

Département de Génie Électrique
Laboratoire de Haute Tension

THESE DE MAGISTER

Présentée par

Adel ABIMOLOUD

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

THEME

**COMPORTEMENT D'UNE SURFACE ISOLANTE
PARTIELLEMENT POLLUEE SOUS TENSION
ALTERNATIVE 50 Hz.**

Soutenue le 25 Décembre 1999 devant le jury :

MM.

A. HELLAL	Maître de Conférences, ENP	Président
A. MEKHALDI	Docteur d'Etat, ENP	Rapporteur
M. TEGUAR	Chargé de Cours, ENP	Rapporteur
A. BOUBAKEUR	Maître de Conférences, ENP	Examineur
S. BOUAZABIA	Chargé de Cours, USTHB	Examineur

Dédicaces



A mes parents,

A mes frères et sœurs,

A mes amis,

A ceux qui s'adonnent à la recherche scientifique.

Adel

Avant propos



Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique sous la direction de Messieurs M.TEGUAR, Chargé de Cours à l'ENP et A.MEKHALDI, Docteur d'Etat à l'ENP. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma très sincère reconnaissance pour leur très grande disponibilité, leur humanisme et pour le soin apporté à la direction scientifique de cette recherche.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à :

Monsieur A. BOUBAKEUR Maître de Conférences à l'ENP et Directeur du Laboratoire, d'abord pour sa participation dans le jury, ensuite et surtout pour ses précieuses directives et conseils au cours de la réalisation de ce travail.

Monsieur A.HELLAL Maître de Conférences à l'ENP pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.

Monsieur S. BOUAZABIA Chargé de Cours à l'USTHB pour avoir bien voulu accepter d'être membre du jury et mettre ainsi en valeur mon travail.

Monsieur R.LECHEHEB et Mademoiselle F.SAIDANI pour leurs aides et leurs suggestions lors des essais effectués au Laboratoire.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants qui ont contribué de près ou loin à ma formation et à tous les amis pour l'ambiance qu'ils ont su créer et les idées fructueuses que nous avons échangées.

إنصب اهتمامنا، في هذا العمل، على دراسة أثر التوزيع اللامتواصل للطبقة الملوثة التي صودفت في الموقع على سطح العازل 1512L لأجله، قمنا بايتماعا رنمه ذرح مجدي ومسطح أسنر أعدنا بالضغط نفس التزرع المشاهد على سطح العازل السالف الذكر كما تم بموجه استخدام طبقة جافة لدهان نصف ناقل كمادة ملوثة. تركزت النتائج التحريية على تفحص سلوك النموذج المخبري اتجاه تغير كل من التوتر المطبق وكذا ناقلية الطبقة الملوثة وبعدها العرضي. وقد قمنا بإنجاز برنامج رقمي يمكن من الإستغلال الدقيق لتسجيلات موجة التيار المتسرب و تحديد التواتري وكذا فرق طوره بالنسبة للتوتر. في النهاية، إقترحنا نموذج نظري يسمح بتقدير توتر الإحاطة وكذا درجة قيم التيار المتسرب وفرق طوره.

Résumé :

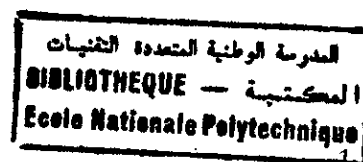
Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à étudier l'effet de la répartition discontinue de la couche polluante rencontrée in situ sur la surface de l'isolateur capot-tige 1512L. Pour cela, nous avons utilisé un modèle plan de Laboratoire sur lequel nous avons reproduit exactement le même état de surface que celui de l'isolateur susmentionné. A cet effet, une couche de peinture semi-conductrice a été utilisée comme agent polluant. Les résultats expérimentaux concernent le comportement du modèle de Laboratoire en fonction de la tension appliquée, la conductivité et la largeur de la couche polluante. Un programme numérique permettant une meilleure précision d'exploitation des enregistrements de l'onde du courant de fuite et la détermination de son spectre fréquentiel ainsi que son déphasage par rapport à la tension, a été élaboré. Enfin, nous proposons un modèle théorique permettant d'évaluer la tension de contournement et l'ordre de grandeur du courant de fuite et de son déphasage.

Abstract :

This work is devoted to study the influence of discontinuous pollution layer met in situ on 1512L cap-pin insulator surface. We have used a Laboratory plan model reproducing exactly the same surface state that the mentioned insulator. In fact, we have used a layer of semi-conducting paint as pollution agent. The experimental results concern the Laboratory model behaviours with regard to the applied voltage, the conductivity and the width of the pollution layer. A numerical algorithm allowing a better exploitation precision of the leakage current wave records and the determination of the fréquentiel spectrum and its phase angle with regard to the voltage, was elaborated. Furthermore, we propose a theoretical model allowing to evaluate the flashover voltage and the rate of leakage current and its phase angle.

Mots clés : Courant de fuite, tension de contournement, isolateur, haute tension, spectre fréquentiel, pollution discontinue, couches semi-conductrice, modèles, surface isolante.

Sommaire



Introduction générale

Chapitre I

Phénomènes de pollution des isolateurs

I. FORMATION ET REPARTITION DE L'AGENT POLLUANT	4
II. NATURE DE LA POLLUTION	4
III. DEGRES DE POLLUTION	5
III.1. Méthode de mesure du degré de pollution	5
III.1.1. Densité du dépôt de sel équivalente (DDSE)	5
III.1.2. Conductance Superficielle	5
III.1.3. Courant de fuite:	6
III.1.4. Contrainte de contournement	6
III.1.5. Mesure de la pollution de l'air	6
III.1.6. Mesures optiques	6
III.2. Critère de choix de la méthode de mesure	7
IV. CLASSIFICATIONS DES SITES POLLUES	7
V. COMPORTEMENT DES ISOLATEURS SOUS POLLUTION	7
V.1. Dépôt de la pollution	7
V.2. Humidification de la pollution	7
V.3. Développement des zones sèches et apparition d'arcs	7
V.4. Comportement des arcs	7
VI. METHODES D'ESSAIS SOUS POLLUTION	7
VII. MODELES D'ETUDE DU COMPORTEMENT DES ISOLATEURS SOUS POLLUTION	8
VII.1. Modèles de laboratoire	8
VII.1.1. Modèles plans	8
VII.1.2. Modèle cylindrique	9
VII.1.3. Modèle de Wilkins	9
VII.2. Modèles théoriques et empiriques	9

VIII. TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION	11
VIII.1. Allongement de la ligne fuite	11
VIII.2. Isolateurs plats	11
VIII.3. Graissage périodique	11
VIII.4. Revêtement silicones	11
VIII.5. Les isolateurs composites	12
VIII.6. Nettoyage des isolateurs	12
IX. CONCLUSION	12

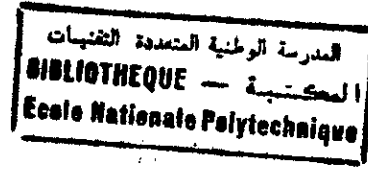


Chapitre II *Effet de la non-uniformité de la couche de pollution*

I. CLASSIFICATIONS DES DIFFERENTS TYPES DE LA NON-UNIFORMITE	13
I.1. La non-uniformité longitudinale par groupe	13
I.2. La non-uniformité transversale	13
I.3. La non-uniformité longitudinale périodique	13
II. TRAVAUX SUR ISOLATEURS REELS	14
II.1. Travaux sur la non-uniformité longitudinale par groupe	14
II.2. Travaux sur la non-uniformité transversale	14
II.3. Travaux sur la non-uniformité longitudinale périodique	15
III. TRAVAUX SUR MODELES DE LABORATOIRE	16
III.1. Modèle de J.Danis	16
III.2. Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh	17
III.3. Modèle de Claverie et Porcheron	19
III. CONCLUSION	22

Chapitre III*Traitement numérique du courant de fuite*

I. FONDEMENT THEORIQUE	23
I.1. L'échantillonnage	23
I.2. La Transformé de Fourier Discrète (TFD)	25
I.3. Filtrage numérique	26
II. PROGRAMME	27
III. APPLICATION	29
IV. CONCLUSION	29

**Chapitre IV***Etude expérimentale*

I. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	31
I.1. Modèle expérimental	32
I.2. Circuit de mesure	34
II. MODE OPERATOIRE	34
II.1. Préparation de l'agent polluant	34
II.2. Mesure de la conductivité superficielle	35
II.3. Préparation du modèle	36
II.4. Procédés d'essai	36
II.5. Mesures préliminaires	37
III. RESULTATS D'ESSAIS ET INTERPRETATIONS	38
III.1. Le contournement	38
III.1.1. Influence de la conductivité de la couche de pollution	40
III.1.2. Influence de la largeur transversale de la couche de pollution	40
III.2. Courant de fuite	40
III.2.1. Influence du niveau de tension appliqué	41
III.2.2. Influence de la conductivité de la couche de pollution	41
III.2.3. Influence de la largeur transversale de la couche de pollution	41
III.3. Déphasage courant-tension	46
IV. CONCLUSION	48

I. FORMULATION MATHEMATIQUE DU MODELE	49
I.1 Hypothèses d'étude	49
I.2. Approche théorique des caractéristiques de la plaque propre	50
I.2.1. Détermination de la capacité superficielle	51
I.2.2. Détermination de la résistivité superficielle	51
I.3. Approche théorique des caractéristiques de la plaque polluée	52
I.3.1. Equations du circuit électrique	54
I.3.2. Tension de contournement	54
II. SIMULATION NUMERIQUE	55
III. CONCLUSION	59
<i>Conclusion générale</i>	60
<i>Bibliographie</i>	
<i>Annexe 1 : Caractéristiques de l'oscilloscope numérique</i>	
<i>Annexe 2 : Traitement numérique des signaux</i>	
<i>Annexe 3 : Calcul de la capacité entre deux cylindres parallèles</i>	

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE

L'isolement électrique des lignes aériennes et des postes du réseau de transport est réalisé en maintenant les conducteurs à une distance suffisante de la masse pour éviter tout risque d'amorçage. Pour supporter ainsi les conducteurs et conserver en toutes circonstances les distances à la masse, on utilise des isolateurs qui, en plus d'une bonne résistance mécanique, doivent aussi répondre à certaines exigences du point de vue électrique.

Selon les conditions climatiques et atmosphériques qui règnent dans un site donné, la surface de l'isolateur se recouvre tout le temps d'une couche plus ou moins conductrice. A cet effet, la répartition du potentiel le long de la surface isolante se modifie et des arcs sont susceptibles de s'amorcer. Suivant les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur, l'arc peut s'éteindre ou bien se développer jusqu'à court-circuiter l'isolateur. C'est le phénomène de contournement qui entraîne la mise hors service de la ligne.

La tension de contournement dépend essentiellement du profil de l'isolateur [1,2], de la conductivité de la couche polluante [3] et notamment de la répartition de cette couche le long de la surface isolante [4-6].

Depuis plusieurs années, un grand nombre de travaux de recherche sont entrepris dans ce domaine qui reste un sujet inépuisé. Ainsi, la connaissance des phénomènes physiques intervenant pendant le développement des décharges et l'impact des conditions atmosphériques diverses sur leurs naissances et leurs comportements présentent un intérêt tant du point de vue physique que du point de vue industriel.

Les travaux expérimentaux consacrés à ce sujet s'effectuent, en général, dans les conditions naturelles de pollution (essai in situ) [7-10] ou sous pollution artificielle (essai au laboratoire) [8,11-13]. Les essais sous conditions naturelles de pollution ont l'avantage de tenir compte de l'effet de toutes les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur avec toutes leurs complexités. Cependant, ils ont l'inconvénient de nécessiter plusieurs années pour pouvoir étudier valablement les performances 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 les stations sur site.

Généralement les critères de conduction et de propagation d'arcs adoptés, dans une grande partie des travaux, envisagent une répartition uniforme de la couche de pollution. En pratique, cette dernière présente fréquemment une répartition peu uniforme dépendant notamment [1,5,14-16] de la géométrie de l'isolateur et sa propriété d'auto-nettoyage, de l'arrangement de l'isolateur en position (verticale, horizontale ou incliné), du niveau de tension appliqué et la position de l'isolateur par rapport à la borne haute tension, des conditions climatiques (directions du vent, taux de pluies,...) et enfin du type de pollution caractérisant le site en question.

Les phénomènes d'arcs qui se produisent sur une surface isolante contaminée sont tellement complexes qu'il est indispensable de faire de nombreuses hypothèses simplificatrices pour rendre possible leur représentation au moyen d'un modèle mathématique [15-18]. Cependant, les modèles proposés [15,16,19-21] ne peuvent se substituer aux travaux expérimentaux. Néanmoins, ils sont intéressants dans la mesure où ils permettent d'interpréter les expériences pratiques dans un temps réduit.

Dans le but de mettre en évidence l'impact de la répartition non-uniforme de la pollution sur le comportement des isolateurs, certains chercheurs ont tenté d'étudier expérimentalement [4,14,22,23] ou théoriquement [6,20] cette caractéristique. Les résultats obtenus montrent que l'adoption d'une répartition uniforme mène à un sur-dimensionnement pour certaines configurations de la non-uniformité [4]. Par contre, d'autres cas de configurations correspondent à un sous-dimensionnement [5].

Dans ce travail, nous nous intéressons également à étudier l'influence d'une configuration discontinue de la pollution sur les phénomènes de conduction d'une surface isolante sous tension alternative 50Hz.

Dans le premier chapitre, nous présentons brièvement les phénomènes de pollution des isolateurs et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique, et ce, pour entrevoir les préoccupations qui rongent le plus l'esprit des chercheurs.

Le deuxième chapitre est consacré à la synthèse de certains travaux effectués sur la non-uniformité de la pollution.

Dans le troisième chapitre, nous élaborons un outil numérique de traitement des signaux de tension et du courant de fuite acquis par le biais d'une interface analogique/numérique lors des essais.

Dans le quatrième chapitre, nous exposons les résultats des essais effectués au Laboratoire de Haute Tension de l'ENP sur une surface isolante plane similaire à celle utilisée par Claverie et Percheron [24]. Le modèle est soumis à une répartition discontinue de la pollution reproduisant l'état de surface de l'isolateur 1512L (utilisé par SONELGAZ) dans les conditions naturelles d'exploitation en régions désertiques du Sahara Algérien [22]. Nos essais se basent sur la mesure de la tension de contournement, puis l'analyse des enregistrements des oscillogrammes du courant de fuite et de la tension appliquée, et ceci, pour différents paliers de tension. Différentes conductivités de l'agent polluant et différentes largeurs transversales sont également imposées. L'exploitation de ces résultats expérimentaux est faite à l'aide du programme élaboré dans le troisième chapitre.

Le cinquième chapitre est consacré à la modélisation mathématique du modèle de laboratoire utilisé, en simulant la surface partiellement polluée par une série de cellules RC parallèles où chaque impédance est shuntée ou non par une résistance pure représentant la couche polluante.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale concernant notre travail.

CHAPITRE I

PHENOMENES DE POLLUTION DES ISOLATEURS H.T.

Le phénomène de pollution des isolateurs peut être considéré comme un déversement continu ou intermittent d'impuretés d'origines diverses [25]. Ces particules, souvent constituées d'une combinaison de plusieurs types de pollution (pollution mixte [22,26]), portées par les vents et déposées sur les isolateurs peuvent s'accumuler sur une longue période et provoquer, par temps de pluie ou de brouillard ou même de rosée, de nombreux désagréments. En effet, le dépôt polluant mouillé abaisse considérablement la résistivité superficielle de l'isolateur en engendrant l'existence et la persistance d'un courant de fuite plus ou moins notable. Dans certains cas, la conductivité de la couche de pollution est telle que des arcs prennent naissance et se développent jusqu'à entraîner le contournement total de l'isolateur causant ainsi l'interruption de la ligne.

Il convient donc de connaître les différents phénomènes de pollution et les mécanismes de contournement des isolateurs et, d'autre part, de mesurer et de quantifier la sévérité de la pollution des différents sites. En plus de cela, et en procédant à un choix judicieux des isolateurs et la mise en place, si nécessaire, de solutions complémentaires fiables et économiquement justifiables, nous pourrions prévenir d'éventuels incidents.

I. FORMATION ET REPARTITION DE L'AGENT POLLUANT :

Suite à l'écoulement d'un air transportant des poussières diverses, et à l'obstacle formé par les isolateurs, une couche de pollution se développe sur la surface de ceux-ci. La répartition non-uniforme de cette couche dépend du profil de l'isolateur, de la position de la chaîne par rapport au sol (verticale, horizontale ou inclinée), du niveau de tension ainsi que la distance à la source de pollution [1,14].

En général, la couche de pollution se concentre dans les parties les mieux protégées contre les facteurs d'auto-nettoyage tels que les pluies et les vents forts. C'est ce qui fait que, souvent, la répartition de la couche polluante est non uniforme.

II. NATURE DE LA POLLUTION :

Quelle que soit la source de pollution, il y a formation d'une couche électrolytique due à l'humidification du dépôt solide accumulé progressivement à la surface d'un isolateur. Malgré le lavage périodique, les dépôts atteignent après une période plus ou moins longue, une pollution limite propre à chaque site [27].

On distingue plusieurs aspects plausibles de la pollution. Nous les énumérerons comme suit :

- Pollution marine constituée de particules salines dans les régions situées en bordure de mer [9,28,29].
- Pollution industrielle et urbaine dont l'origine provient des impuretés et fumées qui s'échappent des appareils d'évacuations [30].

- Pollution rurale constituée d'engrais ou de pollen dans les régions rurales.
- Pollution désertique très contraignante dans les pays qui possèdent des lignes dans les régions désertiques. Elle est constituée de fines particules de sable s'incrétant sur la surface de l'isolateur [12,22,31].
- Pollution par dépôts de glaces concerne les pays très froids comme le Canada où le gel forme une carapace sur les chaînes d'isolateurs et compromet alors la tenue électrique et mécanique des isolateurs.
- Pollution mixte qui est en fait la plus fréquente. Elle est constituée d'une concomitance entre les différents types de pollution [22,32].

III. DEGRES DE POLLUTION :

Afin de pouvoir dimensionner convenablement les isolateurs susceptibles d'assurer un service sans défaillance dans un site pollué, il est nécessaire de caractériser quantitativement la sévérité de la pollution de ce site [13,27]. La détermination de cette sévérité représente l'un des points le plus important à résoudre. Différentes méthodes de mesure existent.

III.1. Méthode de mesure du degré de pollution :

III.1.1. Densité du dépôt de sel équivalente (DDSE) :

Définition : la densité du dépôt de sel équivalent est le dépôt équivalent exprimé en mg de NaCl/cm² de la surface d'un isolateur, ayant une conductivité équivalente égale à un dépôt polluant réel dissous dans la même quantité de solution.

Description : des échantillons sont prélevés à la surface d'isolateurs témoins, par lavage, en utilisant un matériau absorbant (coton, etc...) et de l'eau distillée. Le dépôt est ensuite distillé dans une quantité de solution connue. La conductivité de la solution obtenue, ainsi que les caractéristiques de l'isolateur, permettent de déterminer la salinité équivalente. Les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante afin d'obtenir les niveaux maximaux entre les périodes de lavage naturel [8,9].

III.1.2. Conductance Superficielle :

Définition : La conductance est le rapport du courant qui traverse l'isolateur à la tension appliquée. Elle caractérise l'état global de la surface isolante (niveau de pollution et degré d'humidification de la couche) lequel détermine la performance de l'isolateur.

Description: des isolateurs témoins sont installés sur site. La conductance est obtenue à partir d'une mesure du courant de fuite en calculant le rapport $G=I/U$. La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance par le facteur de forme de l'isolateur. Généralement, la tension est appliquée aux électrodes terminales, ce qui fournit la conductivité superficielle globale de l'isolateur. En cas de couches polluantes

non homogènes, la conductivité superficielle locale peut être obtenue en mesurant la conductance d'une partie de la surface à l'aide d'électrodes auxiliaires [5,12,27].

III.1.3. Courant de fuite :

Comptage d'impulsions : on enregistre pendant une période donnée, sur un isolateur soumis à sa tension de service, le nombre d'impulsions du courant de fuite dépassant une amplitude fixée. L'existence d'impulsions précède généralement la phase de contournement. Pour l'enregistrement, on utilise un isolateur en service ou un isolateur témoin et un dispositif permettant de compter les impulsions du courant de fuite [33].

Courant de fuite crête : on mesure la plus forte valeur de crête du courant de fuite sur un isolateur soumis à sa tension de service. On utilise des isolateurs témoin et une station de mesure fiable et nécessitant un minimum d'entretien. Les mesures devant être effectuées pendant une période relativement longue [11,27].

III.1.4. Contrainte de contournement :

Définition : la contrainte de contournement d'un isolateur est la tension de contournement divisée par la longueur totale de l'isolateur.

Description : sur site, la contrainte de contournement peut être mesurée de différentes façons [9,27].

- Installation de chaînes d'isolateurs de même type, mais de différentes longueurs, et soumises à une tension constante. On estime les probabilités de contournement à partir des proportions d'amorçage enregistrées.
- Une autre méthode consiste à disposer des fusibles sur chaque chaîne, afin que la chaîne accroisse sa longueur effective jusqu'à atteindre le niveau de tenue en tension.

III.1.5. Mesure de la pollution de l'air :

Les mesures de pollution de l'air s'effectuent sur une période de temps donnée et permettent d'évaluer l'intensité et les caractéristiques de la pollution de l'air sur un site. Les méthodes de mesure adoptées partent du principe qu'en ce qui concerne les phénomènes de contournement, une corrélation peut être établie entre l'analyse physico-chimique de l'air sur un site et la sévérité de la pollution sur ce même site [34].

III.1.6. Mesures optiques :

Le but des mesures optiques est d'évaluer l'épaisseur de la couche de pollution déposée à la surface de l'isolateur. Un dispositif à rayons lasers permet à partir des rayons réfléchis (amplitude, décalage de phase etc.), de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche de pollution. La mesure de la sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche [35].

III.2. Critère de choix de la méthode de mesure :

Hormis les problèmes inhérents à chacune des méthodes, le problème le plus important est le temps. Il faut attendre la formation d'une couche polluante. Certains dépôts, Comme le sel marin, peuvent se former en quelques heures, d'autres, comme la poussière de ciment en plusieurs mois. Il faut également tenir compte des fluctuations, des évolutions conditionnels du dépôt et de sa répartition. Les contournements ne se produisent que dans des cas extrêmes, les mesures durent souvent plusieurs années. Le choix d'une méthode s'effectue donc en tenant compte des disponibilités des sources de tension et du coût qu'elle engendre.

IV. CLASSIFICATIONS DES SITES POLLUES :

La longueur de la ligne de fuite d'une chaîne d'isolateurs est difficilement adaptable à chaque site, du fait qu'il est difficile d'accorder à la détermination du degré de pollution une trop grande précision. Pour cela, on regroupe les sites dans des classes de sévérité de pollution. A chaque classe est associée une salinité équivalente correspondant au cas le plus défavorable pour le niveau de pollution représentatif de la classe [36].

V. COMPORTEMENT DES ISOLATEURS SOUS POLLUTION :

Le comportement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en quatre étapes distinctes. Chacune de ces étapes ayant une importance sur le résultat final, c'est à dire la tenue ou le contournement de la chaîne isolante.

Les différentes étapes sont les suivants [37] :

V.1. Dépôt de la pollution :

L'origine du dépôt est soit naturelle (sel, sable...), industrielle (fumées, engrais...) ou encore une combinaison des deux.

Les particules du dépôt sont apportées par le vent et se concentrent surtout entre les nervures.

Les facteurs de vitesse d'accumulation sont les suivants :

- La nature du dépôt, poids et taille des particules.
- La vitesse du vent.
- L'orientation de la chaîne.
- L'écran éventuel des structures.
- La forme de l'isolateur et son aptitude d'auto-nettoyage.

L'accumulation du dépôt est continue et n'est modifiée que par la pluie et le vent. Ce nettoyage est plus efficace sur le dessus de l'isolateur que le dessous. En général, la quantité de dépôt se stabilise à une valeur moyenne après un certain temps.

V.2. Humidification de la pollution :

Le brouillard, la condensation et la fine pluie humidifient graduellement la surface de l'isolateur. Les sels contenus dans le dépôt se dissolvent et créent un électrolyte conducteur. Un courant de fuite prend alors naissance sur la surface de l'isolateur.

Pendant le cycle d'humidification, le courant de fuite augmente à une valeur maximale mais diminue s'il y a lavage ou séchage. Le niveau de ce courant de fuite dépend du temps, de la nature et de la quantité des sels solubles et des produits insolubles contenus dans le dépôt. Les produits insolubles maintiennent par capillarité une certaine quantité d'eau à la surface de l'isolateur, favorisant ainsi l'humidification du dépôt.

V.3. Développement des zones sèches et apparition d'arcs :

La densité du courant de fuite est beaucoup plus importante près du capot et de la tige de l'isolateur.

Par effet joule, la température s'élève, l'eau s'évapore et le dépôt cesse d'être conducteur. Le courant de fuite est alors interrompu par la présence de bande sèche. La répartition de potentiel sur l'isolateur est alors modifiée. La plupart du potentiel est appliquée aux bornes de la bande sèche. Si sa largeur est insuffisante pour supporter le potentiel, un arc se crée.

V.4. Comportement des arcs :

La résistance du dépôt humidifié est en série avec l'arc. Elle limite ainsi le courant d'arc et sa longueur. Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra. Dans le cas d'une humidification continue, la bande sèche s'humidifiera à nouveau et le mécanisme se répétera encore. Tant que le courant de fuite n'excède pas ce que l'on appelle "le courant critique", cette situation reste stable.

Si la résistivité de la pollution humidifiée est suffisamment faible et que le courant de fuite augmente jusqu'au point de dépasser le seuil du courant critique, la longueur de l'arc s'allonge rapidement et court-circuite l'isolateur.

VI. METHODES D'ESSAIS SOUS POLLUTION :

Lorsqu'il s'agit de comparer les performances de divers types d'isolateurs, afin de sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution, l'étude expérimentale constitue le meilleur garant d'un jugement objectif.

En effet, on distingue deux catégories d'essais sur les isolateurs pollués : les essais sous pollution naturelle et les essais sous pollution artificielle. Chacune des deux catégories a ses propres caractéristiques [27].

Les essais sous pollution naturelle consistent à installer dans différents sites pollués des stations dans lesquelles on observe le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs de longueurs ou de profils différents. Les qualités respectives de ces isolateurs, placés sous la même tension, sont appréciées en fonction des temps au contournement. On peut les classer en distinguant ceux qui ont contourné de ceux qui ont tenu durant deux ou trois ans d'exposition par exemple. Cependant, l'inconvénient majeur de ces essais est que plusieurs années sont nécessaires pour pouvoir comparer valablement les performances des isolateurs essayés.

Ce délai étant jugé trop long, c'est pourquoi on a rapidement cherché à reproduire en laboratoire les conditions de pollution naturelle, afin d'obtenir des résultats et effectuer des comparaisons plus rapidement, plus facilement et à moindre coût.

Les méthodes d'essais sous pollution artificielle qui demeurent actuellement normalisées sont la méthode de brouillard salin, la méthode des couches solides et la méthode de pollution liquide [27].

VII. MODELES D'ETUDE DU COMPORTEMENT DES ISOLATEURS SOUS POLLUTION :

VII.1. Modèles de laboratoire :

Afin de contourner la difficulté liée à la configuration souvent complexe de l'isolateur, des modèles de laboratoires ont été adoptés par un certain nombre de chercheurs. Si quelques modèles reflètent assez bien le comportement de l'isolateur, d'autres par contre en restent assez éloignés [38,39].

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

VII.1.1. Modèles plans :

Le modèle plan le plus utilisé est celui considéré par Claverie et Porcheron [24]. Celui-ci est constitué d'une surface isolante plane munie de deux électrodes planes et recouverte d'une couche de pollution. L'électrode circulaire mise sous tension est disposée à une distance donnée de l'électrode rectangulaire de terre (Fig.I.1.(a)).

Antérieurement, Woodson et McElroy [40] ont proposé un modèle plan à géométrie circulaire (Fig.I.1(c)). Celui-ci ne donna pas de résultat satisfaisant, sans doute parce que la configuration proposée est trop éloignée de celle de l'isolateur.

Plus tard, un autre modèle plan, tenant compte de la discontinuité de la couche de pollution, a été proposé par J.Danis [18] (Fig.I.1.(b)). Celui-ci comprend plusieurs zones sèches en alternance avec celles polluées.

VII.1.2. Modèle cylindrique (Alston et Zoledzowski [21]) :

Il est constitué d'un cylindre muni de deux électrodes. Ces dernières étant disposées tout autour des extrémités du cylindre (Fig.I.1.(d)). Ce modèle sera adopté plus tard par d'autres auteurs [41].

VII.1.3. Modèle de Wilkins [42] :

Celui-ci, utilisé également plus tard par d'autres auteurs [39], est constitué d'une électrode mise sous tension et située au-dessus d'un bac rempli d'eau additionnée de sel, permettant de simuler la zone polluée. La zone sèche étant considérée comme l'espace compris entre l'électrode et l'eau (Fig.I.1.(e)). Ce modèle est très utilisé pour étudier le critère de propagation de l'arc [39].

Il existe donc des modèles meilleurs que d'autres, bien que certains d'entre eux ne servent parfois qu'à étudier un phénomène bien précis (arc, par exemple [39], lequel constitue un facteur peu maîtrisé), et ne sont donc pas destinés à se substituer à l'isolateur. Ces modèles ont permis par la simplicité de leur configuration, d'examiner aisément l'influence de nombreux paramètres sur le comportement de l'isolateur (courant de fuite, contournement, tension d'entretien de l'arc, etc.) [43-46].

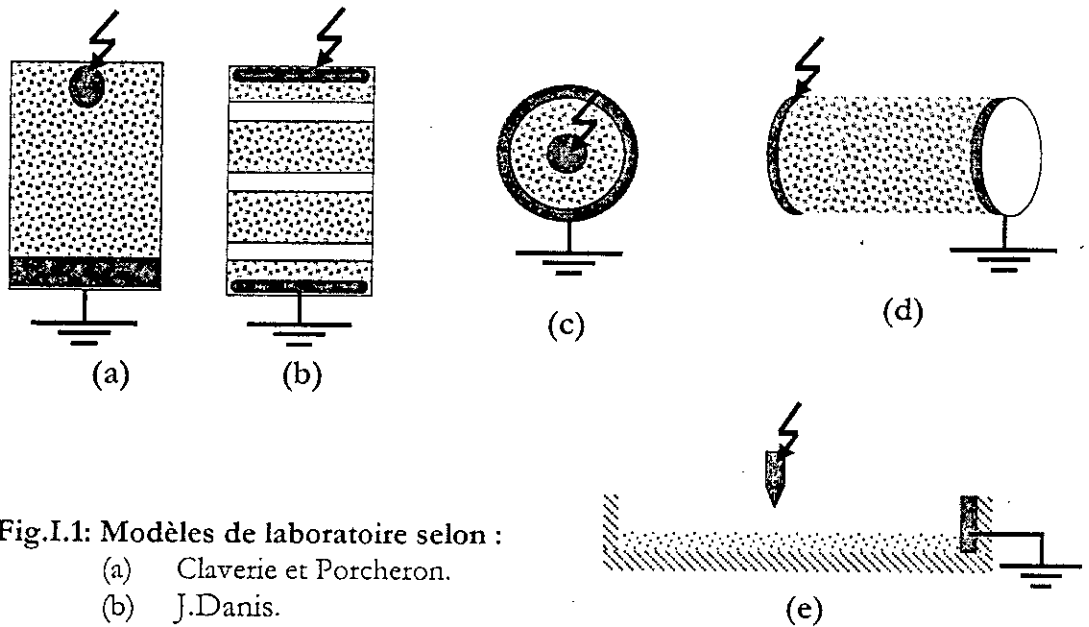


Fig.I.1: Modèles de laboratoire selon :

- (a) Claverie et Porcheron.
- (b) J. Danis.
- (c) Woodson et McElroy.
- (d) Alston et Zoledzowski.
- (e) Wilkins.

VII.2. Modèles théoriques et empiriques :

En vue d'analyser d'une manière rationnelle les phénomènes d'arcs se produisant sur des surfaces polluées, plusieurs investigations ont été effectuées et plusieurs modèles ont été, également, proposés. Ces modèles se basent sur deux aspects fondamentaux [15] :

- La formulation de la tension minimale nécessaire au maintien d'un arc partiel en série avec une couche de pollution.

- Le critère de propagation de l'arc sur la surface d'un isolateur polluée et mouillée.

Des formulations de critère d'établissement d'un arc sous tension continue sont souvent employées pour le cas d'une tension alternative. En effet, par rapport au cas du courant continu, l'arc en courant alternatif s'éteint deux fois par période, chaque fois que le courant s'annule. De ce fait, ces deux cas doivent être traités différemment pour une modélisation plus rigoureuse [47].

VIII. TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION

A cause des nouvelles sources de pollution, le dimensionnement initial des isolateurs peut s'avérer insuffisant pour le bon fonctionnement des installations. Pour cela, plusieurs moyens sont utilisés afin de prévenir, autant que possible, les incidents lorsque la ligne est en service [3,10].

VIII.1. Allongement de la ligne fuite :

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

- Le changement de type d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite) : c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste [3].
- L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existant [48].

VIII.2. Isolateurs plats :

Tandis que les deux précédentes méthodes conduisent à allonger la ligne de fuite des isolateurs, l'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminuer. En effet, ces isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto-nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont principalement utilisés dans les régions désertiques et soumis à des tempêtes de sable où la principale source d'humidification est la condensation [22].

VIII.3. Graissage périodique :

Grâce à ses propriétés hydrophobes, le graissage protège temporairement les isolateurs. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité intrinsèque du produit. Elle est généralement comprise entre 1 et 4 ans. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de regraissage est pénible, longue et coûteuse. Elle nécessite, par ailleurs, une interruption de service [3].

VIII.4. Revêtement silicones :

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs.

Comme pour le graissage dans les propriétés sont hydrophobes, ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre sa longévité est, en général, nettement supérieure à celle des graissages [49].

VIII.5. Les isolateurs composites :

Ils sont constitués d'un noyau en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Ces isolateurs présentent l'avantage d'une grande légèreté alliée à une haute résistance mécanique que lui confrère le noyau. Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisées dans des conditions de pollution très sévères [35].

Cependant, ces isolateurs présentent le désavantage de vieillir sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électrique et mécanique).

VIII.6. Nettoyage des isolateurs :

- Le nettoyage manuel (essuyage à sec de l'isolateur) ou le lavage hors tension peuvent être utilisés de façon périodique, en particulier dans les postes, entraînent nécessairement des interruptions de service parfois assez longue. Ainsi, il faut limiter autant que possible, leur utilisation [3].
- Le lavage sous tension permet d'éviter ces coupures. Ce dernier est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans ces cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau de lavage, le processus de lavage et les distances de sécurité à respecter, afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage [3].
- Le nettoyage des isolateurs à l'aide d'un abrasif pulvérisé sous pression est une technique utilisée dans certain pays (Amérique du Nord en particulier). Cette technique permet le nettoyage d'isolateurs recouverts de pollution très adhérente (ciment, par exemple) et peut être utilisée pour dégraisser les isolateurs [3].

IX. CONCLUSION :

Dans ce chapitre introductif, nous avons présenté une synthèse générale des différents aspects de la pollution et les mécanismes de contournement ainsi que les techniques de quantification de la sévérité de la pollution.

Ils en ressort que la pollution est un facteur déterminant dans le dimensionnement des isolateurs et que la connaissance du degré de pollution est également une condition indispensable pour un dimensionnement convenable.

En outre, les modèles élaborés tant expérimentaux que théoriques ne peuvent en aucun cas se substituer aux essais sur site.

CHAPITRE II

EFFET DE LA NON-UNIFORMITE DE LA COUCHE DE POLLUTION

Dans la pratique la répartition de la couche de pollution est très peu uniforme. Ce qui a poussé à prétendre dans plusieurs recherches que la différence entre les résultats d'essais effectués au laboratoire et ceux effectués sur site est due principalement à cette non-uniformité.

Nous nous intéressons dans cette présente synthèse qu'aux travaux faits sous fréquence industrielle 50Hz.

I. CLASSIFICATIONS DES DIFFERENTS TYPES DE LA NON-UNIFORMITE :

A l'instar de l'étude faite par H.Streubel [5], les types de la non-uniformité peuvent être classés en trois catégories :

I.1. La non-uniformité longitudinale par groupe :

Elle est caractérisée par un ensemble de groupes d'isolateurs soumis à différentes conductivités de la couche de pollution dont la valeur est constante dans chaque groupe.

Nous retrouvons ce type de pollution dans les cas suivants :

- Temporairement pendant le lavage sous tension.
- Dans les chaînes d'isolateurs en forme de "T".
- Par effet de champ électrique où la concentration de la pollution est accentuée sur les isolateurs les plus proches de la borne Haute Tension.

