



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT ELECTROTECHNIQUE

Mémoire du projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

THEME :

*Mesure du courant de fuite et de la charge  
électrique d'un isolateur pollué de haute tension.  
Caractérisation de son état de surface en utilisant  
la transformée en ondelette*

Proposé par :

Pr.A.MEKHALDI

Etudié par :

HARZELLI Imadeddine

MAANANI Yacine

Promotion JUIN 2011

ENP 10, Avenue Hassen Badi, 16200 El Harrach, ALGER

## REMERCIEMENTS

*En premier lieu, nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience afin de mener ce modeste travail à terme.*

*Nous tenons à remercier notre promoteur Mr. A. Mekhaldi pour sa constante présence au sein du laboratoire de Haute Tension ainsi que ses précieux conseils dans le domaine de la recherche scientifique.*

*Nous remercions Mr. A. Boubakeur pour sa constante présence au sein du laboratoire de Haute Tension, ainsi que pour son soutien moral.*

*Nos remerciements vont également à Mr. M. Tegar pour son aide et ses qualités humaines.*

*Un grand merci à Mr. B. Moula qui nous a beaucoup aidé à avancer durant nos manipulations effectuées au laboratoire ainsi pour son dévouement exceptionnel, sa précieuse directive et son suivi constant.*

*Nous tenons également à remercier tous les enseignants ayant contribué à notre formation et ce depuis le tronc commun jusqu'à la dernière année de graduation.*

*Enfin, nous remercions les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre modeste travail.*

# *Dédicaces*

Mes très chers parents, dont le sacrifice, l'amour, la patience, le soutien, l'encouragement et les prières sont l'essence de ma réussite. Merci d'être si fiers de moi.

A mes chers frères et sœurs : Ramzi, Bilel Manel,  
Romaissa et Hadjer.

A toute la famille HARZELLI et EL-BEY.

A mes cher amis : Baha, Ahmed, Youcef, Hamza et Badri....

A mon cher ami et binôme Yacine

A toute les bourawisset

A toute Jma3a tchawe3na " tche3 tchayatch tche3 Biskra".

Je remercie les responsables d'université Mohamed Kheider  
Biskra

A tous ceux qui ont su croire en moi

A tous ceux qui me sont chers

A toute la promo ENP 2011

*Imad*

*A mes très chers parents dont l'amour, le soutien et  
l'encouragement sont l'essence de ma réussite*

*A mes sœurs : Hiba, Salsabil et Rayane*

*A mes frère Ramzi et Aymen acil*

*A ma grand-mère bien-aimée*

*A toute ma famille*

*A mon binôme et frère Imadeddine*

*A mon ami et COPCHs "Seddik"*

*A mes chers amis : Salah ,Karim ,Idir, Raouf, Rouji, Said, Ramzi....*

*A toute la promo ENP 2011*

***Yacine***

## ملخص:

في هذا العمل قمنا بدراسة شدة التلوث تحت تيار متناوب ذو توتر 50 هرتز على نموذج سطحي يمثل العازل **PSV 120 B** ولهذا الغرض أجريت عدة تجارب للتلوث المنتظم و غير المنتظم بمخبر عالي التوتر للمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات لتمييز حالة سطح النموذج اعتمادا على إشارات كل من تيار التسرب و التوتر المطبق. أولا ركزنا على توتر الإحاطة ، سعة التيار التسرب ، فرق الصفحة بين التوتر و التيار التسرب. ثانيا قمنا بعرض نتائج معالجة إشارة كل من إشارة تيار التسرب و التوتر بواسطة FFT لتقدير شدة التلوث. ثالثا طبقت تقنية التحليل بالموجيات على كل من إشارة التوتر و تيار التسرب باستعمال CWT و DWT على التسلسل لتشخيص حالة تلوث السطح.

**الكلمات المفتاح:** تيار التسرب ،توتر الإحاطة ،الشحنة الكهربائية، التلوث المنتظم ،التلوث غير المنتظم ،نموذج سطحي ،التحويل بالموجيات ، FFT .

## Résumé :

Dans le présent travail, l'étude de la sévérité de la pollution est effectuée en tension alternative 50 Hz sur un modèle plan simulant l'isolateur standard **PSV 120 B**. Pour cela, plusieurs essais sous pollution uniforme et non-uniforme sont effectués au Laboratoire de Haute Tension de L'ENP pour caractériser l'état de surface du modèle en exploitant les signaux du courant de fuite et de la tension appliquée. En premier lieu, nous nous intéressons à la mesure de la tension de contournement, à l'amplitude du courant de fuite et la charge électrique. En deuxième lieu, nous présentons les résultats du traitement des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée par l'analyse spectrale pour évaluer la sévérité de la pollution. En troisième lieu, la technique d'analyse par la transformée en ondelettes est appliquée au signal de la tension appliquée via la CWT et au signal du courant de fuite en utilisant la DWT, afin d'estimer l'état de surface du modèle.

**Mots-clés :** Courant de fuite, tension de contournement, charge électrique, pollution uniforme, pollution non-uniforme, modèle plan, transformée en ondelette, analyse spectrale.

## Abstract:

In this work, pollution severity under 50 Hz applied voltage is studied on plan model which simulates **PSV 120 B** outdoor insulator. Many tests at High Voltage Laboratory of the ENP are carried out in uniform and non-uniform pollution in order to characterize the insulating surface state, by using leakage current and applied voltage waveforms. First, we study flashover voltage, leakage current magnitude electric charge. Secondly, we present the signal processing results of leakage current and applied voltage waveforms by using spectral analyses to evaluate pollution severity. Thirdly, Continuous Wavelet Transform is employed on voltage waveform and Discrete Wavelet Transform is adopted to analyze leakage current waveform in order to estimate the state surface.

**Key-words:** Leakage current, electric charge, flashover voltage, uniform pollution, non-uniform pollution, plan model, wavelet transform, spectral analyses.



*Liste des symboles*

A	: Amplitude maximale du signal $X(n)$ .
AFM	: Atomic Force Microscopy.
CEI	: Commission Electrotechnique Internationale.
DAS	: Data Acquisition System.
db	: Daubechies.
DR	: Distorsion ratio
DP	: Décharges partielles.
DSP	: Densité spectrale de puissance.
DOF	: Degree Of Fulfilment.
DWT	: Discrete wavelet transform.
E	: Energie totale d'un signal.
ESDD	: Equivalent salt deposit density.
EVA	: Ethylene Vinyl Acetate.
$f_0$	: Fréquence du signal $X(n)$ .
FFT	: Fast Fourier Transform.
HFCT	: High Frequency Curent Transform
HF	: High Frequency.
IDWT	: Transformée en ondelette inverse.
ITFD	: Transformée de Fourier inverse à temps discret.
LC	: Leakage current.
$L_c$	: Distance de contournement sous pollution.
LF	: Low Frequency.
MRSD	: Multi-Resolution Signal Decomposition.
NaCl	: Chlorure de Sodium.
ND	: Rapport entre le nombre de décharges positive et négatives.
NSDD	: Non Soluble Deposit Density.
PC	: Personal Computer.
PU	: Protection Unit.
P	: Puissance moyenne d'un signal.
RP	: Recurrent plot (technique graphique récurrente).
RTV	: Room Temperature Vulcanized.
$r_{xy}$	: Coefficients de corrélations.
SGWT	: Second Generation Wavelet Transform.
SIR	: Silicone rubber.

$s$	: l'échelle de l'ondelette.
SNR	: Signal noise ratio.
$ s(t) ^2$	: Densité temporelle d'énergie.
$ s(f) ^2$	: Densité spectrale d'énergie.
$s_x, s_y$	: Ecart-types de $x$ et $y$ .
TEM	: Transmission Electron Microscopy
THD	: Total Harmonic Distorsion.
$u$	: la translation de l'ondelette.
WAXD	: Wide Angle X-ray Diffraction.
$w(n)$	: Fonction de fenêtrage.
$X_a(nT)$	: Signal a la sortie du filtre anti-repliement.
$X_e(n)$	: Signal échantillonné pour $n$ .
$X(f)$	: Transformée de Fourier du signal $x(t)$ .
XRD	: X-Ray-Diffraction.
$ x(t) $	: Module du signal $x(t)$ .
$\beta$	: Facteur de forme de la distribution de Weibull .
$\sigma$	: Déviation standard.
$\xi$	: Centre de fréquence d'une ondelette.
$\Psi$	: l'ondelette mère.
$\Delta\Phi$	: Gamme de déphasage.





# *Sommaire*

## Sommaire

**Introduction générale** .....1

### **Chapitre I : Travaux antérieurs sur l'étude de la pollution des isolateurs.**

I-1-Introduction .....6

    I.1. Analyse par la méthode graphique récurrente (recurent plot) du signal du courant de fuite pour la surveillance de l'état de l'isolateur .....6

    I.2.Utilisation des composants harmoniques du signal du courant de fuite comme étant un outil de diagnostic afin d'étudier le vieillissement des isolateurs.....9

    I.3.Investigations sur le courant de fuite et l'angle de phase caractéristiques de porcelaine et d'isolateur polymère dans des conditions souillées .....11

    I.4.Analyse graphique récurrente du signal du courant de fuite afin d'évaluer les performances du contournement des isolateurs composites givrés.....15

    I.5.Comprendre les caractéristiques hydrophobes des nano composites époxy en utilisant Ondelette et Technique Fractal .....18

    I.6.Détermination de la probabilité de l'occurrence de contournement dans les isolateurs en utilisant les composants harmoniques du courant de fuite .....22

    I.7.Distribution du courant de fuite sur la surface d'isolateurs en polymère polluée artificiellement .....24

    I.8.Etude de la pollution des isolateurs en céramique par la détection des décharges partielles .....26

    I.9.Conclusion .....28

### **Chapitre II : Théories du traitement du signal.**

Introduction .....30

II.1. Définition d'un signal.....30

II.2. Energie et puissance des signaux .....30

    II.2.1. Energie totale d'un signal .....30

II.2.2. Puissance moyenne d'un signal .....	30
II.3. Les type des signaux.....	31
II.3.1. Les signaux aléatoires .....	31
II.3.2. Les signaux déterministes.....	32
II.3.2.1. Les signaux à énergie finie .....	32
II.3.2.2. Les signaux puissance moyenne finie non-nulle.....	32
II.4. Transformée de Fourier .....	32
II.4.1. Définition de la transformée de Fourier.....	33
II.4.2. La transformée de Fourier d'un signal continu.....	33
II.4.2.1. Conditions d'existence.....	33
II. 4.2.2. Propriétés.....	34
II .4.3. La transformée de Fourier d'un signal discret.....	35
II.4.3.1. Conditions d'existence. ....	37
II.4.3.2. Propriétés. ....	37
II.4.3.3. La FFT. ....	38
II.4.4. Echantillonnage. ....	38
II.4.4.1. Définition de l'échantillonnage. ....	38
II.4.4.2. Le théorème de Shanon. ....	38
II.4.4.3. Estimation de spectre .....	39
Conclusion.....	40
II.5. Transformée en ondelettes.....	40
Introduction.....	40
II.5.1. Transformée en ondelettes continue (CWT). ....	41
II.5.1.1. Définition. ....	41
II.5.1.2. Expression mathématique. ....	41
II.5.1.3. Les conditions que doivent satisfaire les fonctions ondelettes. ....	42
II.5.1.4. Ondelette de Morlet. ....	43

II.5.1.5. Scalogramme. ....	45
II.5.1.6. Calcul des coefficients de la CWT. ....	46
II.5.2. Transformée en ondelette discrète (DWT). ....	48
II.5.2.1. Définition. ....	48
II.5.2.2. Expression mathématique. ....	48
II.5.2.3. Algorithme de décomposition pyramidale. ....	48
II.5.2.4. Décomposition en paquet d'ondelettes : ....	50
II.5.2.5. Choix de l'ondelette analysante ....	52
II.5.3. Histogramme du signal. ....	53
Conclusion. ....	54

### **Chapitre III : Techniques expérimentales.**

III.1. Introduction ....	56
III.2. Dispositif expérimental ....	56
III.2.1. Circuit d'essais du Laboratoire de l'ENP. ....	56
III.2.2. Objet d'essai. ....	57
III.3. Le nettoyage du plan. ....	60
III.4. Préparation des solutions polluantes. ....	60
III.5. Méthode de pulvérisation. ....	61
III .5.1. Pollution uniforme. ....	61
III.5.2. Pollution non-uniforme ....	62
III.6. Mesure du courant de fuite. ....	62
III.7. Mesure du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée ....	63
III.8. Mesure de la charge électrique ....	63
III.9. Conclusion. ....	63

## **Chapitre IV: Résultats expérimentaux et discussions.**

IV-1-Introduction .....	65
IV.2. Mode opératoire .....	65
IV.3.Etude de la tension de contournement .....	65
IV.3.1. Tension de contournement pour le cas uniforme.....	66
IV.3.2. Tension de contournement pour le cas non-uniforme .....	68
IV.3.3.Discussion.....	72
IV.4.Etude du courant de fuite.....	72
IV.4.1. Résultats des essais sous pollution uniforme.....	72
IV.4.2 Visualisation des signaux .....	75
IV.4.3. Résultats des essais sous pollution non-uniforme.....	77
IV.4.4. Visualisation des signaux.....	80
IV.4.5.Discussion .....	83
IV.5.Analyse du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée sous pollution uniforme .....	83
IV.6 Etude de la charge électrique.....	86
IV.6.1 Résultats des essais sous pollution uniforme.....	86
IV.6.2. Résultats des essais sous pollution non-uniforme .....	88
IV.6.3.Discussion .....	91

## **Chapitre V: Energie des harmoniques du courant de fuite et de la tension appliquée.**

V.1.Introduction .....	93
V.2.L'analyse spectrale.....	93
V.2.1.Pollution uniforme .....	93
V.2.2.Pollution non-uniforme .....	95
V.3.Etude de l'énergie des harmoniques sous pollution uniforme (C=40 g/l) .....	96
V.3.1.Tension appliquée $5kV_{\text{eff}}$ .....	96

V.3.2.Tension appliquée 15kV <sub>eff</sub> .....	97
V.3.3.Tension appliquée 25kV <sub>eff</sub> .....	98
V.4. Etude de l'énergie des harmoniques sous pollution uniforme (C=100 g/l) .....	99
V.4.1.Tension appliquée 5kV <sub>eff</sub> .....	99
V.4.2.Tension appliquée 15kV <sub>eff</sub> .....	100
V.4.3.Tension appliquée 25kV <sub>eff</sub> .....	101
V.5. Etude de l'énergie des harmoniques sous pollution uniforme (C=200 g/l) .....	102
V.5.1.Tension appliquée 5kV <sub>eff</sub> .....	102
V.5.2.Tension appliquée 15kV <sub>eff</sub> .....	103
V.5.3.Tension appliquée 25kV <sub>eff</sub> .....	104
V.6.Etude de l'énergie des harmoniques sous pollution non-uniforme (C=40 g/l) .....	105
V.6.1.Tension appliquée 5kV <sub>eff</sub> .....	105
V.6.2.Tension appliquée 15kV <sub>eff</sub> .....	106
V.6.3.Tension appliquée 25kV <sub>eff</sub> .....	107
V.7. Etude de l'énergie des harmoniques sous pollution non-uniforme (C=100 g/l) .....	108
V.7.1.Tension appliquée 5kV <sub>eff</sub> .....	108
V.7.2.Tension appliquée 15kV <sub>eff</sub> .....	109
V.7.3.Tension appliquée 25kV <sub>eff</sub> .....	110
V.8. Etude de l'énergie des harmoniques sous pollution non-uniforme (C=200 g/l) .....	111
V.8.1.Tension appliquée 5kV <sub>eff</sub> .....	111
V.8.2.Tension appliquée 15kV <sub>eff</sub> .....	112
V.8.3.Tension appliquée 25kV <sub>eff</sub> .....	113
V-9-Conclusion .....	114

## **Chapitre VI: Etude de la pollution par la technique des ondelettes.**

VI.1. Introduction .....	117
VI.2. Pollution uniforme .....	117
VI.2.1. Transformée en ondelette continue de la sinusoïde pure .....	117

VI.2.2. Influence de la conductivité volumique de la couche polluante.....	118
VI.2.2.1. Conductivité 1.2 mS/cm pour une concentration 40 g/l de kaolin.....	118
VI.2.2.2. Conductivité 6 mS/cm pour une concentration 40 g/l de kaolin.....	119
VI. 2.2.3. Conductivité 20 mS/cm pour une concentration 40 g/l de kaolin .....	120
VI.2.3. Influence de la concentration du kaolin .....	122
VI. 2.3.1. Conductivité 20 mS/cm pour une concentration 100 g/l de kaolin .....	122
VI.2.3.2. Conductivité 20 mS/cm pour une concentration 200 g/l de kaolin .....	123
VI.2.4. Conclusion sur l'analyse par la CWT .....	124
VI.3. Pollution uniforme et non-uniforme .....	125
VI.3.1. Pollution uniforme .....	126
VI.3.2. Pollution non-uniforme .....	130
VI.3.3. Conclusion sur l'analyse par la DWT .....	135
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>137</b>

## **Références bibliographiques**

# *Introduction générale*



Les isolateurs des lignes et de poste de transport d'énergie électrique sont le siège de plusieurs contraintes. Entre autres, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie [1]. De ce fait, il faut assurer, à tout instant, un bon équilibre entre la demande croissante et la production de l'énergie. C'est pour cela, qu'une très grande importance est attachée aux réseaux électriques, principalement aux lignes de haute tension [2].

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

Le contournement des isolateurs sous haute tension et en présence d'impuretés conductrices est lié à l'apparition des décharges électriques qui progressent à leurs surfaces conductrices jusqu'au court-circuit. Il peut être caractérisé par deux phases successives [3]:

- Initiation d'une décharge électrique instable à un certain seuil de tension à cause d'un assèchement local de la surface conductrice.
- Progression de la décharge électrique avec l'augmentation du courant de fuite sous des conditions de pollution favorables, pour former un arc de contournement stable qui modifie partiellement la conductivité du milieu.

Les conséquences du contournement vont de la dégradation de la surface de l'isolateur jusqu'à la mise hors service de l'ensemble de l'isolation électrique [4]. Ce phénomène reste à ce jour complexe malgré de nombreuses recherches effectuées pour comprendre le développement de la décharge électrique qui mène au contournement de l'isolateur en présence de couches fortement conductrices. La complexité de ce phénomène impose aux chercheurs d'effectuer plus d'expériences en laboratoires et in situ, sous des conditions de pollution artificielles ou naturelles afin d'en comprendre le mécanisme. Toutefois, les méthodes d'essais sur site sont les plus intéressantes mais nécessitent plusieurs années pour permettre une étude convenable du comportement de l'isolateur [5].

L'étude du phénomène de la décharge à pour objectif de prédire le moment exact du contournement en essayant de fixer des critères de diagnostic convenables. A cet effet, le signal du courant de fuite est une source d'informations capitale pour caractériser l'état de surface des isolateurs avec un moindre coût. Le signal de la tension appliquée peut être également pris en considération pour estimer l'état de surface de l'isolateur. C'est pourquoi nous nous proposons d'analyser les deux signaux en vue de comprendre l'effet de la

conductivité du milieu sur les décharges électriques, en particulier l'évaporation causée par l'augmentation de la température sur la surface isolante.

Le présent travail consiste à étudier la sévérité de pollution sur un modèle d'isolateur plan, avec différentes configurations de pollution afin de comprendre l'impact de celles-ci sur les performances électriques de l'isolateur, en exploitant principalement le signal du courant de fuite puis celui de la tension appliquée.

Dans le premier chapitre, nous présentons les principaux travaux qui traitent de la pollution des isolateurs avec tous les phénomènes accompagnant la progression de la décharge électrique. Ces travaux sont en grande partie basés sur l'étude du courant de fuite avec plusieurs méthodes afin d'en extraire le maximum d'informations sur l'état de surface de l'isolateur considéré.

Le deuxième chapitre présente d'une manière succincte l'environnement du traitement du signal par la transformée de Fourier et la transformée en ondelettes. Nous insistons sur le concept d'énergie qui va nous permettre d'évaluer son importance dans le courant de fuite pendant la décharge électrique. Cela pourrait être une explication du phénomène d'évaporation de la solution conductrice pendant la décharge. Par la suite, nous introduisons la théorie des ondelettes discrètes et continues dans lesquelles nous décrivons les principales idées se rapportant à l'analyse multi-résolution ainsi qu'à la représentation temps-échelle, qui peuvent faire l'objet d'une surveillance de l'état de surface des isolateurs.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les techniques expérimentales et les différents outils de manipulation exploités pour mener à bien les essais en laboratoire.

Le quatrième chapitre est entièrement consacré à l'étude du comportement diélectrique du modèle plan pour les deux cas des pollutions uniforme et non-uniforme. Les essais du laboratoire ont été réalisés pour plusieurs conductivités volumiques de la solution polluante et pour différentes concentrations en kaolin. Nous présentons les résultats concernant la tension de contournement, le courant de fuite et la charge électrique. Le déphasage courant de fuite-tension appliquée a été également évalué.

Le cinquième chapitre présente les résultats du traitement du signal du courant de fuite et de la tension appliquée pour déterminer un critère de diagnostic d'apparition des décharges électriques en mesurant l'énergie présente dans les deux signaux par l'analyse spectrale.

Dans le sixième et dernier chapitre, nous mettons en application l'analyse par la technique des ondelettes. Pour la pollution uniforme, la transformée en ondelette continue (CWT) est appliquée sur le signal de la tension appliquée pour un éventuel diagnostic de l'état de surface du modèle plan. Pour les deux cas de pollution uniforme et non-uniforme, la transformée en ondelette discrète (DWT) est utilisée pour détecter la nature de la pollution si celle-ci est uniforme ou non-uniforme et d'évaluer aussi la sévérité de la pollution via la représentation par la décomposition en paquet d'ondelette.

En dernier lieu, nous terminons par une conclusion générale qui est une synthèse des principales observations liées à l'attitude adoptée par l'isolateur en présence de couches conductrices distinctes.

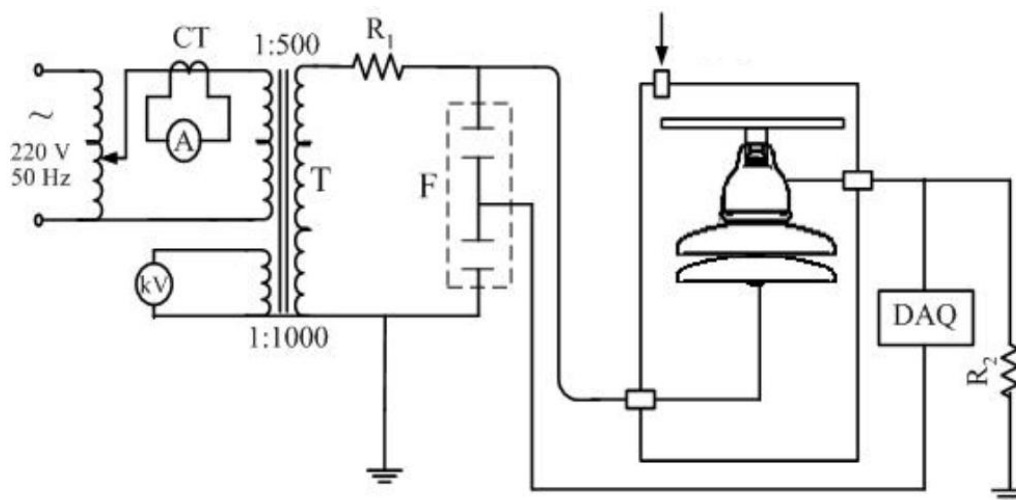
*Chapitre I :*  
*Travaux antérieurs sur la*  
*pollution des isolateurs*

## **I.1.Introduction :**

Dans cette partie, nous présentons les travaux plus récents concernant la pollution des isolateurs ainsi que l'étude des phénomènes accompagnant la phase de contournement. Ces recherches sont pour la plupart basées sur l'étude du courant de fuite qui procure des informations essentielles sur l'état de surface des isolateurs concernés (en porcelaine ou en polymère). L'étude de ce signal est effectuée avec plusieurs méthodes dont l'analyse par les ondelettes ou encore le traitement temps-fréquence par la transformée de Fourier.

### **I.1.Analyse par la méthode graphique récurrente (recurent plot) du signal du courant de fuite pour la surveillance de l'état de l'isolateur:**

B.X Du et al [6] ont introduit une nouvelle méthode d'analyse du courant de fuite pour caractériser l'évolution des décharges partielles avant le phénomène de contournement des isolateurs. Contrairement aux autres techniques d'analyses comme la DWT, la FFT et l'analyse spectrale utilisées pour le diagnostic des isolateurs sous pollution [7,8]. Le dispositif expérimental est donné par la figure I.1.

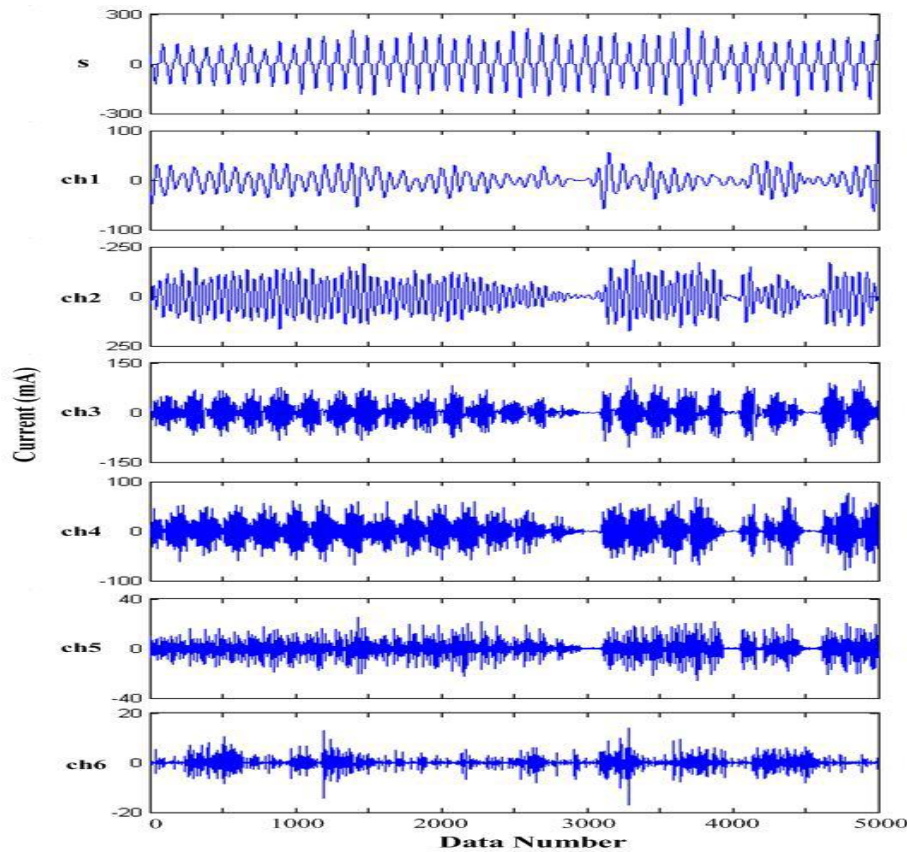


T :transformateur –  $R_1$ :résistance de limitation du courant (100 k $\Omega$ )-  $R_2$ : résistance de mesure –DAQ : système d'acquisition d'information

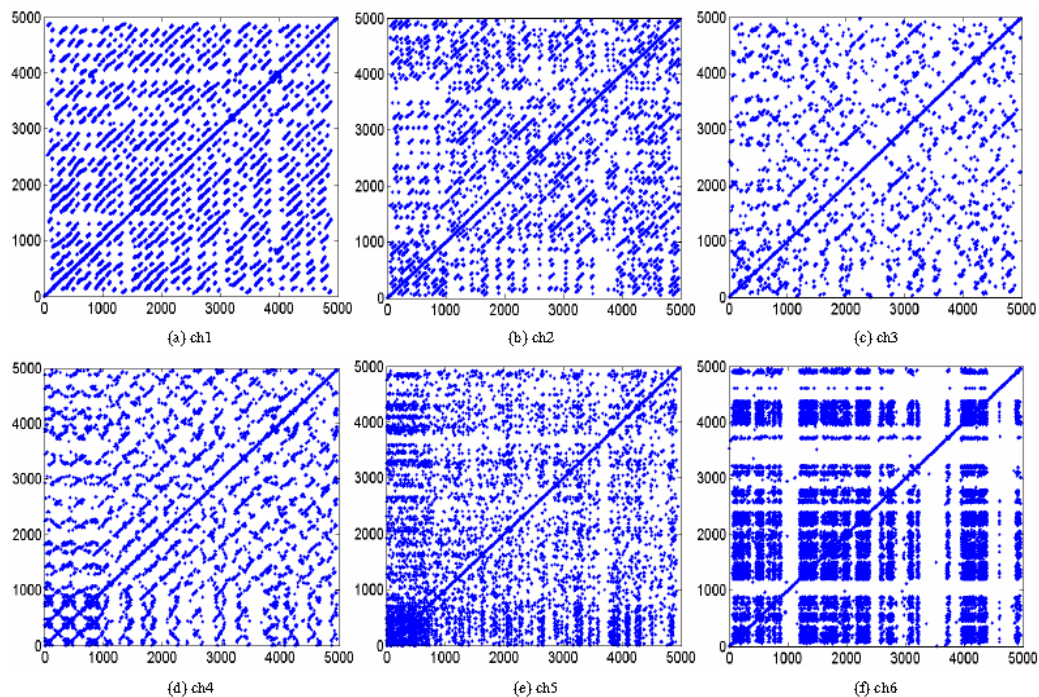
**Figure I.1 :** *Dispositif expérimental*

La RP étudie les caractéristiques non-linéaires du courant de fuite (Répartition non-uniforme des points, apparition de bandes blanches de différentes surfaces) et donne une meilleure perception visuelle pour la surveillance des isolateurs, en se basant sur les informations extraites à partir de la transformée en ondelette du courant de fuite ; celui-ci est décomposé à l'aide d'un développement en séries de fonctions temporelles [9].

