

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

Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Electrique
LABORATOIRE DE HAUTE TENSION

Mémoire du projet de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

THÈME

**ESSAIS SUR ISOLATEURS POLLUES ET
MODELISATION**

Etudié par:

Nadir KHAIRON E

Abderrahmane Djillali ZELLOUTA

Proposé et dirigé par :

Pr. A.MEKHALDI

Promotion 2007/2008

Ecole Nationale Polytechnique
10, Avenue Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

Remerciement

Nous rendons grâce à dieu de nous avoir donné le courage et la patience afin de mener ce travail à terme.

Arrivé au terme de notre travail, nous tenons à exprimer vivement notre profonde gratitude à notre promoteur : Mr. A.MEKHALDI pour l'aide, le suivie et l'intérêt qu'il n'a cessé de nous apporter jusqu'à l'achèvement de notre travail.

Nous remercions, Mr. M.TEGUAR qui nous a généreusement fait profiter de sa connaissance en haute tension et pour son aide et ces conseils utiles.

Nous tenons également à remercier l'ensemble des membres du jury qui ont fait l'honneur de juger notre travail.

Enfin, nos chaleureux remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

ملخص:

نحلل في هذا العمل النتائج التجريبية المتعلقة بتأثير التلوث على تصرف المساحات العازلة. أجريت هذه التجارب على عوازل ملوثة طبيعيًا، وأخرى معرضة لتلوث مصطنع. تتم معالجة التيار المتسرب بواسطة خوارزمية بهدف تحديد ذروته، طيفه الترددي، مقدار تشوّهه، و كذا فرق طوره بالنسبة إلى التوثر المطبق. من أجل إيجاد العلاقة التي تربط المقادير المُقاسة، استعملنا طريقتي الانحدار الخطية المتعددة و اللاخطية. تعتمد هاتان الطريقتان على طريقة المربعات الصغرى. بهدف التنبؤ بتوثر إحاطة عازل ملوث، نقدم نموذج ديناميكي للإحاطة تحت توثر متناوب.

الكلمات المفتاحية : عازل، تلوث، التيار المتسرب، الطيف الترددي، الانحدار الخطي المتعدد، الانحدار اللاخطي، طريقة المربعات الصغرى، الإحاطة.

Résumé :

Dans ce travail nous analysons les résultats expérimentaux concernant l'influence de la pollution sur le comportement des surfaces isolantes. Ces essais sont effectués sur des isolateurs pollués sur site ainsi que des isolateurs soumis à la pollution artificielle. Le signal de courant de fuite est traité par un algorithme, dans le but de déterminer sa crête, son spectre fréquentiel, son taux de distorsion, ainsi son déphasage par rapport à la tension appliquée. Afin d'obtenir les relations existantes entre les grandeurs mesurées, nous utilisons la régression linéaire multiple et la régression non linéaire qui sont basées sur la méthode des moindres carrés. Dans le but de prédire la tension de contournement pour un isolateur pollué, nous présentons un modèle dynamique de contournement sous tension alternative.

Mot clés : Isolateur, pollution, courant de fuite, spectre fréquentiel, régression linéaire multiple, régression non linéaire, méthode des moindres carrés, contournement.

Abstract:

In this work we analyze the experimental results concerning the influence of pollution on the behavior of insulating surfaces, these tests are carried on polluted insulators on site as well as insulators subjected to artificial pollution. The signal of leakage current will be treated by an algorithm to determinate its peak, its frequential spectrum, its rate of distortion, thus its phase angle in comparison with the applied voltage. In order to obtain the relations existing between the measured sizes, we use linear multiple regression and nonlinear regression whose are based on the method of least squares estimation. To predict the flashover voltage for a polluted insulator, we present a dynamic model of flashover under alternating voltage.

Key word: Insulator, pollution, leakage current, frequential spectrum, linear multiple regression, nonlinear regression, method of least squares estimation, flashover.

SOMMAIRE

Introduction Générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Phénomène de pollution des isolateurs de haute tension

I.1. Introduction.....	3
I.2. Définitions.....	3
I.3. Formation des couches polluantes.....	4
I.4. Sources de pollution.....	4
I.4.1. Pollution naturelle.....	5
I.4.2. Pollution industriel.....	5
I.4.3. Pollution domestique.....	5
I.5. Impact de la pollution.....	5
I.5.1. Arc non localisé.....	5
I.5.2. Arc fixe.....	6
I.5.3. Contournement des isolateurs pollués.....	6
I.6. Sévérité de pollution d'un site.....	7
I.6.1. Mesure de la sévérité de pollution d'un site.....	7
I.6.1.1. Densité de dépôt de sel équivalent (DDSE).....	7
I.6.1.2. Conductance superficielle.....	8
I.6.1.3. Mesure optique.....	8
I.6.1.4. Mesure de la pollution de l'air.....	9
I.6.1.5. Densité de dépôt non soluble.....	9
I.6.2. Classification des sites pollués.....	9
I.7. Méthode d'essai sous pollution.....	10
I.7.1. Essai sous pollution naturelle.....	10
I.7.2. Essai sous pollution artificielle.....	11
I.7.2.1. Méthode des couches solides.....	11
I.7.2.2. Méthode du brouillard salin.....	11
I.7.2.3. Méthode la pollution liquide.....	12

I.8. Technique de lutte contre la pollution.....	12
I.9. Conclusion.....	14

Chapitre II : Modèle théorique de régression

II.1. Introduction.....	15
II.2. Régression Linéaire Multiple.....	15
II.2.1. Présentation du modèle.....	15
II.2.2. Estimation des paramètres par la méthode des moindres carrés.....	16
II.2.2.1. Présentation matricielle du modèle.....	16
II.2.2.2. Estimation des paramètres du modèle.....	16
II.2.3. Les hypothèses du modèle de régression linéaire multiple.....	17
II.2.3.1. Hypothèses probabilistes.....	17
II.2.3.2. Test des hypothèses probabilistes.....	18
II.2.3.2.1. Test de la variance des erreurs.....	18
II.2.3.2.2. Test de normalité (Q-Q Plot et Droite de Henry).....	18
II.2.3.2.3. Test de corrélation entre les erreurs.....	19
II.2.4. Tests de signification pour les paramètres estimés.....	20
II.2.5. Analyse de la variance.....	22
II.2.5.1. Décomposition de la variance.....	22
II.2.5.2. Tests de signification de la régression.....	24
II.2.6. Prédiction avec les modèles de régression linéaire multiple.....	25
II.2.6.1. Intervalle de confiance de la valeur moyenne de y	26
II.2.6.2. Intervalle de prédiction pour y	26
II.2.7. Coefficient de détermination (R^2).....	27
II.2.7.1. Définition.....	27
II.2.7.2. Propriété.....	28
II.2.7.3. Coefficient de détermination ajusté ($R^2(\text{ajusté})$).....	29
II.2.8. Le critère PRESS.....	29
II.2.9. Linéarisation des modèles.....	30
II.2.10. Résumé de l'analyse de régression.....	30
II.3. Modèle de régression non linéaire.....	31
II.3.1. Introduction.....	31
II.3.2. Présentation du modèle.....	31

II.3.3. Les hypothèses du modèle de régression non linéaire.....	31
II.3.4. Calcul de l'estimateur des moindres carrés non linéaire.....	31
II.3.5. Intervalles de confiance et tests d'hypothèse pour les paramètres estimés.....	33
II.3.6. Prédiction avec un modèle de régression non linéaire.....	34
II.4. Conclusion.....	35

Chapitre III : Traitement du signal de courant de fuite

III.1. Introduction.....	36
III.2. Fondement Théorique.....	36
III.2.1. L'échantillonnage.....	36
III.2.2. L'Analyse Spectrale.....	37
III.2.3. Le taux de distorsion.....	37
III.2.4 Filtrage Numérique.....	38
III.3. Simulation Numérique.....	39
IV.4. Application.....	40
IV.5. Conclusion.....	43

Chapitre IV : Techniques Expérimentales

IV.1. Introduction.....	44
IV.2. Dispositif expérimental.....	44
IV.2.1. Circuit d'essais au laboratoire de l'ENP.....	44
IV.2.2. Objet d'essai.....	45
IV.3. Essai sous pollution naturelle.....	46
IV.3.1. Mesure de la tension de contournement à l'état sec.....	48
IV.3.2. Mesure de la tension de contournement à l'état humide.....	48
IV.3.3. Visualisation des formes du courant de fuite et de la tension appliquée.....	48
IV.3.4. Visualisation de l'évolution du courant de fuite en fonction du temps.....	49
IV.4. Essais sous pollution artificielle.....	49
IV.4.1. Mesure de la tension de contournement pour différentes conductivités.....	50
IV.4.2. Visualisation des formes du courant de fuite et de la tension appliquée.....	50
IV.4.3. Visualisation de l'évolution du courant de fuite en fonction du temps.....	50
VI.5. Conclusion.....	51

Chapitre V : Résultats d'essais et application

V.1. Introduction.....	52
V.2. Essais de contournement sur les isolateurs pollués sur site.....	52
V.3. Modélisation par la méthode de régression.....	53
V.3.1. Essais sous pollution naturelle.....	53
V.3.1.1. Modèle courant de fuite en fonction de la tension appliquée.....	53
V.3.2. Essais sous pollution artificielle.....	61
V.3.2.1. Modèle tension de contournement en fonction de la conductivité de la couche polluante (par la régression linéaire).....	61
V.3.2.2. Modèle tension de contournement en fonction de la conductivité de la couche polluante (par la régression non linéaire).....	61
V.3.2.3. Modèle courant de fuite en fonction de la tension appliquée (par la régression linéaire).....	66
V.3.2.4. Modèle courant de fuite en fonction de la tension appliquée (par la régression non linéaire).....	67
V.3.2.5. Modèle courant de fuite en fonction de la tension appliquée et la conductivité volumique (par la régression linéaire).....	67
V.4. Traitement du signal de courant de fuite.....	76
V.4.1. Cas d'une pollution naturelle.....	76
V.4.2. Cas d'une pollution artificielle.....	85
V.4.3. Interprétation.....	92
V.5. Conclusion.....	94

Chapitre VI : Modèle dynamique de contournement sous tension alternative

VI.1. Introduction.....	95
VI.2. Elaboration du modèle dynamique.....	95
VI.2.1. Hypothèses simplificatrices.....	95
VI.2.2. Circuit électrique équivalent.....	96
VI.2.3. Critère de propagation.....	96
VI.2.4. Paramètres du circuit électrique.....	96
VI.2.4.1. Equation du circuit.....	96
VI.2.4.2. Caractéristiques de la couche de pollution.....	97

Sommaire

VI.2.4.3. Caractéristiques de l'arc.....	97
VI.2.5. Vitesse de propagation.....	98
VI.2.6. Contournement.....	98
VI.3. Simulation numérique.....	98
VI.4. Validation.....	101
VI.5. Evolution temporelle.....	101
I.6. Conclusion.....	109

Conclusion Générale.....	110
---------------------------------	------------

Annexes

Annexe I.....	01
Annexe II.....	04

Introduction

Générale

Introduction Générale

De nos jours, l'énergie électrique joue un rôle très important dans le développement et l'évolution de l'industrie et l'économie du pays. De ce fait, il faut assurer, à tout instant, un bon équilibre entre la demande croissante et la production de l'énergie. C'est pour cela, qu'une très grande part d'importance est attachée aux réseaux électriques, principalement aux lignes de haute tension [1].

Les isolateurs des lignes et de poste de transport d'énergie électrique sont le siège de plusieurs contraintes. Entre autres, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie [2].

Dans les conditions normales d'exploitation, les isolateurs de haute tension ne tardent pas à se recouvrir de différents types de pollution. Lorsqu'ils sont secs, les polluants n'engendrent pas de dégradation de la rigidité électrique des isolateurs. Cependant, l'humidification d'un dépôt solide accumulé à la surface des isolateurs provoque la dissolution des sels et la formation d'une couche électrolytique caractéristique du phénomène de pollution. Un courant de fuite prend naissance, conduisant par effet joule à l'échauffement de la couche de pollution et par conséquent à son assèchement partiel, une partie importante de la tension appliquée sera reportée aux bornes de cette bande sèche engendrant, si le champ local dépasse un certain seuil, la création d'un arc électrique. Sous cette condition, cet arc peut s'allonger jusqu'à provoquer le contournement total du système isolant. Les conséquences du contournement vont de la dégradation de la surface de l'isolateur jusqu'à la mise hors service de l'ensemble de l'isolation électrique [3].

Le recours aux essais expérimentaux est indispensable pour juger les performances de différents types d'isolateurs. Ces essais sont effectués en préférence sous les conditions naturelles de pollution ayant l'avantage de prendre en considération toutes les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur avec toute leur complexité. Cependant, les essais sur site ont l'inconvénient de nécessiter plusieurs années pour permettre d'étudier le comportement des isolateurs essayés [4]. A cet égard, de nombreuses méthodes d'essai sous pollution artificielle en laboratoire ont été proposées. Cette variété se comprend aisément quand on se réfère aux objectifs que l'on peut se proposer d'atteindre [5].

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

Nous entamons le premier chapitre par une présentation des phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport d'énergie électrique. Nous exposons par la suite, certaines méthodes de mesures de la sévérité de pollution des sites, quelques méthodes d'essais sous pollution naturelle et artificielle, ainsi que différentes techniques de lutte contre la pollution.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une approche théorique sur la méthode de modélisation par régression, en utilisant deux méthodes, linéaire multiple et non linéaire.

Dans le troisième chapitre, nous faisons recours à la méthode de traitement numérique du signal, à savoir l'analyse spectrale et le filtrage numérique, afin d'améliorer la manière d'exploitation des mesures requises. C'est dans cette optique, que nous avons élaboré un algorithme permettant de traiter le signal du courant de fuite, et d'obtenir sa crête, son spectre, son taux de distorsion, et son déphasage par rapport à la tension appliquée.

Dans le quatrième chapitre, nous décrivons en détail les procédures que nous suivons durant nos essais au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique. Ces essais sont effectués d'une part sur des isolateurs pollués sur site, et d'autre part sur des isolateurs soumis à une pollution artificielle.

Dans le cinquième chapitre, nous présentons les résultats des essais, en utilisant la méthode de régression pour modéliser les relations qui existent entre les différentes grandeurs mesurées, ainsi que les résultats du traitement numérique des signaux (courant et tension).

Dans le sixième chapitre, nous proposons un modèle dynamique de contournement sous tension alternative, dans le but d'évaluer la tension de contournement. Les résultats obtenus sont comparés aux résultats expérimentaux. Ce modèle permet de décrire l'évolution temporelle des différents grandeurs physiques, à savoir le courant de fuite, la vitesse de propagation, le champ dans la pollution et au pied de l'arc, la résistance de la pollution et celle de l'arc, la puissance fournie par la source, et celle transférée dans la décharge.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale sous forme de synthèse globale de notre travail.

Chapitre I

Phénomène de pollution des isolateurs de Haute Tension

I.1. Introduction

La pollution des isolateurs est l'une des contraintes les plus importantes dont, il faut tenir compte dans l'exploitation des lignes de haute tension.

En effet la pollution qui recouvre les surfaces isolantes diminue considérablement la tension de tenue des isolateurs, et conduit dans des cas critiques au contournement des isolateurs, ce qui constitue la situation la plus grave, provoquant la mise hors service de la ligne.

En effet, pour obtenir un dimensionnement convenable de l'isolation, il est nécessaire de connaître les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs.

I.2. Définitions

I.2.1. Décharge disruptive

Phénomène associé à une défaillance de l'isolation sous l'effet de contrainte électrique, avec chute de la tension et passage d'un courant [6]. Pour les diélectriques gazeux on parlera de l'amorçage ; claquage pour les liquides et enfin de perforation pour les solides.

I.2.2. Contournement

Décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne ce dernier. Dans notre cas, c'est de l'isolateur qu'il s'agit. Aussi le terme contournement est employé pour des décharges disruptives par amorçage dans l'air entourant l'isolateur [1,6].

I.2.3. Tension de Contournement

C'est le niveau de tension le plus bas au-delà duquel les arcs électriques joignent les deux électrodes [1].

I.2.4. Tension de tenue

C'est le niveau de tension le plus important que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive [7].

I.2.5. Courant de fuite

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

I.2.6. Courant de fuite critique

C'est le courant minimal nécessaire pour provoquer le contournement total de l'isolateur [8].

I.2.7. Conductance superficielle

La conductance superficielle est le rapport du courant de fuite traversant l'isolateur à la tension appliquée. Elle caractérise l'état global de la surface d'isolateur [7].

I.3. Formation des couches polluantes

La disposition des isolateurs dans les lignes forme un obstacle à l'écoulement d'un air transportant de la poussière. Une couche de pollution se développe progressivement sur la surface de ceux-ci. De nombreuses observations ont montré que la répartition de la pollution le long des isolateurs est non-uniforme [9].

La disposition de la pollution dépend de la position de la chaîne (verticale, horizontale ou inclinée), et le profil de l'isolateur. Généralement, la pollution se concentre sur les éléments de la chaîne situés du côté du conducteur de haute tension et dans les parties protégées contre les facteurs d'auto-nettoyage [10].

I.4. Sources de pollution

La nature de la pollution dépend des facteurs géographiques et climatiques. Les diverses sources de pollution peuvent être regroupées selon leurs origines en trois catégories, la pollution naturelle, la pollution industrielle et la pollution domestique.

I.4.1. Pollution naturelle

Dans les installations en bordure de la mer, les embruns portés par le vent déposent progressivement sur les isolateurs une couche de sel. Cette couche humidifiée par les embruns devient conductrice, ce qui donne naissance à un courant de fuite et des arcs qui peuvent se développer jusqu'à provoquer le contournement de l'isolateur [11].

Dans les régions désertiques, la pollution est due aux tempêtes de sable. La densité de sel de sable est très élevée. La rosée matinale est la seule source d'humidification dans les régions désertiques. Cette humidification favorise la conduction sur la surface isolante.

I.4.2. Pollution industrielle

Au voisinage des usines, les isolateurs se recouvrent de poussière faiblement conductrice. La dissolution des sels par humidification provoque la formation d'une couche électrolytique, ce qui abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs [12].

I.4.3. Pollution domestique

Cette pollution est due aux fumées et au gaz échappant des appareils des habitations et les moyens de transport.

On note que la pollution est généralement mixte; elle résulte de la combinaison de plusieurs sources [9].

I.5. Impact de la pollution

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs engendrent une conductivité électrique superficielle. Celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. La tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

I.5.1. Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement puis, se réamorçage à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courants de fuites entraînant une petite perte d'énergie, généralement supportable par le réseau de distribution [2].

I.5.2. Arc fixe

L'arc électrique se fixe sur la surface de l'isolateur, soit en s'y maintenant (courant continu) soit, en se réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner par effet thermique une dégradation du support isolant de l'élément défaillant [1,3].

I.5.3. Contournement des isolateurs pollués

Généralement, les principaux phénomènes conduisant au contournement d'un isolateur pollué, soumis à la tension de service, comprenant la formation d'une couche électrolytique conductrice par humidification du dépôt de pollution sur la surface de l'isolateur, ce qui entraîne l'apparition d'un courant de fuite accompagné de la formation d'une bande sèche et d'arcs partiels, et la propagation de l'arc qui peut couvrir tout l'isolateur.

Le contournement des isolateurs sous pollution peut être décomposé en quatre étapes distinctes.

Etape 1: Dépôt de la pollution

Les particules du dépôt sont apportées par le vent et se concentrent entre les nervures ou autour du capot. Les facteurs d'accumulation sont les suivants [3]:

- ✓ La nature, le poids et la taille des particules polluantes.
- ✓ La distance de l'isolateur par rapport à la source de pollution et par rapport au sol d'où peut provenir des poussières.
- ✓ La vitesse du vent.
- ✓ L'orientation de la chaîne. La forme de l'isolateur et son aptitude à l'auto nettoyage par les fortes pluies et vents.

Etape 2: Humidification de la pollution

Le brouillard et la pluie fine humidifient la couche polluante, provoquant la dissolution des sels contenus dans le dépôt et créant un électrolyte conducteur sur la surface de l'isolateur. Un courant de fuite prend naissance.

Pendant le cycle d'humidification, le courant de fuite augmente jusqu'à une valeur maximale, mais diminue s'il y a assèchement. Le niveau du courant de fuite dépend du temps, de la nature et de la quantité des sels.

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

Par effet joule, la température s'élève, l'eau s'évapore et le dépôt devient moins conducteur. Le courant de fuite est alors très réduit en amplitude par la présence d'une bande sèche. La répartition du potentiel sur l'isolateur est modifiée par cette bande sèche, car la plus grande portion du potentiel électrique se trouve reportée à ses bornes. Si cette bande sèche est insuffisante pour supporter le potentiel correspondant, un arc est créé [3].

Etape 4: Comportement des arcs

La résistance du dépôt humidifié non court-circuitée par l'arc limite le courant et la longueur de l'arc. Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra, la bande sèche s'humidifiera à nouveau et le mécanisme se répètera encore. Tant que le courant de fuite n'excède pas "le courant critique" correspondant à "une longueur critique" de l'arc, cette situation reste stable. Dans le cas contraire, le contournement de l'isolateur peut survenir [2].

I.6. Sévérité de pollution d'un site

Le dimensionnement de l'isolation externe vis-à-vis de la pollution pose un certain nombre de problèmes spécifiques. L'un des plus fondamentaux est la détermination de la sévérité de la pollution là où l'isolation doit être installée [13].

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

I.6.1. Mesure de la sévérité de pollution d'un site

Dans ce qui suit, nous passerons en revue différentes méthodes de mesure largement employées, basées sur des théories et des données expérimentales, dont certaines sont encore controversées [13]. Dans ce cas, les principales méthodes qui ont été proposées pour mesurer la sévérité d'un site sont :

I.6.1.1. Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)

La DDSE est le dépôt équivalent exprimé en mg de sel par cm^2 de la surface d'un isolateur, qui a une conductivité électrique égale à celle du dépôt réel lorsqu'il est dissous dans la même quantité d'eau.

Des échantillons de pollution sont prélevés à la surface de l'isolateur ou d'autres collecteurs. Le dépôt est récupéré par lavage en utilisant un matériau absorbant (coton, mouchoir en papier,...) et de l'eau distillée. A partir de la conductivité de la solution obtenue de la surface utilisée de l'isolateur, du volume d'eau et de sa température, on peut calculer la DDSE.

Pour déterminer la sévérité du site, les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante pour obtenir les niveaux entre les périodes de lavage naturelle.

Cette méthode permet d'établir une relation avec les méthodes d'essais sous pollution artificielle, ce qui est un avantage à prendre en considération. Elle présente en outre certains inconvénients tels que les fréquences de prélèvements, les fluctuations de l'humidité et l'amorçage des arcs électriques qui ne sont pas pris en compte [2].

I.6.1.2. Conductance superficielle

La conductance superficielle des isolateurs témoins, installés sur site, est obtenue à partir du rapport du courant électrique qui traverse l'isolateur, à la tension d'alimentation de l'isolateur témoin (tension de service) $G = I/V$. La conductivité superficielle est obtenue en multipliant la conductance G par un facteur de forme de l'isolateur [3].

Cette méthode est donc un paramètre qui 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.

Ainsi, la mesure de la conductance superficielle est une méthode satisfaisante pour évaluer la sévérité de la pollution d'un site. Elle peut être représentative d'un type de site étudié, mais en général elle présente des résultats dispersés [2,9].

I.6.1.3. Mesure optique

Dans le but de déterminer l'épaisseur de la couche polluante disposée sur la surface de l'isolateur, un dispositif à rayon laser permet à partir de rayons réfléchis (amplitude, décalage de phase, etc.) de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche [2]. La mesure de sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche.

I.6.1.4. Mesure de la pollution de l'air

Les mesures de la 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 dans un site.

Les méthodes de mesures adoptées partent du principe qu'en ce qui concerne le phénomène de contournement, une corrélation peut être établie entre l'analyse physico-chimique de l'air d'un site donné et la sévérité de la pollution de ce même site [1,14].

I.6.1.5. Densité du dépôt non soluble (DDNS)

Elle correspond à la quantité de dépôts polluants non solubles présents dans une couche de pollution. Elle s'exprime en mg/cm^2 .

La mesure de la DDNS s'accompagne souvent d'une analyse physico-chimique de la pollution, au terme de laquelle les sources polluantes peuvent être identifiées [10].

I.6.2. Classification des sites pollués

Pour définir l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la salinité et les niveaux de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été définies selon la norme CEI 81-5 qui sont : faible, moyenne, forte et très forte (Tab.I.1) [15,16].

Faible $0.06 \text{ mg}/\text{cm}^2$	<ul style="list-style-type: none"> • Zones sans industries et avec faible densité d'habitations équipées d'installation de chauffage • Zones avec faible densité d'industries ou d'habitations mais soumise fréquemment aux vents et/ou pluies. • Régions agricoles. • Régions montagneuses.
Moyenne $0.20\text{mg}/\text{cm}^2$	<ul style="list-style-type: none"> • Zones avec industries ne produisant pas de fumées particulièrement polluantes et/ou avec une densité moyenne d'habitation équipées d'installation de chauffage. • Zones à forte densité d'habitation et/ou d'industries mais soumises fréquemment à des chutes de pluies. • Zones exposées aux vents de mer, mais trop proches de la cote.

Forte 0.60mg/cm ²	<ul style="list-style-type: none"> • Zones avec forte densité d'industries et banlieues de grandes • Villes avec forte densité d'installation de chauffage polluantes. • Zones situées près de la mer, ou en tout cas exposées à des vents relativement fort venant de la mer.
Très forte > 0.60 mg/cm ²	<ul style="list-style-type: none"> • Zones généralement peu étendues, soumises à des fumées industrielles produisant des poussières conductrices. • Zones généralement peu étendues, très proches de la cote et exposées aux embruns ou au vent fort et polluant venant de la mer. • Zones désertiques caractérisées par de longues périodes sans pluie, exposées aux vents forts transportant de sable et du sel soumis à une condensation régulière.

Tab.I.1 : Classement de degré de pollution selon CEI 815.

I.7. Méthodes d'essais sous pollution

Afin de comparer les performances de divers types d'isolateurs et de sélectionner ceux qui présentent le meilleur comportement sous pollution, il est nécessaire de les soumettre à des essais. Pour effectuer ces essais, nous distinguons deux principales méthodes d'essai à savoir les essais sous pollution naturelle et les essais sous pollution artificielle. Ces essais peuvent être effectués dans les conditions naturelles (sur site) ou au laboratoire [1].

I.7.1. Essai sous pollution naturelle

Ces essais consistent à installer dans différents sites pollués, des stations dans lesquelles on suit le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs. Comme la pollution naturelle est un phénomène à évolution lent, l'essai sous pollution naturelle peut prendre jusqu'à deux ans ou trois ans. La qualité d'isolement des isolateurs placés sous la même tension est déterminée en fonction de temps au contournement.

La diversité de la nature des agents polluants impose ce type d'essais pour étudier séparément les principales sources de pollution et leurs impacts sur l'isolement des ouvrages. Cependant, l'inconvénient majeur de ces essais est la durée des expériences qui est relativement longue. C'est pourquoi des méthodes de laboratoire furent proposées et sont largement utilisées [1].

I.7.2. Essais sous pollution artificielle

Les essais au laboratoire sont basés sur la reproduction de la couche de pollution par des solutions réparties à la surface de l'isolateur et dont la conductivité peut être modifiée. Afin de valider les essais sous pollution artificielle, il a été nécessaire de comparer les performances des isolateurs testés au laboratoire à celles des isolateurs en exploitation dans des conditions naturelles de pollution. Une première approche consiste à rechercher une méthode qui simule le mieux possible les conditions naturelles de pollution, en tenant compte de la répartition non uniforme de la pollution. Une deuxième approche consiste à rechercher une méthode de laboratoire susceptible de fournir des résultats reproductibles, afin de faciliter la comparaison des performances des différents types d'isolateurs [1,14].

I.7.2.1. Méthode des couches solides

Dans ces méthodes la surface isolante est recouverte par pulvérisation d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte. La conductivité de cette suspension est réglée par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium.

Si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérité est défini par la densité de dépôt de sel en mg/cm^2 . Si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini par la conductivité de la couche polluante [6]. Certains chercheurs ont utilisé une peinture semi-conductrice comme agent polluant [17].

I.7.2.2. Méthode du brouillard salin

La surface isolante est alimentée par une tension de service, maintenue constante durant tous les essais et soumise à un brouillard salin. La solution saline, utilisée dans la méthode du brouillard salin, représente assez bien la pollution marine contenant un peu de matière insoluble, ou bien la pollution industrielle ayant une couche de pollution relativement mince.

Le degré de salinité exprimé en kg de sel par m^3 de solution, définit le paramètre de sévérité. Les valeurs de salinité appliquée en référence aux conditions de pollution sont choisies selon une progression allant de 2,5 à 160 kg/m^3 [17].

I.7.2.3. Méthode de la pollution liquide

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

Après quelques minutes d'égouttages, on applique la tension d'essai à l'isolateur. Il est important de signaler que la couche polluante n'est pas humidifiée en cours d'essai. Ainsi, après quelques minutes d'essai, les courants de fuite assèchent la couche et la probabilité de contournement décroît rapidement [2].

I.8. Techniques de lutte contre la pollution

Pour un niveau de pollution donné, une bonne conception des lignes basée sur des mesures de sévérité de pollution permet de prévenir, autant que possible, les incidents lorsque la ligne est en service. Mais un changement dans les données d'un site est toujours possible, c'est-à-dire même un dimensionnement initialement correct peut s'avérer insuffisant dans certaines conditions [13]. Les différentes méthodes utilisées consistent à :

I.8.1. Allongement de la ligne de fuite

Il 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.
- ✓ L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [3,18].

I.8.2. Utilisation des isolateurs plats (auto-nettoyables)

L'utilisation d'isolateurs plats conduit à la diminution de la ligne de fuite des isolateurs. En effet, ces derniers 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 [10].

I.8.3. Graissage des isolateurs (couches hydrophobes)

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 graissage est pénible, longue et coûteuse. Elle nécessite, par ailleurs, une interruption de service [13].

I.8.4. Revêtements à base de 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, grâce à ses propriétés hydrophobes, ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre sa longévité est, en général, nettement supérieure à celle du graissage [18].

I.8.5. Nettoyages sous ou hors tension

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. Comme ces méthodes sont utilisées hors tension, elles entraînent nécessairement des interruptions de service parfois assez longues.

Le lavage sous tension permet d'éviter ces coupures. Dans son principe, ce type de lavage permet de garder propre l'isolateur. 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.

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 [17].

I.9. Conclusion

La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension.

L'amorçage à la surface d'un isolateur pollué dépend de plusieurs paramètres. Pour représenter les conditions naturelles qui provoquent l'amorçage sous pollution, plusieurs techniques d'essais au laboratoire ont été mises en œuvre.

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

Pour mieux dimensionner les chaînes d'isolateurs, il est indispensable de connaître la sévérité de la pollution des sites concernés. La connaissance de cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation.

Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (graissage, lavage, nouveaux types d'isolateurs, revêtements hydrophobes...), permettent de disposer aujourd'hui de solutions curatives à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants sur le réseau.

Chapitre II

Modèle Théorique de Régression

II.1. Introduction

Il est fréquent de s'interroger sur la relation qui peut exister entre deux grandeurs en particulier dans les problèmes de prévision et d'estimation.

On essaye de déterminer la relation statistique qui existe entre les deux grandeurs X et Y . Ce type d'analyse s'appelle analyse de régression. On considère que la variation de l'une des deux variables (par exemple X) explique celle de l'autre (par exemple Y).

Dans ce type d'analyse, on fixe a priori les valeurs de X , X n'est donc pas une variable aléatoire. Mais la deuxième grandeur Y , est une variable aléatoire et sa distribution est influencée par la valeur de X . Dans ce cas, X est dite variable explicative ou variable indépendante, et Y est dite variable expliquée ou variable dépendante. On a alors, du point de vue statistique, une relation de cause à effet. Le problème sera d'identifier cette relation.

II.2. Régression Linéaire Multiple

II.2.1. Présentation du modèle

Afin de construire le modèle, on considère $k - 1$ variables explicatives indépendantes : x_1, x_2, \dots, x_{k-1} , à valeurs fixées, donc non aléatoires, et une variable dépendante aléatoire y influencée par les $k - 1$ variables explicatives. Le modèle de régression linéaire multiple est donné par l'équation suivante :

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k-1} \beta_j x_j + u \quad (\text{II.1})$$

Où : $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{k-1}$ sont les paramètres inconnus du modèle, et u est une perturbation aléatoire.

Supposant que nous ayons n observations indépendantes y_1, y_2, \dots, y_n de la variable expliquée y , alors chaque observation est décrite par le modèle :

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^{k-1} \beta_j x_{ij} + u_i \quad i = 1, \dots, n \quad (\text{II.2})$$

II.2.2. Estimation des paramètres par la méthode des moindres carrés

Le problème de la détermination des paramètres du modèle, appelés coefficients de régression, se ramène au problème de l'estimation statistique de paramètres inconnus. La méthode la plus utilisée dans ce cas est la méthode des moindres carrés.

Supposons que : $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_{k-1}$ soient des estimateurs de : $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{k-1}$, et posons :

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \sum_{j=1}^{k-1} \hat{\beta}_j x_{ij} \quad i = 1, \dots, n \quad (\text{II.3})$$

Où : \hat{y}_i est la valeur estimée de y_i

Le principe de la méthode des moindres carrés consiste à trouver les paramètres $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_{k-1}$ qui rendent minimum la somme des carrés des résidus :

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{II.4})$$

II.2.2.1. Présentation matricielle du modèle

Afin de faciliter les calculs, nous utilisons la présentation matricielle du modèle. On représente en général les données sous forme d'un tableau à n lignes et $k + 1$ colonnes, la première colonne constituant une matrice à une colonne représentant Y , l'ensemble des k autres colonnes constituant une matrice X à n lignes et k colonnes [19].

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k-1} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2k-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk-1} \end{pmatrix}, \quad \hat{\beta} = \begin{pmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_{k-1} \end{pmatrix}$$

Donc le modèle (II.3) peut s'écrire sous la forme : $\hat{Y} = X\hat{\beta}$. Nous notons que la matrice transposée d'une matrice A est notée par A'

II.2.2.2. Estimation des paramètres du modèle

On définit le vecteur e des résidus : $e = Y - X\hat{\beta}$.

Pour calculer le vecteur $\hat{\beta}$, il suffira de minimiser la quantité $e'e$, ou e' est la transposée du vecteur e .

$$e'e = (Y - X\hat{\beta})'(Y - X\hat{\beta}) = (Y' - \hat{\beta}'X')(Y - X\hat{\beta})$$

$$e'e = Y'Y - \hat{\beta}'X'Y - Y'X\hat{\beta} + \hat{\beta}'(X'X)\hat{\beta} = Y'Y - 2Y'X\hat{\beta} + \hat{\beta}'(X'X)\hat{\beta}$$

Ainsi,

$$\frac{\partial(e'e)}{\partial\hat{\beta}} = 0 \Leftrightarrow -2X'Y + 2X'X\hat{\beta} = 0 \Leftrightarrow X'Y = X'X\hat{\beta}$$

Ce qui donne :
$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y \quad (\text{II.5})$$

Lorsqu'il n'y a qu'une seule variable explicative, la régression linéaire est dite simple. Dans ce cas particulier les deux coefficients de la régression sont donnés par (Annexe I.1) :

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1\bar{x} \quad \hat{\beta}_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

Avec :

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \quad (\text{II.6})$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y} \quad (\text{II.7})$$

II.2.3. Les hypothèses du modèle de régression linéaire multiple

II.2.3.1. Hypothèses probabilistes

Afin d'estimer les paramètres de l'équation de régression, aucune hypothèse sur les distributions des perturbations aléatoires n'est requise. Cependant, dans la suite une distribution devra être spécifiée.

On suppose que les perturbations aléatoires u_1, u_2, \dots, u_n , sont indépendantes, de la loi normale, d'espérance nulle, de variance finie [20] :

- $E(u) = 0$
- $Var(u) = \sigma^2 I_n$

Où I_n est la matrice identité de dimension n , ceci revient à dire que :

$$\begin{pmatrix} E(u_1) \\ E(u_2) \\ \vdots \\ E(u_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

Et :

$$\begin{pmatrix} Var(u_1) & Cov(u_1, u_2) & \dots & Cov(u_1, u_n) \\ Cov(u_2, u_1) & Var(u_2) & \dots & Cov(u_2, u_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Cov(u_n, u_1) & Cov(u_n, u_2) & \dots & Var(u_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma^2 \end{pmatrix}$$

Notant que ces hypothèses reviennent également à dire que le vecteur aléatoire y suit une loi multivariée normale avec :

$$E(y) = X\beta, \quad Var(y) = \sigma^2 I_n$$

A ces hypothèses on ajoute le fait que les x soient observés sans erreur, et l'erreur de mesure u_i est indépendante de y_i .

II.2.3.2. Test des hypothèses probabilistes

II.2.3.2.1. Test de la variance des erreurs

Pour vérifier si la variance de l'erreur est constante, on trace les résidus en fonction des valeurs ajustées, les erreurs auront une variance constante si les résidus sont distribués d'une façon aléatoire autour de zéro. Si les résidus augmentent ou diminuent en fonction des valeurs ajustées, les erreurs peuvent ne pas avoir une variance constante [21].

II.2.3.2.2. Test de normalité (Q-Q Plot et Droite de Henry)

Le Q-Q plot, quantile-quantile plot, est une technique graphique qui permet de comparer les distributions de deux ensembles de données. Les échantillons ne sont pas forcément de même taille. Il se peut également qu'un des ensembles de données soit généré à partir d'une loi de probabilité qui sert de référentiel.

Pour réaliser cette droite, il s'agit :

1. De trier les données de manière croissante pour former la série $e(i)$.
2. A chaque valeur $e(i)$, nous associons la fonction de répartition empirique :

$$F_i = \frac{i-0.375}{n+0.25} \quad (\text{II.9})$$

3. Nous calculons les quantiles successifs $z(i)$ d'ordre F_i en utilisant l'inverse de la loi normale centrée et réduite.

4. Enfin, les données initiales n'étant pas centrées et réduites, nous dé-normalisons les données en appliquant la transformation :

$$e^*(i) = z(i) * S + \bar{e} \quad (\text{II.10})$$

Où : S est l'écart type résiduel, c'est la racine carrée de la variance résiduel et \bar{e} c'est la valeur moyenne de e .