I.2. La non-uniformité transversale :

Ce type est caractérisé par des secteurs ou bandes de différentes conductivités superficielles de la couche polluante et répartis transversalement autour de la surface de chaque isolateur de la chaîne. 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.

I.3. La non-uniformité longitudinale périodique :

Ce type est le plus fréquent. Il est caractérisé 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 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.

II. TRAVAUX SUR ISOLATEURS REELS :

II.1. Travaux sur la non-uniformité longitudinale par groupe :

L.E.Zaffanella et H.M.Schneider [4] ont effectué des essais comparatifs, faits sous pollution artificielle, entre des chaînes polluées d'une façon uniforme et des chaînes à pollution discontinue, en vue de simuler la non-uniformité longitudinale par groupe.

Leurs résultats montrent que la tension de contournement d'une chaîne polluée uniformément, avec la même DDSE, était de 20% inférieure à celle de la chaîne non-uniformément polluée.

Par contre H.Streubel affirme qu'il peut y avoir une diminution notable de la tension de contournement dépendant de la conductivité intrinsèque de chaque groupe

En prenant le cas le plus simple correspondant à deux groupes de conductivités différentes, il a abouti aux constatations suivantes :

- Si seulement 50 à 60% de la ligne de fuite est couverte 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 diminuera à une valeur plus faible par rapport à une distribution uniforme de la pollution faite par cette conductivité.
- La tension de contournement totale est toujours inférieure à la somme des tensions de contournement des groupes séparés. Cette diminution dépendra, outre du pourcentage en longueur, du rapport des conductivités.

Ce comportement de la tension de contournement, prouvé par des essais au laboratoire, est expliqué, selon l'auteur, par l'hypothèse que la tension de contournement total est composée par la tension de contournement de la partie avec la conductivité faible et la chute de tension aux bornes de l'autre partie qui présente une conductivité plus grande. En effet, la tension aux bornes de la partie avec la conductivité la plus faible étant autant élevée que la tension de contournement exigée.

II.2. Travaux sur la non-uniformité transversale :

D'après H.Streubel, dans le cas extrême où seulement un demi, un quart ou un huitième de la circonférence de l'isolateur est contaminée (le reste de l'isolateur 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 mathématiques 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 la plus grande conductivité.

II.3. Travaux sur la non-uniformité longitudinale périodique :

Les auteurs L.E.Zaffanella et H.M.Schneider [4] ont tenté d'étudier l'effet d'une pollution différente entre les surfaces inférieure et supérieure de l'isolateur, suivant la procédure suivante :

- Initialement, la DDSE de la face inférieure est maintenue constante (0,03 mg/cm²), puis la DDSE de la face supérieure est polluée de manière à varier le rapport n donné par :

$$n = \frac{DDSE \text{ (côté dessus)}}{DDSE \text{ (côté dessous)}} \quad (II.1)$$

- Par la suite, une deuxième valeur de la DDSE (0,15 mg/cm²) de la face inférieure est adoptée et on procède de la même manière pour obtenir également des rapports dans la même plage de variation, celle-ci allant de $n = 0.05$ à 10.

Les résultats donnés en pourcentage de la tension d'amorçage pour $n=1$ (pollution continue) ont conduit à la formule empirique suivante :

$$U_c(\%) = 100 \left(\frac{U_c(n)}{U_c(1)} \right) = 100(1 - k \cdot \log(n)) \quad (II.2)$$

Avec k , désignant une constante dépendant de la DDSE côté dessous ainsi que du type d'isolateur étudié. Une valeur moyenne ($k=0,38$) a été déterminée à partir de la caractéristique k en fonction de la DDSE côté dessous (pour différents types d'isolateurs).

Bien que, la relation (II.2) donne une caractéristique strictement décroissante de la tension de contournement relative en fonction du rapport n , H.Streubel déploie dans ses études sur un isolateur à long fût, des résultats assez différents.

Les principaux résultats et remarques de H.Streubel sont les suivant :

- En considérant une conductivité constante γ_0 de la face supérieure de l'ailette et que la face inférieure et le corps d'isolateur ont une conductivité supérieure variable γ_u , la tension de contournement aura une valeur maximale correspondant à un rapport de conductivité γ_0/γ_u proche de 1 (0.63 d'après ses expériences). Ce rapport désigne en particulier la répartition uniforme.

- En outre, en faisant augmenter la conductivité de la face supérieure γ_o 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 point $\gamma_o/\gamma_u=1$.
- La tension de contournement tend vers une valeur limite quand la conductivité d'une portion de la ligne de fuite tend vers l'infinie (parfaitement conductrice) et correspond ainsi à la tension de contournement de la partie avec la faible conductivité.

L'interprétation donnée à ce comportement est que la partie avec la conductivité faible a tendance à se court-circuiter (en raison de la tension rapportée à ses bornes) avant la partie avec la grande conductivité. Cette dernière constitue donc une résistance série avec l'arc. La tension de contournement total est alors composée de la tension de contournement de la partie moins conductrice en plus de la chute de tension aux bornes de la partie résiduelle.

⊙ Commentaire :

Nous pensons que ce contraste entre ces deux études revient à la nature des profils des isolateurs en question. Quant à H.Streubel, il affirme dans ses interprétations que la génération d'arc qui court-circuite la partie avec la conductivité faible, conduit inévitablement au contournement total. Or, ce n'est possible que dans le cas où la longueur critique d'arc électrique soit atteinte. Il semble ainsi que les dimensions de son objet d'essai permettent d'avoir la longueur d'arc exigée.

En revanche, face à une configuration de dimensions différentes, l'obtention d'une meilleure rigidité par rapport à celle d'une répartition uniforme de la pollution s'avère plus probable.

III. TRAVAUX SUR MODELES DE LABORATOIRE :

Nous présentons dans ce paragraphe quelques travaux effectués sur des modèles de laboratoire. Ceux-ci ont l'avantage de mieux observer les phénomènes électriques (arcs, contournement, courant de fuite) et de comprendre le processus physique accompagnant ces phénomènes par l'établissement d'équations simples illustrant le modèle en question.

III.1. Modèle de J.Danis :

L'auteur a pris en considération un modèle simple, constitué d'une plaque isolante, munie de deux électrodes identiques, rectangulaires et placées aux deux extrémités de la plaque (Fig. I(c), Chapitre I) [18].

Des zones sèches sont préétablies sur le modèle, à différents endroits de la plaque, afin d'étudier les différentes étapes de développement de l'arc électrique précédant le contournement :

- L'arc se développe toujours d'abord à travers la zone sèche, puis dans la zone humide.

- L'arc peut se développer à n'importe quelle position le long de la zone sèche et aucune position n'est donc 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.
- Plusieurs arcs peuvent se développer en parallèle aux premiers stades du processus. Ceux-ci disparaissent ensuite lorsque le courant augmente et un seul arc dominant persiste au cours des étapes suivantes. Celui-ci se développe donc, seul, à travers la zone humide.
- Dans le cas de plusieurs zones sèches, le développement de l'arc d'une zone sèche à travers la zone humide s'effectue de manière à rejoindre l'arc développé sur la zone sèche voisine.
- Le contournement se fait à travers les chemins déjà préétablis par les différents arcs de chaque zone sèche.
- Lorsque l'expérience est répétée, les positions des arcs développés sont différentes, et le contournement se fera donc à travers un tout autre chemin.

A travers ces constatations, l'auteur conclut que l'endroit de rupture des zones sèches le long de la largeur de la plaque survient d'une manière aléatoire. L'auteur a donc associé une longueur de fuite différente pour chaque emplacement de ces arcs initiaux. Comme la tension de contournement est liée directement à la longueur de fuite, elle aura également le même caractère, c'est à dire aléatoire.

Une simulation statistique à l'aide d'un programme numérique basé sur le modèle d'Obenaus (en courant continu) a été élaboré et a donné des résultats qui concordent bien avec les résultats expérimentaux.

III.2. Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh :

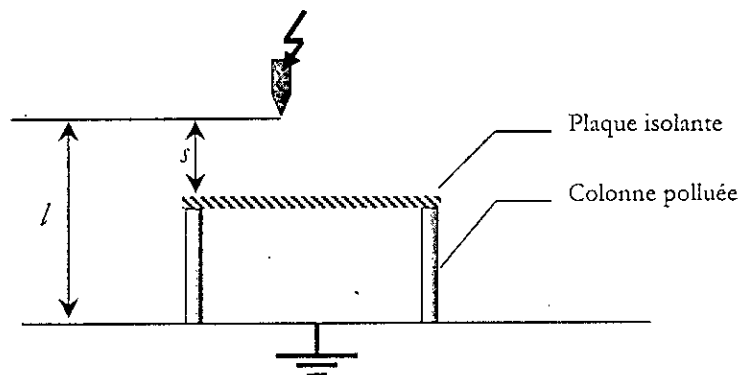


Fig.II.1 : Modèle de M.N.Rayes et M.Zhirh.

Ces auteurs considèrent un modèle constitué d'une électrode placée au-dessus d'une plaque isolante, à une distance s , considérée égale à la largeur de la zone sèche (Fig.II.1). Cette plaque est soumise à une tension alternative 50 Hz et placée sur quatre colonnes uniformément polluées et situées à une distance $(L-s)$ de la terre[23].

Ils se sont intéressés à la variation de la tension de contournement en fonction de la largeur s de la zone sèche pour plusieurs conductivités.

Les résultats ont montré que :

- Les caractéristiques de la tension de contournement U_c en fonction de s sont des courbes en forme de ∇ qui atteignent un minimum, correspondant à une largeur s_{min} . Elle se situe à environ 45-50% de la longueur totale.
- La tension de contournement, pour une même largeur de la zone sèche diminue avec la conductivité des couches polluantes.
- 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 $s > s_{min}$.

L'auteur conclut que :

- Le contournement de l'isolateur sous tension à fréquence 50 Hz dépend du rapport des largeurs zones sèche et polluée.
- Les courbes en ∇ obtenues ont montré que le contournement total ne représente pas la somme des contournements partiels des zones sèches et zones polluées.
- Le contournement total correspond à un des contournements partiels considérés, suivant le rapport entre les largeurs de la zone sèche, et de la zone polluée.

⊙ Commentaires :

Bien que ces études, au moyen de modèles de laboratoire, se limitent au traitement du cas d'une pollution discontinue, nous pouvons conclure que l'établissement de zones sèches dans ce genre de non-uniformité pourrait conduire à :

- la diminution de la rigidité pour une plage précise de variation de la zone sèche. Cette plage devrait dépendre de la longueur critique de l'arc, qui serait favorisée par des zones sèches préétablies.
- l'augmentation de la rigidité lorsque la largeur sèche préétablie devient supérieure à la largeur critique, où aucun arc stable ne peut être observé. Cette largeur critique dépendra du modèle utilisé.

III.3. Modèle type Claverie et Porcheron :

Les travaux effectués sur le modèle type Claverie et Porcheron [24], principalement au laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique [22,50], sont divers et consistent à étudier l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement de la surface isolante tels que :

- la conductivité de la couche de pollution ;
- le rayon de l'électrode circulaire ;
- la distance inter-électrodes ;
- l'épaisseur de la couche de pollution ;
- la répartition discontinue de la couche de pollution.

Une étude minutieuse concernant la discontinuité a été effectuée par D.Namane [50]. Son but est de déterminer l'influence de la discontinuité de la couche polluante sur le comportement de la surface isolante du modèle. Le modèle est soumis à des contraintes bien définies, la première étant la discontinuité de la pollution en variant de manière régulière la largeur de la pollution. La deuxième contrainte concerne la position de la pollution :

- Pollution côté haute tension (électrode circulaire) (Fig.II.2 (a)).
- Pollution côté terre (électrode rectangulaire) (Fig.II.2 (b)),

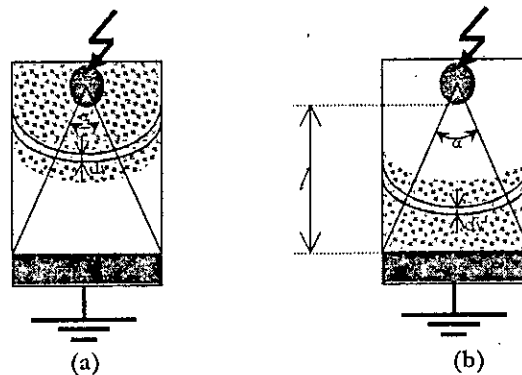


Fig.II.2 : Modèle expérimental :
(a) pollution coté haute tension (b) pollution coté terre.

D'autres paramètres sont également pris en considération à savoir, la tension appliquée et la conductivité de la couche polluante.

L'influence de ces nombreux paramètres sur le courant de fuite, la tension d'entretien de l'arc électrique et la tension de contournement, est alors étudiée.

Les principales conclusions tirées par l'auteur sont :

- Il existe un régime critique à partir duquel on obtient une hausse brutale du courant. Ce régime est atteint pour les grandes largeurs de couche polluante, lorsque la tension et/ou la conductivité sont élevées.
- Le courant de fuite est toujours plus élevé lorsque la couche polluante est du côté de l'électrode rectangulaire, mise à la terre.
- La position a peu d'influence sur la tension d'entretien de l'arc.
- La tension d'entretien d'arc diminue sensiblement, pour une même largeur de la zone sèche, lorsque la conductivité augmente.
- 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 de la zone sèche à partir de laquelle on ne peut plus maintenir un arc stable. Cette longueur, évaluée au tiers de la longueur de la plaque, diffère considérablement de la longueur critique d'arc obtenue par Claverie et Porcheron dans le cas de pollution continue [24].
- La longueur critique de la zone sèche est toutefois indépendante de la conductivité.
- L'auteur a tenté de déterminer la conductivité limite, à partir de laquelle, en cas de zones sèches préétablies, la couche polluante peut être considérée comme un court-circuit. Une conductivité comprise entre 500 et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ semble correspondre à cette limite puisque les résultats d'essais sont assez proches.

Dans le but d'approcher qualitativement le courant de fuite, une impédance équivalente de circuit décrivant l'isolateur en pollution discontinu a été proposée par l'auteur. Cette impédance est composée d'une impédance de la zone propre et d'une autre de la zone polluée.

D'après les analyses des caractéristiques expérimentales courant-tension, l'impédance moyenne de la zone propre " Z_{0e} " est évaluée en fonction de la largeur de la couche polluante pour les deux configurations considérées : pollution coté terre (y') et pollution coté haute tension (y).

$$Z_{0e}(y) = Z_{0e}(y') = Z_0(y=0) \cdot \left(\frac{l-y}{l}\right)^{0.42} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

Z_{0e} : impédance empirique de la zone sèche en fonction de la largeur de la couche polluée.

$Z_0(y=0)$: impédance totale mesurée de la plaque propre lorsqu'il n'y a pas de pollution.

Celle-ci a été évaluée à : $4,24 \cdot 10^8 \Omega$.

L : distance inter-électrodes = 40 cm.

y (ou y') : largeur de la pollution en cm (côté terre ou côté haute tension).

En se basant sur le fait que le courant dans la pollution est plutôt résistif, l'impédance de la couche polluante est considérée comme une résistance R . Par une approximation circulaire des limites de la couche de pollution autour de l'électrode haute tension, cette résistance est donnée par :

$$R(y) = \frac{1}{e\gamma\alpha} \text{Log}\left(\frac{y+a}{a}\right) = \frac{k}{\gamma} \cdot \text{Log}\left(\frac{y+a}{a}\right) \quad (\text{II.4})$$

pour le cas de la pollution coté haute tension :

$$R(y') = \frac{k}{\gamma} \cdot \text{Log}\left(\frac{a+l}{a+l-y'}\right) \quad (\text{II.5})$$

e : épaisseur moyenne de parcours du courant.

γ : conductivité de la couche de pollution.

α : angle utile de parcours du courant (Fig. II.2).

Le paramètre $k = \frac{1}{e\alpha}$: est déterminé à partir des caractéristiques expérimentales par la valeur : $8,26 \cdot 10^8 \text{cm}^{-1}$.

Enfin, L'impédance totale entre électrodes est donnée donc par :

□ Pour le cas de la pollution coté haute tension :

$$Z_t(y) = Z_0 \cdot \left(\frac{l-y}{l}\right)^{0.42} + \frac{k}{\gamma} \cdot \text{Log}\left(\frac{y+a}{a}\right) \quad (\text{II.6})$$

□ Pour le cas de la pollution coté terre :

$$Z_t(y') = Z_0 \cdot \left(\frac{l-y'}{l}\right)^{0.42} + \frac{k}{\gamma} \cdot \text{Log}\left(\frac{a+l}{a+l-y'}\right) \quad (\text{II.7})$$

Une bonne corrélation est constatée entre les résultats expérimentaux et le modèle empirique tant que la zone sèche garde les mêmes propriétés d'isolement. Au-delà, le modèle montre ses limites et ne convient plus puisque celui-ci ne tient pas compte de la variation de l'impédance de la zone sèche avec la tension reportée à ses bornes.

III. CONCLUSION :

Ce chapitre nous permet d'entrevoir les différents types éventuels de la non-uniformité de la couche de pollution ainsi que les divers procédés d'essais adoptés en vue d'examiner leurs impacts sur la rigidité de la surface isolante. Les principales conclusions que nous pouvons tirer de cette étude bibliographique sont :

- La non-uniformité longitudinale, notamment, la répartition discontinue ne correspond pas forcément à une meilleure rigidité face à une répartition uniforme de la couche polluante.
- Certaines configurations de la non-uniformité longitudinale conduit à une diminution de la rigidité diélectrique par rapport à celle d'une distribution uniforme faite pour la conductivité la plus élevée de couche non-uniforme. Cette diminution est liée d'une part aux rapports entre les conductivités des différentes parties de la couche polluante et, d'autre part, au rapport de leurs portions de la longueur de fuite.
- Les isolateurs soumis à une non-uniformité transversale ont une rigidité peu différente de celle d'une répartition uniforme. La tension de contournement est imposée par la portion de la couche de pollution avec la conductivité la plus grande.

Nous pensons que la variété des procédés d'essais retenus, afin de simuler la non-uniformité de la couche polluante, et les divers profils des isolateurs adoptés sont responsables des divergences obtenues. Il en résulte que la comparaison et la généralisation de ces résultats n'est valable que dans une marge restreinte.

CHAPITRE III

TRAITEMENT NUMERIQUE DU SIGNAL DU COURANT DE FUITE

Les enregistrements des oscillogrammes du courant de fuite montrent que l'allure du signal comporte trop de distorsions rendant la détermination des caractéristiques du signal tels que l'amplitude et le décalage de phase imprécise [8,27,51]. 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.

Le développement actuel des cartes d'interfaces entre le micro-ordinateur et les systèmes a rendu possible et aisé l'acquisition et la visualisation des informations. Il devient désormais assez facile de manipuler ces informations en développant uniquement des logiciels basés sur le modèle théorique approprié [52].

Dans notre étude expérimentale, nous avons utilisé pour l'enregistrement de l'onde du courant de fuite et celle de la tension d'alimentation un oscilloscope numérique constitué par l'ensemble d'une interface de communication (analogique/ numérique) et un micro-ordinateur muni d'un logiciel simulateur d'oscilloscope. A cet égard, Il serait donc plus judicieux d'en profiter de ce privilège en élaborant un programme de traitement de signal qui répond à nos besoins d'étude.

Ainsi, le but de ce chapitre est de concevoir un outil numérique qui consiste à analyser le signal qui circule sur la surface isolante polluée, et ce, pour obtenir les caractéristiques suivantes :

- Le spectre fréquentiel du courant de fuite en déterminant les différents harmoniques constituant le signal.
- L'amplitude moyenne du courant de fuite.
- Le déphasage courant-tension.

Nous commençons, en premier lieu, par la présentation du fondement théorique de la méthode. Par la suite, nous établissons un organigramme qui permet de traduire, en particulier, les bases théoriques en un programme convenable au traitement de signal du courant de fuite. A la fin, une application du programme est également exposée.

I. FONDEMENT THEORIQUE :

Le fondement théorique de l'outil numérique établi se base sur les concepts du traitement de signal, à savoir, l'échantillonnage, la Transformé de Fourier Discrète (TFD) et le filtrage numérique.

I.1. L'échantillonnage :

La plupart des grandeurs physiques sont de nature analogique qui exige un traitement spécifié (filtrage, transformé de Fourier, stockage en mémoire, ...). Avec le progrès de l'électronique numérique, les fonctions complexes telles que le filtrage et les transformés de Fourier sont maintenant réalisables sous forme de cartes programmables

associées à un système à micro-ordinateur. Les grandeurs analogiques doivent être donc échantillonnées pour produire le signal numérique correspondant [52,53].

Le principe de base d'un échantillonneur est réalisé à l'aide d'un interrupteur qui s'ouvre et se ferme périodiquement à la fréquence d'échantillonnage $f_e = 1/T$ (Fig.III.1). Le signal analogique d'entrée $y(t)$ apparaît en sortie lorsque l'interrupteur est fermé (position1) pendant une durée τ et disparaît quand l'interrupteur est ouvert (position2) pendant le reste de la période T . Le signal échantillonné $y_e(t)$ est une suite d'impulsions périodique de très faible durée du signal d'entrée [54].

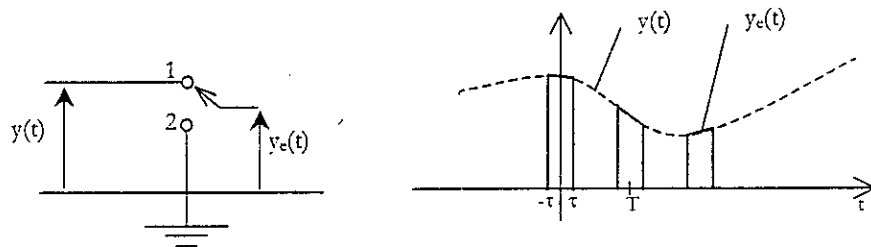


Fig.III.1 : Principe de l'échantillonnage.

La condition permettant une reconstitution du signal analogique à partir du signal échantillonné, est appelée le théorème d'échantillonnage qui peut être énoncé comme suit :

Pour qu'un signal analogique puisse être déterminé uniquement à partir de ses échantillons, il faut et il suffit que la fréquence d'échantillonnage soit supérieure à deux fois la plus grande fréquence contenue dans le signal analogique.

En pratique les signaux réels n'ont pas de spectre limité et la condition précitée n'est jamais réalisée. Par conséquent, la reconstitution du signal n'est valable que si l'information contenue dans les composantes de hautes fréquences est supposée peu importante [54].

En plus, 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 [52].

Ces contraintes limitent les performances des CAN lors d'enregistrement des signaux correspondant aux phénomènes d'évolution rapide combinés avec d'autres phénomènes à évolution plus modérée. Cette difficulté a été rencontrée lors de nos essais au laboratoire pendant l'enregistrement des signaux du courant de fuite. En effet, les décharges partielles (effet couronne) ont généré une forte distorsion, voire la perte de la nature alternative pour certains niveaux de tension (Fig.III.2).

Notons que le nombre d'échantillons offert par le CAN de nos essais est $N=1024$, avec une résolution $M = 8\text{bit}$ (256 niveaux) et la fréquence d'échantillonnage 20kHz (Annexe1).

I.2. La Transformé de Fourier Discrète (TFD) :

Le traitement de signal dans le domaine fréquentiel dit traitement spectral est effectué à l'aide des transformés de Fourier normales et inverses. Rappelons que J. Fourier démontra, au début du 19^{ème} siècle, que tout signal périodique pouvait être décomposé en une somme de composantes élémentaires (des sinusoïdes). Ces sinusoïdes, d'amplitudes et de fréquences variées, constituent le spectre [53,54].

Toutefois, la méthode de Fourier, telle quelle, est définie pour des variables de fréquences et de temps continues qu'on ne peut pas les manipuler dans un système de traitement numérique. Pour maîtriser cette contrainte, on utilise respectivement la Transformé de Fourier Discrète (TFD) et la Transformé de Fourier Discrète Inverse (TFDI) qui s'adaptent bien aux traitements des signaux échantillonnés. Elles sont définies par :

$$\text{TFD} : Y(f) = Y\left(\frac{k}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(nt) \cdot e^{-j2\pi \frac{n}{N}k} \quad \text{où } k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{III.1})$$

$$\text{TFDI} : y(t) = y(nT) = \sum_{n=0}^{N-1} Y\left(\frac{k}{NT}\right) \cdot e^{j2\pi \frac{n}{N}k} \quad \text{où } n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{III.2})$$

où : $Y(f)$: signal dans le domaine fréquentiel,

$y(t)$: signal dans le domaine temporel,

T : période d'échantillonnage,

N : nombre d'échantillons.

La transformé de Fourier est généralement une fonction complexe pouvant se mettre sous la forme :

$$Y(f) = |Y(f)| e^{j\varphi(f)} \quad (\text{III.3})$$

qui constitue la représentation spectrale du signal $y(t)$. Elle se décompose en un spectre d'amplitude $|Y(f)|$ et un spectre de phase $\varphi(f)$.

Pour avoir davantage le décalage de phase entre deux signaux, c'est à dire le déphasage entre leurs fondamentaux, il suffit de faire la différence entre les spectres de phase à la fréquence du fondamental.

$$\Delta\varphi = \varphi_1(f_1) - \varphi_2(f_1) \quad (\text{III.4})$$

où $\varphi_i(f_1)$ est la phase du fondamental du signal « i ».

I.3. Filtrage numérique :

La transformé de Fourier du signal de sortie $Y_f(f)$ d'un filtre linéaire est, par définition, le produit de la fonction de transfert du filtre $G(f)$ par la transformé du signal d'entrée $Y(f)$ [53,54] :

$$Y_f(f) = G(f) \cdot Y(f) \tag{III.5}$$

Donc le signal filtré dans le domaine temporel n'est autre que la transformé de fourrier inverse du produit obtenu. Il est donné par :

$$y_f(t) = F^{-1}\{Y_f(f)\} = F^{-1}\{G(f) \cdot Y(f)\} \tag{III.6}$$

Dans le cas des signaux discrets, on introduit la TFDI et la dernière équation s'écrit :

$$y_f(nT) = \sum_{k=0}^{N-1} G\left(\frac{k}{NT}\right) \cdot Y\left(\frac{k}{NT}\right) \cdot e^{j2\pi \frac{n}{N}k} \quad \text{où } n = 0, 1, \dots, N-1 \tag{III.7}$$

Les filtres passe-bas les plus connus par leur sélectivité en fréquence sont les filtres de BUTTERWORTH [54]. Ce type de filtres est basé sur l'approximation de BUTTERWORTH suivante :

$$|G(f)|^2 = [1 + (f/f_c)^{2n}]^{-1} \tag{III.8}$$

Avec G : la fonction de transfert de filtre,
 f_c : la fréquence de coupure,
 n : le degré de filtre.

Pour le filtrage de nos signaux enregistrés du courant de fuite, nous avons choisi $f_c=200\text{Hz}$, $n=4$ (FigIII.3). Ce choix a prouvé sa validité dans une étude antérieure consacrée au traitement numérique du courant de fuite[51].

Le concept de filtrage nous servira comme solution au problème lié à la détermination de l'amplitude alternative du courant de fuite. En effet, les fluctuations à fréquences élevées, perçues surtout au voisinage des valeurs crêtes, la rendent difficile.

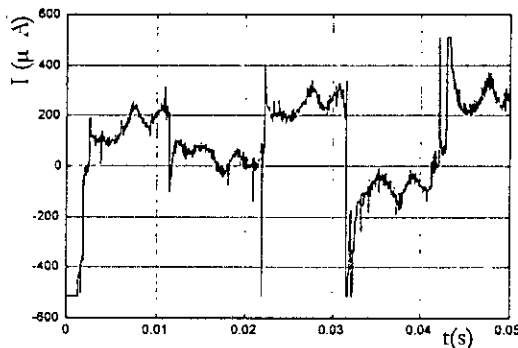


Fig.III.2 : Courant capté par l'oscilloscope.

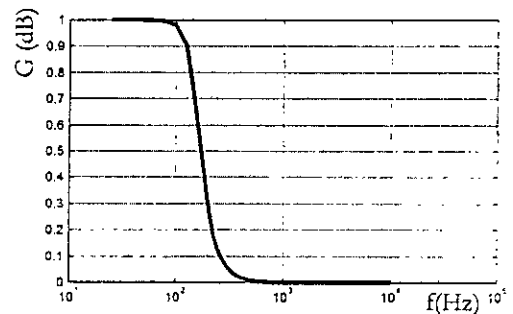


Fig.III.3 : Configuration du filtre.

II. PROGRAMME :

Suivant les concepts décrits ci-dessus, un programme est élaboré par un langage évolué (MATLAB 5.2), afin de traiter les signaux enregistrés lors de nos expériences. Ce programme est composé de deux sous-programmes. Le premier consiste à calculer les fondamentaux et le déphasage des signaux du courant et de la tension enregistrés simultanément. Le deuxième consiste à calculer la valeur moyenne de l'amplitude du courant de fuite. Les organigrammes sont développés dans les (Fig.III.3 et Fig. III.4).

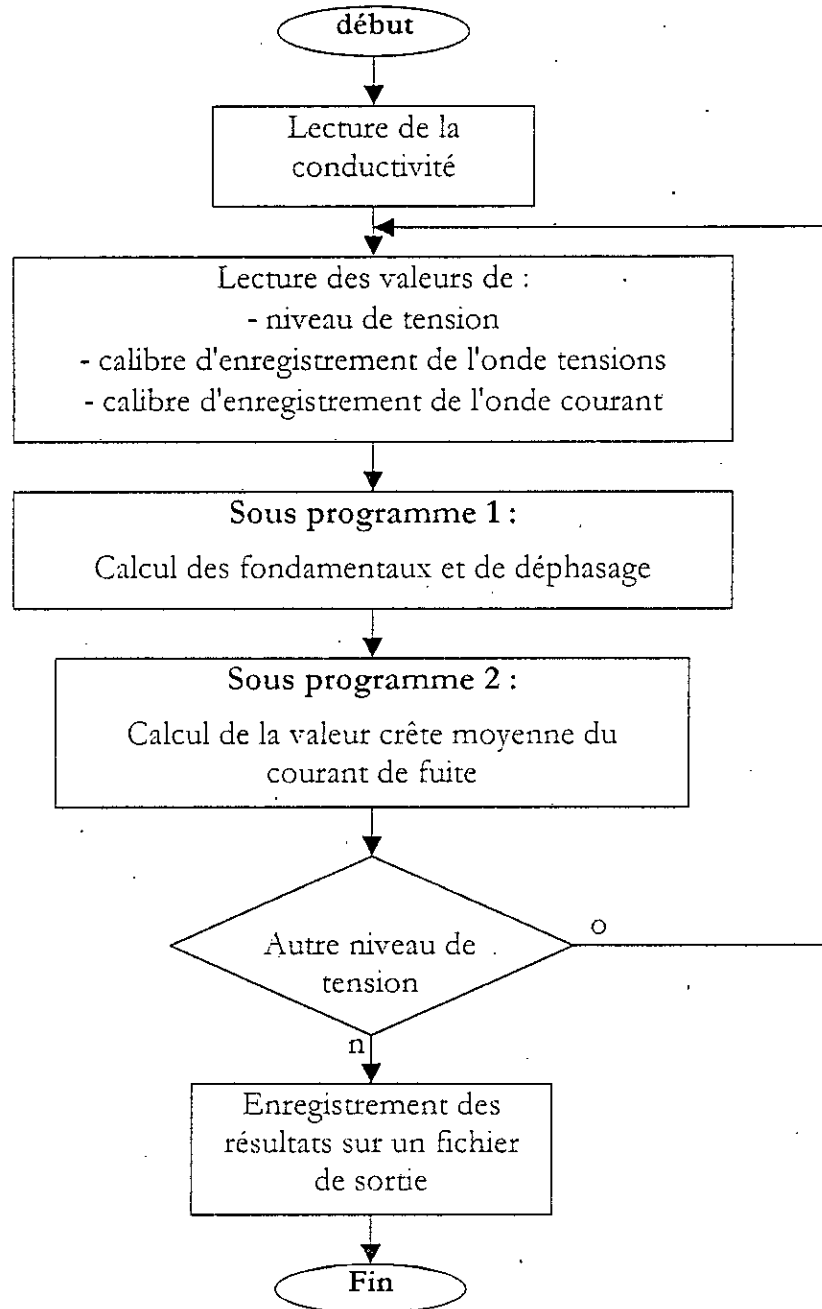


Fig. III.3 : Organigramme du programme principal.

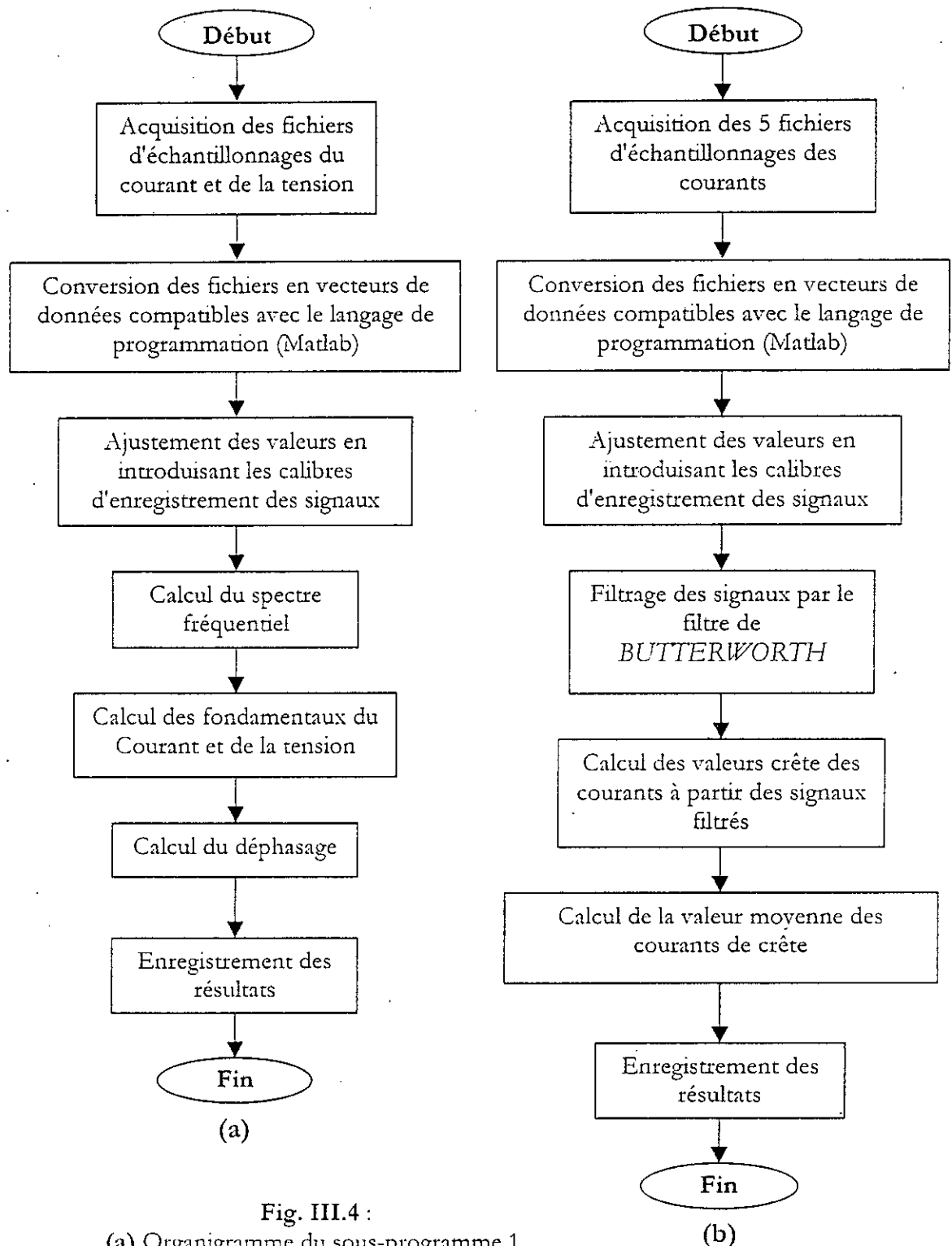


Fig. III.4 :

- (a) Organigramme du sous-programme 1.
- (b) Organigramme du sous-programme 2.

III. APPLICATION :

Nous présentons, dans ce paragraphe, la validation des étapes du programme élaboré, en vue de tester son bon fonctionnement dans le recueil et le traitement des signaux.

Nous exposons, en particulier, le signal du courant de fuite enregistré qui comporte également des perturbations (Fig.III.5(a)). De ce fait, le spectre fréquentiel contient des composantes à hautes fréquences (Fig.III.5(b)). Il est alors indispensable d'introduire un filtre pour avoir le signal filtré illustré dans la figure (Fig.III.5(c)).