Un exemple du courant de fuite juste avant le contournement a été étudié et les composantes décomposées sont montrés sur la figure I.2, le comportement capacitif du courant de fuite est dans la plupart du temps concentré aux niveaux de décomposition *ch1* et *ch2*. Les détails de *ch3* jusqu'à *ch6* montrent clairement des décharges sur la surface de l'isolateur. Basé sur la recherche des caractéristiques de fréquence [10], les composantes de fréquence peuvent être séparées en trois parties : *ch1* jusqu'à *ch3* sont considérés comme les composants de basse fréquence ; *ch4* jusqu'à *ch5* comme composantes à fréquence moyenne et *ch6* comme composante de haute fréquence.



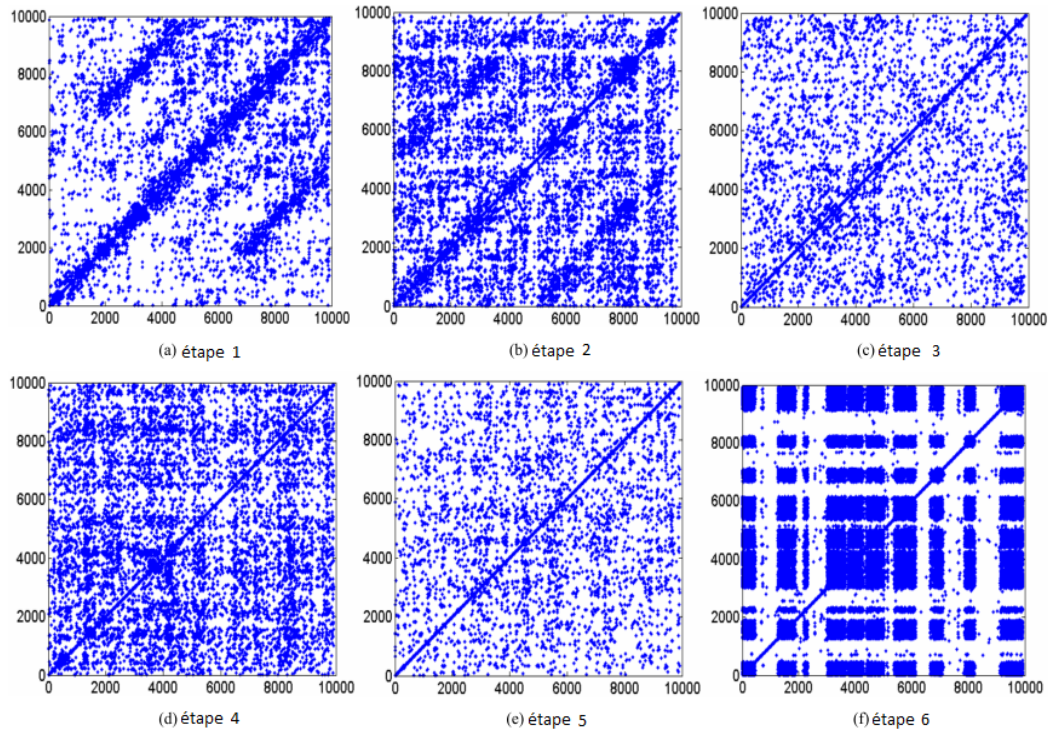
**Figure I.2 :** Fréquences du courant de fuite juste avant l'étincelle de rupture : *s* indique le courant original de fuite ; *ch1* montre le composant à la fréquence de 50 hertz ; *ch2* pour 150 hertz ; *ch3* pour 250 hertz ; le *CH4* pour 350-650 hertz ; *ch5* pour 650-1250 hertz ; *ch6* pour 1250 hertz à 2500 hertz.



**Figure I.3 :** (RP) des composants décomposés du signal de courant de fuite juste avant l'étincelle de contournement : ch1 montre le composant à la fréquence de 50 hertz ; ch2 pour 150 hertz ; ch3 pour 250 hertz ; le CH4 pour 350-650 hertz ; ch5 pour 650-1250 hertz ; ch6 pour 1250 hertz à 2500 hertz.

Les points denses indiquent l'état stationnaire des décharges intenses de la bande sèche. Les segments blancs représentent l'état de transition, qui signifie les différents états de la décharge. L'alternance entre les points denses et les segments blancs démontre les groupes intermittents de décharges de la bande sèche. La portée des points de concentration montre la durée soutenue des décharges. Une telle complexité de la structure de RP indique des activités intenses des décharges et leurs transitions sur la surface de l'isolateur, qui est une indication de décharge de contournement.

Le courant de fuite pendant le processus de décharge de contournement est généralement divisé en plusieurs phases : initiale, intermédiaire, juste avant la décharge de contournement et les étapes de décharge de contournement [11, 8]. A l'étape initiale, les formes d'onde des courants sont toujours sinusoïdales. L'étape intermédiaire est la transition entre l'étape initiale et l'étape décharge de contournement, Après avoir extrait les composants de haute fréquence du courant de fuite, les techniques graphiques récurrentes pendant le processus de contournement sont obtenues comme le montre la figure I.3.



**Figure I.4 :** *RP des composants à haute fréquence pendant le processus de décharge de contournement*

Dans les étapes initiales l'étape 1 et l'étape 2, seulement quelques décharges faibles se sont produites sur la surface de l'isolateur, la figure 4c montre l'aspect des décharge partielles locales, la figure 4d reflète l'aspect des décharges faibles, la figure 4e indique l'apparition du canal des décharges. La figure 4f montre les décharges intenses sans interruption formant un canal de décharge.

## **I.2. Utilisation des composants harmoniques du signal du courant de fuite comme outil de diagnostic pour étudier du vieillissement des isolateurs:**

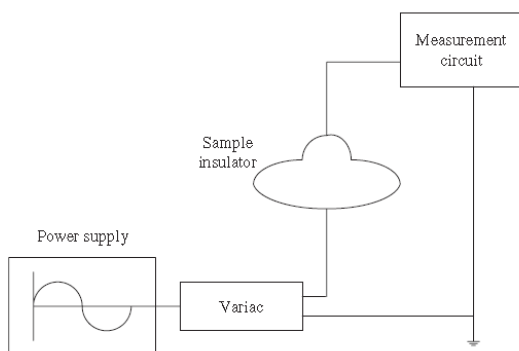
Les recherches réalisées par Hussein Ahmad, M.A. Salam, Lee Yi Ying, N. Bashir [12] présentent une technique de surveillance basée sur l'étude des composants harmoniques pour l'étude du vieillissement des isolateurs en verre trempé. Des théories d'analyse harmonique et les principes de l'analyse statistique sont appliqués dans cette recherche. On examine des isolateurs neufs et âgés à travers les composants harmoniques à une tension d'entrée de  $250V_{eff}$ . Le spectre de puissance obtenu à partir de l'expérience est analysé et les composants harmoniques sont utilisés comme indicateur du vieillissement des isolateurs en verre trempé. Les spectres de puissance d'isolateurs neufs et âgés sont comparés pour obtenir le résultat désiré. Le niveau de confiance pour le résultat obtenu est déterminé en utilisant l'analyse statistique [14]. Ils constatent que les composants harmoniques principaux (fondamental, le troisième, le cinquième et le septième) ont des résultats positifs (c.-à-d. la puissance consommée par ces composants harmoniques augmente avec l'âge de l'isolateur en verre trempé). Les résultats expérimentaux prouvent que le troisième composant harmonique est un indicateur du vieillissement des isolateurs en verre trempé. La première étape de



recherche concerne l'utilisation des composantes harmoniques de basse fréquence du courant de fuite pour étudier le vieillissement des isolateurs en silicone [8].

Le but de cette recherche est d'utiliser la troisième et la cinquième composante harmonique du courant de fuite pour la détection de la bande sèche. Ce travail a conclu que le composant harmonique de basse fréquence du courant de fuite pourrait être le meilleur indicateur sur la présence arc mais aussi du taux de vieillissement.

La deuxième étape de recherche utilisée le composante harmonique de basse fréquence du courant de fuite pour détecter l'arc sur l'isolateur de silicone. L'objectif principal de cette recherche est de trouver une corrélation entre le composant harmonique de basse fréquence du courant de fuite et le vieillissement des tiges en caoutchouc de silicone de HTV.



**Figure I.5 :** *Circuit expérimental équivalent*



**Figure I.6:** *Tension appliquée à la borne d'un isolateur*

Les étapes expérimentales effectuées sont :

- On choisit comme échantillon d'essai quatre isolateurs neufs de verre trempé et 15 isolateurs âgés de verre trempé.
- Le circuit expérimental et l'équipement sont installés sous tension  $240V_{eff}$ .
- L'enregistrement du spectre de puissance de quatre isolateurs neufs.
- L'enregistrement du spectre de puissance de quinze vieux isolateurs.
- Le traitement et l'analyse des cinq groupes des données en utilisant Microsoft Excel pour les neufs et les vieux isolateurs.
- L'analyse statistique a été faite sur toutes les données analysées pour calculer le niveau de confiance pour le résultat de l'expérience.

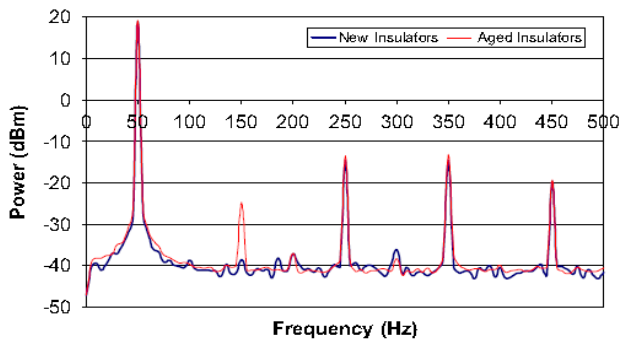


Figure I.7 : Spectre de puissance moyenne

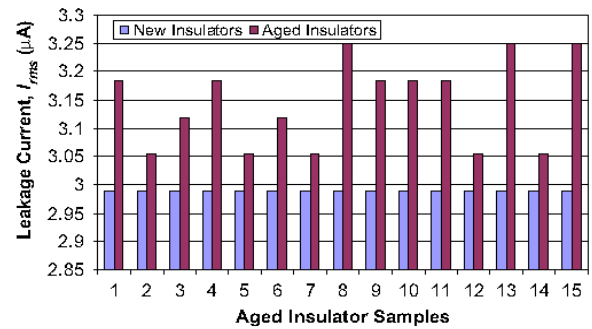


Figure I.8 : Comparaison du courant de fuite

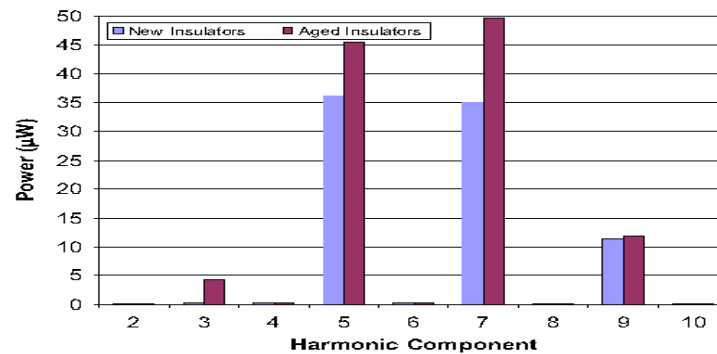


Figure I.9 : Puissance moyenne du composant harmonique

La conclusion finale prévoit que les composants harmoniques permettront de surveiller le comportement du courant de fuite. Cette technique est capable de devenir un outil de diagnostic qui sera exploité par les compagnies d'électricité pour la surveillance de la qualité de l'isolateur en verre trempé.

### **I.3. Investigations sur le courant de fuite et l'angle de phase pour caractérisation d'isolateurs en porcelaine et d'isolateur polymère dans des conditions de pollution :**

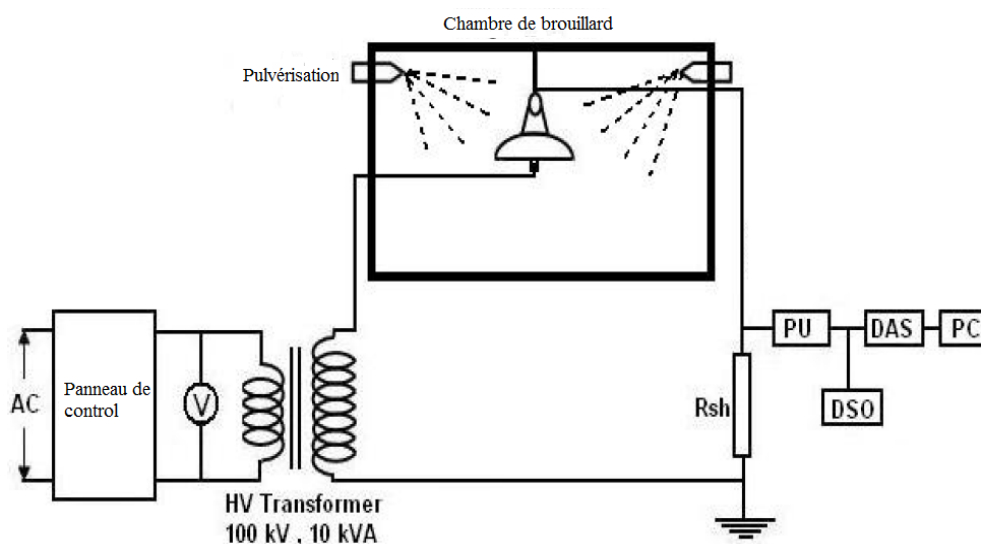
A. Cavallini, G. Montanari et S. Chandrasekar [15] ont pu déterminer à travers leur étude l'analyse des caractéristiques de déphasage et du courant de fuite d'isolateur en porcelaine et de celui en silicone afin de développer un meilleur outil de diagnostic pour identifier la sévérité de pollution des isolateurs extérieurs sous tension alternative. La décomposition du signal en multi résolution (MRSD) ; en utilisant la transformation en ondelettes discrète (DWT), est utilisée pour comprendre les caractéristiques de temps-fréquence du signal de courant de fuite. L'analyse spectrale (FFT) de la transformée de Fourier rapide est adoptée pour calculer les valeurs d'angle de phase des signaux de la tension appliquée et du courant de fuite. Les résultats rapportés sur les isolateurs en silicone et en porcelaine montrent que la sévérité de pollution des isolateurs de type extérieurs pourrait être identifiée par l'analyse du rapport de déformation de DWT, STD-MRA (Standard Déviation d'analyse multi résolution) des signaux de courant de fuite. La méthode Equivalent salt density dépôt (ESDD) a été proposée, mais difficile à contrôler [16, 17]. Gorur et autres [18]

ont proposé une méthodologie basée sur les mesures de la résistance superficielle pour identifier la dégradation des isolateurs non-céramique. En général le matériel en silicone offre une bonne hydrophobicité pendant longtemps.

Le déphasage entre la tension appliquée et le courant de fuite peut être utilisé comme mesure de l'hydrophobicité (surface humidifiée), qui sera un outil pour diagnostiquer la sévérité de pollution et la dégradation superficielle du matériel. W.Que et al [19] ont proposé une méthodologie basée sur des mesures du déphasage tension-courant pour comprendre la dégradation et le vieillissement de la surface des isolateurs en polymère.

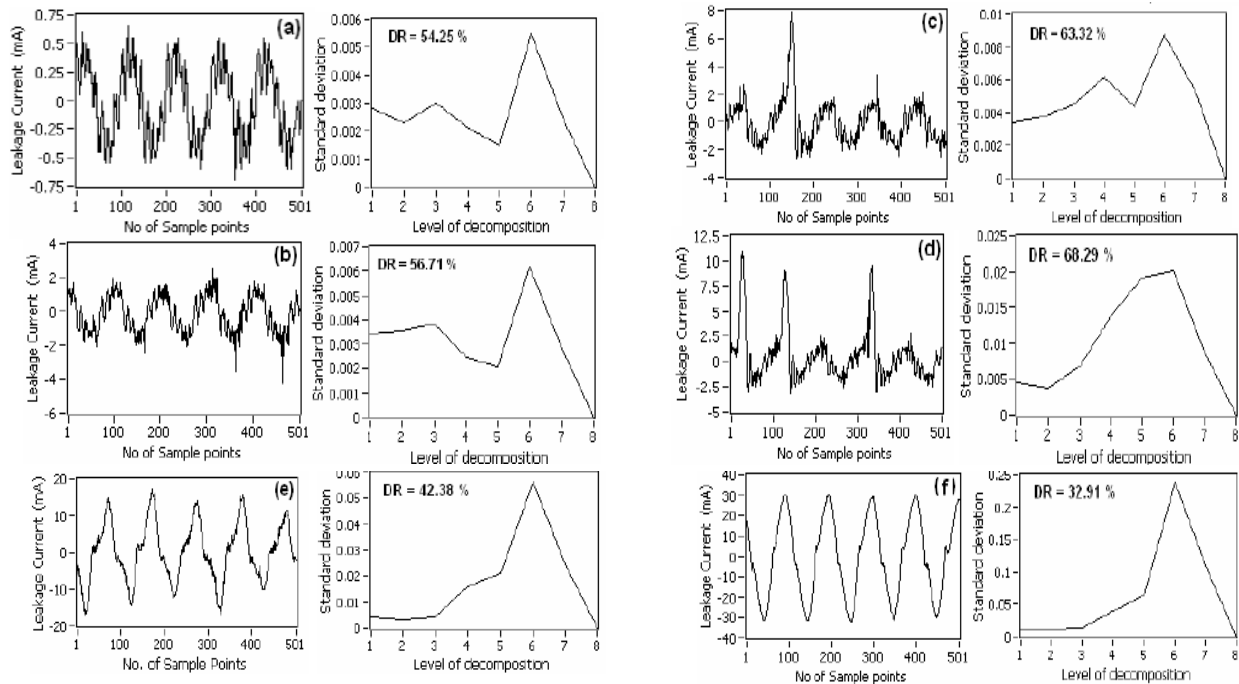
Kumagai et al [22, 23] ont comparé les caractéristiques du courant de fuite et le vieillissement de l'isolateur en porcelaine et en polymère pour des essais de chambre de brouillard contaminé. Ils ont conclu que les variations en temps des charges cumulées étaient utiles pour estimer les conditions des surfaces isolantes en céramique et en polymère. Ugur et al [20] ont proposé une méthodologie pour classifier l'état de surface de la structure d'isolation en utilisant l'approche du réseau neurologique et les informations extraites à partir de l'analyse de FFT du courant de fuite. Il est bien connu, que la transformée de Fourier ne devrait pas être appliquée aux signaux non stationnaires donc on propose la décomposition du signal en multi résolution en utilisant la technique de transformée en ondelettes discrète (DWT) comme un outil efficace pour comprendre les caractéristiques de temps-fréquence des signaux du courants de fuite et pour fournir des données importantes pour identifier l'état de surface de l'isolateur [21].

La technique de la transformée de Fourier rapide (FFT) a été adoptée pour calculer les valeurs du déphasage entre le signal de la tension appliquée et celui du courant de fuite. La technique de la transformée en ondelettes discrète (DWT) est employée pour comprendre la tendance suivie des composants à haute fréquence du signal du courant de fuite. Le dispositif expérimental est donné par la figure I.10.



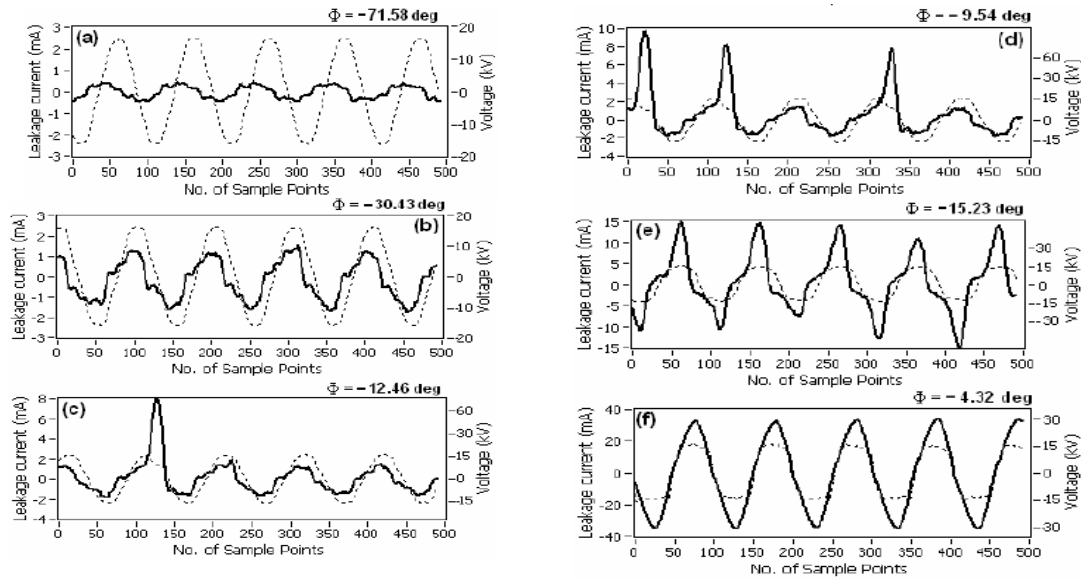
**Figure I.10 :** Circuit d'essai de l'installation expérimentale

La figure I.11a montre le signal du courant de fuite obtenu à l'état sec et propre de la surface de l'isolateur et les autres figures I.11b, 11c, 11d, 11e et 11f montrent les signaux du courant de fuite obtenus à l'intérieur de la chambre de brouillard pour les différents niveaux de pollution utilisés.



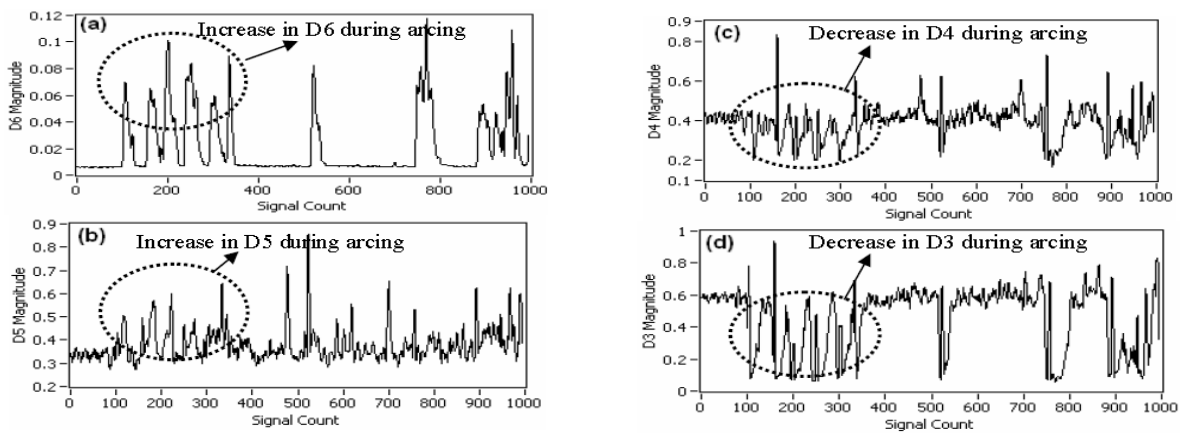
**Figure I.11 :** Modèles typiques du courant de fuite obtenus pendant la pollution expérimente  
(a) surface sèche et propre (b) surface polluée et humide (c, d) décharges de courte durée  
(e, f) contournement

Dans les figures I.11a et I.11b aucune décharge n'apparaît dans ces conditions, on constate que l'importance du composant D5 augmente par rapport aux autres composants à haute fréquence dans la figure I.11d. Ceci indique que quand la fréquence d'apparition des décharges de courte durée augmente, le composant du troisième harmonique augmente [8, 18]. Quand il y a une formation d'arc sur le fond et au dessus de la surface isolante, dû à l'augmentation de la pollution et au taux d'humidité, engendre l'augmentation du composant fondamental du courant de fuite et la réduction des composants à haute fréquence sur les figures I.11e, et 11f. Quand l'isolateur s'approche du contournement, la forme du courant de fuite ressemble presque à la forme sinusoïdale avec une amplitude très élevée la figure I.11f et la plupart des composants à haute fréquence sont éteints dans cette phase. Par conséquent, l'identification de la présence des composants à haute fréquence peut jouer un rôle important afin de prévoir des phénomènes de contournement sur l'isolateur.



**Figure I.12 :** Le déphasage entre la tension appliquée (ligne en pointillée) et le courant de fuite (en trait plein) obtenu pendant les expériences sous pollution (a) surface sèche et propre (b) surface polluée et humide (c, d) décharges de courte durée (e, f) longs arcs.

D'après l'analyse du graphe, on conclut que le déphasage peut distinguer clairement entre l'isolateur sec-propre et l'isolateur humide-pollué.



