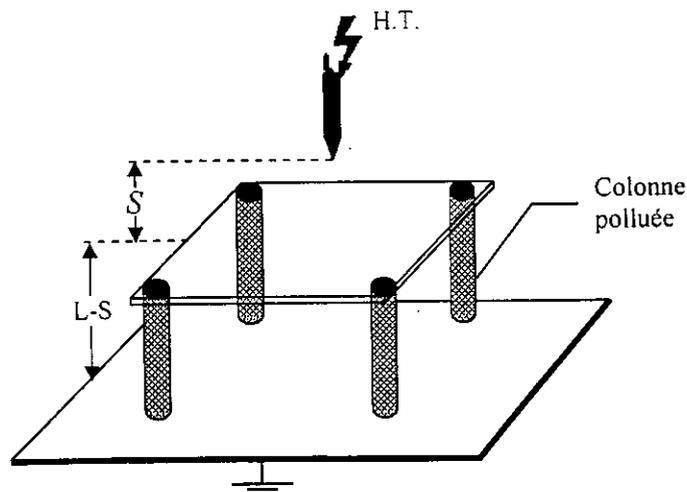


Fig. I.2 : Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh

I.2.3. Modèle de D. Namane

Afin d'examiner le comportement des surfaces isolantes sous pollution discontinue, D.Namane [11] a proposé un modèle plan rectangulaire (Fig. I.3). Les différentes contraintes auxquelles est soumis son modèle sont : la discontinuité de la pollution en variant de manière régulière la longueur de la pollution, la position de cette dernière par rapport aux électrodes ainsi que sa conductivité.

L'influence de ces paramètres sur le courant de fuite, sur la tension de maintien de l'arc électrique et sur la tension ainsi que le processus de contournement, est alors examinée.

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- Il existe un régime critique à partir duquel on obtient une hausse brutale du courant. Ce régime est caractérisé par une longueur de pollution correspondant à 90 % de la ligne de fuite totale.
- Le courant de fuite est toujours plus élevé lorsque la couche polluante est du côté de l'électrode rectangulaire, mise à la terre. Lorsque la zone sèche est du côté haute tension,

le rayon de courbure de l'électrode circulaire provoque un champ électrique, plus intense que celui de l'électrode rectangulaire, d'où l'augmentation du courant de fuite.

- La position de la couche polluante par rapport aux électrodes a peu d'influence sur la tension d'entretien de l'arc.
- La position de la pollution n'a apparemment pas d'influence sur la tension de contournement, pour les conductivités utilisées.
- Il existe une longueur critique d'arc à partir de laquelle on ne peut plus maintenir un arc stable. Cette longueur est évaluée au tiers de la longueur totale de la plaque isolante et diffère considérablement de la longueur critique d'arc obtenue par P.Claverie et Y.Porcheron [2] dans le cas d'une pollution continue. Cette longueur est toutefois indépendante de la conductivité de la couche polluante.
- Il existe une conductivité limite, selon l'auteur, à partir de laquelle, en cas de zones sèches préétablies, la couche polluante peut être considérée comme court-circuitée.

L'auteur a proposé un modèle théorique, décrivant l'isolateur sous pollution discontinue. Ce modèle est basé sur le calcul de deux impédances équivalentes à la zone sèche et à celle polluée. Le modèle théorique est d'autant plus proche du modèle expérimental que le niveau de tension n'est pas trop élevé et la longueur de pollution n'est pas critique (le contournement ne se produit pas directement sans apparition de décharges partielles).

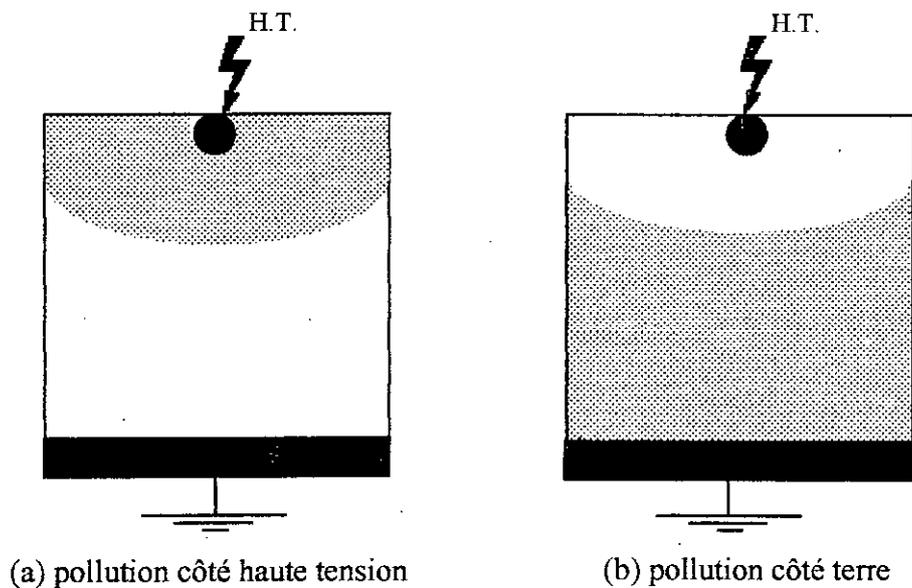
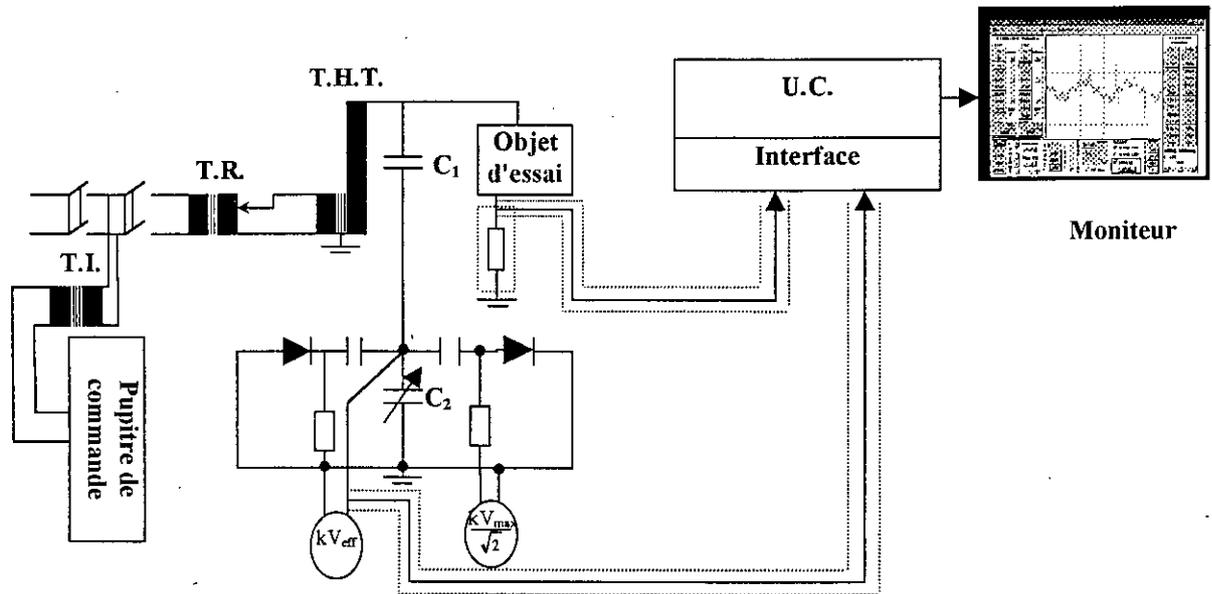


Fig. I.3 : Modèle expérimental selon D.Namane

I.3. TECHNIQUES EXPERIMENTALES

L'équipement de la station d'essai à fréquence industrielle (50 Hz), comprend un transformateur de haute tension (300 kV, 50 kVA), un transformateur de réglage (500 V, 50 kVA), un diviseur de tension capacitif (constitué d'une capacité C_1 de 400 pF en série avec

une capacité C_2 variable selon le calibre de mesure), des appareils annexes de mesure et de protection et l'objet d'essai (Fig. I.4). Ce dernier est constitué d'une plaque du verre (500x500x6 mm) ayant la propriété de résister à la chaleur due aux décharges électriques. Cette plaque est munie de deux électrodes métalliques en aluminium. La première est cylindrique (de rayon $r=25$ mm et d'épaisseur $e=40$ mm) mise à la borne haute tension et la seconde est parallélépipédique (300x50x40 mm) mise à la terre. Le modèle de laboratoire est soumis à une répartition discontinue de la pollution reproduisant l'état de surface de l'isolateur capot et tige type 1512L, prélevé de la zone SONELGAZ de Hassi R'mel [6-8] (Fig. I.5). La distance inter-électrodes du modèle expérimental $d=292$ mm correspond à la ligne de fuite de l'isolateur réel. Les dimensions longitudinales des bandes propres et polluées sont données dans le tableau I.1.



- T.H.T. Transformateur de haute tension 300 kV, 50 kVA, 50 Hz.
- T.R. Transformateur de réglage 500 V, 50 kVA, 50 Hz.
- T.I. Transformateur d'isolement.
- U.C. Unité centrale

Fig. I.4 : Circuit d'essai

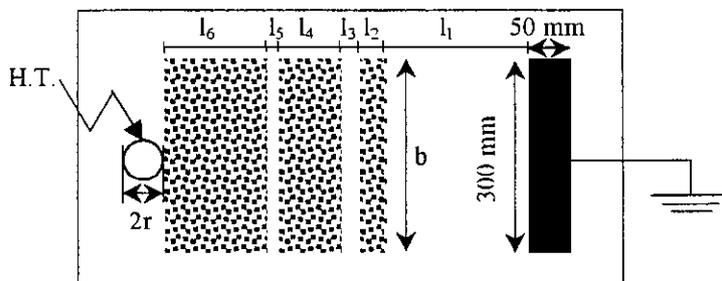


Fig. I.5 : Modèle expérimental

	Bande i	Longueur l _i (mm)	Pourcentage par rapport à la longueur de fuite (%)	
Bande propre équivalente	1	106	36.30	42.12
	3	13	4.45	
	5	04	1.37	
Bande polluée équivalente	2	30	10.27	57.88
	4	52	17.81	
	6	87	29.80	

Tableau I.1: Dimensions longitudinales des zones propres et polluées

Les méthodes d'essais qui demeurent actuellement normalisées par la recommandation de la CEI 60-1 [12] sont celles du brouillard salin et des couches solides pré déposées. Pour les surfaces planes exposées à des tensions d'essais de longue durée, par exemple durant les essais à 50 Hz demandant plusieurs applications de tension, les méthodes recommandées par la CEI présentent un grand inconvénient, car les couches doivent être humides durant tous les essais pour que la conductivité superficielle puisse rester constante [13]. Afin de garder une conductivité constante durant les essais indépendamment des conditions atmosphériques au laboratoire, nous avons retenu une méthode utilisant des couches à base de peinture semi-conductrice [14-16]. Cette peinture permet, en outre, de contourner la difficulté liée à la pulvérisation manuelle et à la reproductibilité lors de l'utilisation des méthodes de mouillage.

La peinture que nous avons utilisée est réalisée d'un mélange de graphite, de bioxyde de silicium, de la résine cellulosique et d'alcool isopropylique. La conductivité superficielle désirée est obtenue en changeant la concentration du graphite (élément conducteur) par rapport à celle du bioxyde de silicium (élément isolant). La résine cellulosique est un composant inerte utilisé pour assurer la liaison entre le graphite et la silice. Le mélange est dilué avec de l'alcool isopropylique afin de garantir une homogénéité satisfaisante de la peinture ainsi obtenue.

La plaque isolante doit être initialement bien lavée, puis bien essuyée avec du coton imbibé d'alcool isopropylique. Nous appliquons par la suite la couche de peinture semi-conductrice soigneusement de manière uniforme. Après séchage complet de la peinture qui dure environ vingt quatre (24) heures, la plaque est imbibée de gas-oil dans les endroits d'emplacement des électrodes en papier aluminium, de manière à ce qu'aucun espace d'air ne reste entre ces électrodes et la plaque. Nous commençons les essais par la mesure de la tension de contournement. Nous relevons ensuite le courant de fuite pour différents niveaux de tension nettement inférieurs à la tension de contournement. Ces mesures permettent la détermination de la résistance électrique équivalente à la plaque isolante sous pollution uniforme. Cette résistance représente la pente de la partie linéaire de la caractéristique tension appliquée-courant de fuite. Finalement, la peinture est partiellement frottée de manière à obtenir la répartition discontinue adoptée. Notons qu'avant chaque essai, nous nettoyons toutes les zones propres de la plaque avec du coton imbibé d'alcool isopropylique pour éliminer toute trace de gas-oil ou de poussières.

En se basant sur les mesures de la résistance de fuite pour chaque bande polluée, nous avons procédé à la détermination de la conductivité superficielle conformément à la recommandation de la CEI 60-1 [12] et à la norme polonaise PN-71 E/04405 [13]. Pour cela, nous utilisons aux bornes de chaque bande polluée deux électrodes transversales

parallélépipédiques en aluminium, de 50 mm de largeur, 40 mm d'épaisseur et de longueur légèrement grande à celle de la bande polluée (Fig. I.6).

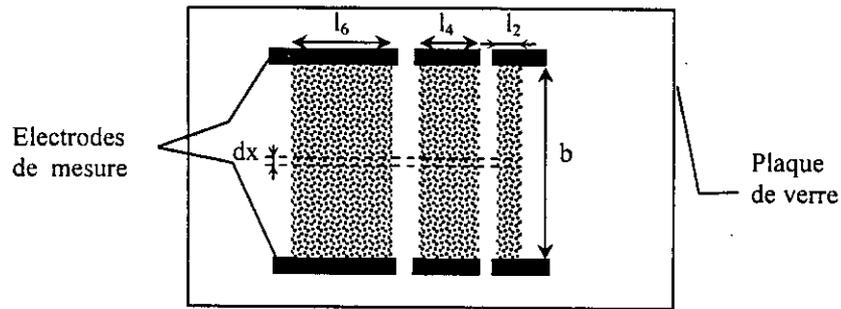


Fig. I.6 : Mesure de la résistance de fuite

La conductivité superficielle a été déterminée pour chaque bande polluée ($i=2, 4, 6$), à partir de l'expression suivante :

$$\gamma_{sp} = \frac{1}{R_{fu}} \int_0^b \frac{dx}{l_i} = \frac{1}{R_{fu}} \frac{b}{l_i} = \frac{I}{U} \frac{b}{l_i} \quad (I.1)$$

avec γ_{sp} la conductivité superficielle, R_{fu} ($=U/I$) la résistance de fuite, b la largeur de la couche polluante, dx élément de largeur, l_i ($i=2, 4, 6$) la longueur de la bande polluée, I le courant et U la tension appliquée.

L'enregistrement du courant de fuite, par l'intermédiaire de l'onde de tension captée aux bornes d'une résistance non-inductive de 100Ω insérée entre l'électrode parallélépipède et la terre, et de la tension au secondaire du transformateur s'effectue à l'aide d'un oscilloscope digital dont la fréquence de coupure est de 20 MHz (Fig. I.4). Celui-ci est constitué d'une interface de communication analogique/numérique reliée à un micro-ordinateur muni d'un logiciel simulateur d'oscilloscope. Pour éviter l'influence du champ électrique, qui pourrait introduire des parasites dans le signal recueilli, la résistance est introduite dans une boîte métallique en aluminium mise à la terre.

Nous avons choisi cinq valeurs différentes de la conductivité superficielle ($\gamma_{sp}=2, 4, 8, 15$ et 30 nS) des couches polluantes. Pour chaque conductivité donnée, cinq largeurs de la pollution ($b=6, 12, 18, 24$ et 30 cm) ont été considérées. La tension appliquée a été variée de 10 à 35 kV avec un pas de 5 kV . Nous avons aussi utilisé des couches conductrices en papier aluminium pour déterminer la tension de contournement minimale.

Le passage d'un niveau de tension à un autre supérieur est effectué par la mise à zéro de la tension pour éviter les transitoires en sortie du transformateur. Lors des essais de contournement, nous débranchons l'oscilloscope digital. Pour évaluer la tension correspondante, nous effectuons au moins dix essais pour chaque cas considéré afin d'obtenir la valeur moyenne de la tension de contournement. Ceci nous permet d'analyser l'effet des paramètres auxquels est soumis le modèle expérimental sur la tension de contournement moyenne.

1.4. TRAITEMENT NUMERIQUE DU COURANT DE FUITE

Le fondement théorique de l'algorithme établi se base sur les concepts du traitement de signal à savoir, l'échantillonnage, la transformée de Fourier discrète (TFD) et le filtrage numérique. Les grandeurs analogiques doivent être donc échantillonnées pour produire le signal numérique correspondant [17, 18].

Les convertisseurs analogique/numérique (CAN) sont caractérisés par un temps de conversion et par une résolution ou nombre de bits. La vitesse de variation maximale détectable du signal analogique par le CAN est donc limitée et dépend de ces deux paramètres [18].

Le but de notre algorithme consiste, en premier lieu, de convertir les signaux échantillonnés du courant de fuite et/ou de la tension appliquée en vecteurs de données compatibles avec le langage de programmation (Matlab 5.2) [19-21]. Notons que le nombre d'échantillons offert par notre convertisseur est $N=1024$ (10 bits) et une résolution de $M=8$ bits (256 niveaux). Dans une deuxième étape, les signaux enregistrés dans le domaine temporel sont convertis au domaine fréquentiel en utilisant la transformée de Fourier discrète, définie par [17, 19-22] :

$$Y(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(t) e^{-j2\pi \frac{n}{N}k} = |Y(f)| e^{j\varphi(f)} \quad (I.2)$$

où $Y(f)$ est le signal dans le domaine fréquentiel, f la fréquence, T la période d'échantillonnage, $t=nT$ le temps, $y(t)$ le signal dans le domaine temporel, N le nombre d'échantillons, $\varphi(f)$ le spectre de phase, $|Y(f)|$ le spectre d'amplitude, j le nombre complexe ($j^2=-1$) et finalement k et n sont des entiers variant de 0 à $N-1$.

Le déphasage est défini comme étant la différence entre le spectre de la phase du courant de fuite et celui de la tension appliquée à la fréquence du fondamental :

$$\Delta\varphi = |\varphi_i(f_1) - \varphi_u(f_1)| \quad (I.3)$$

où $\varphi_i(f_1)$ et $\varphi_u(f_1)$ sont respectivement les phases du courant de fuite et de la tension appliquée et f_1 (=50 Hz) la fréquence du fondamental.

La transformée de Fourier du signal de sortie $Y_{fil}(f)$ d'un filtre linéaire est, par définition, le produit de la fonction de transfert du filtre $G(f)$ par le signal $Y(f)$ [17, 19-22] :

$$Y_{fil}(f) = G(f)Y(f) \quad (I.4)$$

Ainsi, le signal filtré $y_{fil}(t)$ dans le domaine temporel est la transformée de Fourier discrète inverse du produit obtenu, soit :

$$y_{fil}(t) = F^{-1}(Y_{fil}(f)) = F^{-1}(G(f)Y(f)) \quad (I.5)$$

En introduisant la transformée de Fourier discrète inverse [17, 19-22], l'équation (I.5) devient :

$$y_{fil}(nT) = \sum_{k=0}^{N-1} G\left(\frac{k}{NT}\right) Y\left(\frac{k}{NT}\right) e^{j2\pi \frac{n}{N} k} \quad (I.6)$$

Les filtres passe-bas les plus connus sont les filtres basés sur l'approximation de Butterworth suivante [17, 19-22] :

$$|G(f)|^2 = \left[1 + \left(\frac{f}{f_c} \right)^{2m} \right]^{-1} \quad (I.7)$$

avec $G(f)$ est la fonction de transfert du filtre, f_c la fréquence de coupure et m le degré du filtre.

Cette opération de filtrage numérique permet la détermination de l'amplitude du signal périodique du courant de fuite.

1.5. SIMULATION NUMERIQUE

La simulation numérique est effectuée à travers les étapes suivantes :

Étape 1 : Introduction de la conductivité, du niveau de tension et de la largeur de la couche de pollution.

Étape 2 : Enregistrement des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée.

Étape 3 : Acquisition de fichiers des signaux échantillonnés.

Étape 4 : Conversion de fichiers en vecteurs de données compatibles avec le langage de programmation.

Étape 5 : Filtrage du signal du courant de fuite.

Étape 6 : Détermination de la valeur de crête du signal filtré.

Étape 7 : Détermination du spectre fréquentiel de l'onde du courant de fuite.

Étape 8 : Détermination des fondamentaux du courant de fuite et de la tension appliquée.

Étape 9 : Détermination du déphasage.

Étape 10 : Exploitation des résultats.

1.6. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les résultats d'essais concernent les évolutions de la tension de contournement, de l'amplitude du courant de fuite et de l'impédance électrique équivalente en fonction des paramètres auxquels est soumis le modèle de laboratoire.

1.6.1. Contournement

Les observations de laboratoire montrent que le contournement se produit directement sans apparition au préalable de décharges préliminaires. Dues à l'effet de couronne, l'initiation des premières luminosités commence autour de l'électrode haute tension à 20 kV. Avec l'augmentation de la tension appliquée, ces luminosités deviennent intenses. A partir d'un certain seuil représentant la tension critique, une décharge électrique rapide court-circuite brutalement la distance inter-électrodes, provoquant ainsi le contournement total de la surface isolante.

Ce phénomène, caractérisé par la non-génération d'arcs partiels, est dû à la fois à la nature de la pollution utilisée et au fait que la longueur totale de la bande propre équivalente (représentant la somme des différentes bandes propres partielles) dépasse la valeur critique à partir de laquelle aucune décharge stable ne se propage [15, 16, 23, 24]. Cette longueur critique a été estimée, dans une étude antérieure [11], au tiers (33 %) de la ligne de fuite totale. Dans notre cas, la longueur de la bande propre équivalente représente 42.12 % de la distance inter-électrodes.

A la figure I.7, nous présentons la variation de la tension de contournement en fonction de la largeur de la pollution. Lorsque la largeur des couches polluantes augmente, nous constatons une diminution de la tension de contournement. Cependant, cette diminution est pratiquement insignifiante et ne dépasse pas dans le cas extrême 13 % de la tension de contournement initiale.

Par ailleurs, pour les couches en feuilles d'aluminium, une légère augmentation de la tension de contournement est observée quand la largeur de la couche de pollution augmente. Le cas de l'utilisation des feuilles d'aluminium au lieu des couches de pollution représente une singularité dans la mesure où plus la largeur est faible, plus nous tendons vers une géométrie pointue des bandes en aluminium, engendrant une diminution de la rigidité du système isolant.

En ce qui concerne la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité, nous constatons que plus la conductivité est élevée, plus la tension de contournement est faible (Fig. I.8). Ceci est valable quelle que soit la largeur de la pollution. En effet, la tension de contournement décroît rapidement pour des conductivités allant de 0 à 8 nS et lentement au delà de 8 nS en tendant vers une limite obtenue dans le cas où les couches de pollution sont parfaitement conductrices (réalisées en papier aluminium).

Nous signalons que les conductivités ainsi adoptées permettent d'obtenir une bonne répartition des valeurs de la tension de contournement relevées pour deux configurations extrêmes. Ces dernières correspondent au cas où la surface isolante est totalement propre et au cas où les couches polluantes sont remplacées par des surfaces conductrices en papier aluminium. Par ailleurs, la peinture semi-conductrice assure une reproductibilité quasi parfaite et donc une dispersion très restreinte des valeurs mesurées de la tension de contournement ; son utilisation s'avère ainsi très pratique.

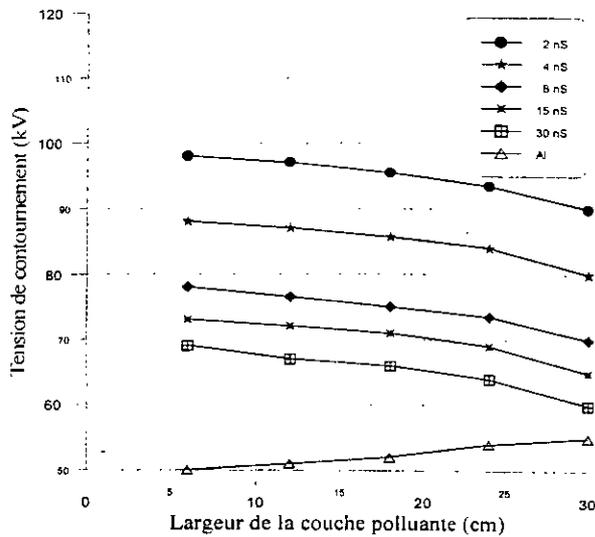


Fig. I.7 : Tension de contournement – largeur de la pollution, pour différentes conductivités

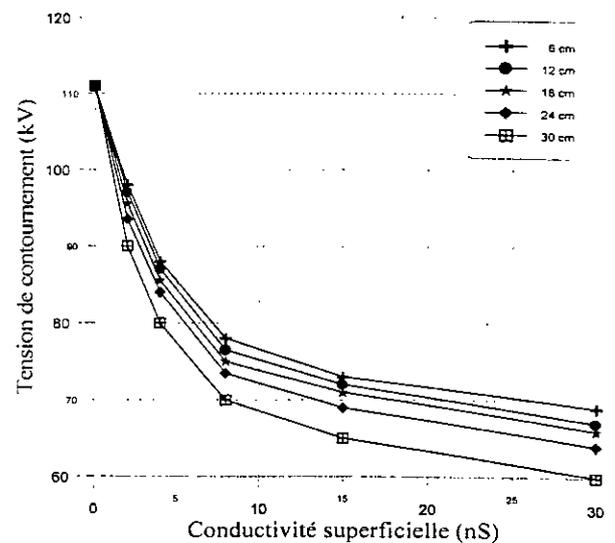


Fig. I.8 : Tension de contournement – conductivité, pour différentes largeurs de la pollution

I.6.2. Amplitude du courant de fuite

Dès l'application de la tension, nous enregistrons le passage du courant de fuite sur la surface isolante. Ce courant est périodique et s'annule deux fois par période. L'amplitude du courant de fuite nous informe sur l'état de dégradation du système isolant.

La configuration choisie est caractérisée par l'absence totale d'arcs partiels. Dans ces conditions, le courant de fuite reste faible et ne dépasse pas quelques centaines de micro-ampères [15, 16, 23, 24]. A cette gamme d'amplitude, et pour toutes les conductivités superficielles et les largeurs de la pollution, la valeur de crête du courant de fuite augmente linéairement avec la tension appliquée (Fig. I.9). Nous remarquons également que, quelles que soient la tension appliquée et la largeur de la pollution utilisées, le courant de fuite augmente avec la conductivité superficielle (Fig. I.10).

La variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche de pollution est présentée à la figure I.11. Pour des tensions et des conductivités données, le courant de fuite augmente avec la largeur de la pollution. En outre, il existe une limite pour cette largeur (24 cm) à partir de laquelle le courant de fuite croît rapidement. Cette augmentation brutale du courant de fuite s'explique par l'affaiblissement de l'impédance totale entre électrodes.

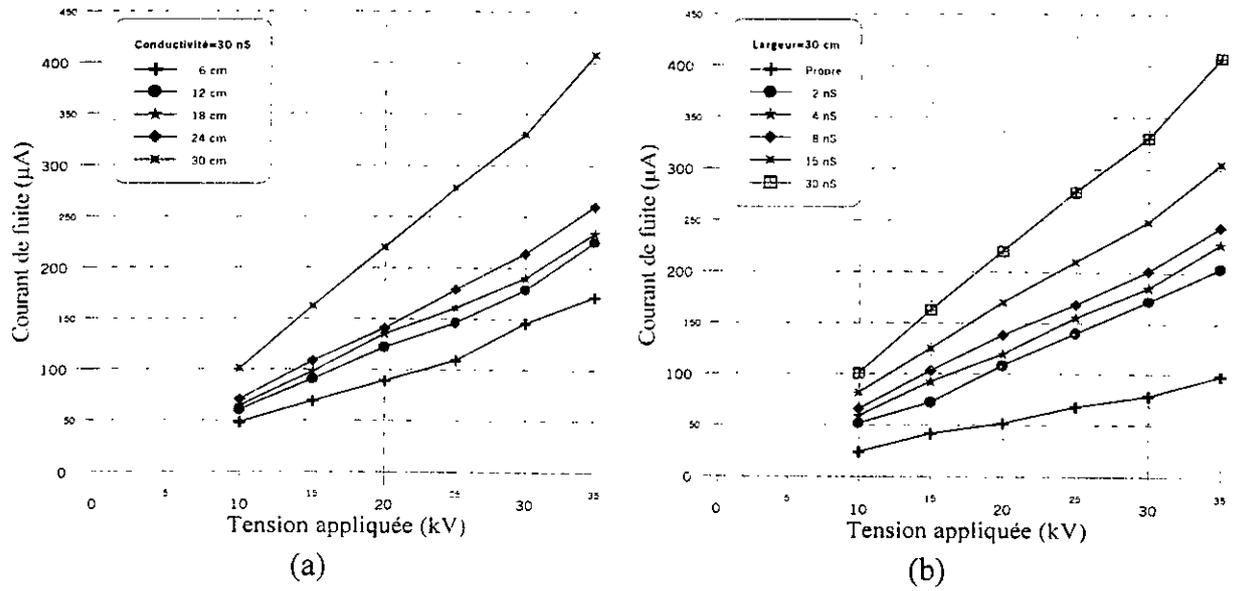


Fig. I.9 : Courant de fuite – tension appliquée, (a) pour différentes largeurs de la pollution, (b) pour différentes conductivités superficielles

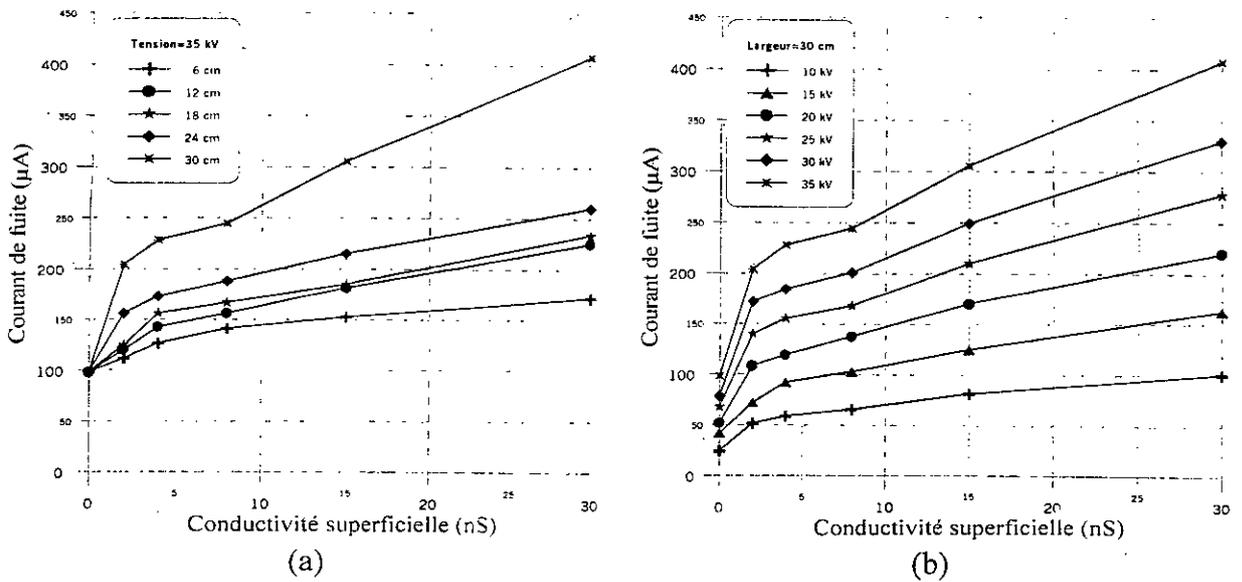


Fig. I.10 : Courant de fuite – conductivité superficielle, (a) pour différentes largeurs de la pollution, (b) pour différentes tensions

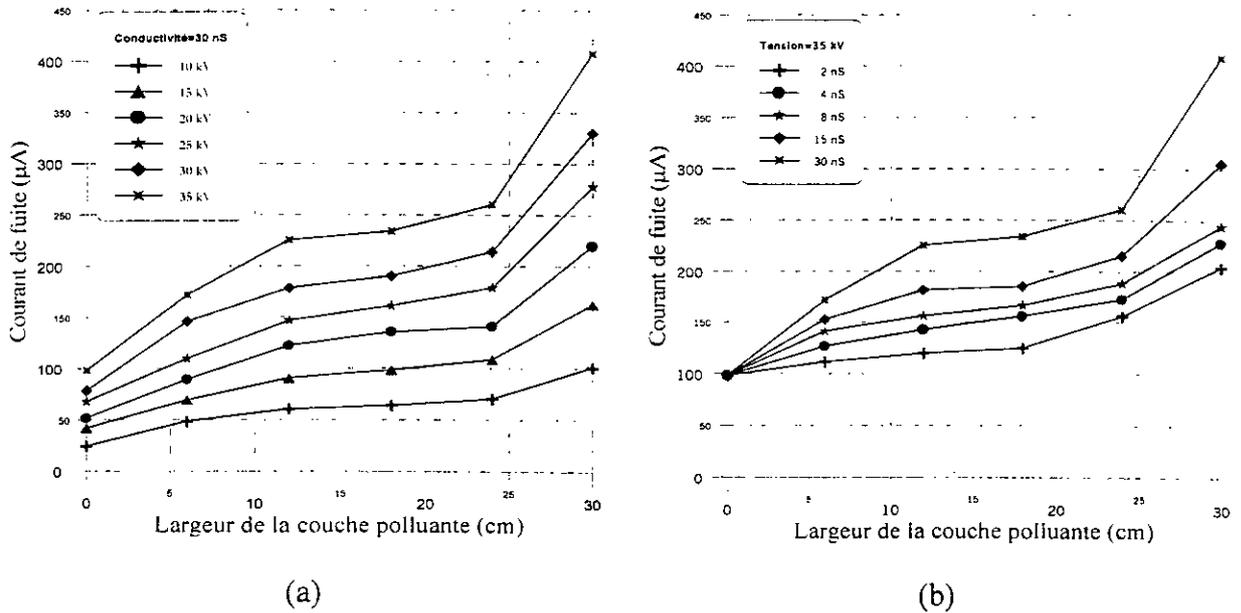


Fig. I.11 : Courant de fuite – largeur de la pollution, (a) pour différentes tensions, (b) pour différentes conductivités superficielles

I.6.3. Impédance électrique

Etant donné que l'amplitude du courant de fuite augmente linéairement avec la tension appliquée, nous pouvons déterminer, dans les limites des tensions utilisées, l'impédance électrique équivalente à partir de la pente des caractéristiques donnant la tension appliquée U en fonction de l'amplitude du courant de fuite I , car $Z=U\sqrt{2}/I$.

Pour une conductivité superficielle donnée, nous constatons que l'augmentation de la largeur de la pollution engendre une diminution de l'impédance électrique totale entre électrodes (Fig. I.12).

Par ailleurs, pour chaque largeur de la pollution, lorsque la conductivité superficielle augmente, l'impédance équivalente diminue brusquement pour des conductivités variant de 0 à 8 nS et lentement ailleurs (Fig. I.13). Cette impédance tend vers une valeur limite déterminée expérimentalement à partir des caractéristiques courant-tension obtenues en substituant les couches de pollution discontinue par du papier aluminium.

Cette limite est pratiquement insensible à la variation de la largeur du papier aluminium. Sa valeur moyenne est $Z_{Al}\approx 85\text{ M}\Omega$.

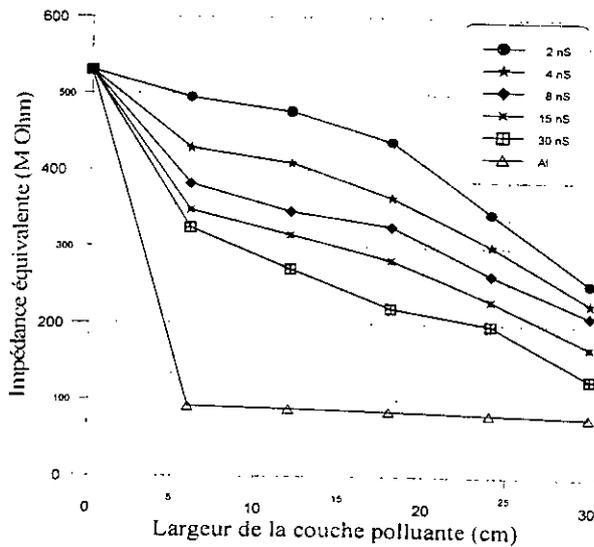


Fig. I.12 : Impédance entre électrodes – largeur de la pollution, pour différentes conductivités

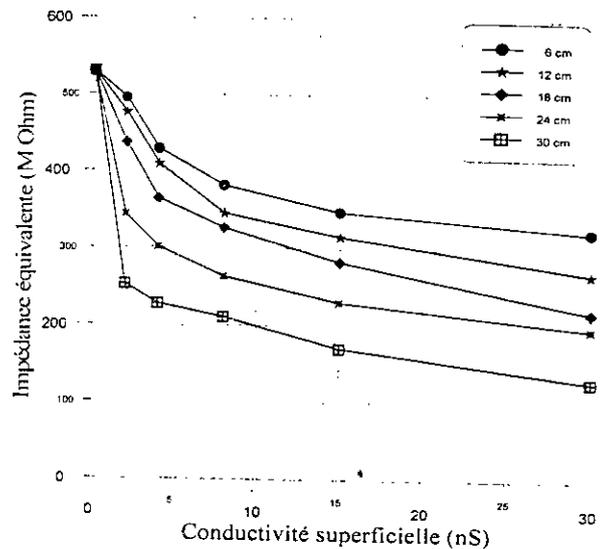


Fig. I.13 : Impédance équivalente – conductivité, pour différentes largeurs de la pollution

I.7. RESULTATS NUMERIQUES

La peinture semi-conductrice permet une bonne reproductibilité des valeurs mesurées. Cependant, l'effet de couronne contribue à engendrer une forte distorsion du signal du courant de fuite. Ce phénomène se manifeste en générant un ensemble d'impulsions dont l'amplitude augmente avec la tension appliquée [19-21, 25]. En réalité, l'apparition de l'effet de couronne n'est pas liée uniquement au niveau de tension appliqué, elle dépend également de l'état de surface de la couche semi-conductrice et de la forme des électrodes actives.

L'algorithme élaboré nous a permis, en fait, d'écarter les difficultés liées à ces fluctuations perturbatrices et d'éliminer les erreurs de lecture en donnant directement les valeurs effectives du courant et de la tension à partir des signaux enregistrés.

I.7.1. Evolution du signal et spectre fréquentiel du courant de fuite

Quand la tension appliquée est augmentée graduellement par paliers constants jusqu'à provoquer le contournement de la surface isolante, l'évolution des oscillogrammes du courant de fuite s'effectue quant à elle progressivement suivant certaines étapes.

Pour les faibles niveaux de tension, la forme du courant de fuite enregistrée est pratiquement sinusoïdale ; le fondamental devient en effet prédominant. Dès le début des aigrettes de l'effet de couronne, à partir de 10 kV, des distorsions apparaissent puisque chaque alternance de l'onde du courant de fuite prend la forme de "M" déformé. Ces distorsions sont accompagnées par des impulsions intermittentes ayant des amplitudes limitées, comme présenté à la figure I.14.a. Dans ces conditions, le spectre fréquentiel en amplitude montre que l'harmonique 250 Hz est le premier à apparaître (Fig. I.14.b).

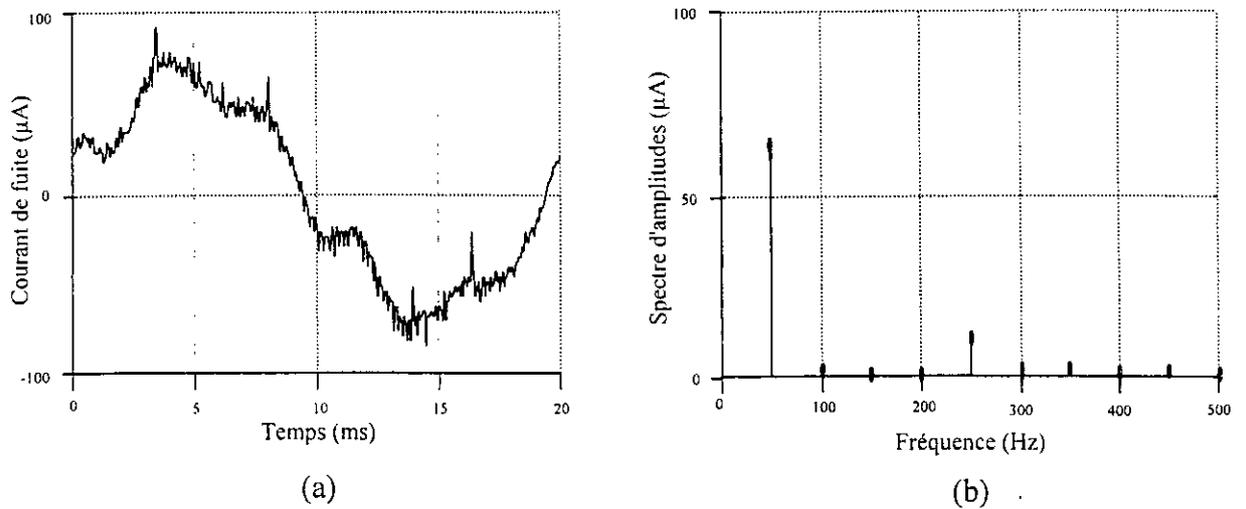


Fig. I.14 : (a) Courant de fuite réel, (b) spectre d'amplitudes, pour $U=10$ kV, $b=18$ cm et $\gamma_{sp}=30$ nS

Pour des tensions élevées, les distorsions et les amplitudes des impulsions deviennent importantes (Fig. I.15.a). Du moment que les ondes du courant de fuite gardent pratiquement leur symétrie, les harmoniques d'ordre impair, dont la fréquence ne dépasse pas 350 Hz, sont générés (Fig. I.15.b). L'amplitude de l'harmonique 250 Hz est plus élevée que celles de 150 et 350 Hz.

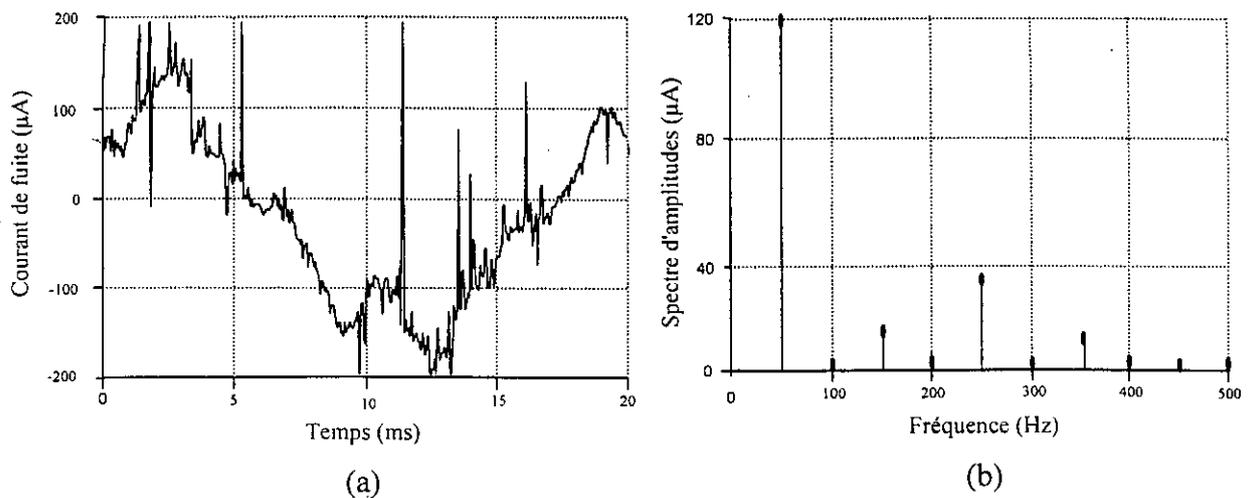


Fig. I.15 : (a) Courant de fuite réel, (b) spectre d'amplitudes, pour $U=20$ kV, $b=24$ cm et $\gamma_{sp}=30$ nS

Le nombre et la densité des impulsions vont en augmentant, lorsque la tension appliquée est augmentée davantage (Fig. I.16.a). Les composants harmoniques maintiennent le même ordre (Fig. I.16.b). L'existence d'une forte densité d'impulsions précède, généralement, la phase de contournement.

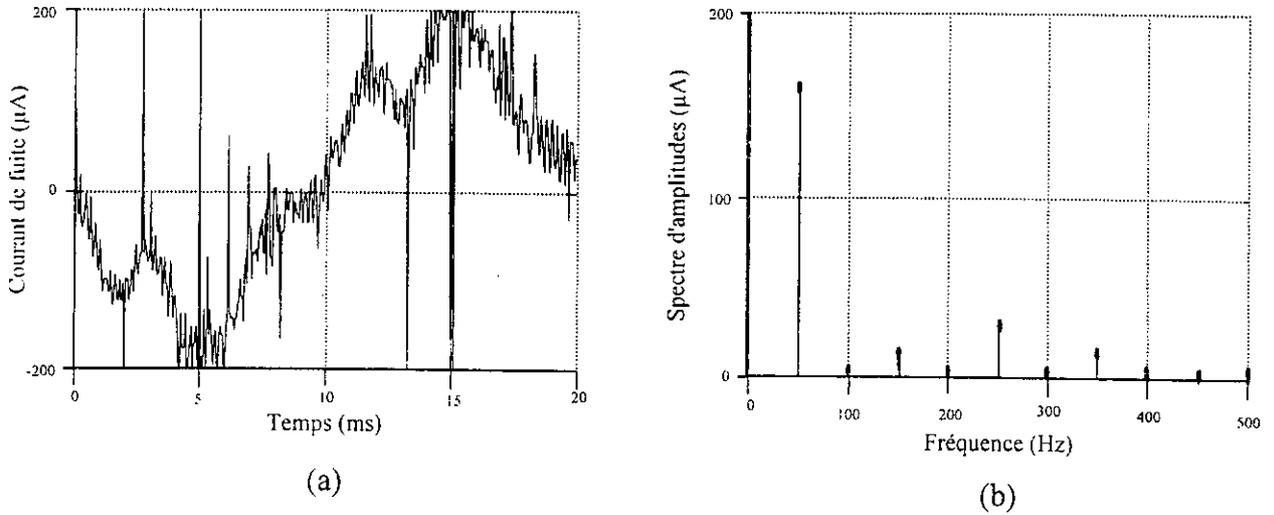


Fig. 1.16 : (a) Courant de fuite réel, (b) spectre d'amplitudes, pour $U=30$ kV, $b=30$ cm et $\gamma_{sp}=8$ nS

Par ailleurs, la figure I.17 montre que les amplitudes des harmoniques 5, 7 et 3 peuvent atteindre respectivement, 54 %, 36 % et 21 % de celle du fondamental. Des résultats similaires ont été trouvés par d'autres chercheurs [19, 20, 26]. Selon les figures (I.17) à (I.19), la variation du troisième harmonique est pratiquement identique à celle du cinquième harmonique, car ils augmentent et diminuent simultanément.

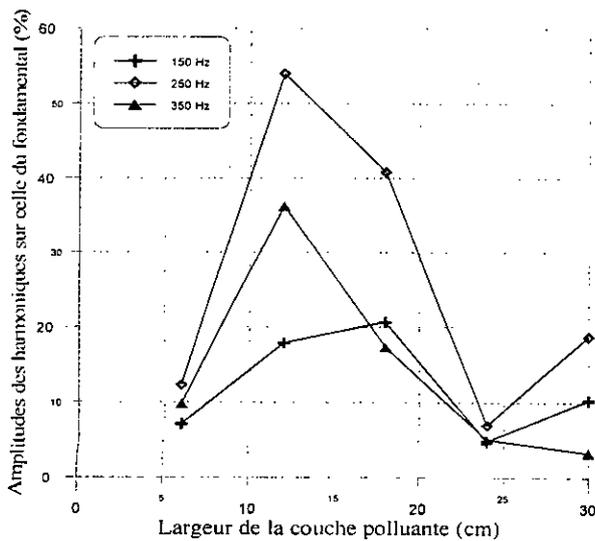


Fig. I.17 : Amplitudes des harmoniques sur celle du fondamental – largeur de la pollution, pour $U=25$ kV et $\gamma_{sp}=30$ nS

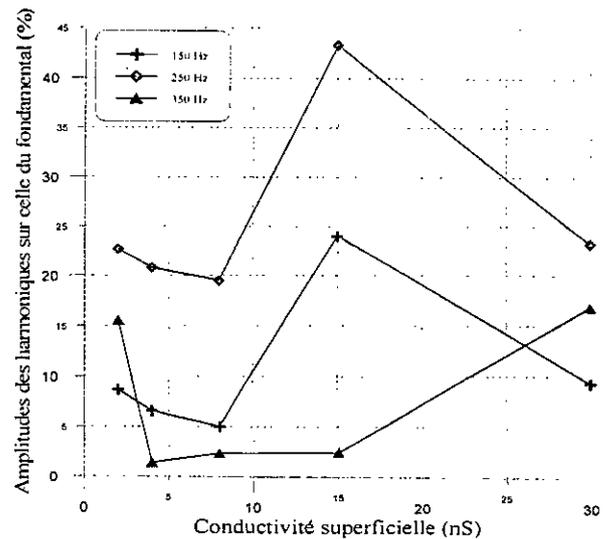


Fig. I.18 : Amplitudes des harmoniques sur celle du fondamental – conductivité superficielle, pour $U=30$ kV et $b=30$ cm

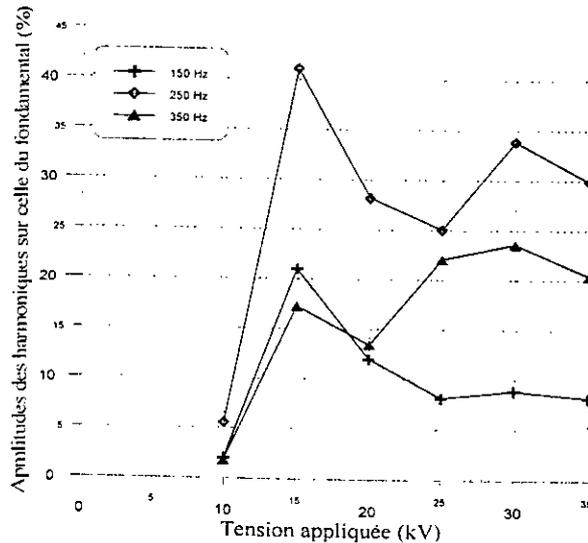


Fig. I.19 : Amplitudes des harmoniques sur celle du fondamental – tension appliquée, pour $b=18$ cm et $\gamma_{sp}=30$ nS

I.7.2. Filtrage numérique

Le temps au contournement est, par définition, le temps qui s'écoule entre l'instant d'amorçage de l'arc électrique et l'instant où son pied atteint l'électrode mise à la terre. Dans le cas d'une tension alternative, ce temps est précédé d'un temps t_0 plus grand qu'une demi période pendant lequel la décharge s'éteint et se réamorce plusieurs fois avant de contourner la surface isolante. Ce temps t_0 est appelé temps de retard, il correspond à la durée pendant laquelle le milieu où s'amorce la décharge perd ses caractéristiques diélectriques.