L'enregistrement simultané du courant de fuite et de la tension appliquée ne permet pas d'évaluer aisément le déphasage (Fig.III.5(d)). Cependant la détermination des signaux fondamentaux permet de voir nettement ce déphasage (Fig.III.5(e)).

Un complément de résultats pour différentes tensions, conductivités et largeurs de la pollution, est présenté dans l'annexe 2.

IV. CONCLUSION :

L'utilisation d'un oscilloscope numérique permet de détecter les faibles variations de signal du courant de fuite. Ce qui convient parfaitement pour mesurer, d'une manière minutieuse, ce genre de courant.

Nous constatons, également, que l'implémentation d'un programme de traitement numérique approprié nous permet de contourner la difficulté liée aux fluctuations perturbatrices nuisibles accompagnant souvent les signaux du courant de fuite. Mieux encore, ce programme élimine carrément les erreurs de lecture en offrant les différents tableaux de mesures directement à partir des enregistrements des ondes des signaux de tension et du courant de fuite.

Nous pouvons affirmer que les performances recherchées aux niveaux de la précision et du temps d'exploitation des mesures se révèlent tout à fait satisfaisantes.

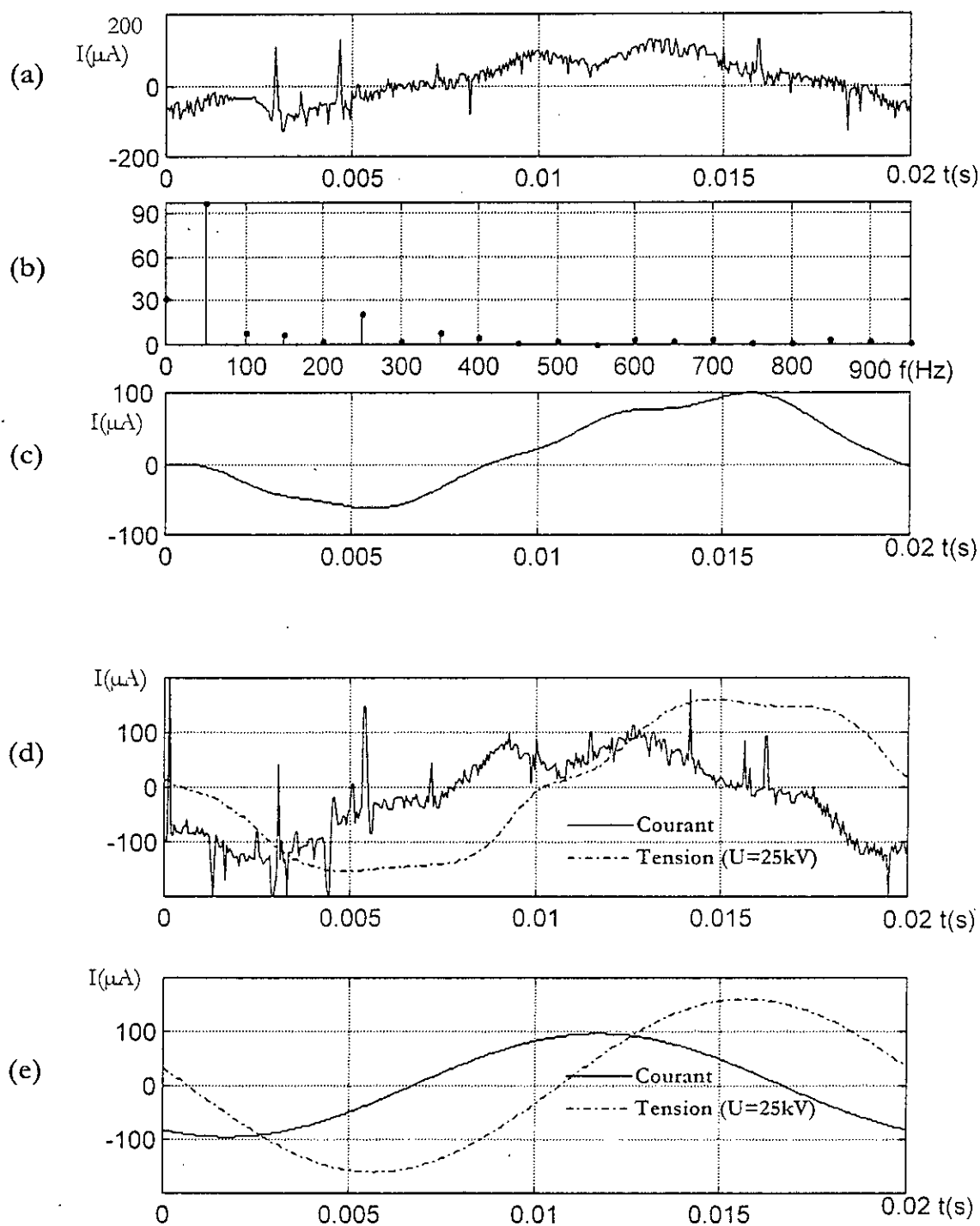


Fig.III.5 : Application du programme (conductivité $\gamma = 85\mu\text{S}$, largeur $l = 30\text{cm}$)
 (a) : Courant de fuite réel, (b) : Spectre d'amplitude, (c): Courant de fuite filtré.
 (d) : Courant de fuite et tension appliquée, (e) : Fondamentaux du courant et de la tension.

CHAPITRE IV

ETUDE EXPERIMENTALE

Le but de cette étude expérimentale est d'étudier l'influence d'une configuration discontinue de la couche de pollution sur le comportement d'une surface isolante soumise à une tension alternative à fréquence industrielle 50Hz. La dite configuration est celle représentant l'isolateur capot-tige 1512L exploité dans les régions désertiques Algériennes [22].

Afin de faciliter les observations et les mesures nécessaires à l'analyse des phénomènes mis en jeu, les essais ont été faits sur modèle plan semblable à celui de Claverie et Porcheron [24].

La ligne de fuite du modèle ainsi que la répartition longitudinale des différentes couches polluantes sont fixées, au préalable, conformément aux mesures effectuées sur l'isolateur réel (1512L) correspondant à la région électrique de Hassi R'mel[22]. Le modèle a été également soumis à trois contraintes principales, à savoir, la conductivité de la couche de pollution, la largeur transversale de la couche polluante et le niveau de tension appliqué.

Le comportement est étudié en analysant l'évolution des principaux paramètres tels que le courant de fuite, le déphasage courant-tension, la tension de contournement et le développement de la décharge.

I. DISPOSITIF EXPERIMENTAL :

Le dispositif expérimental est constitué d'une alimentation à fréquence industrielle 50Hz, de l'objet d'essai et d'un circuit de mesure (Fig.IV.1.).

Le circuit d'alimentation de la station d'essai comprend les organes suivants :

- Un transformateur de Haute Tension : 300kV, 50kVA, 50Hz.
- Transformateur de réglage : 500V, 50kVA.
- Un diviseur de tension capacitif.
- Des appareils annexes de mesure et de protection.

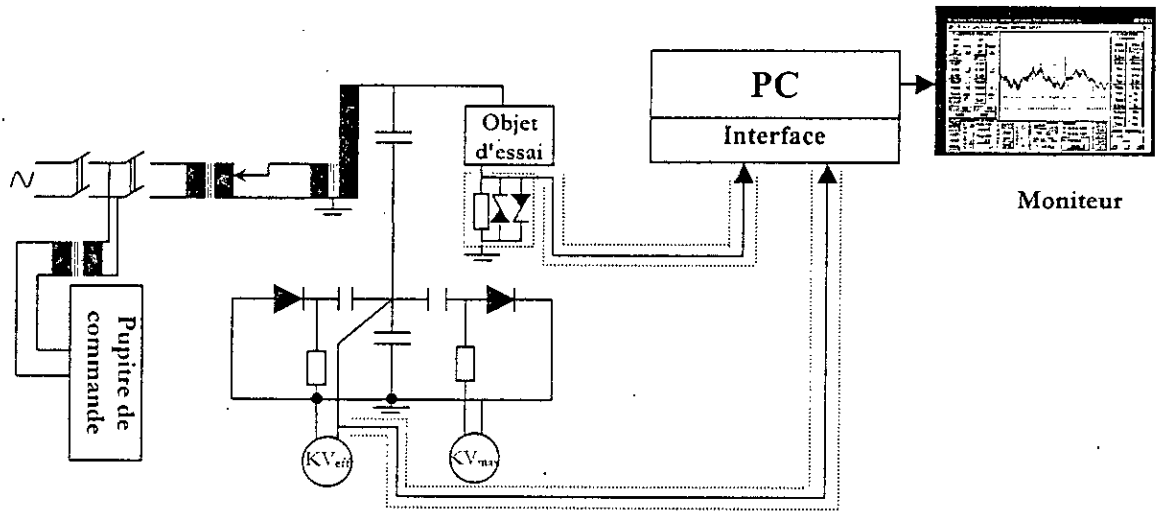


Fig.IV.1 : Dispositif expérimental.

I.1. Modèle expérimental :

Le modèle expérimental considéré est un modèle plan similaire à celui de Clavierie et Porcheron, constitué d'une plaque de verre ($500 \times 500 \times 6 \text{ mm}^3$) ayant la propriété de résister à la chaleur due aux décharges électriques. La plaque est munie de deux électrodes en feuilles d'aluminium dont l'épaisseur est de $2 \mu\text{m}$, l'une des électrodes est circulaire de diamètre (50 mm) mise sous tension et l'autre est rectangulaire ($300 \times 50 \text{ mm}^2$) mis à la terre (Fig. VI.2).

La configuration de la répartition de la couche de pollution simule (Fig.V.3) l'état de surface de l'isolateur de type capot-tige 1512L le plus pollué de la chaîne, prélevée de la région électrique de Hassi-R'mel [22]. Les dimensions longitudinales des zones propres et polluées sont données dans le Tableau V.1.

L'agent polluant utilisé est une couche de peinture semi-conductrice qui a l'avantage de garder après séchage une conductivité constante durant les essais, indépendamment des conditions atmosphériques au laboratoire. Elle permet également d'éviter les difficultés liées à la reproductibilité lors d'utilisation des méthodes de mouillage.

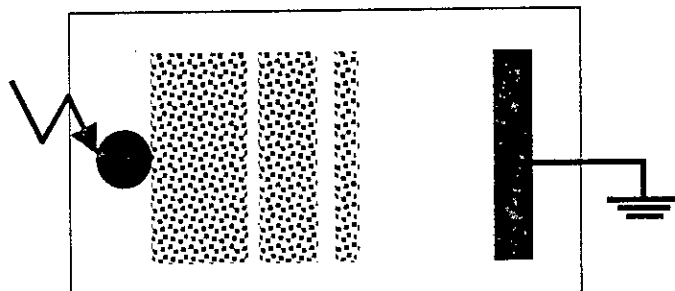


Fig.IV.2.- Modèle expérimental.

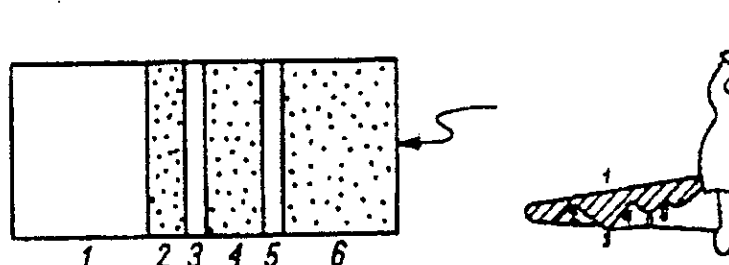


Fig.IV.3 : Répartition de la pollution de l'isolateur capot-tige 1512L dans la zone de Hassi R`mel [22].

	N°	Longueurs (mm)	Pourcentage par rapport à la longueur de fuite 292 mm(%)
Zones propres	1	106	36.30
	3	13	4.45
	5	04	1.37
Zones polluées	2	30	10.27
	4	52	17.81
	6	87	29.80

Tableau IV.1 : Dimensions de la répartition de la couche polluante sur l'isolateur capot-tige 1512L [22].

I.2. Circuit de mesure :

La tension d'alimentation est mesurée indirectement à l'aide d'un diviseur capacitif (Fig.IV.1). Ce diviseur est constitué d'une capacité C_1 de 400pF en série avec une capacité C_2 1000 fois plus élevée. Ainsi, ce dispositif permet de réduire de 1/1000 la tension d'essai. La tension réduite peut ensuite être relevée à partir :

- d'un galvanomètre à spot lumineux permettant la lecture de la valeur de crête de la tension.
- d'un voltmètre à spot lumineux pour la lecture de la valeur efficace de la tension.
- d'une sonde pour capter l'onde de la tension appliquée. Cette onde est rapportée à l'aide d'un câble coaxial, sur une interface analogique/numérique dont les caractéristiques sont présentées dans l'annexe 1.

Le courant de fuite est mesuré par l'intermédiaire de l'onde de la tension captée aux bornes d'une résistance de 100Ω connectée entre l'électrode rectangulaire et la terre. Cette onde est acquise également, à l'aide un câble coaxial, et ramenée vers la même interface.

Pour atténuer l'influence des parasites dans le signal du courant recueilli, la résistance est introduite dans une boîte métallique mise à la terre, formant ainsi un écran électrique.

II. MODE OPERATOIRE :

II.1. Préparation de l'agent polluant :

Pour contourner la difficulté liée à la pulvérisation manuelle et à la reproductibilité lors de l'utilisation des méthodes de mouillage, l'agent polluant utilisé est une peinture semi-conductrice. Cette peinture a l'avantage de garder après séchage une conductivité constante durant les essais [55,56].

La peinture semi-conductrice est réalisée au laboratoire, par un mélange des éléments suivants :

- Graphite ;
- Bioxyde de silicium : SiO_2 ;
- Résine cellulosique ;
- Alcool isopropylique.

La conductivité superficielle désirée est obtenue en jouant sur la concentration du graphite (élément conducteur), par rapport à celle de bioxyde silicium (étant un élément isolant). La résine cellulosique est une composante inerte utilisée 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.

II.2. Mesure de la conductivité superficielle :

La conductivité superficielle est déterminée par la méthode volt-ampèremétrique (Fig.IV.5) en mesurant la résistance de fuite des couches polluées entre deux électrodes en aluminium. Ces électrodes sont placées transversalement sur le modèle d'essai (Fig.IV.4) et ne sont utilisées que momentanément lors de l'opération de mesure. La peinture est appliquée après le placement des électrodes pour s'assurer qu'elle recouvre bien les bords de ces dernières. La mesure n'est effectuée qu'après séchage complet de la peinture qui dure environ 16 heures. La couche doit être appliquée soigneusement d'une façon uniforme.

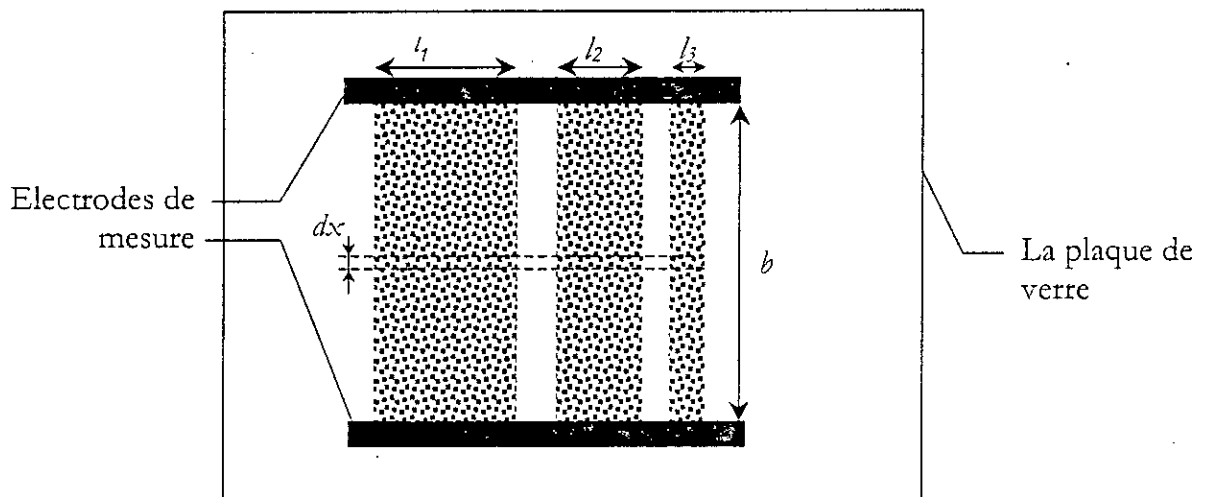


Fig.IV.4.- Modèle d'essai lors de l'opération de mesure de la conductivité

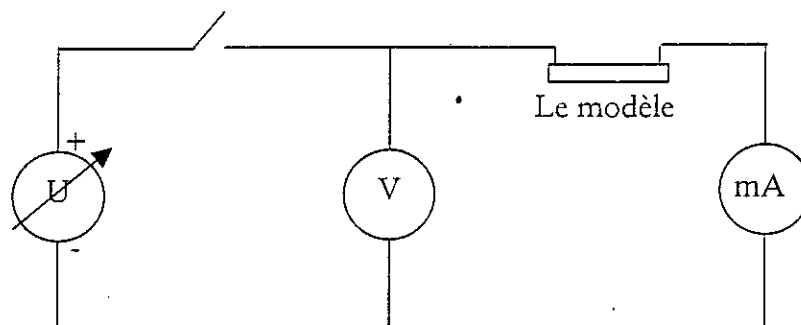


Fig.IV.5 : Circuit de mesure de la résistance de fuite [57].

$$\gamma_s = \rho_s^{-1} = \frac{1}{R_f} \int_0^b \frac{dx}{l(x)} \quad (\text{VI.1})$$

$$\text{avec :} \quad R_f = \frac{U}{I} \quad (\text{VI.2})$$

Le modèle utilisé permet d'avoir :

$$\gamma_s = \frac{I}{U} \cdot \frac{b}{l} \quad (\text{VI.3})$$

avec γ_s : la conductivité superficielle,

ρ_s : la résistivité superficielle,

R_f : la résistance de fuite,

$b = 300 \text{ mm}$: la dimension transversale (largeur) de la couche polluante,

$l = (l_1 + l_2 + l_3)$: la somme des dimensions longitudinales (longueurs) des zones polluées.

II.3. Préparation du modèle :

La préparation de l'objet d'essai commence par un nettoyage, à l'eau, de la plaque, puis imbibée de gas-oil dans les endroits d'emplacement des électrodes en aluminium, pour éliminer tout espace d'air entre la plaque et les électrodes. Ensuite, nous appliquons la couche de peinture semi-conductrice suivant la configuration adoptée (Fig.IV.2.). Après séchage de la couche, nous effectuons l'opération de mesure de la conductivité.

Par la suite, le modèle est disposé horizontalement sur trois colonnes isolantes, elles même posées sur un support en bois de manière à éviter tout phénomène parasite dû au sol.

Une fois la plaque est disposée sur le support, nous repassons le coton imbibé d'alcool isopropylique sur les zones propres de la plaque pour éliminer toute trace de poussière ou de gas-oil.

II.4. Procédés d'essai :

Après la préparation de l'objet d'essai, nous commençons par la mesure de la tension de contournement pour les différentes conductivités. Cette mesure permet non seulement de déterminer l'influence de la conductivité sur la tension de contournement mais aussi de prévoir les paliers des tensions à appliquer pour l'enregistrement du courant de fuite. La tension d'essai est appliquée d'une manière progressivement croissante (2kV/s), jusqu'au niveau de tension désiré. Puis, nous relevons le courant de fuite et cela pour les différentes conductivités et les différentes largeurs. L'onde du courant de fuite a été enregistrée 5 fois pour chaque palier de tension, afin de déterminer la valeur moyenne de leurs valeurs crêtes.

Les conductivités adoptées sont (0.1, 20, 85, 700, 1000 μS). Chaque conductivité considérée est étudiée pour cinq largeurs transversales : 30, 24, 18, 12 et 6 cm.

Nous avons enregistré ainsi, simultanément, l'onde du courant de fuite et l'onde de la tension, pour chaque niveau de tension, afin de déterminer le déphasage.

II.5. Mesures préliminaires :

Nous avons mesuré la tension de contournement de la plaque propre ($U_c=112\text{kV}$) ainsi que le courant de fuite pour différents niveaux de tension. Par la suite, nous avons effectué, également, des mesures de la tension de contournement pour l'autre cas extrême correspondant à une plaque où les zones polluées sont remplacées par du papier aluminium. Cette mesure représente en particulier la tension de contournement des zones propres ($U_c=55\text{ kV}$, largeur de 30cm).

Nous avons constaté que le courant de fuite pour une surface propre augmente d'une manière quasi-exponentielle en fonction du niveau de tension appliqué (Fig.IV.6).

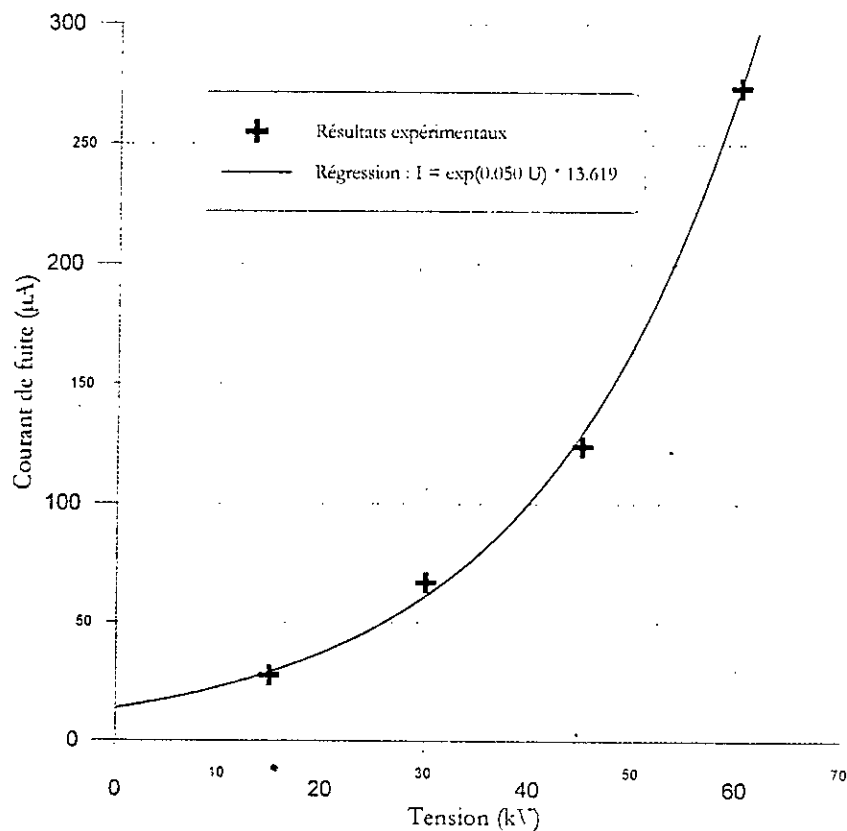


Fig.IV.6 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour une plaque propre.

Ainsi, le choix des différentes conductivités, utilisées lors des essais, est fait de manière à avoir des tensions de contournement correspondantes bien réparties le long de l'intervalle entre les deux cas extrêmes (conductivité nulle et conductivité infinie).

Notons que nous avons essayé de mesurer les courants de fuite pour ce cas où la pollution est parfaitement conductrice. Toutefois, des étincelles qui provoquent des forts pics à courtes durées, au niveau du signal de courant, ont causé la saturation de l'oscilloscope. Dans ce cas, le courant perd complètement sa forme alternative et même pour des faibles niveaux de tension ($< 20\text{kV}$).

Ces étincelles gênantes apparaissent toujours au-dessus de la moins large zone propre et surtout au niveau des bords. Bien que, nous avons procédé d'arrondir soigneusement les bords des couches, la forme lisse même dans la partie rectiligne ne peut être rigoureusement respectée. Par conséquent, à proximité des pointes (micro-pointes), le champ est plus intense qu'ailleurs et les étincelles prennent forcément naissance.

III. RESULTATS D'ESSAIS ET INTERPRETATIONS :

III.1. Le contournement :

Les observations de laboratoire ont montré que, pour les différentes conductivités et les différentes largeurs adoptées, le contournement se produit directement sans étapes intermédiaires. Ceci s'explique par le fait que la longueur de la zone propre dépasse la longueur critique au-dessus de laquelle aucun arc stable ne se produit. Cette longueur critique a été estimée dans une étude antérieure [50] à 33% de la longueur de fuite. Elle représente, dans notre modèle, 42.2% de la longueur de fuite (Tableau IV.1).

Au cours des essais de contournement, nous signalons que la peinture semi-conductrice a gardé avec une bonne satisfaction un état de surface stable. Néanmoins, pour certaines plaques, nous avons remarqué que l'arc de contournement engendre un effritement local de la couche de pollution et laisse des traces visibles. Ceci est dû à la teneur en résine qui caractérise le degré d'adhésion de la peinture semi-conductrice. Quant à la valeur de la tension de contournement elle a montré, même dans le dernier cas, une dispersion restreinte, et ce, pour chaque série de 5 essais de contournement.

L'avantage d'utilisation de la peinture semi-conductrice s'avère ainsi plus pratique par rapport à la méthode d'humidification car elle assure une reproductibilité quasi-parfaite des résultats.

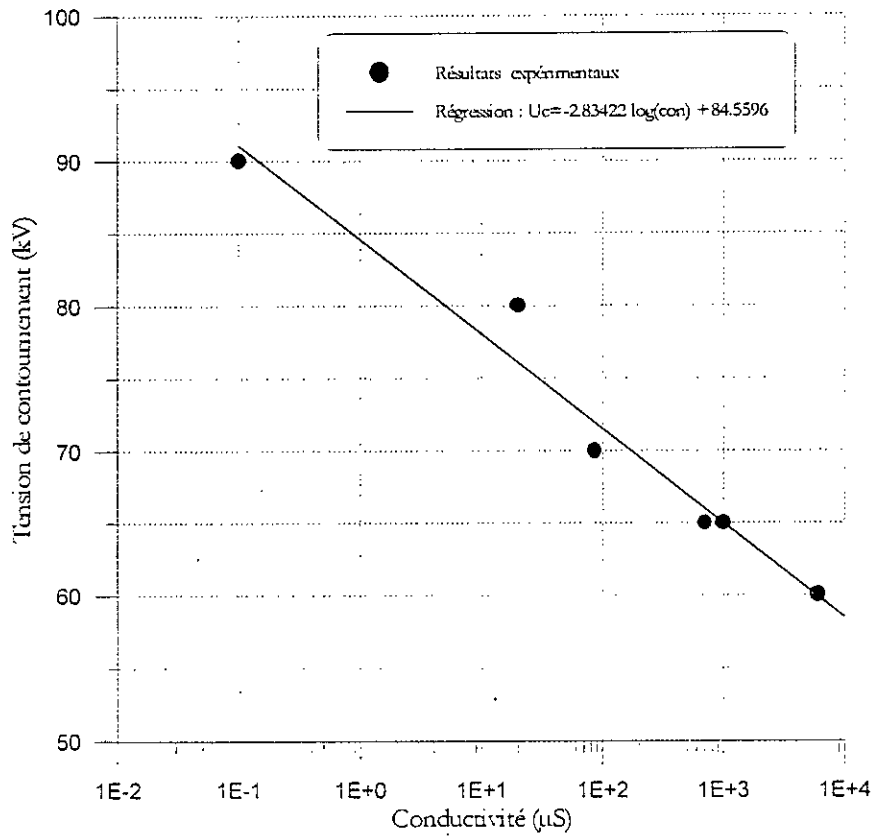


Fig.IV.7 : Tension de contournement en fonction de la conductivité de la pollution ($L=30\text{cm}$).

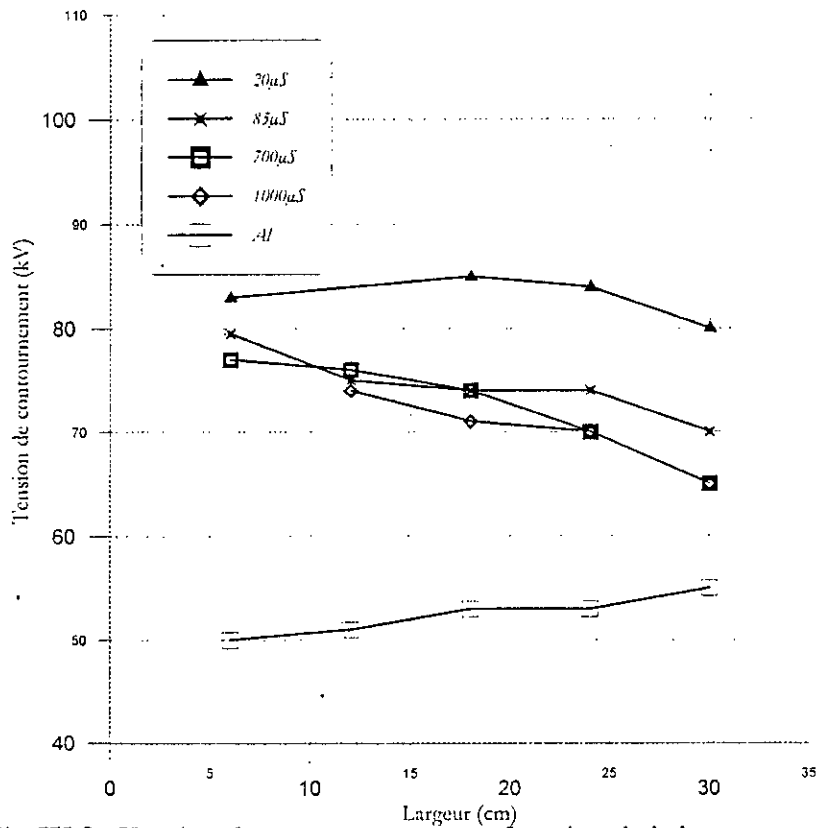


Fig.IV.8 : Tension de contournement en fonction de la largeur pour différentes conductivités de la couche polluante.

III.1.1. Influence de la conductivité de la couche de pollution :

Nous avons constaté que la tension de contournement révèle une nette diminution quand la conductivité augmente surtout au niveau des conductivités faibles. En revanche, la diminution devient moins accentuée quand la conductivité est plus élevée (décroissance quasi-linéaire dans une échelle logarithmique). A ce niveau, la tension de contournement tend vers une valeur asymptotique correspondant à la tension de contournement d'une plaque où les couches de pollution sont parfaitement conductrices (Fig.IV.7).

III.1.2. Influence de la largeur transversale de la couche de pollution :

Nous nous attendions à une augmentation de la tension de contournement suite à la diminution de la largeur transversale de la couche de pollution. Cependant, cette augmentation se montre insignifiante et ne dépasse pas dans le cas extrême 12% de la tension de contournement initiale. Mieux encore, pour des couches de pollution en feuilles d'aluminium nous avons constaté une légère diminution de la tension de contournement quand la largeur de la couche de pollution diminue (Fig.IV.8).

Le cas des feuilles d'aluminium représente une singularité car le contournement est favorisé tant que la tendance vers une géométrie pointue des électrodes métalliques est plus accentuée.

III.2. Courant de fuite :

En absence d'un arc partiel, le courant de fuite reste faible et ne dépasse pas les centaines de micro-ampères. A cette gamme d'amplitude, les phénomènes perturbateurs tels que les courants parasites sont substantiels. Nous avons, quelquefois, noté même avant l'application de la tension, des courants parasites détectés par l'oscilloscope ayant une amplitude qui dépasse celle d'un courant de fuite détecté pour une tension de l'ordre de 15kV. Donc le recours à un matériel d'enregistrement minutieux est indispensable afin d'exploiter les mesures du courant de fuites.

De surcroît, pour les niveaux de tension élevés, l'effet couronne contribue fortement à la distorsion du signal de courant de fuite. Ce phénomène se manifeste en générant un ensemble de pics de courte durée et d'amplitudes excessives proportionnelles au niveau de la tension appliquée [31].

En réalité, l'apparition de l'effet couronne n'est pas liée uniquement au niveau de la tension appliquée. Mais, elle dépend en premier lieu de l'état de surface de la couche semi-conductrice et de la forme des électrodes actives. En effet, la présence éventuelle des pointes au niveau de la surface de la couche semi-conductrice, notamment aux bords, active le phénomène de l'effet couronne à cause du fait que les pointes sont le siège d'un champ électrique intense [58].

Les enregistrements du courant de fuite ont montré que l'amplitude et le nombre de pics engendrés par l'effet couronne n'obéissent pas à l'ordre des conductivités ni à l'ordre des largeurs. En plus, leurs incidences sont aléatoires dans le temps. Par conséquent, ces impulsions ne portent pas d'informations sur le degré d'isolement de la surface de verre polluée. Mais plutôt, elles nous informent sur l'état de surface des

couches polluantes [58]. De ce fait, le recours à l'élimination des pics par la méthode de filtrage numérique s'avère ainsi nécessaire.

Notons que pour certaines plaques, ces impulsions peuvent prendre des amplitudes qui dépassent considérablement l'échelle convenable à l'enregistrement de l'onde alternative du signal de courant. Ceci se produit même pour des niveaux de tensions nettement inférieurs à celle de contournement. Cette contrainte, qui provoque le dépassement des aptitudes de l'oscilloscope (blocage momentané), nous impose la barrière limite des paliers de tension à appliquer.

Les différents tableaux de résultats de mesure du courant de fuite sont obtenus à partir de l'exécution du programme numérique élaboré et commenté dans le chapitre III.

III.2.1. Influence du niveau de tension appliqué :

Pour la plaque propre l'amplitude du courant de fuite croît d'une manière quasi-exponentielle en fonction du niveau de tension appliqué. Cette évolution n'est pas parfaitement respectée pour les plaques polluées où nous constatons que seule la croissance est assurée (Fig.IV.9).

En outre, pour les faibles niveaux de tension (<25kV) l'amplitude du courant est moins sensible à la variation du niveau de tension appliqué.

II.2.2. Influence de la conductivité de la couche de pollution :

Pour les plaques où nous ne dépassons pas 30kV, l'effet de la conductivité de la couche de pollution est difficile à déceler. Au-delà de ce niveau de tension, où l'enregistrement de l'onde du courant n'a été possible que pour peu de plaques, nous constatons que l'amplitude du courant augmente avec la conductivité de la couche de pollution (Fig.IV.10).

II.2.3. Influence de la largeur transversale de la couche de pollution :

La répercussion de la diminution de la largeur transversale de la couche de pollution sur l'amplitude du courant de fuite ne peut être mise en évidence aisément qu'après un pas de variation important (entre 30cm et 6cm) (Fig.IV.11). Ceci n'empêche pas de dire d'une manière grossière que lorsque la couche de pollution est plus large le courant de fuite est plus important.

⊙ Commentaire :

Pour cette configuration de la pollution, nous envisageons que la surface propre du verre demeure dominante. Or, les caractéristiques électriques du verre ne sont pas les mêmes pour les différentes plaques. Ceci se reflète, ainsi, sur le taux d'influence de la pollution sur la conduction surfacique globale d'une plaque à une autre [50].

Par ailleurs, dans une investigation antérieure [9], il a été constaté que la résistivité superficielle des zones propres dépend de la température de ces dernières. La résistivité

superficielle δ_s d'une surface chimiquement propre a été exprimée, pour une humidité relative donnée, par l'expression suivante :

$$\delta_s = \delta_{s0} \exp(\alpha \cdot \Delta\theta) \quad (\text{IV.4})$$

où δ_s est la résistivité superficielle de la surface propre,

δ_{s0} est la résistivité superficielle pour une température de référence,

$\Delta\theta$ l'écart de température,

α est une constante positive (évaluée à 1,4 pour $\Delta\theta$ en centigrades).

L'auteur est arrivé à conclure que la simple division de la longueur de fuite en zones humides et zones sèches ne convient pas pour connaître la distribution de la tension le long de la ligne de fuite car elle est déterminée, en plus, par les températures des zones sèches (propres). En effet, l'écart de température entre les zones sèches pour le même objet d'essai varie, selon l'auteur, entre 1° C et 10° C. par conséquent, la distribution de la tension peut être très irrégulière.

A la lumière des précédentes remarques, nous pouvons affirmer que la régularité de l'évolution de l'amplitude du courant de fuite en fonction des caractéristiques de la couche de pollution est difficilement garantie. Ce qui est le cas de cette présente étude.