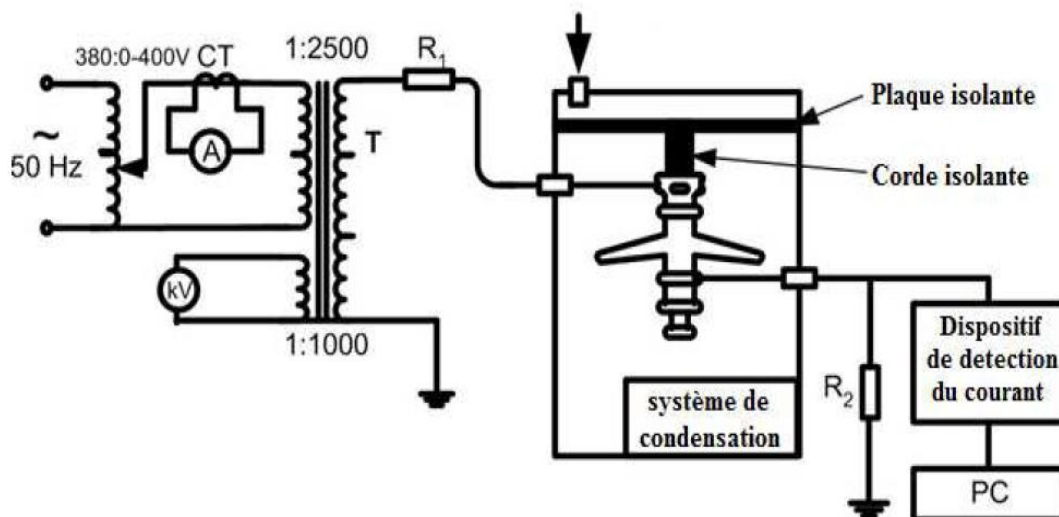
**Figure I.13:** La tendance suivie par les détails de la DWT pendant le contournement

Cette analyse montre que lorsqu'il y a une formation d'arc sur la surface de l'isolateur dû à une pollution élevée et humide, on a une augmentation du détail D6. Pendant le contournement une augmentation est observée au niveau du détail D5, mais en même temps nous observons la réduction significative des détails D4 et D3.

Les coefficients de la DWT dans des conditions pollution prouvent que la sévérité de pollution des surfaces d'isolateurs peut être évaluée en prenant en considération l'évolution des composants des détails DWT au cours du temps.

#### **I.4. Analyse graphique récurrente du signal du courant de fuite afin d'évaluer les performances du contournement des isolateurs composites givrés :**

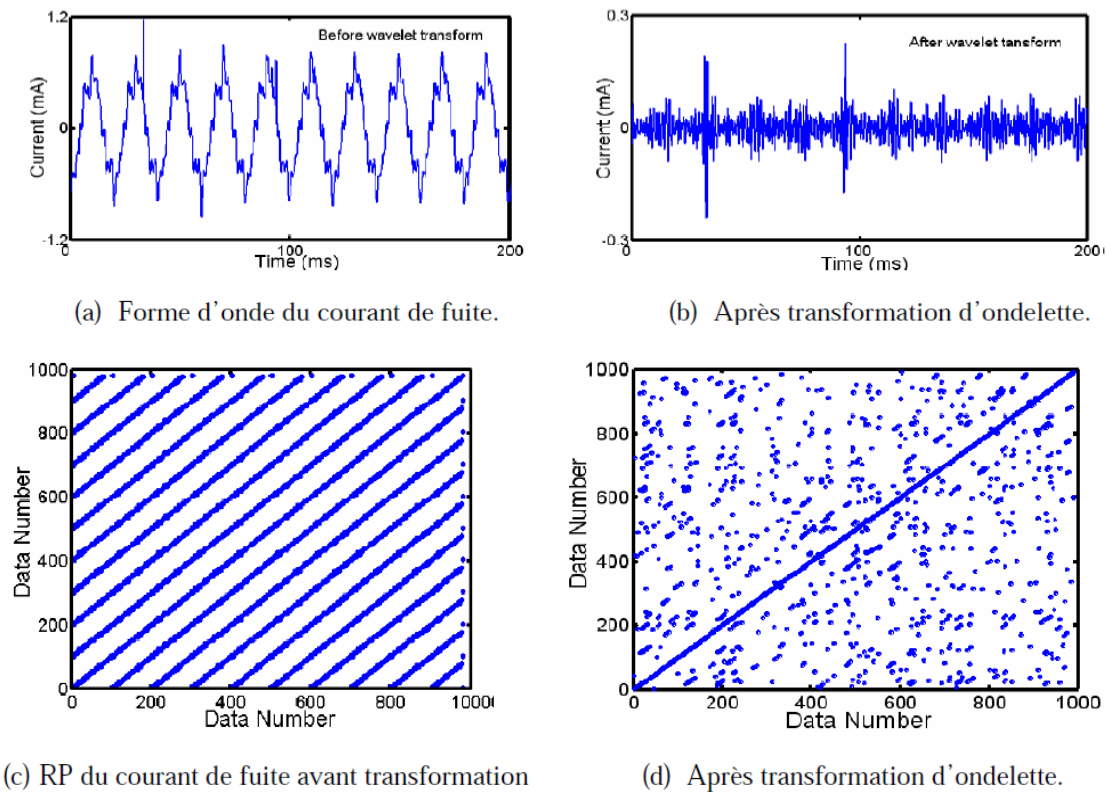
Yong Liu and B. X. Du [25] ont étudié l'influence du givre sur la performance du contournement de l'isolateur composite. Des études en laboratoire ont été réalisées dans une chambre climatique artificielle afin de simuler différentes morphologie rime-glace sur la surface d'isolateur. Le dispositif expérimental est donné par la figure I.14.



T: transformateur de haute tension; R1: Résistance de limitation du courant (100  $\Omega$ );  
R2: Résistance de mesure (1  $\Omega$ )

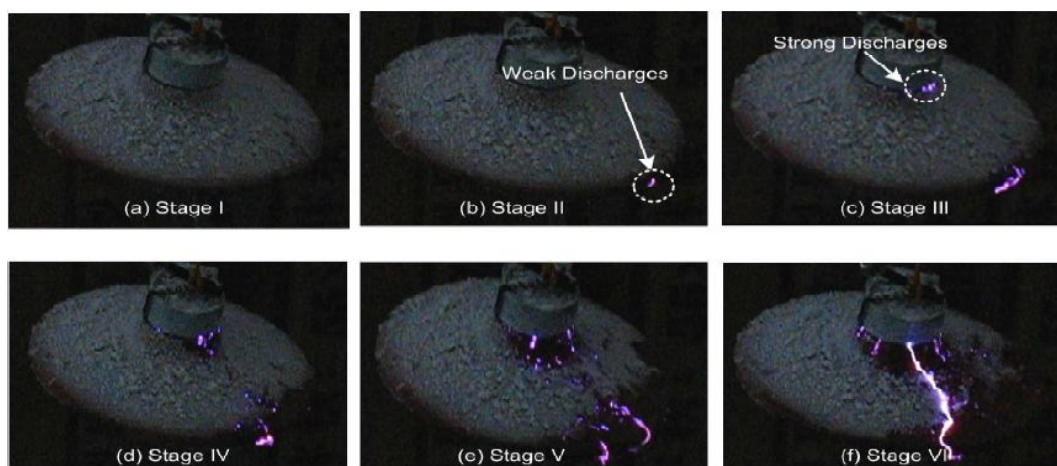
**Figure I.14 :** *Dispositif expérimental*

Une technique graphique récurrente (RP) a été proposée pour analyser les caractéristiques non linéaires du courant de fuite [28]. Cette méthode est très utile pour l'extraction des informations à partir des signaux temporels ainsi que ceux transformés en ondelette dans les hautes fréquences (1.25-2.5 kHz) [29]. La figure I.15 montre un exemple de la RP pour un signal du courant de fuite lors d'un processus de contournement.

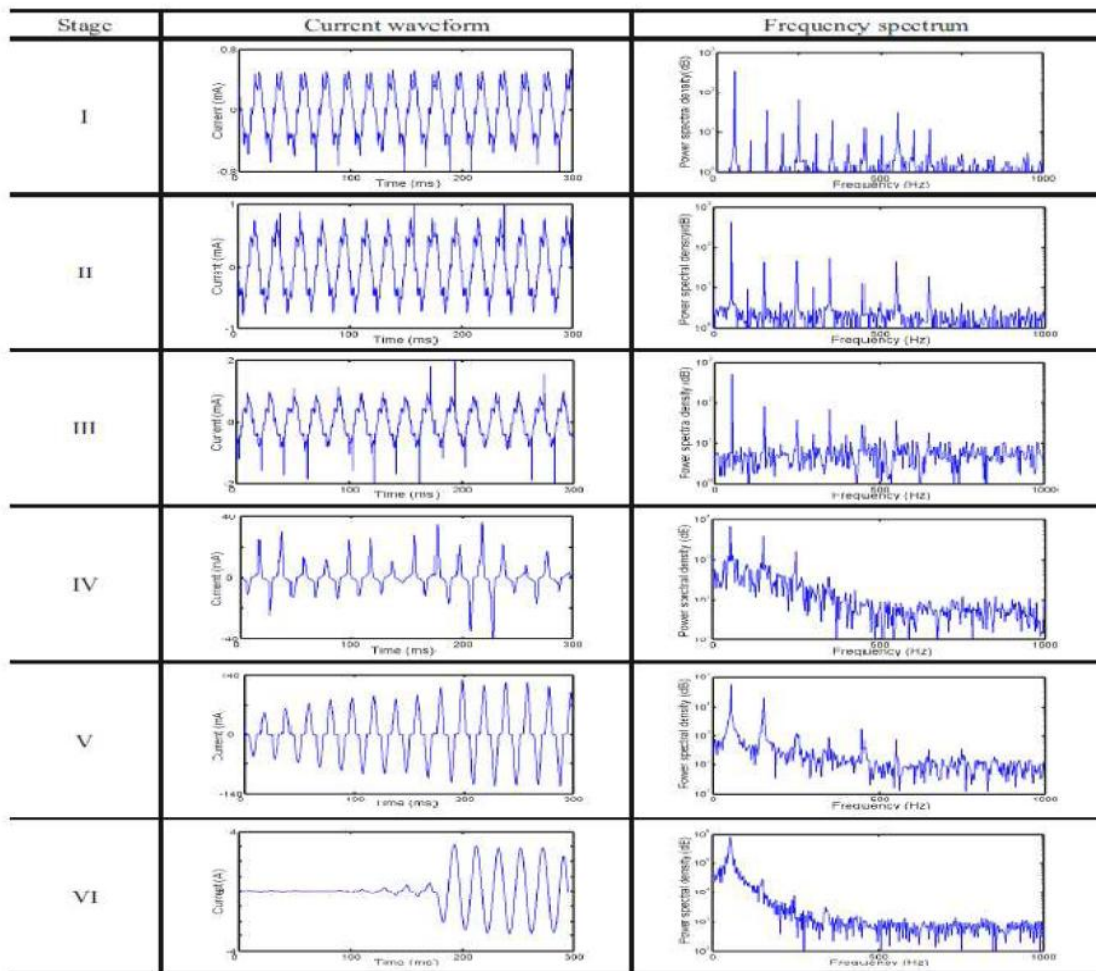


**Figure I.15:** Exemple de la technique graphique récurrente appliquée sur un signal du courant de fuite

Selon l'observation visuelle, le processus de contournement des isolateurs dans les conditions de givre peut être séparé en six étapes. Les phénomènes typiques et les caractéristiques de la décharge à chaque étape sont présentés dans la (figure I.16). Les formes d'ondes et leurs caractéristiques de fréquences sont présentées sur la (figure I.17).



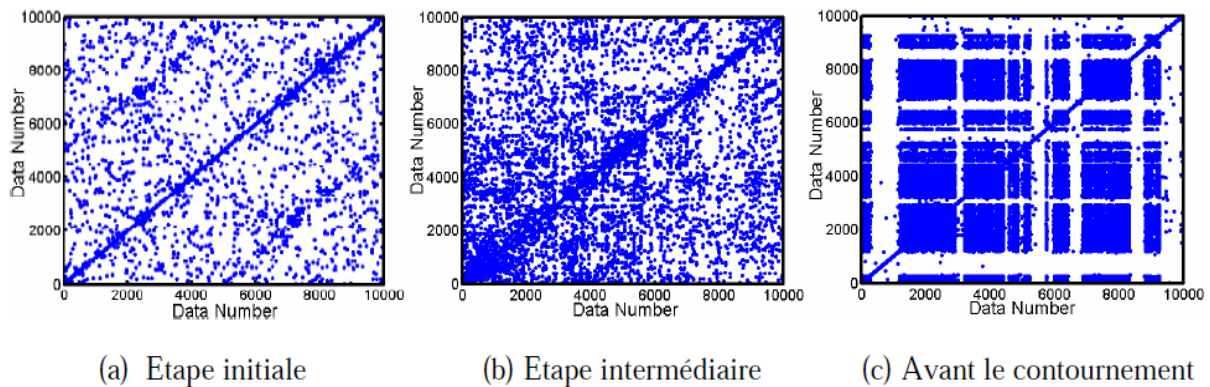
**Figure I.16 :** Le processus de contournement



**Figure I.17 :** *Forme d'onde du signal du courant de fuite et son spectre*

- Tel que décrivent dans les figures I.16 et I.17, le processus de contournement est associé à des décharges de surface qui sont reflétées par les distorsions de l'onde de courant.
- Le courant de fuite décrit dans la figure I.17 est divisé en trois étapes: les phases I et II comme étapes initiales, la phase III décrit l'étape intermédiaire et les phases IV et V représentent la scène avant le contournement total, et la phase VI montre le contournement.
- Après avoir extrait les composants de haute fréquence du courant de fuite, les techniques graphiques récurrentes pendant le processus de contournement sont obtenues comme le montre la (figure I.18).





**Figure I.18 :** La technique graphique récurrente des composants de haute fréquence.

L'évaluation visuelle des structures indique la caractéristique non-linéaire du courant de fuite. Il se trouve qu'il ya deux propriétés différentes: l'une est caractérisée par des points formant des lignes, qui sont parallèles à la principale diagonale, comme illustré dans la figure (I.18.a) et (I.18.b), l'autre se caractérise par l'alternance des points de concentration récurrentes et segments spatiaux blancs, comme le montre la figure I.18.c. Le nombre croissant de points récurrents peuvent refléter le changement dans l'activité des décharges sur la surface de l'isolateur. Les points denses indiquent l'état stationnaire des décharges intenses dans les bandes sèches, le segment vierge indique l'état de transition.

### **I.5. Comprendre les caractéristiques hydrophobes des nano composites en utilisant les ondelette et la technique fractale :**

Les polymères nano composites à haute performance sont apparus comme une nouvelle classe des matériaux isolants les exigences des applications dans tous les appareils électriques utilisés au niveau du réseau électrique [30,31]. Le grand problème dans un matériau isolant est l'absorption d'eau ou d'humidité mènent à l'augmentation du courant de fuite lors du fonctionnement qui soulève la température du matériel d'isolation. Par conséquent, il est essentiel de comprendre les variations des propriétés de surface du matériau nano composite due à la migration de l'eau dans le corps du matériau. Récemment, une résine avec l'argile modifiée organiquement ont été utilisées dans des applications importantes [32-33]. Les propriétés du matériel nano composite ont été analysés par des études de Angle X-ray diffraction (WAXD) et par des études de TEM.

Les forces atomiques microscopiques (AFM) ont été analysées à l'aide de la technique des ondelettes via la décomposition Multi-résolution du signal (MRSD) et par des calculs des dimensions fractales, pour comprendre l'ampleur de la dégradation de la surface du matériau due au vieillissement par l'absorption de l'eau. La rugosité de la surface a été caractérisé par une technique fractale mesurée par un nombre non dimensionnel appelé la dimension fractale [34]. Il est convenu et prouvé par d'autres chercheurs que la rugosité de surface a une caractéristique fractale [35]. Dans le travail actuel, la dimension fractale de la surface a été calculée en prenant une seule ligne 1D modèle à partir du profil du modèle de l'AFM. Le modèle fractal de l'image 1-D décrite par le spectre de puissance, satisfait statistiquement la relation suivante [36] :

$$P(\omega) = P_0 \omega^{(2D-5)} \quad \text{I.1}$$

Où  $\omega$  est la fréquence,  $P_0$  est une constante et  $D$  est la dimension fractale du modèle,  $\omega_t$  et le taux d'argile, le spectre de puissance de chaque niveau de décomposition peut être écrit comme suit

$$P_k(\omega) = P(\omega) \cdot |\Psi(2^{-k} \omega)|^2 \quad \text{I.2}$$

Où  $\psi$  est la transformée de Fourier de la fonction d'ondelettes.

L'équation de bruit dans le signal.

$$\sigma_k^2 = \frac{2^{-k}}{2\pi} \int_{-2^k}^{+2^k} P_k(\omega) d\omega \quad \text{I.3}$$

En combinant l'équation, on dérive par rapport à la dimension fractale.

$$\sigma_k^2 = 2^{4-2D} \sigma_{k+1}^2 \quad \text{I.4}$$

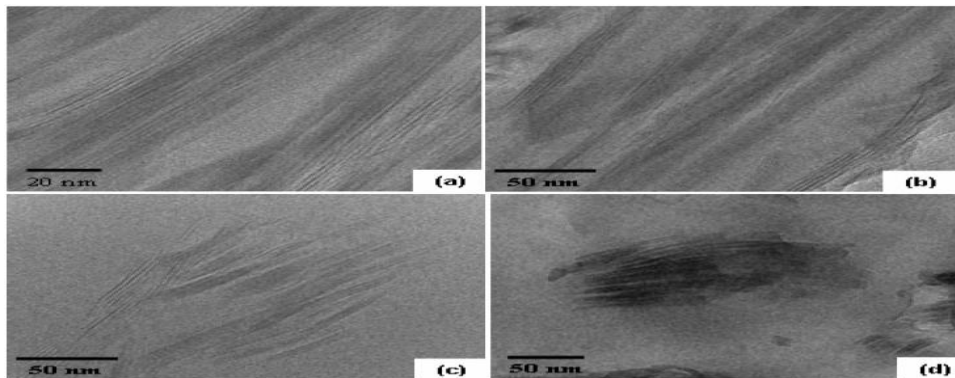
Réécrire l'équation mentionnée au-dessus, on obtient :

$$\sigma_k^2 = 2^{4-2Dk} \quad \text{I.5}$$

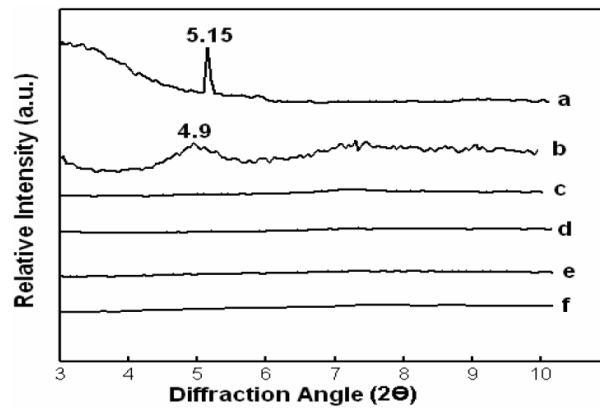
En appliquant le logarithme de l'équation ci-dessus aux deux membres, nous aurons :

$$\log_2 \sigma_k^2 = \log_2 \sigma - (4 - 2D)k \quad \text{I.6}$$

En traçant l'équation sous forme graphique pour différents niveaux de décomposition pour s'adapter à une ligne droite et la pente de la ligne droite donne la dimension fractale ( $D$ ).



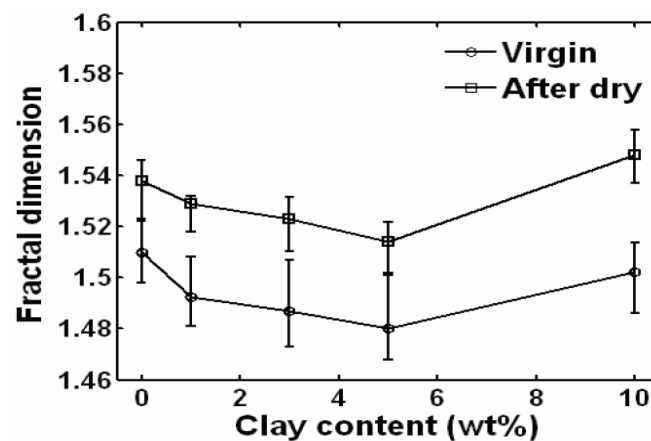
**Figure I.18** : Modèles de TEM des nano composites. (a) 1% argile, (b) 3% d'argile, (c) 5% d'argile, (d) 10% d'argile.



**Figure I.19** : Modèle de WAXD du nano composite. (a) Argil, (b) 10Wt. %, (c) 5Wt. %, (d) 3wt. %, (e) wt. %, (f) époxy.

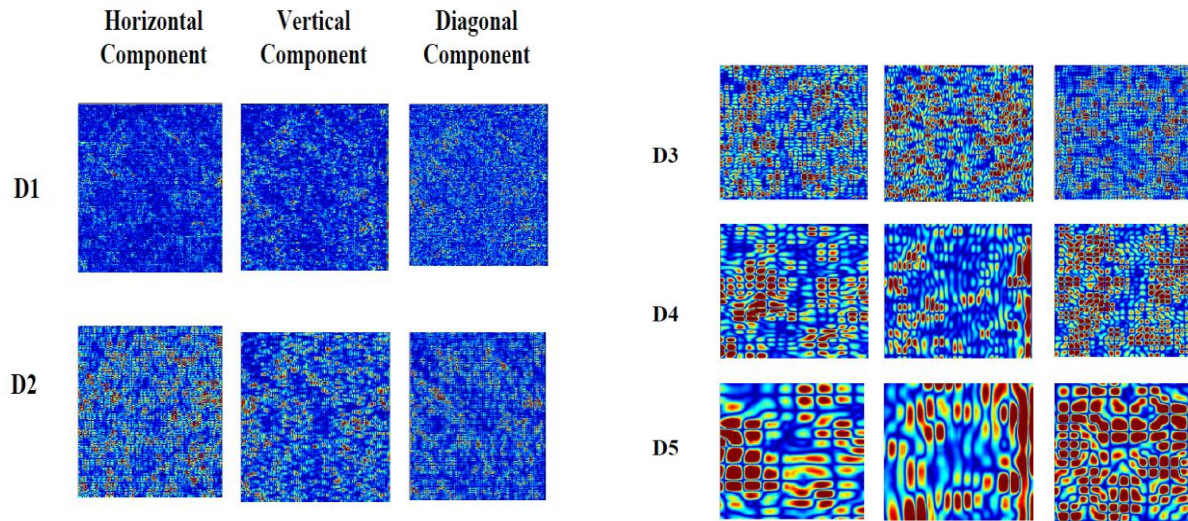
Les lignes épaisses noires sont les sections transversales des couches d'argile grises et les blancs sont les parties du matériau de résine époxy. On constate que les échantillons préparés sont intercalés avec exfoliation partielle (figure 18 a, b, c). A partir de la figure.2d, on se rend compte que, quand le pourcentage en poids d'argile augmente jusqu'à 10%, l'agglomération se produit. Les études de WAXD n'ont pas montré à aucune crête ce qui indiquerait l'exfoliation partielle. Ceci peut être dû à la petite taille des particules intercalées. Comme le pourcentage de poids est augmenté au-dessus de 5%, les diagrammes de diffraction montrent la formation des nano composites intercalés. Wang et al [37], obtiennent des résultats similaires.

La diffusion des molécules d'eau dans le corps de l'époxy résine dépend de deux facteurs importants [38] : (a) la disponibilité appropriée de la taille des trous moléculaire dans le polymère. (b) la force d'attraction entre la molécule pénétrant et le polymère. La rugosité de la surface est un bon indicateur du processus de vieillissement [39].

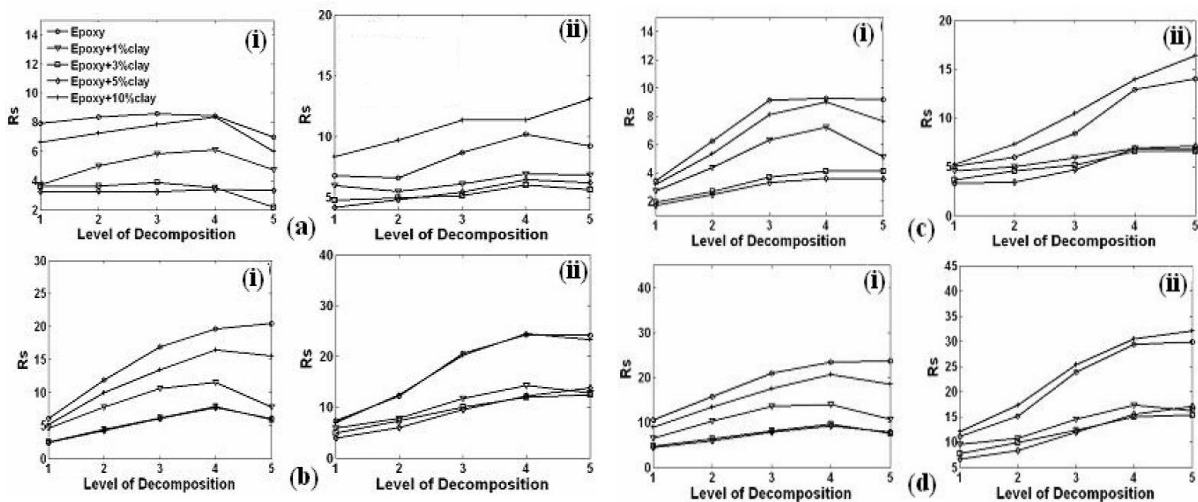


**Figure I.20** : caractéristique de dimension fractale de la surface époxy nano composite.

X. Wang et al [40] appliquent la technique fractale pour prédire l'état de surface du matériau isolant et concluaient que la rugosité de la surface est directement liée à la dimension fractale.



**Figure I.21** : Modèle d'un signal 2D typique et la représentation de la décomposition en Multi-Résolution de l'AFM de 3% en poids époxy nano composites



**Figure I.22** : Caractéristique de la variation de la rugosité de la surface calculée à partir des détails de l'image par l'analyse MRSD (a) la composante verticale (b) la composante horizontale (c) la composante diagonale (d) La somme de toutes les composantes a, b et c.

On a observé que le facteur de rugosité calculé par le composant détail horizontal figure I.22b est élevé par rapport au composant détail vertical et diagonale mesurés les figures I.22a et I.22c, quel que soit le pourcentage d'argile inclus dans les nano composites époxy. La caractéristique du changement de la rugosité de la surface du matériau due au vieillissement peut être clairement observée à partir de la figure.22d. On conçoit que jusqu'à 5% en poids

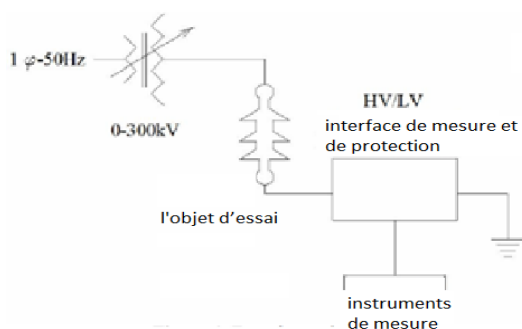
d'argile dans les nano composites époxy, la rugosité de la surface est inférieure à celle de la résine époxy pure. Le modèle TEM et les études WAXD indiquent que les structures intercalées sont formées lorsque le pourcentage d'argile contenu est augmenté au-delà de 5% en poids de résine époxy.

