

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'ELECTROTECHNIQUE
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire
pour l'obtention du diplôme de
Master en Electrotechnique

Intitulé

**Etude du courant de fuite sous pollution désertique – Région de
Bousaâda**

Présenté par
Nada ZOUZOU

Sous la direction de Pr. A. Mekhaldi
soutenu publiquement le 20 juin 2016

Membres du Jury

Président :

A. Boubakeur, Professeur à l'ENP

Rapporteur :

A. Mekhaldi, Professeur à l'ENP

Examineur :

M. Tegar, Professeur à l'ENP

ENP 2016

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

ملخص:

يتناول هذا العمل دراسة شدة التلوث تحت تيار متناوب ذو توتر 50 هرتز على نموذج سطحي يمثل العازل ولهذا الغرض أجريت عدة تجارب للتلوث المنتظم بالمخبر عالي التوتر للمدرسة العليا المتعددة التقنيات لتمييز وتشخيص حالة سطح النموذج اعتمادا على إشارات كل من تيار التسرب والتوتر المطبق، أولا ركزنا على التحليل الزمني حيث قمنا بدراسة توتر الإحاطة، القيمة الفعالة لتيار التسرب، فرق الصفحة بين التوتر وتيار التسرب، تطور عدد وطول التفريغات المتوازية، تطور الشكل الموجي لتيار التسرب، ثانيا التحليل الترددي حيث قمنا بعرض نتائج معالجة إشارة كل من التسرب و التوتر بواسطة $Kh(5/3)$, THD, FFT. كل هذه المؤشرات تتغير التي حد كبير مع سمك طبقة التلوث. توضح النتائج المتحصل عليها في هذا العمل ان الإشارات التي قمنا بتطويرها تمكننا من تحقيق نتائج تشخيص ممتازة.

الكلمات المفتاحية: تشخيص، شدة التلوث، التلوث المنتظم، نموذج سطحي، تيار التسرب، التوتر المطبق، التحليل الزمني، توتر الإحاطة، فرق الصفحة، التفريغات المتوازية، الشكل الموجي، القيمة الفعالة، التحليل الترددي، THD, FFT, $Kh(5/3)$ ، ناقلي، سمك، طبقة التلوث.

Abstract

This present work deals with the desert pollution's severity under 50Hz supplied voltage. It uses a plan model that simulates the real insulator. Many tests at High Voltage Laboratory of the ENP were carried out using a uniform desert pollution in order to characterize the conditions of insulating surface, by passing through the leakage current and applied voltage waveforms. First, we are interested in the temporal analysis where we study the flashover voltage, the effective value of the leakage current, phase angle between leakage current and applied voltage, evolution of partial discharges' length and number according to the applied voltage and waveform of the leakage current. Secondly, a frequency analysis was made where we present the signal processing results of leakage current and applied voltage waveforms by using spectral analyses (FFT), the rate harmonic distortion (THD), and the report between the two harmonics 5 and 3 ($Kh(5/3)$), all these parameters depend on the thickness (amount) of the pollution layer. The results obtained in this work show that the signals that we have developed allow to achieve excellent diagnostic results.

Key-words : Uniform pollution, plan model, leakage current, flashover voltage, phase angle, spectral analyses, rate harmonic distortion.

Résumé

Ce présent travail se porte sur l'étude de la sévérité de la pollution désertique sous tension alternatif 50Hz sur un modèle plan qui simule l'isolateur. Pour cela, plusieurs essais en pollution uniforme sont accomplis au Laboratoire de Haute Tension de l'ENP pour caractériser l'état de surface du modèle à travers les signaux du courant de fuite et la tension appliquée. En premier lieu, nous nous intéressons à l'analyse temporelle où nous étudions la tension de contournement, la valeur efficace du courant de fuite, le déphasage du courant de fuite-tension et la forme d'onde du courant de fuite. En deuxième lieu, une analyse fréquentielle a été faite où nous présentons les résultats du traitement des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée par l'analyse spectrale (FFT), le taux de distorsion harmonique (THD) et le rapport des deux harmoniques n°5 et n°3 ($Kh(5/3)$), tous ces paramètres changent en fonction de l'épaisseur (quantité) de la couche polluante. Les résultats obtenus dans ce travail montrent que les signaux que nous avons élaborés permettent d'aboutir à d'excellents résultats de diagnostic.

Mots-clés : pollution uniforme, modèle plan, courant de fuite, tension de contournement, forme d'onde, valeur efficace du courant de fuite, le déphasage courant de fuite-tension appliquée, Analyse spectrale, taux de distorsion harmonique.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, que Dieu tout le puissant les gardes pour moi, je ne saurai comment leur exprimer ma gratitude ; leur amour et leur attention n'ont fait que combler mon existence.

Mes grands-parents qui m'ont toujours apporté soutien et réconfort et m'ont comblés de leur tendresse.

Mon frère Soheib pour sa présence, sa reconnaissance et sa gentillesse.

Mon adorable petite sœur Nesrine, pour qui je suis l'exemple de bienfaisance.

Ma meilleure amie Chami Ilhem, tous mes amis d'enfance, de l'EPST Annaba et sans oublier ceux de l'école nationale Polytechnique.

Tous les membres de ma famille surtout mes deux cousines Boughfir Djihen et Zouzou Chaima.

Zouzou Nada

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu le bon Dieu pour nous avoir donné force et courage à atteindre notre objectif.

Nous remercions, en deuxième lieu notre encadreur Mr MEKHALDI pour ses conseils, ses idées pertinentes et tout le temps qu'il a consacré à la réalisation de ce travail.

Nous remercions aussi Mr TEGUAR et Mr BOUBAKEUR qui ont été d'une grande gentillesse avec leurs présences et leurs encouragements, nous avons pu franchir plusieurs difficultés.

Un grand merci à MAADJOUJ Djamel qui nous a beaucoup aidé comme étant un accompagnant durant les manipulations au laboratoire.

Nos remerciements s'adressent également au chef de département d'électrotechnique Mr IBTIOUENE.

Nous ne pouvons pas ignorer l'ensemble des enseignants du département du Génie Électrique de l'Ecole Nationale Polytechnique.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Table des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction générale.....	13

Chapitre I : THEORIE DE TRAITEMENT DE SIGNAL

I.1. Introduction.....	16
I.2. Définition du traitement de signal.....	16
I.3. Finalités du traitement du signal	16
I.4. Traitement de l'information.....	16
I.5. Quelques notions sur le traitement du signal	17
I.5.1. Valeur efficace d'un signal (RMS).....	17
I.5.2. Taux de distorsion harmonique (THD).....	17
I.5.3. KH (5/3).....	17
I.6.4. Morphologie.....	18
I.6.4.1. Echantillonnage :.....	18
I.7. Analyse spectrale	19
I.8. Transformations de Fourier.....	19
I.8.1. ANALYSE SPECTRALE DES FONCTIONS PÉRIODIQUES.....	19
I.8.1.1. Développement en série de Fourier :.....	19
I.8.1.2. Représentation fréquentielle :	20
I.8.2. ANALYSE SPECTRALE DES FONCTIONS NON PÉRIODIQUES	20
I.8.2.1. La transformée de Fourier continue :.....	20
I.8.3. Transformée de Fourier discrète (TFD).....	20
I.8.4. Transformée de Fourier Rapide	22
I.9. Conclusion	22

Chapitre II : TECHNIQUES EXPERIMENTALES

II.1. Introduction.....	24
II.2. Dispositif expérimental.....	24
II.2.1. Circuits d'essais.....	24
II.2.2. Objet d'essais.....	25
II.3. Mode opératoire.....	26
II.3.1. Préparation de la couche polluante de sable	27

II.3.2 Nettoyage des isolateurs plan	27
II.3.2.1. Cas propre	27
II.3.2.2 Cas Pollué	27
II.4.Mesure du courant de fuite	29

Chapitre III : EXPLOITATION DES RESULTAS

III.1. Introduction	31
III.2. Analyse temporelle.....	31
III.2.1.Etude de la tension de contournement.....	31
III.2.1.1. Pour une surface propre de l'isolateur.....	31
III.2.1.2. Cas d'une surface polluée.....	32
III.2.1.2.1.Influence de l'épaisseur (la quantité) de la couche polluante.....	32
III.2.2. Etude du courant de fuite.....	34
III.2.3. Valeur efficace (RMS) du courant de fuite	34
III.2.3.1.Effet de la tension appliquée et de la quantité (l'épaisseur) de la couche polluante sur le courant de fuite	34
III.2.4.Déphasage du courant de fuite-tension.....	34
III.2.4.1. Influence de la tension appliquée et la quantité de la couche de contamination sur le déphasage	36
III.2.5. Formes d'onde du courant de fuite et de la tension appliquée	37
III.2.5.1. Effet de la variation du niveau de la tension appliqué.....	37
III.2.5.2. Effet de la quantité de la couche de contamination	37
III.3. Analyse fréquentielle du courant de fuite.....	39
III.3.1. Représentation spectrale du courant de fuite.....	39
III.3.1.1 Etude de l'effet de la variation du niveau de la tension appliqué.....	39
III.3.1.1.1. Cas d'une faible quantité de contamination	39
III.3.1.2 Etude de l'effet de la variation de la quantité de sable.....	44
III.3.2. Taux de distorsion d'harmonique (THD) du courant de fuite.....	46
III.3.2.1 Influence de la tension appliquée et de la quantité de la couche polluante	46
III.3.3. Etude du rapport des deux harmoniques n°3 et n°5 (Kh (5/3))	47
III.4 Conclusion.....	48
Conclusion générale	50
Références Bibliographiques.....	52



Liste des tableaux

Chapitre I

THEORIE DE TRAITEMENT DE SIGNAL

Tableau I.1. Méthodes utilisées selon le type de signal.	21
--	----

Chapitre II

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Tableau II.1. Dimensions du modèle plan étudié.	27
---	----

Chapitre III

EXPLOITATION DES RESULTAS

Tableau III.1. Essais de contournement pour l'état propre.	31
--	----



Liste des figures

Chapitre I : THEORIE DE TRAITEMENT DE SIGNAL

Fig.I. 1 Représentation des étapes de traitement de l'information.....	16
Fig.I. 2 Echantillonnage d'un signal	19
Fig.I. 3 Représentation fréquentielle d'un signal périodique d'une période $T_0=1/f_0$	21

Chapitre II : TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Fig.II 1 Vue du laboratoire de l'ENP	25
Fig.II 2 Oscilloscope GWINSTEK	25
Fig.II 3 Circuit d'essais et de mesures	26
Fig.II 4 Modèle plan expérimental, vue de haut	27
Fig.II 5 La couche polluante est uniforme sur la surface	28
Fig.II 6 Humidification de la surface du modèle par un pulvérisateur de l'eau distillée	29

Chapitre III : EXPLOITATION DES RESULTAS

Fig.III 1 Tension de contournement : cas du sable de Boussaâda pour différentes quantités de la couche polluante.....	32
Fig.III 2 Comportement du modèle plan dans le cas d'une pollution (a) niveau de tension 40 kV; (b1) niveau de tension 60kV ; (b2) niveau de tension 65kV; (c) niveau de tension 72Kv;(d) tension du contournement 76kV pour une quantité de 75 g	34
Fig.III 3 Valeur efficace du courant de fuite	35
Fig.III 4 Variation de déphasage du courant de fuite-tension	36
Fig.III 5 Formes d'onde du courant de fuite et de la tension appliquée pour deux niveaux de tension 5kV (Fig.III.5.a) et 30 kV (Fig.III.5.b)	37
Fig.III 6 Formes d'onde du courant de fuite et de la tension appliquée pour deux quantités de la couche polluante 15g (Fig.III.6.a) et 60g (Fig.III.6.b)	38
Fig.III 7 FFT du courant de fuite pour la 1ère quantité (m=15g) pour les niveaux de tension de : (a) 5kV, (b) 10kV, (c) 20kV, (d) 30kV et (e) 40kV	41
Fig.III 8 FFT du courant de fuite pour la 5ème quantité (m=75g) pour les niveaux de tension de : (a) 5kV, (b) 10kV, (c) 15kV, (d) 20kV et (e) 25kV	43
Fig.III 9 FFT du courant de fuite pour un niveau de tension de 20kV et pour différentes quantités de contamination : (a) propre (b) 15g, (c) 30g, (d) 45g (e) 60g et (f) 75g.....	45
Fig.III 10 Variation du taux de distorsion (%) en fonction de la tension pour différentes quantités de sable	46
Fig.III 11 Variation du rapport $K_h(5/3)$ en fonction de la tension appliquée pour différentes quantités de sable	47



Introduction Générale

L'énergie électrique est un facteur essentiel et précieux qui est la base de tout développement industriel et humain [1]. Parmi les principales formes d'infrastructures énergétiques et les composants principaux des grands réseaux de transport d'électricité, les lignes de haute tension [2]. Ces dernières transportent l'énergie électrique des centrales électriques aux consommateurs par des lignes aériennes ou câbles souterrains ou même sous-marins.

Les lignes aériennes sont composées de câbles conducteurs, suspendus à des supports, pylônes ou poteaux. La fixation et l'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs dont sa conception et réalisation est devenue un des facteurs déterminants pour assurer le bon fonctionnement des ligne de haute tension .

Parmi les grands problèmes auxquels les ingénieurs réfléchissent nous citons le problème du contournement des isolateurs et leurs tenues au contournement en fonction de l'environnement dans lequel ils sont utilisés. Le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut devenir insuffisant avec le temps et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution. C'est pourquoi les chercheurs consacrent leur temps à effectuer des expériences en laboratoire sous conditions artificielles ou naturelles dans le but de faire une étude convenable du comportement de l'isolateur.

Depuis des années, plusieurs travaux ont été menés pour comprendre les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs pollués et se prémunir d'outils permettant la prédiction de ce phénomène. Alors un critère de diagnostic est nécessaire pour déterminer l'état de surface de l'isolateur et le risque d'occurrence du contournement.

Les chercheurs dans les laboratoires montrent que les paramètres majeurs pouvant nous informer sur l'état de la surface des isolateurs sont le courant de fuite circulant sur la surface de l'isolateur et la tension appliquée. En effet, dans notre travail, nous nous sommes intéressés à analyser ces deux signaux et comprendre l'effet de la quantité de la couche polluante sur la rigidité diélectrique de l'isolateur.

Parmi les méthodes de diagnostic utilisées, en premier lieu, nous proposons une analyse temporelle du courant de fuite. Les différents résultats de cette analyse ont permis d'extraire, en variant la quantité ainsi que la conductivité de la couche de pollution, un nombre important d'informations à partir notamment des amplitudes et de leurs valeurs efficaces (RMS), ainsi que de sa forme d'onde et sa tension de contournement. En deuxième lieu, une analyse fréquentielle a été proposée pour étudier le taux de distorsion harmonique et le rapport des deux harmoniques 5 et 3 qui décrivent l'influence des composantes harmoniques.

Ces deux analyses constituent des outils importants dans l'étude du comportement électrique des isolateurs pollués uniformément par le sable.

Ce travail consiste à étudier l'influence de la pollution sur un modèle d'isolateur plan avec différentes quantités de la couche polluante constituée de sable de la région Algériennes de Bousaâda afin de comprendre leurs impacts sur les performances électriques de l'isolateur, en exploitant principalement le signal du courant de fuite et de la tension appliquée.