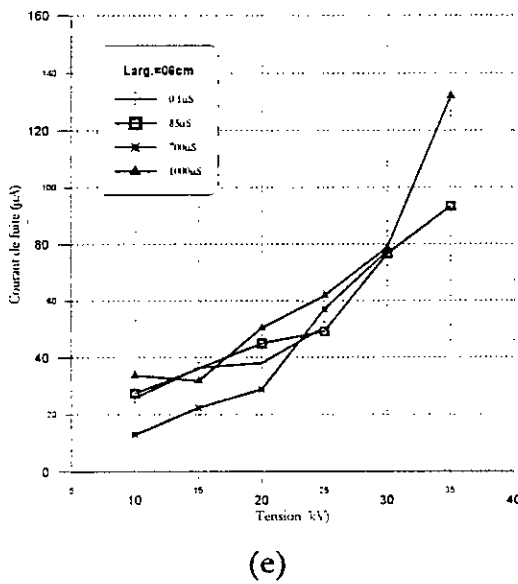
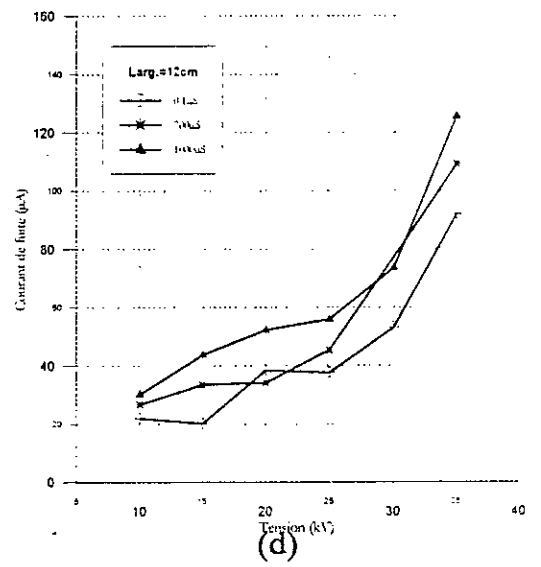
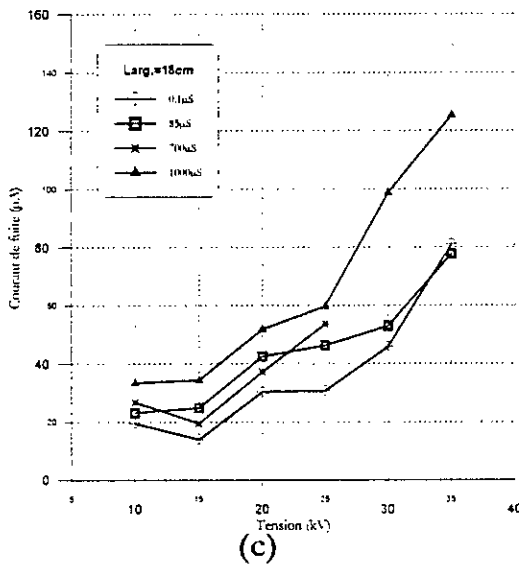
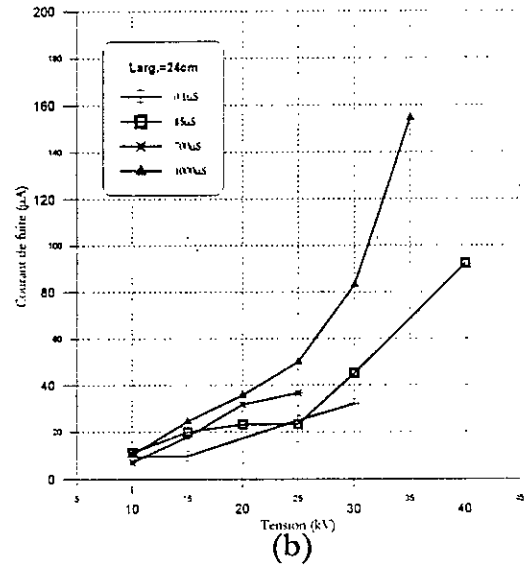
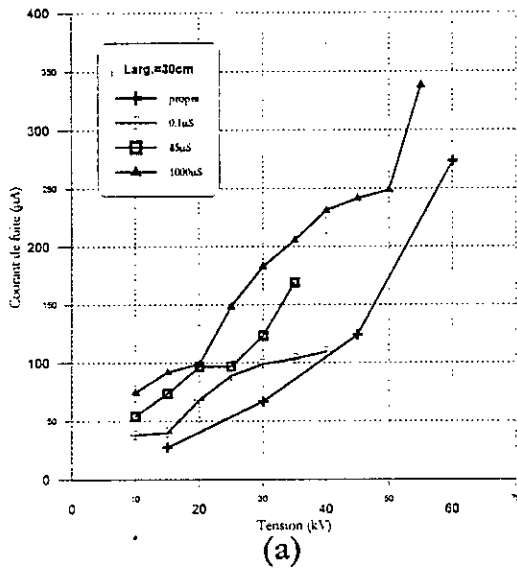
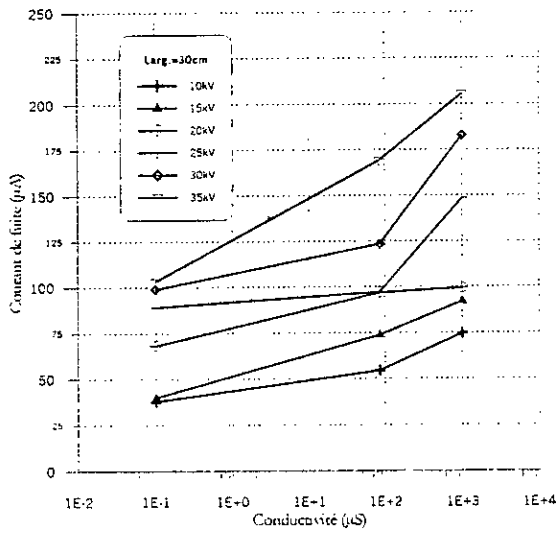
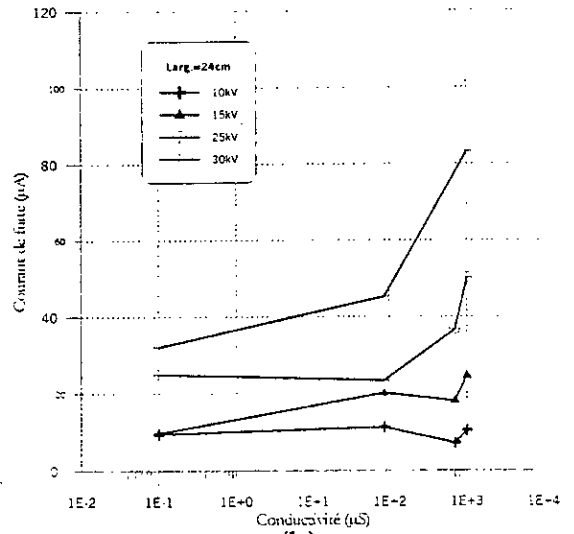


Fig.IV.9 : Courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour une largeur de pollution de :

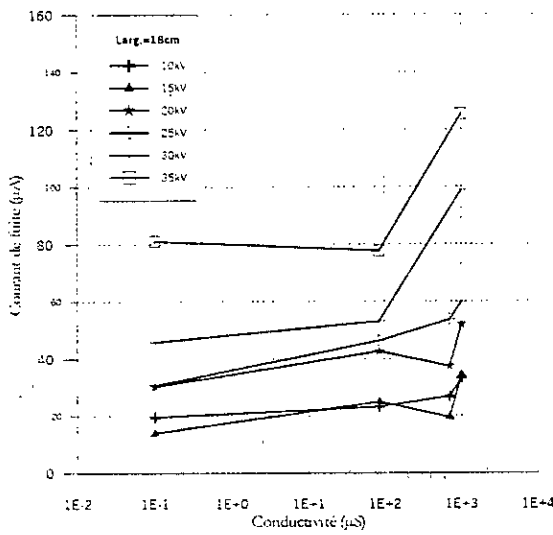
- (a) : 30cm,
- (b) : 24cm,
- (c) : 18cm,
- (d) : 12cm,
- (e) : 06cm.



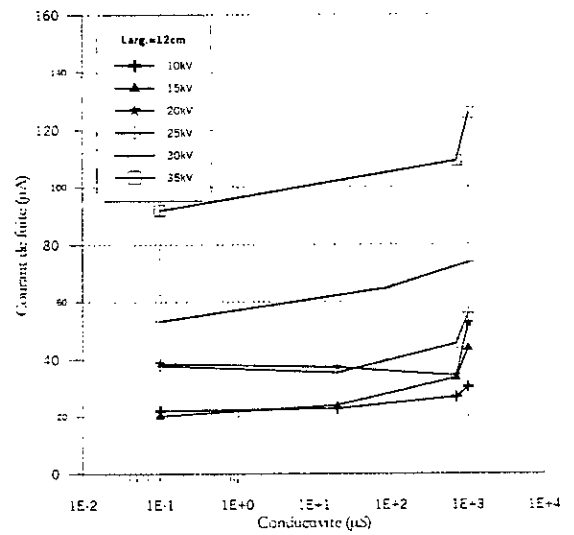
(a)



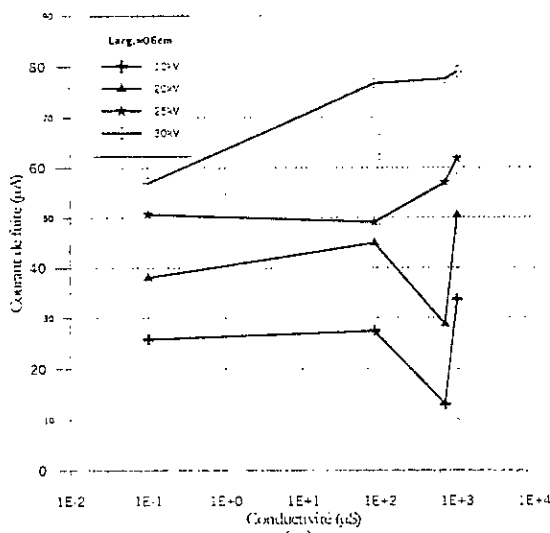
(b)



(c)



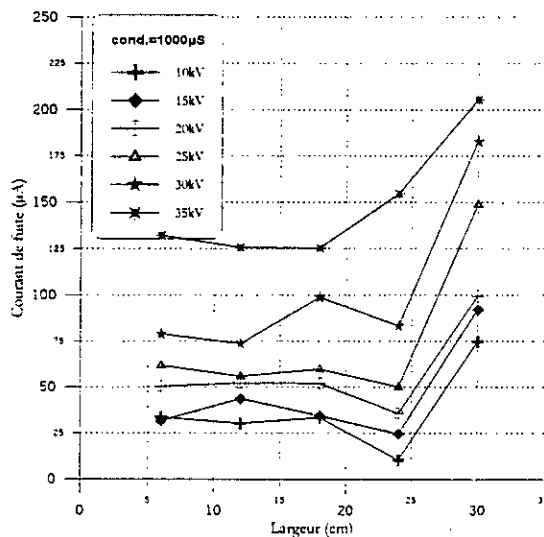
(d)



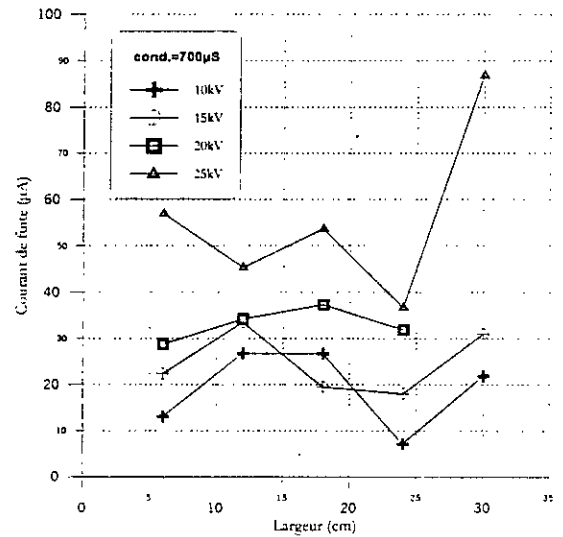
(e)

Fig.IV.10 : Courant de fuite en fonction de la conductivité de la pollution ayant une largeur de :

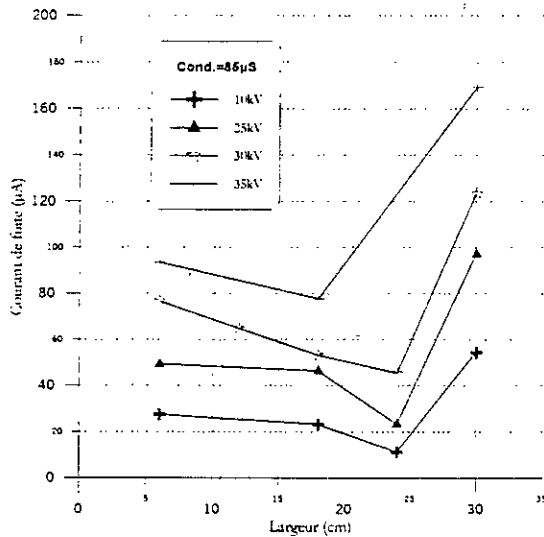
- (a) : 30cm,
- (b) : 24cm,
- (c) : 18cm,
- (d) : 12cm,
- (e) : 06cm.



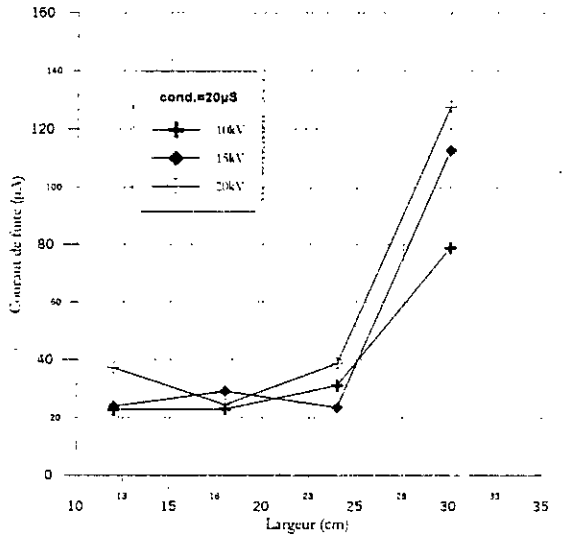
(a)



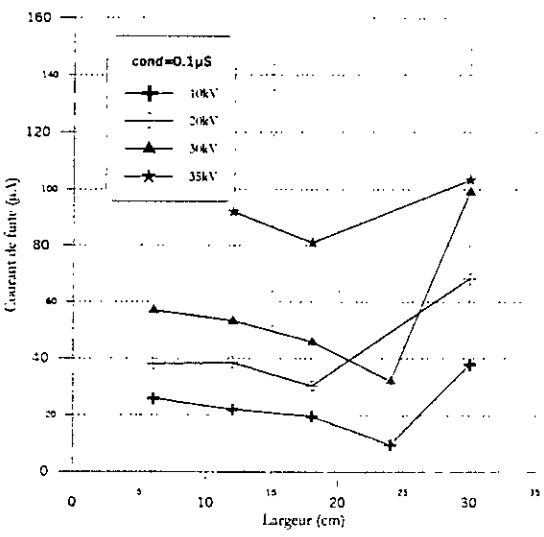
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig.IV.11 : Courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante possédant une conductivité de :

- (a) : 1000μS,
- (b) : 700μS,
- (c) : 85μS,
- (d) : 20μS,
- (e) : 0.1μS.

III.3. Déphasage courant-tension :

L'enregistrement simultané de l'onde du courant et celle de la tension permet de nous informer sur le déphasage. Cette grandeur nous renseigne sur le rapport entre la partie active et celle réactive de l'impédance totale vue des électrodes. Son intérêt ne se limite pas dans le calcul du facteur de puissance seulement, mais il constitue un paramètre essentiel lorsque nous tenons à établir une modélisation rigoureuse.

Tant que le déphasage est lié par définition aux ondes fondamentales du signal du courant et celui de la tension, la détermination des ondes fondamentales est impérative. Ceci se réalise aisément à l'aide d'une méthode numérique.

Nous avons vu précédemment que l'évolution de l'amplitude du courant de fuite est peu régulière. Nous constatons aussi au niveau des résultats du déphasage que son évolution n'est pas meilleure que celle de l'amplitude du courant.

Cependant, nous pouvons entrevoir globalement le comportement du déphasage, vis à vis des différentes contraintes imposées, comme suit :

1. Le déphasage est toujours de nature capacitive.
2. Le déphasage est étroitement lié au niveau de tension appliqué et tend à se maintenir constant (Fig.VI.13).
3. Le déphasage maximal est obtenu dans le cas de la plaque propre et vaut en moyenne 76° (Fig.VI.12,13).
4. Le déphasage diminue autant que la conductivité augmente mais ne dépasse pas une valeur minimale moyenne voisine de 56° (Fig.VI.12).
5. L'influence de la largeur de la couche de pollution ne se manifeste pas semblablement d'une conductivité à une autre et l'ordre n'est pas respecté. Il s'avère que l'influence de la largeur sur le déphasage est aléatoire (Fig.VI.12).

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 qu'une atténuation de ce caractère en tendant à le rendre plus résistif. Mais, cette modification ne peut pas aller au-delà d'une valeur voisine de 56° .

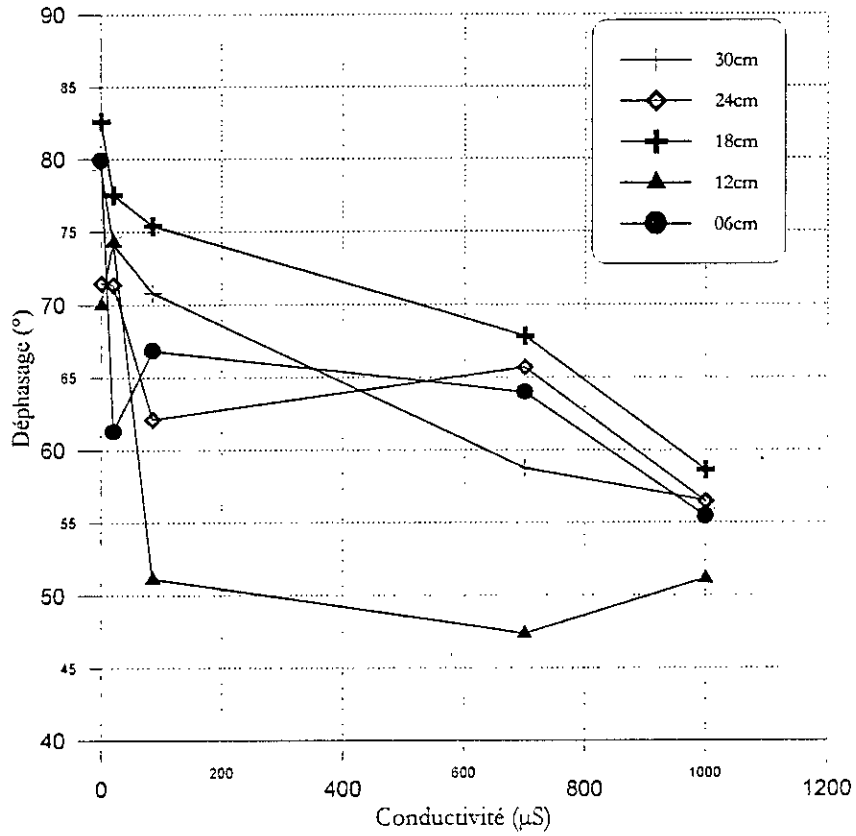


Fig.IV.12 : Déphasage en fonction de la conductivité de la couche polluante.

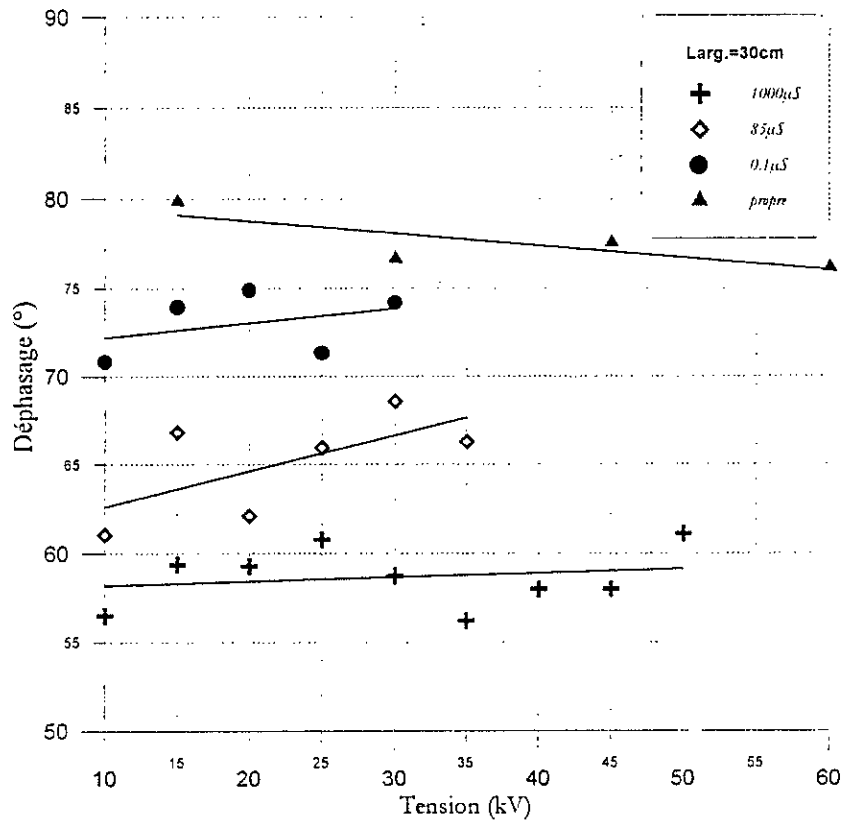


Fig.IV.13 : Déphasage en fonction du niveau de tension appliqué pour une largeur de 30cm de la couche polluante.

IV. CONCLUSION :

A l'issue de l'étude expérimentale du comportement de la surface isolante face à la configuration discontinue adoptée de la pollution, nous pouvons retenir les conclusions suivantes :

1. L'emploi d'une couche sèche de peinture semi-conductrice, pour simuler la couche de pollution, garantit une reproductibilité parfaite des résultats de mesures de la tension de contournement. Cet intérêt est obtenu au détriment de la distorsion du signal de courant de fuite. L'effet couronne accentué, notamment pour ce genre de pollution, contribue à engendrer des impulsions nuisibles accompagnant le signal alternatif des faibles courants de fuite.
2. Les dimensions de la zone propre (42,2% de la longueur de fuite) font que le contournement se produise directement sans étapes intermédiaires.
3. La tension de contournement diminue quand la conductivité de la couche de pollution augmente. Mais elle tend vers une valeur limite correspondant à la tension de contournement de l'ensemble des zones propres. A l'exception de la plaque comportant des couches polluantes parfaitement conductrices, la tension de contournement diminue légèrement en fonction des différentes largeurs transversales de la couche de pollution.
4. Le courant de fuite demeure faible à tous les niveaux de tension au-dessous de la tension de contournement. A cette gamme de courant, qui ne dépasse pas les centaines de micro-ampères, le courant est trop sensible au changement des conditions d'essai. Mais l'amplitude alternative du courant de fuite augmente régulièrement en fonction du niveau de tension appliquée et avec un moindre degré de régularité quand la conductivité ou/et la largeur transversale de la couche de pollution augmentent.
5. Le déphasage courant-tension est de nature capacitive. Il est indépendant du niveau de tension appliquée et évolue irrégulièrement en fonction de la largeur transversale de la couche de pollution. L'augmentation de la conductivité de la couche polluante ne provoque qu'une atténuation légère de ce déphasage en le rendant plus résistif.

CHARITRE V

MODELE THEORIQUE

La plupart des modèles théoriques antérieurs des études sur les phénomènes de pollution, ne prennent guère en considération la présence de la zone propre. Cette dernière dispose d'une importance primordiale dans notre modèle de laboratoire. Ainsi et afin de faire une approche théorique plus convaincante des contraintes critiques, nous devons passer par la détermination avec exactitude des caractéristiques électriques des zones propres de la surface isolante.

En premier lieu, nous déterminons la résistivité et la capacité superficielles de la zone propre. Par la suite, l'introduction des ces paramètres dans un modèle globale simulant la surface isolante partiellement polluée, permet d'effectuer une étude par simulation numérique des diverses caractéristiques des phénomènes de conduction.

Enfin, une étude comparative, entre les résultats expérimentaux et ceux théoriques, est effectuée.

I. FORMULATION MATHÉMATIQUE DU MODÈLE :

En vue de faire une modélisation mathématique cohérente, une connaissance des phénomènes inhérents à la conduction surfacique s'avère nécessaire. Ces phénomènes sont régis principalement par les équations de champ électrique qui dérivent du modèle macroscopique établi par Maxwell [59].

Toutefois, l'application de ces lois sur les systèmes d'isolation, composés de milieux de différentes propriétés électriques et de diverses formes géométriques, génère souvent un ensemble complexe d'équations [60].

Cependant, l'adaptation des hypothèses simplificatrices réduit l'ordre de complexité et rend la détermination des caractéristiques du système plus aisée.

I.1 Hypothèses d'étude :

Les particularités de notre modèle de laboratoire, faisant l'objet de cette modélisation, permettent d'adopter les hypothèses suivantes :

- Les impédances des matériaux isolants sont linéaires (condition nécessaire pour l'application des impédances complexes).
- Les champs magnétiques sont très faibles (ce qui est couramment admis pour les équipements de haute tension).
- La tension alternative appliquée est parfaitement sinusoïdale.
- La couche de pollution est de faible épaisseur afin d'être en mesure d'introduire une distribution surfacique en deux dimensions.
- La composante normale du champ électrique à la surface isolante est considérée nulle.

I.2. Approche théorique des caractéristiques de la plaque propre :

Le modèle électrique approprié de la plaque propre consiste à assimiler l'interface air-verre par une résistance montée en parallèle à une capacité (Fig.V.1) [61]. Ceci se justifie par le caractère capacitif accentué perçu lors des essais expérimentaux.

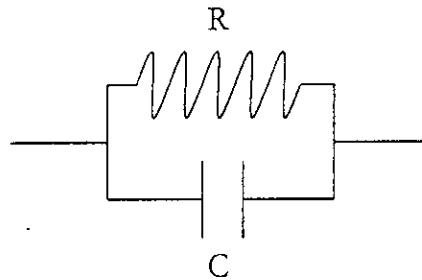


Fig. V.1 : Schéma électrique équivalent à la plaque propre.

La formulation mathématique s'obtient en assimilant notre modèle par une électrode cylindrique de rayon r mise à une tension U avec une autre plane mise à la tension nulle. Le système sera équivalent par la méthode des images à deux électrodes cylindriques excentriques l'une mise à la tension U et l'autre à la tension $-U$ (Fig.V.2) [62].

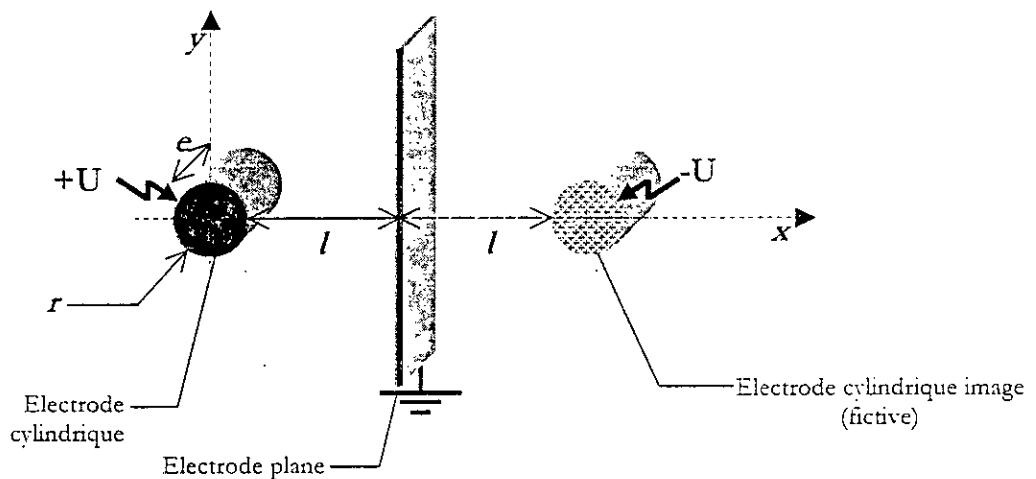


Fig. V.2. : Modèle théorique de la plaque propre.

Les équations du champ sont basées sur l'équation de Poisson [69] :

$$\nabla^2 V + \frac{\rho}{\varepsilon} = 0 \quad (\text{V.1})$$

et les conditions aux limites du potentiel électrique :

$$\begin{aligned} V(r) &= U \\ V(2(r+l)) &= -U \end{aligned} \quad (\text{V.2})$$

1.2.1. Détermination de la capacité superficielle :

Pour formuler la valeur de la partie capacitive nous résolvons l'équation (V.1) dans les milieux parfaitement isolants qui sont régis par :

la densité de charge $\bar{D} = \varepsilon \bar{E}$,

la charge $Q = \oiint \bar{D}.d\bar{s}$,

le potentiel $U = \frac{Q}{C}$.

Par voie de conséquence, cette capacité C est donnée par (voir l'Annexe 3) :

$$C = \varepsilon e \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{l+r}{r} + \sqrt{\left(\frac{l+r}{r}\right)^2 - 1}\right)} \quad (\text{V.3})$$

En prenant en considération une capacité superficielle constante $\varepsilon e = C_0$, cette dernière sera formulée par :

$$C_0 = \frac{C}{2\pi} \ln\left(\frac{l+r}{r} + \sqrt{\left(\frac{l+r}{r}\right)^2 - 1}\right) \quad (\text{V.4})$$

1.2.2. Détermination de la résistivité superficielle :

De la même manière, la résolution de l'équation (V.1) dans les milieux conducteurs qui sont régis par :

La densité de courant $\bar{J} = \gamma \bar{E}$,

Le courant $I = \oiint \bar{J}.d\bar{s}$,

Le potentiel $U = R.I$,

permet d'aboutir à la formule de la résistance R :

$$R = \frac{1}{2\pi \gamma e} \ln \left(\frac{l+r}{r} + \sqrt{\left(\frac{l+r}{r}\right)^2 - 1} \right) \quad (\text{V.5})$$

et avec l'hypothèse d'une résistivité superficielle constante, nous remplaçons $(1/\gamma e)$ par R_0 pour aboutir à :

$$R_0 = R \frac{2\pi}{\ln \left(\frac{l+r}{r} + \sqrt{\left(\frac{l+r}{r}\right)^2 - 1} \right)} \quad (\text{V.6})$$

Sachant que l'admittance complexe peut s'écrire comme suit :

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + jC\omega \quad (\text{V.7})$$

Nous pouvons ainsi déterminer, à partir des essais expérimentaux, les valeurs de la résistivité et de la conductivité superficielles, par le biais de l'identité entre le rapport courant-tension et l'admittance complexe :

$$Y = \frac{I_0}{U_0} \cos(\varphi_0) + j \frac{I_0}{U_0} \sin(\varphi_0) = \frac{1}{R} + jC\omega \quad (\text{V.8})$$

où I_0 , U_0 , φ_0 : sont respectivement le courant, la tension et le déphasage mesurés pour une plaque propre.

Enfin, nous obtenons les grandeurs superficielles suivantes :

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0 \cos(\varphi_0)} \frac{2\pi}{\ln \left(\frac{l+r}{r} + \sqrt{\left(\frac{l+r}{r}\right)^2 - 1} \right)} \quad (\text{V.9})$$

$$C_0 = \frac{I_0}{U_0 \omega} \sin(\varphi_0) \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{l+r}{r} + \sqrt{\left(\frac{l+r}{r}\right)^2 - 1} \right)$$

I.3. Approche théorique des caractéristiques de la plaque polluée :

Nous pensons que l'application des couches polluées en forme de bandes rectangulaires tend à rendre le champ électrique plus uniforme. Il serait donc plus judicieux de formuler les différentes résistances et capacités par les équations linéaires suivantes :

Pour chaque zone propre, la résistance et la capacité sont formulées respectivement par :

$$R_i = R_0 \frac{l_i}{b} \tag{V.10}$$

$$\text{et } C_i = C_0 \frac{b}{l_i} \tag{V.11}$$

pour chaque zone polluée la résistance est formulée par :

$$R_{pi}(\gamma) = \frac{1}{\gamma_s} \frac{l_i}{b} \tag{V.12}$$

où :

R_{pi} : la résistance d'une couche de pollution ($i=2, 4, 6$),

R_i : la résistance d'une zone propre ($i=1$ à 6),

C_i : la capacité d'une zone propre,

γ_s : la conductivité superficielle de la couche de pollution,

l_i : la dimension longitudinale (longueur) d'une zone propre ou polluée,

b : la dimension transversale (largeur) de la couche de pollution.

La largeur de la surface propre est considérée égale à celle de la zone polluée. Ceci se justifie par le fait que le champ se concentre dans l'endroit délimité entre les différentes couches de pollution.

Le schéma électrique du modèle global de la plaque polluée (Fig.V.3) est constitué d'un ensemble de résistances pures (représentant les couches polluantes [63]) qui shuntent les impédances partielles de la plaque propre.

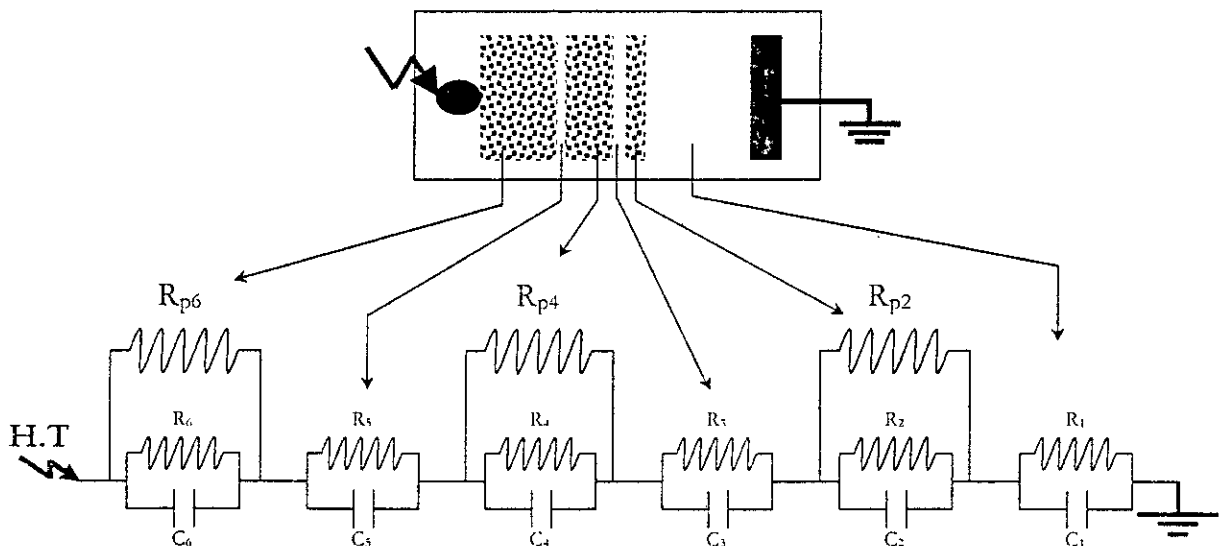


Fig. V.3 : Schéma électrique équivalent à la plaque polluée.

1.3.1. Equations du circuit électrique :

Chaque impédance partielle Z_i d'une zone propre est donnée par :

$$Z_i(b) = (R_i // C_i) = \frac{R_i}{1 + jR_i C_i \omega} \quad (V.13)$$

Chaque impédance Z_{pi} de la zone polluée est donnée par :

$$Z_{pi}(b, \gamma) = (R_{pi} // R_i // C_i) = \frac{(R_i // R_{pi})}{1 + j(R_i // R_{pi})C_i \omega} \quad (V.14)$$

Donc la tension totale U appliquée au système est :

$$U = (Z_{p1} + Z_2 + Z_{p3} + Z_4 + Z_{p5} + Z_6)I = Z_T(b, \gamma)I \quad (V.15)$$

avec : $Z_T(b, \gamma) = (Z_{p1} + Z_2 + Z_{p3} + Z_4 + Z_{p5} + Z_6)$

le déphasage est l'argument de l'impédance Z_T :

$$\varphi = \arg(Z_T(b, \gamma)) \quad (V.16)$$

La tension rapportée à la totalité des zones propres est :

$$\begin{aligned} U_r &= (Z_2 + Z_4 + Z_6)I \\ &= Z_r(b)I \end{aligned} \quad (V.17)$$

La chute de tension à travers les zones polluées est :

$$\begin{aligned} U_p &= (Z_{p1} + Z_{p3} + Z_{p5})I = U - U_r \\ &= Z_p(b, \gamma)I \end{aligned} \quad (V.18)$$

1.3.2. Tension de contournement :

Les essais effectués, pour une couche parfaitement conductrice en feuilles d'aluminium, nous fournissent la tension de contournement de la zone propre totale. Etant donné que le contournement se fait directement, nous pouvons attribuer la tension de contournement totale de la plaque partiellement polluée à celle qui permet de rapporter aux bornes de la dite zone propre la même tension de contournement précédente [5].

