

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département d'Electrotechnique**  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'  
**Ingénieur d'état en Electrotechnique**

Intitulé

**Signal du courant de fuite à la surface d'un isolateur de haute tension  
sous pollution désertique**

Présenté par  
**Aicha LAIDOUDI et Nada ZOUZOU**

Sous la direction de **Pr. A.MEKHALDI**  
Soutenu publiquement le 16 juin 2016

**Membres du Jury**

Président :	M. TEGUAR, Professeur à l'ENP
Rapporteur :	A.MEKHALDI, Professeur à l'ENP
Examineur :	A.BOUBAKEUR, Professeur à l'ENP
	D.MAADJOUJ, Doctorant à l'ENP

**ENP 2016**

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

## ملخص:

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

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

## Abstract

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

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

## Résumé

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

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

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents, aux quels mon amour ne saurait s'estomper un jour, leur affection et leur tendresse ont illuminées le parcours de ma vie, que dieu les garde et les protège.*

*A mes sœurs Rym, Imene et son mari Karim à qui je souhaite tout le bonheur du monde*

*A mon petit frère Ahmed Abderraouf et toute ma famille de près ou de loin*

*A tous mes profs qui m'ont appris durant toutes mes années d'étude.*

*A tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour être un jour un ingénieur d'état en Electrotechnique.*

*Aux chères sœurs amies, Lamia Sayah, Katia Mezhoud, Leïla Messelem et toutes mes amies (es) ayant contribué à la réalisation de ce travail.*

*A tous les amis(es) d'études surtout ceux d'électrotechnique promotion 2016.*

*A tous les proches que j'ai mentionnés et les autres que j'ai oubliés veuillez m'excuser*

*LAIDOUDI Aïcha*

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

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

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

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

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

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

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

Zouzou Nada

## *Remerciements*

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

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

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

*Un grand merci à MAADJOU DJamel qui nous a beaucoup aidé comme étant un accompagnant durant les manipulations au laboratoire.*

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

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

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



# Table des matières

ENP  
2016



Liste des tableaux  
Liste des figures  
Introduction générale..... 19

**Chapitre I**  
**THEORIES DU TRAITEMENT DE SIGNAL**

I.1. Introduction..... 22  
I.2. Définition du traitement de signal..... 22  
I.3. Branches du traitement de signal ..... 22  
I.6. Quelques notions..... 23  
    I.6.1. Produit de convolution ..... 23  
        I.6.1.1. Définition..... 23  
        I.6.1.2. Propriétés ..... 24  
    I.6.2. Corrélation..... 24  
        I.6.2.1. Définition..... 24  
        I.6.2.2. Intercorrélation ..... 24  
        I.6.2.3. Cas particulier : autocorrélation ..... 25  
    I.6.3. Valeur efficace d'un signal (RMS) ..... 25  
    I.6.4. Taux de distorsion harmonique (THD) ..... 27  
        I.6.4.1. Définition..... 27  
        I.6.4.2. THD d'un courant et d'une tension ..... 27  
    I.6.5. Rapport des deux harmonique 5 et 3 (KH (5/3))..... 28  
I.7. Classification des signaux..... 28  
    I.7.1. Dimension : ..... 28  
    I.7.2. Evolution déterministe ou aléatoire des signaux..... 28  
    I.7.3. Energie et Puissance des signaux ..... 29  
    I.7.4. Morphologie ..... 30  
        I.7.4.1. Quantification ..... 30  
        I.7.4.2. Echantillonnage ..... 30  
I.8. Analyse spectrale ..... 31

I.9. Transformations de Fourier.....	32
I.9.1. ANALYSE SPECTRALE DES FONCTIONS PÉRIODIQUES.....	32
I.9.1.1. Développement en série de Fourier .....	32
I.9.1.2. Représentation fréquentielle .....	33
I.9.2. ANALYSE SPECTRALE DES FONCTIONS NON PÉRIODIQUES .....	33
I.9.2.1. Transformée de Fourier continue .....	33
I.9.2.2. Propriétés des transformations de Fourier continues.....	34
I.9.3. Transformée de Fourier discrète (TFD) .....	35
I.9.3.1. Définition .....	35
I.9.3.2. Propriétés de la TFD.....	35
I.9.4. Transformée de Fourier Rapide.....	36
I.9.5. Transformée de Fourier à fenêtre glissante .....	38
I.9.6. Transformée en ondelette continue .....	39
I.9.7. Transformée en ondelette discrète (DWT).....	39
I.10. Conclusion .....	40

## **Chapitre II**

### **PRINCIPAUX TRAVAUX ANTERIEURS SUR LA POLLUTION DESERTIQUE DES ISOLATEURS**

II.1.Introduction .....	42
II.2. Définition.....	42
II.3.Rôles d'un isolateur .....	42
II.4. Types des isolateurs.....	43
II.4.1. Isolateur suspendu en verre trempé.....	43
II.4.2. Isolateur composite .....	43
II.5. Pollution des isolateurs.....	44
II.5.1.Contournement.....	44
II.5.2.Sources de la pollution.....	45
II.5.2.1. Pollution naturelle .....	45
II.5.2.2. Pollution industrielle .....	45
II.5.2.3. Pollution mixte .....	46

II.6. Quelques travaux sur la pollution désertique .....	46
II.6.1. Effet de la contamination désertique des isolateurs sur le comportement du courant de fuite .....	46
II.6.1.1 Préparation de la couche polluante.....	47
II.6.1.2 Résultats expérimentaux et discussion.....	49
II.6.2. Evaluation des risques de pollution du désert sur les isolateurs composites à haute tension.....	51
II.6.2.1.Méthodologie .....	52
II.6.2.2.Résultats et discussions .....	54
II.7. Conclusion .....	60

### **Chapitre III**

#### **TECHNIQUES EXPERIMENTALES**

III.1. Introduction .....	62
III.2. Dispositif expérimental .....	62
III.2.1. Circuits d'essais.....	62
III.2.2. Objet d'essais.....	64
III.3. Mode opératoire .....	68
III.3.1. Préparation de la couche polluante de sable.....	68
III.3.2 Nettoyage des isolateurs plan .....	69
III.3.2.1. Cas propre .....	69
III.3.2.2 Cas Pollué .....	70
III.4. Mesure du courant de fuite.....	71
III.5. Déphasage entre la tension appliquée et le courant de fuite .....	72
III.6. Taux de distorsion harmonique (THD) .....	72
III.7. Valeur efficace (RMS) .....	72
III.8. Rapport KH (5/3) .....	72

### **Chapitre IV**

#### **EXPLOITATION DES RESULTATS**

IV.1. Introduction.....	74
IV.2. Analyse temporelle .....	74

IV.2.1. Etude de la tension de contournement.....	74
IV.2.1.1. Pour une surface propre de l'isolateur .....	74
IV.2.1.2. Cas d'une surface polluée .....	75
IV.2.2. Etude du courant de fuite.....	79
IV.2.3. Valeur efficace (RMS) du courant de fuite .....	79
IV.2.3.1. Effet de la tension appliquée et de la quantité (l'épaisseur) de la couche polluante sur le courant de fuite.....	79
IV.2.3.2. Effet de la conductivité.....	81
IV.2.4. Déphasage du courant de fuite-tension .....	82
IV.2.4.1. Influence de la tension appliquée et la quantité de la couche de contamination sur le déphasage : .....	82
IV.2.4.2. Effet de la conductivité.....	84
IV.2.5. Formes d'onde du courant de fuite et de la tension appliquée .....	85
IV.2.5.1. Effet de la variation du niveau de la tension appliquée .....	85
IV.2.5.2. Effet de la quantité de la couche de contamination .....	86
IV.2.5.3. Effet de la conductivité de la couche de contamination .....	87
IV.2.5.4. Interprétation.....	88
IV.3. Analyse fréquentielle du courant de fuite .....	89
IV.3.1. Représentation spectrale du courant de fuite.....	89
IV.3.1.1 Etude de l'effet de la variation du niveau de la tension appliqué :.....	89
IV.3.1.2 Etude de l'effet de la variation de la quantité de sable : .....	98
IV.3.1.3. Etude de l'effet de la variation de la conductivité .....	101
IV.3.2. Taux de distorsion d'harmonique (THD) du courant de fuite.....	101
IV.3.2.1 Influence de la tension appliquée et de la quantité de la couche polluante .....	101
IV.3.2.2 .Influence de la conductivité.....	103
IV.3.3. Etude du rapport des deux harmoniques n°3 et n°5 (Kh (5/3)).....	104
IV.4. Conclusion .....	106
Conclusion générale .....	108
Références bibliographiques .....	111



# Liste des tableaux

ENP  
2016



## Chapitre I

### THEORIE DE TRAITEMENT DE SIGNAL

<b>Tableau I.1.</b> Différentes propriétés de la transformation de Fourier continue. ....	16
<b>Tableau I.2.</b> Différentes propriétés de la Transformation de Fourier discrète. ....	17
<b>Tableau I.3.</b> Méthodes utilisées selon le type de signal. ....	17

## Chapitre II

### TRAVAUX ANTERIEURS SUR LA POLLUTION DESERTIQUE DES ISOLATEURS

<b>Tableau II.1</b> Composants chimiques de contamination prélevée de la ligne de transport de 132 kV dans la région de Riyad .....	28
<b>Tableau II.2</b> Sels solubles majeurs dans des échantillons contaminés de la côte des zones désertiques de a) l'Egypte et b) le Pakistan .....	28
<b>Tableau II.3.</b> Variation de la solubilité (sel / 100 g eau) en fonction de la température (°C) .	31
<b>Tableau II.4</b> Dimensions des composants de l'isolateur utilisé.....	34
<b>Tableau II.5.</b> Estimation de la conductivité de la couche déposée du sable humide .....	36
<b>Tableau II.6.</b> Courant de fuite en mA pour des différentes épaisseurs de la couches de pollution et différentes valeurs de conductivité. ....	38

## Chapitre III

### TECHNIQUES EXPERIMENTALES

<b>Tableau III.1.</b> Caractéristiques de l'isolateur réel .....	47
<b>Tableau III.2.</b> Dimensions du modèle plan étudié.....	47

## Chapitre IV

### EXPLOITATION DES RESULTAS

<b>Tableau IV.1.</b> Essais de contournement pour l'état propre .....	53
---	----



# Liste des figures

ENP  
2016



## Chapitre I

### THEORIE DE TRAITEMENT DE SIGNAL

<b>Fig.I.1.</b> Représentation des étapes de traitement de l'information.....	4
<b>Fig. I.2.</b> Convolution d'un signal d'impulsion continue porté par signal rectangulaire. ....	5
<b>FigI.3.</b> Exemple de signaux "porte". Si les deux signaux ont la même énergie, leur intercorrelation est maximale lorsqu'ils sont identiques.....	6
<b>FigI.4.</b> Valeur efficace d'un signal constant .....	7
<b>FigI.5.</b> Valeur efficace d'un signal sinusoïdal. ....	7
<b>FigI.6.</b> Signal sans et avec distorsion harmonique.....	9
<b>FigI.7.</b> Exemple d'un signal déterministe. ....	10
<b>FigI.8.</b> Exemple d'un signal aléatoire. ....	10
<b>FigI.9.</b> Quantification d'un signal. ....	11
<b>Fig.I.10.</b> Echantillonnage d'un signal. ....	12
<b>Fig.I.11.</b> Représentation fréquentielle d'un signal périodique d'une période $T_0=1/f_0$ .....	14
<b>Fig.I.12.</b> Opération « butterfly » ou papillon .....	19
<b>Fig.I.13.</b> Calcul des termes X (m) de la Transformée de Fourier rapide pour un N=8.....	20

## Chapitre II

### PRINCIPAUX TRAVAUX ANTERIEURS SUR LA POLLUTION DESERTIQUE DES ISOLATEURS

<b>Fig.II.1.</b> Schémas d'un isolateur.....	23
<b>Fig.II.2.</b> Isolateurs en verre. ....	24
<b>Fig.II.3.</b> Déroulement du contournement sur un isolateur pollué. ....	26
<b>Fig. II.4.</b> Montage expérimental.....	29
<b>Fig.II.5.</b> Effet de $\text{Na}_2\text{SO}_4$ sur le courant de fuite.....	30
<b>Fig.II.6.</b> Effet de $\text{KNO}_3$ sur le courant de fuite. ....	30
<b>Fig.II.7.</b> Effet du « sel mixte » sur le courant de fuite .....	31
<b>Fig.II.8.</b> Comparaison des effets des différents sels à $9000 \mu\text{S}/\text{cm}$ .....	32
<b>Fig. II.9.a.</b> Forme de l'isolateur avec le hangar utilisé comme dans le guide de conception ABB.....	33
<b>Fig.II.10.a.</b> Densité du courant de fuite à travers de 1 mm de la couche polluante pour une conductivité égale à $284,9 \mu\text{S} / \text{cm}$ . ....	36

<b>FigII.10.b.</b> Densité du courant de fuite à travers 1 mm de la couche polluante pour des conductivités différentes.....	36
<b>FigII.10.c.</b> Densité du courant de fuite à travers 1.5 mm de la couche polluante pour des conductivités différentes .....	37
<b>FigII.10.d.</b> Densité du courant de fuite à travers 2 mm de la couche polluante pour des conductivités différentes.....	37
<b>Fig. II.11.a.</b> Dépendance entre courant de fuite et la conductivité, pour différentes tailles de grains de sable.....	38
<b>Fig.II.11.b.</b> Dépendance entre courant de fuite et la taille des grains de sable, pour différentes valeurs de conductivité. ....	39
<b>Fig.II.11.c.</b> Relation entre la conductivité et la taille des grains de sable, pour différentes valeurs de courant de fuite .....	39
<b>Fig.II.12.</b> Fonction de densité de probabilité en fonction du courant de fuite .....	40
<b>Fig.II.13.</b> Estimation des risques de défaillance de l'isolateur .....	41

## Chapitre III

### TECHNIQUES EXPERIMENTALES

<b>Fig.III.1.</b> Vue du laboratoire de l'ENP.....	43
<b>Fig.III.2.</b> Oscilloscope GWINSTEK .....	43
<b>Fig.III.3.</b> Circuit d'essais et de mesures.....	44
<b>Fig.III.4.</b> Modèle plan expérimental, vue de haut .....	44
<b>Fig.III.5.</b> Matériel utilisé dans le modèle plan. ....	45
<b>Fig.III.6.</b> Position du modèle par rapport à la terre.....	46
<b>Fig.III.7.</b> Eléments de l'isolateur réel capot (à droite) et la tige (la partie limitée par le cercle côté gauche).....	47
<b>Fig.III.8.</b> Sable de Boussaâda (à gauche) et de Bechar (à droite) .....	48
<b>Fig.III.9.</b> Mesure de la conductivité par un conductimètre.....	49
<b>Fig.III.10.</b> Couche polluante est uniforme sur la surface.....	50
<b>Fig.III.11.</b> Humidification de la surface du modèle par un pulvérisateur de l'eau distillée .....	51

## Chapitre IV

### EXPLOITATION DES RESULTAS

<b>Fig.IV.1.</b> Tension de contournement : cas du sable de Boussaâda pour différentes quantités de la couche polluante. ....	54
<b>Fig.IV.2.</b> Tension de contournement : cas du sable de Bechar pour différentes quantités de la couche polluante. ....	55
<b>Fig.IV.3.</b> Tension de contournement pour les deux types de sable en fonction de la quantité de la couche polluante. ....	55
<b>Fig. IV.4.</b> Comportement du modèle plan dans le cas d'une pollution par le sable de Boussaâda $\sigma=21$ ( $\mu\text{S}$ ) (a) niveau de tension 40 kV; (b1) niveau de tension 60kV ; (b2) niveau de tension 65kV; (c) niveau de tension 72Kv;(d) tension du contournement 76kV pour une quantité de 75 g. ....	57
<b>Fig. IV.5.</b> Comportement du modèle plan dans le cas d'une pollution par le sable de BECHAR ( $\sigma =9$ $\mu\text{S}$ ) (a) niveau de tension 70 kV; (b) niveau de tension 80kV ;(c) niveau de tension 86kV;(c) tension du contournement 96kV pour une quantité de 75 g. ....	58
<b>Fig. IV.6.</b> Valeur efficace du courant de fuite pour le sable de Boussaâda. ....	59
<b>Fig. IV.7.</b> Valeur efficace du courant de fuite pour le sable de Bechar. ....	59
<b>Fig. IV.8.</b> Valeur efficace du courant de fuite pour deux types de sable différents avec une quantité de sable de 30 g.....	60
<b>Fig.IV.9.</b> Apparition des décharges partielles pour les deux types de sable : sable de Boussaâda (à droite) et le sable de Bechar (à gauche) pour un niveau de tension de 80 kV et une quantité de 60g.....	61
<b>Fig. IV.10.</b> Variation de déphasage du courant de fuite-tension pour le sable de Boussaâda. ....	62
<b>Fig. IV.11.</b> Variation du déphasage courant de fuite-tension pour le cas du sable de Bechar ....	62
<b>Fig. IV.12.</b> Variation du déphasage courant de fuite-tension pour deux conductivités de la couche polluante (le sable de Bechar et de Boussaâda). ....	63
<b>Fig. IV.13.</b> Formes d'onde du courant de fuite et de la tension appliquée pour deux niveaux de tension 5kV (Fig.IV.13.a) et 30 kV (Fig.IV.13.b).....	64
<b>Fig. IV.14.</b> Formes d'onde du courant de fuite et de la tension appliquée pour deux quantités de la couche polluante 15g (Fig.IV.14.a) et 60g (Fig.IV.14.b).....	65
<b>Fig. IV.15.</b> Formes d'onde du courant de fuite et de la tension appliquée de deux conductivités de la couche polluante 21 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig.IV.15.a) et 9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig.IV.15.b).....	66
<b>Fig. IV.16.</b> Formes d'onde du courant de fuite et de la tension appliquée avec un niveau de tension de 20kV dans le cas d'une surface propre.....	67
<b>Fig. IV.17.</b> FFT du courant de fuite pour la 1 <sup>ère</sup> quantité (m=15g) pour les niveaux de tension de : (a) 5kV, (b) 10kV, (c) 20kV, (d) 30kV et (e) 40kV (sable de Boussaada).....	70

<b>Fig. IV.18.</b> FFT du courant de fuite pour la 1 <sup>ère</sup> quantité (m=15g) pour les niveaux de tension de : (a) 5kV, (b) 10kV, (c) 20kV, (d) 30kV et (e) 40kV (sable de Bechar).....	71
<b>Fig. IV.19.</b> FFT du courant de fuite pour la 5 <sup>ème</sup> quantité (m=75g) pour les niveaux de tension de : (a) 5kV, (b) 10kV, (c) 15kV, (d) 20kV et (e) 25kV (sable de Boussaada). .....	74
<b>Fig. IV.20.</b> FFT du courant de fuite pour la 5 <sup>ème</sup> quantité (m=75g) pour les niveaux de tension de : (a) 5kV, (b) 10kV, (c) 20kV, (d) 30Kv et (e) 35kV (sable de Bechar).....	76
<b>Fig.IV.21.</b> FFT du courant de fuite pour un niveau de tension de 20kV et pour différentes quantités de contamination : (a) propre (b) 15g, (c) 30g, (d) 45g (e) 60g et (f) 75g (sable de Boussaada).....	78
<b>Fig. IV.22.</b> FFT du courant de fuite pour un niveau de tension de 20kV et pour différentes quantités de contamination : (a) propre (b) 15g, (c) 30g, (d) 45g (e) ,60g (f) et 75g (sable de Bechar).....	79
<b>Fig.IV.23.</b> FFT du courant de fuite pour la 4 <sup>ème</sup> quantité (m=60g) pour un niveau de tension de 20kV et deux différentes conductivités : Boussaâda [21 $\mu$ s] (à gauche) et Bechar [9 $\mu$ s] (à droite).....	80
<b>Fig. IV.24.</b> Variation du taux de distorsion (%) en fonction de la tension pour différentes quantités de sable de Boussaâda .....	81
<b>Fig. IV.25.</b> Variation du taux de distorsion en fonction de la tension pour différentes quantités de sable de Bechar.....	81
<b>Fig. IV.26.</b> Variation du taux de distorsion en fonction du niveau de la tension appliqué pour deux différentes conductivités de la couche polluante.....	82
<b>Fig. IV.27.</b> Variation du rapport Kh(5/3) en fonction de la tension appliquée pour différentes quantités pour le sable de Boussaâda. ....	83
<b>Fig. IV.28.</b> Variation du rapport Kh (5/3) en fonction de la tension appliquée pour différentes quantités pour le sable de Bechar. ....	84



# **Introduction générale**

ENP  
2016



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dans le second chapitre, nous présentons dans une partie, l'importance des isolateurs, leurs types et leurs utilités. L'autre partie a été consacrée à quelques principaux travaux antérieurs concernant la pollution désertique des isolateurs. Ces travaux sont basés sur l'étude du courant de fuite avec plusieurs méthodes dans le but d'extraire le plus d'informations concernant l'état de surface de l'isolateur considéré.

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

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

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

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



# Chapitre I

## **Théorie du traitement de signal**

ENP  
2016



## I.1. Introduction

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

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

## I.2. Définition du traitement de signal

Le traitement de signal est un ensemble des techniques permettant de créer, analyser et transformer les signaux en vue de leur exploitation, c'est aussi l'extraction du maximum d'informations utiles d'un signal perturbé par le bruit [4].

Elaboration du signal :

- **Créer** : Cette étape se divise en :
  1. Synthèse : Par la création du signal par combinaison de signaux élémentaires.
  2. Modulation : C'est l'adaptation du signal au canal de transmission.
  
- **Analyser** : Connue aussi par l'interprétation du signal, cette étape se compose de :
  1. Détection : Isoler les composantes utiles d'un signal complexe et l'extraction du signal d'un bruit de fond.
  2. Identification : Le classement de signal.
  
- **Transformer** : Cette étape comporte :
  1. Filtrage : Dans cette opération on élimine certaines composantes.
  2. Codage et compression.

## I.3. Branches du traitement de signal

Il existe plusieurs branches particulières de traitement de signal en fonction de la nature des signaux considérés [5] :

- **Traitement de la parole (généralement du son)** : - pour l'analyse, la compression, la synthèse et la reconnaissance de la parole
- **Traitement d'images** : -pour l'analyse, la restauration et la compression des images fixes.
- **Traitement de la vidéo** :-pour l'analyse et la compression des séquences vidéo.

## I.4. Finalités du traitement du signal

Le traitement du signal peut avoir différentes finalités [5] :

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

## I.5. Traitement de l'information

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

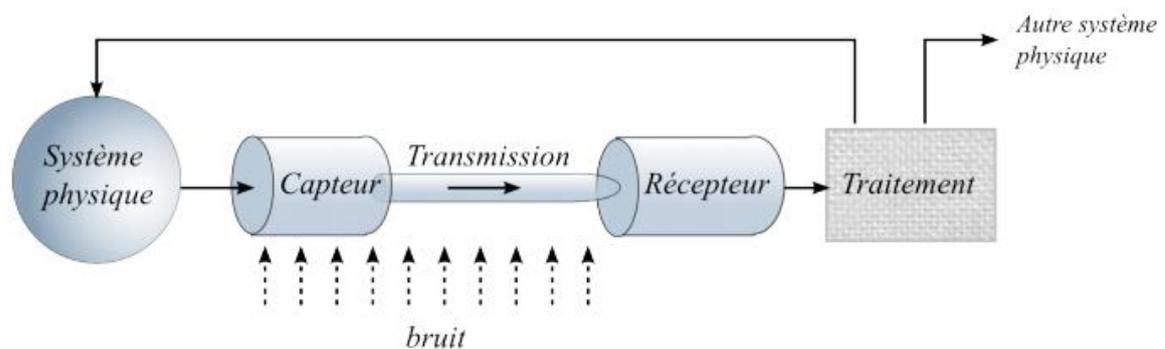


Fig.I.1. Représentation des étapes de traitement de l'information [4]

## I.6. Quelques notions

### I.6.1. Produit de convolution

#### I.6.1.1. Définition

Le produit de convolution exprime la quantité de recouvrement d'une fonction  $y$  lorsqu'on la déplace sur une autre fonction  $x$  : c'est un mélangeur de fonction aussi un outil important dans le domaine du traitement de signal (filtrage...) [6 , 7]. La figure (I.2) représente la convolution d'un signal d'impulsion continue porté par signal rectangulaire

Si le signal est continu :

$$Z(t) = x(t) \otimes y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \cdot y(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

Si le Signal est discret :

$$Z[k] = x[k] \otimes y[k] = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} x[n] \cdot y[k - n] \quad (2)$$

### I.6.1.2. Propriétés

- **Commutativité :**

1. Changement de variable  $\tau = t - u$

$$\text{alors } Z(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - u) \cdot y(u) du \quad (3)$$

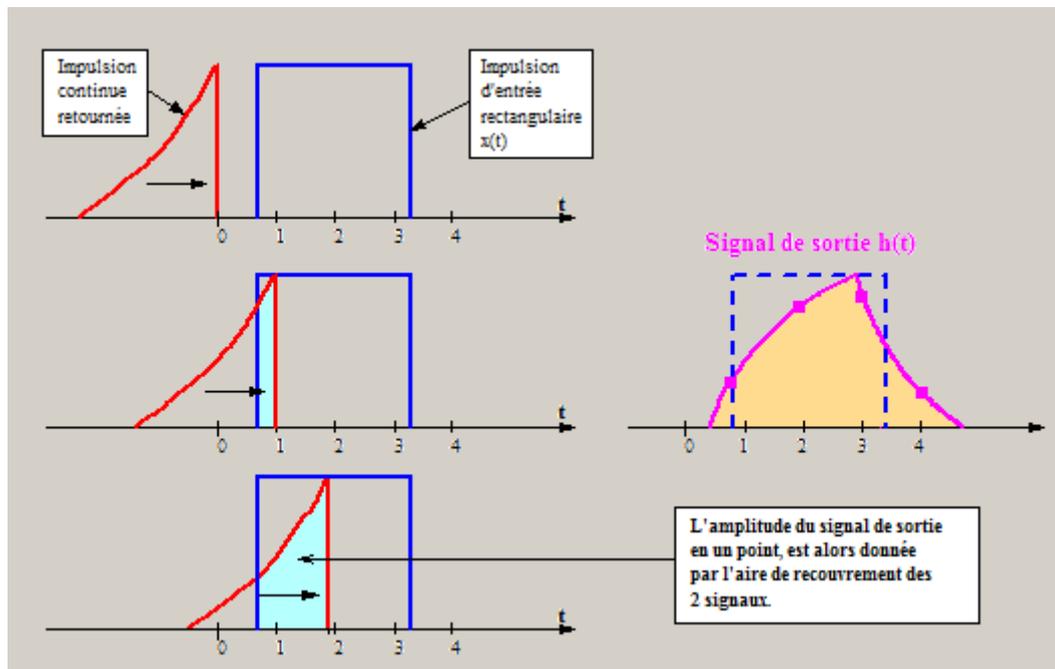
$$2. x(t) \otimes y(t) = y(t) \otimes x(t) \quad (4)$$

- **Distributivité :**

$$[x_1(t) + x_2(t)] \otimes y(t) = x_1(t) \otimes y(t) + x_2(t) \otimes y(t) \quad (5)$$

- **Associativité :**

$$[x_1(t) \otimes y_1(t)] \otimes y_2(t) = x_1(t) \otimes [y_1(t) \otimes y_2(t)] \quad (6)$$



**Fig. I.2.** Convolution d'un signal d'impulsion continue porté par signal rectangulaire [7]

## I.6.2. Corrélation

### I.6.2.1. Définition

La corrélation est la mesure énergétique de la similitude de forme et de position entre deux signaux décalés [6, 8]

### I.6.2.2. Intercorrélation

On veut comparer un signal  $x(t)$  à un signal  $y(t)$ , éventuellement en les décalant l'un par rapport à l'autre

L'intercorrélation mesure la similitude entre ces deux signaux. Pour des signaux réels (pas complexes), la fonction d'intercorrélation s'écrit [4, 6]

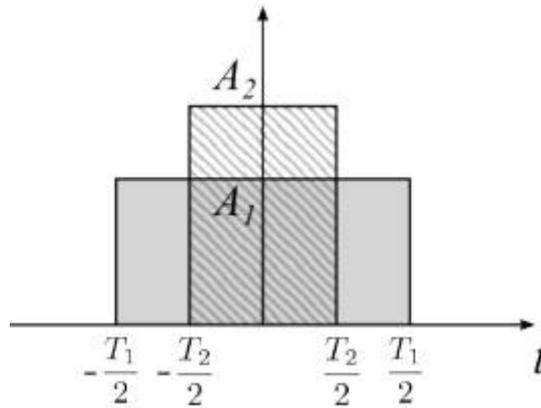
Pour les signaux à énergie finie

$$C_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot y(t - \tau) dt \quad (7)$$

Pour les signaux à énergie infinie

$$C_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} x(t) \cdot y(t - \tau) dt \quad (8)$$

Si les deux signaux ont la même énergie, leur intercorrélation est maximale lorsqu'ils sont identiques, la figure (I.3) représente un exemple d'intercorrélation des deux signaux porte.



**FigI.3.** Exemple de signaux "porte"[4]

### I.6.2.3. Cas particulier : autocorrélation

L'autocorrélation est une intercorrélation du signal avec une version décalée de lui-même [4,6,8]

Pour les signaux à énergie finie :

$$C_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot x(t - \tau) dt . \quad (9)$$

Pour les signaux à énergie infinie :

$$C_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} x(t) \cdot y(t - \tau) dt . \quad (10)$$

### I.6.3. Valeur efficace d'un signal (RMS)

La valeur efficace d'une tension U est la valeur de la tension continue constante qui aurait les mêmes effets que U sur un dipôle purement résistif [9, 10].

Nous voyons que cette définition peut s'appliquer sur toutes sortes de tensions, continues, alternatives, ou quelconques.

Elle est particulièrement utile naturellement dans le cas d'une tension périodique. On peut alors la calculer sur une période.

Les figures (I.4) et (I.5) représentent la valeur efficace d'un signal constant et un exemple d'un signal sinusoïdal respectivement.

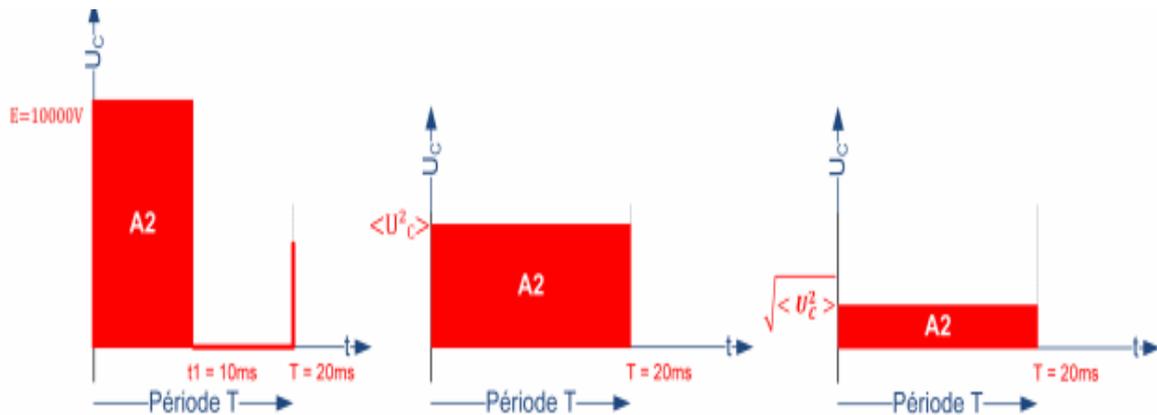
La valeur efficace d'un signal  $U$  est exprimée par cette équation [10] :

$$\text{Nous avons } \langle U_c \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \quad (11)$$

$$\text{Si le signal est sinusoïdal } \langle U_c \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U(\theta) d\theta \quad (12)$$

$$\text{alors : } U_{\text{eff}} = \sqrt{\langle U_c^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} \quad (13)$$

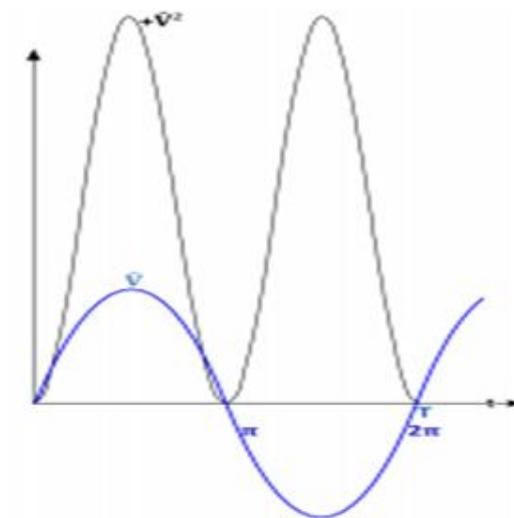
$$\text{Si le signal est sinusoïdal : } U_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U^2(\theta) d\theta} \quad (14)$$



**Fig.I.4.** La valeur efficace d'un signal constant [10]

Dans ce cas  $U_{\text{eff}} = 70,7 \text{ V}$

Si le signal est sinusoïdal :



**Fig.I.5.** La valeur efficace d'un signal sinusoïdal [10]

Dans ce cas :  $U_{\text{eff}} = \frac{\hat{V}}{\sqrt{2}}$ .

## I.6.4. Taux de distorsion harmonique (THD)

### I.6.4.1. Définition

Le taux de distorsion harmonique est un pourcentage qui se calcule pour indiquer la qualité de traitement du signal dans un appareil. C'est la comparaison entre le signal de sortie et le signal d'entrée purement sinusoïdal pour définir le degré de contenu harmonique dans un signal alternatif [11].