### **I.6.Détermination de la probabilité de l'occurrence du contournement des isolateurs en utilisant les composantes harmoniques du courant de fuite.**

Le contournement des isolateurs induits par la contamination a été étudié par beaucoup de chercheurs récemment [61]. L'optimisation d'exécutions du programme est associée à la substitution et le lavage des isolateurs. Entre autre, CBMS (système de contrôle) est considéré comme une approche importante pour les utilisateurs. En utilisant ce système et en mesurant les paramètres du courant de fuite et l'humidité ambiante, et en les comparant aux critères prédéterminés, nous déterminons des critères appropriés importants pour découvrir l'état des isolateurs, aussi rapidement que possible. Diverses investigations ont été faites pour développer les critères du système [40-41]. Quelques critères présentés se basent sur la mesure des différents paramètres et les comparer aux quantités prédéterminées. En Floride, un système de contrôle à distance a été conçu pour mesurer la quantité de contamination, qui pourrait surveiller le taux de sévérité en utilisant plusieurs capteurs.

Le capteur d'eau dans le système et également utilisé pour mesurer la quantité de condensation d'eau de la couche de contamination sur la surface de l'isolateur. Enfin le système détermine l'état de l'isolateur en comparant les paramètres mesurés pour prédéterminer les quantités et générer les alarmes nécessaires [40].

Les THD (la distorsion harmonique totale) de la forme d'onde du courant de fuite et de ses seuils dans différentes contaminations ont été utilisées comme outil pour le diagnostic de l'isolateur [42]. Le niveau du fondamental et les composantes harmoniques de basse fréquence du courant de fuite sont considérés comme une signature pour détecter les dommages de surface d'isolateurs [43, 44, 45]. Un système basé sur le réseau de neurone a été également développé dans ces études [46]. Dans ce document, les auteurs proposent un nouveau critère basé sur le taux de distorsion des composantes harmoniques N° 5 et 3. Les essais ont été réalisés à l'aide de l'installation suivante (I.23) et (I.24).



**Figure I.24 :** L'installation Expérimentale



**Figure I.23 :** Un échantillon d'isolateur des essais sous le brouillard

Afin de mesurer les composantes harmoniques du courant de fuite des isolateurs avec différents profils et niveaux de contamination, chaque isolateur contaminé a été testé à l'état sec (humidité ambiante) et humide (de brouillard propre).

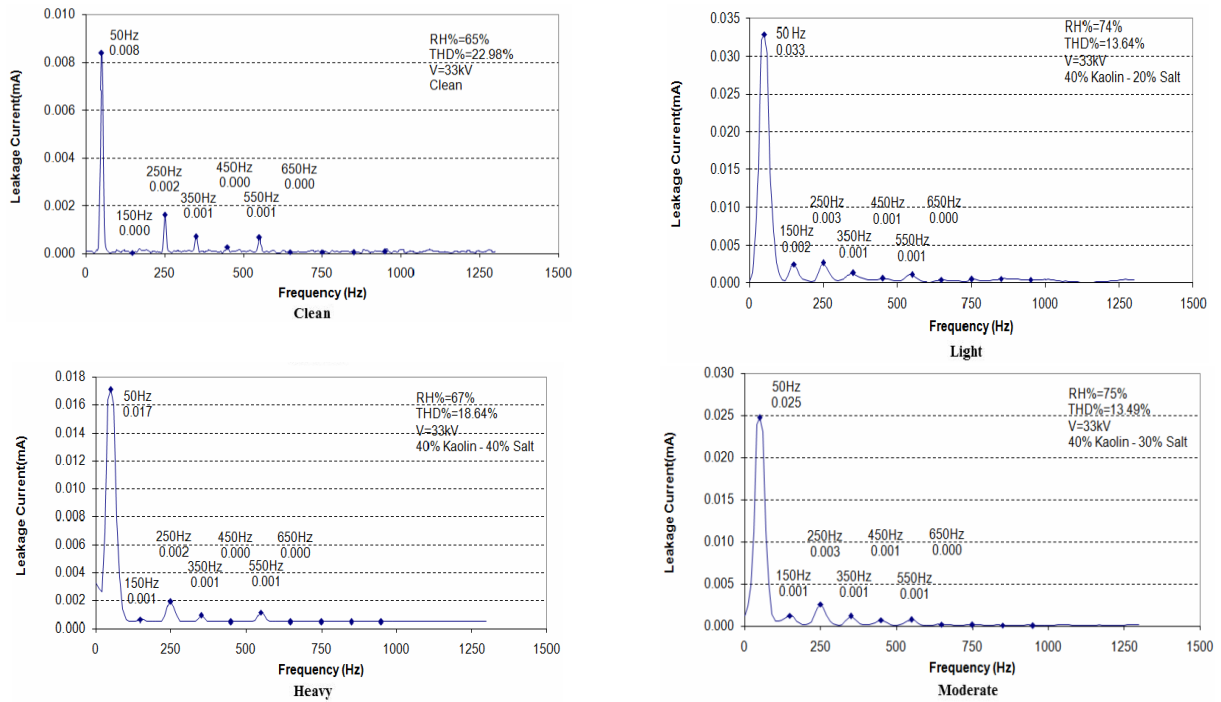


Figure I.25 : Spectre du courant de fuite FFT pour l'isolateur No.1 avec différents niveaux de contamination dans l'humidité ambiante.

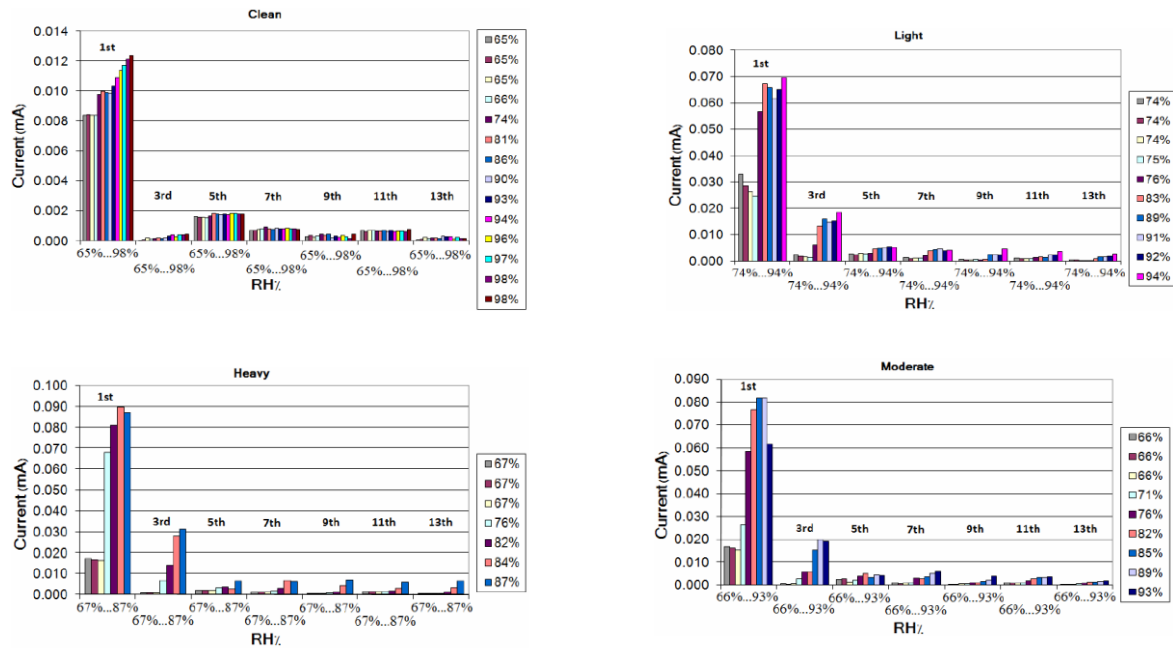


Figure I.26 : Variations des composantes harmoniques pour les différents niveaux de contamination et les différents taux d'humidités pour l'isolateur No.1.

Dans les conditions propres, aucun contournement ne s'est produit pendant les essais. Il est également montré dans les conditions propres que la valeur du composant harmonique du fondamental augmente raisonnablement avec l'augmentation de l'humidité, mais cette variation n'est pas comme pour d'autres harmoniques. Il y a deux incréments pointus du courant de fuite (composant principal) autour de 75% et de 90% d'humidité.

Dans le niveau de contamination léger, le fondamental commence à diminuer, mais quand le brouillard était appliqué, il y a augmentation graduelle de celui-ci. Après un moment, il commence à diminuer et au début de la saturation d'humidité, il augmente de nouveau.

### **I.7. Distribution du courant de fuite sur la surface d'isolateurs en polymère polluée artificiellement:**

Yong Zhou et al [47] ont exploité les informations procurées par le signal du courant de fuite pour caractériser l'état de surface d'un isolateur SIR de type EVA et pour comparer les résultats obtenus avec ceux d'un modèle proposé. Le diagnostic à partir du courant de fuite a été pris en considération suite à l'intérêt porté par l'équipe sur les propriétés hydrophobes du matériau [48].

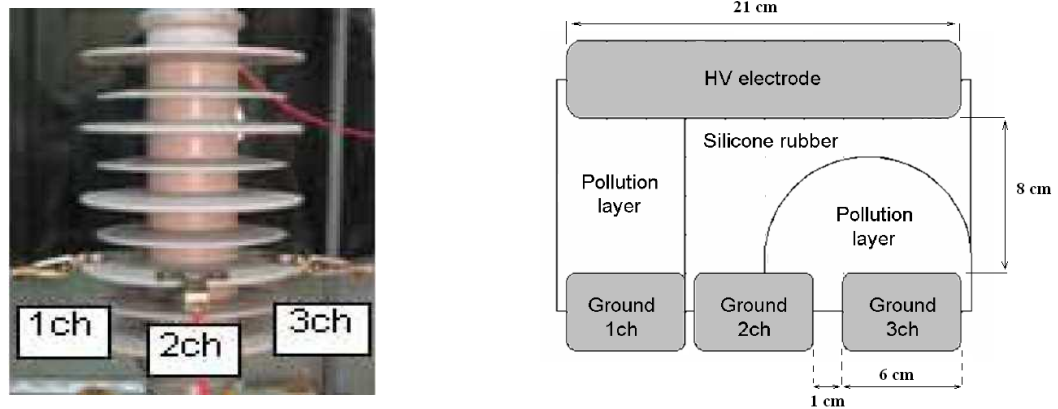
Cette étude a également tenu compte du comportement des décharges électriques qui ont lieu à la surface des polymères :

- Les arcs locaux qui surviennent dans les bandes sèches.
- Les décharges partielles qui sont provoquées par la triple jonction entre les gouttelettes d'eau, le polymère et l'air à cause de la différence de la permittivité de chacun d'entre eux [49].

Le mode expérimental a pris en considération la pollution par humidification vu qu'elle est largement utilisée dans les recherches pour l'étude des performances électriques des polymères sous haute tension [50-51].

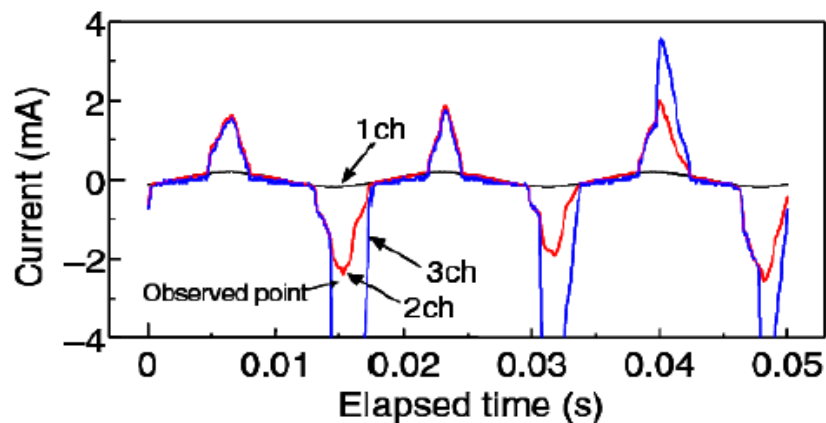
La pollution des isolateurs réels et leur modèle (figure I.5) est faite avec une solution de 3l d'eau distillée qui contient 12 g/l de NaCl ; les mesures effectuées avec l'ESDD indiquent 0.03 mg/cm<sup>2</sup> pour cette solution. La pollution des surfaces est effectuée par pulvérisation et la tension appliquée est de 4.8 kV et 13.3 kV respectivement pour le modèle et l'isolateur réel.

Une camera sert à suivre le phénomène de décharge et un oscilloscope relié à un PC permet l'acquisition des signaux du courant de fuite. L'évaluation du champ électrique en utilisant la méthode des éléments finis, indique les zones de fortes intensités.



**Figure I.27:** *Isolateur réel (à gauche) et son modèle (à droite).*

Les résultats obtenus lors de l'analyse des courants 1ch, 2ch et 3ch montrent que 1ch a une forme parfaitement sinusoïdale due à l'uniformité de la couche de pollution (caractère parfaitement résistif) ; 2ch et 3ch ont une forme distordue due d'une part à l'activité intense des décharges et d'autre part à la non-uniformité de la couche de pollution (figure I.27). Ces décharges sont le résultat d'une valeur du champ électrique qui dépasse celle de la rigidité diélectrique du système ainsi formé.

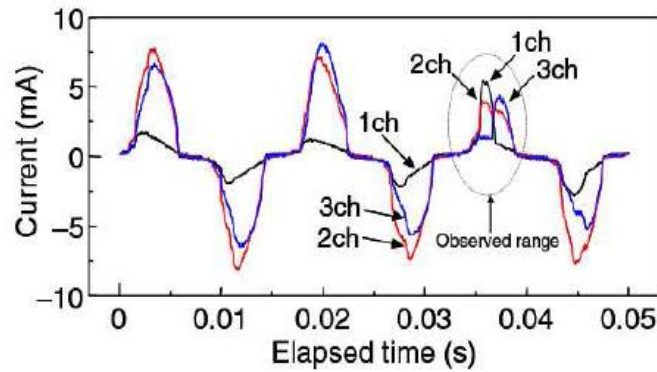


**Figure I.28 :** *Formes d'ondes des courants de fuite du modèle.*

Pour l'isolateur de type EVA, les trois signaux du courant de fuite ont une densité non-uniforme (figure I.28); ce phénomène est le résultat de l'irrégularité du profil de l'isolateur. L'apparition d'arcs locaux est causée par l'assèchement de certaines zones, dû à cette densité de courant non-uniforme. La surveillance par caméra de l'activité des décharges a permis de détecter la position de celles-ci en fonction de la variation d'amplitude de 1ch, 2ch et 3ch :

- Une décharge apparaît à 37 ms sur 1ch.
- Le déplacement de cette décharge de 1ch à 2ch à 38ms est caractérisé par une augmentation de l'amplitude des courants 1ch et 2ch.
- L'apparition de la décharge entre 2ch et 3ch après 1ms augmente l'amplitude du courant 3ch.





**Figure I.29** : formes d'ondes des courants de fuite de l'isolateur réel.

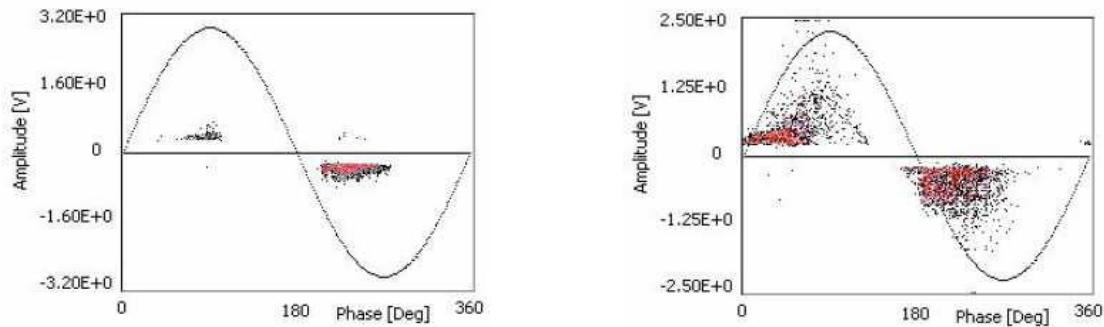
Cette étude permet de conclure que le courant de fuite peut être utilisé comme moyen de détection des positions des décharges partielles et qu'il identifie l'état de surface de l'isolateur, compte tenu de l'irrégularité de son profil.

### **I.8. Etude de la pollution des isolateurs en céramique par la détection des décharges partielles :**

En Italie, A. Cavallini et al [50] analysent la corrélation qui peut exister entre les décharges partielles et le niveau de pollution des isolateurs en céramique. Pour cela, ils préfèrent une expertise des données du courant de fuite pour la détection des décharges partielles que d'appliquer les méthodes classiques basées sur l'ESDD, compte tenu de la simplicité d'étude de l'onde du courant [51,52].

L'expérience est faite sur des isolateurs en céramique « capot et tige » en commençant par tester un seul (longueur axiale : 50mm, distance de fuite : 350mm) puis sur une chaîne de trois isolateurs (longueur axiale : 380 mm, distance de fuite : 350 mm). Les essais sont faits pour différentes concentrations de la solution polluante (de 20 g/l jusqu'à 100 g/l de NaCl) avec une humidification par pulvérisation. La détection des décharges partielles est faite avec un HFCT. Des caméras infra-rouge et ultra-violettes suivent l'évolution des décharges et de la température sur la surface des isolateurs.

Pour l'isolateur seul, la tension d'apparition des décharges partielles diminue avec l'augmentation de la concentration de la solution polluante ; ces décharges se propagent entre l'électrode haute tension et la surface intérieure de l'isolateur, puis sur le côté extérieur de l'isolateur à cause de la forte densité du courant de fuite qui augmente la température sur la surface intérieure, menant à l'assèchement local de plusieurs zones. L'amplitude des DP augmente proportionnellement avec la tension appliquée et le niveau de pollution (figure I.21) ; ceci est concrétisé par l'élongation progressive des DP en fonction des zones sèches.



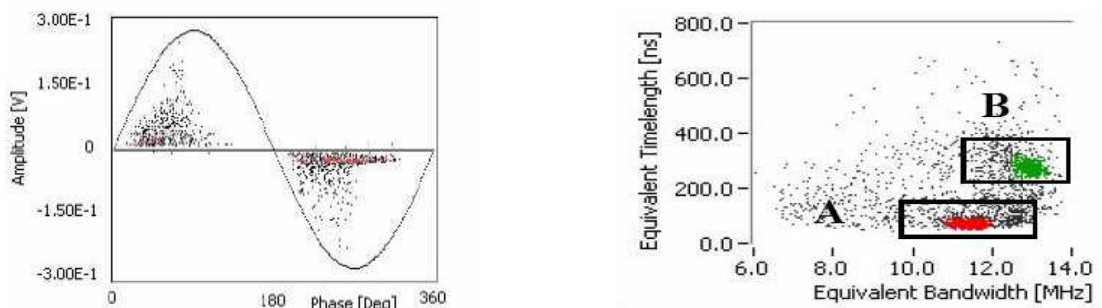
**Figure I.30 :** Evolution de l'amplitude des décharges partielles pour l'état sec et Propre (à gauche) et pour l'état pollué (à droite).

Pour la chaîne d'isolateurs, les DP apparaissent uniquement sur la périphérie des isolateurs en forme de bandes ; le temps d'apparition des DP est pratiquement le même pour des niveaux de tension très élevés, ce qui signifie la charge d'espace cédée par la décharge précédente n'agit pas sur le comportement stochastique des DP.

Les auteurs présentent également un algorithme pour caractériser la sévérité de pollution à partir de l'analyse du déphasage entre la tension appliquée et le courant de fuite moyennant la fonction d'appartenance (Membership function).

$$\begin{aligned} & \text{IF}(\Delta\Phi^+ < 100) \text{ AND} \\ & (\Phi_{mean}^+ > 45) \text{ AND} (\Phi_{mean}^- > 225) \text{ AND} \\ & (-0.975 < \text{ND} < 0.975) \text{ AND} \\ & (\beta^+ < 3) \text{ AND} (\beta^- < 3) \\ & \text{Then Conductive Pollution.} \end{aligned}$$

L'algorithme permet de calculer le DOF après estimation de B et  $\Delta\Phi$  ; il peut être proche de 0 pour un faible niveau de pollution ou proche de 1 pour un niveau de pollution critique. Enfin, les auteurs soutiennent qu'il serait préférable de combiner les données du courant de fuite et celles du HFCT pour réduire les erreurs d'estimation des DP car certaines sont issues des détecteurs qui ont une bande passante de quelques kilohertz ; cette gamme affecte la résolution en temps lorsque les DP ont lieu, menant à une superposition de certains signaux [52].



**Figure I.31 :** Séparation entre les DP parasites causées par l'effet de couronne et les DP utiles du signal HFCT.

## **I.9. Conclusion :**

Evaluer en terme de risque, la nécessité de surveiller l'état de surface des isolateurs en service, est d'une importance capitale. Les techniques actuelles les plus performantes pour évaluer le degré de sévérité de la pollution des isolateurs sont fondées pratiquement sur les méthodes de traitement du signal.

La synthèse bibliographique des différents travaux antérieurs effectués dans le présent chapitre nous permet de comprendre d'une manière approfondie les mécanismes assez conduisant au contournement des isolateurs et l'application des méthodes de traitement de signal dans le domaine de la haute tension spécialement le phénomène de la pollution des isolateurs.

Pour les méthodes les plus usuelles, nous citons la transformée de Fourier et les transformées en ondelettes. L'application de ces méthodes se fait généralement sur le signal du courant de fuite ainsi que sur celui de la tension appliquée.

Enfin, les signaux constituent un outil très efficace et suffisant pour prédire le comportement de l'isolateur en service.

*Chapitre II :*  
*Théories du traitement*  
*du Signal*

## **Introduction :**

Les enregistrements du signal du courant de fuite montrent que son allure varie clairement en fonction de plusieurs paramètres, comme la tension appliquée ou la disposition de la couche de pollution de la surface isolante. Pour comprendre cette variation, il est primordial de connaître les concepts fondamentaux du traitement de signal à savoir, l'échantillonnage, la transformée de Fourier, ainsi que l'énergie des harmoniques du courant de fuite et de la tension appliquée.

On appelle « traitement du signal », toutes les méthodes et les techniques qui permettent l'extraction de l'information à partir d'un signal quelconque.

### **II.1. Définition d'un signal [53]:**

Un signal est un support d'information modélisé par un objet mathématique qui représente des variations d'une grandeur physique en fonction d'une variable (le temps par exemple). Cet objet peut être continu donc disponible à tout instant, ou discret à condition qu'il soit observable à des instants particulièrement espacés.

On appelle « signal utile » le signal qui nous intéresse (l'objet de notre application), et on appelle « bruit » tout signal qui perturbe notre signal utile.

$$S(t) = x(t) + b(t) \quad (\text{II.1})$$

$S(t)$  : signal reçu

$x(t)$  : signal intéressant

$b(t)$  : bruit

### **II.2. Energie et puissance des signaux [53]:**

#### **II.2.1. Energie totale d'un signal :**

Dans le cas d'un signal continu :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt \quad (\text{II.2})$$

Dans le cas d'un signal discret :

$$E = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} |x(t)|^2 \quad (\text{II.3})$$

#### **II.2.2. Puissance moyenne d'un signal :**

Dans le cas d'un signal continu :

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} |x(t)|^2 dt \quad (\text{II.4})$$

Dans le cas d'un signal discret :

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^{+N} |x(k)|^2 \quad (\text{II.5})$$

### II.3. Les type des signaux [53, 54]:

Avant d'entamer un traitement quelconque de signal, il est primordial de connaître sa nature pour choisir la méthode analysante adéquate. L'organigramme de la figure ci-dessous nous montre les différents types de signaux qui peuvent être rencontrés.

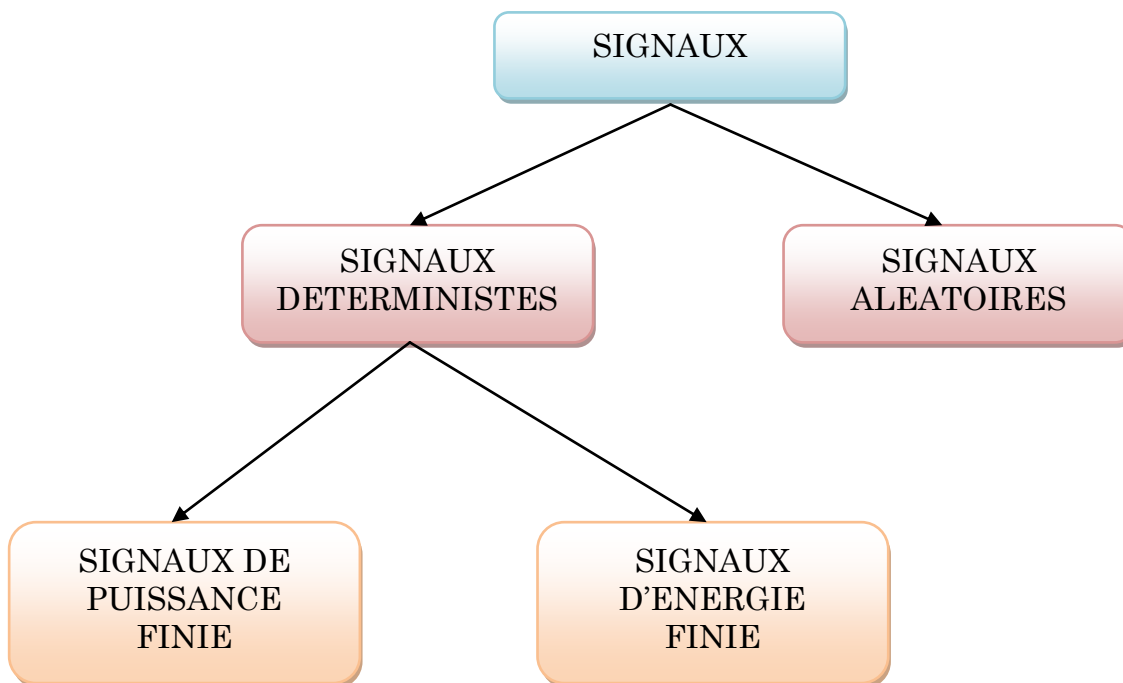


Figure II.1: Les différents types de signaux.

#### II.3.1. Les signaux aléatoires :

Il s'agit de signaux dont le modèle mathématique n'est pas connu (Figure II.2.1). Leur évolution en fonction du temps est imprévisible.

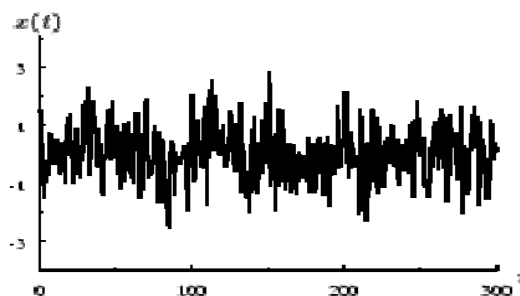
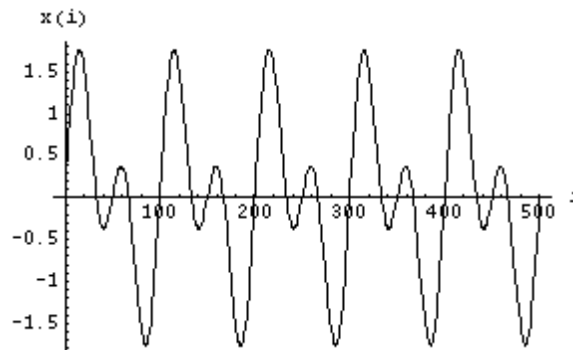


Figure II.2.1: Exemple d'un signal aléatoire

### **II.3.2. Les signaux déterministes :**

Il s'agit de signaux dont le modèle mathématique est connu (Figure II.2.2). Leur évolution en fonction du temps peut donc être parfaitement prédite. Ils peuvent être classés en deux groupes selon qu'ils soient d'énergie finie ou de puissance finie.