D'après les essais expérimentaux, la tension de contournement de la zone propre entière est déduite de celle correspondant à la couche parfaitement conductrice. Nous avons donc pour une largeur de 30cm : $U_{rc} = 55kV$.

Elle correspond à un courant de fuite critique I_c dépendant seulement de la largeur admise de la zone propre :

$$I_c(b) = \frac{U_{rc}}{Z_r(b)} \quad (\text{V.19})$$

et également à une chute de tension critique aux bornes de la zone polluée donnée par :

$$U_{pc}(\gamma) = Z_{pl}(b, \gamma) I_c(b) \quad (\text{V.20})$$

Finalement la tension de contournement correspondante est donnée par :

$$\begin{aligned} U_c(\gamma) &= U_{cp} + U_{cr} \\ U_c(\gamma) &= \frac{Z_T(b, \gamma)}{Z_r(b)} U_{cr} \end{aligned} \quad (\text{V.21})$$

Notons que la tension de contournement est ainsi indépendante de la largeur.

II. SIMULATION NUMERIQUE :

En vue de faire une étude comparative, nous nous sommes focalisés le plus sur la détermination de la tension de contournement. Ceci à cause du fait qu'elle est la plus significative en se montrant fiable au plan pratique.

La simulation numérique de la caractéristique de la tension de contournement en fonction de la conductivité est effectuée suivant un organigramme qui récapitule l'ensemble des équations déjà développées (Fig.V.4).

Les résultats de simulation ainsi obtenus montrent une concordance satisfaisante avec ceux expérimentaux (Fig.V.5).

A titre illustratif, nous avons représenté quelques caractéristiques linéaires du courant de fuite (Fig.V.7), ainsi que celles du déphasage (Fig.V.6). Les résultats sont de même ordre de grandeur que les résultats d'expériences.

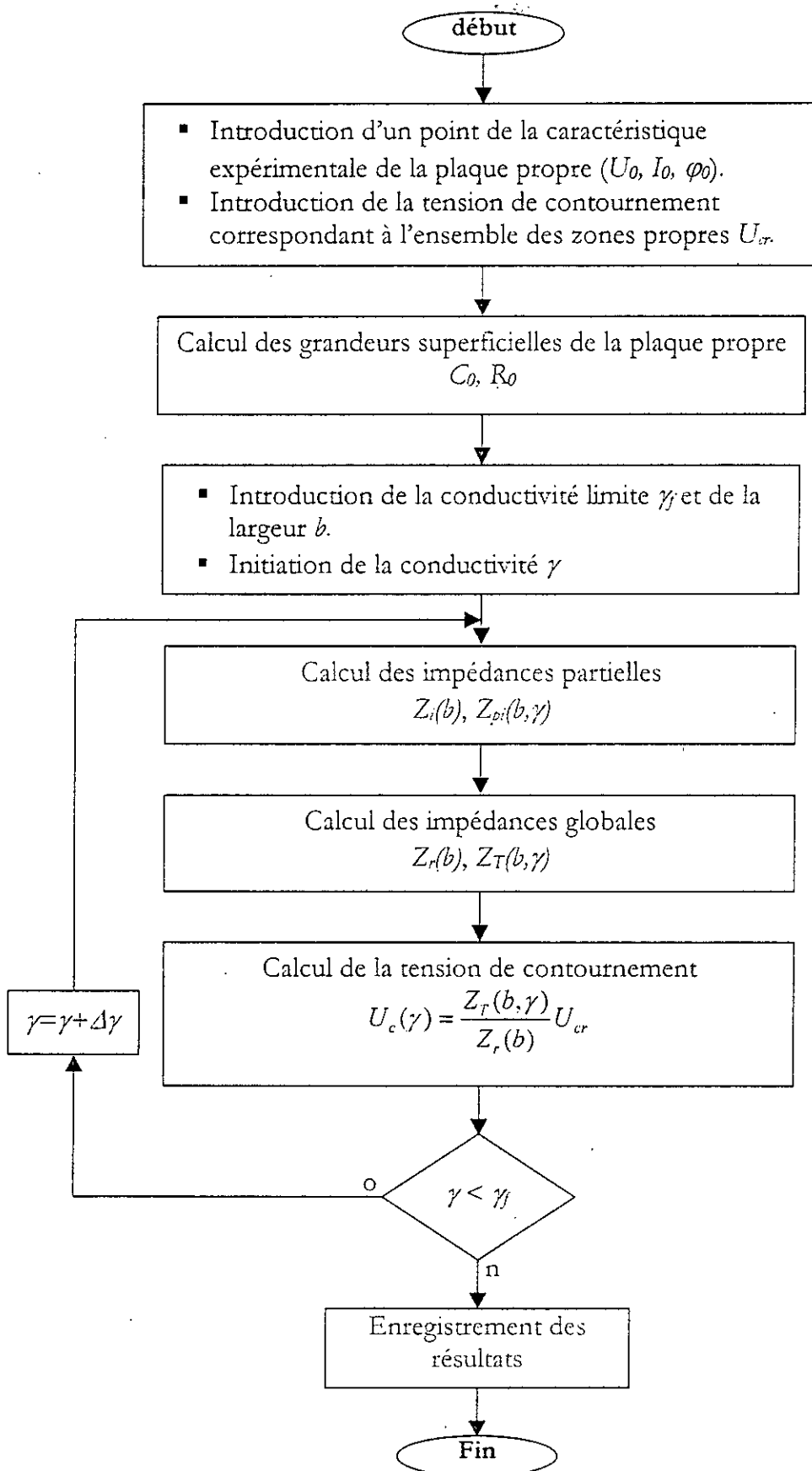


Fig.V.4 : Organigramme de calcul de la tension de contournement.

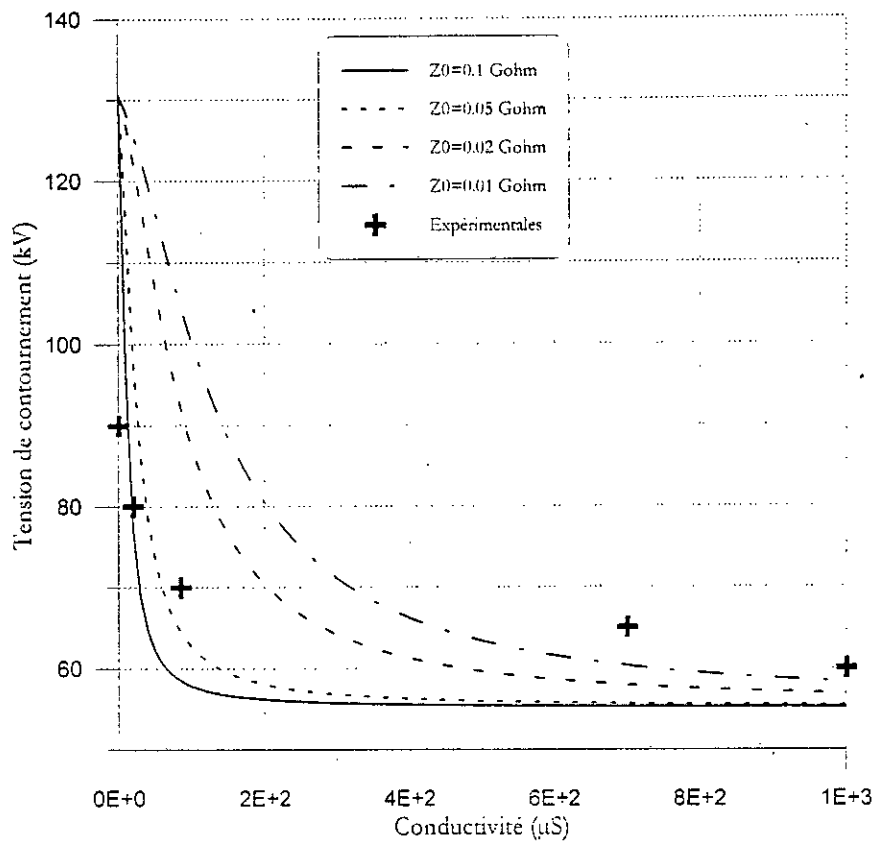


Fig.V.5 : Tension de contournement en fonction de la conductivité pour différentes valeurs expérimentales de l'impédance superficielle.

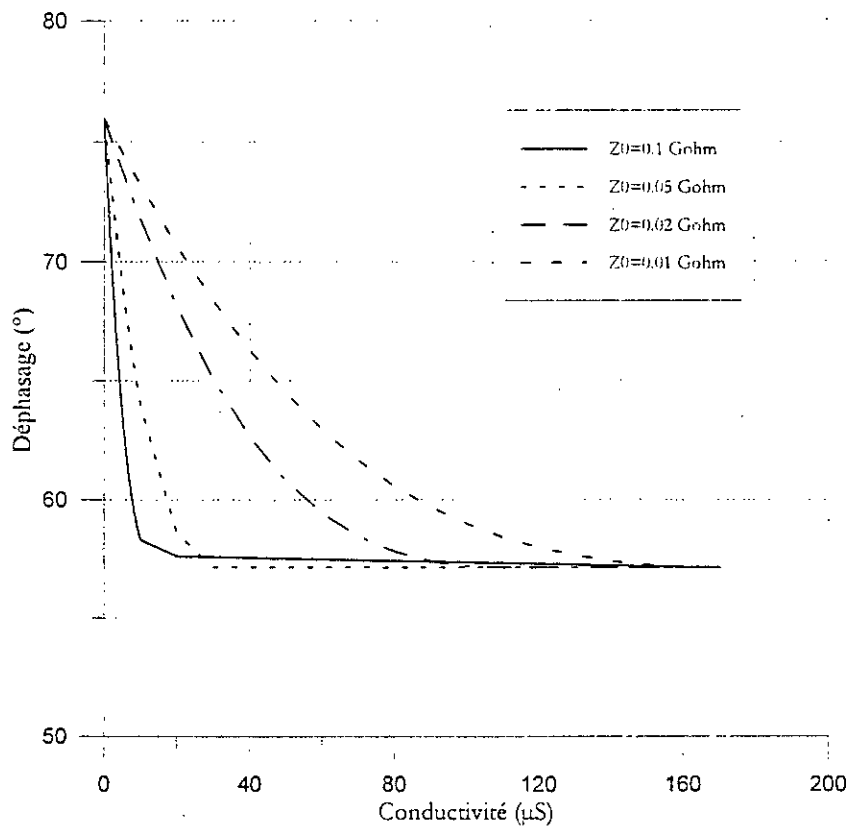


Fig.V.6 : Déphasage en fonction de la conductivité.

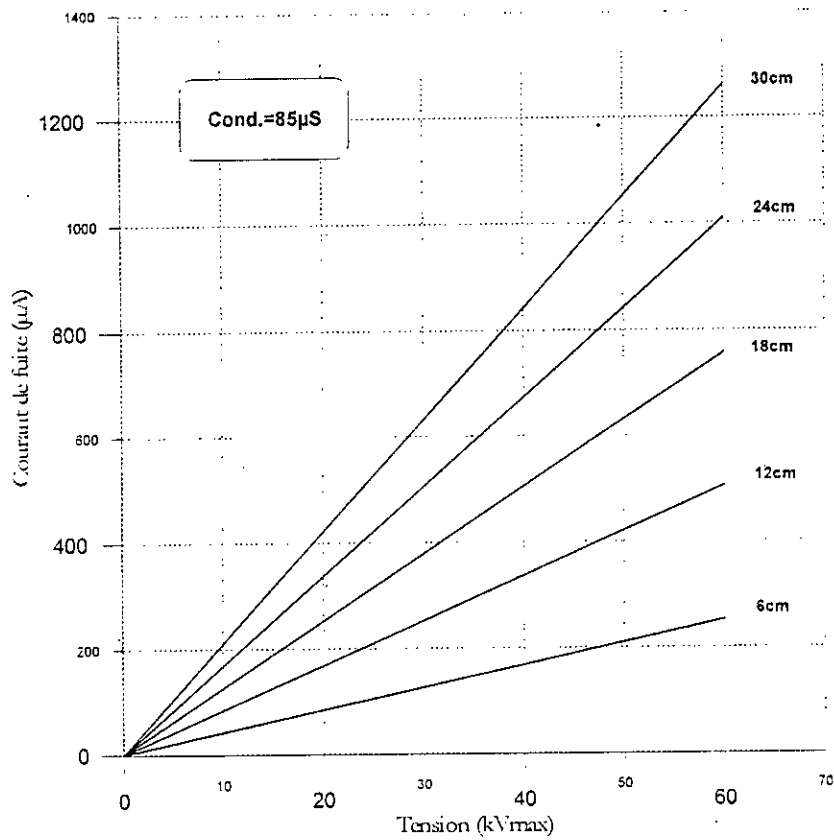


Fig.V.7 : Courant de fuite en fonction du niveau de tensions pour différentes largeurs de la couche polluante avec une conductivité de 85µS.

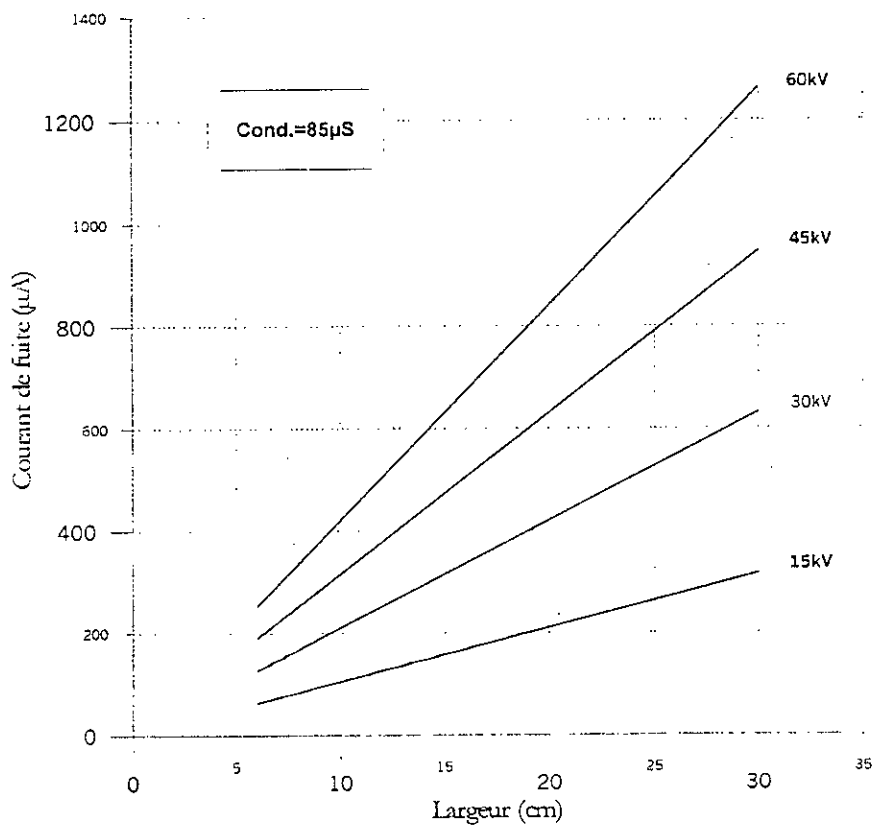


Fig.V.8 : Courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante pour différents niveaux de tensions et une conductivité de 85µS.

III. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons élaboré un modèle électrique équivalent simulant une surface isolante à pollution discontinue. Le modèle consiste à assimiler la surface isolante à une série d'impédances partielles. Chaque impédance partielle est une cellule RC parallèle shuntée ou non avec une résistance pure représentant la couche de pollution.

Les paramètres du modèle sont déduits à partir des essais expérimentaux effectués sur la plaque propre ainsi que les dimensions des différentes zones propres et celles polluées. Une estimation prédictive de la contrainte de contournement est possible par la connaissance de la tension de contournement de la plaque à pollution parfaitement conductrice.

Le modèle a été validé par simulation numérique pour une variété de points expérimentaux correspondant à la plaque propre. Les résultats de simulations comparés à ceux expérimentaux sont satisfaisants. Ceci concerne aussi bien les tensions de contournement que l'ordre de grandeur du courant de fuite et de son déphasage par rapport à la tension.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail est consacré à l'étude de l'effet de la répartition discontinue de la couche de pollution rencontrée in situ sur la surface de l'isolateur capot-tige 1512L. Cette répartition est reproduite sur un modèle plan de laboratoire qui s'inspire de celui de Claverie et Porcheron. L'agent polluant utilisé est une couche sèche de peinture semi-conductrice qui a l'avantage de garder après séchage la même conductivité indépendamment des conditions d'essais. Une numérisation des enregistrements du courant de fuite a amélioré considérablement le taux de précision et le temps d'exploitation des mesures.

Le comportement de la surface isolante partiellement polluée, soumise tension alternative 50Hz, a été étudié à travers l'analyse des paramètres suivants :

- Le courant de fuite.
- Le déphasage entre l'onde de courant et celle de tension.
- La tension de contournement et le développement de la décharge.

Pour cela, le modèle est soumis aux contraintes suivantes :

- Le niveau de tension appliqué.
- La conductivité de la couche de pollution.
- La largeur transversale de la couche de pollution.

A la lumière des résultats obtenus, un modèle théorique approprié a été proposé.

Nous pouvons récapituler les principales conclusions sur lesquelles ont porté ces recherches comme suit :

1. L'emploi des couches sèches de peinture semi-conductrice est très avantageux pour la mesure de la tension de contournement. Cependant, elle se répercute négativement sur la qualité des mesures du courant de fuite, surtout pour les faibles amplitudes, principalement à cause des fluctuations dues à l'effet couronne.

2. Vu ses dimensions longitudinales, la zone propre présente un caractère dominant qui a pour effet d'imposer aussi bien l'ordre de grandeur du courant de fuite que le processus de développement de la décharge.
3. Le contournement se produit brusquement sans étapes intermédiaires. Il n'est influencé que par le rapport entre l'impédance superficielle de la plaque propre et la résistance superficielle de la couche de pollution. La tension de contournement diminue lorsque la conductivité de la couche de pollution augmente en tendant vers une valeur limite correspondant à la tension de contournement des zones propres. Cette tension est ainsi étroitement liée à la largeur transversale de la couche de pollution.
4. Le traitement numérique du courant de fuite est avantageux dans la mesure où il permet une meilleure précision, un temps d'exploitation des mesures réduit et une possibilité d'exploiter un volume beaucoup plus important d'informations.
5. Le courant de fuite reste faible avant l'étape de contournement. De ce fait, son amplitude est sensible aux moindres phénomènes perturbateurs. Par conséquent, il ne porte pas beaucoup d'informations significatives sur le degré d'isolation de la surface isolante polluée.
6. Le déphasage est de nature capacitive. L'augmentation de la conductivité résulte en une atténuation de ce caractère en le rendant plus résistif.
7. Le modèle théorique proposé est basé sur la simulation de la surface partiellement polluée par une série d'impédances partielles en forme de cellules parallèles RC où chaque impédance est shuntée ou non par une résistance pure. Les résistances pures représentent en particulier les couches de pollution. L'exploitation numérique du modèle donne des valeurs de la tension de contournement très proches de celles obtenues expérimentalement au Laboratoire. Il permet également d'estimer l'ordre de grandeurs du courant de fuite ainsi que son déphasage par rapport à la tension.

BIBLIOGRAPHIE



- [1] A.EL-ARABATY, A.NOSSEIR, S.EL-DÉBEIKY, A.EL-AWADY, E.NASSER, A.EL-SARKY "Effects of Insulator Shape, Dimensions and Material on its Flashover Characteristics" 4^e International Symposium On High Voltage Engineering, rapport 46-04, Athènes, 5-9 Septembre 1983.
- [2] ZHANG RENYU, ZHU DEHENG, ZHANG BINGYUAN, "The Effect of Arc Bridging Between Sheds on the Flashover Performance of Polluted Stab Type Support Insulators", 4^e International Symposium On High Voltage Engineering, rapport 46-05, Athènes, 5-9 Septembre 1983.
- [3] A.CIMADOR, S.VITET, "La Pollution des Isolateurs", EDF-Epure N°27 Juillet 1990.
- [4] L.E.ZAFFANELLA, H.M.SCNEIDER, J.H.DUNLAP. "Performances des Isolateurs Pollués pour Lignes CCHT", CIGRE, rapport 33-05. 1986.
- [5] H.STREUBEL "The Influence of Nonuniform Contamination on the Flashover Voltage of Insulators" 4^e International Symposium On High Voltage Engineering, rapport 46-10, Athènes, 5-9 Septembre 1983.
- [6] R.SUNDARARAJAN, R.S.GORUR, "Dynamic Arc Modeling of Pollution Flashover of Insulators Under dc Voltage", IEEE Trans.On Elec.Insul.Vol.28, No2, April 1993.
- [7] R.KOSZTALUK, W.CZALAK, R. KUCHARSKI, "Mesure de Pollution, Essais d'Isolateurs Pollués, Choix des Isolateurs", CIGRE, rapport n°33-07-1978.
- [8] HE.PEI-ZHONG, XU.CHENG-DONG "Résultats d'Essais et de Recherches Sur des Isolateurs Naturellement Pollués et leur Application à la Conception de l'Isolation d'un Réseau en Régions Polluées" CIGRE, Rapport 33-07. 1982.
- [9] J.KELLER-JACOBSEN, AA.PEDERSEN, J.K.RASMUSSEN, A.HENRIKSEN, C.LINDQVIST, S.SMEDSFELT "Essais au Laboratoire et en Plein Air pour Dimensionner Correctement les Isolateurs Exposés A La Pollution Saline", CIGRE, rapport 33-11. 1978.
- [10] P.J.LAMBETH, J.S.T.LOOMS, M.SFORZINI, C.MALAGUTI, Y.PORCHERON, P.CLAVERIE, "Recherche International sur la Pollution", CIGRE, rapport n°33-02-1970.
- [11] M.P.VERMA, H.NIKLASCH, W.HEISE, H.LIPKEN, H.SCHREIBER, G.F.LUXA, "Critère de Contournement par Pollution et ses Applications pour le Dimensionnement et le Contrôle de l'Isolation" CIGRE, rapport 33-09. 1978.
- [12] M.KHALIFA, M.ABOU-SEADA, H.EL-GHAZALY, "Laboratory Simulation of Desert Pollution Flashover of High Voltage Insulators", 4^e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport 46-03, Athènes, 5-9 Septembre 1983.
- [13] A.CIMADOR, M.COJAN, P.HAUTEFEUILLE, M.MOREAU, "Méthode de Dimensionnement des Isolateurs des Ligne Aeriennes en Régions Polluées". CIGRE, rapport n°33-04-1978.
- [14] D.A.SWIFT, "AC Disc Insulators : Accumulation of Pollution Within and Around the Pin Cavity", 7^e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport44-22, Dresde, Allemagne, 26-30 Août 1991.



- [15] F.A.M.RIZK, "Modèles Mathématiques du Contournement des Isolateurs sous Pollution", *Electra* N°78 Octobre 1981.
- [16] N.DHAHBI-MEGRICHE, A.BEROUAL, L.KRAHENBUHL, "A New Proposal Model for Polluted Insulators Flashover". *Journal of Physics D: Applied Physics*. (30), N° 5, March 1997.
- [17] P.S.GHOSH, N.CHATTERJEE "Arc Propagation over Electrolytic Surfaces Under Frequency Voltage" *IEEE Trans. On Dielect. & Elec. Insul.* Vol.3, No4, August 1996.
- [18] J.DANIS, "A Stochastic Pollution Flashover Model", 4^e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport 46-12, Athènes. 5-9 Sept. 1983.
- [19] F.OBENAU, "Fremdschichtüberschlag Und Kriechweglänge", *Deutsche Elektrotechnik*, vol.4, 1958.
- [20] M.TEGUAR, "Etude Mathématique des Mécanismes de Développement des Décharges Électriques sur des Isolateurs Installés en Régions Polluées". *Thèse de Magister ENP*, Février 1993.
- [21] L.L.ALSTON, S.ZOLEDZIOWSKI, "Growth of Discharges on Polluted Insulators" *IEEE Trans.PAS*, Vol.110, No7, Juillet 1963.
- [22] A.MEKHALDI, "Etude du Développement d'un Arc Électrique sur des Surfaces Isolantes Contaminées par la Pollution Désertique", *Thèse De Magister, ENP*, Juin 1990.
- [23] M.N.RAYES, M.ZHIRH. "Investigation about Flashover Performance of Insulators under Uniform and Non Uniform Contamination", 7^e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport 43-08, Dresde, Allemagne. 26-30 Août 1991.
- [24] P.CLAVERIE, Y.PORCHERON, "How to Choose Insulators for Polluted Areas", *IEEE Trans.PAS*, vol.92, N°3, Mai-Juin 1973.
- [25] M.BARNEA, P.URSU, "Pollution et Protection de l'Atmosphère", *Edition Eyrolles, Paris* 1974.
- [26] R.SUNDARARAJAN, R.S.GORUR, "Role of Non Soluble Contaminants on the Flashover Voltage of Porcelain Insulators" *IEEE Trans. On Dielect. & Elec. Insul.* Vol.3, No2, April 1997.
- [27] CEI 60-1, "Techniques des Essais A Haute Tension", *Définitions Et Prescriptions Générales Relatives Aux Essais*, Deuxième Édition 1989-11.
- [28] A.DJOUADI, H.MELOUK, "Problème de la Pollution Marine des Isolateurs de Haute Tension En Algérie", *PFE, ENP* 1975.
- [29] R.G.HOULGATE, P.J.LAMBETH, W.J.ROBERTS, " Performances des Isolateurs en Milieu Maritime en Très Haute et Ultra Haute Tension" *CIGRE. Rapport 33-01*, 1982.
- [30] V.M.RUTSKY, "Prediction of Discharge Characteristics of External High-Voltage Insulation Near Industrial Enterprises, Polluting the Atmosphere", 9^e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport 3247, Autriche, 28 Août-1^{er} Septembre 1995.



- [31] M.DOBARZIK, "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. Enp, Alger, Juin 1975.*
- [32] L.CHOUGUI, R.BELAICHA, "Contribution à l'Étude de la Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région d'Arzew", *PFE, ENP Janvier 1983.*
- [33] J.P.HOLTZHAUSEN, O.C.T.POTGIETER, J.M.SMITH, "The One Site Leakage Current Performance of Insulators of Various Designs and Materials as a Function of Water Data", *7^e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport 44-22, Dresden, Allemagne, 26-30 Août 1991.*
- [34] J.DANIS, J.SCHNÖRCH " Continuous Measurement Method of the Site Pollution Severity and its Use for Insulator Dimensioning", *CIGRE 122-05 Symposium 22-81 Stockholm 1981.*
- [35] G.RIQUEL, E.SPANGENBERG, " De la Céramique au Synthétique, les Isolateurs Font Peau Neuve", *EDF-Epure N°58-Avril 1998.*
- [36] CEI 71-2, "Coordination de l'isolement", *Guide d'application, Deuxième Édition 1976.*
- [37] D.DUMORA, L.PARGAMIN, R.PARRAUD, "Expérience des Isolateurs en Verre Trempe sous Pollution Naturelle en Zone Desertique", *SEDIVER Journées Technniques. Alger 16,17 Fevrier 1999.*
- [38] O.FOUATHIA, S.HOUACHE, "Approche d'un Isolateur de Haute Tension par un Modèle de Laboratoire", *PFE, ENP Juin 1996.*
- [39] C.HURAU, A.M.RAHAL, "Le Contournement des Isolateurs Haute Tension : Approche à l'Aide d'un Modèle de Laboratoire", *RGE, Juin 1975.*
- [40] H.H.WOODSON, A.J.MC-ELROY, "Insulators With Contaminated Surface, Part II, Modeling of Discharge Mechanisms", *IEEE, Trans.PAS, Vol.89, No8, Nov-Dec 1970.*
- [41] J.P.HOLTZHAUSEN, "The Relationship Between the Parameters Affecting the AC pollution Performance of a Cylindrical Insulator", *9^e International Symposium On High Voltage Engineering, Rapport 3233, Autriche, 28 Août -1^e Septembre 1995.*
- [42] R.WILKINS, "Flashover Voltage Of High Voltage Insulators With Uniform Surface Pollution Films", *Proc. IEE, 116, No3, Mars 1969.*
- [43] R.TAMARANTE, A.TAIR, "Mesure de Courant de Fuite sur les Diélectriques Pollués", *PFE, ENP juin 1993.*
- [44] A.LAOUFI, S.RANDI, "Corrélation entre Modèle Continu et Discontinu d'un Isolateur Pollué", *PFE, ENP Juin 1995.*
- [45] S.HELIS, A.MEDDOUR, "Etude du Contournement d'un Isolateur Pollué", *PFE, ENP Septembre 1996.*
- [46] M.T.FELLAH, M.DRIBINE, "Etude de l'Influence de l'Épaisseur de La Couche Polluante sur le Contournement des Isolateurs Pollués". *PFE, ENP Juin 1996.*



- [47] A.MEKHALDI, "Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternatives 50Hz", *Thèse De Doctorat d'Etat, ENP. Septembre 1999.*
- [48] C.H.A.ELY, P.J.LAMBETH, J.S.T.LOOMS, D.A.SWIFT, "Contournement des Polymères Humides et Pollués : l'Ailette BOOSTER" *CIGRE, Rapport 15-02, 1978.*
- [49] A.EL-ARABATY, A.NOSSEIR, S.EL-DEBEIKY, E.NASSER, A.EL-SARKY, "Choix d'Isolateurs Utilisables dans des Ambiances Polluées et Notamment dans des Régions désertiques.", *CIGRE. Rapport 33-11, 1980.*
- [50] D.NAMANE, "Effet de la Discontinuité de la Couche de Pollution sur le Comportement d'Isolateur Haute Tension, sous la Fréquence 50Hz" . *Thèse de Magister ENP, Février 1998.*
- [51] A. LECHEB, " Visualisation et Traitement de Signal du Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée", *PFE. ENP Juin 1999.*
- [52] R.DELSOL, " Electronique Numérique", *TomeII. Edition BERTI. 1992.*
- [53] M. KUNT, "Traitement Numérique des Signaux", *Edition Dunod 1981.*
- [54] R.E.BEKKA, "Fondement du Traitement de Signal", *Edition OPU.1998.*
- [55] A. BOUBAKEUR, "Essais d'Isolateurs Pollués dans les Conditions Naturelles" *Rapport Interne. I.W.N Politechnika Warszawska. Varsovie 1978.*
- [56] F.SAIDANI, "Influence de la Largeur de la Couche Polluante sur la Tenue Diélectrique d'une Surface Isolante", *PFE ENP juin 1999.*
- [57] NORME POLONAISE P.N.71/E-04405. " Matériaux Isolants Solides – Mesure de la Résistance Electrique". *Varsovie 1971.*
- [58] R. MESSAOUDI, A.YOUNSI, F.MASSINE, B.DESPAX, C.MAYOUX, "Influence of Humidity on Current Waveform and Light Emission of a Low-frequency Discharge Controlled by a Dielectric Barrier", *IEEE Trans. On Dielec. & Elec. Insul. Vol 3 N°4 August 1996.*
- [59] K.KÜPFMULLER, "Electricité Théorique et Appliquée", *Dunod. Paris. 1959.*
- [60] GUOXIANG XU, P.B.MC.GRATH, "Electrical and Thermal Analysis of Polymer Insulator Under Contaminated Surface Conditions" *IEEE Trans. On Dielec. & Elec. Insul. Vol.3, No2. April 1996.*
- [61] A.K.JONSCHER, E.F.OWEDE, "Time and Frequency-resolved Surface Current on Insulators" *IEEE Trans. On Elec. Insul. Vol 25.N°6 December 1990.*
- [62] H.AGUET, M.IANUZ, "Haute Tension", *Traité d'Electricité, DUNOD. 1987.*
- [63] A.MEKHALDI, S.BOUAZABIA, "Condition Phenomena on polluted insulating surface Under AC High Voltages", *9^e international symposium on high voltage engineering, rapport 3174. Autriche. 28 Août -1e Septembre 1995.*

ANNEXES

ANNEXE 1: CARACTERISTIQUES DE L'OSCILLOSCOPE NUMERIQUE

VERTICAL

Number of Channels: 2
 Trace Modes: CH1, CH2, Dual, Invert, Add.
 Bandwidth: DC to 20MHz (-3dB)
 Resolution: 8-bit (256 levels); 32 levels per division.
 Sensitivity: 5mV/div to 5V/div (1-2-5 sequence); accuracy $\pm 2.5\% \pm 1$ bit.
 Offset Range: ± 4 divisions nominal.
 Cursors: Two on-screen cursors with readout of voltage difference.
 Input Impedance: 1MW//25pF
 Input Coupling: Selectable AC/DC/GND; AC coupling -3dB at 5Hz.
 Maximum Input Voltage: 350V (dc+ac peak) at 500Hz, Cat I; on 5mV/div to 0.1V/div ranges derate above 500Hz at 20dB/decade to 7V peak at above 25kHz.

HORIZONTAL (TIMEBASE)

Maximum Sampling Rate: Transient - 20MS/s
 Repetitive - 2GS/s (equivalent)
 Timebase Ranges: Transient - 5 μ s/div to 50s/div (1-2-5 sequence)
 Repetitive - 50ns/div to 2 μ s/div (1-2-5 sequence)
 Record Length: 1024 points; 2048 points with pre-trigger
 Resolution: 100 points per division.
 Cursors: Two on-screen cursors with readout of time difference or frequency.
 Accuracy: $\pm 0.01\%$; $\pm 1\%$ in repetitive sampling mode.
 Horizontal Expansion: x10.

TRIGGER

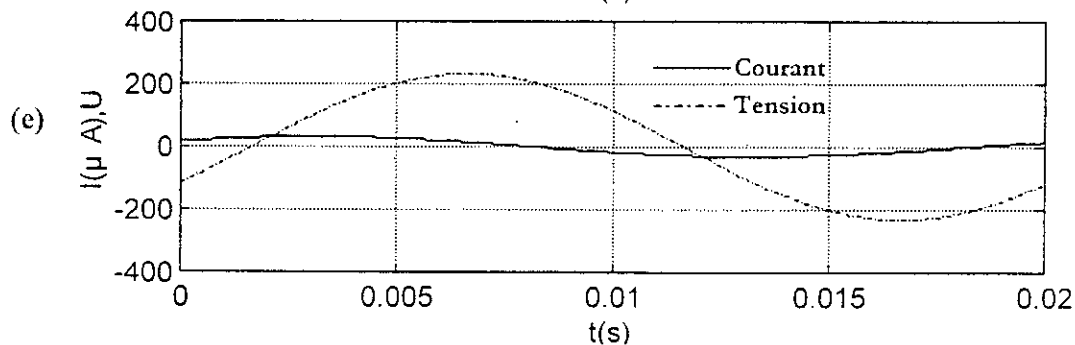
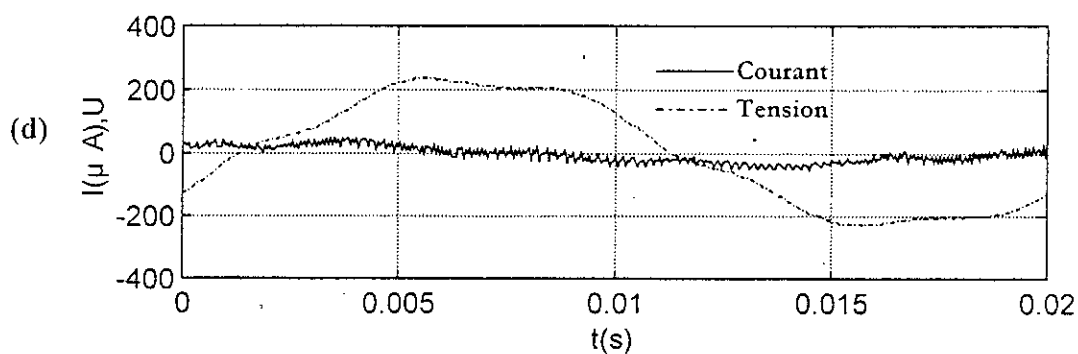
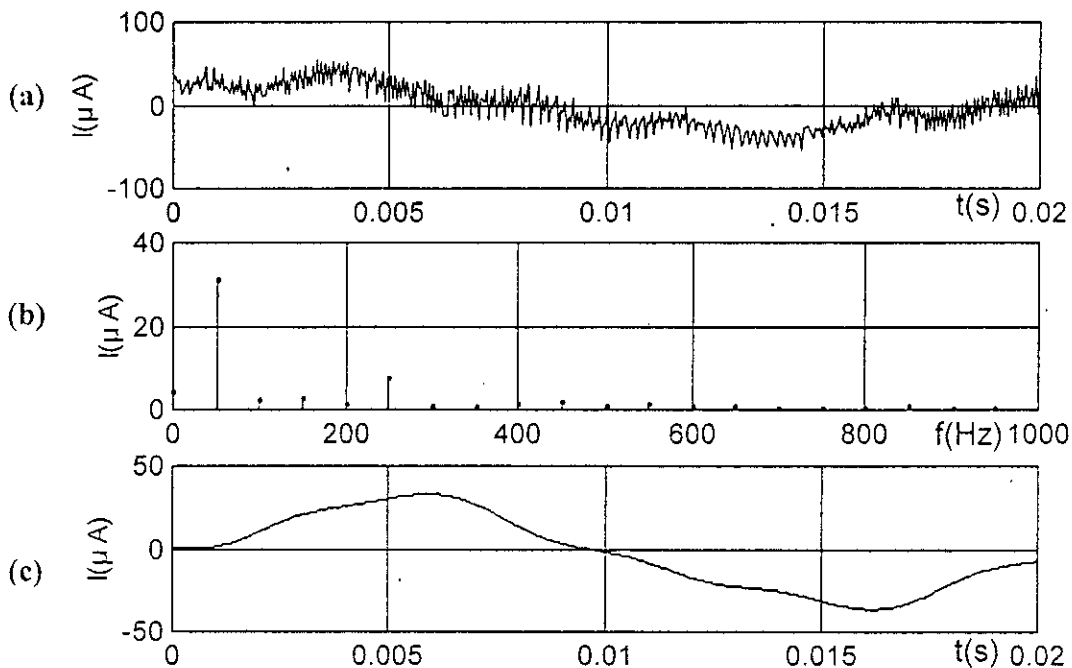
Source: CH1, CH2, External or Line.
 Coupling: AC, DC, HF Reject Filter (-3dB at 7kHz); AC coupling -3dB at 5Hz.
 Slope: +ve or -ve.
 Sensitivity: 0.5 div CH1 or CH2 DC to 20MHz; typically 1.5V pk-pk External.
 Trigger Level: Variable 0-100% of screen.
 Auto/Normal Mode: In Auto mode the timebase free runs in the absence of an adequate trigger signal, except in repetitive sampling mode.
 Input Impedance: 1MW
 Maximum Input Voltage: 350V (dc + ac peak) at 500Hz, Cat I; derate above 500Hz at 20dB/decade to 7V peak at 25kHz and above.
 Pre-Trigger: 0, 2.5, 5, 7.5 or 10 divisions of pre-trigger data can be displayed when operating in Normal timebase mode.