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

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} x^2_h}}{x_1} \quad (15)$$

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

Cette définition se conforme à la norme IEC 61000-2-2<sup>1</sup> [12].

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

### I.6.4.2. THD d'un courant et d'une tension

Quand on cherche le taux de distorsion harmonique d'un courant, la formule devient :

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I^2_h}}{I_1} \quad (16)$$

Lorsque la valeur efficace totale d'un courant est connue, l'équation ci-dessus est équivalente à celle ci-dessous :

$$THD_I = \sqrt{\left(\frac{I_{\text{rms}}}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (17)$$

Quand on cherche le taux de distorsion harmonique d'une tension la formule est :

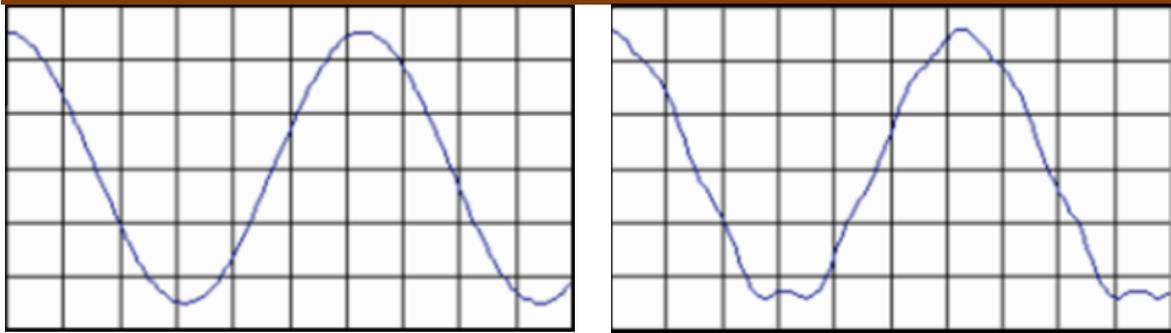
$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U^2_h}}{U_1} \quad (18)$$

La figure (I.6) représente un signal sans distorsion harmonique (à gauche) et avec distorsion harmonique (à droite).

Signal sans distorsion harmonique

Signal avec distorsion harmonique

<sup>1</sup>La norme de compatibilité électromagnétique (EMC)



**FigI.6.** Signal sans et avec distorsion harmonique [8]

### I.6.5. Rapport des deux harmonique 5 et 3 (KH (5/3))

KH (5/3) est représenté par un rapport entre l'amplitude de l'harmonique 5 et l'amplitude de l'harmonique 3 du courant de fuite. Il détermine la probabilité d'occurrence de contournement [13].

Ce rapport est caractérisé par :

$$Kh (5/3) = 100 * \frac{\text{L'amplitude de l'harmonique 5}}{\text{L'amplitude de l'harmonique 3}} (\%) \quad (20)$$

## I.7. Classification des signaux

La classification d'un signal se fait selon [4].

### I.7.1. Dimension :

Signal monodimensionnel 1D : Fonction d'un seul paramètre, pas forcément le temps : une concentration, une abscisse, etc.

Signal bidimensionnel 2D : Exemple : image NG  $\rightarrow f(x, y)$

Signal tridimensionnel 3D : Exemple : film NB  $\rightarrow f(x, y, t)$

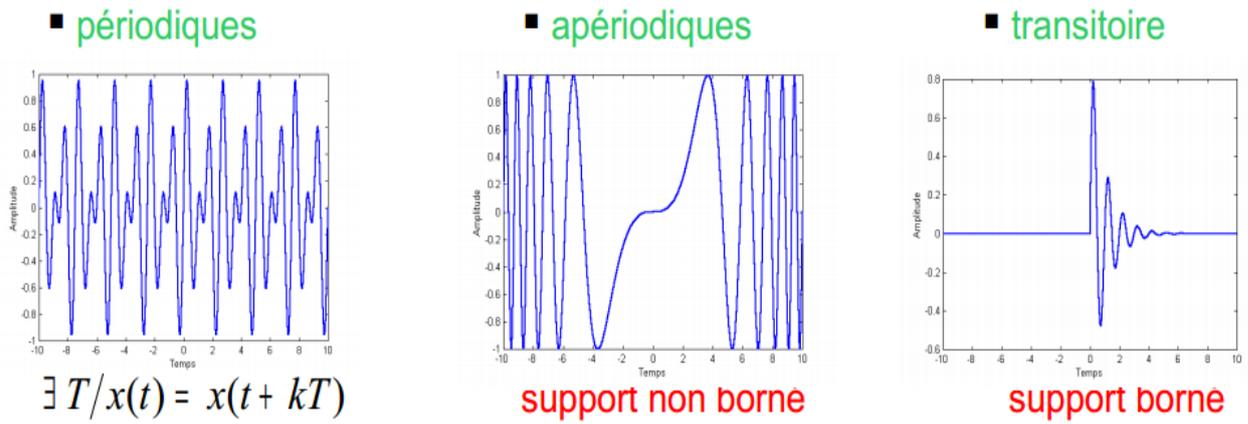
### I.7.2. Evolution déterministe ou aléatoire des signaux

- **Evolution déterministe**

Ce sont les signaux dont l'évolution est en fonction du temps « t », elle se trouve en plusieurs catégories :

1. Périodique.
2. Apériodique.
3. Transitoire.

La figure (I.7) représente les différentes catégories d'un signal déterministe.



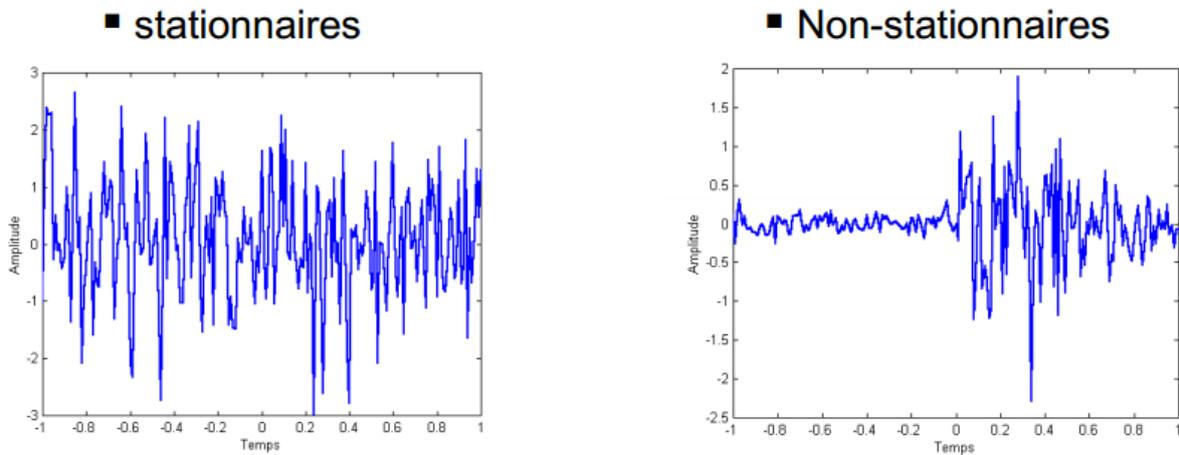
**FigI.7.** Exemple d'un signal déterministe

• **Evolutions aléatoires (stochastiques)**

Ce sont les signaux dont l'évolution temporelle est imprévisible et dont on ne peut pas prédire la valeur à un temps « t » elle englobe la moyenne, la variance et les lois de probabilité [4].

Exemple : résultat d'un jet de dé.

Les signaux aléatoires peuvent être stationnaires comme ils peuvent être non stationnaires, représentés par la figure (I.8)



**FigI.8.** exemple d'un signal aléatoire

**I.7.3. Energie et Puissance des signaux**

Si un signal  $x(t)$  est défini sur  $]-\infty, +\infty[$  et  $T_0$  l'intervalle de temps, alors l'énergie de ce signal est donnée par [14] :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt \quad \text{ou} \quad \lim_{T_0 \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{+\frac{T_0}{2}} |x(t)|^2 dt \quad (21)$$

et la puissance moyenne de ce signal est représenté par l'équation (22).

$$P = \lim_{T_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{+\frac{T_0}{2}} |x(t)|^2 dt. \quad (22)$$

Si les signaux sont périodiques de période T alors la puissance devient :

$$P = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt. \quad (23)$$

L'énergie des signaux peut être soit une énergie finie soit une énergie infinie

### 1. Signal à énergie finie

La puissance moyenne est nulle. Généralement, c'est le cas où les signaux représentent une grandeur physique telle que les signaux transitoires à support borné [4,14].

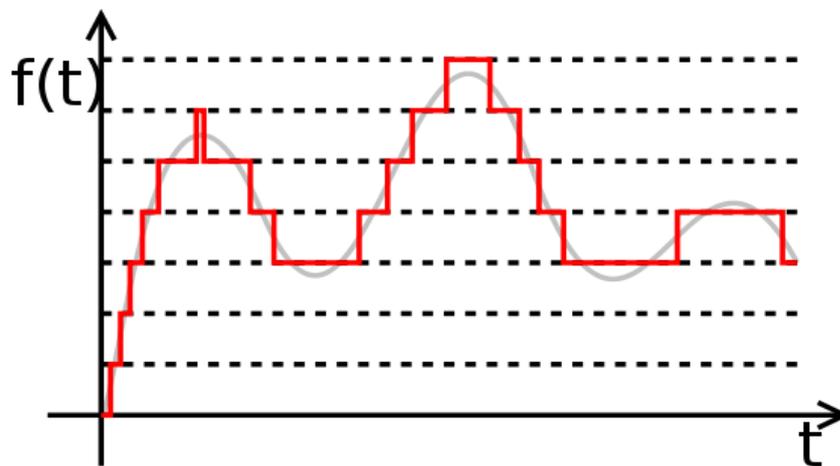
### 2. Signal à énergie infinie

Dans ce cas la puissance moyenne est non nulle, c'est le cas des signaux périodiques [4,14].

## I.7.4. Morphologie

### I.7.4.1. Quantification

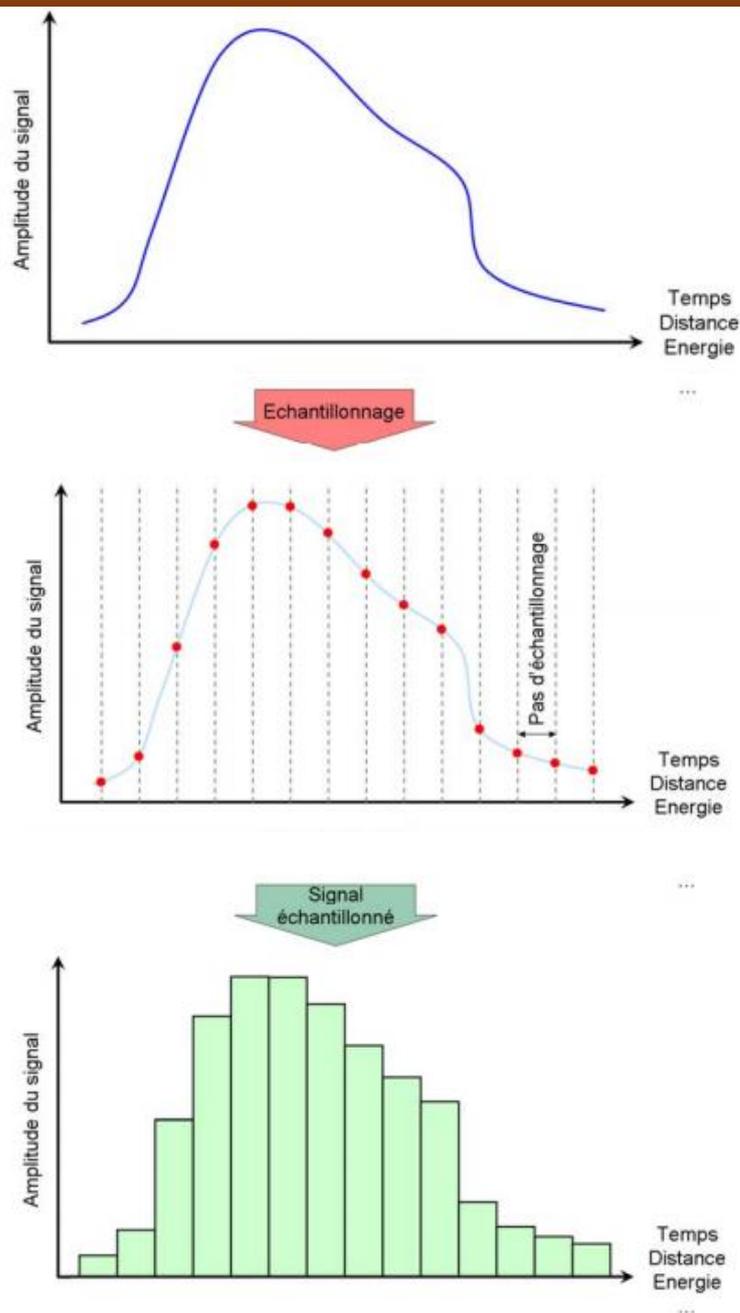
La quantification est le procédé qui permet d'approcher un signal continu par les valeurs d'un ensemble discret d'assez petite taille. On parle aussi de quantification pour approcher un signal à valeurs dans un ensemble discret de grande taille par un ensemble plus restreint [15,16]. La figure (I.9) représente la quantification d'un signal  $f(t)$ .



FigI.9. Quantification d'un signal  $f(t)$

### I.7.4.2. Echantillonnage

La conversion d'un signal analogique en un signal numérique nécessite l'échantillonnage du signal analogique d'origine. Cet échantillonnage consiste à représenter un signal analogique continu par une série de mesures successives. Ces mesures sont faites à une certaine cadence : deux valeurs consécutives sont ainsi séparées par un intervalle constant (intervalle de temps, de distance, ou de toute autre grandeur). Cet intervalle constant est le pas d'échantillonnage [15, 16, 17]. La figure (I.10) représente les étapes d'échantillonnage d'un signal.



**Fig.I.10.** Echantillonnage d'un signal [17].

Le signal échantillonné peut donc être considéré comme une suite de valeurs discrètes de  $x(t)$ .

L'échantillonnage ne doit pas détériorer le signal. En particulier il doit conserver le spectre de  $x(t)$  et permettre de restituer ce spectre en fin d'opérations [16].

## I.8. Analyse spectrale

Lors du traitement numérique à l'oscilloscope ou à l'ordinateur, la détermination d'un signal numérisé passe par un algorithme appelé FFT : Fast Fourier Transform ou transformée de Fourier rapide [16].

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

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

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

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

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

## I.9. Transformations de Fourier

La transformation de Fourier est l'un des outils fondamental du traitement des signaux [18]. Elle permet d'associer à la largeur d'onde habituelle la représentation du signal en fonction de sa variable d'évolution (le temps généralement) une autre représentation complémentaire dans le domaine fréquentiel.

### I.9.1. ANALYSE SPECTRALE DES FONCTIONS PÉRIODIQUES

#### I.9.1.1. Développement en série de Fourier

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

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=0}^{+\infty} a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t) \quad (24)$$

avec :

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) dt \quad (25)$$

$$a_k = \frac{2}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) \cos(k\omega_0 t) dt \quad (26)$$

$$b_k = \frac{2}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) \sin(k\omega_0 t) dt \quad (27)$$

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

et voici une autre représentation de la série de Fourier :

$$x(t) = \sum_{k=1}^{+\infty} A_k \cos(k\omega_0 t + \varphi_k) \quad (28)$$

avec les coefficients :

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

$$\varphi_k = -\text{Arctg}\left(\frac{b_k}{a_k}\right)$$

### I.9.1.2. Représentation fréquentielle

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

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_k e^{ik\omega_0 t} \quad (29)$$

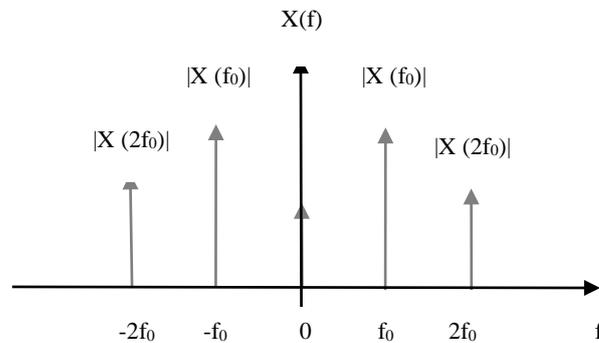
avec :  $C_k = \frac{1}{T_0} \cdot (a_k - i \cdot b_k) = \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) e^{-ik\omega_0 t} dt$

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

Le spectre d'un signal périodique est discontinu et formée de pics de Dirac  $\delta$  d'amplitude  $|X(kf_0)|$  où est représenté un exemple sur la figure (I.11) et il est obtenu à l'aide de cette formule :

$$X(f) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X(kf_0) \cdot \delta(f - kf_0) . \quad (30)$$

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



**Fig.I.11.** Représentation fréquentielle d'un signal périodique d'une période  $T_0 = \frac{1}{f_0}$

## I.9.2. ANALYSE SPECTRALE DES FONCTIONS NON PÉRIODIQUES

### I.9.2.1. Transformée de Fourier continue

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

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

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i2\pi f t} dt \quad (31)$$

La transformation inverse est obtenue par :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{i2\pi f t} df \quad (32)$$

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

La transformée de Fourier existe si les 3 conditions suffisantes de Dirichlet sont vérifiées :

1.  $x(t)$  possède un nombre fini de discontinuités sur tout intervalle fini.
2.  $x(t)$  possède un nombre fini de maximum et de minimum sur tout intervalle fini.
3.  $x(t)$  est absolument intégrable c.-à-d. :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)e^{i2\pi ft}| dt < \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt < +\infty$$

Tous les signaux d'énergie finie admettent une transformée de Fourier.

### I.9.2.2. Propriétés des transformations de Fourier continues

La représentation d'un signal sous le développement de la série de Fourier est unique [19].

On dit que  $x(t)$  et  $X(f)$  forment une paire de transformée de Fourier, ce qui est noté par :

$$x(t) \longleftrightarrow X(f)$$

Le Tableau (I.1) représente les différentes propriétés de la transformation de Fourier continue.

**Tableau I.1.** Les différentes propriétés de la transformation de Fourier continue

Propriétés	$x(t)$	$X(f)$
Linéarité	$\alpha.x(t)+\beta.y(t)$	$\alpha.X(f)+\beta.Y(f)$
Retard temporel (translation)	$x(t-t_0)$	$X(f). e^{-i\omega_0 t}$
Déplacement fréquentiel	$x(t). e^{i\omega_0 t}$	$X(f-f_0)$
Echelle	$x(at)$	$\frac{1}{ a } . X\left(\frac{f}{a}\right)$
Dérivation	$\frac{dx(t)}{dt}$ $(-i2\pi f).x(t)$	$(i2\pi f).X(f)$ $\frac{dX(f)}{df}$
Parité	Réelle paire Réelle impaire Imaginaire paire Imaginaire impaire Complexe paire Complexe impaire	Réelle paire Imaginaire impaire Imaginaire paire Réelle impaire Complexe paire Complexe impaire
Conjugaison	$x^*(-t)$	$X^*(f)$ $X(f)=X^*(-f)$
Formule de Parseval	$\int_{-\infty}^{+\infty}  x(t) ^2 dt$	$\int_{-\infty}^{+\infty}  X(f) ^2 df$

### I.9.3. Transformée de Fourier discrète (TFD)

#### I.9.3.1. Définition

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

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

Les étapes d'échantillonnage sont mentionnées précédemment.

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

$$X(f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(kT_e) \cdot e^{-i\omega kT_e} \quad (33)$$

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

$$X(m \cdot \Delta f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(kT_e) \cdot e^{-i2\pi \cdot m \cdot \Delta f \cdot kT_e} \quad (34)$$

Après des simplifications on obtient :

$$X(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot e^{-i2\pi \frac{k}{N} \cdot m} \quad (35)$$

(1) La TFD d'une fonction discrète  $x(k)$  existe si :  $\sum_{k=0}^{N-1} |x(kT_e)| < \infty$  cela veut dire que la série doit converger.

#### I.9.3.2. Propriétés de la TFD

On dit que  $x(t)$  et  $x(f)$  forment une paire de transformée de Fourier discrète, ce qui est noté par :

$$x(k) \longleftrightarrow X(m)$$

Le tableau (I.2) représente les différentes propriétés de la Transformation de Fourier discrète.

**Tableau I.2.** Différentes propriétés de la Transformation de Fourier discrète

Propriétés	$x(k)$	$X(m)$
Linéarité	$\alpha \cdot x(k) + \beta \cdot y(k)$	$\alpha \cdot X(m) + \beta \cdot Y(m)$
Translation en temps	$x(k - k_0)$	$X(m) \cdot e^{-i2\pi \frac{k_0}{N} \cdot m}$
renversement temporel conjugaison	$x(-k)$ $x^*(k)$	$X(-m)$ $X^*(-m)$ $X^*(m) = X(-m)$
formule de Parseval	$\sum_{k=0}^{N-1}  x(k) ^2$	$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1}  X(m) ^2$

Voici un tableau (I.3) récapitulatif pour savoir comment choisir la méthode de calcul du spectre selon le signal.

**Tableau I.3.** Méthodes utilisées selon le type de signal

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

### I.9.4. Transformée de Fourier Rapide

La transformée de Fourier rapide **TFR** ou **FFT** (Fast Fourier Transform) est tout simplement l'utilisation d'un algorithme qui accélère le calcul de la transformée de Fourier en diminuant le nombre d'opérations (nombre de multiplications) [20].

D'après la formule précédente (36):

$$X(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot e^{-i2\pi \frac{k}{N} m} \quad (36)$$

On peut remarquer que pour calculer cette transformée, il est nécessaire d'effectuer :

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

L'algorithme le plus utilisé est celui de Cooley-Tukey qui utilise un nombre de points  $N=2^p$ . Cet algorithme se base sur la décomposition

On pose :  $W_N^{mk} = e^{-i2\pi \frac{k}{N} m}$

Cette fonction  $W_N^{mk}$  a deux caractéristiques :

- $W_N^{2mk} = e^{-2i \cdot 2\pi \frac{k}{N} m} = e^{-2i \cdot 2\pi \frac{k}{\frac{N}{2}} m} = W_{\frac{N}{2}}^{mk}$
- $W_N^{(mk + \frac{N}{2})} = e^{-i2\pi \frac{(km + \frac{N}{2})}{N} m} = e^{-i2\pi \frac{k}{N} m} \cdot e^{-i\pi} = -W_N^{mk}$  (pour  $m < N/2$ )

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

pour  $m \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$

On sépare les termes pairs des termes impairs comme suit :

$$X(m) = \sum_{k=0}^{\frac{N-1}{2}} x(2k) \cdot W_N^{m(2k)} + \sum_{k=0}^{\frac{N-1}{2}} x(2k+1) \cdot W_N^{m(2k+1)}$$

$$X(m) = \sum_{k=0}^{\frac{N-1}{2}} x(2k) \cdot W_N^{\frac{mk}{2}} + W_N^m \sum_{k=0}^{\frac{N-1}{2}} x(2k+1) \cdot W_N^{\frac{m2k}{2}}$$

Pour expliquer l'algorithme prenons un exemple où  $p=3$ , donc  $N=8$  termes [21].

On décompose la somme en termes de rang pair et de rang impair :

$$X(m) = [X(0) + X(2)W_8^{2m} + X(4)W_8^{4m} + X(6)W_8^{6m}] \\ + W_8^m [X(1) + X(3)W_8^{2m} + X(5)W_8^{4m} + X(7)W_8^{6m}]$$

Et on met le terme  $X(m)$  avec le terme  $X(m + \frac{N}{2})$  comme ceci :

$$X(m) = [X(0) + X(4)W_8^{4m}] + W_8^{2m} [X(2) + X(6)W_8^{4m}] \\ + W_8^m ([X(1) + X(5)W_8^{4m}] + W_8^{2m} [X(3) + X(7)W_8^{4m}])$$

$$= [X(0) + X(4)W_4^{2m}] + W_4^m [X(2) + X(6)W_4^{2m}] \\ + W_8^m ([X(1) + X(5)W_4^{2m}] + W_4^m [X(3) + X(7)W_4^{2m}])$$

Après calcul et réduction en appliquant les propriétés de  $W_N^{mk}$  on aboutit à :

$$X(0) = x(0) + x(4)W_2^0 + W_4^0 [x(2) + x(6)W_2^0] + W_8^0 \{x(1) + x(2)W_2^0 + W_4^0 [x(3) + x(7)W_2^0]\}$$

$$X(1) = x(0) - x(4)W_2^0 + W_4^1 [x(2) - x(6)W_2^0] + W_8^1 \{x(1) - x(2)W_2^0 + W_4^1 [x(3) - x(7)W_2^0]\}$$

$$X(2) = x(0) + x(4)W_2^0 - W_4^0 [x(2) + x(6)W_2^0] + W_8^2 \{x(1) + x(2)W_2^0 - W_4^0 [x(3) + x(7)W_2^0]\}$$

$$X(3) = x(0) - x(4)W_2^0 - W_4^1 [x(2) - x(6)W_2^0] + W_8^3 \{x(1) - x(2)W_2^0 - W_4^1 [x(3) - x(7)W_2^0]\}$$

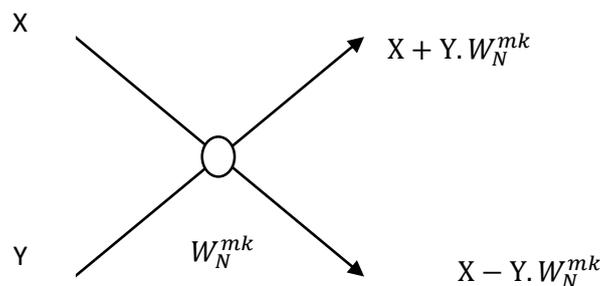
$$X(4) = x(0) + x(4)W_2^0 + W_4^0 [x(2) + x(6)W_2^0] + W_8^0 \{x(1) + x(2)W_2^0 + W_4^0 [x(3) + x(7)W_2^0]\}$$

$$X(5) = x(0) - x(4)W_2^0 + W_4^1 [x(2) - x(6)W_2^0] + W_8^1 \{x(1) - x(2)W_2^0 + W_4^1 [x(3) - x(7)W_2^0]\}$$

$$X(6) = x(0) + x(4)W_2^0 - W_4^0 [x(2) + x(6)W_2^0] + W_8^2 \{x(1) + x(2)W_2^0 - W_4^0 [x(3) + x(7)W_2^0]\}$$

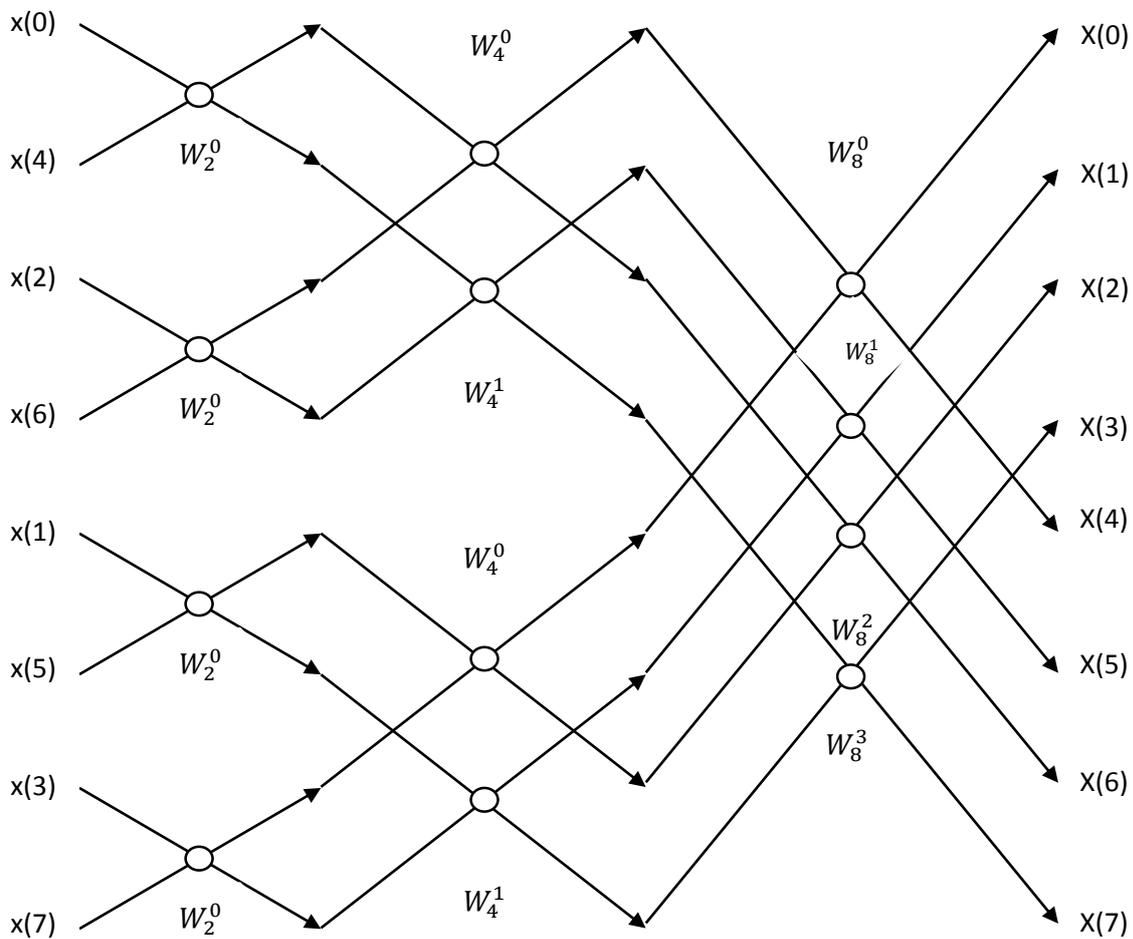
$$X(7) = x(0) - x(4)W_2^0 - W_4^1 [x(2) - x(6)W_2^0] + W_8^3 \{x(1) - x(2)W_2^0 - W_4^1 [x(3) - x(7)W_2^0]\}$$

Le calcul de ces termes peut se faire selon un schéma qui se base sur l'opération "butterfly" ou papillon qui est la suivante (figure(I.12)):



**Fig.I.12.** L'opération « butterfly » ou papillon

Ainsi l'algorithme complet du calcul peut être représenté sous la forme donnée à la figure (I.13).



**Fig.I.13.** Calcul des termes X (m) de la Transformée de Fourier rapide pour un N=8

Cette méthode diminue le nombre d'opérations fait pour le calcul. Elle nécessite seulement  $(N/2) \log(N)$  multiplications complexes au lieu de  $N^2$  [22].

L'algorithme de la FFT est environ R fois plus rapide que la transformée de Fourier discrète.

$$R = \frac{N^2}{(N/2) \log(N)} = \frac{2N}{\log(N)}$$

### I.9.5. Transformée de Fourier à fenêtre glissante

Pour des signaux non stationnaires, la transformée de Fourier ne donne pas suffisamment d'informations à cause des échelles de temps différentes [22]. C'est à ce stade-là que la transformée de Fourier à court terme était introduite. Il s'agit d'utiliser une fenêtre dans l'objectif d'observer seulement les parties utiles du signal pour les analyser par la suite.

Donc la transformée de Fourier à fenêtre glissante s'exprime par :

$$X(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i\omega t} \cdot w^*(t - \tau) dt \quad (37)$$

$W(t)$  est la fonction fenêtre qu'on doit choisir et  $\tau$  est le paramètre de translation de la fenêtre

- Fenêtre de temps court implique une résolution temporelle plus précise mais la résolution fréquentielle est moins précise.
- Fenêtre de temps longue dit que la résolution fréquentielle est plus précise mais la résolution temporelle est moins précise.

### I.9.6. Transformée en ondelette continue

C'est la projection d'un signal non stationnaire sur une base formée de fonctions appelées Ondelettes [23]. Cette transformée nous donne l'avantage d'analyser le signal en fréquence et en temps à la fois et non pas comme la transformation de Fourier qui élimine complètement la notion du temps.

La forme de la transformée en ondelette continue d'une fonction quelconque  $f(t)$  est donnée par la formule :

$$f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (38)$$

- $f(a, b)$  est une fonction de deux variables le temps et la fréquence où 'a' représente l'échelle et 'b' représente la translation.

On pose :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

$$f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}(t) dt = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle \quad (39)$$

Dans notre étude, cette transformée est utilisée dans le cas d'une pollution non uniforme où le signal devient non périodique.

### I.9.7. Transformée en ondelette discrète (DWT)

La transformée en ondelette discrète est basée sur la décomposition d'un signal en sous bandes de fréquences. C'est la projection du signal sur une base d'ondelettes discrètes ; elle permet un gain de calcul et une facilité d'implémentation grâce à l'analyse multi-résolution [24, 25].

Voici la forme de la transformée en ondelette discrète :

$$DWT_{\psi} f(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n) \Psi\left(\frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (40)$$

$\Psi$  est l'ondelette mère dilatée par le paramètre  $a_0^m$  et translatée via le paramètre  $n, a_0^m, b_0$  et  $a_0$  et sont des valeurs fixées tel que  $a_0 > 1$  et  $b_0 > 0$ ;  $m$  et  $n$  sont des entiers naturels.