Afin de bien mener notre étude, nous avons subdivisé notre travail en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons quelques principaux concepts de la théorie de traitement de signal. Nous présentons ensuite quelques paramètres nous permettant d'évaluer l'état de surface de l'isolateur tel que la valeur efficace, le déphasage, le taux de distorsion harmonique et le rapport des deux harmoniques 5 et 3. Enfin nous clôturons ce chapitre par une représentation des différentes transformations utilisées selon le classement des signaux comme la transformée de Fourier, la transformée en ondelettes avec leurs différents types, pouvant être utilisées comme moyen de surveillance de l'état de surface des isolateurs.

Dans le second chapitre, nous présentons les techniques expérimentales et les différents outils utilisés pour réaliser les essais en laboratoire.

Le troisième chapitre est consacré à l'exploitation des résultats des essais qui sont réalisés au niveau du Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale polytechnique dans le but d'étudier le comportement du modèle plan lorsque la surface est propre et lorsqu'elle est uniformément polluée pour différentes quantités de la couche polluante. Une analyse temporelle a été faite pour présenter les résultats concernant la tension de contournement, le déphasage courant de fuite-tension appliquée, la forme d'onde du courant de fuite et leurs évolutions en fonction de la quantité de la couche de contamination. Une deuxième partie de ce chapitre est réservée pour l'analyse fréquentielle dans laquelle nous présentons les résultats concernant l'évolution de la Transformée de Fourier Rapide (FFT), le taux de distorsion harmonique (THD), et le rapport des deux harmoniques 5 et 3 ($K_h(5/3)$) du courant de fuite en fonction de la quantité et la conductivité de la couche polluante.

Nous nous basons sur la banque des données de vidéos de contournements de l'isolateur plan préalablement enregistrées.

Enfin nous clôturons notre mémoire par une conclusion générale qui décrit la performance de l'isolateur en présence de pollution.



Chapitre I :
Théories du Traitement de
Signal

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les principaux concepts utilisés pour le diagnostic de l'état de la surface d'un isolateur pollué. Parmi les plus importants le traitement du signal aussi bien du courant de fuite que celui de la tension appliquée. Nous présentons en premier lieu l'intérêt du traitement de signal en citant ses différentes finalités.

Par la suite, nous présenterons les différentes étapes pour traiter une information donnée par un signal et citerons quelques notions principales utilisées dans le traitement de signal. Comme nous parlerons des différentes méthodes utilisées pour traiter et analyser un signal. Enfin nous clôturons ce chapitre par une représentation des différentes transformations de Fourier selon le classement des signaux. Toutes ces notions seront appliquées dans l'étude du courant de fuite dans le cas d'un isolateur pollué.

I.2. Définition du traitement de signal

Le traitement de signal est un ensemble des techniques permettant de créer, analyser et transformer les signaux en vue de leur exploitation, c'est aussi l'extraction du maximum d'informations utiles d'un signal perturbé par le bruit. [3]

I.3. Finalités du traitement du signal

Le traitement du signal peut avoir différentes finalités [4]:

- La détection d'un signal.
- L'estimation de grandeurs à mesurer sur un signal.
- Le codage, la compression du signal pour son stockage et sa transmission.
- L'amélioration de sa qualité (restauration) selon des critères physiologiques (pour l'écoute et la visualisation).

I.4. Traitement de l'information

Le traitement de l'information d'un système se fait en appliquant une chaîne d'opérations représentée par le schéma (Fig.I.1) en dessous :

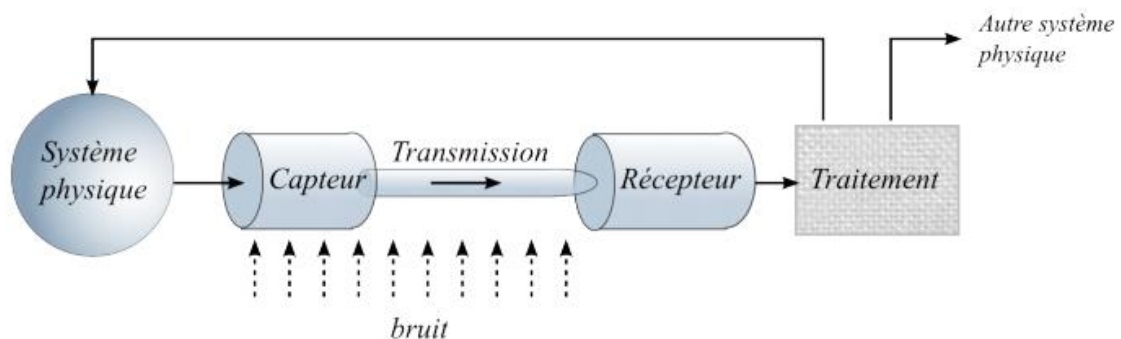


Fig.I.1. Représentation des étapes de traitement de l'information [3]

I.5. Quelques notions sur le traitement du signal

I.5.1. Valeur efficace d'un signal (RMS)

La valeur efficace d'une tension U est la valeur de la tension continue constante qui aurait les mêmes effets que U sur un dipôle purement résistif [5 ,6]. On voit que cette définition peut s'appliquer sur toutes sortes de tensions, continues, alternatives, ou quelconques. Elle est particulièrement utile naturellement dans le cas d'une tension périodique. On peut alors la calculer sur une période.

La valeur efficace d'un signal U est exprimée par cette équation:

$$\text{Nous avons : } U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt}. \quad (1)$$

$$\text{Si le signal est sinusoïdal : } U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U^2(\theta) d\theta} = \frac{V_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

I.5.2. Taux de distorsion harmonique (THD)

I.5.2.1. Définition

Le taux de distorsion harmonique est un pourcentage qui se calcule pour indiquer la qualité de traitement du signal dans un appareil. C'est la comparaison entre le signal de sortie et le signal d'entrée purement sinusoïdal pour définir le degré de contenu harmonique dans un signal alternatif [7].

Soit un signal $x(t)$, le taux de distorsion harmonique (THD) est défini comme le rapport entre la valeur efficace de l'ensemble des composantes harmoniques et le fondamental du signal :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} x_h^2}}{x_1} \quad (3)$$

Où x_h est la valeur efficace de l'harmonique de rang h et x_1 est celle de l'harmonique 1, le fondamental.

Cette définition se conforme à la norme IEC 61000-2-2¹ [8].

Selon cette norme, h peut généralement être limitée à 50. Cette équation donne une seule valeur indiquant la déformation d'une tension ou d'un courant circulant dans un système de distribution. La distorsion harmonique est généralement exprimée en pourcentage.

I.5.3.KH (5/3)

KH (5/3) est représenté par un rapport entre l'amplitude de l'harmonique 5 et l'amplitude de l'harmonique 3 du courant de fuite. Il détermine la probabilité d'occurrence de contournement [9].

¹La norme de compatibilité électromagnétique (EMC)

Ce rapport est caractérisé par : $\mathbf{Kh (5/3) = 100 * \frac{L' \text{ amplitude de l'harmonique 5}}{L' \text{ amplitude de l'harmonique 3}} (\%)}$ (4)

I.6.4. Morphologie

I.6.4.1. Echantillonnage :

La conversion d'un signal analogique en un signal numérique nécessite l'échantillonnage du signal analogique d'origine. Cet échantillonnage consiste à représenter un signal analogique continu par une série de mesures successives. Ces mesures sont faites à une certaine cadence : deux valeurs consécutives sont ainsi séparées par un intervalle constant. Cet intervalle constant est le pas d'échantillonnage [10, 11,12]. Les étapes de l'échantillonnage sont représentées sur la figure (Fig.I.2).

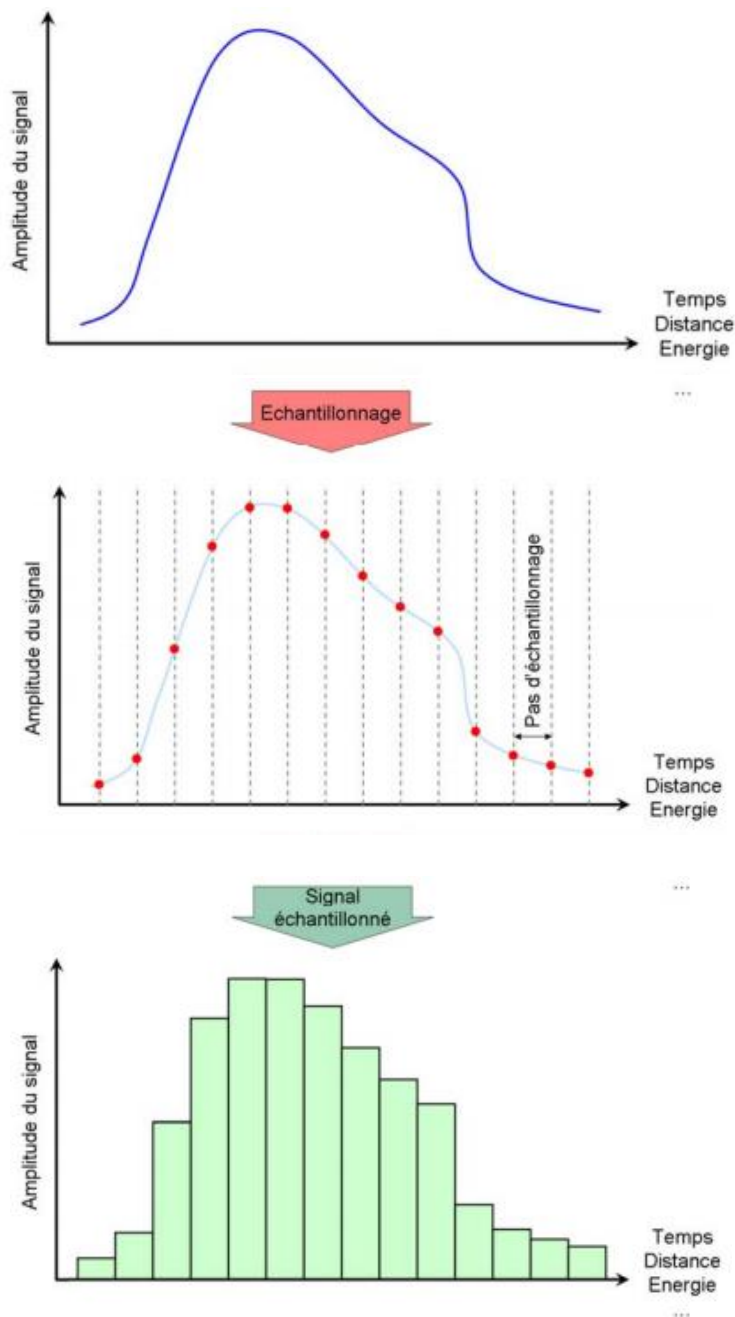


Fig.I.2. Echantillonnage d'un signal [10]

Le signal échantillonné peut donc être considéré comme une suite de valeurs discrètes de $x(t)$. Étudions le spectre de ce signal. Ce point est particulièrement important : l'échantillonnage ne doit pas détériorer le signal. En particulier il doit conserver le spectre de $x(t)$ et il doit permettre de restituer ce spectre en fin d'opérations [12].

I.7. Analyse spectrale

Lors du traitement numérique à l'oscilloscope ou à l'ordinateur, la détermination d'un signal numérisé passe par un algorithme appelé FFT : Fast Fourier Transform ou transformée de Fourier rapide [12].

Pour réaliser cette opération dans de bonnes conditions, il convient de respecter quelques règles liées au mode de calcul :

- a. La fréquence d'échantillonnage doit respecter le critère de Shannon.
- b. La partie du signal exploitée pour le calcul est limitée temporellement : soit T_H le temps total d'acquisition, aussi appelé horizon temporel. Les variations du signal qui se font sur une durée supérieure à T_H ne seront pas prises en compte : la résolution spectrale de la FFT est donc liée à T_H :

La résolution en fréquence du spectre obtenu est $\frac{1}{T_H}$

N est le nombre d'acquisitions qui vérifie $NT_E = T_H$. Comme $f_E > 2f_M$, $\frac{N}{T_H} > 2f_M$, et donc : La plage fréquentielle d'analyse est limitée à $\frac{N}{2T_H}$ donc à $\frac{f_E}{2}$.

- c. L'algorithme de calcul est optimisé si N est une puissance de 2.
- d. Si l'on utilise un ordinateur après une acquisition, T_H doit être un nombre entier de périodes du signal.

I.8. Transformations de Fourier

La transformation de Fourier est l'un des outils fondamentaux du traitement des signaux [16]. Elle permet d'associer à la largeur d'onde habituelle la représentation du signal en fonction de sa variable d'évolution (le temps généralement) une autre représentation complémentaire dans le domaine fréquentiel.

I.8.1. ANALYSE SPECTRALE DES FONCTIONS PÉRIODIQUES

I.8.1.1. Développement en série de Fourier :

Soit $x(t)$ une fonction périodique, de période $T_0 = \frac{1}{f_0}$. Donc elle peut s'écrire comme la somme des fonctions sinusoïdales selon la forme de la série suivante :

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=0}^{+\infty} a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t) \quad (5)$$

avec :

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) dt, \quad a_k = \frac{2}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) \cos(k\omega_0 t) dt, \quad b_k = \frac{2}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) \sin(k\omega_0 t) dt$$

Où a_k et b_k sont appelés les coefficients de la série de Fourier et a_0 la valeur moyenne ou composante continue.

Et voici une autre représentation de la série de Fourier.

$$x(t) = \sum_{k=1}^{+\infty} A_k \cos(k\omega_0 t + \varphi_k) \quad (6)$$

avec les coefficients : $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ et $\varphi_k = -\text{Arctg}\left(\frac{b_k}{a_k}\right)$

I.8.1.2. Représentation fréquentielle :

Le développement de la série de Fourier peut être écrit sous la forme complexe suivante :

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_k e^{ik\omega_0 t} \quad (7)$$

avec : $C_k = \frac{1}{2} \cdot (a_k - i \cdot b_k) = \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) e^{-ik\omega_0 t} dt$

La représentation fréquentielle ou le spectre en fréquence $X(f)$ d'un signal $x(t)$ est constitué de la composante continue à la fréquence $f=0$ du fondamental à la fréquence f_0 en plus des différents harmoniques de fréquence $f=n \cdot f_0$

Le spectre d'un signal périodique est discontinu et formée de pics de Dirac δ d'amplitude $|X(kf_0)|$ et il est obtenu à l'aide de cette formule :

$$X(f) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X(kf_0) \cdot \delta(f - kf_0)$$

avec : $X(kf_0) = C_k = \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) e^{-ik\omega_0 t} dt$.

Voici ci-dessous (Fig.I.3) la représentation fréquentielle d'un signal périodique d'une période $T_0 = \frac{1}{f_0}$.

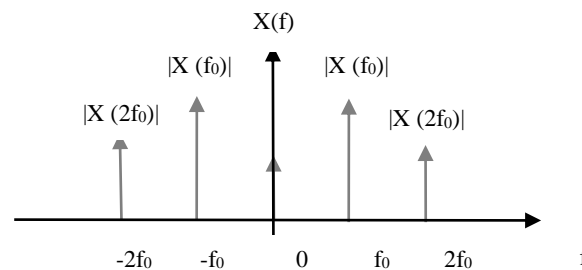


Fig.I.3. Représentation fréquentielle d'un signal périodique d'une période $T_0 = \frac{1}{f_0}$

I.8.2. ANALYSE SPECTRALE DES FONCTIONS NON PÉRIODIQUES

I.8.2.1. Transformée de Fourier continue :

On s'intéresse à une fonction de la variable t , $x(t)$ cette fonction peut être à valeur complexe, dépend d'une variable t qui pourrait être une variable vectorielle. si la variable est un scalaire et considéré comme le temps, la fonction $x(t)$ représentant alors l'évolution temporelle d'un signal. Notons cependant que t ne représente pas nécessairement le temps, et que l'on peut étudier le comportement du signal x suivant une variable d'espace suivant une concentration etc...