**Figure II.2.2:** Exemple d'un signal déterministe

On distingue deux grandes classes de signaux déterministes selon leur nature énergétique.

#### **II.3.2.1. Les signaux à énergie finie :**

$$E < \infty \quad \Rightarrow \quad P = 0 \quad (\text{II.6})$$

Ces signaux se caractérisent par leur énergie puisque leur puissance moyenne est nulle.

#### **II.3.2.2. Les signaux de puissance moyenne finie non-nulle:**

$$P < \infty \quad \Rightarrow \quad E = \infty \quad (\text{leurs énergie est infinie}) \quad (\text{II.7})$$

Ces signaux se caractérisent par leur puissance, ils ne sont pas physiquement réalisables.

## **II.4. Transformée de Fourier :**

### **Introduction :**

Il y a deux domaines importants de description du signal selon la nature de la variable :

- Le domaine de description temporel, dans lequel la variable indépendante est le temps. Il s'agit du domaine de description usuel des signaux. Dans ce domaine de représentation, le signal peut être caractérisé par sa durée, sa période, ou son amplitude.

- Le domaine fréquentiel, dans lequel la variable indépendante est la fréquence dont la dimension est l'inverse du temps. Dans ce domaine de représentation, le signal peut être caractérisé par sa bande passante, sa fréquence fondamentale, ou sa phase.

Ces deux domaines de description du signal sont reliés entre eux par la transformée de Fourier qui constitue une généralisation de la série de Fourier. Cette dualité entre les domaines de description temporelle et fréquentiel est le fondement de la plupart des méthodes du traitement du signal.

#### **II.4.1. Définition de la transformée de Fourier [53] :**

La transformée de Fourier est une généralisation de la série de Fourier appliquée aux signaux non périodiques. De nos jours, cette transformée est devenue un outil puissant en traitement du signal puisqu'elle localise toutes les composantes fréquentielles d'un signal quelconque. Cependant, son application est liée à la nature du signal, qu'il soit continu ou discret.

#### **II.4.2. La transformée de Fourier d'un signal continu :**

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{II.8})$$

##### **II.4.2.1. Conditions d'existence [53]:**

Tous les signaux ne possèdent pas obligatoirement des transformées de Fourier. Pour qu'un signal  $x(t)$  ait une transformée de Fourier, les conditions de Dirichlet sont nécessaires et suffisantes :

**Condition 1 :** Dans l'intervalle considéré  $T$ , le signal  $x(t)$  doit être absolument intégrable :

$$\int_{(T)} |x(t)| dt < \infty \quad (\text{II.9})$$

**Condition 2 :** Dans l'intervalle considéré  $T$ , le signal  $x(t)$  doit posséder un nombre fini d'extremums (maxima et minima).

**Condition 3 :** Dans l'intervalle considéré  $T$ , le signal  $x(t)$  doit avoir un nombre fini de discontinuités. En plus, chacune des discontinuités doit être finie.



$$\text{Exemple : } x(t) = \sin(1/t) \quad 0 < t \leq 1 \quad (\text{II.10})$$

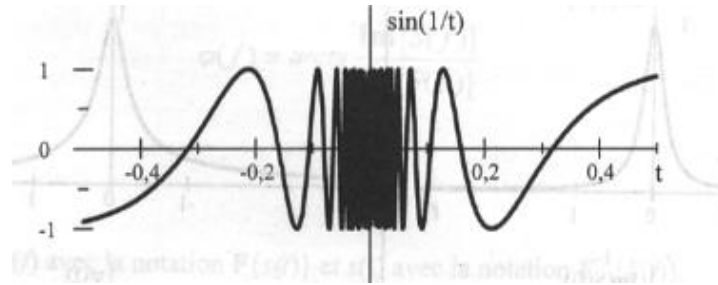


Figure II.3 : représentation graphique du signal  $x(t)$ .

D'après la figure (II.3), ce signal vérifie la condition 1, mais ne vérifie pas la condition 2. Il possède un nombre infini d'extremums, donc la transformée de Fourier n'est pas applicable sur ce signal.

#### II. 4.2.2. Propriétés [53] :

- **Linéarité :**

$$a. s_1(t) + b. s_2(t) \xrightarrow{\text{TF}} a. S_1(f) + b. S_2(f) \quad (\text{II.11})$$

- **Translation dans le domaine temporel :**

$$s(t - t_0) \xrightarrow{\text{TF}} S(f) \cdot e^{-2j\pi f t_0} \quad (\text{II.12})$$

- **Translation dans le domaine fréquentielle :**

$$S(f) \cdot e^{-2j\pi f t_0} \xrightarrow{\text{TF}} S(f - f_0) \quad (\text{II.13})$$

- **Convolution temporelle :**

$$s_1(t) * s_2(t) \xrightarrow{\text{TF}} S_1(f) \cdot S_2(f) \quad (\text{II.14})$$

- **Convolution dans le domaine fréquentielle :**

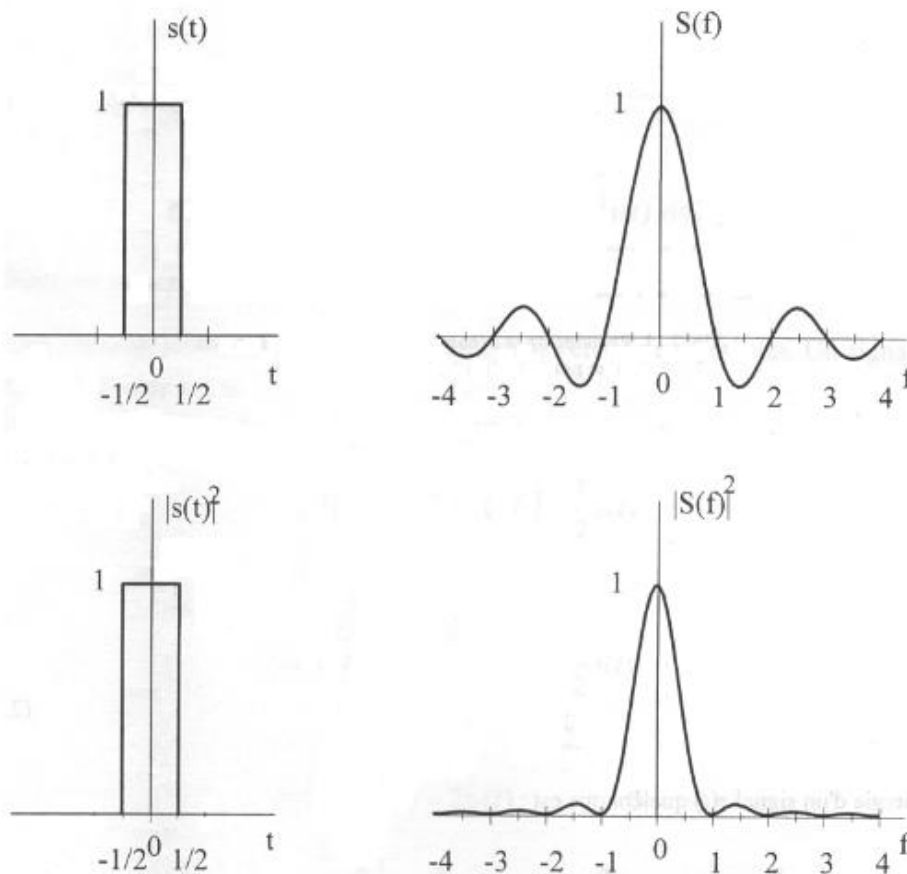
$$S_1(f) \cdot S_2(f) \xrightarrow{\text{TF}} s_1(t) * s_2(t) \quad (\text{II.15})$$

• **Théorème de Parseval :**

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |s(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |s(f)|^2 df \quad (\text{II.16})$$

Ce théorème très important montre que l'énergie totale d'un signal  $s(t)$  peut être déterminée en considérant la puissance instantanée ( $|s(t)|^2$ ) ou l'énergie par unité de fréquence ( $|s(f)|^2$ ).

Les quantités  $|s(t)|^2$  et  $|s(f)|^2$  sont respectivement la densité temporelle d'énergie (DTE) et la densité spectrale d'énergie (DSE). Ce théorème montre donc que l'énergie du signal peut être répartie sur le spectre (Figure II.4).



**Figure II.4:** Théorème de Parseval : les aires au dessous de  $|s(t)|^2$  et  $|s(f)|^2$  sont égales.

**II .4.3. La transformée de Fourier d'un signal discret [55]:**

La transformée de Fourier discrète est une méthode d'analyse et de traitement fondamentale dans l'étude des systèmes et des signaux numériques.

La transformée de Fourier à temps discret effectue un produit scalaire entre un signal discret et l'exponentielle complexe pour chaque fréquence  $f$ . Le but de cette transformée est de rechercher les périodicités dans un signal de durée finie, pour mesurer leurs contributions via une représentation fréquentielle.

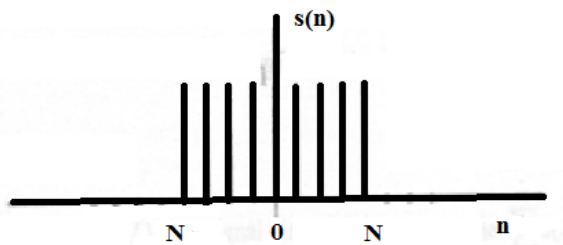
L'expression mathématique de la TFD est la suivante :

$$X(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot e^{-j2\pi m \left(\frac{k}{N}\right)} \quad m=0,1,\dots,N-1 \quad (\text{II.17})$$

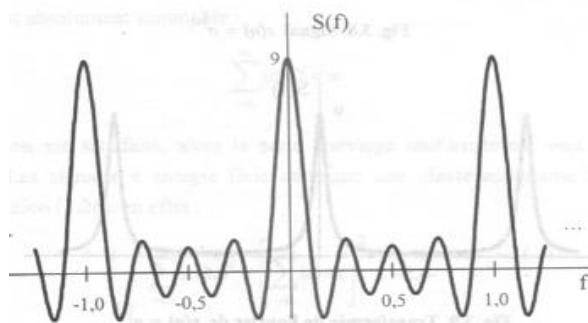
Les nombres « m » sont liés aux instants d'échantillonnage temporel.

Contrairement à la transformée de Fourier d'un signal continu (analogique), la transformée de Fourier d'un signal discret est périodique d'une période égale à l'unité qui est généralement représentée sur l'intervalle  $\left[-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}\right]$ .

Comme  $S(f)$  est périodique de période égale à 1, il suffit de l'échantillonner sur une seule période. Chaque période peut être divisée en  $N$  échantillons (Figure II.5.1 et II.5.2).



**Figure II.5.1 :** Impulsion rectangulaire discrète.



**Figure II.5.2 :** Transformée de Fourier de l'impulsion rectangulaire discrète pour  $N=4$

De manière inverse, on peut calculer  $x(k)$  à partir de  $X(m)$  à l'aide de la transformée de Fourier inverse à temps discret (ITFD) tel que :

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) \cdot e^{j2\pi m \left(\frac{k}{N}\right)} \quad K=0, 1 \dots n-1 \quad (\text{II.18})$$

### **II.4.3.1. Conditions d'existence [53]:**

La transformée de Fourier  $S(f)$  d'un signal discret existe si le terme  $\sum_{-\infty}^{+\infty} x(k) \cdot e^{-j2\pi f k}$  est fini, c'est-à-dire que la série converge.

Comme le module du terme  $e^{-j2\pi f n}$  est toujours égal à 1, la condition suffisante pour que  $S(f)$  existe est que la suite  $s(n)$  soit absolument sommable :

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} |x(k)| < \infty \quad (\text{II.19})$$

### **II.4.3.2. Propriétés [53]:**

La plupart des propriétés de la transformée de Fourier des signaux continus ont leurs équivalents dans la DFT. Ces propriétés vont nous permettre un usage facile de la DFT.

#### **• Périodicité :**

Nous avons vu que le nombre d'échantillons contenu dans le signal  $s(n)$  est égal à celui contenu dans le signal  $S(m)$  et que la discrétisation temporelle conduit à un spectre périodique dans le domaine fréquentiel. De la même façon une discrétisation fréquentielle conduit à une périodisation dans le domaine temporel. Ainsi les suites d'échantillons  $s(n)$  et  $S(m)$  sont périodiques de période  $N$ .

$$\begin{cases} s(n) = s(n + p \cdot N) & 0 \leq n \leq N - 1 \\ S(m) = S(m + p \cdot N) & 0 \leq m \leq N - 1 \end{cases} \quad \text{Pour toute valeur entière de } p$$

#### **• La linéarité :**

$$a \cdot x(k) + b \cdot y(k) \xrightarrow{\text{DFT}} a \cdot X(m) + b \cdot Y(m) \quad (\text{II.20})$$

#### **• Décalage en temps :**

$$x(k - k_0) \xrightarrow{\text{DFT}} X(m) \cdot e^{-j2\pi \left(\frac{m}{N}\right) k_0} \quad (\text{II.21})$$

#### **• Décalage en fréquence :**

$$x(k) \cdot e^{-j2\pi \left(\frac{k}{N}\right) m_0} \xrightarrow{\text{DFT}} X(m - m_0) \quad (\text{II.22})$$

#### **• Conjugaison :**

$$x^*(k) \xrightarrow{\text{DFT}} X^*(-m) \quad (\text{II.23})$$

• **Produit de convolution :**

$$x_1(k) * x_2(k) \xrightarrow{\text{DFT}} X_1(m) \cdot X_2(m) \quad (\text{II.24})$$

• **Théorème de Parseval :**

$$\sum_{k=0}^{N-1} |x(k)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} |X(m)|^2 \quad (\text{II.25})$$

### II.4.3.3. La FFT :

J.W.COOLEY et W.TURKEY [58] ont révolutionné le domaine du traitement numérique du signal avec la publication en 1960 d'un algorithme de calcul rapide de DFT appelé transformée de Fourier rapide plus connu sous le nom de la FFT (Fast Fourier Transform) Lorsque le signal échantillonné est de taille  $N = 2^n$ , la transformée de Fourier peut être calculée à l'aide d'un algorithme nommé transformée de Fourier rapide (FFT) qui permet un gain de calcul appréciable. Ce gain à pour expression :

$$\text{Gain} = \frac{N}{\log_2(N)} \quad (\text{II.26})$$

### II.4.4. Echantillonnage :

#### II.4.4.1. Définition de l'échantillonnage :

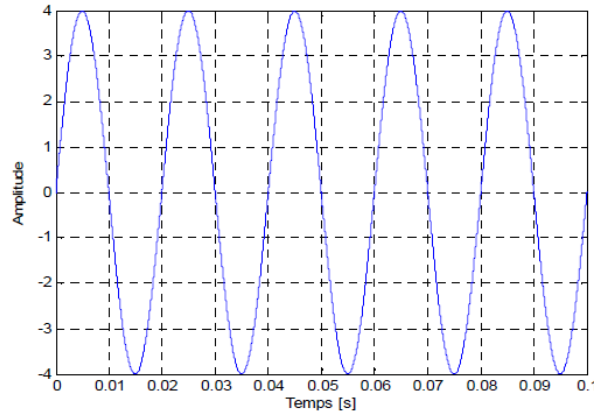
Le principe de base d'un échantillonneur est réalisé à l'aide d'un interrupteur qui s'ouvre et se ferme périodiquement à la fréquence  $F_e = 1/T_e$ . Le signal d'entrée  $S(t)$  apparaît en sortie lorsque l'interrupteur est fermé et disparaît lorsque l'interrupteur est ouvert. Le signal échantillonné  $S_e(t)$  est une suite d'impulsions périodiques de très faible durée du signal d'entrée. Le signal échantillonné  $S_e(t)$  est alors une simple multiplication du signal analogique  $S(t)$  par une fonction d'échantillonnage  $f(t)$ .

#### II.4.4.2. Le théorème de Shanon :

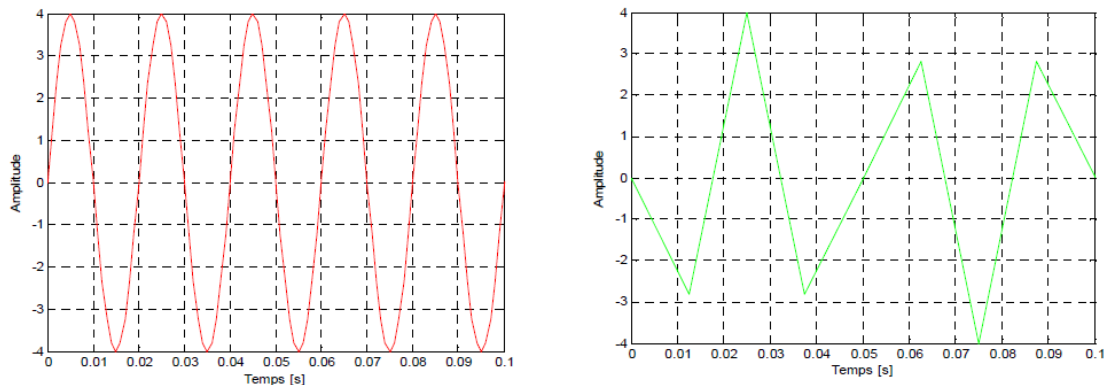
Le théorème de Shanon, appelé aussi « théorème d'échantillonnage » énonce qu'un signal réel à fréquence maximale  $f_s$  doit être échantillonné avec une fréquence  $F_e$  supérieure ou égale à deux fois la fréquence maximale. Cette fréquence d'échantillonnage porte le nom de fréquence de *Nyquist*.

Lorsque cette condition n'est pas respectée, l'opération de reconstruction parfaite n'est plus possible et on assiste à une interférence des motifs : ce phénomène est connu sous le nom de repliement de spectre.

La figure (II.6.2) montre l'échantillonnage d'une sinusoïde de fréquence **50 Hz** et d'amplitude **A=4** (Figure II.6.1) avec les deux fréquences 80 Hz et 1 kHz. Nous constatons que le signal échantillonné avec la fréquence 1 kHz est mieux reconstruit que celui échantillonné avec la fréquence 80 Hz.



**Figure II.6.1** : Allure d'une sinusoïde parfaite de fréquence **50 Hz** et d'amplitude **A=4**.



**Figure II.6.2**: Allure de la sinusoïde échantillonnée pour  $F_e=80$  Hz (à droite en vert) et pour  $F_e=1$  KHz (à gauche en rouge).

### II.4.4.3. Estimation de spectre :

De façon générale, l'estimation de spectre se propose d'évaluer différentes quantités ; dans notre cas cette quantité est la valeur de la densité à partir de la réalisation d'une séquence de longueur N du signal considéré.

La représentation spectrale nous renseigne sur la répartition de l'énergie de chaque composante fréquentielle du signal, qu'il soit discret ou continu. Cependant, il est obligatoire de séparer l'analyse spectrale des signaux déterministes de celle effectuée pour les signaux aléatoires, car les techniques utilisées pour ces deux types de signaux sont totalement différentes.

## **Conclusion :**

Dans cette partie, nous avons présenté brièvement l'environnement du traitement du signal, en définissant ce que c'est qu'un signal, et en traitant les principales idées sur la transformée de Fourier à temps continu et à temps discret.

Pour faire une bonne analyse, il faut tout d'abord connaître la nature du signal à traiter, ainsi que ses propriétés, après cela on pourra entamer notre traitement tout en respectant les règles basiques qu'on a pu voir dans cette partie, comme par exemple : le théorème d'échantillonnage qui constitue la base de toute parfaite reconstruction.

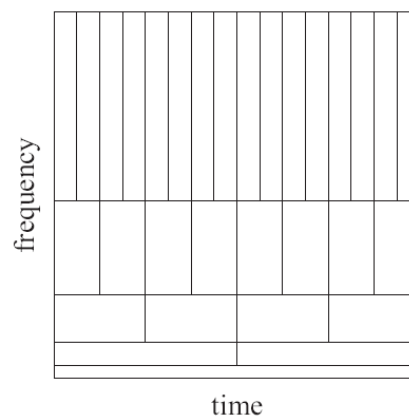
L'estimation spectrale aboutit à de meilleurs résultats qui réduisent de façon appréciable la variance pour une meilleure distribution fréquentielle du signal.

## **II.5. Transformée en ondelettes :**

### **Introduction [60, 61]:**

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

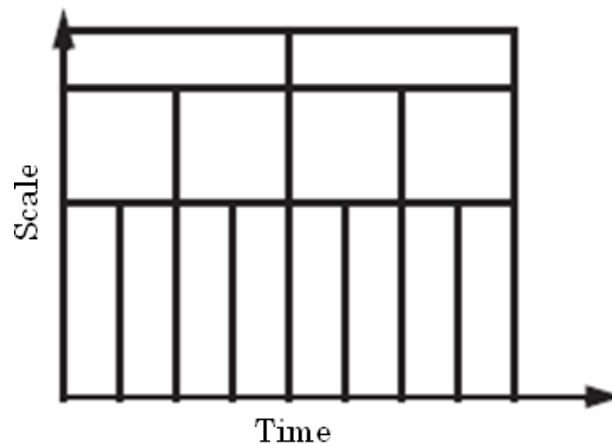
L'analyse par la technique des ondelettes fournit de meilleurs résultats pour le traitement local qui a pour objectif de détecter les points de discontinuités ou les zones déformées du signal, qui sont souvent de hautes fréquences.



**Figure II.7.1:** Représentation de la multi-résolution temps-fréquence pour la transformée de Fourier Rapide.

On constate d'après la représentation temps-fréquence (Figure II.7.1) que les composantes de faibles fréquences (en bas) ont une longue évolution temporelle alors que celles de hautes fréquences apparaissent pendant un très court instant. Donc il faut utiliser de longs intervalles temporels si on veut avoir une bonne résolution pour les faibles fréquences. Par contre, pour étudier les hautes fréquences, cet intervalle temporel doit être relativement court, ce qui affecte la résolution des basses fréquences. Et donc on a un compromis temps-fréquence.

Le traitement du signal par les ondelettes permet d'élargir les intervalles de temps lorsque l'on recherche plus de précision sur les composantes de basses fréquences ; elle permet également de rétrécir les zones pour l'extraction d'informations sur les hautes fréquences ; cela démontre la capacité des ondelettes à garder une bonne résolution temporelle et fréquentielle. L'analyse par la méthode des ondelettes nous permet aussi de partitionner l'énergie du signal en différentes bandes de fréquences pour séparer toutes ses composantes.



**Figure II.7.2:** Représentation de la multi-résolution temps-échelle pour l'analyse par les ondelettes.

## **II.5.1. Transformée en ondelettes continue (CWT) :**

### **II.5.1.1. Définition [56,57]:**

La transformée en ondelette continue (CWT) utilise des ondelettes dont l'enveloppe rétrécit avec l'échelle en gardant le même nombre d'oscillations. Fondamentalement, la transformée en ondelette se calcule de la même manière que la transformée de Fourier fenêtrée, autrement dit on regarde la corrélation au sens du produit scalaire entre le signal à analyser et la famille de fonction  $\Psi_{a,b}(t)$ .

### **II.5.1.2. Expression mathématique [55]:**

Une ondelette est une onde qui oscille à fréquence constante et qui s'annule au bout d'un instant donné (Figure II.8). La fonction analysante peut être choisie en toute liberté



contrairement à la transformée de Fourier qui se restreint uniquement aux fonctions sinusoïdales.

$$\boxed{\Psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{S}} \Psi\left(\frac{t-u}{S}\right)} \quad (u \in \mathbb{R}^*, S \in \mathbb{R}) \quad (\text{II.27})$$

$\Psi$  : l'ondelette mère

$u$  : l'échelle de l'ondelette

$S$  : la translation de l'ondelette

La normalisation par le facteur  $1/\sqrt{S}$  engendre la conservation d'énergie de l'ondelette mère durant son oscillation temporelle.

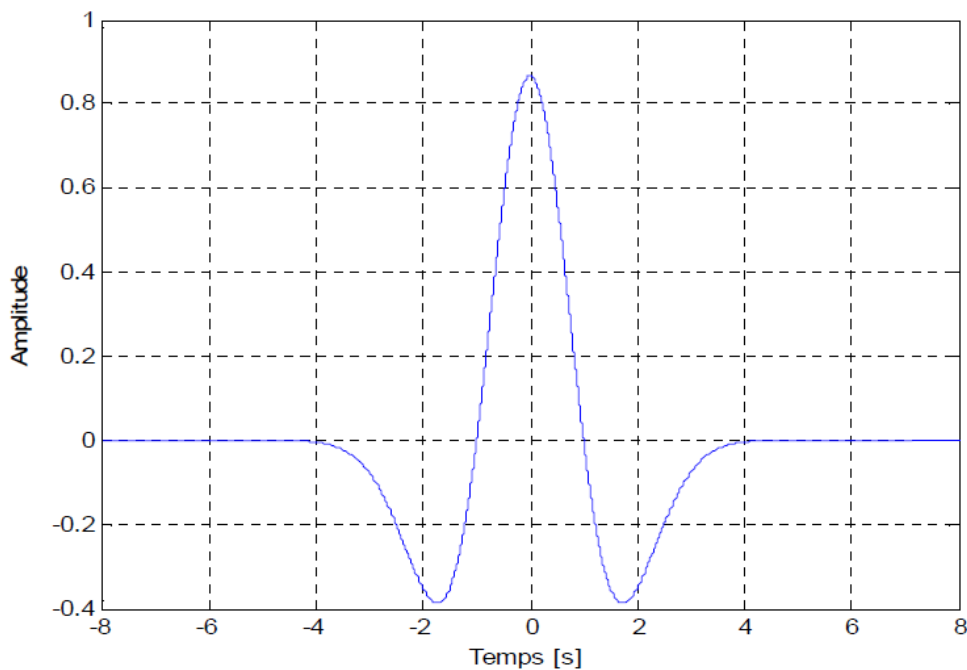


Figure II.8 : Exemple de l'ondelette chapeau mexicain.

### II.5.1.3. Les conditions que doivent satisfaire les fonctions ondelettes [53]:

1. L'ondelette doit être une fonction admissible (de moyenne nulle) comme on l'a dit précédemment:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (\text{II.28})$$

2. Une ondelette doit être à énergie finie :

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty \quad (\text{II.29})$$

3. Une ondelette doit être analytique : sa transformée de Fourier doit être nulle pour  $f < 0$ .

Expression de la transformée en ondelette continue de la fonction  $f$  pour l'échelle  $u$  et la position  $s$  :

- Elle est calculée en associant la fréquence  $f_0$  à une ondelette telle que :

$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi^* \left( \frac{t-u}{s} \right) dt \quad (\text{II.30})$$

- La formule de **Fourier-Parseval** appliquée à l'équation nous donne :

$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi_{u,s}^*(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega) \Psi_{u,s}^\wedge(\omega) d\omega \quad (\text{II.31})$$

Les coefficients d'ondelette  $Wf(u, s)$  dépendent ainsi des valeurs de  $f(t)$  et  $\hat{f}(\omega)$  dans le domaine temps-fréquence où l'énergie de  $\Psi_{u,s}(t)$  et  $\hat{\Psi}_{u,s}(\omega)$  est concentrée. Ainsi, des signaux variables dans le temps sont détectés à partir des coefficients et de l'échelle des coefficients.