La variance résiduel est donnée par :

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-k} \quad (\text{II.11})$$

Si les données sont compatibles avec la loi normale, les points $(e(i) ; e^*(i))$ forment une droite, dite droite de Henry, alignés sur la diagonale principale.

II.2.3.2.3. Test de corrélation entre les erreurs

II.2.3.2.3.1 Tracé des résidus standardisés en fonction de leur ordre

Pour vérifier s'il existe une corrélation entre les erreurs, on trace les résidus en fonction de leurs ordres, on dit qu'il y a corrélation entre les erreurs si les résidus ne sont pas distribués d'une façon aléatoire, c'est-à-dire qu'ils auront une tendance d'augmenter ou diminuer.

II.2.3.2.3.2 Le test de Durbin-Watson

La statistique de Durbin-Watson est liée de près au coefficient d'auto corrélation de premier ordre des e_i de l'échantillon. Elle est désignée indifféremment dans la littérature par d ou DW et est définie par [22] :

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (\text{II.12})$$

La statistique d est compris dans l'intervalle allant de 0 à 4 de la façon suivante :

$d < 2$ pour une autocorrelation positive des e_i

$d > 2$ pour une autocorrelation négative des e_i

$d \approx 2$ pour une autocorrelation nulle des e_i

II.2.4. Tests de signification pour les paramètres estimés

Si nous voulons tester la signification statistique d'une estimations d'un paramètre β_j ($j = 0, \dots, k - 1$) dans la régression linéaire multiple, nous devons déterminer sa variance $Var(\hat{\beta}_j)$.

La matrice variance-covariance estimée du vecteur $\hat{\beta}$ est donnée par (Annexe I.2):

$$\widehat{Var}(\hat{\beta}) = S^2(X'X)^{-1} \quad (\text{II.13})$$

La variance du paramètre $\hat{\beta}_j$ est le j - ème éléments diagonal de la matrice $\widehat{Var}(\hat{\beta})$.

Soit l'hypothèse suivante : $H_0 : \beta_j = 0$ ($j = 1, \dots, k - 1$), on fait ici l'hypothèse que la variable x_j n'a pas d'influence sur y . Ce type de test est très courant et on dit qu'il porte sur le caractère significatif, ou pas, d'une variable explicative [20]. On peut aussi tester la signification du paramètre β_0 sous cette hypothèse. L'hypothèse H_0 est dite nulle, l'hypothèse alternative sera $H_1 : \beta_j \neq 0$.

Pour chaque paramètre β_j ($j = 1, \dots, k - 1$), on définit la statistique :

$$t_j = \frac{\hat{\beta}_j - \beta_j}{S_{\hat{\beta}_j}} \quad (\text{II.14})$$

Avec $S_{\hat{\beta}_j}$ est l'écart type empirique de $\hat{\beta}_j$:

$$S_{\hat{\beta}_j} = \sqrt{Var(\hat{\beta}_j)} \quad (\text{II.15})$$

Le quotient t_j est distribué selon une loi de Student à $(n - k)$ degrés de liberté. Sous l'hypothèse H_0 . Nous avons :

$$t_j = \frac{\hat{\beta}_j}{S_{\hat{\beta}_j}} \mapsto t(n - k) \quad (\text{II.16})$$

La règle de décision serait:

$|t| \leq t_{\frac{\alpha}{2}}$: l'hypothèse H_0 est acceptée et donc le paramètre β_j n'est pas statistiquement significatif.

$|t| > t_{\frac{\alpha}{2}}$: l'hypothèse H_0 est rejetée et H_1 est acceptée et donc le paramètre β_j est statistiquement significatif.

$t_{\frac{\alpha}{2}}$: est la valeur de loi de Student $t(n - k)$ à un risque α .

On peut calculer la probabilité :

$$P(t_{\frac{\alpha}{2}} > |t|) = P \quad (\text{II.17})$$

Si cette probabilité est suffisamment faible ($P < \alpha$), on rejette l'hypothèse H_0 , car le risque d'erreur de rejeter H_0 alors qu'elle est vraie est très faible. Si non l'hypothèse H_0 est acceptée car le risque d'erreur de rejeter H_0 alors qu'elle est vraie est trop important.

On peut déterminer un intervalle de confiance de $(1 - \alpha)100\%$ pour β_j :

$$Ic(\beta_j) = [\hat{\beta}_j - S_{\hat{\beta}_j} t_{\frac{\alpha}{2}}, \hat{\beta}_j + S_{\hat{\beta}_j} t_{\frac{\alpha}{2}}] \quad (\text{II.18})$$

Dans le cas d'une régression linéaire simple, ce test se limite à deux paramètres : β_0 et β_1 , une estimation non biaisée des variances de $\hat{\beta}_0$ et de $\hat{\beta}_1$ est de la forme [23] :

$$var(\hat{\beta}_1) = \frac{S^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{II.20})$$

$$var(\hat{\beta}_0) = S^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right) \quad (\text{II.21})$$

Notons que tester $\beta_0 = 0$ revient à tester si la droite de régression passe par l'origine. Et accepter H_0 pour le paramètre β_1 revient à admettre que la variable x n'a pas d'influence sur y .

II.2.5 Analyse de la variance

II.2.5.1. Décomposition de la variance

On décompose la somme totale des carrés des écarts à la moyenne en une somme des carrés due à la régression, et une somme des carrés due à l'erreur.

Les quantités seront désignées par l'abréviation la plus répandue dans la littérature en langue anglaise. Les deux premières lettres de chaque abréviation seront SS pour désigner la somme des carrés (sum of squares).

La somme des carrés due à la régression est donnée par :

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{II.22})$$

La somme des carrés due à l'erreur est donnée par :

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{II.23})$$

La somme totale des carrés est donnée par:

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{II.24})$$

On montre que :

$$SST = SSR + SSE \quad (\text{II.25})$$

On résume cette décomposition par un tableau appelé " tableau ANOVA" (**Tab.II.1**)

Source de variation	Degré de liberté	Somme des carrés	Somme pondérée des carrés
Régression	$k - 1$	SSR	$MSR = SSR/(k - 1)$
Erreur	$n - k$	SSE	$MSE = SSE/(n - k)$
Totale	$n - 1$	SST	$MST = SST/(n - 1)$

Tab.II.1 : ANOVA élémentaire.

Pour tenir compte de la répétition, on peut décomposer d'avantage la somme des carrés due à l'erreur. Notons d'abord que pour chacune des observations, les variables explicatives prennent diverses valeurs. Il peut parfois arriver que pour une ou plusieurs observations données, les valeurs de ces variables soient tout à fait identiques (sans nécessairement que la variable expliquée prenne la même valeur). Dans ce cas, on dit qu'il existe des répétitions.

On place dans le même bloc, les valeurs de la variable expliquée pour lesquelles les valeurs des variables explicatives sont identiques.

On aura donc:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1n_1} \text{ dans le premier bloc contenant } n_1 \text{ observations, ...} \\ y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2n_2} \text{ dans le deuxième bloc contenant } n_2 \text{ observations,} \\ \vdots \\ y_{I1}, y_{I2}, \dots, y_{In_I} \text{ dans le } I^e \text{ bloc contenant } n_I \text{ observations,} \end{array} \right.$$

On note par \bar{Y}_i la moyenne dans le i^e bloc:

$$\bar{Y}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} y_{ij}}{n_i} \quad (\text{II.26})$$

On remarque que l'estimateur est le même pour chaque observation dans un bloc donné ($\hat{y}_{ij} = \hat{y}_i$), on a donc :

$$y_{ij} - \hat{y}_{ij} = (y_{ij} - \bar{Y}_i) + (\bar{Y}_i - \hat{y}_{ij}) = (y_{ij} - \bar{Y}_i) + (\bar{Y}_i - \hat{y}_i)$$

Alors:

$$\begin{aligned} SSE &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2 \\ &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{n_i} ((y_{ij} - \bar{Y}_i) + (\bar{Y}_i - \hat{y}_i))^2 \\ &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{Y}_i - \hat{y}_i)^2. \text{ (Puisque le terme issu du produit croisé} \\ &\text{s'annule)} \end{aligned}$$

On a donc:

$$SSE = SSPE + SSLF \quad (\text{II.27})$$

ou :

$$SSPE = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 \quad (\text{II.28})$$

est la somme des carrés des erreurs pures (pure error sum of squares),

et :

$$SSLF = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{Y}_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{II.29})$$

est la somme des carrés due au manque d'ajustement (lack of fit sum of squares),

On peut alors présenter le tableau ANOVA en tenant compte de la décomposition de la variance due à l'erreur (Tab.II.2)

Source de variation	Degré de liberté	Somme des carrés	Somme pondérée des carrés
Régression	$k - 1$	SSR	$MSR = SSR/(k - 1)$
Erreur	$n - k$	SSE	$MSE = SSE/(n - k)$
Manque d'ajustement	$I - k$	$SSLF$	$MSLF = SSLF/(I - k)$
Erreur pure	$n - I$	$SSPE$	$MSPE = SSPE/(n - I)$
Totale	$n - 1$	SST	$MST = SST/(n - 1)$

Tab.II.2 : ANOVA avec décomposition de la variance due à l'erreur

II.2.5.2. Tests de signification de la régression

Pour tester si la régression est statistiquement significative, on pose une hypothèse nulle ($H_0: \beta_j = 0, (j = 1, \dots, k - 1)$) qui consiste à demander si le modèle constant est suffisant à expliquer la variable dépendante, et l'hypothèse alternative sera : H_1 : les $\beta_j, (j = 1, \dots, k - 1)$ ne sont pas tous nuls.

On considère le quotient des quantités MSR et MSE qui sous H_0 suit une loi de Fisher $F(k - 1, n - k)$. Soit $F_\alpha(k - 1, n - k)$ le quantile d'ordre $1 - \alpha$, alors si $F_{calculé} = \frac{MSR}{MSE} > F_\alpha(k - 1, n - k)$, alors l'hypothèse H_0 est rejetée au risque d'erreur α et l'hypothèse H_1 est acceptée, et on vient donc à la conclusion que la régression est statistiquement significative. Si la valeur de F calculée est inférieure à la valeur seuil F_α ($F_{calculé} \leq F_\alpha(k - 1, n - k)$), alors l'hypothèse H_0 ne peut être rejetée.

Notons que pour un nombre donné de paramètres, moins on dispose d'observations, plus il est difficile de vérifier si la régression est statistiquement significative [20].

Le choix du risque α est lié aux conséquences pratiques de la décision : si les conséquences sont graves, on choisira $\alpha = 1\%$ ou 1% mais si le débat est plutôt académique, le traditionnel $\alpha = 5\%$ fera le plus souvent l'affaire [24].

La deuxième règle de décision consiste à évaluer la probabilité $\alpha_{évalué}$ tel que $P(F_\alpha(k - 1, n - k) > F_{calculé} = \frac{MSR}{MSE}) = \alpha_{évalué}$, si $\alpha_{évalué}$ est supérieur à α_{choisi} ($\alpha_{évalué} \geq \alpha_{choisi} = 0.05$), l'hypothèse H_0 est acceptée car le risque d'erreur de rejeter H_0 alors qu'elle est vraie est trop important. Si $\alpha_{évalué}$ est inférieur à α_{choisi} ($\alpha_{évalué} < \alpha_{choisi} = 0.05$), l'hypothèse H_0 est rejetée car le risque d'erreur de rejeter H_0 alors qu'elle est vraie est très faible.

Un autre test consiste à vérifier si le manque d'ajustement n'est pas significatif, en utilisant le rapport $\frac{MSLF}{MSPE}$ qui, sous l'hypothèse H_0 (manque d'ajustement), suit une loi de Fisher $F(I - k, n - I)$.

II.2.6. Prévision avec les modèles de régression linéaire multiple

Une fois le modèle de régression est jugé fiable, et si le phénomène étudié ne subit pas un changement de structure dans les intervalles inconnus, on peut utiliser ce modèle pour faire des prévisions.

Supposons que l'on s'intéresse à un vecteur de valeurs particulières des variables explicatives :

$$c' = [1 \ x_{h1} \ x_{h2} \ , \dots \ , x_{hk-1}]$$

Nous cherchons à prédire la valeur de y conditionnellement à c . Toute prévision de ce genre est basée sur l'hypothèse que le modèle estimé est toujours valable pour la période des prévisions. La prévision ponctuelle est obtenue en insérant les valeurs données de x dans la régression, ce qui donne la prévision :

$$\hat{y}_h = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{h1} + \hat{\beta}_2 x_{h2} + \dots + \hat{\beta}_{k-1} x_{hk-1} = c' \hat{\beta}$$

II.2.6.1. Intervalle de confiance de la valeur moyenne de y

On sait que la valeur \hat{y}_h est une estimation de la valeur $E(y_h)$, et si on suppose que le terme de perturbation suit une loi normale, et en remplaçant le paramètre inconnu σ^2 de $Var(\hat{\beta})$ par son estimateur S^2 , il s'ensuit que :

$$\frac{\hat{y}_h - E(y_h)}{\sqrt{Var(\hat{y}_h)}} = \frac{c' \hat{\beta} - c' \beta}{S \sqrt{c' (X'X)^{-1} c}} \mapsto t(n - k)$$

Avec : $Var(\hat{y}_h) = Var(c' \hat{\beta}) = c' Var(\hat{\beta}) c = S^2 c' (X'X)^{-1} c$

Donc on peut définir l'intervalle de confiance à $(1 - \alpha)100\%$ pour $E(y_h)$ par :

$$\hat{y}_h \pm t_{\frac{\alpha}{2}} S \sqrt{c' (X'X)^{-1} c} \quad (II.30)$$

Dans le cas d'une régression linéaire simple, la valeur moyenne de y_h est simplement donnée par :

$$E(y_h) = \beta_0 + \beta_1 x_h$$

Et l'intervalle de confiance à $(1 - \alpha)100\%$ pour $E(y_h)$ par :

$$\hat{y}_h \pm t_{\frac{\alpha}{2}} S \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_h - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (II.31)$$

II.2.6.2. Intervalle de prévision pour y

Comme précédemment, nous avons $\hat{y}_h = c' \hat{\beta}$, et maintenant $y_h = c' \beta + u_h$, l'erreur de prévision est donné par :

$$e_h = y_h - \hat{y}_h = u_h - c' (\hat{\beta} - \beta) \quad (II.32)$$

La variance de l'erreur de prédiction est donnée par :

$$\text{Var}(e_h) = \sigma^2(1 + c'(X'X)^{-1}c) \quad (\text{II.33})$$

A partir de laquelle on obtient la statistique :

$$\frac{\hat{y}_h - y_h}{S\sqrt{1+c'(X'X)^{-1}c}} \mapsto t(n - k) \quad (\text{II.34})$$

D'où l'intervalle de prévision à $(1 - \alpha)100\%$ pour y_h :

$$\hat{y}_h \pm t_{\frac{\alpha}{2}} S \sqrt{1 + c'(X'X)^{-1}c} \quad (\text{II.35})$$

Dans le cas d'une régression linéaire simple l'intervalle de prévision à $(1 - \alpha)100\%$ pour y_h est donnée par : (Annexe I.3)

$$\hat{y}_h \pm t_{\frac{\alpha}{2}} S \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_h - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}\right)} \quad (\text{II.36})$$

II.2.7. Coefficient de détermination (R^2)

Le coefficient de détermination représente la proportion de la variation totale par rapport à la moyenne qui est expliquée par la régression [20].

Les bornes du critère sont 0 et 1 , une valeur de 1 signifie que la régression explique toute la variation des différentes valeurs prises par la variable dépendante, et une valeur de 0 signifie qu'aucune variation n'est expliquée.

II.2.7.1. Définition

Sans aucune information sur la variable indépendante, la meilleure prédiction pour une valeur future de la variable dépendante est la moyenne des n observations dont on dispose [20].

Pour une valeur actuelle donnée y_i , l'erreur commise en utilisant la moyenne \bar{y} comme prédicteur est simplement $y_i - \bar{y}$. Une mesure de la variation totale sera donnée par:

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2.$$

En exploitant l'information sur la variable indépendante, le meilleur estimateur d'une valeur future y_i est \hat{y}_i . La variation sur y qui subsiste après l'ajustement de l'équation de régression est donnée par :

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

La proportion de la variation qui n'est pas expliquée par la régression est donnée par $\frac{SSE}{SST}$. Ainsi la proportion de la variation totale (par rapport à \bar{y}) qui est expliquée par la régression est donnée par:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{II.37})$$

Rappelons qu'au sens des moindres carrés, on vise à minimiser SSE . Ainsi cette dernière expression, ou SSE est affectée d'un signe négatif, suggère de choisir un modèle ayant un coefficient le plus élevé possible, soit des valeurs proches de 1.

Ceci va de pair avec l'idée voulant qu'une bonne régression explique le plus possible la variabilité des différentes valeurs prises par la variable dépendante y [20].

II.2.7.2. Propriété

On peut tester si la régression est statistiquement significative à partir de la valeur observée du coefficient de détermination R^2 , pour cela il faut établir une relation entre la statistique F et R^2 sous l'hypothèse $H_0: \beta_j = 0, (j = 1, \dots, k - 1)$.

On a :

$$F = \frac{MSR}{MSE} = \frac{(SST - SSE)/(k-1)}{SSE/(n-k)} = \frac{(n-k)}{(k-1)} \left(\frac{SST}{SSE} - 1 \right) = \frac{(n-k)}{(k-1)} \left(\frac{1}{1-R^2} - 1 \right)$$

D'où:

$$R^2 = \frac{(k-1)F}{(k-1)F + (n-k)} \quad (\text{II.38})$$

On remarque que cette quantité est une fonction croissante en F . La régression est statistiquement significative au niveau α si :

$$R^2 > \frac{(k-1)F_{\alpha}(k-1, n-k)}{(k-1)F_{\alpha}(k-1, n-k) + (n-k)} \quad (\text{II.39})$$

II.2.7.3. Coefficient de détermination ajusté ($R^2(\text{ajusté})$)

On définit le coefficient de détermination ajusté qui tient compte de la diminution du nombre de degrés de liberté consécutive à l'introduction de nouvelles variables indépendantes [22].

$$R^2(\text{ajusté}) = 1 - \frac{SSE/(n-k)}{SST/(n-1)} \quad (\text{II.40})$$

Il est utile pour comparer les estimations de modèles différents les uns des autres par l'addition ou la suppression de variables explicatives.

II.2.8. Le critère PRESS

Le critère PRESS (Predicted Residual sum of Squares) exploite l'idée de calculer une somme de carrés afin de choisir une équation fournissant les meilleures prédictions. Dans un monde sans contrainte, on considérerait deux échantillons indépendants, un premier pour calculer les paramètres du modèle et l'autre pour valider la qualité des prédictions générées par le modèle. Pour ce, il suffit d'étudier, pour chacune des observations de l'échantillon de validation, les écarts entre les y_i observés et ceux calculés par le modèle. Comme, dans la majorité des cas, on ne peut s'offrir le "luxe" d'un deuxième échantillon, le critère PRESS offre une alternative intéressante [20].

Soit n le nombre total d'observations, on débute en ignorant la première observation et on établit la régression sur les $n - 1$ observations restantes. On trouve alors \hat{y}_1 un prédicteur de y_1 . On poursuit en calculant \hat{y}_2 un prédicteur de y_2 en ignorant la deuxième observation et on établit encore une fois la régression à l'aide des $n - 1$ observations restantes.

On répète le processus jusqu'à ce que l'on ait tous les prédicteurs $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n$. On pourra alors évaluer la somme de carrés suivante :

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{II.41})$$

Ce critère permet de comparer la capacité prédictive de deux modèles, on cherche un modèle qui possède une valeur de $PRESS$ la plus petite possible.

II.2.9. Linéarisation des modèles

En pratique, la dispersion des points suggèrent souvent des relations non linéaires entre les variables. Certains types peuvent être transformés en fonctions linéaires, ceci permet d'utiliser encore la méthode des moindres carrés ordinaires. On donne les fonctions les plus courantes et leurs transformations (Tab II.3).

Modèle	Fonction	Transformation	Fonction linéaire
Log linéaire	$y = Bx^A$	$y' = \log(y)$	$y' = B' + Ax'$ $B' = \log(B), x' = \log(x)$
Exponentiel	$y = e^{Ax+B}$	$y' = \log(y)$	$y' = Ax + B$
Logarithmique	$y = A \log(x) + B$	$x' = \log(x)$	$y = Ax' + B$
Inverse	$y = B + \frac{A}{x}$	$x' = \frac{1}{x}$	$y = Ax' + B$

Tab.II.3: Les formes fonctionnelles et leurs transformations linéaires

II.2.9. Résumé de l'analyse de régression

A la fin, on représente les résultats statistiques de l'analyse de régression par le tableau suivant :

L'équation de la régression : $y = f(x)$					
Paramètre	Estimation	Erreur standard	Lim Inf	Lim Sup	P
β_j	$\hat{\beta}_j$	$S_{\hat{\beta}_j}$	$\hat{\beta}_j - S_{\hat{\beta}_j} t_{\frac{\alpha}{2}}$	$\hat{\beta}_j + S_{\hat{\beta}_j} t_{\frac{\alpha}{2}}$	$P(t_{\frac{\alpha}{2}} > t)$
S		$R^2(\%)$	$R^2(\text{ajusté})(\%)$		$PRESS$
Analyse de la variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Régression	$k - 1$	SSR	MSR	MSR/MSE	$P(F_{\alpha} > F)$
Erreur	$n - k$	SSE	MSE		
Manque d'ajustement	$I - k$	$SSLF$	$MSLF$	$MSLF/MSPE$	$P(F_{\alpha} > F)$
Erreur pure	$n - I$	$SSPE$	$MSPE$		
Totale	$n - 1$	SST			

II.3. Modèle de régression non linéaire

II.3.1. Introduction

Plusieurs situations peuvent induire une relation de forme non linéaire entre des variables, et malgré la flexibilité du modèle linéaire, il ne permet pas de modéliser certaines formes fonctionnelles. Dans cette partie nous allons présenter la méthode des moindres carrés non linéaire.

II.3.2. Présentation du modèle

On considère une variable explicative indépendante x , à valeurs non aléatoires, et une variable dépendante aléatoire y influencée par x , et supposons que nous ayons n observations indépendantes y_1, y_2, \dots, y_n de cette variable dépendante y , la forme générale du modèle de régression non linéaire est :

$$y_i = f(x_i, \beta) + u_i \quad i = 1, \dots, n \quad (\text{II.42})$$

Où β est un vecteur à k éléments qui représentent les paramètres du modèle, et le terme u_i est une perturbation aléatoire.

II.3.3. Les hypothèses du modèle de régression non linéaire

Les hypothèses du modèle non linéaire sont les suivantes :

- Les perturbations aléatoires u_1, u_2, \dots, u_n , sont indépendantes de la loi normale, d'espérance nulle, de variance finie ($E(u) = 0, \text{Var}(u) = \sigma^2$).
- Les x sont observés sans erreur, et l'erreur de mesure u_i est indépendante de y_i .

II.3.4. Calcul de l'estimateur des moindres carrés non linéaire

La minimisation de la somme des carrés est un problème courant de l'optimisation non linéaire. Il peut être résolu par plusieurs méthodes, comme celle de Gauss-Newton, qui est répandue [26].

L'estimateur par la méthode des moindres carrés de β dénoté par $\hat{\beta}$, minimise la somme des carrés des erreurs :

$$SSE(\hat{\beta}) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \hat{\beta}))^2 \quad (\text{II.43})$$

Les équations d'estimation sont alors les suivantes :

$$\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \hat{\beta})) \frac{\partial f(x_i, \hat{\beta})}{\partial \hat{\beta}} = F' (Y - f(\hat{\beta})) = 0 \quad (\text{II.44})$$

Avec :

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)'$$

$$f(\hat{\beta}) = (f(x_1, \hat{\beta}), f(x_2, \hat{\beta}), \dots, f(x_n, \hat{\beta}))'$$

$$F = F(\hat{\beta}) = \frac{\partial f(\hat{\beta})}{\partial \hat{\beta}'} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(x_1, \hat{\beta})}{\partial \hat{\beta}_1} & \dots & \frac{\partial f(x_1, \hat{\beta})}{\partial \hat{\beta}_k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f(x_n, \hat{\beta})}{\partial \hat{\beta}_1} & \dots & \frac{\partial f(x_n, \hat{\beta})}{\partial \hat{\beta}_k} \end{pmatrix}$$

Algorithme de Gauss-Newton

1. Donner la valeur initiale pour $\hat{\beta}$, soit $\hat{\beta}^{(0)}$.
2. Mettre à jour l'estimation comme suit:

$$\hat{\beta}^{(i+1)} = \hat{\beta}^{(i)} + [F'(\hat{\beta}^{(i)})F(\hat{\beta}^{(i)})]^{-1}F'(\hat{\beta}^{(i)}) (Y - f(\hat{\beta}^{(i)}))$$

3. Tester si la norme du vecteur $(\hat{\beta}^{(i+1)} - \hat{\beta}^{(i)})$ est inférieure au critère de convergence, par exemple $1e^{-8}$.
4. Si $(\hat{\beta}^{(i+1)} - \hat{\beta}^{(i)})'(\hat{\beta}^{(i+1)} - \hat{\beta}^{(i)}) > 1e^{-8}$ alors répéter les étapes 2 et 3.
5. Sinon, l'algorithme a convergé et $\hat{\beta} = \hat{\beta}^{(i+1)}$.

Pour ce type de méthode soit efficace, il convient que les valeurs initiales ne soient pas trop éloignées des valeurs optimales. Dans le cas contraire, il n'y a pas convergence et la procédure est défailante [27].

Une fois l'estimation de $\hat{\beta}$ produite, on peut estimer la variance résiduelle comme suit :

$$\hat{\sigma}^2 = S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \hat{\beta}))^2}{n-k} \quad (\text{II.45})$$

II.3.5. Intervalles de confiance et tests d'hypothèse pour les paramètres estimés

Pour tester la signification d'une estimation d'un paramètre β , nous devons déterminer sa variance $Var(\hat{\beta})$. La matrice variance-covariance estimée du vecteur $\hat{\beta}$ est donnée par (Annexe II) :

$$Var(\hat{\beta}) = \sigma^2(F'F)^{-1} \quad (\text{II.46})$$

La variance du paramètre $\hat{\beta}_j$ ($j = 1, \dots, k$) est le j -ème élément diagonal de la matrice $\widehat{Var}(\hat{\beta})$.

On considère l'hypothèse nulle suivante : $H_0 : \beta_j = 0$ ($j = 1, \dots, k$), et l'hypothèse alternative sera : $H_1 : \beta_j \neq 0$ ($j = 1, \dots, k$). La statistique du test est la suivante :

$$t_j = \frac{\hat{\beta}_j - \beta_j}{S_{\hat{\beta}_j}} \quad (\text{II.47})$$

Avec $S_{\hat{\beta}_j}$ est l'écart type empirique de $\hat{\beta}_j$: $S_{\hat{\beta}_j} = \sqrt{\widehat{Var}(\hat{\beta}_j)}$

Le quotient t_j est distribué selon une loi de Student à $(n - k)$ degrés de liberté. Sous l'hypothèse H_0 on a :

$$t_j = \frac{\hat{\beta}_j}{S_{\hat{\beta}_j}} \mapsto t(n - k) \quad (\text{II.48})$$

La règle de décision serait:

$|t| \leq t_{\frac{\alpha}{2}}$: l'hypothèse H_0 est acceptée et donc le paramètre β_j n'est pas statistiquement significatif.

$|t| > t_{\frac{\alpha}{2}}$: l'hypothèse H_0 est rejetée et H_1 est acceptée et donc le paramètre β_j est statistiquement significatif.

$t_{\frac{\alpha}{2}}$: est la valeur de la loi de Student $t(n - k)$ à un risque α .

On peut déterminer un intervalle de confiance de $(1 - \alpha)100\%$ pour β_j :

$$\hat{\beta}_j \pm t_{\frac{\alpha}{2}} S \sqrt{(F'F)^{-1}_{jj}} \quad (\text{II.49})$$

II.3.6. Prédiction avec un modèle de régression non linéaire

Nous cherchons à prédire la valeur de y lorsque $x = x_0$, soit \hat{y}_0 . Une estimation naturelle est $\hat{y}_0 = f(x_0, \hat{\beta})$. Nous avons que $\hat{\beta}$ est près de β , il s'ensuit alors que $f(x_0, \hat{\beta})$ peut être approximé en série de Taylor comme suit :

$$f(x_0, \hat{\beta}) \approx f(x_0, \beta) + f'_0(\hat{\beta} - \beta) \quad (\text{II.50})$$

Où :

$$f'_0 = \left(\frac{\partial f(x_0, \beta)}{\partial \beta_1}, \frac{\partial f(x_0, \beta)}{\partial \beta_2}, \dots, \frac{\partial f(x_0, \beta)}{\partial \beta_k} \right)$$

Nous avons alors :

$$y_0 - \hat{y}_0 \approx y_0 - f(x_0, \beta) - f'_0(\hat{\beta} - \beta) = u_0 - f'_0(\hat{\beta} - \beta) \quad (\text{II.51})$$

A partir de l'indépendance entre $\hat{\beta}$ et u_0 , nous avons :

$$E(y_0 - \hat{y}_0) \approx E(u_0) - f'_0 E(\hat{\beta} - \beta) = 0 \quad (\text{II.52})$$

Et :

$$\text{Var}(y_0 - \hat{y}_0) \approx \text{Var}(u_0) + \text{Var}[f'_0(\hat{\beta} - \beta)] = \sigma^2 + \sigma^2 f'_0 [F(\hat{\beta})' F(\hat{\beta})]^{-1} f_0$$

On trouve alors que :

$$\frac{y_0 - \hat{y}_0}{S \sqrt{1 + f'_0 [F(\hat{\beta})' F(\hat{\beta})]^{-1} f_0}} \mapsto t(n - k) \quad (\text{II.53})$$

Ceci nous mène à l'intervalle de confiance à $100(1 - \alpha)\%$ pour y_0 étant donné que $x = x_0$, donné par :

$$\hat{y}_0 \pm t_{\frac{\alpha}{2}} S \sqrt{1 + f'_0 [F(\hat{\beta})' F(\hat{\beta})]^{-1} f_0} \quad (\text{II.54})$$

$t_{\frac{\alpha}{2}}$: est la valeur de loi de Student $t(n - k)$ à un risque α .

On peut aussi construire l'intervalle de confiance à $100(1 - \alpha)\%$ pour $E(y_0)$:

$$\hat{y}_0 \pm t_{\frac{\alpha}{2}} S \sqrt{f'_0 [F(\hat{\beta})' F(\hat{\beta})]^{-1} f_0} \quad (\text{II.55})$$

II.4. Conclusion

Plusieurs techniques statistiques sont utilisées dans le domaine des isolateurs pour des études de vieillissement et pour la modélisation. La régression est l'une des techniques statistiques la plus répandue pour modéliser la relation qui existe entre un groupe composé d'un certain nombre fini de variables dites explicatives avec un autre groupe formé d'une seule variable dite expliquée.

Les applications de la régression sont énormes dans la technologie, les sciences, les sciences économiques et la gestion. L'utilisation des modèles de régression est typique dans la description de données, l'évaluation de paramètre, et la prévision.

Chapitre III
Traitement du Signal
de Courant de Fuite

III.1. Introduction

Les enregistrements des signaux de courant de fuite montrent que l'allure du signal comporte trop de distorsion rendent la détermination des caractéristiques du signal tels que l'amplitude et le décalage imprécise [28,29].

Le fondement théorique de l'algorithme établi se base sur les concepts du traitement de signal à savoir, l'échantillonnage, la transformé de Fourier discrète et le filtrage numérique ainsi le taux de distorsion.

Le but de ce chapitre est de concevoir un outil numérique qui consiste à analyser le signal du courant 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.
- ✓ Déterminer le déphasage courant-tension.
- ✓ l'amplitude de la crête tension et courant.

III.2. Fondement Théorique

III.2.1. L'échantillonnage

Si on veut traiter un signal par voie numérique, il faut le représenter au préalable par une suite de valeurs ponctuelles prélevées régulièrement. Un tel prélèvement est appelé échantillonnage [30]. Les valeurs successives sont séparées par une distance de T (l'intervalle d'échantillonnage). La quantité $1/T$ représente le taux d'échantillonnage en Hz [31].

La condition permettant une reconstitution du signal analogique à partir du signal échantillonné, est appelé 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 [28].

III.2.2. L'Analyse Spectrale

L'analyse spectrale est la décomposition d'une grandeur variant en fonction du temps en ses composantes fréquentielles. C'est l'une des techniques les plus courantes de traitement des signaux [30].

Pour maîtriser cette analyse, on utilise la transformé de Fourier Discrète qui s'adapte bien au traitement des signaux échantillonnés. Elle est définie par [32]:

$$Y(f) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-1} y(t) * e^{(-j2\pi t f / N)} \quad (\text{III.1})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Y(f) : \text{signal dans le domaine fréquentiel.} \\ y(t) : \text{signal dans le domaine temporel.} \\ N : \text{nombre de points de signal sur une période.} \end{array} \right.$$

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

$$Y(f) = |Y(f)| * e^{j\varphi(f)} \quad (\text{III.2})$$

Qui constitue la représentation spectrale du signale $y(t)$. Elle se décompose en un spectre d'amplitude $|Y(f)|$ et un spectre de phase $\varphi(f)$ [28].

III.2.3. Le taux de distorsion

Le taux de distorsion harmonique total décrit l'influence des composantes harmoniques d'un signal. Il est définie selon la norme CEI 61000-2-2 comme suit :

- ✓ Taux de distorsion en Tension : $\tau_v(\%) = 100. \frac{\sqrt{\sum_{p=2}^{\infty} V_p^2}}{V_1}$
- ✓ Taux de distorsion en Courant : $\tau_I(\%) = 100. \frac{\sqrt{\sum_{p=2}^{\infty} I_p^2}}{I_1}$

Le taux de distorsion défini par la norme CEI représente le rapport entre la valeur efficace des harmonique et la valeur efficace du fondamental [33].

III.2.4. Filtrage Numérique

Nous définissons le filtrage comme étant l'opération d'interruption ou d'atténuation d'un signal [34].

La transformé de Fourier du signal de sortie $Y_{fil}(f)$ d'un filtre linéaire est par définition, le produit de la fonction de transfert du filtre $G(f)$ par la transformé de Fourier du signal d'entrée $Y(f)$ [28] :

$$Y_{fil}(f) = G(f).Y(f) \quad (III.3)$$

Ainsi, le signal filtré dans le domaine temporel est la transformé de Fourier inverse du produit obtenu. Il est donnée par :

$$y_{fil}(t) = F^{-1}\{Y_{fil}(f)\} = F^{-1}\{G(f).Y(f)\} \quad (III.4)$$

Les filtres passe-bas les plus connus sont les filtres basés sur l'approximation de Butterworth suivante [35] :

$$|G(f)|^2 = \left[1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2n}\right]^{-1} \quad (III.5)$$

$$\begin{cases} G(f): \text{la fonction de transfert du filtre.} \\ f_c: \text{la fréquence de coupure.} \\ n: \text{le degré du filtre.} \end{cases}$$

Le gain de ces filtres est le plus constant possible dans la bande passante et tend vers 0 dans la bande de coupure.

Les paramètres du filtre de Butterworth : ordre n , et fréquence f_c limite de la bande passante peuvent être déterminés à partir des conditions imposées :

- ✓ Condition relative à la bande passante

Afin d'éviter une déformation du signal utile dans la bande passante, il ne faut pas que l'atténuation des diverses fréquences qui le constituent soit trop différentes. Soit ε_1 la variation relative maximale tolérable du gain du filtre dans le spectre utile. La réduction du gain étant la plus importante à la fréquence f_h la plus haute du spectre utile, on impose donc [36]:

$$\left(\frac{f_h}{f_c}\right)^{2n} \leq 2\varepsilon_1 \quad (III.6)$$

- ✓ Condition relative à la bande atténuée

On considère une perturbation dont l'amplitude est E_p et dont la fréquence f_p est au-delà du spectre utile du signal de mesure. On impose au filtre de réduire l'amplitude de cette perturbation à la fraction ε_2 de l'amplitude E_s du signal de mesure de fréquence f_s [36]:

$$\left(\frac{f_p}{f_c}\right)^{2n} \geq \frac{1}{\varepsilon_2^2} \quad (\text{III.7})$$

Les relations (III.6) et (III.7) permettent d'écrire :

$$\left(\frac{f_p}{f_h}\right)^{2n} \geq \frac{1}{2\varepsilon_1\varepsilon_2^2} \quad (\text{III.8})$$

Cette dernière relation permet de déterminer l'ordre minimal n du filtre nécessaire pour satisfaire aux conditions imposées :

$$n \geq \frac{-\ln(2\varepsilon_1\varepsilon_2^2)}{2\ln\left(\frac{f_p}{f_h}\right)} \quad (\text{III.9})$$

La connaissance de n permet la détermination de la fréquence de coupure qui satisfait aux deux inégalités [36]:

$$f_c \geq \frac{f_h}{2^n \sqrt{2\varepsilon_1}} \quad \text{et} \quad f_c \leq f_p \cdot \sqrt[n]{\varepsilon_2} \quad (\text{III.10})$$

Le concept de filtrage nous servira comme solution au problème lié à la détermination de l'amplitude du courant de fuite et de la tension. En effet, les fluctuations aperçues surtout au voisinage des valeurs crêtes rendent la détermination de ce dernier difficile.

III.3. Simulation Numérique

Afin de traiter les signaux enregistrés lors de nos expériences, le programme élaboré comporte les étapes suivantes :

- 1 : Acquisition des deux signaux échantillonnés.
- 2 : Détermination du spectre fréquentiel.
- 3 : Détermination du taux de distorsion.
- 4 : Détermination du fondamentaux du courant de fuite et de la tension appliquée.
- 5 : Détermination du déphasage Courant-Tension.
- 6 : Filtrage des deux signaux.
- 7 : Détermination de la valeur crête du Courant de Fuite et de la Tension.

III.4. Application

Nous présentons dans ce paragraphe un exemple d'enregistrement et de traitement numérique, afin de valider la méthode élaborée.

L'oscilloscope est très sensible aux perturbations extérieures. Les signaux enregistrés par cet oscilloscope sont perturbés (Fig.III.1).