Une fonction $x(t)$ quelconque non périodique peut se décomposer sous la forme d'une intégrale de Fourier selon :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (8)$$

La transformation inverse est obtenue par :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{i2\pi ft} df \quad (9)$$

Avec : Moyennes : $X(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) dt$ et $x(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) df$

I.8.3. Transformée de Fourier discrète (TFD)

Si on veut calculer la transformée de Fourier avec ordinateur, qui n'a qu'un nombre limité de mots de taille finie, un passage de la transformée de Fourier continue vers une transformation de Fourier dite discrète est obligatoire.

Ce passage se fait par l'échantillonnage du signal analogique $x(t)$ pour obtenir un signal numérique discret $x(kT_e)$ de N termes.

Les étapes d'échantillonnage sont mentionnées précédemment.

La transformée de Fourier à temps discret du signal $x(k)$ est donnée par l'expression (10).

$$X(f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(kT_e) \cdot e^{-i\omega kT_e} \quad (10)$$

Mais pour avoir la transformée de Fourier Discrète, il faut ensuite échantillonner ce signal $X(f)$ dans le domaine fréquentiel par un pas : $\Delta f = \frac{f_e}{N} = \frac{1}{NT_e}$.

$$X(m, \Delta f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(kT_e) \cdot e^{-i2\pi m \Delta f \cdot kT_e}$$

après des simplifications on obtient :

$$X(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot e^{-i2\pi \frac{k}{N} \cdot m}$$

Voici un tableau (I.1) récapitulatif pour savoir comment choisir la méthode de calcul du spectre selon le signal :

Tableau I.1. Les méthodes utilisées selon le type de signal

Signal	Spectre	
	Méthode de calcul	Caractéristiques
1. Continu et périodique	Série de Fourier	Discret et non périodique
2. Continu et non périodique	Transformée de Fourier	Continu et non périodique
3. Discret et non périodique	Transformée de Fourier	Continu et périodique
4. Discret et périodique	Transformée de Fourier discrète (TFD)	Discret et périodique

I.8.4. Transformée de Fourier Rapide

La transformée de Fourier rapide **TFR** ou **FFT** (Fast Fourier Transform) est tout simplement l'utilisation d'un algorithme qui accélère le calcul de la transformée de Fourier en diminuant le nombre d'opérations (nombre de multiplications) [13].

$$\text{D'après la formule précédente : } X(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot e^{-i2\pi \frac{k}{N} m}$$

Nous pouvons remarquer que pour calculer cette transformée, il est nécessaire d'effectuer :

- N^2 fois des multiplications complexes.
- $N(N-1)$ fois des additions complexes.

Cet algorithme diminue le nombre d'opérations fait pour le calcul. Il nécessite seulement $(N/2) \log(N)$ multiplications complexes au lieu de N^2 [14].

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mentionné quelques notions sur le traitement du signal qui vont nous aider à analyser les courants de fuite et les tensions appliquées et leurs évolutions soit en fonction du temps soit en fréquence.

Pour une meilleure exploitation des signaux, il faut approfondir des connaissances sur le traitement du signal et aborder ses finalités pour pouvoir ensuite se pencher sur la quantification et l'échantillonnage avec ses étapes en respectant le critère de Shannon.

En dernier lieu, l'estimation spectrale obtenue par les transformations de Fourier sur lesquelles notre étude est fondée aboutit à de meilleurs résultats.



Chapitre II :
Techniques expérimentales

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions le comportement d'un modèle d'isolateur plan sous pollution uniforme. Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes intéressées à la pollution désertique. Les essais ont été effectués au niveau du Laboratoire de Haute Tension de l'ENP.

Plusieurs paramètres ayant une influence sur la tension de contournement de l'isolateur ainsi que sur le courant de fuite traversant la couche de pollution ont été pris en considération.

Parmi ces paramètres nous citons, la tension appliquée l'épaisseur de la couche de pollution.

II.2. Dispositif expérimental

II.2.1. Circuits d'essais

La station d'essais du laboratoire (Figure (II.1)) où nous avons effectués nos essais est de marque HAEFELY [15], elle contient :

- Un transformateur d'essai : 500V/300kV, 50 Hz
- Un transformateur de réglage : 220/500 V, 50 Hz.
- Un diviseur de tension capacitif qui est relié au secondaire du transformateur d'essai pour réduire la tension aux bornes du voltmètre, situé près du pupitre de commande. Il est composé d'une capacité $C1=400 \mu\text{F}$ et d'une capacité variable qui permet de contrôler la tension de sortie.
- Des appareils de mesures et de protection.
- Un oscilloscope numérique de type GW INSTEK (Figure (II.2)) de bande passante 500 MHz relié à un PC permettant l'acquisition des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée.
- Une caméra numérique du type SONY avec laquelle on peut suivre et enregistrer le phénomène de contournement pour chaque essai.

Nous avons effectué nos essais en se basant sur ce circuit d'essai représenté sur la figure (II.3).



Fig.II.1 : Vue du laboratoire de l'ENP



Fig.II.2: Oscilloscope GWINSTEK

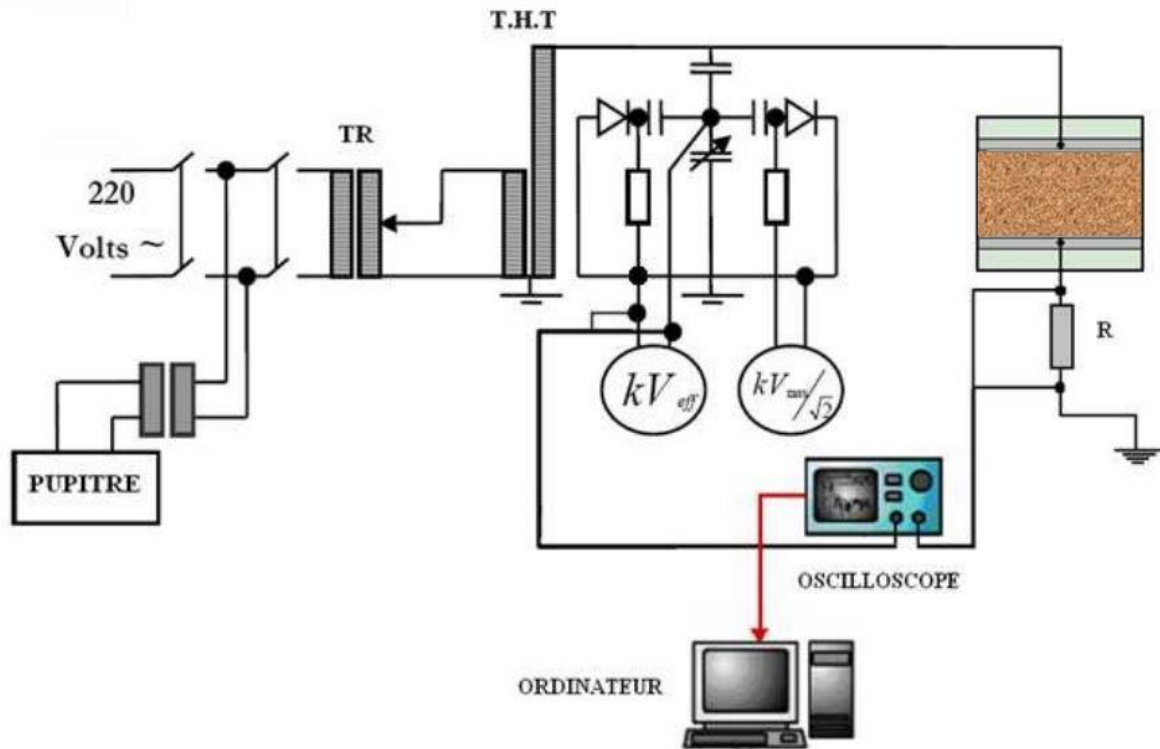


Fig.II.3 : Circuit d'essais et de mesures

II.2.2. Objet d'essais

Lors de nos essais, nous avons utilisé un modèle d'isolateur plan.

Pour effectuer nos essais ce modèle, nous avons besoin de : papier d'Aluminium, alcool chirurgical, papier absorbant, coton, l'eau distillée, sable, gas-oil et un tulle (utilisé comme un tamis).

Voici le modèle plan de l'isolateur (Fig.II.4) utilisé lors des essais :



Fig.II.4 : Modèle plan expérimental, vue de haut

Nous utilisons le papier d'aluminium comme électrodes que nous découpons en bandes d'une largeur de 3 cm d'une manière à ne pas avoir de pointes aux extrémités qui peuvent engendrer des erreurs à nos mesures.

Nous collons les deux bandes correspondant aux deux électrodes sur notre modèle en utilisant le gas-oil, en les fixant de manière à ne pas avoir des bulles d'air entre le plan et les bandes d'aluminium afin d'éliminer le risque d'avoir des décharges partielles qui vont influencer négativement sur nos mesures.

Ensuite, nous nettoyons le reste des gouttelettes de gas-oil utilisé pour le collage, par un bout de coton imbibé d'alcool chirurgical.

Nous posons notre modèle à une hauteur de 1590 mm du sol dans le but de limiter l'effet des capacités parasites qui risquent de rendre nos mesures erronées durant les essais.

Les dimensions de notre modèle plan à étudier sont données par ce tableau ci-dessous :

Tableau II.1 : Dimensions du modèle plan étudié

Grandeur	Longueur (mm)
Longueur de la plaque	500
Largeur de la plaque	500
Epaisseur de la plaque	5
Distance inter-électrode à l'état propre de la plaque	292
Distance inter-électrode à l'état pollué de la plaque	450

II.3. Mode opératoire

Dans notre cas, l'étude de l'évolution du courant de fuite a porté sur deux configurations différentes, le cas d'un modèle propre puis celui d'un modèle pollué.

Cette étude nous permettra d'observer la différence de comportement entre les deux cas, en particulier en ce qui concerne la tension de contournement, le courant de fuite, le déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée, le taux de distorsion (THD) du courant de fuite, la valeur efficace de la tension appliquée et du courant de fuite ainsi que le rapport de deux harmoniques KH (5/3) de courant de fuite .

II.3.1. Préparation de la couche polluante de sable

L'échantillon de sable est prélevé de la ville de Boussaâda (M'sila) et dont la conductivité est de 21 $\mu\text{S}/\text{cm}$ mesurée à une température de 17,2°C. Cette mesure de conductivités a été effectuée au Laboratoire de Haute Tension de l'ENP à l'aide d'un conductimètre de type numérique.

Pour mettre en évidence l'impact de l'épaisseur de la couche polluante sur le comportement de l'isolateur, nous utilisons différentes quantités de sable que nous répartissons d'une manière uniforme sur toute la surface du modèle plan. Les quantités de sable utilisées sont : 15 g, 30g, 45 g ,60g et 75 g.

II.3.2 Nettoyage des isolateurs plan

II.3.2.1. Cas propre

Avant d'entamer les essais, nous nettoyons d'abord notre modèle plan en verre en utilisant une éponge mouillée d'eau de robinet puis nous l'essuyons avec un papier absorbant pour le sécher et se débarrasser de toutes les impuretés déposées.

Ensuite, nous plaçons les deux électrodes sous forme de bandes en aluminium, que nous avons déjà préparées, aux deux côtés du modèle plan en gardant la distance inter-électrode constante et égale à 292 mm

Une bonne adhérence des électrodes sur la surface du modèle doit être assurée en utilisant du gas-oil.

Nous utilisons du coton imbibé d'alcool chirurgical pour le nettoyage du modèle plan de toute trace d'impureté ou de gas-oil. Enfin, un dernier nettoyage du modèle est réalisé en utilisant un papier absorbant pour mieux sécher le modèle.

II.3.2.2 Cas Pollué

Le modèle étant bien nettoyé, nous utilisons, pour chaque quantité de sable désirée, un tulle en plastique que nous utilisons comme un tamis et avec des mouvements de vas et viens de telle façon à obtenir une répartition de la couche de pollution la plus uniforme possible.



Fig.II.5 : La couche polluante est uniforme sur la surface

Une fois la couche de pollution est bien répartie sur toute la surface du modèle plan, nous procédons ensuite à sa pulvérisation avec de l'eau distillée dont la conductivité moyenne est de $1,6 \mu\text{S}$ (à $T= 17,2^\circ\text{C}$). Cette opération est effectuée cinq fois de chaque côté à une distance constante de 0,5 m à l'aide d'un pulvérisateur (Fig. II.6).

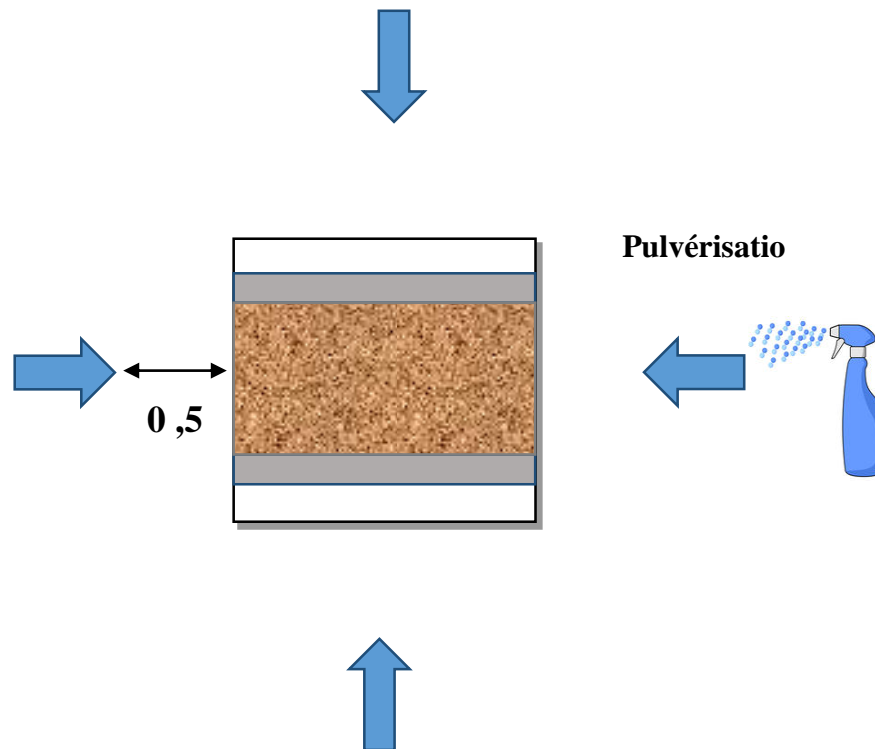


Fig.II.6 : Humidification de la surface du modèle par un pulvérisateur de l'eau distillée

II.4. Mesure du courant de fuite

Pour la mesure et l'enregistrement simultané des signaux de la tension appliquée et du courant de fuite, nous utilisons l'oscilloscope GW INSTEK de fréquence d'échantillonnage de 500 MHz. Le logiciel FreeWave nous permet de transférer les données vers un ordinateur pour être traitées plus tard.

Pour obtenir les signaux de la tension appliquée et du courant de fuite, une résistance a été placée en série avec l'objet d'essais. Deux câbles coaxiaux sont branchés à l'oscilloscope, l'un est placé en amont de la résistance pour récupérer la tension et l'autre en aval pour récupérer le courant de fuite.



Chapitre III :
Exploitation des résultats

III.1. Introduction

Nous consacrons cette partie expérimentale à l'analyse temporelle puis fréquentielle des résultats obtenus durant nos essais.

