

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



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Réseaux électriques

Présenté par

Beddi Ahmed et Chekima El Bachir

Thème

**Etude Temporelle Et Fréquentielle Du Courant
De Fuite D'un Isolateur De Haute Tension**

Soutenu le 27/05/2017. Devant le jury composé de :

Mr. Khechekhouche Ali

Maitre de conférences Président

Mr. Guia Talal

Maitre de conférences Rapporteur

Mr. Merazga Azzeddine

Maitre de conférences Examineur

Année Universitaire 2016/2017

Remerciement :

Nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir accordé la volonté et le courage de mener à terme ce travail.

Nous tenons à remercier Mr GUIA Talal , pour le temps qu'il nous 'a consacré, ses conseils avisés, ses remarques pertinentes et très précieuses.

Nous aimerions aussi remercier nos familles, ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Dédicace :

A mes chers parents et toute ma famille

Ahmed

A mes parents à mes frères et mes sœurs

El Bachir

ملخص:

في هذا العمل، نقترح دراسة ظاهرة تلوث العوازل في خطوط ذات التوتر العالي (50 هرتز الجهد AC). لهذا، أجرينا سلسلة من الاختبارات على عازل حقيقي في مختبر الجهد العالي لجامعة حمّة الأخضر الوادي، و تم تسجيل بيانات اشارة التيار المتسرب والجهد المطبق، و بعد ذلك تم معالجة تلك الإشارات، لاستخراج معلومات عن حالة سطح العازل. لهذا استخدمنا التحليل للاشارة بطريقة FFT في Matlab. بعد توصيف حالة سطح عازل، ونحن نقدم النموذج المختبر الذي يحاكي سلوك عازل، بالنسبة للتيار المتسرب، والناقلية المختلفة للطبقات الملوثة. في النهاية، تم إجراء التحليل التوافقي للتيار المتسرب لتحديد التوافقيات التي تميز حالة سطح العازل.

كلمات المفتاحية:

التيار المتسرب-العوازل-التوتر العالي-ماتلاب-تحليل ب-FFT-تحليل التوافقيات-معالجة الإشارة-الناقلية.

Résume :

Dans ce travail, nous proposons d'étudier le phénomène de pollution des isolateurs de ligne haute tension (tension alternative 50 Hz). Pour cela, nous avons effectué une série d'essais sur une chaîne d'isolateur réel, au niveau du Laboratoire de Haute Tension de Université Hamma Lakhdar El-Oued, les données courant de fuite et tension sont enregistrées, afin, d'effectuer un traitement de signal, pour en tirer les informations sur l'état de surface de l'isolateur. Pour cela, nous avons utilisées la méthode de l'FFT dans Matlab. Après avoir, caractériser l'état de surface de l'isolateur, nous proposons un modèle de laboratoire qui simule le comportement de l'isolateur, vis-à-vis du courant de fuite, et cela pour différentes conductivités des couches polluantes. En fin, l'analyse harmonique du courant de fuite seront effectués, pour déterminer les harmoniques caractérisant l'état de surface de l'isolateur.

Mots Clés :

Courant de fuite- isolateur- haute tension- Matlab – FFT analyse- analyse harmonique- traitement de signal - conductivités.

Abstract:

In this work, we propose to study the pollution phenomenon of high voltage line isolators (50 Hz AC voltage). To do this, we performed a series of tests on a real isolator, at the level of the Hamma Lakhdar El-Oued High-Voltage Laboratory, the current leakage and voltage data are recorded, in order to carry out a signal processing, To obtain information on the surface condition of the insulator. For this, we use FFT analysis in MATLAB. After characterizing the surface state of the insulator, we propose a laboratory model that simulates the behavior of the insulator, with respect to the leakage current, for different conductivities of

the polluting layers. Finally, the harmonic analysis of the leakage current will be carried out, to determine the harmonics characterizing the surface state of the insulator.

Key-words:

Leakage current - insulator - high voltage - MATLAB - FFT analysis - harmonic analysis - signal processing – conductivities.

sommaire

Sommaire

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

Chapitre I : Isolateur et phénomène de pollution

Introduction	4
I.1. Isolateurs de haute tension.....	4
I.2. Types des isolateurs.....	4
I.2.1 Isolateurs rigides.....	5
I.2.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne.....	5
I.2.2.1 Isolateur long fut	5
I.2.2.2. Isolateur capot et tige	6
I.2.2.2.1. Profil standard	7
I.2.2.2.2. Profil anti-brouillard (forme A).....	7
I.2.2.2.3. Profil anti-brouillard (forme B).....	8
I.2.2.2.4. Profil plat	9
I.2.2.2.5. Profil sphérique	9
I.2.2.2.6. caractéristiques géométriques	10
I.3. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs	11
I.3.1. Céramique	11
I.3.2. Verre	11
I.3.3. Matériaux synthétiques.....	12
I.4. Pollution des isolateurs	13
I.5. Sources de pollution	13

I.5.1. Pollution naturelle	13
I.5.1.1. Pollution marine	13
I.5.1.2. Pollution désertique	14
I.5.2. Pollution industrielle	14
I.5.3. Pollution mixte	14
I.6. Mesure de la sévérité de la pollution des sites	14
I.7. Comportement des isolateurs sous pollution	16
I.8. Conclusion	17

Chapitre II : État de l'art de l'isolateur de haute tension

II.1. Introduction.....	18
II.2. Effet de la pollution sur l'isolateur HV	18
II.3. Le courant de fuite et l'isolateur de HV.....	20
II.4. Traitement du signal de courant de fuite	22
II.5. Conclusion	24

Chapitre III : Traitement du signal de courant de fuite

III.1. Introduction.....	26
III.2. Historique.....	26
III.3. Notions Fondamentales du traitement de signal.....	27
III.3.1. L'échantillonnage.....	27
III.3.2. L'Analyse Spectrale.....	28

III.2.3. Le taux de distorsion.....	28
III.2.4.Filtrage Numérique.....	28
III.4. Transformé en Ondelettes Continue	30
III.4.1 Définition	30
III.4.2. Exemple De L'ondelette De Morlet (Complexe).....	31
III.5. Conclusion.....	35

Chapitre IV : Étude Et Résultats Expérimentale

IV.1. Introduction	37
IV.2. Dispositif expérimental	37
IV.2.1. Circuit d'essai du laboratoire de Haute tension (Université d'El Oued).....	37
IV.2.1.1. Équipement de la station d'essai	37
IV.2.1.2. Transformateur d'essai	38
IV.2.1.3. Transformateur de réglage	38
IV.2.1.4. Oscilloscope numérique.....	38
IV.2.1.5. Pupitre de commande.....	38
IV.2.1.6. Appareils de mesure et de protection.....	39
IV 2.1.7. Diviseur de tension.....	39
IV 2.1.8. Circuit d'essai à tension alternatif.....	39
IV.3. Mode opératoire.....	40
IV.3.1. Préparation du modèle	42
IV.3.2. Préparation des solutions polluantes.....	42
IV.3.2.1. Les éléments utilisés pour mesurer la résistance	44
IV.3. 3.1.Les conductivités de la pollution en sable.....	45

IV.3.3.2. Les conductivités de la pollution en tuf.....	45
IV.3.3.3. Les conductivités de la pollution en argile.....	46
IV.3.4. Méthode de pulvérisation.....	46
IV.3.5 Application de la couche de pollution	47
IV.4. Correction atmosphérique	47
IV.4.1. Influence de la densité relative de l'air.....	48
IV.5. Procédé d'essais	48
IV.5.1. Mesure de courant de fuit	48
IV.5.2. Forme de courant de fuite et tension applique	49
IV.6. Méthode d'extrait des résultats en Matlab.....	49
IV.7.1. L'effet des conductivités sur le courant de fuit.....	50
IV.7.2. L'effet d'élément pollué sur le courant de fuit.....	54
IV.7.3. L'effet de degré de pollution sur le courant de fuit.....	57
IV.7.4. L'effet de cas de pollution sur le courant de fuit.....	61
VI.8. Conclusion.....	62
Conclusion générale.....	64

Liste des figures

Liste des figures :

Figure I-1 : Isolateur rigide.....	4
Figure I.2 : Isolateur de type long fut	5
Figure I.3 : Isolateur de type capot-tige.....	5
Figure I.4 : Isolateur de type Profil standard.....	6
Figure I.5 : Isolateur capot et tige de profil anti-brouillard (forme A).....	7
Figure I.6 : Isolateur capot et tige de profil anti-brouillard (forme B).....	7
Figure I.7 : un isolateur capot et tige de profil plat.....	8
Figure I.8 : Isolateur capot et tige de profil sphérique.....	8
Figure I.9 : isolateurs en matériaux synthétiques.....	11
Figure I.10. Isolateur résistant de conditions de pollution très sévères.....	11
Figure III.1 Représentation de l'ondelette de Morlet pour $a=2$ et $b=4$	31
Figure III.2 Représentation de l'ondelette de Morlet pour $a=4$ et $b=5$	32
Figure III.3. Boîtes Temps-fréquence des deux ondelettes.....	34
Figure III.4 Pavage temps-fréquence pour la transformée en ondelettes (illustration du fait que le produit de la résolution temporelle par la résolution fréquentielle est constant)	34
Figure IV .1 : Photo du pupitre de commande et oscilloscope numérique du laboratoire de haute tension de l'université d'El-Oued.....	38
Figure IV.2.: Circuit d'essai à fréquence industrielle.....	40
Figure IV.3: : montage réalisé au laboratoire de haute tension.....	40
Figure IV.4 : les sites des lignes aériennes exposées aux différentes sources de pollutions désertiques et leurs échantillons.....	41
Figure IV.5 : opération de nettoyage et séchage d'isolateur.....	42
Figure IV. 6 : Procédé de distribution de polluant dans le capteur.....	43
Figure IV.7 : méthode de mesure de résistance.....	43

Figure IV. 8 : conductimètre pour mesurer les différentes conductivités de pollution utilisées aux essais.....	44
Figure IV. 9 : variation de conductivité du sable en fonction de résistance.....	45
Figure IV. 10 : variation de conductivité du tuf en fonction de résistance.....	45
Figure IV.11 : variation de conductivité de l'argile en fonction de résistance.....	46
Figure IV.12 : Méthode de pulvérisation pour la configuration uniforme.....	47
Figure IV.13 : instrument de mesure pour les conditions atmosphériques (Humidité, température et pression)	47
Figure IV.14 : Forme de courant de fuite et tension applique.....	49
Figure IV.15 : opération N ⁰⁰¹ d'extraire de résultat en Matlab.....	49
Figure IV.16 : opération N ⁰⁰² d'extraire de résultat en Matlab.....	50
Figure IV.17 : variation de courant de fuit en fonction de la conductivité du sable.....	50
Figure IV.18: variation du 3 ^{iem} harmonique(Ih3)de courant de fuit en fonction de la conductivité du sable.....	51
Figure IV.19 : variation du 5 ^{iem} harmonique(Ih5)de courant de fuit en fonction de la conductivité du sable.....	51
Figure IV.20 : variation du 7 ^{iem} harmonique(Ih7) de courant de fuit en fonction de la conductivité du sable.....	52
Figure IV.21: variation d'argument du courant de fuit en fonction de la conductivité du Sable.....	52
Figure IV.22 : variation du THD en fonction de la conductivité du Sable.....	53
Figure IV.23: Mesures des différentes concentrations du sable dans l'eau distillé.....	53
Figure IV.24 : variation de courant de fuit en fonction de la conductivité du tuf.....	54
Figure IV.25: variation du 3 ^{iem} harmonique(Ih3)de courant de fuit en fonction de la conductivité du tuf	54

Figure IV.26: variation du 5 ^{iem} harmonique(Ih5)de courant de fuit en fonction de la conductivité du tuf	55
Figure IV.27: variation du 7 ^{iem} harmonique(Ih7)de courant de fuit en fonction de la conductivité du tuf.....	55
Figure IV.28: variation de l'argument du courant de fuit en fonction de la conductivité du Tuf.....	56
Figure IV.29: variation THD en fonction de la conductivité du Tuf.....	56
Figure IV.30: mesures des différentes concentrations du Tuf dans l'eau distillé.....	57
Figure IV.31: variation de courant de fuit en fonction de la conductivité de l'argile.....	57
Figure IV.32: variation du 3 ^{iem} harmonique(Ih3) de courant de fuit en fonction de la conductivité de l'argile.....	58
Figure IV.33: variation du 5 ^{iem} harmonique(Ih5)de courant de fuit en fonction de la conductivité de l'argile	59
Figure IV.34: variation du 7 ^{iem} harmonique(Ih7)de courant de fuit en fonction de la conductivité de l'argile.....	59
Figure IV.35: variation d'argument du courant de fuit en fonction de la conductivité de L'argile.....	59
Figure IV.36: variation THD en fonction de la conductivité de l'argile.....	60
Figure IV.37 : mesures des différentes concentrations d'argile dans l'eau distillée.....	60
Figure IV.38 : variation de courant de fuit en fonction de cas de pollution.....	61

liste de tableau

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Caractéristiques géométriques des isolateurs à capot et tige (CEI 60305) [9].	10
Tableau I.2 : Classement de degré de pollution selon CEI 815 [9].....	15

Liste des symboles

Liste des symboles :

$(\pi\%)$: le cosinus de l'angle de phase de l'harmonique principale du courant de fuite.

ESDD : Equivalent Salt deposit density.

CEI : Commission d'Electrotechnique Internationale.

THD : Taux distorsion d'harmonique.

CF : courant de fuite.

$\tau_v(\%)$:Taux de distorsion en Tension .

TOC : La transformée en ondelettes continue.

ψ : Ondelette mère .

a : Paramètre d'échelle .

b : Paramètre de translation.

σ_t : Résolution temporelle.

σ_ω : Résolution fréquentielle.

$\hat{\psi}$: Transformée de Fourier de la fonction ondelette mère.

η : Centre des fréquence.

f : Fréquence du réseau.

T : Température.

f_c : Fréquence centrale.

HT : haute tension.

TR : transformateur de réglage.

T.H.T: transformateur haute tension.

DSM : un voltmètre numérique pour mesurer la tension alternative.

DGM : un voltmètre numérique pour mesurer la tension continue.

T_0 : Température ambiante.

P_0 : Pression atmosphérique.

δ : facteur de correction de la densité de l'air.

I_h : courant de l'harmonique.

φ : l'argument du courant de fuite.

Introduction générale

Introduction générale :

Les lignes aériennes et les postes des réseaux de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. En effet par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut parfois survenir. L'humidification des couches polluantes facilite en fait, la circulation d'un courant de fuite sur les surfaces isolantes provoquant des échauffements locaux et par la suite l'assèchement de la couche de pollution. Ainsi, la répartition du potentiel est modifiée d'une façon significative et des arcs partiels peuvent apparaître. Ces derniers peuvent évoluer jusqu'au contournement total de l'isolateur. Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de la ligne haute tension. Ainsi, une des caractéristiques principale d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est utilisé. Des nombreux travaux, aussi bien théorique qu'expérimentaux ont été entrepris dans le domaine de la pollution des isolateurs afin de mieux comprendre le phénomène de contournement et de se prémunir d'outils permettant le suivi de son évolution et d'éviter son apparition. La complexité du phénomène et le grand nombre de paramètres qui le caractérisent tels que la nature du dépôt polluant, la conductivité superficielle et le profil de l'isolateur, rendent la compréhension et la maîtrise du mécanisme de contournement bien difficiles. Les résultats de recherche ont néanmoins permis d'établir des modèles donnant les caractéristiques des décharges évoluant sur les surfaces d'isolateurs et ce jusqu'au contournement. La plupart de ces modèles sont empiriques ou semi empiriques.

Le présent travail comporte en quatre parties et porte sur l'étude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des isolateurs dans les conditions de pollution.

Dans le premier chapitre, nous présentons, l'importance des isolateurs, leur utilité et leurs principaux types, profils et matériaux. Le deuxième chapitre, nous présentons les principaux résultats des recherche récemment publiée par les chercheurs scientifiques, ou les effets de la pollution sur les isolateurs a été étudié, ainsi le traitement du signal du courant de fuite.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté les méthodes numériques qui consiste à analyser en fréquentielle et temporelle le signal du courant de fuite sur la surface d'isolateur en état pollué et propre.

Finalemment notre travail est achevé par une partie expérimentale qui présente l'effet des différents types de pollution désertiques sur une chaîne d'isolateur réel telle que la conductivité superficielle et le courant de fuite.

Chapitre I : Isolateur et phénomène de pollution

I.1. Introduction :

Le rôle des isolateurs est de relier les conducteurs aux supports en assurant leur isolation électrique.

En effet, un bon choix de dimensionnement des isolateurs s'avère indispensable pour assurer la fiabilité et la qualité de l'isolement de haute tension. La pollution de ces isolateurs figure comme un vrai problème néfaste à leur bon fonctionnement. La tension de tenue des isolateurs peut diminuer considérablement à cause des dépôts polluants recouvrant leurs surfaces. Ils peuvent même conduire au contournement des isolateurs dans certains cas critiques.

I.2. Définition d'isolateurs de haute tension:

L'isolateur est utilisé comme son nom l'indique pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions pour empêcher les courts circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution. L'isolateur est un matériau solide, liquide ou gaz qui a une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle.

Les isolateurs des lignes aériennes ont deux fonctions principales. D'une part, ils permettent d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et d'autre part, ils ont un rôle mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dues surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent, etc.

I.3. Types d'isolateurs :

Vu les différentes façons d'utilisations et les différentes conditions de fonctionnement des isolateurs, on en distingue des types différents des isolateurs. La différence entre ces types peut se faire soit par leur fonction (support ou traversée), soit par le matériau isolant utilisé pour la fabrication de ces isolateurs, soit encore par leur profil ou par leur mode de fixation.

I.3.1 Isolateurs rigides :

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés entre eux, ils sont fixés aux pylônes par des ferrures de différentes formes (Figure I.1). Ils sont montés sur pylônes soit d'une façon

verticale, horizontale ou oblique (inclinée). Mais ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 kV [1].

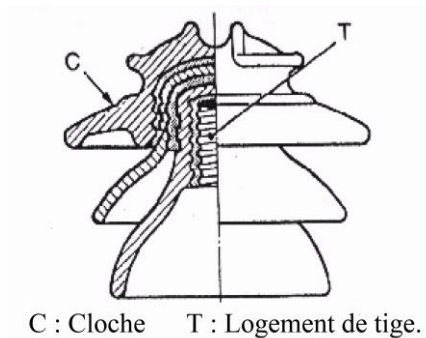


Figure I.1 : Isolateur rigide [2].

I.3.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne :

Ils sont constitués par le matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et à donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs [1,3]. La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (chaîne d'alignement), soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage).

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

- ❖ L'isolateur capot et tige.
- ❖ L'isolateur long fut.

a). Isolateur long fut :

Il est constitué d'un bâton cylindrique plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques muni d'ailettes. A chaque extrémité il y a une pièce métallique pour les liaisons [3]. Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, soit elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (figure I.2.a), soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (figure I.2.b) [2,1].

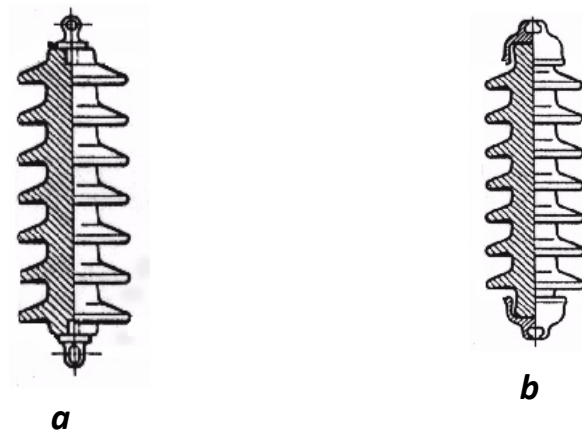


Figure I.2 : Isolateur de type long fut.

b). Isolateur capot et tige :

L'isolateur capot et tige est constitué d'un corps isolant qui porte à l'intérieur une tige en acier, où la tête conique de cette tige est scellée dans le matériau isolant soit le verre soit la porcelaine. L'extrémité supérieure de l'isolateur porte un capot scellé en fonte malléable troué de telle sorte qu'on peut faire entrer l'extrémité inférieure de la tige dans ce trou, et le scellement des éléments de chaîne capot et tige se fait de cette façon en faisant pénétrer la partie inférieure de la tige de l'élément supérieur dans le capot de l'élément inférieur en utilisant du ciment (Figure I.3) [2].