Le spectre fréquentiel contient des harmoniques d'ordre 3, 5, 7 ainsi la présence des composantes perturbatrice (Fig.III.2 et III.3).

Pour évaluer le déphasage courant-tension nous avons déterminé le fondamentales des deux signaux. Puis à travers la visualisation des deux fondamentales simultanément on détermine sa nature (Fig.III.4).

Les signaux enregistrés sont traités par un filtre passe-bas (Fig.III.5). Celui-ci maintient une repense dans la bande passante plate et une atténuation de 3 dB pour $f = 400 \text{ Hz}$. Les signaux filtrés (Fig.III.6 et III.7) sont utilisés pour la détermination de la crête.

A la fin du programme nous aurons les informations concernant le taux de distorsion, le déphasage, la crête (Tab.III.8).

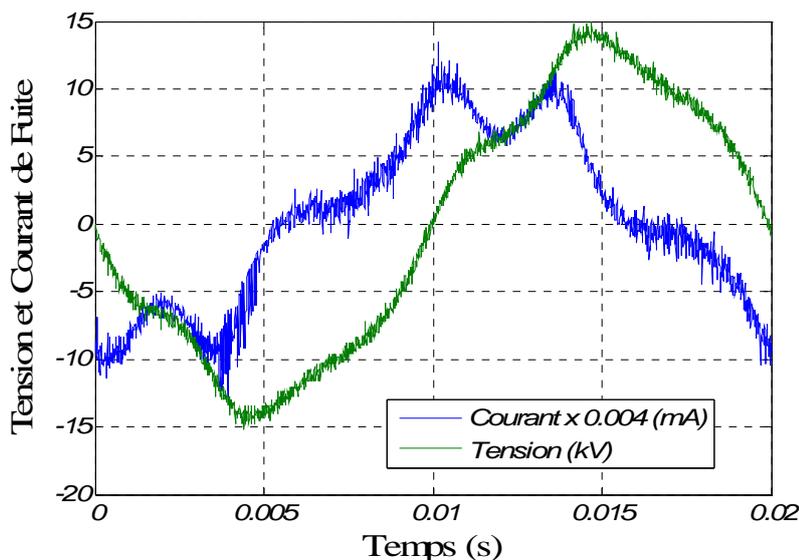


Fig.III.1 : Les deux signaux enregistrés tension et courant (Etat sec)

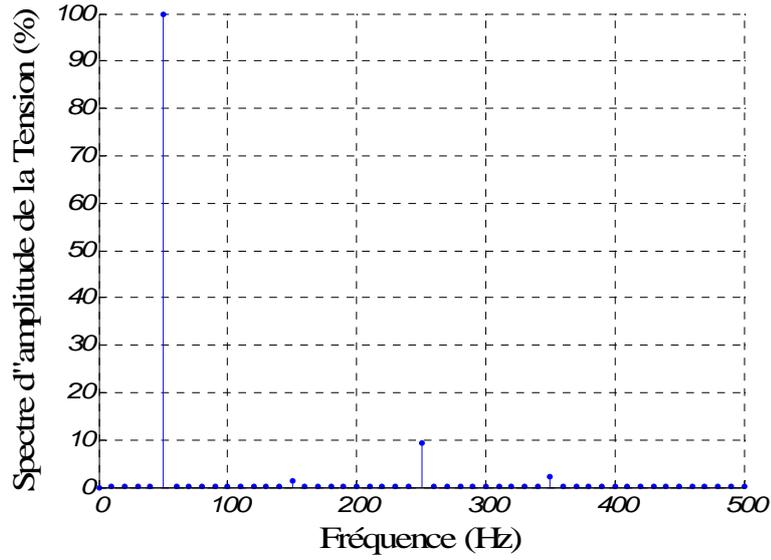


Fig.III.2 : Spectre fréquentiel de la tension.

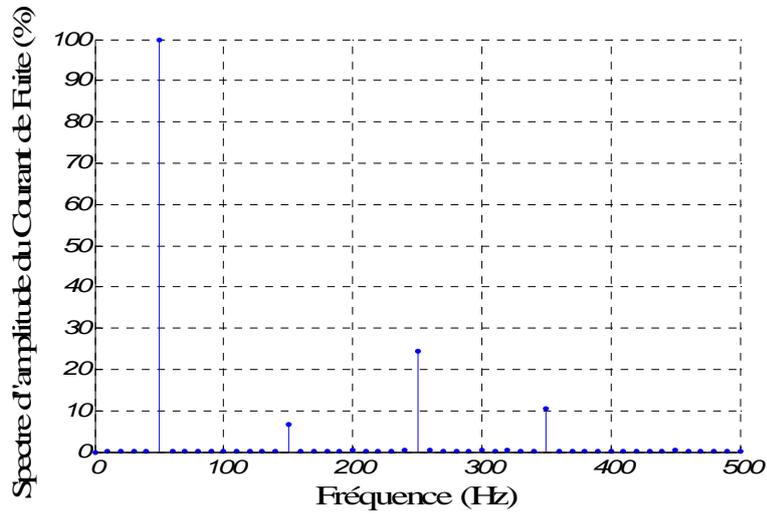


Fig.III.3: Spectre fréquentiel du courant de fuite.

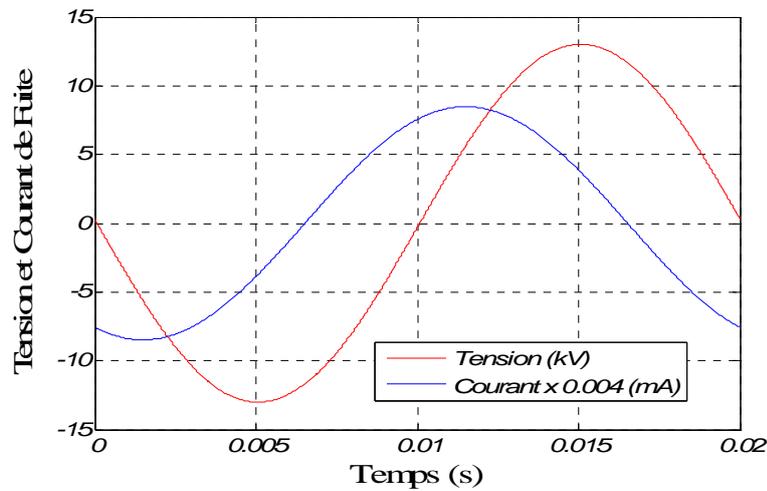
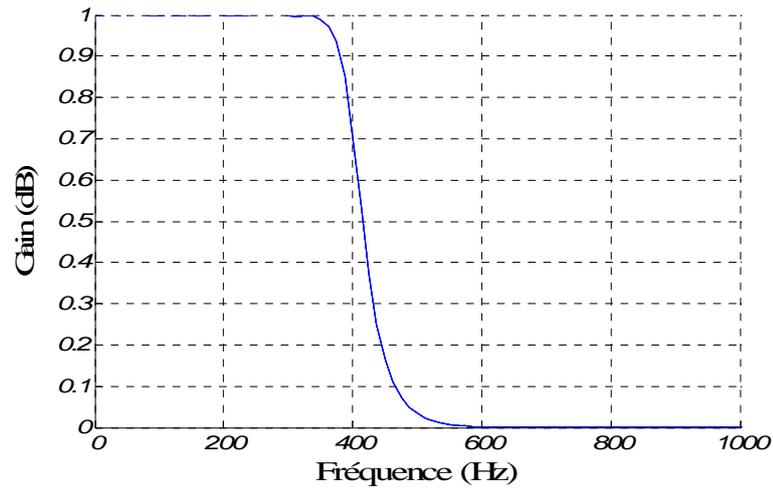
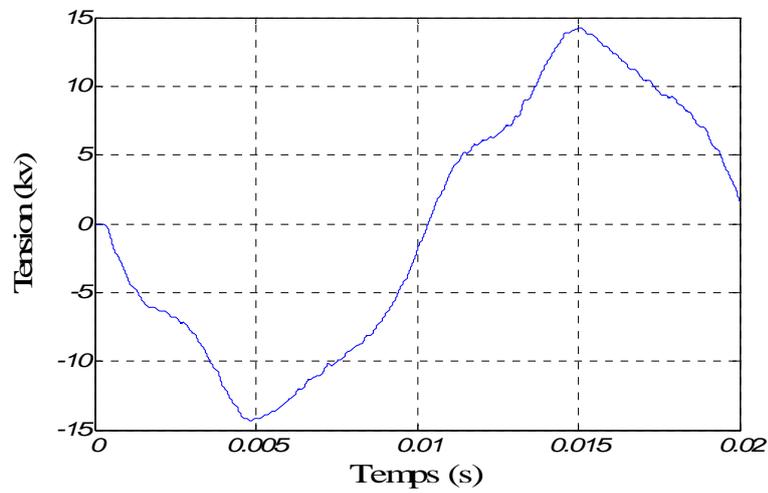
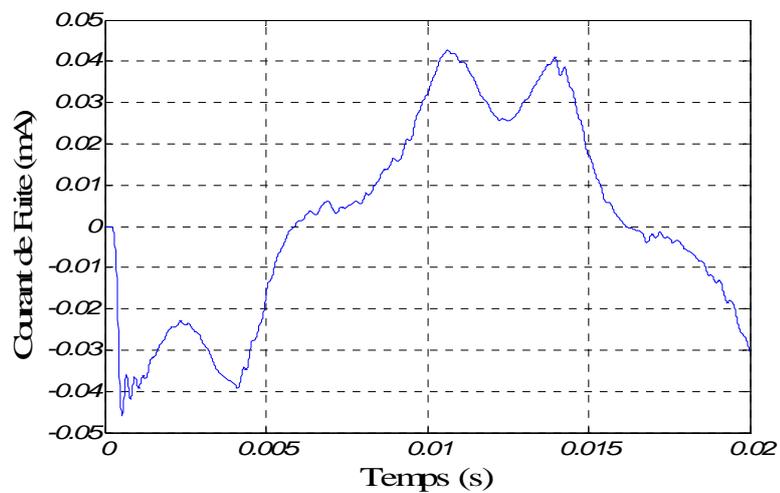


Fig.III.4 : Fondamentaux des deux signaux.

**Fig.III.5** : Configuration du filtre.**Fig.III.6** : Le signal filtré de la tension.**Fig.III.7** : Le signal filtré du courant de fuite.

Crête de Tension (kV)	Crête de Courant (mA)	Déphasage (°)	Taux de distorsion Tension (%)	Taux de distorsion Courant (%)
14.29	0.043	64.08	9.63	25.95

Tab.III.8 : les résultats

III.5. Conclusion

Un programme est élaboré par un langage évolué (Matlab 7) afin de traiter les données enregistrées.

L'implantation de ce programme de traitement numérique, nous permet de contourner la difficulté liée aux fluctuations perturbatrices nuisibles accompagnant souvent les signaux reçus par l'oscilloscope, ce programme élimine les erreurs de lecture offrant les différents tableaux de mesures directement à partir des enregistrements des ondes des signaux de tension et du courant de fuite.

Chapitre IV
Techniques Expérimentales

IV.1. Introduction

Afin d'étudier l'influence de l'état de surface des isolateurs de haute tension sur le comportement des ces derniers, nous effectuons des essais au laboratoire sur deux chaînes d'isolateurs de haute tension, l'une de la ligne 220 kV Khemis Miliana-Oued Sly et l'autre de la ligne 60 kV Oued Sly secours.

Les essais réalisés au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique, concernent la tension de contournement et la visualisation du courant de fuite sur des isolateurs de haute tension.

Ces essais sont effectués d'une part sur des isolateurs pollués sur site et d'autre part sur des isolateurs neufs de même profile soumis à une pollution artificielle.

IV.2. Dispositif expérimental

IV.2.1. Circuit d'essais du Laboratoire de l'ENP

La station d'essai à fréquence industrielle du Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique est de marque " HAEFELY ". Cette station contient les équipements suivants :

- Un transformateur d'essai : 500V/300kV, 50kVA.
- Un transformateur de réglage : 220/(0 à 500)V , 50 kVA.
- Un diviseur capacitif de tension alimenté par la tension secondaire du transformateur d'essai et délivre une tension réduite aux bornes des voltmètres installés sur le pupitre de commande. Il est formé d'une capacité de haute tension $C_1 = 400 \text{ pF}$ en série avec une capacité basse tension C_2 variable, ce qui permet d'obtenir les calibres de mesures : 75 kV, 150 kV et 300 kV.
- Un pupitre de commande où on trouve les appareils de mesure permettant la lecture du courant au secondaire du transformateur de réglage ainsi que des tensions de crête et efficace au secondaire du transformateur d'essai.
- Des appareils annexes de mesure et de protection.
- Un oscilloscope numérique de fréquence d'échantillonnage de 500 MHz " TEKTRONIX" (Fig.IV.1).

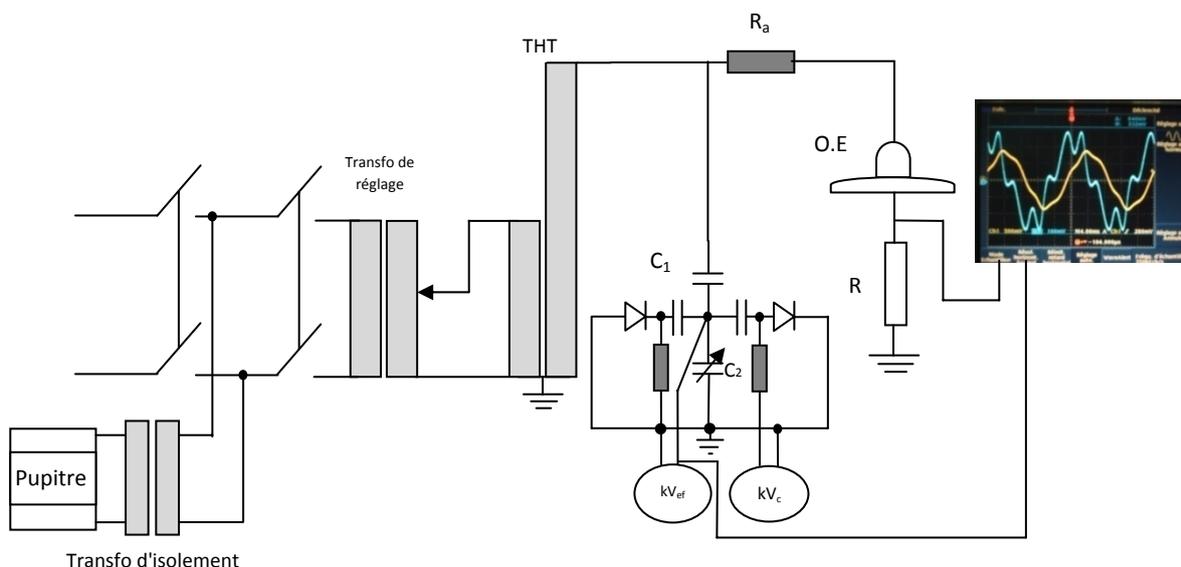


Fig.IV.1 : Circuit d’essai.

IV.2.2. Objet d’essai

Les isolateurs sont de type capot et tige. Ils sont constitués d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre. L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille.

L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique (Fig.IV.2) [37].

Les caractéristiques géométriques des isolateurs 1512L utilisés lors de nos essais sont les suivantes (Fig.IV.3).

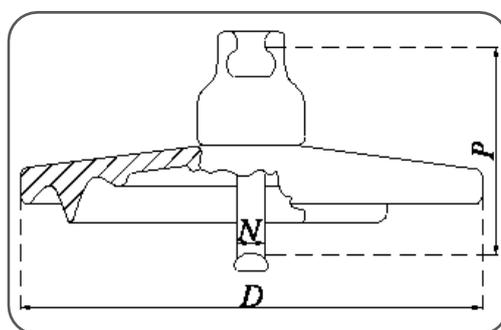
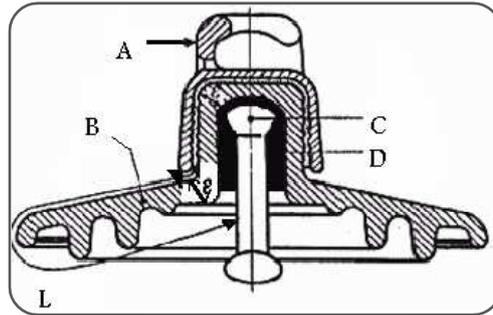


Fig.IV.2 : Isolateur 1512 L.

Désignation	D(mm)	P(mm)	N(mm)	Longueur de ligne de fuite(mm)	Poids net(kg)
1512 L	255	127	16	292	3.75



A : le capot.

B : le diélectrique (verre trempé ou céramique).

D : le ciment de fixation.

C : la tige.

L : Plus courte distance dans l'air entre le capot et la tige.

ϵ : Longueur du canal de perforation, $\epsilon \ll L/2$.

Fig.IV.3 : Isolateur capot et tige (1512 L).

IV.3. Essai sous pollution naturelle

Cette partie des essais est faite sur les deux chaînes d'isolateurs polluées sur site. La première chaîne comporte 14 isolateurs de type 1512L enlevée de la ligne de 220 kV Khemis Miliana-Oued Sly, et la deuxième chaîne comporte 5 isolateurs de même type enlevée de la ligne de 60 kV Oued Sly secours. Nous commençons par démonter les deux chaînes et numéroter les 19 isolateurs. Les 14 isolateurs de la première chaîne sont séparés en trois parties: la partie cotée terre de 1 à 5 (Fig.IV.4), la partie milieu de la chaîne de 6 à 9 (Fig.IV.5), et la partie coté conducteur de 10 à 14 (Fig.IV.6). Les cinq isolateurs de la deuxième chaîne portent les numéros de 15 jusqu'à 19 (Fig.IV.7).



Fig.IV.4 : Isolateur N°1 (coté terre de la chaîne 220 kV).



Fig.IV.5 : Isolateur N°8 (partie milieu de la chaine 220 kV).



Fig.IV.6 : Isolateur N°11 (coté conducteur de la chaine 220 kV).



Fig.IV.7 : Isolateur N°18 (chaine 60 kV).

IV.3.1. Mesure de la tension de contournement à l'état sec

Chaque isolateur est soumis à cinq essais de contournement à l'état sec, et la tension de contournement sera égale à la valeur moyenne des cinq valeurs obtenues. Les valeurs trouvées seront corrigées conformément à la norme CEI 60-1.

IV.3.2. Mesure de la tension de contournement à l'état humide

L'isolateur pollué est installé en position verticale d'essai. A l'aide d'un pulvérisateur manuel on humidifie l'isolateur avec une eau distillée possédant une conductivité de $9.5 \mu S/cm$.

Pour éviter la chute de grosses gouttelettes sur l'objet d'essai et que le ruissellement ne se produise pas, nous avons adopté le mode de pulvérisation pour tous nos essais comme suit : la partie supérieure est soumise à huit pulvérisations réparties sur les quatre directions à une distance de 30 à 40 cm, et la partie inférieure est soumise à cinq pulvérisations à une distance de 20 à 25 cm.

Pour garder les mêmes conditions d'humidification durant les cinq essais effectués sur un isolateur, nous procédons de la façon suivante : nous humidifions le premier isolateur, puis nous réalisons le premier essai de contournement. La même procédure est effectuée pour les autres isolateurs en respectant l'ordre de numérotation. Une fois tous les essais sont réalisés, nous revenons au premier isolateur qui est entre temps devenu sec. Un deuxième essai est effectué, et ainsi de suite jusqu'à effectuer les cinq essais pour chaque isolateur. La tension de contournement sera la moyenne des cinq valeurs obtenues.

IV.3.3. Visualisation des formes du courant de fuite et de la tension appliquée

Pour visualiser la forme du courant de fuite qui circule à travers la couche polluante, nous insérons dans le retour de terre de l'isolateur une résistance de $53,4 \Omega$. Nous relevons la tension aux bornes de la résistance sur un oscilloscope numérique connecté à un ordinateur pour enregistrer directement les signaux captés sur le disque dur.

Cette partie d'essais est effectuée ensuite sur 8 isolateurs choisis de la façon suivante : pour la chaîne 220 kV, les isolateurs 2 et 4 de la partie coté terre, 6 et 9 de la partie milieu de la chaîne, 11 et 12 de la partie coté conducteur. Pour la chaîne 60kV, nous choisissons les deux isolateurs 15 et 18.

La tension appliquée à un isolateur varie de zéro à un niveau très inférieur à la tension de contournement de cet isolateur. Cette précaution est prise pour protéger l'oscilloscope du risque de contournement. La mesure est enregistrée juste après l'ajustement de la tension appliquée, c'est-à-dire que le facteur temps d'application de la tension n'intervient pas sur la forme du courant de fuite.

IV.3.4. Visualisation de l'évolution du courant de fuite en fonction du temps

Pour voir comment évolue le courant de fuite avec le temps, nous appliquons un niveau de tension donné aux bornes de l'isolateur, et on maintient ce niveau de tension pendant dix minutes. Nous relèverons des mesures chaque minute.

IV.4. Essais sous pollution artificielle



Fig.IV.8 : Isolateur 1512L neuf

La deuxième partie de nos essais concerne l'étude du comportement des isolateurs sous une couche de pollution artificielle. Les isolateurs utilisés sont du type 1512L neufs et identiques à ceux utilisés dans la première partie de nos essais (Fig.IV.8).

La pollution artificielle est préparée selon la norme CEI 507. Les solutions salines sont à base de chlorure de sodium (NaCl), de pureté commerciale et de l'eau distillée. Les valeurs des salinités que nous utilisons sont : 2.5 - 3.5 - 5.7 - 10 - 14 - 20 - 28 - 40 - 58 et 80 kg/m³.

Le tableau IV.1 donne les valeurs de la conductivité électrique de la solution pour les valeurs spécifiées de la salinité.

Salinité (kg/m ³)	2.5	3.5	5.7	10	14	20	28	40	58	80
Conductivité volumique (mS/cm)	6.2	8.6	13.6	23.2	31.8	42.4	58.4	79.6	109.8	142.3

Tab.IV.1 : Les valeurs de la conductivité correspondantes à la salinité.

La reproductibilité des essais, dans notre cas, est très délicate, puisqu'il s'agit de reproduire à chaque essai approximativement la même humidification. Pour cela, et afin de minimiser le plus possible les erreurs de manipulation, nous prenons un certain nombre de précautions. Nous commençons d'abord par bien laver l'isolateur à l'aide de l'eau de robinet avant de l'assécher avec du papier. L'isolateur sera lavé une seconde fois avec cette fois-ci de l'eau distillée avant d'être séché avec du papier. Ainsi, l'isolateur est prêt à être humidifié par la solution saline désirée.

IV.4.1. Mesure de la tension de contournement pour différentes conductivités

L'essai de contournement est effectué juste après avoir humidifié l'isolateur par la solution saline. L'isolateur est rendu propre et sec comme déjà mentionné, nous répétons l'essai de contournement quatre fois pour chaque solution saline. La valeur de la tension de contournement sera la valeur moyenne des quatre valeurs obtenues.

IV.4.2. Visualisation des formes du courant de fuite et de la tension appliquée

Pour cette partie, nous utilisons les dix salinités. A chaque fois, nous pulvérisons l'isolateur avec l'une de ces concentrations. Nous enregistrons les formes du courant de fuite et de la tension appliquée pour quatre niveaux de tension, choisis entre zéro et un niveau inférieur à celui de la tension de contournement correspondante à ce degré de pollution.

IV.4.3. Visualisation de l'évolution du courant de fuite en fonction du temps

Comme pour les essais sur la pollution naturelle, après avoir humidifié l'isolateur avec la solution saline, nous lui appliquons un niveau de tension donné (inférieur à celui de la tension de contournement correspondante à ce niveau de pollution) en le maintenant pendant dix minutes. Nous prenons des mesures chaque minute.

VI.5. Conclusion

Pour obtenir de bons résultats pour les essais de haute tension sur les isolateurs il faut prendre plusieurs précautions :

- Dans le cas des isolateurs pollués sur site :
 - Protéger l'isolateur contre tout contact mécanique afin de ne pas modifier la couche polluante.
 - La pulvérisation de la couche polluante doit être homogène sans qu'il y ait ruissellement.
 - Il aurait été préférable d'utiliser la chambre de brouillard pour assurer l'humidification de la pollution durant l'essai sous tension.

- Dans le cas des essais sous pollution artificielle :
 - Il faut bien nettoyer le pulvérisateur avant chaque essai pour ne pas modifier la conductivité de la solution saline.
 - Afin de ne pas changer la conductivité de la couche polluante, la surface de l'isolateur doit être propre et sèche avant la pulvérisation.

Chapitre V
Résultats d'essais et Applications

V.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous montrons une analyse des résultats des essais que nous avons réalisés d'une part sur les isolateurs pollués sur site, et d'autre part sur les isolateurs soumis à la pollution artificielle.

Dans la première partie, nous interprétons les résultats des essais de contournement effectués sur les deux chaînes étudiées.

La deuxième partie concerne la modélisation des données obtenues par la méthode de régression. Dans cette partie, nous montrons l'évolution de la valeur crête du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour différentes sévérités de la couche de pollution, et la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité de la pollution. Chaque modèle présenté est accompagné par une analyse statistique, pour montrer son niveau de signification.

Dans la troisième partie, nous effectuons un traitement numérique des signaux du courant de fuite. En utilisant la technique du filtrage numérique, nous pouvons déterminer la valeur crête d'un signal en éliminant les perturbations de hautes fréquences. Le spectre fréquentiel, le taux de distorsion ainsi que le déphasage courant-tension sont déterminés. A la fin de cette partie, nous interprétons la présence des harmoniques dans les signaux du courant de fuite et de la tension appliquée.

V.2. Essais de contournement sur les isolateurs pollués sur site

La figure V.1 montre les tensions de contournement pour les quatorze isolateurs de la chaîne de 220 kV, à l'état sec et humide. Nous remarquons que les quatre isolateurs de la partie milieu de la chaîne (isolateurs 6 à 9) sont les moins rigides. Cela est dû à la présence de cavités sur leurs surfaces (Figs V.3, V.4, V.5 et V.6), au niveau desquelles le champ électrique est très intense. Ce qui provoque l'augmentation du courant de fuite, et par suite le contournement se fait pour des tensions plus faibles. L'accumulation importante de la pollution sur leurs surfaces engendre une conductivité superficielle, ce qui modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. La tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite. Le réamorçage fréquent au même endroit entraîne par effet thermique la dégradation de la surface isolante.

Pour les isolateurs de la partie coté conducteur (isolateurs 10 à 14), nous avons remarqué qu'ils sont plus rigides que les isolateurs de la partie milieu de la chaîne. Pourtant l'intensité importante des forces électrostatiques autour du conducteur haute tension, implique que l'accumulation de la pollution soit très importante pour cette partie. Donc les isolateurs de cette partie devraient être les moins rigides, alors que ce n'est pas ce que nous trouvons lors de nos essais. C'est pour cette raison, que nous pensons que les agents de SONELGAZ se sont trompés lors de la numérotation de la chaîne.

Les isolateurs de la partie coté terre (isolateurs 1 à 5) sont les plus rigides, car ils sont les mieux exposés au nettoyage par la pluie. En plus les forces électrostatiques d'attraction sont plus faibles par rapport à la partie coté conducteur où les forces électrostatiques sont plus intenses.

Les tensions de contournement des cinq isolateurs de la chaîne de (60 kV) sont données par la figure V.2, le niveau de contournement est presque le même pour tous les isolateurs. Cette chaîne est encore en bon état.

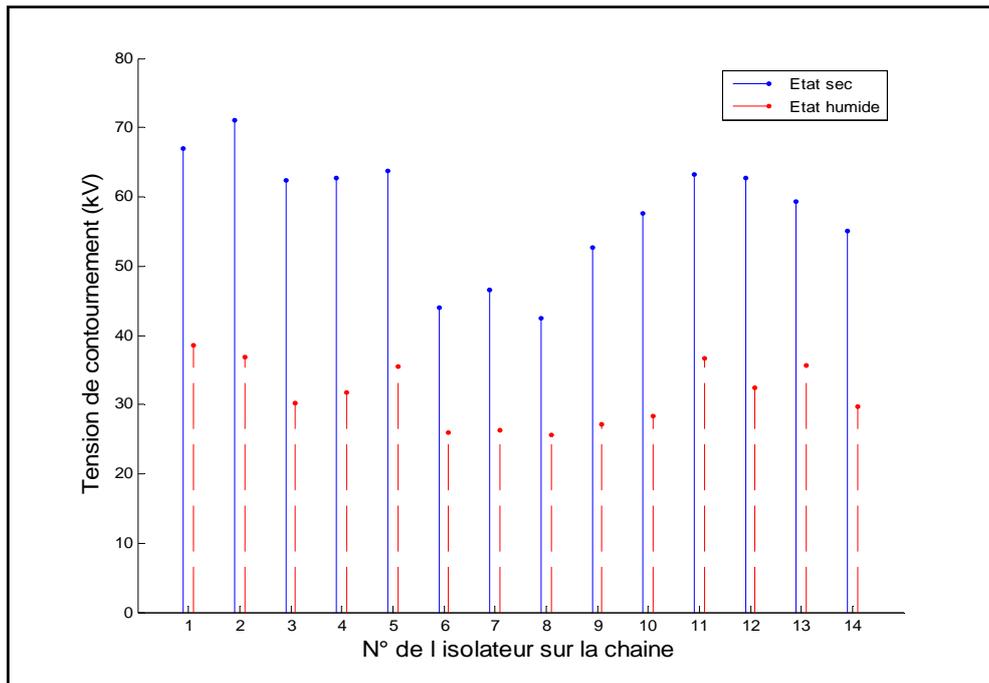


Fig.V.1 Tensions de contournement (Chaine 220 kV)

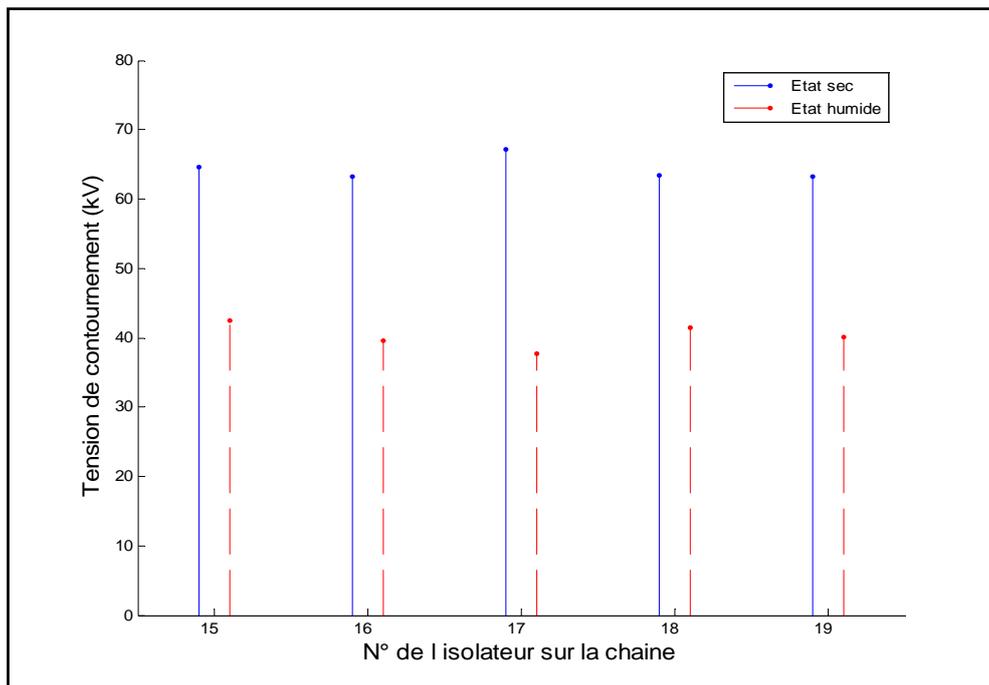


Fig.V.2 Tensions de contournement (Chaine 60 kV)



Fig.V.3 : Isolateur N°6



Fig.V.4 : Isolateur N°7



Fig.V.5 : Isolateur N°8



Fig.V.6 : Isolateur N°9

V.3. Modélisation par la méthode de régression

V.3.1. Essais sous pollution naturelle

Nous présentons les résultats des essais effectués pour quatre isolateurs, (un comme échantillon de chaque partie).

V.3.1.1. Modèle courant de fuite en fonction de la tension appliquée

La figure V.7 présente le modèle de la variation de la valeur crête du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour l'isolateur N°11 de la partie coté conducteur de la chaîne de 220 kV. Les essais sont effectués pour cinq niveaux de tension entre 3.5 kV et 9.3 kV. L'ajustement de ce type de données par la régression linéaire nécessite un changement de variable, c'est-à-dire que nous effectuons la régression de la variable dépendante qui est le courant de fuite, en fonction du carré de la variable indépendante qui est la tension appliquée.

Le tableau V.1 montre les résultats statistiques du modèle. La faible valeur de la probabilité $P(F_\alpha > F_{calculé}) = 0.0007 \ll \alpha = 0.05$ montre que le modèle de régression est significatif, cela est confirmé par le coefficient de détermination très proche de 100%, et qui vaut 98.57%. Le coefficient $R^2(\text{prédiction}) = 96.56\%$ montre que le modèle peut être utilisé pour prédire des valeurs du courant de fuite pour des niveaux de tension autres que les valeurs expérimentales.

Les figures V.8, V.9 et V.10 présentent les tests des hypothèses probabilistes que nous avons posées. Le premier test consiste à vérifier si la variance des erreurs est constante. La figure V.8 montre, dans notre cas, que les résidus en fonction des valeurs ajustés, sont distribués aléatoirement au tour de l'axe des abscisses, et on voit bien que les résidus n'ont pas tendance à augmenter ou diminuer en fonction des valeurs ajustées, d'où nous pouvons dire que la variance des erreurs est constante.

La figure V.9 montre le Q-Q plot ou test de normalité. D'après ce tracé, on voit bien que les points $(e(i) ; e^*(i))$ forment une droite alignée sur la diagonale principale, donc les erreurs sont distribuées selon une loi Normale centrée et réduite.

Enfin la figure V.10 montre que les résidus sont distribués d'une façon aléatoire en fonction de leurs ordres, ce qui signifie qu'il n'y a pas une autocorrelation entre les erreurs, ou plus précisément qu'il n'y a pas une grande autocorrelation. Cela est vérifié par le test de

Durbin-Watson qui a donné une statistique $d = 2.023$, et comme nous l'avons mentionné, cette statistique est comprise entre 0 et 4, et pour qu'il n'y ait pas d'autocorrelation elle doit être proche de 2, ce qui est le cas pour ce test.

La figure V.11 montre une comparaison entre les quatre modèles obtenus pour quatre isolateurs : l'isolateur N°9 de la partie milieu de la chaîne de 220 kV, l'isolateur N°11 de la partie coté conducteur, et l'isolateur N°4 de la partie coté terre; pour la chaîne de 60 kV, nous avons choisi l'isolateur N°15. Ces résultats confirment bien ce que nous avons dit pour les essais de contournement; l'isolateur N°9 (partie milieu de la chaîne) présente un fort courant de fuite, qui nous informe sur l'état dégradée de sa surface. L'isolateur N°4 de la partie coté terre et N°11 de la partie coté conducteur présentent des courants de fuite plus faibles, ce qui est en accord avec leurs tensions de contournement et nous remarquons bien que le courant de fuite est le plus faible pour l'isolateur N°15 (chaîne 60 kV), ce qui signifie que cette chaîne est encore en bon état. Le tableau V.2 montre les quatre modèles et leurs coefficients de détermination.