P.S.Ghosh, S.Chakravorti et N.Chatterjee [27] ont trouvé que le temps au contournement décroît avec l'augmentation de la tension appliquée et dépend de la nature chimique du polluant. Ils ont montré également, qu'il existe une valeur particulière de la tension appliquée pour laquelle le contournement se produit au bout de 1 ms et que toute autre augmentation de la tension n'a pas d'effet remarquable sur le temps au contournement. En outre, ces auteurs ont montré que les temps au contournement sont d'autant plus élevés que l'on se rapproche de la valeur de la tension de contournement [27].

Etant donné que la durée de vie des impulsions générées dans le signal du courant de fuite est largement inférieure à 1 ms, elles ont été de ce fait filtrées. Ainsi, nous nous sommes intéressés à l'amplitude du signal périodique. Le concept de filtrage nous servira, en effet, comme solution au problème lié à la détermination de l'amplitude du signal périodique du courant de fuite. Pour cela, nous avons considéré un filtre du quatrième ordre. Sa fréquence de coupure a été choisie égale à 600 Hz. Cette fréquence est nettement supérieure aux fréquences concernant les harmoniques non négligeables. La figure I.20 illustre un exemple de filtrage numérique du courant de fuite.

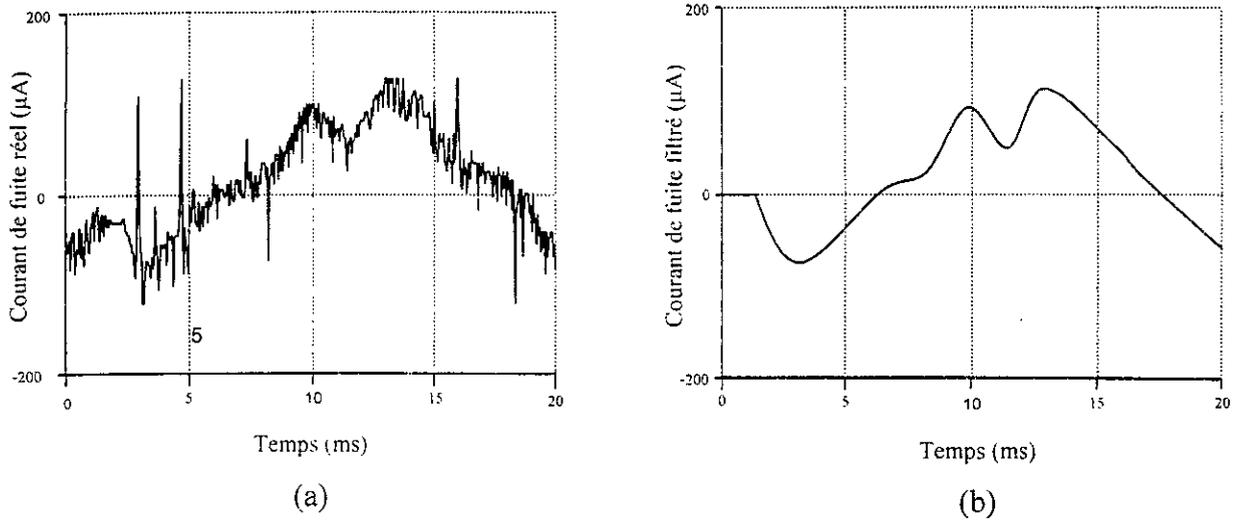


Fig. I.20 : Filtrage numérique pour $U=15$ kV, $b=12$ cm et $\gamma_{sp}=30$ nS, (a) courant de fuite réel, (b) courant de fuite filtré

I.7.3. Déphasage courant–tension

En utilisant l'oscilloscope digital, l'enregistrement simultané de l'onde du courant de fuite et celle de la tension appliquée (Fig. I.21.a) permet l'obtention de l'angle de déphasage. Ce dernier représente la différence entre les spectres de phase du courant de fuite et de la tension appliquée à la fréquence du fondamental (50 Hz) ou alors entre les angles de leurs fondamentaux dans le domaine temporel, comme l'illustre la figure I.21.b

En ce qui concerne l'onde de tension qui a été enregistrée, nous remarquons qu'elle présente une légère fluctuation au niveau des valeurs de crêtes (Fig. I.21.a). Le taux de cette distorsion reste modéré et ne dépasse pas 3 %. Cette distorsion est due probablement aux caractéristiques magnétiques non-linéaires du transformateur.

Dans le cas d'une plaque complètement polluée (couche de pollution continue), il a été montré que le courant de fuite est en phase avec la tension appliquée, indiquant que ce courant est purement résistif [6, 28]. La configuration de la pollution que nous avons considérée est caractérisée par la non-génération des décharges électriques préliminaires [19, 20, 23, 24]. Dans ces conditions, le courant de fuite est toujours en avance sur la tension appliquée. La valeur maximale du déphasage est obtenue dans le cas de la plaque propre et vaut en moyenne 76° . Cet angle est nettement inférieur à 90° , indiquant que l'impédance équivalente de la plaque propre possède un caractère actif non-négligeable.

Pour une conductivité superficielle donnée, le déphasage diminue légèrement avec l'augmentation de la largeur de la couche polluante (Fig. I.22). Ces constatations nous mènent à déduire que le caractère capacitif de la plaque de verre domine, pour cette configuration de la pollution. Les couches de pollution n'y introduisent, en fait, qu'une petite atténuation de ce caractère en tendant à le rendre plus résistif.

Nous constatons également que les caractéristiques donnant les variations du déphasage en fonction de la conductivité superficielle (Fig. I.23), pour différentes largeurs de pollution, présentent un minimum propre à chaque largeur de pollution. Ce minimum est obtenu pour la valeur de la conductivité égale à 4 nS. En effet, en augmentant la conductivité, le déphasage diminue rapidement depuis son maximum, atteint un minimum et augmente par la suite. Notons que le déphasage est pratiquement insensible à la variation de la tension appliquée et tend à se maintenir constant (Fig. I.24).

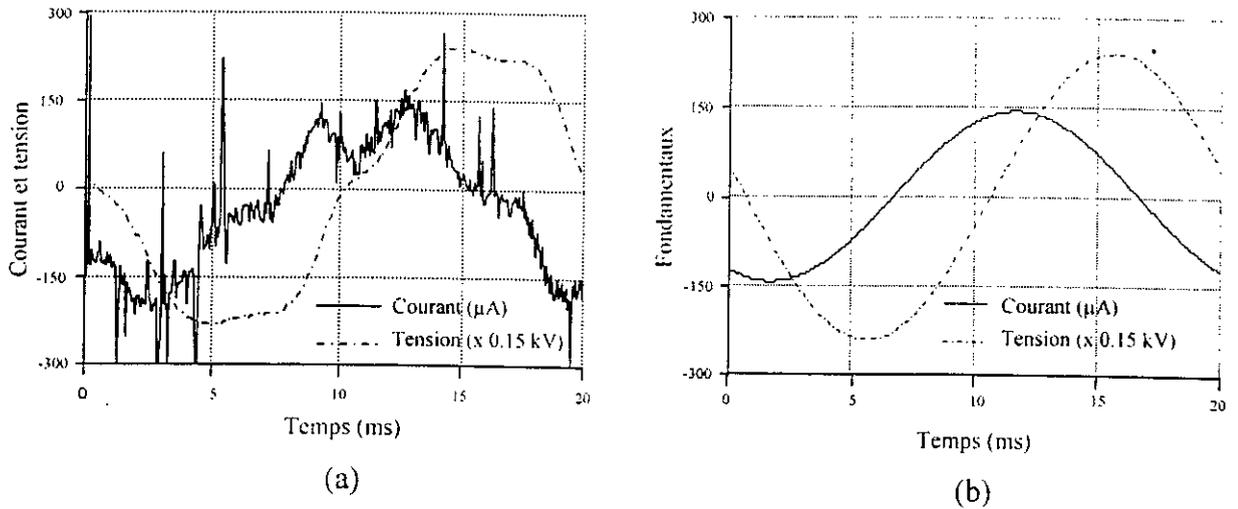


Fig. I.21 : Détermination du déphasage, pour $U=25$ kV, $b=18$ cm et $\gamma_{sp}=30$ nS, (a) courant et tension réels, (b) leurs fondamentaux

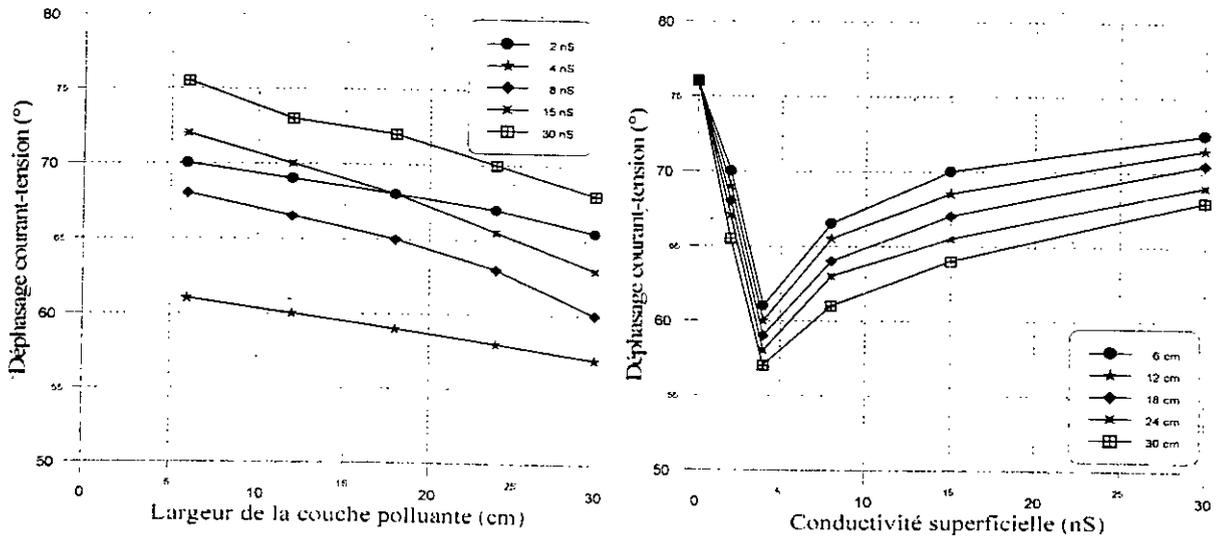


Fig. I.22 : Déphasage – largeur de la pollution, pour différentes conductivités

Fig. I.23 : Déphasage – conductivité, pour différentes largeurs de la pollution

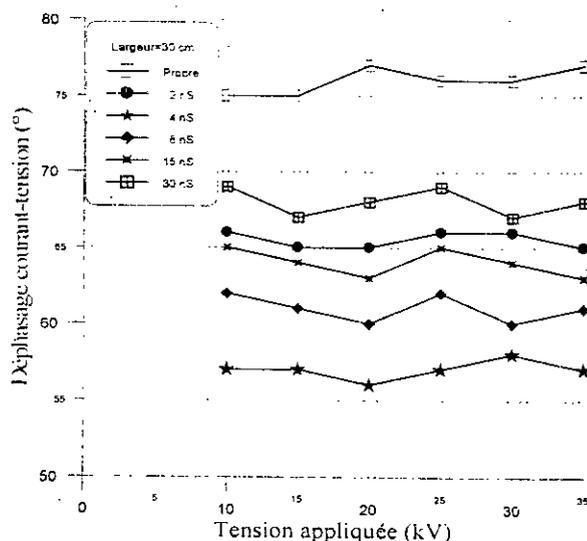


Fig. 1.24 : Déphasage – tension appliquée, pour différentes conductivités

1.8. ALGORITHME DE CONTOURNEMENT SOUS POLLUTION DISCONTINUE

Les phénomènes de conduction surfacique sont gouvernés par les équations du champ électrique dérivées du modèle macroscopique établi par Maxwell [28]. Cependant, l'application de ces lois sur les systèmes d'isolation constitués de milieux divers (ayant différentes propriétés électriques et formes géométriques) génère souvent un ensemble complexe d'équations [29]. L'adaptation de certaines hypothèses simplificatrices réduit l'ordre de complexité et rend plus aisée la détermination des caractéristiques du système.

Le but de cet algorithme est d'obtenir les différentes caractéristiques des phénomènes de conduction sur les surfaces isolantes sous pollution discontinue. Les bandes propres et polluées sont représentées par des circuits électriques. Les composants de ces circuits sont déterminés à partir des essais effectués sur la plaque propre et celle uniformément polluée. Le courant de fuite critique et la tension de contournement sont calculés à partir de la connaissance de la tension de contournement obtenue expérimentalement dans le cas où les couches de la pollution discontinue sont remplacées par du papier aluminium.

1.8.1 Hypothèses

Les particularités de notre modèle permettent d'adopter les suppositions suivantes :

- Les matériaux isolants sont représentés par des impédances complexes.
- Le champ magnétique est très faible.
- La tension alternative est parfaitement sinusoïdale.
- La couche de pollution de faible épaisseur permet d'introduire une distribution surfacique en deux dimensions.

- Le champ électrique n'a pas de composante normale à la surface isolante.

1.8.2. Caractéristiques théoriques de la plaque propre

Les essais expérimentaux effectués sur la plaque propre montrent que le courant de fuite est en avance sur la tension appliquée avec un angle inférieur à 90° . L'impédance équivalente de la plaque propre possède, par conséquent, un caractère actif non-négligeable. En effet, le modèle électrique approprié de la plaque considérée assimile l'interface air-verre par une résistance R_0 en parallèle avec une capacité C_0 (Fig. I.25).

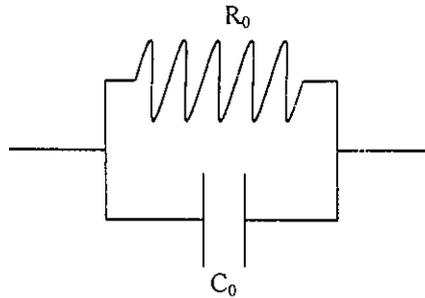


Fig. I.25 : Circuit électrique équivalent de la plaque propre

Dans la formulation mathématique, cette plaque avec son système d'électrodes est représentée, en utilisant la méthode des images, par deux électrodes cylindriques excentriques de rayon r et d'épaisseur e . La première électrode est mise au potentiel $+U$ et la seconde au potentiel $-U$, séparées par un plan de potentiel nul [30-32], comme l'illustre la figure I.26.

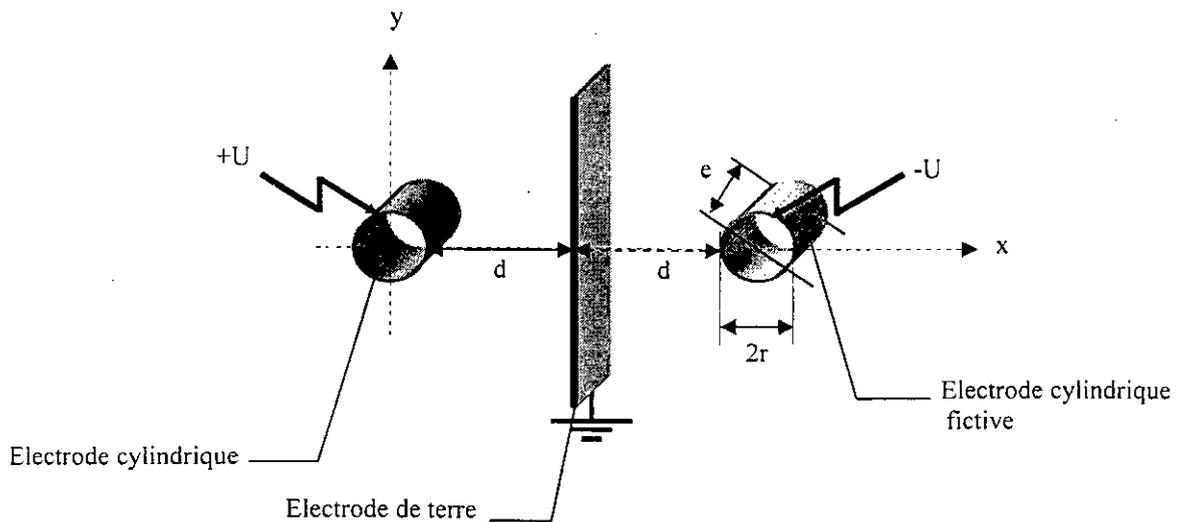


Fig. I.26 : Représentation équivalente en utilisant la méthode des images

Les équations de champ sont basées sur l'équation de Poisson :

$$\nabla^2 V + \frac{\rho}{\epsilon} = 0 \quad (\text{I.8})$$

Les conditions aux limites du potentiel électrique sont :

$$\begin{aligned} V(r) &= U \\ V(2(r+d)) &= -U \end{aligned} \quad (I.9)$$

L'expression de la résistance R_0 de la plaque propre est déduite à partir de la résolution de l'équation de Poisson dans les matériaux conducteurs [33] :

$$R_0 = \frac{1}{2\pi\gamma_0 e} \ln \left(\frac{d+r}{r} + \sqrt{\left(\frac{d+r}{r}\right)^2 - 1} \right) = \frac{1}{\gamma_0 e} \frac{1}{f} \quad (I.10)$$

où r est le rayon de l'électrode cylindrique et e son épaisseur, γ_0 la conductivité volumique de l'interface air-verre, d la distance inter-électrodes et f un facteur dépendant de la forme et de la disposition des électrodes :

$$f = \frac{2\pi}{\ln \left(\frac{d+r}{r} + \sqrt{\left(\frac{d+r}{r}\right)^2 - 1} \right)} \quad (I.11)$$

Nous pouvons considérer $\frac{1}{\gamma_0 e}$ comme étant une résistance superficielle R_{0s} . Comme γ_0 est constante, R_{0s} est donc constante et donnée par l'expression suivante :

$$R_{0s} = \frac{1}{\gamma_0 e} = R_0 f \quad (I.12)$$

D'autre part, la résolution de l'équation de Poisson dans les matériaux isolants, permet d'obtenir l'expression de la capacité C_0 de la plaque propre [33] :

$$C_0 = \varepsilon e f \quad (I.13)$$

avec ε la permittivité de l'interface air-verre.

Par conséquent, la capacité superficielle $C_{0s} = \varepsilon e$ peut être formulée par :

$$C_{0s} = C_0 \frac{1}{f} \quad (I.14)$$

Pour la plaque propre, les valeurs de la résistance R_0 et la capacité C_0 sont déterminées à partir des mesures de la tension U_0 , du courant de fuite I_0 et du déphasage φ_0 entre eux, car :

$$\frac{1}{Z_0} = \frac{I_0}{U_0} \cos(\varphi_0) + j \frac{I_0}{U_0} \sin(\varphi_0) = \frac{1}{R_0} + j C_0 \omega \quad (I.15)$$

où Z_0 est l'impédance équivalente entre électrodes de la plaque propre et $\omega (=2\pi f, f=50 \text{ Hz})$ la pulsation.

A partir de l'équation (I.15), il devient après substitution de R_0 et C_0 dans (I.12) et (I.14) respectivement :

$$R_{0s} = \frac{U_0}{I_0 \cos(\varphi_0)} f = \frac{|Z_0|}{\cos(\varphi_0)} f \quad (\text{I.16})$$

$$C_{0s} = \frac{I_0 \sin(\varphi_0)}{U_0 \omega} \frac{1}{f} = \frac{1}{|Z_0| \omega} \sin(\varphi_0) \frac{1}{f}$$

avec $|Z_0| = \frac{U_0}{I_0}$ le module de l'impédance Z_0 .

I.8.3. Caractéristiques théoriques de la pollution uniforme sur la surface isolante

La pollution uniforme sur la surface isolante est représentée par une résistance R_p . L'expression de cette dernière est similaire à (I.10) :

$$R_p = \frac{1}{2\pi \gamma e} \ln \left(\frac{d+r}{r} + \sqrt{\left(\frac{d+r}{r} \right)^2 - 1} \right) = \frac{1}{\gamma e} \frac{1}{f} \quad (\text{I.17})$$

où γ est la conductivité volumique de la pollution.

Par conséquent, la résistance superficielle R_{sp} peut être donnée par :

$$R_{sp} = \frac{1}{\gamma e} = R_p f \quad (\text{I.18})$$

Pour chaque valeur de la conductivité superficielle de pollution γ_{sp} , la résistance R_p est déterminée à partir des pentes des parties linéaires des caractéristiques tension-courant, obtenues expérimentalement lorsque la surface isolante est uniformément polluée.

I.8.4 Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire

La figure I.27 représente le circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire sous pollution discontinue. Ce circuit simulant chaque bande i ($i=1$ à 6) est constitué d'une résistance R_{0i} en parallèle avec une capacité C_{0i} . Pour chaque bande polluée i ($i=2, 4, 6$), ces circuits sont shuntés par une résistance R_{pi} représentant la couche de pollution.

Le fait que les couches polluantes possèdent des formes rectangulaire (Fig. I.28) et selon la recommandation de la CEI 60-1 [12] et la norme Polonaise PN-71 E/04405 [13], l'expression de la résistance pour chaque bande polluée i peut être formulée par :

$$R_{pi} = R_{sp} \int_0^{l_i} \frac{dx}{b} = R_{sp} \frac{l_i}{b} = R_p f \frac{l_i}{b} \quad (1.19)$$

avec $i=2, 4, 6$, R_{pi} la résistance de couche de pollution, dx élément de longueur, l_i la longueur de la pollution, b la largeur de la couche de pollution et f le facteur de forme.

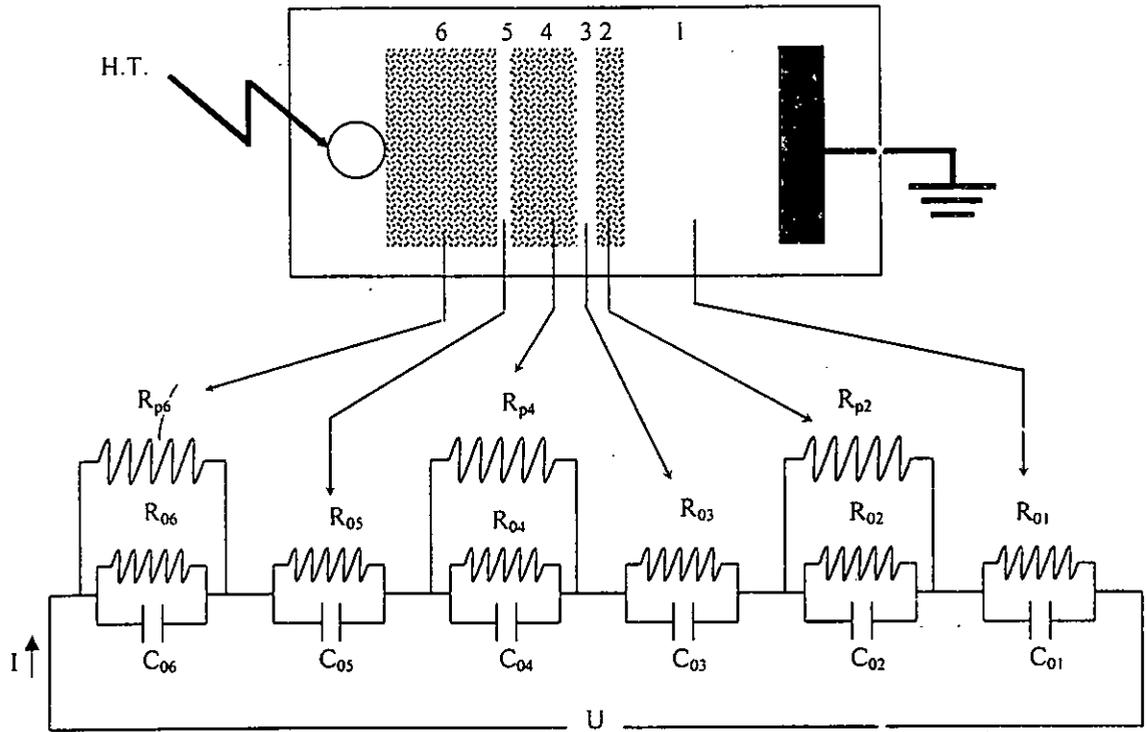


Fig. I.27 : Circuit électrique équivalent du modèle de laboratoire

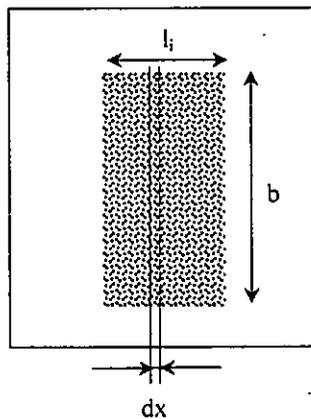


Fig. I.28 : Détermination de la résistance de pollution

La largeur des bandes propres est considérée égale à celle de la couche polluée. Ceci est dû à la concentration du champ électrique dans les zones d'influences délimitées par les différentes couches de pollution. Dans ces conditions, la résistance R_{0i} et la capacité C_{0i} ($i=1$ à 6) simulant l'interface air-verre pour différentes bandes, sont formulées par :

$$R_{0i} = R_{0s} \frac{l_i}{b} \quad (I.20)$$

$$C_{0i} = C_{0s} \frac{b}{l_i}$$

avec l_i la longueur de la bande propre et b sa largeur.

Selon la figure I.27, pour chaque bande propre ($i=1, 3, 5$), l'impédance partielle Z_{0i} constituée par R_{0i} en parallèle avec C_{0i} , est donnée par :

$$Z_{0i} = \frac{R_{0i}}{1 + jR_{0i}C_{0i}\omega} \quad (I.21)$$

et pour chaque bande polluée ($i=2, 4, 6$), l'impédance Z_{pi} correspondant à R_{pi} , R_{0i} et C_{0i} en parallèle, est exprimée par :

$$Z_{pi} = \frac{\frac{R_{0i} R_{pi}}{R_{0i} + R_{pi}}}{1 + j \left(\frac{R_{0i} R_{pi}}{R_{0i} + R_{pi}} \right) C_{0i} \omega} \quad (I.22)$$

La tension totale U appliquée entre électrodes est telle que :

$$U = (Z_{01} + Z_{p2} + Z_{03} + Z_{p4} + Z_{05} + Z_{p6})I = Z_t I \quad (I.23)$$

avec Z_t l'impédance totale équivalente et I le courant circulant à travers cette impédance.

Comme Z_t est complexe, le déphasage représentant l'argument de cette impédance peut être formulé par :

$$\varphi = \arg(Z_t) = \text{Arc tan} \left(\frac{\text{Im}(Z_t)}{\text{Re}(Z_t)} \right) \quad (I.24)$$

où $\text{Im}(Z_t)$ est la composante imaginaire de Z_t et $\text{Re}(Z_t)$ sa partie réelle.

Nous définissons U_{0e} comme étant la tension reportée aux bornes de la bande propre équivalente qui représente la somme des différentes bandes propres partielles :

$$U_{0e} = (Z_{01} + Z_{03} + Z_{05})I = Z_{0e} I \quad (I.25)$$

où Z_{0e} est l'impédance de la bande propre équivalente.

Nous définissons également U_p comme étant la chute tension à travers la bande polluée équivalente qui représente la somme des différentes bandes polluées partielles :

$$U_p = (Z_{p2} + Z_{p4} + Z_{p6})I = Z_p I = U - U_{0c} \quad (I.26)$$

où Z_p est l'impédance de la bande polluée équivalente.

Comme nous l'avons déjà mentionné, le contournement se produit directement sans apparition des arcs partiels préliminaires. Le cas critique est obtenu lorsque nous utilisons le papier aluminium à la place des couches de pollution. Dans ces conditions, la tension critique de contournement correspondante représente le cas où le contournement des trois bandes propres partielles ($i=1, 3, 5$) se produit simultanément. Cette tension notée U_{0c} représente, dans notre simulation, la tension critique de contournement reportée aux bornes de la bande propre équivalente. Le courant de fuite I_c correspondant est défini par :

$$I_c = \frac{U_{0c}}{Z_{0c}} \quad (I.27)$$

Par conséquent, la chute de tension critique U_{cp} aux bornes de la bande polluée équivalente est telle que :

$$U_{cp} = Z_p I_c \quad (I.28)$$

Finalement, La tension de contournement U_c correspond à la somme de U_{cp} et U_{0c} :

$$U_c = U_{cp} + U_{0c} = \frac{Z_p}{Z_{0c}} U_{0c} \quad (I.29)$$

Après calcul de Z_i et Z_{0c} en fonction de b , nous déduisons que la tension de contournement U_c est indépendante de la largeur de la pollution b .

I.8.5. Simulation numérique

En se basant sur des essais expérimentaux, nous déterminons en premier lieu, les composants électriques du circuit équivalent de la figure I.27. Pour une largeur de pollution donnée, la caractéristique tension-courant obtenue expérimentalement dans le cas de la plaque propre, permet de déterminer le module d'impédance $|Z_0|$ ainsi que le déphasage ϕ_0 . A partir de ces valeurs, nous évaluons la résistance R_0 et la capacité C_0 selon l'expression (I.15). En utilisant les équations (I.16) et (I.20), nous pouvons déduire les composants suivants : R_{0s} et C_{0s} , et donc R_{0i} and C_{0i} ($i=1$ to 6). Pour chaque conductivité, la caractéristique expérimentale tension-courant obtenue dans le cas où la plaque est uniformément polluée, permet de déterminer la résistance R_p et par conséquent, les résistances partielles R_{pi} ($i = 2, 4, 6$), à partir de l'expression (I.19). Une fois les composants du circuit équivalent déterminés, il devient facile de calculer, pour toutes les conductivités, les différentes impédances, ainsi que le déphasage représentant l'argument de l'impédance équivalente, en utilisant les équations (I.21) à (I.26). La tension critique U_{0c} obtenue en remplaçant les couches de pollution discontinue par du papier aluminium, permet d'évaluer le courant critique I_c et la tension critique U_c selon (I.27) et (I.29). Connaissant la valeur de l'impédance équivalente totale et utilisant la relation (I.23), nous pouvons évaluer les différentes valeurs du courant de fuite en variant la tension appliquée de zéro à U_{max} (=35 kV). Finalement, il est possible d'obtenir les différentes caractéristiques décrivant le comportement des surfaces isolantes sous pollution

discontinue. Pour chaque largeur de la pollution, la simulation mathématique est effectuée selon l'organigramme détaillé de la figure I.29.

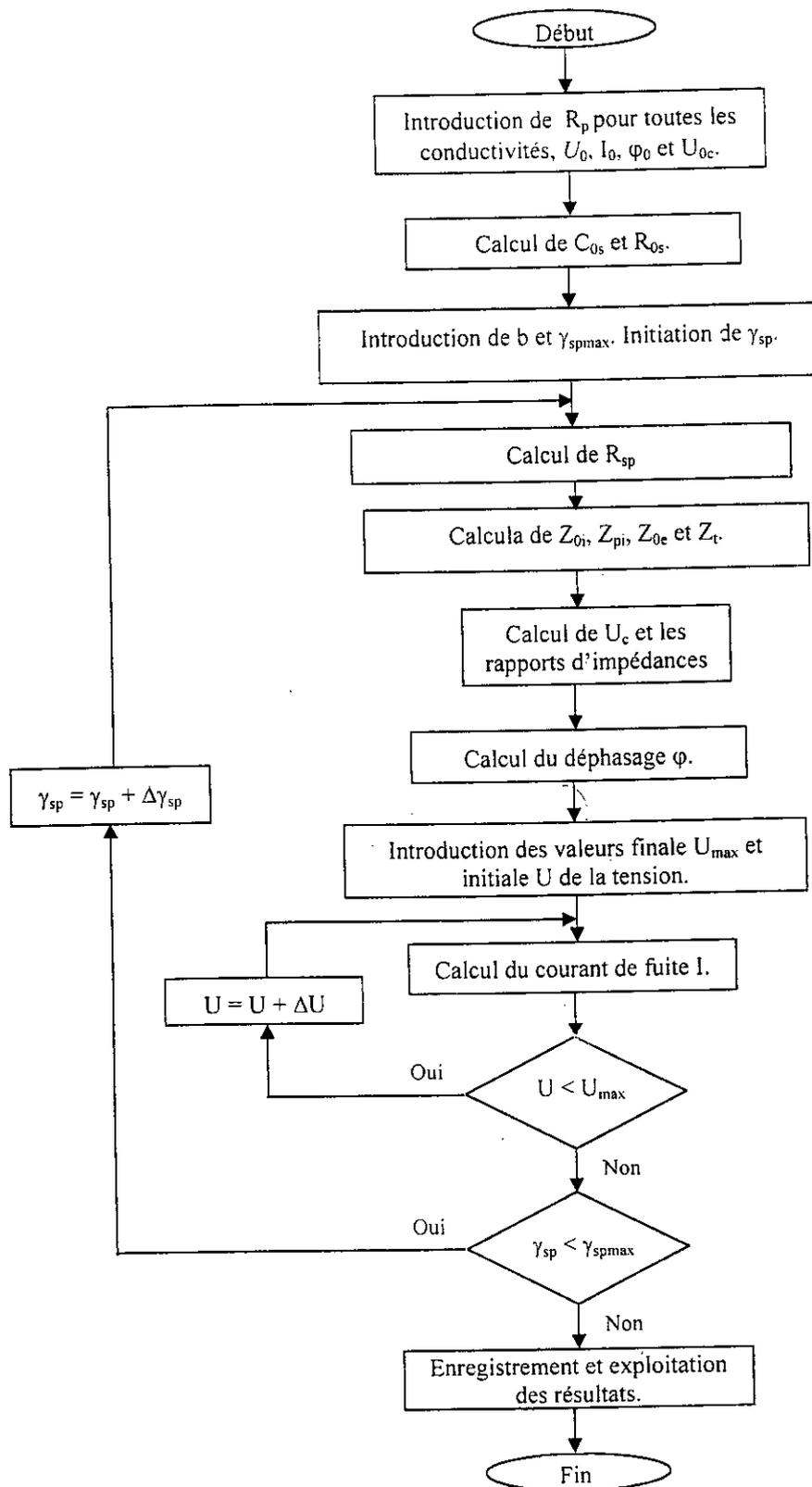


Fig. I.29 : Organigramme détaillé

Selon les essais effectués sur une plaque propre, l'amplitude du courant de fuite augmente linéairement avec la tension appliquée (Fig. I.30). Cette caractéristique permet de déterminer, dans les limites des tensions utilisées, l'impédance électrique équivalente représentant la pente de cette caractéristique multipliée par $\sqrt{2}$; $|Z_0| \approx 530 \text{ M}\Omega$. Cette valeur est en bonne concordance avec celles données dans la littérature [33]. Par ailleurs, nous avons déjà montré que le courant est en avance sur la tension avec un angle $\varphi_0 \approx 76^\circ$. Les valeurs de l'impédance $|Z_0|$ et du déphasage φ_0 dépendent de la nature et de la qualité du verre utilisé.

Concernant la surface isolante sous pollution uniforme, les données expérimentales de la résistance de pollution R_p en fonction de la conductivité γ_{sp} sont données dans le tableau I.2.

En injectant les valeurs de l'impédance $|Z_0|$, du déphasage φ_0 , de la tension moyenne de contournement U_{0c} ($=52.5 \text{ kV}$ représentant la moyenne des valeurs obtenues selon la figure I.7) et de la résistance R_p pour différentes conductivités superficielles γ_{sp} dans le programme élaboré, nous pouvons obtenir les différents paramètres caractérisant les phénomènes de conduction sur les surfaces isolantes partiellement polluées.

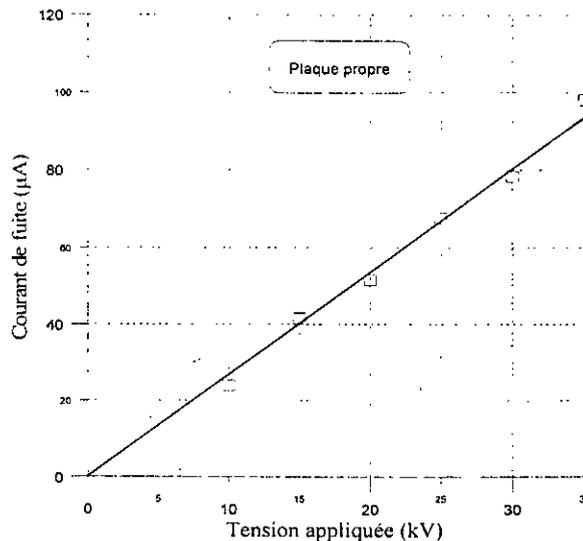


Fig. I.30 : Amplitude du courant de fuite – tension appliquée pour une plaque propre

Conductivité γ_{sp} (nS)	2	4	8	15	30
Résistance R_p (M Ω)	257.5	129	64.5	34.5	17

Tableau I.2 : Résistance de la pollution uniforme – conductivité superficielle

I.8.6. Résultats obtenus et interprétations

I.8.6.1. Amplitude du courant de fuite – tension appliquée

Pour les deux caractéristiques (théorique et expérimentale), l'amplitude du courant de fuite augmente avec la conductivité et la largeur de la pollution, et d'une manière linéaire avec la tension appliquée (Fig. I.31).

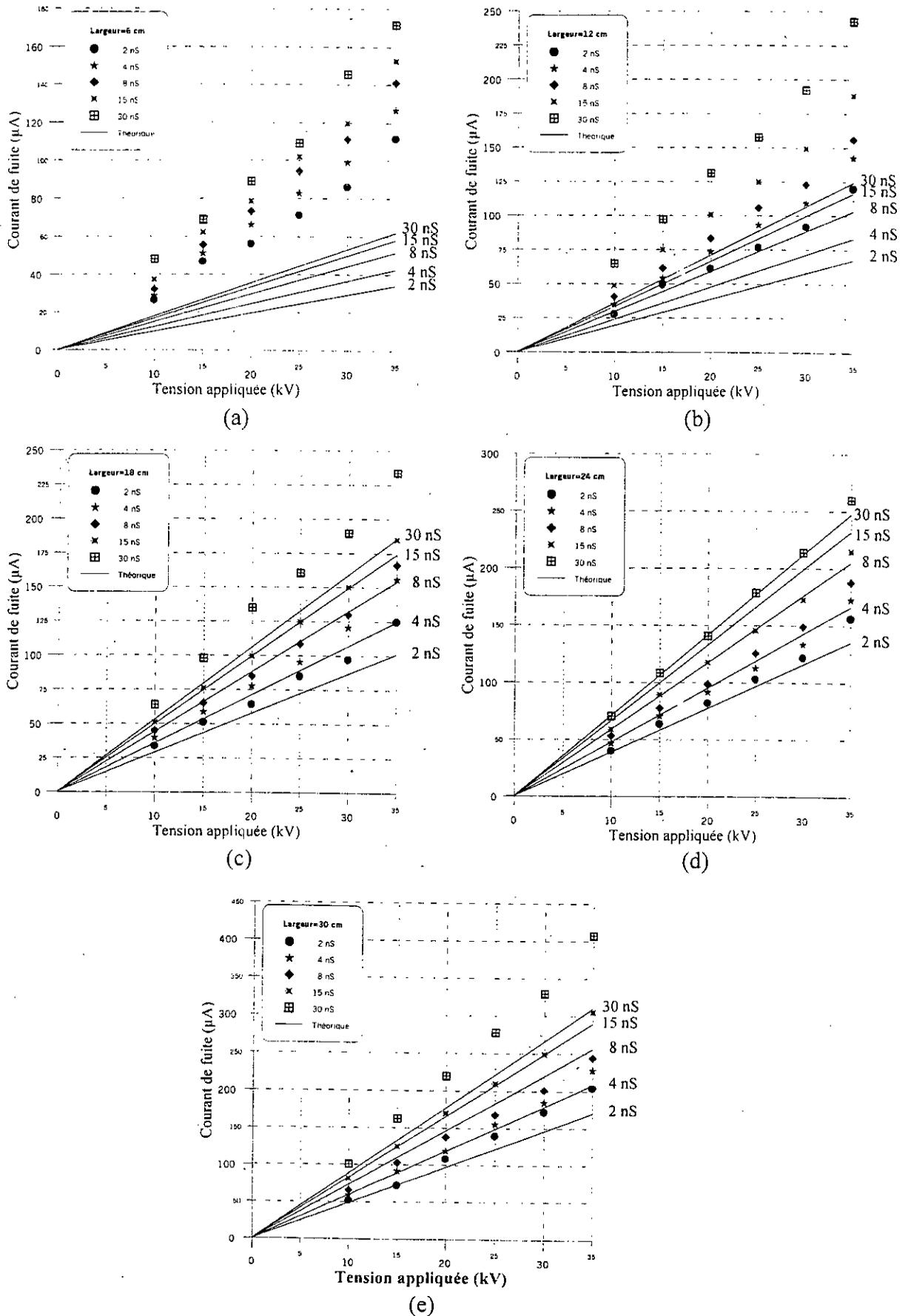


Fig. I.31 : Amplitude du courant de fuite – tension appliquée

Nous observons, en général, que ces deux caractéristiques sont très proches pour des grandes largeurs de pollution (24 et 30 cm). Une divergence significative est observée pour les petites largeurs (< 18 cm). Les valeurs théoriques, dans ces cas, sont petites par rapport à celles expérimentales. Cette différence est d'autant plus grande que la largeur de pollution est petite. Ainsi, le modèle théorique utilisant des circuits électriques représente mieux le modèle expérimental pour les largeurs élevées (≥ 24 cm) de la pollution.

1.8.6.2. Impédance équivalente – conductivité superficielle

La figure I.32 montre que l'allure de l'impédance équivalente vue des électrodes en fonction de la conductivité superficielle obtenue théoriquement pour différentes largeurs de la pollution, est semblable à celle expérimentale. En effet, cette impédance diminue rapidement pour des conductivités allant de 0 à 8 nS et lentement ailleurs. Nous constatons également que pour une largeur de pollution supérieure ou égale à 18 cm, les valeurs théoriques de cette impédance sont proches de celles expérimentales. La meilleure caractéristique théorique est obtenue pour une largeur de pollution égale à 24 cm. Cependant, pour des largeurs inférieures ou égales à 12 cm, les valeurs théoriques sont plus importantes que celles expérimentales.

1.8.6.3. Rapports théoriques d'impédances

Le rapport théorique entre l'impédance de la bande polluée équivalente et l'impédance de la bande propre équivalente (Z_p/Z_{0e}) peut être utilisé pour représenter la mesure de la sévérité de pollution. Plus la pollution est sévère, plus ce rapport est petit. La figure I.33 montre qu'il diminue avec l'augmentation de la conductivité. Cependant, cette diminution est rapide tant que la conductivité ne dépasse pas 15 nS. Ce rapport est donc faible pour les couches polluantes de forte conductivité superficielle. A titre d'exemple, il atteint 7 % pour 30 nS.

D'autre part, avec l'augmentation de la conductivité de la pollution, le rapport théorique de l'impédance de la bande polluée équivalente et celle totale équivalente (Z_p/Z_t) diminue brusquement, pour les valeurs de conductivités inférieures ou égales à 15 nS et légèrement ailleurs (Fig. I.34).

Comme la bande propre équivalente représente le complément de celle polluée équivalente par rapport à la distance inter-électrodes, le rapport théorique de l'impédance de la bande propre équivalente et l'impédance équivalente vue des électrodes (Z_{0e}/Z_t), augmente avec la conductivité (Fig. I.35). Cette augmentation se stabilise à partir de 15 nS, où ce rapport atteint 85 %.

Il est important de noter que les trois rapports théoriques d'impédances (Z_p/Z_{0e} , Z_p/Z_t et Z_{0e}/Z_t) sont indépendants de la largeur de pollution.

A partir des deux caractéristiques (expérimentale et théorique) de la figure I.32, donnant l'impédance équivalente en fonction de la conductivité, nous pouvons déduire, pour chaque largeur de pollution, un rapport moyen de l'impédance théorique et celle expérimentale. La figure I.36 montre que ce rapport diminue avec l'augmentation de la conductivité. Pour des grandes largeurs de pollution (≥ 18 cm), il est proche à l'unité, indiquant que les valeurs théoriques et celle expérimentales sont presque identiques. Cependant, pour les petites largeurs de pollution (< 18 cm), une nette divergence entre elles est observée.

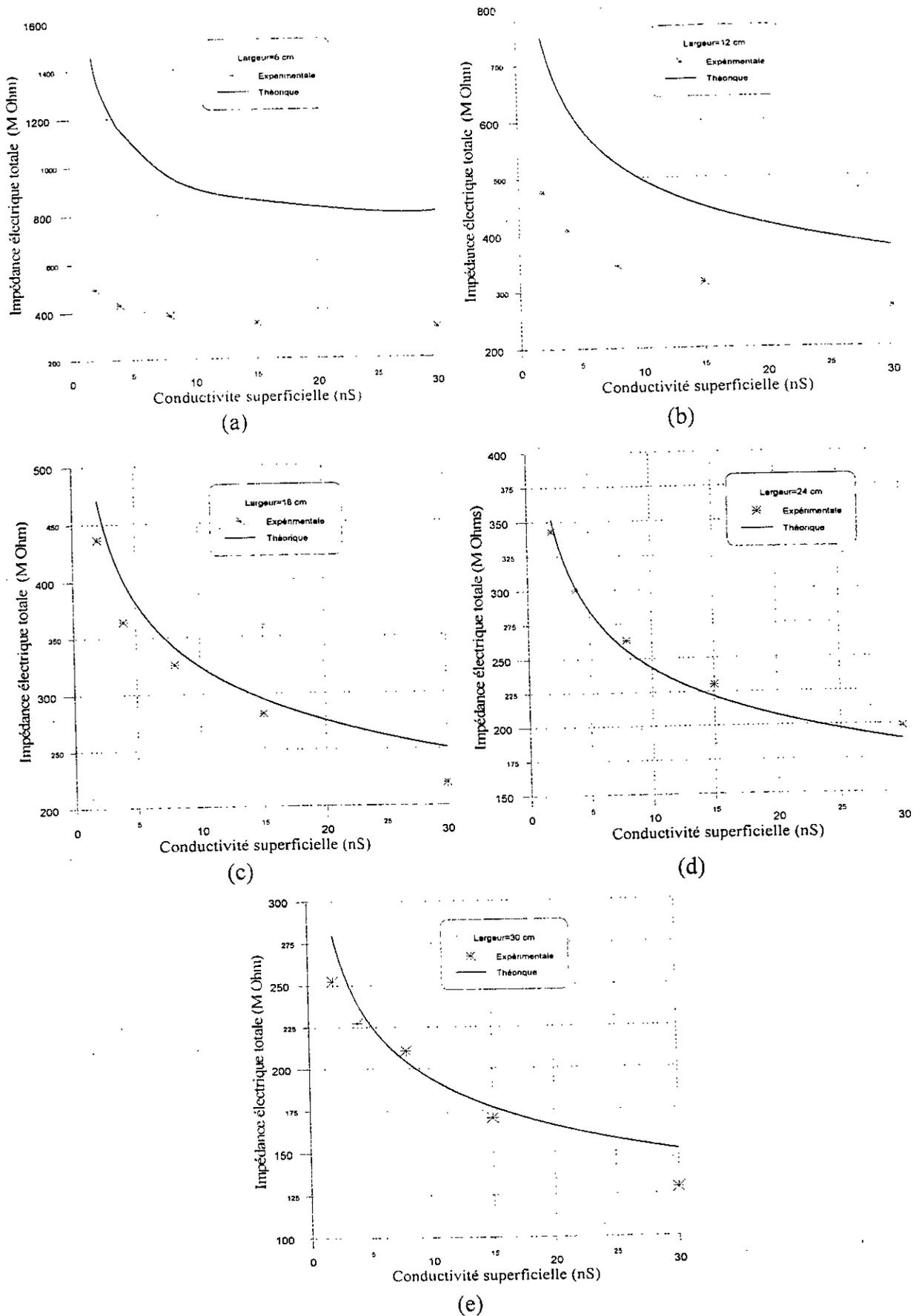


Fig. I.32 : Impédance équivalente totale – conductivité superficielle

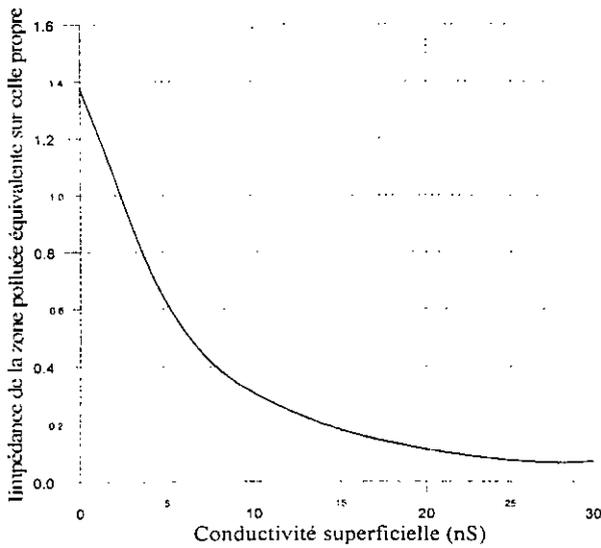


Fig. I.33 : Impédance de la bande polluée équivalente sur celle de la bande propre équivalente – conductivité

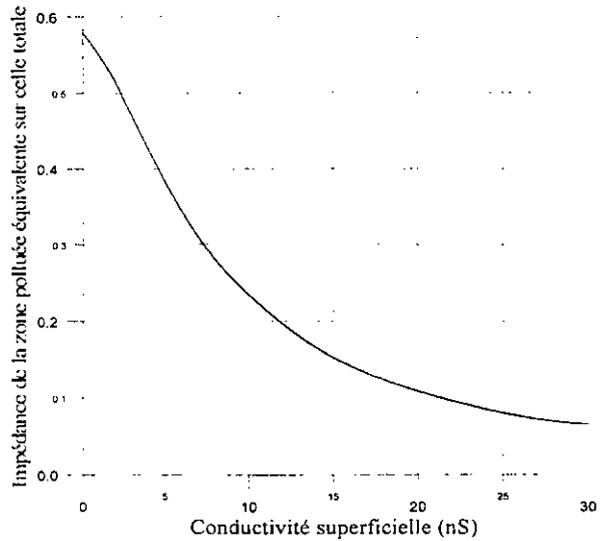


Fig. I.34 : Impédance de la bande polluée équivalente sur celle totale équivalente – conductivité

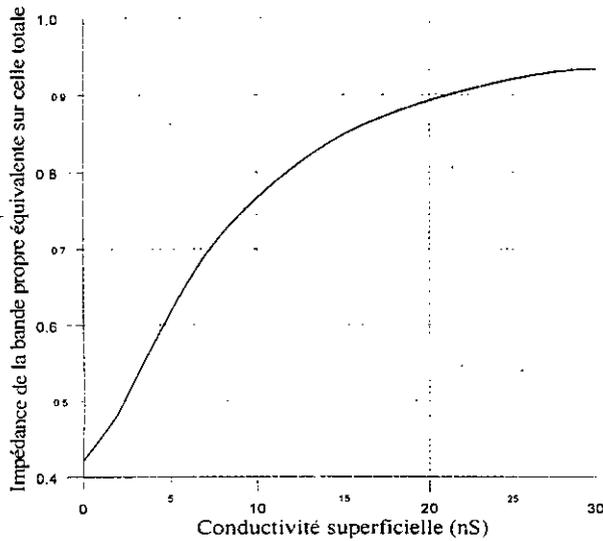


Fig. I.35 : Impédance de la bande propre équivalente sur celle totale équivalente – conductivité

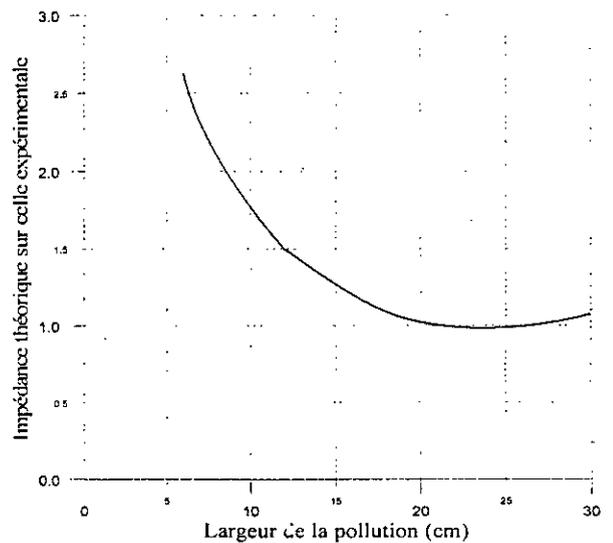


Fig. I.36 : Impédance théorique sur celle expérimentale – de la largeur de la pollution

1.8.6.4. Tension de contournement – conductivité superficielle

Avec l'augmentation de la conductivité, la tension de contournement diminue d'une manière considérable dans la gamme 0 à 15 nS (Fig. I.37). Cette tension tend vers une valeur limite (52.5 kV) obtenue expérimentalement en utilisant du papier aluminium à la place des couches de pollution.