**I.10. Conclusion**

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

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

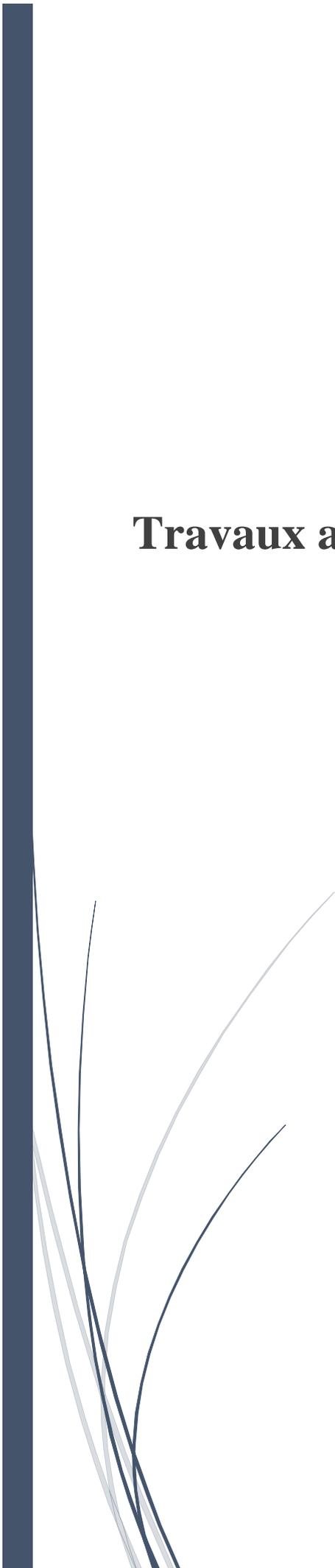
En dernier lieu, l'estimation spectrale obtenue par les transformations de Fourier sur lesquelles notre étude est fondée aboutit à de meilleurs résultats.



# Chapitre II

## **Travaux antérieurs sur la pollution désertique des isolateurs**

ENP  
2016



## II.1.Introduction

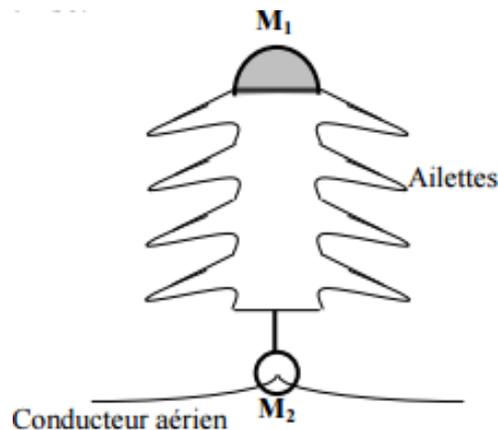
Le phénomène de pollution des lignes aériennes constitue un sujet d'étude d'une importance primordiale. Cela provient du fait que la pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de haute tension. Pour cela, nous présentons dans la première partie de ce chapitre l'importance des isolateurs, leurs utilités et leurs différents types. Ensuite, nous avons consacré la deuxième partie aux travaux antérieurs concernant la pollution désertique des isolateurs.

## II.2. Définition

Les isolateurs électriques se présentent sous la forme d'un <<empilement d'assiettes>> placés directement sur les lignes électriques aériennes, avec pour fonctions principales d'empêcher le courant électrique qui circule dans les câbles, de passer dans les pylônes et servir de jonction entre le câble et le pylône. Ils doivent pour cela résister aux mouvements des câbles qui subissent les effets du vent, de la neige ou du givre, etc...

L'isolateur est formé par un isolant auquel sont fixées deux pièces métalliques M1 et M2. Isolant : Verre, céramique, matériaux synthétiques. M1 se fixe au pylône ; M2 porte le conducteur [14].

La figure (II.1) représente le schéma d'un isolateur



**Fig.II.1.** Schéma d'un isolateur [14]

## II.3.Rôles d'un isolateur

L'isolateur possède un double rôle

- Rôle mécanique : porte le conducteur
- Rôle électrique : isole le conducteur par rapport au pylône.

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison entre les conducteurs hautes tensions (HT) et la terre [26].

- Ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage) ;

- Ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique), ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure) [26].

## II.4. Types des isolateurs

Nous distinguons deux types d'isolateurs sur le réseau de transport électrique : les isolateurs de type rigide et les éléments de chaîne.

### II.4.1. Isolateur suspendu en verre trempé

C'est l'isolateur le plus utilisé sur le réseau électrique de transport. Ce type d'isolateurs ressemble à des assiettes emboîtées les unes aux autres. Il est représenté par la figure (II.2).

L'élément suspendu est relié à d'autres éléments (pince de suspension, support, ...) de façon flexible, par un assemblage à rotule et logement de rotule (Ball socket). Chaque élément est constitué d'un capot, d'une partie isolante en verre trempé, d'une tige et éventuellement d'une rondelle anticorrosion [27, 28].



Fig.II.2. Isolateurs en verre

### II.4.2. Isolateur composite

On l'appelle aussi isolateur rigide (Fig. II.3), il contient un seul élément de longueur variable selon le niveau de tension de la ligne. L'isolateur est relié au support par une ferrure fixe (très souvent, sous forme de tige). Cet isolateur est principalement soumis à des efforts de flexion et de compression, lorsqu'il est placé en position verticale. Il peut, dans certains cas, être placé horizontalement, voire à l'oblique [27, 28].

Par rapport à un isolateur en verre, les isolateurs rigides ont une capacité de tenir des charges mécaniques plus importantes mais ils sont moins flexibles. Ils ressemblent à des assiettes collés les unes aux autres.

## II.5. Pollution des isolateurs

La pollution des isolateurs constitue un sérieux problème pour l'exploitation des réseaux de haute tension. En effet, et suite à l'interaction entre, l'air transportant des grains de poussières et l'isolateur, une couche étrangère se dépose sur les surfaces de celui-ci. Une fois cette couche humidifiée, la tension de tenue peut diminuer considérablement, pouvant provoquer des incidents très graves [29].

### II.5.1. Contournement

Le contournement se produit sur la surface de l'isolateur lorsqu'une décharge électrique s'établit entre ses extrémités et contourne la surface de l'isolateur. Le contournement provoque l'ouverture du disjoncteur, car il établit un court-circuit entre le conducteur et le pylône (défaut monophasé à la terre) [26, 29].

Ce contournement se déroule en quatre phases. Ces phases sont représentées par la figure (II.3)

Phase 1 : dépôt de pollution : Des grains de pollution se déposent sur la surface de l'isolateur (Figure (II.3.a)).

Phase 2 : Formation d'un électrolyte conducteur à sec, la résistance superficielle reste élevée malgré le dépôt de pollution. Quand la couche de pollution devient humide (brouillard, humidité, rosée du matin, pluie fine...), elle se transforme en électrolyte plus ou moins conducteur et donne naissance à un courant de fuite superficiel  $I_f$  circulant sur la surface de l'isolateur (Figure (II.3.b)).

Phase 3 : formation d'une bande sèche : Dans les régions étroites de l'isolateur, où la densité de courant est élevée, une partie de l'électrolyte s'évapore et crée une bande sèche (Figure (II.3.c)).

Phase 4 : contournement : Comme la résistance de la bande sèche est beaucoup plus grande par rapport au reste de l'électrolyte, pratiquement toute la tension aux bornes de l'isolateur est maintenant appliquée aux extrémités de cette zone. Il se produit alors un claquage dans la bande sèche :

- Soit la décharge s'éteint alors il n'y a pas de contournement (Figure (II.3.d)).
- Soit la décharge progresse sur la surface alors il y a un contournement de l'isolateur (Figure (II.3.e)).

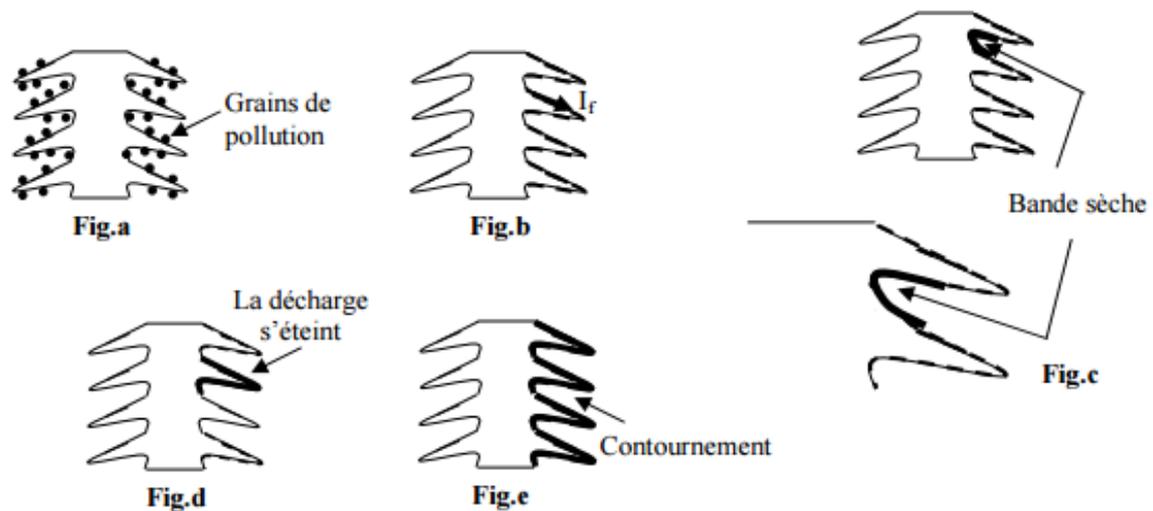


Fig.II.3. Déroulement du contournement sur un isolateur pollué [14]

## II.5.2.Sources de la pollution

Les divers types de pollution atmosphérique les plus fréquemment observés peuvent être regroupés selon leurs origines et classés comme suit [26] :

### II.5.2.1. Pollution naturelle

La pollution naturelle provient :

- des sels marins dans les régions côtières.
- des poussières du sol (notamment lors de chantiers importants).
- des sables véhiculés par le vent en régions désertiques.

#### II.5.2.1.1. Pollution marine

Les installations situées en bord de mer sont exposées aux embruns portés par le vent et qui se déposent progressivement sur les isolateurs, formant une couche de pollution de sel qui devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée par le brouillard ou simplement par condensation. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance.

#### II.5.2.1.2. Pollution désertique

La pollution désertique est caractérisée surtout par les dépôts de sable se formant à la surface des isolateurs après les vents de sable. Une fois humidifiés, ces dépôts deviennent plus ou moins conducteurs (en fonction des concentrations en sels solubles qu'ils contiennent) et engendrent la circulation d'un courant de fuite qui apparaît brusquement et qui est suivi par l'apparition d'arcs partiels qui peuvent conduire au contournement total de l'isolateur.

#### II.5.2.2. Pollution industrielle

Au voisinage de certaines zones industrielles, la pollution est engendrée par l'évacuation des fumées des usines (raffinerie, cimenterie, minerais ..... etc.). La présence d'éléments conducteurs dans les couches, et/ou la dissolution des sels qu'elles contiennent engendrent la circulation d'un courant de fuite plus ou moins fort selon les concentrations des agents polluants.

Les usines ne sont pas les seules responsables de ce genre de pollution ; les gaz d'échappement des véhicules et les engrais utilisés en agriculture contribuent aussi aux dépôts observés à la surface des isolateurs.

### **II.5.2.3. Pollution mixte**

Ce type de pollution est en fait le plus fréquent et le plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. La pollution mixte résulte de la combinaison entre les différents types de pollution, comme par exemple les pollutions marine et industrielle lorsque des installations industrielles sont situées en bord de mer.

## **II.6. Quelques travaux sur la pollution désertique**

Le courant de fuite sur la surface des isolateurs pollués est une cause majeure de défaillance de l'isolateur dans les lignes électriques à haute tension. L'entretien de ces lignes nécessite un nettoyage périodique de la surface, qui est une opération coûteuse. L'amplitude du courant de fuite d'un isolateur pollué dépend du degré de la pollution et la gravité de la salinité de la contamination, ce qui affecte ensuite la conductivité de la couche de pollution.

La couche de pollution accumulée sur la surface a une épaisseur qui dépend du type de sol dans la région et de la taille des grains polluants de sable.

Les travaux antérieurs pertinents dans ce domaine incluent l'estimation des distributions de densité de courant le long de la surface de l'isolateur pollué, en utilisant la simulation de la méthode des charges surfaciques [2].

Dans une autre étude, la simulation du courant de fuite est faite en tenant compte de la quantité de sel dans la couche de contamination. D'autres études expérimentales ont été faites sur l'effet de la pollution désertique sur un isolateur en matériau polymère [2].

Dans un autre travail, le courant de fuite a été estimé en utilisant le logiciel FEMLAB avec différentes conductivités de la couche de contamination [28].

### **II.6.1. Effet de la contamination désertique des isolateurs sur le comportement du courant de fuite**

Les essais réalisés par Sulaiman et M. Iqbal [30] au laboratoire de l'Université de King Saudi, ont pour but d'étudier l'effet de la pollution désertique sur l'évolution du courant de fuite. La quasi-totalité des recherches antérieures sur le sujet de la pollution désertique des isolateurs a été réalisée en se référant au sel de chlorure de sodium NaCl. Quelques travaux récents montrent que l'analyse chimique de la contamination marine et industrielle diffère considérablement des contaminants désertiques [31]. Afin de déterminer l'influence de la pollution désertique sur la performance des isolateurs, plusieurs contaminations désertiques ont été collectées de plusieurs régions de l'Arabie Saoudite. Ces contaminations ont été examinées au laboratoire chimique pour savoir de quels porteurs de charges elles se composent. Cependant, les résultats de Sulaiman et M. Iqbal [30] montrent que les échantillons de pollution désertique recueillis pourraient varier considérablement dans le sens de la qualité et de la quantité suggérant un comportement différent des isolateurs pollués en plein air.

Le tableau (II.1) décrit les constituants chimiques dans la région de Riyad, ce qui montre la domination de  $\text{CaCO}_3$  ainsi que les sulfates et les nitrates.

**Tableau II.1** : Composants chimiques de couches de pollution prélevées de la ligne de transport de 132 kV dans la région de Riyad [34]

Composants	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	KNO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	Teneur en eau
Concentration (%)	36,5	44,63	1,28	1,61	0,52	4,13	7,81	3,10

**Tableau II.2** : Sels solubles majeurs dans des échantillons contaminés de la côte des zones désertiques de a) l'Egypte [32] et b) le Pakistan [33]

Composants	Concentration moyenne (%)	
	(a)	(b)
CaSO <sub>4</sub>	10,0	25,0
NaCl	3,0	42,0
KCl	0,5	-
CaCO <sub>3</sub>	-	23,0
Autres	-	10,0

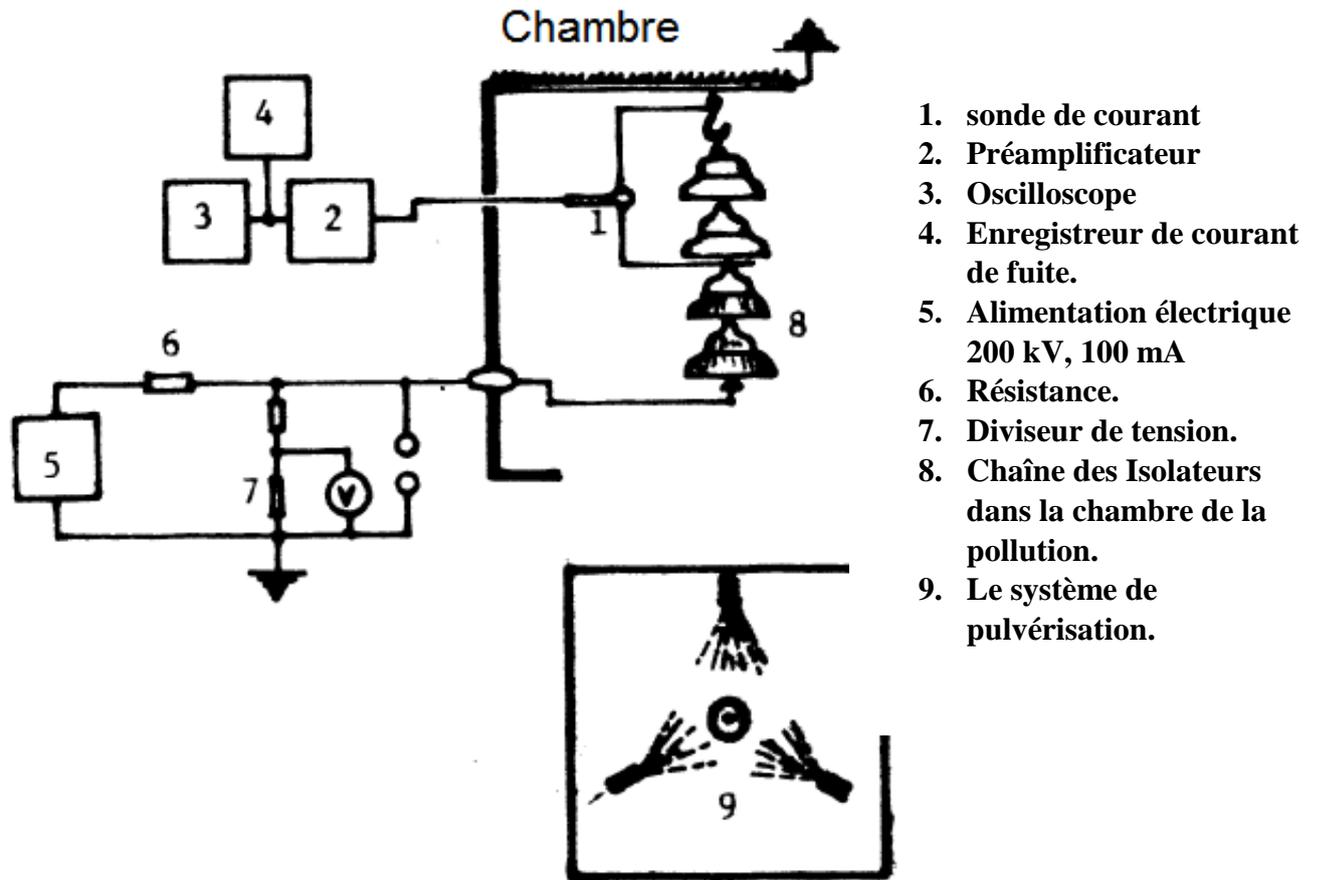
Nous voyons dans le tableau (II.2) des échantillons prélevés sur deux sites désertiques situés non loin de la côte de la mer [32,33] qui montrent la présence de NaCl ainsi que la prédominance des sulfates et autres sels. Alors que presque toutes les recherches antérieures sur ce sujet ont été réalisées à l'aide d'un seul sel, NaCl [34]. Cette présente analyse qui montre l'absence de ce sel à l'intérieur du désert, pose la question sur l'inefficacité des études basées sur NaCl.

### II.6.1.1 Préparation de la couche polluante

Pour simuler ce genre de couches polluantes désertiques, trois solutions différentes sont préparées dans l'objet d'étudier leurs influences sur la performance des isolateurs.

La préparation de la solution de suspension a été faite en mettant 2000 ml d'eau distillée dans un récipient de taille appropriée et en y ajoutant 200 g de Kieselgur avec 20 g de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, en les mélangeant avec un agitateur électrique jusqu'à ce qu'aucune précipitation ne soit vue. A cette solution de base, un sel de contamination a été ajouté pour ajuster la conductivité de la solution à 3000, 6000 et 9000  $\mu\text{S} / \text{cm}$  à 200 ° C. D'une manière similaire, la deuxième solution a été préparée pour KNO<sub>3</sub> et la troisième solution (sel mixte) a été préparée en mélangeant tous les composants chimiques du tableau (II.1).

La figure (II.4) représente le montage expérimental de cette étude.

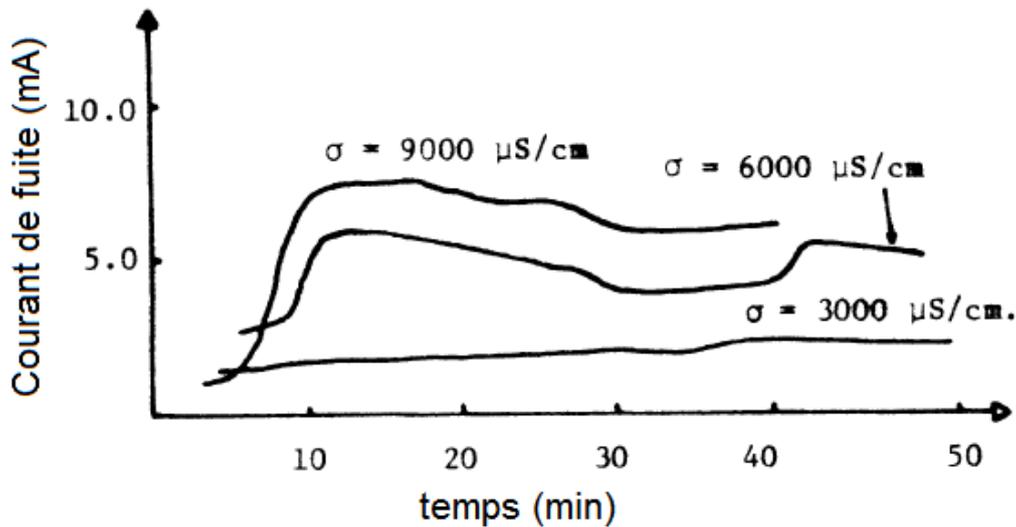


**Fig. II.4.** Montage expérimental au laboratoire de l'Université de King Saudi [34]

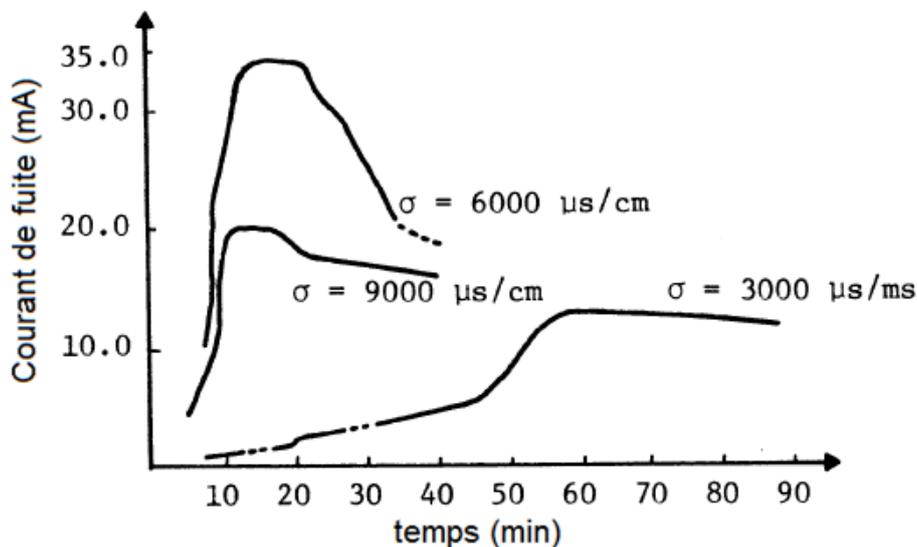
Les isolateurs ont été nettoyés avec de l'eau distillée. Ensuite, ils ont été plongés dans la solution et mis en rotation pour obtenir une couche polluante uniforme. Plus tard, ils ont été suspendus pendant 24 heures pour les régler à la température ambiante.

Les isolateurs sont suspendus verticalement à l'intérieur de la chambre de pollution qui est une tente en plastique d'environ 3 m<sup>2</sup>. Un brouillard de haute densité est produit en utilisant plusieurs pistolets électriques à peinture montés sur des supports en bois. Trois de ces stands étaient disposés à 120°. Chaque arme a une capacité de délivrer une fine pulvérisation du brouillard à un angle de 45°, tandis que la longueur du jet peut être réglée entre 0,5 et 2 m avec son régulateur. La chaîne a été soumise à une tension de 3,5 kV, cinq minutes après l'application de brouillard pour chaque essai expérimental. La variation de courant a été enregistrée à chaque minute et cela a duré de 60 à 90 minutes. Le réservoir d'eau relié à ces pistolets a été fourni avec de l'eau traitée ayant une conductivité uniforme de 150  $\mu\text{S} / \text{cm}$ .

## II.6.1.2 Résultats expérimentaux et discussion

Fig.II.5. Effet de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur le courant de fuite [34]

La Figure (II.5) montre la variation du courant de fuite superficiel en fonction du temps pour Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à différentes conductivités de la couche de 3000, 6000 et 9000 μS / cm. On peut constater qu'en général l'amplitude du courant augmente avec l'augmentation de la couche de sel de la solution, juste après l'application du brouillard. Par ailleurs, le courant augmente brusquement et atteint un maximum à environ 12 minutes, après il reste stable pendant quelques minutes, et commence alors à diminuer très lentement.

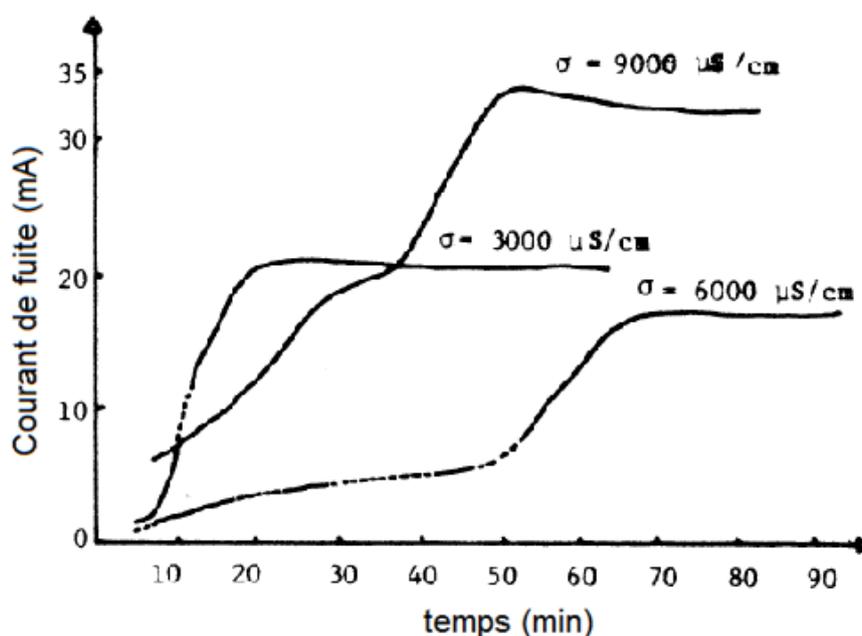
Fig.II.6. Effet de KNO<sub>3</sub> sur le courant de fuite [34]

La figure (II.6) décrit la variation du courant de fuite superficiel en fonction du temps pour KNO<sub>3</sub> à plusieurs conductivités de la couche 3000, 6000 et 9000 μS/cm. Ce sel présente une tendance différente par rapport à d'autres sels. En effet, le courant de fuite dans le cas de 6000 uS / cm est supérieur que dans le cas de 9000 μS / cm. En plus, le pic auquel le courant se stabilise est supérieur à celui de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pour les mêmes conductivités, car le processus d'ionisation anhydre de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> est très lent dans ces conditions expérimentales. La réaction

peut être irréversible et sous la forme de  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{Na}^+ + \text{SO}_4^-$ , alors que le  $\text{KNO}_3$  est un électrolyte fort et qui s'ionise rapidement avec la réaction réversible  $\text{KNO}_3 \rightleftharpoons \text{K} + \text{NO}_3$ . Cela est dû à la solubilité de  $\text{KNO}_3$  qui est supérieure à celle de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ce qui est montré dans le tableau (II.3). Ce dernier présente les variations de solubilité due à une variation de température pour une partie des sels.

**Tableau II.3.** Variation de la solubilité (sel / 100 g eau) en fonction de la température (°C) [34]

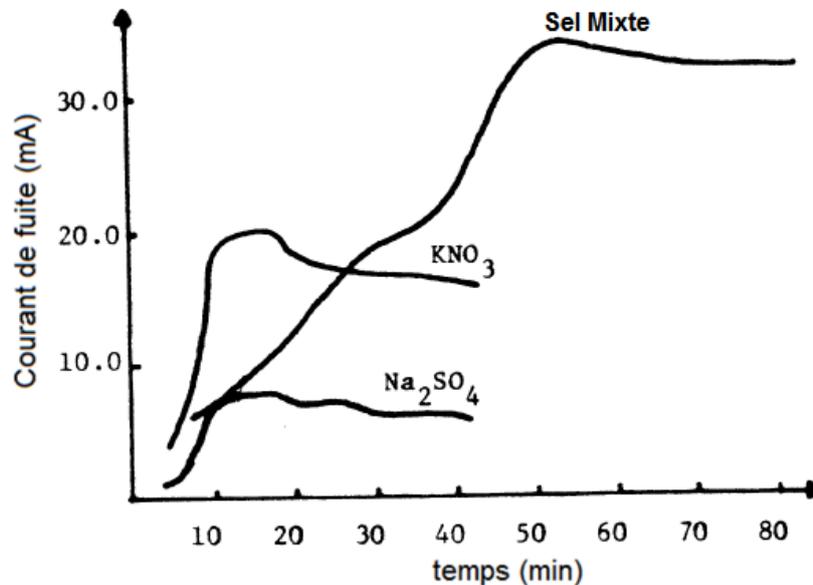
Température \ Sels	0°	10°	20°	30°	40°	50°
CaSO <sub>4</sub>	0,1759	0,1928	-	0,209	0,209	0,203
KNO <sub>3</sub>	13,3	20,9	31,6	45,8	63,9	85,5
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-	-	-	-	48,8	46,7
NaCl	35,7	35,8	36,0	36,3	36,6	37,0



**Fig.II.7.** Effet du « sel mixte » sur le courant de fuite [34]

La figure (II.7) reflète la variation du courant de fuite superficiel en fonction du temps pour le cas du « sel mixte ». Avec une couche de pollution de  $3000 \mu\text{S} / \text{cm}$ , le courant de fuite augmente brusquement à un maximum, puis reste stable. Le courant de fuite a été considérablement amoindri dans les cas de  $3000 \mu\text{S} / \text{cm}$  avec  $\text{KNO}_3$  et  $6000 \mu\text{S} / \text{cm}$  avec « sel mixte » due à l'apparition occasionnelle de décharges de scintillation (pointillés). Ces décharges avec de grandes impulsions de courant se traduisent par la formation de bandes sèches qui, à leur tour réduisent la conductivité électrolytique et par conséquent le courant de fuite qui en résulte. Après l'écoulement d'une activité de décharge, le courant a augmenté et atteint une valeur maximale qui est inférieure à la valeur maximale atteinte dans le cas de  $3000 \mu\text{S} / \text{cm}$ . Cela est dû au fait que l'amplitude du courant dans ce cas avait été soumise à des décharges

jusqu'à 52 minutes de temps d'exécution. Lorsque la décharge a disparu, le courant a augmenté fortement, mais à travers cette longue période de pulvérisation, la couche de sel avait déjà été éliminée de plus en plus. A  $9000 \mu\text{S} / \text{cm}$ , la courbe monte lentement à une valeur maximale, où elle reste stabilisée pendant un temps considérable. Cela peut être attribué à la prépondérance de  $\text{CaSO}_4$  qui a une solubilité limitée, comme c'est indiqué dans le tableau (II.3).



**Fig.II.8.** Comparaison des effets des différents sels à  $9000 \mu\text{S}/\text{cm}$  [34]

Afin d'étudier le comportement des courants de fuite à des concentrations plus élevées de différents sels, les courbes de comparaison ont été établies pour  $9000 \mu\text{S} / \text{cm}$ , comme le montre la figure (II.8).

On peut constater d'après ces résultats que les courants de fuite à un instant particulier sur la surface de l'isolant sont une somme résultante de conductances générée par les sels individuellement. Cette somme résultante variera en fonction du temps avec l'apparition de la pluie. Par exemple, nous pouvons voir sur la figure (II.8) que  $\text{KNO}_3$  est rapidement dissous, il commence à jouer un rôle actif dans la production d'une conductance de surface, et atteint son maximum après environ 12 minutes tandis que les autres sels ne sont pas encore actifs. Mais quand les autres sels deviennent actifs, la plupart du  $\text{KNO}_3$  est dissous ou emporté. Cela est suivi par la dissolution du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

### II.6.2. Evaluation des risques de pollution du désert sur les isolateurs composites à haute tension

Dans cette étude, les distributions statiques des tailles des grains de sable dans le sol du désert de Sinaï ont été acquises à partir d'échantillons aléatoires, ou leur salinité et la conductivité ont été mesurées.

L'étude de simulation de l'isolateur est effectuée en utilisant un programme précis dans le logiciel ANSYS 3-D, qui est basé sur la méthode des éléments finis. Le programme requiert un calcul de performance élevée et a donné des résultats d'une grande précision.