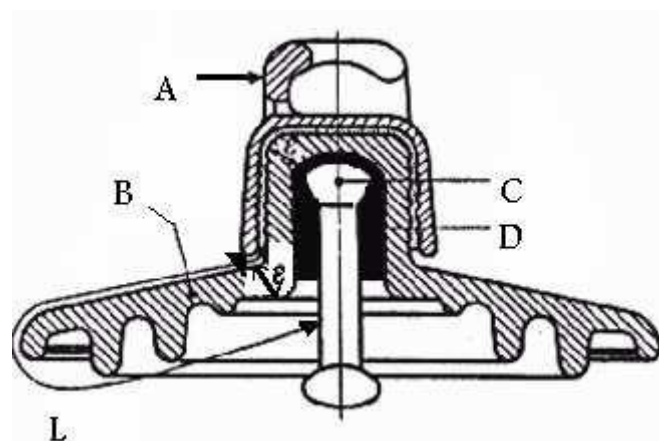


Figure I.3 : Isolateur de type capot-tige.

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, $\varepsilon \ll L/2$.

On peut trouver plusieurs profils d'isolateurs capot et tige et ceci pour un meilleur fonctionnement.

b.1). Profil standard :

La forme et les dimensions sont en accord avec la normalisation internationale (CEI 305 1978), à cause de leur planéité, les rainures internes bien espacées et la longueur de la ligne de fuite supérieure à la demande standard. Ce type est très utilisé dans les endroits à pollution moyenne (Figure I.4) [1].



Figure I.4 : Isolateur de type Profil standard.

b.2). Profil anti-brouillard (forme A):

Son diamètre est plus grand que celui du profil standard. Il est muni de deux ou trois rainures à grande profondeur. Le profil et les grands espacements des rainures permettent un auto lavage par l'action de vent et de la pluie. Cette conception permet également un lavage manuel facile si c'est nécessaire (Figure I.5) [2, 1].



Figure I.5 : Isolateur capot et tige de profil anti-brouillard (forme A).

b.3). Profil anti-brouillard (forme B):

Dans cette conception, l'épaisseur de la rainure extérieure agit comme une barrière contre l'action du brouillard et de dépôt des sels minéraux sur la surface de l'isolateur, empêchant alors la formation d'un électrolyte conducteur sur la surface. Ce type d'isolateur est efficace dans les zones côtières (Figure I.6).



Figure I.6 : Isolateur capot et tige de profil anti-brouillard (forme B).

b.4). Profil plat :

L'élimination complète des rainures internes réduit l'accumulation des agents polluants sur la surface basse, grâce au courant d'air, cette conception est particulièrement efficace dans les zones désertiques ou l'auto lavage est peu fréquent par la pluie (figure I.7).



Figure I.7 : un isolateur capot et tige de profil plat.

b.5). Profil sphérique :

La forme sphérique d'une longueur de fuite importante avec absence des rainures internes permet un lavage manuel facile et efficace (Figure I.8).



Figure I.8 : Isolateur capot et tige de profil sphérique.

b.6). Caractéristiques géométriques :

En effet, les caractéristiques géométriques (diamètre externe de la partie isolante, longueur de la ligne de fuite...) des isolateurs à capot et tige diffèrent selon leurs conditions de service (tension de service, sévérité de la pollution du site ...). Ci-dessous quelques caractéristiques géométriques selon la publication CEI 60305 (Tableau I.1) [1].

Désignation CEI	Charge de rupture (kN)	Diamètre extérieur (mm)	Pas Nominal (mm)	Longueur de la ligne de fuite (mm)
U40	40	175	100 110	185
U70	70	255	127 146	280
U100	100	255 288⁽¹⁾	127 146⁽¹⁾	318 440⁽¹⁾
U160	160	280 320⁽¹⁾	146 170⁽¹⁾	370 540⁽¹⁾
U300	300	320	195	480
U400	400	360 380	206 220	525 550
U530	530	380 440	240 255	600 640

Tableau I.1 : Caractéristiques géométriques des isolateurs à capot et tige (CEI 60305) [1].

I.4. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs :

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine. Mais durant ces dernières années, la porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients principaux qui sont : le poids lourd des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages.

Ces dernières années on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères [1, 3].

I.4.1. Céramique :

Le développement et la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des céramiques à grains très fins. Souvent on trouve les céramiques dans les postes (isolateurs supports, couverture isolante

des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance) [2,1].

I.4.2. Verre :

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présentent le verre, le bas prix et l'observation des défauts est très facile [1-3]. On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit.

➤ Le verre recuit :

Le verre recuit est utilisé pour la fabrication d'isolateurs rigides, mais présente cependant des inconvénients. Parmi ces inconvénients, nous citons le fait qu'il ne résiste pas aux variations brusques de température et qu'il ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles et c'est pour cette raison qu'il n'est pas utilisé pour la fabrication des isolateurs de suspension [2,1].

➤ Le verre trempé :

La résistance à la traction du verre trempé est environ 5 à 6 fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100° C [1, 3].

I.4.3. Matériaux synthétiques :

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique (Figure. I.9) [2, 1, 3]. Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères (Figure. I.10.a) [2]. L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécaniques, atmosphériques...) (Figure. I.10.b) [2].

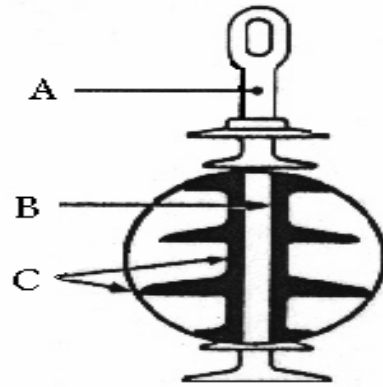
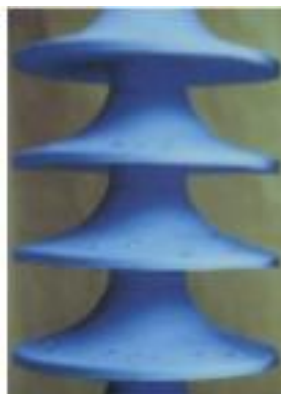


Figure I.9 : isolateurs en matériaux synthétiques.

A : Pièces d'accrochage métallique.

B : noyau en fibre de verre-résine.

C : Revêtement à ailettes en matériaux synthétiques.



a- Avant d'utilisation



b-Après d'utilisation

Figure I.10. Isolateur résistant de conditions de pollution très sévères.

I.5. Pollution des isolateurs :

La pollution est un phénomène qui agit négativement sur le comportement des isolateurs de haute tension. C'est un paramètre important à prendre en considération lors du choix et du dimensionnement des chaînes d'isolateurs.

La pollution provoque la formation d'une couche sur la surface des isolateurs. Ces couches de pollution, quand elles sont humidifiées, réduisent considérablement la résistivité des isolateurs ce qui conduit à la diminution de leur tension de tenue.

Notons que cette couche de pollution n'est pas homogène et sa distribution n'est pas uniforme. La non-homogénéité est due à la présence de différents agents polluants dans une

même région, et la non-uniformité de la répartition sur les surfaces des isolateurs est due aux profils des isolateurs, le sens et la direction des vents dans cette région, la pluie, la position de la chaîne d'isolateurs par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), la position de l'isolateur dans la chaîne, le degré de pollution du site où se trouve les isolateurs ainsi que la surface inférieure ou supérieure de l'isolateur [1,3].

I.6. Sources de pollution :

Nous distinguons trois sortes de pollutions : la pollution naturelle, industrielle et mixte.

I.6.1. Pollution naturelle :

La pollution naturelle provient de sels marins dans des régions côtières, de poussières du sol (notamment lors de chantiers importants), de sables véhiculés par le vent en régions désertiques [2].

I.6.1.1. Pollution marine :

Les lignes de haute tension qui passent près de la mer dans les zones côtières sont exposées au vent qui vient de la mer et qui porte des embruns causant la formation d'une couche polluante de sel sur les surfaces des isolateurs. Cette couche peut devenir conductrice lorsqu'elle est humidifiée ou mouillée ce qui conduit à la circulation d'un courant de fuite et par suite, la génération d'arcs électriques ou même la génération d'un contournement [2, 1].

I.6.1.2. Pollution désertique :

Parmi les phénomènes qui caractérisent la nature désertique, les vents de sable.

Malheureusement, après ces vents, des dépôts de sable se déposent sur les surfaces des isolateurs. Lorsque ces dépôts seront humidifiés, les couches de sable deviennent plus ou moins conductrices à cause de l'existence de sels dans le sable [1,4].

I.6.2. Pollution industrielle :

Le problème de la pollution industrielle se présente pour les lignes qui passent près des zones industrielles (les fumées des usines, raffineries, cimenteries, minerais etc.), près des grandes villes (les gaz d'échappement des véhicules) ou près des terrains agricoles (les engrais utilisés en agriculture) [3].

I.6.3. Pollution mixte :

Ce type de pollution est le plus dangereux, elle est la résultante de l'existence de différents types de pollution dans la même zone, comme les zones industrielles dans des régions côtières.

I.7. Mesure de la sévérité de la pollution des sites :

La sévérité de la pollution d'un site est généralement mesurée par différentes méthodes. Il y a la méthode de salinité équivalente qui consiste à mesurer la conductivité de la solution obtenue par la dissolution des agents polluants dans de l'eau distillée. Il y a aussi la détermination au laboratoire du courant de fuite d'un isolateur pollué artificiellement. Les essais de laboratoire sont valables dans la mesure où les conditions d'essais conduisent aux mêmes valeurs de courant de fuite observées sur site [1,4]. La mesure de la sévérité de la pollution d'un site est importante lors du choix des isolateurs à installer dans ce site [2-4].

On peut classer les degrés de la pollution suivant quatre niveaux selon la CEI 81-5 qui sont: faible, moyenne, forte et très forte (Tableau. I.2) [1].

Faible 0.06 mg/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 0.20mg/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 $0.60\text{mg}/\text{cm}^2$	<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 $> 0.60\text{mg}/\text{cm}^2$	<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.

Tableau I.2 : Classement de degré de pollution selon CEI 815 [1].

I.8. Comportement des isolateurs sous pollution :

Le comportement des isolateurs sous pollution est un facteur essentiel pour la conception et l'exploitation des lignes en zones polluées. Il convient donc de connaître les différents phénomènes de conduction sous pollution.

Lors de la mise en place d'une chaîne d'isolateurs, la longueur de la ligne de fuite de l'ensemble est telle que le champ électrique en chaque point est très inférieur à la rigidité diélectrique de l'atmosphère ambiante. La conductivité superficielle créée par la couche de pollution, modifie la répartition du potentiel de la ligne de fuite, selon les contraintes auxquelles est soumis. Trois cas peuvent se présenter :

- ❖ Arc non localisé : l'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçait à un autre endroit et ainsi de suite. Ces arcs peuvent être dus soit à la formation d'une zone sèche à la suite du passage d'un courant de fuite, comme ils peuvent être dus à l'état de surface de l'isolateur, (l'existence des pics sur la couche de pollution).
- ❖ Arc fixe : l'arc électrique se fixe sur la surface, soit en s'y maintenant (source continue), soit en réamorçant au même endroit (source alternative). L'impédance de dépôt et de la surface propre d'isolateur est en série avec l'arc, elle limite ainsi le courant de l'arc et

sa longueur. Si le courant est trop faible, l'arc s'éteindra. Généralement ce type d'arcs entraîne par effet thermique une dégradation du support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant.

- ❖ Contournement électrique : le phénomène de contournement des isolateurs pollués résulte de la combinaison de plusieurs paramètres.
- Dépôt d'une couche de matériaux solides (conductrice ou isolante).
- Humidification de ces dépôts.
- Existence d'une tension appliquée.

Le contournement des isolateurs pollués est accompli selon les phases suivantes:

Phase 1: un courant de fuite s'écoule à travers la couche électrolytique qui recouvre l'isolant, il provoque un échauffement de l'électrolyte, qui a pour effet d'accroître la conductivité du milieu et par suite courant.

Phase 2: l'échauffement croissant provoque un assèchement local de la couche polluante.

Phase 3: la tension se trouve reportée aux bornes de la zone sèche et des arcs locaux sont susceptibles de s'amorcer, élargissant ainsi la zone sèche.

Phase 4 : à partir de ce stade, l'arc s'allonge longitudinalement jusqu'à atteindre les électrodes est provoqué ainsi le contournement. L'existence de ces phases dépend de nombreux paramètres caractéristiques de l'isolateur pollué: tension appliquée, conductivité de la couche, largeur de la zone sèche, profil de l'isolateur, longueur de fuite...

I.9. Conclusion :

Avant toute réalisation de n'importe quel ouvrage de haute tension, une étude de détermination du degré de pollution du site concerné doit être nécessairement faite, afin de permettre le bon dimensionnement et le bon choix de l'isolation à utiliser.

En effet, la détermination du degré de pollution par la méthode de la salinité équivalente du site par une expérimentation aussi longue que possible dans ce site, est recommandée pour les sites à pollution forte ou même très forte.

Plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont proposées. Nous citons par exemple le lavage manuel périodique des isolateurs lors de la diminution des précipitations pluviales, l'allongement de la ligne de fuite totale de la chaîne d'isolateurs en augmentant le nombre de ces derniers.

Chapitre II : État de l'art de l'isolateur de haute tension

II.1. Introduction :

Analyse, la compréhension et la modélisation des phénomènes de drainage de surface sur l'isolement propre ou contaminé par la pollution ou le gel est d'une importance primordiale pour l'optimisation de l'isolation extérieure des réseaux électriques. Cela nécessite des investigations sur plusieurs fronts: l'étude de la nature physique de la décharge et son interaction avec le dépôt de la pollution, estimée à résister à des dépôts de polluants en présence d'un des mécanismes de déchargement étude des déchets d'allongement, et l'effet de la nature des dépôts sur ce phénomène, etc. Dans ce chapitre, nous présentons les principaux résultats des modèles et des rapports précédents pour les papiers les chercheurs scientifiques ont étudié les effets de la pollution sur les isolants et le courant fuite et de traitement du signal.

II .2. Effet de la pollution sur l'isolateur HV :

Faramarzi et al [5], proposent une nouvelle méthode pour la détection de l'état critique et par conséquent la prévention du contournement dans les isolateurs en porcelaine et en verre par l'analyse du courant de fuite. L'indice de phase ($p.i\%$) c'est le cosinus de l'angle de phase de l'harmonique principale du courant de fuite. Par conséquent, si les indices de phase ($p.i\%$) sont inférieurs à 30% ($p.i\% < 30\%$), les isolateurs placés dans la région souhaitée servaient avec bon rendement et aucun contournement se produit pendant les conditions environnementales. Mais la pollution avec l'humidité augmente cet indice de façon significative, par conséquent, on peut conclure que pour les indices supérieurs à 30% ($p.i\% > 30\%$), le comportement d'isolateur sera influencé par les conditions.

Dans cet article. Le fonctionnement de l'isolateur et ses performances sont déterminés par indice de phase. La situation électrique des isolateurs est décrite selon la valeur de l'indice, lorsque $pi\%$ est inférieur à 30%, les conditions sont normales et lorsque $pi\%$ est supérieur à 85%, les isolateurs en porcelaine sont en états critiques et l'opérateur doit rapidement nettoyer ces isolateurs ou les remplacer. En outre, pour $p.i\% > 68\%$, les isolateurs en verre sont mise dans un état critique. Finalement, cet indice peut être utilisé comme un déterminant de l'occurrence du contournement.

P. N. Bychkov et al [6], ont étudié les spécifications des chaînes d'isolateurs suspendus dans des conditions de contamination extrême ; entraîné par la poussière mixte agriculture et du sol alcaline. Les auteurs décrivent les propriétés de performance des isolateurs à grande surface étendue lorsqu'ils sont contaminés par la poussière très adhérente. Ils sont donnés

également des recommandations sur la procédure d'essai ainsi que la sélection de la configuration d'isolateur optimale pour les conditions extrêmes de service.

La pollution mixte du naturelle et industrielle à haute intensité conduit à une diminution quasi-critique de la tension de contournement de l'isolateur pendant les premiers mois (1,5 à 2,5 mois) d'opération. Ainsi, au cours des essais, la période recommandée pour l'élimination de l'isolateur aux stades initiaux de l'étude est de 1,5 à 2,5 mois. La durée totale des tests peut être réduite à 24 mois. Ils sont conclus que les isolateurs à surface moins massive, sont normalement le premier choix dans les régions à forte intensité de contamination.

Dans le même temps, les isolateurs en forme aérodynamiques fines ont des capacités d'auto-nettoyage individuellement excellentes et même s'ils sont posés dans une chaîne.

O. E. Gouda et al [7]. dans cet recherche, deux autres techniques ont été proposées et ajoutées à la CEI. La première est d'expliquer les performances des isolateurs pollués sous la rosée et la seconde est d'expliquer leur performance sous le brouillard et la rosée simultanée. Les résultats de ces essais sont comparés les uns aux autres sous la surface polluée avec des couches et des conductivités différentes. Le but de cet article est d'enregistrer le courant de fuite et la tension critiques sous différentes conditions climatiques en laboratoire pour surveiller les chaînes d'isolateurs avant l'apparition du contournement qui est bien sûr utile pour l'efficacité d'entretien.

Les principales conclusions qui peuvent être tirées depuis les essais réalisés dans cette étude sont les suivantes :

- a- Les tensions de déclenchement dans les essais sous conditions artificiels sont inférieures aux tensions de contournement dans les conditions du champ. Le réglage du niveau de la tension d'avertissement à 80% de la tension du contournement peut être préféré car il est permis pour les valeurs légèrement inférieures aux valeurs dans les conditions de champ. L'enregistrement du courant de fuite sous des différentes conditions artificielles est considéré comme un système de surveillance pour la sévérité de la couche de pollution, ce qui est utile pour un entretien efficace des isolateurs de haute tension.
- b- Une méthode innovante pour simuler la formation de rosée sur les isolateurs pollués est décrite dans cette étude. Cette méthode fournit une simulation en laboratoire sous pollution désertiques.

- c- Pour la surveillance et l'enregistrement de l'état de la surface d'isolateur à des différentes conditions, deux procédures d'essai sont suggérées pour simuler les conditions naturelles. L'une consiste à simuler la rosée à la matinée et l'autre à simuler simultanément le brouillard et la rosée.

II.3. Le courant de fuite et l'isolateur de HV :

A.Azizi et al [8]. proposent l'analyse des formes d'onde du courant de fuite sous différentes localisations de pollution et densité de dépôt salin équivalente (ESDD). Certains tests sont effectués sur la chaîne d'isolateur de haute tension en porcelaine dans lequel trois éléments d'isolateur adjacents ont été contaminés. De plus, l'effet de l'humidité et de la tension de fonctionnement sur les formes d'onde du courant de fuite est étudié. Les données expérimentales sont analysées en temps et en fréquence. Les résultats obtenus indiquent qu'il existe une forte corrélation entre la localisation de la pollution et les paramètres du CF tels que la valeur crête, les composantes d'harmonique et la distorsion d'harmonique totale (THD).

Cet article décrit la relation entre la localisation de la pollution et les formes d'onde du CF de la chaîne d'isolateur en porcelaine sous deux niveaux de contamination. Les tests ont également été effectués pour des différentes valeurs d'humidité relative et des tensions appliquées.

Après avoir effectué des tests en laboratoire, il a été constaté qu'il existe des relations entre les caractéristiques du CF et l'emplacement de la pollution. Les résultats des essais expérimentaux ont été examinés dans le domaine du temps et de la fréquence. Les principales conclusions sont résumées comme suit.