D'autre part, la caractéristique théorique est insensible à la variation de la largeur de pollution, au moment où les caractéristiques expérimentales montrent, pour une conductivité donnée, une légère diminution de la tension de contournement lorsque la largeur de pollution

augmente (Fig. I.37). Nous observons également, que les valeurs numériques sont très proches de celles obtenues expérimentalement pour la plus grande largeur de pollution (30 cm).

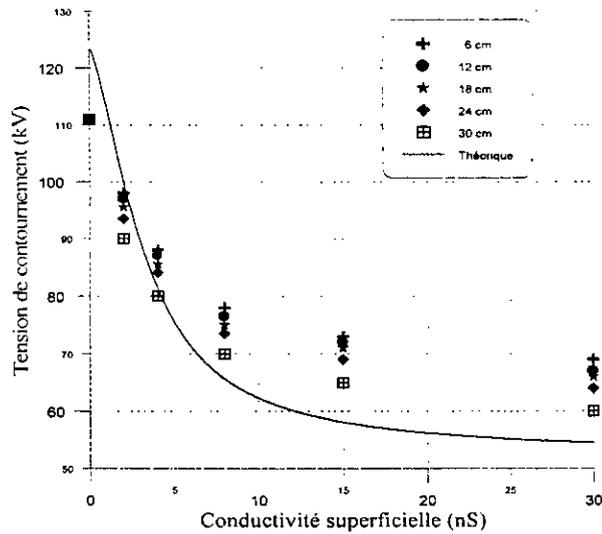


Fig. I.37 : Tension de contournement – conductivité superficielle

I.8.6.5. Angle de déphasage – conductivité superficielle

En fonction de la conductivité, la variation du déphasage courant-tension est similaire à celle obtenue pour le modèle expérimental. Quelle que soit la conductivité superficielle, les caractéristiques expérimentales montrent une décroissance du déphasage avec l'augmentation de la largeur de pollution (Fig. I.38). La caractéristique théorique est insensible à la variation de cette largeur. Dans le cas des grandes largeurs de pollution (≥ 24 cm), les valeurs théoriques sont proches de celles obtenues expérimentalement.

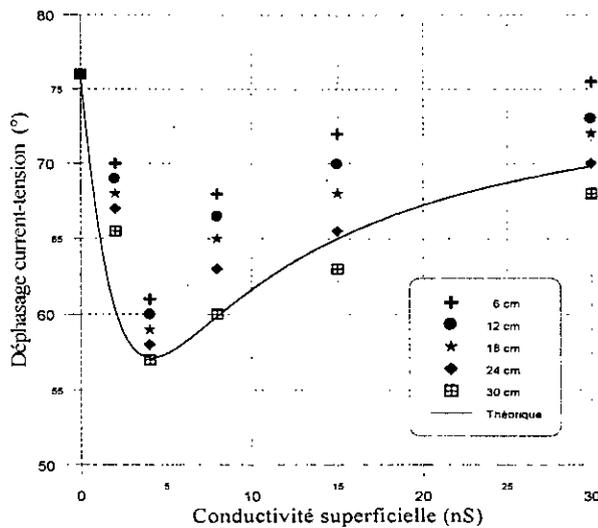


Fig. I.38 : Déphasage – conductivité superficielle

1.9. CONCLUSION

A cause de la nature de l'agent polluant utilisé et de la dimension longitudinale de la bande propre équivalente relativement à la distance inter-électrodes, le contournement se produit directement sans décharges électriques préliminaires. Lorsque la conductivité superficielle augmente, la tension de contournement diminue et tend vers une valeur limite obtenue lorsque les couches polluantes sont parfaitement conductrices. D'autre part, la tension de contournement diminue légèrement avec l'augmentation de la largeur de la pollution.

La variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante, montre qu'il existe une limite à partir de laquelle le courant de fuite augmente rapidement. Par ailleurs, l'amplitude du courant de fuite croît avec la conductivité superficielle et avec la tension appliquée.

En augmentant la conductivité superficielle, l'impédance électrique vue des électrodes diminue rapidement et tend vers une valeur limite. De plus, l'augmentation de la largeur de la couche polluante engendre une diminution de cette impédance.

Les oscillogrammes du courant de fuite sont presque symétriques. Les résultats numériques concernant les spectres fréquentiels ainsi obtenus, montrent que les harmoniques d'ordre impair dont la fréquence ne dépasse pas 350 Hz sont générés. Le cinquième est plus important que le troisième et le septième. Les autres sont négligeables. Une bonne concordance a été trouvée, en comparant ces résultats numériques à ceux obtenus par d'autres chercheurs [19, 20, 26].

Imposé par la configuration choisie, le déphasage, insensible à la variation de la tension appliquée, est toujours de type capacitif. L'augmentation de la largeur des couches polluantes entraîne une petite atténuation de ce déphasage en le rendant de type plus résistif. Par ailleurs, la variation du déphasage en fonction de la conductivité superficielle met en évidence un minimum.

En se basant sur les résultats expérimentaux et utilisant des circuits électriques, nous avons mis au point un modèle théorique permettant d'obtenir les différents paramètres caractérisant les phénomènes de conduction sur les isolateurs de haute tension, sous pollution discontinue. Ces paramètres consistent en la tension de contournement, le courant de fuite, le déphasage courant-tension, les différentes impédances équivalentes et finalement les différents rapports entre ces impédances. Le modèle théorique que nous avons élaboré représente mieux le modèle expérimental pour les grandes valeurs de la largeur de pollution.

CHAPITRE II

CONTOURNEMENT SOUS POLLUTION CONTINUE NON-UNIFORME

II.1. INTRODUCTION

Dû à la forme des isolateurs, à leur position en exploitation (verticale, horizontale, oblique), aux conditions météorologiques, à l'attraction électrostatique des particules polluantes en présence du champ électrique, la couche de pollution se déposant sur les surfaces des isolateurs est le plus souvent non-uniforme.

La pollution s'accumule de manière non-uniforme, principalement dans les parties inférieures des isolateurs. En effet, les nervures situées sur la surface inférieure de l'isolateur ne sont pas exposées directement aux conditions météorologiques. Ceci favorise l'accumulation de la pollution, et donc la diminution des propriétés de l'isolement de l'isolateur, même si ces nervures ont l'avantage de rallonger la ligne de fuite de l'isolateur et donc de réduire la longueur totale de la chaîne pour une ligne donnée.

Dans le but d'étudier l'impact de la non-uniformité de la pollution, sur le comportement d'un modèle de laboratoire, nous analysons les variations du courant de fuite et de la longueur de l'arc en fonction des dispositions et des longueurs de couches de différentes conductivités réparties sur une surface isolante. Pour une même configuration, plusieurs niveaux de tension ont été appliqués jusqu'au contournement.

Afin de simuler le comportement des isolateurs non-uniformément pollués, nous présentons un algorithme permettant l'obtention des différents paramètres caractérisant le développement de l'arc électrique jusqu'au contournement total des surfaces isolantes contaminées. La validité du modèle théorique sera vérifiée en comparant les résultats de simulation à ceux obtenus expérimentalement.

II.2. TYPES DE NON-UNIFORMITE

A l'instar de l'étude faite par H.Streubel [34], la non uniformité de la pollution peut être par groupe (longitudinale), par secteur (longitudinale périodique).

La non-uniformité longitudinale ou par groupe est caractérisée par un ensemble de groupes d'isolateurs soumis à différentes conductivités dont la valeur est constante dans chaque groupe. Nous retrouvons ce type de pollution temporairement pendant le lavage sous tension, dans les chaînes d'isolateurs en forme de « T » et par effet de champ électrique où la concentration de la pollution est accentuée sur les isolateurs les plus proches de la borne haute tension.

Quant à la non-uniformité par secteur, elle est caractérisée par des bandes de différentes conductivités superficielles de la couche polluante. Ces bandes sont réparties suivant la circonférence de chaque isolateur. La conductivité dans chaque secteur est la même le long de toute la longueur de la ligne de fuite. Ce type de pollution est dû principalement à l'existence d'une direction privilégiée des vents et des pluies.

La non-uniformité longitudinale périodique est la plus fréquente. Elle est caractérisée par une variation périodique de la conductivité de la couche de pollution le long de la ligne de fuite, mais elle garde une symétrie circulaire. Ces principales spécifications, selon l'auteur, sont :

- La face inférieure de l'isolateur présente une conductivité plus grande que la face supérieure.
- La concentration de la pollution augmente de la zone périphérique vers la zone centrale.
- La pollution est plus accentuée entre les nervures.

Ces types de regroupement concernent une accumulation progressive de la pollution et ne peuvent pas rendre compte de l'accumulation aléatoire de la pollution en cas de conditions atmosphériques exceptionnelles, comme l'ont bien montré A.El-Arabaty et A.Nosseir [35], lorsqu'il s'agit de tempêtes de sable, par exemple.

II.3. PRINCIPAUX TRAVAUX SUR LA NON-UNIFORMITE

II.3.1. Travaux sur la non-uniformité longitudinale (ou par groupe)

Les travaux d'observation d'un grand nombre de chercheurs [36] sur les stations d'essais touchées par la pollution désertique, ont montré une grande similitude avec celles situées en bord de mer, malgré la nature différente des deux agents de pollution. Cette similitude a été démontrée, lorsque M.A.B.EL-Koshairy et al [36] ont observé, après une exposition de six mois de chaînes d'isolateurs, une densité de pollution maximale sur les isolateurs situés le plus près des conducteurs sous tension, alors qu'elle est minimale sur les éléments proches à la terre. En outre, ils ont constaté que lorsque la chaîne devient plus longue, le rapport entre la densité maximale et la densité minimale du dépôt polluant augmente. Ce qui accentue encore davantage la non-uniformité de la pollution le long de la chaîne. Ces mêmes auteurs, ont également montré que la quantité de pollution déposée sur un isolateur augmente lorsque la tension qui lui est appliquée augmente ; c'est ce qu'a voulu montrer D.A.Suift [37] dans les conditions marines.

Par ailleurs, des travaux portant sur l'état de distribution non-uniforme, d'une durée de trois ans ont été faits par A.EL-Arabaty et al [35]. Ces travaux ont concerné en plus du degré de pollution, la répartition de la pollution sur différents types d'isolateurs.

H.Streubel [34] affirme qu'il peut y avoir une diminution notable de la tension de contournement en fonction de la conductivité intrinsèque de chaque groupe. En prenant un isolateur à long fût possédant deux groupes de conductivités différentes, il a abouti aux constatations suivantes :

- Si seulement 50 à 60% de la ligne de fuite est recouverte par la conductivité la plus élevée, la tension de contournement chutera à une valeur proche de celle correspondant à la ligne de fuite complètement polluée, par la conductivité la plus élevée.
- Quand 80 à 85% de la ligne de fuite est couverte par la conductivité élevée, la tension de contournement devient plus faible que celle obtenue avec une couche uniforme de même conductivité.
- La tension de contournement totale est toujours inférieure à la somme des deux tensions de contournement partielles correspondant aux deux groupes de conductivités différentes.

L.E.Zaffanella et H.M.Schneider [38] ont effectué des essais comparatifs en tension continue sous pollution artificielle, entre des chaînes polluées d'une façon uniforme et des chaînes non-uniformément polluées. Leurs résultats montrent que la tension de contournement d'une chaîne uniformément polluée, avec la même densité du dépôt de sel équivalent (DDSE), était de 20 % inférieure à celle de la chaîne non-uniformément polluée. Ils ont montré également que la tension de contournement des chaînes non-uniformément polluées est égale à la somme de celle de chacun de ses composants. Il est ainsi possible d'additionner les tensions de contournement de chaque isolateur ou de diviser la chaîne en plusieurs parties et de calculer la tension d'amorçage de la chaîne complète par sommation.

R. Sundararajan et S. Gorur [39] ont appliqué leur programme de calcul pour deux chaînes d'isolateurs, composées respectivement de 12 et de 25 éléments, où chaque élément est affecté d'une valeur de DDSE qui dépend de sa position par rapport au conducteur haute tension. Cette valeur sera inspirée des résultats expérimentaux déjà effectués par T.C.Cheng et I.Kimoto [40, 41]. Ils ont comparé leurs résultats à ceux obtenus dans le cas d'une répartition uniforme où une moyenne arithmétique de toutes les DDSE de chaque élément est établie, puis les auteurs ont calculé la tension de contournement équivalente si, tous les éléments possédaient la même DDSE (celle-ci étant donc la moyenne calculée au préalable). Ces auteurs ont constaté que :

- Pour la chaîne de 25 isolateurs, la rigidité diélectrique correspondant à une distribution non-uniforme des couches polluantes, est légèrement plus élevée que celle correspondant à une distribution uniforme. Pour celle de 12 éléments, la rigidité diélectrique est pratiquement la même dans les deux cas de distribution.
- Une assez bonne corrélation a été obtenue en comparant les résultats théoriques à ceux expérimentaux, pour la chaîne de 12 éléments.
- La rigidité dans le cas non-uniforme est toujours supérieure ou égale à celle où la distribution est uniforme.

II.3.2. Travaux sur la non-uniformité par secteur

D'après H.Streubel [34], dans le cas extrême où seulement un demi, un quart ou un huitième de la circonférence de l'isolateur est contaminée (le reste étant propre), on obtient une légère augmentation de la tension de contournement par rapport à celle mesurée sur un isolateur entièrement pollué. La différence n'est considérable que si la pollution est réduite à 10° de la circonférence (360°). Ces constatations sont contradictoires aux études théoriques dont on estime que la tension de contournement est proportionnelle à l'angle du secteur pollué. Il souligne aussi que, lorsque la pollution est constituée par plus d'un secteur pollué, la tension de contournement est imposée par le secteur de plus grande conductivité.

II.3.3. Travaux sur la non-uniformité longitudinale périodique

T.Keller-Jacobsen et al [42] ont effectué des travaux sur sites situés dans les régions côtières. Ils ont utilisé la méthode de DDSE en prenant soin de différencier le côté dessus du côté dessous de l'isolateur. Ils ont remarqué outre les principales spécifications déjà citées, que les isolateurs à long fût avec les dessous de l'isolateur nervurés recevront plus de dépôts.

Quant à H.Streubel [34], il a obtenu des résultats assez différents, lorsqu'il a tenté d'étudier l'effet d'une pollution non-uniforme appliquée à un isolateur à long fut. Ses travaux ont conduit aux résultats et remarques suivants :

- Pour une conductivité γ_o de la face supérieure de l'ailette constante, et une conductivité γ_u variable de la face inférieure et le corps de l'isolateur ($\gamma_o/\gamma_u < 1$), la tension de contournement aura une valeur maximale correspondant à un rapport de conductivité γ_o/γ_u proche de 1. Ce rapport désigne la répartition uniforme.
- En augmentant la conductivité γ_o de la face supérieure et en gardant la conductivité de la face inférieure et du corps γ_u constante, on remarque une nette décroissance de la tension de contournement à partir du rapport $\gamma_o/\gamma_u = 1$.
- La tension de contournement tend vers une valeur limite quand la conductivité d'une portion de la ligne de fuite tend vers l'infini et correspond ainsi à la tension de contournement de la partie de faible conductivité.

L.E.Zaffanella et H.M.Schneider [38] ont établi la variation de la tension de contournement en fonction de la DDSE supérieure. Pour cela, la face supérieure de l'isolateur est polluée de manière à varier le rapport n représentant la DDSE du dessus de l'isolateur sur celle du dessous. La DDSE de la face inférieure est maintenue constante. Grâce aux propriétés d'auto-nettoyage plus élevées de la partie supérieure de l'isolateur, le rapport n est souvent inférieur à 1. C'est pourquoi, ils ont choisi n entre 0.05 et 1. Ces auteurs ont conclu que, la non-uniformité de la couche polluante conduit à une rigidité supérieure ou égale à la rigidité obtenue dans le cas de la distribution continue ; la meilleure rigidité est obtenue pour le rapport n le plus réduit. Des résultats similaires ont été obtenus expérimentalement par d'autres auteurs [39, 43-45].

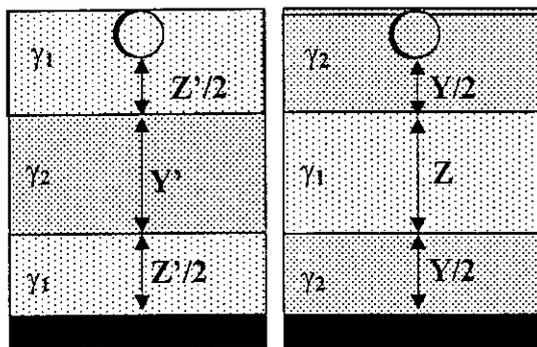
Par ailleurs, S.Djafri et R.Boudissa [45], ont effectué des essais de pollution artificielle sur des isolateurs à ailettes. La pollution, dans ce cas, est réalisée en portant simultanément, à l'aide d'un pinceau, des solutions de conductivités différentes en plusieurs endroits judicieusement choisis, sur la surface de l'isolateur. Deux variantes de non-uniformité ont été étudiées. La première consiste à polluer fortement le tronc ainsi que la face supérieure des ailettes pendant que la face inférieure de celle-ci est faiblement polluée. La seconde consiste à polluer fortement les ailettes et faiblement le tronc. Les auteurs n'ont pas pris en considération le fait qu'en pratique, la face inférieure de l'isolateur est la plus touchée par la pollution. Néanmoins, ils ont pu mettre en évidence un résultat très intéressant se rapportant au fait que la non-uniformité de la pollution engendre un raccourcissement de l'arc électrique. En effet, au lieu de se propager le long de la ligne de fuite de l'isolateur, comme dans le cas de la pollution uniforme, l'arc s'écarte de la surface de celui-ci pour court-circuiter finalement une partie ou la totalité du tronçon situé entre le tronc et la face inférieure de l'ailette. D'autre part, ils ont constaté une diminution sensible de la tension linéique de contournement par rapport à celle mesurée sur ce même isolateur uniformément pollué, à faible conductivité. Cette diminution est croissante en fonction du degré de non-uniformité (rapport entre la faible et la forte conductivités) de la couche de pollution.

II.4. MODELE EXPERIMENTAL

La seule différence dans l'objet d'essai par rapport à celui déjà utilisé dans la cas de la pollution discontinue consiste en la distance inter-électrodes du modèle de laboratoire qui est

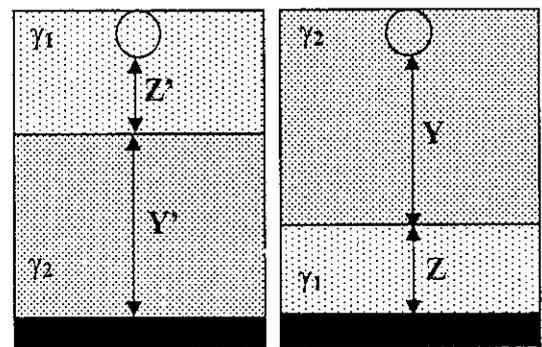
égale cette fois-ci à 400 mm. Cette longueur de fuite nous a facilité en fait les observations et les mesures nécessaires à l'analyse des phénomènes d'apparition et de propagation des arcs à la surface du modèle expérimental.

Deux configurations de la pollution sont considérées. Chacune d'elles possède deux dispositions distinctes des couches polluantes. Dans la première configuration (Fig. II.1), trois couches de pollution (eau distillée et chlorure de sodium) ont été appliquées. Les couches qui sont situées près des électrodes sont identiques (mêmes conductivité et dimensions). Par contre, celle au milieu possède une conductivité différente. Dans une première disposition, la couche faiblement conductrice est située des deux côtés de la plaque isolante, contrairement à la seconde où cette couche est appliquée au milieu. Concernant la deuxième configuration, nous considérons deux milieux de conductivités différentes. La couche fortement conductrice est totalement établie du côté terre, pour une première disposition et du côté haute tension, pour la seconde (Fig. II.2). Les couches fortement conductrices ont une conductivité de $420 \mu\text{S/cm}$ et les couches faiblement conductrices ont une conductivité de $42 \mu\text{S/cm}$.



(a) Disposition 1 (b) Disposition 2

Fig. II.1 : Première configuration



(a) Disposition 1 (b) Disposition 2

Fig. II.2 : Deuxième configuration

où :

Y ou Y' : la longueur de la partie fortement conductrice ($\gamma_2=420 \mu\text{S/cm}$), Z ou Z' : la longueur de la partie faiblement conductrice ($\gamma_1=42 \mu\text{S/cm}$).

II.4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Pour chaque longueur Y' et chaque position de la couche fortement conductrice, nous avons procédé d'abord à la mesure de la tension de contournement pour différentes longueurs de la zone la plus conductrice. Cette mesure nous a permis non seulement de déterminer l'influence des paramètres auxquels est soumis le modèle expérimental sur la tension de contournement, mais aussi de prévoir les paliers de tension à appliquer pour l'enregistrement du courant de fuite et de la longueur de l'arc électrique. Cinq niveaux de tension (8, 16, 24, 32 et 40 kV) ont été considérés. L'enregistrement de l'arc électrique est effectué à l'aide d'un appareil photographique numérique permettant l'enregistrement des séquences vidéo de 15 secondes. Notons que la tension est appliquée de manière croissante (2 kV/s), jusqu'au palier de tension désiré.

II.4.1. Tension de contournement

Les variations de la tension de contournement en fonction de la longueur et de la position de la partie fortement conductrice sont présentées à la figure (II.3).

Pour tous les cas considérés, nous constatons que la tension de contournement diminue avec la croissance de la longueur de la couche la plus conductrice. Ce résultat est prévisible, car l'augmentation de la longueur de la couche à forte conductivité provoque la diminution de l'impédance équivalente totale vue des électrodes, engendrant ainsi la dégradation de la tenue diélectrique du système.

Cependant, Pour les deux dispositions de la deuxième configuration, cette figure montre une légère augmentation de la tension de contournement pour des longueurs de la couche fortement conductrice dépassant sept huitième (soit 87.5 %) de la ligne de fuite totale du modèle. Ce résultat confirme la constatation faite par H.Streubel [34], lorsqu'il a trouvé que la tension de contournement présente un minimum quand 80 à 85 % de la distance inter-électrodes est couverte par la couche fortement conductrice. Ce minimum, observé également par d'autres chercheurs [4, 11, 46-48] à des longueurs différentes de la couche discontinue de la pollution selon la nature des contraintes appliquées, correspondrait au cas le plus favorable à la formation rapide des arcs électrique et donc un contournement plus probable.

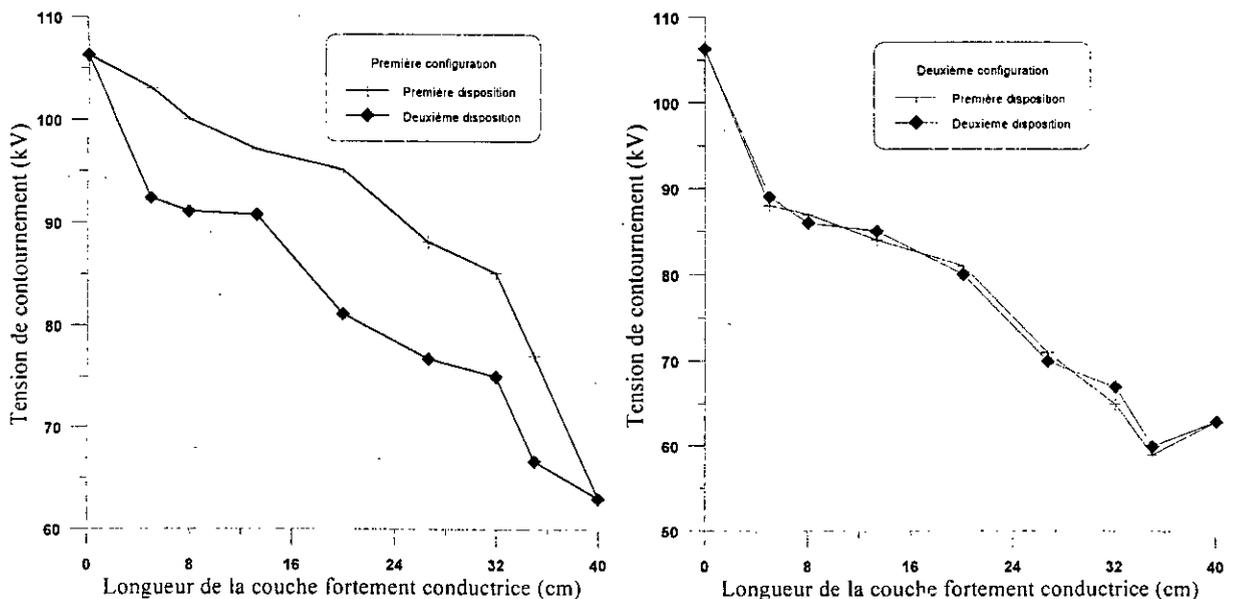


Fig. II.3 : Tension de contournement – longueur de la couche fortement conductrice

Cette figure montre également que, pour la deuxième configuration, la tension de contournement est pratiquement insensible à la position des deux couches polluées par rapport aux électrodes. Cette constatation a été déjà prouvée par d'autres chercheurs [4, 11] pour une pollution discontinue. En effet, la position de la couche la plus conductrice n'a pratiquement pas d'influence sur la tension de contournement des surfaces isolantes soumises à ce genre de configurations de la pollution.

Par ailleurs, pour une même longueur de la couche la plus conductrice, la tension de contournement, dans le cas de la première configuration, est supérieure lorsque cette couche est située au milieu de la plaque isolante. Ce qui veut dire que le système avec cette disposition de la pollution est plus rigide.

A la figure (II.4), nous présentons la variation de la tension de contournement moyenne en fonction de la longueur de la couche fortement conductrice. Les valeurs de la tension de contournement correspondent dans ce cas à la moyenne arithmétique des valeurs des deux dispositions présentées pour chaque configuration.

D'après cette figure, nous constatons de manière globale que la première configuration est plus rigide, car elle présente des tensions de contournement plus importantes (Fig. II.4). Ainsi, les isolateurs sont plus rigides lorsque les couches de pollution de même conductivité sont réparties que lorsqu'elles sont adjacentes. Une constatation analogue a été faite par d'autres auteurs [49], pour une pollution discontinue.

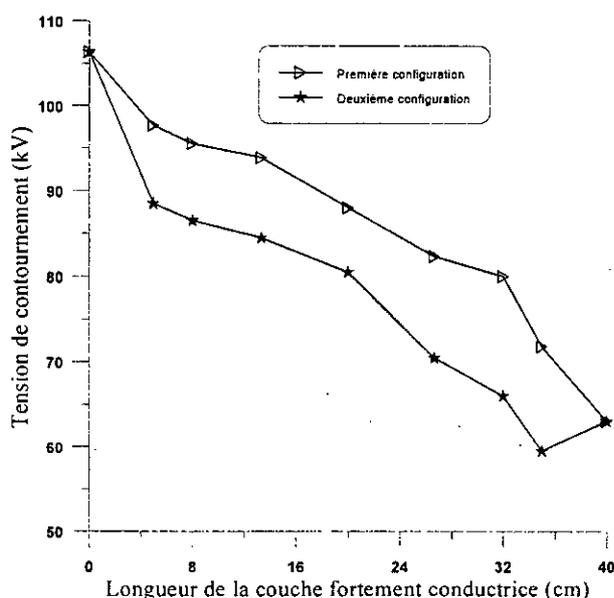
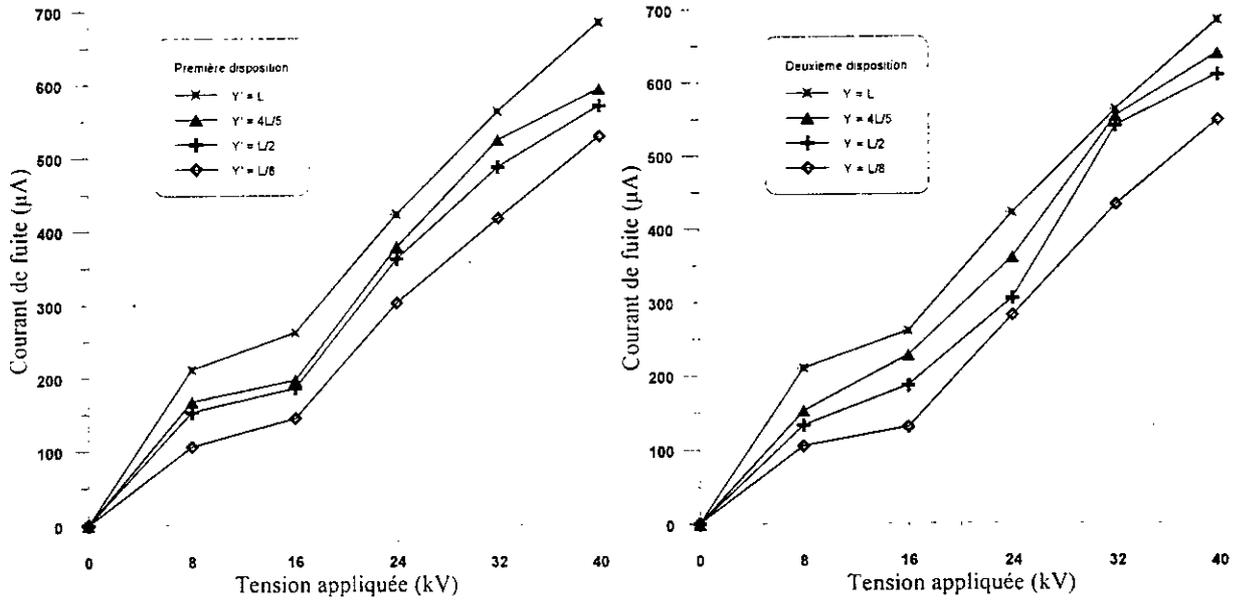


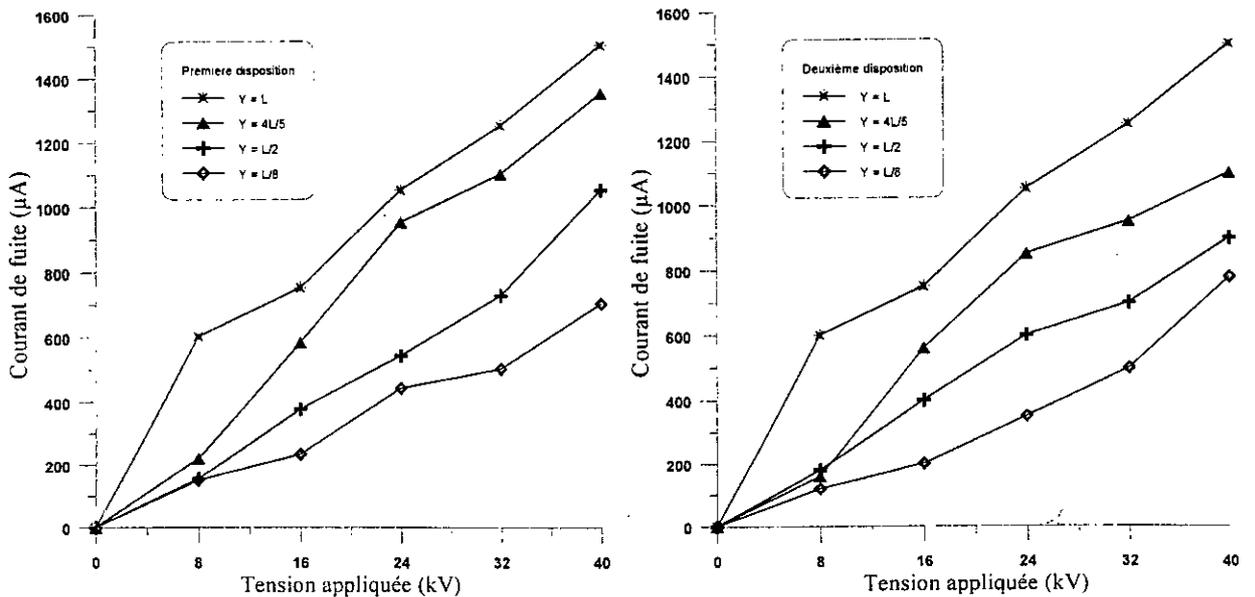
Fig. II.4 : Tension moyenne de contournement moyenne – longueur de la couche fortement conductrice

II.4.2. Amplitude du courant de fuite

Pour les configurations et les dispositions considérées, les caractéristiques donnant la variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension d'alimentation montrent que, pour toutes les longueurs de la couche à forte conductivité ainsi que la position de cette couche par rapport aux électrodes, l'amplitude du courant de fuite augmente avec la tension appliquée (Fig. II.5).



(a) Première configuration



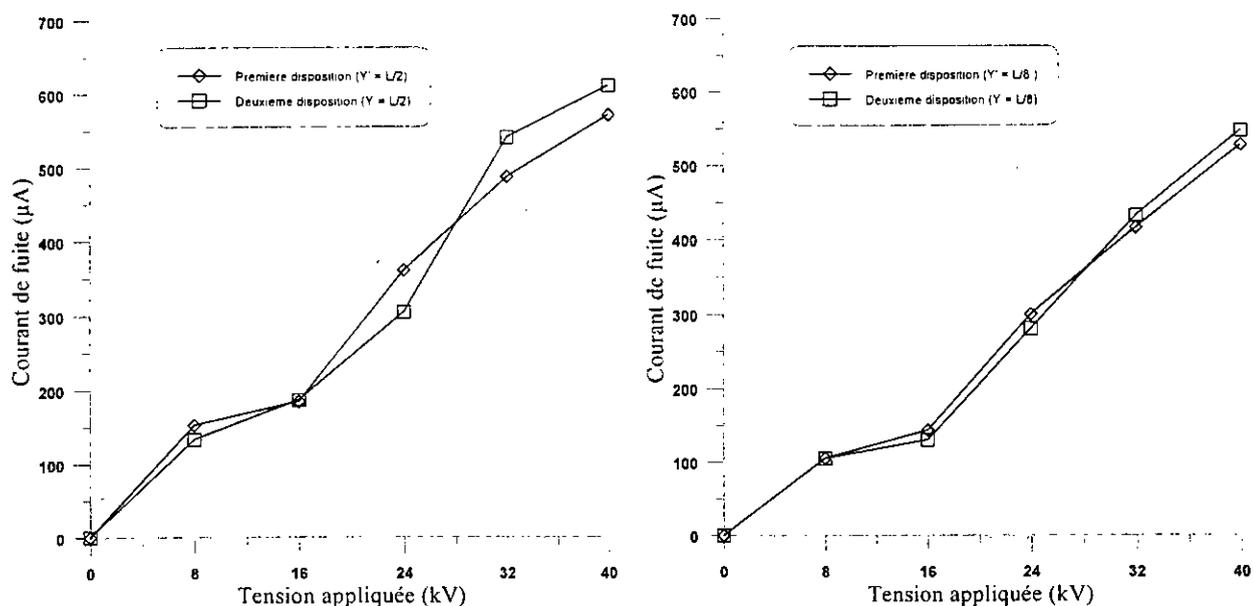
(b) Deuxième configuration

Fig. II.5 : Amplitude du courant de fuite – tension appliquée, pour chaque disposition et chaque configuration

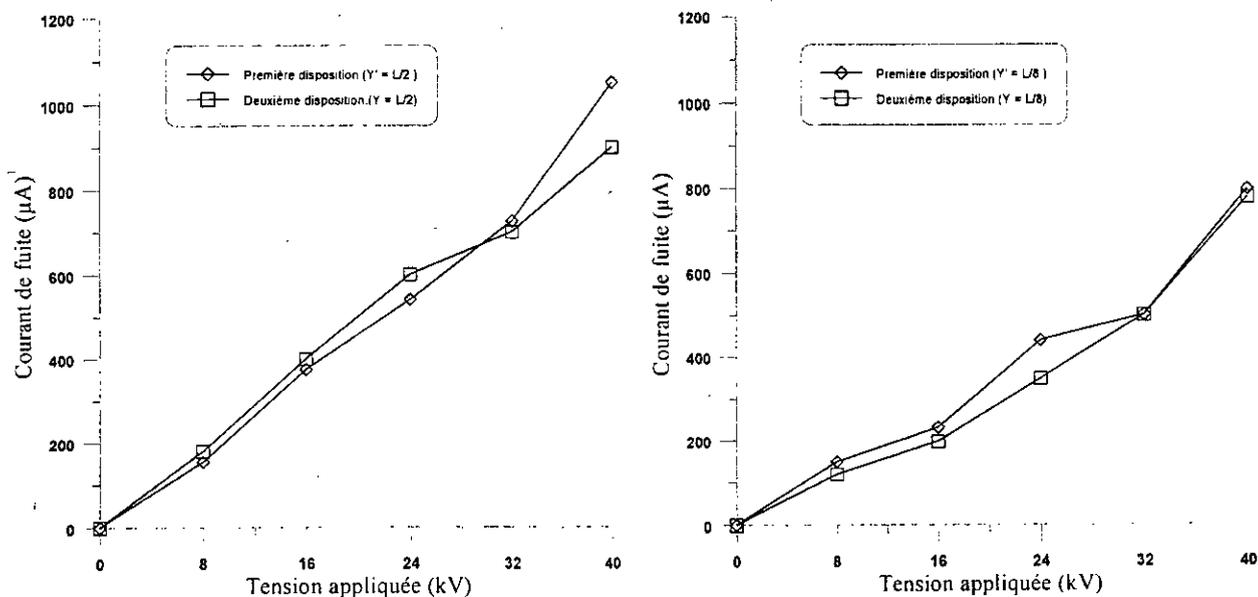
Pour la première configuration, la figure (II.6) montre que pour les niveaux de tension inférieurs à 30kV, les amplitudes du courant de fuite ont approximativement les mêmes valeurs, quelle que soit la position de la couche la plus conductrice. En effet, la position de cette couche n'a pratiquement pas d'influence sur l'évolution du courant de fuite, pour cette

gamme de la tension appliquée. Cependant, et à partir de 30 kV, nous remarquons un léger dépassement dans le cas où la couche la plus conductrice est située au milieu.

Par ailleurs, pour les deux dispositions de la deuxième configuration, les amplitudes du courant de fuite sont très proches pour les niveaux de tension ne dépassant pas 32 kV. Cependant, pour des niveaux de tension élevés, l'amplitude du courant de fuite correspondant au cas où la pollution la plus conductrice est du côté terre est plus importante que celle obtenue dans le cas où la même couche est située du côté haute tension (Fig. II.6).



(a) Première configuration



(b) Deuxième configuration

Fig. II.6 : Effet de la position de la couche fortement conductrice sur la caractéristique amplitude du courant de fuite – tension appliquée

La figure (II.7) montre la variation de l'amplitude moyenne du courant de fuite en fonction de la tension appliquée et ce pour les deux dispositions et les deux configurations choisies. Pour une configuration donnée, chaque valeur de l'amplitude du courant de fuite représente la moyenne arithmétique des valeurs des deux dispositions. En comparant, pour une longueur donnée de la couche fortement conductrice, les résultats des deux configurations, nous constatons que pour un même niveau de tension, l'amplitude du courant de fuite de la deuxième configuration est nettement supérieure à celle obtenue dans le cas de la première configuration. L'écart entre elles augmente avec la longueur de la couche fortement conductrice.

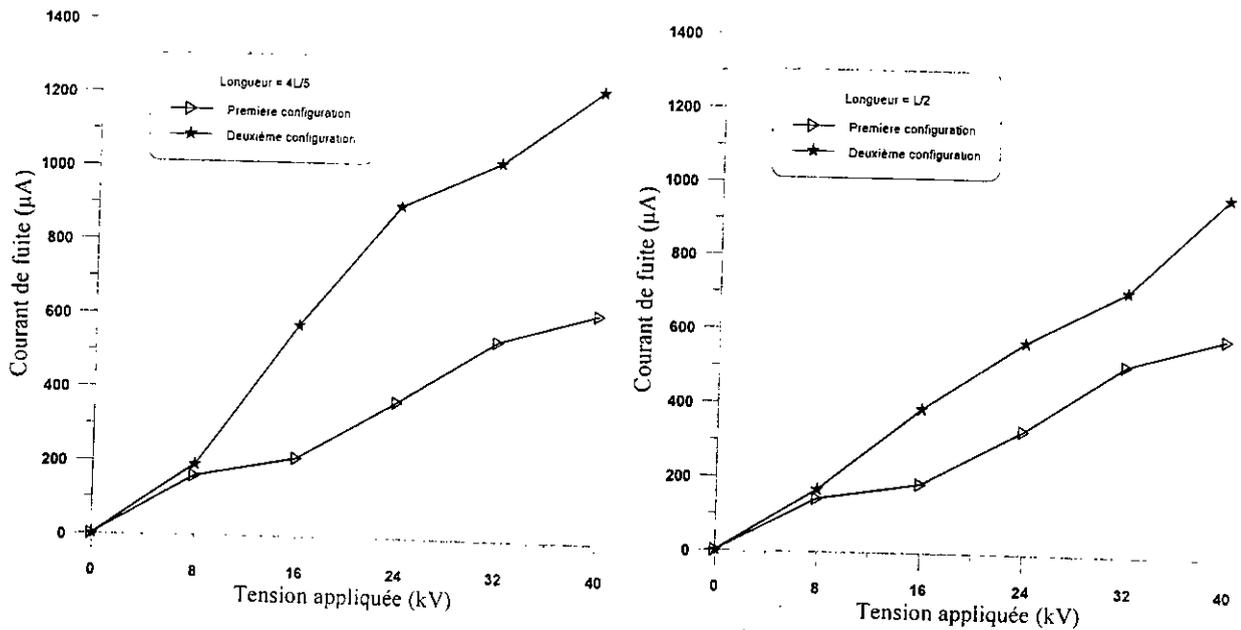
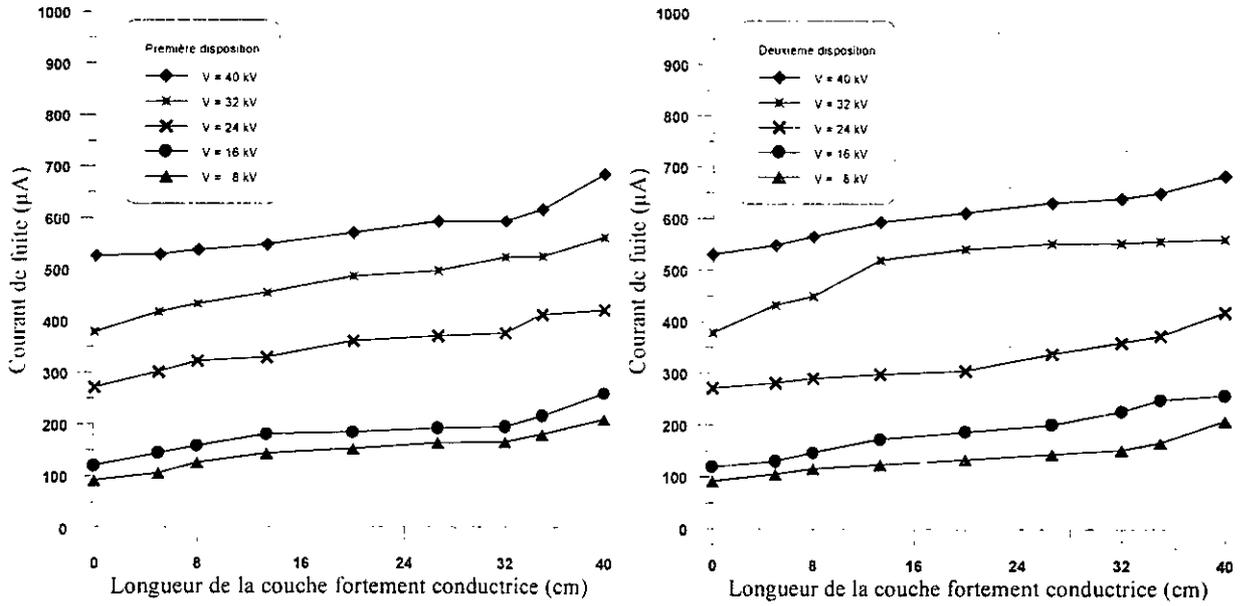
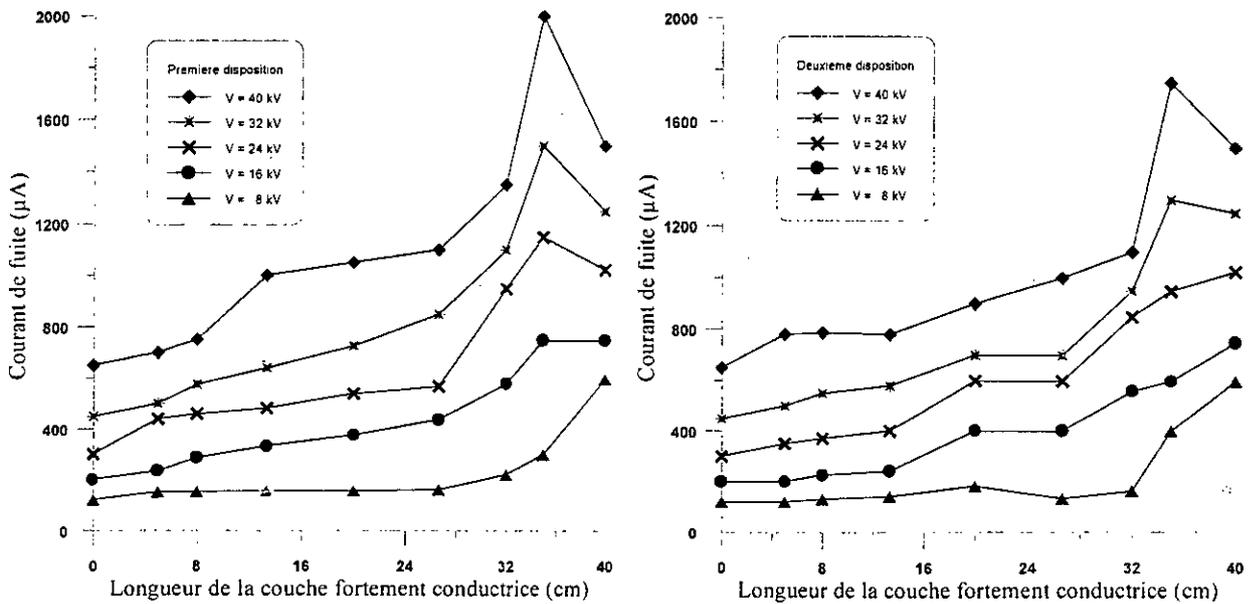


Fig. II.7 : Comparaison de la caractéristique amplitude moyenne du courant de fuite – tension appliquée entre les deux configurations

La figure (II.8) montre l'évolution de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la longueur de la couche la plus conductrice, et ce pour chaque niveau de tension. Pour la première configuration et dans les limites des tensions adoptées, nous remarquons une légère augmentation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la longueur de la couche fortement conductrice. Etant donné que l'allongement de la couche la plus conductrice engendre la diminution de l'impédance totale du modèle, le courant de fuite augmente. Cette augmentation est assez importante dans la deuxième configuration. Dans ce cas et à partir d'un certain seuil de la tension appliquée, égal à 24 kV pour la première disposition et à 32 kV pour la deuxième, ces caractéristiques présentent un maximum lorsque la longueur de la couche la plus conductrice atteint 35 cm. Ce phénomène est observé pour les deux dispositions de la couche polluante. Ce maximum correspondrait à la position la plus favorable à la formation rapide d'arcs électriques.