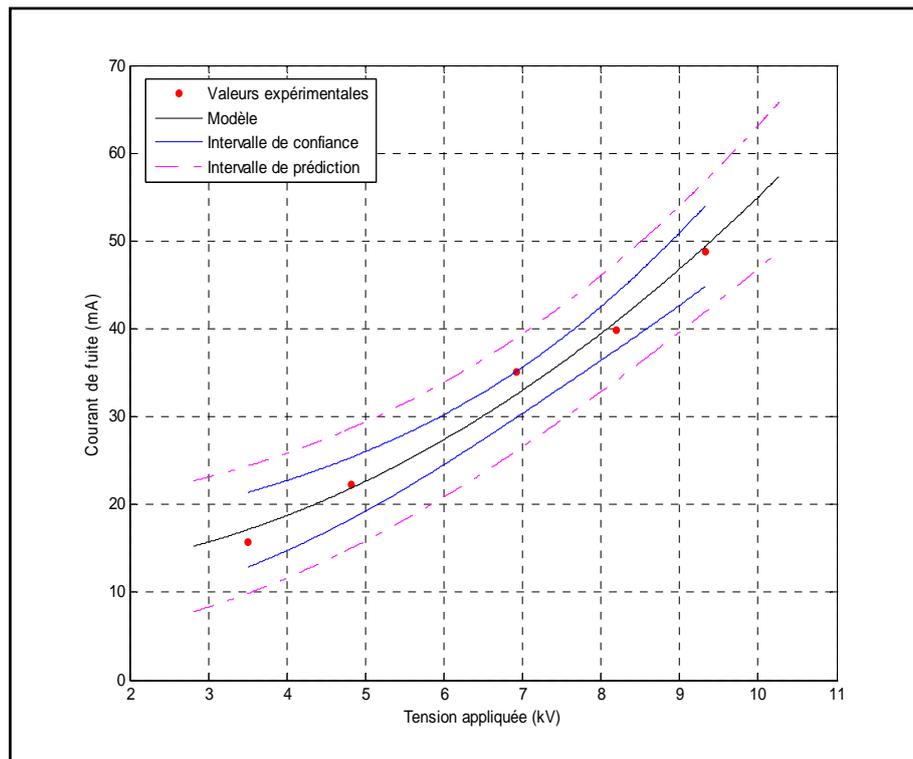


Fig.V.7 : Courant de fuite – Tension appliquée

L'équation de la régression : $I = 11.8172 + 0.4318 V^2$

Paramètre	Estimation	Ecart type	Lim Inf	Lim Sup	P
B_0	11.8172	1.6471	6.5753	17.0590	0.0056
B_1	0.4318	0.0300	0.3363	0.5273	0.0007

$S = 1.8447$ $R^2 = 98.57\%$ $R^2(\text{prédiction}) = 96.56\%$ $PRESS = 24.560$

Analyse de la variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Régression	1	705.2033	705.2033	207.2360	0.0007
Résidus	3	10.2086	3.4028		
Totale	4	715.412000			

Tab.V.1 : Résultats statistiques du modèle courant de fuite en fonction de la tension appliquée (Pour l'isolateur N°11)

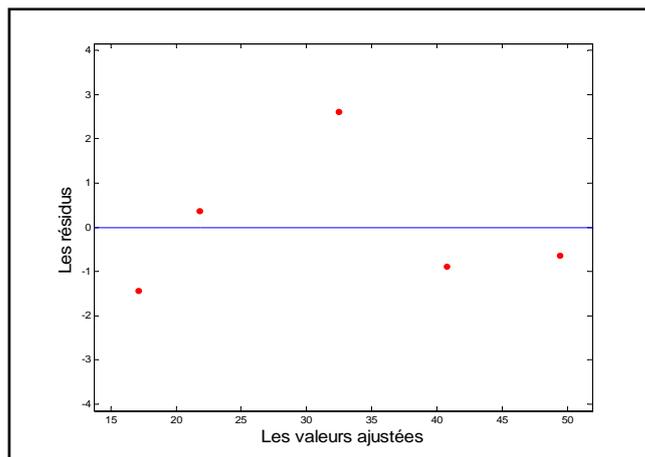


Fig.V.8 : Test de la variance des erreurs

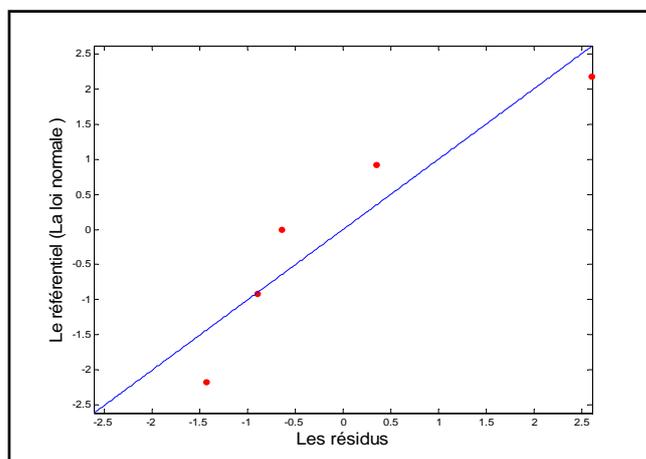


Fig.V.9 : Test de normalité (Q-Q Plot et Droite de Henry)

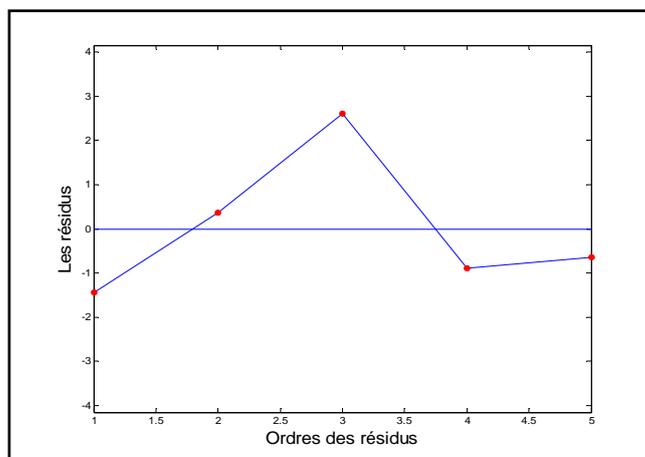


Fig.V.10 : Test de corrélation entre les erreurs

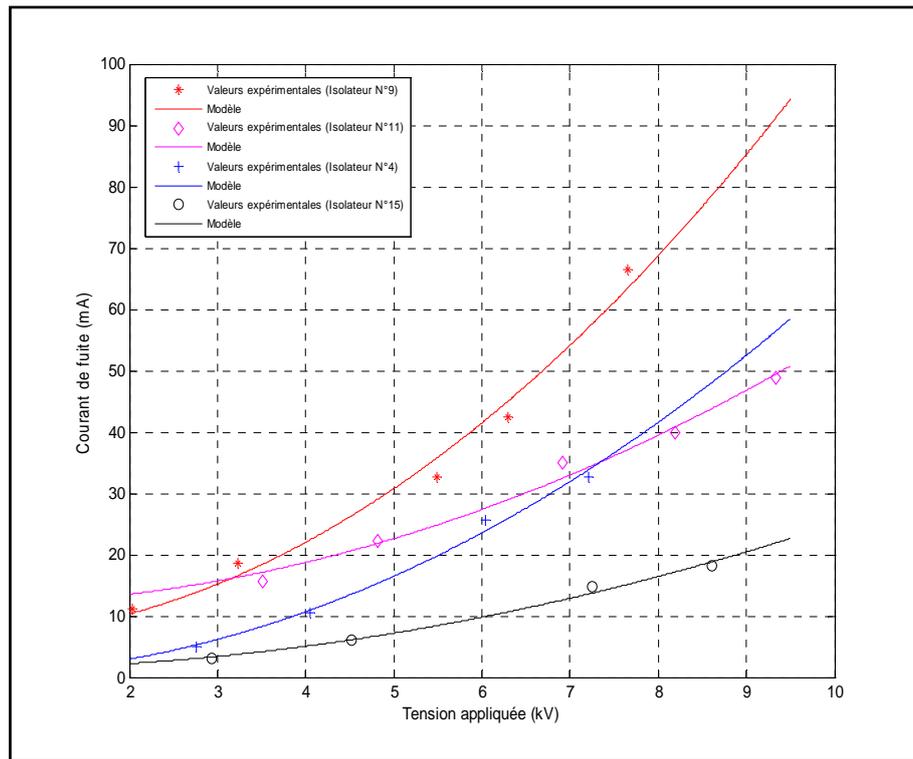


Fig.V.11 : Courant de fuite – Tension appliquée

Isolateur	Modèle	Coefficient de détermination R^2
Isolateur N°9	$I = 6.4347 + 0.9733 V^2$	98.39%
Isolateur N°11	$I = 11.8172 + 0.4318 V^2$	98.57%
Isolateur N°4	$I = 0.3851 + 0.6434 V^2$	98.97%
Isolateur N°15	$I = 1.2816 + 0.2367 V^2$	98.88%

Tab.V.2 : Présentation des modèles courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différents isolateurs

V.3.2. Essais sous pollution artificielle

V.3.2.1 Modèle tension de contournement en fonction de la conductivité de la couche polluante (par la régression linéaire)

La figure V.12 présente la variation de la valeur efficace de la tension de contournement, en fonction de la conductivité volumique de la couche polluante. Les valeurs de la tension de contournement sont obtenues pour neuf conductivités. Le modèle est construit par la régression linéaire simple, en choisissant comme variable explicative le logarithme népérien de la conductivité.

Les résultats statistiques du modèle sont représentés par le tableau V.3, et les tests des hypothèses probabilistes sont représentés par les figures V.13, V.14 et V.15. Le test de Durbin-Watson a donné une statistique $d = 1.5984$.

D'après ces résultats, nous remarquons que l'augmentation de la conductivité diminue la résistance de la couche polluante. Ce qui provoque le contournement de l'isolateur pour de faibles niveaux de tensions, mais à partir d'une certaine valeur de la conductivité, la tension de contournement reste presque constante. Cela est expliqué par le fait que la couche polluante est devenue très conductrice à un niveau à partir duquel l'augmentation de la conductivité n'influe plus sur sa résistance.

V.3.2.2 Modèle tension de contournement en fonction de la conductivité de la couche polluante (par la régression non linéaire)

La figure V.16 présente la modélisation de la tension de contournement en fonction de la conductivité de la couche polluante, par la régression non linéaire. Les résultats statistiques sont présentés par le tableau V.4. La somme des carrés des erreurs pour ce modèle vaut: $SSE=100.7367$, alors que pour le modèle linéaire $SSE=135.5433$, cela signifie que l'ajustement par la régression non linéaire est meilleur dans ce cas (Tab.V.4).

Une valeur prédite de la tension de contournement pour la conductivité 142.3 mS/cm, a été trouvée dans un intervalle de prédiction de 28.7 kV à 36.4 kV, et la valeur expérimentale vaut 32.5 kV. Les tests des hypothèses probabilistes sont représentés par les figures V.17, V.18 et V.19. La statistique de Durbin-Watson vaut $d = 1.9854$.

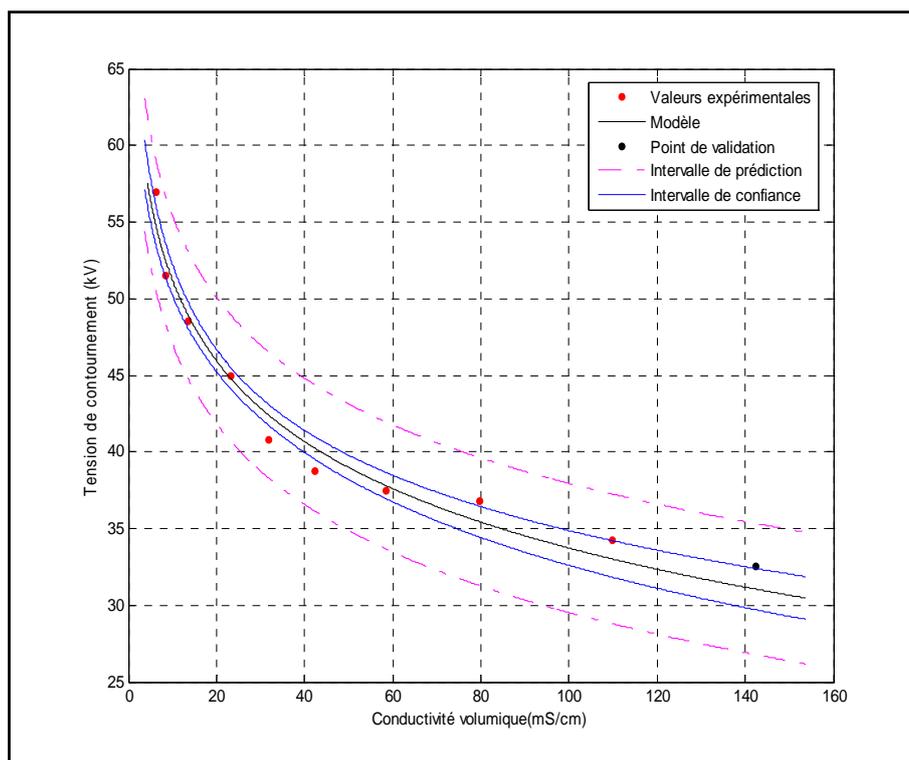


Fig.V.12 : Tension de contournement – Conductivité volumique

L'équation de la régression : $V = 68.7269 - 7.5978 \log(\text{Conductivité})$

Paramètre	Estimation	Ecart type	Lim Inf	Lim Sup	P
B_0	68.7269	1.2322	66.2229	71.2309	0.0000
B_1	- 7.5978	0.3550	- 8.3191	- 6.8764	0.0000

$S = 1.9966$ $R^2 = 93.09\%$ $R^2(\text{prédiction}) = 90.65\%$ $PRESS = 169.98$

Analyse de la variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Régression	1	1826.4567	1826.4567	458.1529	0.0000
Résidus	34	135.5433	3.9866		
Manque d'ajustement	7	55.5433	7.9348	2.6780	0.0305
Erreur pure	27	80.0000	2.9630		
Totale	35	1962.0000			

Tab.V.3 : Résultats statistiques du modèle tension de contournement pour différentes conductivités

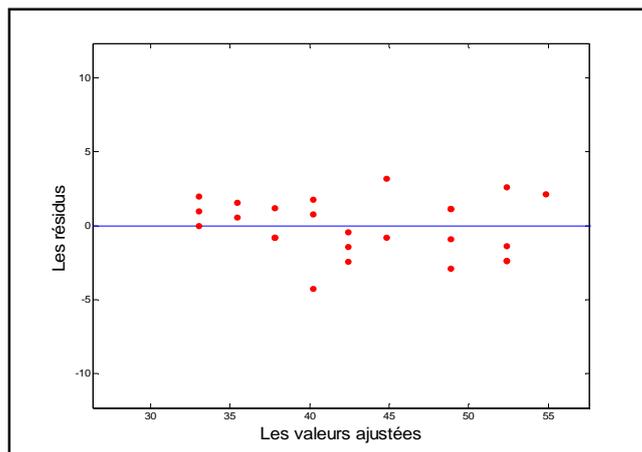


Fig.V.13 : Test de la variance des erreurs

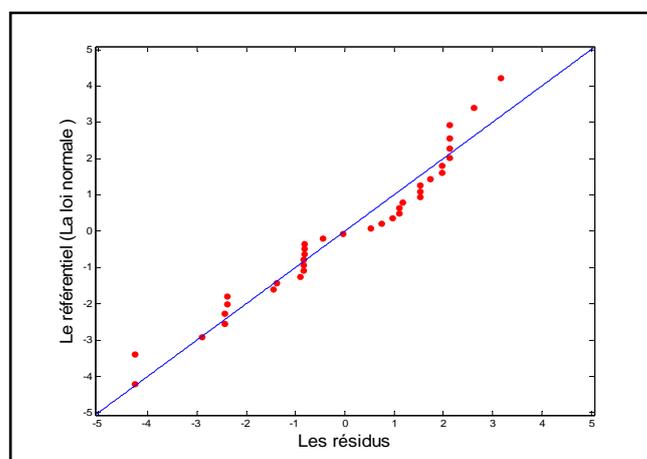


Fig.V.14 : Test de normalité (Q-Q Plot et Droite de Henry)

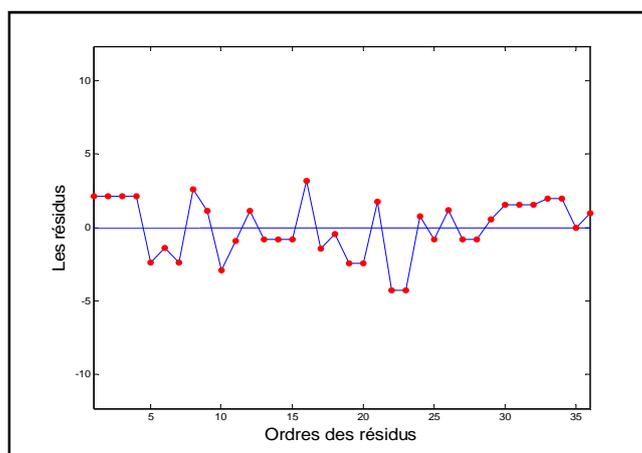


Fig.V.15 : Test de corrélation entre les erreurs

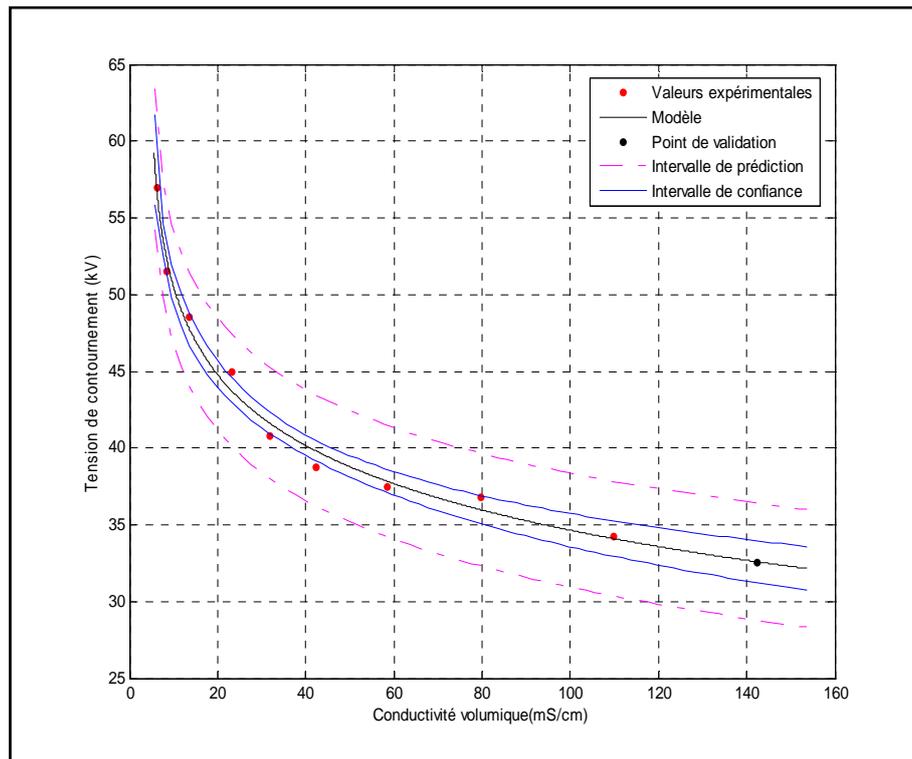


Fig.V.16 : Tension de contournement – Conductivité volumique

L'équation de la régression : $V = 60.2184 - 5.6064 \log (Conductivité - 4.3859)$

Paramètre	Estimation	Ecart type	Lim Inf	Lim Sup	P
B_0	60.2184	1.8919	56.3692	64.0675	0.0000
B_1	- 5.6064	0.4885	- 6.6003	- 4.6124	0.0000
B_2	4.3859	0.6654	3.0321	5.7396	0.0000

Analyse de la variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Régression	3	1861.2633	620.4211	203.2416	0.0000
Résidus	33	100.7367	3.0526		
Totale	36	1962.0000			

Tab.V.4 : Résultats statistiques du modèle tension de contournement pour différentes conductivités

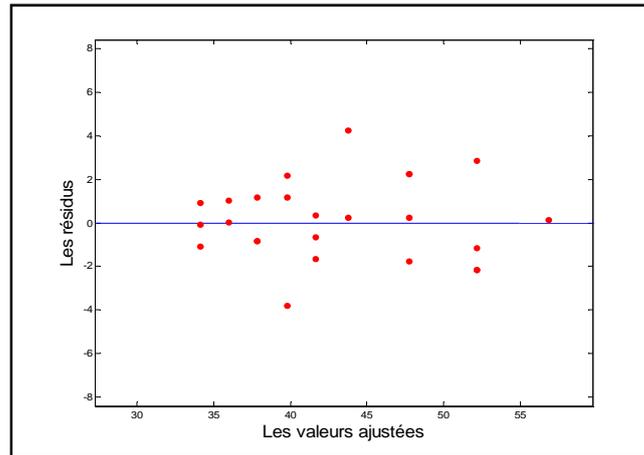


Fig.V.17 : Test de la variance des erreurs

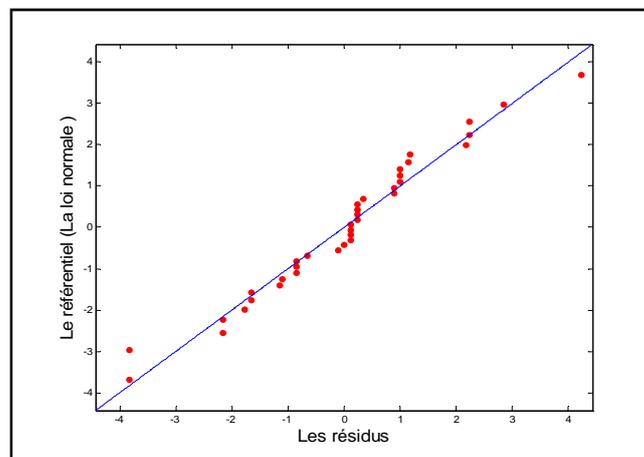


Fig.V.18 : Test de normalité (Q-Q Plot et Droite de Henry)

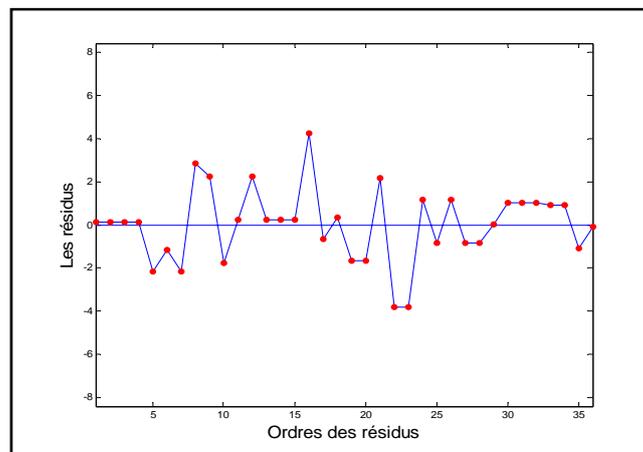


Fig.V.19 : Test de corrélation entre les erreurs

V.3.2.3 Modèle courant de fuite en fonction de la tension appliquée (par la régression linéaire)

Nous présentons les résultats obtenus pour les quatre conductivités : 6.2, 8.6, 23.2 et 79.6 mS/cm.

La figure V.20 montre la variation de la valeur crête du courant de fuite en fonction de la valeur crête de la tension appliquée, pour une conductivité volumique de la couche polluante de 6.2 mS/cm. Les valeurs du courant de fuite sont obtenus pour cinq niveaux de tension entre 3.7 kV et 12.7 kV. Ces résultats sont modélisés par une fonction parabolique, qui explique l'augmentation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée. L'ajustement de ce type de données par la régression linéaire nécessite un changement de variable, c'est-à-dire nous effectuons la régression de la variable dépendante qui est le courant de fuite, en fonction du carré de la variable indépendante qui est la tension appliquée.

Le tableau V.5 montre les résultats statistiques du modèle. D'après la probabilité $P(F_\alpha > F_{calculé}) = 0.000026 \ll 0.05$, la régression est jugée significative, avec un coefficient de détermination de 99.85%, cette valeur proche de 100% implique que le modèle explique presque toute la variabilité des différentes valeurs prises par la variable dépendante (courant de fuite). La capacité de prédiction du modèle est indiquée par le coefficient R^2 (prédiction) = 95.83%, cette valeur proche de 100% veut dire que le modèle peut prédire de nouvelles valeurs du courant de fuite pour des niveaux de tension autres que celles obtenues expérimentalement. Les tests des hypothèses probabilistes sont donnés par les figures V.21, V.22 et V.23.

Afin de voir l'influence du degré de salinité de la couche polluante sur le courant de fuite qui circule à travers cette couche, nous avons construit trois autres modèles pour les conductivités 8.6, 23.2 et 79.6 mS/cm. La figure V.24 présente une comparaison entre les quatre modèles, et montre clairement que l'augmentation de la conductivité de la couche polluante diminue son impédance et par suite provoque l'augmentation du courant de fuite.

Le tableau V.6 montre les quatre modèles et leurs coefficients de détermination. Nous notons bien que les tests des hypothèses probabilistes sont vérifiés pour les trois derniers modèles.

V.3.2.4. Modèle courant de fuite en fonction de la tension appliquée (par la régression non linéaire)

La figure V.25 montre une modélisation des valeurs obtenues pour la conductivité 6.2 mS/cm par la méthode de régression non linéaire. Cette équation non linéaire possède trois paramètres au lieu de deux, ce qui donne au modèle un degré de liberté en plus, et par suite permettre une meilleure minimisation de la somme des carrés des erreurs. Le tableau V.7 montre les résultats statistiques du modèle.

La signification de la régression non linéaire est justifiée par la faible probabilité $P(F_\alpha > F_{calculé}) = 0.000017 \ll \alpha = 0.05$. Le modèle de régression linéaire présente une somme des carrés des erreurs $SSE = 0.000116$, alors que pour le modèle non linéaire $SSE = 0.000006$. Pour vérifier la capacité de prédiction du modèle, une valeur prédite du courant de fuite pour un niveau de tension de 16.52 kV, a été trouvée dans un intervalle de prédiction de 0.665 mA et 0.723 mA, et la valeur expérimentale vaux 0.681 mA, cela nous informe que le modèle peut être utilisé pour prédire d'autre valeurs.

Les tests des hypothèses probabilistes sont présentés par les figures V.26, V.27 et V.28. Le test de Durbin-Watson a donné une statistique $d = 2.5797$.

La figure V.29 montre une comparaison entre quatre modèles construits pour les quatre conductivités 6.2, 8.6, 23.2 et 79.6 mS/cm, ces modèles sont donnés dans le tableau V.8 avec leurs tests de signification.

V.3.2.5 Modèle courant de fuite en fonction de la tension appliquée et la conductivité volumique (par la régression linéaire)

En utilisant la régression linéaire à deux variables explicatives, on peut résumer les quatre modèles présenté précédemment en un seul modèle qui donne la valeur crête du courant de fuite en fonction à la fois du niveau de tension appliqué et de la conductivité de la couche polluante. Pour le faire, nous considérons le logarithme népérien de la conductivité comme étant la première variable explicative, et la deuxième variable explicative serait le carré de la tension appliquée (Fig.V.30). Les résultats statistiques du modèle sont représentés par le tableau V.9. Les figures V.31, V.32 et V.33 présentent les tests des hypothèses probabilistes. Le test de Durbin-Watson a donné une statistique $d = 1.5694$.

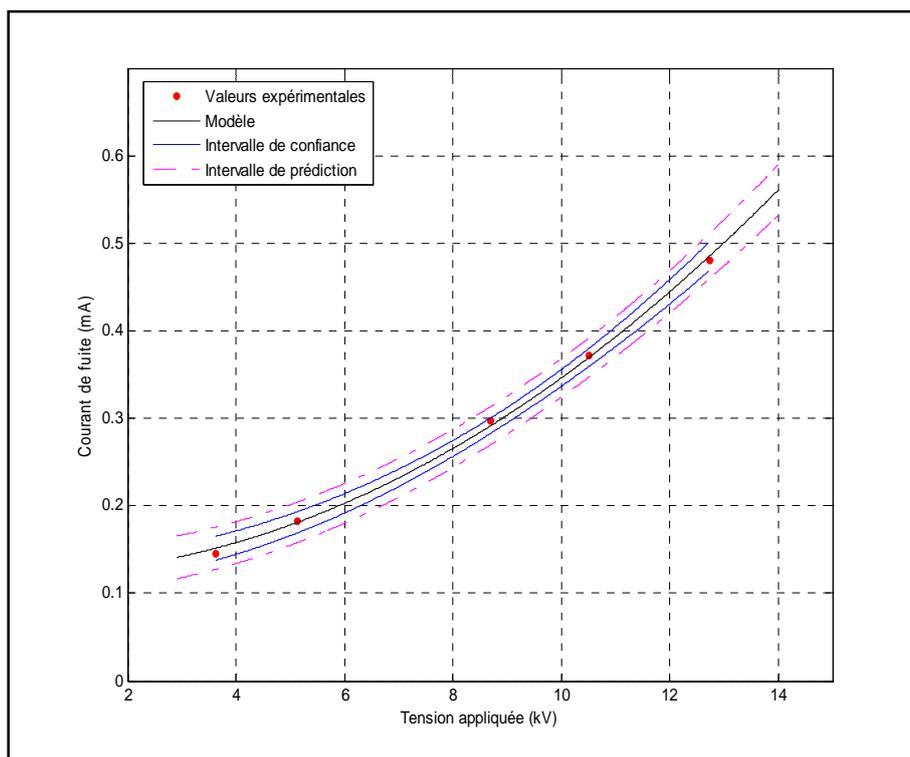


Fig.V.20 Courant de fuite – Tension appliquée

L'équation de la régression : $I = 0.1221 + 0.0022 V^2$

Paramètre	Estimation	Ecart type	Lim Inf	Lim Sup	P
B_0	0.1221	0.0048	0.1068	0.1374	0.0001
B_1	0.0022	0.0001	0.0021	0.0024	0.0000

$S = 0.0062$ $R^2 = 99.85\%$ $R^2(\text{prédiction}) = 95.83\%$ $PRESS = 0.0035$

Analyse de la variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Régression	1	0.074966	0.074966	1941.8213	0.000026
Résidus	3	0.000116	0.000039		
Totale	4	0.075082			

Tab.V.5 : Résultats statistiques du modèle courant de fuite en fonction de la tension appliquée (Pour la conductivité 6.2 mS/cm)

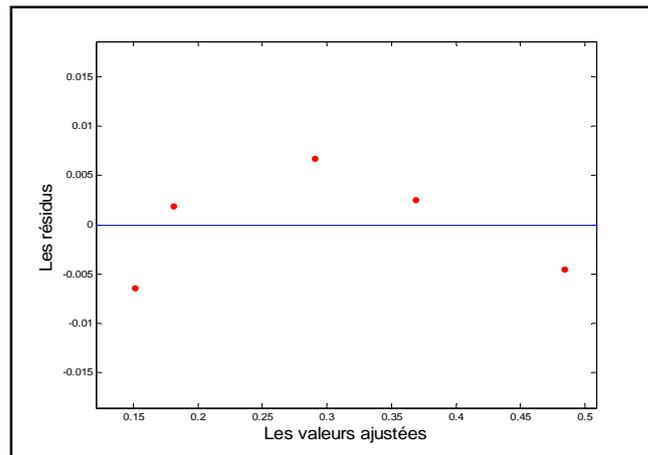


Fig.V.21 : Test de la variance des erreurs

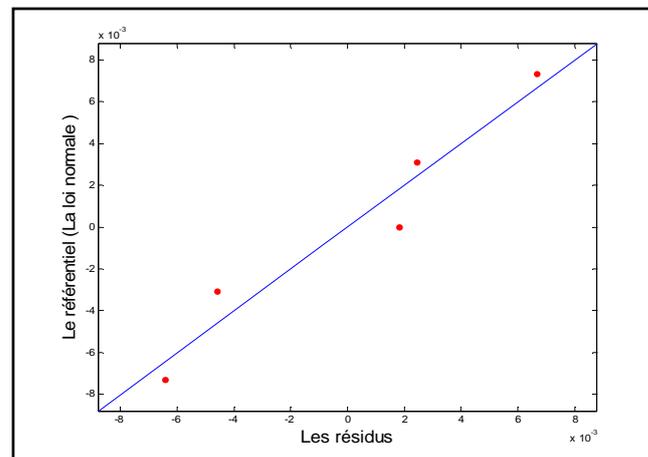


Fig.V.22 : Test de normalité (Q-Q Plot et Droite de Henry)

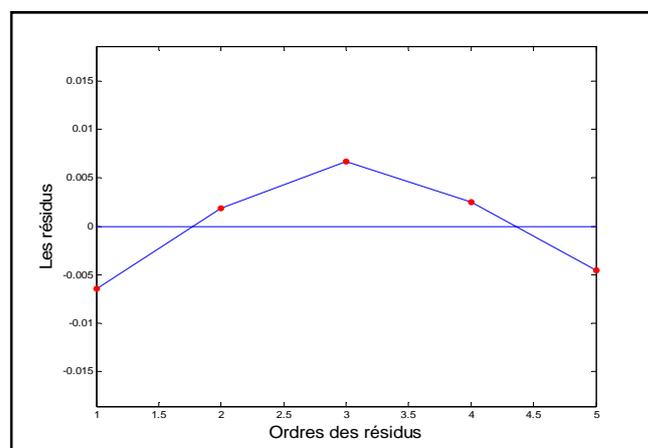


Fig.V.23 : Test de corrélation entre les erreurs

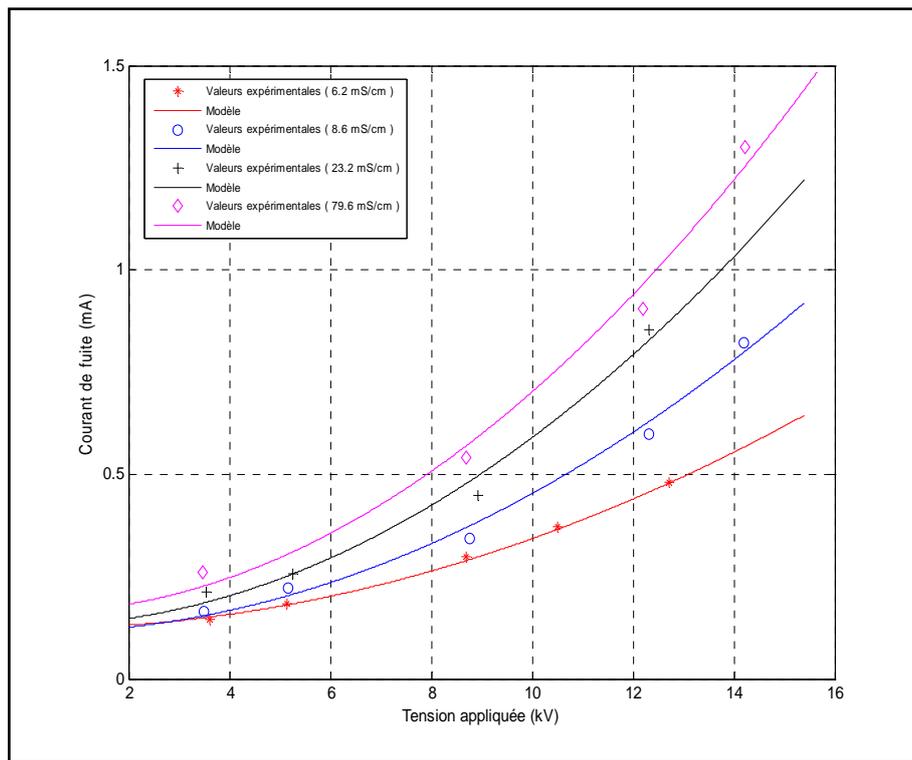


Fig.V.24 : Courant de fuite – Tension appliquée

Conductivité	Modèle	Coefficient de détermination R^2
6.20 mS/cm	$I = 0.1221 + 0.0022 V^2$	99.85%
8.60 mS/cm	$I = 0.1122 + 0.0034 V^2$	99.00%
23.2 mS/cm	$I = 0.1288 + 0.0046 V^2$	98.60%
79.6 mS/cm	$I = 0.1604 + 0.0054 V^2$	98.72%

Tab.V.6 : Présentation des modèles courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités (Par la régression linéaire)

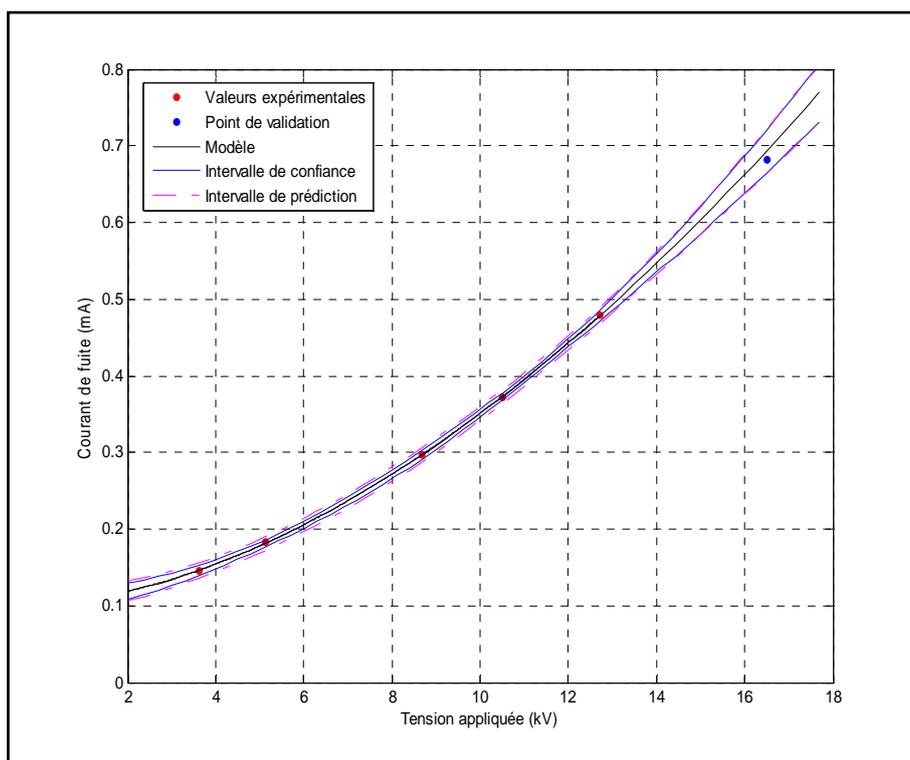


Fig.V.25 : Courant de fuite – Tension appliquée

L'équation de la régression : $I = 0.1037 + 0.0045 V^{1.7359}$

Paramètre	Estimation	Ecart type	Lim Inf	Lim Sup	P
B_0	0.1037	0.0037	0.0878	0.1197	0.0013
B_1	0.0045	0.0005	0.0023	0.0068	0.0130
B_2	1.7359	0.0426	1.5526	1.9193	0.0006

Analyse de la variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Régression	3	0.511323	0.170441	57186.9119	0.000017
Résidus	2	0.000006	0.000003		
Totale	5	0.511329			

Tab.V.7 : Résultats statistiques du modèle courant de fuite en fonction de la tension appliquée (Pour la conductivité 6.2 mS/cm)

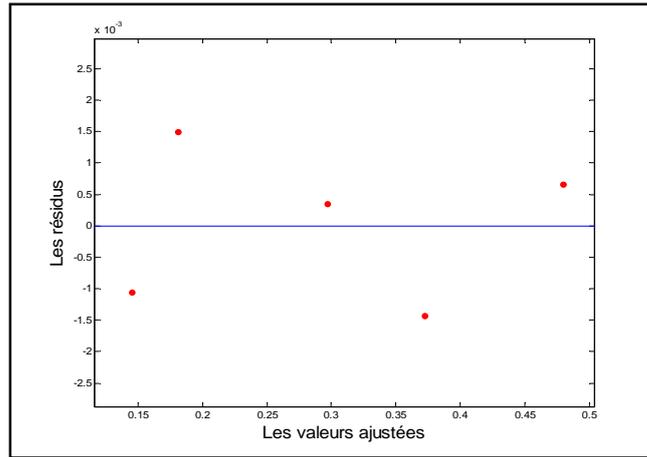


Fig.V.25 : Test de la variance des erreurs

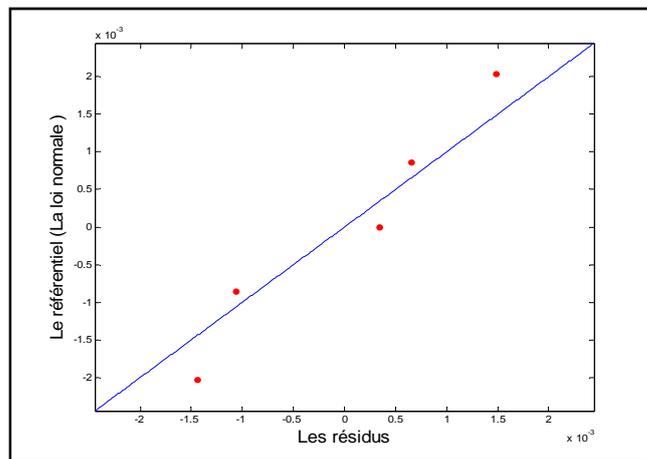


Fig.V.27 : Test de normalité (Q-Q Plot et Droite de Henry)