1) On a constaté que la valeur de pic de CF augmente lorsque la pollution est déposée plus près du côté mis à la terre dans les deux niveaux de pollution. Incrément de CF conduire à l'augmentation du nombre de décharge de surface et, enfin, le contournement se produira à un niveau de tension plus faible. En outre, il augmente lorsque l'humidité et la masse de la pollution augmente.

2) Les composantes d'harmonique de CF ont été corrélées avec la localisation de la pollution. L'emplacement de la pollution a un impact significatif sur la première et la troisième composante harmonique, de sorte que l'amplitude d'entre eux augmente de façon significative avec l'approche de la pollution au côté mis à la terre, mais elle a un peu d'effet sur la composante

du cinquième harmonique. L'augmentation du troisième harmonique est due à l'apparition d'une décharge superficielle.

3) Le THD de CF diminue lorsque les disques pollués sont situés plus près du côté mis à la terre.

4) Il existe une forte corrélation entre la localisation de la pollution et le rapport des composantes de la cinquième à la troisième harmonique. Ce rapport est réduit lorsque les disques pollués se rapprochent du côté mis à la terre.

Nasir Ahmed et al [9]. Propose une procédure pour réduire le bruit inclus dans le signal du courant. Les essais ont été réalisés sur des isolateurs en verre propre et pollué en utilisant la procédure de suivi de surface et de test d'érosion de la CEI 60587. La méthode d'analyse par ondelettes est utilisée pour compresser les données de courant de fuite. Les résultats expérimentaux montrent que les signaux réels de courant de fuite sont liés aux niveaux de pollution de la surface d'isolateur.

Les résultats présentent des informations suffisantes sur le contenu en fréquence, par exemple l'amplitude de fréquence qui est une indication claire de perte d'énergie en cas de décharge et également l'emplacement de fréquence, c'est-à-dire l'instant auquel il s'est produit. En connaissant cette information, on peut donner à l'état d'isolateur une bonne représentation du signal d'origine et très efficace pour extraire des caractéristiques pertinentes du signal. Comme on l'a vu, les conditions environnementales ont joué un rôle important sur les phénomènes de décharge sur la surface.

L. Cheng et al [10]. ont étudiés la corrélation entre l'indice de vieillissement et les années d'exploitation, et ils ont discutés le mécanisme de vieillissement. Selon les résultats de l'analyse, ils ont établi des modèles de prévision de la durée de vie basés sur la physique et les statistiques, respectivement. Les résultats ont montré: la durée de vie des isolateurs échantillonnés a été déterminée par le procédé d'oxydation thermique du caoutchouc de silicone. La durée de vie du caoutchouc de silicone était de 14,6 ans tandis que la durée de vie électrique d'isolateur composite était de 18,9 ans. En ce qui concerne le reste des isolateurs dans les régions à hautes températures et humidité élevée, leur durée de vie restante pourrait être prédite selon les résultats du test de la charge mécanique et de la spectroscopie infrarouge (FTIR). En fin de compte, dans cette étude, 20 isolateurs qui avaient fonctionné pendant 14 ans sont choisies, et prédit leur durée de vie, l'erreur de prévision était de 1 an.

II.4. Traitement du signal de courant de fuite :

M. Faramarzi et al [11]. Présentent une méthode de diagnostic en ligne pour prédire les conditions critiques dans les isolateurs en céramique. A cet effet, plusieurs essais expérimentaux ont été réalisés sur différents types d'isolateurs en céramique dans des conditions environnementales différentes afin d'analyser leur courant de fuite. L'analyse de la transformée de Fourier des courants de fuite montre une forte corrélation entre le rapport de la troisième à la cinquième amplitude d'harmonique en ce qui concerne l'occurrence des conditions critiques et le degré de vieillissement d'isolateur.

Ce travail a pour but d'analyser l'état fonctionnel des isolateurs en céramique dans des conditions de pollution et d'humidité.

1) Si la valeur de la cinquième harmonique est supérieure à la troisième harmonique du courant de fuite, l'isolateur sera dans un état de fonctionnement normal.

2) Dans la pollution sèche et les conditions normales de service, la valeur de la cinquième harmonique est encore plus élevée que la troisième.

3) Les isolateurs pollués, en particulier dans le milieu de pollution lourde avec la fumée et l'humidité, l'isolateur ne plus servie à leur état normal. Dans cette situation, la valeur du troisième harmonique devient plus grande que le cinquième harmonique et l'augmentation du troisième harmonique est plus rapide et plus élevée que le cinquième harmonique. En conséquence, l'état d'isolateur devient critique et la probabilité de contournement augmente.

A. Seddik et al [12]. Proposent d'étudier le phénomène de pollution des isolateurs de ligne haute tension (tension alternative 50 Hz). Pour cela, ils ont effectué une série d'essais sur un modèle d'isolateur (1512 L).

Les données courant et tension sont mesurées, afin, d'effectuer un traitement de signal, pour en tirer les informations sur l'état de surface de l'isolateur à l'aide d'un algorithme basé sur la technique d'ondelettes (transformée en ondelettes). Les chercheurs ont pu proposer un modèle de laboratoire qui simule le comportement de l'isolateur, vis-à-vis du contournement et du courant de fuite, et cela pour différentes conductivités des couches polluantes et différents niveaux de tension. Par la suite, l'analyse des harmoniques du courant de fuite et de la tension appliquée sera effectuée, pour déterminer les harmoniques caractérisant l'état de surface de l'isolateur.

Ils ont remarqué que le courant de fuite (en termes d'amplitude, de forme et de déphasage par rapport à la tension) dépend de plusieurs paramètres, à savoir la tension appliquée, l'état de surface de l'isolateur, la conductivité de la couche de pollution artificielle et l'instant de mesure considéré.

Pour la majorité des cas, le courant de fuite a, au début, une forme sinusoïdale, ceci durera quelques instants, la durée de ces instants va de quelques secondes pour des fortes conductivités jusqu'à une minute pour des faibles conductivités, avant que les décharges aient lieu. Une fois ce seuil atteint, l'amplitude du courant de fuite diminue, la déformation de la forme du courant de fuite commence à apparaître et le déphasage par rapport à la tension augmente jusqu'à une valeur limite.

Après l'extinction des décharges (assèchement partiel de la couche d'humidité), la pente de la courbe de l'amplitude du courant de fuite diminue.

Dans le cas d'une conductivité très faible, des pics de décharges commencent à apparaître à partir du niveau 15 kV. Ces pics sont accompagnés par un bruit sonore. Pour le niveau suivant, cet effet apparaît bien avant, avec des décharges plus importantes, le nombre de décharges augmente avec le temps d'application de la tension ; après un certain temps l'intensité du bruit commence à diminuer ainsi que l'amplitude et le nombre des pics. Les pics sont généralement localisés à droite de la valeur de crête pour les deux alternances, ces deux alternances sont pratiquement identiques (même forme) au signe prêt.

Généralement, le courant a la même forme que la tension aux premiers instants d'application de celle-ci, avec une légère non linéarité ; cette non linéarité est similaire au phénomène d'hystérésis ; une fois que les étincelles commencent à apparaître, il y a déformation de l'onde de courant avec apparition de nouveaux harmoniques, l'amplitude de ces harmoniques varie en fonction du temps.

II.5. Conclusion :

Améliorer les connaissances sur la performance du préservatif masculin est essentiel si l'on veut accroître l'utilisation et la distribution de transmission d'énergie électrique.

Dans ce chapitre, nous examinons brièvement les articles scientifiques par les chercheurs téléchargés études menées sur le site et la simulation en laboratoire, et la contamination des isolateurs et les différents facteurs qui influent sur la puissance de ce dernier.

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 [13,14].

La plupart des signaux du monde réel ne sont pas stationnaires, et c'est justement dans l'évolution de leurs caractéristiques (statistiques, fréquentielles, temporelles, spatiales) que réside l'essentiel de l'information qu'ils contiennent. Or l'analyse de Fourier propose une approche globale du signal, les intégrations sont faites de moins l'infini à plus l'infini, et toute notion de localisation temporelle (ou spatiale pour les images) disparaît dans l'espace de Fourier ; il faut donc trouver un compromis, une transformation qui nous renseigne sur le contenu fréquentiel tout en préservant la localisation afin d'obtenir une représentation temps/fréquence ou espace/échelle du signal [15].

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 maîtriser 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. Historique

Le traitement du signal a pour objet la description des signaux liés au monde réel dans un but de traitement, d'identification, de compression, de compréhension ou de transmission.

Dans ce contexte, les transformations linéaires ont toujours joué un très grand rôle, et parmi ces dernières, la plus célèbre et la plus anciennement étudiée est la transformation de Fourier (1822). Cette transformation permet, comme chacun sait, d'explorer la composition fréquentielle du signal et, par ses propriétés, de lui appliquer facilement des opérateurs de filtrage. Lors de cette transformation, le signal est décomposé sur un ensemble de signaux

de « base » qui sont cosinus et sinus ou l'exponentielle imaginaire, mais, très tôt dans l'histoire du traitement du signal, il est apparu que la décomposition obtenue n'était pas toujours la plus satisfaisante et la première transformation en ondelettes (le nom n'était pas encore utilisé) est proposée par Haar en 1910 ; il serait plus judicieux de parler alors de « paléo-ondelette ».

La transformée en Ondelettes est un outil qui découpe les données, les fonctions ou les opérateurs en composantes fréquentielles suivant une résolution adaptée à l'échelle.

Les précurseurs conscients de cette technique ont été des mathématiciens (Calderon 1964), des physiciens (Aslaken et Klauder en 1968, Paul en 1985), et surtout des ingénieurs comme Esteban et Galand (1977), Smith et Barnwell (1986), Vetterli (1986) ; nous pourrions parler dans leur cas de « pré-ondelette », Mais le premier à avoir utilisé la méthode et le premier à avoir proposé le nom d'ondelettes fut Jean Morlet (1983). Le problème traité par Morlet était celui de l'analyse de données issues de sondages sismiques effectués pour des recherches géologiques ; ces données, faites de nombreux transitoires, sont particulièrement adaptées à une technique d'analyse conservant la notion de localisation de l'événement tout en fournissant une information sur son contenu fréquentiel ce qui est tout l'intérêt de ce type de transformation. Les résultats obtenus par Morlet et formalisés par le physicien Alex Grossmann ont rapidement éveillé l'attention de nombreux chercheurs et bientôt des bases mathématiques solides ont été mises en place faisant apparaître la notion de base orthogonale (Y.Meyer 1985), d'analyse multi résolution (S.Mallat [16] [15]).

III.3. Notions Fondamentales du traitement de signal

III.3.1. 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 [17]. 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 [18].

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 [13].

III.3.2. L'Analyse Spectrale

L'analyse spectrale est la décomposition d'un grandeur variant en fonction du temps en ses composantes fréquentielles. C'est l'une des techniques les plus courantes de traitement des signaux [17].

Pour maîtriser cette analyse, on utilise la transformée de Fourier Discrète qui s'adapte bien au traitement des signaux échantillonnés. Elle est définie par [19] :

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

Y (f): signal dans le domaine fréquentiel.

y(t) : signal dans le domaine temporel.

N : nombre de points de signal sur une période.

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

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

Qui constitue la représentation spectrale du signal y(t). Elle se décompose en un spectre d'amplitude et un spectre de phase [13].

III.3.3. Le taux de distorsion

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

✓ Taux de distorsion en Tension : $\tau_v (\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{p=2}^{\infty} v_p^2}}{v_1}$

✓ Taux de distorsion en Courant : $\tau_v (\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{p=2}^{\infty} I_p^2}}{I_1}$

Le taux de distorsion défini par la norme CEI représente le rapport entre la valeur efficace des harmoniques et la valeur efficace du fondamental [20].

III.3.4. Filtrage Numérique

Nous définissons le filtrage comme étant l'opération d'interruption ou d'atténuation d'un signal [21].

Chapitre III : Traitement du signal de courant de fuite

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 $Y(f)$ [13] :

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

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

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

Les filtres passe-bas les plus connus sont les filtres basés sur l'approximation de

$$\text{Butterworth suivante [22] : } |G(f)|^2 = \left[1 + \left(\frac{f^2}{f_c}\right)^2\right]^{-1} \quad (III.5)$$

$G(f)$: la fonction de transfert du filtre.

f_c : la fréquence de coupure.

N : le degré du filtre.

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_n la plus haute du spectre utile, on impose donc [23]:

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

- ✓ Condition relative à la bande atténuée

On considère une perturbation dont l'amplitude est et dont la fréquence 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_1 de l'amplitude E_s du signal de mesure de fréquence f_s [23] :

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

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

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

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

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

La connaissance de n permet la détermination de la fréquence de coupure qui satisfait aux deux inégalités [23]:

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

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.4. Transformé en Ondelettes Continue

III.4.1 Définition [24-25]

Une Ondelette $\psi(t)$ est une fonction de moyenne nulle

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (\text{III.11})$$

Cette dernière est dilatée avec un paramètre d'échelle a , et translatée par

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{III.12})$$

Parmi une grande famille des ondelettes, on trouve:

- Ondelette **gaussienne complexe**.
- Ondelette **Complexe de Morlet**.
- Ondelette **gaussienne**.
- Ondelette **chapeau mexicain**.
- Ondelette de **Meyer**.
- Ondelette de **Meyer avec une fonction auxiliaire**.

- Ondelette de **Morlet**.
- Ondelette **complexe de Shannon**.

La transformée en ondelettes continue (TOC) utilise des ondelettes dont l'enveloppe rétrécit avec l'échelle tandis que le nombre d'oscillations reste constant (Figure III.1 et III.2). En effet l'opération de changement de facteur b est équivalente à une homothétie du paramètre b sur l'axe des temps. Dans ce cas on obtient une largeur de bande qui augmente avec la fréquence.

III.4.2. Exemple De L'ondelette De Morlet (Complexe)

$$\psi(x) = e^{-\pi x^2} e^{10i\pi x} \quad (\text{III.13})$$

Par la dilatation et la translation dans le temps, on trouve la fonction d'ondelette dilatée et translatée $\psi_{a,b}(t)$:

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} e^{-\pi(\frac{x-b}{a})^2} e^{10i\pi(\frac{x-b}{a})} \quad (\text{III.14})$$

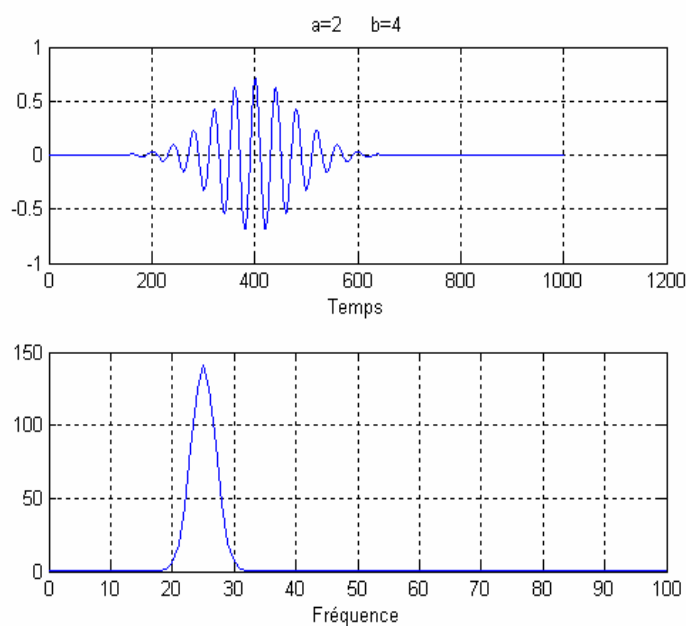


Figure III.1 Représentation de l'ondelette de Morlet pour $a=2$ et $b=4$.

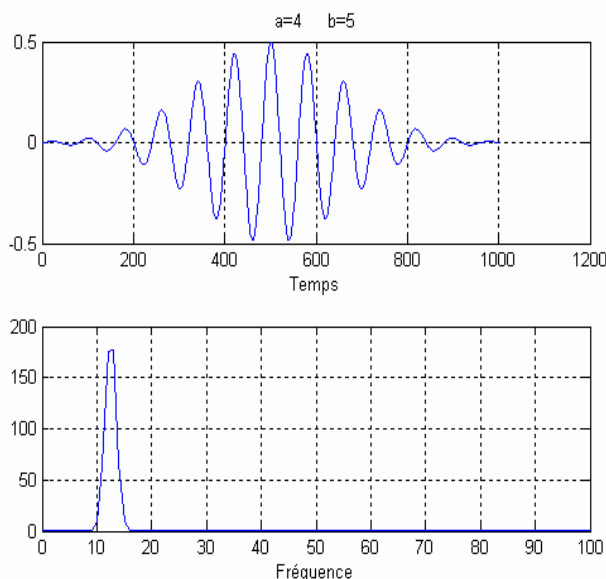


Figure III.2 Représentation de l'ondelette de Morlet pour $a=4$ et $b=5$.

La transformée en ondelettes de la fonction f à l'échelle ' a ' et la position ' b ' est calculée en corrélant f avec un atome d'ondelette:

$$Wf(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi * \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (\text{III.15})$$

La transformée en ondelettes a une résolution temps-fréquence qui dépend de l'échelle ' a ', la résolution dans le plan temps fréquence de la transformation peut être estimée par les variances de la fonction analysante dans l'espace temporel et dans l'espace fréquentiel :

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 |\psi(x)|^2 dx \quad (\text{III.16})$$

$$\sigma_t^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} t^2 |\psi(t)|^2 dt \quad (\text{III.17})$$

$$\sigma_w^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} w^2 |\psi(w)|^2 dw \quad (\text{III.18})$$

Or une, parmi les propriétés des ondelettes est que ces dernières conservent leurs normes lors du changement de facteur d'échelle, après calcul on trouve :

$\sigma_t = a, \sigma_w = \frac{1}{a}$, de sorte que le pavé élémentaire dans l'espace temps fréquence est de surface constante tandis que la résolution temporelle est proportionnelle à ' a ' et que la résolution fréquentielle est inversement proportionnelle à ' a ' (Figure III.3).

Sous la condition :

$$C_\psi = \int_0^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(w)|^2}{w} dw < +\infty \quad (\text{III.19})$$

C'est une représentation complète, stable et redondante du signal; en particulier, la transformée en ondelettes est inversible. La redondance se traduit par l'existence d'un noyau reproduisant.

Comme la transformée de Fourier à fenêtre, une transformée en ondelettes peut mesurer les variations de temps-fréquence des composants spectraux, mais il a une différente résolution de temps-fréquence. Une transformée en ondelettes fait corrélérer f avec $\psi_{a,b}(t)$.

En appliquant la formule de Fourier-Parseval sur l'équation (III.5), on obtient cette dernière écrite comme intégration de fréquence:

$$Wf(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_{a,b} * (t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(w) \hat{\psi}_{a,b}(w) dw \quad (III.20)$$

Le coefficient d'ondelettes $Wf(a, b)$ dépend ainsi des valeurs $f(t)$ et $\hat{f}(w)$ dans le domaine temps-fréquence où l'énergie de $\psi_{a,b}$ et de $\hat{\psi}_{a,b}$ est concentrée. Des harmoniques variables dans le temps sont détectés à partir de la position et l'échelle des coefficients d'amplitude élevés des ondelettes.

En temps, $\hat{\psi}_{a,b}(w)$ est centrée à 'b' avec une distribution proportionnelle au 'a', et que sa transformée de Fourier est calculée à partir de la relation suivante:

$$\hat{\psi}_{a,b}(w) = e^{-jbw} \sqrt{a} \hat{\psi}(w) \quad (III.21)$$

Où $\hat{\psi}$ est la transformée de Fourier de ψ . Pour analyser l'information d'une phase des signaux, une ondelette analytique complexe est utilisée. Ceci signifie que $\hat{\psi}(w)=0$ pour $0 < \omega$.