Sur la base de l'influence de la taille des grains de sable et de la salinité de la couche polluante, la cartographie de la répartition statistique a été effectuée pour produire la

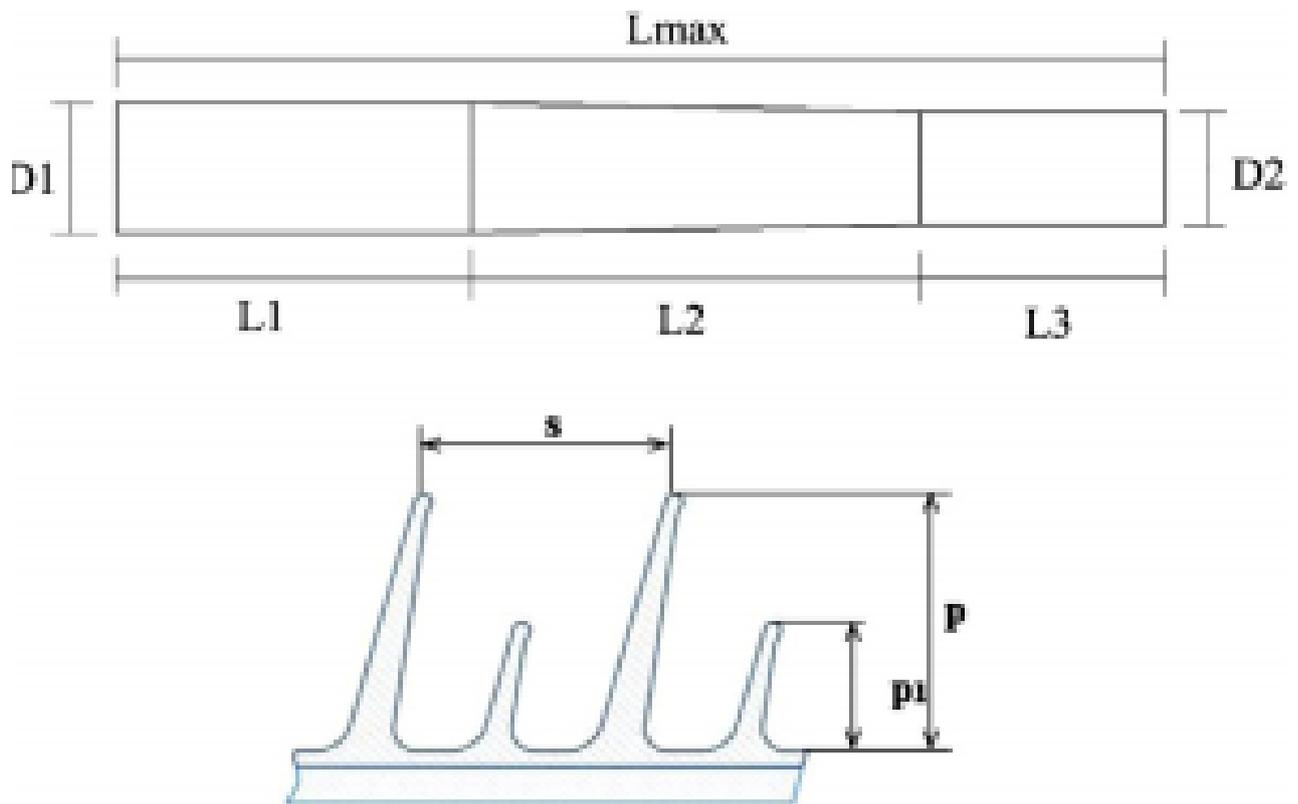
distribution globale de la densité de probabilité de courant de fuite et évaluer le risque de défaillance de l'isolateur.

### II.6.2.1.Méthodologie

Les deux chercheurs Mohammed El-Shahat, Hussein Anis [2] utilisent un isolateur dans lequel son matériau est défini comme étant un caoutchouc de silicone 220 kV ABB comme le montre la figure (II.9.a). Ses dimensions sont données dans le tableau (II. 4). Ils ont utilisé un UNIGRAPHICS pour créer le modèle d'isolateur en 3-D et l'exporter vers le programme ANSYS.

Comme représenté sur la figure. (II.9.b), dans le programme ANSYS, les mailles d'éléments finis appropriées ont été utilisées pour l'analyse

Le secteur de l'isolateur a deux hangars ; un hangar est long et l'autre est court avec une distance totale de fuite de 186,14 mm. Unigraphics a été utilisé pour simuler ce secteur de l'échantillon d'isolateur comme illustré sur la figure (II.9.c).



**Fig. II.9.a.** Forme de l'isolateur avec le hangar utilisé comme dans le guide de conception ABB [2]

**Tableau.II.4** Dimensions des composantes de l'isolateur utilisé [2]

Dimension	Symbole	Valeurs (mm)
Diamètre intérieur 1	D1	250
Diamètre intérieur 2	D2	219
Longueur 1	L1	680
Longueur 2	L2	855
Longueur 3	L3	470
Longueur maximale	Lmax	2005
La distance entre deux hangars	S	55
Hauteur de grand hangar	P	55
Hauteur de petit hangar	P1	25

**Fig. II.9.b.** Modèle Unigraphics 3-D de l'isolateur [2]**Fig.II.9.c.** Modèle d'échantillon de l'isolateur [2]

### II.6.2.2. Résultats et discussions

#### a. Effet de l'épaisseur de la couche polluante

Des grains de sable avec des diamètres dans la gamme de 1-2 mm ont été prédominants dans l'étude, prend cette gamme de tailles de grains et suppose que l'accumulation crée une couche uniforme. En outre, une analyse chimique a été effectuée sur les échantillons acquis qui détermine la teneur en sel équivalente (ESC) de la couche de pollution (ESC, en mg de sel / g de sable). Ils ont constaté que toute une gamme de salinité de 0,5-1,5 mg de sel / g de sable était la plus susceptible d'exister dans cette région (Sinai) [2].

Pour convertir la teneur en sel exprimée en ESC (mg de sel / g de sable) -obtenue par l'analyse chimique- en conductivité électrique de la couche polluante (S / m), la salinité de la solution est d'abord obtenue par l'expression [35] :

$$S_a = 10^{-3} \cdot \text{ESC} \cdot Q$$

$S_a$  : la salinité de la solution.

$Q$  : la quantité de sable déposée sur la surface de l'isolateur avec une certaine quantité d'eau.

La salinité de la couche est liée à la conductivité électrique, elle est déterminée par [36] :

$$S_a = 1,03 (5,7 \delta_{20})$$

$\delta_{20}$  : La conductivité à une température de 20 ° C (S / m)

En utilisant les théories de la géométrie de réseau, la quantité  $Q$  peut être exprimée comme suit :

$$Q = \frac{\lambda}{1-\lambda} \rho$$

où  $\lambda$  est la densité d'agencement du réseau, qui est la proportion de la quantité réelle de particules (sable) qui occupe un espace donné ;  $\rho$  est la masse volumique du sable humide (1,92 g / ml).

Le paramètre  $\lambda$  a été calculé pour tomber dans la plage de 0,523 à 0,740, dans cette étude elle est choisie égale à 0,523 alors la quantité de sable déposée est donné par 2,1 g/ml.

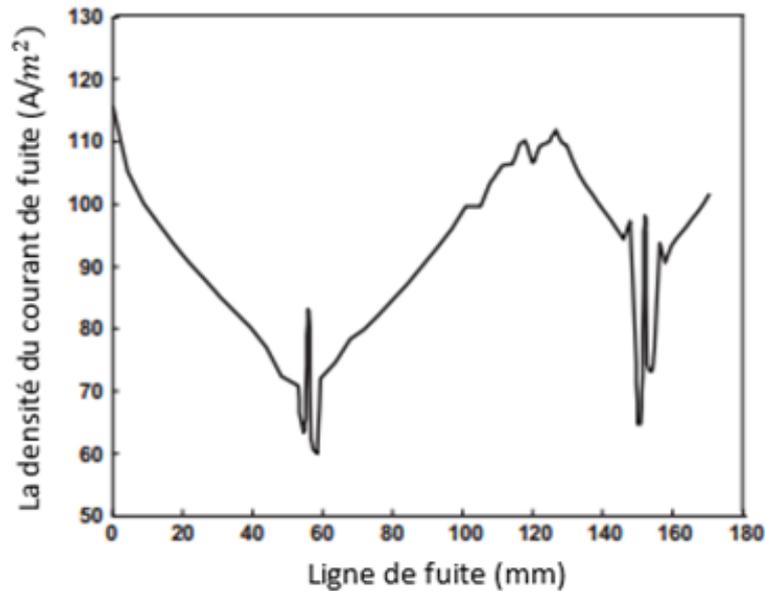
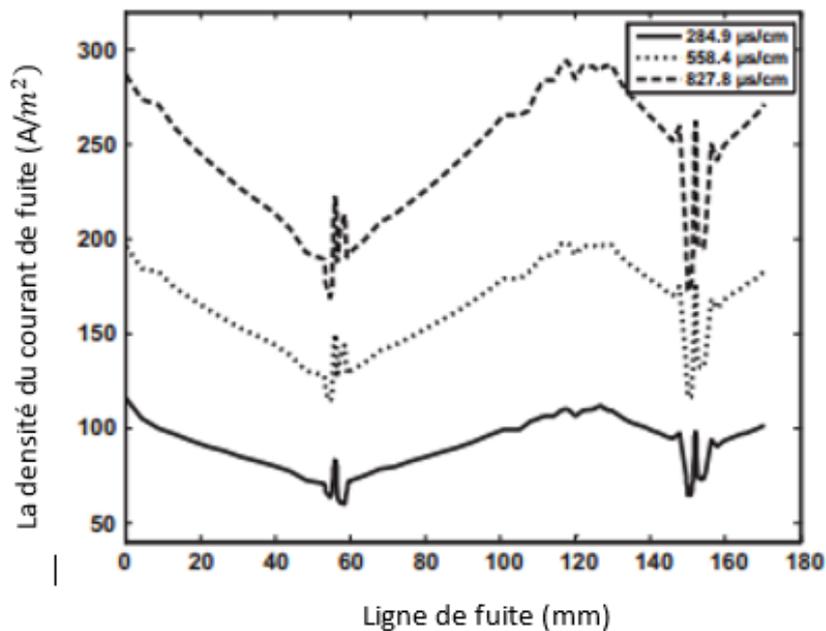
Le tableau (II.5) ci-dessous montre les différentes conductivités du grain de sable du désert du Sinai recueillies en fonction de sa gamme ESC. Ces valeurs ont été utilisées dans la simulation de l'isolateur pollué en cherchant les statistiques d'un champ électrique tangentiel le long de l'isolateur composite, qui entraîne le courant de fuite.

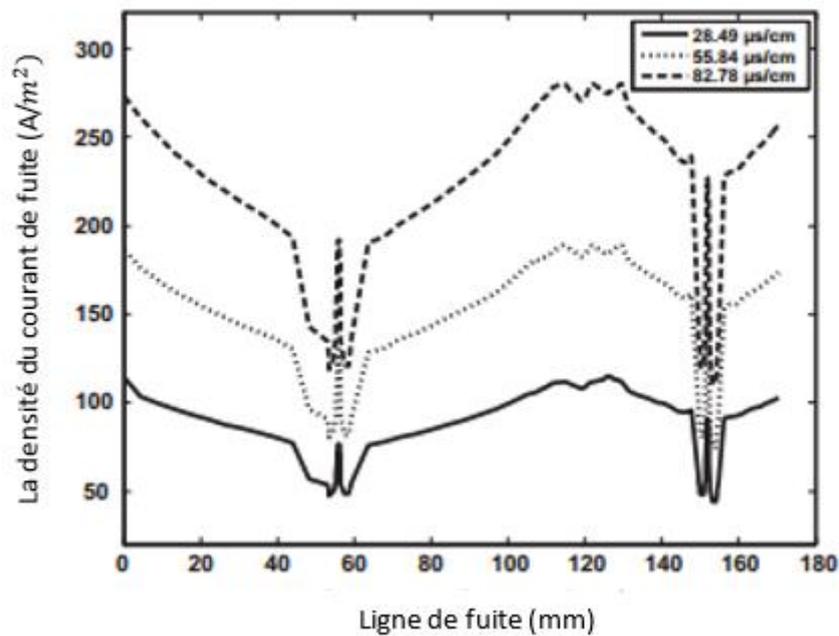
Ils ont étudié l'effet de la conductivité pour chaque couche de pollution sur la densité de courant de fuite sur la surface de l'isolateur.

L'intensité de courant de fuite considérée dépend de l'évolution de la salinité de sable polluant (et donc de la conductivité) et la taille des grains de sable.

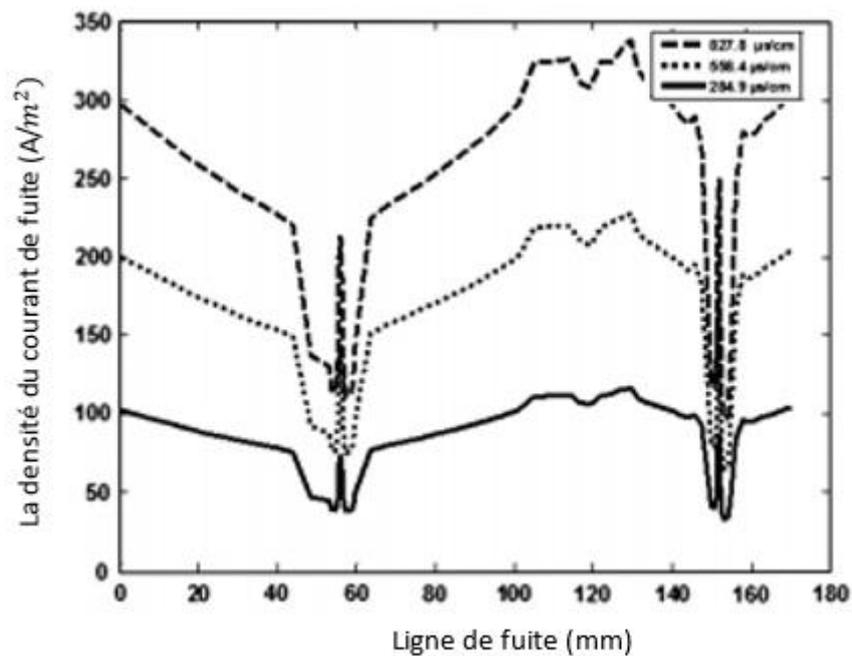
**Tableau II.5.** Estimation de la conductivité de la couche déposée du sable humide [2]

L'équivalent de la teneur en sel (ESC) (mg sel par g sable)	Salinité (Sa) (mg/ml)	Conductivité ( $\delta_{20}$ ) ( $\mu\text{S/cm}$ )
0,5	1,05	284,9
1,0	2,10	558,4
1,5	3,15	827,8

**Fig.II.10.a.** Densité du courant de fuite à travers 1 mm de la couche polluante pour une conductivité égale à  $284,9\mu\text{S} / \text{cm}$ **Fig II.10.b.** Densité du courant de fuite à travers 1 mm de la couche polluante pour des conductivités différentes



**Fig II.10.c.** Densité du courant de fuite à travers 1,5 mm de la couche polluante pour des conductivités différentes



**Fig II.10.d.** Densité du courant de fuite à travers 2 mm de la couche polluante pour des conductivités différentes

### b. Interdépendance du courant de fuite de la taille des grains de sable et de la conductivité

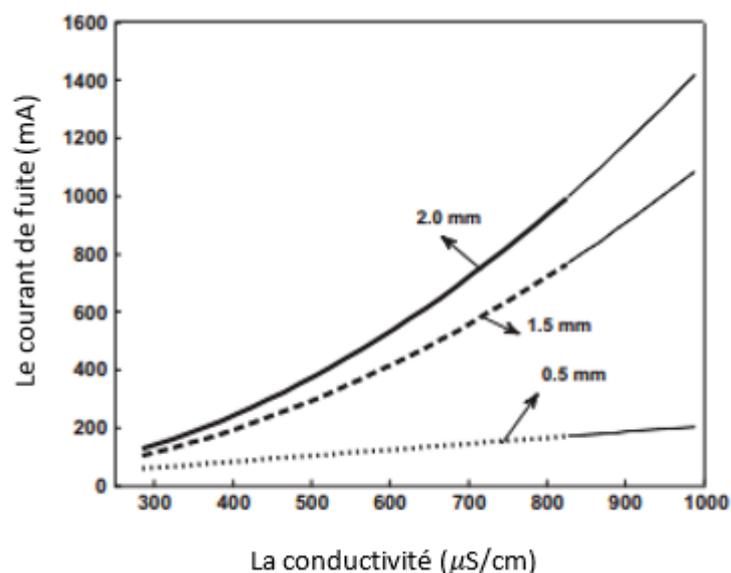
La Figure (II.10.a) montre la répartition des densités de courant de fuite au-dessus de la ligne de fuite pour une épaisseur de 1 mm de la couche polluante et de conductivité  $284,9 \mu\text{S/cm}$ .

Les Figures (II.10.b), (II.10.c) et (II.10.d) décrivent l'effet de la conductivité superficielle sur la densité de courant de fuite dans le cas d'une couche de contamination 1 ; 1,5 et 2 mm, respectivement. Les résultats sont résumés dans le tableau (II.6).

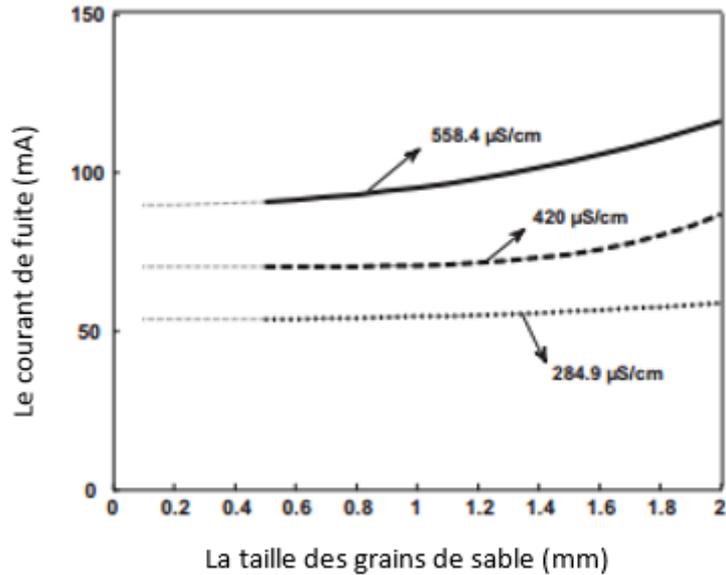
**Tableau II.6.** Courant de fuite en mA pour des différentes épaisseurs de la couche de pollution et différentes valeurs de conductivité [2]

L'épaisseur de La couche de pollution.	La conductivité		
	$284,9 \mu\text{S/cm}$	$558,4 \mu\text{S/cm}$	$827,8 \mu\text{S/cm}$
1,0	54,60 mA	96,00 Ma	140,87 Ma
1,5	56,23 mA	98,34 Ma	145,78 mA
2,0	58,93 mA	115,5 Ma	171,22 mA

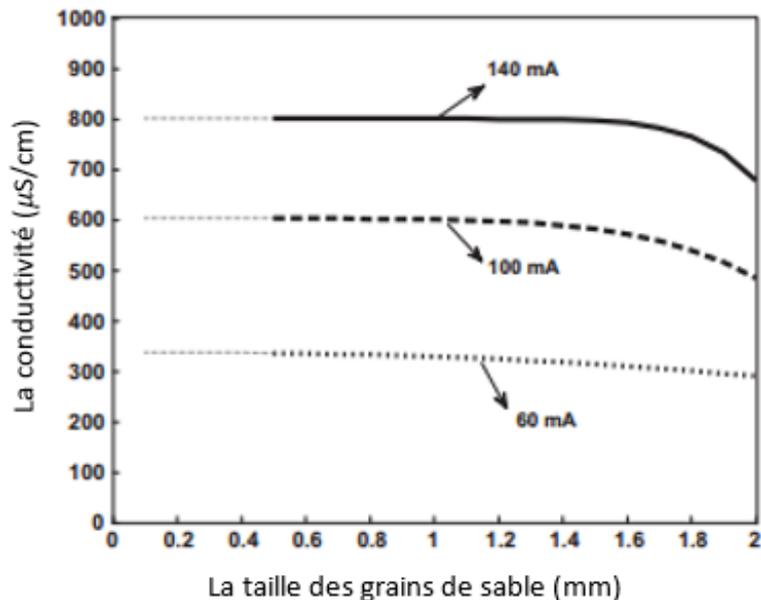
Sur la base des résultats ci-dessus, la Figure (II.11.a) représente la relation entre le courant de fuite et la conductivité avec différentes tailles de grains de sable (l'épaisseur de la couche) déduite numériquement. De même, la Figure (II.11.b) représente la relation entre le courant de fuite et la taille de grains avec différentes conductivités de sable ; la Figure (II.11.c) représente la variation de la conductivité par rapport à la taille des grains du sable pour différentes valeurs de courant de fuite [16].



**Fig II.11.a.** Dépendance entre courant de fuite et la conductivité, pour différentes tailles de grains de sable [2]



**Fig II.11.b.** Dépendance entre courant de fuite et la taille des grains de sable, pour différentes valeurs de conductivité



**Fig II.11.c.** Relation entre la conductivité et la taille des grains de sable, pour différentes valeurs de courant de fuite

### c. Evaluation du risque de défaillance de l'isolateur en se basant sur le courant de fuite

Les deux chercheurs Mohammed El-Shahat et Hussein Anis [2] ont démontré que le courant de fuite dépend à la fois de l'épaisseur de la couche de sable polluante et de sa salinité et par conséquent de sa conductivité électrique.

Le courant de fuite peut aussi être considéré comme une variable aléatoire, les deux variables, la conductivité  $c$  et la taille du grain de sable  $g$ , sont supposés être statistiquement

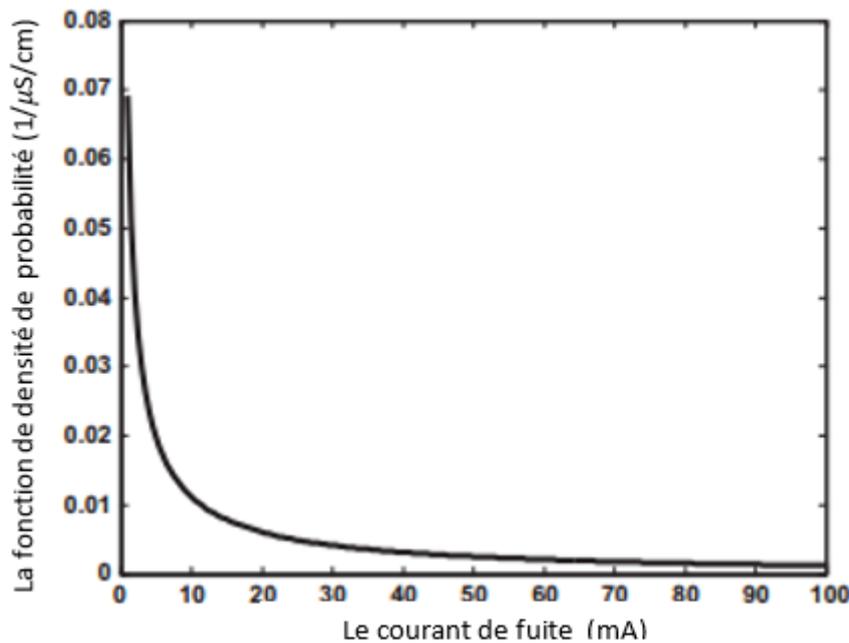
indépendants. Si les distributions de probabilité de la taille des grains de sable et la conductivité sont, respectivement,  $p(c)$  et  $p(g)$ , la distribution de probabilité de courant de fuite  $p(I)$  serait :  $P(I) = p(c) \cdot p(g)$  [2].

Mohammed El-Shahat, Hussein Anis [2] utilisent quelque technique et ils concluent la dépendance entre les statistiques du courant de fuite et la distribution de probabilité pour les deux variables indépendantes (la conductivité et la taille des grains de sable)

La répartition globale de densité de probabilité de courant de fuite est exprimée par cette relation [33]

$$P(x, \lambda, k) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}, \quad x > 0, k=0,344, \lambda=49,7$$

La variation de la fonction de densité de probabilité de courant de fuite est représentée par la figure (II.12)

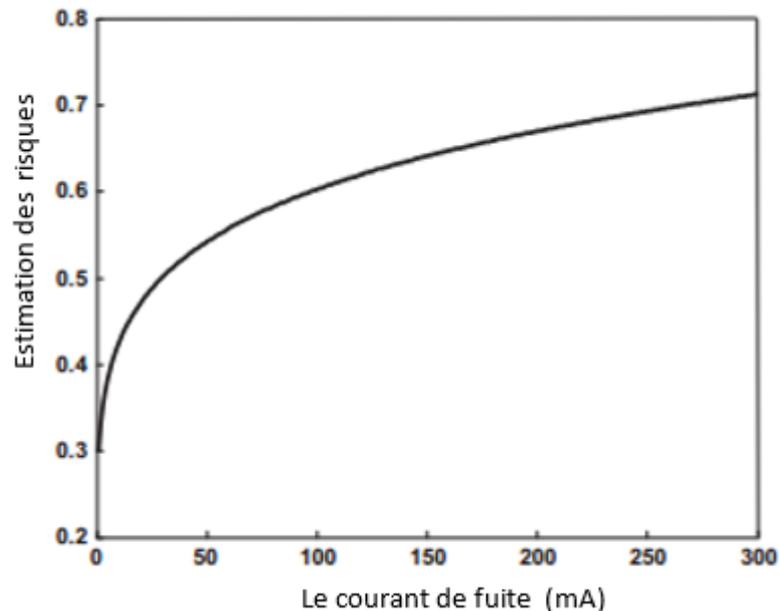


**Fig II.12.** Fonction de densité de probabilité en fonction du courant de fuite [2]

D'autres recherches [35] montrent que l'amplitude du courant de fuite est un prédicateur fiable de décharge surfacique et l'ultime défaillance de l'isolateur. Par conséquent, la distribution de probabilité d'un courant de fuite peut être utilisée pour évaluer le risque de défaillance de l'isolateur. Sur la base de la distribution de densité de probabilité, la probabilité cumulée du courant de fuite peut être produite.

Une valeur critique de courant de fuite peut être fixée par les compagnies d'électricité lorsque cette valeur est dépassée, la défaillance de l'isolateur est imminente. Par conséquent, la fonction de probabilité cumulative indique les chances pour que la valeur actuelle de courant de fuite puisse être dépassée la valeur critique, il indique également les chances de défaillance de l'isolateur.

La Figure (II.13) affiche le résultat final de l'étude.



**Fig II.13.** Estimation des risques de défaillance de l'isolateur [2]

Alors comme la figure (II.13) montre, le risque de défaillance de l'isolateur est grand si le courant de fuite est important.

## II.7. Conclusion

Ces résultats montrent que le courant de fuite sur la surface d'un isolateur dépend en grande partie de la solubilité des sels individuels contenus dans la couche polluante.

Dans des conditions de pollution désertique, la densité de courant de fuite et son amplitude ont été calculées le long de la couche polluante sur un isolateur de type composite et pour une épaisseur et une salinité (conductivité) données.

Les relations entre la taille des grains, la conductivité et les courants de fuite ont été estimées. Les statistiques du courant de fuite superficiel qui dépendent de la distribution de probabilité pour les deux variables indépendantes (conductivité et la taille des grains) ont été déduites en utilisant des techniques.

Une nouvelle méthode est donnée pour estimer le risque de contournement sous pollution, où la densité de probabilité du courant de fuite est utilisée comme un outil direct pour le risque de défaillance de l'isolateur.



# Chapitre III

## **Techniques expérimentales**



ENP  
2016

### III.1. Introduction

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

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

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

### III.2. Dispositif expérimental

#### III.2.1. Circuits d'essais

La station d'essais du laboratoire (Figure (III.1)) où nous avons effectué nos essais est de marque HAEFELY [8], elle contient :

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

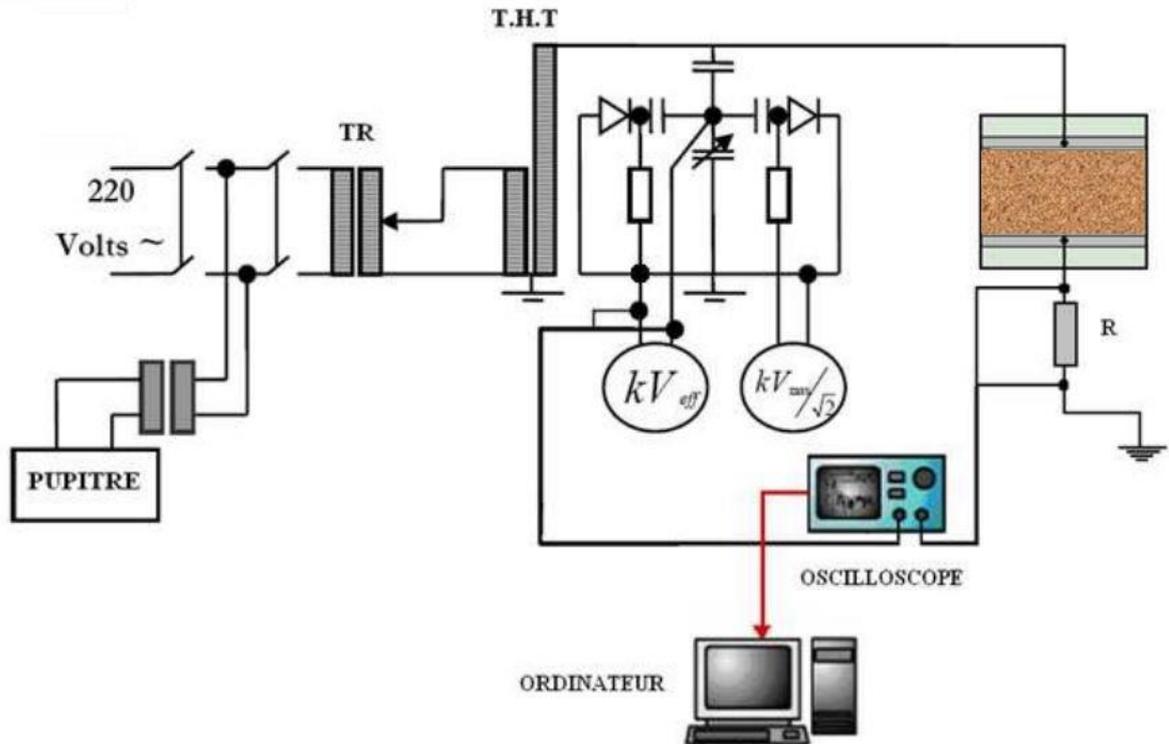
Nous avons effectué nos essais en se basant sur ce circuit d'essai représenté sur la figure (III.3).



Fig.III.1 Vue du laboratoire de l'ENP



Fig.III.2 Oscilloscope GWINSTEK



**Fig.III.3** Circuit d'essais et de mesures

### III.2.2. Objet d'essais

Lors de nos essais, nous avons utilisé un modèle d'isolateur plan (Figure (III.4)).

Pour effectuer nos essais ce modèle, nous avons besoin du matériels (Figure (III.5)) comme :

- Papier d'Aluminium.
- Alcool chirurgical.
- Papier absorbant.
- Coton.
- L'eau distillée.
- Sable.
- Gas-oil.
- Tulle (utilisé comme un tamis).



**Fig.III.4** Modèle plan expérimental, vue de haut



**Fig.III.5** Matériel utilisé dans le modèle plan

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

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

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

Nous posons notre modèle à une hauteur de 1590 mm du sol dans (Figure (III.6)) le but de limiter l'effet des capacités parasites qui risquent de rendre nos mesures erronées durant les essais.



**Fig.III.6** Position du modèle par rapport à la terre

Les dimensions de l'isolateur réel avec une représentation de ses éléments (Figure (III.7)) et les dimensions de notre modèle plan à étudier sont données par les deux tableaux ci-dessous (Tableau (III.1)) et (Tableau (III.2)).

**Tableau III.1** Caractéristiques de l'isolateur réel

Caractéristiques de l'isolateur	Grandeurs
Résistance mécanique	120 kN
Diamètre du disque	260 mm
Longueur de la tige	100 mm
Largeur de la tige	95 mm

Longueur de fuite	450mm
Distance de contournement à sec	292mm

**Tableau III.2** Dimensions du modèle plan étudié

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

**Fig.III.7.** Les éléments de l'isolateur réel capot (à droite) et la tige (la partie limitée par le cercle côté gauche)

### III.3. Mode opératoire

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

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

Nous considérons deux conductivités différentes de la couche de pollution avec laquelle nous recouvrons le modèle isolant expérimental. La couche de pollution est constituée par du sable humidifié à l'aide d'un pulvérisateur contenant de l'eau distillée de conductivité donnée. Pour chaque configuration, nous effectuons 5 fois la même mesure de la tension de contournement, et nous calculons leurs valeurs moyennes.

#### III.3.1. Préparation de la couche polluante de sable

Deux échantillons de sable prélevés de deux régions différentes ont été utilisés dans nos essais (Figure (III.8)). Le premier échantillon de sable est prélevé de la ville de Boussaâda (M'sila) et dont la conductivité est de  $21 \mu\text{S}/\text{cm}$  mesurée à une température de  $17,2^\circ\text{C}$ . Le deuxième échantillon a été prélevé de la ville de Bechar et dont la conductivité est de  $9 \mu\text{S}/\text{cm}$  (à  $T= 17,2^\circ\text{C}$ ). Ces mesures de conductivités ont été effectuées au Laboratoire de Haute Tension de l'ENP à l'aide d'un conductimètre de type numérique comme c'est indiqué sur la figure (III.9)).