(a) Première configuration



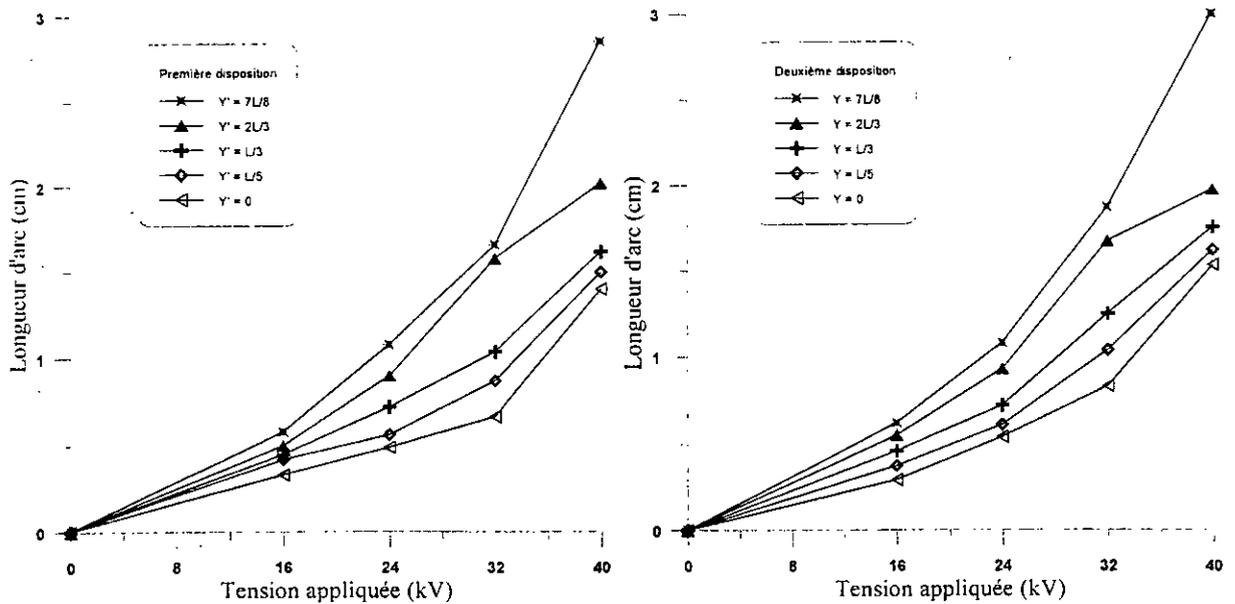
(b) Deuxième configuration

Fig. II.8 : Amplitude du courant de fuite – largeur de la couche fortement conductrice

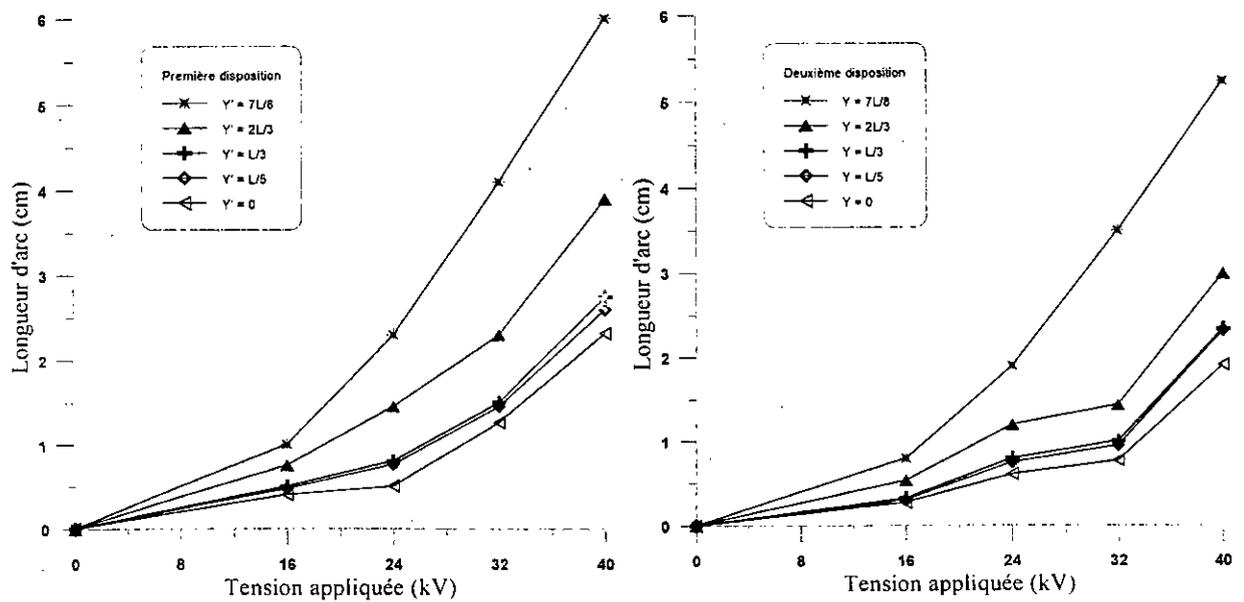
II.4.3. Longueur d'arc

La figure (II.9) donne la variation de la longueur d'arc en fonction de la tension appliquée, pour différentes configurations, dispositions et longueurs de la couche fortement conductrice. De même que pour le courant de fuite, nous observons une augmentation

régulière de la longueur d'arc avec la tension appliquée. En effet, l'augmentation de la tension engendre la croissance de l'énergie électrique apparaissant dans l'arc, ce qui provoque son allongement.



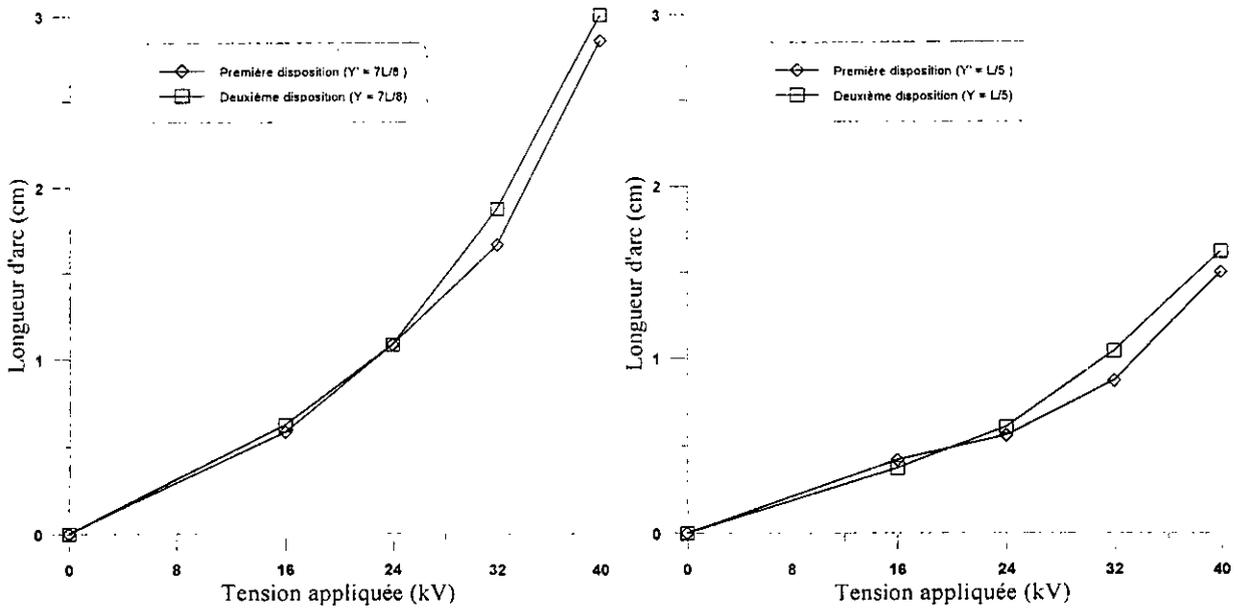
(a) Première configuration



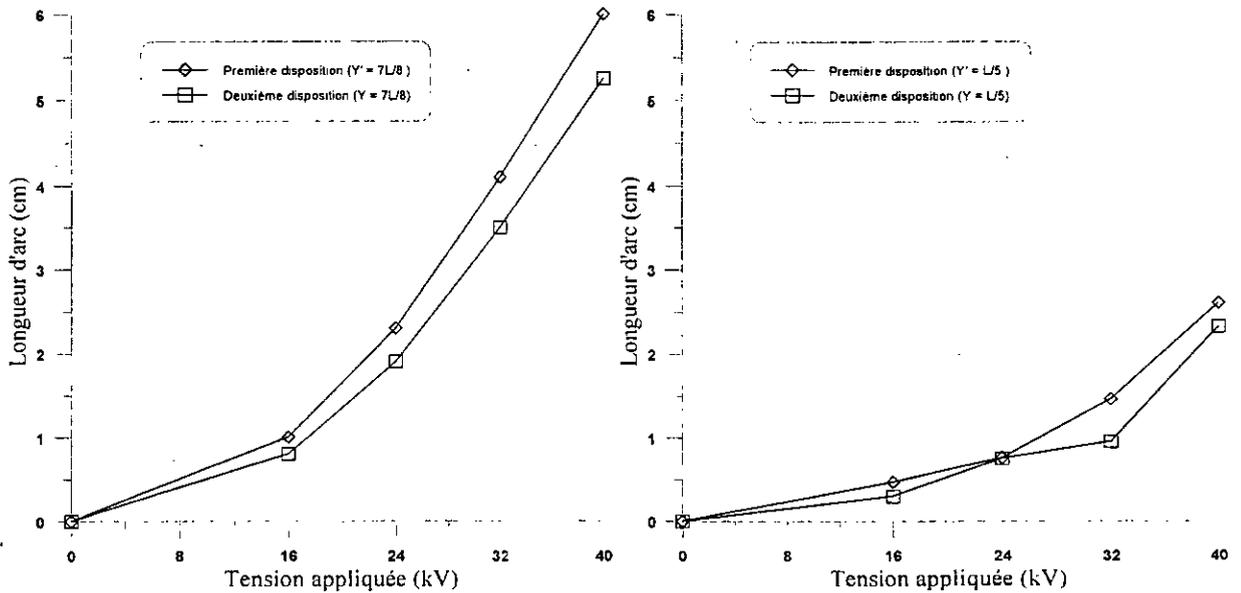
(b) Deuxième configuration

Fig. II.9 : Longueur d'arc – tension appliquée pour chaque disposition et chaque configuration

Pour une configuration donnée, l'influence de la position de la couche fortement conductrice sur la longueur de l'arc électrique est observée uniquement pour des tensions élevées (Fig. II.10). Dans ces conditions et pour la première configuration, la même figure montre que la longueur d'arc est légèrement plus grande lorsque la couche à forte conductivité est située au milieu. Par ailleurs, pour la deuxième configuration, la longueur de l'arc est plus importante lorsque la pollution la plus conductrice est établie côté terre.



(a) Première configuration



(b) Deuxième configuration

Fig. II.10 : Effet de la position de la couche fortement conductrice sur la caractéristique longueur d'arc – tension appliquée

Pour chaque configuration, nous avons présenté à la figure (II.11) la longueur de l'arc électrique moyenne. Cette dernière correspond à la moyenne arithmétique des valeurs obtenues dans le cas des deux dispositions considérées. Pour une même tension, nous constatons, d'après la figure (II.11), que la longueur de l'arc électrique obtenue dans le cas de la deuxième configuration est plus importante à celle de la première configuration. L'écart entre elles augmente avec la longueur de la couche fortement conductrice.

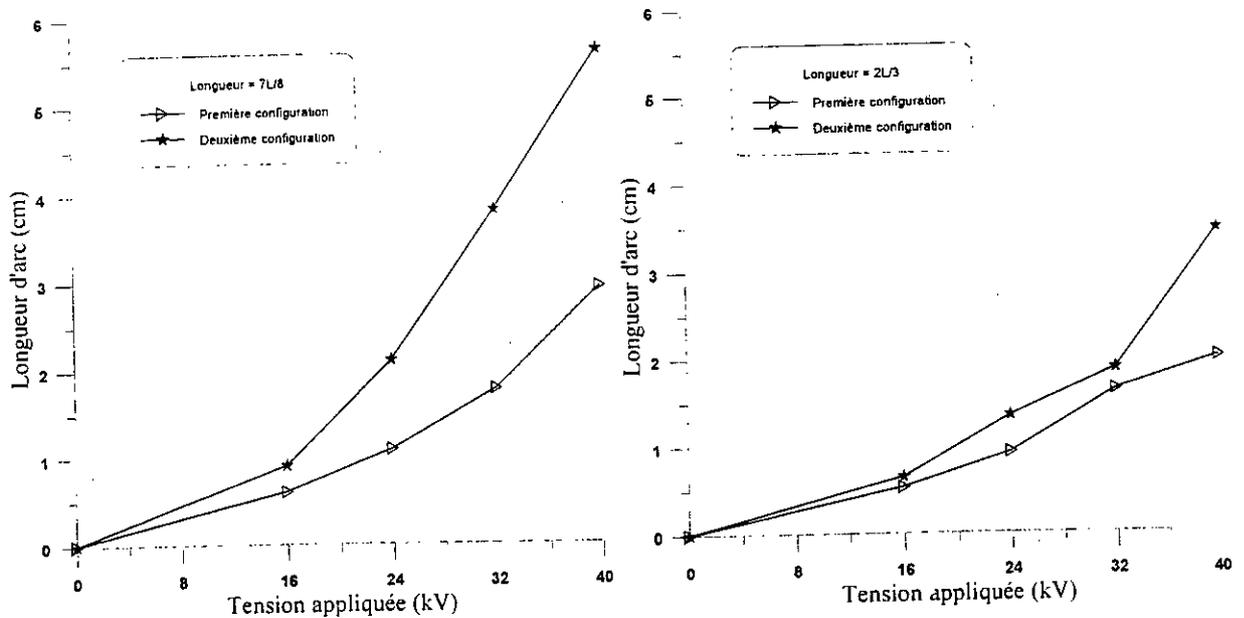
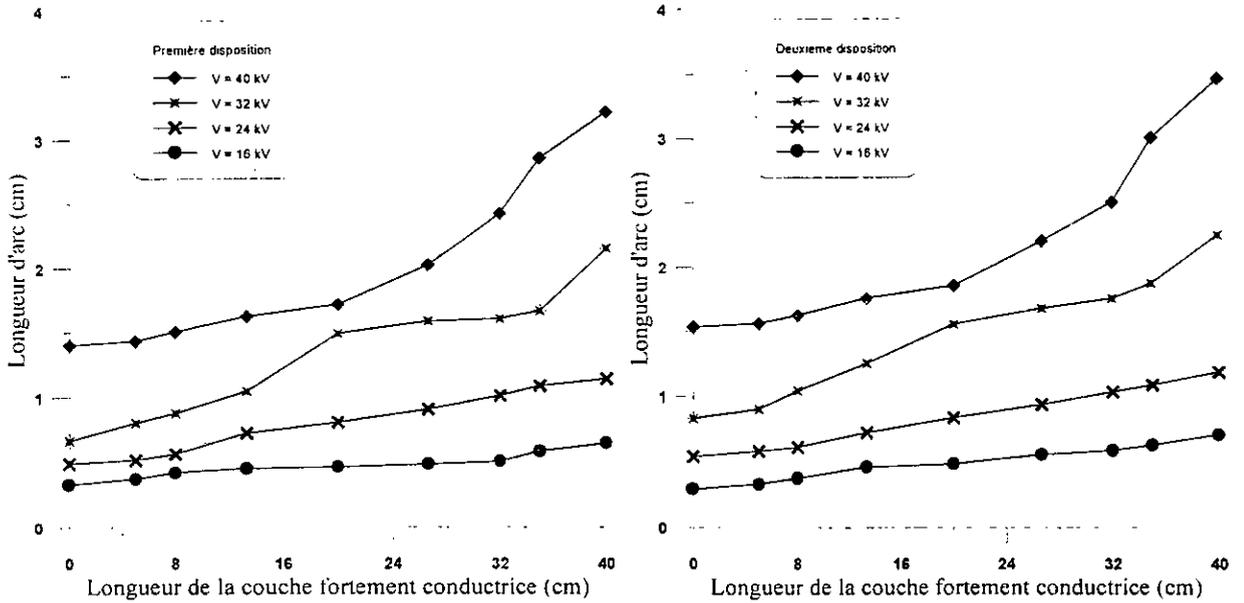


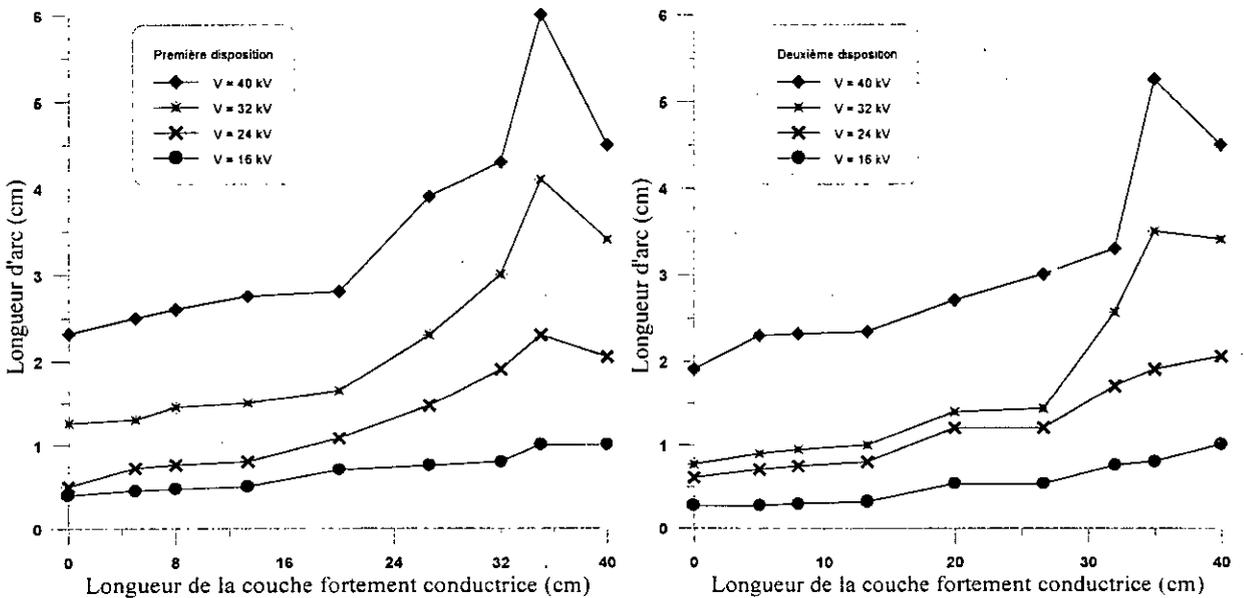
Fig. II.11 : Comparaison de la caractéristique longueur d'arc moyenne – tension appliquée entre les deux configurations

La figure (II.12) montre la variation de la longueur d'arc en fonction de la longueur de la couche fortement conductrice, pour différents niveaux de tension. Nous observons, pour la première configuration, un allongement de l'arc électrique quand la longueur de la couche fortement conductrice augmente. Cet allongement de l'arc est assez important dans la deuxième configuration. Dans ce cas et pour des tensions importantes (24 kV pour la première disposition et 32 kV pour la deuxième), la longueur de l'arc passe par un maximum puis diminue lorsque la longueur de la couche à forte conductivité dépasse 35 cm. En raison de la tension reportée à ces bornes, la couche de pollution avec la conductivité faible, ayant une longueur ne dépassant pas un huitième (soit 5 cm) de la ligne de fuite du modèle, a tendance à être court-circuitée rapidement. Dans ces conditions, l'arc électrique présente des longueurs plus importantes, même face à une répartition de pollution uniforme faite par la grande conductivité. Ce qui explique la présence des maxima pour une longueur de sept huitième (35 cm) de la couche avec la plus grande conductivité.

Par ailleurs, à cause de sa courbure et en présence d'une couche faiblement polluée du côté haute tension, l'électrode active provoque un champ électrique intense provoquant l'assèchement de cette couche et donc la création rapide d'un arc électrique. Cependant, lorsque la couche faiblement conductrice est répartie, la tension reportée sera divisée, ce qui engendre l'augmentation de la rigidité du système, et donc des longueurs d'arc moins importantes.



(a) Première configuration



(b) Deuxième configuration

Fig. II.12 : Longueur d'arc – longueur de la couche fortement conductrice

Finalement, il est intéressant de noter que l'arc électrique présente un même comportement que celui du courant de fuite en fonction des paramètres auxquels est soumis le modèle expérimental. D'autre part, la pollution non-uniforme ne correspond pas forcément à une meilleure rigidité par rapport à une répartition uniforme.

II.5. MODELE THEORIQUE

Afin de faire une analyse quantitative des phénomènes d'arcs se produisant sur des surfaces isolantes contaminées par une pollution non-uniforme, nous avons élaboré un algorithme de calcul basé sur un travail antérieur [6].

Cet algorithme permet d'obtenir certaines grandeurs importantes caractérisant le comportement des surfaces isolantes non-uniformément polluées. Nous montrons qu'il est possible de surveiller la sévérité de pollution des isolateurs en se basant simplement sur la mesure du courant de fuite. Cela permet l'intervention à temps pour éviter les dégâts engendrés par le contournement sous pollution.

La simulation que nous allons présenter est valable pour toutes les configurations et les dispositions choisies. Comme application, nous nous intéressons à la première disposition de la deuxième configuration. Pour valider ainsi notre simulation, nous comparons dans ces conditions les résultats théoriques à ceux obtenus expérimentalement.

II.5.1. Hypothèses simplificatrices

Les différentes hypothèses adoptées sont les suivantes :

- Les couches de pollution sont représentées par des résistances.
- Il existe un seul arc dominant parmi tous les arcs multiples qui apparaissent sur la surface polluante.
- L'arc électrique se développe le long de l'axe $\alpha\alpha'$ perpendiculaire à l'électrode de terre (Fig. II.13).
- Pour chaque zone de pollution, la conductivité appropriée est la même en tous points.

II.5.2. Mise en équations

Nous considérons que le modèle de laboratoire, pour la configuration et la disposition choisies, est pollué par une couche continue de pollution constituée de deux parties de conductivités différentes $\gamma_1=42 \mu\text{S/cm}$ et $\gamma_2=420 \mu\text{S/cm}$ et partiellement contourné par un arc de longueur x (Fig. II.13).

Comme la tension appliquée se trouve reportée aux bornes de la couche de pollution la moins conductrice, l'arc électrique s'initie dans cette zone, il se développe jusqu'à la court-circuiter, pénètre par la suite dans la deuxième couche de forte conductivité, avant qu'il ne provoque le contournement total.

Ainsi, le modèle de laboratoire proposé peut être représenté par un circuit électrique équivalent, constitué d'un arc dont la tension à ces bornes est U_{arc} en série avec deux résistances $R_{P1}(x)$ et $R_{P2}(x)$ représentant les portions des deux couches polluantes non court-circuitées par la décharge électrique de conductivités respectives γ_1 et γ_2 . Nous obtenons ainsi le circuit électrique équivalent représenté à la figure (II.14).

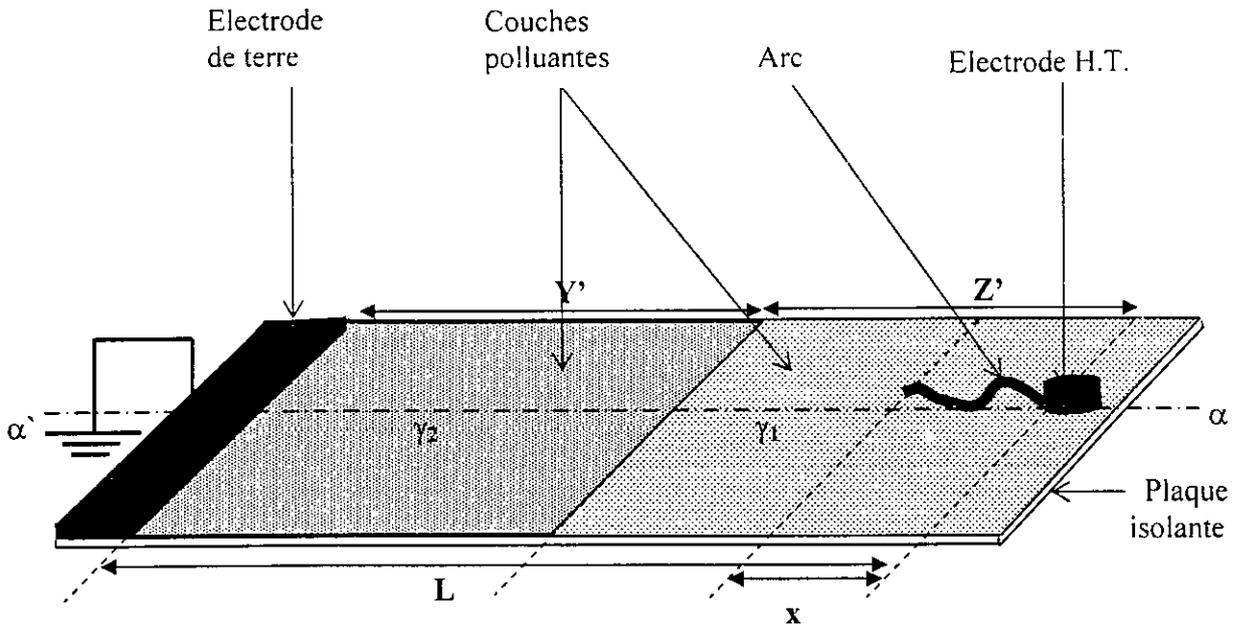


Fig. II.13. Modèle d'étude

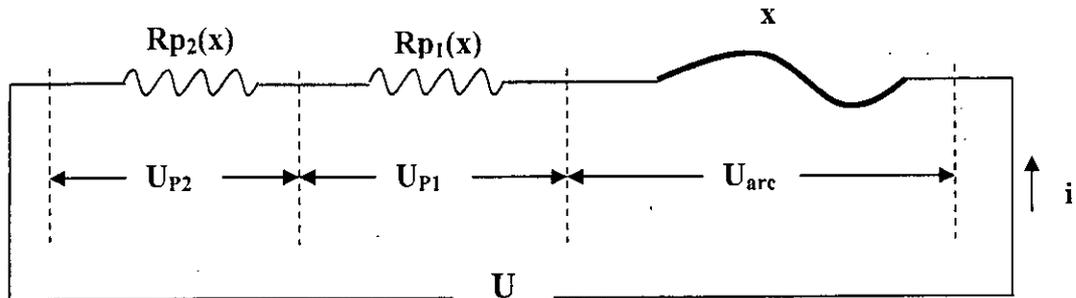


Fig. II.14 : Circuit électrique équivalent

avec :

U_{arc} : la tension de l'arc électrique.

U_{p1} : la tension entre le pied de l'arc et la limite de la couche de conductivité γ_1 .

U_{p2} : la tension aux bornes de la partie de la couche de conductivité γ_2 .

i : le courant de fuite qui traverse les résistances équivalentes aux deux couches.

U : la tension appliquée à la plaque isolante.

x : la longueur de l'arc électrique.

En négligeant la chute de tension cumulée aux électrodes [6, 8, 50], l'équation électrique de ce circuit sera donnée par :

$$U = U_{arc} + U_{p1} + U_{p2} \quad (II.1)$$

Les résistances $R_{p1}(x)$ et $R_{p2}(x)$ équivalentes des deux parties de la couche polluante dépendent de la position, de la longueur et de la direction de l'arc, de la forme géométrique de la surface isolante ainsi que des conductivités et des largeurs des deux zones polluées.

Selon B.F.Hampton [51], l'expression approximative de la tension d'arc U_{arc} est donnée par l'expression empirique suivante :

$$U_{arc} = \frac{Ax}{i^n} \quad (II.2)$$

avec A et n des constantes caractéristiques de l'arc électrique.

En remplaçant chaque terme dans l'équation (II.1) par son équivalent, nous trouvons :

$$U = \frac{Ax}{i^n} + R_{p1}(x)i + R_{p2}(x)i \quad (II.3)$$

Par ailleurs, la condition de réamorçage de l'arc, après chaque alternance est [3, 6, 8, 52, 53] :

$$U \geq \frac{Kx}{i^n} \quad (II.4)$$

où K et n sont les constantes caractéristiques statiques de l'arc électrique.

La relation limite entre la tension appliquée U, le courant maximal de fuite I et la longueur maximale d'arc X est par conséquent :

$$UI^n = KX \quad (II.5)$$

Cette relation est valable quelles que soient les conductivités et la répartition de la couche polluante.

Eliminant le courant entre les équations (II.3) et (II.5), nous trouverons la relation suivante :

$$U = \frac{K}{(K - A)^{\frac{n}{n+1}}} \left\{ X^{\frac{1}{n}} [R_{p1}(X) + R_{p2}(X)] \right\}^{\frac{n}{n+1}} \quad (II.6)$$

Cette dernière expression présente un maximum U_C dit tension critique, qui apparaît comme la tension qui ne saurait être dépassée sans que le contournement ne se produise. L'expression de cette tension est la suivante :

$$U_C = \frac{K}{(K - A)^{\frac{n}{n+1}}} \left\{ X_C^{\frac{1}{n}} [R_{p1}(X_C) + R_{p2}(X_C)] \right\}^{\frac{n}{n+1}} \quad (II.7)$$

Il est clair que la tension critique est obtenue pour une certaine longueur (notée X_C) de la décharge électrique appelée longueur critique. Cette dernière représente la racine de :

$$\frac{d \left[X^n [R_{p1}(X) + R_{p2}(X)] \right]}{dX} = 0 \quad (\text{II.8})$$

A partir de l'équation (II.5), nous déduisons le courant de fuite maximal critique :

$$I_C = \left[\frac{KX_C}{U_C} \right]^n \quad (\text{II.9})$$

Nous définissons le coefficient de sécurité par le rapport de la tension appliquée U correspondant au degré de pollution actuel de l'isolement considéré à la tension critique U_C :

$$C_s = \frac{U}{U_C} = \left\{ \frac{X^n [R_{p1}(X) + R_{p2}(X)]}{X_C^n [R_{p1}(X_C) + R_{p2}(X_C)]} \right\}^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{II.10})$$

II.5.3. Simulation numérique

Afin d'étudier le développement des décharges électriques sur des surfaces non uniformément polluées, notre modèle est basé sur le calcul de la résistance du circuit électrique équivalent [53].

Pour chaque largeur Y' de la partie fortement conductrice et en appliquant différents niveaux de tension d'alimentation, la mesure expérimentale du courant de fuite et de la longueur de l'arc électrique permet la détermination des constantes caractéristiques statiques K et n relatives à l'arc électrique, et ce en utilisant un logiciel approprié (Matlab, Eureka, ...).

Nous procédons par la suite, à la détermination de la somme des résistances caractérisant le circuit équivalent, à partir des valeurs du courant de fuite et de la tension d'alimentation, puisque les équations (II.3) et (II.5) permettent d'écrire :

$$R_{PT}(X) = R_{p1}(X) + R_{p2}(X) = \frac{K - A U}{K I} \quad (\text{II.11})$$

A partir des valeurs expérimentales de R_{PT} pour chaque X , nous pouvons déterminer, à l'aide d'une méthode approximative (méthode des moindres carrés par exemple), les coefficients de $R_{PT}(X)$ permettant la formation d'un polynôme simple :

$$R_{PT} = \sum_{i=1}^m C_i X^{i-1} \quad (\text{II.12})$$

où C_i sont respectivement les coefficients du polynôme caractérisant la résistance $R_{PT}(X)$, X appartenant à l'intervalle $[0, L]$. Le nombre de ces coefficients est choisi de telle manière à minimiser l'erreur représentant la valeur absolue de la différence entre la valeur réelle et celle approchée (de l'ordre de 10^{-6}).

Du fait que la plus grande portion de la tension appliquée se trouve reportée aux bornes de la couche faiblement conductrice, l'arc électrique s'amorce dans cette couche. Cette dernière sera court-circuitée lorsque la longueur de l'arc atteint celle de la couche. Dans ces conditions, la relation (II.11) permet de déterminer la résistance partielle de la couche fortement conductrice, car $R_{PT}(X)$ devient égale à $R_{P2}(X)$. Par contre, si l'arc se propage uniquement dans la zone faiblement conductrice, la résistance de celle fortement conductrice demeure constante. Dans ces conditions, cette résistance est déterminée graphiquement, à partir de la caractéristique résistance totale – longueur d'arc, puisque :

$$R_{P2}(X) = \begin{cases} R_{PT}(Z') = \text{constante} & \text{si } X \leq Z' \\ R_{PT}(X) & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

où Z' est la longueur de la couche faiblement conductrice du cas considéré, L la ligne de fuite totale de l'isolateur et X la longueur de l'arc électrique.

Pour une longueur d'arc donnée, la résistance de la zone faiblement conductrice représente la différence entre la résistance totale et celle de la couche fortement conductrice.

Par ailleurs, la détermination du polynôme de la résistance totale permet de déduire la longueur maximale X_C que peut atteindre l'arc électrique. Cette longueur maximale représente en fait la racine de l'équation (II.8). Introduisant la valeur de X_C dans les expressions (II.7) et (II.9), nous évaluerons respectivement la tension critique U_C et le courant de fuite critique I_C .

Le fait de supposer que chaque zone de la couche de pollution possède une conductivité constante et la même le long de sa surface, nous pouvons exprimer les résistances partielles de la pollution par [3, 6, 8, 52, 53] :

$$R_{P_i}(X) = \frac{1}{\gamma_i} F_{P_i}(X) \quad i = 1, 2 \quad (\text{II.14})$$

où γ_i ($i=1, 2$) sont respectivement les conductivités de la première et de la deuxième zone de pollution, les fonctions $F_{P_i}(X)$ ($i=1, 2$) dépendent à la fois de la forme géométrique de la surface isolante, de la répartition de la pollution et de la direction de l'arc le long de cette surface.

En remplaçant les résistances $R_{P1}(X)$ et $R_{P2}(X)$ par leurs expressions dans l'équation (II.6), nous obtenons :

$$U = \frac{K}{(K - A)^{\frac{n}{n+1}}} \left[X^n \left(\frac{F_{P1}(X)}{\gamma_1} + \frac{F_{P2}(X)}{\gamma_2} \right) \right]^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{II.15})$$

En fixant l'une des conductivités, les expressions (II.5) et (II.15) permettent d'évaluer la tension appliquée et le courant de fuite pour différentes valeurs de la deuxième conductivité puisque les fonctions $F_i(X)$ ($i=1, 2$) demeurent inchangées.

Enfin, nous sommes en mesure de déterminer tous les paramètres caractérisant les phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes non-uniformément polluées.

En effet, pour chaque longueur de la zone la plus conductrice, l'algorithme élaboré est effectué selon les étapes principales suivantes :

1. Détermination des constantes caractéristiques K et n à partir des valeurs expérimentales du courant de fuite, de la longueur d'arc, et de la tension appliquée. La valeur de A qui permet d'obtenir des meilleurs résultats est dans notre cas égale à 80 [4, 51, 53].
2. Calcul de la résistance totale R_{PT} du circuit équivalent, pour chaque valeur de X en utilisant la relation (II.11).
3. Formulation d'un polynôme simple et linéaire selon l'équation (II.12).
4. Calcul de la résistance de la couche fortement conductrice suivant l'expression (II.13) et déduction de la résistance de la couche faiblement conductrice.
5. Calcul de la longueur critique X_C de l'arc électrique qui représente la racine de l'équation (II.8).
6. Déduction des valeurs de la tension critique U_C et du courant de fuite critique I_C , selon les relations (II.7) et (II.9).
7. Détermination des coefficients de sécurité $C_s=U/U_c$ en utilisant l'expression (II.10).
8. Détermination des fonctions $F_1(x)$ et $F_2(x)$ caractérisant les deux couches de pollution, en utilisant la relation (II.14).
9. Détermination du courant de fuite et de la tension d'alimentation, pour différentes conductivités de l'une des deux couches de la pollution en fixant la conductivité de l'autre couche, selon les équations (II.5), (II.14) et (II.15). Cela permet la déduction des valeurs critiques de contournement de la tension appliquée et du courant de fuite.
10. Exploitation des résultats.

III.5.4. Résultats obtenus par simulation et validation

Nous commençons par comparer certaines caractéristiques théoriques à celles obtenues expérimentalement à savoir la tension d'alimentation en fonction de la longueur d'arc et le courant de fuite en fonction de la longueur d'arc, et ce pour certaines valeurs de la longueur de la couche la plus conductrice ($Y'=4L/5, L/2, L/3$ et $L/8$). Nous procédons par la suite, à la détermination d'autres caractéristiques telles que, la tension et le courant en fonction de la longueur d'arc, la tension et le courant critiques en fonction de la longueur de la couche fortement conductrice, les résistances des deux couches de pollution en fonction de la

longueur d'arc, le coefficient de sécurité en fonction de la longueur relative de l'arc, la tension et le courant en fonction de la longueur de l'arc pour différentes conductivités γ_2 (en considérant γ_1 constante) et finalement la tension et le courant critiques en fonction de la conductivité γ_2 .

Pour chaque longueur de la couche fortement conductrice et en se basant sur les différentes valeurs expérimentales de la tension appliquée, du courant de fuite et de la longueur d'arc, nous avons déterminé les valeurs des paramètres K et n. L'injection de ces valeurs dans le programme élaboré permet l'obtention des principales grandeurs décrivant les phénomènes de conduction et de décharges électriques sur les surfaces isolantes non-uniformément polluées. Nous présentons les valeurs des constantes caractéristiques K et n de l'arc dans le tableau suivant :

Y'	4L/5	L/2	L/3	L/8
K	87	234	146	166
n	0.73	0.60	0.66	0.64

Tableau II.1 : Constantes caractéristiques de l'arc

Les caractéristiques de la tension critique de contournement en fonction de la longueur de la couche fortement conductrice (Fig. II.15), de la tension appliquée en fonction de la longueur d'arc (Fig. II.16) et du courant de fuite en fonction de la longueur d'arc (Fig. II.17), montrent une bonne concordance entre les valeurs théoriques et celles expérimentales, ce qui justifie la validité de l'algorithme élaboré.

Il est clair que la tension critique de contournement diminue avec l'augmentation de la longueur de la couche fortement conductrice (Fig. II.15). par ailleurs, l'augmentation de la tension engendre l'augmentation du courant de fuite et l'allongement de l'arc (Fig. II.16 et II.17).

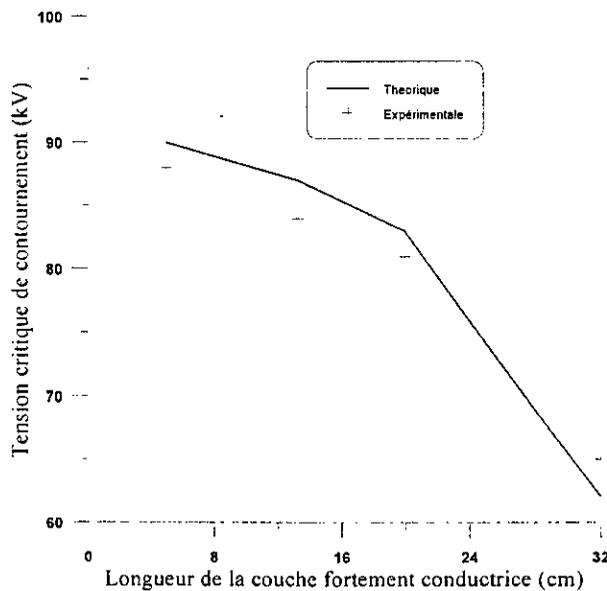


Fig. II.15 : Tension critique – longueur de la couche fortement conductrice

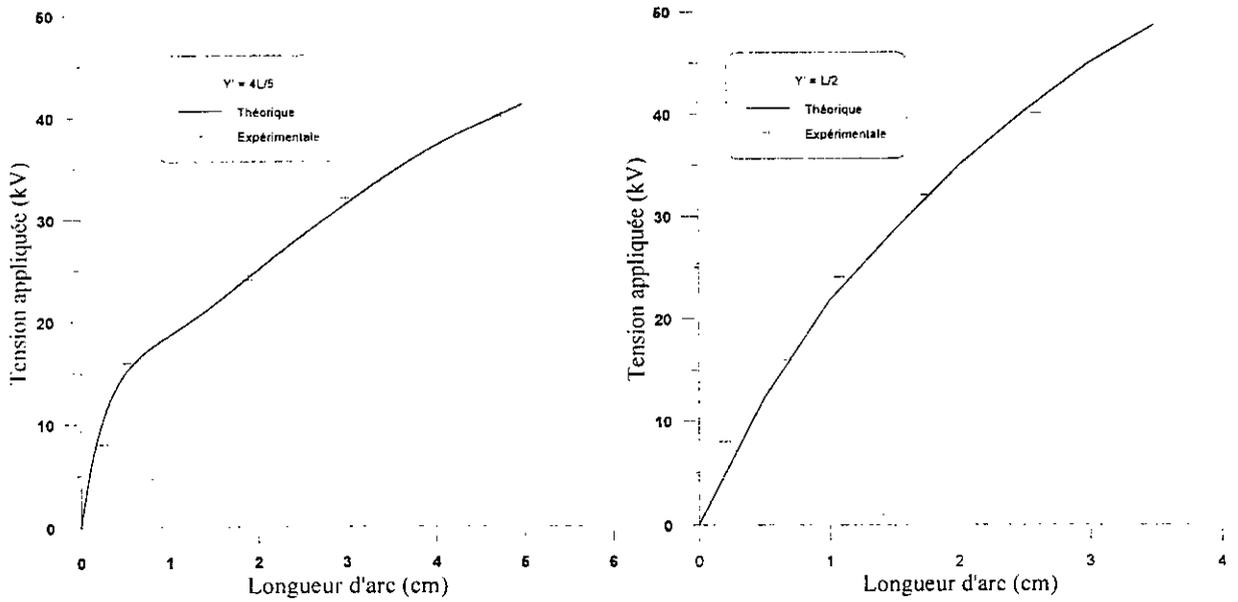


Fig. II.16 : Tension appliquée – longueur de l'arc électrique

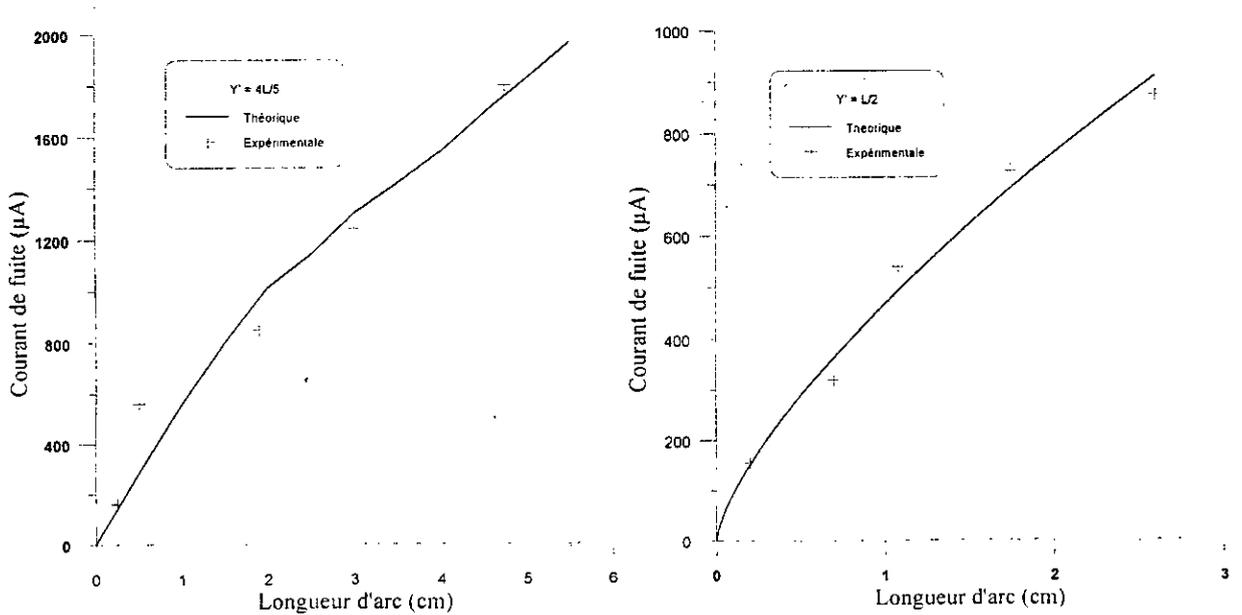


Fig. II.17 : Courant de fuite – longueur de l'arc électrique

Le dispositif de mesure n'est pas protégé contre les courants de court-circuit ; il est donc difficile de mesurer expérimentalement le courant critique de contournement. Nous nous sommes limités, par conséquent, à le déterminer théoriquement. Contrairement à la tension de contournement, la figure II.18 montre que le courant critique théorique augmente avec la longueur de la couche fortement conductrice.

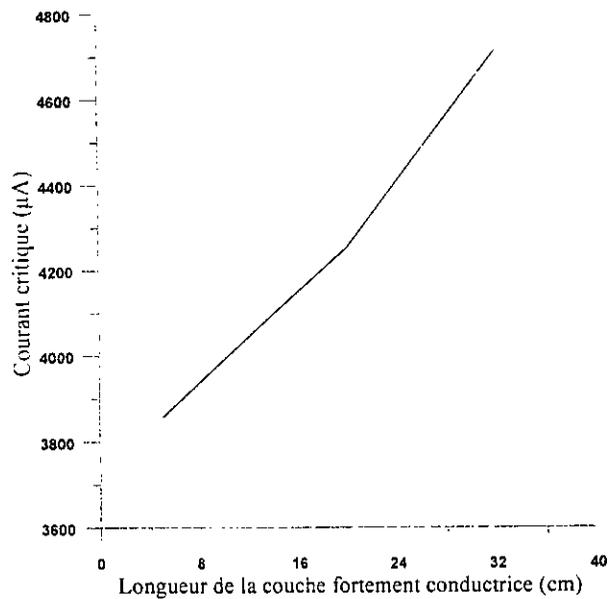


Fig. II.18 : Courant critique théorique – longueur de la couche fortement conductrice

Les résistances du circuit équivalent en fonction de la longueur de l'arc électrique sont représentées à la figure (II.19). Nous remarquons que dans les deux cas considérés, la résistance totale équivalente, représentant la somme des résistances partielles des couches polluantes, diminue avec l'accroissement de la longueur d'arc. Ceci s'explique facilement par le fait qu'à chaque fois que l'arc progresse, le long de la plaque isolante polluée, il court-circuite une partie de la couche de pollution, par conséquent, la résistance totale équivalente diminue.

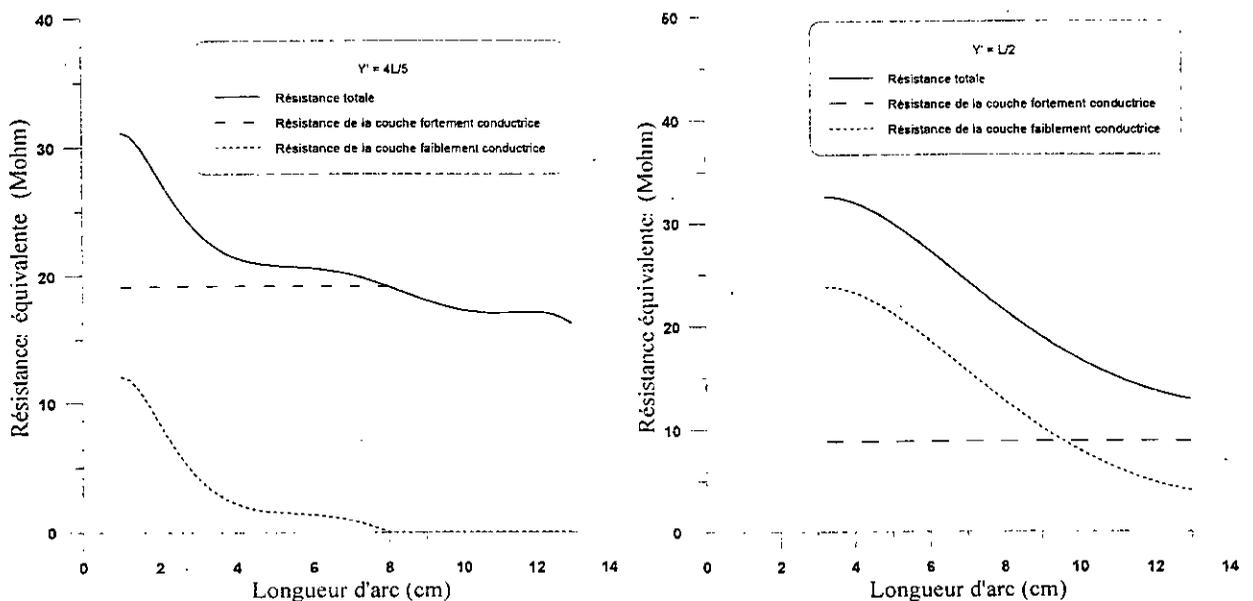


Fig. II.19 : Résistance – longueur d'arc

Tout comme la résistance totale, celle de la couche faiblement conductrice diminue avec l'allongement de l'arc (Fig. II.19). Lorsque la longueur de l'arc atteint ou dépasse la longueur de cette couche, sa résistance s'annule (cas de $Y'=4L/5$). Concernant la résistance partielle de la couche fortement conductrice, nous constatons que tant que l'arc électrique ne pénètre pas dans cette couche, sa résistance R_{p2} reste constante. Par contre, si l'arc pénètre dans cette couche, la résistance correspondante décroît avec la progression de cet arc.

Le coefficient de sécurité représente le rapport entre la tension appliquée et la tension de contournement. Il caractérise en fait, la marge de sécurité du dispositif isolant. La caractéristique donnant ce coefficient en fonction de la longueur relative de l'arc est présenté à la figure (II.20). Nous remarquons que la longueur relative de l'arc augmente progressivement avec le coefficient de sécurité. L'allongement de l'arc est engendré par l'augmentation de la tension appliquée. Lorsque cette dernière atteint sa valeur critique, le contournement se produit en rendant ainsi le rapport X/X_c et U/U_c égaux à l'unité.

Pour un isolateur témoin, cette caractéristique est déterminée à partir des essais au laboratoire. Pour cela et en augmentant la tension appliquée par palier, nous mesurons le courant de fuite et la longueur de l'arc. Ces mesures permettent le calcul de la longueur critique de l'arc et de la tension de contournement donc du coefficient de sécurité. Ainsi nous traçons la caractéristique coefficient de sécurité en fonction de la longueur d'arc relative point par point. En mesurant en permanence le courant de fuite d'un isolateur identique à celui essayé au laboratoire et se reportant simplement à la caractéristique précédente, il sera possible à tout moment de connaître la marge de sécurité.

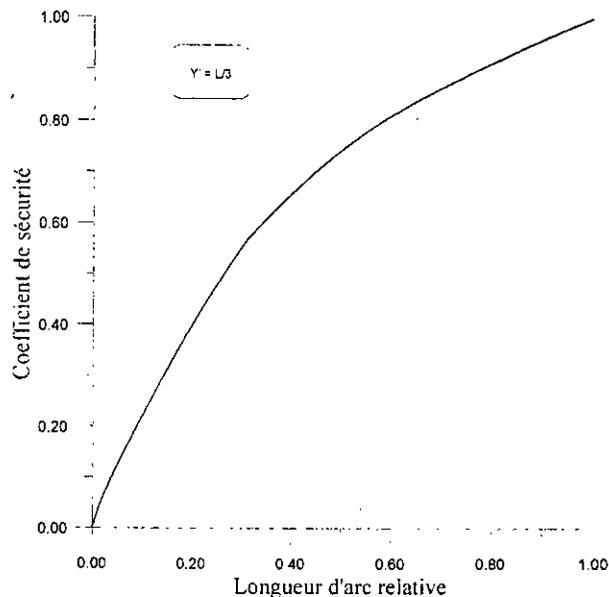


Fig. II.20 : Coefficient de sécurité – longueur d'arc relative

En fixant la conductivité γ_1 de la couche faiblement conductrice à $42 \mu\text{S}/\text{cm}$ et en faisant varier la conductivité γ_2 de la couche fortement conductrice de 300 à $100 \mu\text{S}/\text{cm}$, nous pouvons tirer les différentes valeurs de la tension et du courant (les fonctions $F_1(X)$ et $F_2(X)$ demeurent inchangées). Les figures (II.21) et (II.22) montrent respectivement la variation de

la tension et du courant de fuite en fonction de la longueur d'arc et ce pour différentes conductivités γ_2 de la couche fortement conductrice. Pour une tension appliquée donnée supérieure à 30 kV, l'augmentation de la conductivité γ_2 engendre l'allongement de l'arc (Fig. II.21). Nous constatons également que, pour une même longueur d'arc, le courant de fuite augmente avec la conductivité γ_2 (Fig. II.22). Par ailleurs, pour une conductivité γ_2 donnée, les valeurs extrêmes de la tension, du courant de fuite et de la longueur d'arc présentées aux figures (II.21) et (II.22) précédentes, correspondent à l'état critique de contournement. Ces deux figures montrent que l'augmentation de la conductivité γ_2 entraîne la diminution de la tension critique et l'augmentation du courant critique.