Pour la première analyse, nous avons relevé les valeurs de la tension de contournement, du courant de fuite, puis nous calculons le déphasage entre ces deux derniers dans le cas où la surface de l'isolateur est propre ensuite polluée avec différentes épaisseurs de la couche polluante.

Pour la deuxième analyse, nous calculons la transformée de Fourier Rapide (FFT), le taux de distorsion (THD) et le rapport des deux harmoniques (Kh (5/3)) dans le cas où la surface est propre ou polluée pour différentes épaisseurs de la couche polluante.

III.2. Analyse temporelle

L'analyse temporelle est très importante, elle peut nous procurer des informations pertinentes sur l'évolution du courant de fuite dans le but de pouvoir identifier des signatures significatives indiquant une dégradation importante de la tenue diélectrique des isolateurs.

III.2.1. Etude de la tension de contournement

La tension de contournement permet de définir la rigidité diélectrique du système. Alors il faut la connaître pour éviter les risques de contournement lors de la mesure des courants de fuite pour différents niveaux de la tension appliquée.

III.2.1.1. Pour une surface propre de l'isolateur

Nous avons procédé à des essais de contournement à sec. Pour des distances inter-électrodes $d = 29.2$ cm, les résultats sont donnés dans le tableau (III.1).

Tableau III.1.Essais de contournement pour l'état propre

Modèle	1	2	3	4	5	Valeur moyenne (kV)
U (kV)	120	118	122	120	120	120

Comme dans notre cas, d est supérieure à 8 cm, et notre système du modèle plan est équivalent à un système d'électrodes pointe-pointe non symétrique dont la formule ampérique de sa tension de contournement est :

$$U_c = 3.16 d [\text{cm}] + 14 \quad [\text{kV}_{\text{eff}}]$$

Où d est la distance inter-électrode.

Nous trouvons à partir de cette formule que la tension de contournement est $106.27 \text{ kV}_{\text{eff}}$ pour $d=29.2$ cm, nous remarquons que cette valeur est relativement proche de celle obtenue expérimentalement qui est de 120 kV .

Le contournement dans ce cas se fait directement dès qu'on atteint la valeur de tension critique sans apparition d'arc au préalable.

III.2.1.2. Cas d'une surface polluée

III.2.1.2.1. Influence de l'épaisseur (la quantité) de la couche polluante

Dans ce cas, nous avons étudié l'influence de l'épaisseur de la couche polluante sur la tension de contournement dans le cas où la surface de modèle plan est contaminée par le sable de Boussaâda. Les résultats des essais sont donnés par les figures (III.1).

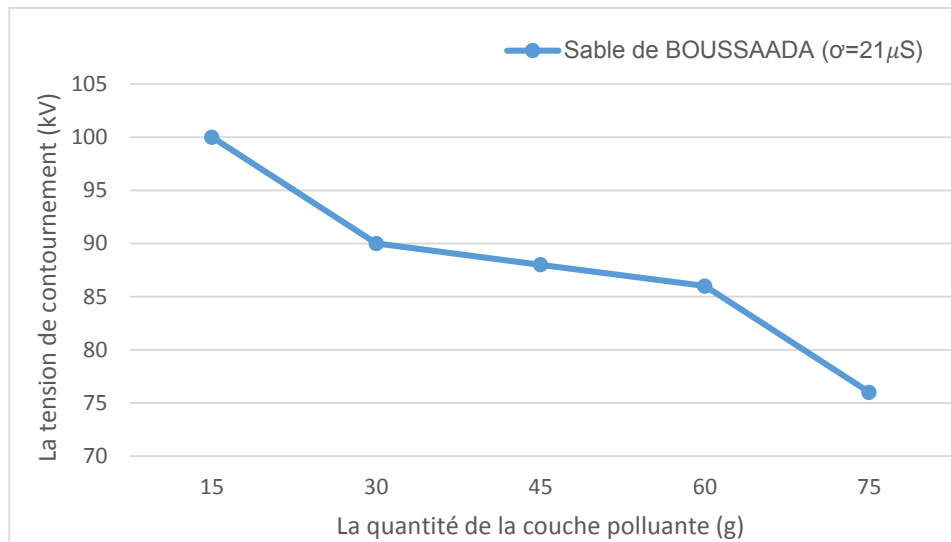


Fig.III.1. Tension de contournement : cas du sable de Boussaâda pour différentes quantités de la couche polluante

D'après la figure (III.1) nous remarquons que la tension de contournement de la couche polluante diminue d'une manière non linéaire en fonction de la quantité de celle-ci. En effet l'impédance de la couche propre est grande devant celle de la couche polluée, plus on diminue l'épaisseur de la couche polluante plus l'impédance de celle-ci devient importante.

Nous avons constaté que le contournement se fait sur plusieurs étapes.

D'abord l'apparition de décharges électriques sur la surface du modèle (la figure (III.2.a)). Ces décharges ont tendance à s'allonger le long de la surface (Figure (III.2.b)). Ce phénomène est accompagné d'une évaporation progressive donc d'un assèchement de la couche de pollution à cause de la chaleur dégagée par effet Joule et la formation d'une bande sèche, où la densité de courant est élevée.

Cette phase est suivie d'un phénomène qui est l'apparition d'arcs électriques dans les zones sèches (Figure (III.2.c)), alors la densité du courant de fuite devient très importante aux extrémités de ces zones, l'augmentation de l'intensité du champ électrique favorise l'extension de ces dernières jusqu'à la création de bandes sèches plus larges.

Enfin, l'arc final de contournement se produit (Figure (III.2.d)).



Fig.III.2.a

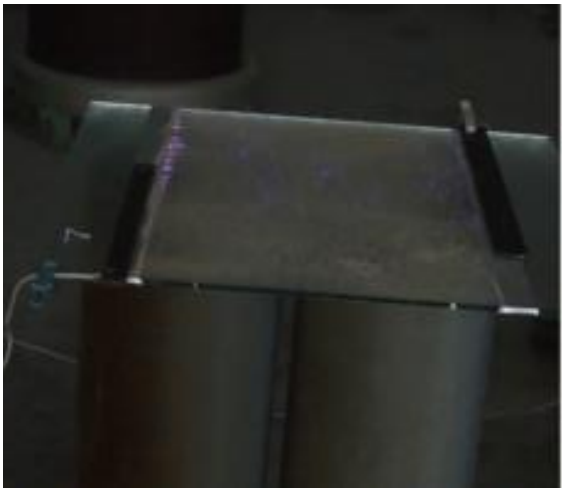


Fig. III.2.b1

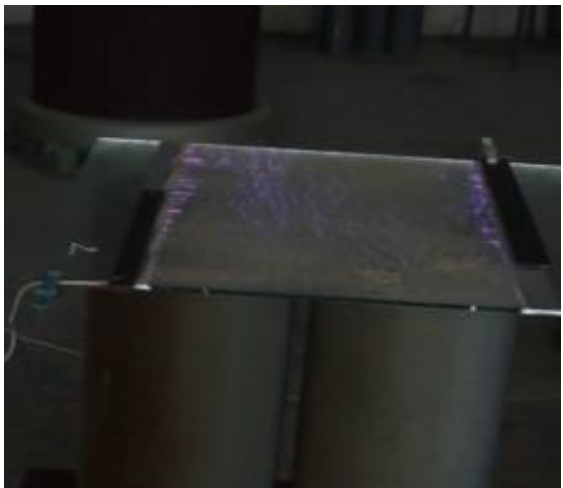


Fig. III.2.b2

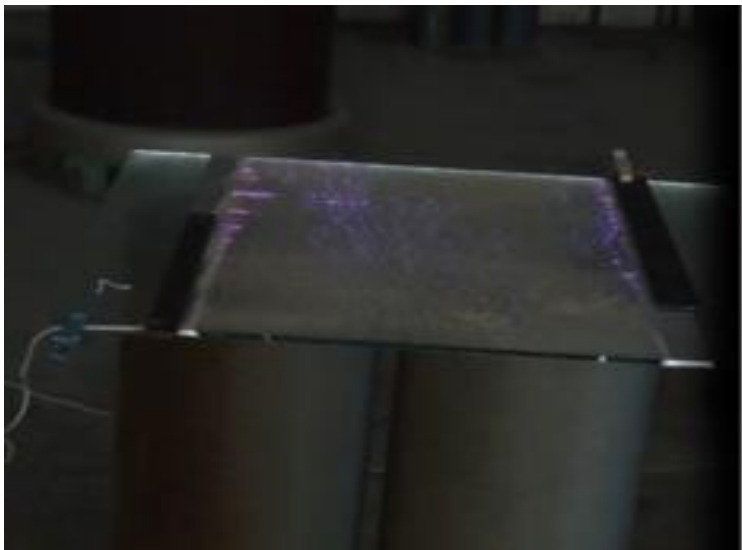


Fig. III.2.c



Fig. III.2.d

Fig. III.2. Comportement du modèle plan dans le cas d'une pollution (a) niveau de tension 40 kV; (b1) niveau de tension 60kV ; (b2) niveau de tension 65kV; (c) niveau de tension 72Kv;(d) tension du contournement 76kV pour une quantité de 75 g

Le contournement à lieu après avoir au préalable l'apparition d'arcs contournant le modèle, donc c'est le contournement total. Ce phénomène peut être expliqué par la diminution de l'impédance équivalente de l'isolateur.

III.2.2. Etude du courant de fuite

Le courant de fuite est le paramètre le plus important qui nous informe sur l'état de surface de l'isolateur.

Nous avons mesuré les niveaux des tensions de contournement dans l'étape précédente pour pouvoir fixer le niveau maximal de la tension que nous allons appliquer et qui va représenter 50% de la tension de contournement, ceci nous permettra de relever le courant de fuite sans aucun risque de court-circuit.

Nous avons relevé le courant de fuite pour 5 niveaux de tension inférieurs à cette tension maximale pour chaque cas de configuration (surface propre, polluée avec les 5 différentes quantités).

III.2.3. Valeur efficace (RMS) du courant de fuite

Le calcul des valeurs efficaces du courant de fuite est effectué en utilisant le programme Matlab pour pouvoir comparer les résultats obtenus pour une surface propre du modèle avec celle polluée avec différentes conductivités .

III.2.3.1. Effet de la tension appliquée et de la quantité (l'épaisseur) de la couche polluante sur le courant de fuite

Nous étudions la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes quantités de la couche polluante, les résultats sont donnés par la figure (III.3).

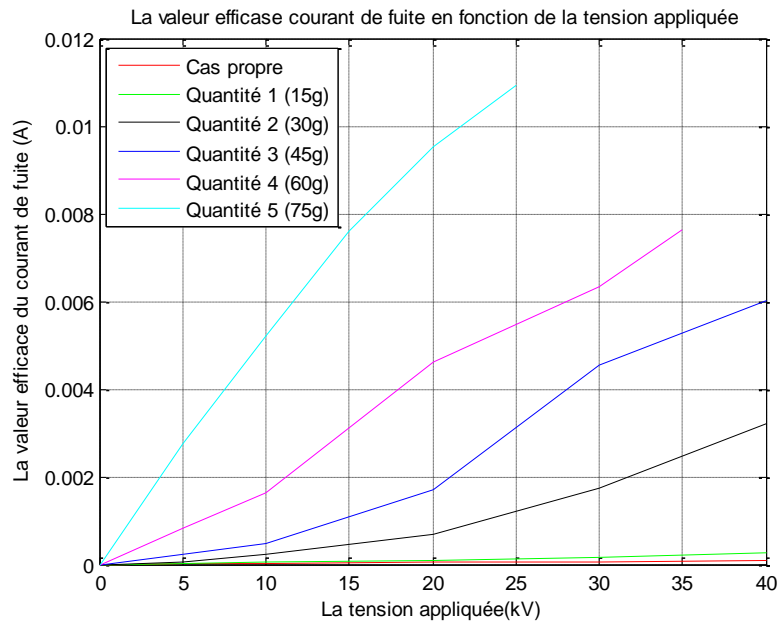


Fig. III.3. Valeur efficace du courant de fuite

D'après la figure (III.3), nous constatons que le courant de fuite augmente d'une manière non linéaire en fonction de la tension appliquée pour les différentes quantités utilisées.

Nous remarquons bien que la valeur efficace du courant de fuite est proportionnelle à la valeur de la quantité de la couche polluante, pour $U = 30\text{kV}$ par exemple, elle est minimale pour une surface propre et maximale pour la plus grande quantité de la couche de contamination ($m = 75\text{ g}$). En effet les valeurs de courant de fuite augmentent en augmentant la quantité de la couche polluante, ces valeurs sont faibles pour une surface propre à cause de l'impédance du milieu qui est importante.

Pour les faibles quantités de la couche de pollution (état sec, 15 g), la valeur efficace du courant de fuite augmente d'une façon presque linéaire en fonction de la tension appliquée. On remarque aussi que ces valeurs sont relativement faibles (de l'ordre de μA) à cause de l'impédance importante du milieu.

Pour les autres quantités importantes (30g, 45g, 60g, 75g), les valeurs du courant de fuite sont nettement plus importantes (de l'ordre de mA) relativement aux autres quantités, Cela est dû aux faibles impédances du milieu. Par conséquent, plus nous augmentons la quantité de la couche polluante, l'impédance du milieu devient plus faible alors le courant de fuite est plus important.

III.2.4. Déphasage du courant de fuite-tension

La détermination du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée est nécessaire pour étudier le comportement de notre modèle d'isolateur.

Cette étude nous a permis d'étudier l'influence de la tension appliquée et l'épaisseur (la quantité) de la couche de contamination sur le déphasage courant de fuite-tension pour le cas de la pollution uniforme.

III.2.4.1. Influence de la tension appliquée et la quantité de la couche de contamination sur le déphasage

Pour étudier l'influence de la tension appliquée et la quantité de la couche polluante sur le déphasage du courant de fuite-tension, nous présentons de résultats des essais par la figure (III.4).

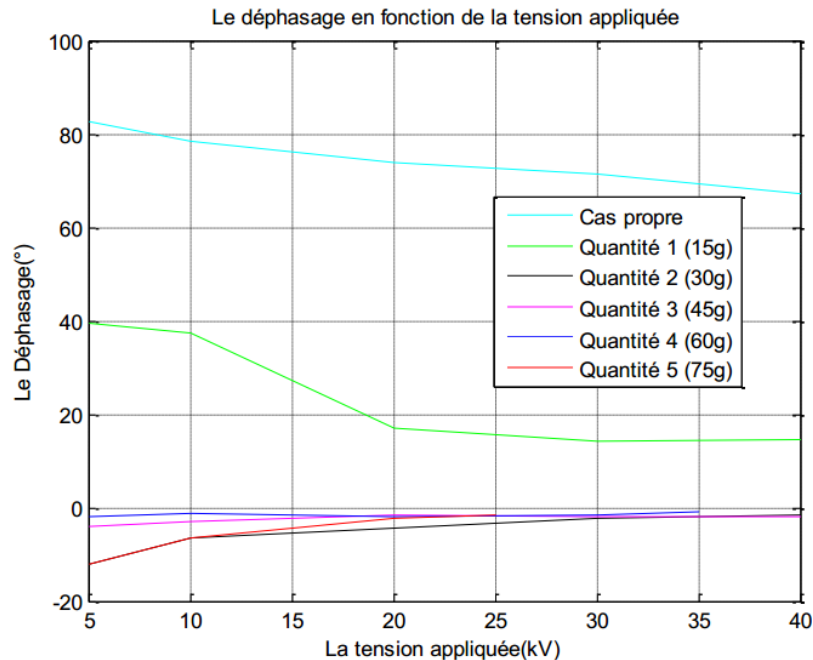


Fig. III.4. Variation de déphasage du courant de fuite-tension

D'après la figure (III.4) nous remarquons que la valeur du déphasage courant-tension diminue avec l'augmentation de la quantité de la couche polluante, il est minimal pour la grande valeur de la quantité de la couche polluante.