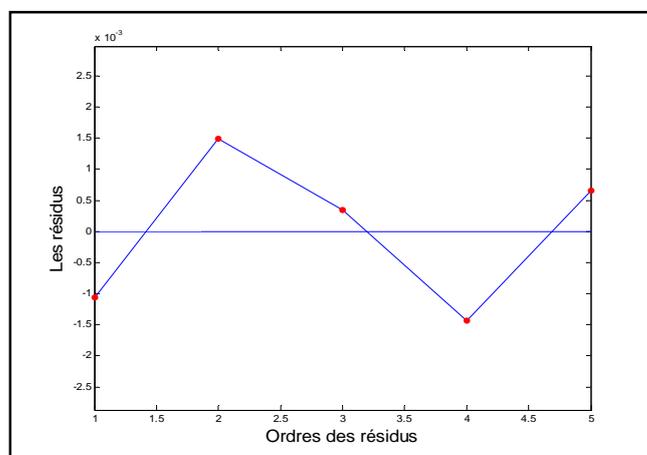


Fig.V.28 : Test de corrélation entre les erreurs

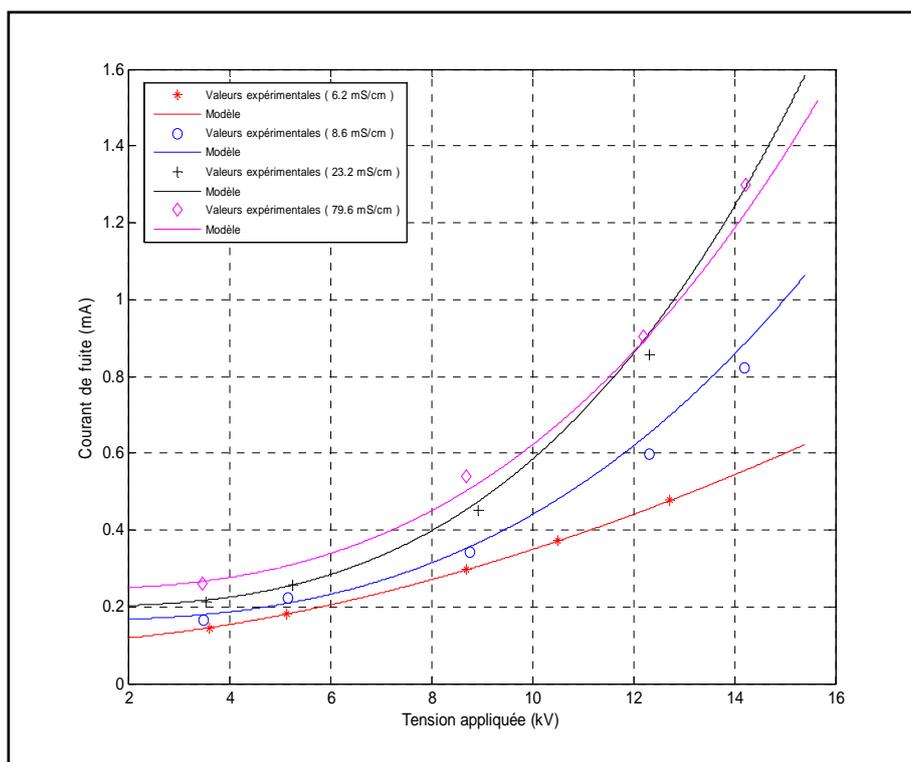


Fig.V.29 : Courant de fuite – Tension appliquée

Conductivité	Modèle	$P(F_\alpha > F_{calculé})$
6.20 mS/cm	$I = 0.1037 + 0.0045 V^{1.7359}$	0.000017
8.60 mS/cm	$I = 0.1641 + 0.0005 V^{2.7406}$	0.000748
23.2 mS/cm	$I = 0.1999 + 0.0004 V^{2.9805}$	0.006970
79.6 mS/cm	$I = 0.2451 + 0.0007 V^{2.7288}$	0.030254

Table.V.8 : Présentation des modèles courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités (Par la régression non linéaire)

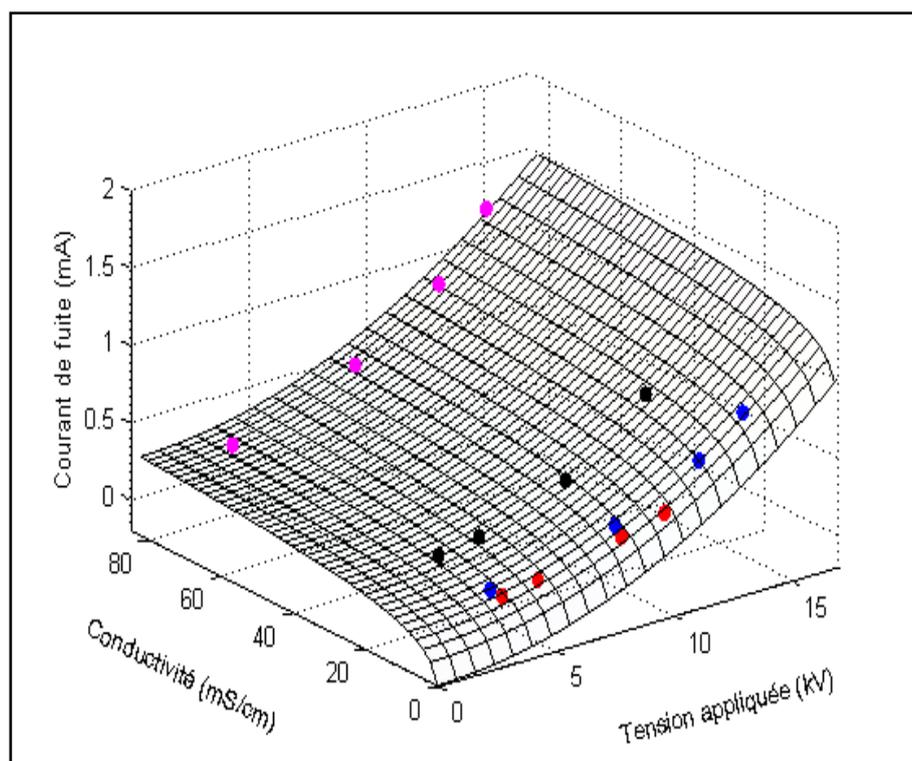


Fig.V.30 : Courant de fuite - Tension appliquée- conductivité volumique

L'équation de la régression : $I = -0.2084 + 0.1146 \log(\text{Conductivité}) + 0.0042V^2$

Paramètre	Estimation	Ecart type	Lim Inf	Lim Sup	P
B_0	-0.2084	0.0624	-0.3432	-0.0737	0.0053
B_1	0.1146	0.0201	0.0713	0.1580	0.0001
B_2	0.0042	0.0003	0.0035	0.0048	0.0000

$S = 0.0787$ $R^2 = 95.16\%$ $R^2(\text{prédiction}) = 91.08\%$ $PRESS = 14.8382$

Analyse de la variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Régression	2	1.5834	0.7917	127.8653	0.0000
Résidus	3	0.0805	0.0062		
Totale	15	1.6639			

Tab.V.9 : Résultats statistiques du modèle courant de fuite en fonction de la tension appliquée et la conductivité de la couche polluante

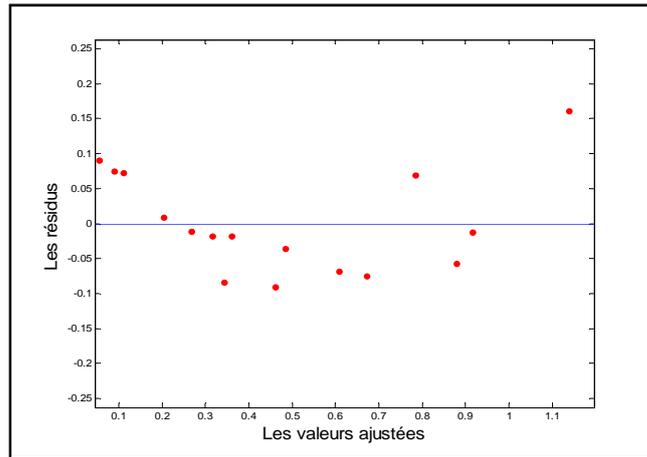


Fig.V.31 : Test de la variance des erreurs

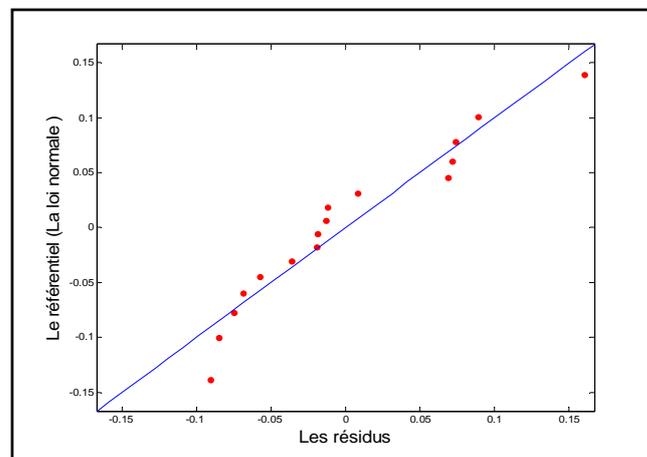


Fig.V.32 : Test de normalité (Q-Q Plot et Droite de Henry)

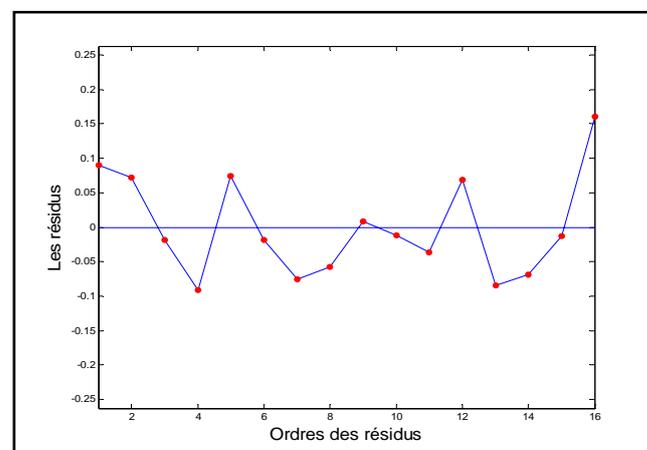


Fig.V.33 Test de corrélation entre les erreurs

V.4. Traitement du signal de courant de fuite

V.4.1. Cas d'une pollution naturelle

La forme de la tension n'est pas parfaitement une sinusoïde, le signal contient des perturbations (Fig.V.35.a). En ce qui concerne le spectre fréquentiel, les harmoniques les plus importants sont d'ordre 3, 5 et 7 (Fig.V.35.b).

A l'état sec, l'onde du courant de fuite prend la forme de 'M' déformé, c'est-à-dire que l'onde comporte des distorsions. Ces distorsions sont accompagnées par des impulsions irrégulières ayant des amplitudes limitées. L'amplitude de ces courants est de quelques centaines de micro-ampère (Fig.V.36.a, V.37.a et V.38.a). Le spectre fréquentiel montre la présence des harmoniques 3, 5 et 7, avec l'amplitude de l'harmonique 5 plus élevée que celle de l'harmonique 7, et l'amplitude de l'harmonique 3 est la plus faible (Fig.V.36.b, V.37.b et V.38.b). La mesure du déphasage dans ce cas, montre que le courant de fuite est en avance par rapport à la tension appliquée avec un angle variant entre 60° et 70° . Cela signifie que l'effet capacitif est dominant, mais le caractère résistif est non négligeable.

Les figures V.39, V.40 et V.41 montrent la forme du courant de fuite et celle de la tension appliquée pour différents états de la surface isolante. Dans le premier cas, la surface est sèche, dans le deuxième cas, la partie supérieure de l'isolateur est humidifiée, et dans le troisième cas, l'isolateur est complètement humidifié (Isolateur N°12 par exemple), et pour un niveau de tension de 10 kV.

La figure V.42 donne le déphasage courant-tension et le facteur de distorsion pour les trois cas considérés précédemment. Nous remarquons que le déphasage et le taux de distorsion sont plus élevés pour l'état sec. En augmentant le caractère résistif par l'humidification de la partie supérieure de l'isolateur, le déphasage diminue ainsi que le taux de distorsion. L'humidification complète de l'isolateur rend son caractère plus résistif, le déphasage est très faible, et nous notons l'existence de l'effet capacitif dû à l'intervalle d'air qui existe entre le capôt de l'isolateur et la surface isolante, cette partie de la surface ne peut être touchée par l'humidification (Fig.V.34).

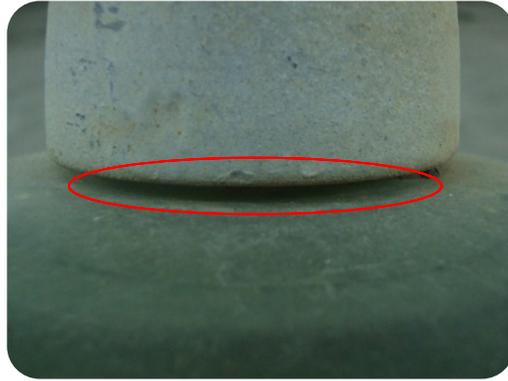
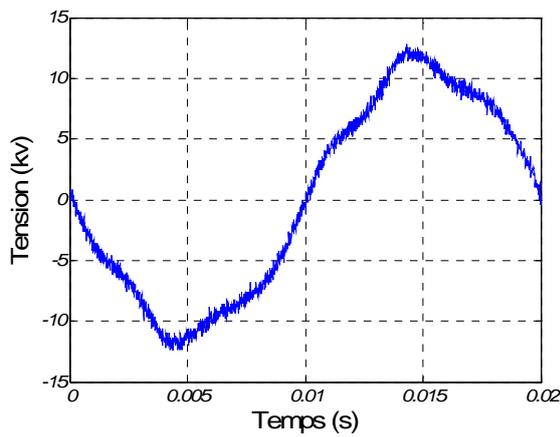


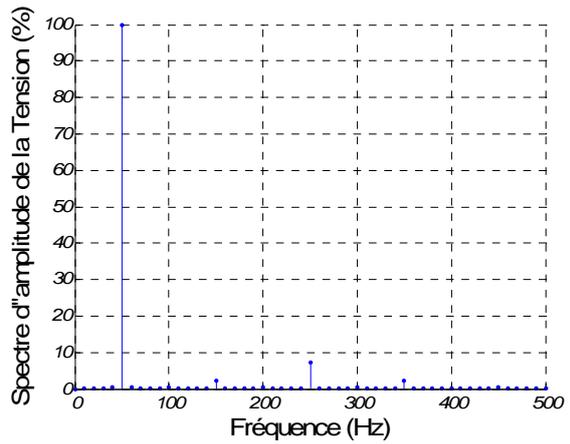
Fig.V.34 : Partie de l'isolateur non touchée par l'humidification.

Les figures V.43 à V.46, montrent la forme du courant de fuite et celle de la tension appliquée pour différents niveaux de cette dernière (Isolateur N°2 par exemple); l'état de l'humidification est le même pour chaque essai. Le déphasage courant-tension et le taux de distorsion sont les mêmes pour les quatre cas. Cela implique que le niveau de tension n'influe pas sur le caractère de l'impédance, à condition que l'état de l'humidification reste le même pendant l'essai.

Les figures V.47 à V.50, montrent l'influence du temps d'application de la tension sur la forme du courant de fuite, pour deux niveaux de tension, 9 kV et 15 kV, (isolateur N°18 par exemple). A l'instant d'application de la tension, nous remarquons pour les deux niveaux que la forme du courant de fuite est proche d'une sinusoïde, et sa valeur crête est plus élevée pour le niveau de tension le plus élevé; le taux de distorsion et le déphasage sont faibles. L'assèchement de la couche polluante par l'effet Joule augmente sa résistance, et par suite le courant diminue. Cette diminution est très rapide pour le niveau de tension le plus élevé car le courant est plus intense. L'apparition des zones sèches engendre l'effet capacitif, ce qui augmente à la fois le déphasage entre le courant et la tension, et le taux de distorsion du courant, l'augmentation de ces deux derniers est plus rapide et plus importante pour le niveau de tension le plus élevé (Figs V.51, V.52 et V.53).

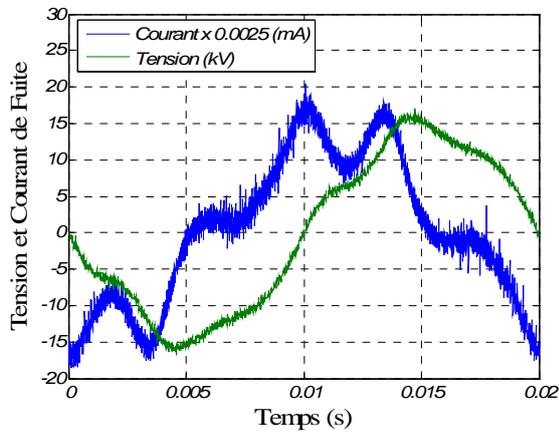


(a)

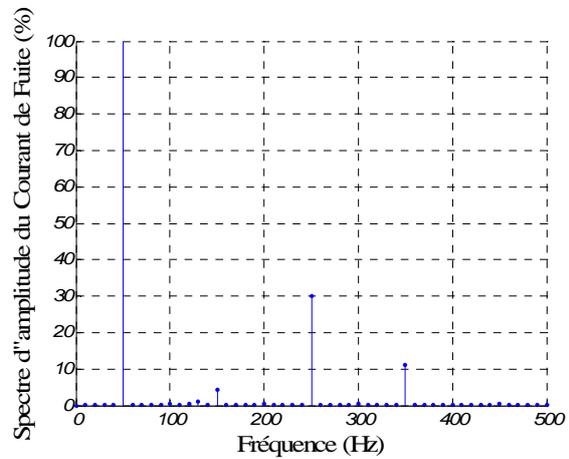


(b)

Fig.V.35 : La forme de la tension et son spectre fréquentiel
(Taux de distorsion Tension = 9.69 %)

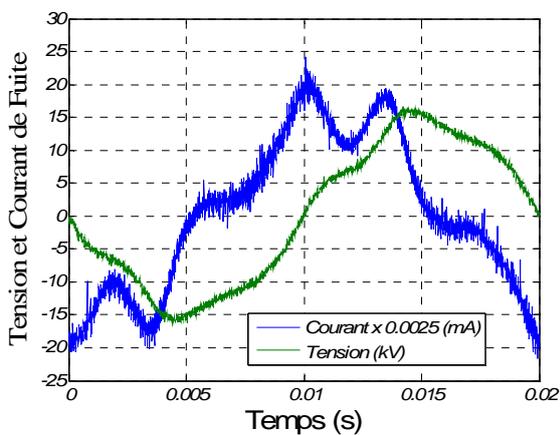


(a)

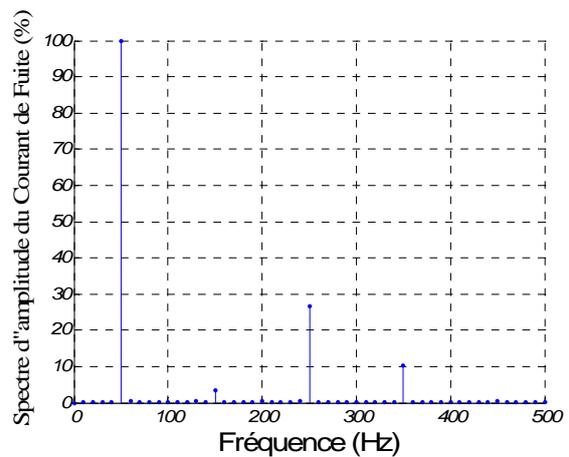


(b)

Fig.V.36 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 15.87 kV (Taux de distorsion courant = 30.21 %, Déphasage = 69.48 °)
(Isolateur 06) "Etat sec"



(a)



(b)

Fig.V.37 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 15.85 kV (Taux de distorsion courant = 26.88 %, Déphasage = 70.38 °)
(Isolateur 11) "Etat sec"

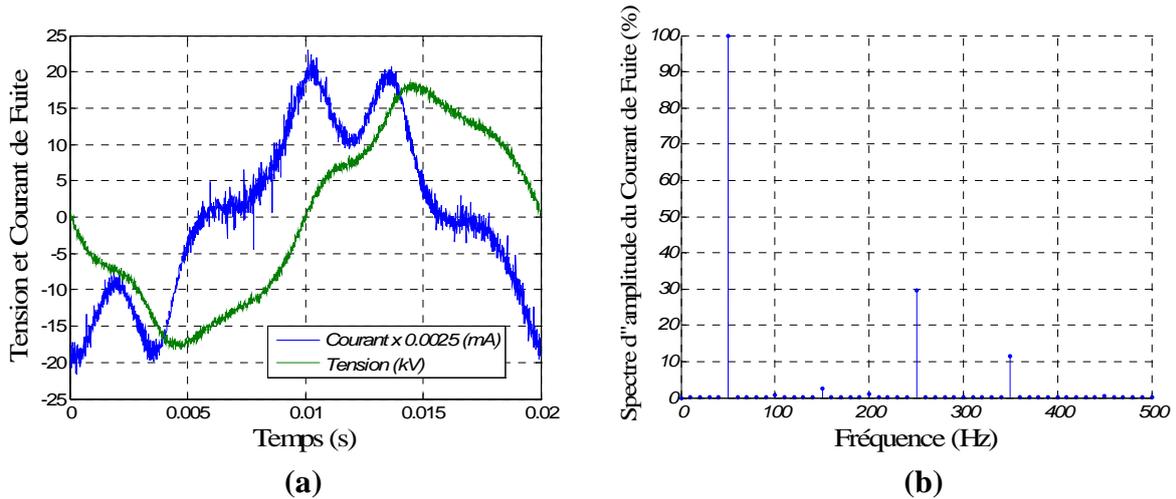


Fig.V.38 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 17.84 kV (Taux de distorsion courant = 29.72 %, Déphasage = 65.52 °) (Isolateur 02) "Etat sec"

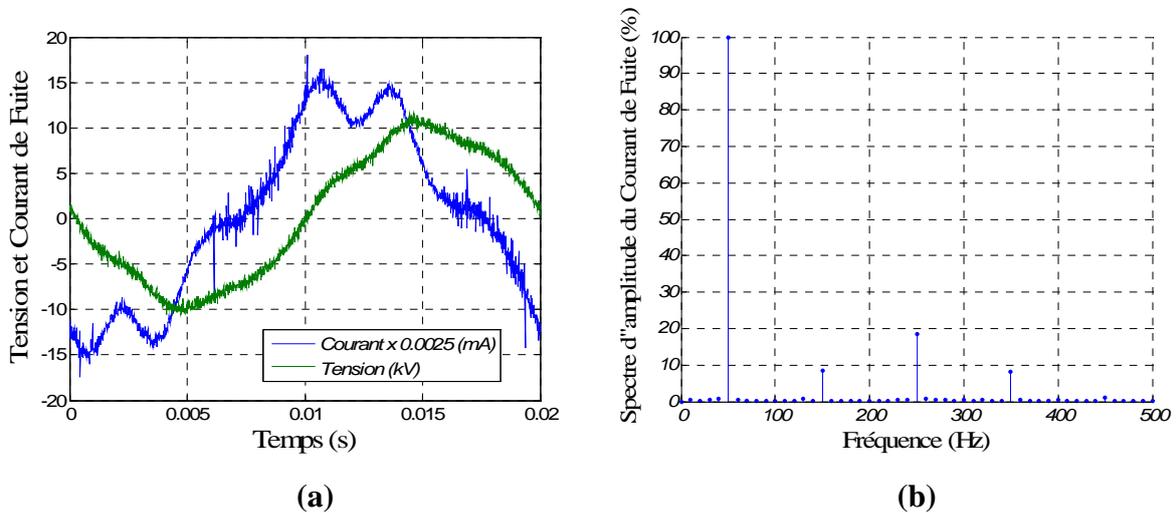


Fig.V.39 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel "Etat sec" pour une valeur crête de la tension de 10.43 kV (Isolateur 12)

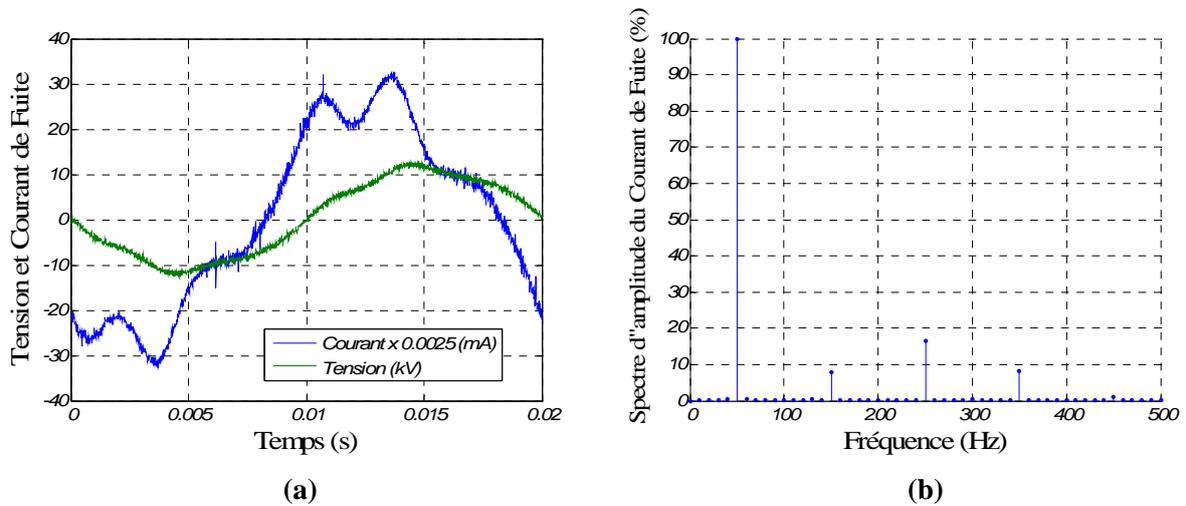


Fig.V.40 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel "Partie supérieure humidifiée", pour une valeur crête de la tension de 10.76 kV (Isolateur 12)

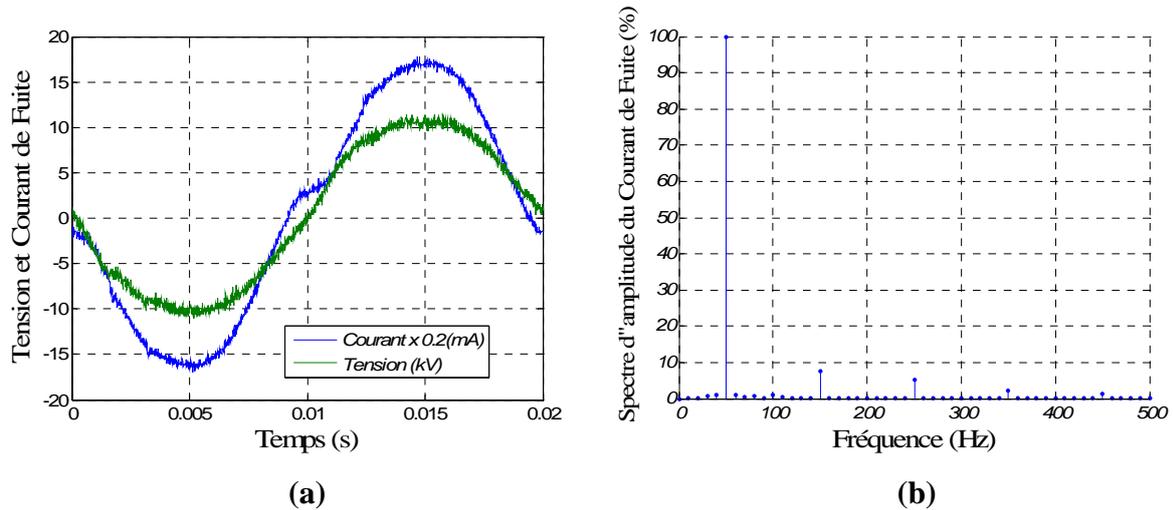


Fig.V.41 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel "Totalemment humidifié" pour une valeur crête de la tension de 10.58 kV (Isolateur 12)

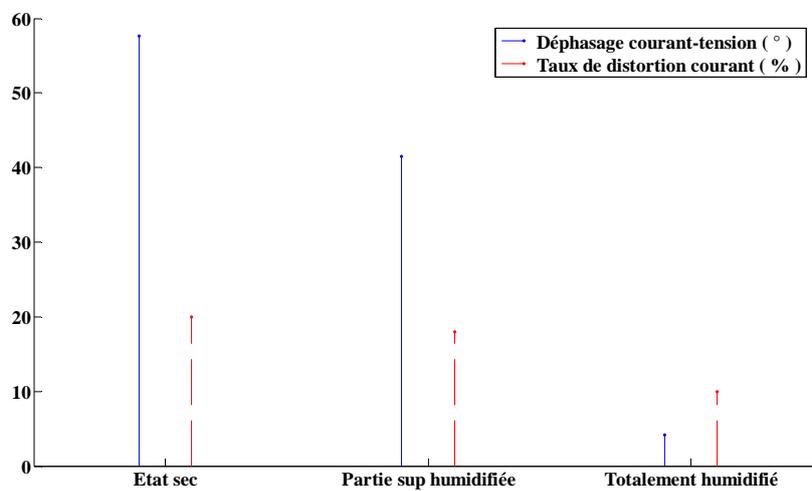


Fig.V.42 : L'évolution du Déphasage et du Taux de Distorsion pour des différents états de la surface de l'isolateur

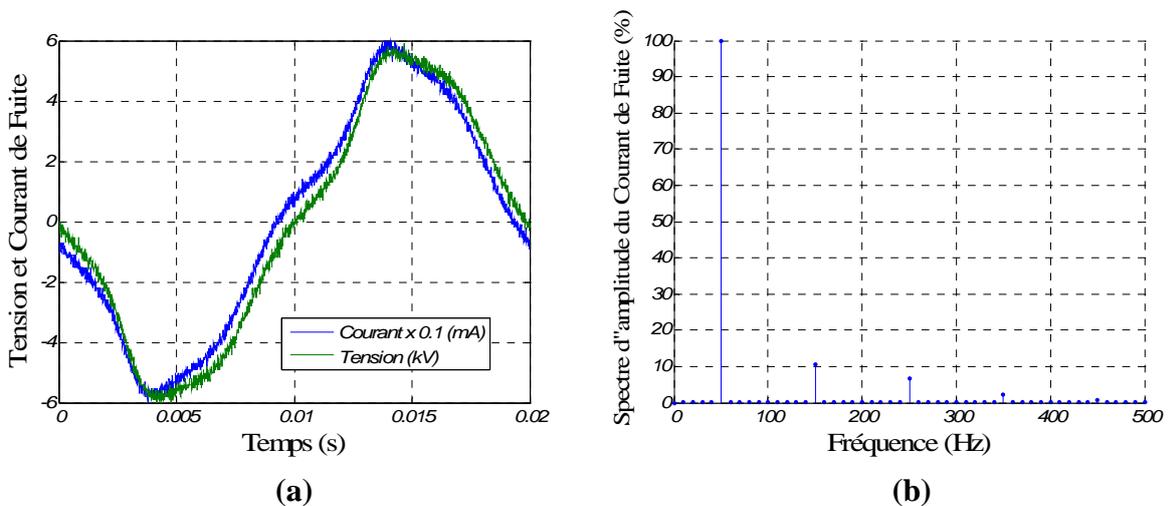


Fig.V.43 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel "Totalemment humidifié" pour une valeur crête de la tension de 5.7 kV (Taux de distortion courant = 12.46 %, Déphasage = 8.64 °) (Isolateur 02)

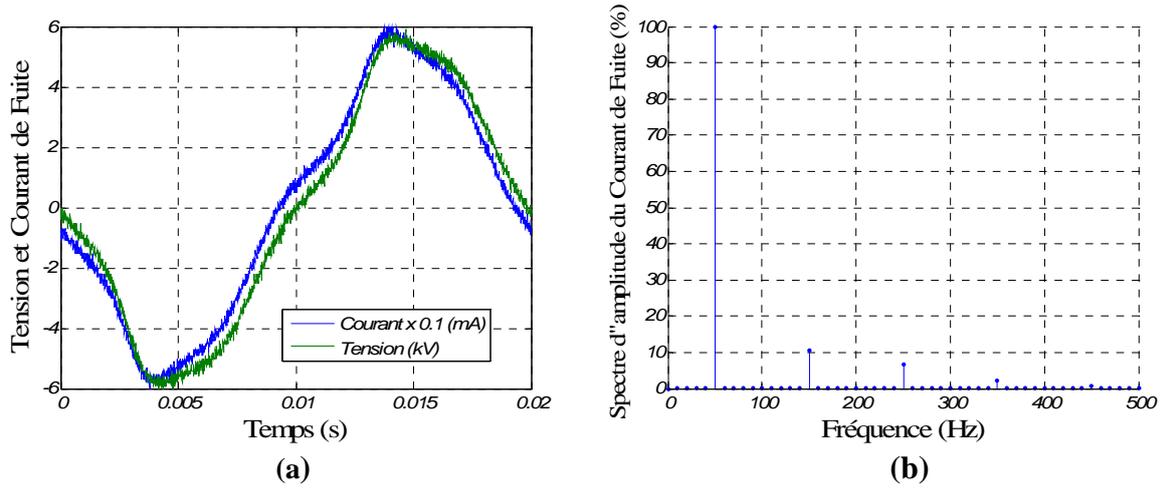


Fig.V.44 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel "Totalemment humidifié" pour une valeur crête de la tension de 8.86 kV (Taux de distorsion courant = 12.94 %, Déphasage = 8.2 °) (Isolateur 02)

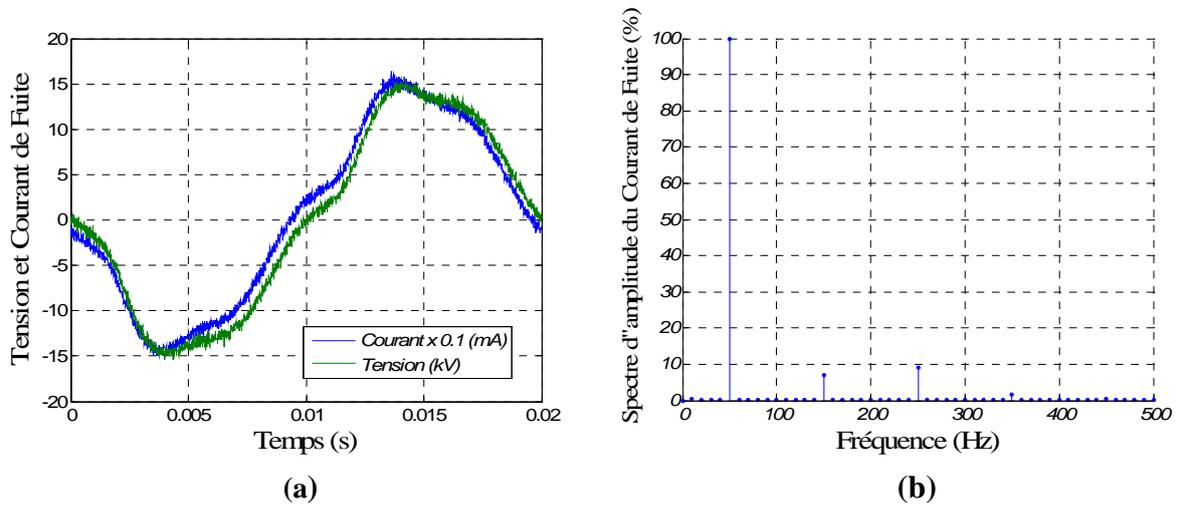


Fig.V.45 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel "Totalemment humidifié" pour une valeur crête de la tension de 14.77 kV (Taux de distorsion courant = 12.1 %, Déphasage = 8.46 °) (Isolateur 02)

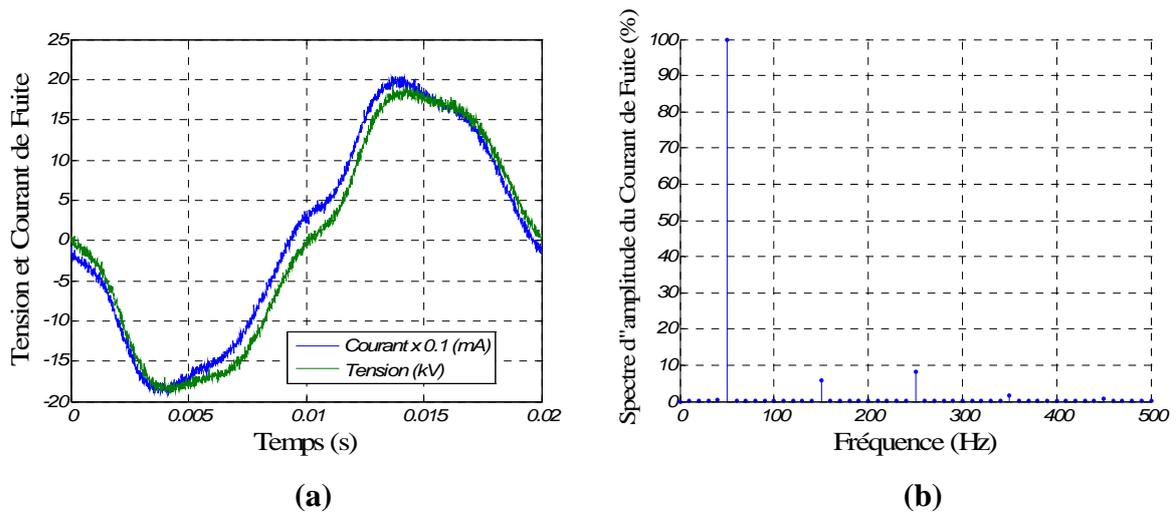


Fig.V.46 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel "Totalemment humidifié" pour une valeur crête de la tension de 18.5 kV (Taux de distorsion courant = 11.88 %, Déphasage = 8.28 °) (Isolateur N°2)