TIMEBASE MODES

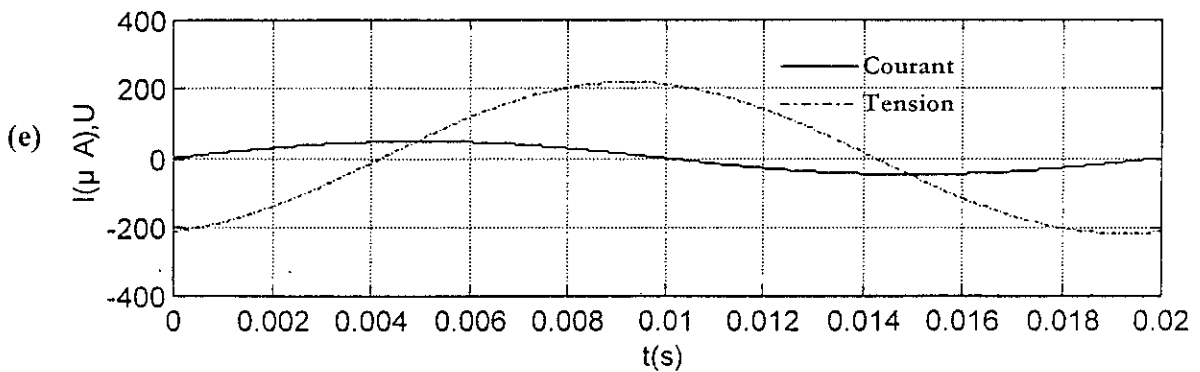
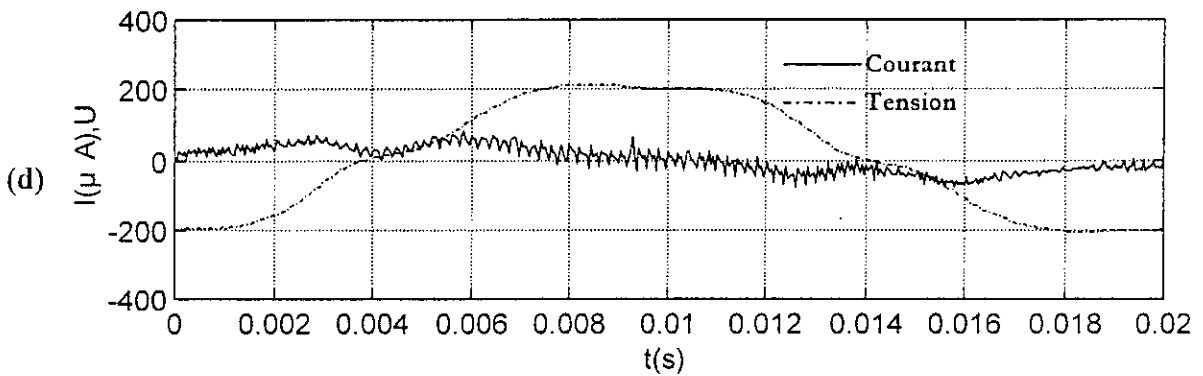
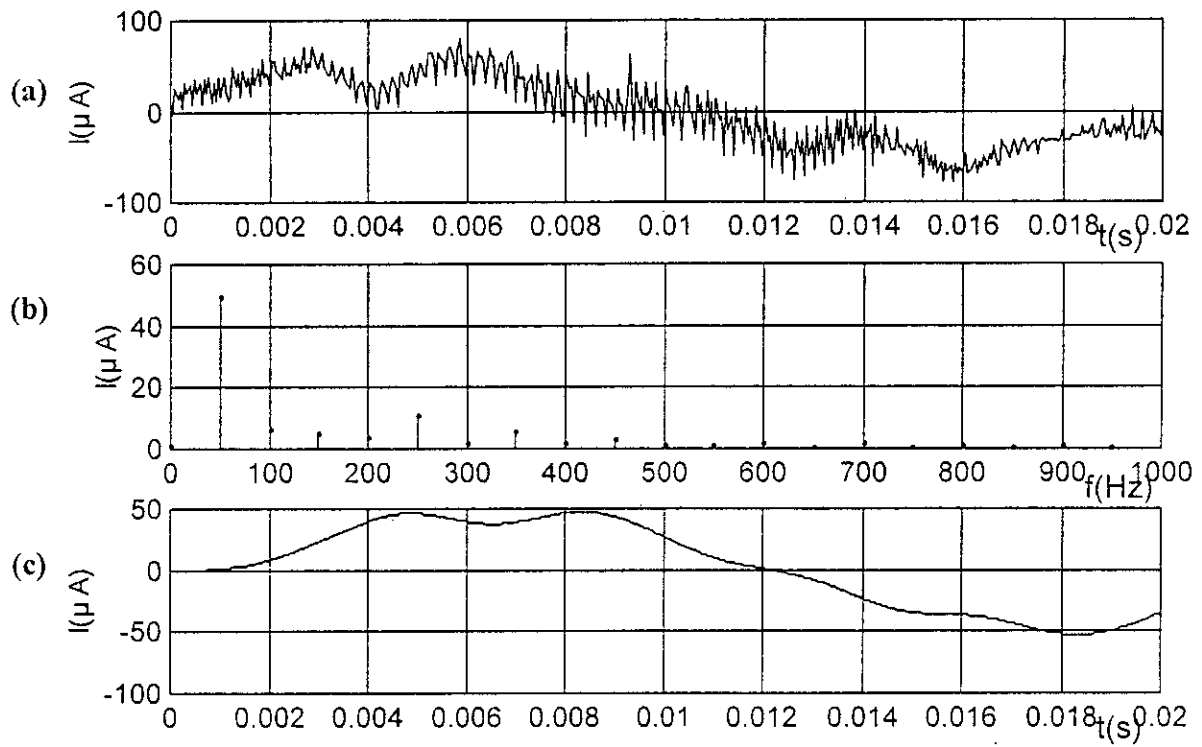
Update: 50 s/div to 0.5 s/div, Auto trigger mode only. Display updated from left to right (overwritten) at the selected sweep rate.
 Normal: 5.0s/div to 5 μ s/div. Display rewritten at the end of sweep.
 Repeat: 2 μ s/div to 50ns/div. Data is repetitively sampled to give high equivalent sample rates; the display is rewritten every time the complete waveform has been reacquired (from multiple trigger events).

ANNEXE 2 : TRAITEMENT NUMERIQUE DES SIGNAUX

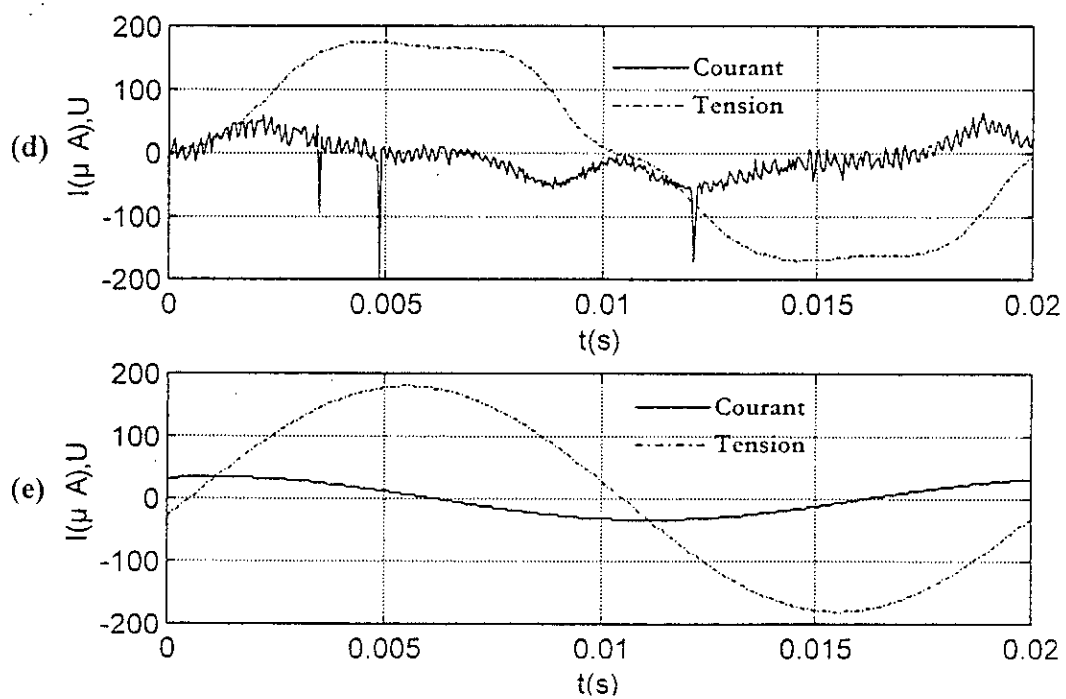
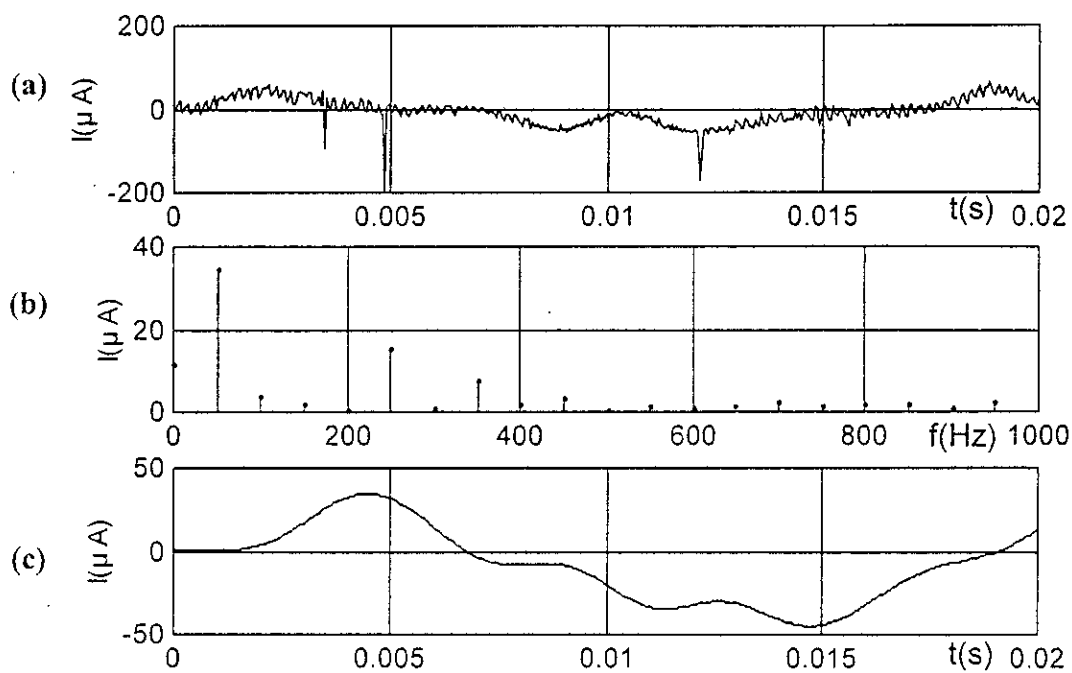
(a) : Courant de fuite réel, (b) : Spectre d'amplitude, (c) : Courant de fuite filtré.
 (d) : Courant de fuite et tension appliquée, (e) : Fondamentaux du courant et de la tension



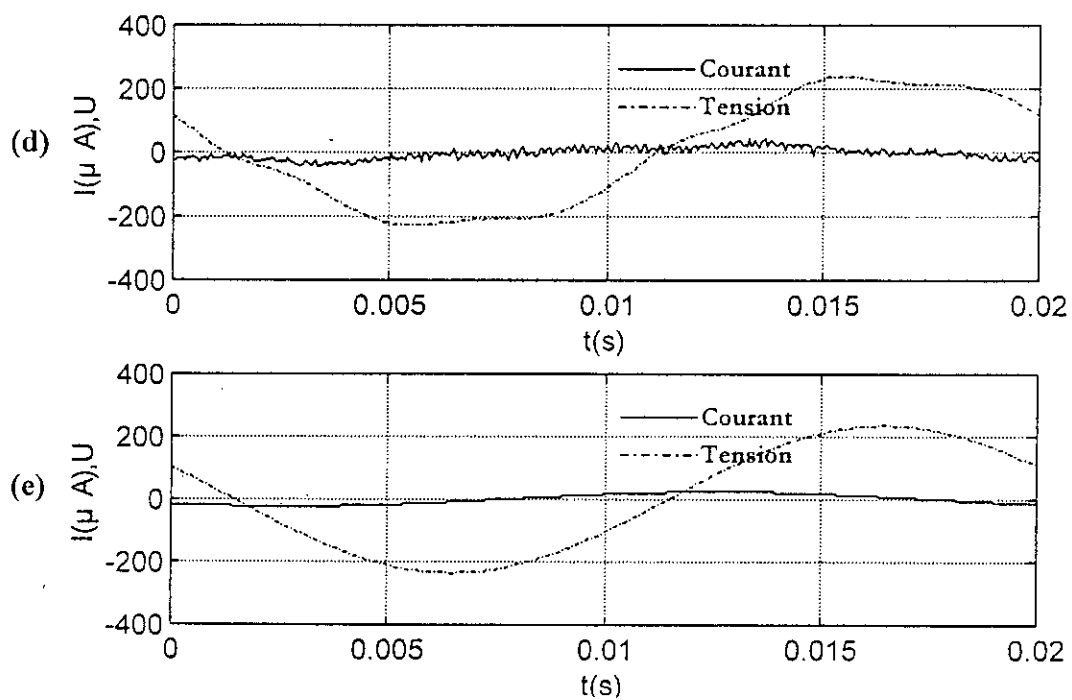
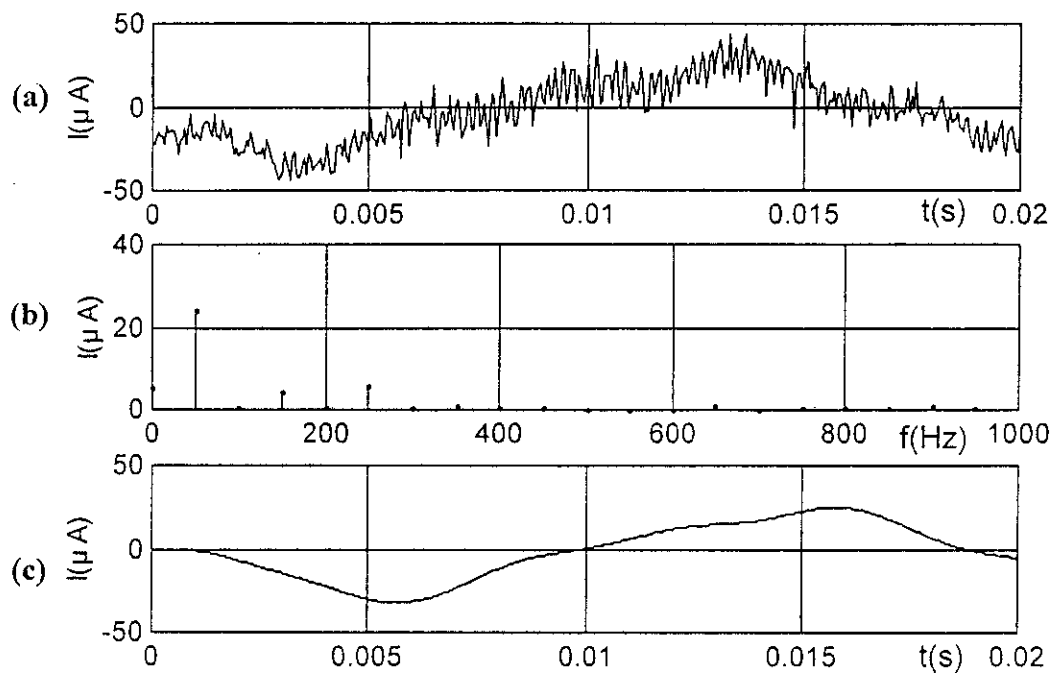
$$\gamma = 0,1\mu\text{S}, L = 06\text{cm}, U = 10\text{kV}.$$



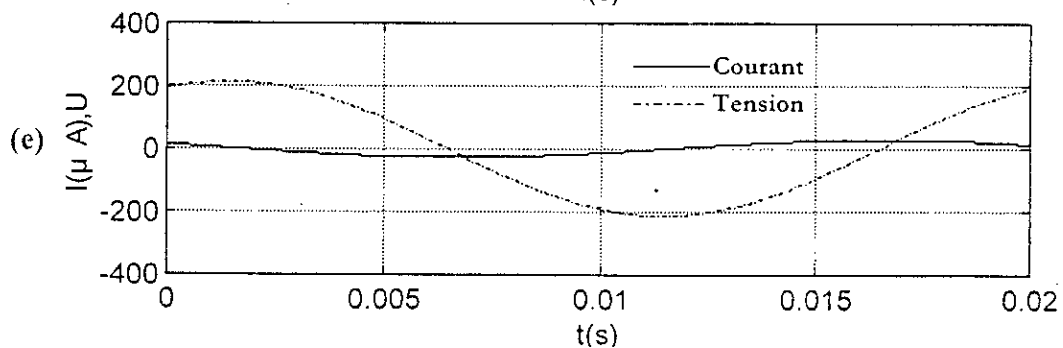
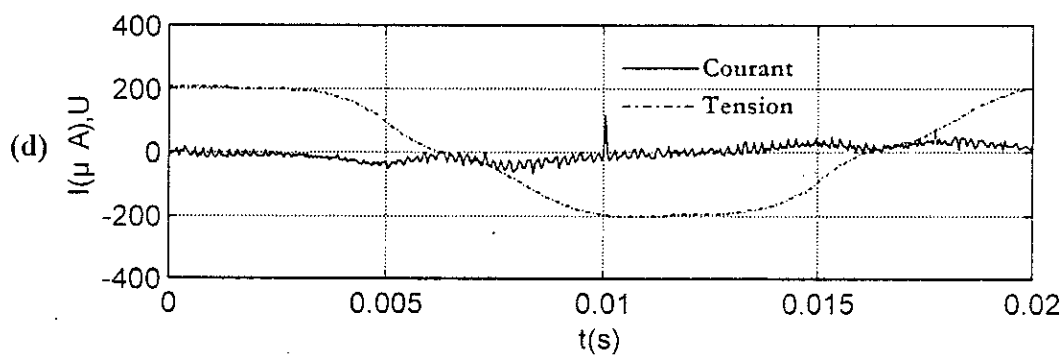
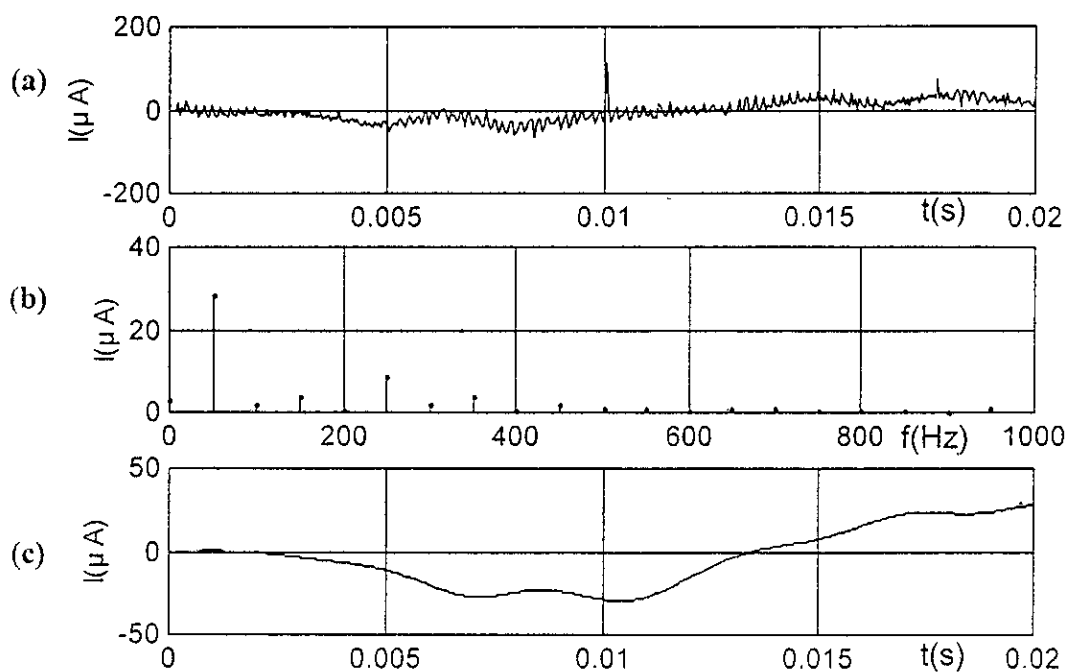
$$\gamma = 0,1\mu\text{S}, L = 06\text{cm}, U = 20\text{kV}.$$



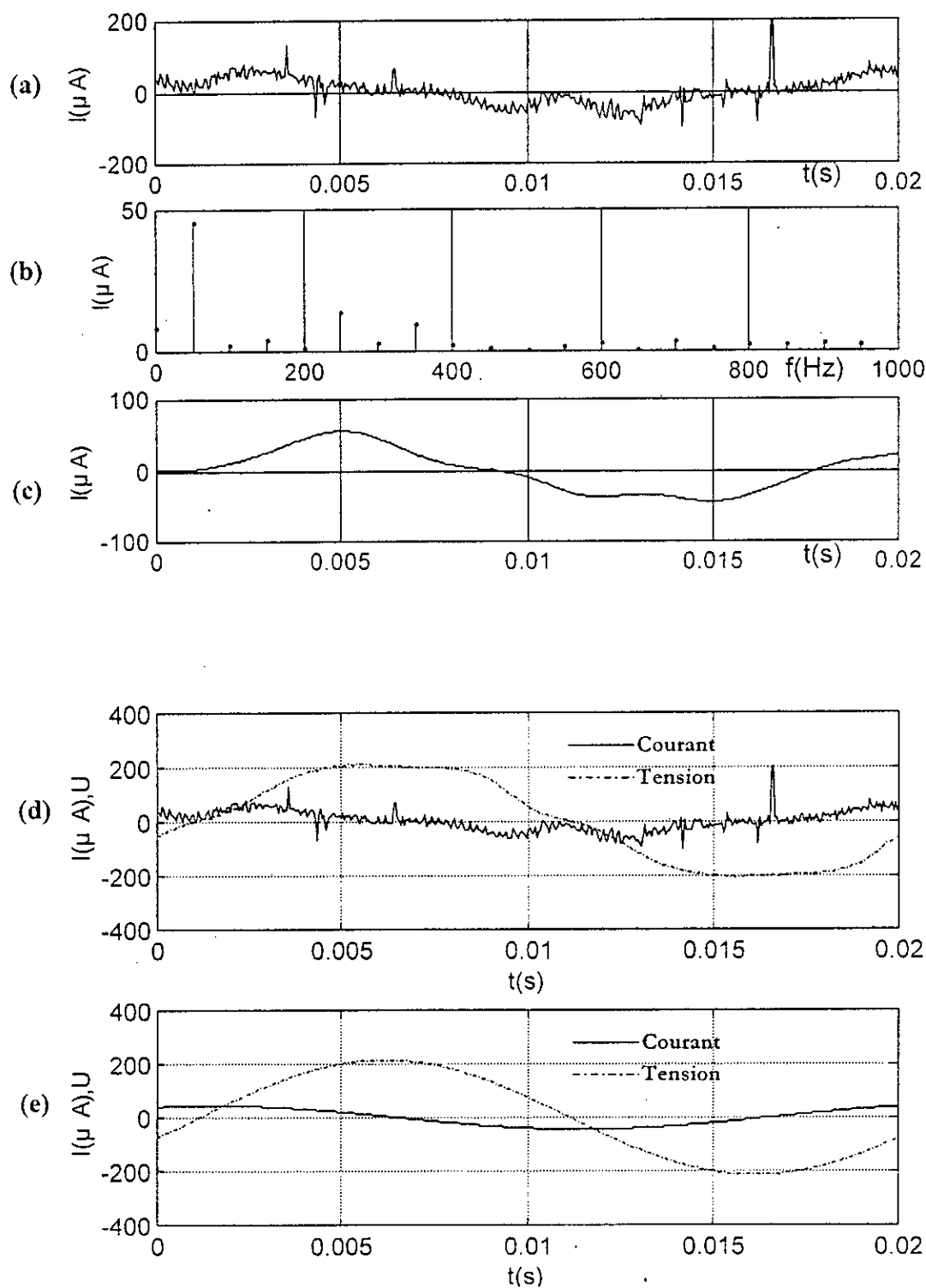
$\gamma = 0,1\mu\text{S}, L = 06\text{cm}, U = 30\text{kV}.$



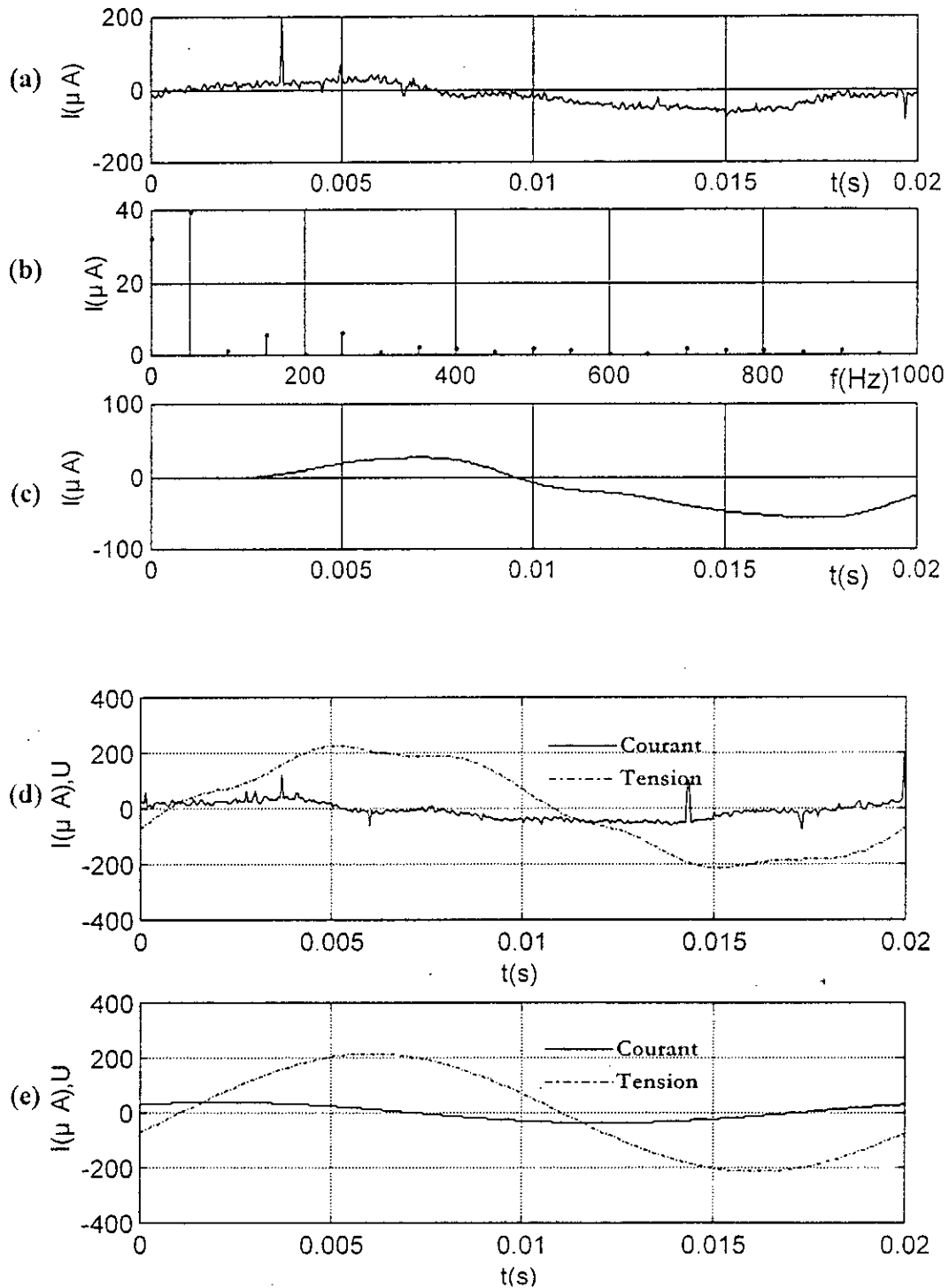
$\gamma = 0,1 \mu\text{S}$, $L = 18\text{cm}$, $U = 10\text{kV}$.



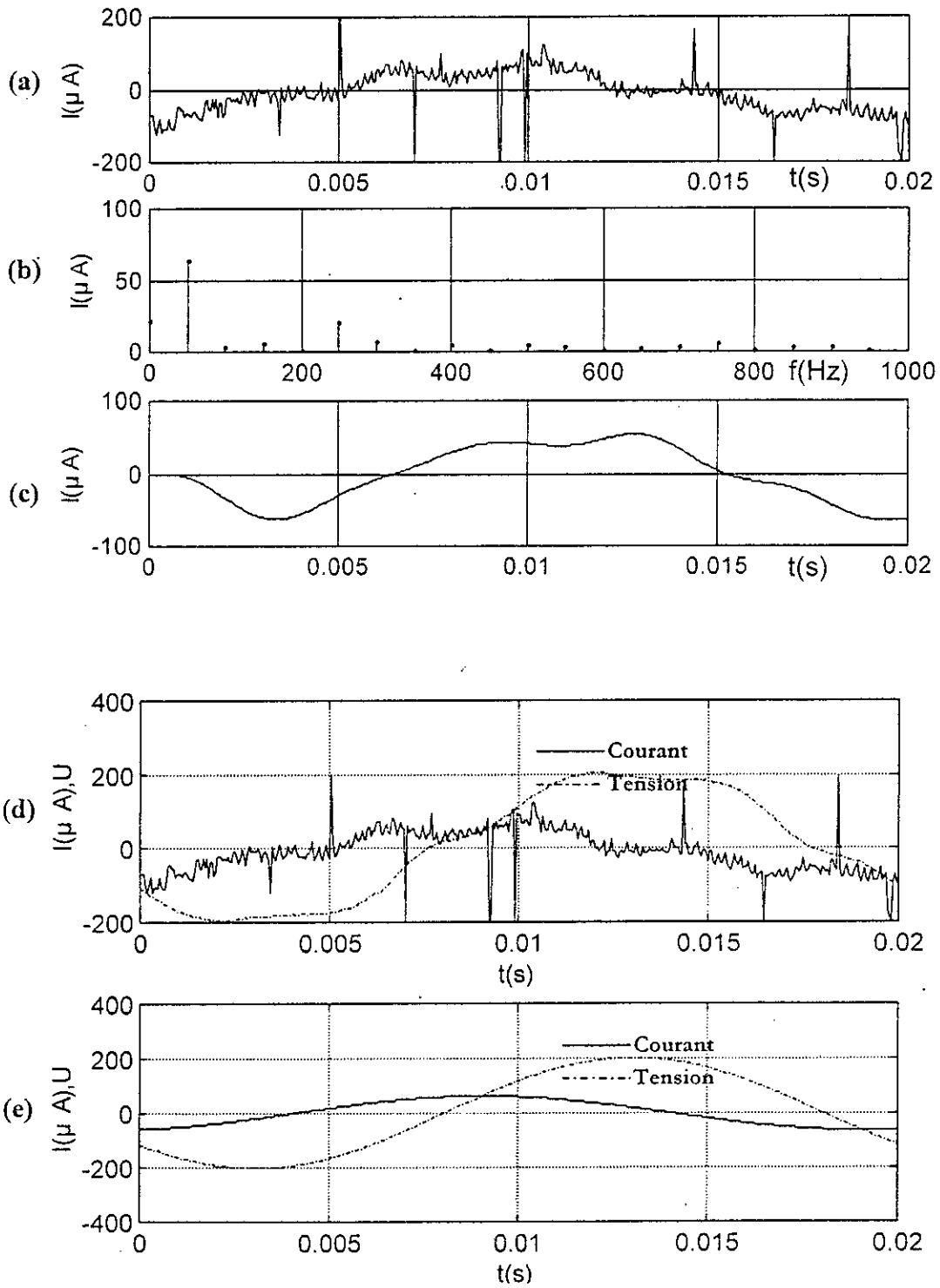
$\gamma = 0,1 \mu\text{S}$, $L = 18 \text{cm}$, $U = 20 \text{kV}$.