Son énergie est concentrée dans un intervalle positif de fréquence centré à η . L'énergie

de, $\hat{\psi}_{a,b}$ est donc concentrée dans un intervalle positif de fréquence centré à $\frac{\eta}{a}$, dont la taille est mesurée par $1/a$. Dans le plan temps-fréquence, un atome d'ondelettes $\psi_{a,b}$ est

Symboliquement représenté par un rectangle centré à $(b, \frac{\eta}{a})$.

La diffusion de temps et de fréquence est respectivement proportionnelle à 'b' et à '1/a'. Quand 'a' change, la longueur et la largeur du rectangle changent mais sa surface reste toujours constante, comme illustré par la (figure III.3). [26]

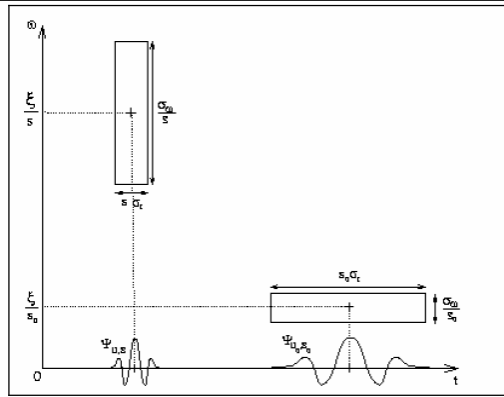


Figure III.3. Boîtes Temps-fréquence des deux ondelettes.

$\psi_{u,s}$ et ψ_{u_0,s_0} quand l'échelle 'a' diminue, le support du temps est réduit mais la diffusion de fréquence augmente et couvre un intervalle qui est décalé vers des hautes fréquences.

La TOC (Transformée en Ondelette Continue) travaille donc à résolution fréquentielle relative constante. Cela implique:

- Pour a petit, donc pour les hautes fréquences, une mauvaise résolution temporelle et une bonne résolution fréquentielle.
- Pour a grand, donc pour les basses fréquences, une bonne résolution temporelle et une mauvaise résolution fréquentielle.

En termes de pavage temps-échelle (ou temps-fréquence), cela se traduit par des pavés élémentaires qui se déforment lorsque l'échelle d'analyse varie, leur surface demeurant constante. Dans cette représentation, chaque cellule correspond à la résolution d'analyse pour le point du plan situé en son centre (Figure III.4).

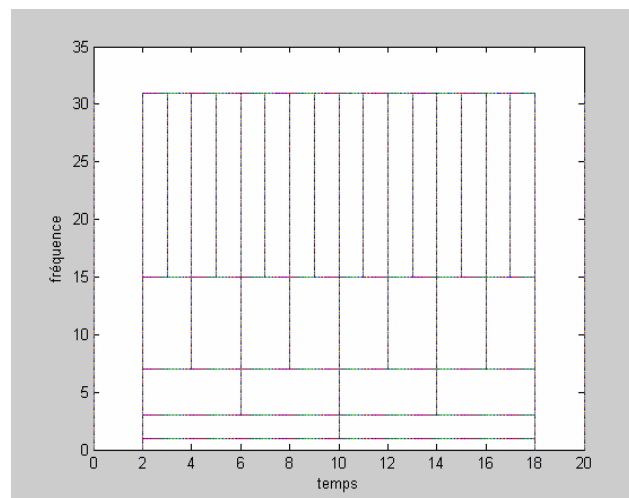


Figure III.4 Pavage temps-fréquence pour la transformée en ondelettes (illustration du fait que le produit de la résolution temporelle par la résolution fréquentielle est constant).

La TOC, lorsqu'elle est utilisée pour l'analyse des signaux discrets, doit être échantillonnée, c'est-à-dire calculée pour des valeurs discrètes de ' a ' et de ' b '. L'implémentation de la transformée continue correspond généralement à un échantillonnage uniforme du temps calqué sur celui du signal, et à la sélection d'un nombre constant d'échelles par bandes d'octaves. Cette implémentation conserve la caractéristique de redondance attachée à la transformée continue, tant du point de vue du temps que de l'échelle.

III.5. Conclusion

Le traitement de signal par une voie numérique se base sur la transformation de Fourier et le filtrage numérique, aussi des techniques d'analyse du signales sont élaborés par un langage évolué (Matlab 7), telle que la technique d'ondelette, 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 : Étude Et Résultats Expérimentale

IV.1. Introduction :

Dans le laboratoire de haute tension de l'université d'el oued, où notre étude expérimentale a été effectuée, existe un transformateur d'essais à fréquence industrielle 50 Hertz.

Afin d'assurer un bon fonctionnement des équipements de haute tension, des essais diélectriques sont nécessaires.

Les essais effectués, au laboratoire de haute tension, concernent le courant de fuite d'un d'isolateur réel en labo de haute tension. Ce profil d'isolateur est utilisé dans les régions désertiques Algériennes.

Dans ce chapitre nous présentons l'équipement de la station d'essais. Nous présentons aussi les différents types d'essais, et le modèle opératoire utilisé pour les essais de haute tension ainsi que les procédés d'essai en suite nous interprétons nos résultats.

IV.2. Dispositif expérimental :

IV.2.1. Circuit d'essai du laboratoire de Haute tension (Université d'El Oued) :

Les essais sont effectués dans le laboratoire de haute tension de l'université d'El Oued.

Notre laboratoire est constitué des trois sources de tensions :

- Une source de tension à fréquence industrielle 50Hz,
- Un générateur de tension continue,
- Un générateur de tension impulsionnelle.

IV.2.1.1. Équipement de la station d'essai :

La station d'essai de notre laboratoire comprend les organes suivants :

- Un transformateur d'essai,
- Un transformateur de réglage,
- Des diviseurs de tension,
- Un pupitre de commande et des appareils de mesure et de protection,
- Un oscilloscope numérique.

IV.2.1.2. Transformateur d'essai :

Nous avons utilisé un transformateur d'essai conçu et isolé pour la génération de haute tension. Il a un rapport de transformation de 250V / 100kV, avec une puissance de 5 kVA.

Ce transformateur permet la variation de la haute tension au secondaire de 0 à pleine tension.

IV.2.1.3. Transformateur de réglage :

Nous permettons la variation de la tension aux bornes du transformateur d'essai.

Son rapport de transformation est de 220V/250V.

IV.2.1.4. Oscilloscope numérique :

C'est un appareil qui permet de donner la forme de l'onde. Les phénomènes enregistrés.

IV.2.1.5. Pupitre de commande :

Ce pupitre est alimenté sous une tension de 220V. Ce pupitre nous permettons la variation automatique de la tension d'essai. Figure (IV 1).



Figure IV .1 : Photo du pupitre de commande du laboratoire de haute tension de l'université d'El-Oued.

IV.2.1.6. Appareils de mesure et de protection :

L'alimentation du laboratoire se fait à partir d'un pupitre de commande situé dans le laboratoire, mais à l'extérieur de la plate-forme d'essai (la cage de faraday).

Le transformateur de haute tension et son régulateur sont protégés indépendamment par un fusible et un relais thermique de 250A. Ces protections sont liées avec le circuit de la bobine du contacteur principal, ce qui donne une protection suffisante contre les surcharges du transformateur et les courants de court-circuit.

Pour les mesures de tension on a :

DSM : un voltmètre numérique pour mesurer la tension alternative.

DGM : un voltmètre numérique pour mesurer la tension continue.

Un voltmètre et ampèremètre pour mesurer de la tension primaire au niveau du transformateur d'essai.

IV 2.1.7. Diviseur de tension :

Il existe deux diviseurs de tension :

- Un diviseur de tension capacitif pour la mesure de la tension à fréquence industrielle.
- Un diviseur de tension résistif pour la mesure de la tension continue.

IV 2.1.8. Circuit d'essai à tension alternatif :

Les générateurs de haute tension alternative à fréquence industrielle sont utilisés pour :

- Les essais à haute tension alternative (transformateurs haute tension).
- L'alimentation (transformateurs haute tension) des redresseurs à courant continu, des générateurs à circuit oscillant et des générateurs de choc.

La Figure IV.2 représente le circuit d'essai à tension alternatif réalisé au laboratoire de haute tension. Figure IV.3 est celle du montage réalisé au laboratoire de haute tension.

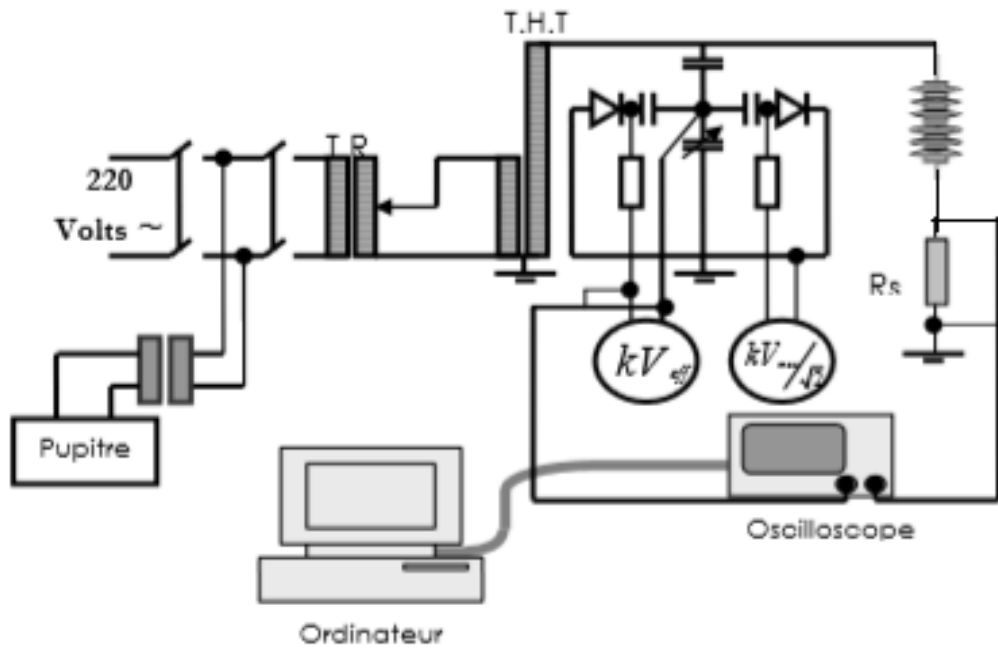


Figure IV.2: Circuit d'essai à fréquence industrielle.



Figure IV.3: montage réalisé au laboratoire de haute tension.

IV.3. Mode opératoire :

Pour étudier le comportement du courant de fuit des isolateurs en à haute tension, nous avons utilisé une chaine d'isolateur afin de faire l'expérience proche de la réalité.

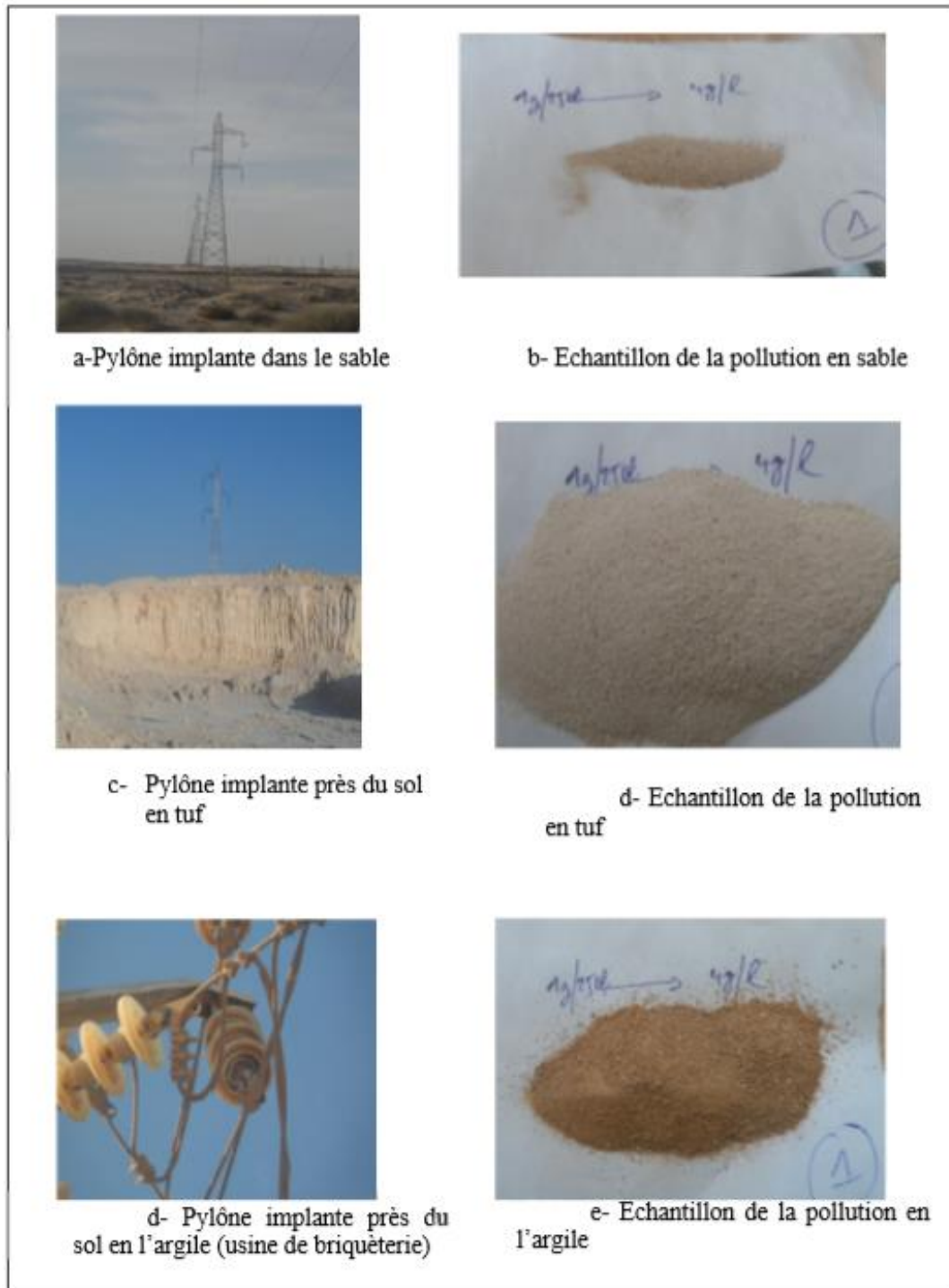


Figure IV.4 : les sites des lignes aériennes exposées aux différentes sources de pollutions désertiques et leurs échantillons.

IV.3.1. Préparation du modèle :

Avant chaque Série d'essai, la chaîne d'isolateur bien nettoyée par l'eau distillée, ensuite, essuyez l'isolation avec un chiffon propre et la pièce métallique pour éliminer toute trace de pollution utilisée précédant, dans le dernier nous avons le séchage par séchoir comme indiqué sur la figure ci-dessous :



Figure IV.5: opération de nettoyage et séchage d'isolateur.

IV.3.2. Préparation des solutions polluantes :

Les solutions polluantes ont été préparées au laboratoire. Celles-ci sont composées de différentes quantités de poudre extraite des différents sols situés au près des lignes aériennes par exemples les dunes du sable, usines de briqueterie et le mine du tuf, ces échantillons de pollution sont mélangés à de l'eau distillée, afin d'obtenir plusieurs conductivités volumiques.

Où nous utilisons une nouvelle méthode pour mesurer le degré de pollution dans les isolant afin qu'il soit pollué placé sur la surface du verre d'une manière uniforme, par la suite le verre pollué est placé au-dessus du capteur qui est basé sur le principe de la mesure des valeurs de transmission de la lumière et la résistance d'enregistrement sur le PC via le panneau Arduino puis on enlève le matière pollué de la verre soigneusement pour garder le matière pollué, puis le mettre dans une certaine quantité d'eau distillée pour mesurer la conductivité.



Figure IV. 6 : Procédé de distribution de polluant dans le capteur.

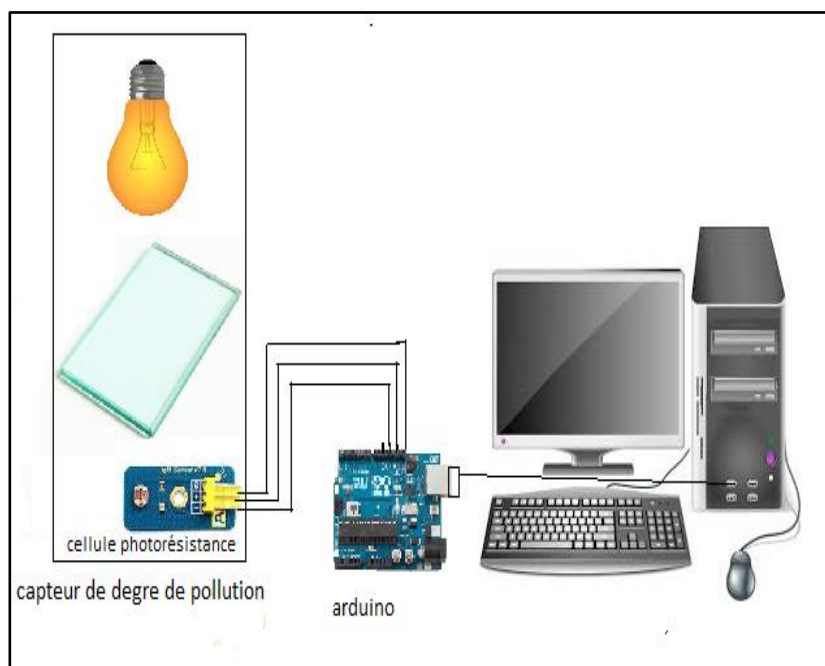


Figure IV.7 : méthode de mesure de résistance.

IV.3.2.1. Les éléments utilisés pour mesurer la résistance :

- **Capteur photorésistance :**

Une photorésistance est un composant dont la résistivité dépend de la luminosité ambiante. Pour faire simple, c'est une résistance dont la valeur change en fonction de la lumière qu'elle reçoit.

- **Arduino :**

Arduino est une plate-forme électronique open-source basé sur le matériel et le logiciel facile à utiliser. Les cartes Arduino sont capables de lire les entrées - la lumière sur un capteur, un doigt sur un bouton ou un message Twitter - et la transformer en une sortie - activation d'un moteur, d'allumer une LED, publier quelque chose en ligne. Fournir des données à votre ordinateur.

La mesure de la conductivité est effectuée à l'aide d'un conductivité-mètre

(figure IV.8).



Figure IV. 8: conductimètre pour mesurer les différentes conductivités de pollution utilisées aux essais.

Ainsi pour les différents types de pollution, on a utilisé trois conductivités différentes pour avoir l'effet de cette pollution au comportement d'isolateur, par la suite on présente les différentes conductivités préparées pour les essais :

IV.3.3.1. Les conductivités de la pollution en sable:

Dans notre zone désertique on a une grande surface en sable qu'en tuf ou en argile pour cela on a très intéressé sur la variation de la conductivité du sable, la figure IV.9 présente la courbe de la variation de conductivité du sable en fonction de résistance du sable dans l'eau distillé.

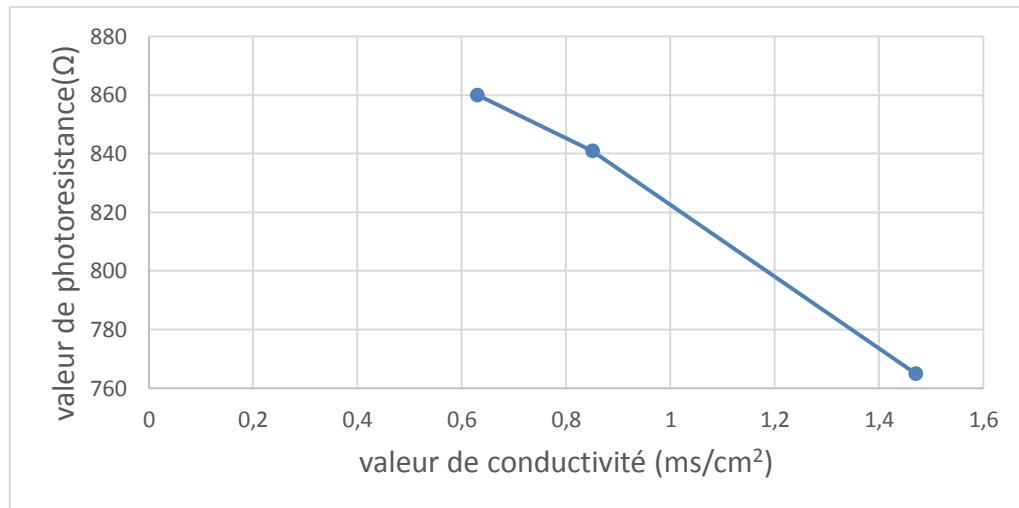


Figure IV. 9 : variation de conductivité du sable en fonction de photorésistance.