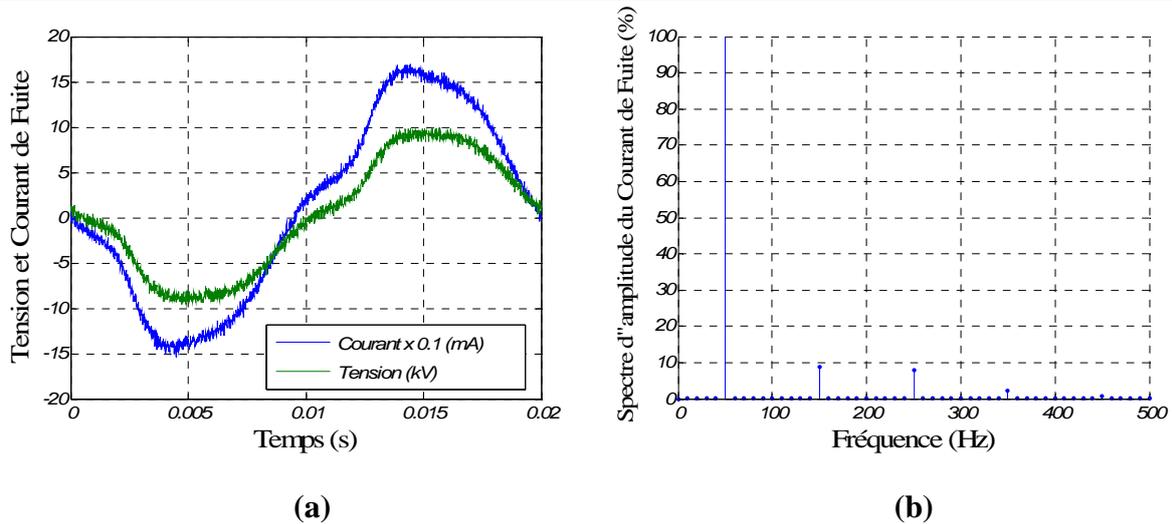


Fig.V.47 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour un niveau tension de 9 kV (Taux de distorsion courant = 11.72 %, Déphasage = 8.1 °) (Isolateur 18) " A l'instant d'application de la tension "

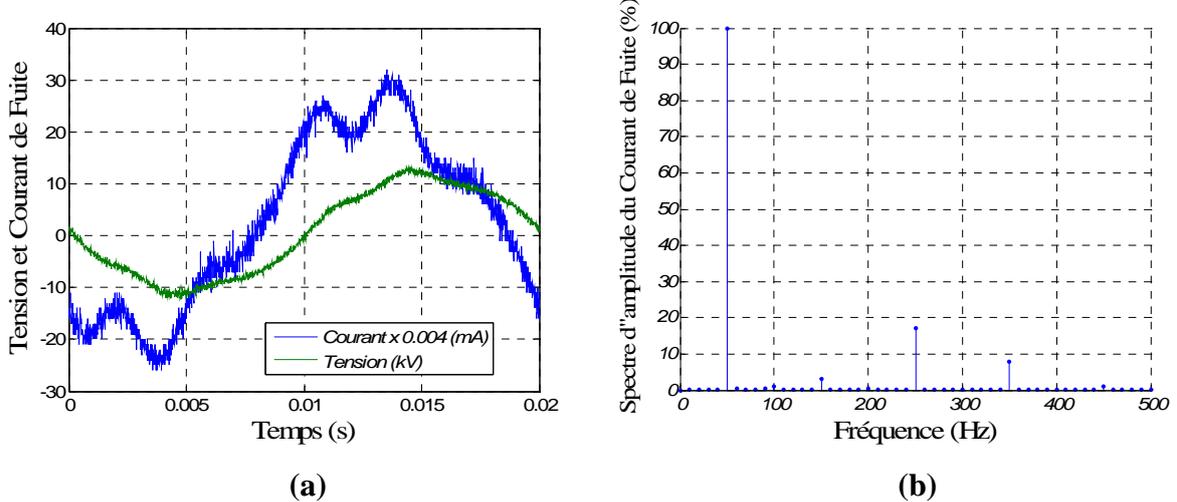


Fig.V.48 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour un niveau tension de 9 kV (Taux de distorsion courant = 17.33 %, Déphasage = 39.6 °) (Isolateur 18) "Après 10 min"

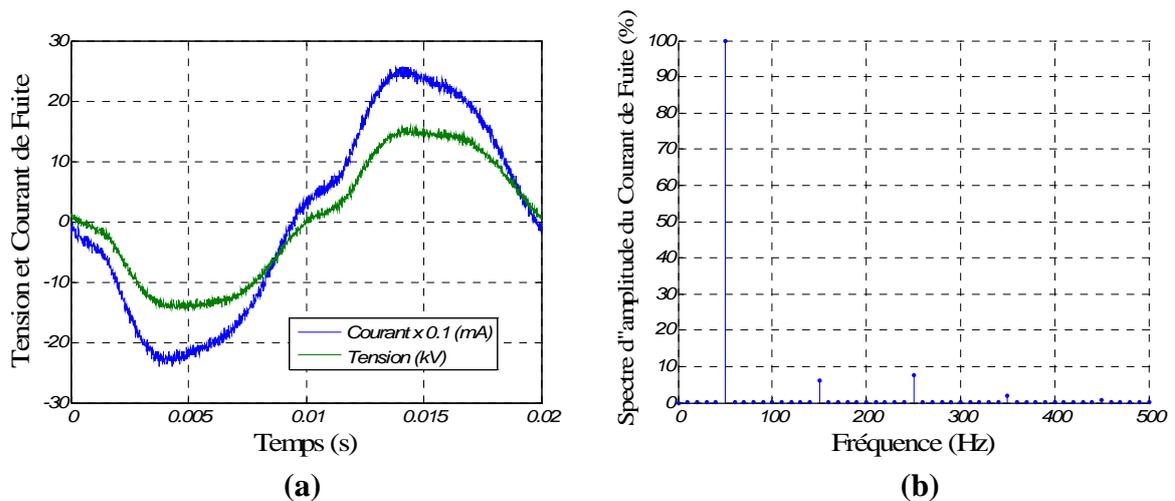


Fig.V.49 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour un niveau tension de 15 kV (Taux de distorsion courant = 9.72 %, Déphasage = 8.1 °) (Isolateur 18) " A l'instant d'application de la tension "

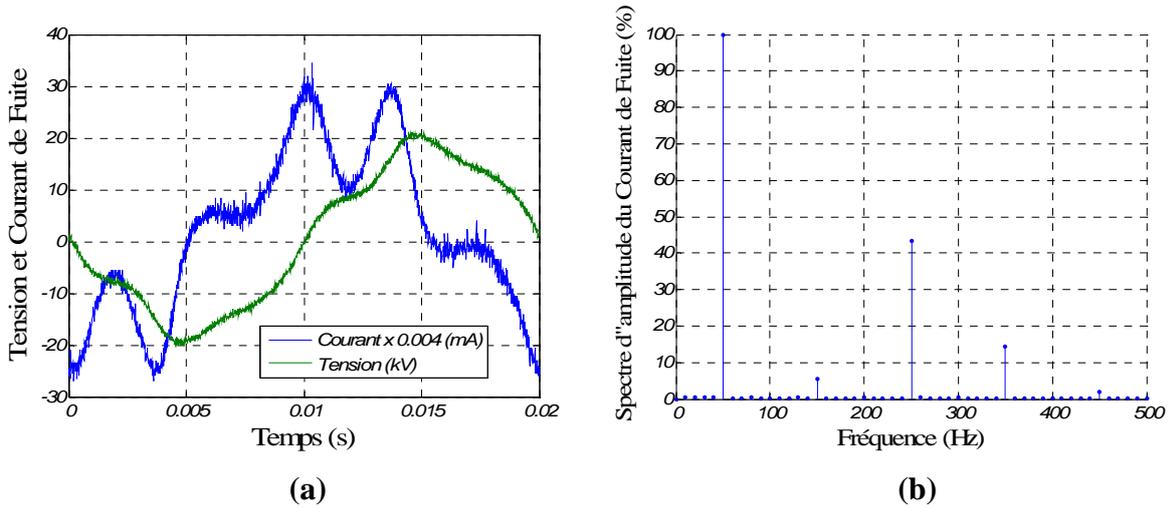


Fig.V.50 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour un niveau tension de 9 kV (Taux de distorsion courant = 43.66 %, Déphasage = 71.28 °) (Isolateur 18) "Après 10 min"

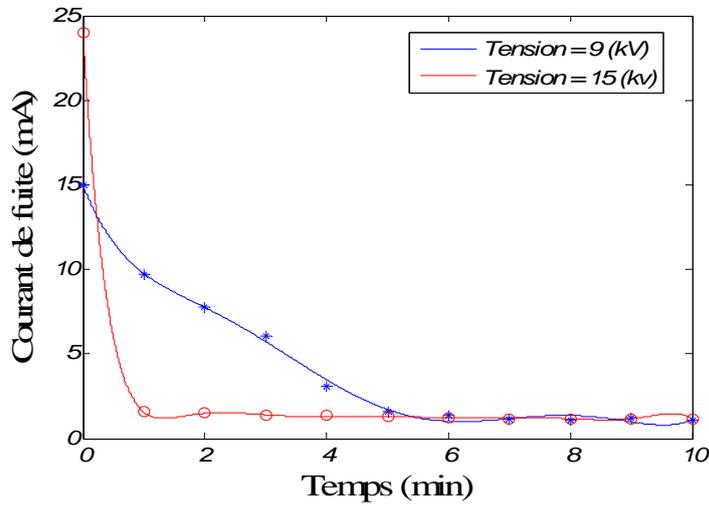


Fig.V.51 : L'évolution de l'amplitude courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension

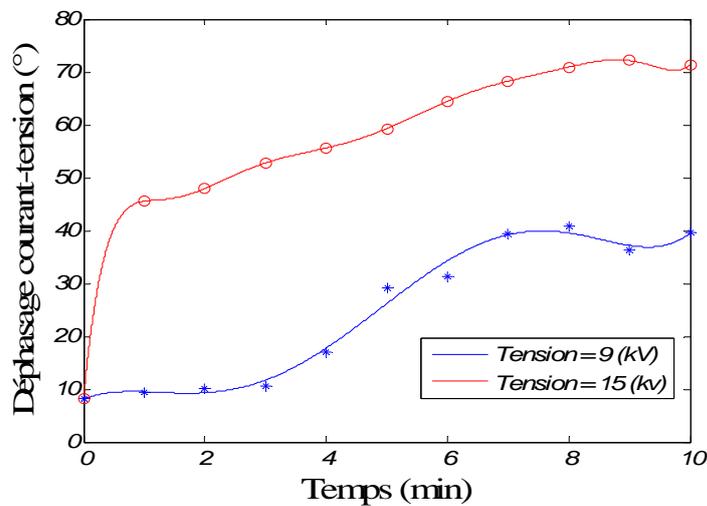


Fig.V.52 : L'évolution du déphasage en fonction du temps d'application de la tension

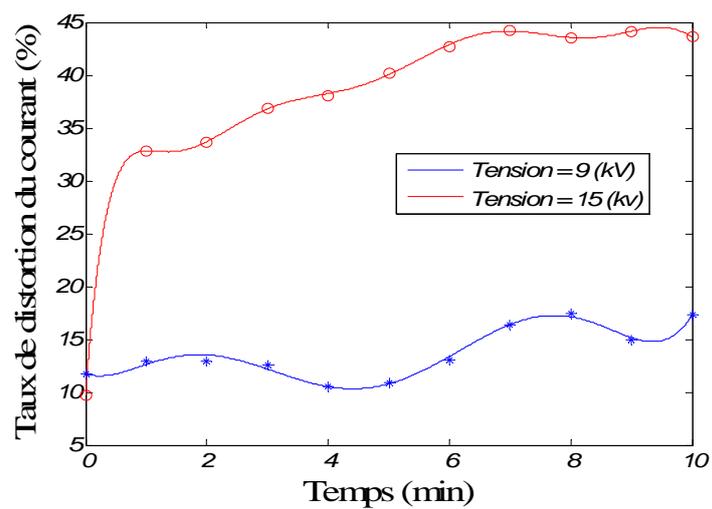


Fig.V.53 : L'évolution du taux de distorsion en fonction du temps d'application de la tension

V.4.2. Cas d'une pollution artificielle

À l'état sec, l'onde du courant de fuite prend la forme de 'M' déformé, c'est-à-dire que l'onde comporte des distorsions. Ces distorsions sont accompagnées par des impulsions irrégulières ayant des amplitudes limitées. L'amplitude de ces courants est de quelques dizaines de micro-ampère (Fig.V.54.a). Le spectre fréquentiel de ces signaux montre la présence des harmoniques 3, 5 et 7, avec l'amplitude de l'harmonique 5 plus élevée que celle de l'harmonique 7, et l'amplitude de l'harmonique 3 est la plus faible (Fig.V.54.b). La mesure du déphasage dans ce cas montre que le courant de fuite est en avance par rapport à la tension appliquée avec un angle de 89.46° , cela signifie que l'effet capacitif est dominant.

Les figures V.55 à V.62, montrent la forme du courant de fuite et celle de la tension appliquée pour deux conductivités différentes (6.2 mS/cm et 42.4 mS/cm par exemple), avec quatre niveaux de tension. Nous remarquons que le déphasage courant-tension est constant quelque soit le niveau de tension appliquée. Ce résultat est prévisible s'il n'y a pas assèchement de la couche polluante, car le déphasage représente la configuration électrique du système.

Les figures V.63 à V.66 montrent les différents signaux du courant pour différentes conductivités. Nous remarquons que l'augmentation de la conductivité engendre la diminution du déphasage, ceci est dû à l'augmentation du caractère résistif du système par l'augmentation de la conductivité superficielle de l'isolateur.

Les figures V.67 à V.70, montrent l'influence du temps d'application de la tension sur la forme du courant de fuite, pour un même niveau de tension et différentes conductivités (6.2 mS/cm et 142.3 mS/cm par exemple). À l'instant d'application de la tension la valeur crête du courant de fuite est plus élevée pour la conductivité la plus élevée. L'assèchement de la couche polluante par l'effet Joule augmente sa résistance, et par suite le courant diminue.

La diminution du courant de fuite est très rapide pour les niveaux de tension les plus élevés car le courant est plus intense (Fig.V.71.a). L'apparition des zones sèches engendre l'effet capacitif, ce qui augmente le déphasage entre le courant et la tension, l'augmentation de ce dernier est plus rapide et plus importante pour le niveau de tension le plus importante (Fig.V.71.b).

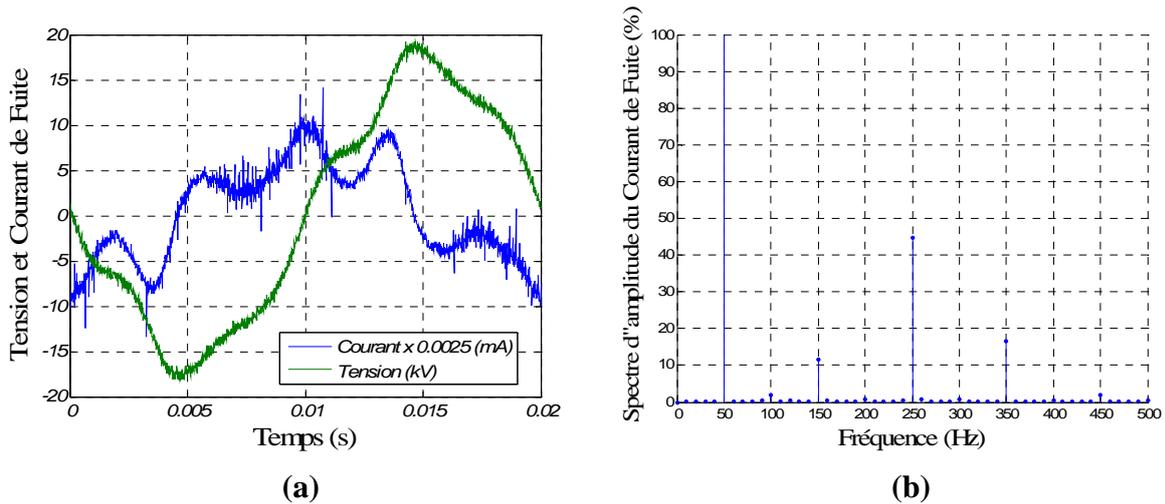


Fig.V.54 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 18.23 kV (Taux de distorsion courant = 46.23 %, Déphasage = 89.46 °)

« Etat sec »

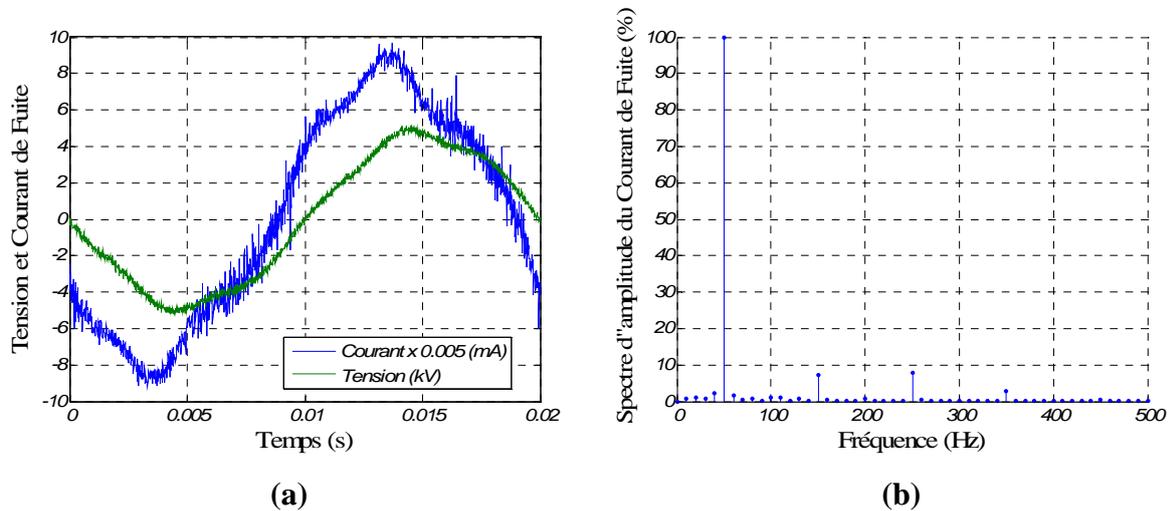


Fig.V.55 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 4.73kV (Taux de distorsion courant= 11.5 %, Déphasage= 27.5°)

Conductivité = 6.2 mS/cm

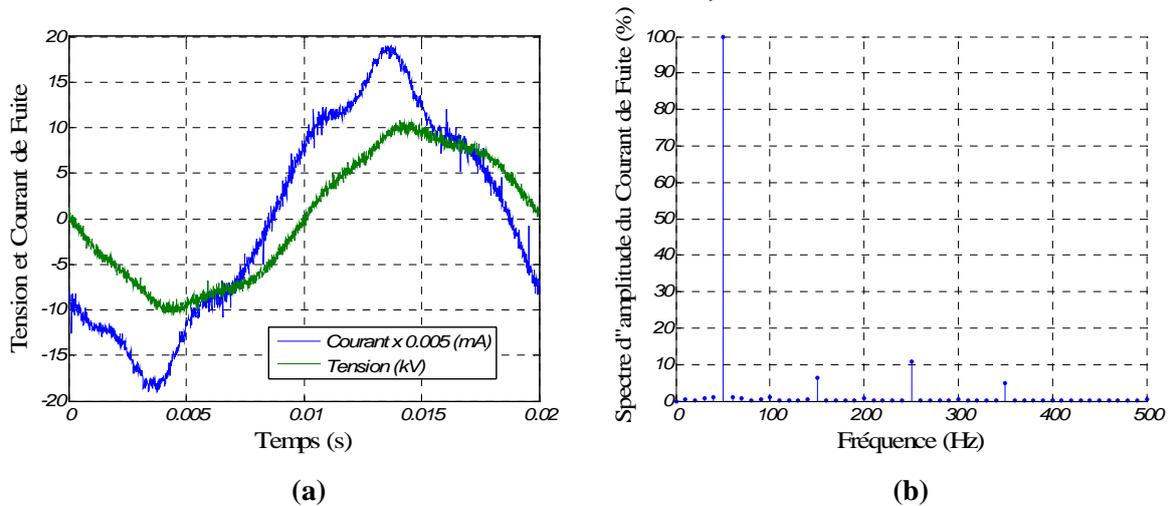


Fig.V.56 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 10.02 kV (Taux de distorsion courant= 12 %, Déphasage=27.04°)

Conductivité = 6.2 mS/cm

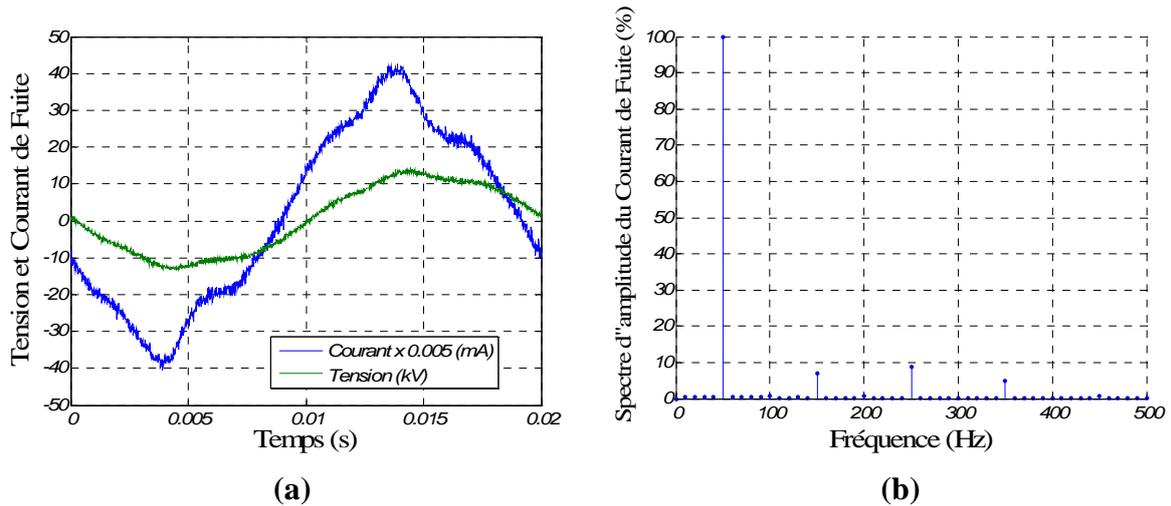


Fig.V.57 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 13.22 kV (Taux de distorsion courant= 12.1 %, Déphasage =26.4 °)
Conductivité = 6.2 mS/cm

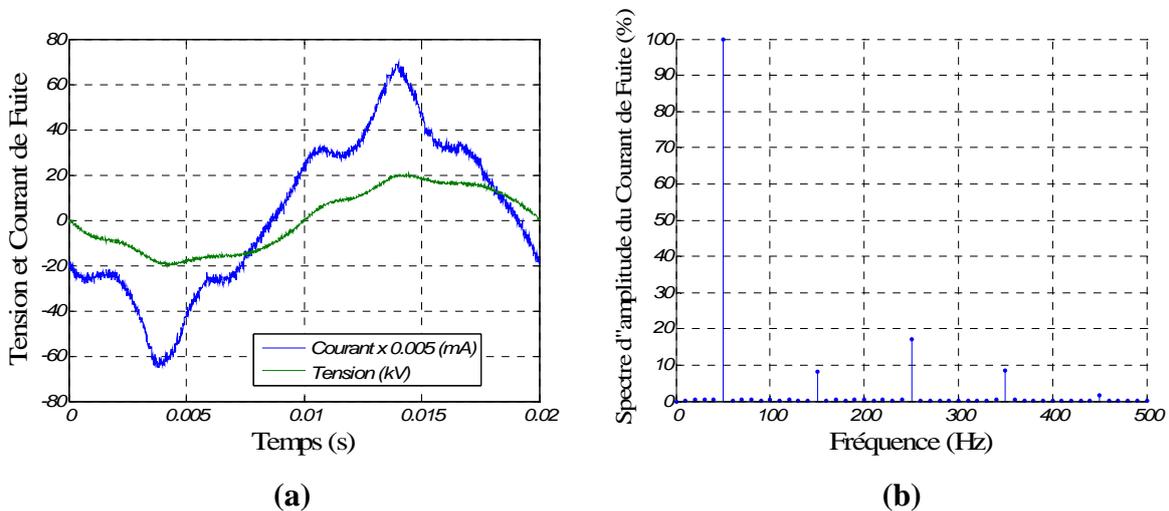


Fig.V.58 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 19.34 kV (Taux de distorsion courant = 19 %, Déphasage= 26.04 °)
Conductivité = 6.2 mS/cm

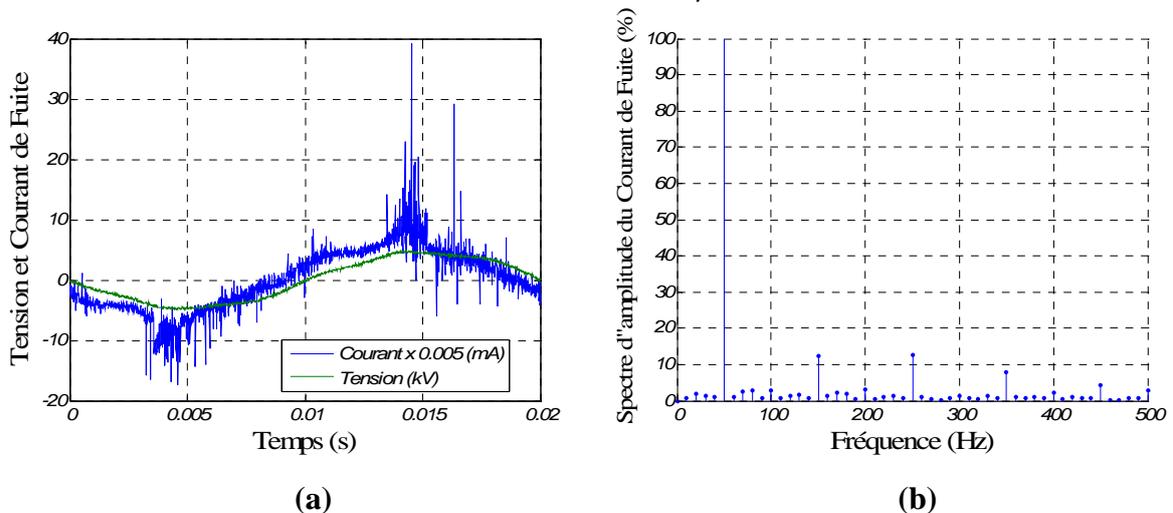


Fig.V.59 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 4.73 kV (Taux de distorsion courant = 19.96 %, Déphasage = 20°)
Conductivité = 42.2 mS/cm

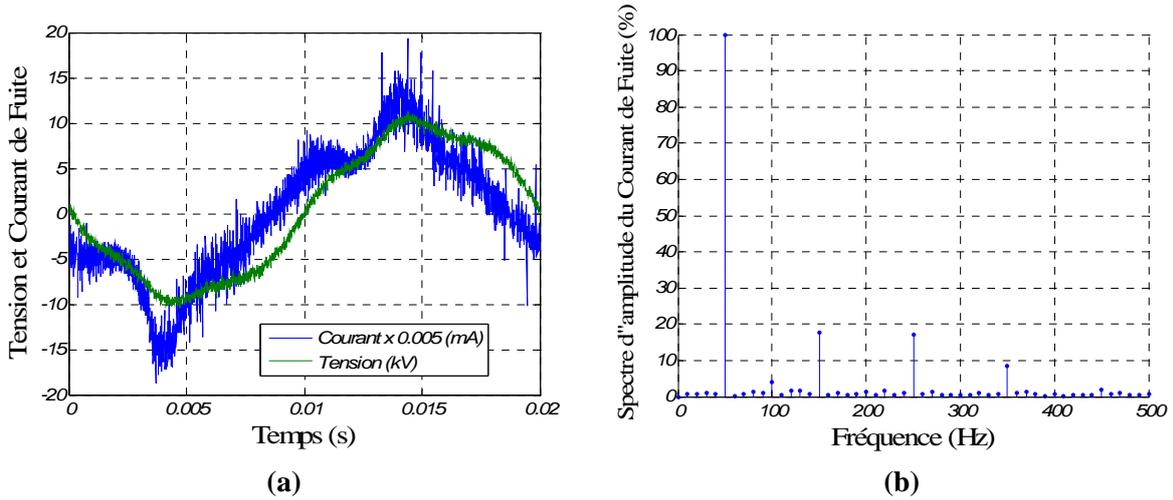


Fig.V.60 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 10.22 kV (Taux de distorsion courant = 25.5 %, Déphasage = 21.4°)
Conductivité = 42.4 mS/cm

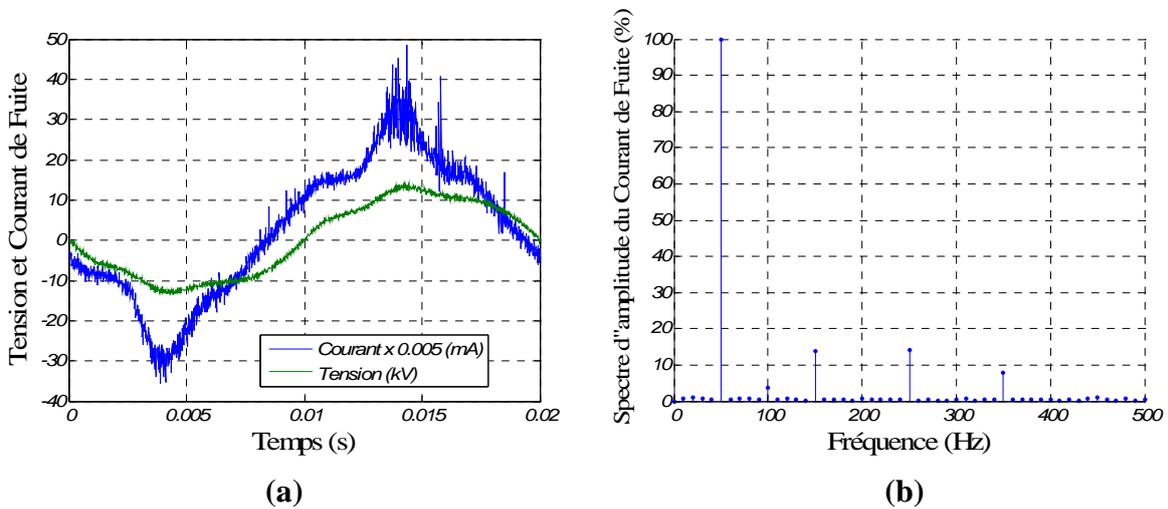


Fig.V.61 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 13.2 kV (Taux de distorsion courant = 27.1%, Déphasage = 19.9 °)
Conductivité = 42.4 mS/cm

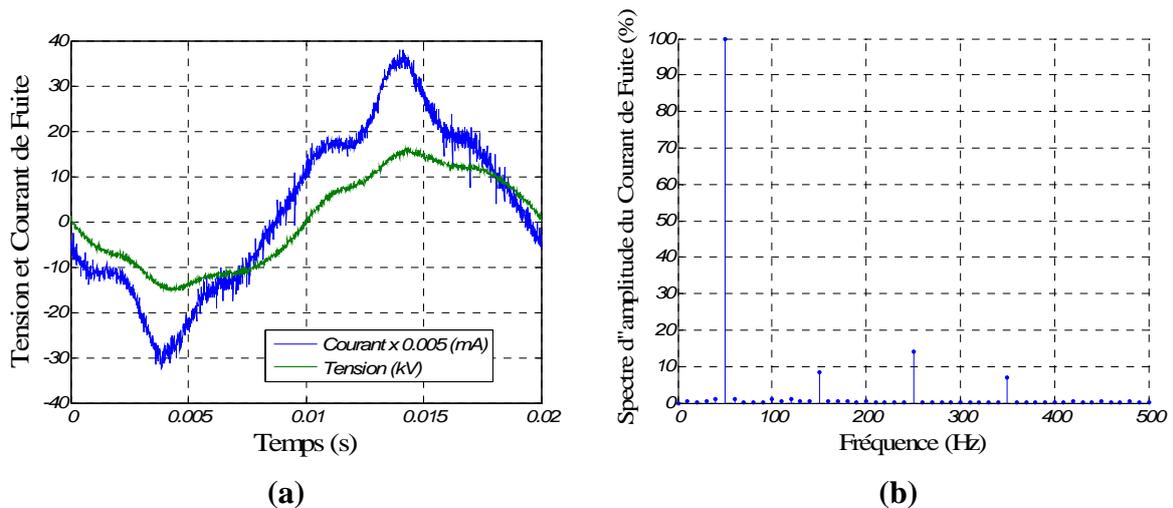


Fig.V.62 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 15.37 kV (Taux de distorsion courant = 27.1 %, Déphasage = 19.5 °)
Conductivité = 42.4 mS/cm

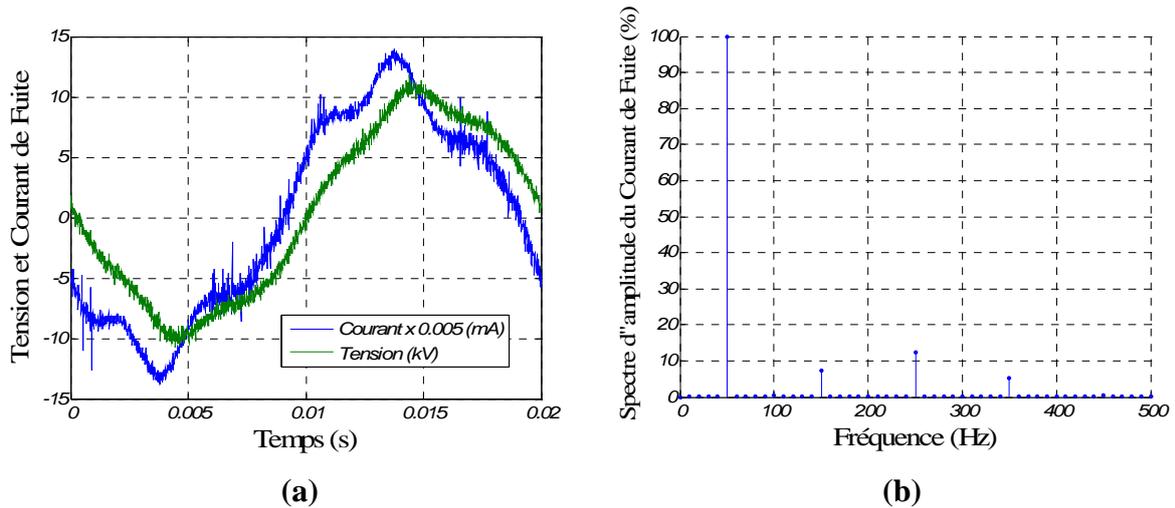


Fig.V.63 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 10.3 kV (Taux de distorsion courant = 14.5 %, Déphasage = 25.7 °)
Conductivité = 13.6 mS/cm

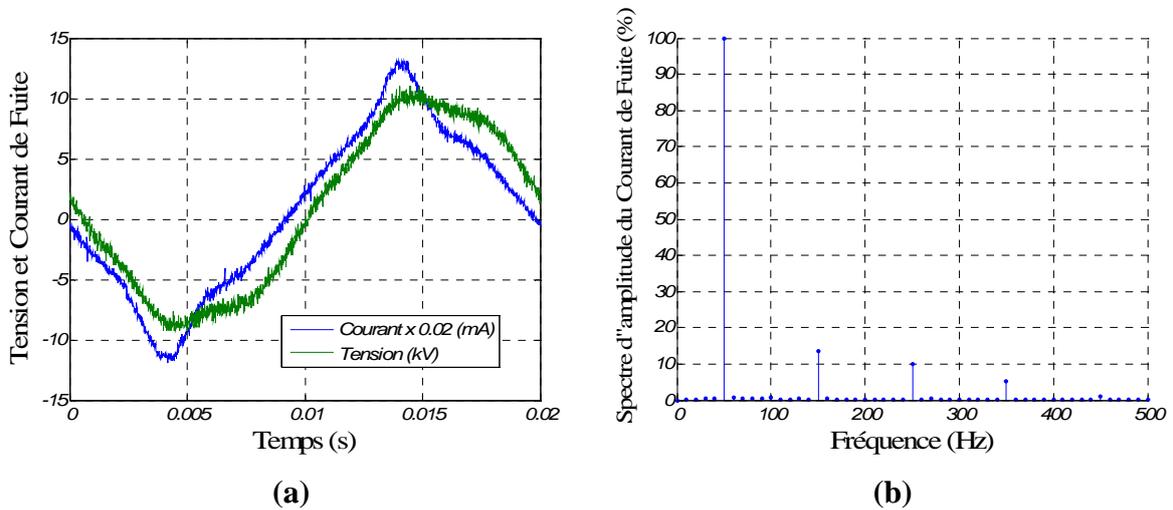


Fig.V.64 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 10.02 kV (Taux de distorsion courant = 16.8 %, Déphasage = 18.1 °)
Conductivité = 58.4 mS/cm