Nous remarquons aussi que le déphasage est pratiquement le même pour une surface propre quelle que soit la tension appliquée dont la valeur du déphasage est comprise entre 70° et 81° , cela indique que le comportement de l'isolateur dans ce cas est pratiquement capacitif.

Le comportement de l'isolateur est davantage capacitif en diminuant la quantité de la couche polluante, l'impédance dans ce cas devient de plus en plus importante, donc le courant de fuite aura un comportement capacitive-résistif pour les grandes valeurs de la quantité de la couche polluante.

Lorsque nous augmentons la quantité de la couche de contamination, l'apparition des décharges électriques est accentuée et le déphasage diminue à son tour et devient négatif pour atteindre un minimum de -15° , durant le passage au régime permanent, le déphasage augmente légèrement pour se situer entre 0° et -1° , le déphasage négatif dans ce cas n'est pas dû à un régime inductif, mais à l'interférence des équipements proche comme le transformateur d'essai.

III.2.5. Formes d'onde du courant de fuite et de la tension appliquée

III.2.5.1. Effet de la variation du niveau de la tension appliqué

Dans cette partie nous avons étudié l'influence de la variation de la tension sur les formes d'onde du courant de fuite pour une quantité égale de 15g de la couche polluante. Les résultats obtenus à partir des essais sont donnés par la figure (III.5).

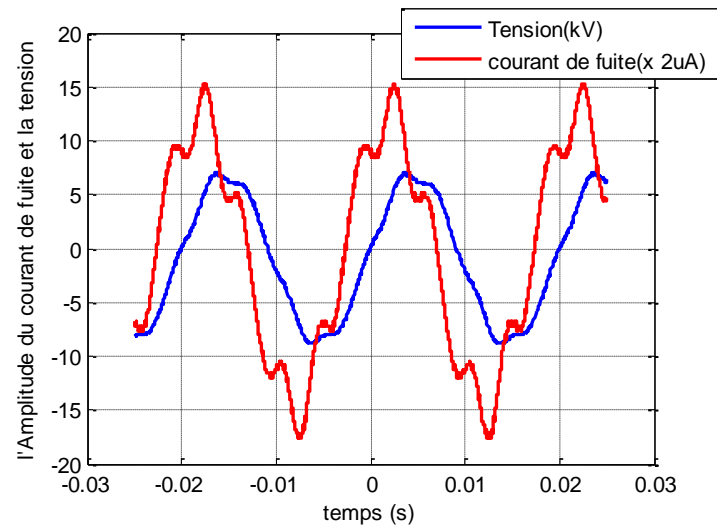


Fig.III.5.a

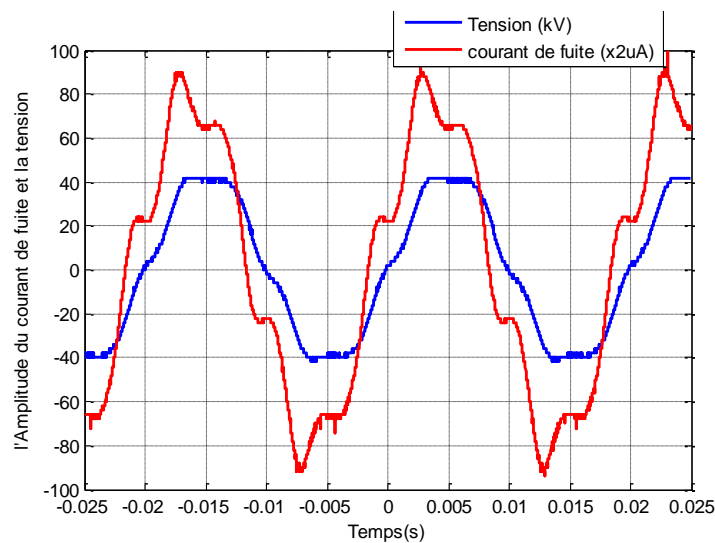


Fig.III.5.b

Fig. III.5 Formes d'onde du courant de fuite et de la tension appliquée pour deux niveaux de tension 5kV (Fig.III.5.a) et 30 kV (Fig.III.5.b)

Nous remarquons bien que les déformations de la forme d'onde du courant de fuite sont d'autant plus importantes quand on augmente le niveau de la tension appliquée.

III.2.5.2. Effet de la quantité de la couche de contamination

Dans cette partie nous avons étudié l'influence de la quantité de la couche polluante sur les formes d'onde du courant de fuite pour une tension de 5kV. Les résultats des essais obtenus sont donnés par la figure(III.6).

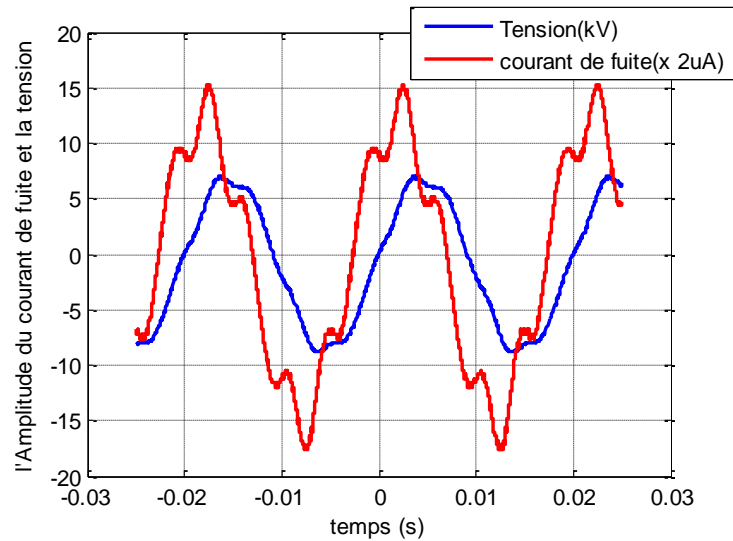


Fig. III.6.a

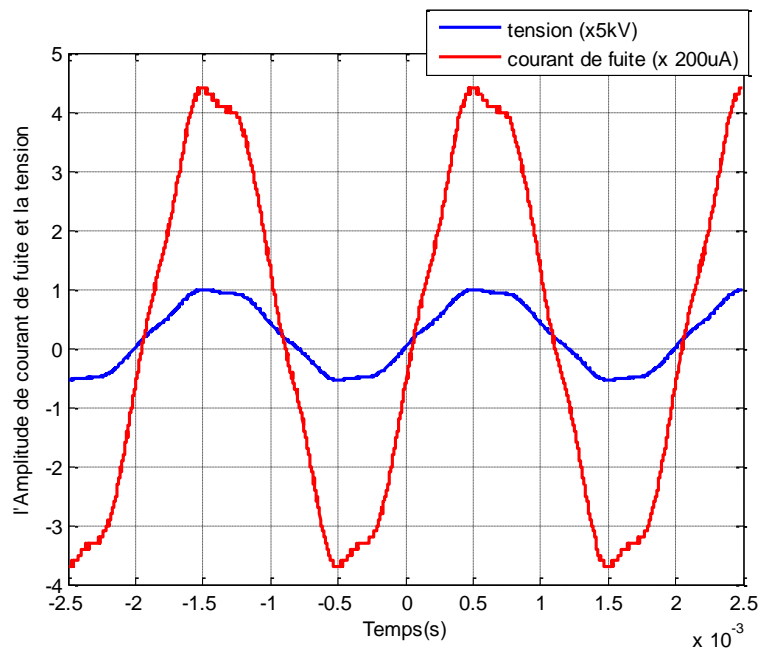


Fig.III.6.b

Fig. III.6 Formes d'onde du courant de fuite et de la tension appliquée pour deux quantités de la couche polluante 15g (Fig.III.6.a) et 60g (Fig.III.6.b)

Nous remarquons que les déformations de la forme d'onde du courant de fuite sont plus importantes quand l'épaisseur de la couche de contamination est faible, et plus nous augmentons la quantité de la couche de contamination plus nous obtenons moins de déformations. Ceci nous amène à dire que la déformation du courant de fuite varie inversement avec la quantité de la couche polluante.

III.3. Analyse fréquentielle du courant de fuite

L'allure temporelle des signaux est souvent difficile à interpréter ce qui nous amène à utiliser la Transformée de Fourier Rapide (FFT) pour avoir une représentation dans le domaine fréquentiel plus intéressante et plus riche en informations sur l'évolution du courant de fuite [16]. Le but de pouvoir identifier des signatures significatives indiquant une dégradation importante de la tenue diélectrique des isolateurs [17].

III.3.1. Représentation spectrale du courant de fuite

La FFT nous permet de tracer les spectres d'amplitude du courant de fuite. Notre étude se limite aux harmoniques les plus significatifs (1^{er}, 3^{ème}, 5^{ème} et 7^{ème}).

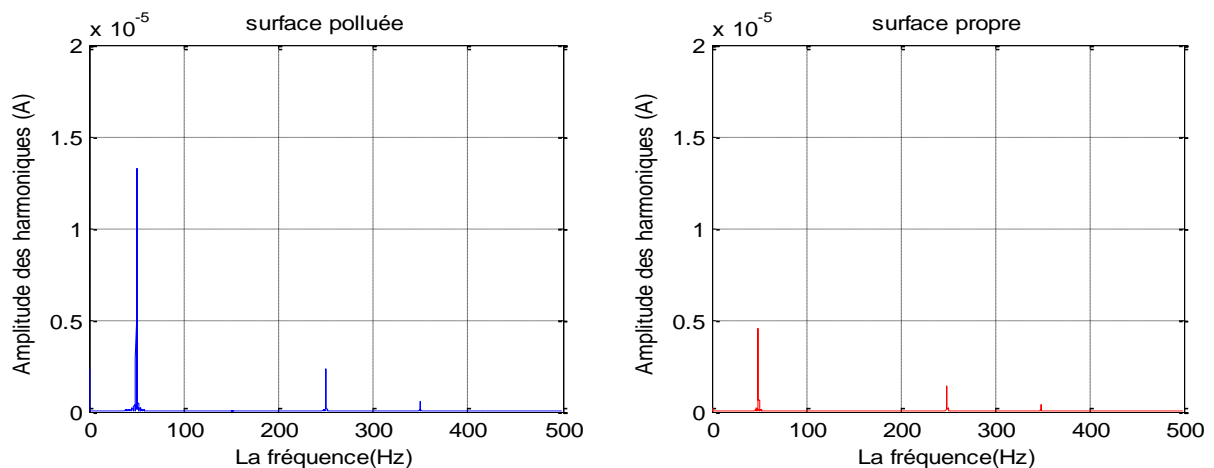
Les résultats ci-dessous représentent les spectres d'amplitude du courant de fuite obtenus par Matlab pour différentes valeurs de la tension appliquée (5 kV, 10 kV, 20kV,30kV et 40kV) en fonction des quantités de la couche polluante (15g, 30g,45g, 60g et 75g) à gauche en comparaison avec le cas propre à droite.

III.3.1.1 Etude de l'effet de la variation du niveau de la tension appliqué

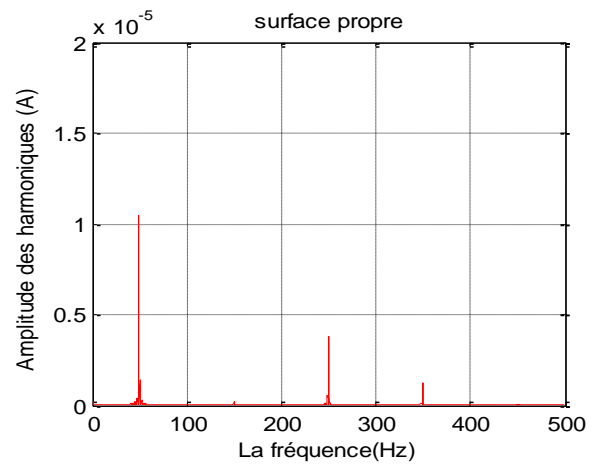
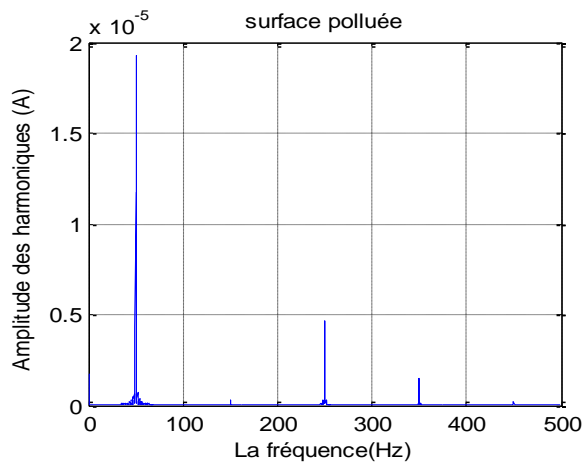
Nous consacrons cette partie à l'étude de l'influence du niveau de la tension appliquée pour une quantité de pollution fixe, sur le spectre d'amplitude du courant de fuite.

III.3.1.1.1. Cas d'une faible quantité de contamination

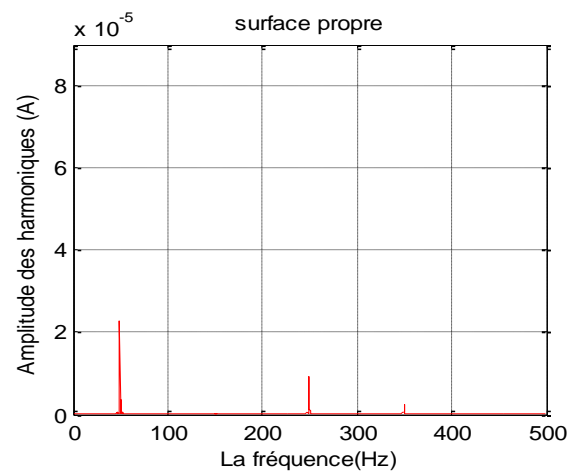
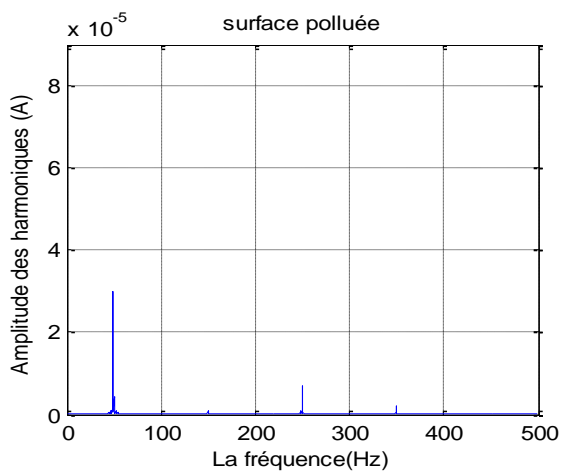
- Quantité 1 (15 g) :