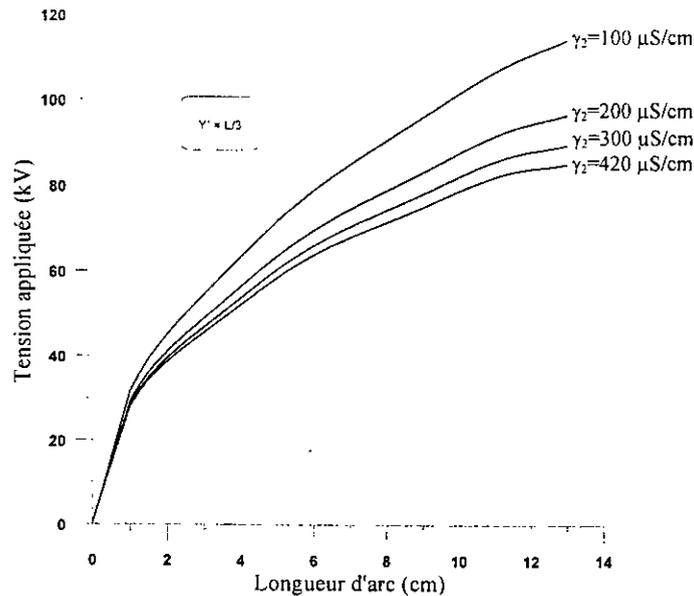


Fig. II.21 : Tension appliquée – longueur d'arc, pour différentes conductivités de la couche fortement conductrice

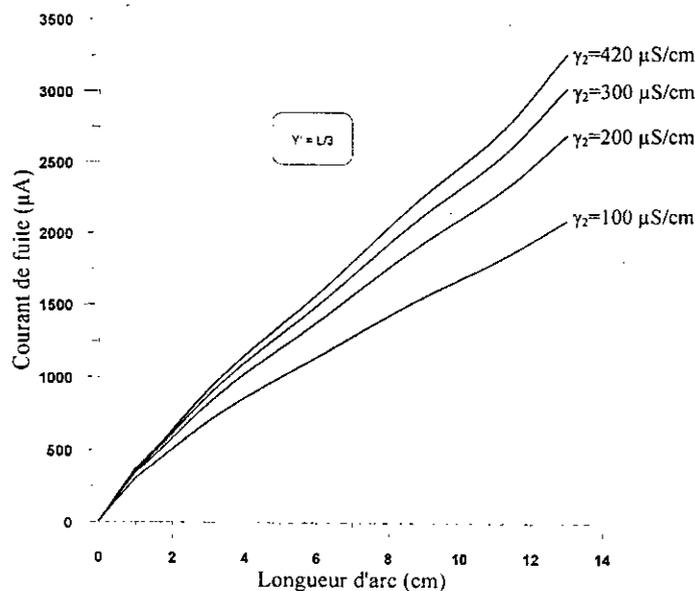


Fig. II.22 : Courant de fuite – longueur d'arc, pour différentes conductivités de la couche fortement conductrice

II.6. CONCLUSION

Dans ce présent chapitre, nous avons rappelé les principaux travaux rapportés dans la littérature et portant sur la non-uniformité de la pollution le long d'une surface isolante, lorsqu'une tension alternative lui est appliquée. Il ressort de ces travaux que :

- Quel que soit le type de la pollution, la répartition de la pollution est le plus souvent non-uniforme. Celle-ci dépend principalement du niveau de tension appliquée, du profil de l'isolateur et de la position de l'isolateur par rapport au conducteur sous tension.
- La surface supérieure de l'isolateur, tant qu'elle est exposée aux facteurs d'auto-nettoyage, est moins polluée que la surface inférieure.
- La pollution augmente sensiblement de la zone périphérique vers la zone centrale de l'isolateur.
- La non-uniformité de la pollution le long de la surface d'un isolateur, peut être la cause de certains phénomènes complexes conduisant au contournement (raccourcissement de l'arc [45], création d'arcs multiples [11]).

Dans le but de déterminer les différentes caractéristiques de l'isolateur non-uniformément pollué, nous avons effectué des travaux expérimentaux sur un modèle de laboratoire et avons abouti aux résultats suivants :

- Le système de la première disposition de la première configuration (trois couches de pollution dont la partie fortement conductrice est située au milieu) est plus rigide par rapport aux autres cas, car il présente des tensions de contournement légèrement supérieures.
- La tension de contournement diminue avec l'augmentation de la largeur de la partie fortement conductrice. Notons que pour la deuxième configuration (ayant deux couches de pollution), nous remarquons toutefois une légère augmentation de cette tension à partir de la longueur 35 cm de la partie fortement conductrice.
- Pour toutes les configurations et les dispositions adoptées, la longueur de l'arc électrique présente exactement les mêmes allures que celles du courant de fuite vis à vis des différents paramètres appliqués au modèle expérimental.
- Pour les deux configurations, le courant de fuite augmente régulièrement aussi bien avec la tension appliquée qu'avec la longueur de la couche fortement conductrice. Cependant, pour des tensions élevées, le courant de fuite obtenu dans le cas de la deuxième configuration, présente un maximum lorsque la longueur de la couche fortement conductrice avoisine 90 % de la ligne de fuite totale de l'isolateur.
- Pour une tension et une longueur de la couche fortement conductrice données, le courant de fuite obtenu dans le cas de la deuxième configuration est plus important que celui mesuré dans le cas de la première configuration.

- Pour une configuration donnée et pour des tensions relativement élevées, le courant de fuite est plus important lorsque la partie fortement conductrice est située totalement du côté de l'électrode liée à la terre.

En utilisant certaines caractéristiques expérimentales, nous avons mis au point un modèle permettant de simuler le comportement des isolateurs non-uniformément pollués. Il permet d'obtenir les différentes caractéristiques à savoir le courant de fuite et la tension appliquée en fonction de la longueur d'arc, le courant de fuite et la tension critiques en fonction de la largeur et de la conductivité de la couche fortement conductrice, le courant de fuite et la tension en fonction de la longueur de l'arc et ce pour différentes conductivités, les résistances équivalentes en fonction de la longueur d'arc et finalement le coefficient de sécurité en fonction de la longueur d'arc relative. Cette dernière caractéristique s'avère très importante, car elle peut servir comme moyen de surveillance du degré de pollution afin d'éviter le contournement total qui peut être préjudiciable pour les installations électriques. Les résultats obtenus concordent avec ceux obtenus expérimentalement, validant ainsi notre modèle mathématique.

CHAPITRE III

MODELE DYNAMIQUE DE CONTOURNEMENT SOUS POLLUTION

III.1. INTRODUCTION

La performance d'un isolateur sous une contrainte continue est plus critique car la décharge produite après formation de bandes sèches persiste plus longtemps que pour le cas d'une contrainte alternative [54]. Certains chercheurs [55, 56] ont montré que la tension de contournement, pour les mêmes conditions, est plus faible en tension continue qu'en tension alternative. Ceci est dû principalement à l'attraction des particules polluantes dans l'air, induite par la force électrostatique unidirectionnelle et qui est plus importante en continu qu'en alternatif. Par ailleurs, l'absence du zéro en tension continue, contribue également, à l'abaissement de la tension de contournement.

Malgré que le paramètre temps intervient dans le phénomène de propagation de l'arc électrique, l'étude de ce phénomène a été effectuée en grande partie en utilisant des modèles statiques [5, 6]. Afin de se rapprocher le plus possible de la réalité, nous proposons dans ce chapitre, un modèle dynamique permettant de prédire le comportement d'un isolateur pollué soumis à une tension continue. Ce modèle utilise un critère de propagation et se base sur un circuit électrique équivalent. Dans cette simulation, un isolateur pollué et partiellement contourné est représenté par une décharge électrique de longueur donnée en série avec une résistance représentant la bande de pollution. Le canal de la décharge est assimilé à des cellules résistives. Chaque cellule nouvellement créée correspond à un nouveau déplacement partiel de l'arc.

Le modèle que nous avons proposé permet d'estimer la tension de contournement et le temps au contournement et de décrire la dynamique de l'arc en tenant compte de la géométrie de l'isolateur ainsi que des variations instantanées de certains paramètres importants à savoir le courant de fuite, la vitesse de propagation, la puissance et l'énergie fournies par la source, le champ dans la pollution et au pied de l'arc, la résistance de la pollution, le rayon du canal d'arc, la résistance de ce canal, sa longueur, sa résistance linéique, sa résistivité, sa tension ainsi que la puissance et l'énergie qui lui ont été transférées. L'exploitation numérique ainsi que la validation du modèle élaboré sont également présentées.

III.2. PRINCIPAUX MODELES DYNAMIQUES DE CONTOURNEMENT

Les modèles statiques [5, 6] permettant la prédiction des différents paramètres caractérisant l'évolution de la décharge électrique sur les surfaces isolantes, traitent le phénomène de contournement sous un aspect global en lui associant un critère d'extension. Ils nous donnent une image à un temps fixe reflétant une situation donnée. Par ailleurs, les modèles dynamiques représentent le mécanisme de contournement, qui tient compte des changements instantanés des paramètres caractérisant l'arc électrique.

III.2.1. Modèle de F.A.M.Rizk et D.H.Nguyen

Pour caractériser la dynamique de l'arc en continu, F.A.M.Rizk et D.H.Nguyen [57] ont considéré une résistance d'arc qui varie selon l'équation de O.Mayr [58] :

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

où, $\tau=100 \mu s$ est la constante de temps de l'arc et $n=0,8$ et $A=60$ sont les constantes de la caractéristique statique de l'arc.

III.3.2. Modèle de S.Anjana et C.S.Lakshminarasimha

S.Anjana et C.S.Lakshminarasimha [59] ont proposé un modèle basé sur l'équation de O.Mayr [58] et sur le modèle statique de F.Obenaus [60]. Ils ont proposé que l'isolateur soit 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 l'expression :

$$W_{th} = \frac{3}{2} K T M \quad (III.2)$$

T : la température de l'arc, M le nombre de particules neutres dans l'arc et K la constante de Boltzmann.

Pour la propagation de l'arc, S.Anjana et Al [59] proposent leur propre modèle, selon lequel l'arc ne se déplace que si son énergie totale W_{totale} est supérieure ou égale à l'énergie W_{th} nécessaire pour maintenir l'arc à sa température, où W_{totale} est donnée par l'expression :

$$W_{totale} = (E_{arc} I_{arc} - P_0) \Delta t \quad (III.3)$$

E_{arc} est le gradient de la décharge, I_{arc} le courant de la décharge, Δt l'incrément du temps, et P_0 les pertes par unité de longueur (constantes).

Si la condition de propagation n'est pas satisfaite, la tension est incrémentée de ΔU 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 :

$$V = \mu E_{arc} \quad (III.4)$$

μ est la mobilité de l'arc.

Grâce au pas de temps Δt , on déduit l'allongement ΔX de l'arc électrique, car :

$$\Delta X = V \Delta t \quad (III.5)$$

La multiplication de la vitesse instantanée par l'intervalle de temps Δt (représentant l'incrément temporelle) permet d'obtenir l'évolution dans l'espace équivalente (ΔX) qui représente l'allongement de la décharge, dont la nouvelle longueur est $(X+\Delta X)$. 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.

III.2..3 Modèle de N.Dhahbi

N.Dhahbi [61] a considéré que la décharge peut être représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure (III.1). Pour chaque saut de l'arc, on obtient une nouvelle cellule ayant les paramètres suivants : R_i , C_i , L_i et U_i . Elle a considéré aussi que

la résistance du canal d'arc varie selon l'équation de O.Mayr [58] et que la forme de ce canal est cylindrique de résistivité constante.

Le modèle de N.Dhahbi permet soit de calculer la tension de contournement, le temps au contournement et la vitesse de propagation, soit de suivre, pour une tension donnée pendant un intervalle de temps fixé à l'avance, la variation de certains paramètres caractérisant l'arc électrique à savoir le courant d'arc, la vitesse de propagation, la chute de tension dans l'arc, la tension à la tête de l'arc et charge injectée dans l'intervalle inter-électrodes. Ce modèle utilise le critère d'impédance comme critère de propagation. Ainsi, l'auteur a 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.

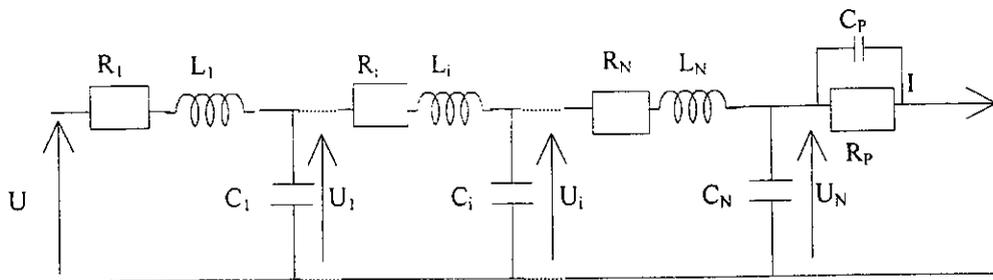


Fig. III.1 : Schéma électrique équivalent à la propagation de la décharge selon N.Dhahbi.

où, R_p et C_p représentent la résistance et la capacité de la couche de pollution, R_i , C_i et L_i la résistance, la capacité et l'inductance de la décharge, et U_i la tension correspondant à chaque cellule nouvellement créée représentant un nouveau déplacement de l'arc électrique.

III.2.4. Modèle de R.Sundararajan et R.S.Gorur

Dans le but d'estimer la tension de contournement des isolateurs pollués sous tension continue, R.Sundararajan et R.S.Gorur [62] ont proposé un modèle dynamique, qui ressemble à celui de S.Anjana et C.S. Lakshminarasimha, mais basé sur le critère de propagation de B.F.Hampton [51] (champ au pied de l'arc inférieur à celui dans la pollution, soit $E_{arc} < E_p$).

Concernant le gradient de tension dans la couche de pollution E_p , ces auteurs ont utilisé la contrainte critique donnée par l'expression suivante :

$$E_p = A^{n+1} r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (III.6)$$

où r_p représente la résistance linéique, $A=63$ et $n=0,5$.

La résistance R_p de la couche polluante est calculée en se basant sur le facteur de forme de l'isolateur :

$$R_p = \frac{1}{\gamma_p} f = \frac{1}{\gamma_p} \int_X^L \frac{dX}{2\pi r_a} \quad (III.7)$$

L est la longueur de fuite de l'isolateur en cm, X la longueur d'arc en cm, ΔX pas de la longueur d'arc en cm, r_a le rayon jusqu'à la distance X en cm, γ_p la conductivité superficielle de la couche polluante.

III.3. ELABORATION DU MODELE DYNAMIQUE

Le modèle que nous proposons se base sur le circuit de F.Obenaus et utilise le critère de B.F.Hampton. Il tient compte de la géométrie de l'isolateur, et permet aussi de calculer la tension de contournement et le temps au contournement, et de suivre la propagation temporelle d'une décharge sur des isolateurs pollués. Nous comparons nos résultats de simulation à ceux obtenus par d'autres chercheurs.

III.3.1. Hypothèses Simplificatrices

Les phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces polluées sont tellement complexes, qu'il est indispensable de faire de nombreuses hypothèses simplificatrices, pour rendre possible leur représentation à l'aide d'un modèle mathématique. Dans notre étude, nous avons adopté différentes hypothèses qui sont données comme suit :

- L'isolateur réel est remplacé par un modèle plan équivalent ; il s'agit donc d'une représentation bidimensionnelle.
- La conductivité de la pollution est la même en tout point de la couche polluante et ne change pas durant la propagation de la décharge.
- La couche de pollution est représentée par une résistance.
- Parmi tous les arcs multiples se développant sur la surface isolante, un seul arc dominant est pris en considération.
- Le canal d'arc est assimilé à un cylindre de longueur X et de rayon r .
- Choix de l'exposant associé au courant, dans l'expression de la tension d'arc, égal à l'unité [63].

III.3.2. Circuit électrique équivalent

Une fois générée, la décharge électrique ne peut évoluer que si certaines conditions sont réunies. Dans ce qui suit, nous analysons le comportement ainsi que l'effet de la décharge le long de son parcours sur une surface isolante polluée. Pour cela, nous représentons cette dernière par un circuit électrique équivalent (Fig. III.2), semblable à celui déjà proposé par F.Obenaus [60].

En effet, un isolateur pollué et partiellement contourné par une décharge électrique, peut être représenté par un circuit électrique équivalent constitué de deux résistances en série. La première R_{arc} représente la résistance du canal de la décharge et la seconde R_p celle de la partie de la couche de pollution non court-circuitée par cette décharge.

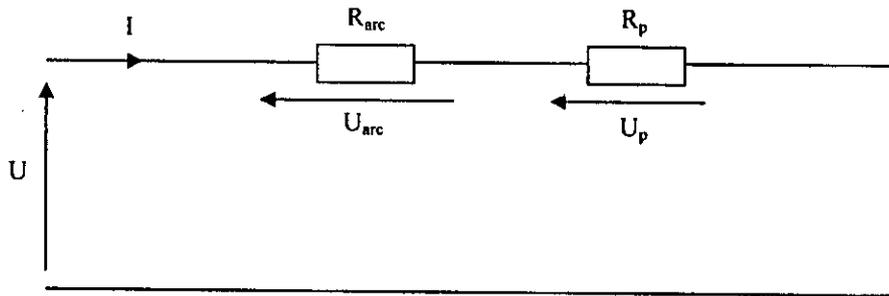


Figure III.2 : Circuit électrique équivalent de base

III.3.3. Propagation de la décharge

Les états critiques du contournement représentent les conditions initiales nécessaires et suffisantes pour remplir le critère d'élongation de la décharge tout au long de la surface isolante, jusqu'à la mise en court-circuit de la haute tension avec la masse. Le bon accord entre les prévisions théoriques et les valeurs expérimentales prouve la validité des différents critères de propagation proposés dans la littérature. Par conséquent, ces critères servent d'appui pour la majorité d'études de modélisation à travers le monde entier.

III.3.3.1. Initialisation de la décharge

Lorsque la tension appliquée entre deux électrodes dépasse une certaine valeur, une décharge de longueur initiale X_0 de type couronne peut prendre naissance à la surface de l'isolant. Si les conditions de propagation sont vérifiées, alors le canal de l'arc est alimenté par le courant de cette décharge couronne et peut donc s'allonger. Dans le cas contraire, le canal se refroidit et disparaît. La valeur initiale de la décharge généralement prise par les chercheurs [54, 62] est égale à 1 % de la longueur de fuite totale de l'isolateur.

III.3.3.2. Critère de propagation

Le critère de propagation que nous avons adopté pour notre modèle, est celui proposé par B.F.Hampton [51]. Selon cet auteur, la différence entre le champ au pied la décharge et le champ dans la pollution représente l'élément essentiel qui gouverne la propagation de la décharge, car cette dernière évolue si le gradient de la tension dans la pollution (E_p) est supérieur à celui au pied de la décharge (E_{arc}), soit :

$$E_{arc} < E_p \quad (III.8)$$

En effet, l'arc se propage si $E_p > E_{arc}$. Dans ce cas, le gradient de la tension de la couche de pollution est supérieur à celui de l'arc, car l'incrustation du chemin en aval de l'arc par la croissance du courant à chaque instant permet à l'arc de se propager.

Par ailleurs, N.Dhahbi [61] a proposé un nouveau critère analytique de propagation de la décharge en faisant intervenir l'impédance équivalente Z_{eq} d'un circuit électrique (Fig. III.3), simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite.

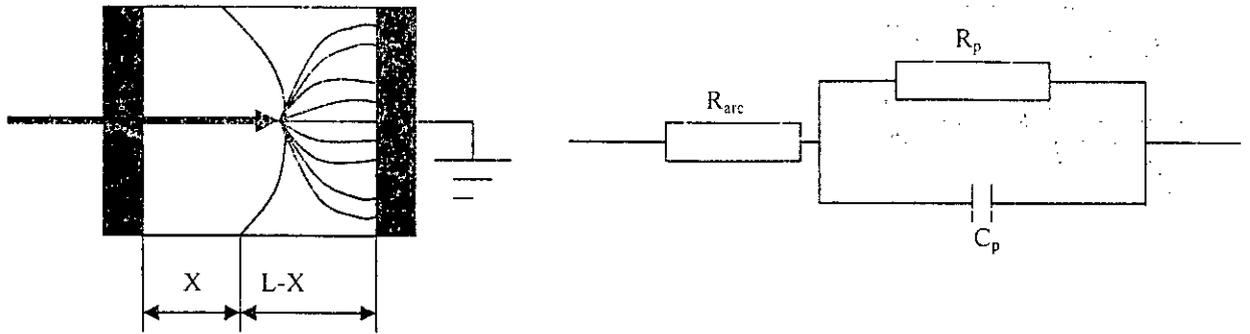


Figure III.3 : Modèle d'isolateur pollué avec son circuit équivalent selon N.Dhahbi

Le critère de N.Dhahbi utilise comme condition nécessaire à la propagation de l'arc :

$$\frac{d|Z_{eq}|}{dX} < 0 \quad (III.9)$$

Pour une tension constante, ce critère est équivalent à celui de S.Hesketh [64], car I est inversement proportionnel à Z_{eq} . Selon cet auteur, l'arc en série avec la couche de pollution se propage de telle manière à rendre maximal le courant I qu'il tire de la source d'alimentation. En effet, le critère de propagation établi est exprimé par :

$$\frac{dI}{dX} > 0 \quad (III.10)$$

Par ailleurs, l'impédance équivalente de notre circuit est telle que :

$$Z_{eq} = R_{eq} = R_{arc} + R_p \quad (III.11)$$

Selon la figure (III.2), nous pouvons écrire :

$$R_{arc} = \frac{U_{arc}}{I} \quad (III.12)$$

et

$$R_p = \frac{U_p}{I} \quad (III.13)$$

La substitution des expressions (III.12) et (III.13) dans la relation (III.9) permet d'écrire :

$$\frac{dU_{arc}}{I dX} + \frac{dU_p}{I dX} < 0 \quad (III.14)$$

Nous signalons que lorsque la longueur X de l'arc électrique augmente, la résistance R_p de la portion non court-circuitée par cet arc décroît, ce qui engendre la diminution de la tension U_p aux bornes de cette résistance. En effet :

$$-\frac{dR_p}{dX} > 0 \quad (\text{III.15})$$

et donc :

$$-\frac{dU_p}{dX} > 0 \quad (\text{III.16})$$

Le champ dans la pollution et celui au pied de l'arc s'écrivent comme suit :

$$E_{arc} = \frac{dU_{arc}}{dX} = \frac{A}{I^n} \quad (\text{III.17})$$

et

$$E_p = -\frac{dU_p}{dX} = r_p I \quad (\text{III.18})$$

Multipliant la relation (III.14) par I et utilisant les expressions (III.17) et (III.18), nous aboutissons au critère de B.F.Hampton. Par conséquent, le critère d'impédance utilisé par N.Dhahbi est équivalent, dans notre cas, à celui de B.F.Hampton.

Quant à R.Wilkins [65], l'allongement de l'arc est possible, s'il provoque une augmentation de la puissance P fournie par la source, soit :

$$\frac{dP}{dX} > 0 \quad (\text{III.19})$$

Pour une tension constante, le critère de R.Wilkins coïncide avec celui de S.Hesketh ($dI/dX > 0$) et par conséquent avec celui de N.Dhahbi, qui coïncide à son tour avec celui de B.F.Hampton.

En effet, tous les critères, différents par leur contenu physique, aboutissent aux mêmes résultats obtenus dans le cas de notre modèle.

III.3.4. Circuit de propagation

La propagation de l'arc électrique est possible, si le critère d'élongation est rempli. Dans ces conditions, le canal de la décharge sera assimilé à des cellules résistives. Chaque cellule nouvellement créée représentera un nouveau déplacement partiel de l'arc. Cette propagation de la décharge peut être donc représentée par un schéma électrique équivalent comme l'indique la figure (III.4).

Dans cette figure, R_i , I_i , et U_i représentent respectivement la résistance, le courant et la tension, correspondant à chaque cellule nouvellement créée et R_p la résistance de la partie de la couche de pollution non court-circuitée par l'arc.

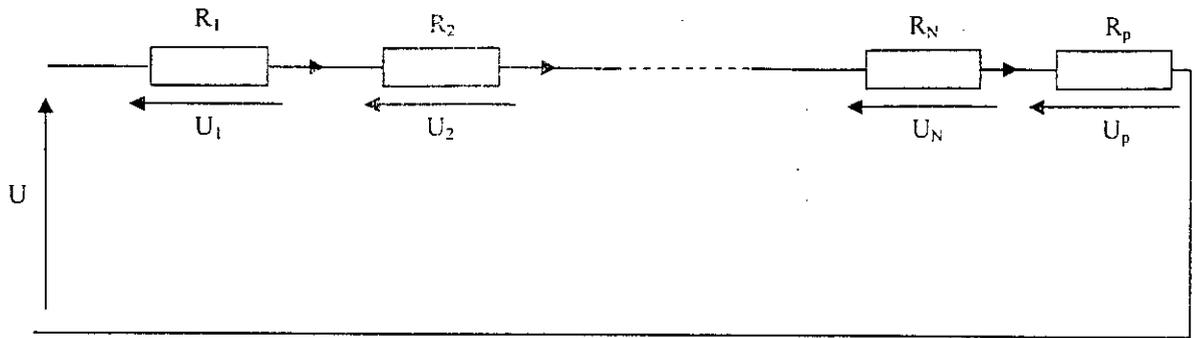


Figure III.4 : Circuit électrique équivalent à la propagation de la décharge

III.3.5. Paramètres du circuit électrique

Les paramètres de ce circuit concernent la tension totale entre électrodes, la résistance de pollution et les caractéristiques du canal d'arc à savoir sa tension, sa résistance, sa résistivité, son rayon, sa longueur, sa puissance et son énergie.

En négligeant la chute de tension cumulée aux électrodes, de l'ordre de 840 V selon R. Wilkins [65], l'équation du circuit sera donnée par:

$$U = U_{arc} + U_p = (R_{arc} + R_p) I \quad (\text{III.20})$$

avec, U la tension appliquée, U_{arc} la tension de la décharge, R_p la résistance de la couche polluante et I le courant de fuite.

Une des difficultés principales provient de la forme complexe de l'isolateur réel. Cette difficulté est contournée en remplaçant cet isolateur par un modèle convenable ayant une géométrie simple (cylindrique, circulaire, rectangulaire, ...). Ce modèle doit prendre en considération la forme de l'isolateur et conserver, autant que possible, la nature physique du contournement. Par conséquent, plusieurs chercheurs se basent, dans leurs travaux, sur des modèles simples [3-6, 8, 11, 59, 62, 63, 65-68], permettant ainsi d'exprimer la résistance de pollution par une équation simple.

Dans notre étude, l'isolateur réel est remplacé par un modèle plan équivalent. La longueur de fuite de ce dernier est égale à celle de l'isolateur réel, tandis que sa largeur correspond à la circonférence de l'isolateur réel. Le choix de cette représentation bidimensionnelle est justifiée par le fait que les phénomènes de conduction et de décharge électrique dépendent principalement des caractéristiques surfaciques de la couche de pollution se déposant sur les isolateurs.

Pour représenter la pollution, nous avons adopté le modèle linéaire, car c'est le modèle le plus utilisé. Il considère une répartition critique (uniforme) de la pollution et exprime, par conséquent, la résistance de la couche de pollution comme une fonction linéaire de la longueur de fuite [5, 6] :

$$R_p = r_p (L - X) \quad (\text{III.21})$$

avec, r_p la résistance linéique, L la longueur de fuite totale et X la longueur de l'arc.

En se basant sur le modèle de Z.Renyu et G.Zhicheng [68], nous pouvons ramener une structure complexe d'un isolateur pollué à un modèle plan dont la résistance R_p de la pollution peut prendre la forme suivante :

$$R_p = \frac{1}{\pi \gamma_p} \frac{L-X}{r_{iso}} \quad (\text{III.22})$$

où γ_p la conductivité superficielle de la pollution et r_{iso} le rayon effectif de l'isolateur.

A partir des équations (III.21) et (III.22), la résistance linéique de la pollution peut être formulée par :

$$r_p = \frac{1}{\pi \gamma_p r_{iso}} \quad (\text{III.23})$$

Par ailleurs, la relation approximative de la tension aux bornes de l'arc est donnée, selon F.Obenaus [60], par l'expression empirique suivante :

$$U_{arc} = \frac{AX}{I^n} = E_{arc} X \quad (\text{III.24})$$

A et n sont les constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc, X sa longueur et I son courant.

En se basant sur l'expression de la tension aux bornes de l'arc électrique proposé par F.Obenaus, la résistance R_{arc} du canal de cet arc peut s'écrire sous la forme suivante :

$$R_{arc} = \frac{U_{arc}}{I} = \frac{AX}{I^{n+1}} \quad (\text{III.25})$$

Sachant que la résistance linéique r_{arc} de ce canal est donnée par :

$$r_{arc} = \frac{R_{arc}}{X} = \frac{A}{I^{n+1}} \quad (\text{III.26})$$

Le diamètre du canal d'arc est un paramètre important dont la connaissance est indispensable à la vérification des modèles physiques de l'arc. Sa mesure est cependant, très délicate, car il n'est pas défini de façon unique. La partie lumineuse n'est pas forcément identique à la partie qui assure la conductivité ou à la partie dans laquelle est répartie la charge d'espace. D'autre part, l'arc n'est pas un volume dont les frontières sont parfaitement nettes. Il est donc nécessaire de définir un diamètre équivalent. Une relation entre le rayon r (en cm) du pied de l'arc et le courant I dans l'arc est donnée selon R.Wilkins [65] par :

$$r = \sqrt{\frac{I}{1.45 \pi}} \quad (\text{III.27})$$

Nous considérons que le canal d'arc est cylindrique de section $S (= \pi r^2)$, r étant le rayon de l'arc), de longueur X et de résistance R_{arc} . Dans ces conditions, la résistivité ρ_{arc} du canal conducteur peut être donnée par :

$$\rho_{arc} = \frac{R_{arc} S}{X} = \frac{R_{arc} \pi r^2}{X} \quad (III.28)$$

Cette résistivité peut être déterminée en fonction du courant, en substituant, dans cette dernière équation, R_{arc} et r par leurs expressions respectives (III.25) et (III.27) :

$$\rho_{arc} = \frac{A}{1.45 I^n} \quad (III.29)$$

Par ailleurs, en fonction du rayon du canal d'arc, cette résistivité peut être exprimée par :

$$\rho_{arc} = \frac{A}{1.45^{n+1} \pi^n r^{2n}} \quad (III.30)$$

La puissance fournie aux électrons peut s'écrire comme suit :

$$P_{arc} = U_{arc} I = E_{arc} X I = A X I^{1-n} \quad (III.31)$$

En raison de leur grande mobilité, les électrons cèdent cette puissance aux particules lourdes par collisions, par conduction thermique, par rayonnement, etc. [69].

III.3.6. Vitesse de propagation

La vitesse de propagation est un facteur très important qui influe directement sur le comportement de la décharge sur les surfaces isolantes contaminées. Parmi tous les modèles qui ont été établis dans la littérature, peu proposent des relations permettant d'évaluer la vitesse d'élongation de la décharge.

Après avoir supposé que l'allongement de l'arc électrique est lié à la puissance disponible nécessaire à la naissance de la décharge et à l'énergie nécessaire pour l'obtenir, L.L.Alston et S.Zoledziowski [67] ont établi une équation de vitesse qui s'écrit sous la forme suivante :

$$V = \frac{dX}{dt} = \frac{U^2}{\sigma r_p^2 (L-X)^2 Q^2} \quad (III.32)$$

avec, U la tension de la source, σ la conductance de la décharge, Q la densité d'énergie linéique de la décharge, X la longueur de la décharge, L la distance inter-électrodes et r_p la résistance linéique de la pollution.

A l'aide d'une caméra ultra rapide, A.A.J.Al-Baghdadi [70] a pu établir une relation empirique donnant la vitesse (en cm/s) :

$$V = 1.45 r_p^{2.5} (I_c^4 - I^4) 10^{-4} \quad (\text{III.33})$$

où, I est le courant de fuite (en A), I_c le courant critique (en A) et r_p est la résistance linéique de la pollution (en Ω/cm).

Cette dernière expression a été utilisée par F.A.M.Rizk et D.H.Nguyen [57] dans leur modèle dynamique.

D'après R.Sandararajan et R.Gorur [62] et S.Anjana et C.S.Lakshminarasimha [59], la vitesse de propagation est fonction de la mobilité μ des électrons dans l'arc et du champ électrique E_{arc} au pied de cet arc. Elle aura pour expression :

$$V = \mu E_{\text{arc}} \quad (\text{III.34})$$

En partant du principe que l'énergie totale W_t est dépensée sous différentes formes, et qu'une partie de cette énergie est transférée au canal de la décharge sous forme d'énergie cinétique W_{cin} ($W_{\text{cin}} = \beta W_t$, $0 < \beta < 1$), lui permettant ainsi de s'allonger de ΔX , N.Dhahbi [61] a abouti à l'expression suivante de la vitesse de propagation de l'arc :

$$V = \sqrt[3]{\frac{2\beta P}{\rho \pi r^2}} \quad (\text{III.35})$$

β étant la fraction d'énergie nécessaire à la propagation de la décharge, r le rayon de l'arc, ρ la masse volumique du gaz (air) et P : la puissance instantanée injectée dans l'intervalle inter-électrodes.

La vitesse ainsi que le mode de propagation de la décharge électrique sur les surfaces isolantes polluées, dépendent essentiellement du champ électrique au pied de l'arc ainsi que de la mobilité des électrons dans cet arc. C'est pour cette raison que nous avons adopté, dans notre modélisation, $V = \mu E_{\text{arc}}$ comme expression de vitesse. Par ailleurs, cette vitesse permet l'obtention des temps au contournement proches de ceux obtenus par d'autres chercheurs [71, 72].

III.3.7. Temps au contournement

Le temps au contournement estimé dans notre modèle, représente la différence entre l'instant d'amorçage de l'arc (correspondant à l'instant où le critère de propagation est vérifié) et l'instant où son pied atteint l'électrode basse tension. Dans notre modèle, ce temps dépend de la conductivité de la pollution, de la géométrie de l'isolateur et de la vitesse de propagation de la décharge.

Cependant, comme nous avons déjà mentionné dans le premier chapitre, P.S.Ghosh, S.Chakravorti et N.Chatterjee [27] ont montré que le temps au contournement décroît avec l'augmentation de la tension. Ils ont montré également qu'il existe une valeur particulière de la tension appliquée pour laquelle un contournement se produit au bout de 1 ms, et que toute augmentation de la tension n'a pas d'effet remarquable sur le temps au contournement.

Quant à M.Pollentes [73], il a observé qu'à résistivité d'électrolyte constante, les temps au contournement moyens sont d'autant plus élevés que l'on se rapproche de la tension critique de contournement. En prenant la même résistivité de la pollution et le même niveau de surtension, il a aussi constaté qu'en polarité négative, les temps au contournement sont plus élevés qu'en polarité positive. De nombreux chercheurs [71, 74] ont confirmé ce résultat, lorsqu'ils ont montré que les tensions critiques en polarité négative sont aux environs de deux tiers des tensions critiques obtenues dans le cas d'une polarité positive.

III.3.8. Simulation numérique

F.A.M.Rizk et D.H.Nguyen [57], R.Sandararajan et R Gorur [62] et S.Anjana et C.S.Lakshminarasimha [59] se sont limités uniquement à évaluer, dans leurs modèles dynamiques, la tension de contournement. Notre modèle est proche de celui de N.Dhabhi [61]. Notons que nous avons opté pour la même expression de vitesse utilisée par R.Sandararajan et R Gorur [62] et S.Anjana et C.S.Lakshminarasimha [59]. Par ailleurs, nous avons utilisé le critère de propagation de B.F.Hampton [51] en considérant un gradient critique de tension dans la couche de pollution. Nous avons aussi supposé que le canal d'arc est cylindrique dont la résistance est déduite de l'expression empirique de F.Obenaus [60] donnant la tension aux bornes de ce canal.

Dans notre modélisation, nous introduisons d'abord les données du système d'isolation à savoir la conductivité superficielle γ_p de la couche de pollution, la longueur totale de fuite de l'isolateur L , le rayon effectif de cet isolateur r_{iso} ou sa largeur lar , la mobilité μ des électrons dans l'arc, la valeur initiale de la tension appliquée U , le pas d'incrément de la tension ΔU et le pas d'incrément de temps Δt .

A travers ces données initiales, nous calculons les différents paramètres du circuit électrique équivalent. Pour cela, nous initialisons le temps ($t=0$). Nous considérons à cet instant que la décharge électrique est de type couronne de longueur égale à 1 % de la ligne de fuite totale L de l'isolateur. A partir de cette longueur, nous évaluons la résistance R_p et la résistance linéique r_p de la partie de la couche de pollution non court-circuitée par la décharge suivant les expressions (III.22) et (III.23). Nous déterminons le courant de fuite I et la résistance du canal d'arc R_{arc} en résolvant le système constitué des équations (III.20) et (III.25).

Nous testons, par la suite, le critère de propagation, en calculant les champs dans la pollution E_p suivant (III.6) et au pied de l'arc E_{arc} selon (III.25). Si ce critère n'est pas satisfait, la tension est augmentée de ΔU et nous reprenons les calculs précédents. Par contre, si la condition de propagation est remplie, nous calculons le rayon au pied de l'arc r selon l'expression (III.27), la résistance linéique r_{arc} du canal conducteur suivant (III.26) et sa résistivité ρ_{arc} en utilisant (III.28), (III.29) ou (III.30), la tension U_{arc} aux bornes de la décharge selon (III.25), la puissance P_{arc} dans la décharge suivant (III.31) et donc de l'énergie ξ_{arc} (égale à la puissance P_{arc} fois le temps) dans la décharge, la puissance P (égale à la tension appliquée fois le courant) et l'énergie ξ (égale à la puissance P fois le temps) fournies par la source et finalement la vitesse de propagation V suivant (III.34). Ce dernier calcul de la vitesse de propagation nous permet de déterminer l'allongement ΔX de l'arc électrique en utilisant l'équation (III.5).

Si la nouvelle longueur d'arc ($X=X+\Delta X$) dépasse la longueur d'arc critique estimée à deux tiers (2/3) de la ligne de fuite totale de l'isolateur [61], il y a contournement. Nous

relevons, dans ce cas, la tension appliquée car elle correspond à la tension critique de contournement. Dans le cas contraire, nous augmentons le temps t de Δt et reprenons les calculs précédents depuis le début.

Pour une conductivité superficielle donnée, les principales étapes de l'algorithme de simulation élaboré sont les suivantes :

Etape 0 : Introduction des données initiales : la conductivité de la pollution γ_p , la géométrie de l'isolateur (sa longueur totale de fuite L et son rayon effectif r_{iso} ou sa largeur lar), la mobilité μ des électrons, la valeur initiale de la tension appliquée U , le pas d'incrémentement de la tension ΔU et le pas d'incrémentement du temps Δt .

Etape 1 : Initialisation de la longueur d'arc ($X=1 \% L$) et du temps ($t=0$).

Etape 2 : Calcul de la résistance du canal d'arc R_{arc} , de la résistance R_p et la résistance linéique r_p de la partie de la couche de pollution non court-circuitée par l'arc, du courant de fuite I et des champs au pied de l'arc E_{arc} et dans la pollution E_p .

Etape 3 : Vérification du critère de propagation de B.F.Hampton ($E_p > E_{arc}$), puis accomplissement de l'étape 4 (pas de propagation) si le champs au pied de l'arc est inférieur à celui dans la pollution et de l'étape 5 (propagation) dans le cas contraire.

Etape 4 : Incrémentement de la tension ($U=U+\Delta U$) et reprise des étapes 1 à 3.

Etape 5 : Calcul du temps au contournement t , de la longueur d'arc X , de sa résistivité ρ_{arc} , de sa résistance R_{arc} , de son rayon r , de sa chute de tension U_{arc} , du courant I , de la vitesse de propagation V , de la puissance P et de l'énergie ξ délivrées par la source ainsi que celles (P_{arc} et ξ_{arc}) transférées dans le canal d'arc.

Etape 6 : Test de la nouvelle valeur de la longueur d'arc ($X=X+\Delta X$) ; accomplissement de l'étape 7 (pas de contournement) si cette longueur n'atteint pas la longueur critique estimée à deux tiers de la ligne de fuite totale de l'isolateur ($X_c=2/3 L$) [61], et de l'étape 8 (contournement) dans le cas contraire.

Etape 7 : Incrémentement du temps ($t=t+\Delta t$) et reprise des étapes 2 à 6.

Etape 8 : Prélèvement de la tension critique de contournement correspondante.

Etape 9 : Exploitation des résultats.

Ces différentes étapes peuvent être représentées par l'organigramme de la figure (III.5) suivante :

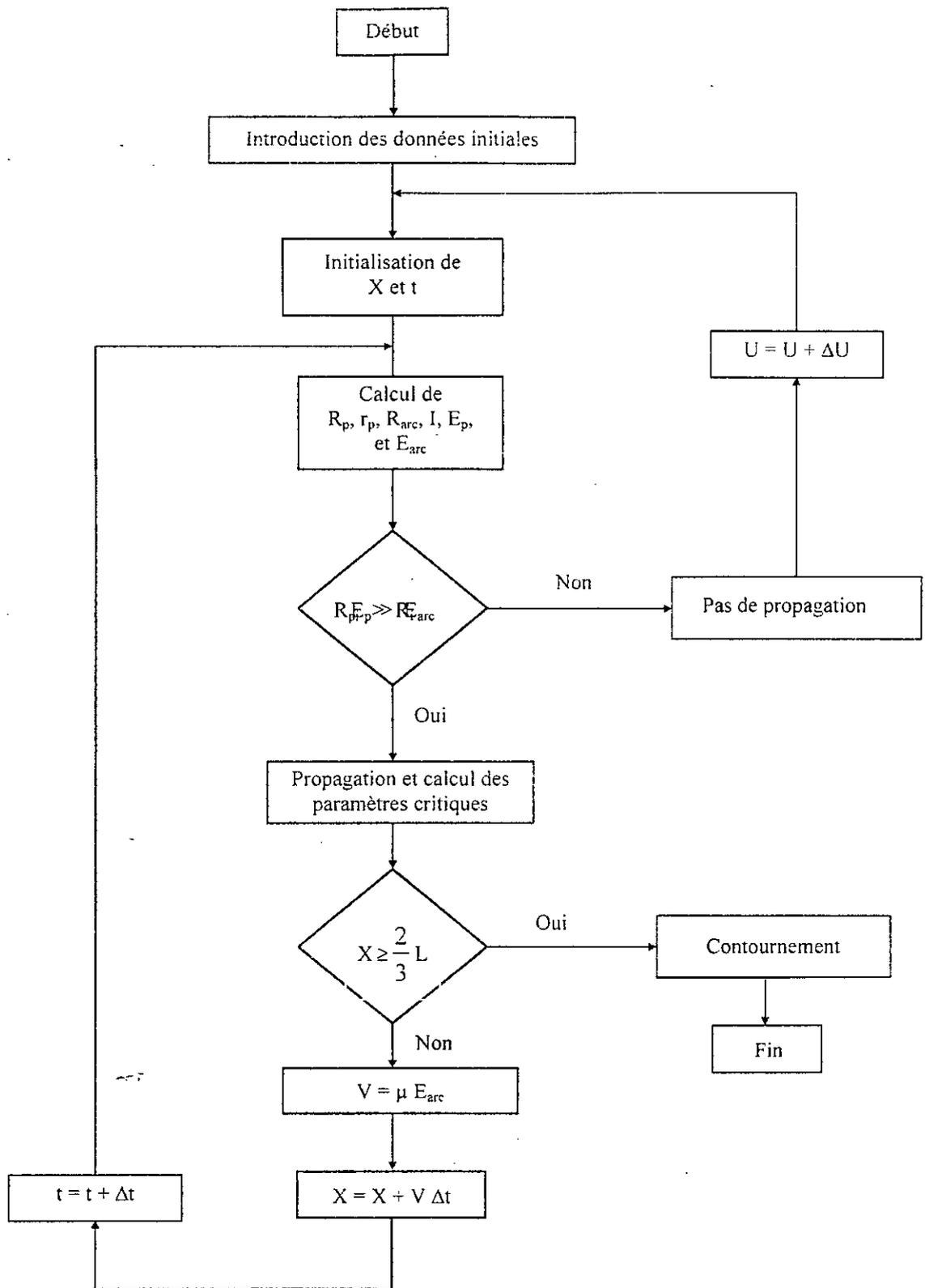


Figure III.5 : Organigramme du modèle dynamique

III.3.9. Validation

La validation est effectuée en comparant la tension de contournement, le courant critique ainsi que le temps au contournement estimés par notre modèle dynamique à ceux obtenus par d'autres chercheurs.

En tension continue, R.Sandararajan et R.S.Gorur [62] ont proposé un modèle dynamique utilisant le critère de propagation de B.F.Hampton [51]. Ils ont considéré un isolateur long fût constitué de sept (7) éléments, de longueur de fuite totale 3040 mm et de diamètre effectif 370 mm. Les constantes caractéristiques de l'arc prises dans ce modèle sont $n=0,5$ et $A=63$. La nouvelle valeur de la résistance non-linéaire de l'arc est calculée par $R_{arc}(nouvelle) = R_{arc}(ancienne) + dR_{arc}$. Le changement dynamique dans la résistance de l'arc est évalué selon l'équation (III.1) de O.Mayr [58]. Connaissant la longueur d'arc, le facteur de forme et la résistance de pollution, ils ont déterminé le courant de fuite. Le temps est calculé par $t(nouveau) = t(ancien) + \Delta t$, où Δt est défini par le rapport de l'allongement Δx de l'arc sur la vitesse de propagation. L'expression de cette dernière est donnée par le produit du champ au pied de l'arc et la mobilité des électrons dans cet arc. Cette mobilité varie de 5 à 100 cm^2/Vs . L'isolateur en question est soumis à différentes conductivités superficielles allant de 10 à 40 μS . Pour chaque conductivité, ces deux auteurs ont comparé leur tension critique de contournement à celle évaluée par le modèle statique de R.Wilkins [65] ainsi qu'à celle obtenue expérimentalement par V.Cron [65].

La figure (III.6) donne les caractéristiques présentant la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle, obtenues par notre modèle ainsi que celles dynamique de R.Sundararajan et R.S.Gorur, statique de R.Wilkins et expérimentale de V.Cron. Pour l'isolateur considéré et les conductivités adoptées par ces auteurs, une bonne concordance entre les quatre modèles a été obtenue. Notre modèle présente des tensions légèrement supérieures à celles obtenues par les trois modèles, pour des conductivités inférieures à 20 μS . Au delà de cette valeur, notre modèle suit parfaitement le modèle statique de R.Wilkins, présentant des tensions de contournement légèrement inférieures relativement à celles obtenues à partir des deux modèles : expérimental de V.Cron et dynamique de R.Sandararajan et R.S.Gorur.

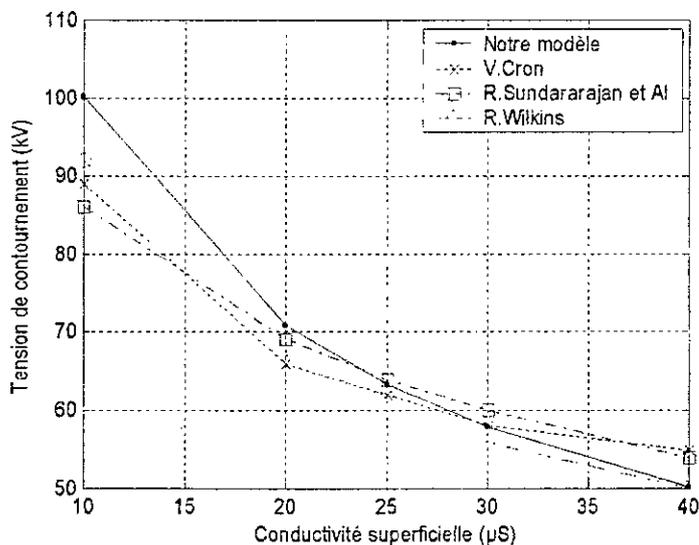


Fig. III.6 : Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle

Il est à signaler que la tension de contournement diminue avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante. Ceci est évident, car la réduction de la résistivité superficielle (qui se traduit par l'augmentation de la conductivité superficielle) de la pollution engendre la diminution de la tenue diélectrique des isolateurs.

Lors de l'élaboration de sa modélisation dynamique, N.Dhahbi [61] a considéré un isolateur cylindrique de longueur de fuite 187 cm et de rayon 15 cm. La conductivité superficielle de la couche de pollution se déposant sur cet isolateur varie de 5 à 50 μS . Ces deux conductivités extrêmes représentent respectivement une légère et forte pollution. Cet intervalle de conductivité correspond à une gamme de résistances linéiques comprises entre 40 et 500 $\text{k}\Omega/\text{m}$.

Dans ces conditions, la caractéristique obtenue à partir du modèle de N.Dhahbi ainsi que celle obtenue à partir de notre modèle, donnant le temps au contournement en fonction de la conductivité de la couche polluante, sont présentées à la figure (III.7). Cette dernière montre que le temps au contournement augmente avec la conductivité des couches polluantes. Ceci est expliqué par le fait que lorsque la conductivité de la pollution se déposant sur l'isolateur est faible, le contournement se produit directement sans apparition d'arcs partiels. Ce processus a pour effet de réduire le temps au contournement. Par contre, lorsque cette conductivité est telle que des décharges prenant naissance, se développent jusqu'à provoquer le contournement, le temps du à cette élancement sera important.