D'après la courbe précédant on observe que la variation de conductivité du sable est inversement proportionnelle avec de résistance presque ment linéaire.

IV.3.3.2. Les conductivités de la pollution en tuf :

la figure IV.10 présente la courbe de la variation de conductivité du tuf en fonction de résistance du tuf dans l'eau distillé.

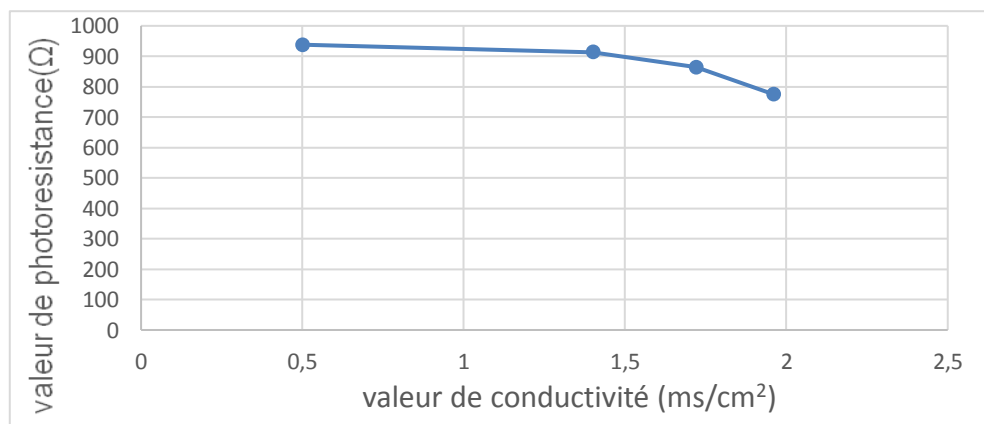


Figure IV. 10 :variation de conductivité du tuf en fonction de photorésistance.

D'après la courbe précédant on observe que la variation de conductivité du tuf est inversement proportionnelle avec de résistance.

IV.3.3.3. Les conductivités de la pollution en argile :

Pour mesurer la conductivité de l'argile on a déplacé sur site ou se passe plusieurs problème au niveau des lignes de haute tension ces zones sont près des zones industriels ou il situé les usines de faïence et briquèterie. La figure IV.11 montre la courbe de la variation de résistance d'argile en fonction de la conductivité d'argile dans l'eau distillée.

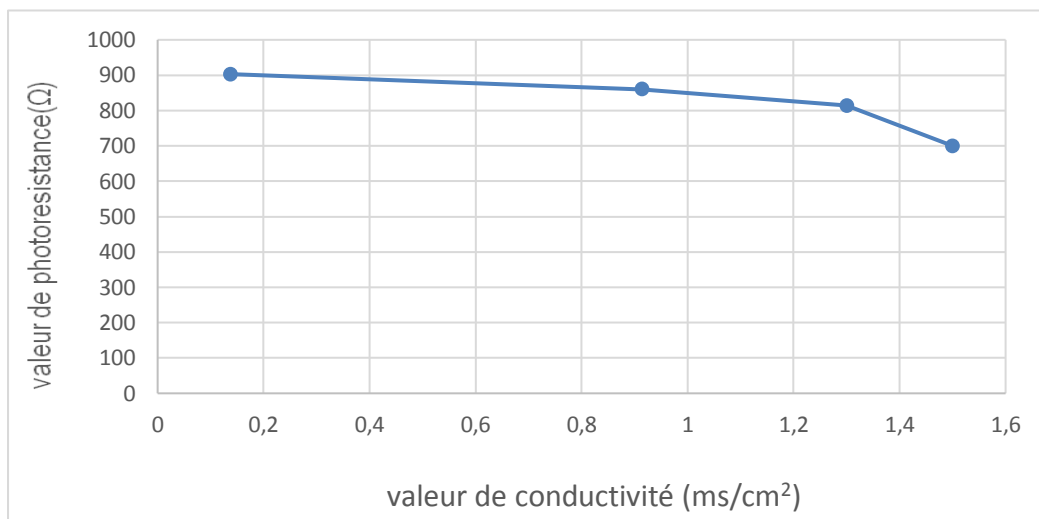


Figure IV.11 : variation de conductivité de l'argile en fonction de photorésistance.

D'après la courbe précédant on observe que la variation de conductivité du l'argile est inversement proportionnelle avec de résistance.

IV.3.4. Méthode de pulvérisation :

La méthode de pulvérisation a été choisie pour la pollution artificielle de la Bottom du l'isolateur.

Pour cette configuration (pollution uniforme), l'isolateur est humidifié avec une conductivité donnée en gardant une ouverture constante du pulvérisateur, L'humidification de Bottom est obtenue après deux pulvérisations de chaque côté de l'isolateur (figure IV.12) à une distance de 0.5 m qui est gardée constante durant toute l'opération avec sans humidifié de la surface.

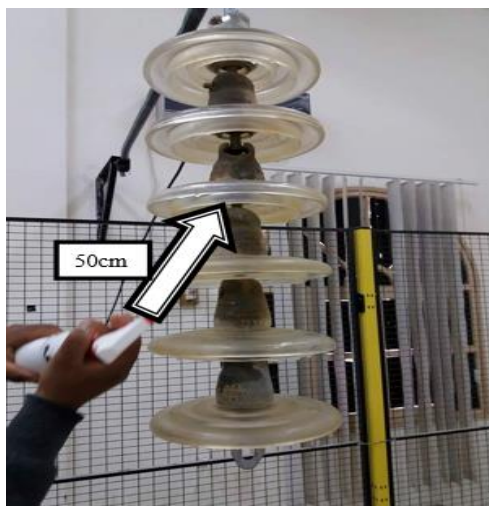


Figure IV.12 : Méthode de pulvérisation pour la configuration uniforme.

IV.3.5 Application de la couche de pollution :

La couche polluante est réalisée sur des isolateur réel de chaque type de pollution à l'isolateur, en humidifiant l'isolateur avec du l'eau distillé, chaque fois la couche polluante que nous changeons. En ce qui concerne la qualité du polluant et du degré de pollution pour chaque type de polluant Nous appliquons une tension alternative, et mesurons le courant de fuite.

IV.4. Correction atmosphérique :

Pour chaque essai que on effectuée on prenant les conditions atmosphériques par un appareil spécial électronique qui est présenter par la figure IV.13



Figure IV.13 : instrument de mesure pour les conditions atmosphériques (Humidité, température et pression).

IV.4.1. Influence de la densité relative de l'air :

La température et la pression, influent sur la rigidité diélectrique de l'air. Dans la CEI 60 (Commission d'Electrotechnique Internationale), nous trouvons la notion de densité relative qui est définie comme étant le rapport de la densité de l'air dans les conditions de pressions P et de température T, à la densité de l'air dans les conditions atmosphériques de référence dites normales, c'est à dire:

❖ Température ambiante $T_0 = 20.8^{\circ}\text{C}$

❖ Pression atmosphérique $P_0 = 1013 \text{ mbar} (= 760 \text{ mmHg})$

$$\partial = 0.289 \frac{p}{273+T} \quad \text{IV.1}$$

∂ : facteur de correction de la densité du l'air.

La pression P est en mbar et la température T en $^{\circ}\text{C}$.

IV.4.2. Influence de l'humidité :

La tension d'amorçage est particulièrement moins sensible à la variation de l'humidité dans le cas des ondes rapides ou très rapides. C'est le cas pour les chocs de foudre. Ainsi, nous ne tiendrons pas compte de ce facteur. Durant nos essais l'humidité relative variait entre 34% et 56%.

IV.5. Procédé d'essais :

Les essais que nous avons effectués, nous permettent de faire une analyse de l'évolution le courant de fuit.

IV.5.1. Mesure le courant de fuit :

Avant chaque essai, nous nettoyons la chaine d'isolateur par coton propres, imbibé d'eau distillé, pour éliminer les traces de couche polluant. La mesure courant de fuit a été effectuée pour la tension alternative, en variant la conductivité de la couche polluante de l'élément 01 à l'élément 06.

IV.5.2. Forme de courant de fuite et tension appliquée :

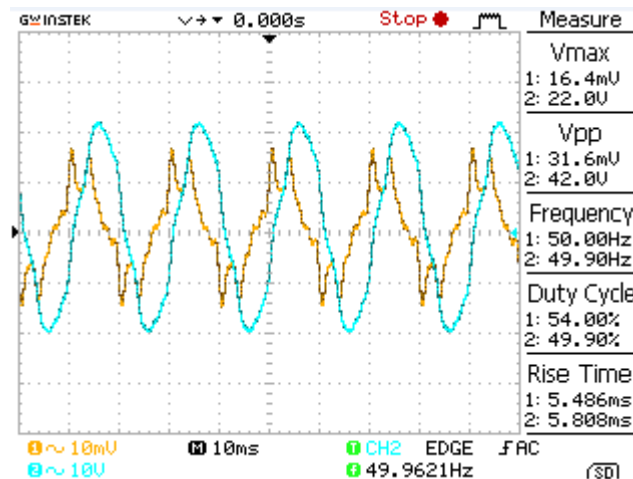


Figure IV.14 : Forme de courant de fuite et tension appliquée.

— : tension appliquée.

— : courant de fuite.

IV.6. Méthode d'extraite des résultats en Matlab :

Pour extraire les résultats expérimentaux dans notre laboratoire à haute tension à l'Université d'el-oued, que nous avons enregistré par oscilloscope enregistré dans EXCEL.

Nous avons un programme d'inclusion dans Matlab (command Windows) et par Matlab Simulink nous avons analysé les résultats par le toolbox présenté en figure ci-dessous :

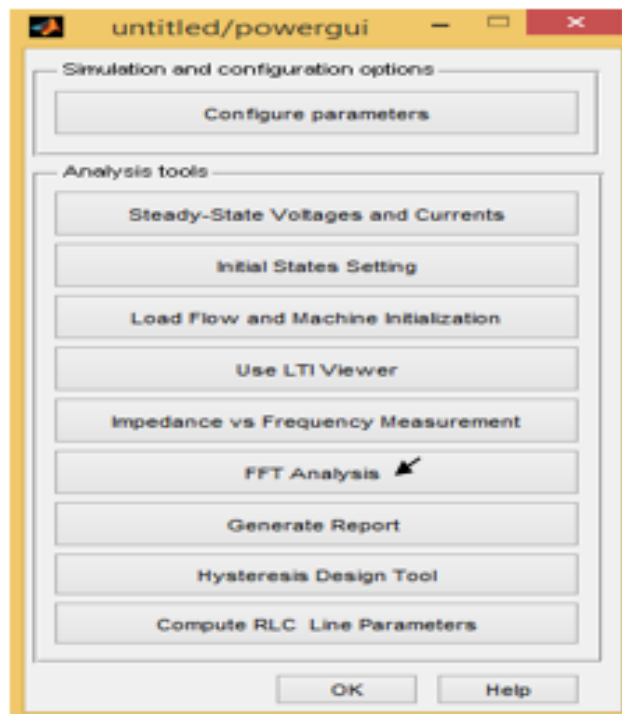


Figure IV.15 : opération N°01 d'extraire de résultat en Matlab.

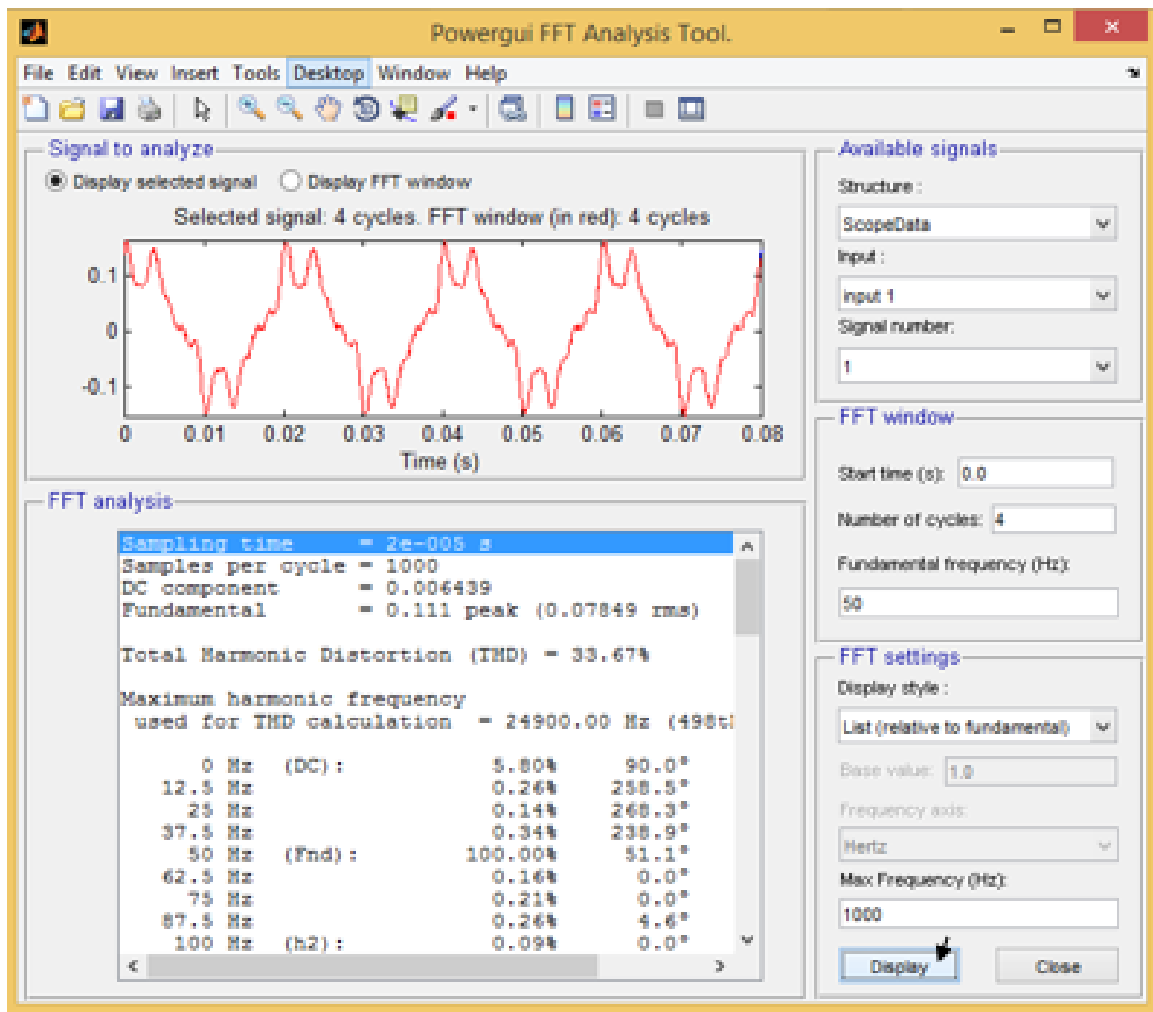


Figure IV.16 : opération N°02 d'extraire de résultat en Matlab.

IV.7.1. L'effet des conductivités sur le courant de fuit :

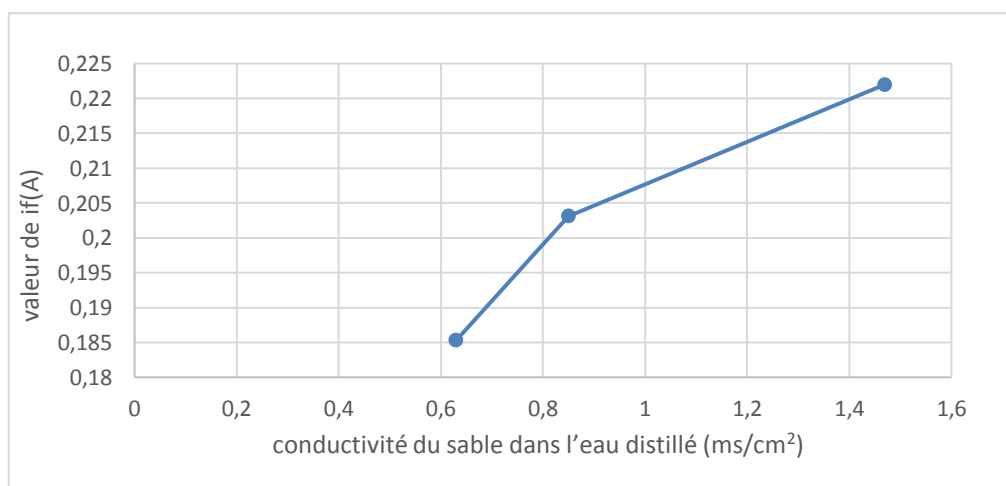


Figure IV.17 : variation de courant de fuit en fonction de la conductivité du sable.

Chapitre IV : Étude Et Résultats Expérimentale

D'après la courbe précédant on observe que la variation de courant de fuit (fondamentale) est proportionnelle avec la conductivité presque ment linéaire, sa valeur atteinte une valeur maximale presque 0.23mA.

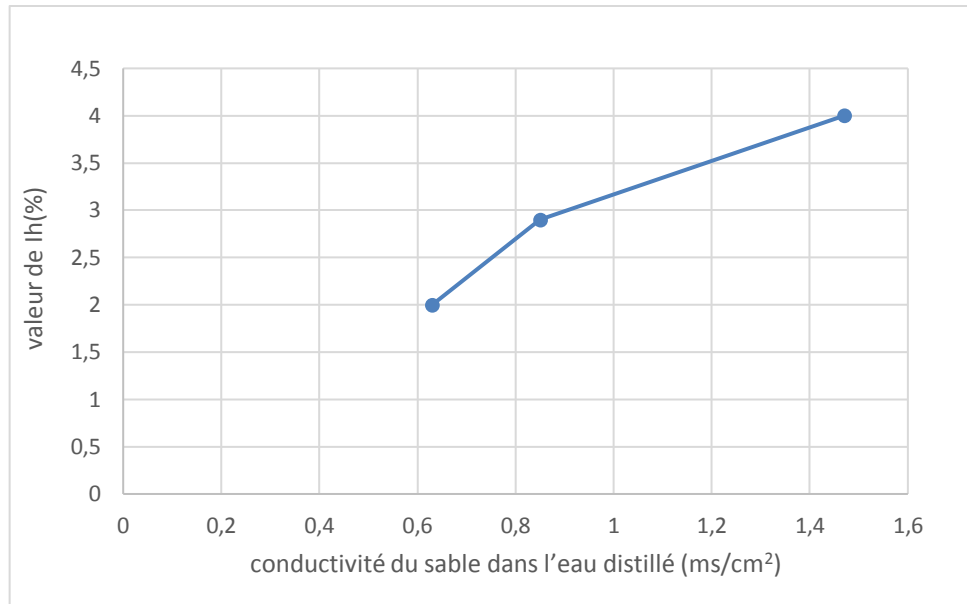


Figure IV.18: variation du 3^{iem} harmonique(Ih3)de courant de fuit en fonction de la conductivité du sable.