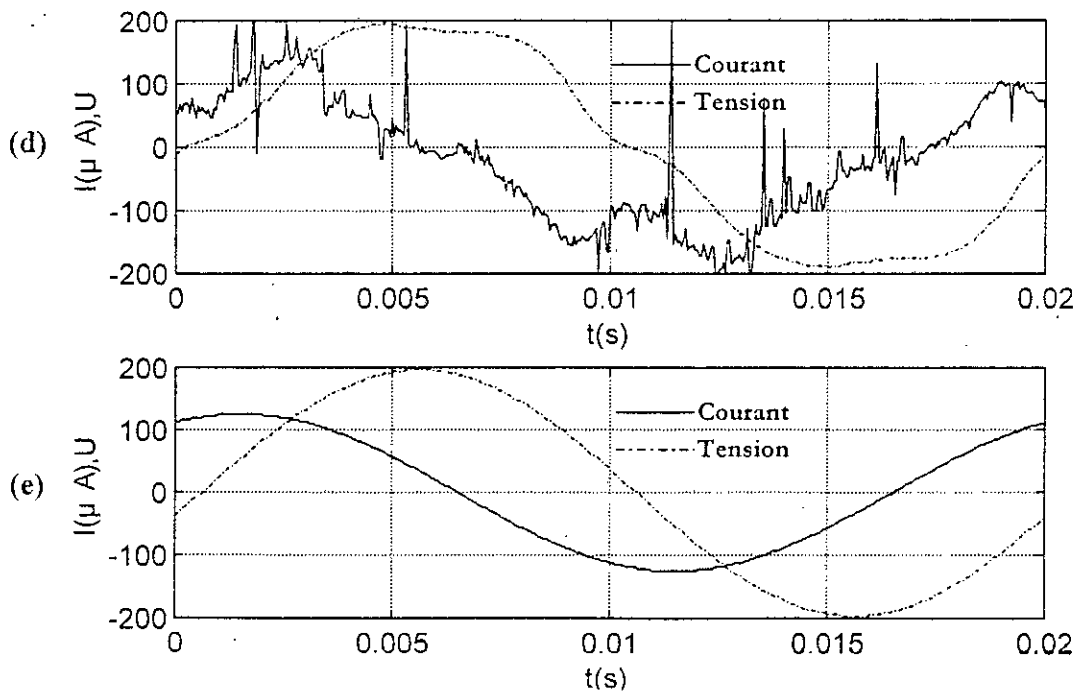
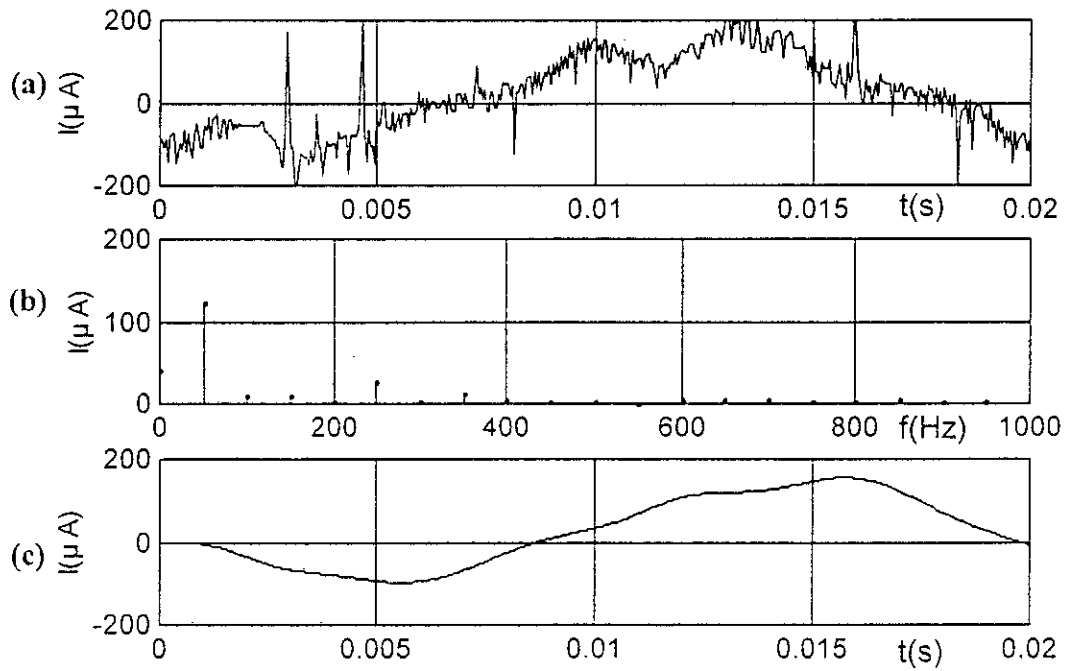
$\gamma = 0,1\mu\text{S}$, $L = 18\text{cm}$, $U = 30\text{kV}$.



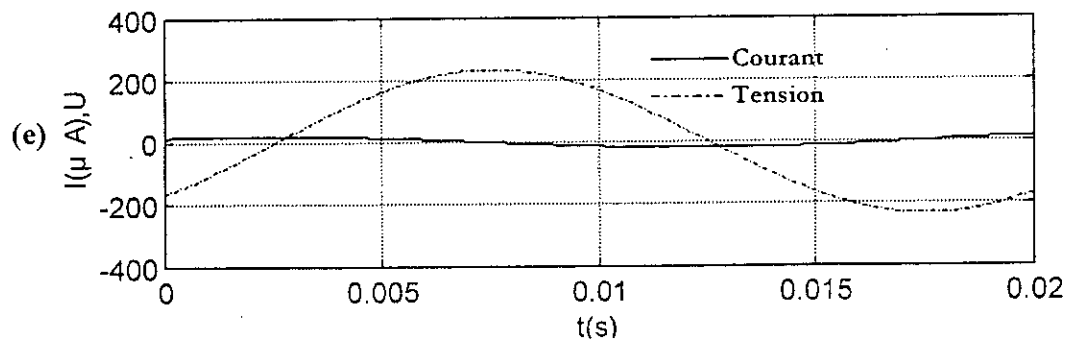
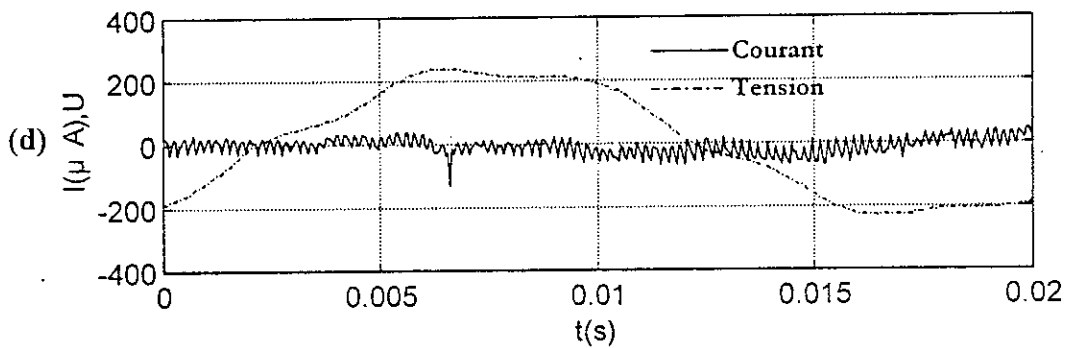
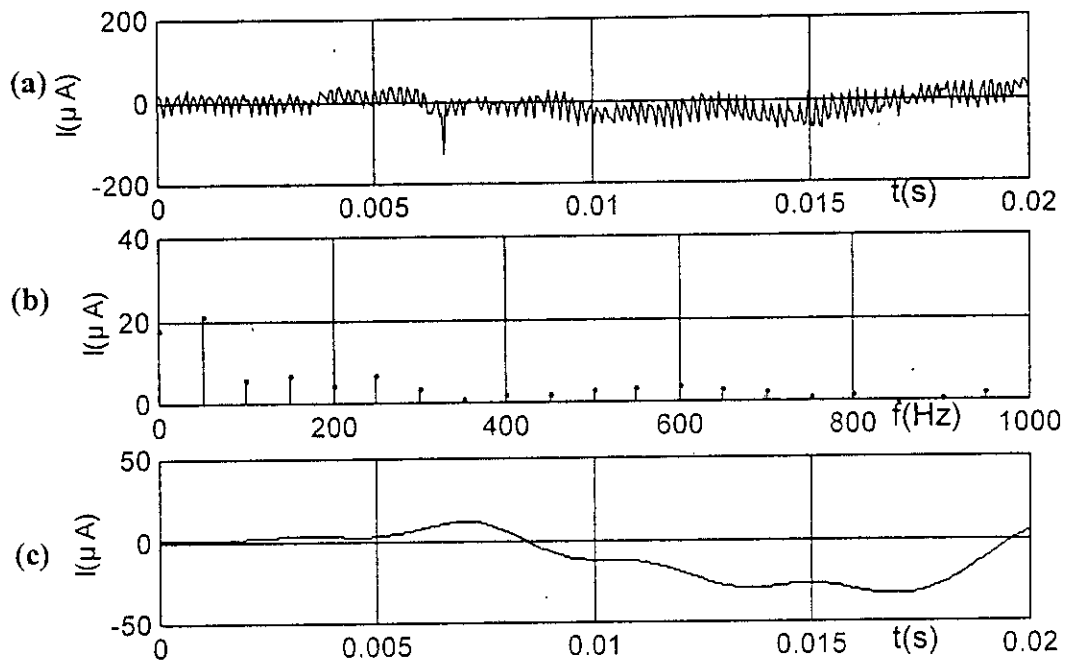
$\gamma = 0,1\mu\text{S}$, $L = 30\text{cm}$, $U = 10\text{kV}$.



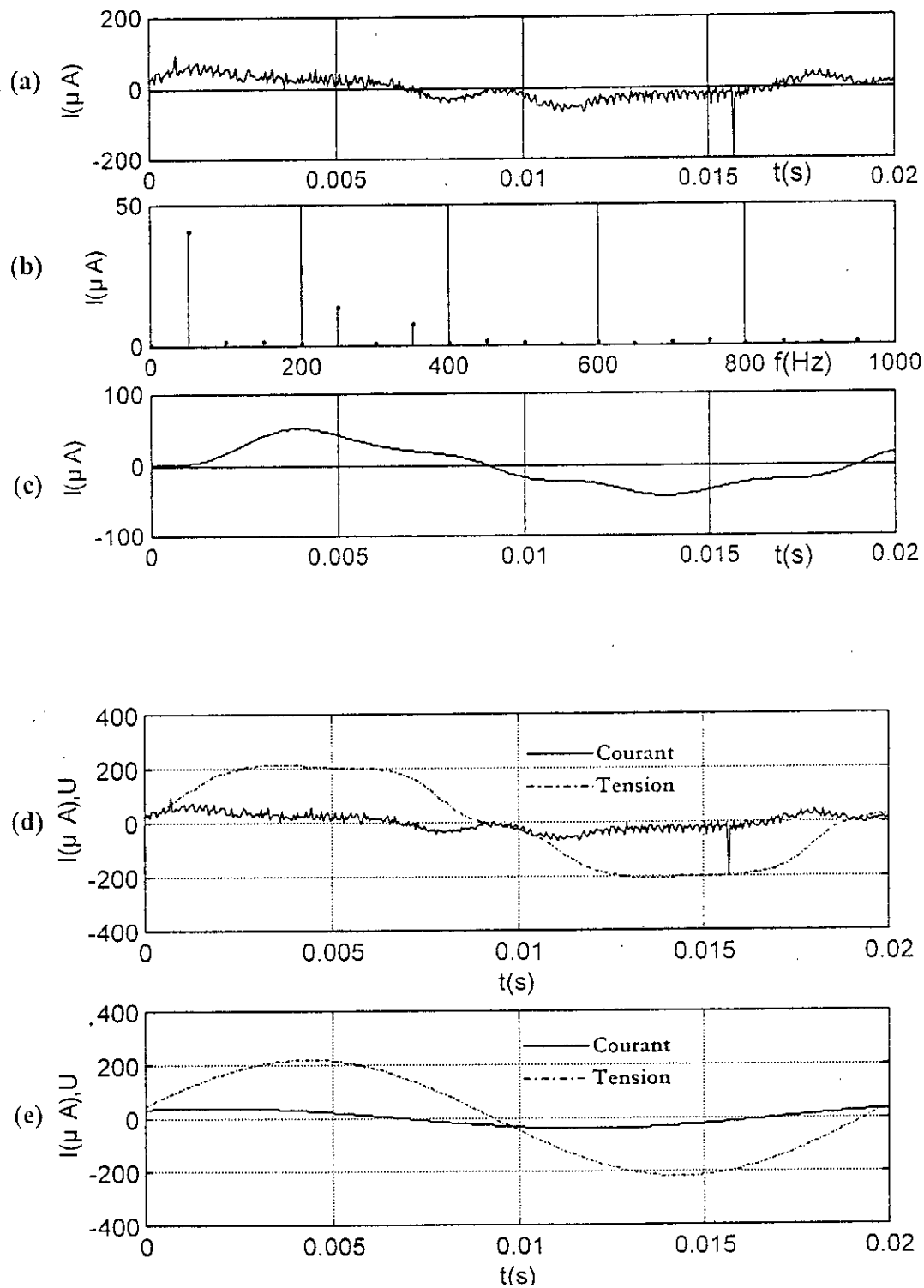
$$\gamma = 0,1\mu\text{S}, L = 30\text{cm}, U = 20\text{kV}.$$



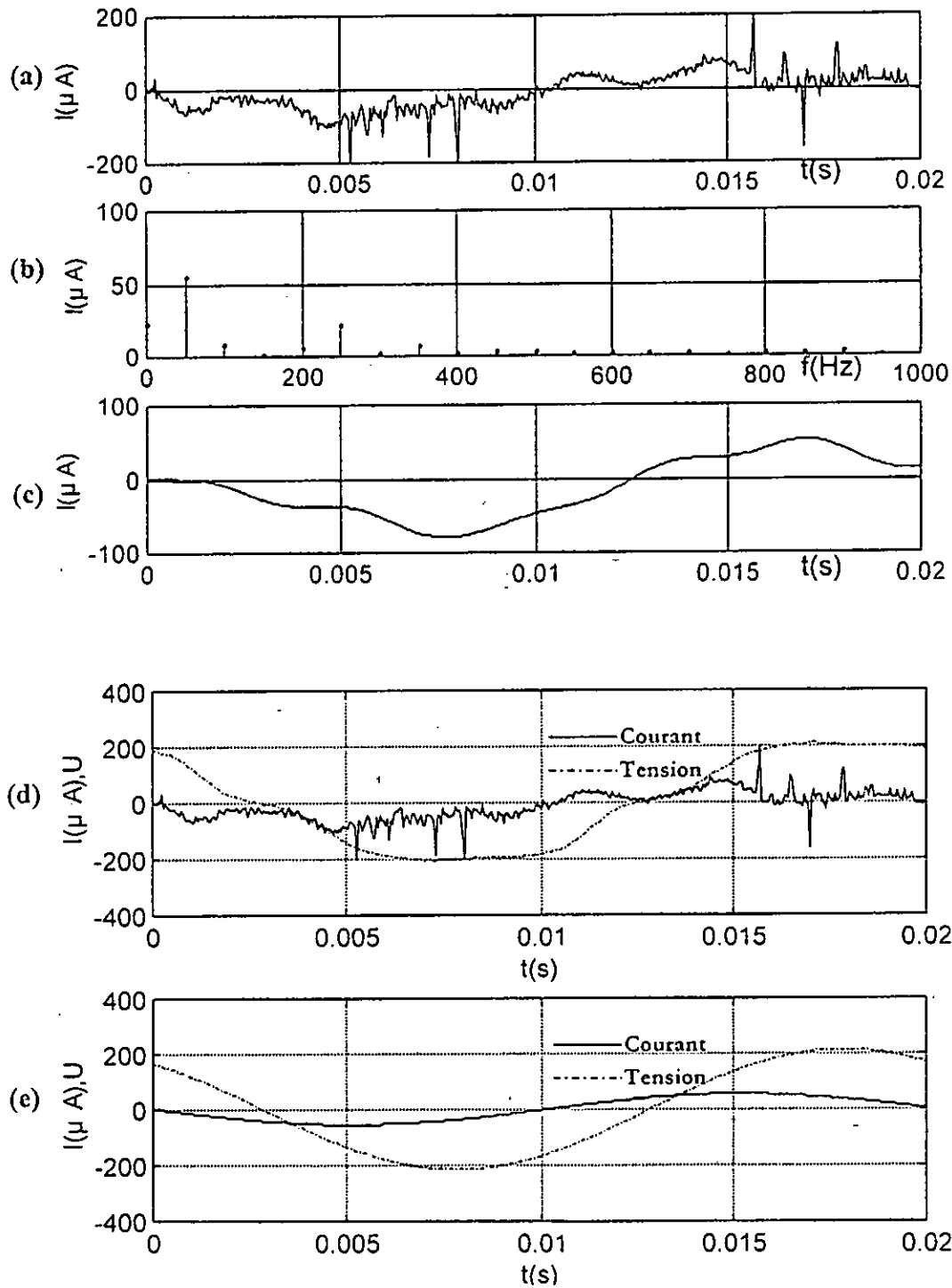
$$\gamma = 0,1\mu\text{S}, L=30\text{cm}, U=30\text{kV}.$$



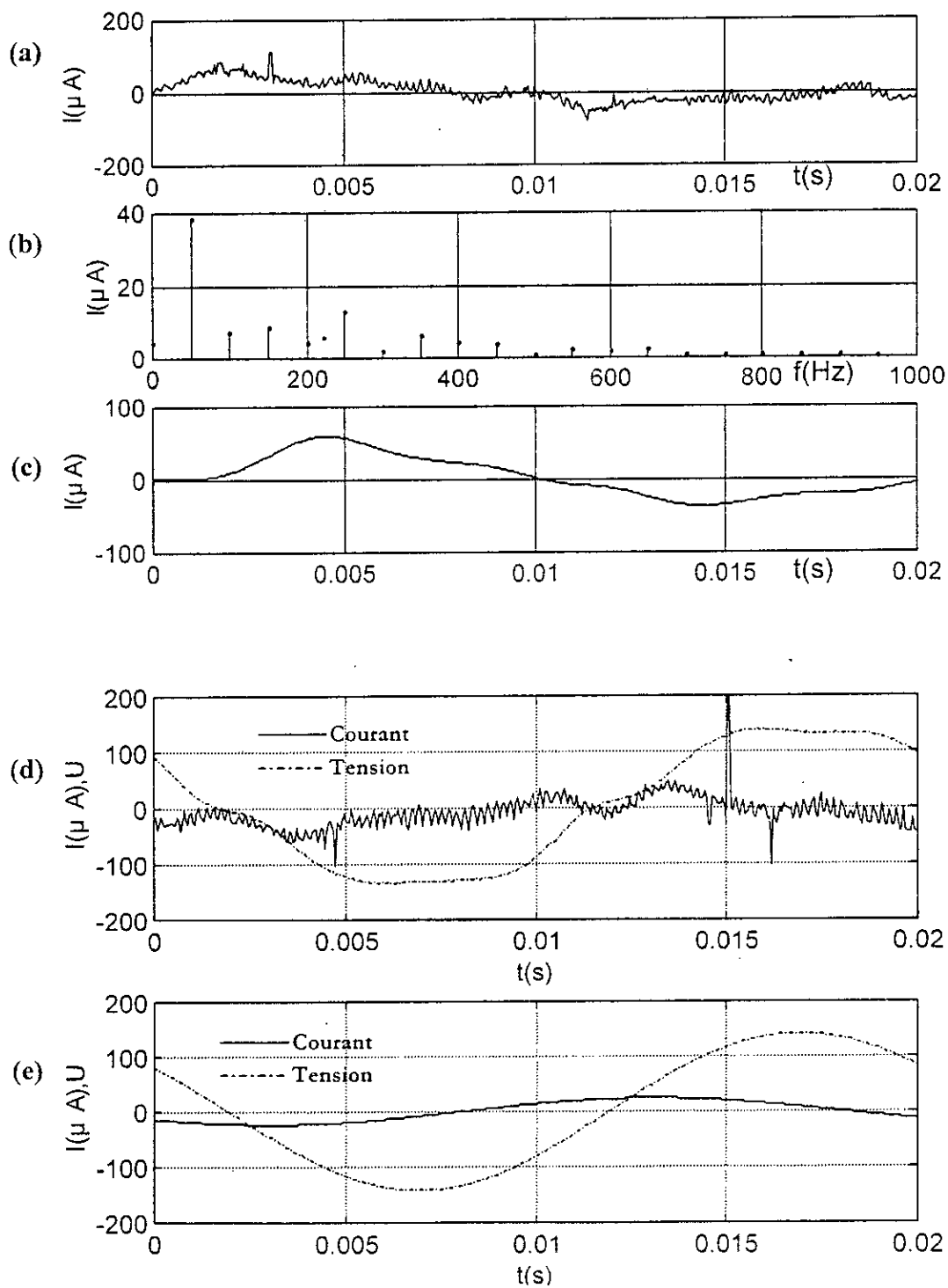
$\gamma = 85 \mu\text{S}$, $L = 06\text{cm}$, $U = 10\text{kV}$.



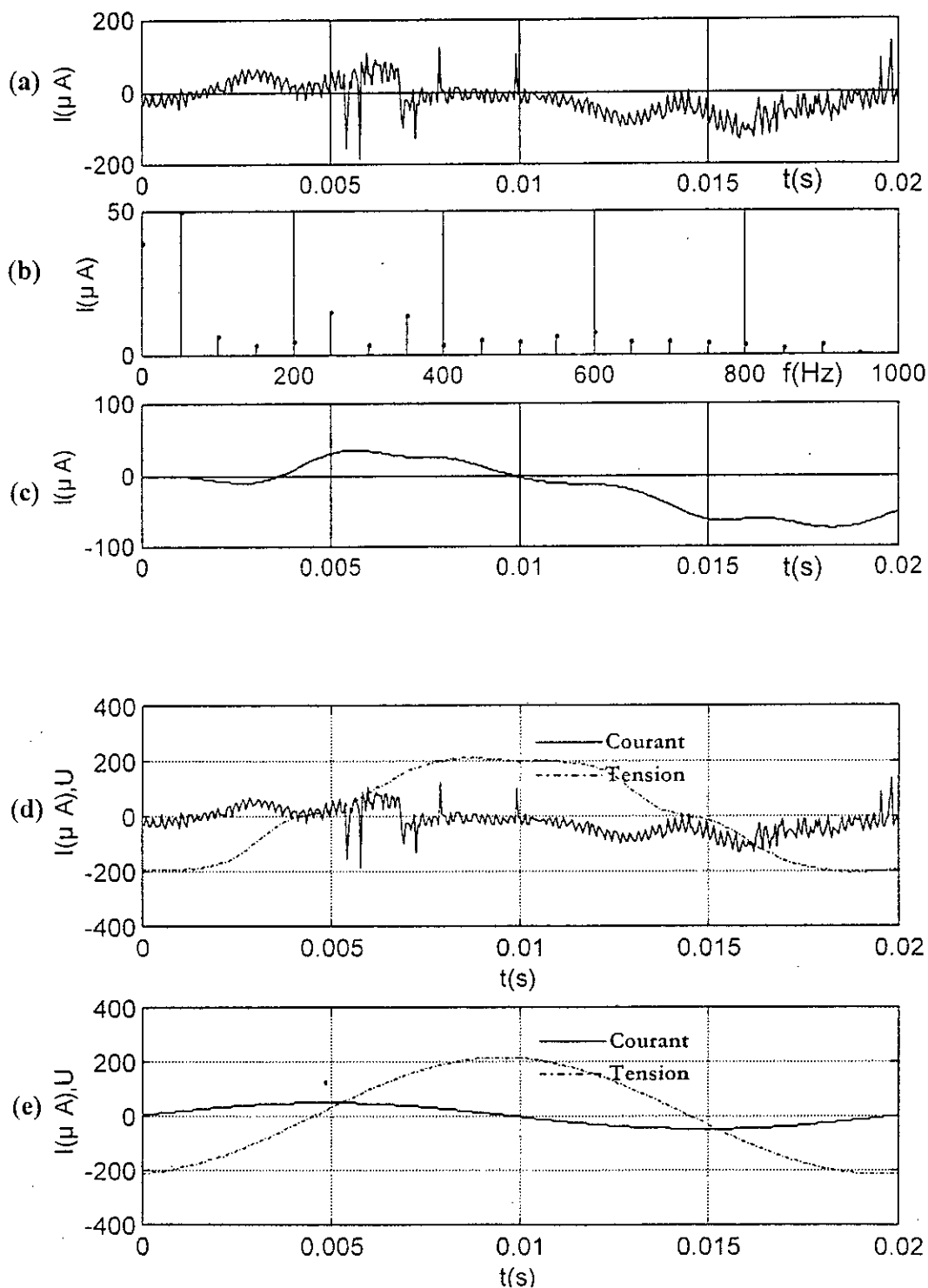
$\gamma = 85 \mu\text{S}$, $L = 06 \text{cm}$, $U = 20 \text{kV}$.



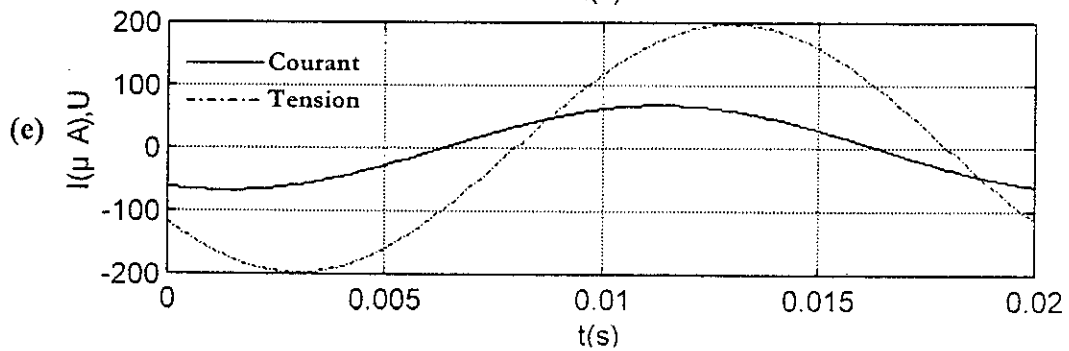
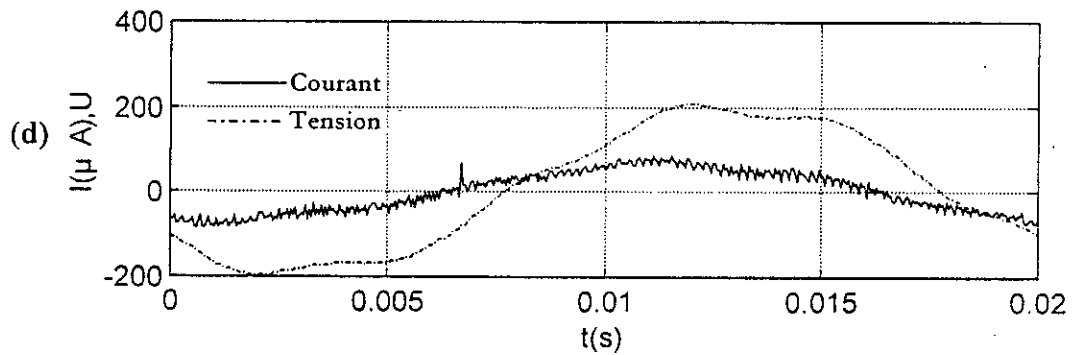
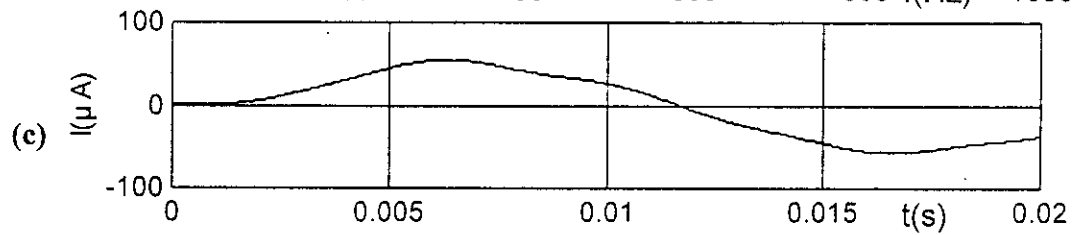
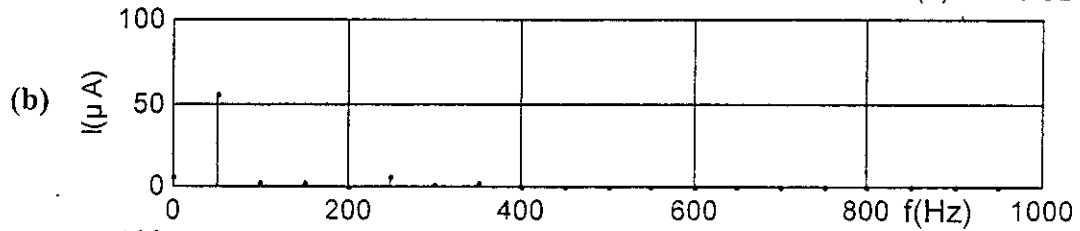
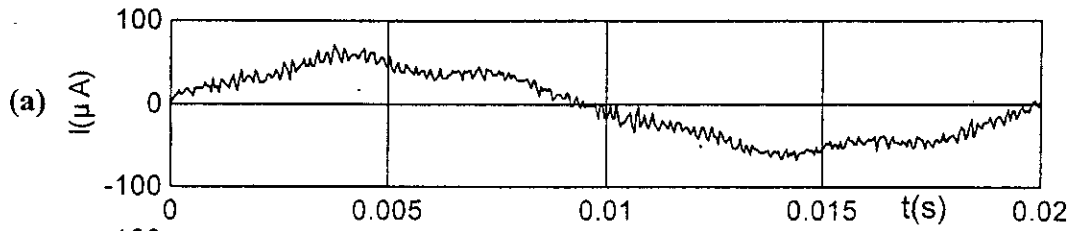
$$\gamma = 85 \mu\text{S}, L = 06 \text{cm}, U = 30 \text{kV}.$$



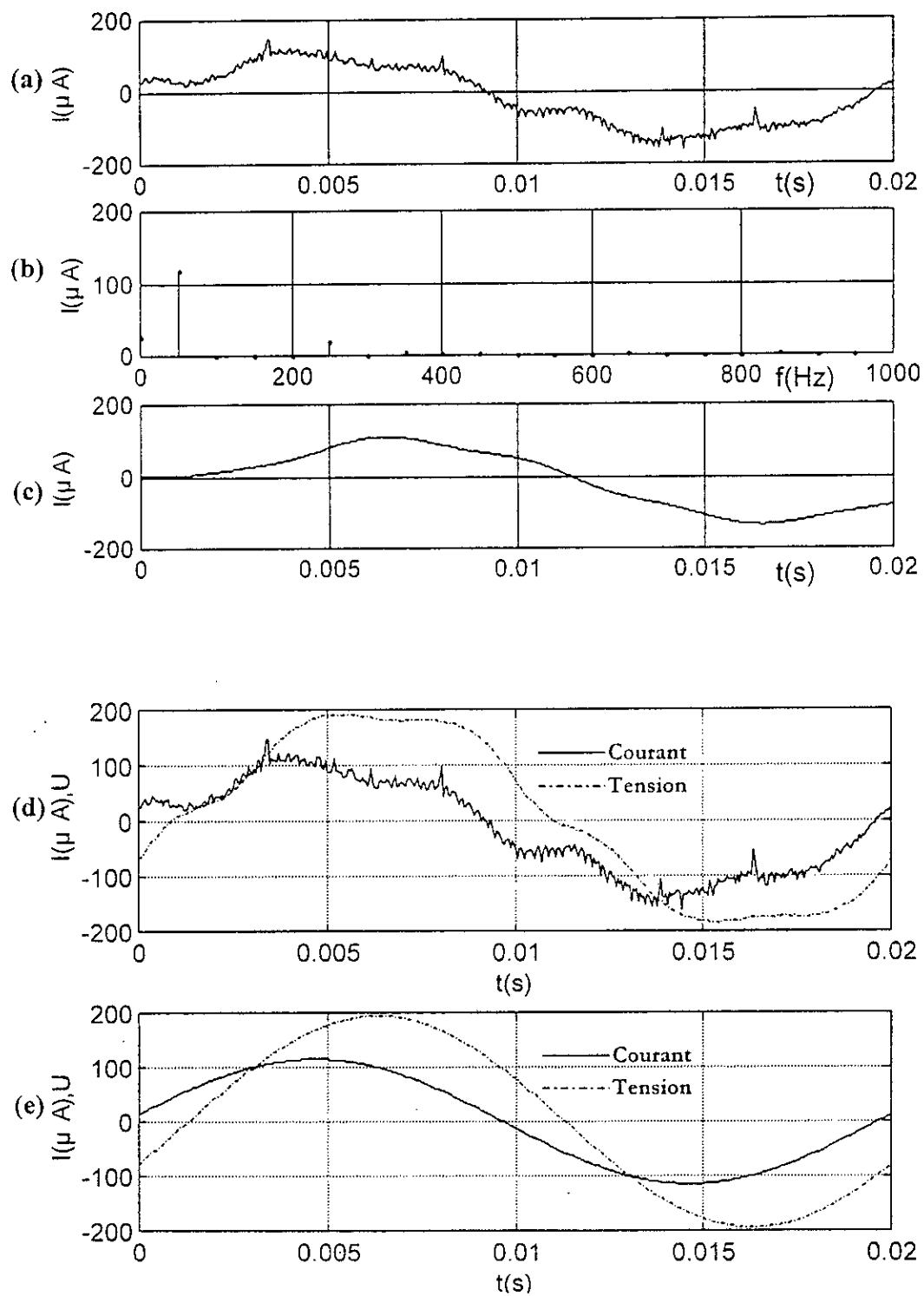
$\gamma = 85 \mu\text{S}$, $L = 18 \text{cm}$, $U = 20 \text{kV}$.



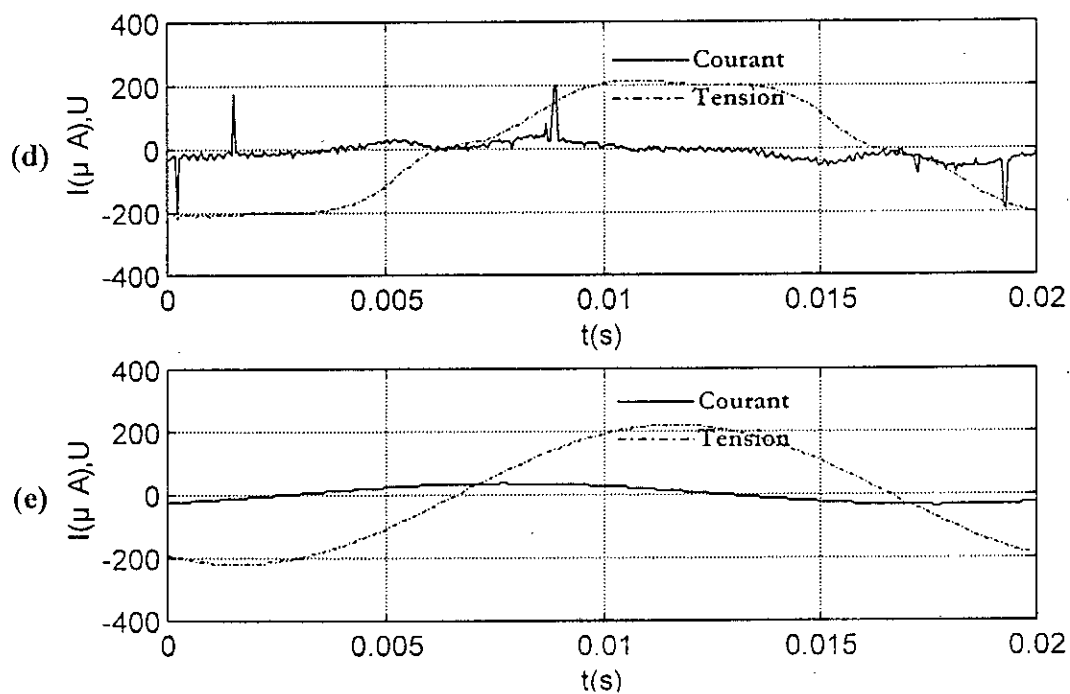
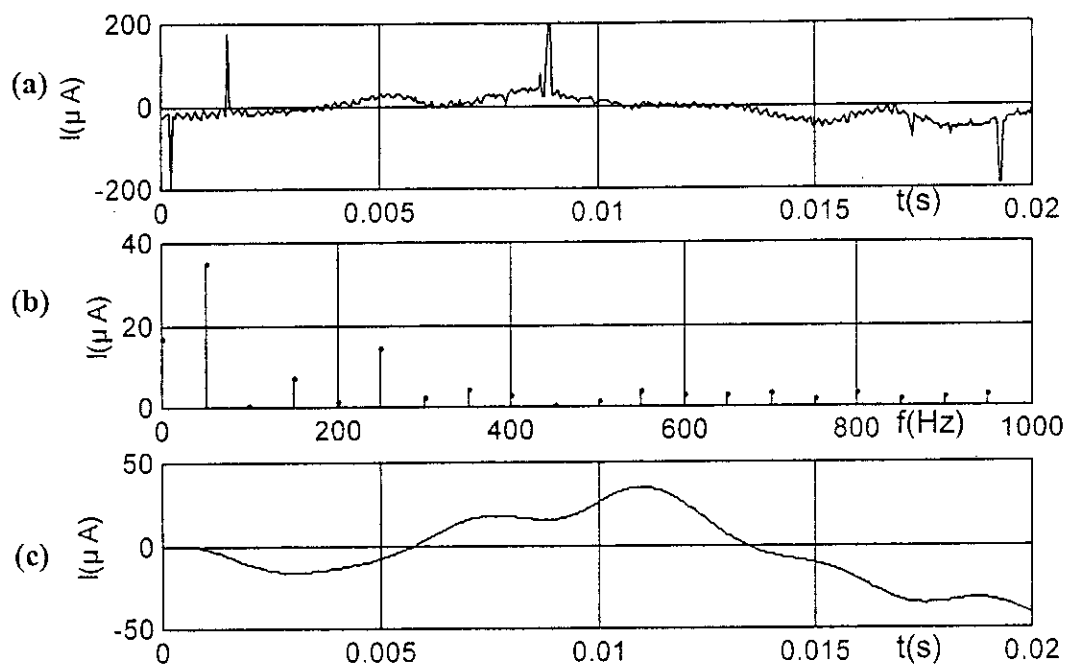
$\gamma = 85 \mu\text{S}$, $L = 18 \text{cm}$, $U = 30 \text{kV}$.