Basée sur les considérations énergétiques, la vitesse utilisée par N.Dhahbi est trouvée supérieure à celle que nous avons adoptée. Notre modèle présente, par conséquent, des temps au contournement plus importants, malgré que nous ayons pris une forte mobilité ($45 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [62]). Par ailleurs, les temps au contournement estimés par notre modèle, sont très proches de ceux calculés ou mesurés par A.M.Rahal [71] et J.P.Filho [72]. Selon ce dernier chercheur, les temps au contournement varient de quelques millisecondes à quelques dizaines de millisecondes correspondant respectivement aux faibles et fortes conductivités. Notons que N.Dhahbi a justifié ses faibles temps au contournement par le fait que la vitesse estimée par son modèle est trop importante qu'elle ne devrait l'être.

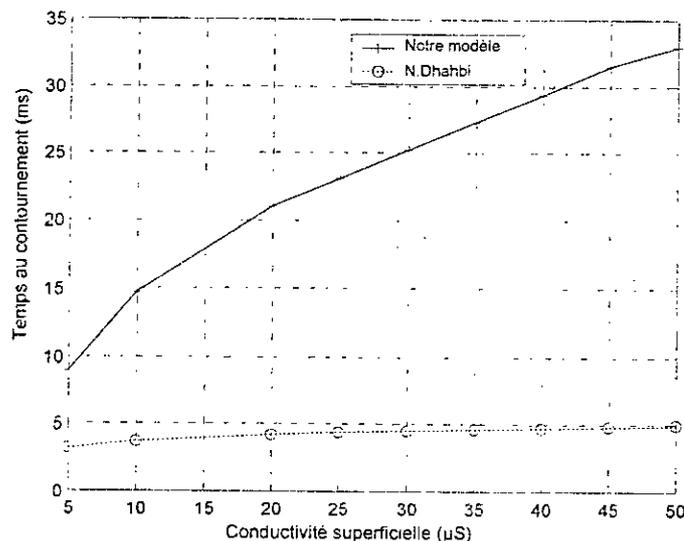


Fig. III.7 : Temps au contournement en fonction de la conductivité superficielle

Pour le même isolateur considéré par N.Dhahbi, nous avons représenté à la figure (III.8), les caractéristiques donnant l'évolution temporelle du courant de fuite critique obtenues par son modèle et le notre. Afin de pouvoir comparer l'allure de notre caractéristique à celle présentée par N.Dhahbi, il nous a fallu prendre une mobilité exagérée de $180 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

Dans la pratique, les mobilités des électrons dans l'arc sont plus faibles à celle-là. A titre d'exemple, R.Sandararajan et R.S.Gorur [62] ont considéré, dans leur modèle, des mobilités entre 5 et $50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Ces valeurs extrêmes correspondent respectivement, selon ces deux auteurs, à une faible et forte mobilité.

Par ailleurs, la diminution de la mobilité engendre l'augmentation du temps au contournement. Nous constatons dans ces conditions, que nos courants critiques sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par N.Dhahbi.

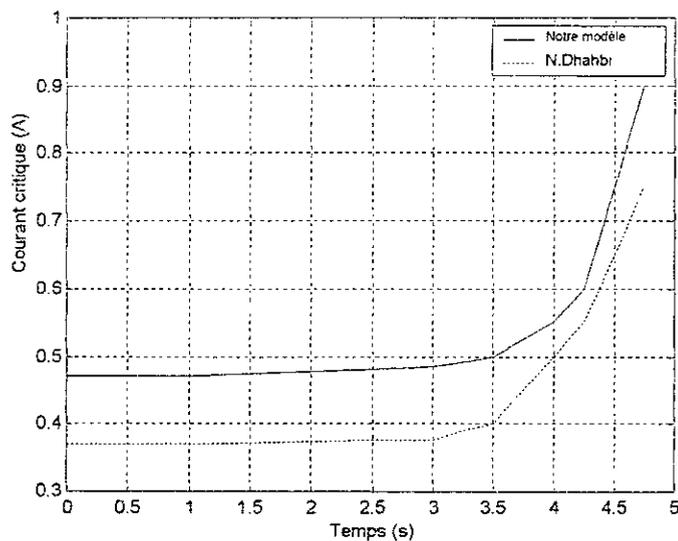


Fig. III.8 : Courant critique en fonction du temps

III.3.10. Application

La dynamique de l'arc électrique est décrite en tenant compte des évolutions en fonction du temps (évolution temporelle) et en fonction de la longueur de l'arc (évolution spatiale), de différents paramètres régissant le comportement d'un isolateur pollué, sur lequel une décharge se développe jusqu'à provoquer le contournement total. A titre illustratif, nous présentons par la suite les variations de la tension de contournement et du temps au contournement en fonction de la conductivité superficielle de la pollution.

Comme application, nous considérons le même isolateur utilisé par R.Sandararajan et R.S.Gorur [62]. Sa forme est cylindrique de 3040 mm de longueur de fuite et 370 mm de diamètre. Sur cet isolateur s'est déposé un dépôt polluant de conductivité superficielle variable allant de 3 à $24 \mu\text{S}$. Dans le but de déterminer la vitesse de propagation, nous avons aussi considéré une mobilité de $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

III.3.10.1 Evolution temporelle

Les figures (III.9 et III.10) présentent les évolutions des champs au pied de la décharge et dans la pollution en fonction du temps, pour différentes conductivités. Le temps $t=0$ représente l'instant de l'amorçage de la décharge à partir duquel le critère de propagation de l'arc est vérifié ; à cet instant le champ dans la couche polluante devient supérieur à celui au pied de la décharge. Ce dernier champ diminue au cours du temps. Cette diminution est relativement lente durant la phase de propagation et brusque durant la phase de contournement. Puisque le champ dans la pollution représente la contrainte critique, il demeure inchangé tant que la résistance linéique de la pollution reste constante. Notons que l'augmentation de la conductivité engendre la diminution de ces deux champs électriques.

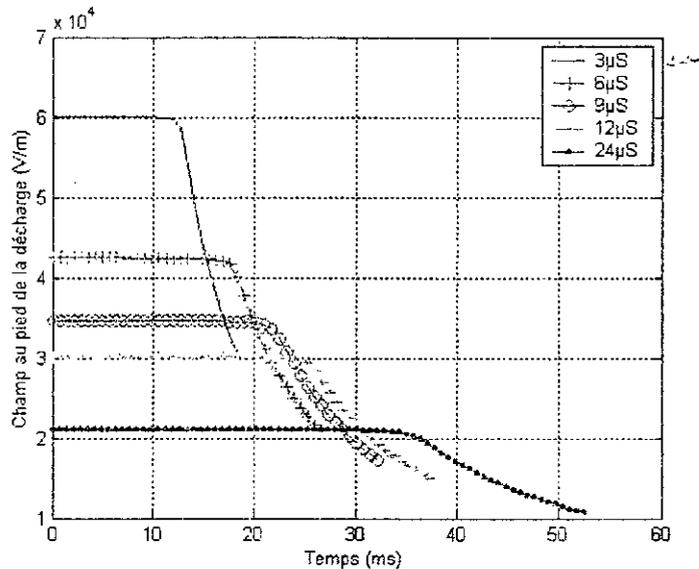


Fig. III.9 : Champ au pied de la décharge en fonction du temps, pour différentes conductivités superficielles

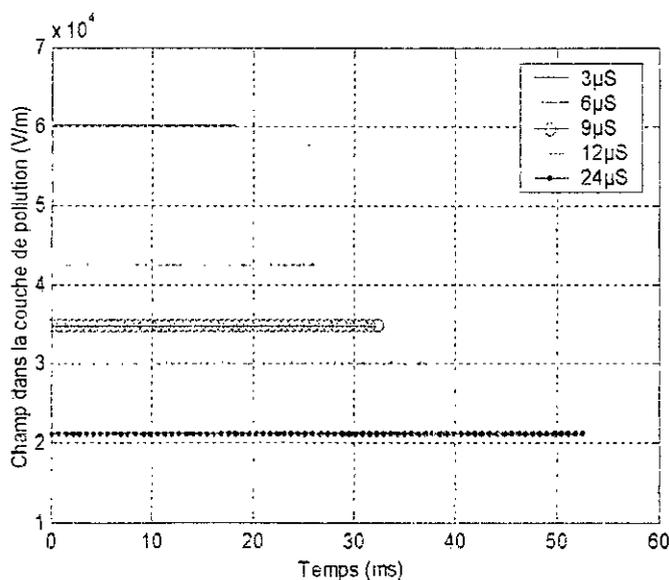


Fig. III.10 : Champ dans la couche de pollution en fonction du temps, pour différentes conductivités superficielles

La puissance délivrée par la source augmente lentement pendant la phase de propagation et rapidement durant la phase de contournement (Fig. III.11). Par ailleurs, l'énergie délivrée par la source d'alimentation déduite à partir de la caractéristique précédente, possède une allure croissance au cours du temps (Fig. III.12).

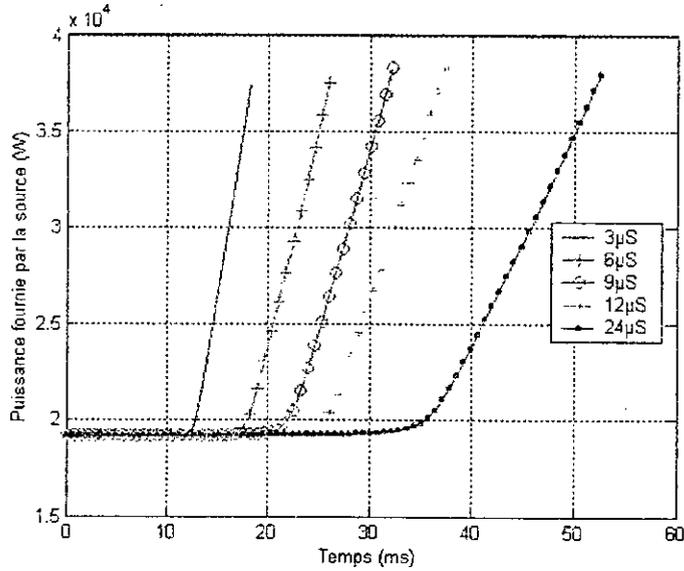


Fig. III.11 : Puissance fournie par la source en fonction du temps, pour différentes conductivités superficielles

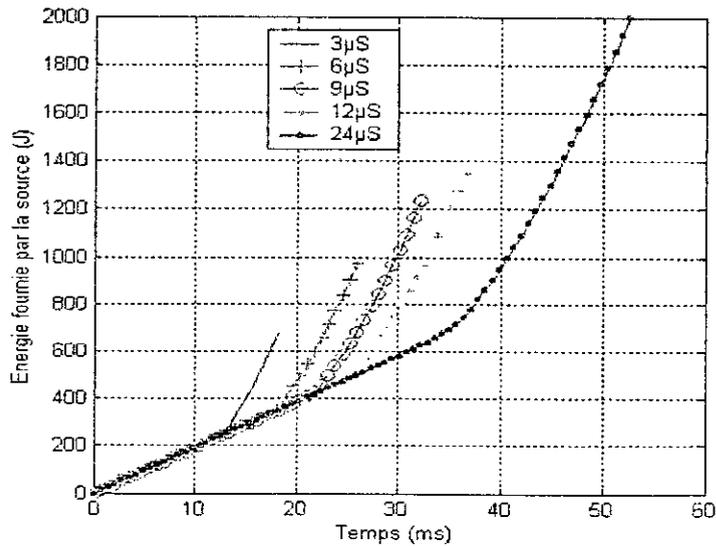


Fig. III.12 : Energie fournie par la source en fonction du temps, pour différentes conductivités superficielles

L'évolution de la décharge dans le temps, se fait d'une manière régulière, comme le montre la figure (III.13). Notons que plus la conductivité est importante, moins vite l'arc se déplace. En effet, l'augmentation de la conductivité engendre le prolongement de la phase de propagation.

Par ailleurs, la résistance de la partie de la couche polluante non court-circuitée par l'arc est une fonction décroissante du temps (Fig. III.14), ce qui est en parfait accord avec la propagation de l'arc.

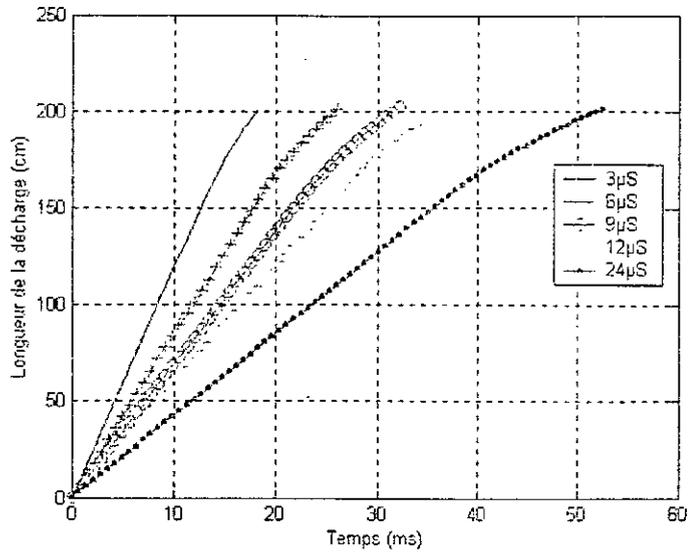


Fig. III.13 : Longueur de la décharge en fonction du temps, pour différentes conductivités superficielles

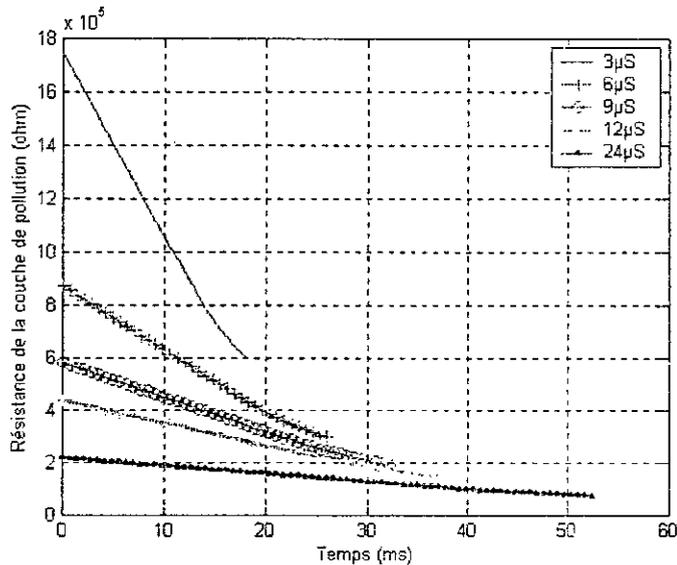


Fig. III.14 : Résistance de la couche de pollution en fonction du temps, pour différentes conductivités superficielles

La puissance transférée dans le canal d'arc électrique possède une même allure que celle de la longueur de l'arc à laquelle elle est proportionnelle (Fig. III.15), puisque la constante caractéristique de l'arc n est prise égale à l'unité. Cette puissance instantanée permet l'obtention de l'énergie transférée dans le canal conducteur. Cette énergie augmente considérablement au cours du temps (Fig. III.16). En outre, l'augmentation de la conductivité

de la pollution engendre la diminution de la puissance et donc de l'énergie transférées dans le canal d'arc. En effet, plus la conductivité est grande, plus l'arc se développe facilement en absorbant moins d'énergie.

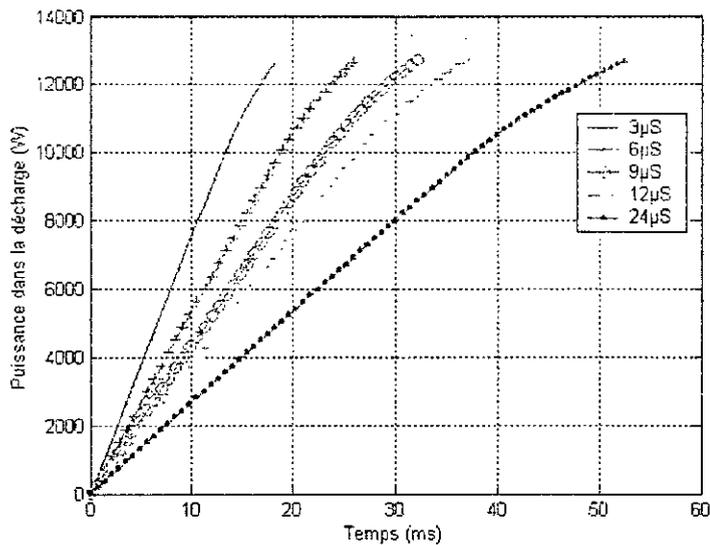


Fig. III.15 : Puissance dans le canal de la décharge en fonction du temps, pour différentes conductivités superficielles

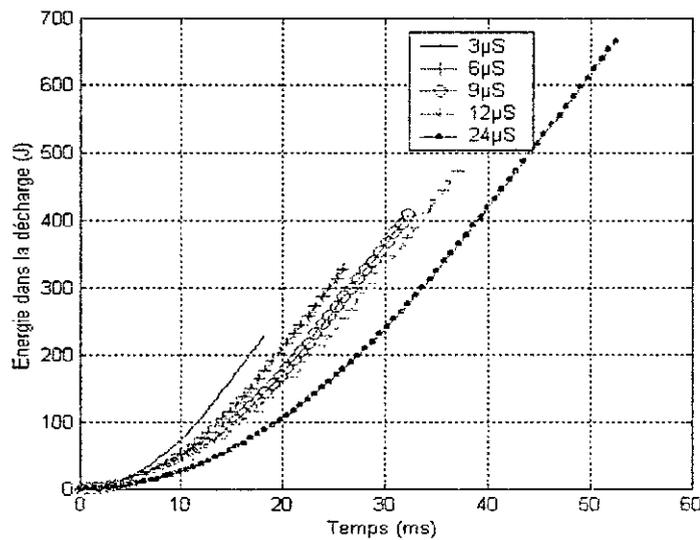


Fig. III.16 : Energie dans le canal de la décharge en fonction du temps, pour différentes conductivités superficielles

Les caractéristiques donnant le courant en fonction du temps (Fig. III.17) montrent que l'allure du courant de fuite présente une première partie à croissance relativement lente correspondant à la phase de propagation, suivie d'une brusque augmentation correspondant à

la phase du contournement. Nous constatons également que plus la pollution est accentuée (donc plus la conductivité est grande), plus les courants sont importants.

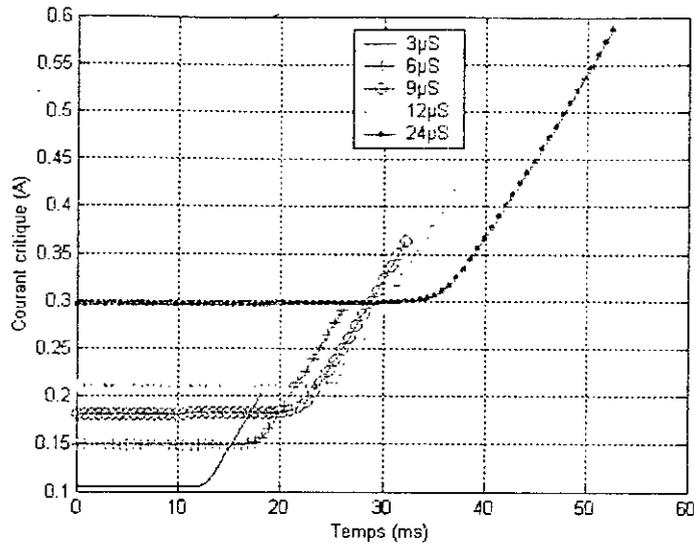


Fig. III.17 : Courant critique en fonction du temps, pour différentes conductivités superficielles

La figure (III.18) donne la variation du rayon du canal d'arc en fonction du temps, pour différentes conductivités. Comme le rayon du pied de l'arc est calculé à partir du modèle de R. Wilkins [65], son allure est similaire à celle du courant de fuite. En effet, l'augmentation de ce rayon est relativement lente durant la phase de propagation. A partir d'un certain temps, le rayon de la décharge croît assez brusquement pour atteindre une taille plus ou moins importante, lorsque le courant dans l'arc atteint la phase d'augmentation rapide. En outre, ce rayon augmente, tout comme le courant, avec la conductivité de la pollution.

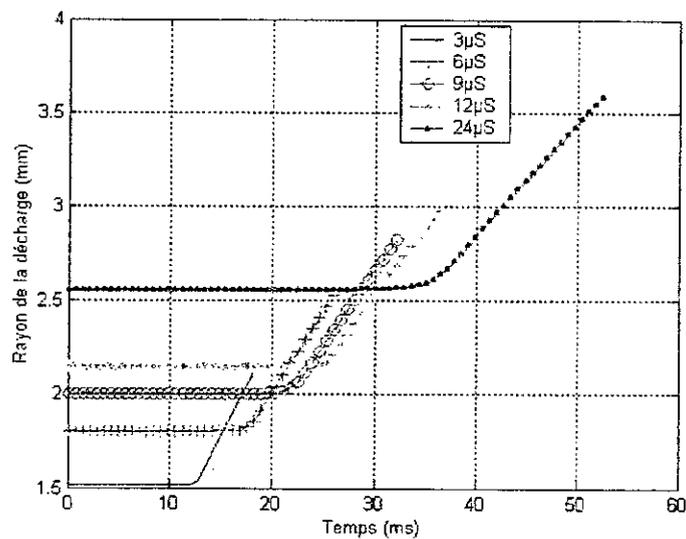


Fig. III.18 : Rayon de la décharge en fonction du temps, pour différentes conductivités superficielles

Les caractéristiques de la figure (III.19), donnant la variation de la tension aux bornes de la décharge en fonction du temps pour différentes conductivités, présentent une première partie croissante représentant la phase de propagation et une deuxième partie décroissante représentant la phase de contournement. Selon F.Obenaus [60], la tension aux bornes de la décharge est donnée suivant l'expression empirique (III.25). Cette tension est proportionnelle à la longueur d'arc et inversement proportionnelle au courant (car la constante n est prise égale à l'unité).

Comme le courant croît lentement durant la phase de propagation, la tension aux bornes de la décharge suit pratiquement l'allure de la longueur de cette décharge et augmente, par conséquent, d'une manière régulière en fonction du temps. Durant la phase de contournement, le courant augmente brusquement, ce qui engendre la diminution de la tension aux bornes de la décharge. Notons que pour une conductivité donnée, l'allure de la tension de l'arc coïncide parfaitement, durant l'étape finale du contournement, avec celles obtenues pour des conductivités inférieures. Par ailleurs, plus la conductivité est faible, plus la tension aux bornes de la décharge est importante.

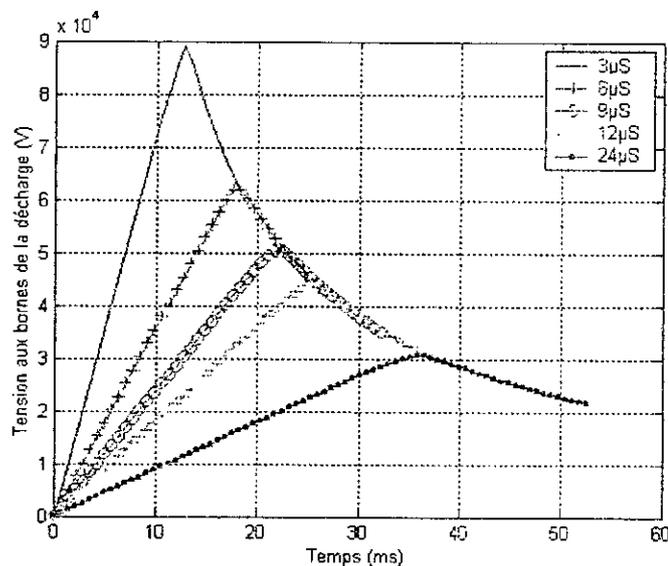


Fig. III.19 : Tension aux bornes de la décharge en fonction du temps, pour différentes conductivités superficielles

Pour une mobilité donnée des électrons, la vitesse d'élongation de la décharge électrique diminue au cours du temps (Fig. III.20). Ceci est expliqué par la diminution du champ au pied de cette décharge auquel la vitesse est proportionnelle. L'allure de la vitesse de propagation présente en fait deux parties. Une première à décroissance relativement lente, suivie d'une deuxième à diminution brusque correspondant à la fin de la phase de propagation. D'autre part, l'augmentation de la conductivité entraîne la diminution de la vitesse de propagation.

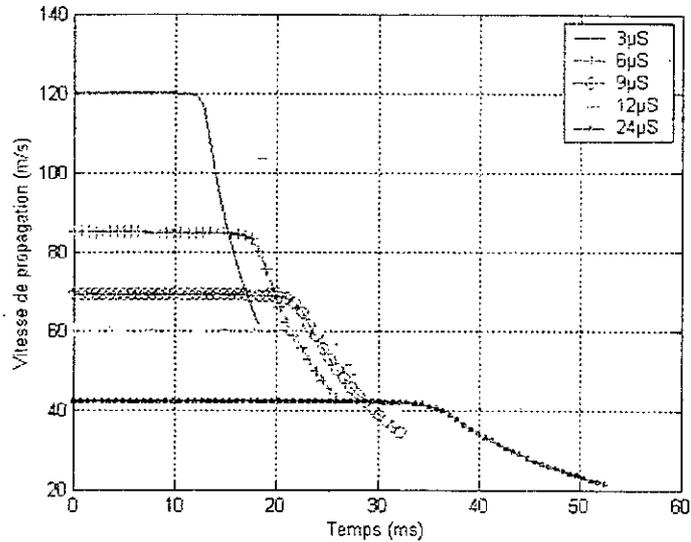


Fig. III.20 : Vitesse de propagation en fonction du temps, pour différentes conductivités superficielles

Les caractéristiques donnant la variation de la résistance du canal d'arc en fonction du temps (Fig. III.21), montrent que cette résistance augmente en premier lieu, atteint un maximum et diminue par la suite. La raideur de ces caractéristiques est d'autant plus importante que les conductivités sont faibles. En plus, il est tout à fait évident que, la résistance de l'arc décroît avec l'augmentation de la conductivité de la pollution.

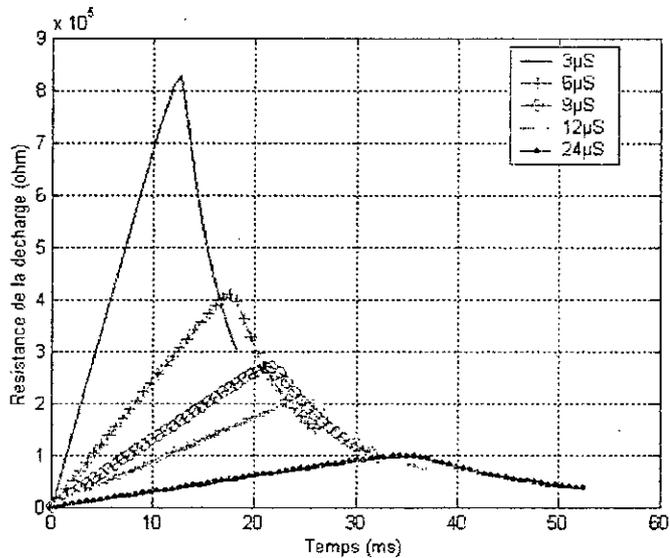


Fig. III.21 : Résistance de la décharge en fonction du temps, pour différentes conductivités superficielles

Les caractéristiques présentées à la figure (III.22) montrent l'évolution de la résistance linéique du canal de la décharge électrique dans le temps, pour différentes conductivités. Cette variation possède également deux parties distinctes. La résistance linéique de l'arc diminue lentement durant la phase de propagation et brusquement durant la phase de contournement. Par ailleurs, la diminution de la conductivité de la pollution engendre l'augmentation de la résistance linéique de l'arc électrique.

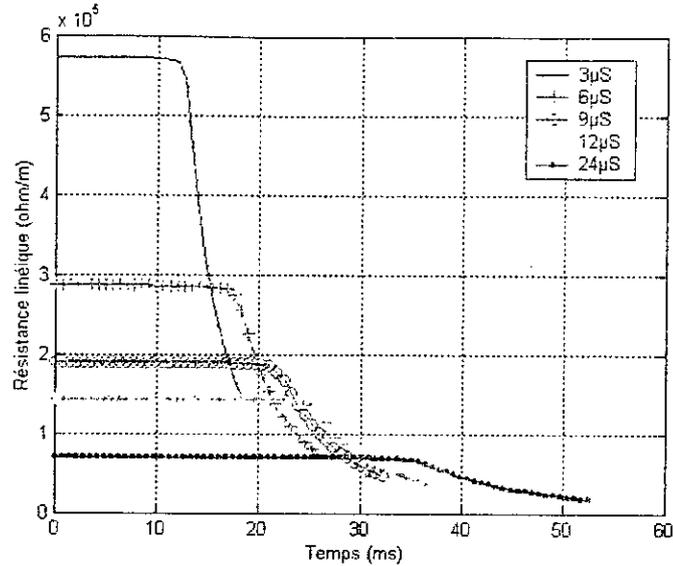


Fig. III.22 : Résistance linéique de la décharge en fonction du temps, pour différentes conductivités superficielles

La figure (III.23) met en évidence les différentes phases de variation de la résistivité de l'arc au cours du temps. Tout comme les évolutions précédentes, cette variation comporte deux phases. Durant la propagation, la résistivité de la décharge présente une diminution relativement lente. Cette décroissance est très accentuée durant la phase de contournement, surtout pour les petites conductivités. Notons aussi que l'accroissement de la conductivité de la couche polluante engendre l'affaiblissement de la résistivité de l'arc.

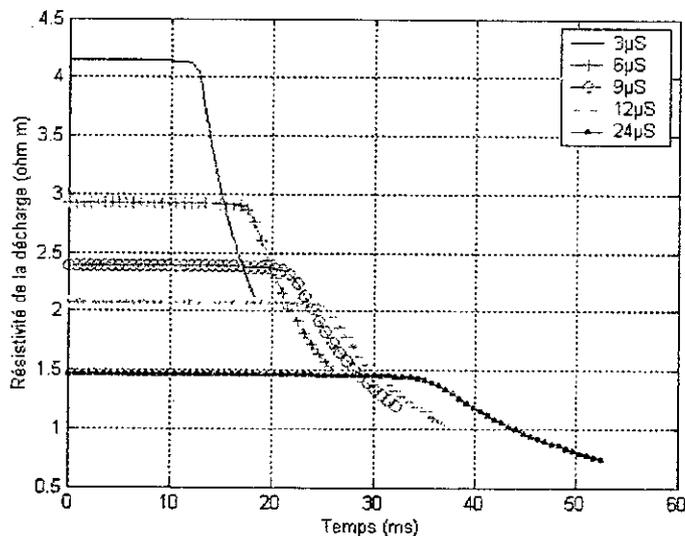


Fig. III.23 : Résistivité de la décharge en fonction temps, pour différentes conductivités superficielles

III.3.10.2. Evolution spatiale

Etant donné que la longueur de la décharge augmente de façon continue au cours du temps, les caractéristiques des différentes grandeurs régissant l'arc électrique conservent leurs mêmes allures en fonction de la longueur de la décharge, qu'en fonction du temps:

En effet, ces caractéristiques (Fig. III.24 à III.27) présentent deux phases de variation correspondant à la propagation et au contournement. La limite entre ces deux phases, indépendante de la conductivité de la couche polluante, est obtenue pour une longueur critique de l'arc électrique estimée à la moitié de la longueur de fuite totale de l'isolateur. Cette longueur critique diffère de celle obtenue par N.Dhahbi [61] (deux tiers de la ligne de fuite totale de l'isolateur) et de celle trouvée expérimentalement par A.Mekhaldi [4] et D.Namane [11] (un tiers de la ligne de fuite totale). Par ailleurs, certains chercheurs [75, 76] ont montré à partir des essais sur une surface électrolytique de longueur de fuite totale L , qu'il existe un intervalle de longueurs critiques dépendant du degré de pollution. En effet, P.S.Ghosh et N.Chatterjee [75] ont trouvé un intervalle de $0.4L$ à $0.63L$ et B.Zegnini et D.Mahi [76] un intervalle de $0.385L$ à $0.721L$. Cette différence dans l'évaluation de la longueur critique de l'arc peut être justifiée par le choix du modèle, le mode d'application de la pollution ainsi que la nature des polluants.

D'autre part, à la figure (III.24) sont tracées certaines caractéristiques concernant le courant de fuite en fonction de la longueur de l'arc, pour différentes vitesses de propagation. La mobilité des électrons dans l'arc varie de 20 à $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Nous constatons que toutes ces courbes sont confondues. Ceci reste valable pour toutes les autres grandeurs en fonction de la longueur de l'arc électrique. Il s'agit par conséquent d'une caractéristique intrinsèque des modèles statiques qui ne prennent pas en considération le facteur temps, d'où l'importance et l'intérêt de l'élaboration des modèles en régime dynamique.

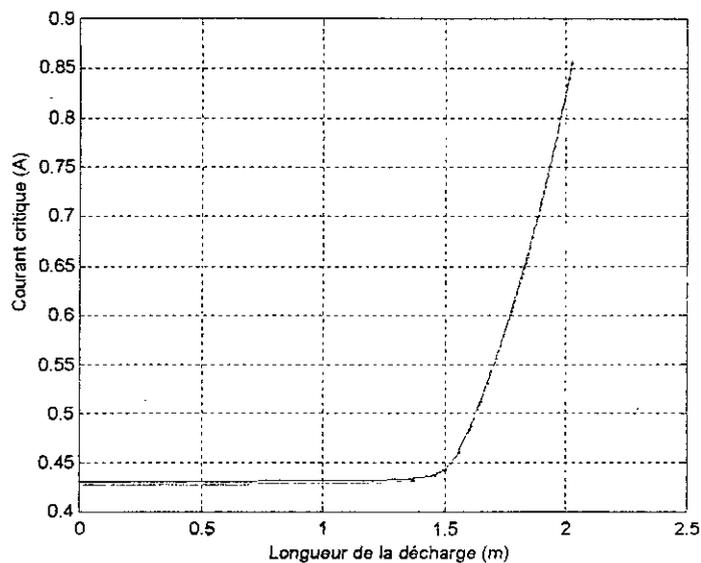


Fig. III.24 : Courant critique en fonction de la longueur de la décharge, pour différentes mobilités (20 à $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)

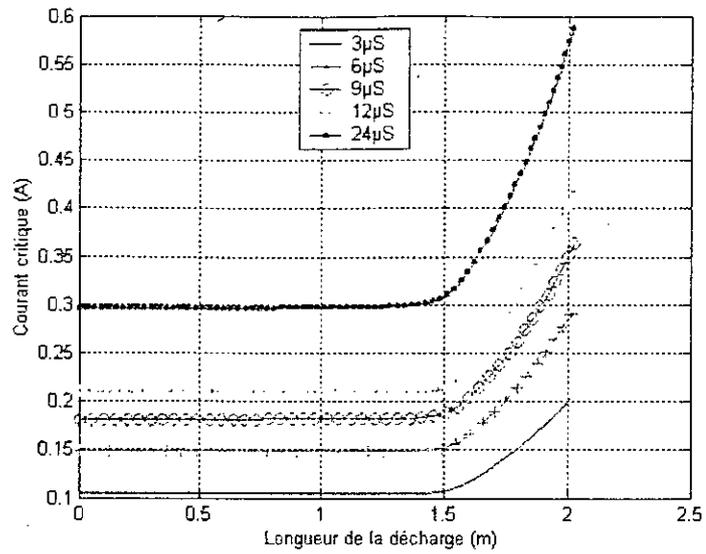


Fig. III.25 : Courant critique en fonction de la longueur de la décharge, pour différentes conductivités

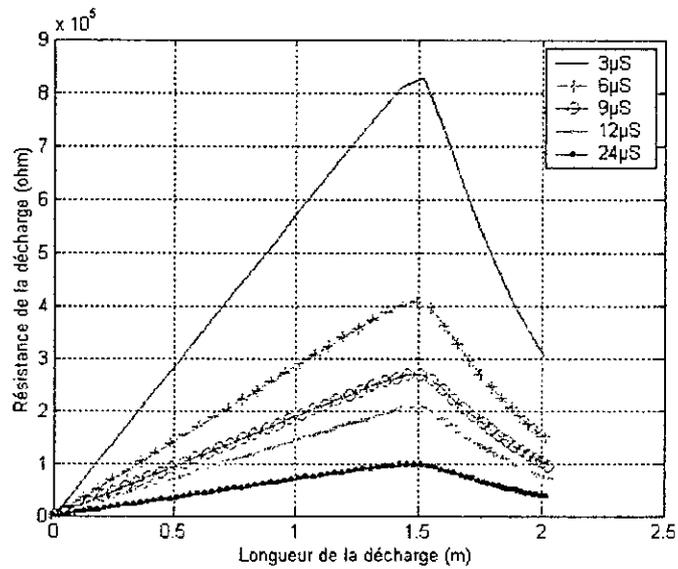


Fig. III.26 : Résistance de la décharge en fonction de sa longueur, pour différentes conductivités superficielles

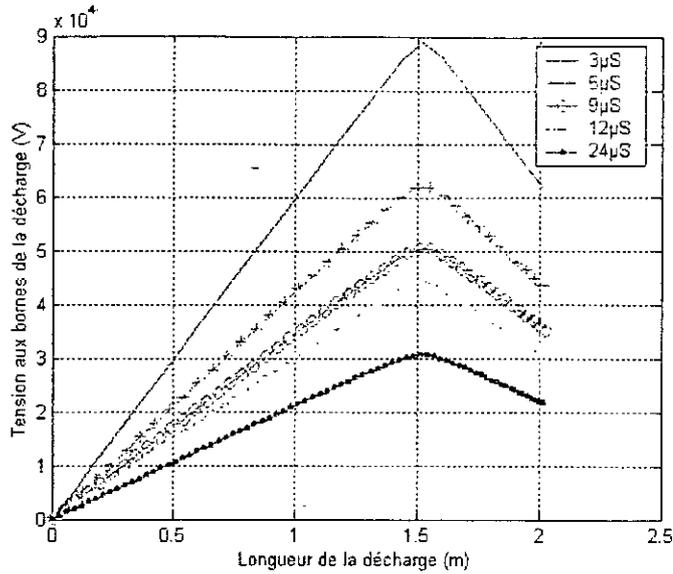


Fig. III.27 : Tension aux bornes de la décharge en fonction de la longueur de la décharge pour différentes conductivités superficielles

III.3.10.3. Tension de contournement et temps au contournement

Les figures (III.28) et (III.29) présentent les variations de la tension de contournement et le temps au contournement en fonction de la conductivité superficielle de la pollution. Nous remarquons que l'augmentation de la conductivité engendre la diminution de la tension de contournement et l'augmentation du temps au contournement.

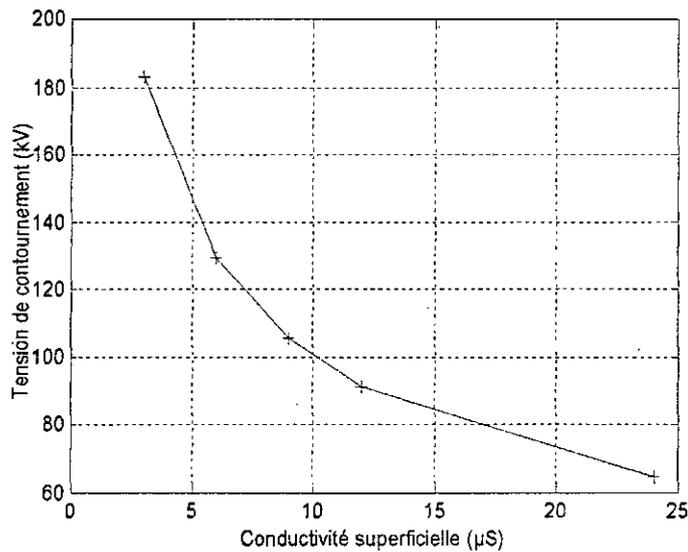


Fig. III.28 : Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle

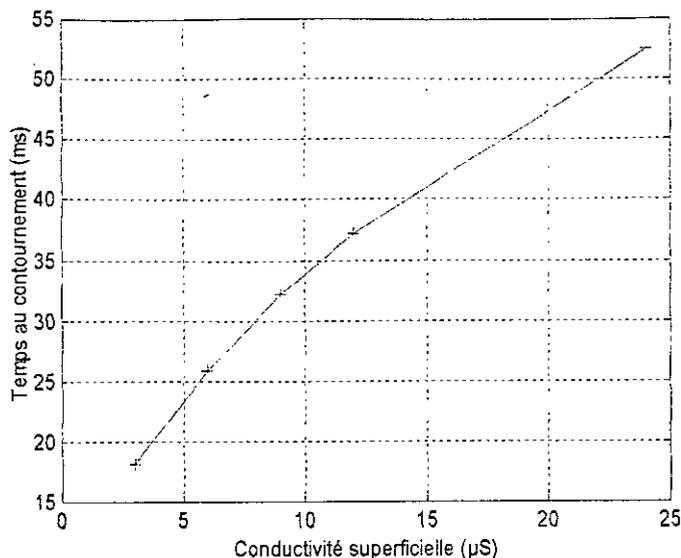


Fig. III.28 : Tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle

III.3.11. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté un modèle dynamique basé sur un critère analytique de propagation de la décharge. Tenant compte de la géométrie de l'isolateur, ce modèle permet de calculer la tension de contournement et le temps au contournement ainsi que de suivre l'évolution dans le temps des différents paramètres caractérisant l'état critique des surfaces isolantes polluées.

Les résultats de simulation donnant la tension de contournement, obtenus à partir du modèle élaboré, sont en bon accord avec ceux trouvés par d'autres chercheurs [62, 65]. En outre, les temps au contournement estimés sont très proches à ceux trouvés par A.M.Rahal [71] et J.P.Filho [72].

Comme principales conclusions, les caractéristiques que nous avons obtenues présentent deux évolutions distinctes correspondant à la phase de propagation (qui s'effectue sur la moitié de la longueur de fuite totale de l'isolateur) et à la phase de contournement. Le courant de fuite, le rayon de la décharge et la puissance fournie par la source d'alimentation augmentent lentement durant la phase de propagation et rapidement durant la phase de contournement. Par ailleurs, la longueur ainsi que la puissance de la décharge augmentent régulièrement avec le temps. Selon le modèle proposé, il est évident que lorsque la longueur de la décharge augmente, la résistance de la partie non court-circuitée par cette décharge diminue. Le champ au pied de la décharge, la vitesse de propagation, la résistivité et la résistance linéique de la décharge diminuent lentement pendant la phase de propagation et rapidement pendant la phase de contournement. Finalement, la résistance de la décharge et la tension à ses bornes augmentent en premier lieu pour atteindre un maximum et diminuer à la fin de la phase de propagation.

CHAPITRE IV

UTILISATION DES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS DANS LE DOMAINE DE LA POLLUTION DES ISOLATEURS

IV.1. INTRODUCTION

Les réseaux de neurones avec leurs aptitudes en classification, mémorisation, filtrage et approximation sont devenus un moyen très efficace et ont conquis plusieurs domaines. Dans le domaine de la haute tension, certains travaux de recherche ont permis de développer des algorithmes de calcul utilisant et/ou élaborant différentes techniques d'apprentissage et de prédiction, et d'élargir l'application des réseaux de neurones artificiels (RNA) au diagnostic de l'isolation [77], aux isolateurs pollués pour estimer le temps au contournement [27] et la tension de contournement [78], dans le dimensionnement de l'isolation [79], dans l'étude de l'influence des décharges partielles sur les lignes aériennes [80], pour la classification des différents défauts dus au développement des décharges partielles [81], dans l'identification des décharges partielles [82], aux systèmes à isolation en polymères [83-85], au diagnostic de l'huile de transformateur [86, 87], dans le vieillissement thermique de l'huile de transformateur [88, 89], aux différents types d'isolation [90, 91], dans la prédiction de la tension de claquage des intervalles d'air pointe-barrière-plan [92], ...etc.

Afin de réduire la durée des essais et d'extrapoler certaines fonctions non-linéaires caractérisant la propagation des décharges électriques sur des surfaces isolantes polluées, nous avons élaboré trois programmes de prédiction utilisant les réseaux de neurones artificiels. Les trois configurations qui sont utilisées entrent dans le même type des réseaux de neurones artificiels, il s'agit du réseau à fonction de base radiale (RBF), entraîné par la méthode d'optimisation aléatoire. La différence entre ces trois configurations résulte soit dans la nature des entrées et des sorties, soit dans l'architecture du réseau utilisé. Dans ce travail, nous détaillons en premier lieu l'architecture des réseaux de neurones des trois configurations ainsi que les principes de chacune d'elles. Nous exposons par la suite les résultats de simulation numérique des trois configurations adoptées ainsi que leurs discussions, et ce en se basant sur certaines caractéristiques expérimentales obtenues par A.Mekhaldi [4] et D.Namane [11].

IV.2. STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT D'UN NEURONE ARTIFICIEL

L'étude des réseaux de neurones date des années 1940-1950. Héritière de la révolution scientifique qui mobilisait les esprits à cette période, cette discipline trouve ses sources à la fois dans les connaissances neurobiologiques de l'époque et dans l'ordinateur qui permet d'explorer par simulation le comportement des modèles théoriques proposés. Cette décennie vit aussi plusieurs travaux importants [93] en particulier, les réflexions sur la nature du raisonnement humain de John von Newomann, d'Alan Turing, d'Alonzo Church, d'Allan newell et de Herbert Simon qui galvanisèrent les recherches sur le cerveau et l'esprit humain et posèrent les fondations de ce qui allait devenir l'intelligence artificielle.

Les premiers travaux ont débuté en 1943 par Warren Mc Culloch (physiologiste) et Walte Pitts (mathématicien) [94], lorsqu'ils proposèrent pour la première fois un modèle formel de la cellule nerveuse qui résumait en une formule simple l'effet d'une impulsion nerveuse sur un neurone (Fig. IV.1). Leur système est simple ; chaque neurone possède des connexions le reliant aux autres neurones. Les synapses qui effectuent les connexions (en grande partie aléatoires) entre neurones peuvent être excitatrices ou inhibitrices. Périodiquement, le neurone calcule son degré d'activation. Si celui-ci dépasse un certain seuil, le neurone devient actif. En effet, le modèle fonctionnel proposé par ces auteurs est le suivant :

- Un neurone sera actif si son excitation dépasse un certain seuil et inactif dans le cas contraire.
- Chaque synapse fournit au neurone aval une unité d'excitation élémentaire, si le neurone amont est actif.
- Des systèmes de tels neurones sont capables d'exécuter des opérations logiques.

Si ce modèle reste trop grossier pour expliquer ce qui se passe dans le cerveau, il est le point de départ de la construction de nouveaux automates : les réseaux neuromimétiques. Le neurone formalisé est un automate booléen dont les éléments sont les suivants :

- les entrées du neurone ($e_i, i=1, \dots, n$).
- la sortie (S).
- le seuil (β).
- les paramètres de pondération (w_j).
- la fonction de seuillage (f) : $f(x)=1$ si $x>\beta$, sinon $f(x)=0$.

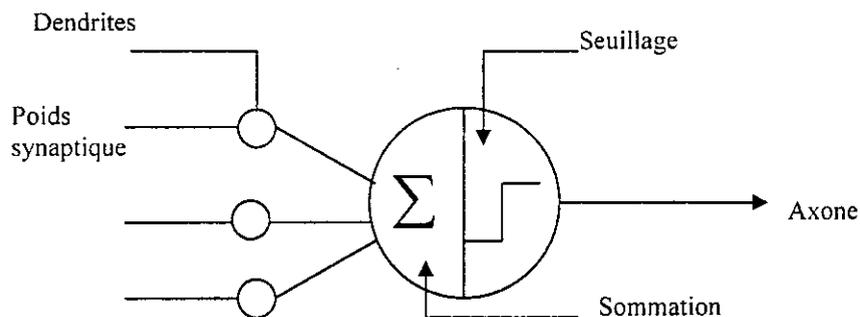


Fig. IV.1: Neurone formel

Donald Hebb (en 1949), psychophysiologiste américain, s'oppose aux théories béhavioristes du comportement humain [94]. Le béhaviorisme, qui réduit le comportement à une somme d'associations de type stimulus/réponse, se heurte à deux problèmes majeurs :

- Comment expliquer que la privation d'expériences sensorielles chez de jeunes animaux ait des effets négatifs sur le comportement de l'adulte.
- Comment expliquer le mécanisme des idées abstraites et de l'imagination (qui ne sont directement liées à aucun stimulus) ?

D.Hebb, en l'absence de bases physiologiques sûres et de toute espèce de matériel informatique, fait les hypothèses suivantes :

- Il existe des assemblées cellulaires ou réseaux de neurones, qui se trouvent dans le cortex visuel primaire et reçoivent des stimulations de photorécepteurs de la rétine. Ces neurones activent à leur tour des neurones du cortex « associatif » sans lien direct avec la rétine.

- Des signaux d'entrées convergent font décharger les neurones de ces assemblées et activent les boucles fermées (l'existence de boucles fermées ou de circuits rétroactifs avait déjà été mis en évidence par le neurophysiologiste Raphael Lorente de No [96]) capables d'expliquer les structures conceptuelles.
- Les comportements résultent de l'existence de structures neurales qui sont des assemblées de cellules interagissant par des synapses hyperactivées. La « règle de D.Hebb » dit que toute connexion inter-neuronale activée tend à se renforcer.

En conclusion, Donald Hebb [94] proposait une hypothèse qui associe l'activité des neurones à l'efficacité des synapses qui les reliait. Ces deux théories, en décrivant formellement d'une part le comportement à court terme d'un réseau connexionniste en fonction des neurones qui le constituent et d'autre part son comportement à long terme en fonction de ses interconnexions, constituent les fondements du neuromimétisme.

Peu de temps après, Franck Rosenblatt et Bernard Widrow [95] proposèrent indépendamment des modèles neuromimétiques ; le perceptron et l'Adaline respectivement, capables d'apprendre à résoudre des problèmes posés par l'expérimentateur. Ces travaux donnèrent lieu à une intense activité de recherche.

L'existence possible d'autres règles que la règle de D.Hebb va conduire à de nouvelles modélisations obéissant à d'autres finalités que la simulation : on ne cherchera plus alors à savoir comment le réseau fonctionne ou si son fonctionnement reproduit de façon plausible celui du cerveau humain. On voudra surtout imposer au réseau une certaine fonctionnalité, par exemple, celle de reconnaître des formes arbitraires ou de classer des informations. Le réseau devient alors une fonction de transfert des entrées dont il faut calculer les bons paramètres. Cette démarche aboutit dans les années 1960 à la construction de machines particulières comme l'adaptateur linéaire de Widrow et Hoff ou le perceptron de Rosenblatt [94]. C'est en 1965 que Nilson publie le classique ouvrage « learning machine » qui construit les fondations mathématiques de l'apprentissage automatique pour la reconnaissance de formes [94].