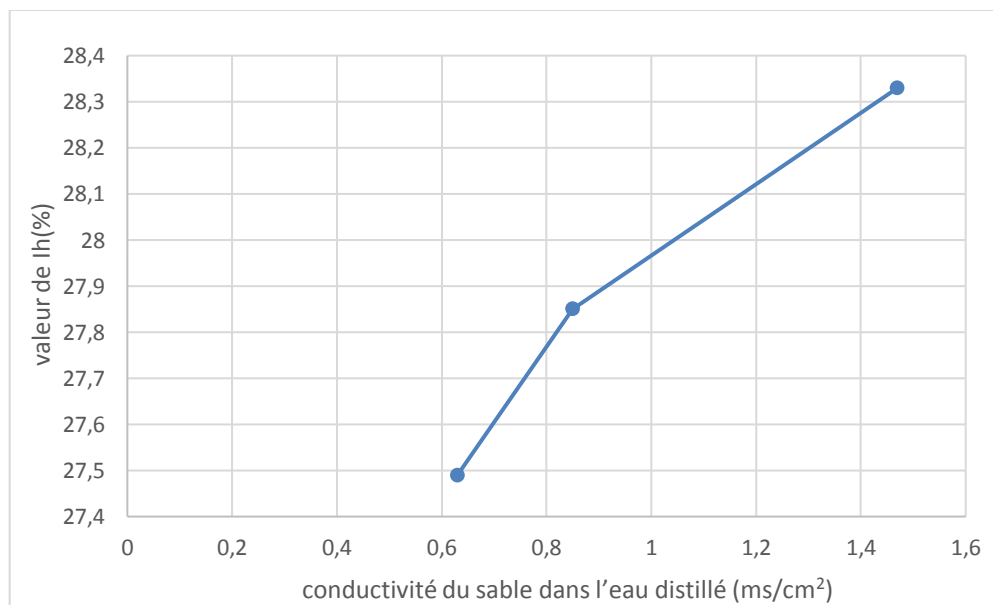


Figure IV.19 : variation du 5^{iem} harmonique(Ih5)de courant de fuit en fonction de la conductivité du sable.

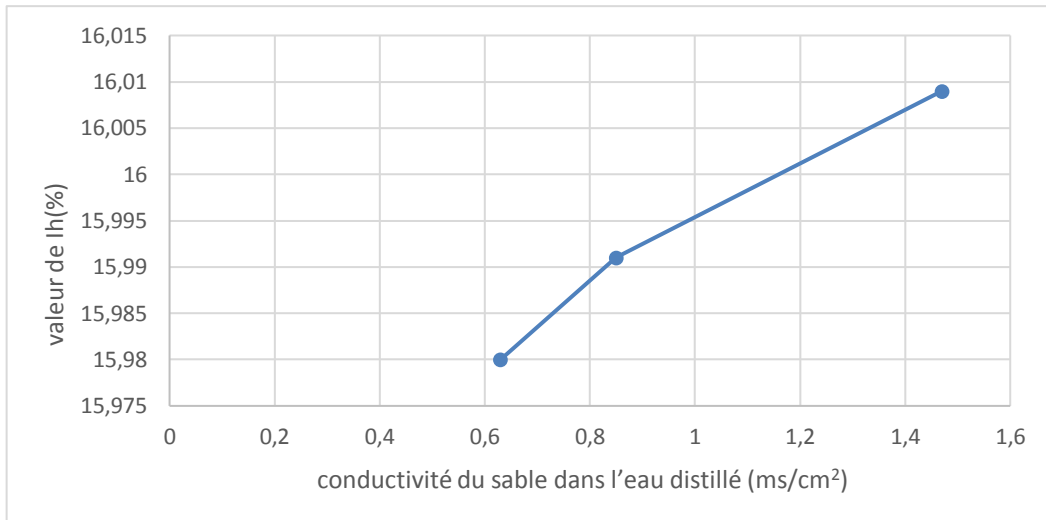


Figure IV.20 : variation du 7^{iem}harmonique(Ih7) de courant de fuit en fonction de la conductivité du sable.

D'après les figures précédant on observe que la variation de valeur de l'harmonique en % du courant de fuit est proportionnelle avec la conductivité, mais la valeur de pourcentage de l'harmonique Ih5 et Ih7 sont supérieur à la valeur de Ih3.

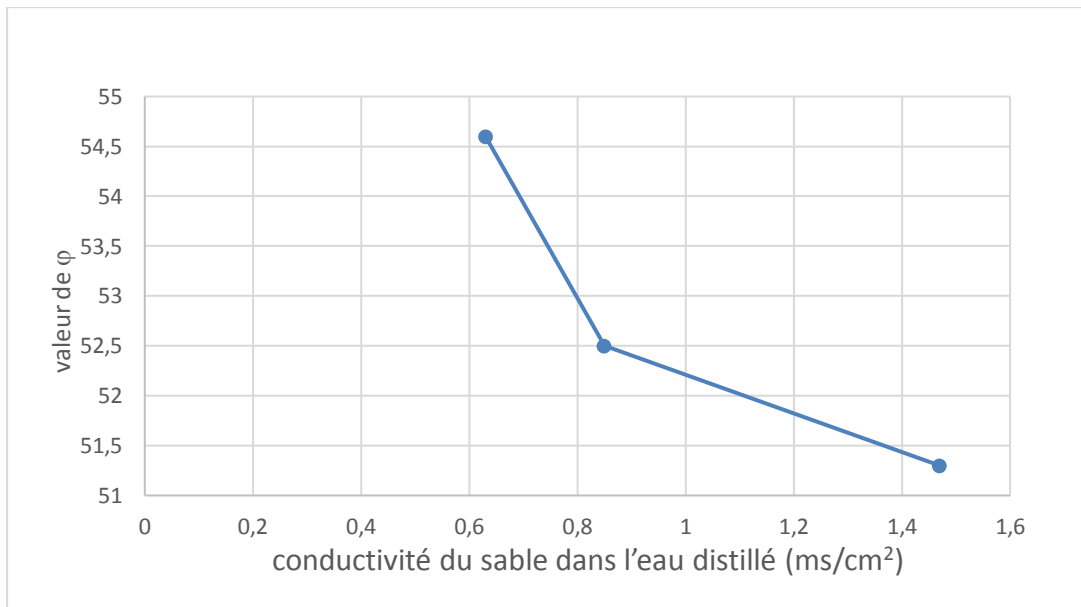


Figure IV.21: variation d'argument du courant de fuit en fonction de la conductivité du Sable.

On observe d'après la figure IV.21 que l'angle de phase du courant de fuite fondamentale diminuant en fonction de l'augmentation de la conductivité dû au fait que dans le cas si l'isolateur est propre la propriété électrique de l'impédance équivalente d'isolateur est capacitive et quand la surface de l'isolateur est polluée telle propriété change à la résistivité.

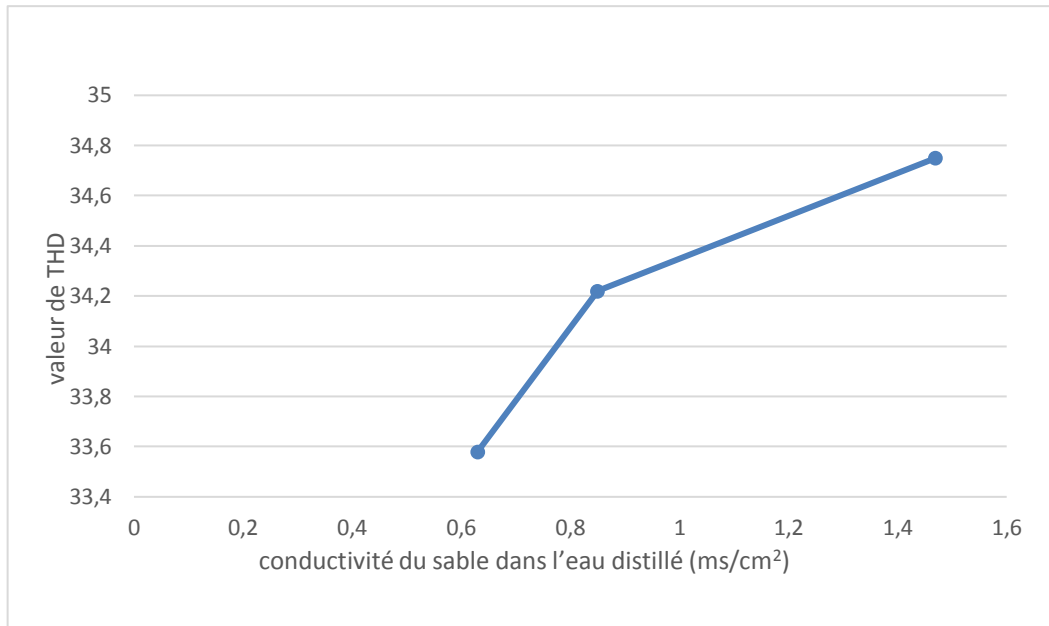


Figure IV.22 : variation du THD en fonction de la conductivité du Sable.

On remarque que le taux de distorsion harmonique augmente proportionnellement à la conductivité. Cette distorsion est due à la présence des harmonique n°3, 5, et 7.

D'après la courbe précédant on observe que la variation de THDest proportionnelle avec la conductivité presque ment linéaire.

La figure IV.23 montre les mesures faites par le conductimètre au laboratoire.



Figure IV.23: Mesures des différentes concentrations du sable dans l'eau distillé.

IV.7.2. L'effet d'élément pollué sur le courant de fuite :

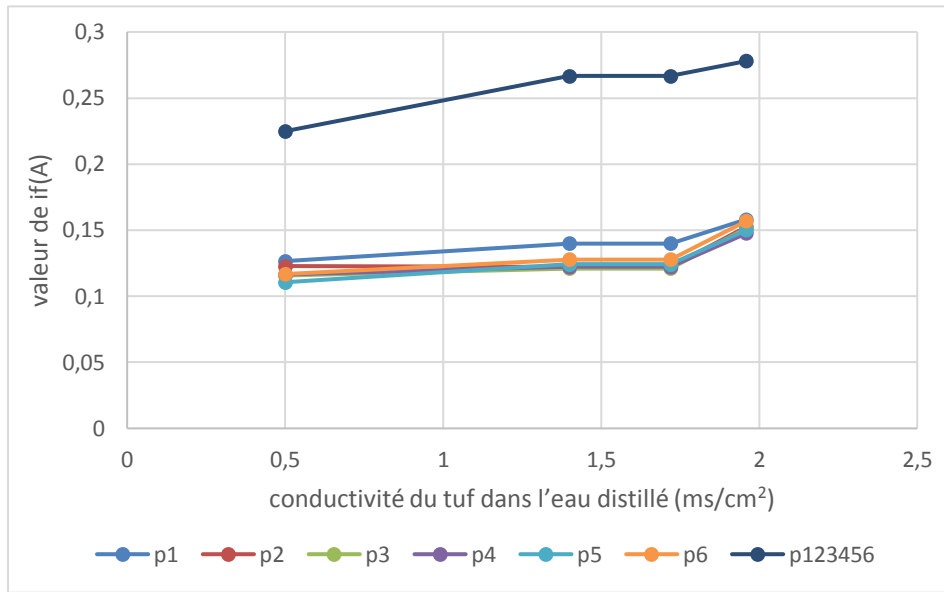


Figure IV.24 : variation de courant de fuite en fonction de la conductivité du tuf.

D'après cette courbe, la variation a une augmentation faible pour les cas quand la pollution dans un élément séparant, mais dans le cas quand la pollution dans tous les éléments la valeur de courant de fuite est grande.

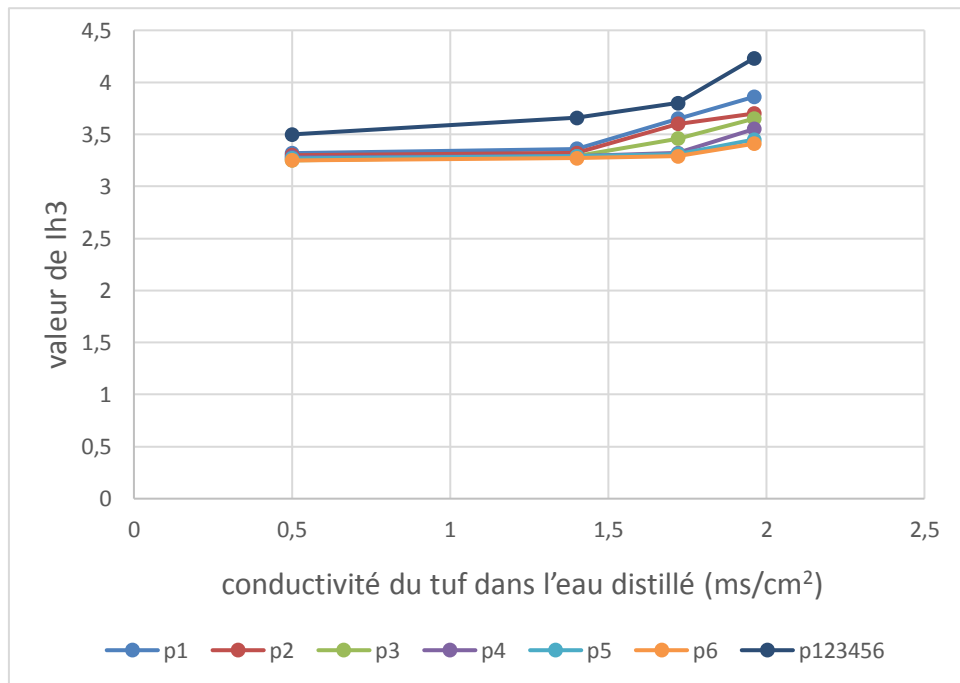


Figure IV.25: variation du 3^{iem}harmonique(Ih3)de courant de fuite en fonction de la conductivité du tuf .

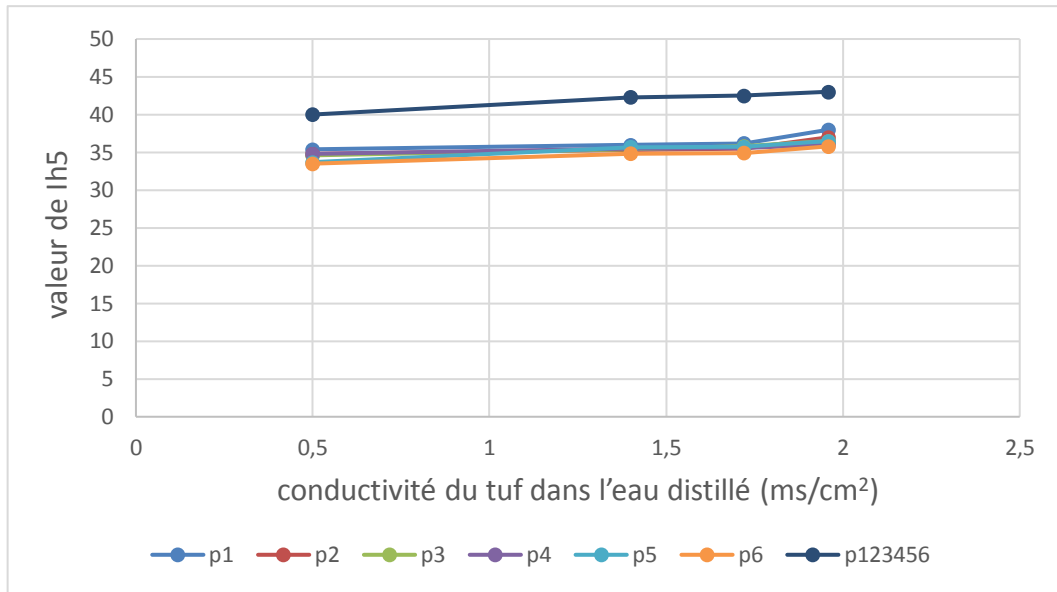


Figure IV.26: variation du 5^{iem} harmonique(Ih5)de courant de fuite en fonction de la conductivité du tuf .

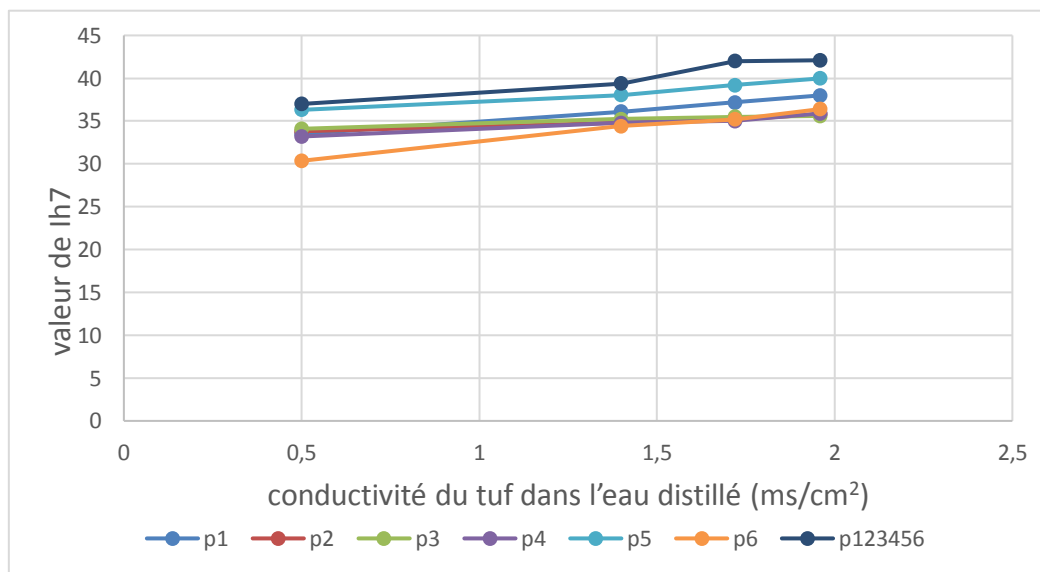


Figure IV.27: variation du 7^{iem} harmonique(Ih7)de courant de fuite en fonction de la conductivité du tuf.

D'après les figures précédant on observe que la variation de valeur de l'harmonique en % du courant de fuite est proportionnelle avec la conductivité, mais la valeur de pourcentage de l'harmonique Ih3 sont moins que Ih5et Ih7.

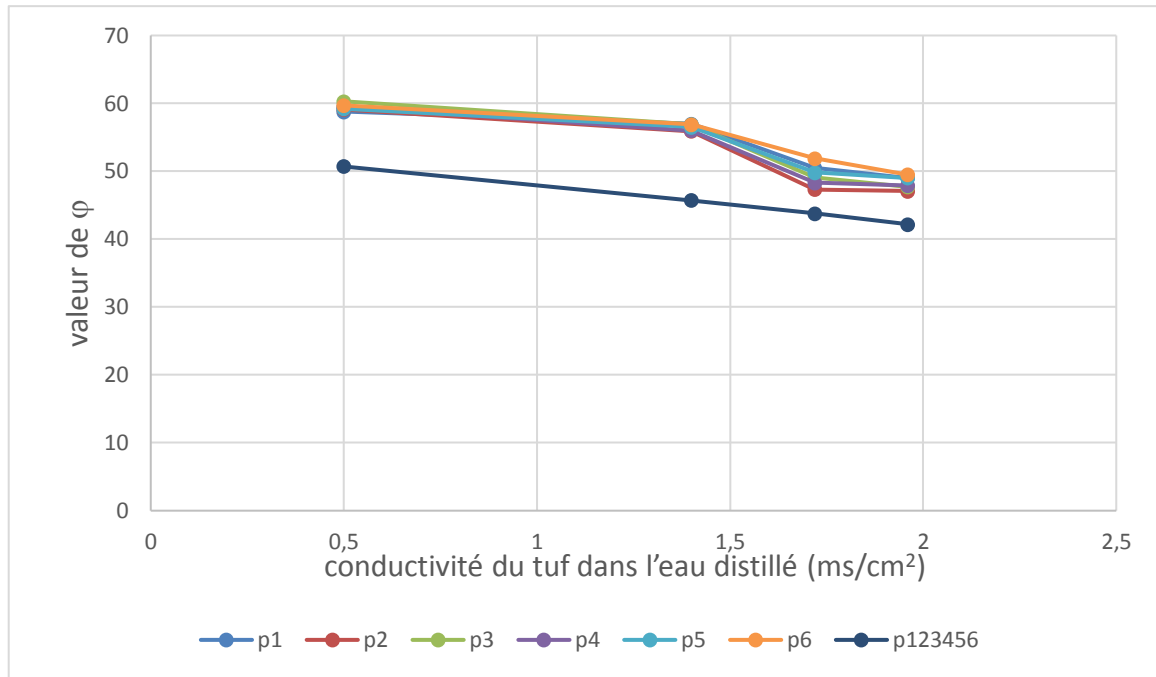


Figure IV.28: variation de l'argument du courant de fuite en fonction de la conductivité du Tuf.