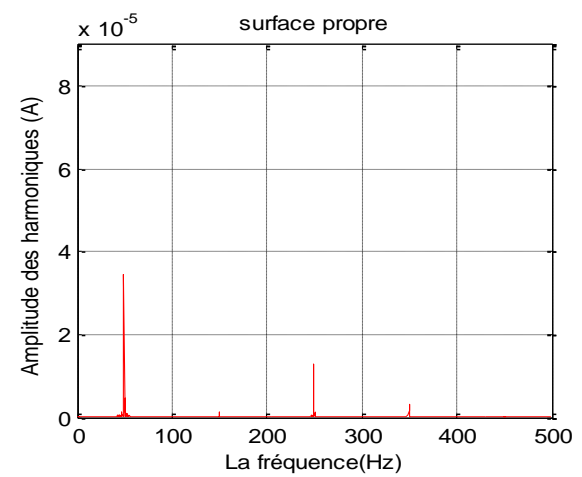
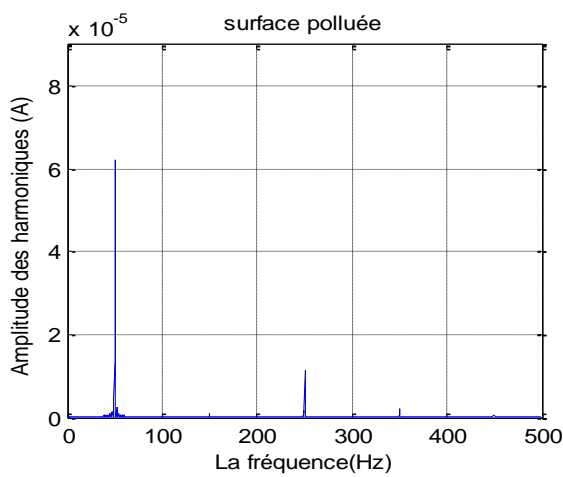
(a)



(b)



(c)



(d)

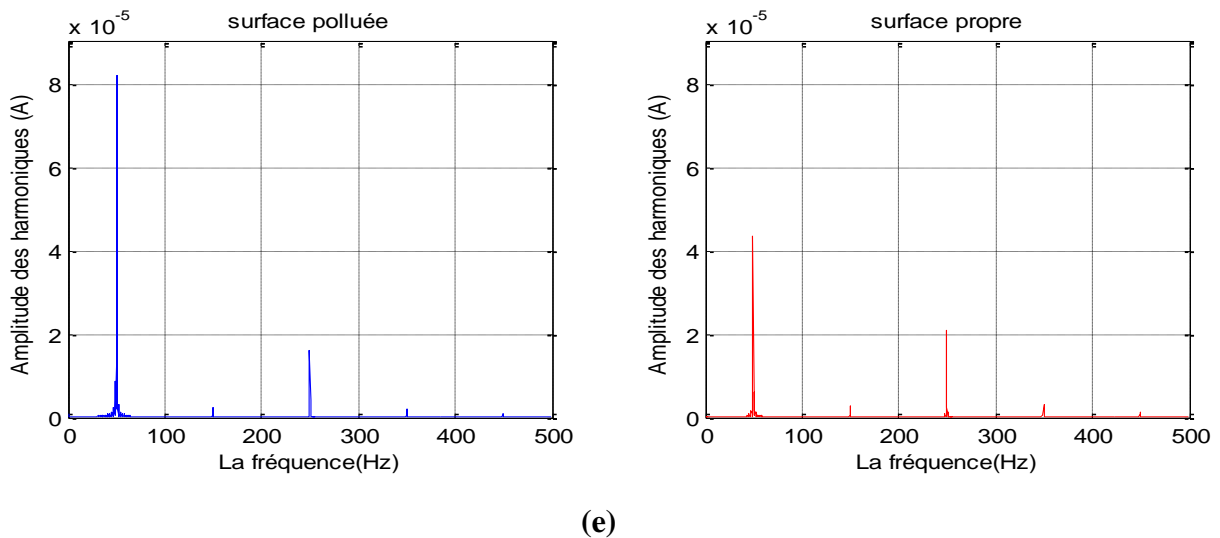


Fig. III.7 FFT du courant de fuite pour la 1^{ère} quantité ($m=15g$) pour les niveaux de tension de : (a) 5kV, (b) 10kV, (c) 20kV, (d) 30kV et (e) 40kV

- **Discussion des résultats**

Ces figures représentent la variation du spectre d'amplitude du courant de fuite dans les cas pollués (à gauche) et les cas propres (à droite) en fonction de la tension appliquée (Figure (III.7)).

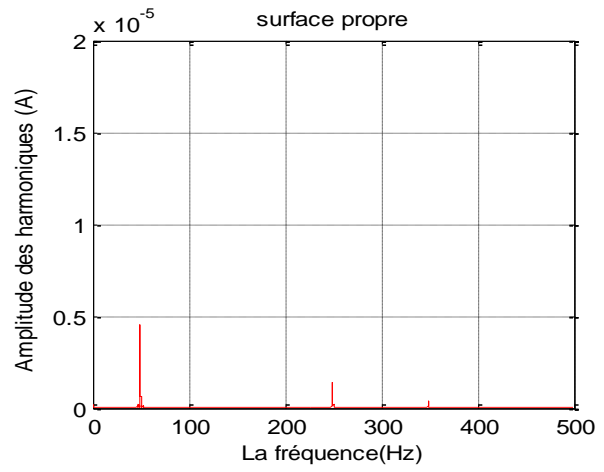
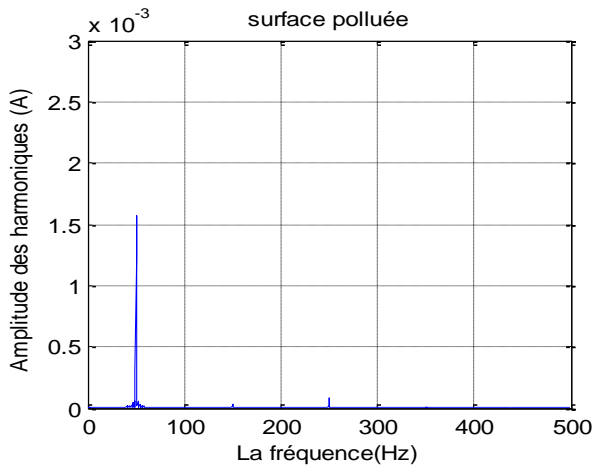
L'analyse fréquentielle montre clairement la dominance de l'harmonique fondamentale à 50 Hz dans les deux cas de configurations propre ou pollué. Dans certaines représentations, une composante apparaît à 0 Hz ce qui montre que dans ces cas-là la valeur moyenne du courant de fuite n'est pas nulle. Cela est dû simplement à un décalage vertical du signal pris par l'oscilloscope.

Il est remarquable de noter que seuls les harmoniques n°1 et n°5 apparaissent aux faibles valeurs de la tension appliquée. Les harmoniques n°3 et n°7 n'apparaissent qu'aux tensions élevées mais avec une amplitude trop faible cela s'explique par la déformation des ondes de courant de fuite constaté précédemment par l'analyse temporelle. L'harmonique n°3 commence à apparaître au moment où des arcs partiels violets apparaissent de façon intermittente à l'extrémité des électrodes (Fig.III.2.a).

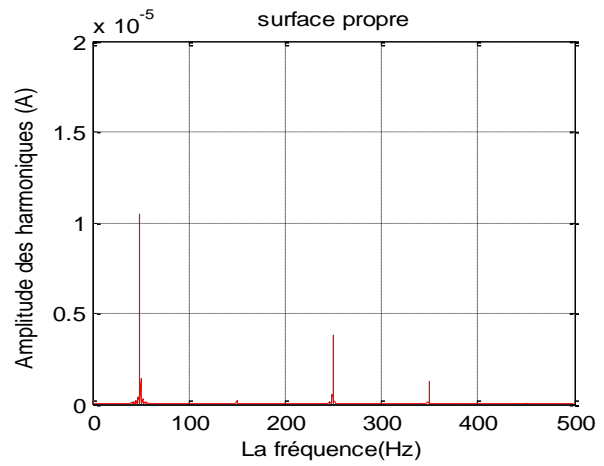
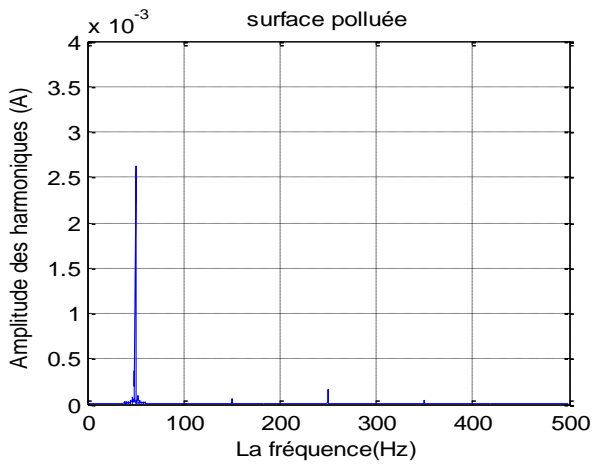
En comparant les cas pollués pour cette première quantité (faible), avec les cas propres, nous pouvons facilement voir que l'amplitude des harmoniques fondamentaux des cas pollués est égale à presque deux fois l'amplitude des harmoniques fondamentaux des cas propres. Les amplitudes des harmonique n°5 et n°7 sont presque les mêmes pour les deux cas de figure et ne changent pas de valeurs quelles que soient les valeurs de la tension appliquée. Cela veut dire que la forme du signal du courant de fuite n'est pas trop distordue.

III.3.1.1.1.2. Cas d'une quantité de contamination importante

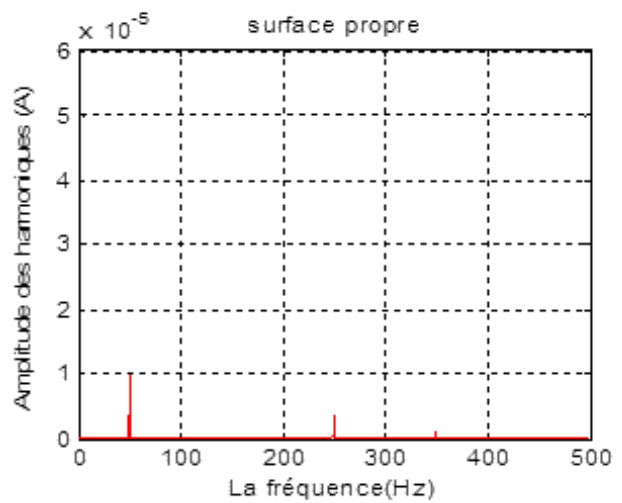
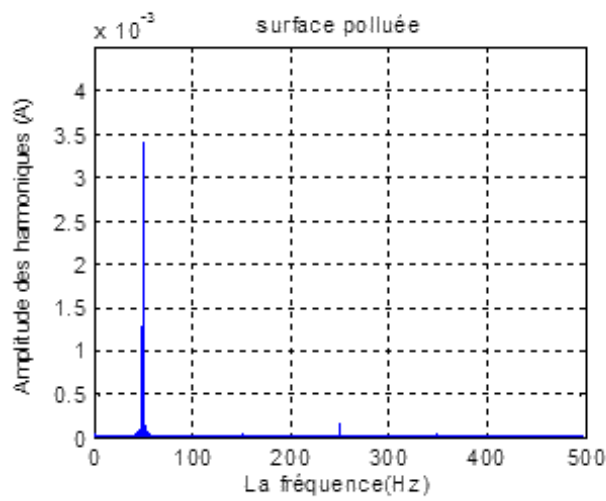
- Quantité 5 (75 g)



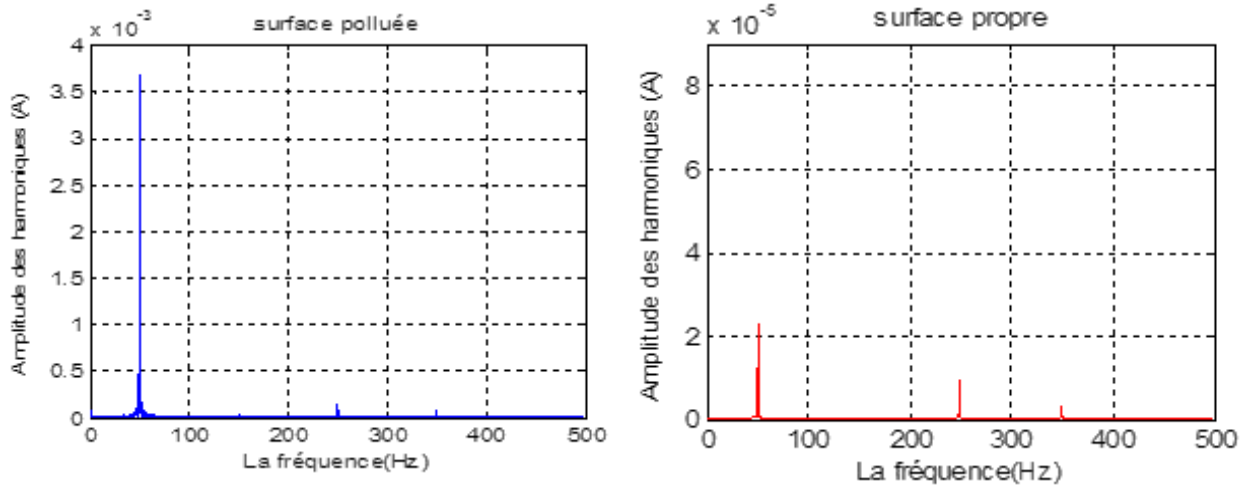
(a)



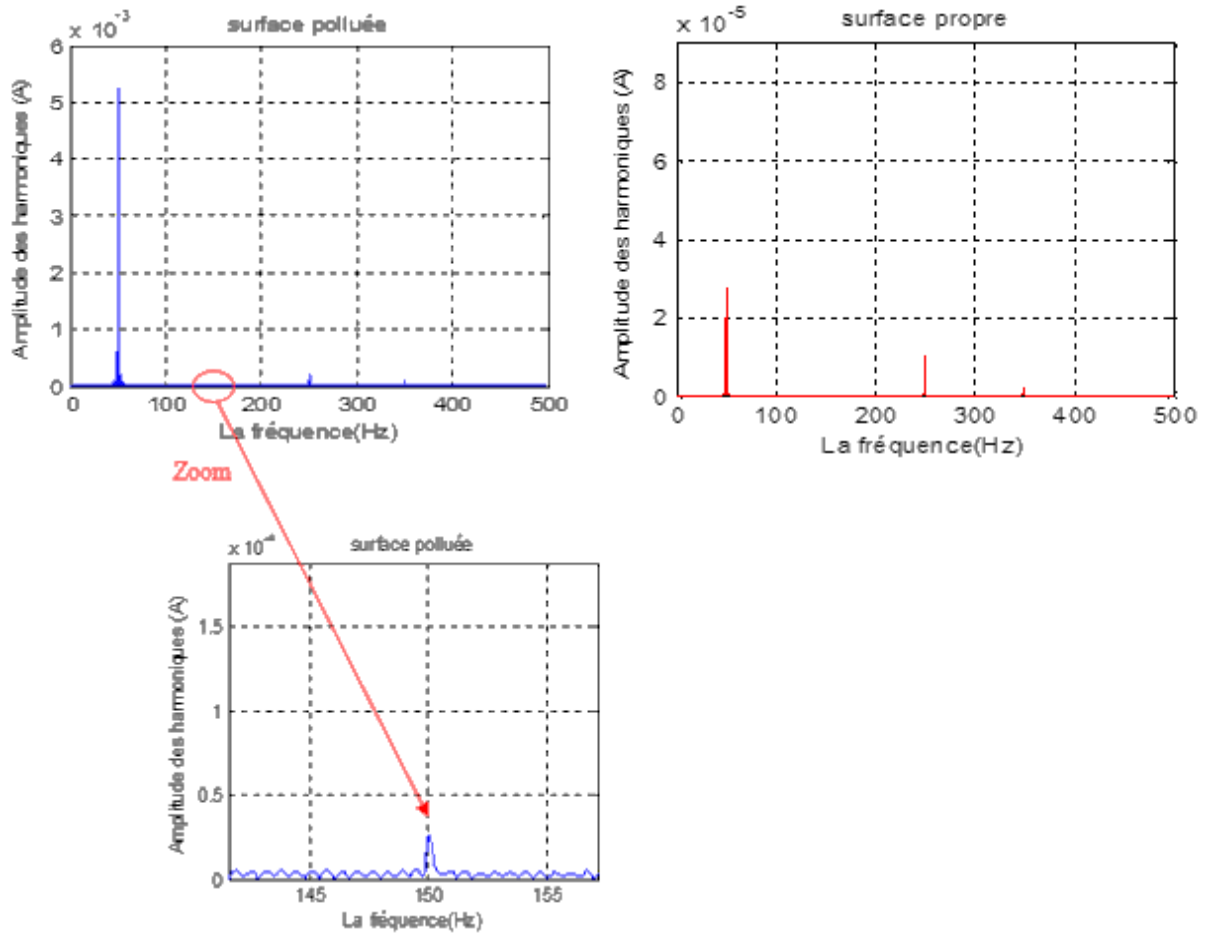
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. III.8 FFT du courant de fuite pour la 5^{ème} quantité (m=75g) pour les niveaux de tension de : (a) 5kV, (b) 10kV, (c) 15kV, (d) 20kV et (e) 25kV