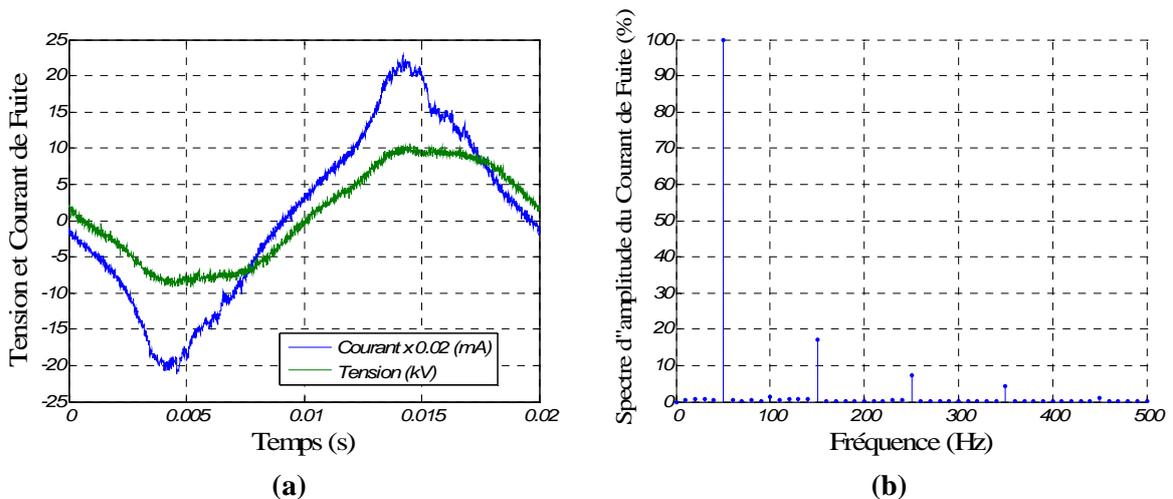


Fig.V.65 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 9.9 kV (Taux de distorsion courant = 18.82 %, Déphasage = 17.1 °)
Conductivité = 109.8 mS/cm

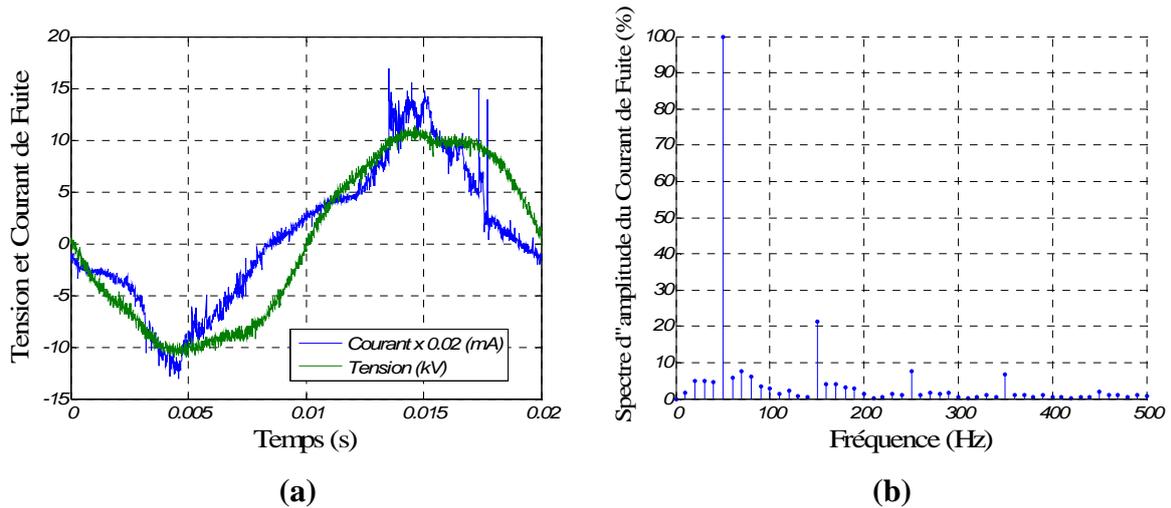


Fig.V.66 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 10.4 kV (Taux de distorsion courant = 30.5 %, Déphasage = 15.1 °)
Conductivité = 142.3mS/cm

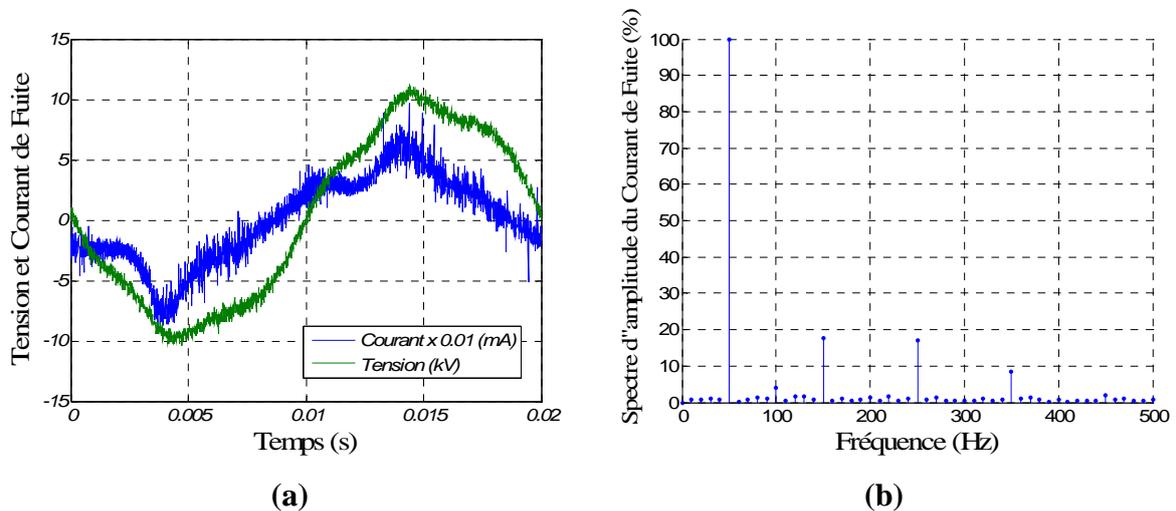


Fig.V.67 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 9.8 kV (Taux de distorsion courant = 25.4 %, Déphasage = 23.9 °)
Conductivité = 6.2 mS/cm «A l'instant d'application de la tension»

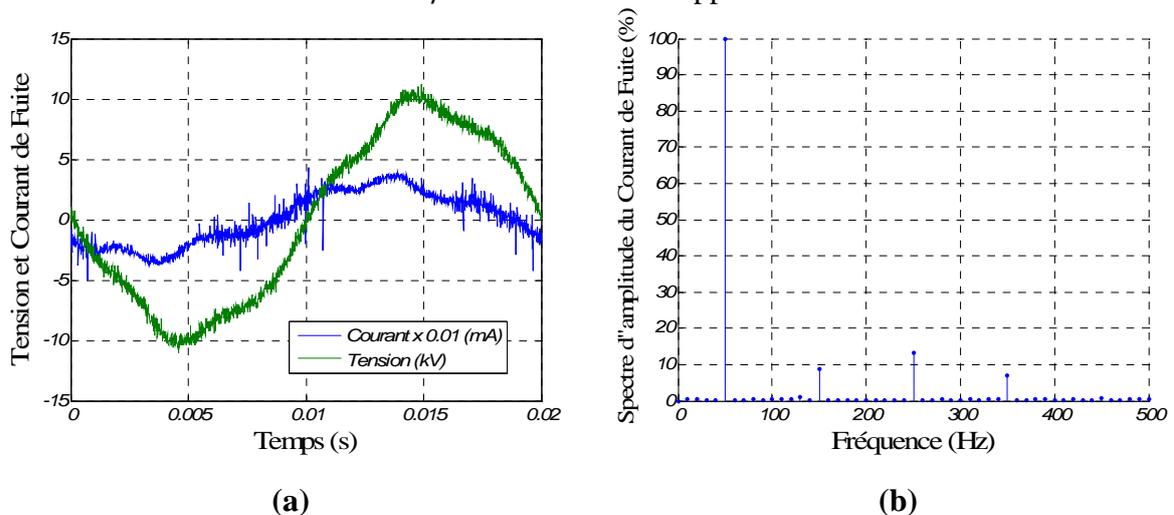


Fig.V.68 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 9.8 kV (Taux de distorsion courant = 15.88 %, Déphasage = 32.58 °)
Conductivité = 6.2 mS/cm «Après 10 min »

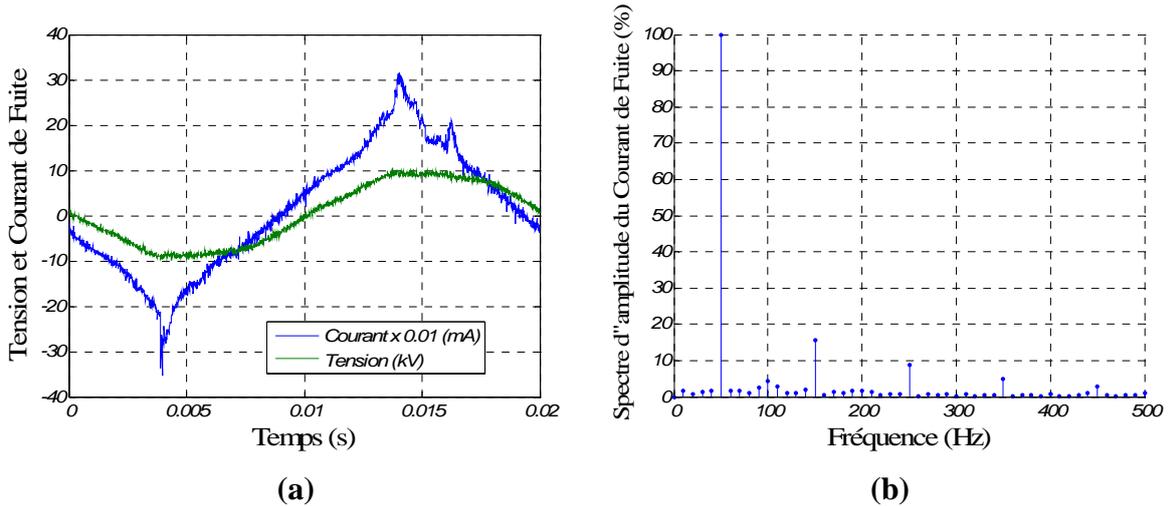


Fig.V.69 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 9.8 kV (Taux de distorsion courant = 19.6 %, Déphasage = 19.8 °)
Conductivité = 142.3 mS/cm «A l’instant d’application de la tension»

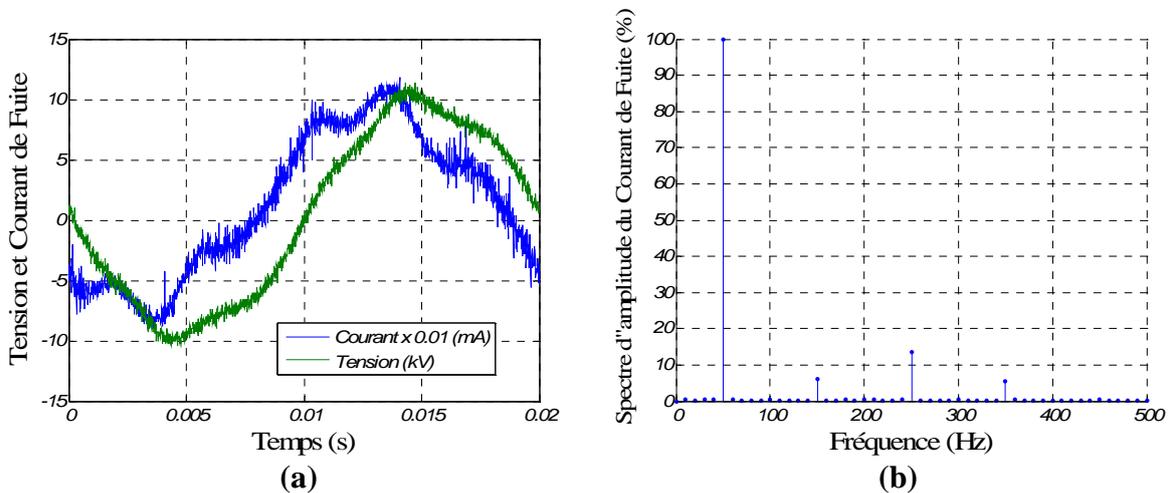


Fig.V.70 : La forme du courant de fuite et son spectre fréquentiel pour une valeur crête de la tension de 9.8 kV (Taux de distorsion courant = 15.1 %, Déphasage = 37.05 °)
Conductivité = 142.3 mS/cm «Après 10 min»

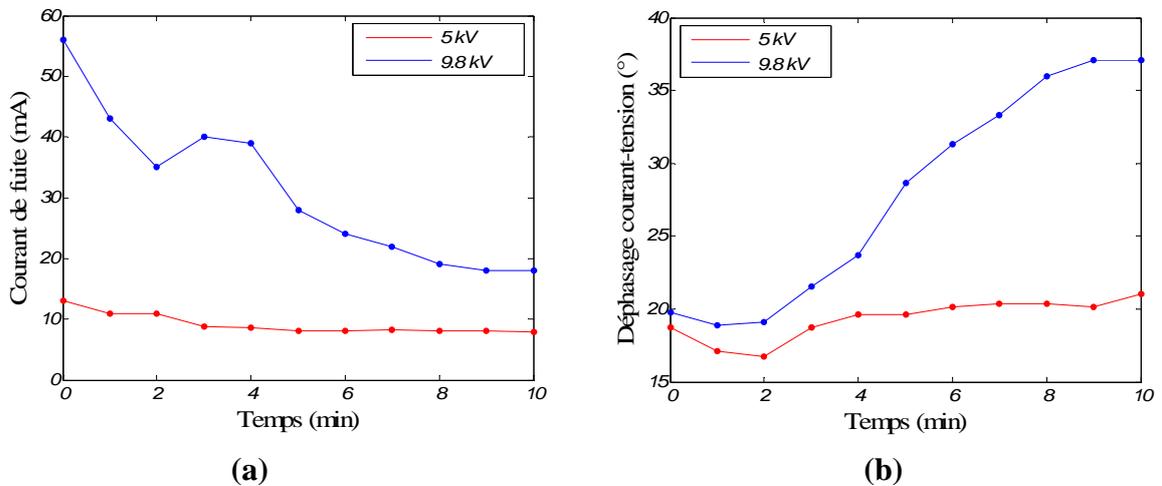


Fig.V.71 : L'évolution de l'amplitude du courant de fuite et du déphasage en fonction du temps d'application de la tension
Conductivité = 142.3 mS/cm

V.4.3. Interprétation

D'après l'analyse du courant de fuite, nous avons constaté que ce dernier peut donner des informations sur l'état de la surface isolante polluée. Nous avons montré que la valeur crête du courant de fuite est liée à la sévérité de pollution, plus la couche est conductrice plus le courant est important.

Le calcul du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée, ainsi que l'analyse fréquentielle nous informent sur l'état de l'humidification et la continuité de la couche polluante.

D'après l'analyse fréquentielle de la tension appliquée, nous avons détecté la présence des trois premiers harmoniques impaires (3, 5 et 7), avec de faibles pourcentages, et nous notons que le cinquième est le plus grand.

Ces harmoniques parviennent d'une part du réseau d'alimentation, et d'autre part de la non linéarité du circuit magnétique du transformateur.

Pour une surface polluée et complètement mouillée, le courant de fuite est pratiquement en phase avec la tension appliquée, et ils ont presque la même forme pseudo sinusoïdale. Le spectre fréquentiel montre la présence des harmoniques 3, 5 et 7, avec le même ordre de grandeur pour la tension et le courant. Cela signifie que l'impédance est en grande partie résistive.

L'évaporation de la couche polluante due à la circulation du courant de fuite, crée des zones sèches, ce qui rend le courant en avance par rapport à la tension, avec l'augmentation du taux des trois harmoniques (3, 5, 7) dans le courant. Les zones sèches présentent des capacités qui forment avec la résistance de la partie humide un circuit amplificateur, qui amplifie les harmoniques qui existent déjà dans la tension.

Ce cas de figure peut être modélisé par un simple circuit électrique comportant une résistance qui représente la couche polluante conductrice, en série avec une capacité qui représente l'effet capacitif de la zone sèche. D'après le principe de superposition, l'équation du circuit pour le fondamental en notation complexe est donnée par :

$$\bar{V}_1 = \bar{Z}_1 \bar{I}_1 \quad \bar{Z}_1 = \left(R - \frac{1}{C\omega_1} j \right) \quad (\text{V.1})$$

Avec :

\bar{V}_1 : le fondamental de la tension appliquée.

\bar{I}_1 : le fondamental du courant de fuite.

R : la résistance de la couche de pollution conductrice.

C : la capacité de la zone sèche.

ω_1 : la pulsation à 50Hz.

Et pour les harmoniques du circuit :

$$\bar{V}_h = \bar{Z}_h \bar{I}_h \quad , \quad \bar{Z}_h = (R - \frac{1}{C\omega_h}j) \quad (\text{V.2})$$

h : le rang de l'harmonique.

\bar{V}_h : l'harmonique de rang h de la tension appliquée.

\bar{I}_h : l'harmonique de rang h du courant de fuite.

$\omega_h = h \times \omega_1$: La pulsation à la fréquence $h \times 50\text{Hz}$.

Supposons que l'harmonique de rang h existe dans la tension appliquée avec un pourcentage τ_V :

$$|\bar{V}_h| = \tau_V |\bar{V}_1|$$

L'amplitude de cet harmonique dans le courant est :

$$|\bar{I}_h| = \frac{|\bar{V}_h|}{|\bar{Z}_h|} = \tau_V \frac{|\bar{V}_1|}{|\bar{Z}_h|} = \tau_V \frac{|\bar{Z}_1|}{|\bar{Z}_h|} |\bar{I}_1| = \tau_I |\bar{I}_1|$$

Avec τ_I est le pourcentage de l'harmonique h dans le courant.

Plus la fréquence est élevée la partie imaginaire de l'impédance diminue, pour la même valeur de la résistance l'impédance diminue, pour un harmonique d'ordre $h > 1$, nous avons $|\bar{Z}_1| > |\bar{Z}_h|$, et par suite, le taux de l'harmonique h dans le courant est plus élevé que son taux dans la tension.

V.5. Conclusion

Les essais de contournement effectués sur les deux chaînes d'isolateurs, ont montré qu'une partie de la chaîne de 220 kV est dégradée. Cela est due à deux facteurs, la sévérité du site et la durée d'exploitation. Par contre, la chaîne de la ligne de 60 kV, reste encore en bon état. Ces résultats sont confirmés par la mesure du courant de fuite.

La méthode de régression a été utilisée pour élaborer les relations qui existent entre les différentes grandeurs que nous avons mesurées durant nos essais.

La relation qui existe entre le courant de fuite et la tension appliquée, est modélisée par une fonction parabolique. Cela signifie que la résistance de la couche de pollution humide diminue en fonction de la tension appliquée. Cette augmentation est due à l'échauffement de l'électrolytique par la circulation du courant, qui a pour effet d'accroître la conductivité.

L'augmentation de la conductivité de la couche de pollution, diminue sa résistance, ce qui implique la diminution de la tension de contournement. Les résultats obtenus d'après ces essais ont été modélisés par une fonction logarithmique décroissante.

En utilisant la régression multiple à deux variables explicatives, nous avons modélisé la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée et de la conductivité de la couche polluante.

D'après le traitement numérique du signal du courant de fuite, nous avons constaté que ce dernier peut donner des informations sur l'état de la surface de l'isolateur. Le niveau de distorsion de la forme du courant, et son déphasage par rapport à la tension appliquée. Ce traitement nous informe sur l'état de l'humidification et la continuité de la couche polluante.

Chapitre VI
Modèle Dynamique de Contournement
Sous Tension Alternative

VI.1. Introduction

Une quantité importante de travaux théoriques a été consacrée à l'étude du phénomène de contournement des isolateurs pour aboutir à l'élaboration d'un modèle pouvant tenir compte des paramètres réels caractéristiques du phénomène de pollution. Il s'agit de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes, et leurs résistivités ainsi que les échanges thermiques.

La modélisation théorique permet non seulement de mieux comprendre le processus physique de contournement mais aussi de réduire considérablement le temps très long que nécessite les essais sur site. Mais, elle reste insuffisante lors du passage à l'application pratique, principalement à cause des hypothèses simplificatrices rendues nécessaires par le traitement mathématique.

Dans ce chapitre nous proposons un modèle dynamique de contournement sous tension alternative, en tenant compte de la géométrie de l'isolateur réel que nous avons utilisé durant nos essais (1512L). Nous comparerons les résultats expérimentaux à ceux obtenus par simulation.

VI.2. Elaboration du modèle dynamique

Le modèle que nous proposons se base sur le modèle de Tegar [4]. Il utilise le critère de propagation de B.F.Hampton [38], et l'expression de la vitesse de l'arc développé par Rahal [18].

VI.2.1. Hypothèses simplificatrices

Vu la complexité des phénomènes d'arcs se produisant sur les surfaces isolantes polluées, nous adoptons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'isolateur réel est remplacé par un modèle plan équivalent.
- La résistance de la pollution est représentée par une résistance pure.
- La conductivité de la pollution est la même en tout point de la couche polluante et ne change pas durant la propagation de la décharge.
- Parmi tous les arcs multiples qui se développent sur la surface isolante, seul l'arc dominant est pris en considération.
- L'arc électrique est assimilé à un canal cylindrique de longueur X et de rayon r .

VI.2.2. Circuit électrique équivalent

Selon le modèle proposé par F.Obenaus [4], un isolateur pollué et partiellement contourné par une décharge électrique, peut être représenté par un circuit électrique équivalent constitué de deux résistances en série. La première R_{arc} représente le canal de décharge, et la seconde résistance R_p représente la couche de pollution non court-circuitée par la décharge (Fig.VI.1).

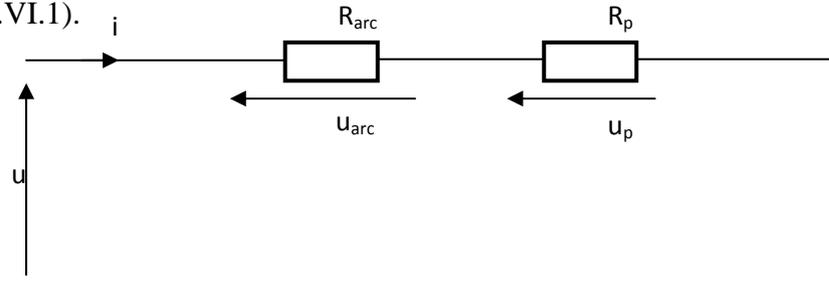


Fig.VI.1 : Circuit électrique équivalent

VI.2.3. Critère de propagation

Lorsque la tension appliquée est suffisamment élevée entre les deux électrodes, il y aura apparition d'une première décharge de longueur X_0 sous forme d'effet couronne. Cette décharge ne peut s'allonger que si le critère de propagation est vérifié.

Pour notre modélisation nous avons adopté le critère de propagation proposé par B.F.Hampton [38]. Selon cet auteur, la décharge évolue si le champ dans la pollution (E_p) est supérieur à celui au pied de la décharge (E_{arc}).

VI.2.4. Paramètres du circuit électrique

VI.2.4.1. Equation du circuit

En négligeant la chute de tension aux électrodes, environ 800 V selon Chung et Nour [39], la tension d'alimentation est répartie entre l'arc et la couche de pollution.

D'où l'équation électrique :

$$u = u_{arc} + u_p = (R_{arc} + R_p)i \quad (VI.1)$$

Avec, u la tension instantanée appliquée, u_{arc} la tension de la décharge et R_{arc} sa résistance, u_p la tension de la couche polluante et R_p sa résistance, et i le courant de fuite instantané.

VI.2.4.2. Caractéristiques de la couche de pollution

En se basant sur le modèle de Renyu et Zhicheng [40], une structure complexe d'un isolateur pollué peut être ramenée à un modèle plan équivalent, dont la résistance R_p de la pollution peut s'écrire sous la forme suivante [4]:

$$R_p = \frac{1}{\pi \gamma_p} \frac{L-X}{r_{iso}} \quad (\text{VI.2})$$

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

La résistance linéique de la pollution peut être formulée par :

$$r_p = \frac{1}{r_{iso} \gamma_p \pi} \quad (\text{VI.3})$$

Le champ dans la pollution est donné par :

$$E_p = -\frac{du_p}{dx} = r_p i \quad (\text{VI.4})$$

VI.2.4.3. Caractéristiques de l'arc

La relation approximative de la tension aux bornes de l'arc est donnée, selon F.Obenaus [3], par l'expression empirique suivante :

$$u_{arc} = \frac{AX}{i^n} = E_{arc} X \quad (\text{VI.5})$$

A et n sont les constantes empiriques qui caractérisent l'état statique de l'arc, X sa longueur et i son courant. Les valeurs de ces deux paramètres dépendent du milieu dans lequel s'amorce la décharge. Elles varient selon les auteurs [41]:

$$0.4 < n < 1 \quad \text{et} \quad 3 < A < 500$$

La résistance R_{arc} du canal de cet arc peut s'écrire sous la forme :

$$R_{arc} = \frac{u_{arc}}{i} = \frac{AX}{i^{n+1}} \quad (\text{VI.6})$$

La puissance dissipée dans l'arc peut s'écrire comme suit :

$$P_{arc} = u_{arc} i = AX i^{1-n} \quad (\text{VI.7})$$

VI.2.5. Vitesse de propagation

Rahal [18], suppose que le déplacement de la décharge est gouverné par les ions qui sont extraits et que la vitesse moyenne de ces ions est proportionnelle au champ E_p dans la pollution. De plus, une force de rappel provenant de la colonne de la décharge, s'exerce sur ces ions. Le champ total s'exerçant sur les ions est alors égal à la différence entre E_p et E_{arc} et la vitesse aura pour expression :

$$V = \frac{dX}{dt} = \mu(E_p - E_{arc}) \quad (VI.8)$$

μ désigne la mobilité des électrons dans l'arc ($5cm^2/Vs < \mu < 150 cm^2/Vs$) [42].

L'augmentation de la vitesse de propagation avec la longueur et le courant de la décharge, donnée par cette relation trouve confirmation dans la littérature [18], ce qui n'est pas le cas avec l'expression de la vitesse ($V = \mu E_{arc}$) [43], où celle-ci diminue avec l'augmentation de la longueur de la décharge, vu que le champ E_p diminue lorsque le courant augmente. C'est pour cette raison que nous avons adopté, dans notre modélisation, l'expression donnée par Rahal comme expression de la vitesse.

VI.2.6. Contournement

En augmentant la tension appliquée par paliers, la décharge atteint un état critique au-delà duquel toute nouvelle augmentation de la tension provoque immédiatement le contournement de l'isolateur. L'état critique correspond à une longueur critique de la décharge X_c , qui est la racine de l'équation suivante [3]:

$$\frac{d[X^{\frac{1}{n}}R(X)]}{dX} = 0 \quad (VI.9)$$

VI.3. Simulation numérique

D'après Rahal [18], le contournement immédiat à résistivité de la couche de pollution quasiment constante, nécessite une seule alternance. En se basant sur ça, nous avons considéré dans l'élaboration de notre modèle dynamique, que le contournement à lieu durant la première alternance de la tension sinusoïdale.

Dans cette simulation, nous introduisons en premier lieu les données du système d'isolation à savoir la conductivité γ_p de la couche de pollution, la longueur de fuite totale L,

le rayon effectif de l'isolateur r_{iso} , la mobilité des électrons dans l'arc μ , la valeur initiale maximale de la tension appliquée U , le pas d'incrément de la tension dU et le pas d'incrément de temps dt .

En second lieu, nous initialisons le temps ($t=t_0$), et la longueur de la décharge ($X=X_0=1\% L$) [4]. A partir de ces données initiales, nous pouvons calculer les paramètres du circuit électrique équivalent : la résistance R_p et la résistance linéique r_p de la partie de la couche de pollution non court-circuitée par la décharge, le courant de fuite i , la résistance du canal d'arc R_{arc} , les champs au pied de l'arc E_{arc} et dans la pollution E_p , la vitesse de propagation V .

Nous testons par la suite, le critère de propagation de B.F.Hampton ($E_p > E_{arc}$) [38]. Si ce critère n'est pas vérifié, il n'y a pas de propagation et le temps est incrémenté (donc la tension sinusoïdale augmente ($u = U \sin(\omega t)$)) et il faudra recalculer les paramètres précédents.

Si le critère est vérifié, il y a propagation et il faudra alors recalculer tous les paramètres précédents à partir des nouvelles valeurs de la longueur de la décharge ($X=X+Vdt$) et du temps ($t=t+dt$). La tension de contournement est obtenue lorsque la longueur de la décharge sera supérieure ou égale à la longueur critique X_c . La fin de la simulation correspond à une longueur de la décharge supérieure ou égale à la longueur $X=0.9 L$.

Nous notons qu'après chaque incrément de temps, il faut tester si le temps de propagation est supérieur à la durée d'une alternance de la tension sinusoïdale ($T=10$ ms). Si c'est le cas il faudra donc incrémenter la tension ($U=U+dU$) et reprendre les calculs depuis le début. La figure VI.2 présente l'organigramme de la simulation.

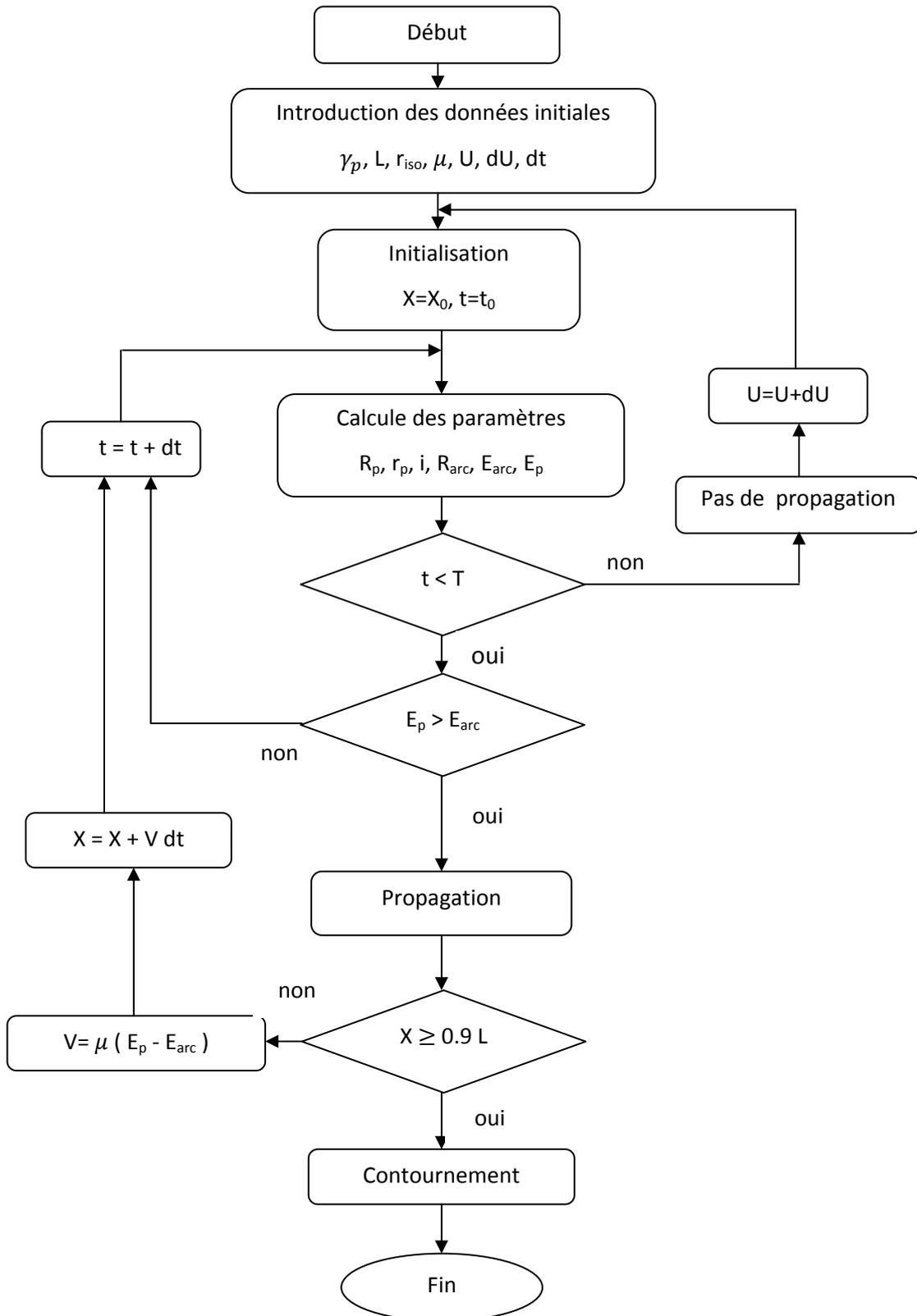


Fig.VI.2 : Diagramme de simulation

VI.4. Validation

La validation est effectuée en comparant la tension de contournement estimée par simulation, et celle obtenue expérimentalement. Les constantes A et n que nous avons considérées pour la validation du modèle sont respectivement 240 et 0.5, comme nous considérons une mobilité de $20\text{cm}^2/\text{Vs}$. L'isolateur est remplacé par un modèle plan équivalent, ayant une longueur de fuite de 29.2 cm et une largeur égale à 48 cm. La longueur critique de la décharge d'après les deux relations VI.2 et VI.9, vaut : $2/3L$.

La figure VI.3 donne les caractéristiques présentant la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité obtenues d'après les essais expérimentaux, le modèle de régression et le modèle électrique équivalent.

D'après les résultats obtenus par le modèle électrique équivalent, nous remarquons que la tension de contournement diminue en augmentant la conductivité de la couche polluante. Ce qui est en accord avec la réalité physique. L'erreur relative entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux varie entre 7 et 32 %, cela est due à plusieurs facteurs.

Parmi les hypothèses simplificatrices que nous avons posées, est que la résistance de la pollution ne varie pas pendant le développement de l'arc, ce qui n'est pas le cas en réalité, car l'effet thermique durant la propagation de l'arc à travers la couche polluante, engendre des zones sèches, et par suite la diminution du courant de fuite, ce qui nécessite une tension plus élevée pour provoquer le contournement. Ce phénomène est favorisé par la formation d'arcs multiples, alors que nous n'avons pris en considération que l'arc dominant.

VI.5. Evolution temporelle

Les figures VI.4 et VI.5 représentent respectivement la dernière alternance de la tension appliquée provoquant le contournement et le courant de la décharge, pour différentes conductivités. Nous remarquons que l'augmentation de la conductivité de la pollution diminue sa résistance et par suite le courant de la décharge sera plus intense, et le contournement aura lieu pour une tension plus faible. Durant la propagation, le courant augmente lentement jusqu'au contournement où cette augmentation devient brutale.

La résistance de la couche polluante non court-circuitée par l'arc est constante avant la propagation. Dès la vérification du critère de propagation, cette résistance commence à

décroître en fonction du temps (Fig.VI.6). Nous remarquons que la résistance est inversement proportionnelle à la conductivité.

La figure VI.7 montre l'évolution de la résistance de l'arc. Nous remarquons qu'avant la propagation cette résistance diminue, car elle est inversement proportionnelle au courant. Dès la vérification du critère de propagation, la résistance de l'arc devient proportionnelle à la longueur de l'arc. Durant la phase de contournement, cette résistance diminue rapidement car le courant augmente brutalement. D'autre part, nous remarquons que la résistance de l'arc est inversement proportionnelle à la conductivité. Car l'augmentation de la conductivité provoque l'augmentation du courant de la décharge, et puisque la résistance de l'arc est inversement proportionnelle au courant, cette résistance va diminuer.

Les figures VI.8, VI.9 et VI.10 montrent l'évolution des champs au pied de l'arc et dans la pollution. Nous remarquons qu'avant la propagation, le champ au pied de la décharge est supérieur à celui dans la pollution. A l'instant où le champ dans la pollution devient supérieur à celui dans l'arc, le critère de propagation est vérifié. Durant la phase de contournement, le champ dans la pollution augmente brutalement, et la diminution du champ au pieds de l'arc devient plus accentuée. Cela est dû au fait que le champ dans la pollution est proportionnel au courant, alors que le champ au pied de la décharge est inversement proportionnel au courant.

Avant la vérification du critère de propagation, la vitesse est nulle, une fois ce critère est vérifié, la vitesse augmente, par ce qu'elle est proportionnelle à la différence entre les deux champs, et puisque le champ dans la pollution augmente et celui au pied de l'arc diminue en fonction du temps, la différence entre eux augmente (Fig.VI.11).

Les figures VI.12 et VI.13 représentent respectivement, la puissance de la décharge, et la puissance délivrée par la source. Nous remarquons que la puissance de la décharge est pratiquement nulle avant la vérification du critère de propagation. Puis elle commence à augmenter avec la propagation de la décharge. Cette augmentation est due d'une part à l'augmentation du courant, et d'autre part à l'élongation de la décharge qui entraîne l'accroissement de la chute de tension au niveau de cette dernière. Durant la phase de contournement, le courant augmente brutalement, ce qui provoque une augmentation importante de la puissance transférée dans la décharge.

Nous notons que l'augmentation de la conductivité entraîne l'augmentation de la puissance de la décharge.

La puissance délivrée par la source augmente lentement pendant la phase de propagation et rapidement durant la phase de contournement. Notons que l'augmentation de la conductivité engendre l'augmentation de la puissance fournie par la source.