On observe d'après la figure IV.28 que l'angle de phase du courant de fuite fondamentale diminuant en fonction de l'augmentation de la conductivité dû au fait que dans le cas si l'isolateur est propre la propriété électrique de l'impédance équivalente d'isolateur est capacitive et quand la surface de l'isolateur est polluée telle propriété change à la résistivité.

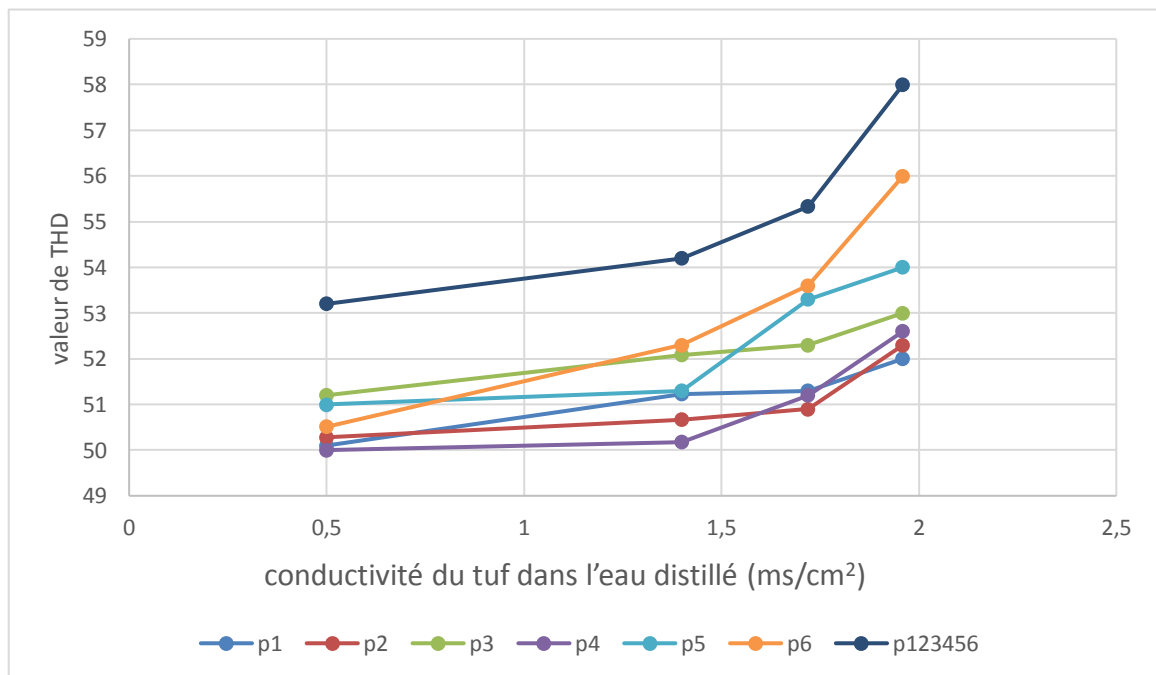


Figure IV.29: variation THD en fonction de la conductivité du Tuf.

Chapitre IV : Étude Et Résultats Expérimentale

On remarque que le taux de distorsion harmonique augmente proportionnellement à la conductivité. Cette distorsion est due à la présence des harmoniques n°3, 5, et 7. Ainsi on observe une augmentation rapide de THD quand la valeur de la conductivité est de 1.4 (ms/cm).

Les résultats des conductivités de tuf sont mesurés en laboratoire de haute tension d'une université d'El Oued (figure IV.30). Ces échantillons sont pris d'après les carrières de tuf près des lignes aériennes de haute tension.



Figure IV.30: mesures des différentes concentrations de tuf dans l'eau distillée.

IV.7.3. L'effet de degré de pollution sur le courant de fuite :

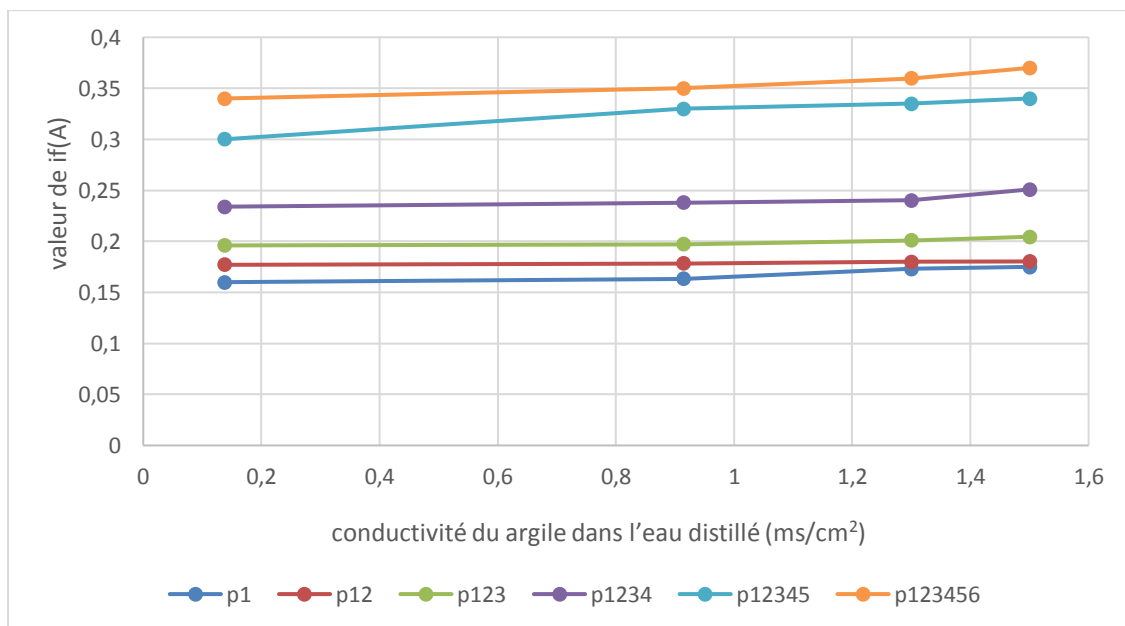


Figure IV.31: variation de courant de fuite en fonction de la conductivité de l'argile.

Chapitre IV : Étude Et Résultats Expérimentale

D'après cette courbe, la variation a une augmentation faible en fonction de la conductivité mais dans les cas quand chaque fois en ajoute la pollution de profile nouveaux graduellement (élément 1 à élément 6) on observe une augmentation important.

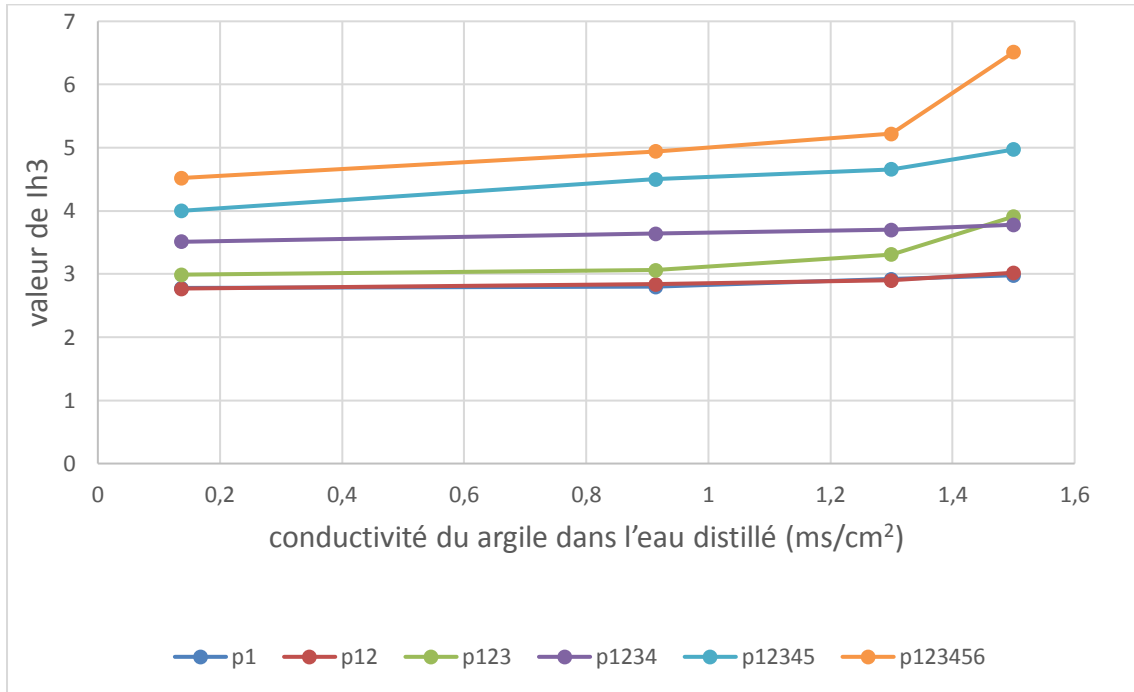


Figure IV. 32 :variation du 3^{iem} harmonique(Ih3) de courant de fuit en fonction de la conductivité de l'argile.

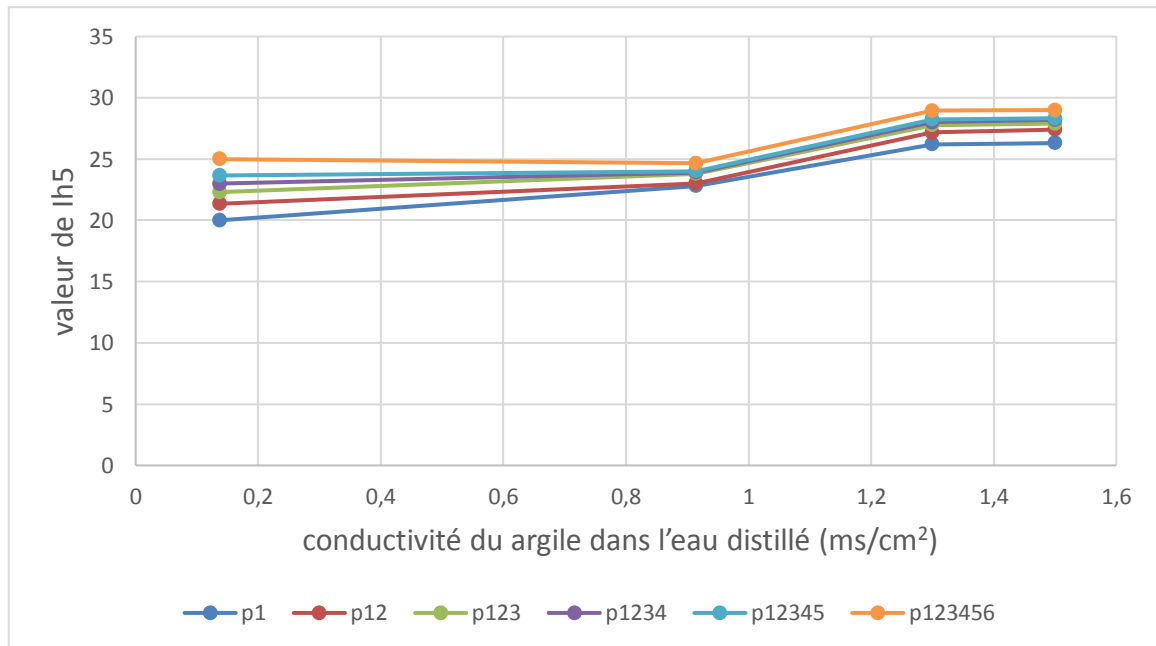


Figure IV.33: variation du 5^{iem} harmonique(Ih5)de courant de fuit en fonction de la conductivité de l'argile .

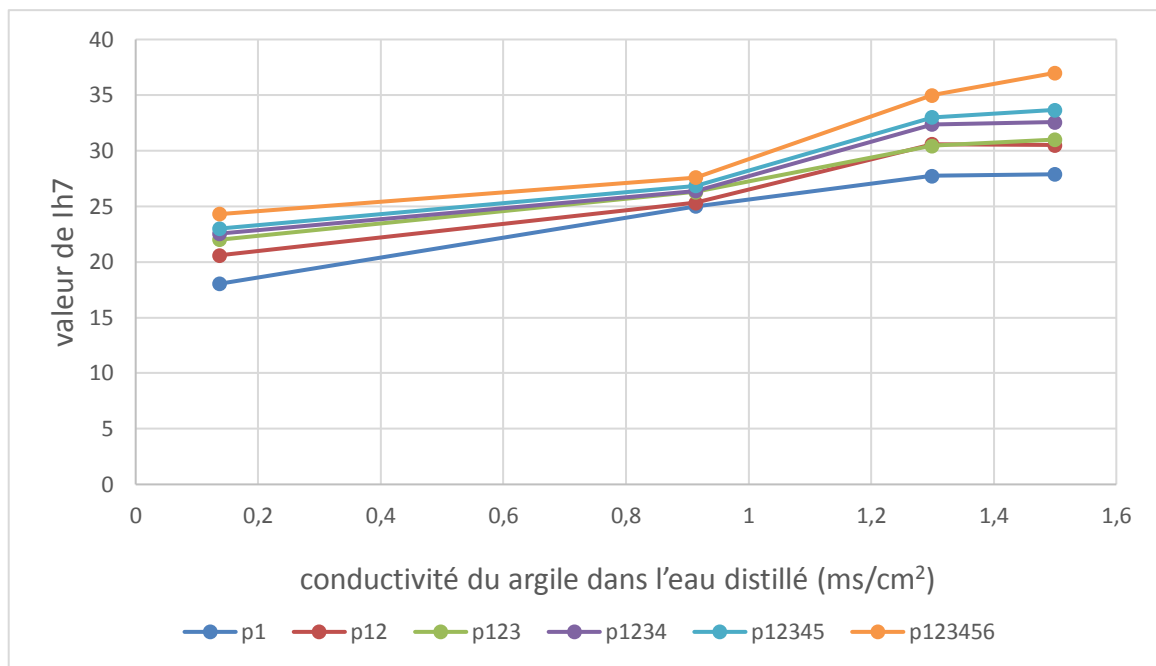


Figure IV.34: variation du 7^{iem} harmonique(Ih7)de courant de fuit en fonction de la conductivité de l'argile.

D'après les figures précédant on observe que la variation de valeur de l'harmonique en % du courant de fuit est proportionnelle avec la conductivité, mais la valeur de pourcentage de l'harmonique Ih3 et Ih7sont moins valeur de Ih5.

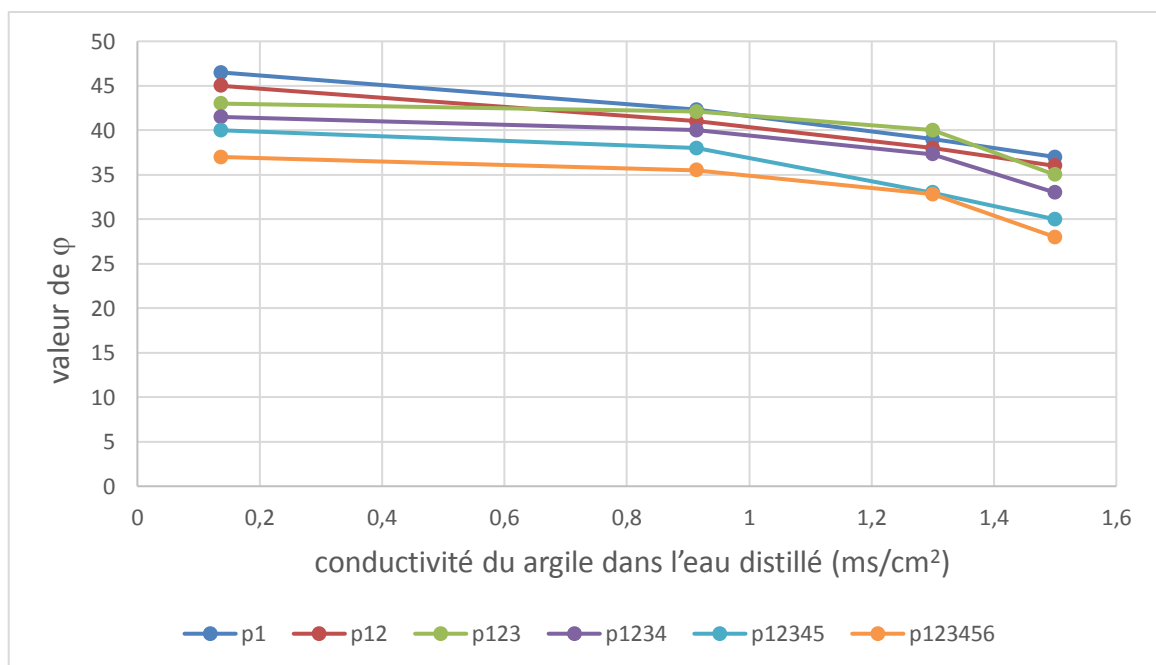


Figure IV.35: variation d'argument du courant de fuit en fonction de la conductivité de L'argile.

Chapitre IV : Étude Et Résultats Expérimentale

On observe d'après la figure IV.35 que l'angle de phase du courant de fuite fondamentale diminuant en fonction de l'augmentation de la conductivité dû au fait que dans le cas si l'isolateur est propre la propriété électrique de l'impédance équivalente d'isolateur est capacitive et quand la surface de l'isolateur est polluée telle propriété change à la résistivité.

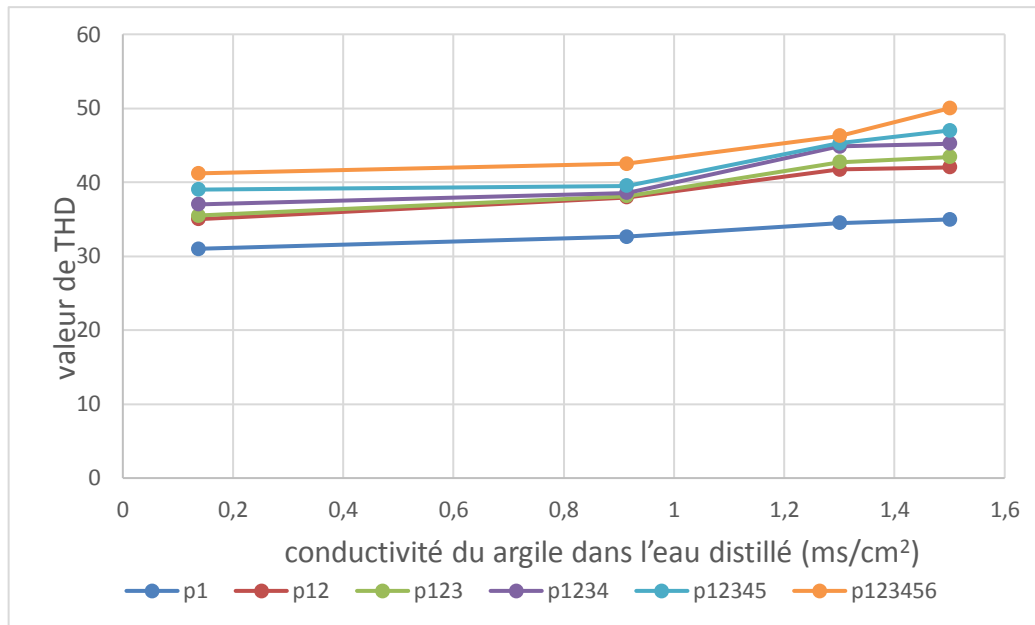


Figure IV.36: variation THD en fonction de la conductivité de l'argile.