#### **II.5.1.4. Ondelette de Morlet :**

Le problème traité par Morlet était celui de l'analyse de données issues de sondages sismiques effectués pour les recherches géologiques ; ces données particulièrement adaptées à une technique d'analyse sur son contenu fréquentiel ce qui est tout l'intérêt de ce type de transformation.

La première famille d'ondelettes présentée par J. Morlet est issue de la fonction :

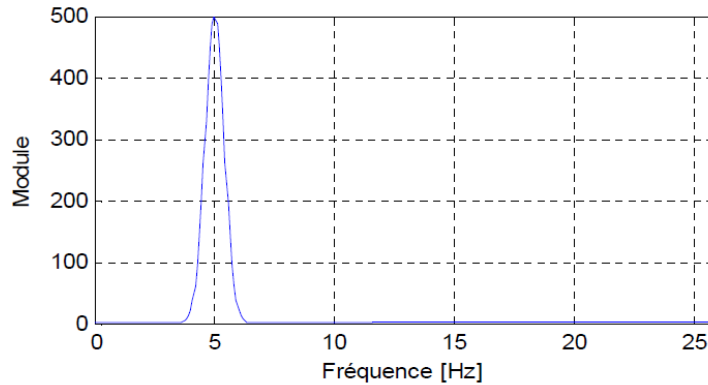
$$\Psi(t) = e^{-\left(\frac{\alpha^2 \cdot t^2}{2}\right)} \cdot e^{-j2\pi f_0 t} \quad (\text{II.32})$$

Elle est inspirée du signal élémentaire de Gabor, c'est à dire par modulation d'une gaussienne. Depuis, toutes les ondelettes  $\Psi(t)$  correspondant à une modulation d'amplitude d'enveloppe  $A(t)$  portée par une exponentielle complexe, s'appellent ondelettes de type Morlet.

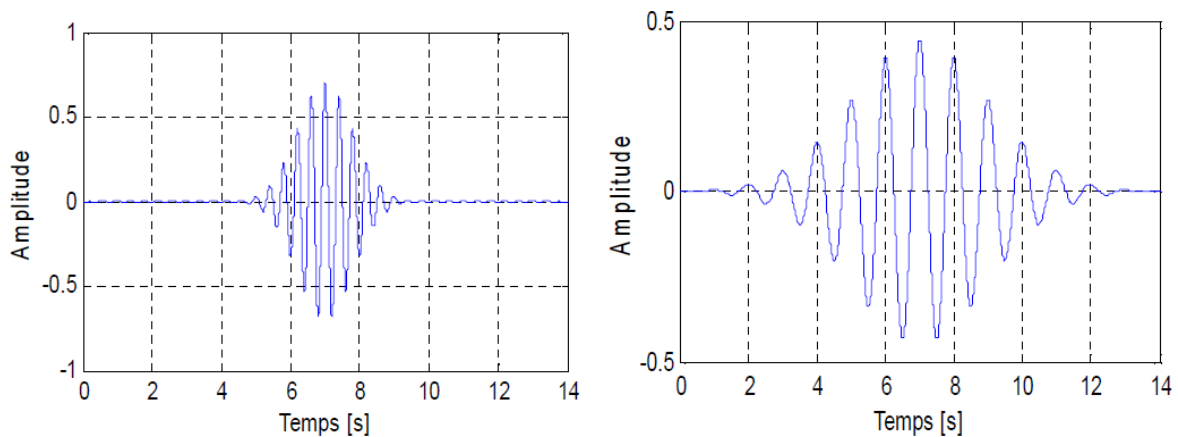
Elle ne satisfait pas rigoureusement à la condition d'admissibilité mais le choix de  $f_0$  a permis d'approcher cette condition. La solution de compromis retenue par Morlet consistait à imposer une valeur faible de  $|\Psi(0)|$  tout en ne tolérant qu'un petit nombre d'oscillations. La

famille d'ondelettes de Morlet donne un outil remarquable pour l'analyse des signaux (figure II.9). L'ondelette de Morlet complexe translatée par  $\mathbf{u}$  et dilatée par  $\mathbf{s}$  a pour expression mathématique :

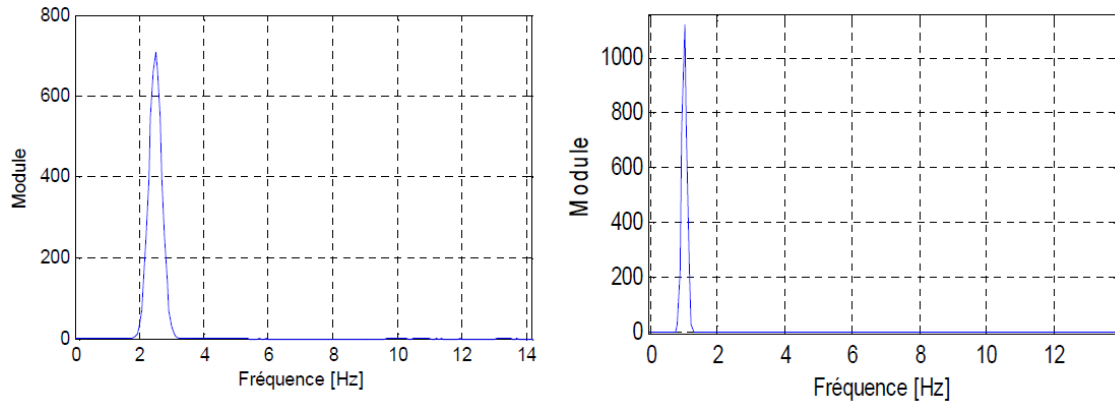
$$\Psi_{\mathbf{u}, \mathbf{s}}(\mathbf{t}) = \frac{1}{\sqrt{\mathbf{s}}} e^{-\pi \left(\frac{\mathbf{t}-\mathbf{u}}{\mathbf{s}}\right)^2} \cdot e^{-10j\pi \left(\frac{\mathbf{t}-\mathbf{u}}{\mathbf{s}}\right)} \quad (\text{II.33})$$



**Figure II.9 :** Représentation temporelle et fréquentielle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la translation pour  $s=1$  : (a)  $u=4$ , (b)  $u=2$ .



**Figure II.10:** Représentation temporelle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la dilatation pour  $u=7$  (à gauche  $s=3$  et à droite  $s=5$ ).



**Figure II.11:** Représentation fréquentielle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la dilatation pour  $u=7$  (à gauche  $s=3$  et à droite  $s = 5$ ).

### II.5.1.5. Scalogramme :

En notant  $\eta$  le centre de fréquence de l'ondelette élémentaire, le centre de fréquence d'une ondelette dilatée est :  $\xi = \frac{\eta}{b}$ . Le scalogramme d'un signal est défini par :

$$P_w(b, \xi) = |W_f(a, b)|^2 = \left| W_f\left(a, \frac{\eta}{\xi}\right) \right|^2 \quad (\text{II.34})$$

$$\text{Le scalogramme normalisé vaut : } \frac{\xi}{\eta} \cdot P_w f(b, \xi) \quad (\text{II.35})$$

La normalisation revient à multiplier l'expression par un facteur égal à  $\frac{\xi}{\eta}$ .  $\eta$  est le centre de fréquence de l'ondelette élémentaire qui a une énergie concentrée dans un intervalle positif centré en  $\eta/s$  dont la taille est donnée par  $1/s$ . Dans le domaine temps-fréquence de l'analyse par les ondelettes, un atome d'ondelette (Figure II.12) est représenté par le rectangle de Heisenberg de largeur temporelle  $s \cdot \sigma_t$  et de largeur fréquentielle  $1/s \cdot \sigma_w$  ;  $\sigma_t$  et  $\sigma_w$  correspondent aux dimensions du rectangle de Heisenberg pour l'ondelette mère ; ces dernières restent constantes pour toute la transformée car  $S_{rect} = \sigma_w * \sigma_t$ .

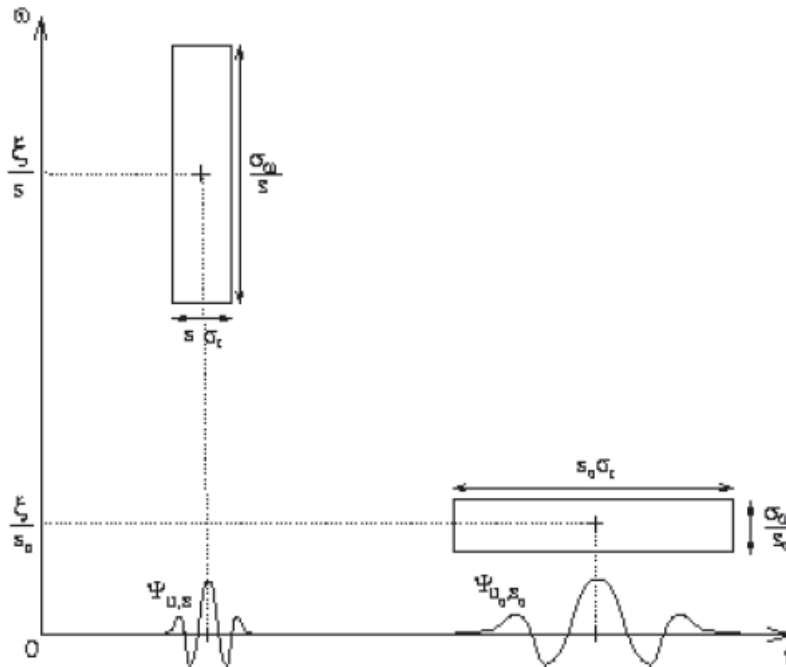


Figure II.12: Atome de la Wavelet Transform.

### II.5.1.6. Calcul des coefficients de la CWT [58] :

La procédure de calcul des coefficients s'effectue en multipliant le signal par l'ondelette analysante puis en calculant l'intégrale du produit. Ce processus est accompli en quatre étapes :

- Dès le départ, on compare l'ondelette à une portion du signal (Figure II.13).
- On calcule le coefficient  $W$  qui étudie le degré de similitude entre la portion du signal et l'ondelette analysante ; celles-ci sont similaires lorsque la valeur numérique du coefficient  $W$  est élevée. Plus précisément, lorsque l'énergie du signal et celle de l'ondelette sont relativement proches, le coefficient  $W$  peut être interprété comme un facteur de corrélation.

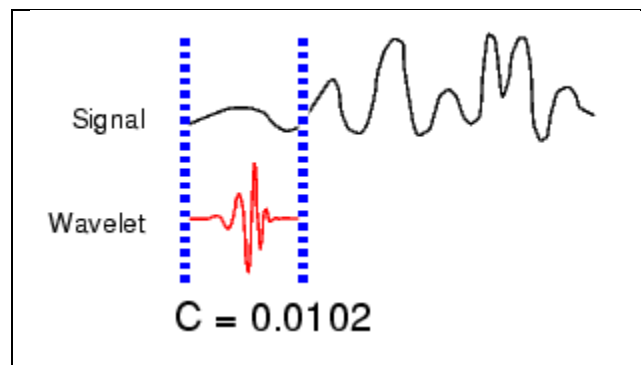
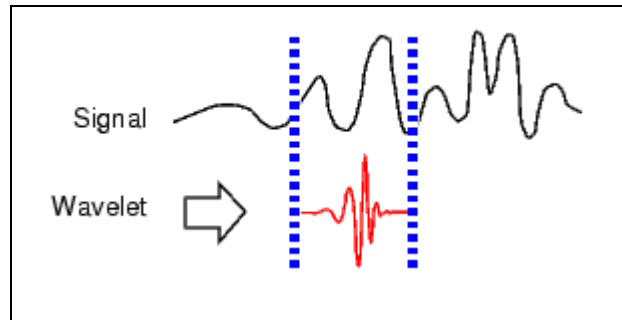


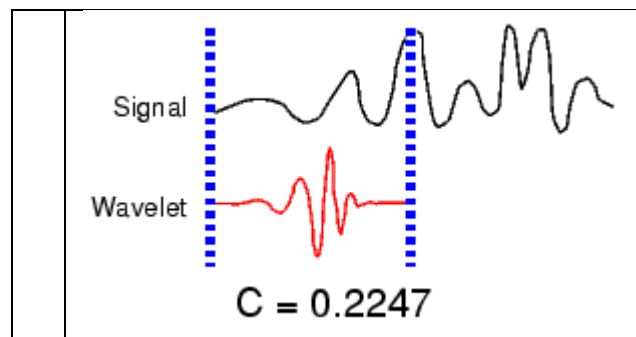
Figure II.13: Comparaison de l'ondelette à une portion du signal

- On translate l'ondelette vers la droite jusqu'au balayage total du signal (Figure II.14).



**Figure II.14:** Balayage du signal par l'ondelette.

- On passe ensuite à une échelle plus élevée qui induit une dilatation temporelle de l'ondelette analysante. Cela a pour effet d'augmenter la portion de comparaison (Figure II.15).



**Figure II.15:** Dilatation de l'ondelette et balayage du signal.

Cette opération est répétée pour chaque échelle jusqu'au calcul des coefficients pour toutes les échelles et pour différentes portions du signal. Les coefficients constituent le résultat d'une régression effectuée sur le signal original. Cette technique d'analyse nous permet d'avoir une représentation temps-échelle du signal original qui procure une vision différente par rapport à la représentation temps-fréquence de Fourier, mais qui lui est complémentaire. En effet, une petite échelle correspond à une variation temporelle rapide de l'ondelette qui se traduit par une haute fréquence ; par contre une grande échelle correspond à une variation lente de l'ondelette qui se traduit par une basse fréquence.

La relation entre l'échelle  $s$  et la fréquence  $f$  est donnée par :

$$f = \frac{f_c}{s \cdot \Delta t} \quad (\text{II.36})$$

$\Delta t$  : est la période d'échantillonnage du signal.

$f_c$  : est la fréquence centrale de l'ondelette mère.

$s$  : est l'échelle.

$f$  : est la fréquence instantanée.

## **II.5.2. Transformée en ondelette discrète (DWT) [53,59] :**

### **II.5.2.1. Définition :**

La **transformée en ondelette discrète** (en anglais *Discrete Wavelet Transform*, ou *DWT*) est une technique utilisée dans la compression de données numériques avec ou sans perte. La compression est réalisée par approximations successives de l'information initiale du plus grossier au plus fin. On réduit alors la taille de l'information en choisissant un niveau de détail.

Cette technique permet de réduire la taille d'information numérique (qualité de l'information compressée à partir de l'information complète), mais aussi d'accélérer l'affichage d'information (qualité de l'affichage à partir d'un fichier compressé). Cette dernière utilisation est indispensable pour des documents cartographiques où la qualité et la taille de l'information nécessaire sont considérables.

### **II.5.2.2. Expression mathématique :**

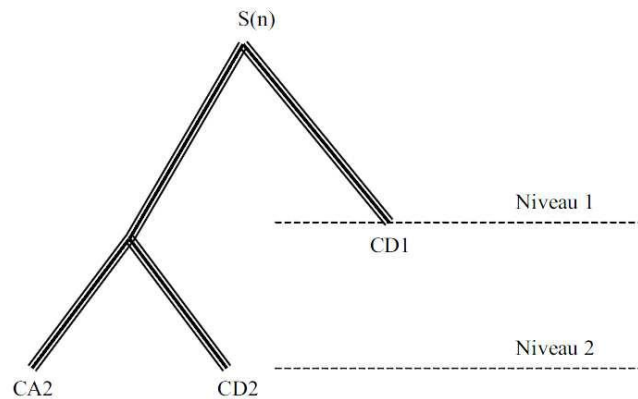
La transformée en ondelette discrète a pour expression mathématique :

$$DWT_{\Psi} f(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n) \Psi \left( \frac{k - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (\text{II.37})$$

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

### **II.5.2.3. Algorithme de décomposition pyramidale :**

La structure pyramidale est composée d'une paire de filtres, l'un étant passe-bas et l'autre passe-haut. Lorsqu'un signal est décomposé avec la DWT, il passe obligatoirement par ces deux filtres **LF** et **HF** en subissant un algorithme de sous échantillonnage ; ceci induit une séparation des composantes de basses fréquences appelées **approximations** et des composantes de hautes fréquences appelées **détails**. L'approximation est à son tour décomposée lors de son passage par la paire de filtres LF et HF. La reconstruction du signal s'effectue grâce à l'algorithme de sur-échantillonnage nommé **transformée en ondelette inverse** (IDWT).

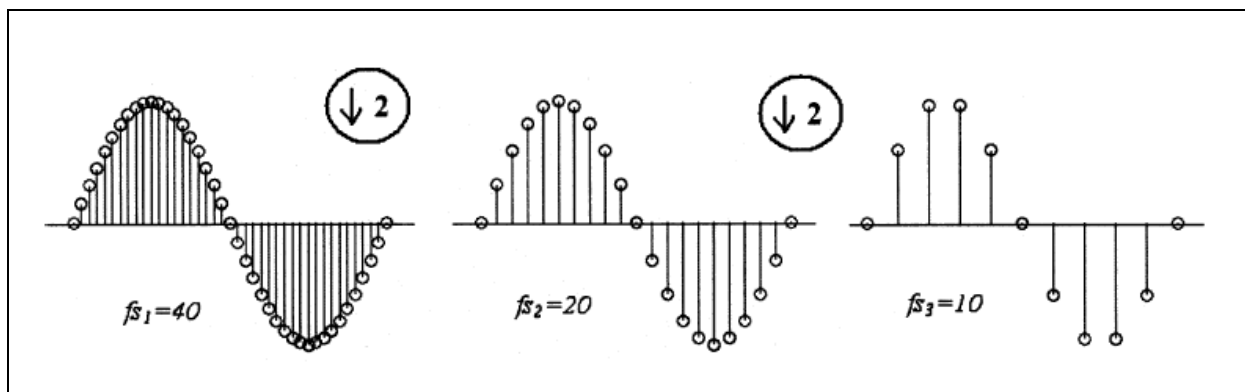


**Figure II.16:** Décomposition pyramidale de profondeur 2.

Ce schéma (Figure II.16) illustre la décomposition d'une profondeur (depth) de 2 niveaux.  $S(n)$  est le signal original de taille  $N$ . CA2 est le signal basses fréquences de taille  $N/2$  ainsi que CD2 les coefficients détails (hautes fréquences) au niveau 2. CD1 représente les coefficients détails du niveau de décomposition 1.

La procédure de décomposition impose un découpage systématique du signal original à chaque passage par la paire de filtres, laissant ainsi le signal sortant avec une longueur de  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$ , ...,  $1/N$  de celle du signal original pour les niveaux de décomposition 1, 2, 3, ..., N.

En fait, le sous-échantillonnage est une opération qui élimine les données impaires du signal et génère un vecteur avec une dimension qui est la moitié de celle du signal. Autrement dit, sous échantillonner un signal par un facteur de 2 est équivalent à réduire de moitié la fréquence d'échantillonnage. Par conséquent, les fréquences correspondantes aux niveaux 1, 2, 3, ..., N sont  $1/2 * fs$ ,  $1/4 * fs$ ,  $1/6 * fs$ ,  $1/8 * fs$ , ...,  $1/(2)^N * fs$ .  $fs$  représente la fréquence d'échantillonnage du signal original.



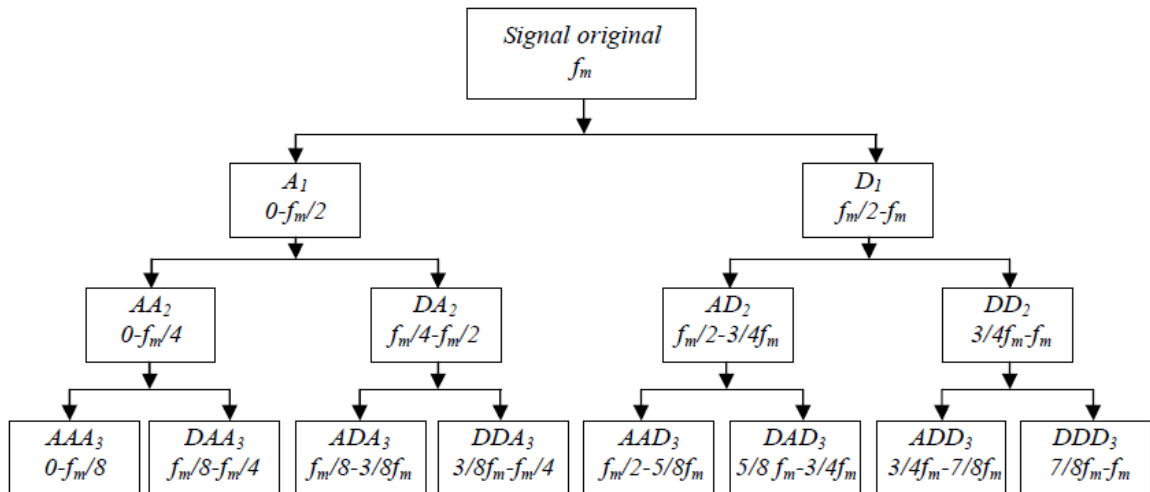
**Figure II.17 :** Effet du sous-échantillonnage.



**II.5.2.4. Décomposition en paquet d'ondelettes:**

La méthode de paquet d'ondelettes est une généralisation de la décomposition en ondelettes qui offre une gamme plus riche des possibilités pour l'analyse du signal. Dans l'analyse en ondelette, un signal est décomposé en approximation et détail. L'approximation est alors elle-même coupée en approximation et détail de deuxième-niveau, et le processus est répété. Pour une décomposition de  $n$ -niveau, il y a  $(n+1)$  manières possibles de décomposer ou coder le signal [57].

Dans l'analyse en paquet d'ondelettes, les détails aussi bien que les approximations peuvent être décomposés. Ceci rapporte plus de  $2^{2^{n-1}}$  de différentes décompositions du signal. L'arbre de décomposition en paquet d'ondelettes est représenté dans la figure II.18.



**Figure II.18 :** Décomposition en paquet d'ondelettes d'ordre 3

De la même façon que la décomposition en ondelettes, le signal original dans la décomposition en paquet d'ondelettes est estimé par la somme des signaux d'approximation et de détail à chaque niveau.

$$i = 1, f(n) = A1(n) + D1(n) \tag{II.38}$$

$$i = 2, f(n) = AA_1(n) + DA_2(n) + AD_2(n) + DD_2(n) \tag{II.39}$$

$$i = 3, f(n) = AAA_3(n) + DAA_3(n) + ADA_3(n) + DDA_3(n) + AAD_3(n) + DAD_3(n) + ADD_3(n) + DDD_3(n) \tag{II.40}$$

Le paquet d'ondelettes décompose le signal original qui est stationnaire ou non stationnaire dans des bandes de fréquence indépendantes. Il n'y a aucune information redondante dans les bandes de fréquence décomposées. C'est une approche efficace d'analyse basée sur la multi résolution et peut être proposée comme méthode de diagnostic de la sévérité de la pollution. La transformation en paquet d'ondelettes est une généralisation de la transformée en ondelettes, par la définition des deux fonctions suivantes :

$$W_0(t) = \varphi(t) \quad (\text{II.41})$$

$$W_1(t) = \Psi(t) \quad (\text{II.42})$$

Tel que  $\varphi(t)$  et  $\Psi(t)$  sont la fonction d'échelle et l'ondelette mère respectivement. La décomposition d'ordre  $m$  donne la fonction  $W_m(n)$  exprimée par :

$$W_{2m}(t) = 2 \sum_{n=0}^{2N-1} h(n) W_m(2t-n) \quad (\text{II.43})$$

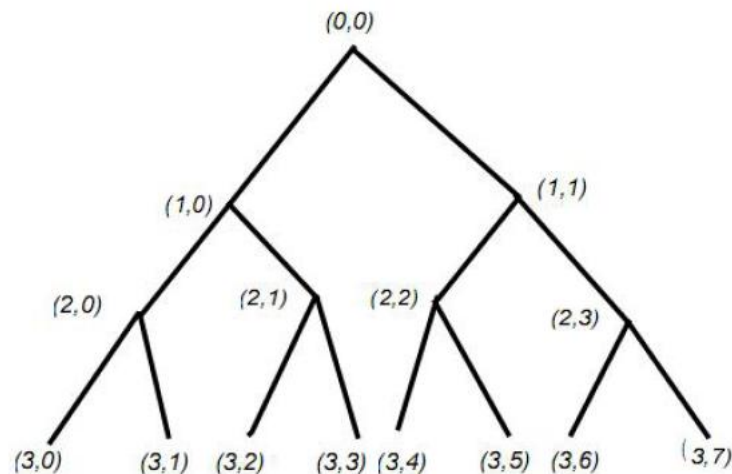
$$W_{2m+1}(t) = 2 \sum_{n=0}^{2N-1} g(n) W_m(2t-n) \quad (\text{II.44})$$

$$W_{j,m,n}(t) = 2^{j/2} W_m(2^{-j}t - n) \quad (\text{II.45})$$

Tels que  $j$  : paramètre d'échelle,  $n$  : paramètre de localisation en temps.

Dans la figure II.19, un exemple d'un arbre de décomposition de paquet d'ondelettes de trois niveaux est illustré. Chaque nœud de l'arbre de la décomposition en paquet d'ondelettes est classé avec une paire de nombres entiers  $(j,k)$ , où  $j$  est le niveau correspondant à la décomposition et  $k$  est l'ordre de la position du nœud à un niveau spécifique.

Dans chaque niveau  $j$ , il y a  $2^j$  nœuds et leur ordre est  $k = 0.1, \dots, 2^j - 1$ . Un vecteur de  $C_{jA}$  de coefficients de paquet d'ondelettes correspond au chaque nœud  $(j,k)$ , la longueur d'un  $C_{jA}$  de vecteur est approximativement  $Nt/2^j$ . La reconstitution des signaux est basée sur les coefficients d'approximation et les détails.



**Figure II.19 :** Répartition des nœuds dans un arbre de décomposition en paquet d'ondelettes

### II.5.2.5. Choix de l'ondelette analysante :

Le choix de l'ondelette analysante joue un rôle primordial pour la compréhension des phénomènes transitoires comme les impulsions de décharges électriques observées sur le courant de fuite pour un état de pollution d'isolateurs sous des conditions humides. Il est cependant connu que les ondelettes **db4** et **db6** sont plus appropriées pour la détection des perturbations de courtes durées alors que les ondelettes **db8** et **db10** sont adéquates pour l'étude des perturbations de relatives longues durées.

Dans notre travail, nous choisissons d'utiliser l'ondelette de Daubechies 4 pour décomposer le signal du courant de fuite afin d'en identifier les transitions pour les pollutions non-uniforme et uniforme, qui sont causées par des perturbations de hautes fréquences [57,58].