IV.3. ELEMENTS CONSTITUTIFS D'UN RESEAU DE NEURONES

Un réseau de neurones est un graphe orienté et pondéré. Les nœuds de ce graphe sont des automates simples (neurones formels ou unités connexionnistes). Ces automates sont dotés d'un état interne (activation), par lequel ils influencent les autres neurones du réseau. Cette activité se propage dans le graphe le long d'arcs pondérés appelés liens synaptiques ; par extension, on appelle poids synaptique la pondération d'un lien synaptique. La règle qui détermine l'activation d'un neurone en fonction de l'influence de ses voisins est appelée règle ou fonction d'activation. L'état du réseau entier est composé de l'activation de ses neurones constitutifs. Si l'on suppose que les N neurones d'un réseau sont indexés, cet état global peut être exprimé sous la forme d'un vecteur d'activation, dont les composantes sont les valeurs d'activation des neurones individuels :

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_N)$$

De même, les liens synaptiques du réseau sont utilement décrits par la matrice des poids synaptiques, matrice carrée dans laquelle s'inscrivent les poids des liens :

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & \dots & w_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{M1} & \dots & w_{MN} \end{bmatrix}$$

En général, un neurone n'est relié qu'à un sous-ensemble d'autres neurones. En effet, la connectivité d'un réseau est rarement complète, mais obéit plutôt à des contraintes imposées lors de sa construction. Les liens manquants sont alors représentés dans la matrice des poids par un élément nul ; quand les contraintes de connectivité sont sévères, la matrice des poids résultante est creuse. Ainsi, les caractéristiques de la matrice résument bien la structure de connectivité du réseau. On nommera architecture, la structure du réseau (nombre et types des neurones, et connectivité).

Une fois l'architecture du réseau déterminée, il reste encore à choisir les valeurs des poids synaptiques de connexions que cette architecture a prescrites. Souvent, ce choix est implicite dans les contraintes de connectivité choisies ; ainsi, les neurones des modèles compétitifs doivent interagir par des liens essentiellement inhibiteurs. Dans d'autres cas, le réseau est suffisamment simple pour les déterminer directement, selon l'effet désiré.

Cependant, les cas simples sont l'exception plutôt que la règle : un réseau de neurone comporte en général un grand nombre de connexions, qui ont de surcroît un rapport fort complexe avec le comportement du réseau. En effet, la plupart des modèles neuromimétiques disposent de mécanismes capables de modifier leurs poids synaptiques automatiquement ; ils sont dotés de règles d'apprentissage. La règle d'entraînement, ainsi que le choix de fonctions d'activations et de contraintes de connectivité constituent les principaux éléments qui définissent un modèle neuromimétique.

Il résulte que le réseau possède deux dynamiques, celle de l'activité de ses neurones et celles des poids de ses liens. En général, le changement d'activation du réseau est beaucoup plus rapide que l'évolution de ses poids synaptiques, et on suppose que la dynamique de l'activation est indépendante de la dynamique des poids (on dira que le changement de l'activation est adiabatique par rapport à celui des poids).

Tout l'intérêt d'un réseau de neurones réside dans sa capacité de résoudre des problèmes pratiques. Pour l'utiliser, il est donc nécessaire de communiquer au réseau les données du problème en question, et de lui soutirer le résultat de ses calculs. Répartissons donc les neurones du réseau en trois ensembles (Fig. IV.2) :

- Ensemble E des neurones d'entrée qui perçoivent les données du problème.
- Ensemble S des neurones de sortie dont l'activation sera interprétée comme la réponse du réseau.
- Ensemble C des neurones cachés qui ne sont ni à l'entrée ni à la sortie du réseau. Ces neurones n'ont aucun lien direct avec l'utilisateur du réseau et doivent donc agir par l'intermédiaire d'autres neurones.

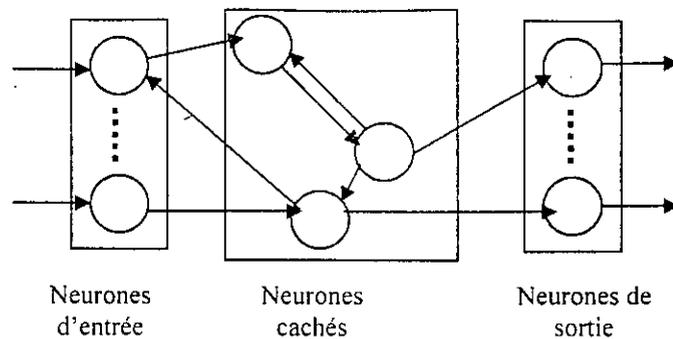


Fig. IV.2 : Un réseau de neurones

IV.4. APPRENTISSAGE DES RESEAUX DE NEURONES

On entend par apprentissage d'un réseau, l'opération qui consiste à modifier les connexions dans le réseau lors de la présentation d'un vecteur d'entrée à celui-ci. La modification des poids se poursuit jusqu'à ce que ces derniers ne varient que d'une façon infime. Le réseau est entraîné pour être adapté à un type d'application, à l'aide d'algorithmes appropriés qu'on verra par la suite.

L'apprentissage d'un réseau se fait généralement dans le contexte d'une tâche ou d'un comportement à apprendre. Les informations à traiter sont codées sous la forme d'un vecteur appelé « patron d'entrée », qui est communiqué aux neurones d'entrée du réseau. La réponse du réseau s'interprète à partir de la valeur d'activation de ces neurones de sortie, dont le vecteur s'appelle « patron de sortie ». Lors d'un apprentissage supervisé, on dispose aussi du comportement de référence que doit apprendre le réseau, exprimé sous la forme de « patron de référence », ou « patron de sorties désirées ».

En général, l'apprentissage se fait sur une période relativement longue, durant laquelle les patrons d'entrées (et éventuellement de sorties désirées) peuvent être présentés au réseau un grand nombre de fois chacun. Cet apprentissage comprend quatre étapes de calcul :

- 1- Initialisation des poids synaptiques du réseau : les poids trouvés par le réseau à la fin de l'apprentissage dépendent souvent de l'ensemble des poids dont il disposait au départ. La pratique courante est d'initialiser les poids du réseau à des petites valeurs aléatoires au début de l'apprentissage.
- 2- Présentation du patron d'entrée et propagation d'activation.
- 3- Calcul de l'erreur à partir de l'activation de chaque neurone et de celui des neurones qui lui sont reliés. Dans le cas d'un apprentissage supervisé, l'erreur tient aussi compte de la différence entre l'activation des neurones de sortie et de patron de référence.
- 4- Calcul du vecteur de correction : à partir des valeurs d'erreur, on détermine alors la correction à apporter aux poids synaptiques des connexions et aux seuils des neurones. La correction effective des poids peut se faire après chaque présentation de patron. Le

nombre de patrons à présenter au réseau avant d'effectuer la correction s'appelle « fenêtre de mise à jour ».

5- Les étapes 2, 3 et 4 sont répétées jusqu'à la fin de l'apprentissage.

Il est clair qu'un grand nombre de choix s'impose à celui qui voudrait entraîner un réseau de neurones. Chaque choix compte plus d'un écueil potentiel, dont par exemple :

- Insuffisance de la règle d'apprentissage : rien ne garantit que la règle d'apprentissage converge vers la solution optimale.
- Minima locaux : la majorité des apprentissages supervisés procèdent par descente du gradient. Ce type de technique peut conduire à une solution sous optimale. En pratique, ce type de problème est particulièrement difficile à éviter, notamment parce que la surface d'erreur n'est généralement pas connue. Sachant que les poids initiaux du réseau conditionnent en partie les résultats de l'apprentissage ; plusieurs chercheurs relancent l'apprentissage à partir du choix des poids initiaux différents pour se préserver de ce problème.
- Mauvais choix de paramètres : le comportement du réseau est gouverné par un ensemble de paramètres, pour lesquels un mauvais choix de valeurs peut compromettre l'apprentissage. Parmi ceux-ci, considérons par exemple le nombre de neurones cachés du réseau. Cette valeur est particulièrement importante parce qu'elle détermine le nombre de variables libres (c'est à dire de poids) du réseau, et parce qu'elle détermine les capacités de calcul du réseau. Ainsi, un nombre insuffisant de neurones cachés peut compromettre la capacité du réseau à résoudre la tâche donnée. Inversement, trop de neurones cachés permettent au réseau d'apprendre les particularités de corpus d'apprentissage (d'apprendre les corpus par cœur), au détriment des performances de généralisation. Les paramètres propres à la règle d'apprentissage sont souvent aussi difficiles à choisir que ceux du réseau : par exemple, la plupart des règles d'apprentissage comprennent un pas d'apprentissage, valeur qui affecte la taille du vecteur de correction. Une fois de plus, le bon choix de ce paramètre peut relever de l'exploit : un pas trop petit empêche le réseau de se stabiliser sur une solution, tandis qu'un pas trop grand augmente inutilement la quantité de calculs à effectuer.
- Surapprentissage : quand l'apprentissage d'un réseau est prolongé, son choix de poids reflète de trop près les particularités de corpus d'apprentissage, au détriment de la tâche réelle.
- Mauvais échantillonnage : les corpus d'apprentissage ne reflètent pas toujours adéquatement la tâche, soit par mauvais échantillonnage, soit tout simplement parce qu'il est trop petit. Il en résulte que le réseau généralise mal et se comporte incorrectement quand il est mis en situation réelle.
- Oubli et interférence : certains patrons peuvent interférer avec l'apprentissage d'autres patrons. Cela est particulièrement vrai lorsque le corpus d'apprentissage est grand, ou que le comportement à apprendre comprend plusieurs cas exceptionnels. Ces derniers sont alors difficiles à apprendre par le réseau et peuvent nécessiter un traitement particulier.

- Mauvais codage : il se peut que la technique de codage choisie accule ou rende inutilement obscure l'information nécessaire à la résolution du problème.

IV.5. RESEAUX DE NEURONES A APPRENTISSAGE SUPERVISE

L'intérêt de cet apprentissage est de trouver un vecteur de poids synaptiques localement optimal, afin de ramener le réseau vers le comportement désiré imposé par un superviseur à l'aide des échantillons aléatoires (par exemple $x_i, y_i, i=1, \dots, n$). On distingue deux approches :

- la première est basée seulement sur la validité de la décision du réseau. Le superviseur n'a qu'à juger si elle est correcte ou pas. Elle permet la classification de chaque exemple de l'espace d'entrée. Ce type de réseaux est appelé « réseaux basés sur les décisions » (Decision Basis Neural Network ; DBNN).
- la deuxième approche est basée sur l'optimisation d'un critère à optimiser, appelé fonction coût. Elle sert généralement à l'approximation et l'optimisation des fonctions.

IV.5.1. Perceptron

C'est l'un des premiers réseaux de neurones, conçu en 1958 par Roseblatt [94]. C'est un réseau statique constitué d'une seule couche d'entrée reliée à un ou plusieurs neurones de sorties. Il est capable de modifier ses poids en fonction des exemples que l'on veut lui faire apprendre. L'information à l'intérieur de ces réseaux ne circule que dans un seul sens, de l'entrée vers la sortie.

Il faut noter que seuls les poids des liaisons entre la couche d'association et la couche finale peuvent être modifiés. La règle de modification des poids utilisée est la règle de Widrow-Hoff [93], si la sortie du réseau est égale à la sortie désirée, le poids de connexion n'est pas modifié. Dans le cas contraire, le poids est modifié en fonction de l'entrée.

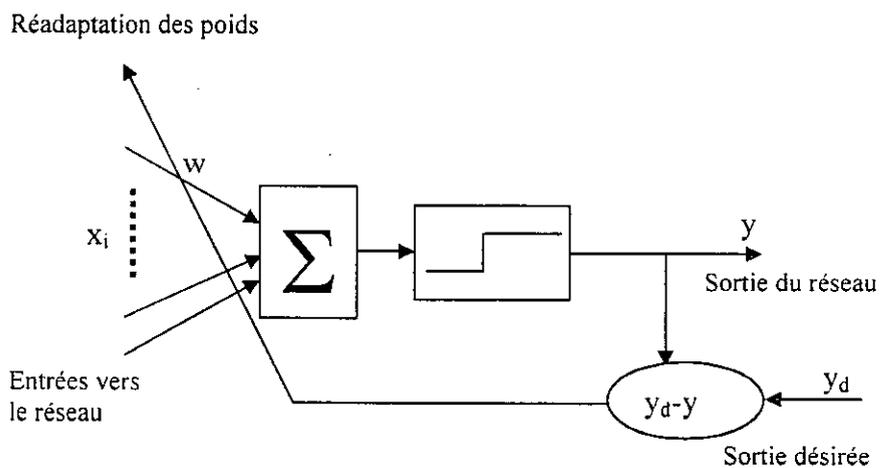


Fig. IV.3 : Structure du Perceptron linéaire

L'activité des neurones dans ce type de réseaux est définie par l'équation linéaire suivante :

$$net_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j + \theta_i \quad i=1, \dots, m \quad (IV.1)$$

x_j représentent les entrées des neurones, w_{ij} le poids synaptique en provenance du $j^{\text{ème}}$ neurone de la couche d'entrée vers le $i^{\text{ème}}$ neurone de sortie, θ_i est un paramètre qui agit sur le seuil en sortie, n le nombre d'éléments du vecteur d'entrée et m le nombre de sorties.

La sortie est définie par la fonction seuil :

$$y = S_i(net_i) = \begin{cases} 1 & net_i > 0 \\ 0 & net_i \leq 0 \end{cases} \quad (IV.2)$$

L'adaptation des poids de ce réseau n'est autre qu'un cas particulier de l'application de la méthode de descente du gradient que nous exposons plus loin :

$$w(t+1) = w(t) + \Delta w(t) \quad (IV.3)$$

avec :

$$\Delta w(t) = \eta (y_d(t) - y(t)) x(t) \quad (IV.4)$$

où η est un paramètre qui contrôle le taux d'apprentissage, $x(t)$ le vecteur présenté à l'entrée du réseau, $y(t)$ la sortie du réseau, $y_d(t)$ la sortie désirée et $w(t)$ le vecteur des poids.

En 1969, Papert et Minsky [96] démontrent les limites du Perceptron classique, incapable par exemple de simuler les fonctions non-linéaires telle que la fonction « ou exclusif (XOR) ». Pour ce fait, il faut changer la fonction d'activation en une fonction non-linéaire telle que les réseaux de neurones à fonction de base radiale RBF ou linéaire LBF.

Une amélioration de ce Perceptron à une ou plusieurs couches cachées a donné naissance au Perceptron multicouches. Ce dernier modifie ces poids par un algorithme de rétro-propagation du gradient que nous allons présenter par la suite. Cet algorithme représente une généralisation de la règle de Widrow-Hoff [97].

IV.5.2. Adaline, Madaline

L'architecture du réseau Adaline est la même que celle du Perceptron, à savoir une couche d'entrée connectée à une ou plusieurs sorties. Dans le cas de plusieurs sorties, il est alors appelé Madaline. La différence par rapport au Perceptron est que le Madaline est destiné à l'approximation des fonctions.

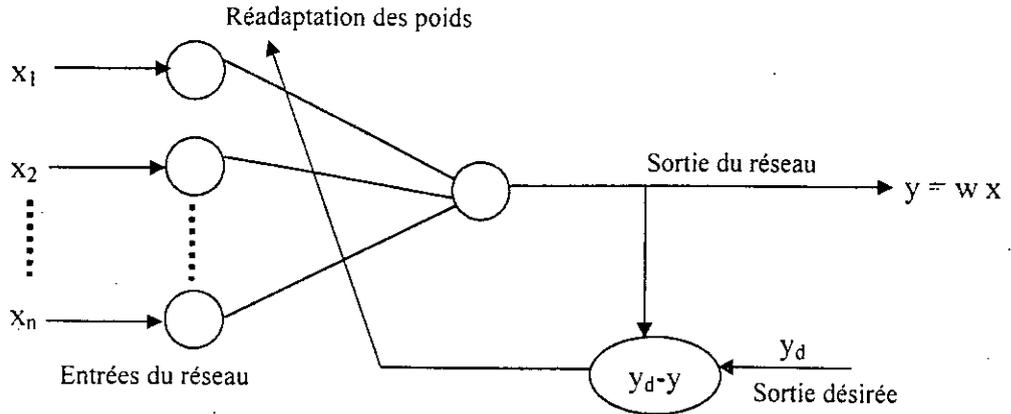


Fig. IV.4 : Structure du réseau Adaline

IV.5.2.1. Apprentissage

A la présentation d'une entrée x_j^k , la sortie y_i^k correspondante est le produit scalaire de cette entrée avec un vecteur poids w_{ij}^k (Fig. IV.4) :

$$y_i^k = \sum_{j=1}^n w_{ij}^k x_j^k + \theta_i \quad i=1, \dots, m \quad (\text{IV.5})$$

où n est le nombre d'éléments du vecteur d'entrée et m le nombre de sorties, x_j^k l'entrée du $j^{\text{ème}}$ neurone du $k^{\text{ème}}$ exemple, w_{ij} poids synaptique du $i^{\text{ème}}$ neurone de la couche de sortie provenant du $j^{\text{ème}}$ neurone de la couche d'entrée et θ_i est un paramètre agissant sur le seuil en sortie.

On définit l'erreur instantanée à chaque sortie par :

$$e_i^k = y_{di}^k - y_i^k \quad (\text{IV.6})$$

tels que, e_i^k est l'erreur instantanée de la sortie du réseau y_i^k du $k^{\text{ème}}$ exemple et y_{di}^k est la réponse désirée.

Il y a plusieurs méthodes qui nous permettent d'ajuster les poids w_{ij} afin que l'écart entre la sortie du réseau et celle désirée soit nul pour toutes les entrées.

IV.5.2.2. Méthode de descente de gradient

Cette méthode est utilisée pour déterminer les adaptations qu'il faut apporter aux vecteurs des poids synaptiques à chaque présentation d'une entrée, afin de faire décroître l'erreur de sortie jusqu'à l'obtention de la solution optimale. Pour cela, il suffit donc d'aller dans la direction opposée du gradient.

L'erreur quadratique instantanée est [97]:

$$\zeta^k = \frac{1}{2}(e^k)^2 = \frac{1}{2}(y_d^k - y^k)^2 \quad (IV.7)$$

Afin de progresser dans le sens opposé du gradient,

$$\Delta w^k = -\eta^k \frac{\partial \zeta^k}{\partial w^k} \quad (IV.8)$$

A partir des équations (IV.5), (IV.7) et (IV.8), on obtient :

$$w_{ij}^{k+1} = w_{ij}^k + \eta^k (y_{d_i}^k - y_i^k) x_j^k \quad (IV.9)$$

où : η^k est le taux d'apprentissage dont le rôle est de réguler la vitesse de convergence et contrôler la stabilité du processus.

Ce type de réseaux de neurones étant un approximateur linéaire, une augmentation du nombre de couches n'a absolument aucune utilité ; n'importe quel nombre de couches sera équivalent à une seule dont la matrice des poids est le produit des matrices de toutes les couches. L'amélioration des performances de ces réseaux nécessite donc l'introduction des fonctions non-linéaires pour les rendre sensibles à l'augmentation du nombre de couches.

IV.5.3. Réseaux multicouches statiques

Le fait que ces réseaux sont non-linéaires, leurs architectures multicouches leur permettent de traiter des problèmes très complexes surtout après la mise au point de l'algorithme d'apprentissage de rétropropagation en 1986.

L'entrée dans ces réseaux est suivie par une succession de couches dites couches cachées, pour finalement aboutir à la sortie (Fig. IV.5) ; ce passage par ces couches contribue à la richesse du traitement de l'information à l'intérieur du réseau afin d'obtenir le résultat désiré en sortie [98].

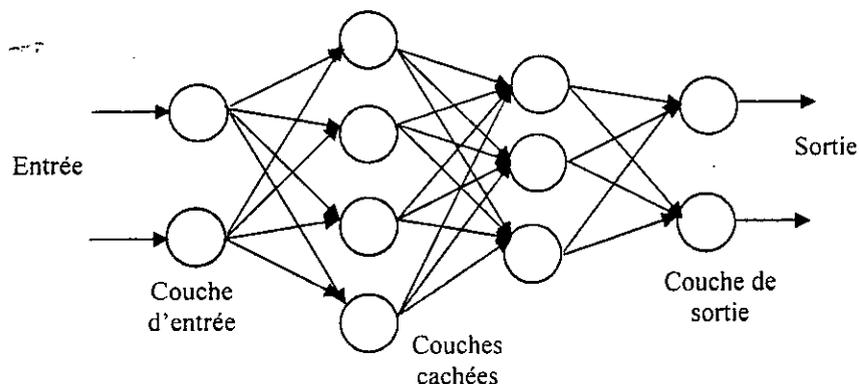


Fig. IV.5 : Architecture d'un réseau statique multicouches

IV.5.3.1. Réseaux à fonction de base linéaire LBF (Linear Basis Function)

La dimension d'un réseau LBF permettant d'obtenir un meilleur résultat est impossible à fixer ; un tel réseau à une couche cachée peut faire l'approximation de n'importe quelle fonction, mais le nombre de neurones cachés n'a jamais pu être spécifié pour un problème donné. Il a été constaté qu'un nombre important de neurones permet d'obtenir une bonne précision d'entraînement. Par contre, un nombre insuffisant entraînera sa dégradation. Malheureusement, un réseau trop chargé en neurones cachés souffre de manque de généralisation, échouant ainsi devant des exemples autres que ceux présents dans la base d'apprentissage. La diminution du nombre de neurones cachés améliore la généralisation mais au détriment de la précision [101].

Un autre problème dont souffrent les réseaux LBF est la difficulté de subir l'apprentissage avec de nouveaux exemples sans perdre les caractéristiques déjà acquises. En effet, la fonction d'activation des neurones, qui est non locale, favorise ce phénomène d'oubli appelé « effet de non-entraînement » et rend ces réseaux souvent incapables d'apprendre de nouveaux exemples après avoir déjà subi un premier apprentissage [101].

Le réseau LBF a un discriminant linéaire, il est régi par l'équation dynamique suivante :

$$y_i^l(t) = f(u_i^l(t)) \quad (II.11)$$

avec :

$$u_i^l(t) = \sum_{j=1}^{N_{l-1}} w_{ij}^l(t) y_j^{l-1}(t) + \theta_i^l(t) \quad (IV.10)$$

où :

l est le nombre de couches, t le temps, $u_i^l(t)$ l'activité du $i^{\text{ème}}$ neurone dans la $l^{\text{ème}}$ couche, $y_j^{l-1}(t)$ la sortie du $j^{\text{ème}}$ neurone dans la $l^{\text{ème}}$ couche en provenance du $j^{\text{ème}}$ neurone de la couche précédente, $w_{ij}^l(t)$ le poids entre le neurone i et neurone j de la couche l , $\theta_i^l(t)$ un paramètre appelé Bias, il diffère pour chaque neurone et a pour objectif de donner plus de souplesse à la fonction de sortie du neurone en approximation de fonctions et f la fonction d'activation.

La fonction d'activation f du neurone est monotone non décroissante. Elle peut être une sigmoïde, une tangente hyperbolique ou une Log-sigmoïde. Pour les neurones de la couche d'entrée, cette fonction n'est autre que l'identité.

IV.5.3.1.1. Algorithme de rétropropagation du gradient

Les réseaux de neurones à rétropropagation ont été découverts indépendamment par plusieurs chercheurs de disciplines assez différentes. La première approche du gradient décroissant pour l'entraînement des réseaux de neurones multicouches est de source mathématique et a été développée par Amari (1967) [97] qui a introduit une seule couche de neurones cachés pour réaliser une classification non-linéaire. L'approche de Amari était dans le bon sens mais cela n'empêche que c'était une description non-complète de la manière de développer une architecture multicouche.

En 1969, Brypon et Ho [99] ont développé un algorithme très similaire jusqu'à ce que Werbos [99] ait découvert en 1974, en travaillant sur sa thèse de Doctorat en statistiques, l'algorithme de retro-propagation à plusieurs variantes appelé l'algorithme du retour dynamique [100].

En 1986, Rumhart, Hinton et Williams [99] groupe d'informaticiens, exploitent le pouvoir et le potentiel de la retropropagation, ceci a poussé la communauté scientifique à s'y intéresser de plus en plus, ce qui a fait de lui l'algorithme connexionniste le plus utilisé qu'on désigne par « backpropagation ». L'erreur se rétropropage à travers les couches du réseau (Fig. IV.6).

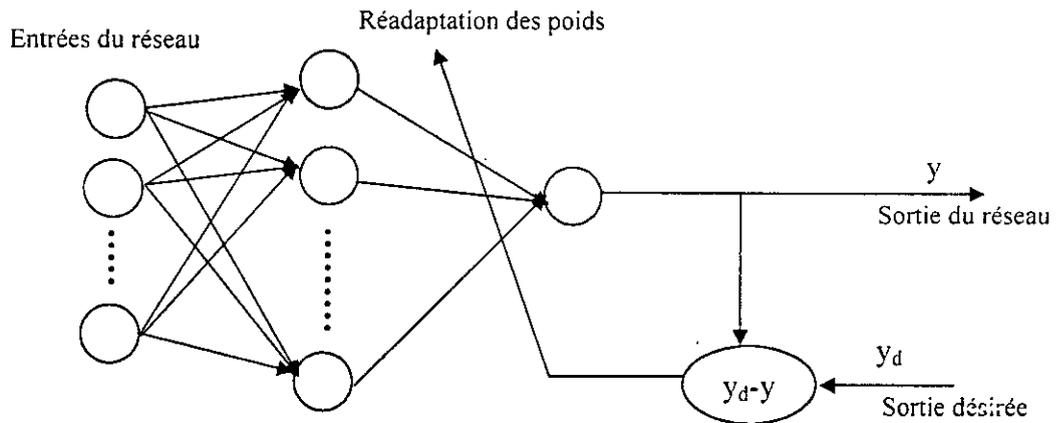


Fig. IV.6 : Principe de l'entraînement du réseau par rétropropagation du gradient

Cet algorithme s'applique comme suit :

1. Au début, il faut initialiser les poids synaptiques à des petites valeurs aléatoires comprises en général entre -1 et 1.
2. Présenter un nouvel exemple x^p à l'entrée du réseau.
3. Calculer la sortie du réseau et l'erreur en sortie :

$$E_p = \sum_{i=1}^{n_1} (y_{di}^p - y_i^p)^2 \quad (IV.12)$$

n_1 est le nombre de neurones dans la couche de sortie, y_{di}^p la sortie désirée correspondante à l'exemple p et y_i^p la sortie calculée par le réseau.

4. Calculer les valeurs de réadaptation des poids.

$$[\Delta w'_{ij}]_p = \eta f'(u'_i(t)) \delta'_i y_j'^{t-1} \quad (IV.13)$$

η est le paramètre qui contrôle la vitesse de l'apprentissage appelé taux d'apprentissage, $f(u_i^l(t))$ est la sortie du $i^{\text{ème}}$ neurone de la $l^{\text{ème}}$ couche et Δw_{ij}^l est la valeur rajoutée aux poids.

avec :

$$\delta_i^l = \begin{cases} (y_{d_i}^p - y_i^l) & \text{pour les neurones de la couche de sortie} \\ \sum_{k=1}^{n_{l+1}} \delta_k^{l+1} w_{ki}^{l+1} & \text{pour les neurones des autres couches} \end{cases} \quad (\text{IV.14})$$

5.

◆ s'il s'agit d'un data learning, réadapter les poids

- poser :

$$\Delta w_{ij}^l(t) = \sum_{p=1}^M [\Delta w_{ij}^l]_p \quad (\text{IV.15})$$

- aller à 6.

◆ s'il s'agit d'un block learning :

- si $p \neq M$: (M étant le nombre d'exemples d'entraînement), retourner à 2.

- Sinon :

$$\Delta w_{ij}^l(t) = [\Delta w_{ij}^l]_p \quad (\text{IV.16})$$

6. réadapter les poids :

$$w_{ij}^l(t+1) = w_{ij}^l(t) + \Delta w_{ij}^l(t) \quad (\text{IV.17})$$

7. Répéter de 1 à 6 autant de fois que nécessaire jusqu'à la convergence vers le seuil d'erreur fixé.

D'après cet algorithme, on peut opérer de deux manières différentes : Data Adaptive Learning ou Block adaptive Learning. Pour la première méthode, les poids sont réadaptés au passage de chaque exemple. De cette manière, le processus devient sensible à chaque exemple individuellement, ce qui le rend influençable par les bruits que peuvent contenir ces entrées durant l'entraînement. Pour la deuxième méthode, on ne réadapte les poids qu'après le passage de tous les exemples d'entraînement. Le réajustement se fait suivant la moyenne de tous les exemples et la méthode est donc beaucoup moins sensible aux bruits que peuvent contenir des exemples singuliers pouvant se présenter.

L'algorithme de backpropagation réclame une variation infinitésimale des poids à chaque itération. Cette variation est contrôlée par le taux d'apprentissage. Un facteur trop petit assure la convergence mais très lentement. Alors qu'un facteur plus grand génère des changements plus importants dans les valeurs des poids synaptiques, pouvant accélérer ainsi l'apprentissage, mais engendrant aussi une instabilité dans la recherche du minimum global, ce qui compromet la convergence.

IV.5.3.1.2. Méthode d'optimisation aléatoire (ROM)

Cette méthode est basée sur la génération des séquences aléatoires afin de déplacer les valeurs des poids synaptiques dans l'espace à la recherche de l'optimum. Son grand avantage est qu'elle ne nécessite pas la détermination du gradient du critère à minimiser, comme elle permet d'échapper aux minima locaux [97]. Elle a été proposée en 1965 par J.Mathias et développée par F.J.Sollis et J.B.Wells en 1981, qui ont démontré la convergence de l'algorithme vers un minimum global [97]. L'algorithme régressant cette méthode est comme suit:

1. Initialiser aléatoirement tous les poids w du réseau. Initialiser la variance v et la moyenne de la séquence aléatoire $b(o) = 0$.
2. Générer une nouvelle séquence aléatoire $\xi(k)$ de moyenne $b(k)$ et variance $v(k)$.
3. Calculer les erreurs $E = \sum_{p=1}^m E_p$ à la sortie du réseau pour chaque cas:
 - $E(w(k)) \rightarrow E_1$
 - $E(w(k) + \xi(k)) \rightarrow E_2$
 - $E(w(k) - \xi(k)) \rightarrow E_3$
4. Si $E_2 < E_1$ alors $\begin{cases} w(k+1) = w(k) + \xi(k) \\ b(k+1) = 0.2b(k) + 0.4\xi(k) \end{cases}$
 Si $E_2 > E_1$ et $E_3 < E_1$ alors $\begin{cases} w(k+1) = w(k) - \xi(k) \\ b(k+1) = 0.2b(k) - 0.4\xi(k) \end{cases}$
 Sinon $\begin{cases} w(k+1) = w(k) \\ b(k+1) = 0.5b(k) \end{cases}$
5. Poser $k=k+1$ et refaire les étapes de 2 à 4 jusqu'à l'obtention de l'erreur désirée.

Contrairement à la méthode de backpropagation où le calcul du Jacobien est nécessaire, le grand avantage de cette méthode est son indépendance du critère à minimiser ; son utilisation dépend seulement de la variance du vecteur gaussien. Une séquence avec une grande variance génère de grands changements dans l'erreur mais jamais des oscillations. Il est intéressant de commencer l'entraînement avec une variance importante et de la faire baisser au fur et à mesure que l'entraînement avance.

IV.5.3.2. Réseaux à fonction de base radiale (RBF)

IV.5.3.2.1. Principe de base

Les réseaux de neurones à fonction de base radiale, outre les couches d'entrée et de sortie, comprennent une couche cachée de q unités qui ne réagissent significativement qu'à une partie restreinte dans l'espace d'entrée suivant une fonction d'activation de type gaussien [83]. A travers une combinaison linéaire de fonctions non-linéaires de base radiale, le fonctionnement de ces réseaux repose sur le principe des estimateurs à noyau, et la

généralisation du monovarié vers le multivarié. Un estimateur à noyau considère des fonctions de R^+ vers R et sont de la forme :

$$\phi_i(x) = \phi(\|x - c_i\|) \quad (IV.18)$$

L'idée principale a été introduite par M.J.D.Powell [80], toute fonction $f(x)$ d'une variable x de R^m peut être approchée par une interpolation composée par la somme de q fonctions noyaux de forme fixée $\phi(\|x - c_i\|)$:

$$f(x) = \sum_{k=1}^q \lambda_k \phi(\|x - c_k\|) \quad (IV.19)$$

où c_i représente le nœud d'interpolation ou centre pour $i=1$ à m , m le nombre d'entrées, $\phi(\|x - c_i\|)$ une fonction assurant la continuité aux nœuds et la dérivabilité d'ordre supérieur en ces points [79], $j=1$ à n , n le nombre de sorties et λ_k sont les paramètres de pondération que l'on déterminera à partir des exemples connus x_j, y_j en résolvant le système :

$$f(x_j) = y_j \quad j = 1, \dots, n \quad (IV.20)$$

Parmi les fonctions noyaux qui sont utilisées dans les réseaux RBF, on peut trouver les formes suivantes :

- Forme cubique : $\phi(r) = r^3$
- Forme multi-quadratique : $\phi(r) = (r^2 + k^2)^{\frac{1}{2}}$
- Forme gaussienne : $\phi(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{\beta^2}\right)$
- Forme logarithmique décalée : $\phi(r) = \log[r(r^2 + k^2)]$

où r est un réel quelconque remplaçant le discriminant des neurones, β et k sont des constantes.

IV.5.3.2.2. Architecture et fonctionnement des réseaux RBF

L'architecture d'un réseau à fonction de base radiale est représentée par la figure (IV.7). Ce réseau est composé de trois couches. La première reçoit les entrées injectées au réseau, la couche cachée est constituée de q neurones, dont le discriminant est à fonction de base radiale. Chacun de ces neurones est doté d'un vecteur c_i appelé centre et chaque entrée du réseau est rangée dans l'une des classes représentées par les neurones de la couche cachée. Les valeurs des centres doivent donc représenter chacune le barycentre de la classe qui lui correspond. Plus le nombre d'exemples d'entraînement est important, plus cette couche est chargée de neurones.

Lorsqu'un vecteur X est présenté à l'entrée du réseau, chaque neurone calcule, à travers son discriminant, la distance euclidienne d_i de cet exemple par rapport au centre de la classe qui le représente est donnée par :

$$d_i = \|X - c_i\| \quad (IV.21)$$

où $i=1$ à q , q le nombre de neurones dans la couche cachée.

La sortie de la couche d'entrée est calculée comme suit :

$$s_i = \phi(X - c_i) = \exp\left(-\frac{(X - c_i)^T (X - c_i)}{2\sigma^2}\right) \quad (IV.22)$$

où σ , est un paramètre qui représente une mesure de la dispersion des données associées à chaque nœud, $i=1$ à q , q le nombre de neurones dans la couche cachée, $(X-c_i)^T$ vecteur transposé de la distance euclidienne et c_i le centre gaussien.

La couche de sortie constituée de neurones linéaires, effectue l'approximation définie par la somme pondérée suivante :

$$y_j(x) = \sum_{k=1}^q w_{jk} \phi(\|x_i - c_{ki}\|) \quad j = 1, \dots, n \text{ et } i = 1, \dots, q \quad (IV.23)$$

n est le nombre de neurones de sortie, m le nombre de neurones d'entrée, x_i neurone de la $i^{\text{ème}}$ couche d'entrée, y_j la sortie de la couche j , w_{jk} paramètres à déterminer à partir des exemples.

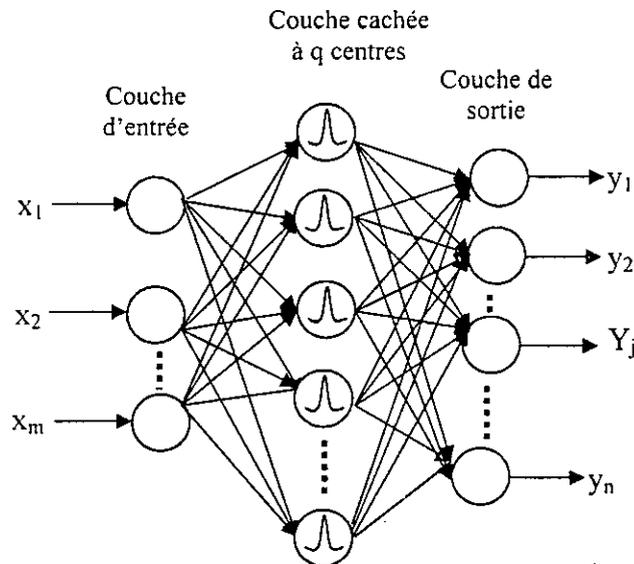


Fig. IV.7 : Architecture d'un réseau RBF multi-sorties

IV.5.3.2.3. Apprentissage des réseaux RBF

L'entraînement d'un réseau RBF comprend deux étapes :

- L'apprentissage de la couche cachée pour sélectionner des centres.

- L'apprentissage de la couche de sortie pour déterminer les poids synaptiques.

Nous présentons ci-dessous certains algorithmes d'apprentissage :

a. Méthode de centrage adaptative

Comme pour les paramètres de pondération w_{jk} , à toute valeur attribuée aux centres c_i correspondra une certaine erreur en sortie. Il est aisé de remarquer que l'équation (IV.23) est dérivable par rapport aux centres qu'aux poids synaptiques. Ainsi, tous ces paramètres peuvent être ajustés en utilisant la méthode de descente du gradient jusqu'à l'obtention d'un minimum satisfaisant. Les étapes de cette technique sont les suivantes :

1. Initialiser les centres $c_i(0)$, les paramètres de la sortie gaussienne de chaque neurone de la couche cachée $\sigma_i(0)$, $i=1$ à q (q le nombre de neurones dans la couche cachée) et les poids synaptiques $\omega_{ij}(0)$, $j=1$ à n (n le nombre de sorties).
2. Choisir un taux d'entraînement $\eta < 1$ variable ou fixe.
3. Présenter successivement les l exemples d'entraînement et calculer l'erreur quadratique E en sorties entre la réponse désirée et celle fournie par le réseau :

$$E = \sum_{l=1}^M \sum_{j=1}^n (y_{dj}^l - y_j^l)^2 \quad (IV.24)$$

avec M le nombre d'entraînement, n le nombre de sorties, y_{dj}^l et y_j^l la $j^{\text{ème}}$ réponse désirée et celle calculée par le réseau pour la $l^{\text{ème}}$ vecteur d'entrée.

4. Réajuster les centres et éventuellement les paramètres des fonction noyau :

$$\begin{aligned} c_i(t+1) &= c_i(t) + \eta \Delta c_i(t) \\ \sigma_i(t+1) &= \sigma_i(t) + \eta \Delta \sigma_i(t) \end{aligned} \quad (IV.25)$$

avec

$$\begin{aligned} \Delta c_i(t) &= - \frac{\partial E}{\partial c_i(t)} \\ \Delta \sigma_i(t) &= - \frac{\partial E}{\partial \sigma_i(t)} \end{aligned} \quad i=1 \text{ à } q$$

5. Réajuster les poids synaptiques :

$$\omega_{ij}(t+1) = \omega_{ij}(t) + \eta \Delta \omega_{ij}(t) \quad (IV.26)$$

avec $i=1$ à q et $j=1$ à n et :

$$\Delta \omega_{ij}(t) = - \frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}(t)}$$

6. Répéter les étapes 3 à 5 jusqu'à l'obtention de la précision désirée.

Cet algorithme simplifie l'apprentissage car les poids et les centres sont réadaptés ensembles et ceci en dépit du calcul des dérivées partielles de l'erreur par rapport à chaque centre. Ce calcul ne pose pas de problème puisque le réseau ne contient qu'une seule couche cachée.

b. Méthode basée sur l'algorithme de regroupement

Cette technique ne nécessite pas le calcul des dérivées partielles par rapport aux centres et repose sur le partage de l'espace des exemples en sous espaces représentant chacun une classe différente. Les étapes de l'algorithme dans ce cas sont :

1. Initialiser les centres $c_i(0)$, $i=1$ à q (q le nombre de neurones dans la couche cachée) avec des valeurs aléatoires et choisir un taux d'apprentissage initial $\eta(0) < 1$.
2. Calculer la distance euclidienne d_i de l'exemple l par rapport à chaque classe :

$$d_i = \|x^l - c_i(l-1)\| \quad i=1, \dots, q \quad (\text{IV.27})$$

3. Noter l'argument α du centre pour lequel la distance est minimale

$$\alpha = \arg[\min(d_i(p))] \quad (\text{IV.28})$$

Tel que $\arg[.]$ identifie le rang du neurone i dans la couche cachée :

4. Réadapter les centres :

$$\begin{aligned} c_i(l) &= c_i(l-1) & i=1, \dots, q \text{ et } i \neq \alpha \\ c_i(l) &= c_i(l-1) + \eta(l)[x^l - c_i(l-1)] & i = \alpha \end{aligned} \quad (\text{IV.28})$$

5. Réduire le taux d'apprentissage :

$$\eta(l) = \frac{\eta(l-1)}{1 + \text{int}\left[\frac{l}{M}\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{IV.28})$$

avec M le nombre d'exemples d'entraînement et $\text{int}[.]$ la partie entière.

6. Refaire les étapes de 1 à 5 jusqu'à ce que chaque exemple soit classée et que les classes de changent plus.

Pour les poids synaptiques, la méthode des moindres carrés peut être aisément utilisée après la détermination des centres. En effet, cet algorithme détermine d'abord les centres puis les poids. L'apprentissage non supervisé utilisé pour déterminer les centres peut limiter le nombre de neurones suivant le nombre de la classe auquel cet apprentissage a abouti. L'algorithme supervisé, par contre, nous oblige à fixer le nombre de neurones dès le début. Cette méthode nous permet donc d'appliquer les techniques d'apprentissage compétitif.

Il existe une famille d'algorithmes d'apprentissage plus rapides et plus économiques en nombre de neurones, ils sont basés sur la classification et appelés Algorithmes de regroupement hiérarchique

c. Apprentissage de regroupement hiérarchique

Cette méthode nécessite la présence des couples d'entrées et leurs sorties désirées. Elles permettent, tout en procédant avec un apprentissage supervisé, de rendre l'architecture du réseau évolutive ; ce qui permet de limiter le nombre de neurones dans la couche cachée et d'accélérer l'apprentissage. Il existe deux techniques différentes pour ce genre d'apprentissage. La première consiste à commencer l'apprentissage avec un seul neurone dans la couche cachée et augmenter leur nombre par la suite pendant qu'avec la seconde, l'apprentissage commence un nombre important de neurones et le faire diminuer durant l'apprentissage.

d. Réseaux RBF et approximation de fonctions

Les réseaux RBF constituent des modèles très efficaces notamment pour l'approximation des fonctions. L'utilisation de la fonction gaussienne permet de bénéficier de sa caractérisation locale pour faciliter l'apprentissage et améliorer l'approximation. Par ailleurs, la procédure d'entraînement, basée sur le fonctionnement de ces réseaux, qui consiste à une classification suivie d'une optimisation, rend l'apprentissage beaucoup moins difficile et plus rapide que celui des réseaux LBF. En outre, ces réseaux sont toujours utilisés avec une seule couche cachée.

Afin d'alléger l'apprentissage, il est nécessaire de fixer les paramètres de dispersion dès le début à une valeur commune pour tous les neurones. Dans ce cas, il faut savoir qu'une valeur très petite de ce paramètre nécessite beaucoup de neurones dans la couche cachée, ce qui peut diminuer les capacités de généralisation du réseau. Une valeur très importante de ce paramètre, par contre, peut entraîner un chevauchement entre les classes rendant ainsi l'apprentissage impossible.

IV.5.4. Etude critique

Les réseaux LBF sont capables de faire l'approximation de n'importe quelle fonction continue dans l'espace. Néanmoins, ils souffrent de l'impossibilité de déterminer la dimension permettant d'obtenir un meilleur résultat. Un autre problème dont souffrent les réseaux LBF est le phénomène d'oubli. En effet, ces réseaux trouvent des difficultés de subir l'apprentissage avec de nouveaux exemples sans perdre les caractéristiques déjà acquises.

Les réseaux RBF sont utilisés avec une seule couche cachée, libérant ainsi l'utilisateur du choix du nombre de couches. De plus, l'utilisation de la fonction gaussienne permet de bénéficier de sa caractéristique locale pour faciliter l'apprentissage et améliorer l'approximation. Ces réseaux sont caractérisés par la facilité et la rapidité de l'apprentissage, mais présentent quelques inconvénients. En effet, lorsque le nombre d'exemples d'apprentissage est important, la couche cachée risque d'être surchargée en neurones, ce qui conduit au ralentissement de l'apprentissage.

Concernant les principaux algorithmes d'apprentissage des réseaux multicouches statiques (LBF, RBF) que nous avons présentés, nous constatons que :

- l'apprentissage de descente de gradient a l'avantage de ne pas nécessiter l'augmentation du nombre de couches mais il présente l'inconvénient du choix des taux d'apprentissage, des poids, des centres et des variances. Si le taux d'apprentissage est trop petit, le temps d'exécution va être trop lent. Par contre, s'il est trop grand les paramètres à ajuster oscillent autour de l'optimum.
- la méthode de backpropagation constitue l'algorithme d'apprentissage supervisé le plus utilisé. Toutefois, cette méthode souffre de quelques inconvénients. D'une part, la vitesse de convergence est trop lente et dépend étroitement de la base d'apprentissage. D'autre part, cet algorithme se bloque souvent dans des minima locaux.
- le plus grand avantage de la méthode d'optimisation aléatoire est qu'elle permet d'échapper aux minima locaux et que sa technique de recherche permet d'atteindre un minimum global. De plus, cet algorithme permet l'entraînement du système d'une manière très souple, grâce à son indépendance du système pour lequel le réseau est appliqué.

IV.6. CHOIX DU RESEAU UTILISE

Comme nous avons déjà vu, les réseaux RBF constituent les modèles les plus efficaces pour la généralisation des fonctions. Leur principal avantage est qu'ils sont toujours utilisés avec une seule couche cachée de q neurones, ce qui nous libère du choix du nombre de couches. L'utilisation de la fonction gaussienne permet de bénéficier de sa caractéristique locale pour faciliter l'apprentissage et améliorer la généralisation. Dans notre étude, nous allons utiliser trois méthodes reposant sur le même réseau « réseau à base radiale normalisé » à une seule sortie mais avec des entrées différentes (Fig. IV.8).

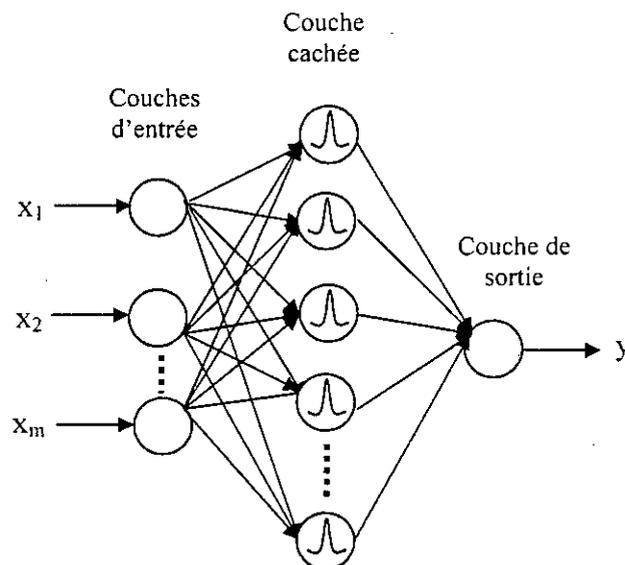


Fig. IV.8 : Architecture d'un réseau RBF à une seule sortie

D'une façon générale, la $j^{\text{ème}}$ sortie normalisée du réseau s'exprime sous la forme suivante :

$$y_j = \frac{\sum_{k=1}^q w_{jk} \rho_k}{\sum_{k=1}^q \rho_k} \quad j=1, \dots, n \quad (\text{IV.29})$$

avec :

$$\rho_k = \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \frac{(x_i - c_{ki})^2}{\sigma_{ki}^2} \right] \quad (\text{IV.30})$$

où : $\sum_{k=1}^q \rho_k$ est le terme de normalisation, q le nombre de nœuds cachés, m le nombre de nœuds dans la couche d'entrée, w_{jk} le poids synaptique du $k^{\text{ème}}$ neurone de la couche cachée, ρ_k la fonction d'activation du $k^{\text{ème}}$ nœud de la couche cachée, x_i la $i^{\text{ème}}$ entrée, c_{ki} le centre du $k^{\text{ème}}$ neurone de la couche cachée correspondant à la $i^{\text{ème}}$ entrée, σ_{ki} l'écart type du $k^{\text{ème}}$ neurone de la couche cachée correspondant à la $i^{\text{ème}}$ entrée et y_j la sortie j du réseau.

Les vecteurs c_{ki} ($k=1, \dots, q$ et $i=1, \dots, m$) sont appelés « centres des gaussiennes ». Ils ont la même dimension que le vecteur d'entrée. Ces centres constituent par conséquent la matrice $\zeta(q, m)$ suivante :

$$\zeta = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{q1} & \dots & c_{qm} \end{bmatrix}$$

Ces centres de gaussiennes sont choisis par plusieurs techniques, afin de les mettre comme points représentatifs dans les zones de grandes concentrations de données. Il existe une méthode plus simple qui consiste à disposer les centres en treillis régulier, pour couvrir uniformément la partie utile de l'espace d'entrée. Les rayons des gaussiennes dans ce cas sont fixés par les distances entre centres voisins, afin d'assurer un certain degré de recouvrement entre les différentes gaussiennes (champ d'influence des différents centres). La valeur du taux de recouvrement est donnée par [100] :

$$\tau = \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{\left[\frac{\delta}{2} \right]^2}{\sigma^2} \right] \quad (\text{IV.26})$$

où σ est l'écart type de chaque gaussienne et δ est la distance entre centres.

Dans le cas où le réseau ne contient qu'une seule entrée, le recouvrement se fait en treillis régulier et les rayons des gaussiennes sont identiques. Dans ce cas, le nombre des unités de la couche cachée est égal au nombre de centres de gaussiennes. La matrice des centres se réduit à un vecteur ($\zeta^T = [c_1, c_2, \dots, c_q]$, avec c_1 est le minimum des entrées et c_q le maximum). Par ailleurs, si le réseau contient deux entrées, le nombre des unités cachées est égal au nombre de couples des centres. Enfin, si le réseau contient trois entrées, le recouvrement de l'espace d'entrées se fait de la même façon mais sa schématisation relève de

l'imaginaire. En outre, la disposition des centres à priori s'avère impraticable, car le nombre de centres requis est parfois trop élevé (dans le cas de la disposition des centres en treillis régulier). Ce qui est conseillé est d'utiliser alors un nombre beaucoup plus restreint de centres et de laisser libre leur disposition, car l'algorithme d'apprentissage devra ajuster outre les poids, les positions des centres ainsi que les valeurs des rayons associés [89, 101].

Concernant l'apprentissage, nous avons utilisé la méthode d'optimisation aléatoire (ROM) dont le principe est basé sur la génération des séquences aléatoires afin de déplacer les valeurs des poids dans l'espace à la recherche de l'optimum. La combinaison fournissant le meilleur résultat est retenue à chaque itération.