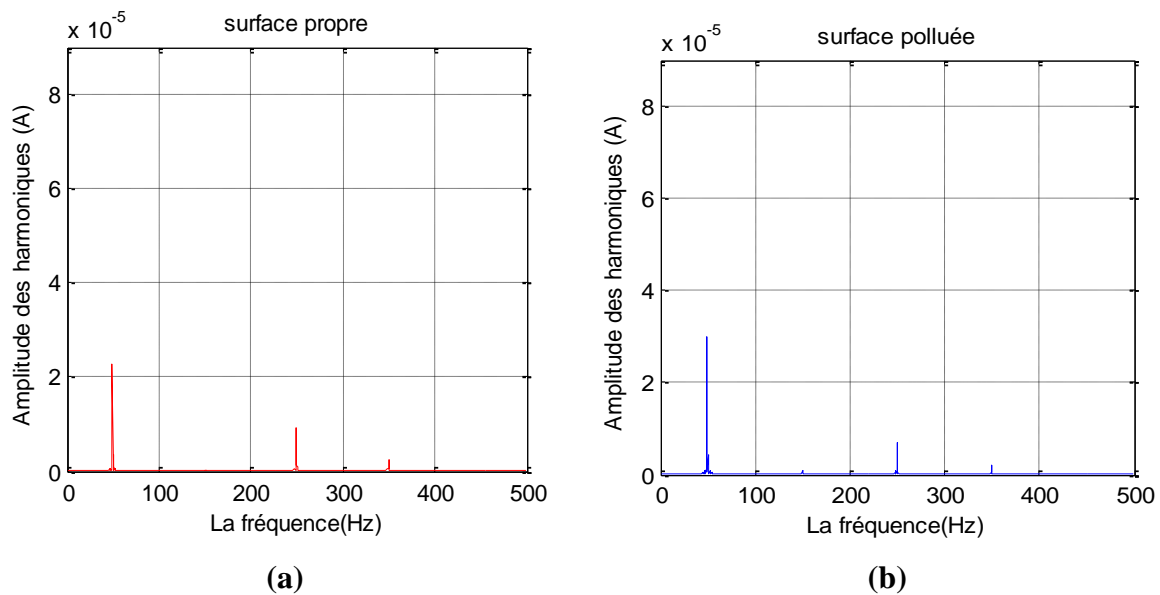
- **Discussion des résultats**

L'analyse fréquentielle (Figure (III.8)) montre clairement la dominance du fondamental à 50 Hz pour les deux cas propre ou pollué. Pour cette quantité, nous remarquons que l'amplitude de l'harmonique n°5 et supérieure aux autres harmoniques soit l'harmonique n°3 ou n°7.

En comparant les cas pollués avec les cas propres, nous pouvons facilement constater que l'amplitude des harmoniques (Figure(III.8)) est supérieure à 100 fois l'amplitude des harmoniques des cas propres. Pour le cas propre, l'amplitude du fondamental est égale à 2 fois l'amplitude de l'harmonique n°5 quant au cas pollué, l'amplitude de l'harmonique fondamental est 10 fois supérieur à l'amplitude de l'harmonique n°5. L'apparition de l'harmonique n°7 survient aux grandes valeurs de la tension appliquée. Nous avons constaté que l'apparition de l'harmonique n°3 ne s'effectue presque jamais dans le cas propre, donc nous pouvons considérer l'apparition de l'harmonique n°3 comme indice de contamination de la surface de l'isolateur.

III.3.1.2 Etude de l'effet de la variation de la quantité de sable

Dans cette partie, nous avons fixé le niveau de tension à 20 kV et faisons varier la quantité de contamination pour voir son effet sur le spectre d'amplitude du courant de fuite sur la figure (III.9).



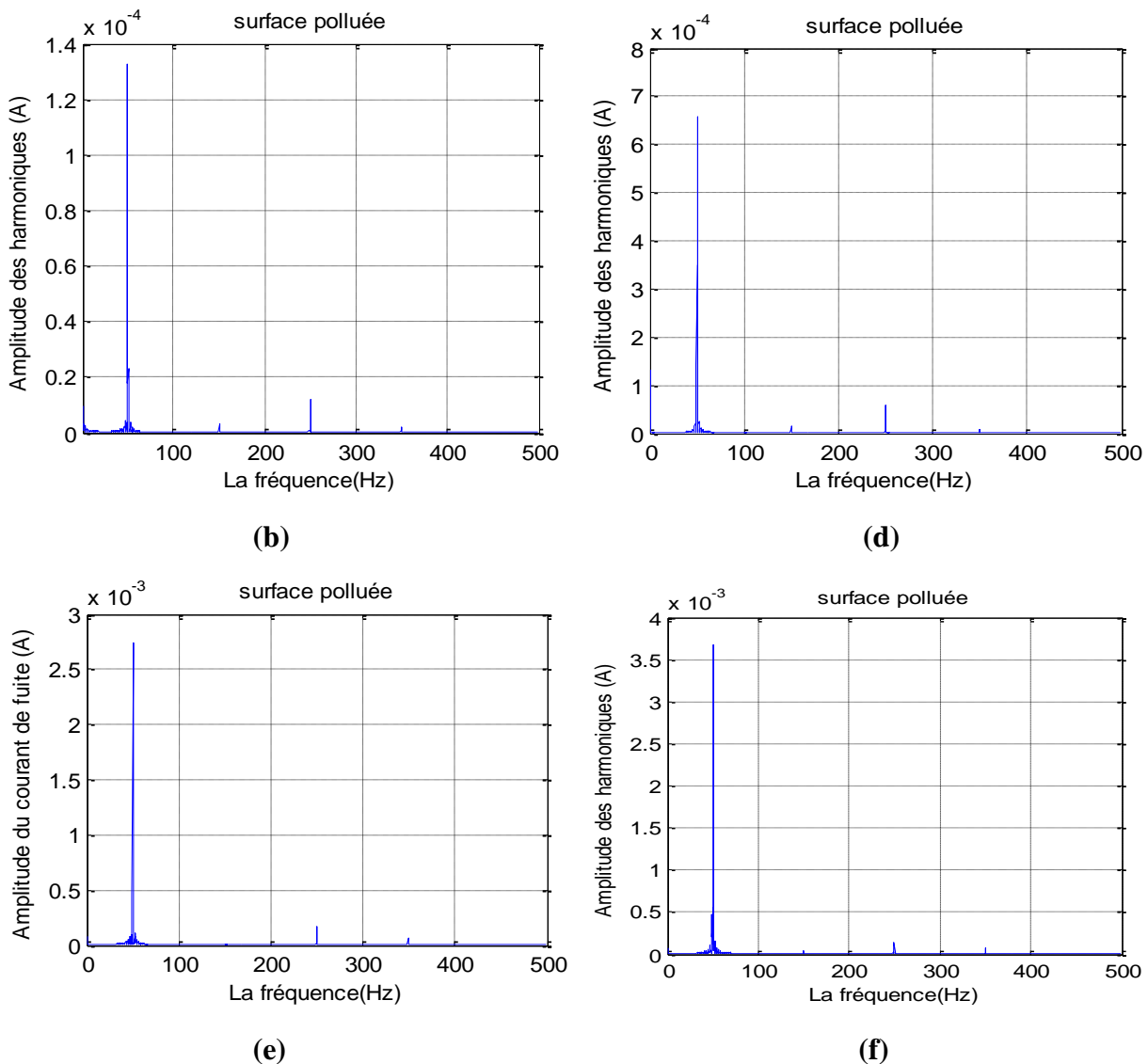


Fig.III.9 FFT du courant de fuite pour un niveau de tension de 20kV et pour différentes quantités de contamination : (a) propre (b) 15g, (c) 30g, (d) 45g (e) 60g et (f) 75g

- **Discussion des résultats**

L'évolution de la quantité de sable qui contamine la surface de l'isolateur influe fortement sur l'amplitude des harmoniques ($n^{\circ}1$, $n^{\circ}3$, $n^{\circ}5$ et $n^{\circ}7$) comme c'est montré aux figures ci- dessus (Figure(III.9)).

D'après les résultats obtenus, nous apercevons que l'amplitude des harmoniques augmente proportionnellement avec l'accumulation de la quantité de pollution en raison de l'augmentation de la valeur efficace du courant de fuite. Cet accroissement devient plus intense aux tensions élevées. Cella est causée par l'apparition rapide des décharges électriques partielles sur la surface de l'isolateur.

Dans ce cas-là, nous pouvons confirmer que l'harmonique $n^{\circ}3$ peut être considérable comme indice de contamination de la surface de l'isolateur car il n'apparait qu'aux cas pollués.

III.3.2. Taux de distorsion d'harmonique (THD) du courant de fuite

III.3.2.1 Influence de la tension appliquée et de la quantité de la couche polluante

Dans cette partie, nous avons étudié l'influence du niveau de la tension appliquée et de la quantité de la couche polluante sur le taux de distorsion des harmoniques. Les résultats des essais sont donnés à la figure (III.10).

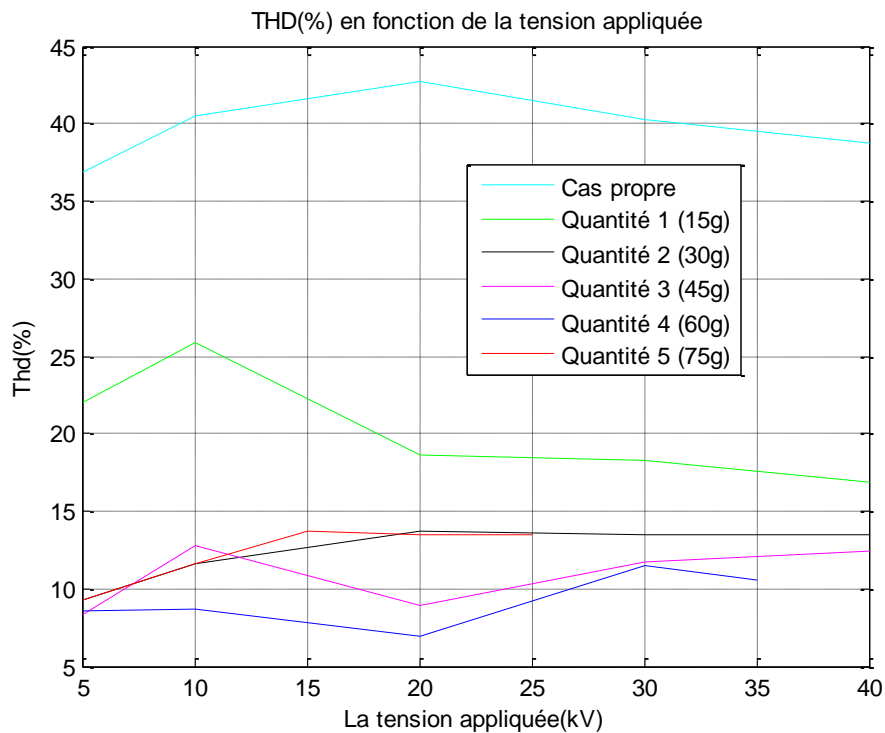


Fig. III.10 Variation du taux de distorsion (%) en fonction de la tension pour différentes quantités de sable

D'après les deux figures (III.23), l'évolution du taux de distorsion des harmoniques en fonction de la tension appliquée à la même allure pour les différentes quantités. Nous remarquons que pour les faibles valeurs de la tension (<10kV), le taux de distorsion d'harmonique augmente légèrement avec l'augmentation de la tension à cause de l'augmentation rapide de l'amplitude des harmoniques $n^{\circ}3$, $n^{\circ}5$ et $n^{\circ}7$ par rapport à l'augmentation de l'harmonique fondamental.

Pour les grandes valeurs de la tension (> 20kV), nous remarquons la diminution du taux de distorsion des harmoniques, cela est dû à l'augmentation rapide de l'amplitude du fondamental par rapport à l'augmentation des autres harmoniques ($3^{\text{ème}}$, $5^{\text{ème}}$ et $7^{\text{ème}}$).

Le taux de distorsion est maximal pour une surface propre et minimal pour la grande valeur de la quantité de la couche de contamination. Ce dernier cas est dû à la présence dominante de l'harmonique fondamental suivie du $3^{\text{ème}}$ et $5^{\text{ème}}$ harmoniques. L'onde du courant de fuite est complètement déformée dans ce 1^{er} cas.

III.3.3. Etude du rapport des deux harmoniques n°3 et n°5 (Kh (5/3))

Selon les résultats obtenus par l'analyse harmonique du courant de fuite, il est intéressant de noter, sans tenir compte du fondamental, que seuls les harmoniques impairs d'ordre 3 et 5 (150 Hz et 450 Hz) présentent une amplitude significative. Cela nous a conduit à limiter notre étude à ces deux composantes donc sur le coefficient $Kh(5/3)$.

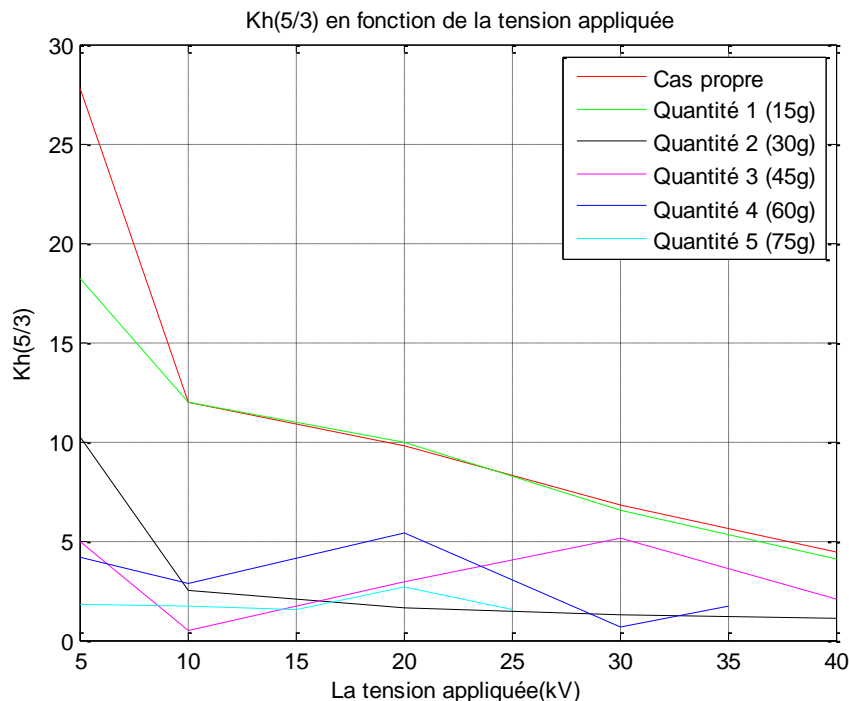


Fig. III.11 Variation du rapport $Kh(5/3)$ en fonction de la tension appliquée pour différentes quantités de sable

- **Discussion des résultats**

La figure donnée ci-dessus présente la variation du coefficient $Kh(5/3)$ en fonction de la tension appliquée des cas propres et pour différentes quantités de la couche polluante (Figure(III.11)).