L'ondelette mère complexe de Daubechies (Figure II.20) a comme expression mathématique :

$$\Psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} * (e^{j\omega t} - e^{-\frac{\omega^2}{2}}) \quad (\text{II.46})$$

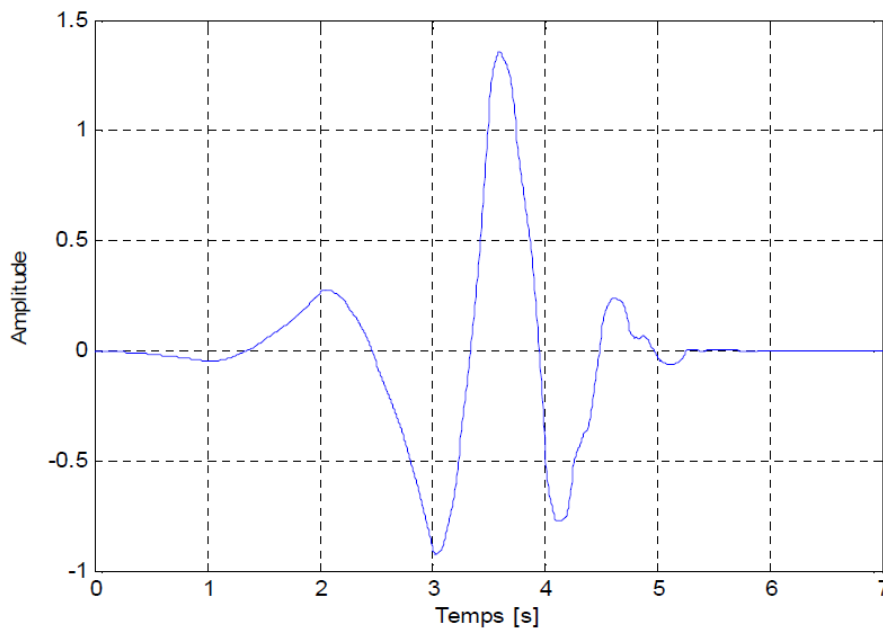
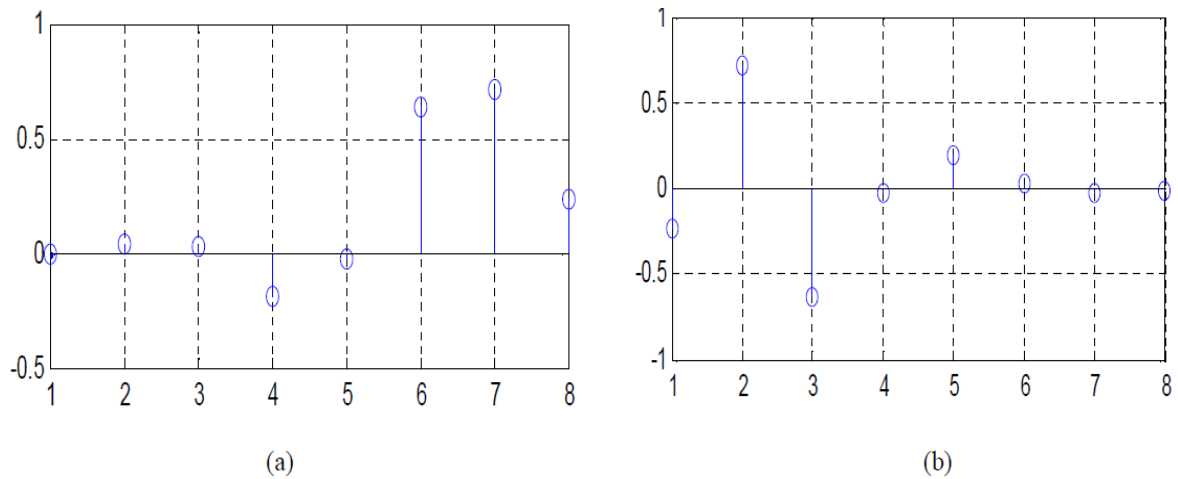


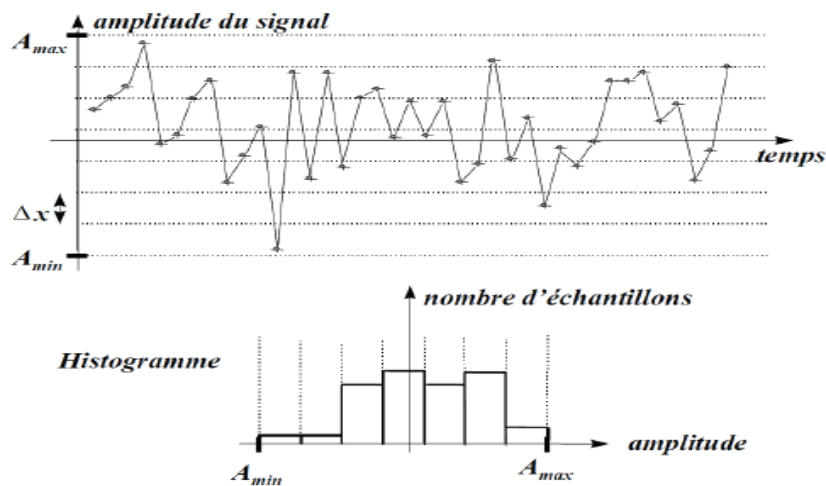
Figure II.20: Représentation de l'ondelette de Daubechies4.



**Figure II.21:** Représentation des filtres de décomposition de l'ondelette de Daubechies4 :  
(a) filtre passe-bas, (b) filtre passe-haut.

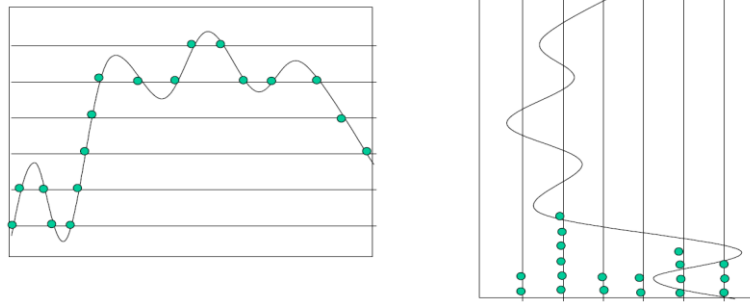
### II.5.3. Histogramme du signal:

L'outil graphique le plus simple est l'histogramme de l'amplitude. Il s'agit de couper automatiquement l'intervalle de définition de la variable en  $\Delta x$  intervalles de largeur égales, puis de produire une série de barres dont la hauteur est proportionnelle à l'effectif associé à l'intervalle.



**Figure II.22:** Représentation d'un histogramme du signal.

On peut illustrer l'opération précédente de la façon suivante : considérons une fonction représentée graphiquement sur un boulier. Sur ce boulier sont placées des billes qui représentent plus ou moins finement la fonction : les tiges peuvent être assez rapprochées et les billes assez petites pour donner une impression de continuité selon les deux axes de coordonnées. Si on place ce boulier dans le plan vertical et qu'ensuite, on lui fait subir une rotation de  $90^\circ$  dans ce plan vertical, les billes vont glisser le long des fils et on aura le nombre de billes sur chaque fil.



**Figure II.23:** *Histogramme d'amplitude.*

### **Conclusion :**

Cette partie a été consacrée essentiellement à l'étude des ondelettes. Elle donne un aperçu rapide sur la notion échelle, les caractéristiques principales que doit vérifier une onde mère ainsi que les propriétés de cette transformée. On a aussi illustré l'architecture pyramidale.

Les ondelettes sont des outils parmi les plus récents du traitement du signal et qui datent de quelques décennies seulement. Ils permettent à l'utilisateur d'effectuer une analyse robuste et mènent à une variété d'applications.

*Chapitre III :*  
*Techniques expérimentales*

### **III-1-Introduction:**

Dans notre travail, nous étudions le comportement du modèle plan de l'isolateur standard **PSV 120 B** dans les deux cas de la pollution uniforme et non-uniforme. Les expériences concernant les deux configurations se sont déroulées au laboratoire de haute tension de l'ENP.

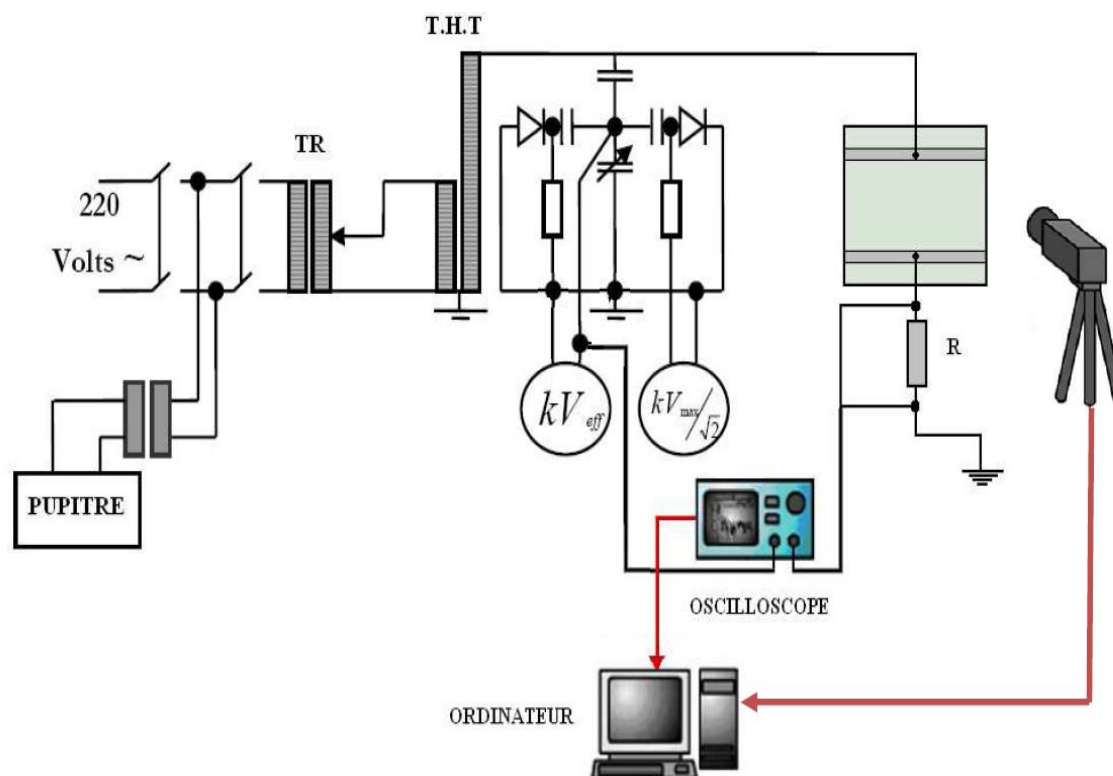
Les essais effectués pour les pollutions uniforme et non-uniforme nous ont permis de décrire l'évolution de la tension de contournement, du courant de fuite ainsi que la charge électrique. Ceci a été effectué pour différentes conductivités volumiques et concentrations en Kaolin de l'agent polluant pour plusieurs niveaux de tension appliqués.

### **III.2.Dispositif expérimental:**

#### **III.2.1.Circuit d'essais du Laboratoire de l'ENP:**

Le laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique est muni d'une station d'essai à fréquence industrielle de marque HEAFELY composé par les équipements suivants :

- Un transformateur d'essai : 500V/300kV, 50 Hz, 50 kVA.
- Un transformateur de réglage : 220 / à 500 V, 50 Hz, 50 kVA.
- 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 permet de contrôler la tension de sortie.
- Des appareils de mesures et de protection.
- Un oscilloscope numérique « TEKTRONIX » de bande passante 500 MHz.
- Une caméra numérique SONY DCR-SR45 pour suivre l'évolution des décharges parallèles en fonction de la tension appliquée et de l'état de surface du modèle.
- Un ordinateur pour l'acquisition des données de la tension appliquée et du courant de fuite ainsi que de la charge qui traverse la surface du modèle.



**Figure III.1 :** *Dispositif expérimental.*

### III.2.2. Objet d'essai :

Les essais sont effectués sur le modèle plan pour simuler l'isolateur **standard PSV 120B** (Figure III.2).

Nous avons utilisé deux bandes conductrices en aluminium comme électrodes que nous avons découpées de manière à ne pas avoir de pointes à leurs extrémités. Nous les collons par suite sur notre modèle plan à l'aide du gesso de manière à éviter les couches d'air qui ont tendance à se former entre le plan et les bandes conductrices, pouvant engendrer des petites décharges, ce qui risque d'altérer nos mesures pendant les expérimentales (Figure III.3).

Le modèle est posé à une hauteur de 175 cm du sol (Figure III.4), afin de limiter l'effet des capacités parasites qui peuvent altérer la mesure de la tension appliquée et du courant de fuite ainsi que la charge électrique.

Les principales dimensions du modèle plan étudié et de l'isolateur réel **PSV 120B** sont données dans les tableaux III.1 et III.2.

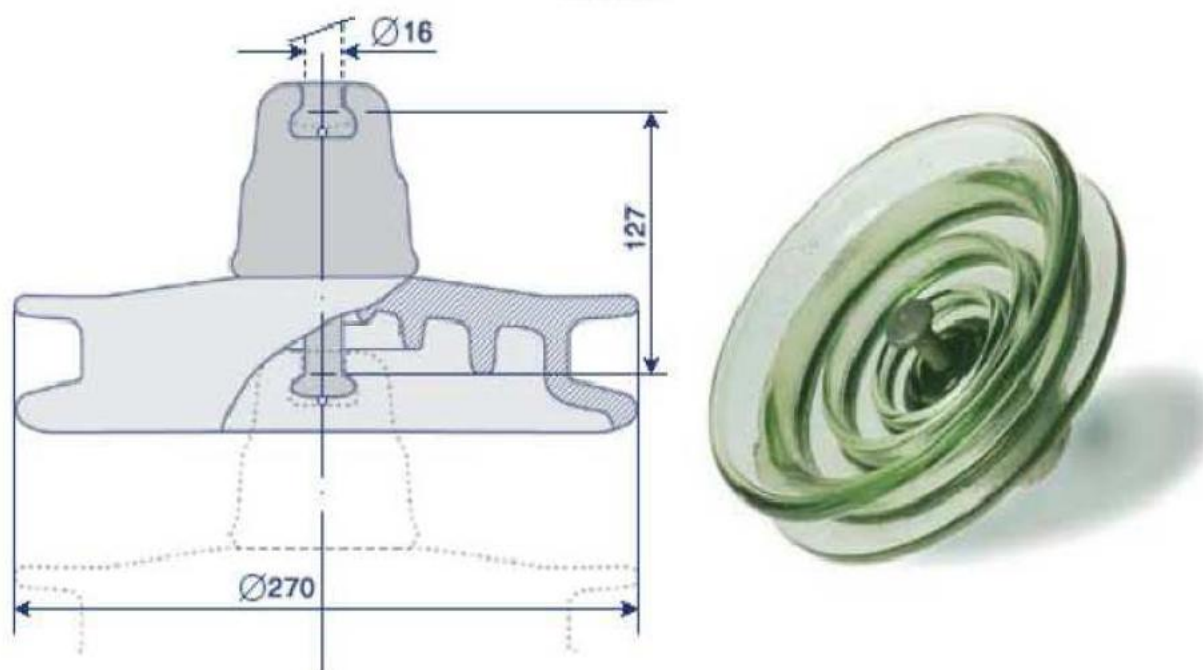


<b>Caractéristiques de l'isolateur</b>	<b>Grandeurs</b>
Résistance mécanique	120 kN
Diamètre du disque	290 mm
Poids	5,7 kg
Dimensions de fixation métallique, IEC 60 120/1984.	16
Longueur de la tige	127 mm
Longueur de fuite	440 mm
Distance de contournement à sec	273 mm

**Tableau III.2:** Caractéristiques de l'isolateur réel (IEC 60 305/1995).

<b>Grandeur</b>	<b>Longueur (mm)</b>
Longueur de la plaque	500
Largeur de la plaque	500
Épaisseur de la plaque	5
Distance inter-électrode dans le cas de pollution uniforme et non-uniforme	440

**Tableau III.1:** Dimensions du modèle plan étudié.



**Figure III.2:** Profil de l'isolateur réel.



**Figure III.3:** Modèle plan étudié vue de haut.



**Figure III.4:** *Dispositif général du model étudié.*

### **III.3. Le nettoyage du modèle plan:**

Le nettoyage du plan est tout d'abord fait avec de l'eau du robinet ; puis il est séché avec des serviettes en papier pour éliminer le maximum d'impuretés déposées. Un deuxième nettoyage est effectué à l'aide d'un bout de coton imbibé d'alcool chirurgical à 90<sup>0</sup> afin d'assurer une propreté quasi-totale du modèle plan. Cette méthode de nettoyage est adoptée pour le cas de la pollution uniforme et non-uniforme.

### **III.4. Préparation des solutions polluantes :**

Les solutions polluantes ont été préparées au laboratoire du département du Génie de l'environnement. Elles sont composées de différentes quantités de Kaolin et NaCl dilué dans un litre d'eau distillée.

Pour nos essais, nous avons choisi d'utiliser cinq solutions de conductivités différentes et trois concentrations distinctes en Kaolin (40 g/l, 100 g/l, 200 g/l). Les propriétés des solutions polluantes utilisées sont données dans le tableau III.3.

Solution	Concentration de Kaolin (g/l)	Conductivité (mS/cm)
1 <sup>ère</sup> solution de kaolin	40 g /l	(1.2, 3.5, 6 ,10 ,20)
2 <sup>ème</sup> solution de kaolin	100 g /l	(1.2, 3.5, 6 ,10 ,20)
3 <sup>ème</sup> solution de kaolin	200 g /l	(1.2, 3.5, 6 ,10 ,20)

**Tableau III.3.** *Propriétés des solutions polluantes.*

On utilise ces solutions pour les deux cas des pollutions uniforme et non-uniforme.

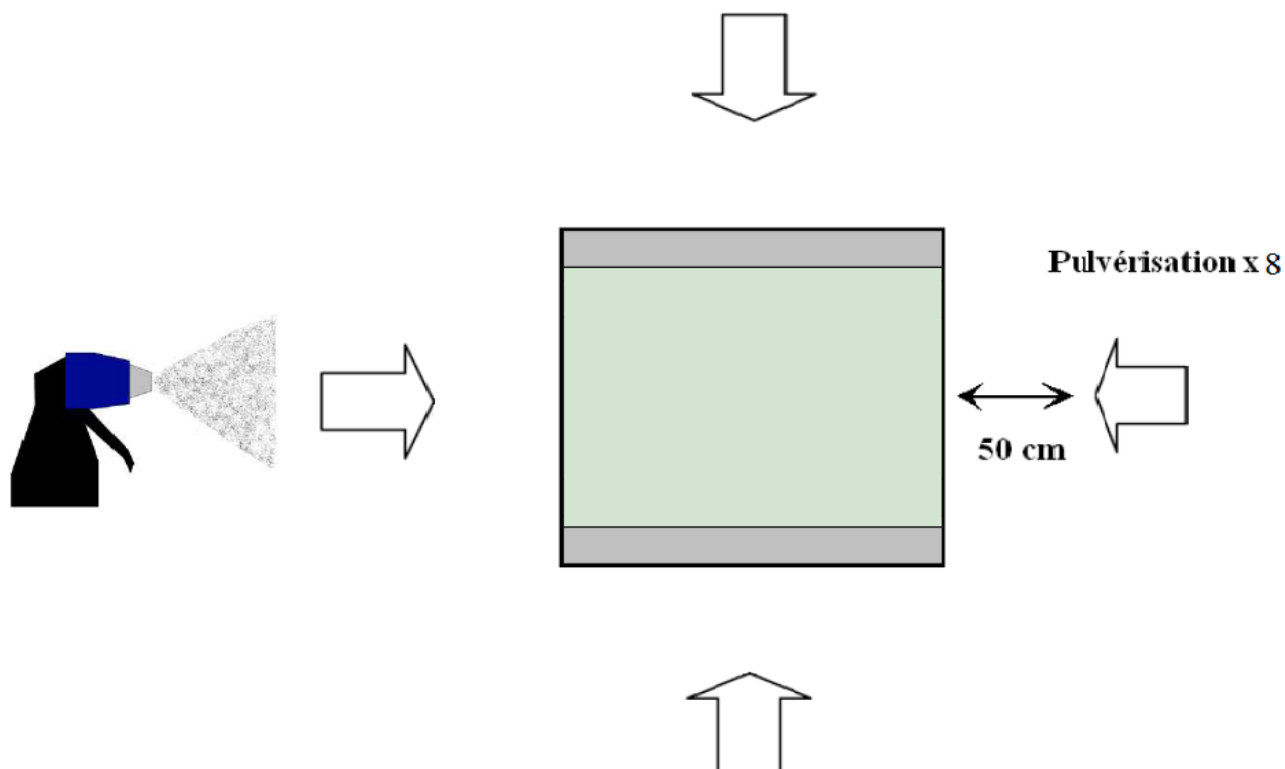
### III.5. Méthode de pulvérisation :

La pulvérisation est utilisée pour obtenir une couche de pollution artificielle. La méthode de pulvérisation doit être la même pour les différents essais afin de reproduire les mêmes conditions initiales.

L'humidification de la surface est obtenue après huit pulvérisations de chaque côté de l'isolateur, à une distance de 0.5 m qui est gardée constante durant toute l'opération.

#### III .5.1. Pollution uniforme :

L'isolateur est directement pulvérisé (Figure III.5)



**Figure III.5:** *Méthode de pulvérisation pour la configuration uniforme.*

### III.5.2. Pollution non-uniforme:

Dans l'intention de déterminer l'influence de la pollution non-uniforme sur le comportement du modèle plan du laboratoire, les essais sont effectués en fixant la largeur de la couche de pollution et celle de la couche propre de façon régulière ainsi que sa position (coté HT et coté terre).

Pour ce cas de figure, l'humidification de la surface est faite en cachant l'extrémité qu'on veut garder sèche avec du nylon (Figure III.6). La méthode de pulvérisation adoptée est la même que pour la pollution uniforme.

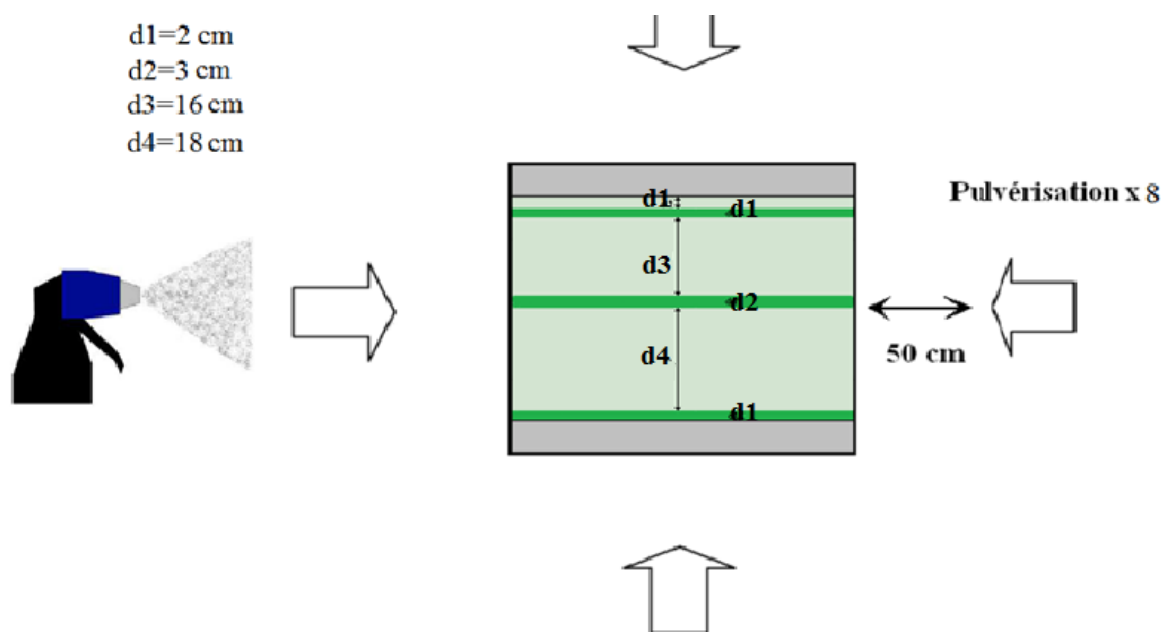


Figure III.6: Méthode de pulvérisation pour la configuration non-uniforme.

### III.6. Mesure du courant de fuite :

Dans les deux cas des pollutions de la surface du modèle, la mesure du courant de fuite et la tension appliquée a été faite à travers un oscilloscope TEKTRONIX par l'intermédiaire d'une résistance  $R = 36\Omega$  pour la pollution uniforme et une résistance de  $1k\Omega$  pour la pollution non-uniforme.

La résistance est insérée en série avec l'objet d'essai. Un câble coaxial connecté à l'oscilloscope est utilisé pour récupérer les données du courant de fuite ainsi que la tension appliquée.

La fréquence d'échantillonnage est de 100 kHz, ce choix permet d'avoir une vision plus large des ondes de la tension et du courant de fuite pour les deux cas de pollution uniforme et non-uniforme.

### **III.7. Mesure du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée :**

La mesure du déphasage courant de fuite-tension appliquée est déterminée à l'aide de la transformée de Fourier discrète basée sur la FFT, grâce à un programme MATLAB® qui permet de calculer le déphasage entre le fondamental du courant de fuite et celui de la tension appliquée. Cette mesure est effectuée pour le cas de la pollution uniforme.

Ce calcul a pour objectif d'étudier la progression du déphasage (tension appliqué – courant de fuite) en fonction de la valeur de la conductivité et la concentration en kaolin.

### **III.8. Mesure de la charge électrique :**

Pour les pollutions uniforme et non-uniforme de la surface du modèle plan, la mesure de la charge électrique a été faite en utilisant l'oscilloscope TEKTRONIX. La tension qui reflète l'image de la charge électrique est récupérée aux bornes d'une capacité de 20 $\mu$ F pour la pollution uniforme et une capacité de 33 $\mu$ F pour la pollution non-uniforme. La capacité est insérée en série entre l'objet d'essai et la terre.

La fréquence d'échantillonnage est de 100 kHz, ce choix permet d'avoir une vision plus large des ondes de tension et de la charge électrique pour les deux cas des pollutions uniforme et non-uniforme.

### **III.9. Conclusion :**

Afin de bien réussir notre étude, nos essais sont effectués sur le modèle plan pour simuler l'isolateur réel **PSV 120B** dans le cas d'une pollution uniforme et non-uniforme, le modèle plan a été choisi pour plusieurs raisons :

- L'utilisation d'une plaque isolante transparente nous permet de bien visualiser l'activité des décharges parallèles sur la surface du plan.
- L'application de la couche de pollution uniforme et non-uniforme est facile à réaliser sur un modèle plan mieux que sur l'isolateur réel.
- Le nettoyage de la plaque est simple.

*Chapitre IV:*  
*Résultats expérimentaux et*  
*Discussions*

## **IV.1.Introduction :**

Dans cette partie expérimentale concernant l'étude du comportement du modèle plan de l'isolateur standard **PSV 120 B**, nous proposons dans un premier temps de mesurer la tension de contournement du modèle de l'isolateur dont la ligne fuite est égale à 44 cm. Les essais ont été réalisés pour les différentes conductivités et pour des concentrations distinctes en kaolin, dans les deux cas de pollution uniforme et non-uniforme.

En deuxième lieu, on s'intéresse à l'évolution du courant de fuite qui est un des paramètres essentiels pour la prédiction de l'état de surface de l'isolateur. Pour les deux cas de pollutions uniforme et non-uniforme, nous étudions la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités et différentes concentrations en Kaolin.

En troisième lieu, nous étudions le déphasage entre le fondamental du courant de fuite et celui de la tension appliquée pour le cas d'une pollution uniforme, nous avons pris en considération l'influence de la concentration en kaolin et la conductivité volumique du milieu sur le déphasage pour différents niveaux de tension appliqués. L'étude du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée peut être très intéressante pour la compréhension du comportement du circuit équivalent de l'isolateur et pour l'évaluation de l'hydrophobicité (absorption du liquide par l'isolateur), afin de diagnostiquer la sévérité de pollution.