**Fig.III.8** Sable de Boussaâda (à gauche) et de Bechar (à droite)



**Fig.III.9** Mesure de la conductivité par un conductimètre

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

### **III.3.2 Nettoyage des isolateurs plan**

#### **III.3.2.1. Cas propre**

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

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

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

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

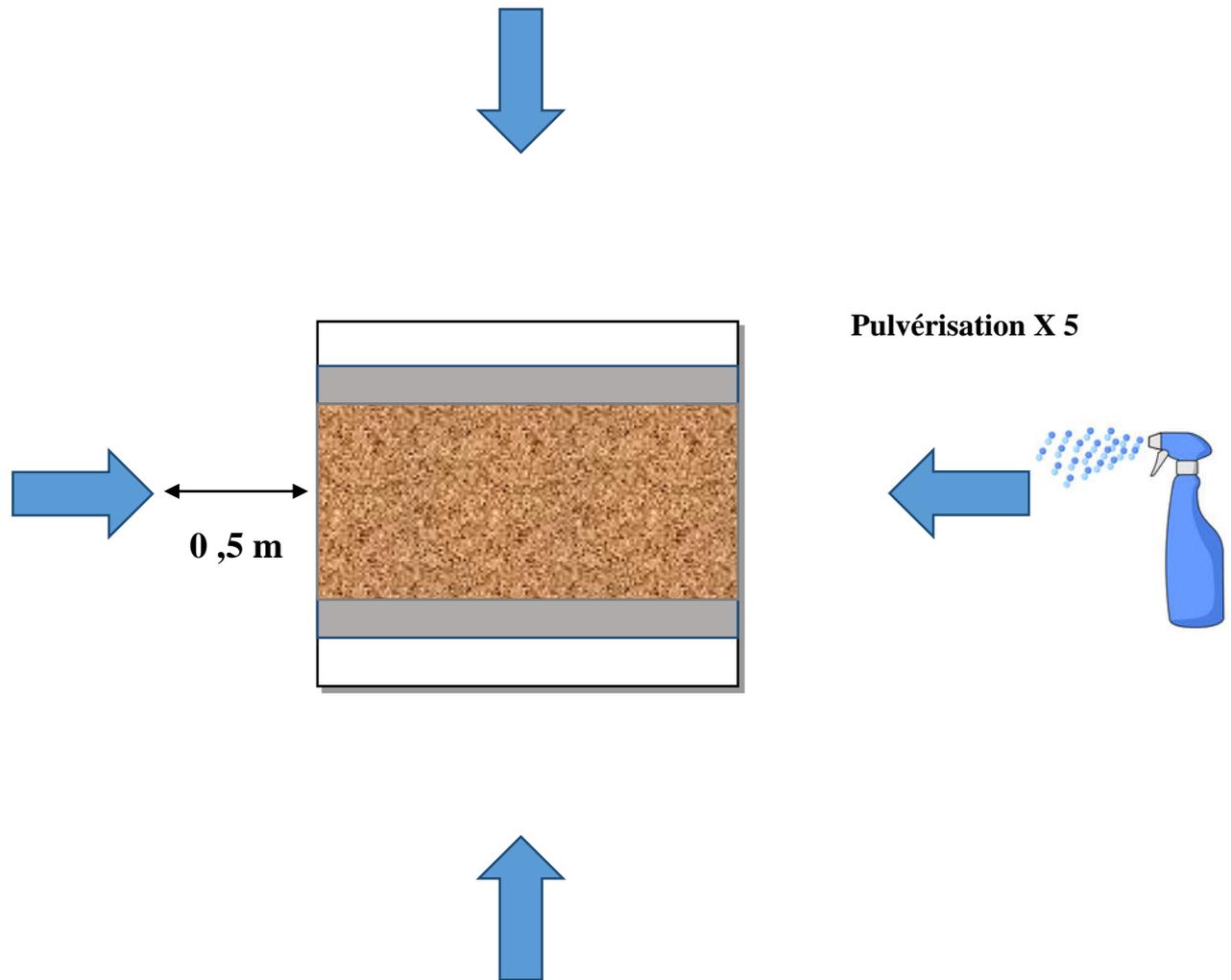
### III.3.2.2 Cas Pollué

Le modèle étant bien nettoyé, nous utilisons, pour chaque quantité de sable désirée, un tulle en plastique que nous utilisons comme un tamis et avec des mouvements de vas et viens de telle façon à obtenir une répartition de la couche de pollution la plus uniforme possible (Fig. III.10).



**Fig.III.10** La couche polluante est uniforme sur la surface

Une fois la couche de pollution est bien répartie sur toute la surface du modèle plan, nous procédons ensuite à sa pulvérisation avec de l'eau distillée dont la conductivité moyenne est de  $1,6 \mu\text{S}/\text{cm}$  (à  $T= 17,2^\circ\text{C}$ ). Cette opération est effectuée cinq fois de chaque côté à une distance constante de  $0,5 \text{ m}$  à l'aide d'un pulvérisateur (Fig. III.11).



**Fig.III.11** L'humidification de la surface du modèle par un pulvérisateur de l'eau distillée

#### III.4. Mesure du courant de fuite

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

Pour obtenir les signaux de la tension appliquée et du courant de fuite, une résistance de  $1k\Omega$  a été placée en série avec l'objet d'essais. Deux câbles coaxiaux sont branchés à l'oscilloscope, l'un est placé en amont de la résistance pour récupérer la tension et l'autre en aval pour récupérer le courant de fuite.

### **III.5. Déphasage entre la tension appliquée et le courant de fuite**

Le déphasage peut être calculé par un programme Matlab, ou plus simplement donné directement par cet oscilloscope.

Aussi, pour déterminer le déphasage en utilisant Matlab, nous pouvons tout d'abord calculer la FFT de la tension et du courant de fuite et puis trouver le déphasage entre le fondamental de la tension appliquée et celui du courant de fuite.

Cela a pour but de suivre la progression du déphasage en fonction des tensions appliquées pour le cas propre et pour les cas pollués avec les deux types du sable utilisé.

### **III.6. Taux de distorsion harmonique (THD)**

La détermination de THD du courant de fuite est déterminée grâce au programme Matlab qui permet de le calculer à partir de la transformée de Fourier discrète basée sur la FFT.

Cette mesure se définit comme le rapport entre la valeur efficace de l'ensemble des composantes harmoniques et la valeur efficace globale. Nous pouvons le considérer comme un indicateur de qualité de traitement de signal.

Notre mesure de THD a pour but de suivre la variation de THD du courant de fuite en fonction de la tension appliquée dans les cas d'une surface propre et d'une surface polluée avec des quantités de sable différentes.

### **III.7. Valeur efficace (RMS)**

La détermination de la valeur efficace des courants de fuite et des tensions appliquées est faite à l'aide d'un programme Matlab.

Cette mesure a pour le but de suivre l'évolution du RMS du courant de fuite en fonction de la tension appliquée dans les cas d'une surface propre et d'une surface polluée avec des quantités de sable différentes.

### **III.8. Rapport KH (5/3)**

La détermination de KH (5/3) est obtenue par la détermination du rapport entre l'amplitude de l'harmonique 5 et l'amplitude de l'harmonique 3 du courant de fuite. Ce rapport est calculé en utilisant le programme Matlab et la transformée de Fourier discrète basée sur la FFT.

Cette mesure est effectuée pour suivre la variation de ce rapport en agissant sur la tension appliquée dans les cas d'une surface propre et d'une surface polluée avec des quantités de sable différentes.



# Chapitre IV

## **Exploitation des résultats**

ENP  
2016



## IV.1. Introduction

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

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

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

## IV.2. Analyse temporelle

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

### IV.2.1. Etude de la tension de contournement

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

#### IV.2.1.1. Pour une surface propre de l'isolateur

Nous avons procédé à des essais de contournement à sec. Pour des distances inter-électrodes  $d = 29,2$  cm, les résultats sont donnés dans le tableau (IV.1).

**Tableau IV.1.** Essais de contournement pour l'état propre

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

Comme dans notre cas le système du modèle plan est équivalent à un système d'électrodes pointe-pointe non symétrique dont la formule empirique de sa tension de contournement est :

pour les conditions normales

$$U_c = 3,16 d [\text{cm}] + 14 \quad [\text{kV}_{\text{eff}}]$$

Où  $d$  est la distance inter-électrodes.

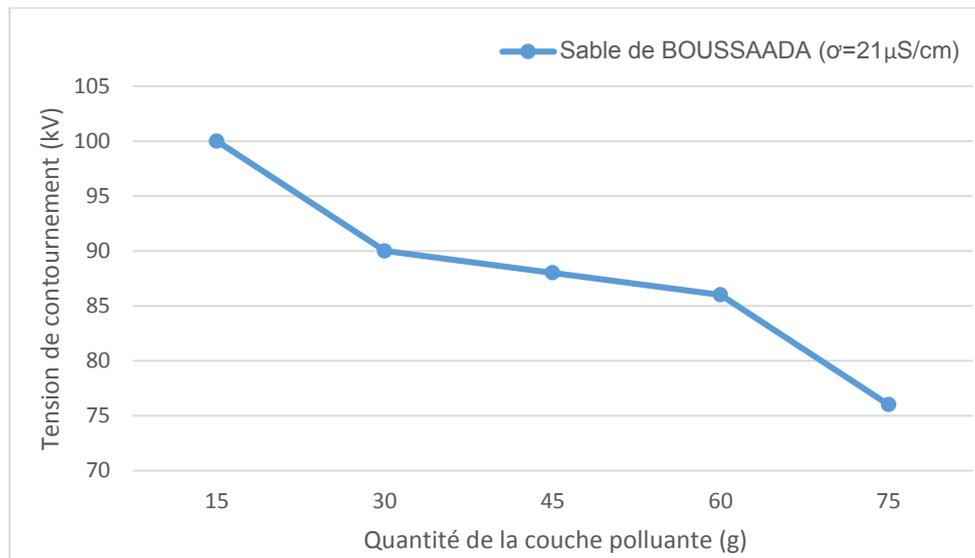
Nous trouvons à partir de cette formule que la tension de contournement est  $106,3 \text{ kV}_{\text{eff}}$  pour  $d=29,2$  cm, nous remarquons que cette valeur est relativement proche de celle obtenue expérimentalement qui est de  $120 \text{ kV}$ .

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

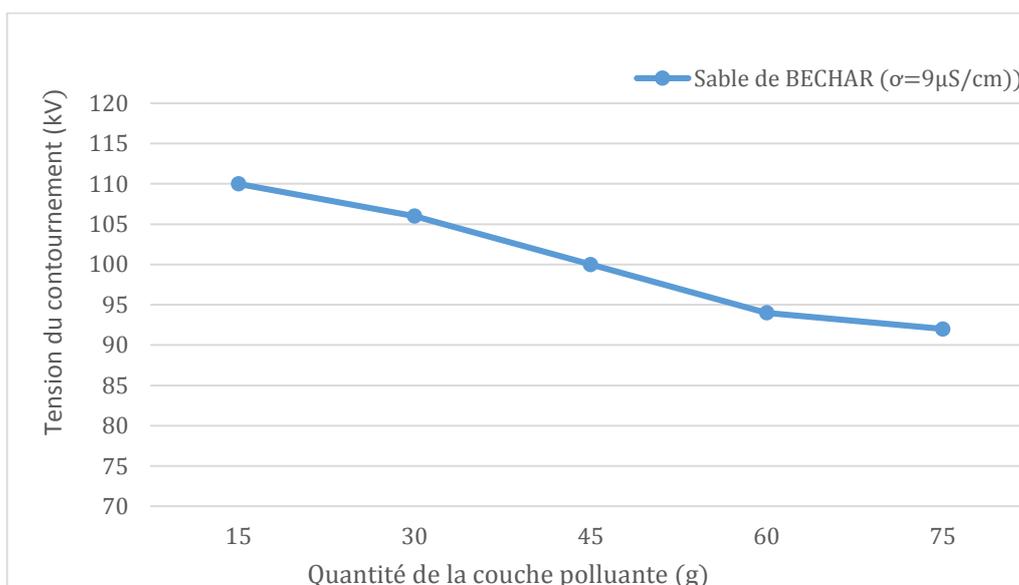
#### IV.2.1.2. Cas d'une surface polluée

##### IV.2.1.2.1. L'influence de l'épaisseur (la quantité) de la couche polluante

Dans ce cas, nous avons étudié l'influence de l'épaisseur de la couche polluante sur la tension de contournement dans le cas où la surface de modèle plan est contaminée par le sable de Boussaâda et de Bechar. Les résultats des essais sont donnés par les figures (IV.1) et (IV.2) respectivement.



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

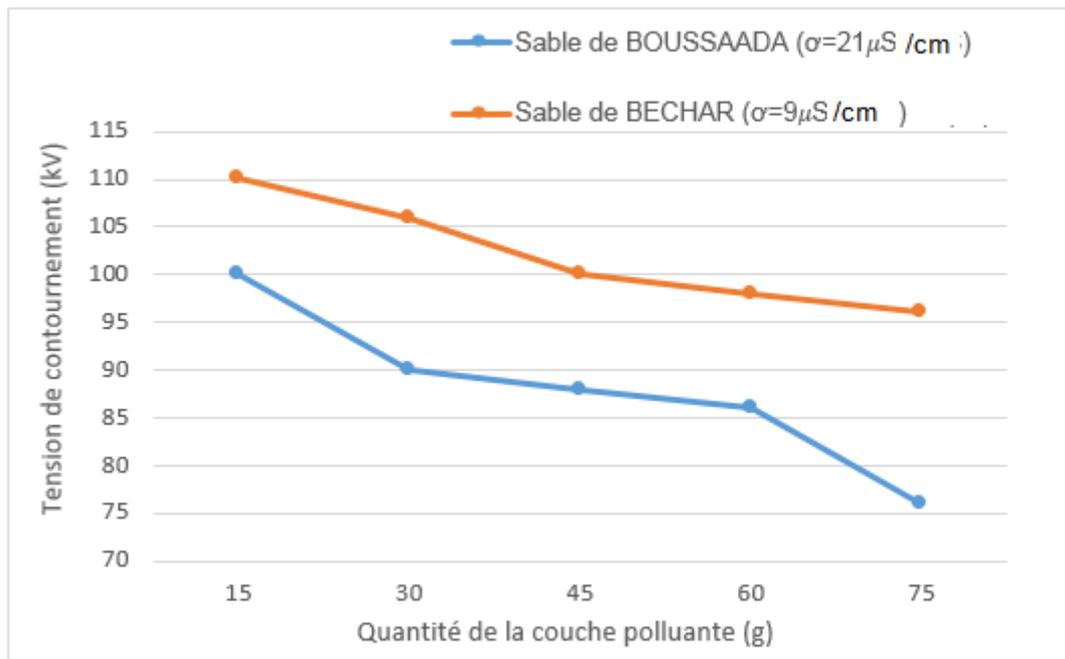


**Fig.IV.2** Tension de contournement : cas du sable de Bechar pour différentes quantités de la couche polluante

D'après les figures (IV.1) et (IV.2), nous remarquons que la tension de contournement de la couche polluante (soit le sable de Bechar ou de Boussaâda) diminue d'une manière non linéaire en fonction de la quantité de celle-ci. En effet l'impédance de la couche propre est grande devant celle de la couche polluée plus on diminue l'épaisseur de la couche polluante plus l'impédance de celle-ci devient importante.

#### IV.2.1.2.2. L'influence de la conductivité

Nous étudions l'influence de la conductivité sur la tension de contournement du modèle plan. Les résultats des essais des tensions de contournement obtenus pour les différentes conductivités sont donnés sur la figure (IV.3).



**Fig.IV.3** Tension de contournement pour les deux types de sable en fonction de la quantité de la couche polluante

Nous remarquons d'après la figure (IV.3) que la tension de contournement diminue avec l'accroissement de conductivité ; La tension de contournement est maximale pour la conductivité  $\sigma = 21$  ( $\mu\text{S/cm}$ ) pour le sable de Boussaâda.

Nous avons constaté que le contournement se fait en plusieurs étapes. D'abord l'apparition de décharges électriques sur la surface du modèle (les Figures (IV.4.a) et (IV.5.a)).

Ces décharges ont tendance à s'allonger le long de la surface (Figures (IV.4.b) et (IV.5.b)). Ce phénomène est accompagné d'une évaporation progressive donc d'un assèchement de la couche de pollution à cause de la chaleur dégagée par effet Joule et la formation d'une bande sèche, où la densité de courant est élevée.

Cette phase est suivie par un phénomène qui est l'apparition d'arcs électriques dans les zones sèches (Figure (IV.4.c)), alors La densité du courant de fuite devient très importante aux extrémités de ces zones, l'augmentation de l'intensité du champ électrique favorise l'extension de ces dernières jusqu'à la création de bandes sèches plus larges.

Enfin, Il se produit alors l'arc final de contournement (Figures (IV.4.d) et (IV.5.c)).



Fig.IV.4.a

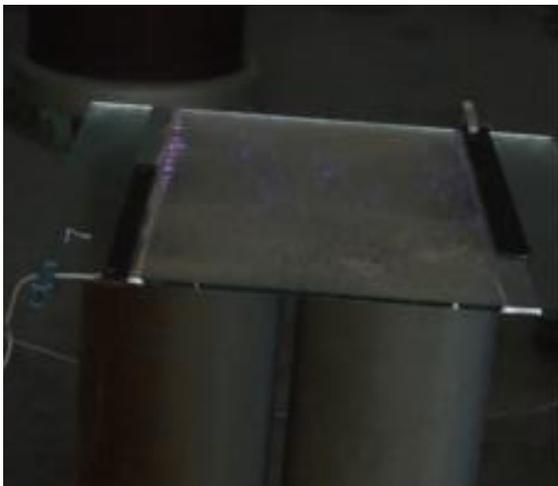


Fig. IV.4.b1

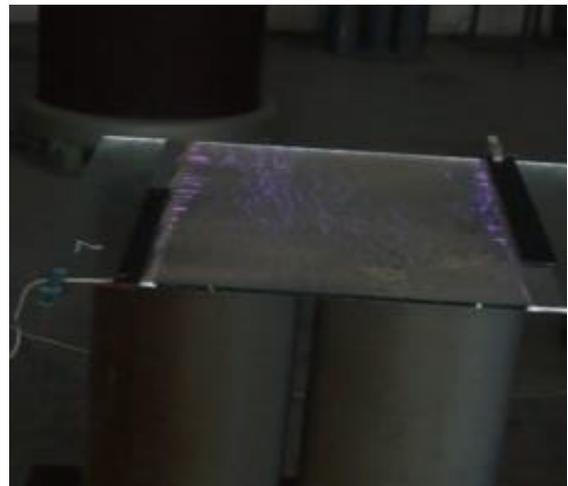


Fig. IV.4.b2



Fig. IV.4.c



Fig. IV.4.d

**Fig. IV.4.** Comportement du modèle plan dans le cas d'une pollution par le sable de Boussaâda  $\sigma=21$  ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à niveau de tension (a) 40 kV; (b1) 60kV ; (b2) 65kV; (c) 72kV;(d) tension du contournement 76kV pour une quantité de 75 g

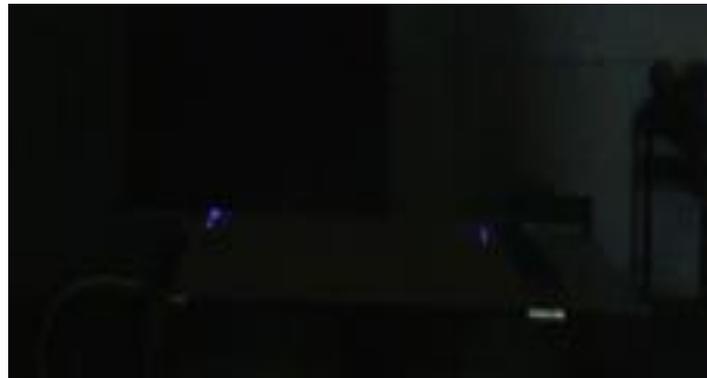


Fig. IV.5.a



Fig. IV.5.b



Fig. IV.5.c

**Fig. IV.5.d**

**Fig. IV.5.** Comportement du modèle plan dans le cas d'une pollution par le sable de BECHAR ( $\sigma = 9 \mu\text{S/cm}$ ) à niveau de tension de (a) 70 kV, (b) 80kV, (c) 86kV, (d) tension du contournement 96kV pour une quantité de 75 g

D'après les figures(IV.4) et (IV.5), nous remarquons bien que l'intensité de décharges partielles dans le cas de la pollution par le sable de Boussaâda est plus élevée que dans le cas du sable de Bechar alors les décharges partielles sont importantes pour les grandes valeurs de la conductivité.

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

### **IV.2.2. Etude du courant de fuite**

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

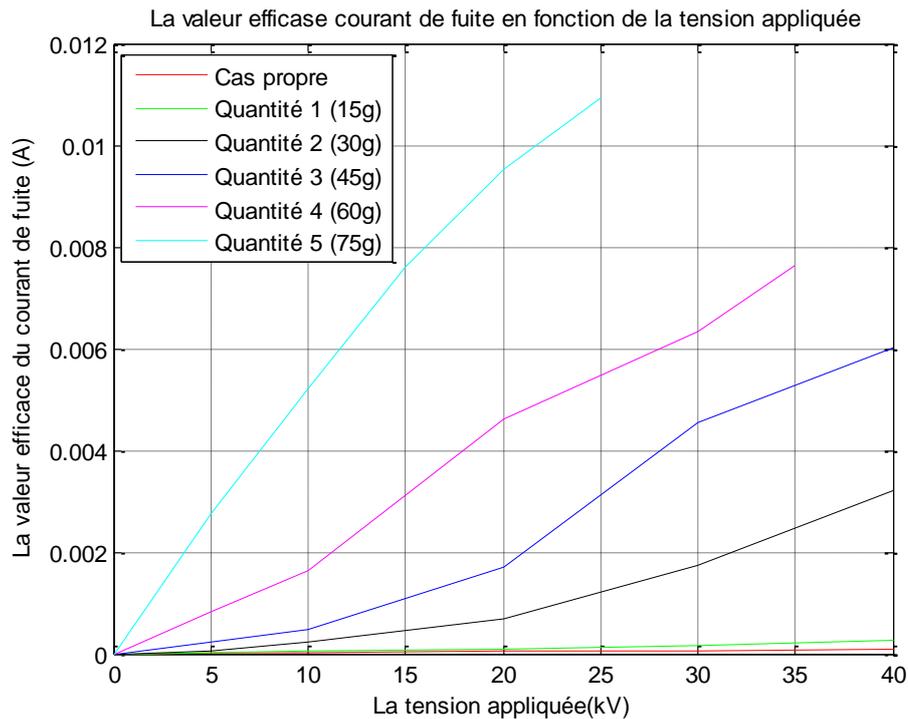
Nous avons mesuré les niveaux des tensions de contournement dans l'étape précédente pour pouvoir fixer le niveau maximal de la tension que nous allons appliquer et qui va représenter 50% de la tension de contournement, ceci nous permettra de relever le courant de fuite sans aucun risque de court-circuit. Nous avons relevé le courant de fuite pour 5 niveaux de tension inférieurs à cette tension maximale pour chaque cas de configuration (surface propre, polluée avec les 5 différentes quantités avec 2 conductivités différentes).

### **IV.2.3. Valeur efficace (RMS) du courant de fuite**

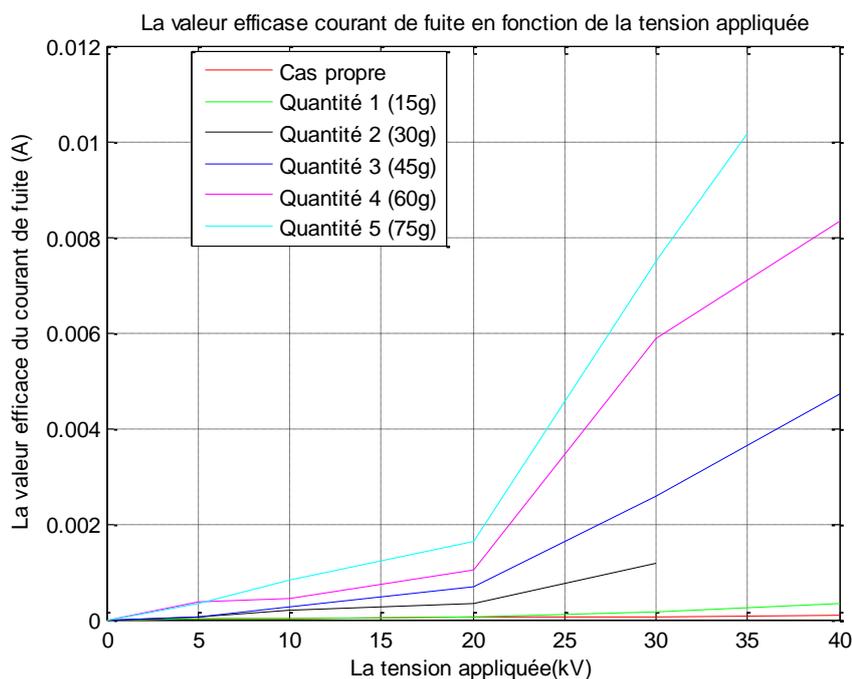
La détermination des valeurs efficaces du courant de fuite est effectuée en utilisant le programme Matlab pour pouvoir comparer les résultats obtenus pour une surface propre du modèle avec celle polluée avec différentes conductivités.

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

Nous étudions la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes quantités de la couche polluante. Les résultats sont donnés par les figures (IV.6) et (IV.7).



**Fig. IV.6.** La valeur efficace du courant de fuite pour le sable de Boussaâda



**Fig. IV.7.** La valeur efficace du courant de fuite pour le sable de Bechar

D'après les Figures(IV.6) et (IV.7), nous constatons que le courant de fuite augmente d'une manière non linéaire en fonction de la tension appliquée pour les différentes quantités utilisées.

Nous remarquons bien que la valeur efficace du courant de fuite augmente en fonction de la valeur de la quantité de la couche polluante. Au-delà de  $U= 20\text{kV}$ , il y a un changement

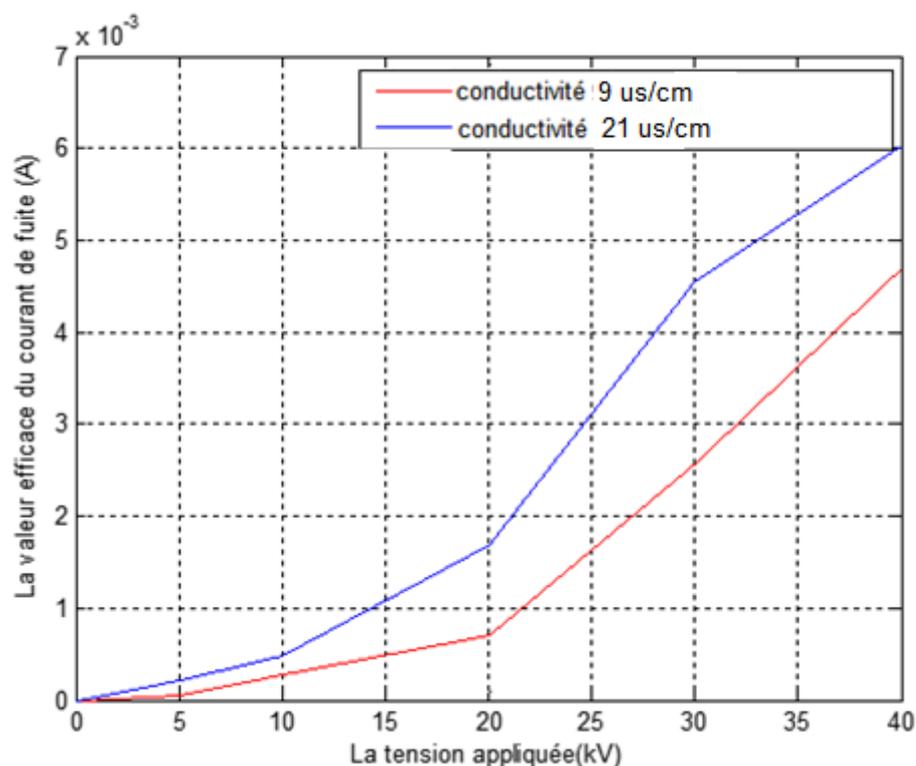
de pente, cela est peut-être dû à un changement dans le type de décharge électrique et la transitions des arcs .En effet les valeurs du courant de fuite augmentent en augmentant la quantité de la couche polluante, ces valeurs sont faibles pour une surface propre à cause de l'impédance du milieu qui est importante.

Pour les faibles quantités de la couche de pollution (état sec ,15 g), la valeur efficace du courant de fuite augmente d'une façon presque linéaire en fonction de la tension appliquée. Nous remarquons aussi que ces valeurs sont relativement faibles (de l'ordre du  $\mu\text{A}$ ) à cause de l'impédance importante du milieu.

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

#### IV.2.3.2.Effet de la conductivité

Nous étudions la variation de la valeur efficace du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, pour deux différentes conductivités de la couche polluante (sable de Boussaâda ( $\sigma=21\mu\text{S}$ ) et de Bechar ( $\sigma=9\mu\text{S}$ )), les essais sont effectués pour une quantité fixe de la couche de contamination, les résultats sont présentés à la figure (IV.8).

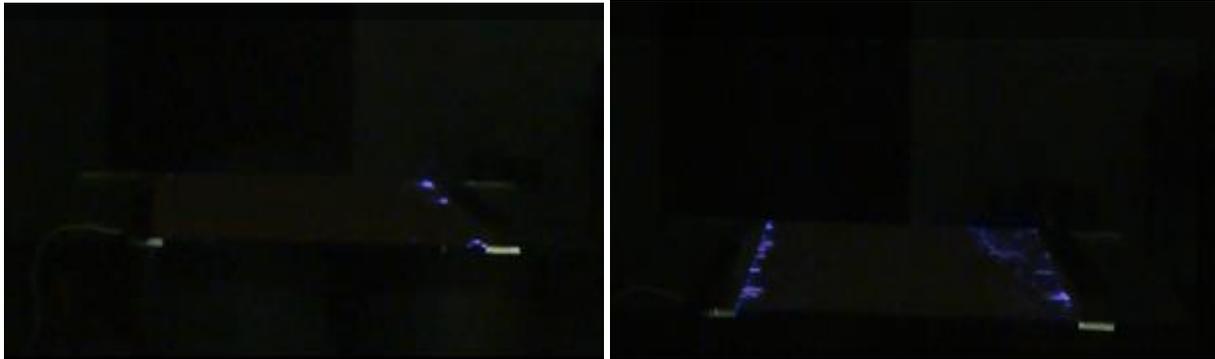


**Fig. IV.8.** Valeur efficace du courant de fuite pour deux types de sable différents avec une quantité de sable de 30 g

D'après la figure (IV.8), nous constatons que le courant de fuite augmente d'une manière non linéaire en fonction de la tension appliquée pour les différentes conductivités utilisées (les deux types de sable).

Nous remarquons aussi que pour le même niveau de tension, la valeur efficace du courant de fuite augmente de plus en plus la valeur de la conductivité augmente, elle est minimale pour  $\sigma = 21$  ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Plus nous augmentons les conductivités, plus les valeurs efficaces du courant de fuite deviennent plus importantes figure (IV.9). Cela est dû à l'activité des décharges qui deviennent plus intenses dès qu'on dépasse 50% de la tension de contournement pour la couche où la conductivité est la plus grande, ce qui peut expliquer l'augmentation subite du courant de fuite.



**Fig.IV.9.** Apparition des décharges partielles pour les deux types de sable : sable de Boussaâda (à droite) et le sable de Bechar (à gauche) pour un niveau de tension de 80 kV et une quantité de 60g

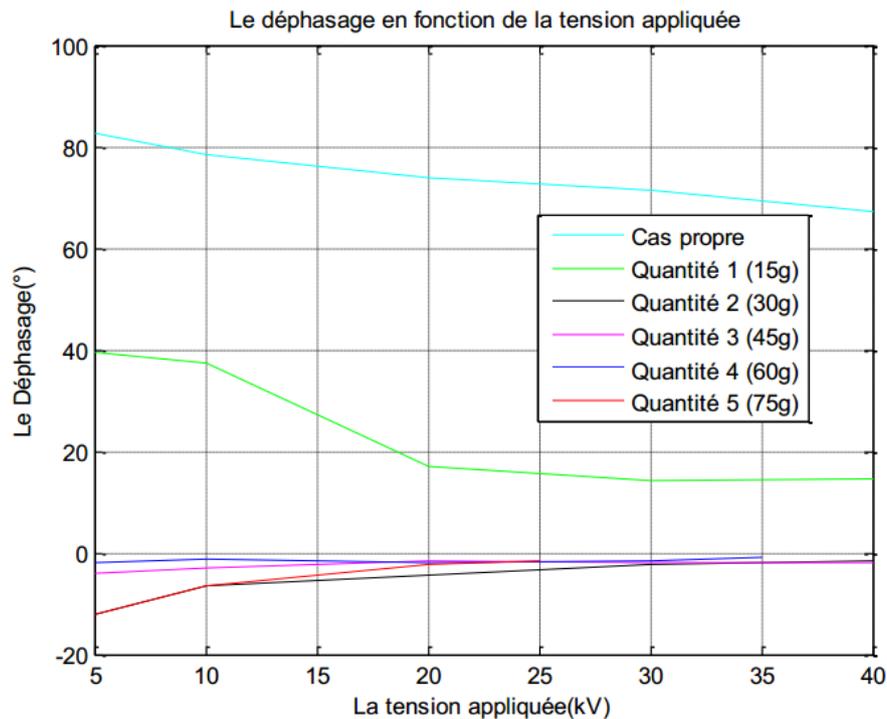
#### IV.2.4. Déphasage du courant de fuite-tension

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

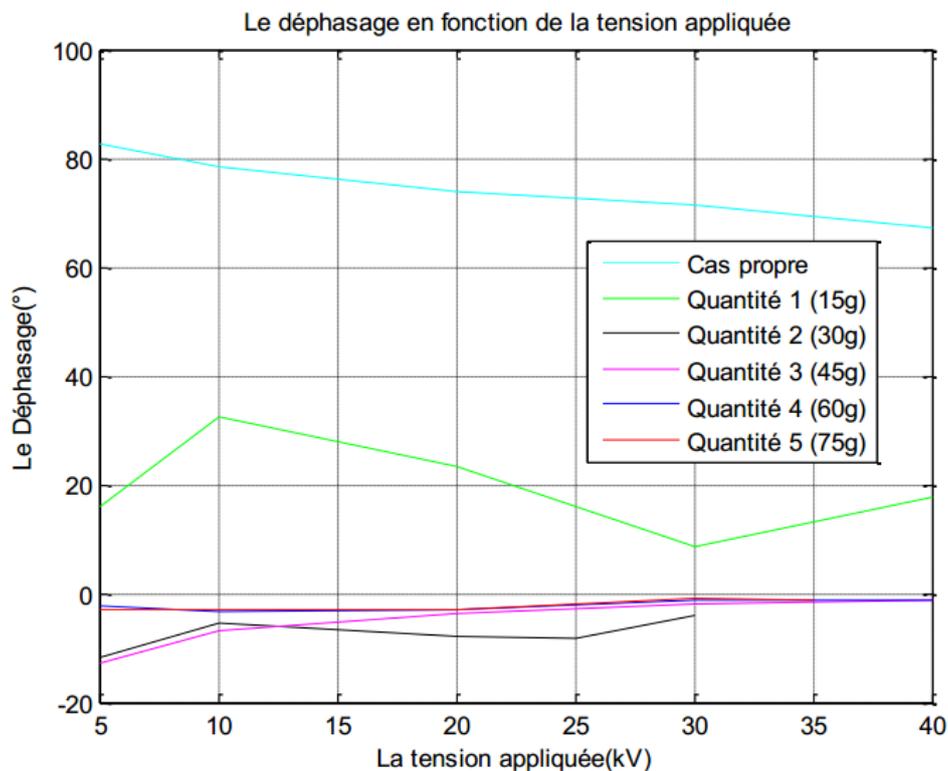
Cette étude nous a permis d'étudier l'influence de la tension appliquée, la conductivité et l'épaisseur (la quantité) de la couche de contamination sur le déphasage courant de fuite-tension pour le cas de la pollution uniforme.