Il est important de noter que les trois méthodes que nous allons présenter ont la même structure générale, d'où l'algorithme de calcul suivant :

1. Fixer le taux de recouvrement τ , le pas d'apprentissage sur l'axe des coordonnées ainsi que la valeur initiale sur l'axe des abscisses.
2. Fixer l'erreur d'apprentissage et introduire les m valeurs initiales à l'entrée du réseau.
3. Introduire les n valeurs désirées normalisées.
4. Calculer le minimum et le maximum des données, afin de déterminer les centres.
5. Calculer la distance entre centres.
6. Effectuer une disposition en treillis réguliers des centres et des variances.
7. Initialiser les poids à de petites valeurs aléatoires.
8. Calculer les sorties du réseau de neurones en utilisant la formule (IV.23).
9. Adapter les poids avec la méthode d'optimisation aléatoire (ROM).
10. Répéter les étapes 8 et 9 pour les m valeurs initiales.
11. Répéter les étapes de 8 à 10, tant que l'erreur quadratique moyenne entre la sortie du réseau et celle désirée est supérieure à une valeur fixée à l'avance.
12. Calculer la sortie correspondant à l'entrée $(m+1)$ en utilisant la même formule IV.23.
13. Répéter les étapes de 8 à 12 en remplaçant la première valeur de la base de données par la valeur calculée $(m+1)$, pour garder une base de données fixe.
14. Récupérer la vraie valeur de cette sortie en la multipliant par le terme de normalisation.
15. Répéter les étapes de 4 à 14 pour les n valeurs à prédire.
16. Exploiter les résultats.

IV.7. ARCHITECTURE DES RESEAUX ELABORES

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude des variations de certaines caractéristiques obtenues dans le cas d'un isolateur pollué. Nous nous servons d'une partie de chaque caractéristique, pour effectuer l'apprentissage du réseau tout en considérant le reste de l'allure complètement inconnu. Après l'apprentissage, nous utilisons ce réseau dont tous les paramètres sont adaptés, pour prédire le reste de la courbe point par point. Afin de vérifier la qualité des résultats prédits ainsi obtenus, nous les comparons aux points de la partie restante de la caractéristique expérimentale.

Avant d'exposer les résultats de prédiction, nous présentons les trois différentes configurations de réseaux de neurones RBF dont les rayons et les centres sont disposés en treillis régulier et les poids synaptiques sont ajustés par l'algorithme d'optimisation aléatoire (ROM) [97, 102].

IV.7.1. Configuration 1 : RBF avec une entrée et une sortie de natures différentes

Comme l'illustre la figure (IV.9), l'apprentissage est effectué avec des exemples de type (x_p, y_p) pour n couples (donc $p=1, \dots, n$). Autrement dit, à chaque fois nous présentons à l'entrée du réseau la $p^{\text{ème}}$ abscisse, nous calculons l'erreur sur l'image correspondant à la sortie du réseau qui consiste en la différence entre la sortie désirée et celle représentant la sortie du réseau. A la fin de l'apprentissage, tous les paramètres sont adaptés de telle manière que lorsque le réseau reçoit une valeur actuelle x_{n+1} , et grâce aux poids synaptiques calculés lors de cet apprentissage, il fournira une valeur future y_{n+1} . Dans le but d'éviter le problème de surapprentissage au cours de la prédiction [103], nous avons gardé le même nombre d'exemples d'entraînement. Ainsi, la base d'apprentissage est rendue évolutive ; après chaque valeur future, le premier couple de l'ensemble des exemples d'entraînement est remplacé par le dernier couple. Par exemple, la prédiction de y_{n+2} se fait à travers un entraînement avec des exemples (x_p, y_p) avec $p=2, \dots, n+1$; le couple (x_1, y_1) étant remplacé par (x_{n+1}, y_{n+1}) . La nouvelle valeur y_{n+3} se base sur des exemples d'apprentissage (x_p, y_p) avec $p=3, \dots, n+2, \dots$ etc. Cette procédure est répétée jusqu'à l'obtention de toutes les valeurs constituant le reste de la courbe étudiée.

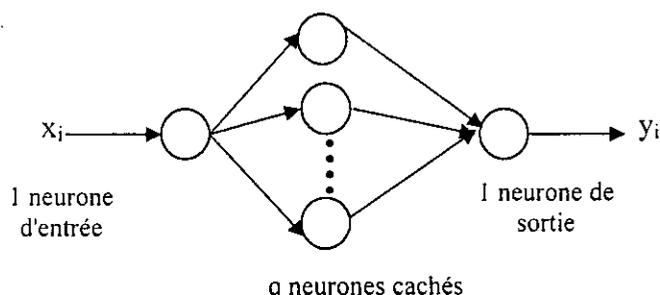


Fig. IV.9 : Architecture du réseau de la configuration 1

IV.7.2. Configuration 2 : RBF avec une entrée et une sortie de même nature

La même procédure que pour la configuration 1 est refaite, mais cette fois-ci la base des abscisses est éliminée car l'apprentissage est effectué seulement avec les valeurs sur l'axe

des ordonnées (Fig. IV.9). Pour cela, nous considérons que l'axe des abscisses est régulièrement espacé de Δx . Ainsi, nous pouvons savoir a priori que les valeurs y_1, y_2, \dots, y_n sont les images des abscisses $x_1, x_1+\Delta x, \dots, x_1+n\Delta x$. Comme l'apprentissage, pour cette deuxième méthode, est effectué avec des exemples de type (y_{p-1}, y_p) avec $p=1, \dots, n$, la présentation de y_1 à l'entrée du réseau permet de calculer l'erreur entre la sortie du réseau y_2 et la valeur désirée correspondante. En considérant par la suite que y_2 est exacte, sa présentation au réseau permet à son tours de calculer l'erreur entre la sortie du réseau y_3 et la valeur désirée correspondante, ..., et ainsi de suite. Une fois l'apprentissage est fait, nous présentons à l'entrée du réseau la valeur y_n pour obtenir y_{n+1} comme réponse. Nous refaisons par la suite l'apprentissage dès le début, en considérant que y_{n+1} comme valeur exacte et l'ajoutant à la base d'apprentissage, après avoir enlevé la première valeur. Lorsque le réseau reçoit y_{n+1} , sa réponse sera y_{n+2} . Ainsi, nous obtenons tous les points désirés en suivant la même procédure.

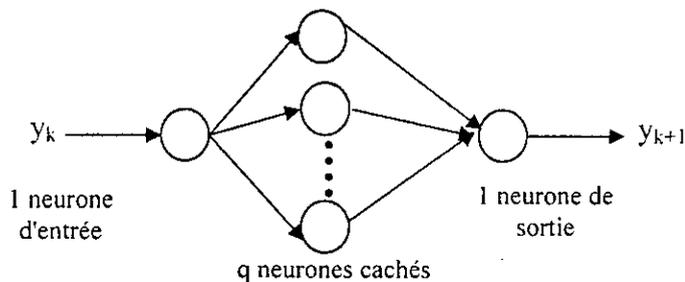


Fig. IV.10 : Architecture du réseau de la configuration 2

IV.7.3. Configuration 3 : RBF avec deux entrées

Cette configuration regroupe les performances de prédiction des deux premières. Les entrées du réseaux de cette méthode sont x_k et y_k , la sortie est y_{k+1} (Fig. IV.11). Donc les exemples d'entraînement seront $(x_i, y_i$ et $y_{i+1})$. Le réseau effectue le test d'erreur entre la sortie calculée et celle désirée y_{k+1} .

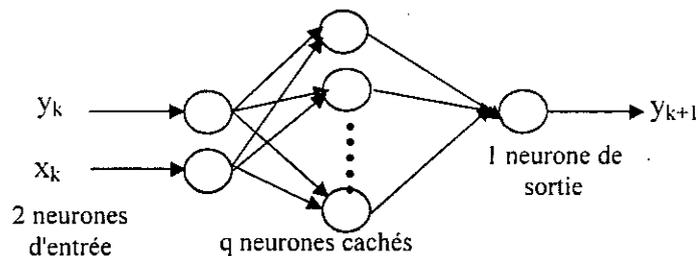


Fig. IV.11: Architecture du réseau de la configuration 3

Il est intéressant de noter que, pour la première configuration, la disposition des centres et des variances en treillis réguliers s'applique sur les valeurs de l'axe des abscisses de

la caractéristique à prédire. Contrairement à la deuxième configuration où cette disposition s'applique sur les valeurs de l'axe des ordonnées de la caractéristique. Comme la troisième configuration est la combinaison des deux premières, les centres et les variances sont des vecteurs de deux éléments. En effet, la disposition en treillis réguliers pour cette méthode s'applique sur les valeurs des deux axes.

IV.8. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette section, nous allons présenter quelques résultats de prédiction des trois configurations présentées. Pour cela, nous considérons les résultats obtenus expérimentalement par A. Mekhaldi [4] et D.Namane [11] dans le but d'analyser les processus de conduction et de développement des décharges électriques sur des modèles de laboratoire, munis de deux électrodes. La première est circulaire reliée à la borne haute tension et la seconde rectangulaire (300x50 mm) reliée à la terre.

La caractéristique de la figure (IV.12) donnant la variation de la longueur de l'arc électrique en fonction de la tension appliquée, a été obtenue à travers des essais effectués sur un modèle plan de laboratoire en verre (500x500x6 mm) [4]. La distance inter-électrodes est de 292 mm. La couche de pollution recouvrant toute la surface isolante est constituée par du sable (de conductivité 12 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et d'épaisseur 4 mm) humidifié en utilisant l'eau distillée jusqu'à saturation. Le rayon de l'électrode haute tension est fixé à 25 mm.

Les caractéristiques correspondant à l'évolution du courant de fuite en fonction de la conductivité de la pollution (Fig. IV.13) d'une part et en fonction du rayon de l'électrode active (Fig. IV.14) d'autre part, ont été obtenues en effectuant des essais sur une plaque en EPDM carrée de 250 mm de côté [4]. La couche de pollution continue est un mélange d'eau distillée et sel, dont les proportions déterminent la conductivité désirée. Pour la première caractéristique, la distance inter-électrodes a été choisie égale à 70 mm, la tension appliquée à 10 kV et le rayon de l'électrode circulaire à 25 mm. Concernant la deuxième caractéristique, la distance inter-électrodes est égale à 110 mm, la tension appliquée à 10 kV et la conductivité à 34 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La figure (IV.15) présente la variation de la tension de contournement en fonction de la longueur de la couche polluante. La distance inter-électrodes du modèle en verre est égale à 400 mm [11]. Le rayon de l'électrode active est 25 mm. Le dépôt polluant est obtenu par pulvérisation d'une solution saline de conductivité 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur une partie de la surface isolant. La répartition de la pollution est constituée de deux parties, une bande propre et une bande polluée. La longueur de la bande polluée (établie côté terre) est variée de 0.1L à 0.8L par pas de 0.1L.

En prenant différents domaines d'apprentissage pour une caractéristique donnée, nous avons constaté qu'en fonction du nombre de points prédits, la qualité de prédiction change. En général, une bonne prédiction a été obtenue lorsque son intervalle avoisine celui d'apprentissage. Nous avons remarqué également que la qualité de prédiction est liée à l'allure de la caractéristique en question.

A partir des courbes de simulation (Fig. IV.12 à IV.15), nous observons une différence entre la qualité de prédiction des trois configurations. La première configuration donne de bons résultats. Par contre, la prédiction est mauvaise pour la deuxième configuration. Les courbes prédites correspondant à la troisième configuration coïncident pratiquement avec

celles expérimentales. La qualité de prédiction de cette configuration est par conséquent, la meilleure par rapport aux deux premières.

Selon la qualité de prédiction, nous pouvons classer les trois méthodes comme suit : configuration 3, configuration 1 puis configuration 2. Nous rappelons que dans la configuration 1, nous présentons x_i à l'entrée du réseau pour obtenir y_i à la sortie ; la sortie y_i ne dépend que de la valeur de x_i . Pour la méthode 2, l'entrée et la sortie possèdent une même nature. Par l'injection de y_i , nous obtenons y_{i+1} à la sortie du réseau ; la sortie prédite (future) y_{i+1} ne dépend que de la valeur précédente de la caractéristique y_i .

Il est clair qu'à l'exception de la caractéristique de la figure (IV.14), les autres possèdent une forme convexe ou concave. En valeur absolue, la plus simple fonction non-linéaire régissant ce genre de forme est donnée par $y=x^2$. Prenons cette fonction comme exemple pour montrer les limitations des deux premières configurations. Nous avons donc : $y_i=x_i^2$. Si nous désignons par A le pas sur l'axe des abscisses :

$$y_{i+1} = x_{i+1}^2 = (x_i+A)^2 = x_i^2 + 2Ax_i + A^2 = y_i + 2x_iA + A^2$$

Nous remarquons que la valeur prédite y_{i+1} dépend à la fois de y_i et x_i , ce qui prouve l'efficacité de la troisième méthode, car ces dernières grandeurs représentent les entrées du réseau correspondant à cette configuration résultant de la combinaison des deux premières. Le choix des entrées est lié par conséquent à la forme de la fonction de la caractéristique appropriée.

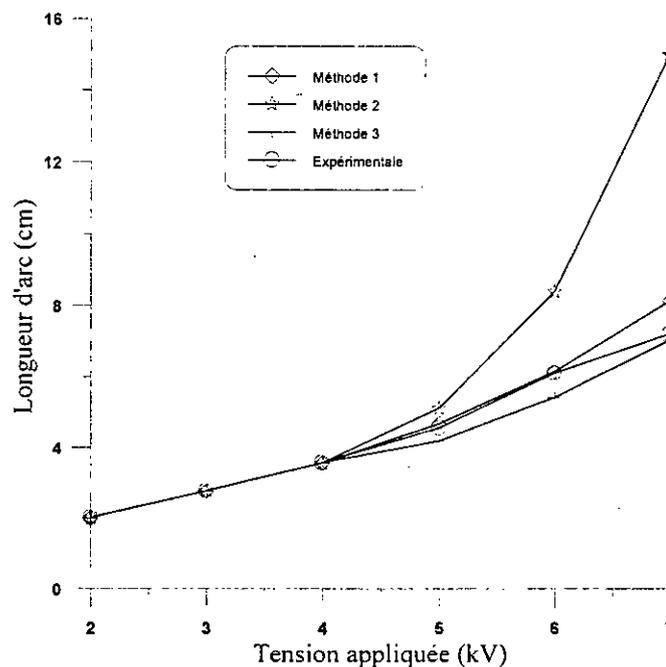


Fig. IV.12 : Longueur d'arc - tension appliquée (3 points d'apprentissage, 3 points prédits)

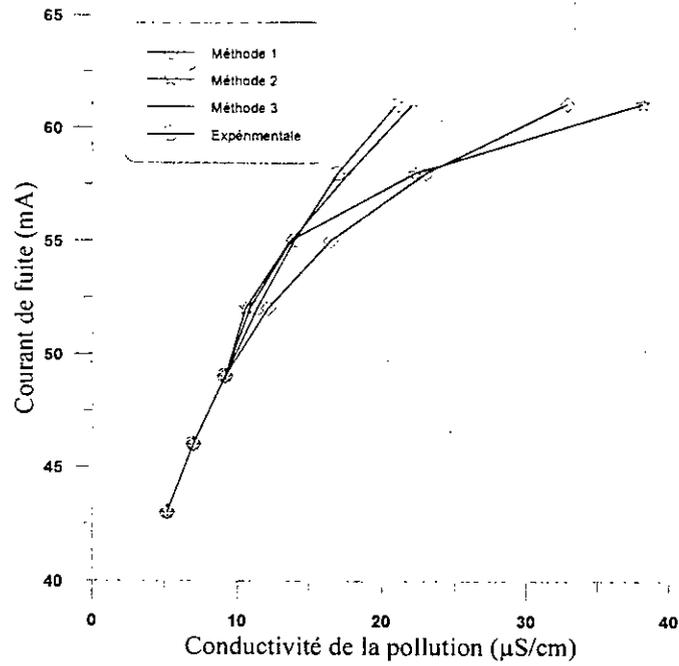


Fig. IV.13 : Courant de fuite – conductivité de la couche de pollution (3 points d'apprentissage, 4 points de prédiction)

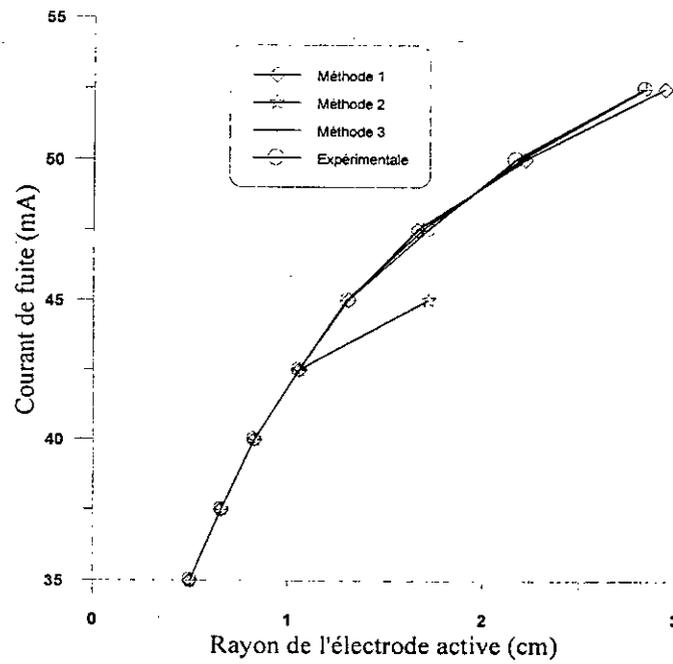


Fig. IV.14 : Courant de fuite - rayon de l'électrode circulaire (4 points d'apprentissage, 4 points de prédiction)

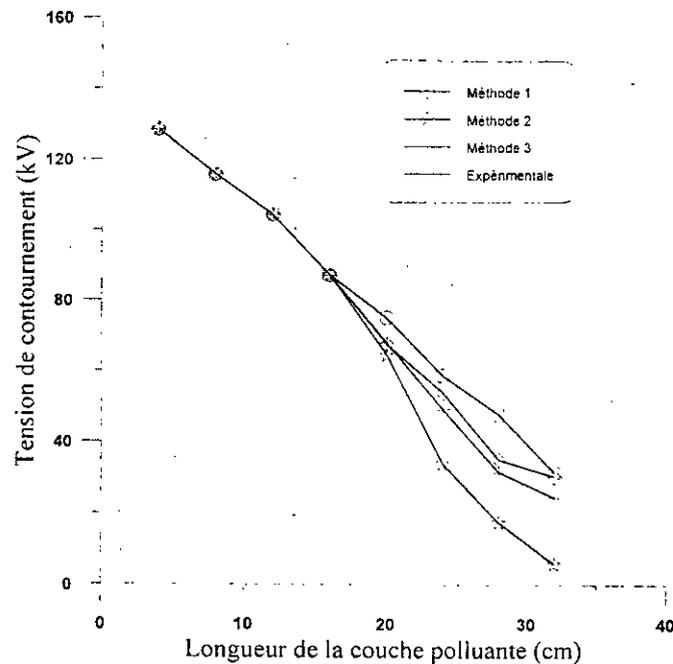


Fig. IV.15 : Tension de contournement - longueur de la couche polluante (4 points d'apprentissage, 4 points de prédiction)

IV.9. CONCLUSION

Le travail que nous avons effectué consiste en la présentation de l'évolution de certaines caractéristiques décrivant le comportement d'un isolateur sous pollution en utilisant les réseaux de neurones artificiels « RNA ».

Pour mieux utiliser les RNA et bien exploiter leurs caractéristiques, nous avons mené une large recherche bibliographique qui nous a permis d'explorer les différents types de réseaux de neurones artificiels à apprentissage supervisé. Dans le but d'aboutir à un réseau plus robuste dont les caractéristiques nous permettront de prédire quelques caractéristiques décrivant le comportement d'un isolateur sous pollution, nous avons élaboré trois programmes de prédiction. Le premier est basé sur un réseau d'une seule entrée et d'une seule sortie de natures différentes pour effectuer l'apprentissage. Pour le deuxième programme, l'entrée et la sortie du réseau sont d'une même nature. Une combinaison entre ces deux programmes nous a permis d'élaborer un troisième, qui utilise deux entrées. Il ressort de cette étude les conclusions suivantes :

- Les réseaux de neurones à fonction de base radiale « RBF » sont des outils de calculs très puissants et sont des approximateurs universels. Ces réseaux obtiennent des performances comparables ou supérieures à celles des autres types des réseaux. De plus, leur apprentissage plus rapide et plus simple en a fait des algorithmes de choix pour plusieurs types d'applications. Ces nombreux avantages font que les RBF soient largement utilisés.
- La méthode d'optimisation aléatoire « ROM » est l'un des meilleurs algorithmes d'apprentissage. Cette technique a l'avantage d'être souple. En effet, partant du principe

de minimiser un critère, cette méthode ne dépend nullement de la nature mathématique du système sur laquelle elle est appliquée. Elle ne nécessite pas de déterminer le gradient ou de faire un quelconque calcul dépendant du critère à minimiser. Nous pouvons dire qu'un RBF entraîné par la ROM constitue un outil très puissant pour la prédiction des fonctions non-linéaires.

- Pour les courbes de simulation, nous remarquons bien la différence entre la qualité de prédiction des trois configurations. La troisième configuration, qui utilise deux entrées, présente la meilleure qualité de prédiction par rapport aux deux premières.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Notre étude nous a permis, dans un premier temps, d'approfondir la compréhension des mécanismes d'extension d'une décharge électrique sur des surfaces isolantes faiblement conductrices et de contribuer, par la suite, à la modélisation des isolateurs pollués en vue de prédéterminer leur tenue au contournement, afin d'éviter la mise hors service de l'ensemble de l'installation électrique.

Nous avons rappelé, dans notre étude bibliographique répartie sur les quatre chapitres, les principaux travaux examinant l'effet de la discontinuité et de la non-uniformité de la pollution sur des isolateurs réels ou sur des modèles de laboratoire. Nous avons cité également les principaux modèles dynamiques de contournement. Finalement, une synthèse sur la théorie des réseaux de neurones artificiels (RNA) supervisés comprenant les différents types de réseaux et d'algorithmes d'apprentissage, a été présentée.

Dans le cas de la distribution discontinue de la pollution semi-conductrice appliquée au modèle expérimental, le contournement se produit directement sans apparition au préalable de décharges électriques partielles. L'augmentation de la conductivité et de la largeur de la pollution engendrent d'une part la diminution de la tension de contournement et de l'impédance vue des électrodes, et d'autre part l'augmentation du courant de fuite. Ce dernier croît également avec la tension d'alimentation.

Par ailleurs, les spectres fréquentiels concernant les signaux du courant de fuite obtenus montrent que l'amplitude du cinquième harmonique est plus importante que celles du troisième et du septième. Les autres sont négligeables. En outre, l'augmentation de la largeur des couches polluantes entraîne une légère diminution du déphasage capacitif courant-tension. Ce dernier, insensible à la variation de la tension appliquée, passe par un minimum lorsque la conductivité de la pollution augmente.

En exploitant certains résultats expérimentaux et en utilisant des circuits électriques, nous avons mis au point un modèle statique permettant l'obtention des différents paramètres caractérisant le contournement des surfaces isolantes partiellement polluées. Les résultats de simulation sont en bonne concordance avec ceux obtenus expérimentalement pour les grandes largeurs de pollution. Ceci serait dû au fait que pour les petites largeurs l'effet de bord est plus accentué engendrant des phénomènes de conduction superficielle dont nous ne tenons pas compte théoriquement.

Concernant la répartition non-uniforme de la pollution, nous concluons que le système isolant est plus rigide, lorsque les couches faiblement conductrices sont réparties (première disposition de la première configuration) que lorsqu'elles sont adjacentes (les dispositions restantes). Par ailleurs, l'augmentation de la longueur de la bande fortement conductrice engendre la diminution de la tension de contournement et l'augmentation du courant de fuite. Cependant pour la deuxième configuration ayant deux couches polluantes différentes, lorsque cette longueur avoisine 90 % de la distance inter-électrodes, l'allure de la tension de contournement présente un minimum au même moment où celle du courant de fuite présente un maximum. Les variations de la longueur d'arc sont similaires à celles du courant de fuite vis à vis des contraintes adoptées.

En se basant sur les mesures du courant de fuite et de la longueur d'arc, pour différents niveaux de tension, nous avons élaboré un modèle de simulation permettant d'obtenir les différentes caractéristiques décrivant le comportement des isolateurs non-uniformément

pollués. Dans ce cas aussi, les résultats de simulation sont en bon accord avec ceux trouvés expérimentalement.

Tenant compte de la forme complexe de l'isolateur, nous avons développé un modèle dynamique permettant d'évaluer la tension critique de contournement et le temps au contournement ainsi que de suivre les évolutions dans le temps, des différents paramètres caractérisant la propagation des décharges électriques sur des isolateurs pollués soumis à une tension continue. Une bonne similitude a été obtenue en comparant certains de nos résultats numériques à ceux rapportés dans la littérature.

Les trois modèles de simulation que nous avons élaborés constituent des outils appréciables de prédiction du comportement des isolateurs pollués. Cependant, nos modèles traitent le phénomène de contournement uniquement d'un point de vue électrique. Cette analyse ne peut pas à elle seule expliquer les mécanismes réels qui entrent dans la génération et la propagation des décharges électriques sur des isolateurs pollués. Afin d'expliquer plus rationnellement ces mécanismes, une connaissance plus profonde de la physique de la décharge s'avère indispensable. Ces trois modèles gagneraient à être étendus à des configurations plus complexes en y intégrant d'autres paramètres tels que la présence d'arcs multiples, l'influence de l'effet thermique, l'influence des paramètres de la source, la formation de zones sèches, etc.

Dans le but d'extrapoler certaines caractéristiques non-linéaires décrivant le comportement d'un isolateur sous pollution, nous avons utilisé les réseaux de neurones à fonction de base radiale entraînés par la méthode d'optimisation aléatoire comme algorithme d'apprentissage. Pour cela, trois configurations ont été proposées. La première est basée sur un réseau d'une seule entrée et sortie de natures différentes. Pour la deuxième, l'entrée et la sortie du réseau sont d'une même nature. Une combinaison entre les deux premières configurations nous a permis d'élaborer une troisième utilisant deux entrées. Cette dernière configuration présente la meilleure qualité de prédiction par rapport aux deux premières.

Il est très économique d'utiliser les réseaux de neurones artificiels dans différents domaines et en particulier dans le domaine de la pollution des isolateurs. En effet, les essais sont non seulement très coûteux mais aussi très longs à réaliser. Les réseaux de neurones artificiels permettent de diminuer le travail expérimental en faisant une prédiction des valeurs de la caractéristique, d'où un gain de temps considérable.

Sur site, leur avantage serait certainement ressenti dans la réduction des essais pour prédire le degré de sévérité, l'évolution du courant de fuite et de la conductivité superficielle en fonction du temps d'exploitation des isolateurs dans les conditions naturelles.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A.Cimador, M.Cojan, P.Hautefeuille, M.Morceau, « Méthode de Dimensionnement des Isolateurs de Lignes Aériennes en Régions Polluées », CIGRE, Rapport No. 33-04, 30 Août-7 Septembre 1978, Paris, France.
- [2] J.Y.Saison, « Etude du Phénomène d'Humidification de Dépôts Naturels et Artificiels de Pollution sur des Isolateurs Electriques », Thèse de Doctorat Es-Sciences, Université de Strasbourg, France, 1992.
- [3] P.Claverie, Y.Porcheron, « Les Phénomènes de Pollution des Isolateurs et l'Isolement des Ouvrages en Régions Polluées », RGE, Tome 82, No. 3, pp. 166-194, Mars 1973, Paris, France.
- [4] A.Mekhaldi, « Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternative 50 Hz », Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Septembre 1999.
- [5] F.A.M.Rizk, « Méthodes Mathématiques du Contournement des Isolateurs sous Pollution », Electra No. 78, pp. 71-103, Octobre 1981, Paris, France.
- [6] M.Teguar, « Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Electriques sur des Isolateurs Installés en Régions Polluées », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juillet 1993.
- [7] A.Mekhaldi, « Modèle de Contournement d'Isolateurs Polluées dans les Conditions Désertiques du Sahara Algérien », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 1990.
- [8] A.Mekhaldi, M.Teguar, A.Beroual, « Algorithm for Pollution Flashover Calculations », Archives of Electrical Engineering, Vol. XLV, No. 4, pp. 385-397, 1996.
- [9] J.Danis, « A Stochastic Pollution Flashover Model », 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Report 46-12, September 5-9, 1983, Athens, Greece.
- [10] M.N.Rayes, M.Zhirh, « Investigation about Flashover Performance of Insulators under Non Uniform Contamination », 7th International Symposium on High Voltage Engineering, Rapport 43-08, 26-30, August 1991, Dresde, Germany.
- [11] D.Namane, « Effet de Discontinuité de la Couche de Pollution sur le Comportement d'Isolateurs Haute Tension, sous la Fréquence 50 Hz », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Février 1998.
- [12] CEI 60-1, « Techniques des Essais à Haute Tension. 1- Définitions et Prescriptions Générales relatives aux Essais », Deuxième Edition, 1989.

- [13] Norme Polonaise PN-71 E/04405, « Matériaux Isolants Solides. Mesure de la Résistance Electrique », Varsovie, Pologne, 1971.
- [14] A.Boubakeur, « Influence des Barrière sur la Tension de Décharge Disruptive des Moyens Intervalles d'Air Pointe-Plan » Thèse de Doctorat es-Sciences Techniques, Université Polytechnique de Varsovie, Pologne, 1979.
- [15] A.Boubakeur, M.Teguar, A.Abimouloud, A.Mekhaldi, « Simulation Expérimentale sous Tension Alternative 50 Hz du Comportement d'un Isolateur de Haute Tension Naturellement Pollué », Quatrième Conférence Régionale des Comités CIGRE dans les Pays Arabes, Vol. 2, pp. 271-278, 19-21 Mars 2001, Tripoli, Libye.
- [16] M.Teguar, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, « Conduction Phenomenon on HV Insulators with Discontinuous Pollution under ac Voltage », International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials, APTADM'2001, Special Issue of Przegląd Elektryczny, edited by Polish Electrical Society, pp. 267-270, September 17-19, 2001, Wroclaw, Poland.
- [17] M.Kunt, « Traitement Numérique des Signaux », Edition Dunod, 1981.
- [18] R.Delsol, « Electronique Numérique », Tome II, Edition Berti, 1992.
- [19] A.Mekhaldi, M.Teguar, A.Abimouloud, A.Boubakeur, « Caractéristique Fréquentielle du Courant de Fuite Sur une Surface Isolante Partiellement Polluée Sous Tension Alternative 50 Hz », Quatrième Conférence Régionale des Comités CIGRE dans les Pays Arabes, Vol. 2, pp. 290-296, 19-21 Mars 2001, Tripoli, Libye.
- [20] A.Mekhaldi, M.Teguar, A.Boubakeur, « Leakage Current Waveform characteristics On HV Insulators under Discontinuous Pollution », International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials, APTADM'2001, Special Issue of Przegląd Elektryczny, edited by Polish Electrical Society, pp. 263-266, September 17-19, 2001, Wroclaw, Poland.
- [21] M.Teguar, A.Mekhaldi, A.Abimouloud, A.Boubakeur, « Traitement de Signal du Courant de Fuite sur un Isolateur Partiellement Pollué », 4^{ème} Conférence de la Haute Tension, Numéro spécial de l'Algerian Journal of Technology (AJOT), pp. 140-143, 16-17 Janvier 2002, Ghardaia, Algérie.
- [22] R.E.Bekka, « Fondement du Traitement de Signal », Edition O. P. U., 1998.
- [23] M.Teguar, A.Abimouloud, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, « Influence of Discontinuous Pollution Width on the Surface Conduction. Frequency Characteristics of the Leakage Current », 2000 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 211-214, October 15-18, 2000, Victoria, British Columbia, Canada.
- [24] M.Teguar, A.Abimouloud, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, « Effect of Discontinuous Pollution Layer Conductivity on the Flashover and Leakage Current Characteristics », CIGRE Symposium, Behaviour of Electrical Equipment and Components in Tropical Environment, Report No. 200-02, September 3-7, 2001, Cairns, Australia.

- [25] M.Dobarzic, « Formes de Décharges Glissantes sous Tension de Choc 1,2/50 μ s sur les Surfaces de Diélectriques Solides Polluées par le Sable du Sahara », Thèse de Docteur-Ingénieur, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 1975.
- [26] T.Suda, « Study on the Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of Artificially Polluted 12t Suspension Insulators by the Clean Fog Method », High Voltage Engineering Symposium, Conference Publication No. 467, © IEE, Vol. 4, Sec. 27, pp. 115-118, August 22-27, 1999, London, UK.
- [27] P.S.Ghosh, S.Chakravorti, N.Chatterjee, « Estimations of Time to Flashover Characteristics of Contaminated Electrolytic Surface using a Neural Network », IEEE Trans. on Dielec. and Elect. Insul., Vol. 2, No. 6, pp. 1064-1076, December 1995.
- [28] A.Mekhaldi, S.Bouazabia, « Conduction Phenomena on Polluted Surface under ACHV », 9th International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 310.74, August 28th-September 1st, 1995, Graz, Austria.
- [29] K.Küpfmüller, « Electricité Théorique et Appliquée », Edition Dunod, Paris. 1959.
- [30] M.Teguar, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, « Algorithm for HV Insulator Flashover under Discontinuous Pollution », Archives of Electrical Engineering, Vol. LI, No. 2, pp. 119-136, 2002.
- [31] M.Teguar, A.Abimouloud, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, « Approche Prédictive des phénomènes de conduction Sur une Surface Isolante Partiellement Polluée sous Tension Alternative 50Hz », Quatrième Conférence Régionale des Comités CIGRE dans les Pays Arabes, Vol. 2, pp.279-289, 19-21 Mars 2001, Tripoli, Libye.
- [32] M.Teguar, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, « Modèle de Contournement des Isolateurs Partiellement Pollués », 4th International Conference on Electric Charges in Non-Inductive Materials, organisée par la Société Française du vide (SFV), Numéro spécial : Science, Technique et Applications, pp. 305-308, July 1-6, 2001, Tours, France,
- [33] M.Aguet, M.Ianoz, « Traité de l'Electricité. Volume XXII : Haute Tension », Ecole Nationale Fédérale de Lausanne, Deuxième Edition, 1982.
- [34] H.Streubel, « The Influence of Nonuniform Contamination on the Flashover Voltage of Insulators », 4th International Symposium on High Voltage Engineering, Report 46-10, September 5-9, 1983, Athens, Greece.
- [35] A.El-Arabaty, A.Nosseir, S.El-Debeiky, E.Nasser, A.El-Sarky, « Choix d'Isolateurs Utilisables dans des Ambiances Polluées Dans des Régions Désertiques », CIGRE, Rapport 33-11, 1980, Paris, France.
- [36] M.A.El-Koshairy, F.A.M.Rizk, « Comportement des Isolateurs des Lignes de Transport à Très Haute Tension dans les Conditions Désertiques », CIGRE, rapport 33-05, 1970, Paris, France.

- [37] D.A.Swift, « AC Disc Insulators : Accumulation of Pollution Within and Around the Pin Cavity », 7th International Symposium on High Voltage Engineering, Report 44-22, September 26-30, 1991, Dresde, Germany.
- [38] L.E.Zaffanella, H.M.Schneider, J.H.Dunlap, « Performances des Isolateurs Pollués pour les Lignes CCHT », CIGRE, Rapport 33-05, 1986, Paris, France.
- [39] R.Sundararajan, R.S.Gorur, « Role of Non Soluble Contaminants on the Flashover Voltage of Porcelain Insulators », IEEE Trans. on Dielec. and Elect. Insul., Vol. 3, No. 1, pp. 113-118, February 1996.
- [40] T.C.Cheng, C.T.Wu, A.Rodriguez-Penz, « Contamination Flashover of HDVC Insulators », Tab. 3-13, Final Report, Electric Power Research Institute (EPRI), EI- 2016, August 1981.
- [41] I.Kimoto, T.Fujimura, K.Naito, « Performance of Insulators for Direct Current Transmission Line under Polluted Conditions », IEEE, Trans. PAS, Vol. 92, pp. 943-949, 1973.
- [42] J.Keller-Jacobsen, A.Pedersen, J.K.Rasmussen, A.Henriksen, C.Lindqvist, S.Smedsfelt, « Essais au Laboratoire et en Plein Air pour Dimensionner Correctement les Isolateurs Exposés à la Pollution Saline », CIGRE, Rapport 33-11, Paris, France, 1978.
- [43] T.C.Cheng, C.T.Wu, « HVDC Insulators under Contaminated Conditions », IEEE, Trans. on Dielec. and Elect. Insul., Vol. 15, No. 3, pp. 270-284, 1980.
- [44] K.Naito, K.Morita, Y.Hasegawa, T.Imakoma, « Improvement of the DC Voltage Insulation Efficiency of Suspension Insulators under Contaminated Conditions », IEEE Trans. on Dielec. and Elect. Insul., Vol. 23, No. 6, pp. 1025-1031, 1988.
- [45] S.Djafri, R.Boudissa, « Influence de la Répartition de la Pollution sur l'Utilisation de la Ligne de Fuite d'Isolateurs à Ailettes », Deuxième Conférence Nationale sur la Haute Tension, pp. 7-10, 17-19 Novembre 1997, Tizi-Ouzou, Algérie.
- [46] F.A.M.Rizk, S.I.Kamel, « Modelling of HVDC Wall Bushing Flashover in Non Uniform Rain », IEEE Trans. on Power Delivery. Vol. 6, No. 4, pp. 1650-1662, October 1991.
- [47] M.Farsaneh, X.Cheng, J.Zhang, « The Influence of Applied Voltage on the Surface of Atmospheric Ice Deposited on Insulating Surfaces », IEEE, ISEI, June 16-19, 1996, Montreal, Québec, Canada.
- [48] M.Teguar, A.Mekhaldi, A.Bouhafs, A.Boubakeur, « Comportement des Surfaces Isolantes sous Pollution Non-Uniforme », 2nd International Conference on Electrical and Power Engineering, EPE 2002, November 14-15, 2002, Iasi, Romania.
- [49] G.Leroy, C.Gary, « Les propriétés Diélectriques de l'Air et les Très Hautes Tensions », Edition Eyrolles, Paris, France, 1984.
- [50] M.Teguar, A.Mekhaldi, « Modélisation Mathématique des Isolateurs Pollués sous Tension Continue », Deuxième Conférence Maghrébine sur l'Automatique,

l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle, COMAEI'96, Edition Spéciale de l'Algerian Journal of Technology (ISSN 1111-357 X), AJOT, Vol. 3, 3-5 Décembre 1996, Tlemcen, Algérie.

[51] B.F.Hampton, « Flashover Mechanism of Polluted Insulation », Proc. IEE, Vol. 111, No. 5, pp. 985-990, May 1964.

[52] M.Teguar, A.Mekhaldi, « Etude Mathématique du Développement de l'Arc Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées », 1st Conference on Modelling and Simulation of Electrical Systems, CMSE'95, pp. 82-88, November 7-8, 1995, Guelma, Algérie.

[53] A.Mekhaldi, M.Teguar, A.Bouhafs, A.Boubakeur, A.Beroual, « Algorithme de Calcul de la Tension de Contournement des Surfaces Isolantes sous Pollution Non-Uniforme », 2nd International Conference on Electrical and Power Engineering, EPE 2002, November 14-15, 2002, Iasi, Romania.

[54] G.Zhicheng, Z.Renyu, « Calculation of DC and AC Flashover Voltage of Polluted Insulators », IEEE Trans. on Dielec. and Elect. Insul., Vol. 25, No. 4, pp. 723-729, August 1990.

[55] N.Dhahbi-Megrache, A. Beroual, « Evaluation of Polluted Insulators Flashover Voltage for Different Waveforms Using an Equivalent Electrical Network Model », High Voltage Engineering Symposium, Conference Publication No. 467, © IEE, Vol. 4, sec. P2, pp. 377-380, August 22-27, 1999, London, UK.

[56] J.P.Holtzhausen, D.A.Swift, « The Pollution Flashover of AC and DC Energised Cap and Pin Insulators: The Role of Shortening of the Arc », High Voltage Engineering Symposium, Conference Publication No. 467, © IEE, Vol. 4, sec. P2, pp. 333-336, August 22-27, 1999, London, UK.

[57] F.A.M.Rizk, D.H.Nguyen, « Digital Simulation of Source Insulator Interaction in HVDC Pollution Tests », IEEE Trans. on Power Delivery, pp. 405-410, 1988.

[58] O.Mayr, « Beitrag zur Theorie der Statischen und der Dynamischen Litchbogens », Arch. f. Elektrotechnik, Vol. 37, pp. 588-608, 1943.

[59] S.Anjana, C.S.Lakshminarasmha, « Computed of Flashover Voltages of Polluted Insulators using Dynamic Arc Model », 6th International Symposium on high voltage Engineering, Paper 30-09, New Orleans, USA, 1989.

[60] F.Obenaus, « Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge », Deutsche Elektrotechnik, Vol. 4, pp. 135-136, 1958.

[61] N.Dhahbi, « Modélisation Dynamique des Décharges sur les Surfaces d'Isolateurs Pollués sous Différentes Formes de Tensions : Elaboration d'un Critère Analytique de Propagation », Thèse de Doctorat es-Sciences, Ecole Centrale de Lyon, France, Mars 1998.

[62] R.Sundararajan, R.S.Gorur, « Dynamic Arc Modeling of Pollution Flashover of Insulators under dc Voltage », IEEE Trans. on Dielec. and Elect. Insul., Vol. 26, No. 2, pp. 209-218, April 1993.

- [63] H.Boeheme, F.Obenaus, « Essais de Contournement sur des Isolateurs Pollués en Laboratoire et en Lieu de Service du Point de Vue de la Conception d'un Modèle d'Amorçage pour Courant Rampant », CIGRE, Rapport No. 407, Paris, France, 1966.
- [64] S.Hesketh, « General criterion for the prediction of pollution flashover », Proc. IEE, Vol. 114, No. 4, pp. 531-532, April 1967.
- [65] R.Wilkins, « Flashover Voltage of High Voltage Insulators with Uniform Surface Pollution Films », Proc. IEE, Vol. 116, No. 3, pp. 457- 465, March 1969.
- [66] R.Sundararajan. R.S.Gorur, « Computer Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Condition », IEEE Trans. on Dielec. and Elect. Insul., Vol. 2, No. 1, pp. 121-127, February 1995.
- [67] L.L.Atston, S.Zoldedziowski, « Growth of Discharge on Polluted Insulators », IEEE Trans. PAS. Vol. 110, No. 7, July 1963.
- [68] G.Zhicheng, Z.Renyu, « Calculation of DC and AC Flashover Voltage of Polluted Insulators », IEEE Trans. on Dielec. and Elect. Insul.,Vol. 25, No. 4, pp. 723-729, August, 1990.
- [69] S.Vacquié, « Arc Electrique », Technique de l'Ingénieur, Vol. D 2 II, Papier No. D 2870, 1986.
- [70] A.Al-Baghdadi, « The Mechanism of Flashover of Polluted Insulator », Ph.D. Dissertation, The Victoria University of Manchester, May 1970.
- [71] A.M.Rahal, « Sur les Mécanismes Physiques du Contournement des Isolateurs Haute Tension », Thèse de Doctorat es-Sciences Physiques, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1979.
- [72] José Pissalto Filho, « Analyse du Contournement d'une Surface Faiblement Conductrice par une Décharge Electrique Alimentée en Courant Continu », Thèse de Doctorat es-Sciences Physiques, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1986.
- [73] Michel Pollentes, « Sur l'Utilisation de Modèles de Laboratoire pour l'Etude de la Tenue au Contournement des Isolateurs Pollués », Thèse de Doctorat es-Sciences, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1996.
- [74] C.Hurax, A.M.Rahal, « Le Contournement des Isolateurs Haute Tension Approché à l'aide d'un Modèle de Laboratoire », RGE, Tome 84, No. 6, pp. 425-429, Paris, France, Juin 1975.
- [75] P.S.Ghosh, N.Chatterjee, « Arc Propagation over Electrolytic Surfaces under Power Frequency Voltage », IEEE Trans. on Dielec. and Elect. Insul., Vol. 3, No. 4, pp. 529-536, August 1996.
- [76] B.Zegnini, D.Mahi, « Etude Dynamique de la propagation sur une Surface d'Electrolyte d'une Décharge Electrique Alimentée en Courant Alternatif », 4^{ème} Conférence de la Haute

Tension, Numéro spécial de l'Algerian Journal of Technology (AJOT), pp. 129-132, 16-17 Janvier 2002, Ghardaia, Algérie.

[77] M.E.Ghourab, « Application of Artificial Neural Networks for Insulation Diagnosis », 9th International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 5595.1-5595.4, August 28th-September 1st, 1995, Graz, Austria.

[78] P.S.Ghosh, S.Chakravorti, N.Chatterjee, « ANN with RPROP Algorithm Applied to Modelling of Flashover Voltage Characteristics of Polluted Insulators », 9th International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 3197.1-3197.4, August 28th-September 1st, 1995, Graz, Austria.

[79] Y.Tian, P.L.Lewin, A.E.Davies, Z.Richardson, « PD Pattern Identification Using Acoustic Emission Measurement and Neural Networks », High Voltage Engineering Symposium, Conference Publication No. 467, © IEE, Vol. 5, Sec. 8, pp. 41-44, August 22-27, 1999, London, UK.

[80] Ivan Nunes da Silva, André Nunes de Souza, « Analysis of High Voltage Substations Design Using Artificial Neural networks », High Voltage Engineering Symposium, Conference Publication No. 467, © IEE, Vol. 5, Sec. 8, pp. 53-56, August 22-27, 1999, London, UK.

[81] J.A.S.B.Jayasinghe, R.K.Aggarwal, A.T.Jhons, J.Downes, « A New Approach to Condition Monitoring of High Voltage Overhead Lines Using Neural Networks », High Voltage Engineering Symposium, Conference Publication No. 467, © IEE, Vol. 5, Sec. 8, pp. 73-76, August 22-27, 1999, London, UK.

[82] Katrin Engel, Dirk Peier, « Influence of PD Fault Development on Fault Type Recognition using an Artificial Neural Network », 9th International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 5861.1-5861.4, August 28th-September 1st, 1995, Graz, Austria.

[83] A.L.Nemmour, A.Khelifi, « Utilisation des Réseaux de Neurones Artificiels au Vieillessement des Polymères utilisés dans les Câbles MT », Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 1999.

[84] A.Boubakeur, L.Mokhnache, A.L.Nemmour, A.Khelifi, « Neural Networks Application in the Field of High Voltage Cable Insulation Thermal Ageing », 3rd International Conference on Quality Reliability and Maintenance, Professional Engineering Publishing, I. Mech. E., pp. 123-126, Oxford, London, UK, 2000.

[85] S.Benabbas, H.Cair, « Utilisation des Réseaux de Neurones Artificiels dans le Vieillessement Thermique de l'EPDM », Projet de Fin d'Etudes, Département d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, Juin 2002.

[86] L.Mokhnache, A.Boubakeur, N.Nait Said, « Diagnosis of Transformer Oil using some Neural Networks Algorithms », 4th International Conference on Quality Reliability and Maintenance, Professional Engineering Publishing, I. Mech. E., March 2002, Oxford, London, UK.

- [87] L.Mokhnache, A.Boubakeur, N.Nait Said, « Application of Neural Networks in the Diagnosis of Transformer Oil used by SONELGAZ », 4^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, Numéro spécial de l'Algerian Journal of Technology (AJOT), pp. 51-54, 16-17 Janvier 2002, Ghardaïa, Algérie.
- [88] L.Mokhnache, A.Boubakeur, B.Ould Noureddine, M.A.Bedja, « Prediction of Long Thermal Ageing of Transformer Oil using Neural Networks », International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials, APTADM'2001, Special Issue of Przegląd Elektryczny, edited by Polish Electrical Society, pp. 277-280, September 17-19, 2001. Wroclaw, Poland.
- [89] M.Almi, Y.Guehrrar, « Utilisation des Réseaux de Neurones Artificiels dans le Vieillissement Thermique de l'Huile de Transformateur », Projet de Fin d'Etudes, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 2002.
- [90] L.Mokhnache, A.Boubakeur, « Neural Networks Application to Predict High Voltage Insulation Thermal Ageing », 12th International Symposium on High Voltage Engineering, Vol. 5, Paper No. 8-8, August 28th, 2001, Bangalore, India.
- [91] L.Mokhnache, A.Boubakeur, « The Use of Neural Networks in Prediction of Dielectric Properties for High Voltage Liquid Solid and Gas Insulations », Conference record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 306-309, April 7-10, 2002, Boston, MA USA.
- [92] L.Mokhnache, A.Boubakeur, « Prediction of the Breakdown Voltage in a Point-Barrier-Plane Air Gap using Neural Networks », IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 369-372, October 2001, Kitcheners, Ontario, Canada.
- [93] J.F.Jodouin « Réseaux de Neurones, Principes et Définitions », Hermès, Paris 1994.
- [94] F.Roseblatt, «The perceptron : A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain », pp. 386-408, Vol. 65, Psychological Review, 1958.
- [95] W.Mc Culloch, W.Pitts, « A Logical Calculation of the Ideas Immanent in Nervous Activity », pp.127-147, Vol. 9, Bulletin of Mathematical Biophysics, 1943.
- [96] T.Kohonen « Associative Mémoires », Principe Hall, 1977.
- [97] M.Y.M.Yeddou, « Etude de Synthèse sur les Réseaux de Neurones et leurs Applications », Thèse de Magister, Département d'Electronique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 1998.
- [98] T.Kohonen, « An Introduction to Neural Computing , Neural Networks », pp. 3-16, Vol. 1, Pergamon Press, 1988.
- [99] R.J.Williams, D.Zipser, « A Learning Algorithm for Continually Running Fully Recurrent Neural Networks », Neural Networks, Neural Computation, Vol. 1, pp. 268-280, 1989.

[100] P.J.Werbos, « Backpropagation Trought Time, What is does and how to do it ? » Proceedings of the IEEE, vol. 78, Paper No.10, October 1990.

[101] J.M.Renders, « Algorithmes Génétiques et Réseaux de Neurones, Application à la Commande de Processus », Hermès, Paris, 1995.

[102] E.Ailem, M.Teguar, A.Mekhaldi, « Utilisation des Réseaux de Neurones dans le domaine de la Pollution des Isolateurs », 4^{ème} Conférence de la Haute Tension, Numéro spécial de l'Algerian Journal of Technology (AJOT), pp. 136-139, 16-17 Janvier 2002, Ghardaia, Algérie.

[103] J.F.Jodouin « Les Réseaux Neuromimétiques, Modèles et Applications », Hermès, Paris 1994.