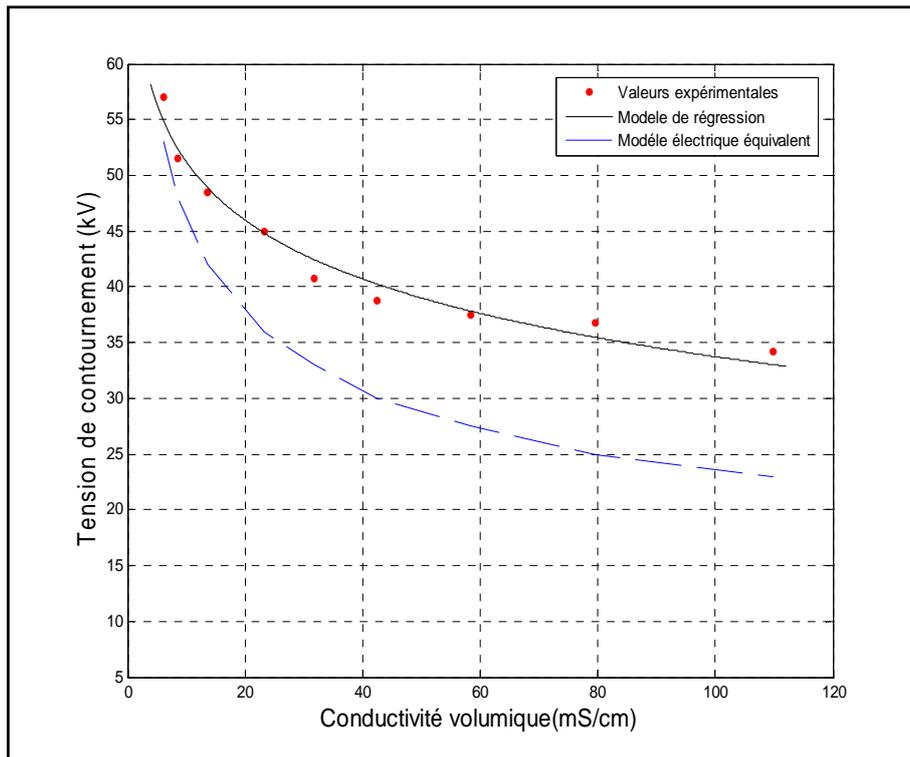


Fig.VI.3 : Tension de contournement – Conductivité volumique

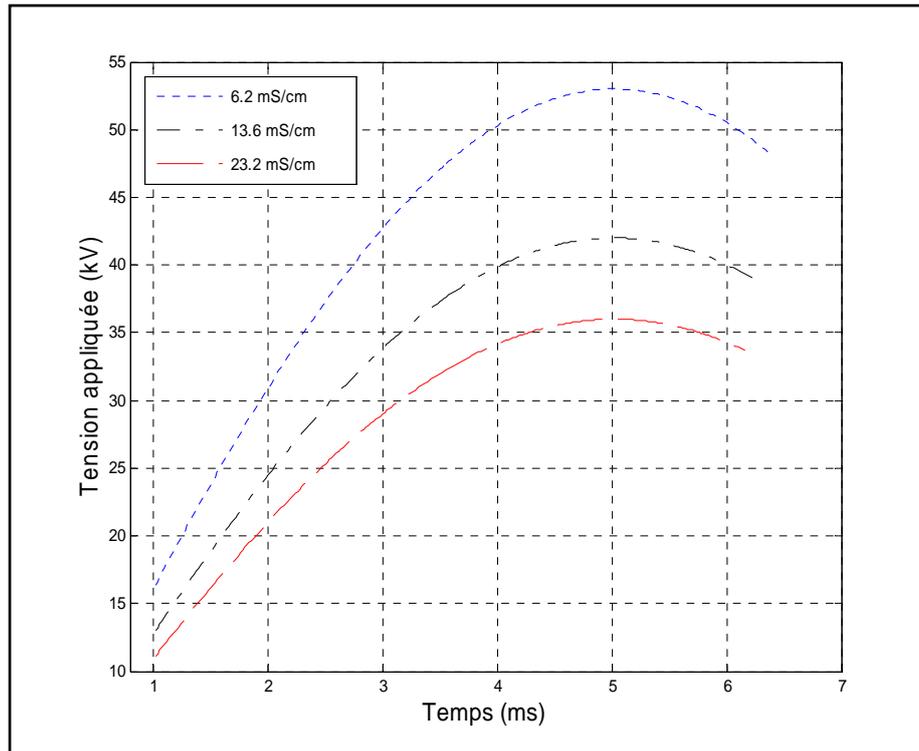


Fig.VI.4 : Dernière alternance de la tension appliquée provoquant de contournement

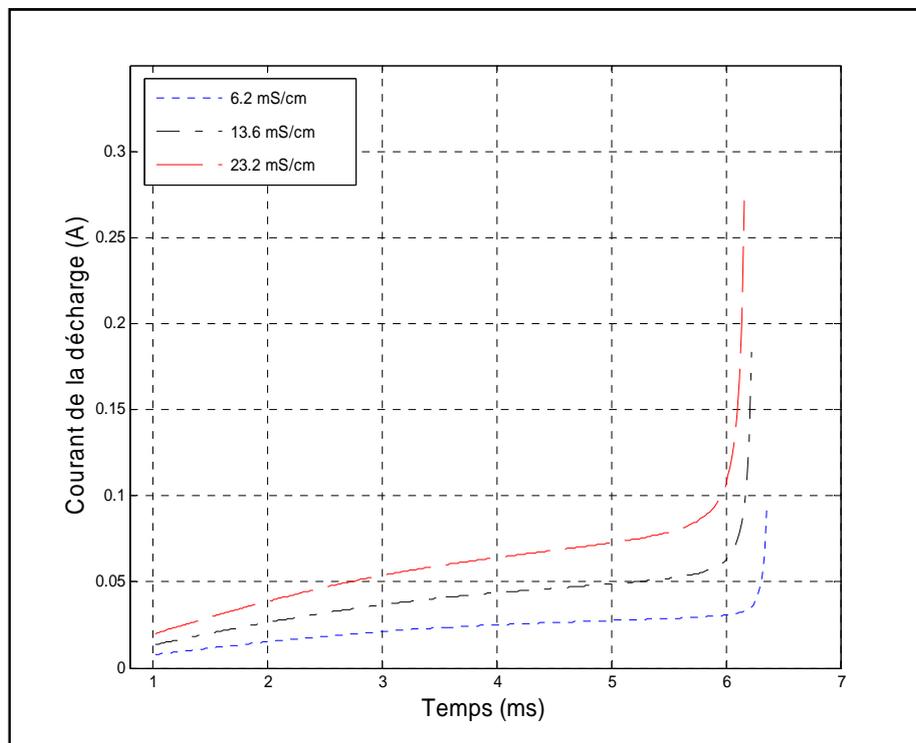


Fig.VI.5 : Courant de la décharge -Temps

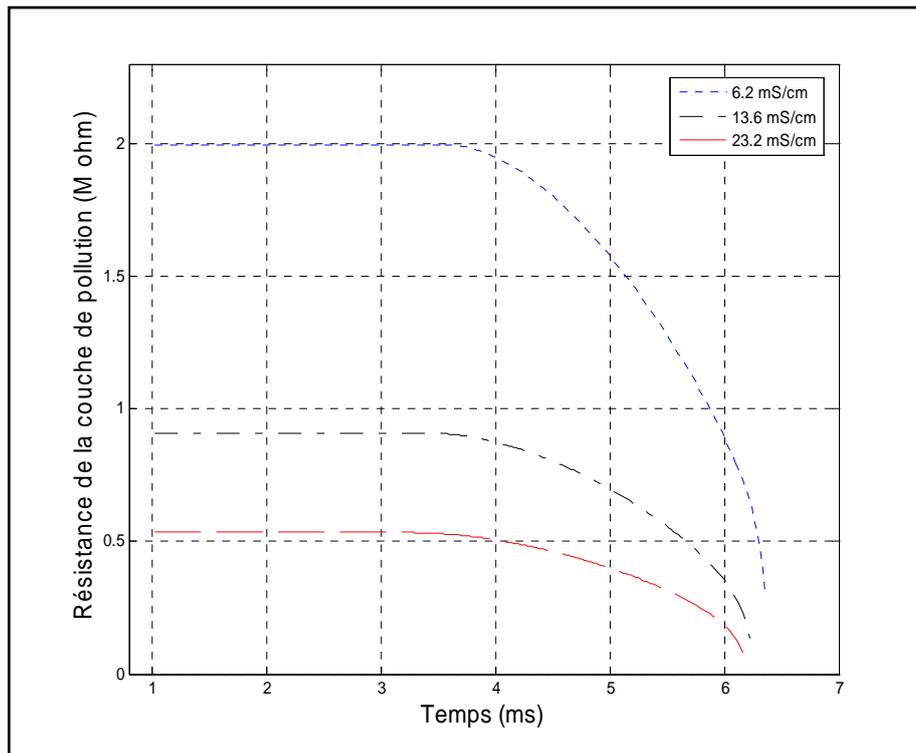


Fig.VI.6 : Résistance de la couche de pollution non court-circuitée - Temps

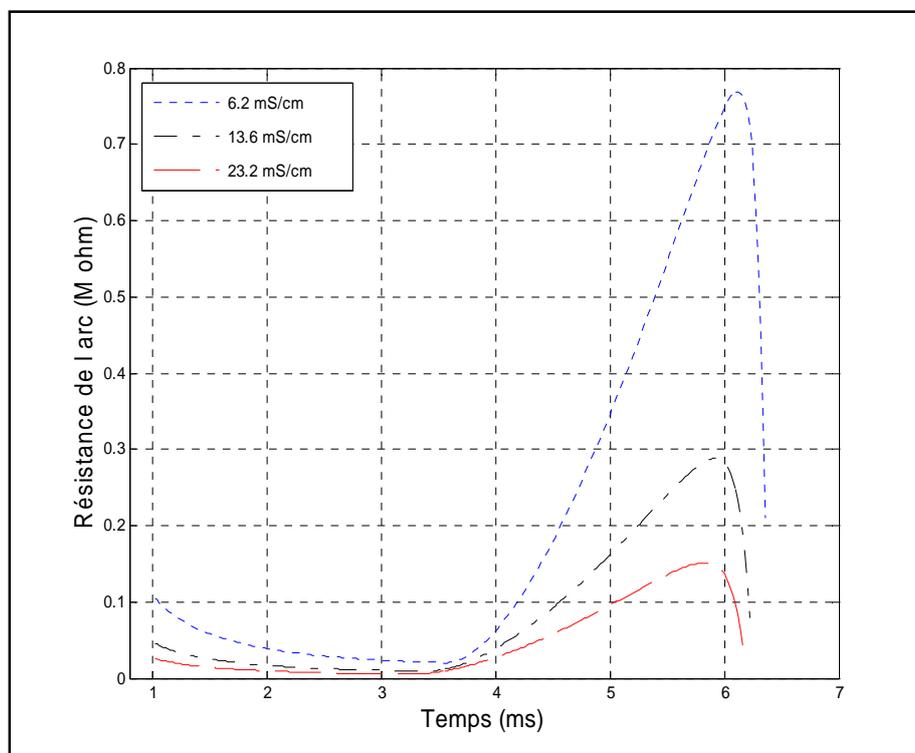


Fig.VI.7. Résistance de l'arc – Temps

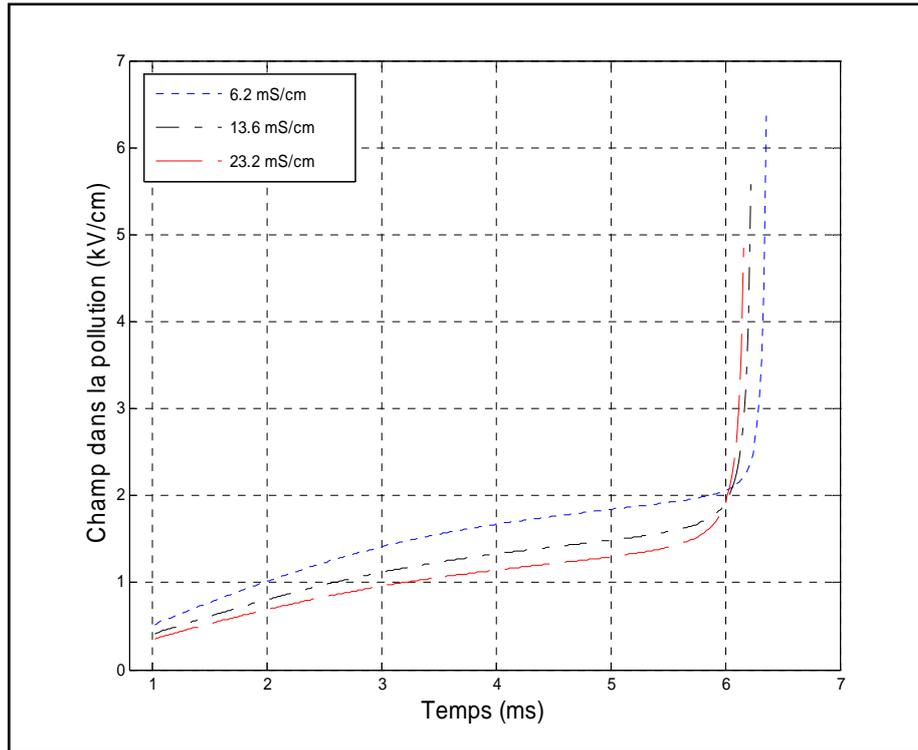


Fig.VI.8 : Champ dans la pollution – Temps

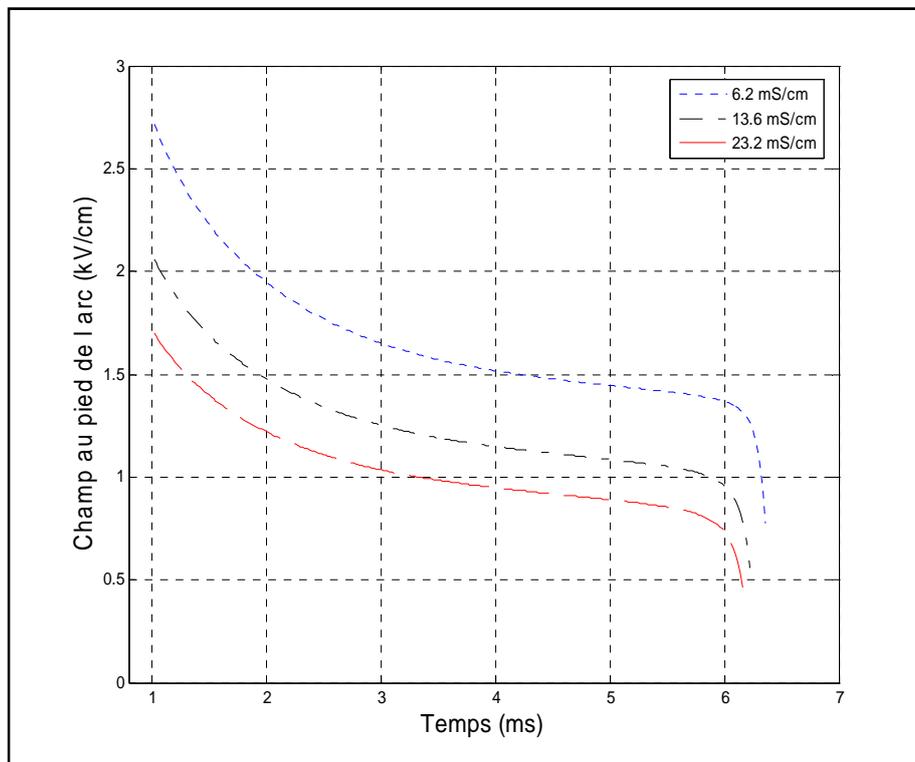


Fig.VI.9 : Champ au pied de l'arc – Temps

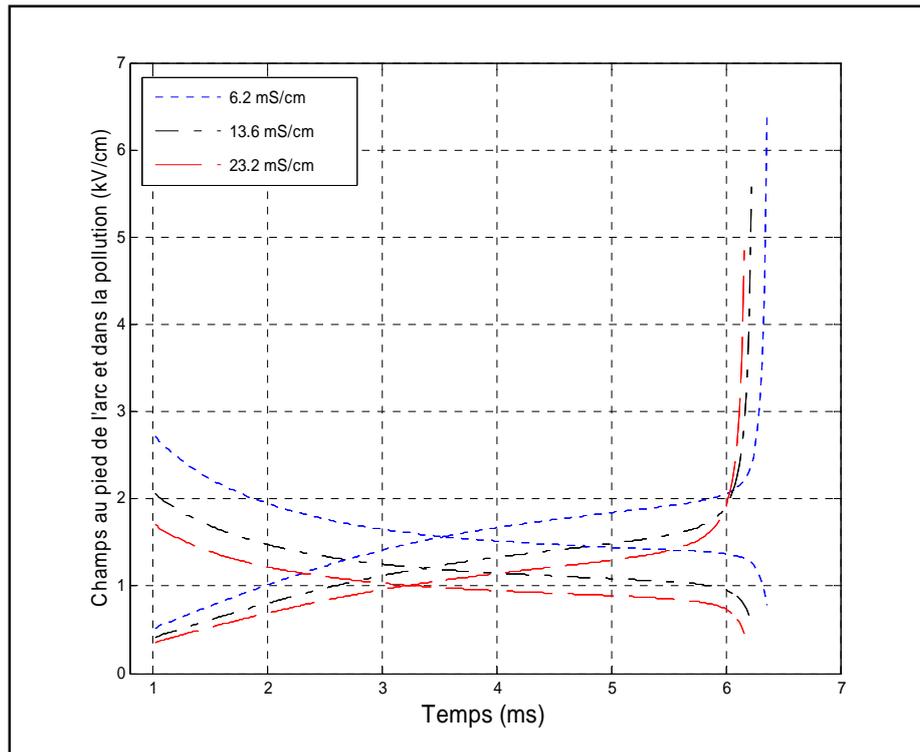


Fig.VI.10 : Champs au pied de l'arc et dans la pollution – Temps

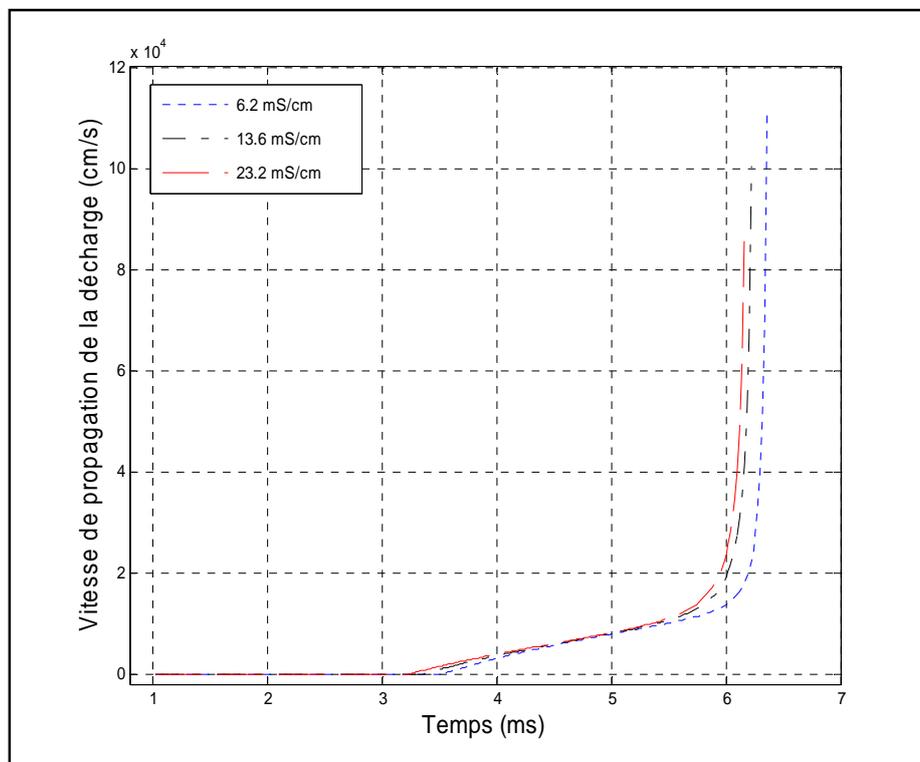


Fig.VI.11 : Vitesse de propagation – Temps

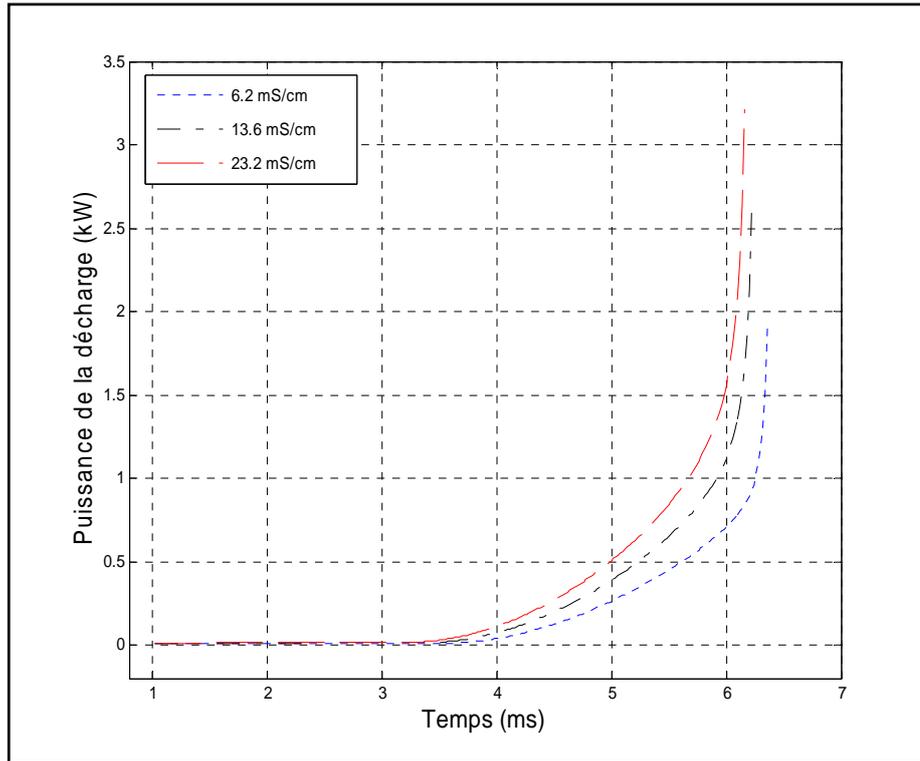


Fig.VI.12 : Puissance de la décharge – Temps

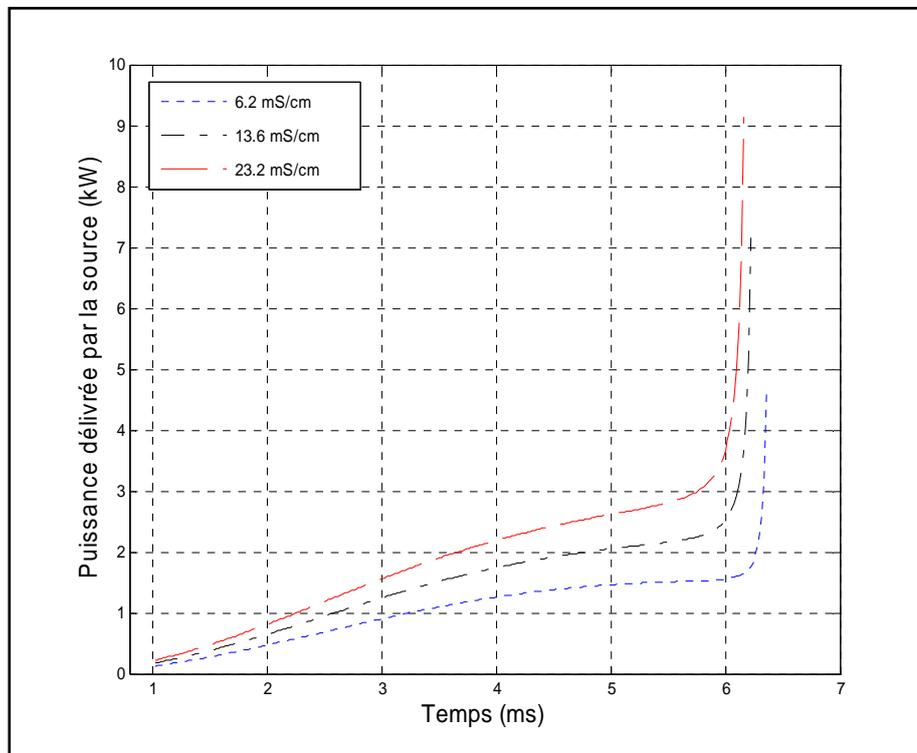


Fig.VI.13 : Puissance délivrée par la source – Temps

I.6. Conclusion

Afin de prédire la tension de contournement d'un isolateur pollué, nous avons présenté dans ce chapitre, un modèle dynamique, basé sur le critère de B.F.Hampton [38], en utilisant la relation de la vitesse développée par Rahal [18]. Ce modèle permet de suivre l'évolution temporelle des différents paramètres caractérisant le développement de la décharge.

Les tensions de contournement calculées par ce modèle présentent une différence par rapport aux valeurs expérimentales, cette différence est expliquée par les hypothèses simplificatrices que nous avons posées.

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

Dans le cadre de notre étude, les essais effectués au Laboratoire de Haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique sur des isolateurs pollués nous ont permis de mettre en évidence l'influence de la pollution sur le comportement des isolateurs de haute tension. Ces essais ont été effectués sur des isolateurs soumis d'une part à la pollution naturelle et d'autre part à la pollution artificielle.

En faisant recours à la méthode de régression très utilisée dans le domaine scientifique, nous avons établi les relations qui existent entre les différentes grandeurs physiques que nous avons mesurées.

Cette méthode est basée sur le critère des moindres carrés qui consiste à minimiser la somme des carrés des erreurs. Si la relation qui existe entre la variable dépendante et les variables indépendantes est linéaire ou peut être linéarisée par un changement de variable, la régression linéaire multiple permet d'établir cette relation. Sinon c'est la régression non linéaire qu'il faut utiliser. L'analyse de la variance et les tests des hypothèses sont nécessaires pour voir la signification du modèle construit.

Le traitement numérique du courant de fuite basé sur la transformée de Fourier discrète et le filtrage permet d'avoir les différents résultats concernant le spectre fréquentiel, le déphasage, le taux de distorsion ainsi que la valeur crête. Le recours au filtrage nous permet d'éliminer les erreurs de lecture liées aux perturbations.

Différents résultats sont élaborés concernant le courant de fuite parmi eux :

- ✓ La valeur crête du courant de fuite est liée à la sévérité de pollution, plus la couche est conductrice plus le courant est important. Donc, ce dernier donne des informations sur l'état de la surface isolante polluée.

✓ Le calcul du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée, et l'analyse fréquentielle nous informent sur l'état de l'humidification et la continuité de la couche polluante.

Nous avons présenté un modèle dynamique de contournement basé sur le modèle de Tegar, qui utilise le critère de B.F.Hampton comme critère de propagation. Alors que nous avons adopté pour le calcul de la vitesse, la relation développée par Rahal, cet auteur a développé le critère de B.F.Hampton pour aboutir au résultat qui dit que la vitesse de propagation est proportionnelle à la différence entre le champ dans la pollution et celui dans l'arc, donc cette vitesse augmente avec la propagation de la décharge. Ce modèle a été proposé dans le but de prédire la tension de contournement des isolateurs pollués. Il permet de suivre l'évolution temporelle des différents grandeurs caractérisant le phénomène de contournement.

Annexes

Annexe I

I.1. Estimation des paramètres de la régression linéaire simple :

$$\Phi(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i)^2$$

Cette relation fait apparaître la somme des carrés due à l'erreur comme une fonction des paramètres $\hat{\beta}_0$ et $\hat{\beta}_1$. Lorsque cette fonction est minimale, les dérivées par rapport à ces paramètres s'annulent:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1)}{\partial \hat{\beta}_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i) = 0 \\ \frac{\partial \Phi(\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1)}{\partial \hat{\beta}_1} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i) = 0 \end{cases}$$

Soit:

$$\begin{cases} \hat{\beta}_0 n + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \\ \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_i + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{cases}$$

Ce système d'équations admet pour solution

$$\begin{cases} \hat{\beta}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \\ \hat{\beta}_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \end{cases}$$

On pose :

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}$$

On trouve :

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \qquad \hat{\beta}_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

I.2. Espérance et variance de \hat{B} :

On sait que :

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y$$

En remplaçant Y , il vient :

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'(X\beta + U) = \beta + (X'X)^{-1}X'U$$

D'où :

$$\hat{\beta} - \beta = (X'X)^{-1}X'U$$

Il s'ensuit, compte tenu des hypothèses faites :

$$E(\hat{\beta} - \beta) = (X'X)^{-1}X'E(U) = 0$$

Et donc :

$$E(\hat{\beta}) = \beta$$

Donc, sous les hypothèse faite, les coefficients des moindres carrés sont des estimateurs sans biais des paramètres β . La matrice de variance-covariance des estimateurs des moindres carrés est établie comme suit. On part de la définition :

$$\begin{aligned} \text{Var}(\hat{\beta}) &= E\left(\left(\hat{\beta} - E(\hat{\beta})\right)\left(\hat{\beta} - E(\hat{\beta})\right)'\right) = E\left(\left(\hat{\beta} - \beta\right)\left(\hat{\beta} - \beta\right)'\right) \\ &= E\left[\left((X'X)^{-1}X'U\right)\left((X'X)^{-1}X'U\right)'\right] \\ &= E\left(\left(X'X\right)^{-1}X'(UU')X\left(X'X\right)^{-1}\right) \\ &= \sigma^2\left(X'X\right)^{-1} \end{aligned}$$

Et la matrice variance-covariance estimée du vecteur $\hat{\beta}$ est donnée par :

$$\widehat{\text{Var}}(\hat{\beta}) = S^2(X'X)^{-1}$$

I.3. Intervalle de prévision

On dispose du modèle:

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i$$

La prévision ponctuelle est donnée par la valeur prise par la régression en x_h , c'est-à-dire par :

$$\hat{y}_h = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_h = \bar{y} + \hat{\beta}_1 (x_h - \bar{x})$$

La vraie valeur prise par y pour la période sur laquelle porte la prévision est :

$$y_h = \beta_0 + \beta_1 x_h + u_h$$

La valeur moyenne de y sur l'échantillon de taille n est donnée par :

$$\bar{y} = \beta_0 + \beta_1 \bar{x} + \bar{u}$$

Ce qui donne, en soustrayant :

$$y_h = \bar{y} + \beta_1 (x_h - \bar{x}) + u_h - \bar{u}$$

L'erreur de prévision est par définition :

$$e_h = y_h - \hat{y}_h = (\beta_1 - \hat{\beta}_1)(x_h - \bar{x}) + u_h - \bar{u}$$

La variance de l'erreur de prévision est donnée par :

$$\text{Var}(e_h) = \sigma^2 \left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_h - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)$$

Puisque l'erreur de la prévision est une fonction linéaire de plusieurs variables normales, elle suit donc une loi normale, et comme σ^2 est inconnu, on utilise son estimation non biaisée S^2 , on obtient :

$$\frac{e_h}{S \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_h - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)}} \mapsto t(n-2)$$

D'où on détermine l'intervalle de prévision au risque α de la prévision:

$$\hat{y}_h \pm \frac{t_{\alpha/2}}{2} S \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_h - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)}$$

Annexe II

Espérance et variance de β :

La minimisation de la somme des carrés des erreurs donne le système d'équations suivant :

$$F'(Y - f(\hat{\beta})) = 0 \quad (1)$$

$f(\hat{\beta})$ peut être approximé en série de Taylor comme suit :

$$f(\hat{\beta}) \approx f(\beta) + F(\hat{\beta} - \beta) \quad (2)$$

En remplaçant (2) dans (1), il vient :

$$F'(Y - f(\beta) - F(\hat{\beta} - \beta)) \approx 0$$

D'où :

$$\hat{\beta} - \beta = (F'F)^{-1}F'(Y - f(\beta)) = (F'F)^{-1}F'U$$

Il s'ensuit, compte tenu des hypothèses faites :

$$E(\hat{\beta} - \beta) = (F'F)^{-1}F'E(U) = 0$$

Et donc :

$$E(\hat{\beta}) = \beta$$

Donc, sous les hypothèse faite, les coefficients des moindres carrés sont des estimateurs sans biais des paramètres β . La matrice de variance-covariance des estimateurs des moindres carrés est établie comme suit. On part de la définition :

$$\begin{aligned} \text{Var}(\hat{\beta}) &= E\left(\left(\hat{\beta} - E(\hat{\beta})\right)\left(\hat{\beta} - E(\hat{\beta})\right)'\right) = E\left(\left(\hat{\beta} - \beta\right)\left(\hat{\beta} - \beta\right)'\right) \\ &= E\left(\left((F'F)^{-1}F'U\right)\left((F'F)^{-1}F'U\right)'\right) \\ &= E\left((F'F)^{-1}F'(UU')F(F'F)^{-1}\right) \\ &= \sigma^2(F'F)^{-1} \end{aligned}$$

Références
Bibliographiques

Références Bibliographiques



- [1] **M.Soufi, M.Zemirline**, "Conception d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz", Mémoire de projet de fin d'études, Génie Electrique, ENP 2004.
- [2] **S.Guerfi**, "Modélisation des isolateurs de haute tension pollués sous tension continue", Mémoire de Magister, Génie Electrique, UAM Bejaia.
- [3] **K.Amriche, S.Benayad**, "Modélisation des principales caractéristiques d'un isolateur pollué sous tension continue", Mémoire de projet de fin d'études, Génie Electrique, USTHB 2004.
- [4] **M.Teguar**, "Modélisation d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro géométriques", Mémoire de doctorat d'état, Génie Electrique, ENP 2003.
- [5] **C.Gary**, "Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions", Edition Eyrolles.
- [6] **S.Bouazabia, T.Chikhaoui**, "Méthode d'essai sur des isolateurs pollués dans des conditions désertiques", Mémoire de projet de fin d'études, Génie Electrique, ENP 1988.
- [7] **A.Bouarouri, R.Ladjal**, "Comportement et caractérisation électrique d'un modèle d'isolateur sous tension alternative", Mémoire de projet de fin d'étude, Génie Electrique, ENP 2006.
- [8] **D.Dumora**, "Matériaux isolants céramiques en électrotechnique", Technique de l'ingénieur D275.
- [9] **D.Namane**, "Effet de la discontinuité de la pollution sur le comportement d'isolateur haute tension, sous la fréquence de 50 Hz", Thèse de Magister, Génie Electrique, ENP 1998.
- [10] **A.Mekhaldi**, "Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique", Thèse de Magister, Génie Electrique, ENP 1990.
- [11] **Z.Djemai, F.Bennai**, "Essai sur site et au laboratoire d'isolateurs contaminés par la pollution industrielle au bord de la mer ", Thèse de projet de fin d'étude, Génie Electrique, ENP 1986.
- [12] **A.Mekhaldi, H.Boudjelthia**, "Contribution à l'étude de la pollution des isolateurs de haute tension dans la région électrique de Annaba", Thèse de projet de fin d'étude, Génie Electrique, ENP 1984.

- [13] **A.Mekhaldi**, "Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tension alternative 50 Hz ", Thèse de doctorat d'état, Génie Electrique, ENP, juin 1999.
- [14] **M.Teguar**, "Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées", Thèse de Magister, Génie Electrique, ENP 1993.
- [15] **B.Hammoum, A.Kerbouche**, "Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien ", Mémoire de projet de fin d'études, Génie Electrique, ENP 2007.
- [16] **R.Moumeni, A.Bahous**, "Modélisation dynamique de l'arc électrique sur des isolateurs pollués de haute tension ", Thèse de projet de fin d'études, Génie Electrique, USTHB 1996.
- [17] **F.Midi, K.Ouerdane**, "Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30 kV en région littorales ", Thèse de projet de fin d'études, Génie Electrique, USTHB 1998.
- [18] **Z.Sahli**, "Etude de la non uniformité de la pollution sur des caractéristiques de contournement des isolateurs réels pollués sous tension continu", Mémoire de Magister, Génie Electrique, UAM Bejaia.
- [19] **E.Diday, J.Lemaire, J.Pouget, F.Testu**, "Eléments d'analyse de données", Edition Dunod.
- [20] **J-F.Dubois**, " Quelques pièges cachés des méthodes de sélection de variables en régression linéaire multiple", Mémoire présenté au département de mathématique et d'informatique en vue de l'obtention du grade de maitre des sciences, Janvier 2000.
- [21] **S.Venkataraman, R.S.Gorur**, "Extending the applicability of insulator flashover models by regression analysis", IEEE trans. Dielectr. Electr. Insul, pp.368-374, 2007
- [22] **J.Johnston, J.Dinardo**, "Méthode économétriques", Edition Economica.
- [23] **S.Weisberg**, "Applied linear regression", Wiley series in probability and statistics.
- [24] **D.Mouchiroud**, "Mathématiques : Outils pour la Biologie", Deug science de la vie, Université Claude Bernard, Lyon, 2003.
- [25] **D.Salvatore**, "Econométrie et statistique appliquées". Edition Mac Graw Hill.
- [26] **W.Greene**, "Econométrie" 5^e édition Pearson Education.
- [27] **R.Bourbonnais**, "Econométrie" 6^e édition Dunod.
- [28] **Abimouloud**, "Comportement d'une surface isolante partiellement polluée sous tension alternative 50 Hz", Thèse de Magister, Génie Electrique, ENP 1999.
- [29] **A.Lacheheb**, " Visualisation et traitement de signal du courant de fuite sur une surface isolante polluée", Thèse de projet de fin d'étude, Génie Electrique, ENP 1999.

- [30] **F.De Coulon**, "Théorie et traitement des signaux ", Edition Dunod.
- [31] **A.W.M.Van Den Enden, N.A.M.Verhoeckx**, "Traitement Numérique du signal ", Edition Masson.
- [32] **M.Kunt**, "Traitement numérique des signaux", Edition Dunod.
- [33] **C.Prévé**, "Les réseaux électriques industriels 2", Edition Lavoisier.
- [34] **J.Max, J-L.Lacoume**, "Méthodes et techniques de traitement du signal et application aux mesures physiques", Edition Masson.
- [35] **F.Auger**, "Introduction à la théorie du signal et de l'information", Edition Technip.
- [36] **G.Asch**, "Acquisition de données du capteur à l'ordinateur", Edition Dunod.
- [37] **A.Boubakeur, M.Teguar**, " Pollution des Isolateurs de Haute Tension ", Laboratoire de Haute Tension, Département de Génie Electrique, ENP.
- [38] **B.F.Hampton**, "Flashover mechanism of polluted insulation", Proc.PIEE, vol.111 n°5, pp.985-990, July 1964.
- [39] **T.C.Chung, H.I.M.Nour**, "DC interfacial breakdown on contaminated electrolytic surfaces", IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol.19, N°6, December 1984.
- [40] **G.Zhicheng, Z.Renyu**, "Calculation of dc and ac Flashover Voltage of Polluted Insulators", IEEE Transaction on Electrical Insulation, vol. 25 n°4, August 1990.
- [41] **Y.Guehrrar**, "Elaboration d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative et impulsionnelle", Thèse de magister, Génie Electrique, ENP 2004.
- [42] **Y.Beausejour, F.A.M.Rizk**, "Feed back controlled cascade rectifier source for HV testing of contaminated insulators", IEEE TRANS. Pas, vol.100, n°7, 1981.
- [43] **R.Sundararajan, R.S.Gorur**, "Computer Aided Design of Porcelain Insulators under Polluted Conditions", IEEE trans. Dielectr. Electr. Insul, vol. 2 n°1, pp.121-127, February 1995.