##### IV.2.4.1. Influence de la tension appliquée et la quantité de la couche de contamination sur le déphasage :

Pour étudier l'influence de la tension appliquée et la quantité de la couche polluante sur le déphasage du courant de fuite-tension, nous présentons de résultats des essais par les figures (IV.10) et (IV.11).



**Fig. IV.10.** Variation de déphasage du courant de fuite-tension pour le sable de Boussaâda



**Fig. IV.11.** Variation du déphasage courant de fuite-tension pour le cas du sable de Bechar

D'après les figures (IV.10) et (IV.11), nous remarquons que la valeur du déphasage courant-tension diminue avec l'augmentation de la quantité de la couche polluante. Il est minimal pour la grande valeur de la quantité de la couche polluante.

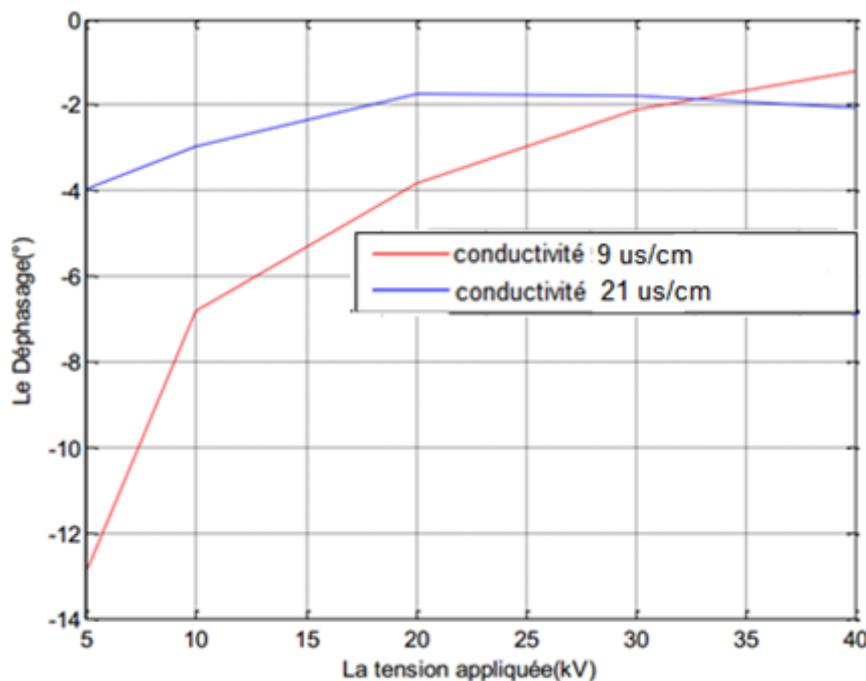
Nous remarquons aussi que le déphasage est pratiquement le même pour une surface propre quelle que soit la tension appliquée dont la valeur du déphasage est comprise entre  $70^\circ$  et  $81^\circ$ , cela indique que le comportement de l'isolateur dans ce cas est pratiquement capacitif.

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

Lorsque nous augmentons la quantité de la couche de contamination, l'apparition des décharges électriques est accentuée et le déphasage diminue à son tour et devient négatif pour atteindre un minimum de  $-15^\circ$ , durant le passage au régime permanent, le déphasage augmente légèrement pour se situer entre  $0^\circ$  et  $-1^\circ$ , le déphasage négatif dans ce cas n'est pas dû à un régime inductif, mais à la forme d'onde du courant.

#### IV.2.4.2. Effet de la conductivité

Pour étudier l'influence de la conductivité de la couche polluante sur le déphasage courant de fuite-tension, les résultats des essais obtenus pour une quantité de pollution fixe (45g), sont donnés sur la figure (IV.12).



**Fig. IV.12.** Variation du déphasage courant de fuite-tension pour deux conductivités de la couche polluante (le sable de Bechar et de Boussaâda)

D'après la Figure (IV.12), nous remarquons que le déphasage (courant de fuite-tension appliquée) a tendance à diminuer avec l'augmentation de la conductivité du milieu. Le comportement de l'isolateur est en grande partie résistif pour le sable de Boussaâda ( $21\mu\text{S}/\text{cm}$ ) où le déphasage est presque ( $-3^\circ$ ) pour un niveau de tension de 10 kV alors que pour le sable de Bechar ( $9\mu\text{S}/\text{cm}$ ), le déphasage est presque ( $-7,5^\circ$ ) pour le même niveau de tension.

Cette diminution du déphasage en fonction de la conductivité est due à l'activité des décharges qui deviennent très importantes causant l'assèchement des zones polluantes qui a

pour effet d'augmenter l'effet résistif de l'isolateur. Par conséquent, plus nous augmentons la conductivité, plus le comportement de l'isolateur devient plus résistif.

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

### IV.2.5.1. Effet de la variation du niveau de la tension appliquée

Dans cette partie nous avons étudié l'influence de la variation de la tension sur les formes d'onde du courant de fuite pour une quantité et une conductivité fixes (15g,  $21\mu\text{S/cm}$ ) de la couche polluante. Les résultats obtenus à partir des essais sont donnés sur la figure (IV.13).

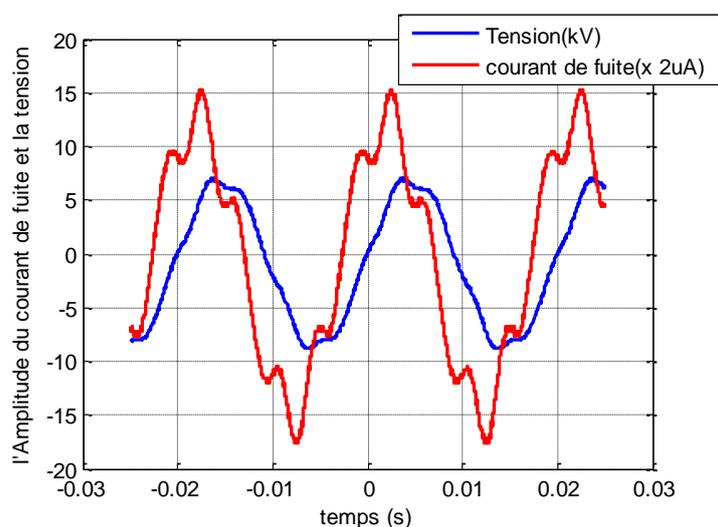


Fig.IV.13.a

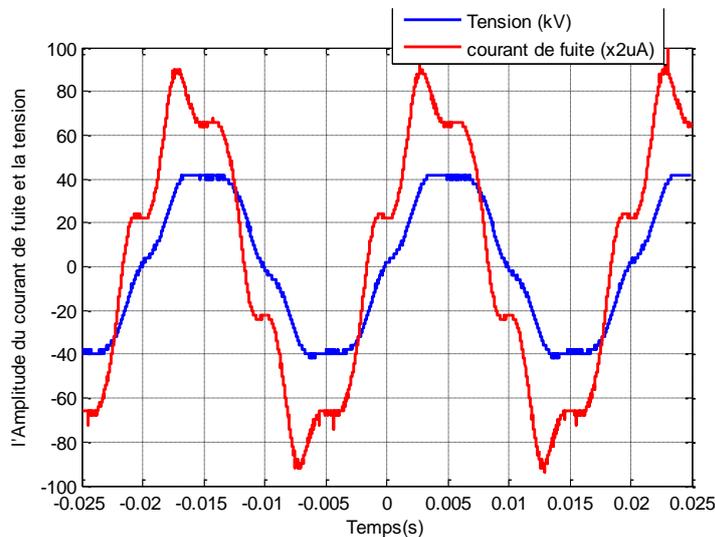


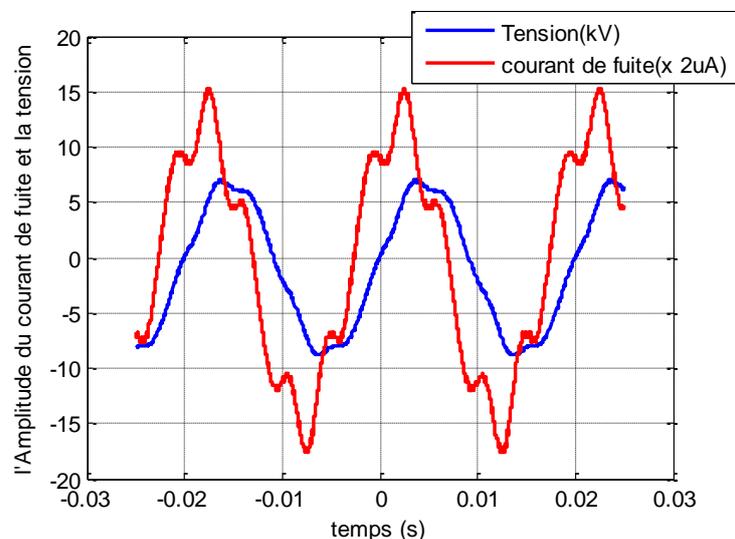
Fig.IV.13.b

**Fig. IV.13.** Formes d'onde du courant de fuite et de la tension appliquée pour deux niveaux de tension 5kV (figure (IV.13.a)) et 30 kV (figure (IV.13.b))

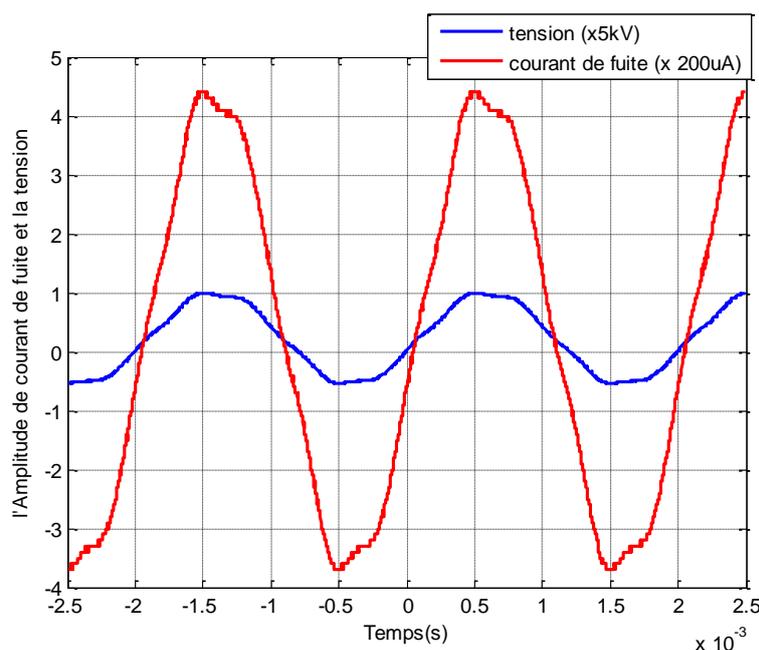
Nous remarquons bien que les déformations de la forme d'onde du courant de fuite sont d'autant plus importantes quand on augmente le niveau de la tension appliquée.

### IV.2.5.2. Effet de la quantité de la couche de contamination

Dans cette partie nous avons étudié l'influence de la quantité de la couche polluante sur les formes d'onde du courant de fuite pour une tension et conductivité fixes (5kV, 21 $\mu$ S) de la couche polluante. Les résultats des essais obtenus sont donnés sur la figure(IV.14).



**Fig. IV.14.a**



**Fig.IV.14.b**

**Fig. IV.14** Formes d'onde du courant de fuite et de la tension appliquée pour deux quantités de la couche polluante 15g (figure (IV.14.a)) et 60g (figure (IV.14.b))

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

### IV.2.5.3. Effet de la conductivité de la couche de contamination

Dans cette partie, nous avons étudié l'influence de la variation du niveau de la tension sur les formes d'onde du courant de fuite pour une quantité et tension fixes (15 g, 5kV) de la couche polluante, les résultats des essais sont donnés par la figure (IV.15).

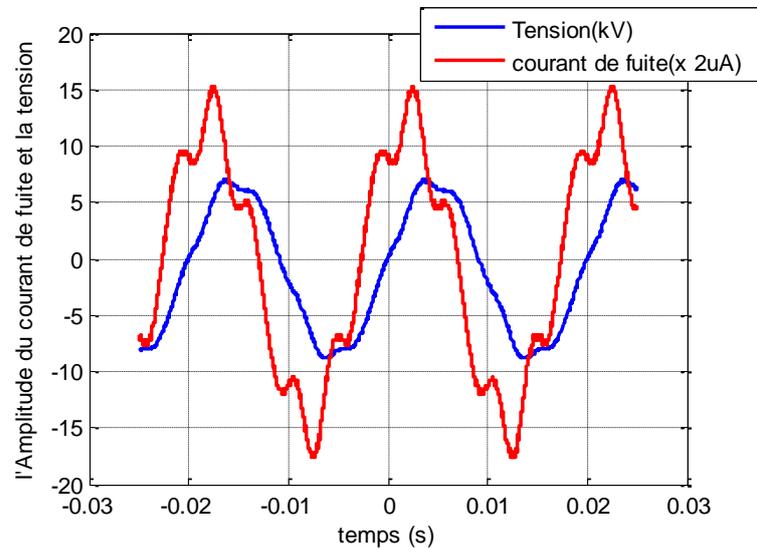


Fig. IV.15.a

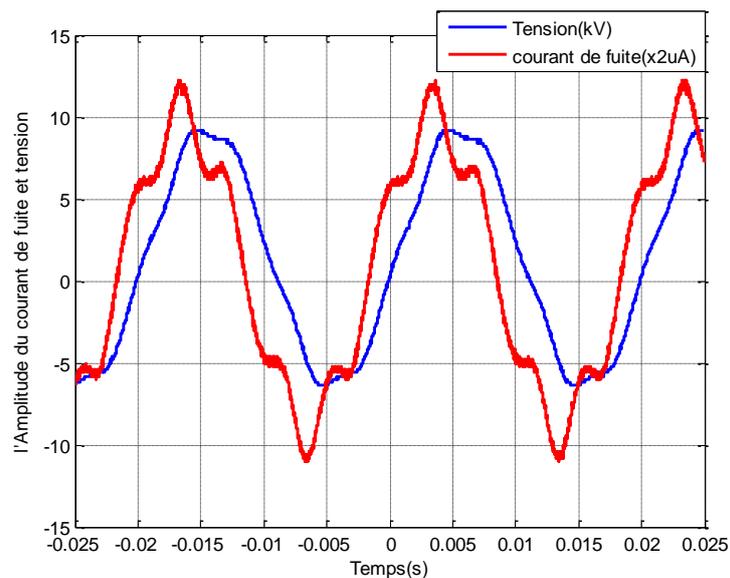
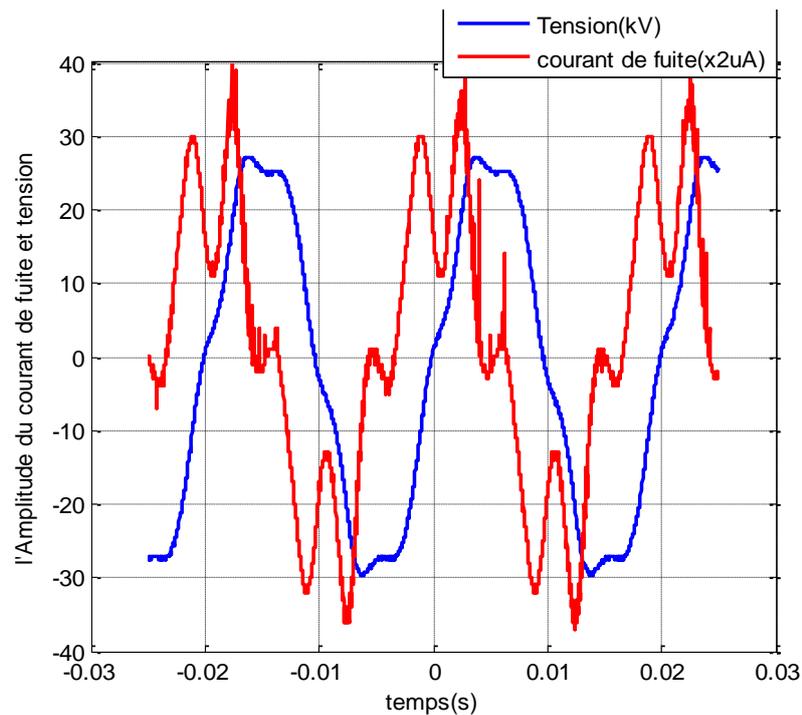


Fig. IV.15.b

**Fig. IV.15** Formes d'onde du courant de fuite et de la tension appliquée pour deux conductivités de la couche polluante 21 µS (Fig. IV.15.a) et 9 µS (Fig. IV.15.b)



**Fig. IV.16.** Formes d'onde du courant de fuite et de la tension appliquée avec un niveau de tension de 20kV dans le cas d'une surface propre

D'après la figure (IV.15), nous remarquons que les déformations de la forme d'onde du courant de fuite sont plus importantes pour des conductivités de la couche de contamination élevées. Plus nous augmentons la conductivité de la couche de contamination plus nous obtenons plus de déformations au niveau du signal du courant de fuite. Dans ce cas, nous pouvons dire alors que la déformation du courant de fuite diminue avec l'augmentation de la conductivité de la couche polluante.

#### IV.2.5.4. Interprétation

D'après la figure (IV.16), nous remarquons une présence intense des impulsions sur l'onde du courant de fuite qui se traduit par la diminution du rapport de l'harmonique 5 par rapport au fondamental, aussi le courant qui ne circule pas librement à cause de la valeur importante de l'impédance, c'est pour cela l'absence de décharges électriques sur la surface du plan même pour des tensions élevées.

Le courant de fuite présente une forme d'onde qui évolue avec l'état de la surface de l'isolateur et est déformée par la présence d'arcs électriques partiels. Cette déformation peut être expliquée par l'effet capacitif de la surface de l'isolateur qui influe sur la forme sinusoïdale du courant de fuite.

Une telle déformation de la forme d'onde du courant de fuite est interprétée d'un point de vue fréquentiel par l'apparition d'harmoniques impaires de la fréquence fondamentale de 50Hz, dont les amplitudes sont principalement dépendantes du degré de déformation de la forme d'onde (expliqué dans la partie de l'analyse fréquentielle du courant de fuite).

### IV.3. Analyse fréquentielle du courant de fuite

L'allure temporelle des signaux est souvent difficile à interpréter ce qui nous amène à utiliser la Transformée de Fourier Rapide (FFT) pour avoir une représentation dans le domaine fréquentiel plus intéressante et plus riche en informations sur l'évolution du courant de fuite [3]. Le but de pouvoir identifier des signatures significatives indiquant une dégradation importante de la tenue diélectrique des isolateurs [1].

#### IV.3.1. Représentation spectrale du courant de fuite

La FFT nous permet de tracer les spectres d'amplitude du courant de fuite pour deux régions différentes. Notre étude se limite aux harmoniques les plus significatifs (1<sup>er</sup>, 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup>).

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

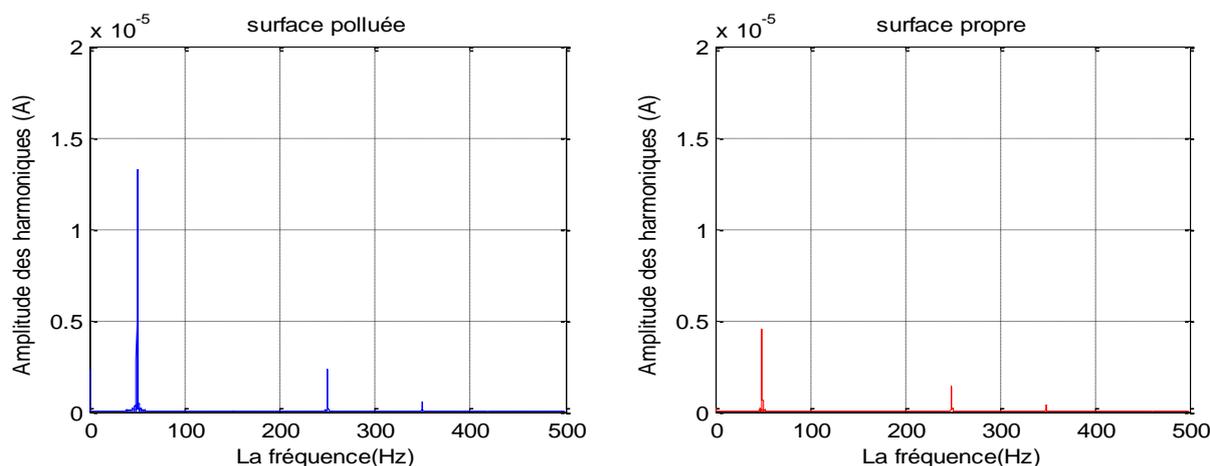
##### IV.3.1.1 Etude de l'effet de la variation du niveau de la tension appliqué :

Nous consacrons cette partie à l'étude de l'influence du niveau de la tension appliquée pour une quantité de pollution fixe, sur le spectre d'amplitude du courant de fuite, pour la région de Boussaâda en premier lieu puis pour la région de Bechar en deuxième lieu.

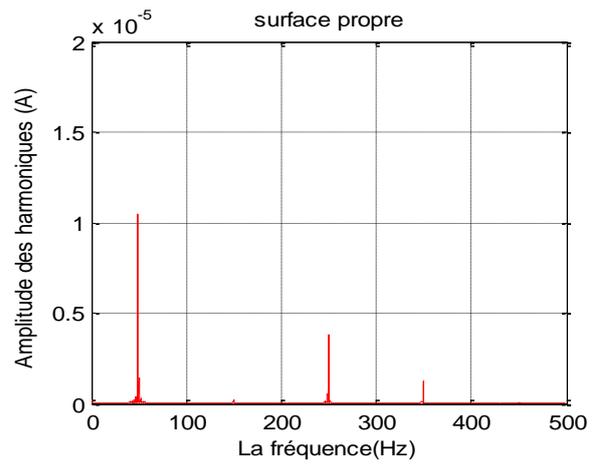
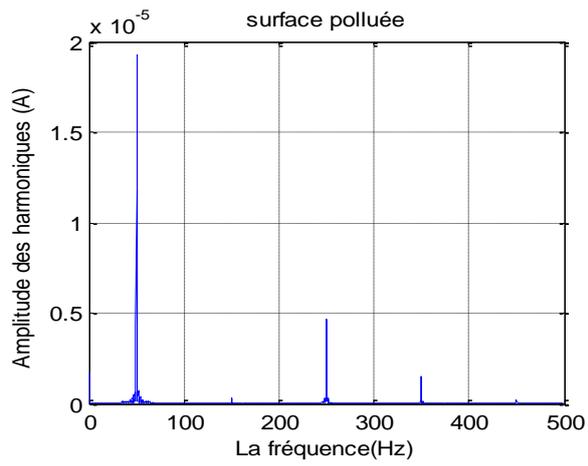
##### IV.3.1.1.1. Cas d'une faible quantité de contamination

###### a. Région de Boussaâda :

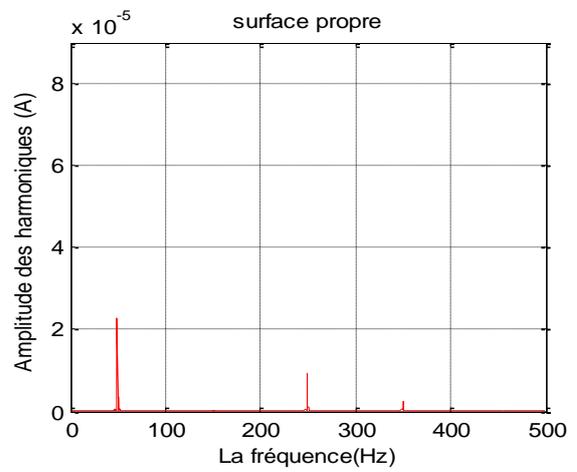
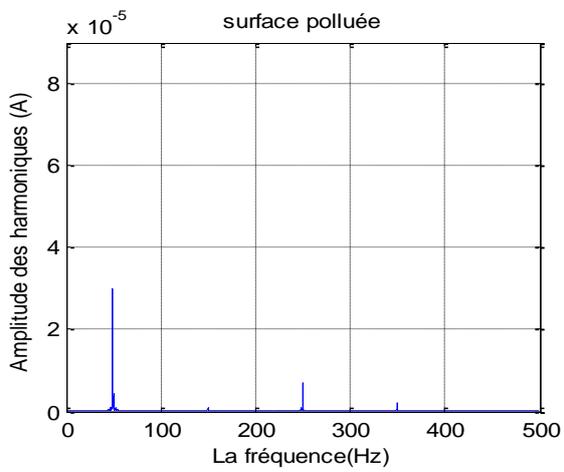
###### ● Quantité 1 (15 g) :



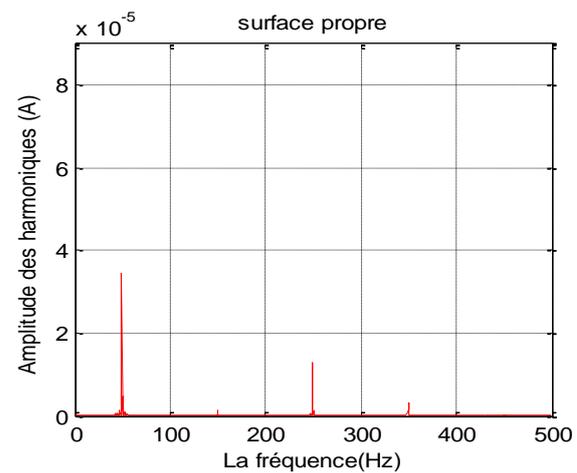
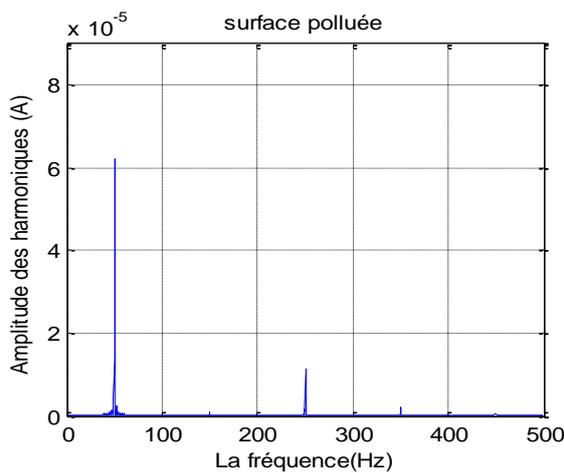
(a)



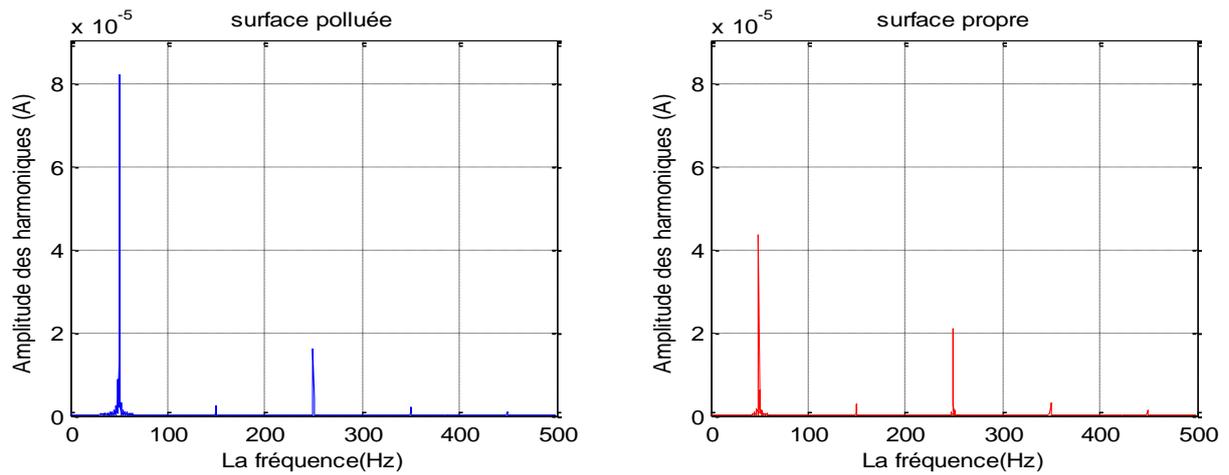
(b)



(c)



(d)

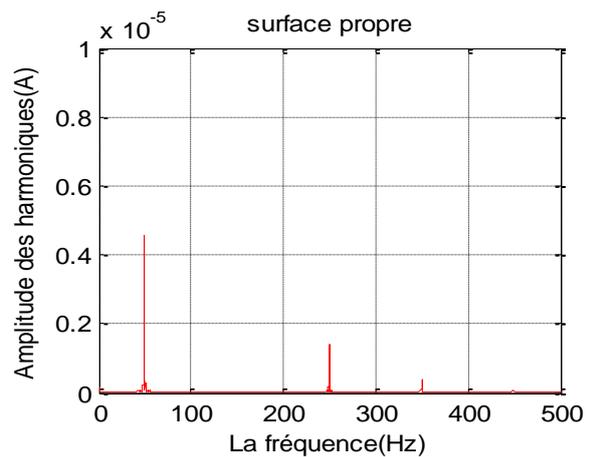
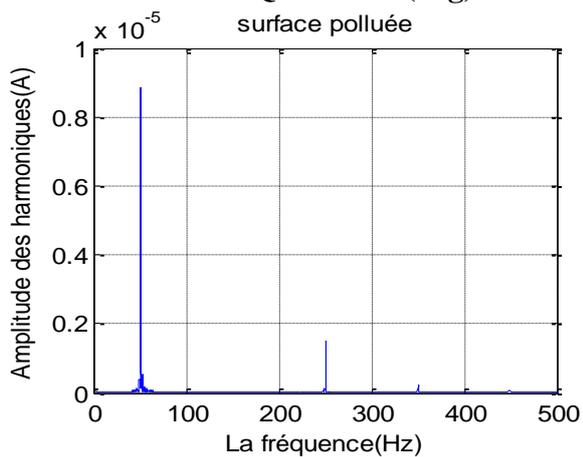


(e)

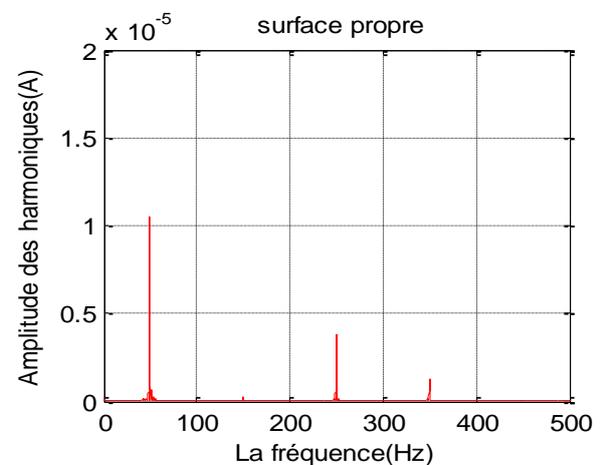
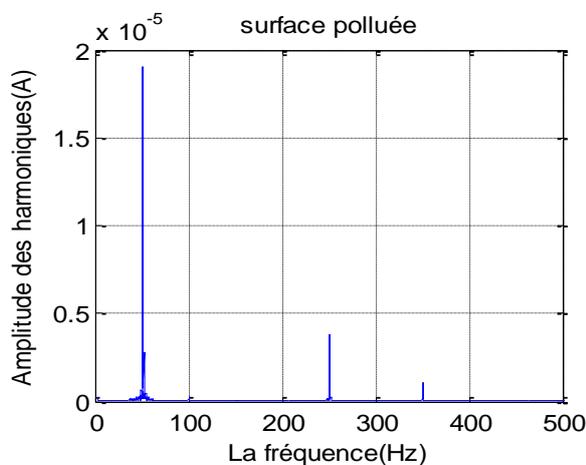
**Fig. IV.17** FFT du courant de fuite pour la 1<sup>ère</sup> quantité (m=15g) pour les niveaux de tension de : (a) 5kV, (b) 10kV, (c) 20kV, (d) 30kV et (e) 40kV (sable de Boussaâda)

**b. Région de Bechar**

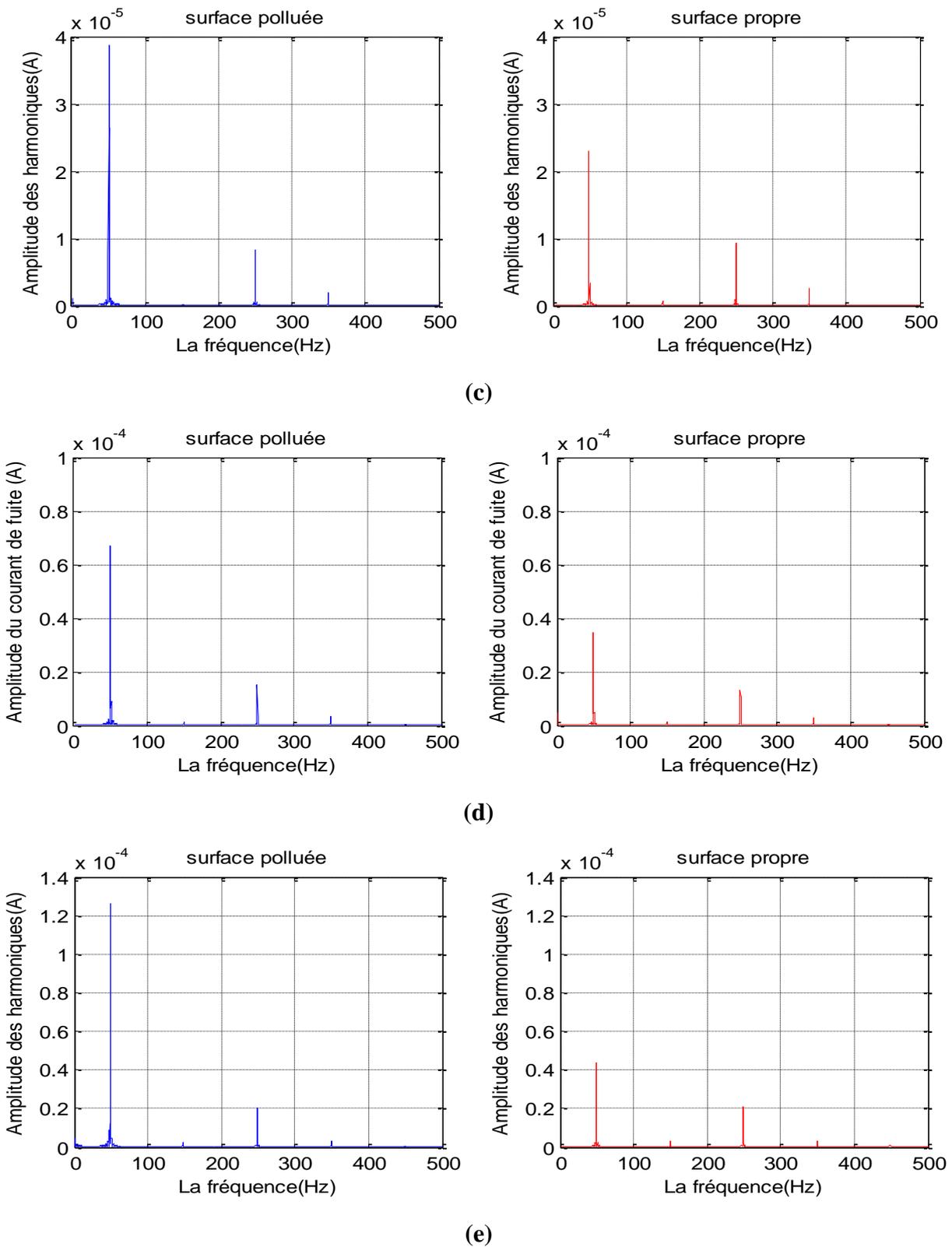
• **Quantité 1 (15g) :**



(a)



(b)



**Fig. IV.18** FFT du courant de fuite pour la 1<sup>ère</sup> quantité (m=15g) pour les niveaux de tension de : (a) 5kV, (b) 10kV, (c) 20kV, (d) 30kV et (e) 40kV (sable de Bechar)

### c. Discussion des résultats

Ces figures représentent la variation du spectre d'amplitude du courant de fuite dans les cas pollués (à gauche) et les cas propres (à droite) en fonction de la tension appliquée pour les deux régions Boussaâda (Figure (IV.17)) et Bechar (Figure(IV.18)).