L'analyse harmonique a montré la dominance de l'harmonique n°5 suivi par l'harmonique n°3. La négligence de l'harmonique n°3 pour le cas propre et la 1^{ère} quantité explique les énormes valeurs de Kh aux tensions faibles. Au-delà de 30kV, ce coefficient chute de 5 fois par rapport à sa valeur initiale. Cela correspond en effet à l'apparition des arcs partiels intermittents qui modifient grandement la forme d'onde du courant couplée à l'augmentation de l'harmoniques n°3.

Ce ratio varie entre 2 et 10 pour les quantités supérieures à 30 g avec une diminution de sa valeur quand la tension augmente suite à l'accroissement de l'harmonique n°3. L'accroissement de la sévérité de pollution engendre l'atténuation de ce rapport $Kh(5/3)$.

Certes ce coefficient est intéressant pour le diagnostic des isolateurs mais à cause de la confusion des courbes aux tensions élevées et dans les cas des quantités importantes il devient un mauvais indicateur de l'état de l'isolateur.

III.4 Conclusion

Une analyse temporelle et une autre fréquentielle ont été présentées dans ce chapitre afin d'identifier les indices significatifs qui vont nous permettre de détecter le début de la dégradation de la surface de l'isolateur.

La tension de contournement diminue avec l'augmentation de la quantité de la couche polluante. L'étude temporelle du courant de fuite a montré que la déformation de la forme d'onde du courant de fuite dépend de la tension appliquée, la couche de contamination et la conductivité.

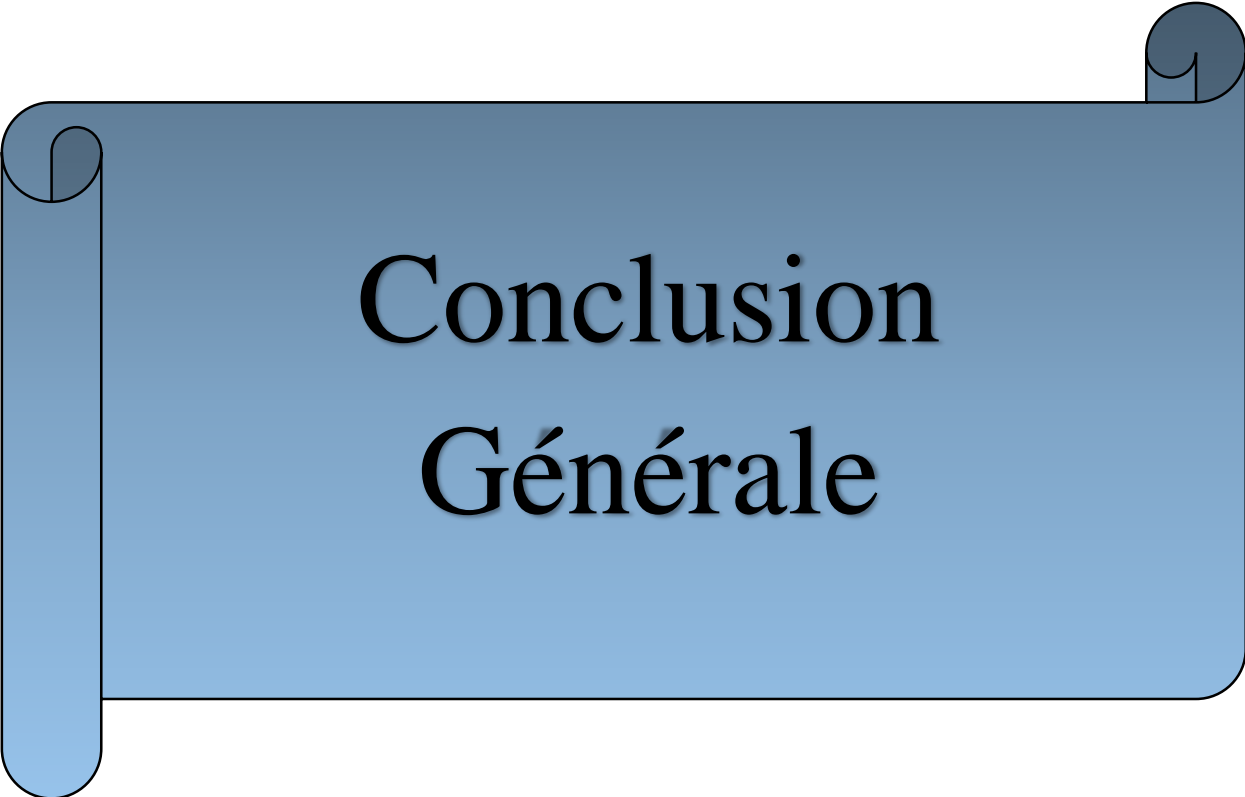
Cette étude a prouvé que la valeur efficace du courant de fuite aide aussi à la prédiction sur l'état de surface de l'isolateur car elle augmente avec l'augmentation de la quantité, mais aussi avec la tension appliquée et/ou la conductivité de la couche polluante à cause de l'impédance du milieu qui diminue.

La diminution du déphasage indique le début d'une formation de couche polluante. Un déphasage résistif montre la sévérité de cette pollution.

L'étude de l'évolution des harmoniques des spectres d'amplitudes du courant de fuite a montré que les harmoniques n°3 et n°5 sont les plus significatifs lorsque la forme d'onde du courant de fuite se déforme. Le rapport K_h (5/3) est intéressant pour surveiller l'état des isolateurs mais à cause de la confusion des courbes aux tensions élevées et aux quantités importantes de la couche polluante aussi, il est considéré comme un mauvais indicateur de l'état de l'isolateur.

La présence de décharges est traduite par l'augmentation remarquée de l'harmonique n°3 ainsi qu'une apparition des harmoniques n°7 et n°9. L'accumulation de la contamination se traduit aussi par une diminution progressive du taux de distorsion.

Donc cette partie de notre travail est importante pour estimer la gravité de la contamination pour assurer ainsi un bon fonctionnement de l'isolateur.



**Conclusion
Générale**

La pollution des isolateurs est un vrai problème qui diminue la fiabilité des réseaux électriques et affecte le transport d'énergie électrique à travers les lignes électriques de haute tension. La lutte contre la contamination de ces isolateurs constitue un vrai défi dans les différentes régions de l'Algérie. Alors, il est indispensable de connaître le type de pollution des sites concernés pour bien identifier les paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation.

Dans notre travail, nous nous sommes concentrées sur la pollution désertique de la région Algérienne Bousaâda. Une des approches suivie pour le diagnostic des isolateurs, consiste à étudier le comportement du courant de fuite qui circule sur la surface des isolateurs en simulant convenablement les conditions naturelles d'exploitation.

L'étude du comportement du courant de fuite fournit plusieurs renseignements sur l'état de l'isolateur sous pollution au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique. En effet, nous nous sommes penchées sur deux volets, l'un est fondé sur l'analyse temporelle du courant de fuite, sa valeur efficace et son déphasage par rapport à la tension appliquée. L'autre volet a été consacré à l'analyse fréquentielle du courant de fuite aussi, son taux de distorsion et le rapport entre l'amplitude de l'harmonique n°5 sur l'harmonique n°3.

Les essais réalisés au laboratoire ont montré que la tension de contournement varie inversement avec l'accumulation de la quantité de la couche polluante.

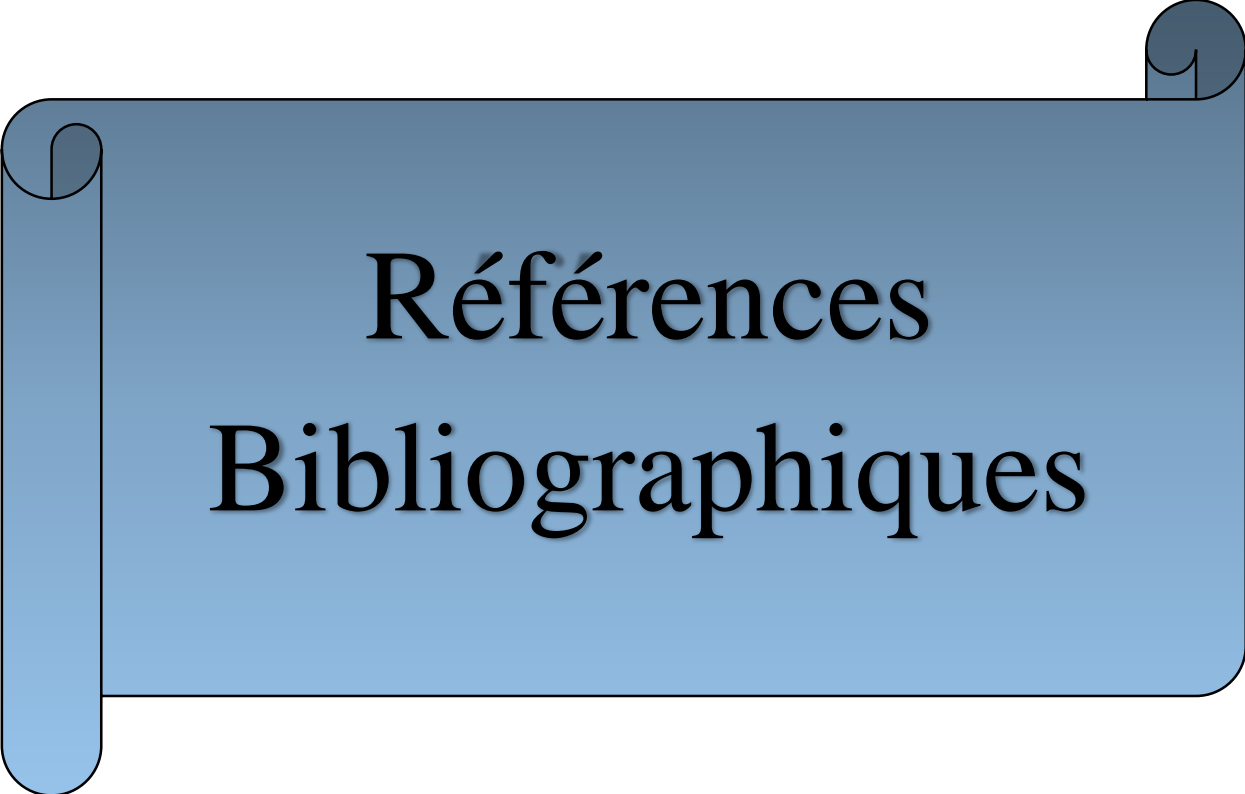
Nous avons constaté que l'onde du courant est complètement déformée avec la présence dominante de l'harmonique n°1 suivie par le 3^{ème} et 5^{ème} harmonique. Cette déformation peut être expliquée par l'effet capacitif de la surface de l'isolateur qui a un effet sur la forme sinusoïdale du courant de fuite.

La prédiction de l'état de la surface de l'isolateur nécessite l'étude de plusieurs paramètres. Parmi ces paramètres, la valeur efficace du courant de fuite qui augmente en augmentant la tension appliquée, la quantité ou la conductivité de la couche polluante à cause de l'impédance du milieu qui diminue.

Nos résultats confirment que le déphasage présente un facteur indispensable pour le diagnostic des isolateurs. Il est intéressant de noter que le décroissement du déphasage indique une accumulation des dépôts polluants sur la surface des isolateurs. Nous avons pu conclure qu'un déphasage résistif reflète une sévérité de pollution.

L'étude du spectre de l'amplitude du courant de fuite a mis en évidence le fait que l'harmoniques n°3 est la plus significative lorsque la forme d'onde du courant de fuite est déformée. Pour une surface propre, le taux de distorsion est minimal dans le cas de la plus grande valeur de la quantité de la couche de contamination. Un autre paramètre qui peut nous informer sur l'état de la surface de l'isolateur est le rapport Kh (5/3), qui s'atténue avec l'accroissement de la sévérité de pollution ou avec l'augmentation de la tension appliquée.

Enfin, nous souhaitons que ce modeste travail puisse être d'un apport bénéfique pour d'autres projets afin de mieux maîtriser le problème des isolateurs pollués.



Références Bibliographiques

- [1]. A.Oloulade . "*Mémoire d'ingénieur de conception*".2010
- [2]. M.Teguar ."*Pollution des Isolateurs de Haute Tension*". Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Avril 2012.
- [3]. D,Bskulic. "*Notes de cours de PHYS 708 Méthodes et outils numériques de traitement du signal* ",10 décembre 2010.
- [4]. B.Torresani. "*Méthodes mathématiques pour le traitement du signal* ", Université de Provence. Thèse Master Mathématiques et Applications, 2009-2010.
- [5]. S. POUJOULI, "*Valeur moyenne et efficace*".Analyse des signaux version 1.0, <http://poujouly.club.fr>.
- [6]. M.Sanchez. "*calcul des valeurs moyenne et efficaces sur les convertisseurs d'énergie électronique*".
- [7]. D.Shmilovitz. "*On the definition of total harmonic distortion and its effect on measurement interpretation*". IEEE Transactions on power delivery, VOL.20, N°1, Janvier 2005.
- [8]. Electromagnetic Compatibility (EMC) & mdash , Part 4, Section 7: General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply System and Equipment and Equipment Connected Thereto, 1991, IEC
- [9]. B.Moula, "*Diagnostic des isolateurs hautes tensions sous tension alternative 50Hz*", Thèse de Doctorat en Sciences en Electrotechnique, ENP. 2013-2014.
- [10]. A.Vincent-Randonnier. "*l'échantillonnage*".
- [11]. G. Baudoin et J-F.Berchier, "*Eléments de traitement du signal*", Ecole Supérieure d'Ingénieur en Electrotechnique et Electronique, Septembre 1998.
- [12]. ASDS, "*Conversion des signaux analogiques en numérique*", http://www.lycee champollion.fr/IMG/PDF/ads_can.pdf.
- [13]. F.Cottet. "*AIDE MEMOIRE Traitement du signal*".Dunod,Paris,2000
- [14]. M.Bellanger, "*Traitement numérique du signal – Théorie et pratique*".Dunod, Paris, 1998.
- [15]. N. Benmessaoud et H.Benbrahim "*Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur pollué sous tension sous tension alternative 50Hz*". Mémoire du projet de Fin d'Etudes, Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, ENP. Juin 2010.
- [16]. F.Meghnefi. "*Étude temporelle et fréquentielle du courant de fuite des isolateurs de poste recouverts de glace en vue du développement d'un système de surveillance et de prédiction en temps réel du contournement électrique*". Août 2007.
- [17]. T.Suda ."*Study on the frequency characteristics of leakage current waveforms of artificially polluted 12t suspension insulators by the clean fog method*".IEE 11th International Symposium on High-Voltage Engineering.23-27 Août 1999.