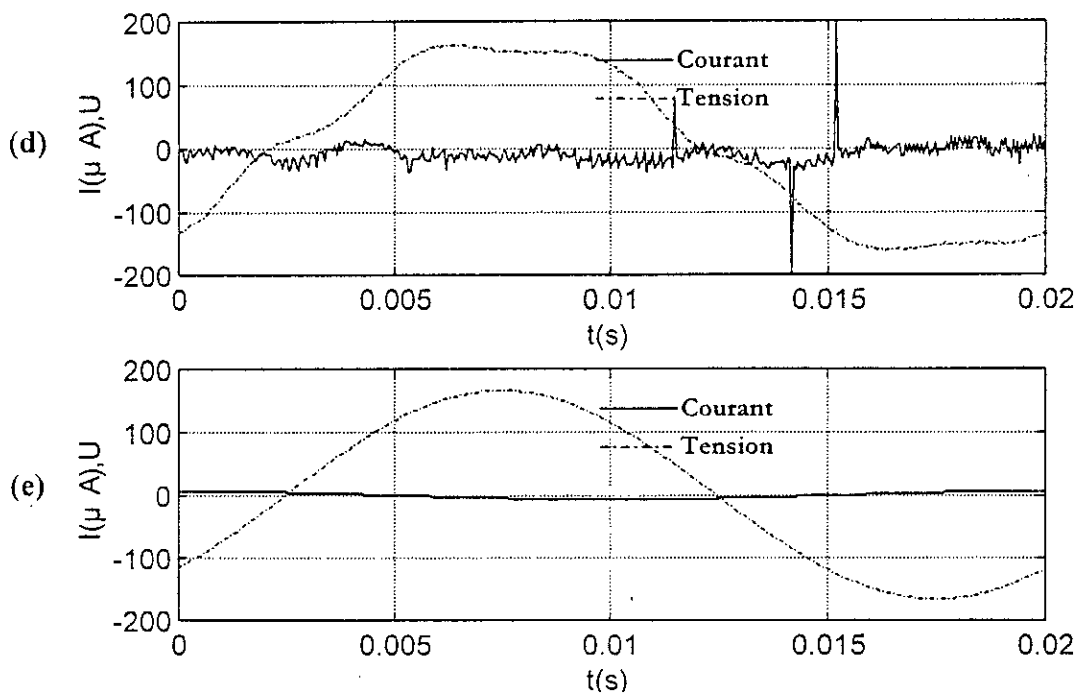
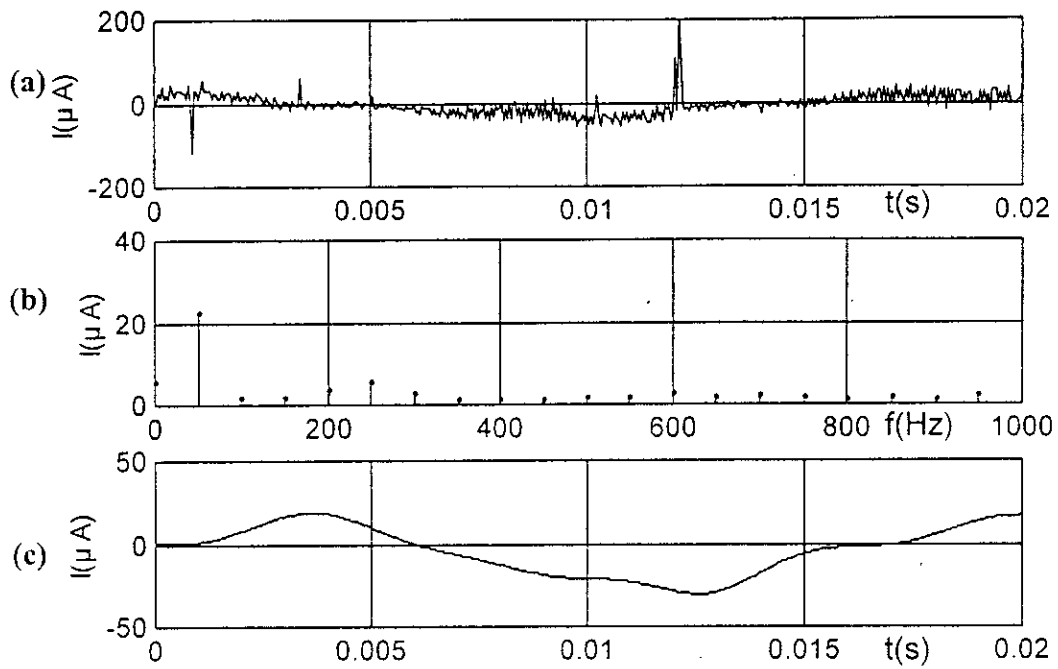
$\gamma = 85 \mu\text{S}$, $L = 30 \text{cm}$, $U = 10 \text{kV}$.



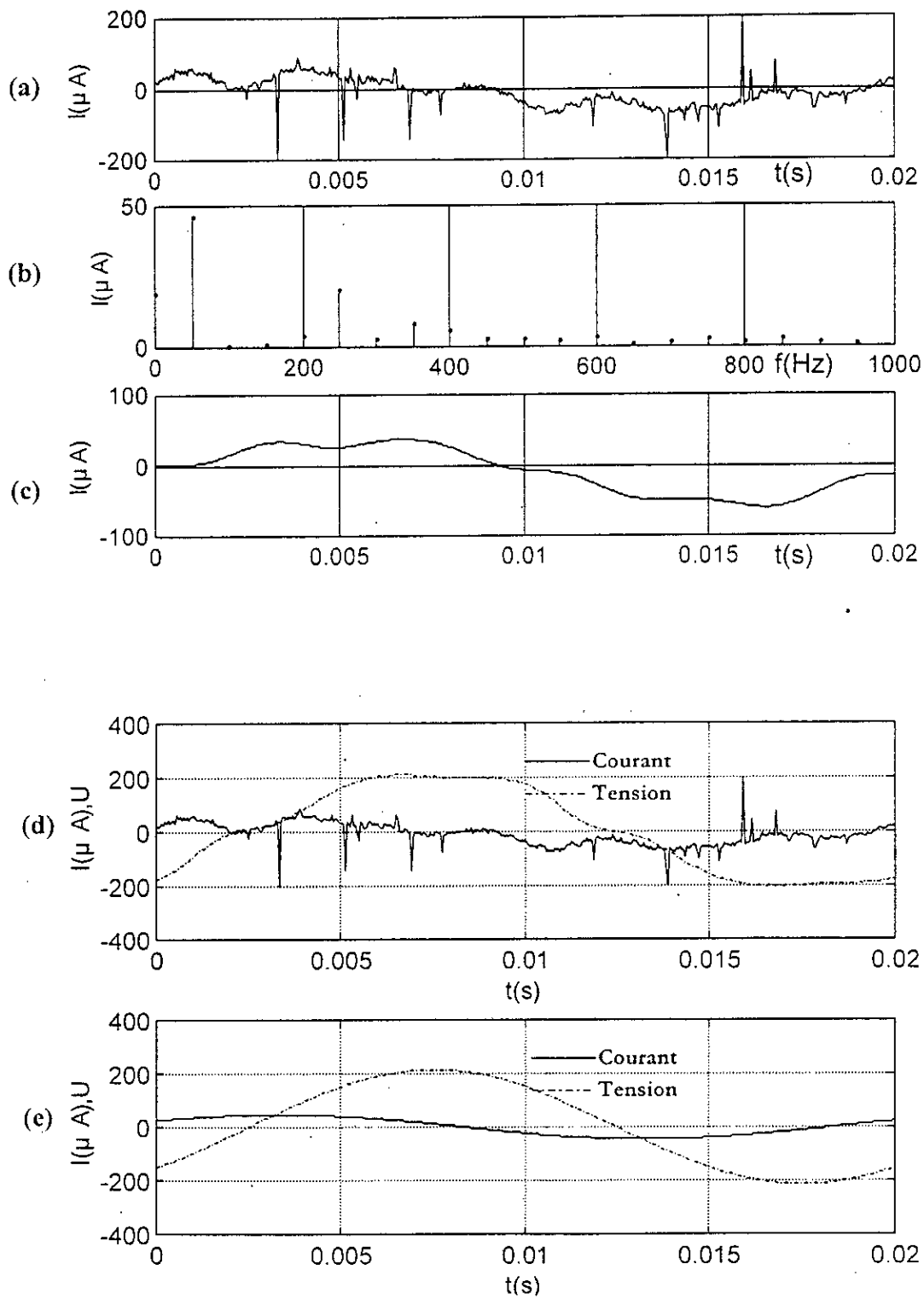
$\gamma = 85 \mu\text{S}$, $L = 30 \text{cm}$, $U = 20 \text{kV}$.



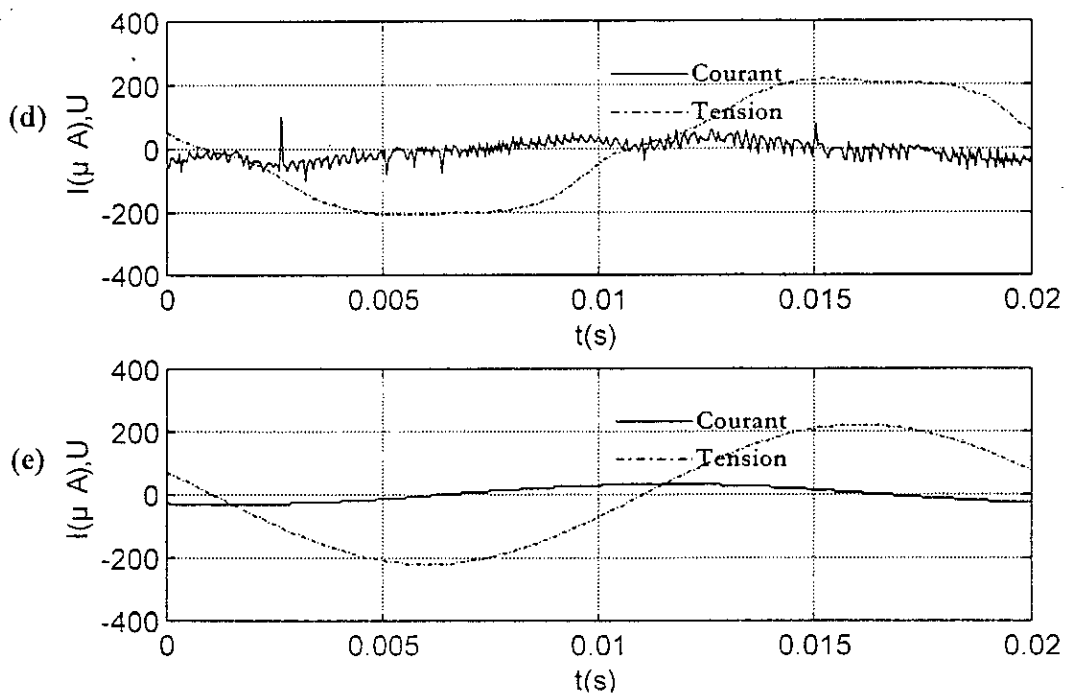
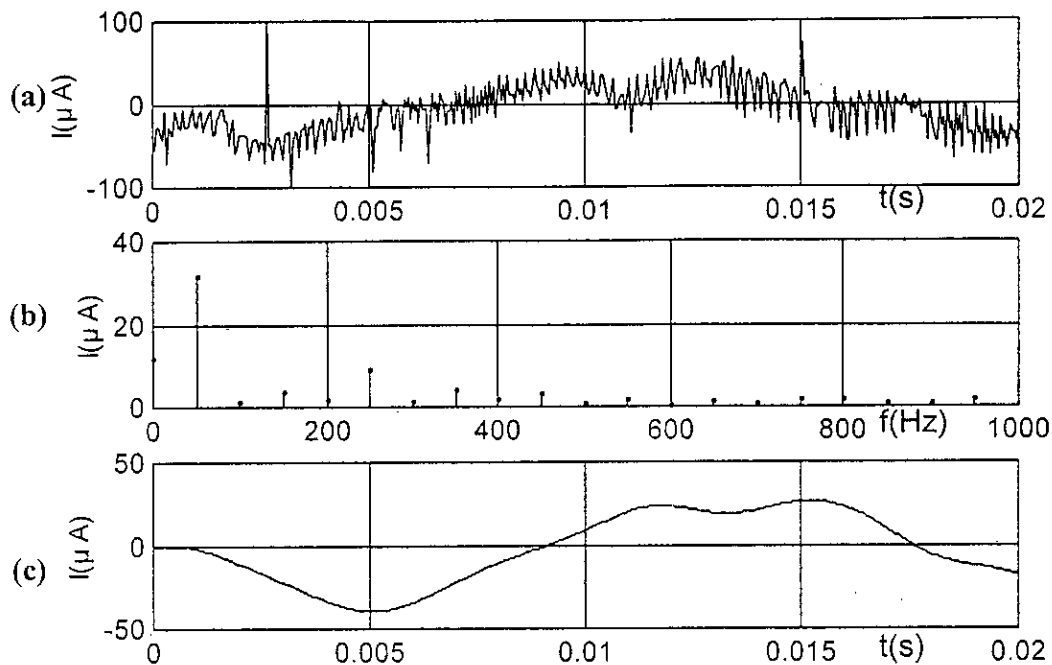
$\gamma = 1000\mu\text{S}$, $L = 06\text{cm}$, $U = 20\text{kV}$.



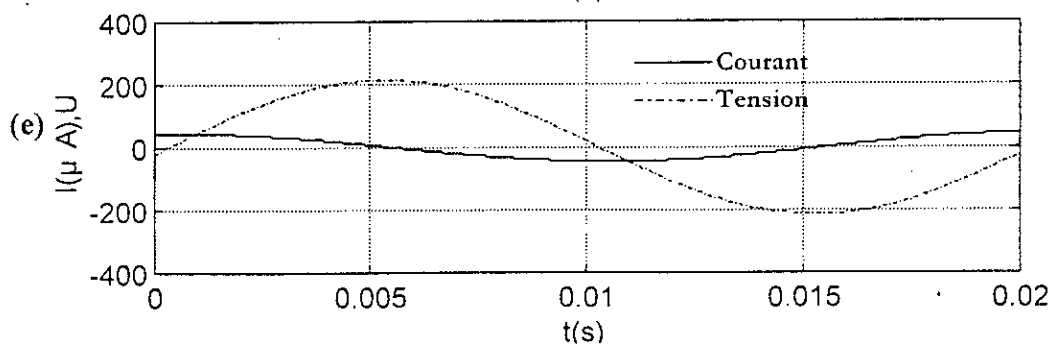
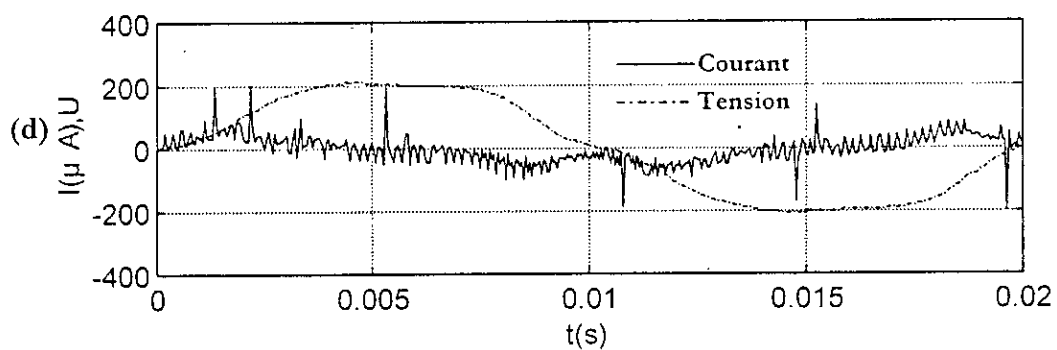
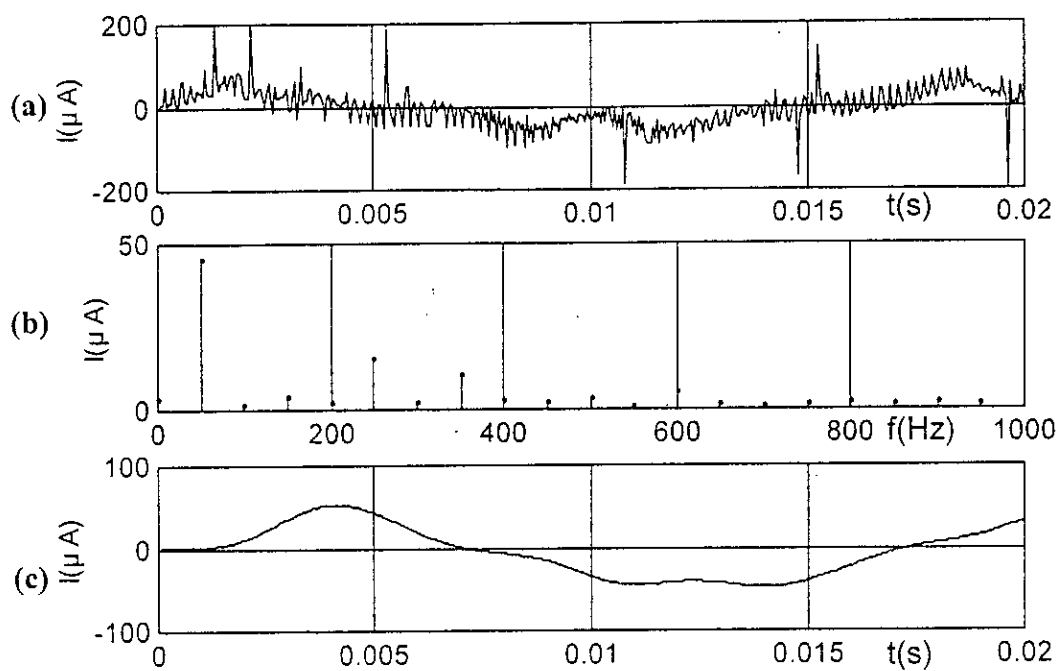
$\gamma = 1000 \mu S, L = 06 \text{ cm}, U = 10 \text{ kV}.$



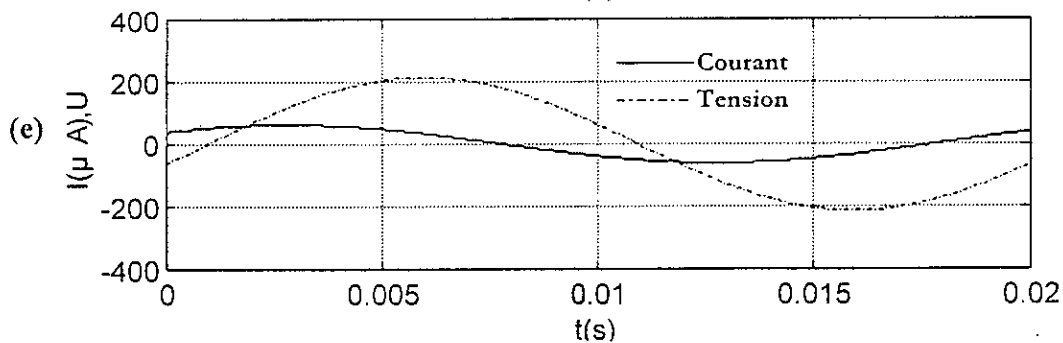
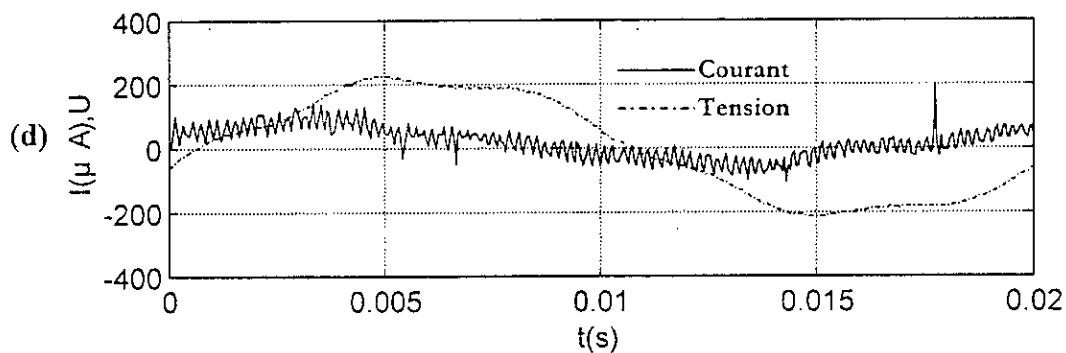
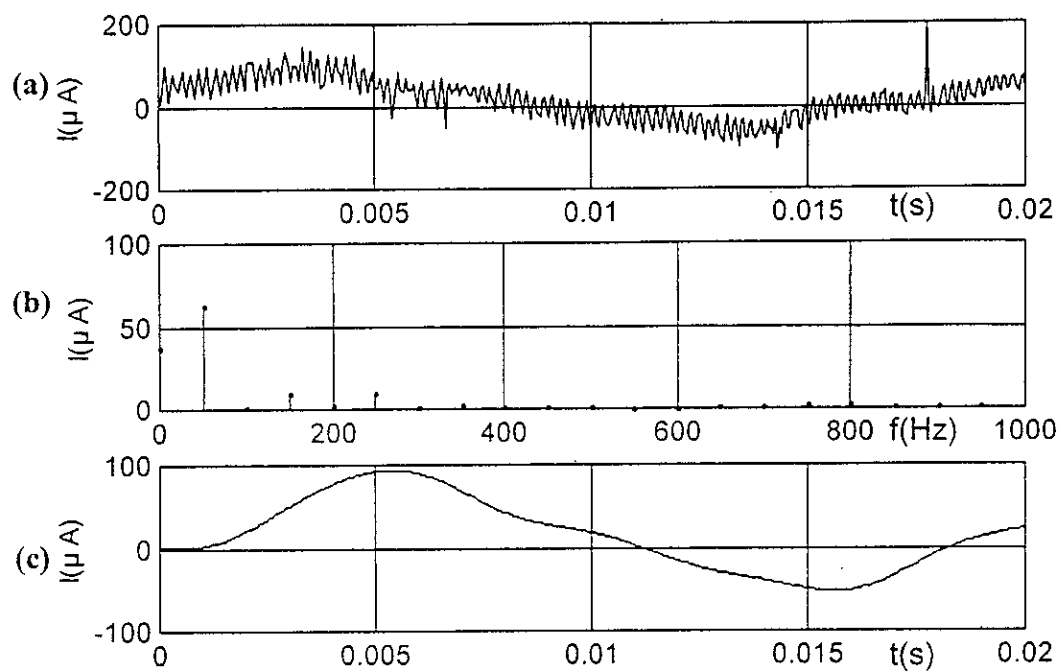
$\gamma=1000\mu\text{S}$, $L=06\text{cm}$, $U=30\text{kV}$.



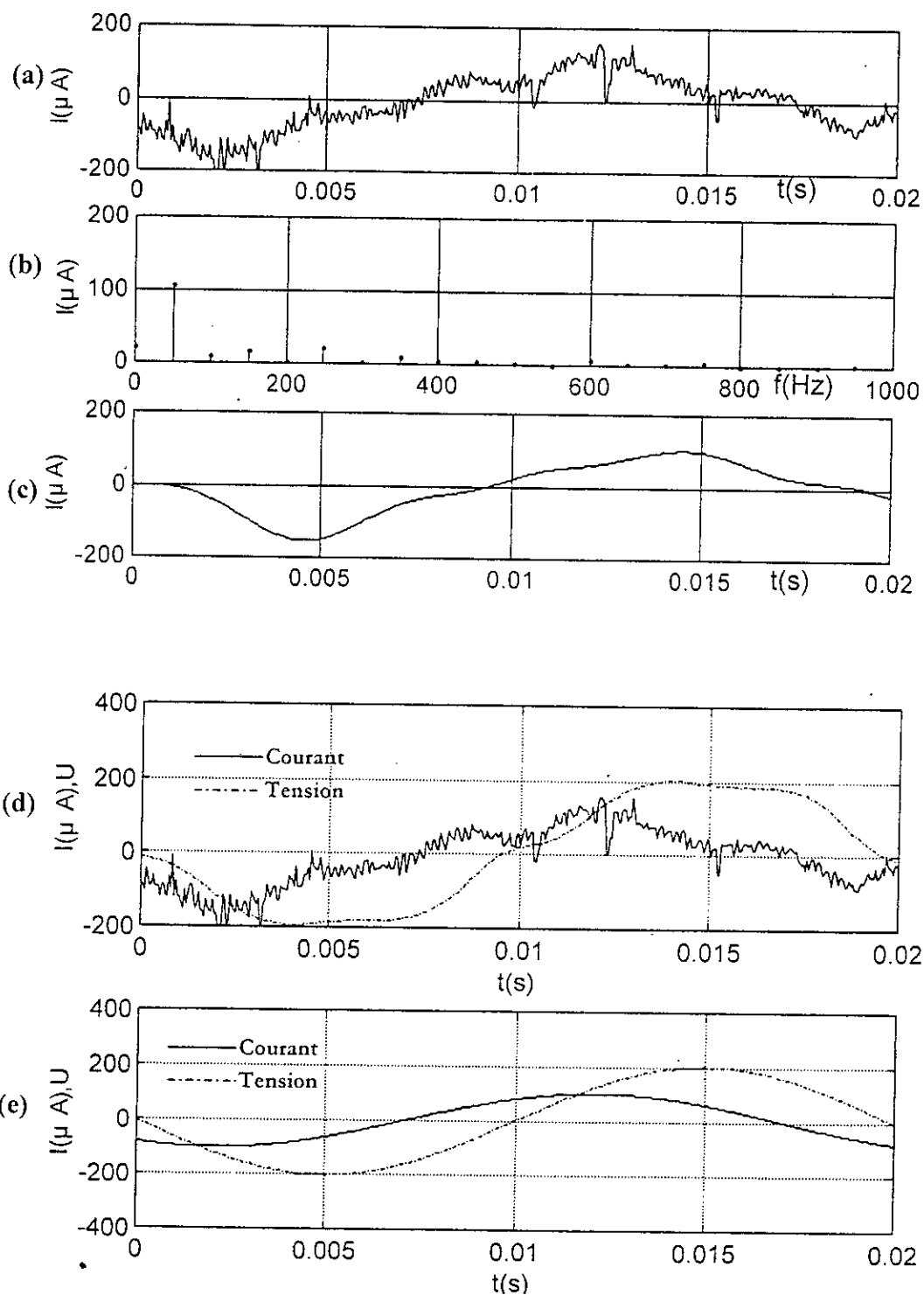
$\gamma=1000\mu\text{S}$, $L=18\text{cm}$, $U=20\text{kV}$.



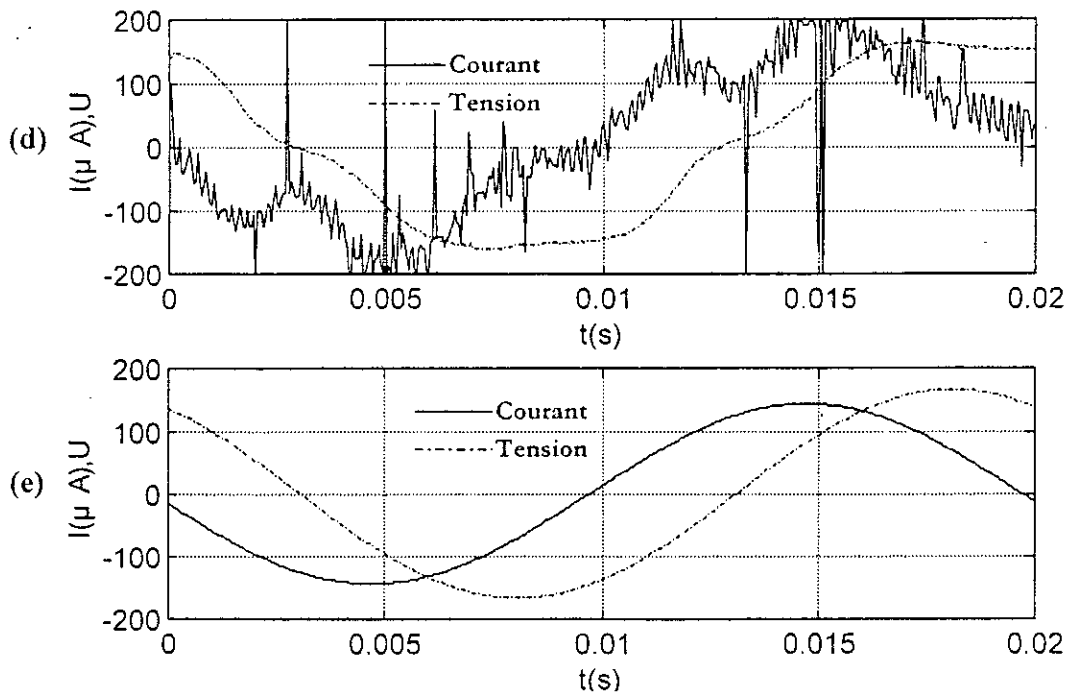
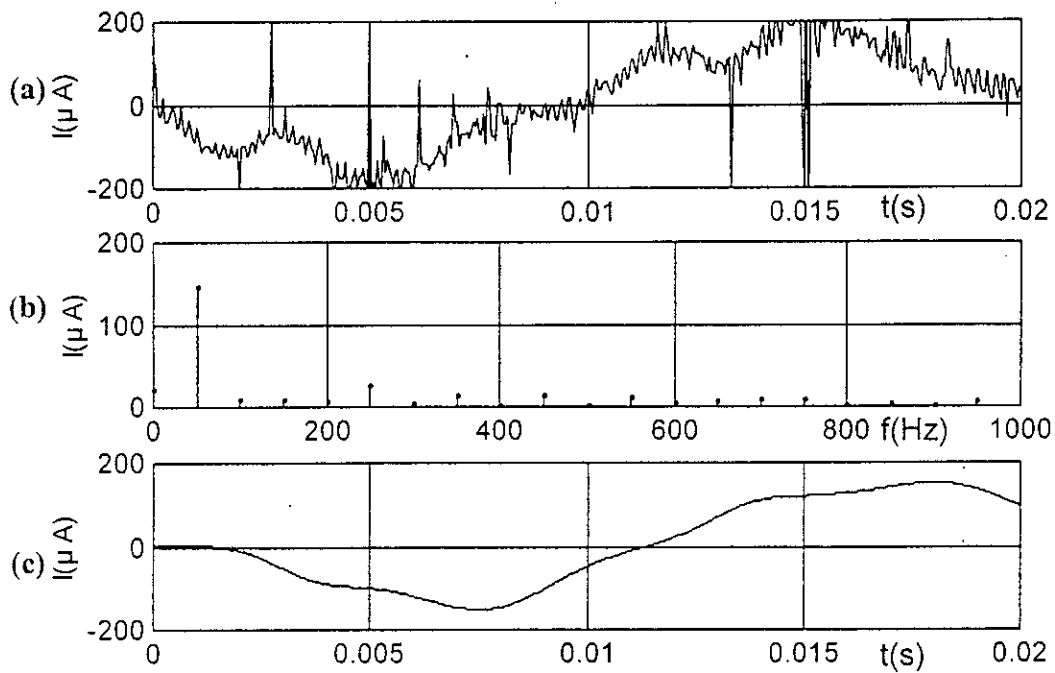
$\gamma = 1000 \mu S, L = 18 \text{ cm}, U = 30 \text{ kV}.$



$$\gamma = 1000 \mu\text{S}, L = 30 \text{cm}, U = 10 \text{kV}.$$

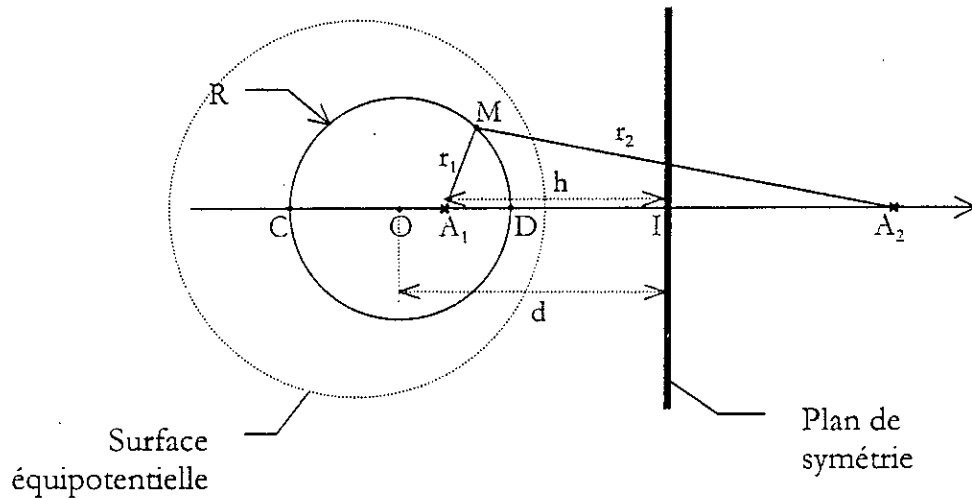


$$\gamma = 1000 \mu\text{S}, L = 30 \text{cm}, U = 20 \text{kV}.$$



$\gamma = 1000 \mu\text{S}$, $L = 30 \text{cm}$, $U = 30 \text{kV}$.

ANNEXE 3 : CALCUL DE LA CAPACITE ENTRE DEUX CYLINDRES PARALLELES



La méthode des charges fictive permet de remplacer les deux conducteurs cylindriques par deux conducteurs filiformes qui sont représenté dans le plan perpendiculaire par deux points A_1 et A_2 (figure ci-dessus).

Rappelons qu'un fil (Δ) de longueur e et de charge Q crée en un point N à la distance r :

- un champ $\vec{E}(N)$ tel que, d'après le théorème de Gauss où le flux à travers la surface cylindrique d'axe (Δ) et de rayon r est : $\phi = \oiint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{Q}{\epsilon}$, soit $\vec{E}(N) = \frac{Q}{2\pi\epsilon e} \frac{\vec{r}}{r^2}$.
- et un potentiel : $V(N) = - \int \vec{E} \cdot d\vec{r} = \frac{-Q}{2\pi\epsilon e} \ln\left(\frac{r}{r_0}\right)$

(en supposant qu'il existe r_0 , où $V(r=r_0)=0$).

Donc la superposition de deux fils parallèle (A_1), (A_2) de charges respectives (Q) et ($-Q$) crée en un point M de distance r_1 du fil (A_1) et r_2 du fil (A_2) le potentiel (figure ci-dessus) :

$$V(M) = \frac{-Q}{2\pi\epsilon e} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right) + \frac{Q}{2\pi\epsilon e} \ln\left(\frac{r_2}{r_0}\right) = \frac{Q}{2\pi\epsilon e} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Les surfaces équipotentielles, définies par $\frac{r_2}{r_1} = Cte$, forment donc un faisceau de surfaces cylindriques de révolution admettant comme droites limites les deux conducteurs filiformes. Donc, dans le plan perpendiculaire aux fils, elles forment un faisceau de cercles de centre O , de diamètre CD tel que (A_1, A_2, C, D) forme une division harmonique. Chaque cercle est caractérisé par :

- La position du centre O, $OI=d$ (I : milieu de A_1, A_2).
- Le rayon R du cercle équipotentiel.

On a pour une division harmonique :

$$\overline{OC}^2 = \overline{OD}^2 = \overline{OA_1} \cdot \overline{OA_2} \text{ soit } R^2 = (d-h)(d+h) = d^2 - h^2$$

$$\text{ou } h^2 = d^2 - R^2$$

$$\text{d'autre part, on a } \frac{\overline{CA_2}}{\overline{CA_1}} = -\frac{\overline{DA_2}}{\overline{DA_1}} = \frac{r_2}{r_1}, \text{ soit } \frac{r_2}{r_1} = \frac{\overline{CA_2} + \overline{DA_2}}{\overline{CA_1} - \overline{DA_1}} = \frac{2\overline{OA_2}}{\overline{CD}} = \frac{d+h}{R}$$

La tension U de la surface équipotentielle est donnée par :

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon\epsilon} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \text{ soit } U = \frac{Q}{2\pi\epsilon\epsilon} \ln\left(\frac{d+h}{R}\right)$$

$$\text{ou : } U = \frac{Q}{2\pi\epsilon\epsilon} \ln\left(\frac{d + \sqrt{d^2 - R^2}}{R}\right)$$

$$\text{ou : } U = \frac{Q}{2\pi\epsilon\epsilon} \ln\left(\frac{d}{R} + \sqrt{\left(\frac{d}{R}\right)^2 - 1}\right)$$

Finalement, la capacité constituée du plan de symétrie et du conducteur cylindrique est donnée par :

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon}{\ln\left(\frac{d}{R} + \sqrt{\left(\frac{d}{R}\right)^2 - 1}\right)}$$