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

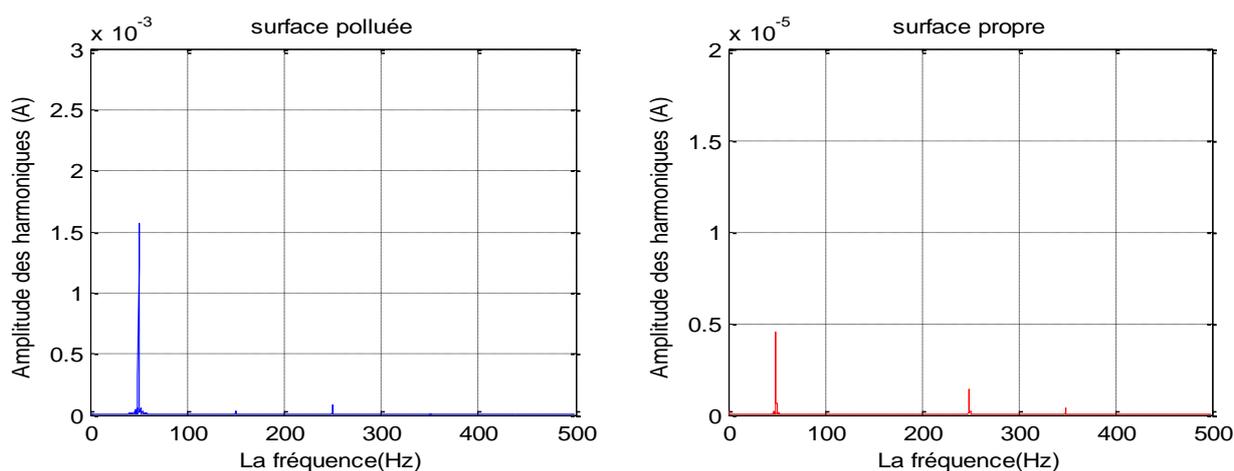
Pour ces deux régions, il est remarquable de noter que seuls les harmoniques n°1 et n°5 apparaissent aux faibles valeurs de la tension appliquée. Les harmoniques n°3 et n°7 n'apparaissent qu'aux tensions élevées mais avec une amplitude trop faible cela s'explique par la déformation des ondes de courant de fuite constaté précédemment par l'analyse temporelle. L'harmonique n°3 commence à apparaître au moment où des arcs partiels violets apparaissent de façon intermittente à l'extrémité des électrodes (Fig.IV.4.a).

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

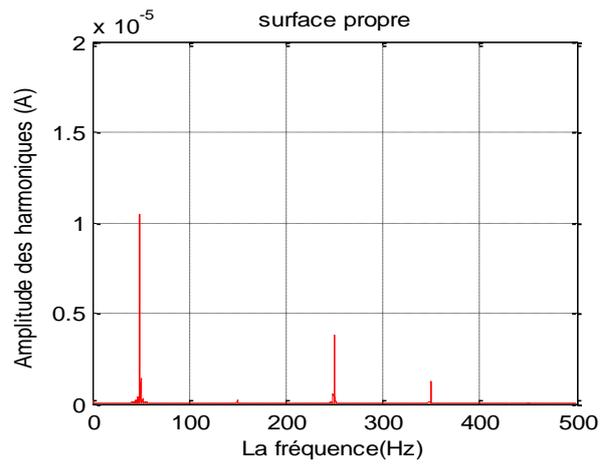
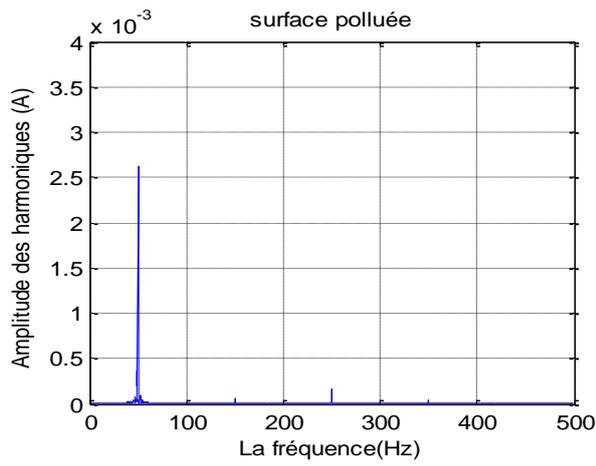
#### IV.3.1.1.2. Cas d'une quantité de contamination importante :

##### a. Région de Boussaâda

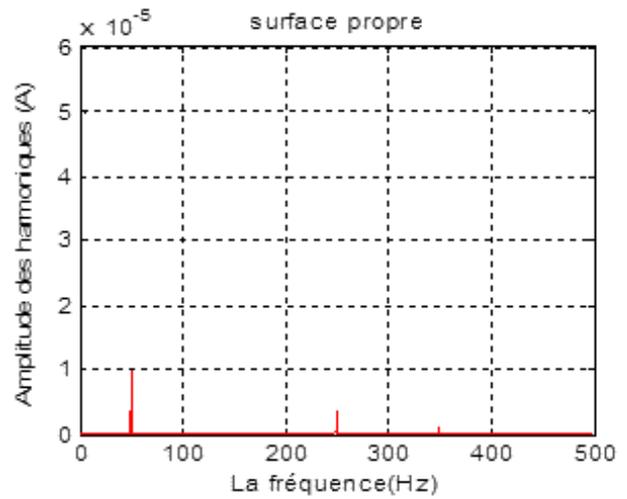
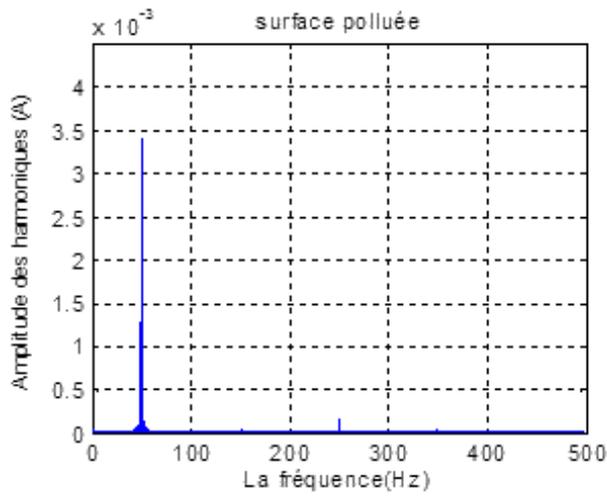
- Quantité 5 (75 g) :



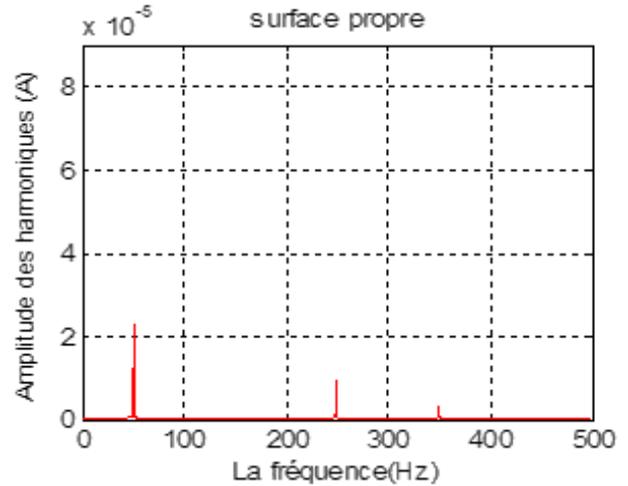
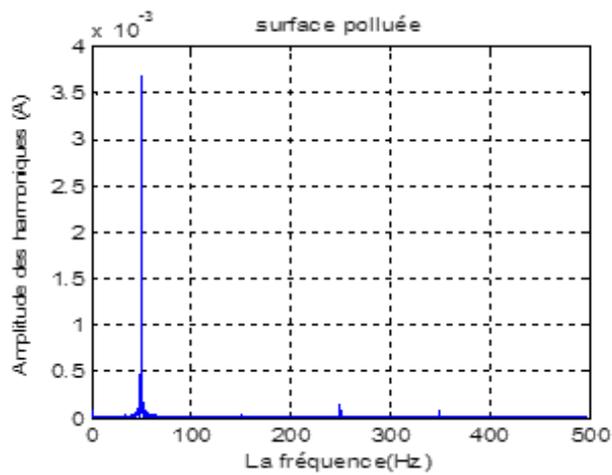
(a)



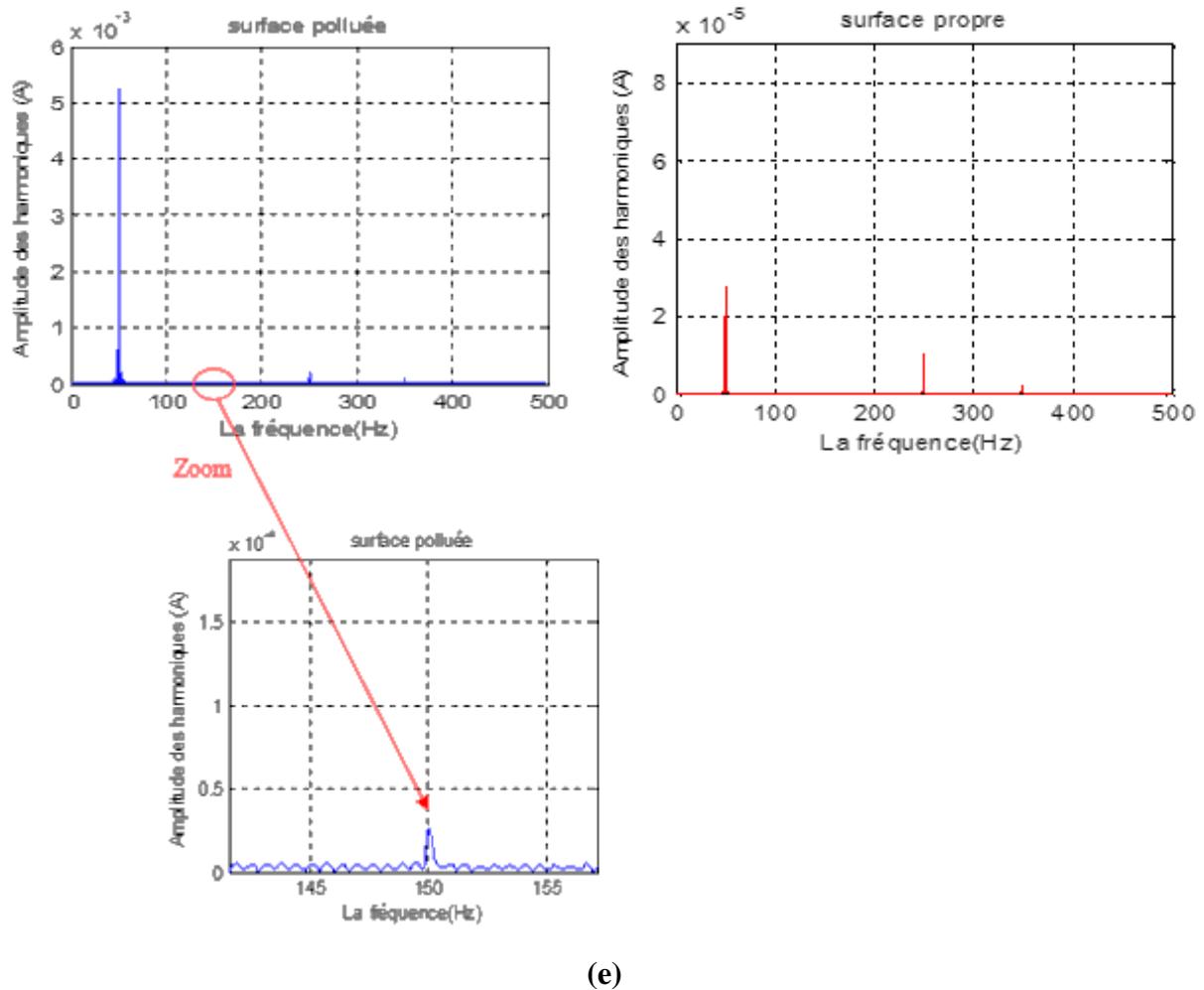
(b)



(c)



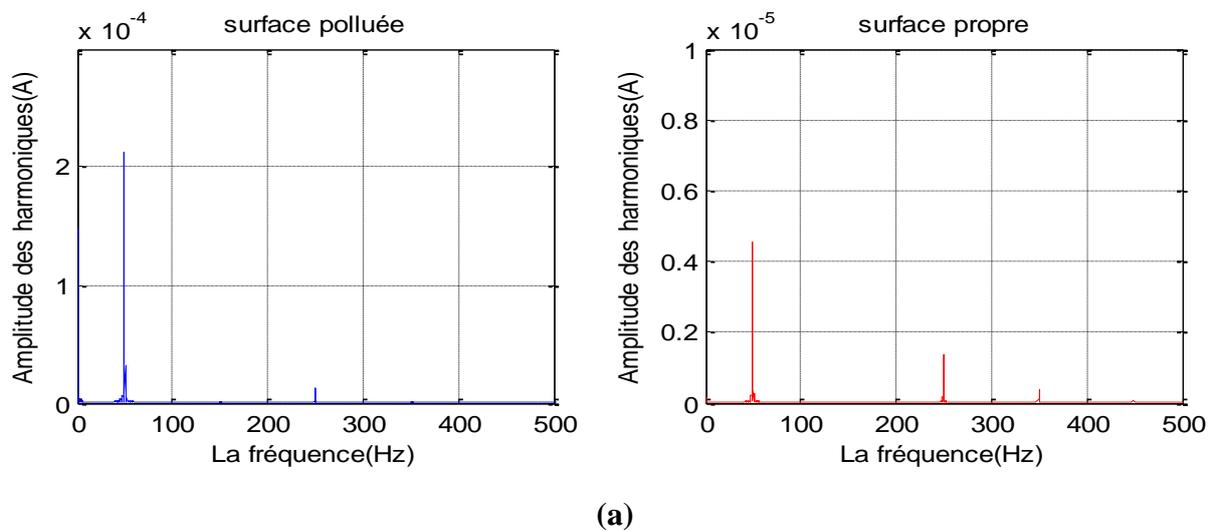
(d)

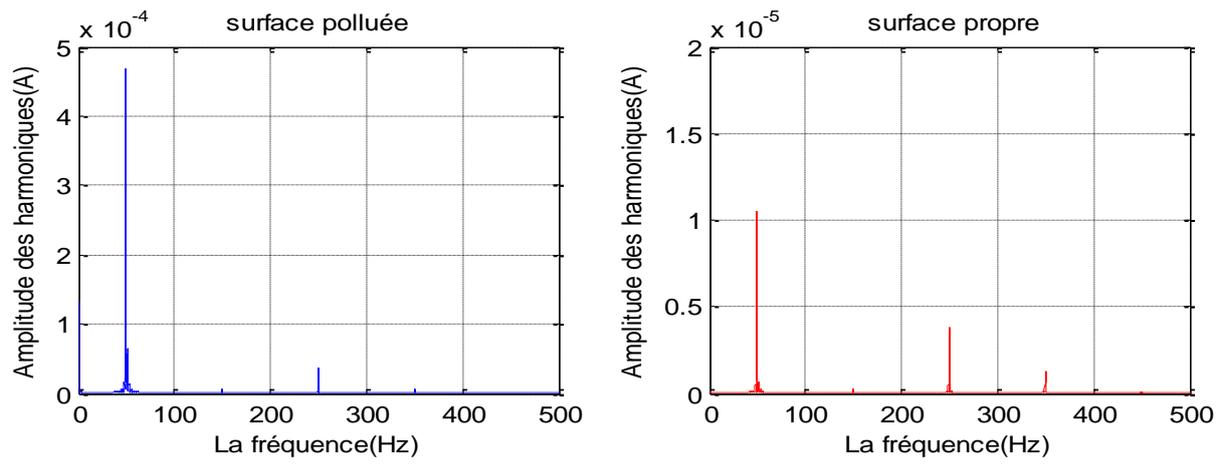


**Fig. IV.19** FFT du courant de fuite pour la 5<sup>ème</sup> quantité (m=75g) pour les niveaux de tension de : (a) 5kV, (b) 10kV, (c) 15kV, (d) 20kV et (e) 25kV (sable de Boussaâda)

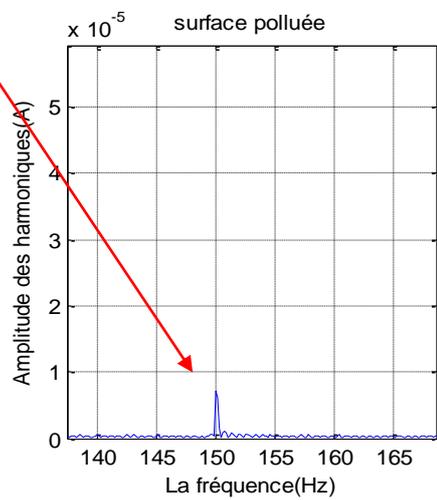
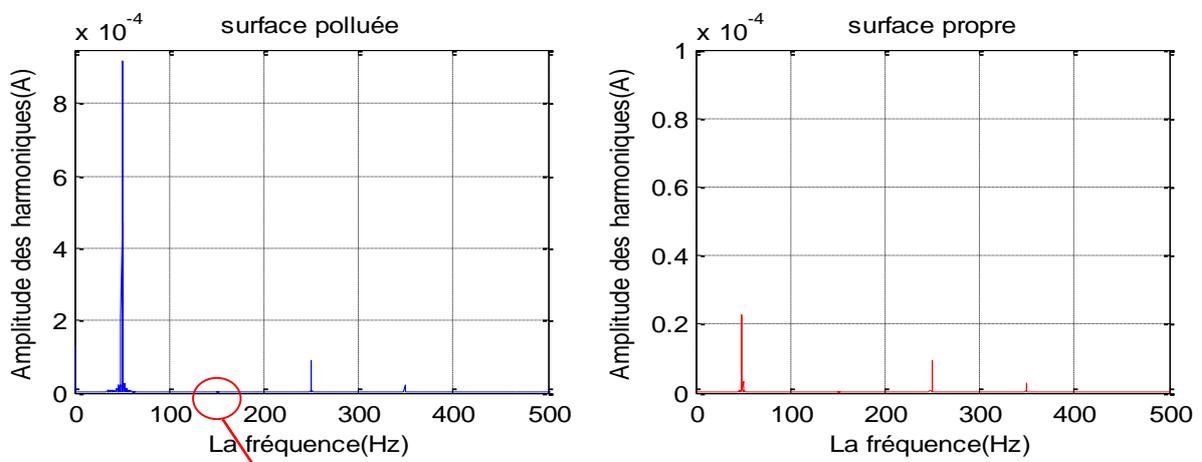
**b. Région de Bechar**

- **Quantité 5 (75 g) :**

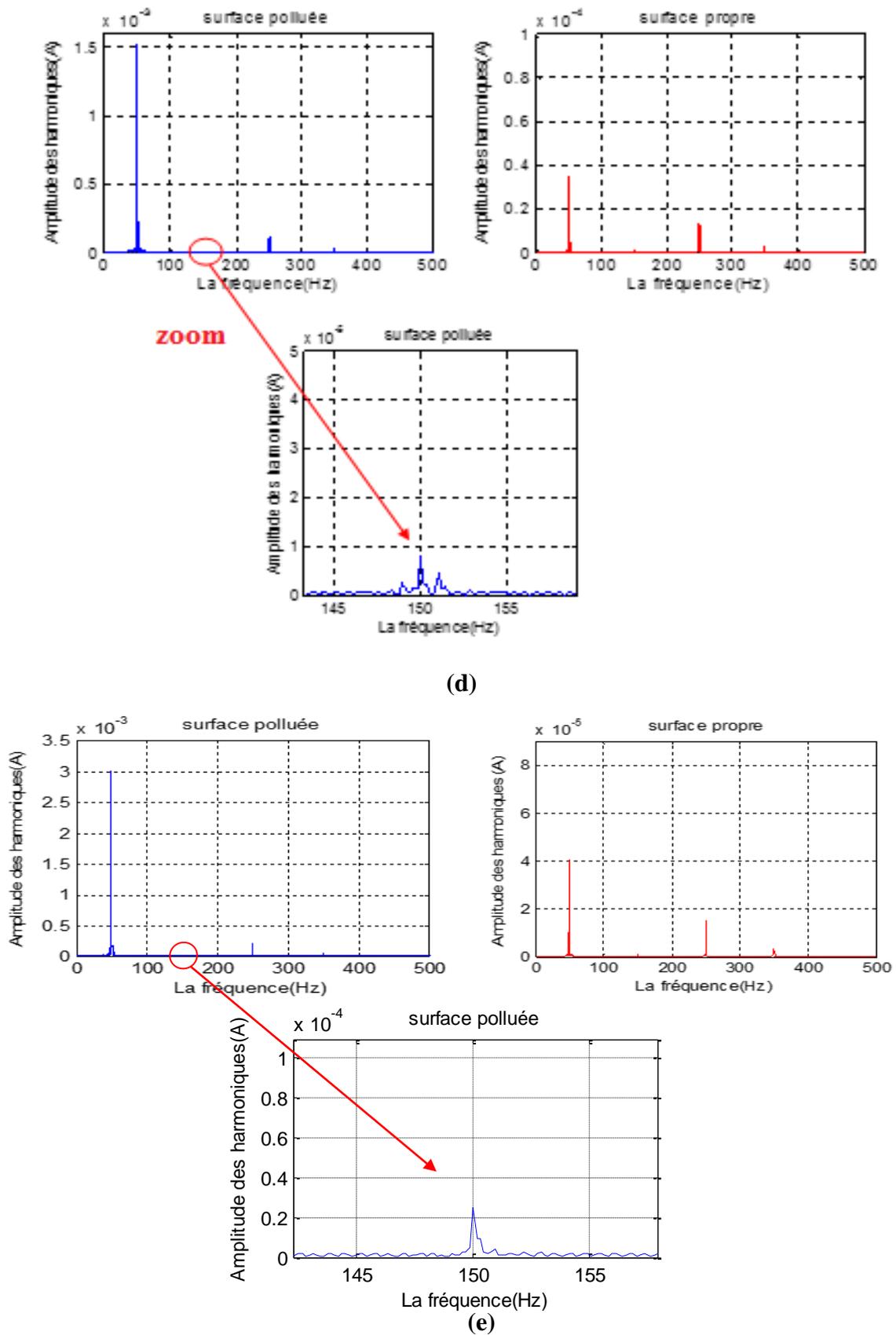




(b)



(c)



**Fig. IV.20** FFT du courant de fuite pour la 5<sup>ème</sup> quantité (m=75g) pour les niveaux de tension de : (a) 5kV, (b) 10kV, (c) 20kV, (d) 30Kv et (e) 35kV (sable de Bechar)

### c. Discussion des résultats

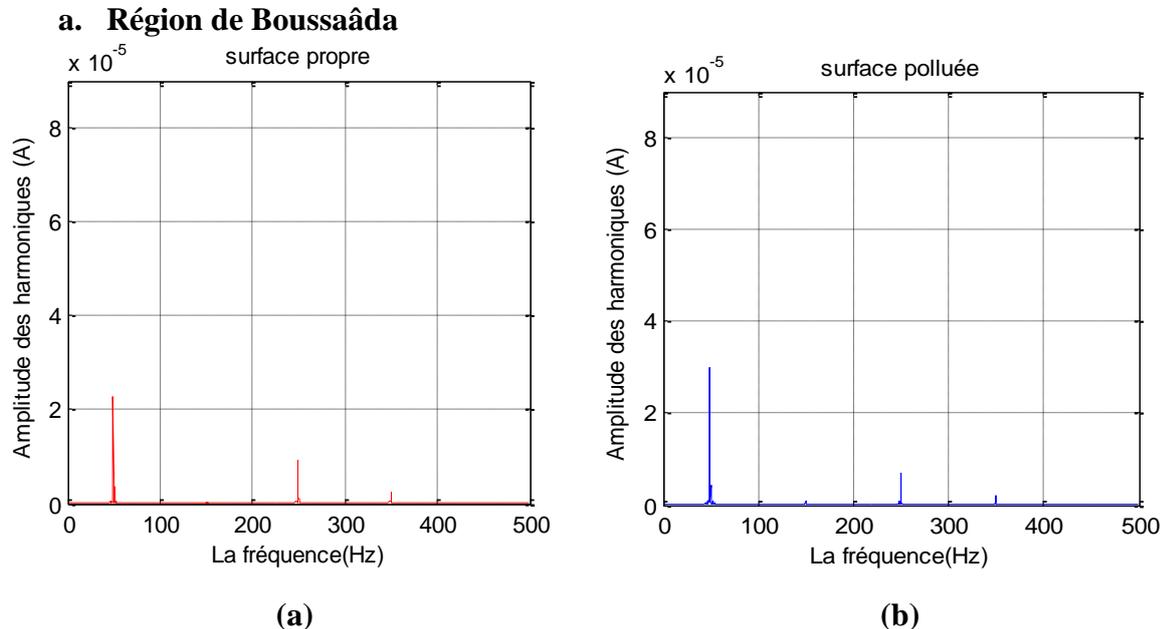
L'analyse fréquentielle montre clairement la dominance du fondamental à 50 Hz pour les deux cas propre ou pollué. Pour cette quantité, nous remarquons que l'amplitude de l'harmonique n°5 est supérieure aux autres harmoniques soit l'harmonique n°3 ou n°7.

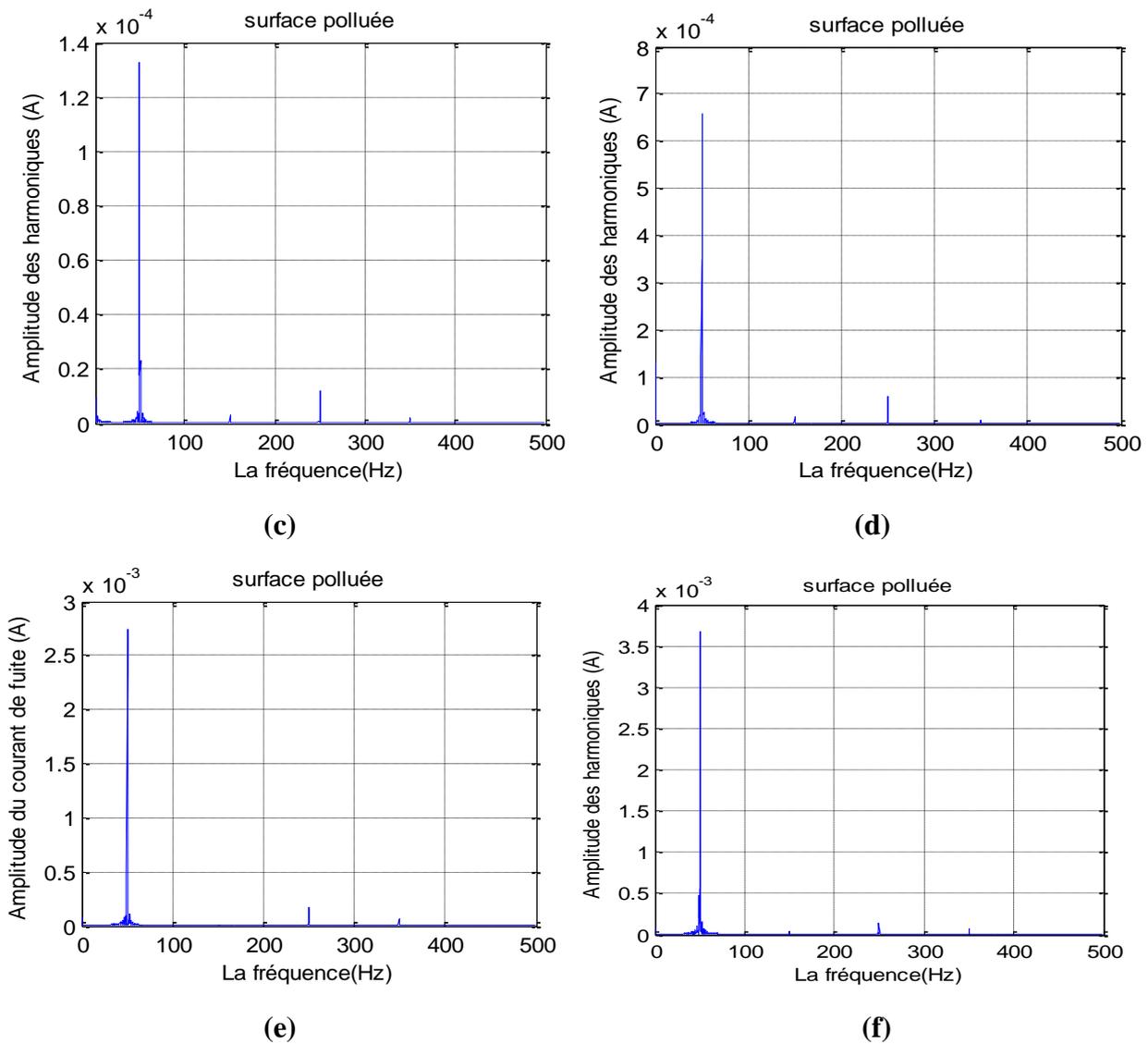
En comparant les cas pollués avec les cas propres, nous pouvons facilement constater que l'amplitude des harmoniques des cas pollués de Boussaâda (Figure(IV.19)) est supérieure à 100 fois l'amplitude des harmoniques des cas propres, mais cela diminue à environ 50 fois pour l'amplitude des fondamentaux des cas pollués de Bechar (Figure(IV.20)). Pour le cas propre, l'amplitude du fondamental est égale à 2 fois l'amplitude de l'harmonique n°5 quant au cas pollué, l'amplitude du fondamental est 10 fois supérieur à l'amplitude de l'harmonique n°5. L'apparition de l'harmonique n°7 survient aux grandes valeurs de la tension appliquée.

Nous avons constaté que l'apparition de l'harmonique n°3 ne s'effectue presque jamais dans le cas propre, donc nous pouvons considérer l'apparition de l'harmonique n°3 comme indice de contamination de la surface de l'isolateur. L'amplitude de l'harmonique n°5 ne change presque pas ce qui indique que le réseau est la source de cette harmonique.