On remarque que le taux de distorsion harmonique augmente proportionnellement à la conductivité. Cette distorsion est due à la présence des harmonique n°3, 5, et 7

Les résultats des conductivités de l'argile sont mesurés en laboratoire de haute tension d'université d'el oued (figure IV.37). Ces échantillons sont pris d'après les carrières de l'argile près des lignes aériennes de haute tension

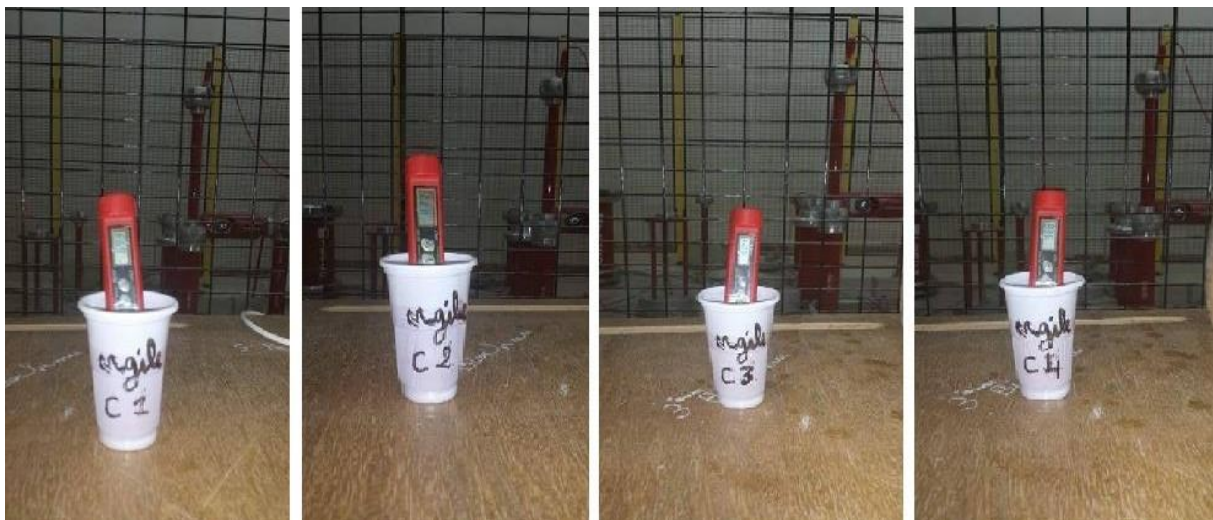


Figure IV.37 : mesures des différentes concentrations d'argile dans l'eau distillée.

IV.7.4. L'effet de cas de pollution sur le courant de fuit :

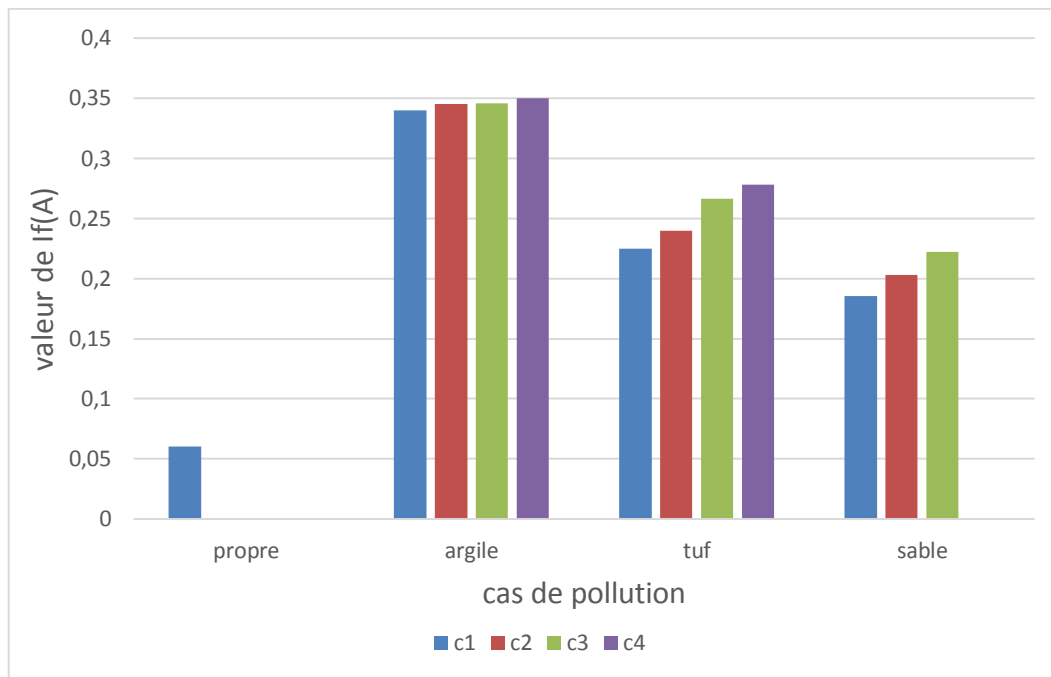


Figure IV.38 : variation de courant de fuit en fonction de cas de pollution.

D'après cet organigramme, la variation a une augmentation faible en fonction de la conductivité dans l'argile.

Dans les cas du sable et de tuf augmentation important en fonction de la conductivité, mais dans le cas propre on observe une valeur très faible.

Pour comparer entre les cas des pollutions on observe que la valeur de l'argile est grande valeur vis à vis le tuf et le sable.

VI.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons cité les dispositifs expérimentaux, (circuit d'essai, etc.), nous avons présenté la chaîne d'isolateur réel utilisé au labo, ainsi que le mode expérimental et préparation du modèle pour chaque essai. Aussi nous avons présenté les différentes sources de pollution désertiques situées dans notre zone, telles que le sable, le tuf et l'argile. Après ce dernier nous avons donné les procédures d'essai pour mesurer le courant de fuite. Ensuite nous avons appliqué ces pollutions pour des différentes conductivités sur notre modèle de laboratoire, ces essais nous définiront le comportement d'isolateur de haute tension dans cette région désertique. Finalement nous présentons les résultats expérimentaux obtenus et les interprétations.

Nous concluons qu'il y a une différence dans le courant de fuite lorsque l'on change le type de polluant (état humide) où nous avons constaté que le type le plus dangereux des polluants sur les isolants dans ce cas est l'argile, et aussi on remarque quand on augmente la conductivité la valeur du courant de fuite et THD sont augmentées et que la valeur des harmoniques I_{h3} , I_{h5} et I_{h7} augmente avec la conductivité.



Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans le cadre de notre étude, les essais effectués au Laboratoire de Haute tension de l'université d'el oued, avaient pour objectif d'étudier le comportement d'un isolateur pollué, lorsqu'une tension alternative lui est appliquée. Pour cela, des solutions chimiques salines (à base de pollution en sable, tuf, argile et de l'eau distillée) des conductivités différentes ont été utilisées. En outre, une répartition continue (isolateur réel) de la pollution a été considérée. Lors des essais expérimentaux, nous avons suivi les variations de courant de fuite, en fonction de la conductivité et de pollution sur la surface intérieure de l'isolateur. Nous avons conclu que le courant de fuite, change en fonction de la conductivité. En effet, le courant de fuite augmente avec l'augmentation de la conductivité volumique de la pollution. Par voie de conséquence, l'isolateur est moins rigide lorsqu'il est appliqué par une couche polluante. Il est évident que le courant de fuite est affecté par l'état de surface interne de l'isolateur.

Nous constatons également qu'à partir d'un certain niveau de tension, toute augmentation de celle-ci est accompagnée par un bruit qui croît avec l'augmentation de la tension. Ce bruit est généralement attribué à l'effet de couronne qui est une phase initiale du contournement. Nous avons aussi constaté une évaporation progressive de la couche de pollution, qui augmente proportionnellement avec l'augmentation de tension. Cette évaporation peut être expliquée par l'augmentation de la densité de courant au surface de l'isolateur proportionnellement à la conductivité générant un dégagement de chaleur important par l'effet joule.

Nous avons constaté que le type le plus dangereux des agents polluants sur les isolateurs dans le cas d'argile, et aussi on remarque quand on augmente la conductivité la valeur du courant de fuite et le THD augmentant. et que la valeur des harmoniques I_{h3} , I_{h5} et I_{h7} augmente avec la conductivité.

Bibliographique

Bibliographique:

[1] - M. TERKMANI, M.BABOUAMER, " Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension ", PFE, USTO, juin 2005.

[2] M. TEGUAR, A. BOUBAKEUR, " Pollution des Isolateurs de Haute Tension ",
Laboratoire de Haute Tension, Département de Génie Électrique, École Nationale
Polytechnique d'Alger (E.N.P.).

[3] - L. ARRABIY, " Visualisation et Traitement de Signal de Courant de Fuite sur une
Surface Isolante Polluée ", PFE, Département de Génie Électrique, École Nationale
Polytechnique d'Alger (E.N.P.), 1999.

[4]- S. LOTFI, S. DJAFRI, " Contribution à l'Étude de la Pollution des Isolateurs des Lignes
Aériennes de Haute Tension dans la Région de l'Arbaa ", PFE, Département d'électronique et
d'électrotechnique, université des sciences et de la technologie d'Alger, Juin 1982.

[5]-M. faramarzi palangar a, M. Mirzaie b, Mohammad faramarzi palangarc " a Faculty of
Electrical and Computer Engineering", Babol University of Technology, Babol, Iran. c Power
Distribution Company of Golestan-ramyan, Iran. The 20th Iranian Electrical Power
Distribution Conference (EPDC2015), 28-29 April 2015, Zahedan, Iran.

[6]- Petr N. Bychkov , Irina K. Zabrodina, and Vladislav S. Shlapak " Isolation Contamination
des lignes de transport aériennes par des conditions extrêmes de service" (2016).

[7]- O. E. Gouda and Adel Z. El Dein "Experimental Techniques to Simulate Naturally Polluted
High Voltage Transmission Line Insulators" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical
Insulation Vol. 21, No. 5; October 2014.ss

[8]- A. Azizi Tousi, M. Mirzaie" Faculty of Electrical and Computer Engineering", Babol
University of Technology, Babol, Iran. Vol. 1, No. 2, Summer & Fall 2013, Pages: 74-83

[9]- Nasir Ahmed Algeelani and M. Afendi M. Piah" Institute of High Voltage and High Current
University Technology Malaysia Johor, Malaysia" 2012 4th International Conference on
Intelligent and Advanced Systems (ICIAS2012).

- [10]- L. Cheng , H. Mei, L. Wang, Z. Guan and F. Zhang " Research on Aging Evaluation and Remaining Lifespan Prediction of Composite Insulators in High Temperature" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 23, No. 5; October 2016.
- [11]- Mousalreza Faramarzi Palangar and Mohammad Mirzaie" Department of Electrical and Computer Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran " Electric Power Components and Systems, Vol. 00 (2016), No. 00
- [12]- Ahmed Seddik Bouhadjar et AMOKRANE Mounir "Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur par technique d'ondelettes et modélisation "Juin 2008.
- [13] Abimouloud, "Comportement d'une surface isolante partiellement polluée sous tension alternative 50 Hz", Thèse de Magister, Génie Electrique, ENP 1999.
- [14] 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.
- [15] Frédéric Truchetet, "Ondelettes pour le signal numérique", EDITION HERMES, Avril 1998.
- [16] S. Mallat, «Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases of $L_2(\mathbb{R})$ », Trans. Am. Math. Soc., vol. 315, N°1, pp. 69-87, sep. 1989.
- [17] F.De Coulon, "Théorie et traitement des signaux ", Edition Dunod.
- [18] A.W.M.Van Den Enden, N.A.M.Verhoeckx, "Traitement Numérique du signal ", Edition Masson.
- [19] M.Kunt, "Traitement numérique des signaux", Edition Dunod.
- [20] C.Prévé, "Les réseaux électriques industriels 2", Edition Lavoisier.
- [21] J.Max, J-L.Lacoume, "Méthodes et techniques de traitement du signal et application aux mesures physiques", Edition Masson.
- [22] F.Auger, "Introduction à la théorie du signal et de l'information", Edition Technip.
- [23] G.Asch, "Acquisition de données du capteur à l'ordinateur", Edition Dunod.
- [24] S. Mallat. "A Wavelet Tour of Signal Processing", Second Edition, ACADEMIC PRESS.

[25] A.N. Akansu, R. A. Haddad « Multiresolution Signal Decompositionm Transforms, Subbands, and Wavelets », Second Edition, New Jersey Institute of Technology Newark, NJ, ACADEMIC PRESS, 2001.

[26] BOUZIDA Ahcene, “Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique d’ondelette“, Mémoire de Magister 2008, l’Ecole Nationale Polytechnique.

Annexe

Annexe :

Valeur de conductivité (ms/cm)	Valeur de résistances(Ω)
0,63	860
0,85	841
1,47	765

Tableau .1 : variation de conductivité du sable en fonction de résistance

Valeur de conductivité (ms/cm)	Valeur de résistances(Ω)
0,5	938
1,4	913
1,72	864
1,96	775

Tableau .2: variation de conductivité du tuf en fonction de résistance.

Valeur de conductivité (ms/cm)	Valeur de résistances(Ω)
0,137	903
0,914	860
1,3	814
1,5	700

Tableau .3: variation de conductivité de l'argile en fonction de résistance.

Valeur de conductivité (ms/cm)	Valeur de if(A)
0,63	0,1853
0,85	0,2031
1,47	0,222

Tableau .4: variation de courant de fuit en fonction de la conductivité du sable.

Valeur de conductivité (ms/cm)	Valeur de Ih(%)
0,63	2
0,85	2,9
1,47	4

Tableau .5: variation du 3^{iem} harmonique(Ih3) de courant de fuit en fonction de la conductivité du sable.

Valeur de conductivité (ms/cm)	valeur de lh(%)
0,63	27,49
0,85	27,85
1,47	28,33

Tableau.6: variation du 5^{iem} harmonique(Ih5) de courant de fuit en fonction de la conductivité du sable.

Valeur de conductivité (ms/cm)	valeur de lh(%)
0,63	15,98
0,85	15,991
1,47	16,009

Tableau .7: variation du 7^{iem} harmonique(Ih7) de courant de fuit en fonction de la conductivité du sable.

Valeur de conductivité (ms/cm)	Valeur d'argument
0,63	54,6
0,85	52,5
1,47	51,3

Tableau .8: variation d'argument du courant de fuit en fonction de la conductivité du Sable.

Valeur de conductivité (ms/cm)	Valeur de THD
0,63	33,58
0,85	34,22
1,47	34,75

Tableau .9: variation du THD en fonction de la conductivité du Sable.

Valeur de conductivité (ms/cm)	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p123456
0,5	0,1266	0,1227	0,1157	0,1165	0,1106	0,1168	0,2249
1,4	0,1399	0,1222	0,1211	0,1223	0,1241	0,1279	0,2666
1,72	0,1399	0,1222	0,1211	0,1223	0,1241	0,1279	0,2666
1,96	0,1582	0,1526	0,1514	0,1476	0,15	0,157	0,278

Tableau .10: variation de courant de fuit en fonction de la conductivité du tuf.

Valeur de conductivité (ms/cm)	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p123456
0,5	3,32	3,3	3,25	3,28	3,27	3,25	3,5
1,4	3,36	3,32	3,29	3,29	3,29	3,27	3,66
1,72	3,65	3,6	3,46	3,32	3,31	3,29	3,8
1,96	3,86	3,7	3,65	3,55	3,45	3,41	4,23

Tableau .11: variation du 3^{iem} harmonique(Ih3)de courant de fuit en fonction de la conductivité du tuf .

Valeur de conductivité (ms/cm)	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p123456
0,5	35,4	34,8	34,6	34,8	33,7	33,5	40
1,4	35,99	35,33	35,4	35,53	35,66	34,83	42,3
1,72	36,2	35,5	35,8	35,6	35,7	34,9	42,5
1,96	38	37	36,5	36	36,5	35,8	43,02

Tableau .12: variation du 5^{iem} harmonique(Ih5)de courant de fuit en fonction de la conductivité du tuf .

Valeur de conductivité (ms/cm)	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p123456
0,5	33,5	33,81	34,1	33,2	36,31	30,36	37
1,4	36,11	34,82	35,24	34,8	38,06	34,41	39,4
1,72	37,2	35,2	35,5	35	39,2	35,2	42
1,96	38	35,8	35,6	35,9	39,98	36,4	42,1

Tableau .13: variation du 7^{iem} harmonique(Ih7)de courant de fuit en fonction de la conductivité du tuf.

Valeur de conductivité (ms/cm)	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p123456
0,5	58,8	59,1	60,3	59,5	59,2	59,7	50,7
1,4	57	55,9	56,9	56	56,5	56,9	45,7
1,72	50,5	47,3	49,1	48,3	49,8	51,9	43,8
1,96	49	47,1	47,7	47,9	49	49,5	42,2

Tableau .14: variation de l'argument du courant de fuit en fonction de la conductivité du Tuf.

Valeur de conductivité (ms/cm)	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p123456
0,5	50,1	50,28	51,2	50	51	50,51	53,2
1,4	51,23	50,67	52,08	50,18	51,3	52,3	54,2
1,72	51,3	50,9	52,3	51,2	53,3	53,6	55,33
1,96	52	52,3	53	52,6	54	56	58

Tableau .15: variation THD en fonction de la conductivité du Tuf.

Valeur de conductivité (ms/cm)	p1	p12	p123	p1234	p12345	p123456
0,137	0,16	0,177	0,196	0,234	0,3	0,34
0,914	0,1634	0,1783	0,1971	0,238	0,33	0,35
1,3	0,173	0,1799	0,201	0,2402	0,335	0,3598
1,5	0,175	0,1803	0,2045	0,2509	0,34	0,37

Tableau .16: variation de courant de fuit en fonction de la conductivité de l'argile.

Valeur de conductivité (ms/cm)	p1	p12	p123	p1234	p12345	p123456
0,137	2,78	2,77	2,99	3,51	4	4,52
0,914	2,8	2,84	3,06	3,64	4,5	4,94
1,3	2,92	2,9	3,31	3,7	4,66	5,22
1,5	2,98	3,02	3,91	3,78	4,97	6,51

Tableau .17: variation du 3^{iem} harmonique(Ih3) de courant de fuit en fonction de la conductivité de l'argile.

Valeur de conductivité (ms/cm)	p1	p12	p123	p1234	p12345	p123456
0,137	20	21,35	22,3	23	23,66	25
0,914	22,8	23,03	23,79	23,9	24	24,66
1,3	26,2	27,17	27,78	28	28,23	28,95
1,5	26,3	27,4	27,9	28,2	28,33	29

Tableau .18: variation du 5^{iem} harmonique(Ih5)de courant de fuit en fonction de la conductivité de l'argile .

Valeur de conductivité (ms/cm)	p1	p12	p123	p1234	p12345	p123456
0,137	18,04	20,6	22	22,55	23	24,3
0,914	25	25,33	26,3	26,4	26,85	27,6
1,3	27,75	30,58	30,44	32,36	33	35
1,5	27,88	30,5	31	32,58	33,67	37

Tableau .19: variation du 7^{iem} harmonique(Ih7)de courant de fuit en fonction de la conductivité de l'argile.

Valeur de conductivité (ms/cm)	p1	p12	p123	p1234	p12345	p123456
0,137	46,5	45	43	41,5	40	37
0,914	42,3	41	42,1	40	38	35,5
1,3	39	38	40	37,3	33	32,8
1,5	37	36	35	33	30	28

Tableau .20: variation d'argument du courant de fuit en fonction de la conductivité de L'argile.

Valeur de conductivité (ms/cm)	p1	p12	p123	p1234	p12345	p123456
0,137	31	35	35,5	37	39	41,2
0,914	32,64	37,94	38,11	38,55	39,5	42,51
1,3	34,5	41,72	42,73	44,83	45,28	46,25
1,5	34,97	42	43,4	45,2	47	50

Tableau .21: variation THD en fonction de la conductivité de l'argile.

	c1	c2	c3	c4
propre	0,06042			
argile	0,34	0,345	0,3455	0,35
tuf	0,2249	0,24	0,2666	0,278
sable	0,1853	0,2031	0,222	

Tableau .22: variation de courant de fuit en fonction de cas de pollution.