#### IV.3.1.2 Etude de l'effet de la variation de la quantité de sable :

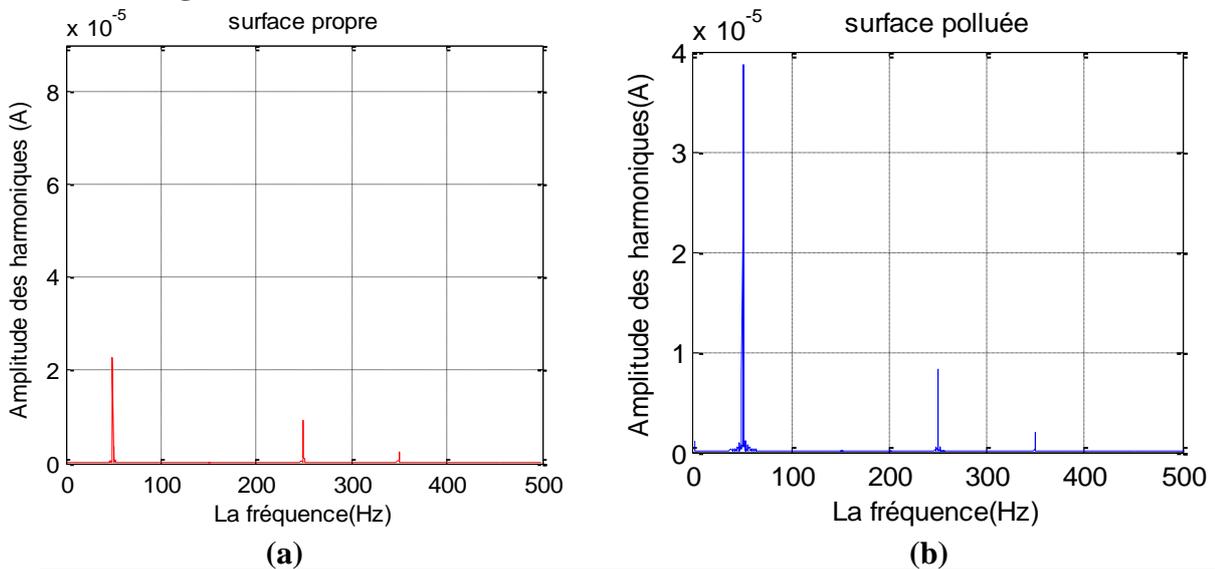
Dans cette partie, nous avons fixé le niveau de tension à 20 kV et faisons varier la quantité de contamination pour voir son effet sur le spectre d'amplitude du courant de fuite. Cela est appliqué pour les deux régions exactement comme le cas précédent.

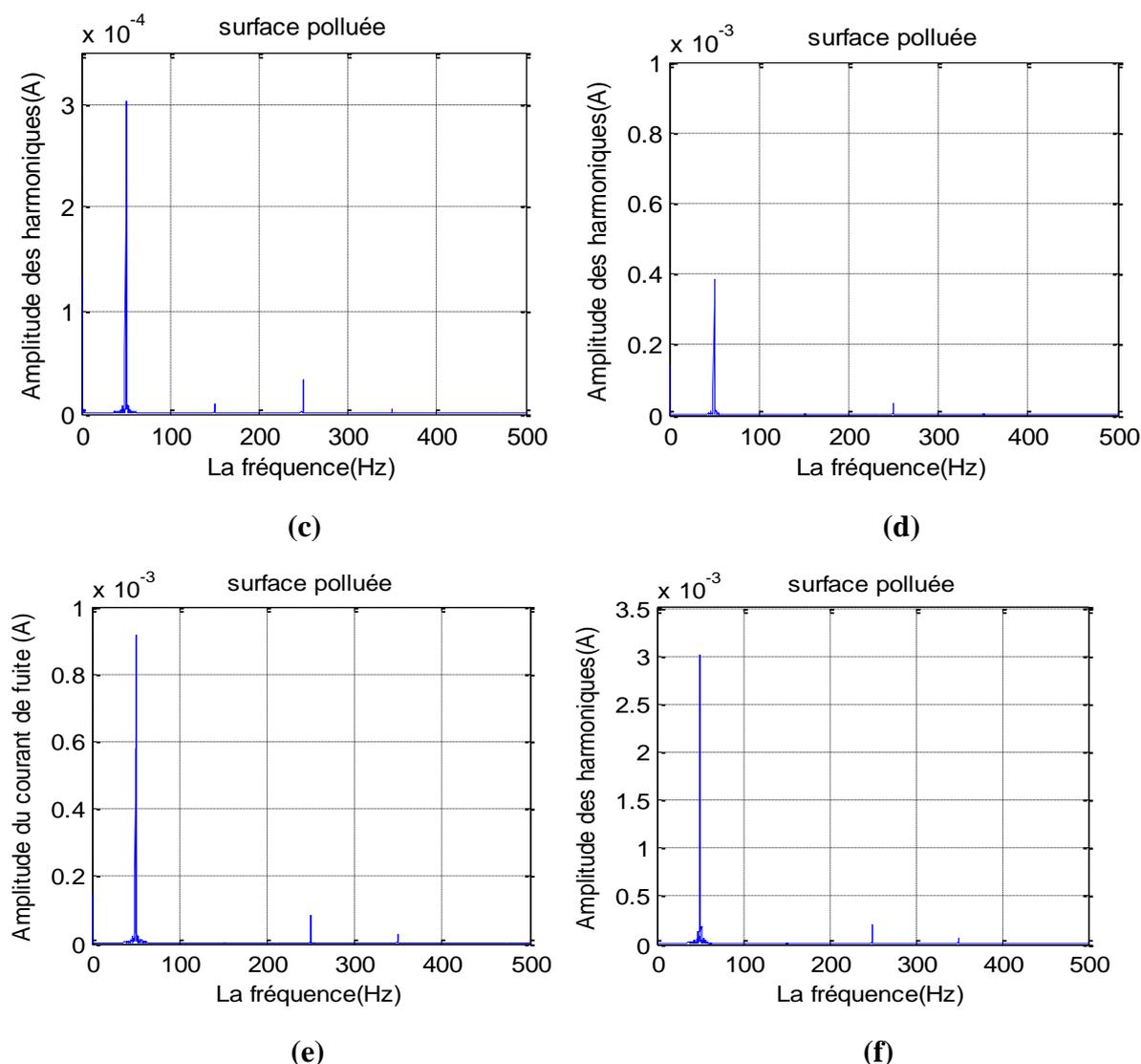




**Fig.IV.21** FFT du courant de fuite pour un niveau de tension de 20kV et pour différentes quantités de contamination : (a) propre (b) 15g, (c) 30g, (d) 45g (e) 60g et (f) 75g (sable de Boussaâda)

**b. Région de Bechar**





**Fig. IV.22** FFT du courant de fuite pour un niveau de tension de 20kV et pour différentes quantités de contamination : (a) propre (b) 15g, (c) 30g, (d) 45g (e) 60g et (f) 75g (sable de Bechar)

### c. Discussion des résultats

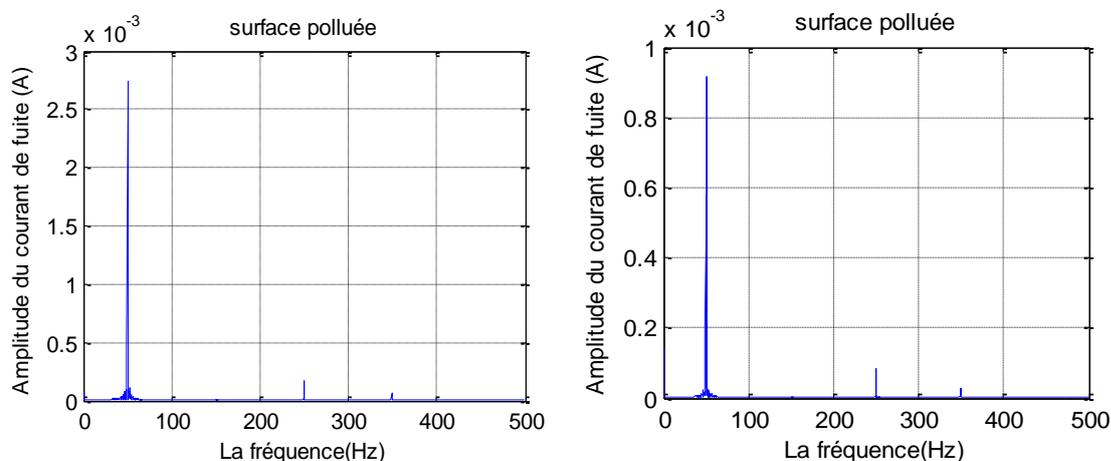
L'évolution de la quantité de sable qui contamine la surface de l'isolateur influe fortement sur l'amplitude des harmoniques ( $n^{\circ}1$ ,  $n^{\circ}3$ ,  $n^{\circ}5$  et  $n^{\circ}7$ ) comme c'est montré aux figures ci-dessus (Figure(IV.21), pour la région Boussaâda) et (Figure(IV.22) pour la région Bechar).

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

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

### IV.3.1.3. Etude de l'effet de la variation de la conductivité

Nous nous intéressons dans cette partie à mettre en évidence l'effet de la conductivité de la couche polluante sur le comportement du courant de fuite dans le cas pollué (4<sup>ème</sup> quantité) pour un niveau de tension fixe de 20kV.



**Fig.IV.23** FFT du courant de fuite pour la 4<sup>ème</sup> quantité (m=60g) pour un niveau de tension de 20kV et deux différentes conductivités : Boussaâda [ $21 \mu\text{s/cm}$ ] (à gauche) et Bechar [ $9 \mu\text{s/cm}$ ] (à droite)

#### IV.3.1.3.1 Discussion des résultats

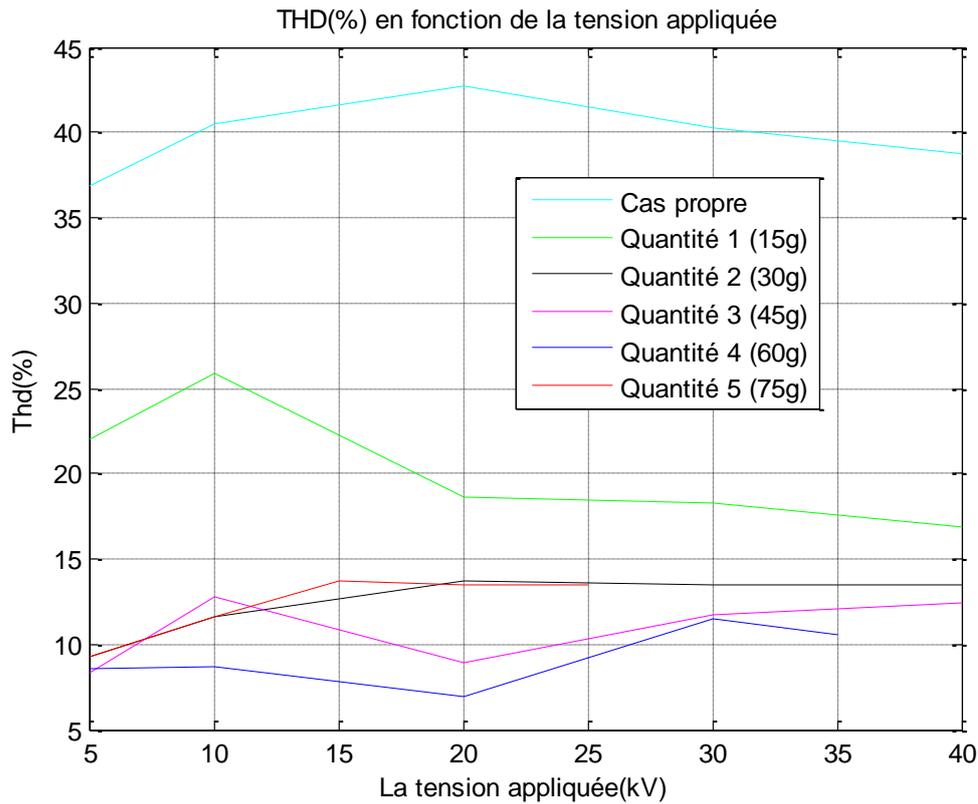
Nous remarquons que les harmoniques qui apparaissent aux deux figures sont les fondamentaux avec une composante dominante, et les harmoniques n°5 et n°7. L'harmonique n°3 existe mais dû à la composante élevée du fondamental, elle n'apparait pas.

La conductivité favorise la circulation du courant de fuite, donc plus la conductivité croît plus les amplitudes des harmoniques deviennent importantes. Le sable de Boussaâda utilisé pour la contamination de l'isolateur a une conductivité supérieure à celle de la région de Bechar. Cela est montré à la figure (IV.23) où les amplitudes des harmoniques des cas de Boussaâda sont plus élevées par rapport à ceux de Bechar.

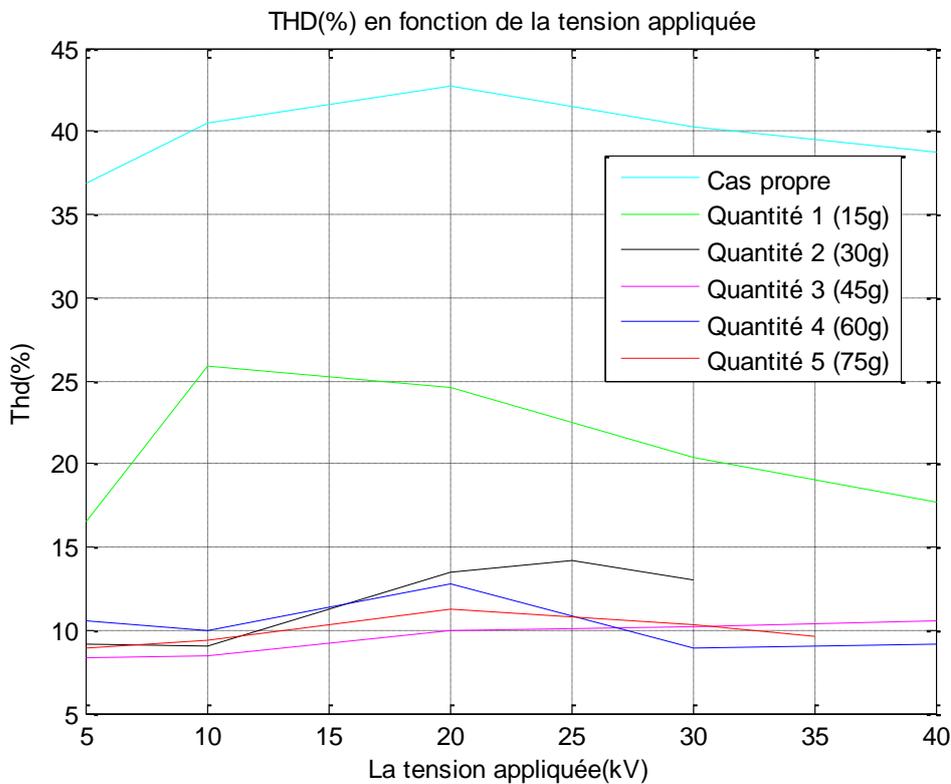
### IV.3.2. Taux de distorsion d'harmonique (THD) du courant de fuite

#### IV.3.2.1 Influence de la tension appliquée et de la quantité de la couche polluante

Dans cette partie, nous avons étudié l'influence du niveau de la tension appliquée et de la quantité de la couche polluante sur le taux de distorsion des harmoniques. Les résultats des essais sont donnés par les figures (IV.24) et (IV.25).



**Fig. IV.24** Variation du taux de distorsion (%) en fonction de la tension pour différentes quantités de sable de Boussaâda



**Fig. IV.25.** Variation du taux de distorsion en fonction de la tension pour différentes quantités de sable de Bechar

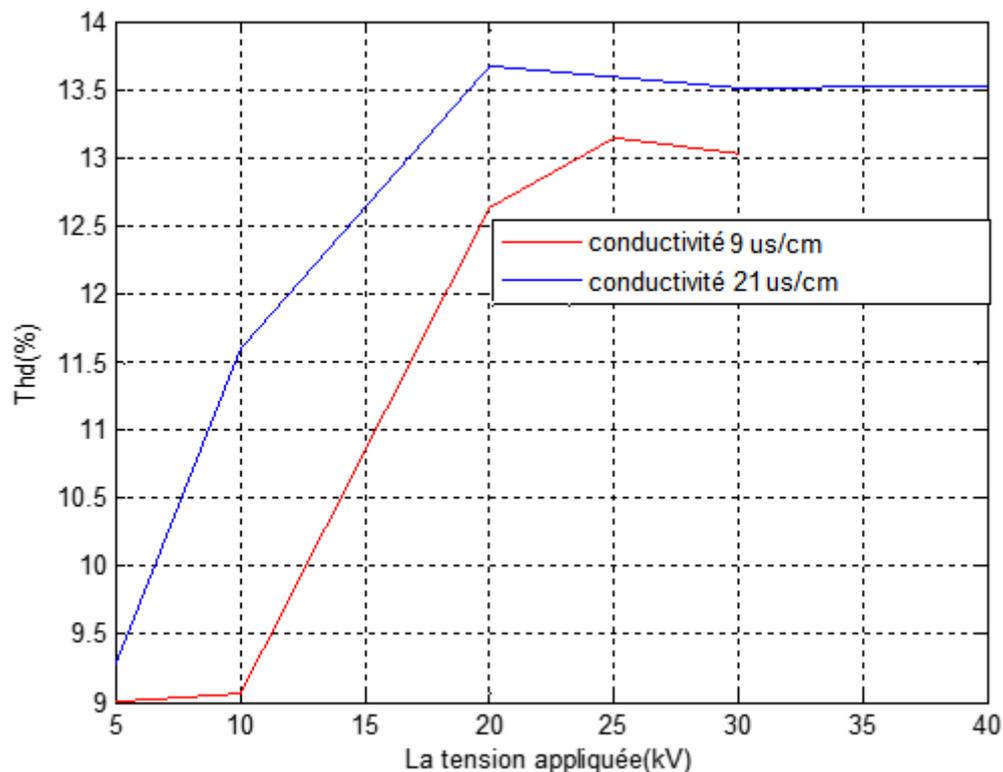
D'après les deux figures (IV.24) et (IV.25), l'évolution du taux de distorsion des harmoniques en fonction de la tension appliquée à la même allure pour les différentes quantités. Nous remarquons que pour les faibles valeurs de la tension ( $<10\text{kV}$ ), le taux de distorsion d'harmonique augmente légèrement avec l'augmentation de la tension à cause de l'augmentation rapide de l'amplitude des harmoniques n°3, n°5 et n°7 par rapport à l'augmentation du fondamental.

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

Le taux de distorsion est maximal pour une surface propre et minimal pour la grande valeur de la quantité de la couche de contamination. Ce dernier cas est dû à la présence dominante du fondamental suivie du 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> harmoniques. L'onde du courant de fuite est complètement déformée dans ce 1<sup>er</sup> cas.

#### IV.4.2.2 .Influence de la conductivité

Nous avons étudié l'influence de la conductivité sur le taux de distorsion d'harmonique où nous avons considéré deux types de sable différents et en fixant la quantité de la couche polluante à 30g. Les résultats des essais sont donnés par la figure (IV.26).



**Fig. IV.26.** Variation du taux de distorsion en fonction du niveau de la tension appliqué pour deux différentes conductivités de la couche polluante

D'après la figure (IV.26), nous remarquons une augmentation importante du taux de distorsion d'harmonique en fonction de la tension pour la conductivité  $21\mu\text{s}$  par rapport à celle de  $9\mu\text{s}$  à cause de l'augmentation de la quantité de sel de la couche polluante qui provoque l'apparition des décharges électriques sur les zones sèches après évaporation plus rapide de la

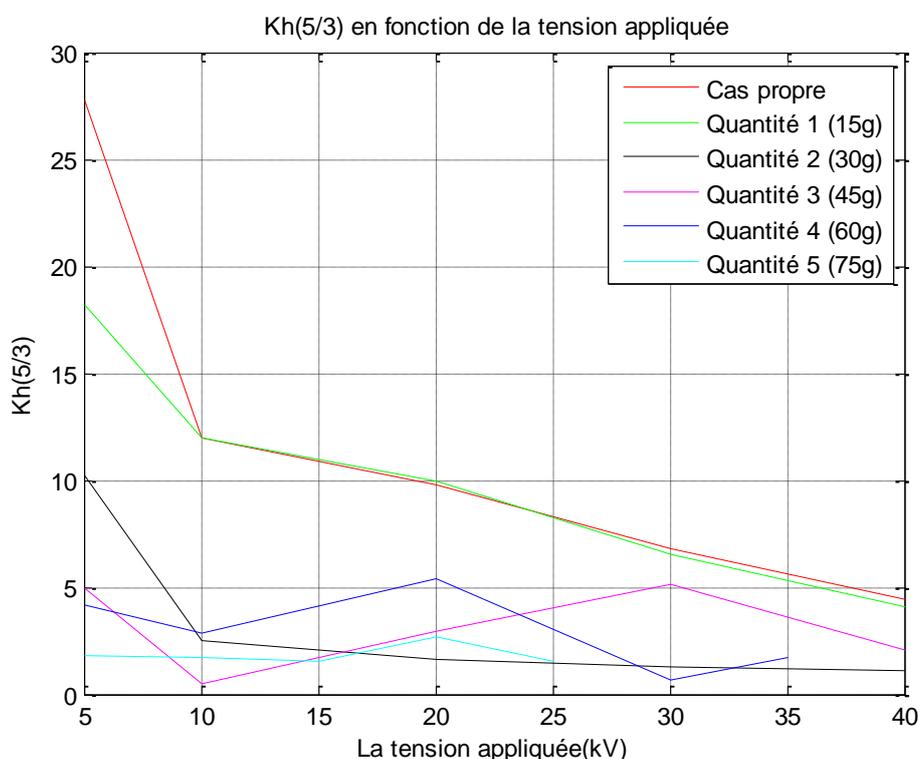
couche polluante due à la chaleur dégagée par effet joule. Ces zones sèches présentent des capacités qui forment avec la résistance de la partie polluée et humidifiée par l'eau distillée, un circuit amplificateur, qui amplifie les harmoniques et du coup engendre l'augmentation importante du taux de distorsion harmonique.

Donc, l'augmentation de la conductivité engendre une augmentation de la quantité de sel de la couche polluante ce qui provoque une augmentation de porteurs de charge des décharges électriques et une rapidité de vaporisation des zones polluées et humidifiées et donc un taux de distorsion harmonique plus élevé.

### IV.3.3. Etude du rapport des deux harmoniques n°3 et n°5 ( $K_h(5/3)$ )

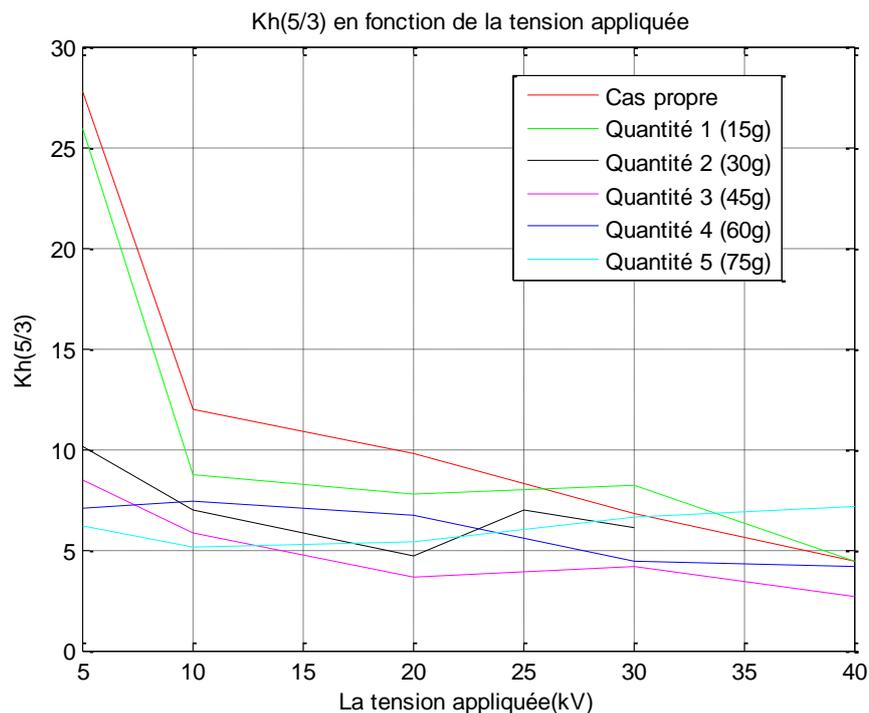
Selon les résultats obtenus par l'analyse harmonique du courant de fuite, il est intéressant de noter, sans tenir compte du fondamental, que seuls les harmoniques impairs d'ordre 3 et 5 (150 Hz et 450 Hz) présentent une amplitude significative. Cela nous a conduit à limiter notre étude à ces deux composantes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

#### a. Région de Boussaâda



**Fig. IV.27** Variation du rapport  $K_h(5/3)$  en fonction de la tension appliquée pour différentes quantités pour le sable de Boussaâda

### b. Région de Bechar



**Fig. IV.28** Variation du rapport Kh (5/3) en fonction de la tension appliquée pour différentes quantités pour le sable de Bechar

### c. Discussion des résultats

Les figures données ci-dessus présentent la variation du coefficient Kh (5/3) en fonction de la tension appliquée des cas propres et pour différentes quantités de la couche polluante pour la région de Boussaâda (Figure(IV.27)) et la région de Bechar (Figure(IV.28))

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

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

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

## IV.4. Conclusion

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

La tension de contournement diminue avec l'augmentation de la quantité de la couche polluante. Autrement dit, elle varie inversement avec l'augmentation de la conductivité de la couche de contamination.

L'étude temporelle du courant de fuite a montré que la déformation de la forme d'onde du courant de fuite dépend de la tension appliquée, la couche de contamination et la conductivité.

L'évolution de la conductivité peut être due à l'augmentation de la quantité de sel posée sur la surface de l'isolateur qui accélère l'apparition des décharges électriques.

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

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

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

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

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



# Conclusion générale

ENP  
2016



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

Dans notre travail, nous nous sommes concentrées sur la pollution désertique des deux régions Algériennes Boussaâda et Bechar. Une des approches suivie pour le diagnostic des isolateurs, consiste à étudier le comportement du courant de fuite qui circule sur la surface des isolateurs en simulant convenablement les conditions naturelles d'exploitation. Les recherches antérieures dans ce contexte révèlent qu'il dépend en grande partie de la solubilité des sels individuels, conductivité et la taille des grains du sable de la couche polluante.

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

Les essais réalisés au laboratoire ont montré que la tension de contournement varie inversement avec l'augmentation de la conductivité du sel ainsi qu'avec l'accumulation de la quantité de la couche polluante.

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

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

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

L'étude du spectre de l'amplitude du courant de fuite a mis en évidence le fait que les harmoniques n°3 et n°5 sont les plus significatifs lorsque la forme d'onde du courant de fuite est déformée. Pour une surface propre, le taux de distorsion est maximal et est minimal dans le cas de la plus grande valeur de la quantité de la couche de contamination. En plus, l'accroissement de la conductivité engendre une augmentation de la quantité de sel de la couche polluante ce qui provoque une augmentation de porteurs de charges électriques et une rapidité de vaporisation des zones polluées et humidifiées et donc le taux de distorsion harmonique devient de plus en plus élevé.

Un autre paramètre qui peut nous informer sur l'état de la surface de l'isolateur est le rapport  $K_h$  (5/3), qui s'atténue avec l'accroissement de la sévérité de pollution ou avec l'augmentation de la tension appliquée.

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



# Référence bibliographique

ENP  
2016



- [1]. T.Suda .” *Study on the frequency characteristics of leakage current waveforms of artificially polluted 12t suspension insulators by the clean fog method*”. IEE 11<sup>th</sup> International Symposium on High-Voltage Engineering, Aout 1999.
- [2]. M. El-Shahat.et H.Anis. ” *Risk assessment of desert pollution on composite high voltage insulators*”, Journal of Advanced Research (2014)5, 569–576, Cairo University,24 Juillet 2013.
- [3]. F.Meghnefi. ” *Étude temporelle et fréquentielle du courant de fuite des isolateurs de poste recouverts de glace en vue du développement d'un système de surveillance et de prédiction en temps réel du contournement électrique* ” ,Aout 2007.
- [4]. D,Bskulic. ” *Notes de cours de PHYS 708 Méthodes et outils numériques de traitement du signal* ” ,10 décembre 2010.
- [5]. B.Torresani. ” *Méthodes mathématiques pour le traitement du signal* ” , Université de Provence. Thèse Master Mathématiques et Applications, 2009-2010.
- [6]. H. Guillaume, ” *cours de traitement de signal Convolution/Corrélation* ” ,6 Septembre 2007.
- [7]. D. Benta, ” *Electronique FASTOCHE* ” , septembre 2000.
- [8]. N. Benmessaoud et H.Benbrahim ” *Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur pollué sous tension alternative 50Hz*”. Mémoire du projet de Fin d'Etudes, Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, ENP. Juin 2010.
- [9]. S. POUJOULI, ” *Valeur moyenne et efficace* ”.Analyse des signaux version 1.0, <http://poujouly.club.fr>
- [10]. M.Sanchez. ” *calcul des valeurs moyenne et efficaces sur les convertisseurs d'énergie électronique* ”.
- [11]. D.Shmilovitz. ” *On the definition of total harmonic distortion and its effect on measurement interpretation*”. IEEE Transactions on power delivery, VOL.20, N°1, Janvier 2005.
- [12]. Electromagnetic Compatibility (EMC) & mdash , Part 4, Section 7: General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply System and Equipment and Equipment Connected Thereto, 1991, IEC
- [13]. B.Moula, ” *Diagnostic des isolateurs hautes tensions sous tension alternative 50Hz* ”, Thèse de Doctorat en Sciences en Electrotechnique, ENP. 2013-2014.
- [14]. C .Cardinal, et Y.Goustard, et B,Hamelin, ” *ELE2700 — Analyse des signaux* ” , chapitre 3. Août 2006
- [15]. G. Baudoin et J-F.Berchier, ” *Eléments de traitement du signal* ”, Ecole Supérieure d'Ingénieur en Electrotechnique et Electronique, Septembre 1998.
- [16]. ASDS, ” *Conversion des signaux analogiques en numérique* ”, [http://www.lycee champollion.fr/IMG/PDF/ads\\_can.pdf](http://www.lycee champollion.fr/IMG/PDF/ads_can.pdf).
- [17]. A.Vincent-Randonnier. ” *l'échantillonnage* ”.
- [18]. É. Tisserand et J-F. Pautex et P. Schweitzer . ” *Analyse et traitement des signaux* ”.. Dunod, Paris, 2008 , pp 112
- [19]. M .Charbit ” *Bases de traitement du signal* ”. septembre, 2004.
- [20]. F.Cottet. ” *AIDE MEMOIRE Traitement du signal* ”.Dunod,Paris,2000
- [21]. G.BLANCHET et M.CHARBIT. ” *Traitement numérique du signal* ”. Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique, Août ,1998.
- [22]. M.Bellanger, ” *Traitement numérique du signal – Théorie et pratique* ”.Dunod, Paris, 1998.
- [23]. R. Benzid, ” *Ondelettes et Statistiques d'Ordre Supérieur Appliquées aux Signaux Uni et Bidimensionnel* ”, Thèse de doctorat, Université de Batna, Algérie, 2005.
- [24]. R.BEKKA, ” *fondements du traitement du signal* ”, Office des Publications Universitaires, 3ème édition, 2005.

- [25]. X. Zhou, C. Zhou, and I. J. Kemp, "An Improved Methodology for Application of wavelet transform to partial discharge measurement denoising", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol.12, pp. 586-594, 2005.
- [26]. A.Tilmatine. "Isolateurs des lignes", Chapitre 6.
- [27]. Ducouret," *Lignes aériennes : Matériels –Isolateurs-Essais* ", Technique de l'ingénieur,10 Février 2004.
- [28]. Direction Approvisionnements et Marchés-Division Etudes et Normalisation." *Isolateurs en verre* ", SPECIFICATION TECHNIQUE ONE ST N° C64 – L64, Edition Décembre 2003.
- [29]. A .Abimouloud. "Comportement d'une Surface Isolante Partiellement Polluée sous Tension Alternative 50Hz ", mémoire de magister en Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique Alger .Décembre 1999.
- [30]. T. C. Cheng et C. T. Wu,"On the deleterious effects of nitrates on insulating surfaces under HVDC conditions", IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-14 No. 3, June 1979, pp. 171-174.
- [31]. F. Rizk et al., "Laboratory and field experience with EHV transmission line insulators in the desert", IEEE Trans. PAS-94, No. 5, 1975 pp 1770-1776.
- [32]. Wapda et NGK, "Study on performance of desert contaminated insulators in Pakistan",NGK Tech. Note TN-81032, Mai 1981.
- [33]. J. A. Dean, "Lange's Handbook of Chemistry", McGraw Hill Book Co. New York, 1973.
- [34]. Abdulaziz-El-Sulaiman et M. Iqbal Qureshi. "EFFECT OF CONTAMINATION ON THE LEAKAGE CURRENT OF INLAND DESERT INSULATORS". IEEE Trans. Elect. Insul. Vol. EI-19 No. 4, Aout 1984
- [35]. C. Henry, K.Abhinav "The densest lattice in twenty-four dimensions. Electronic Res Announ Am Math Soc" , 2004.
- [36]. M.Salam, Z.Nadir, N.Mohammad , A.Al Maqrashi ,A. AlKaf , Al Shibli , et 'al. Measurement of conductivity and equivalent salt deposit density of contaminated glass plate". TENCON IEEE region 10 conference; Novembre 2004.