En dernier lieu, nous étudions la charge électrique qui est l'un des paramètres important pour connaître la quantité d'énergie dissipée au niveau du modèle. Pour les deux cas de pollutions uniforme et non-uniforme, nous étudions la variation de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités et différentes concentrations en Kaolin.

## **IV.2. Mode opératoire:**

Le modèle est nettoyé avant chaque essai suivant la procédure expliqué dans le chapitre précédent pour éliminer le maximum d'impuretés, les électrodes son changées après chaque essai de contournement. Enfin, le modèle est humidifié à l'aide d'un pulvérisateur contenant la solution polluante de conductivité donnée. Pour chaque configuration, nous effectuons 8 fois la même mesure de la tension de contournement, et nous calculons les valeurs moyennes des valeurs obtenues.

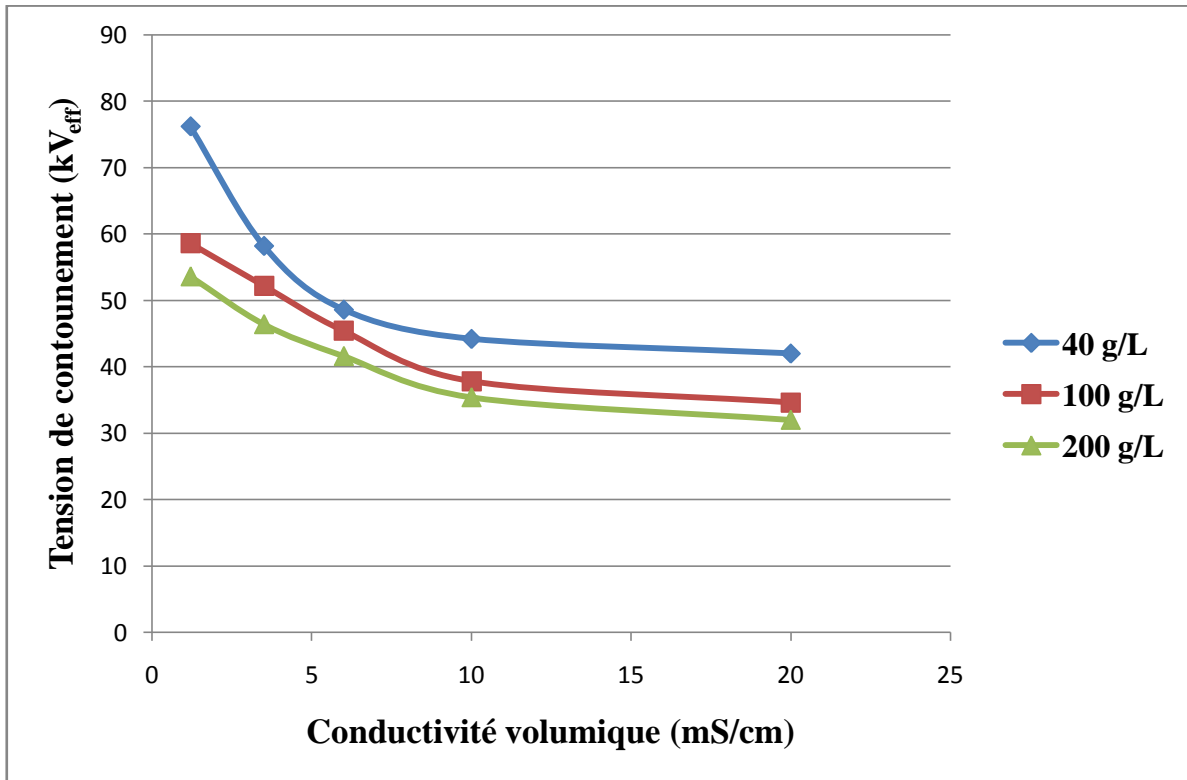
## **IV.3.Etude de la tension de contournement:**

La tension de contournement est un paramètre essentiel pour l'isolateur, elle permet de définir la rigidité diélectrique du système. Dans notre cas, on doit la connaître pour éviter les risques de contournement lors de la mesure des courants de fuite ainsi que la charge électrique pour différents niveaux de la tension appliquée.



### IV.3.1. Tension de contournement pour le cas uniforme:

Dans cette partie nous analysons l'influence de la conductivité et de la concentration en kaolin sur la tension de contournement du modèle plan. Les résultats d'essais pour les différentes conductivités et les concentrations sont représentés sur la (figure IV.1).



**Figure IV.1:** Influence de la conductivité et la concentration en kaolin sur la tension de contournement du modèle plan pour la pollution uniforme.

D'après la figure (IV.1), nous remarquons que la tension de contournement diminue d'une manière non-linéaire en fonction de la conductivité et de la concentration en kaolin ; elle est la plus importante pour la conductivité 1,2 mS/cm, concentration 40 g/l et a tendance à se stabiliser à partir de la conductivité 10 mS/cm pour les différentes concentrations en kaolin.

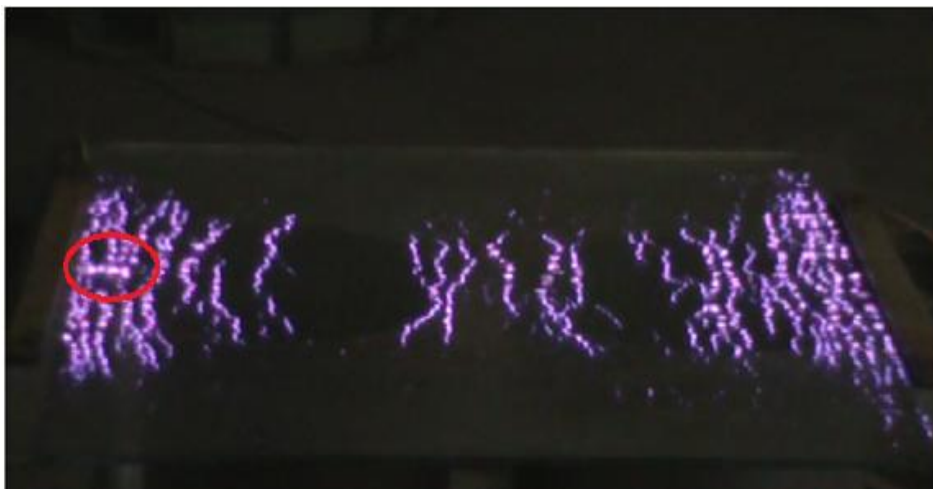
Pour ce type de pollution, nous avons constaté que le contournement se fait sur plusieurs étapes, on remarque d'abord l'apparition des décharges électriques sur la surface du modèle (Figure IV.1.a). Ces décharges ont tendance à s'allonger le long de la surface (Figure IV.1.b.1 et IV.1.b.2). Ce phénomène est accompagné d'une évaporation progressive de la couche de pollution à cause de la chaleur dégagée par effet Joule. Ces décharges sont plus importantes pour les grandes valeurs de la conductivité. Cette étape est suivie par un phénomène remarquable qui est l'apparition d'arcs électriques dans les zones sèches (Figure IV.2.c), ceci est dû à l'augmentation de l'intensité du champ électrique dans ces zones asséchées. Enfin, se produit l'arc final de contournement (Figure. IV.1.d).



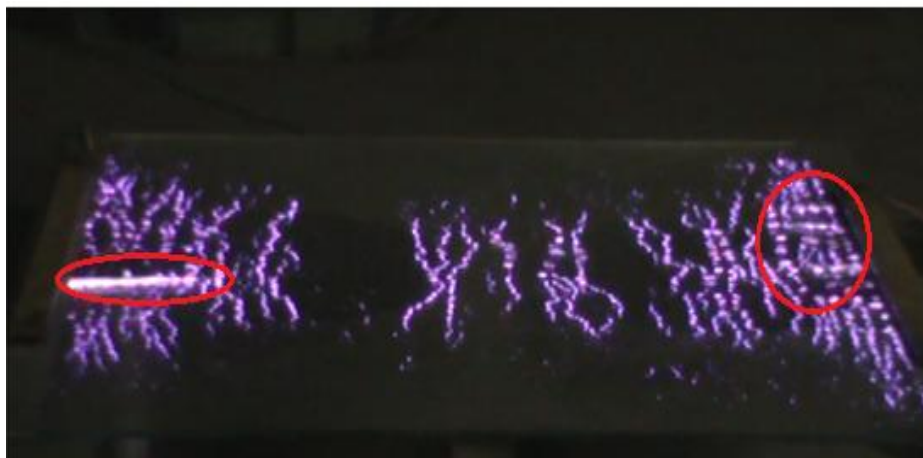
(a)



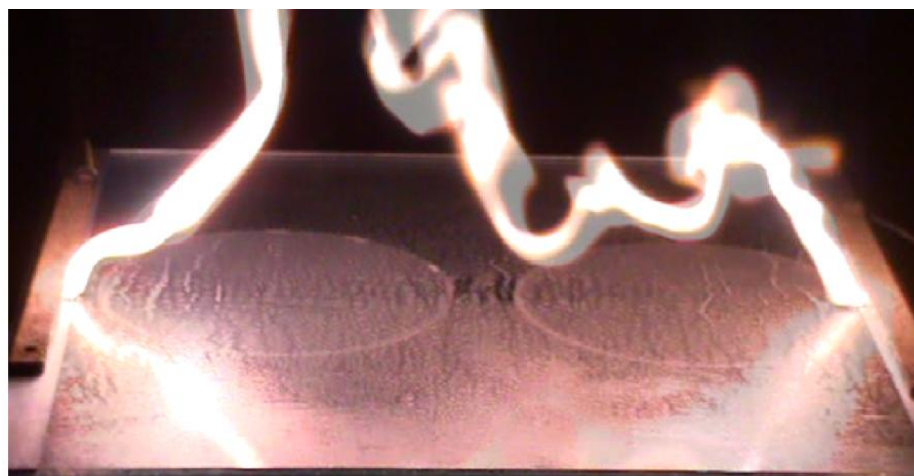
(b.1)



(b.2)



(c)

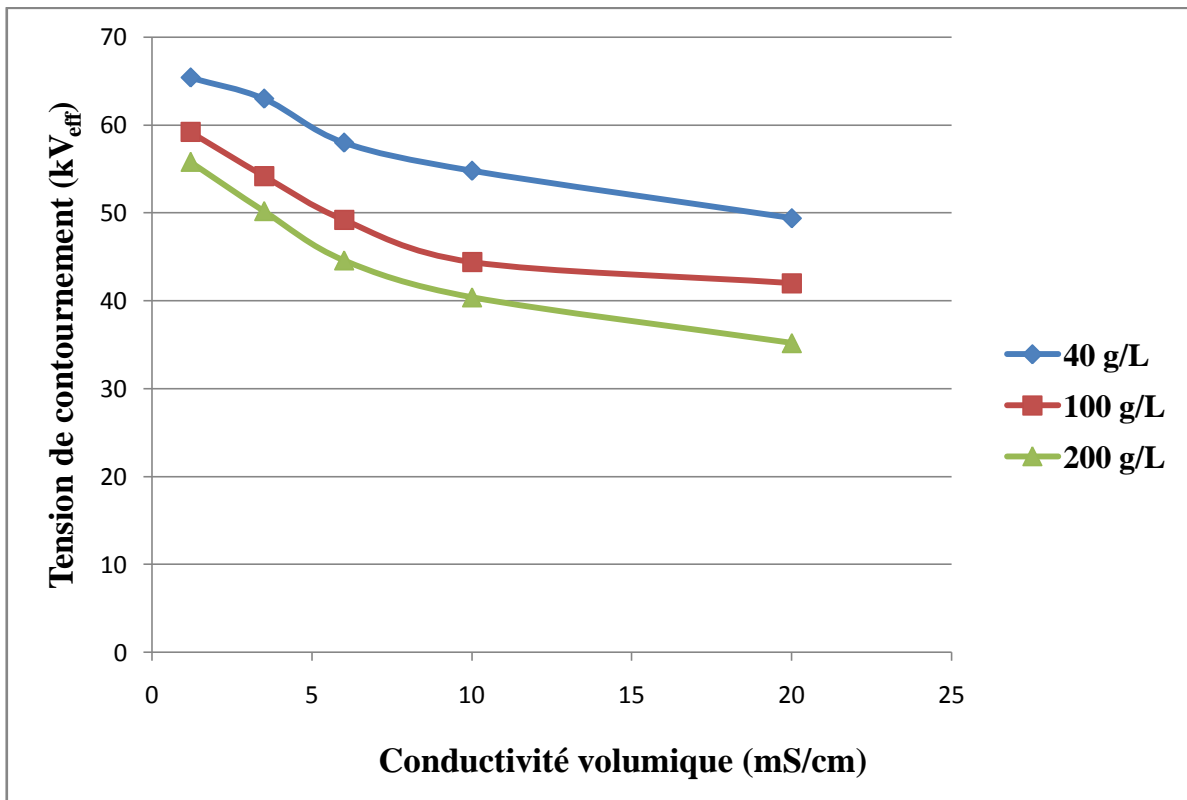


(d)

**Figure IV.2 :** Comportement du model plan dans le cas d'une pollution uniforme ( $\sigma= 1,2$  mS/cm) : (a) niveau de tension 35 kV; (b) niveau de tension 66 kV; (c) tension du contournement 72 kV.

### **IV.3.2. Tension de contournement pour le cas non-uniforme:**

Dans le cas de la pollution non-uniforme, nous étudions l'influence des couches propres sur la tension de contournement du modèle plan. Les résultats obtenus pour les essais de contournement concernant la pollution non-uniforme sont donnés à la figure IV.3.



**Figure IV.3:** Influence de la conductivité et de la concentration en kaolin sur la tension de contournement du modèle plan pour la pollution non-uniforme.

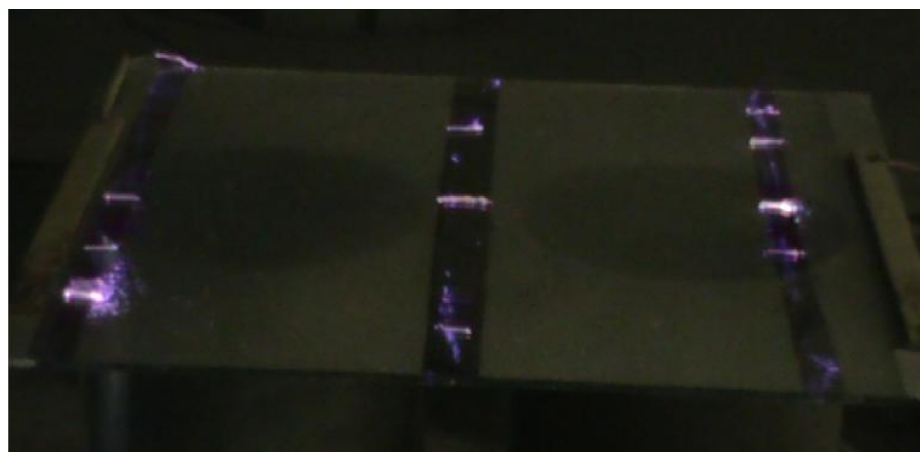
Nous remarquons d'après la Figure (IV.3) que la tension varie d'une manière non linéaire et inversement proportionnelle avec la conductivité volumique et la concentration en kaolin de l'agent polluant.

Le court-circuit a lieu initialement dans les trois zones propres, celle du centre et des cotés terre et de haute tension de la plaque, où on voit clairement l'apparition d'arcs électriques (Figure IV.4.a,b), puis l'apparition de décharges dans la zone humidifiée (Figure IV.4.c,d) accompagnées du même phénomène d'évaporation que pour le cas de la pollution uniforme. L'allongement de ces décharges forme l'arc de contournement et provoque le saut final (Figure IV.4.e).

Pour les petites conductivités et de faible concentration en kaolin, le contournement a lieu directement sans qu'il y ait au préalable apparition des décharges partielles dans les zones humidifiées (Figure IV.5). Ce phénomène peut être expliqué par la largeur de la couche propre qui rend l'impédance de celle-ci très grande devant celle de la couche humidifiée à cause des faibles concentrations.



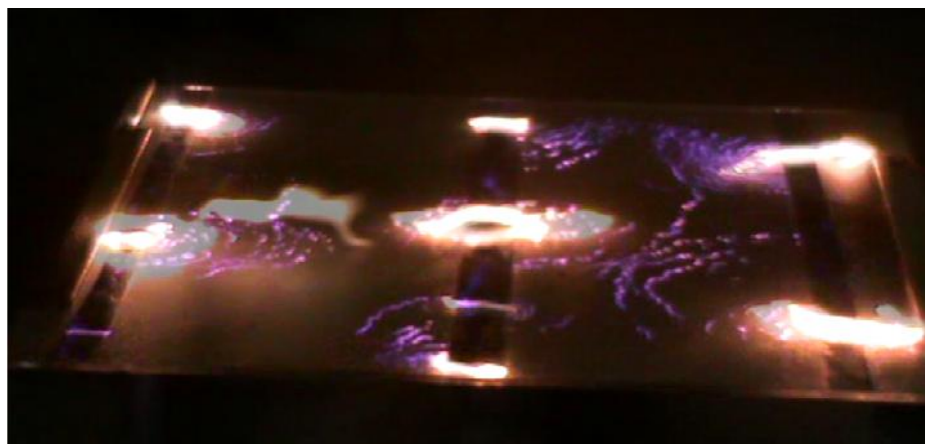
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Figure IV.4 :** Comportement du model plan dans le cas d'une pollution non-uniforme ( $\sigma = 10 \text{ mS/cm}$   $C= 200 \text{ g/l}$ ) : (a) niveau de tension  $15 \text{ kV}_{\text{eff}}$ ; (b) niveau de tension  $25 \text{ kV}_{\text{eff}}$ ; (c) niveau de tension  $30 \text{ kV}_{\text{eff}}$ ; (d) niveau de tension  $35 \text{ kV}_{\text{eff}}$ ; (e) saut final à  $42 \text{ kV}_{\text{eff}}$ .



**Figure IV.5 :** Etapes de Contournement sur le modèle plan dans le cas d'une pollution non-uniforme ( $\sigma = 1.2 \text{ mS/cm}$   $C= 40 \text{ g/l}$ )

### IV.3. Discussion:

Nous concluons d'après cette étude que la tension de contournement diminue d'une façon non linéaire en fonction des deux paramètres principaux qui sont :

- La conductivité du milieu
- La concentration en kaolin.

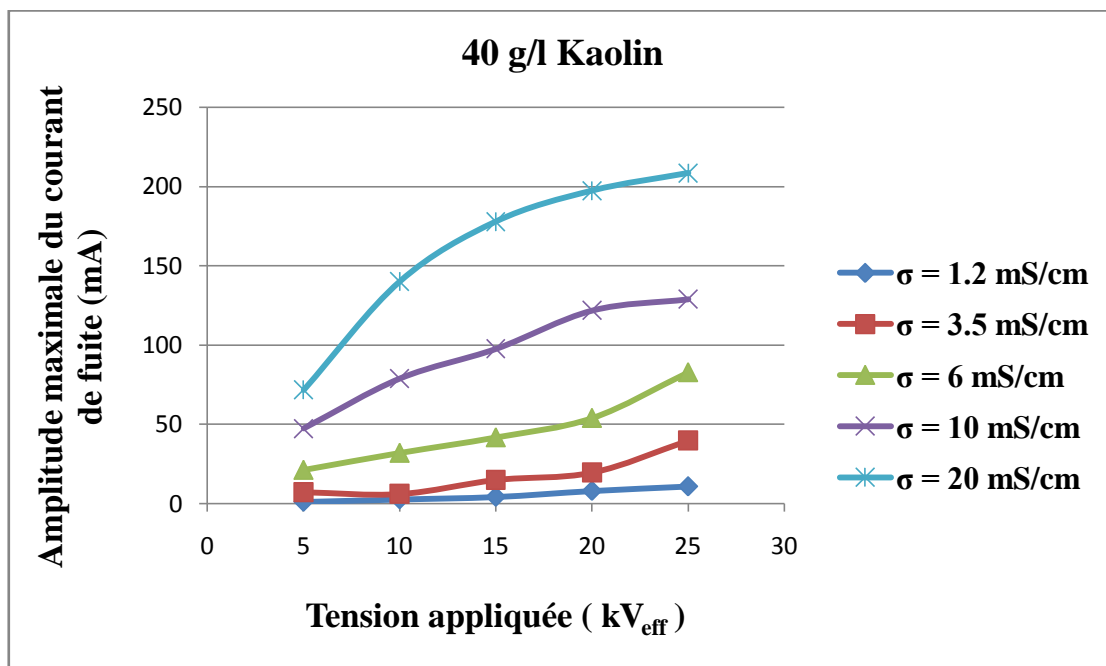
### IV.4. Etude du courant de fuite:

Dans cette partie, on s'intéresse à l'évolution du courant de fuite, qui est un paramètre essentiel pour la prédiction de l'état de surface de l'isolateur.

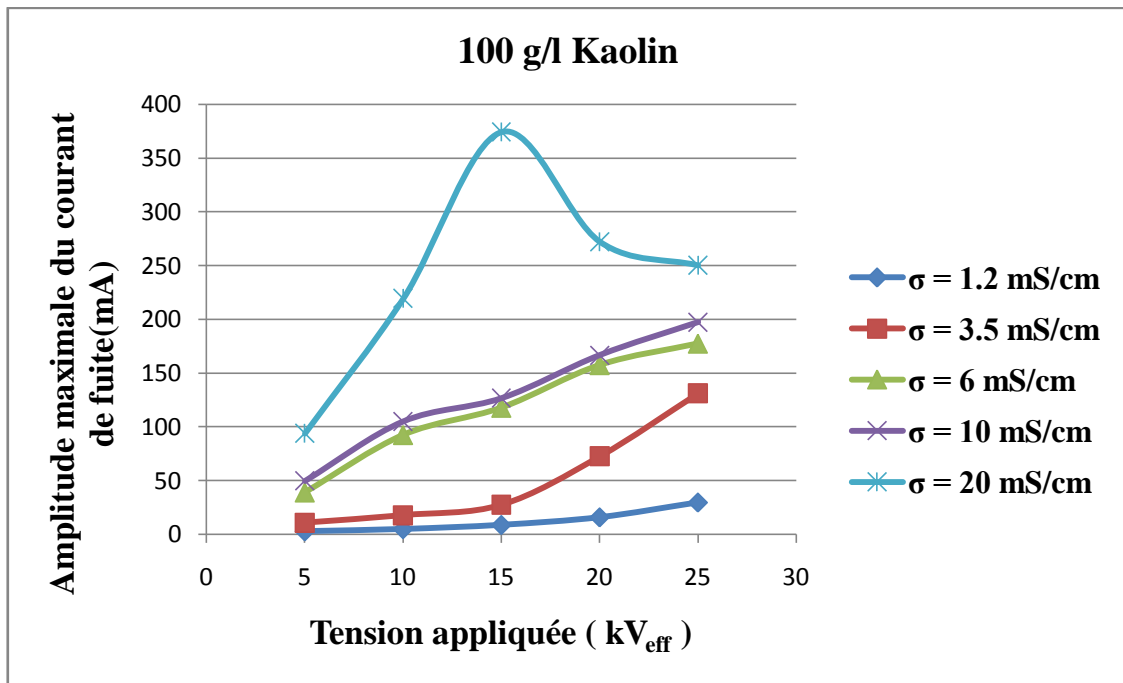
Les tensions de contournement mesurées précédemment nous serviront à fixer le niveau maximal de la tension pour lequel on doit relever le courant de fuite en évitant tout risque de court-circuit, cette tension maximale est prise égale à 60% de la tension de contournement. Nous avons relevé le courant de fuite à l'aide d'un oscilloscope pour 5 niveaux de tension inférieurs à cette tension maximale.

#### IV.4.1. Résultats des essais sous pollution uniforme:

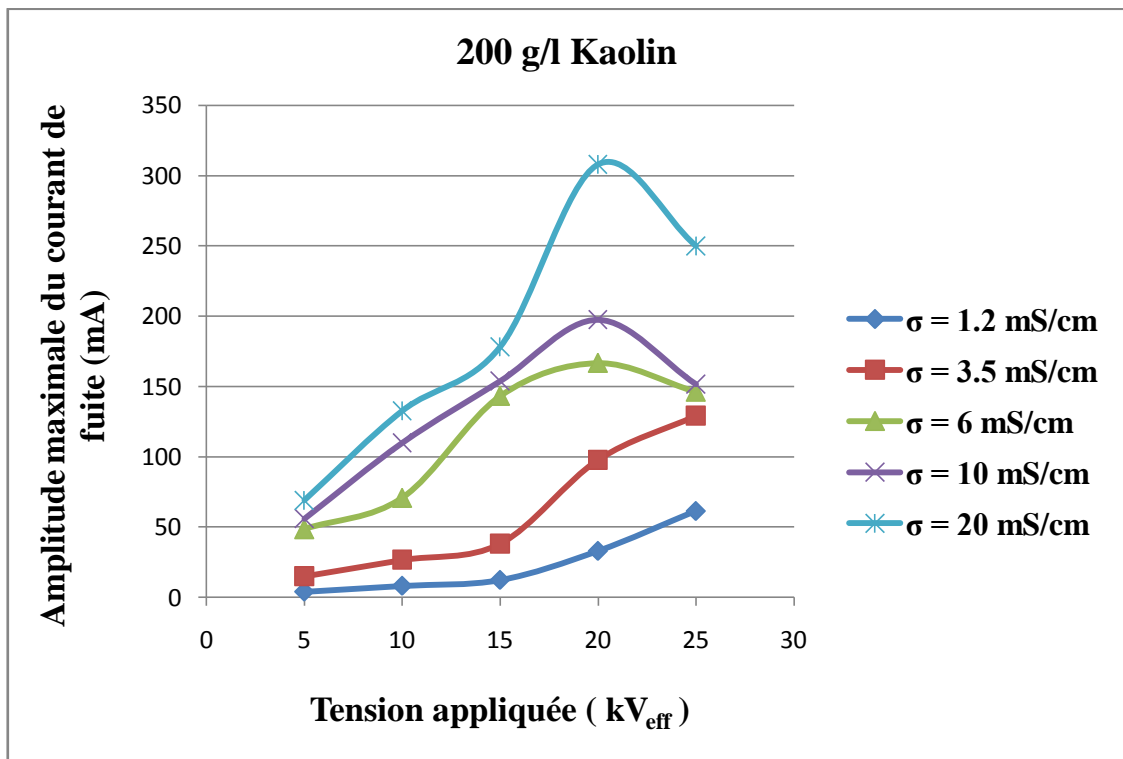
Pour cette pollution, nous mesurons l'amplitude maximale du courant de fuite pour chaque conductivité avec la même concentration en kaolin, et pour plusieurs paliers de tension. Les résultats d'essais sont donnés dans les figures IV.6 à IV.8.



**Figure IV.6:** Variation de la valeur maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités avec une concentration de 40 g/l de kaolin sous pollution uniforme.



**Figure IV.7:** Variation de la valeur maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités avec une concentration de 100 g/l de kaolin sous pollution uniforme.



**Figure IV.8:** Variation de la valeur maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités avec une concentration de 200 g/l de kaolin sous pollution uniforme.



D'après la figure IV.6, nous remarquons que le courant de fuite augmente en fonction de la tension appliquée d'une manière non-linéaire pour toutes les conductivités. Pour la concentration de 40 g/l en kaolin, le courant de fuite augmente de manière progressive car il n'y pas eu d'assèchement important et cela malgré la présence de décharges non localisées à la surface de l'isolateur (à partir de 25 kVeff).

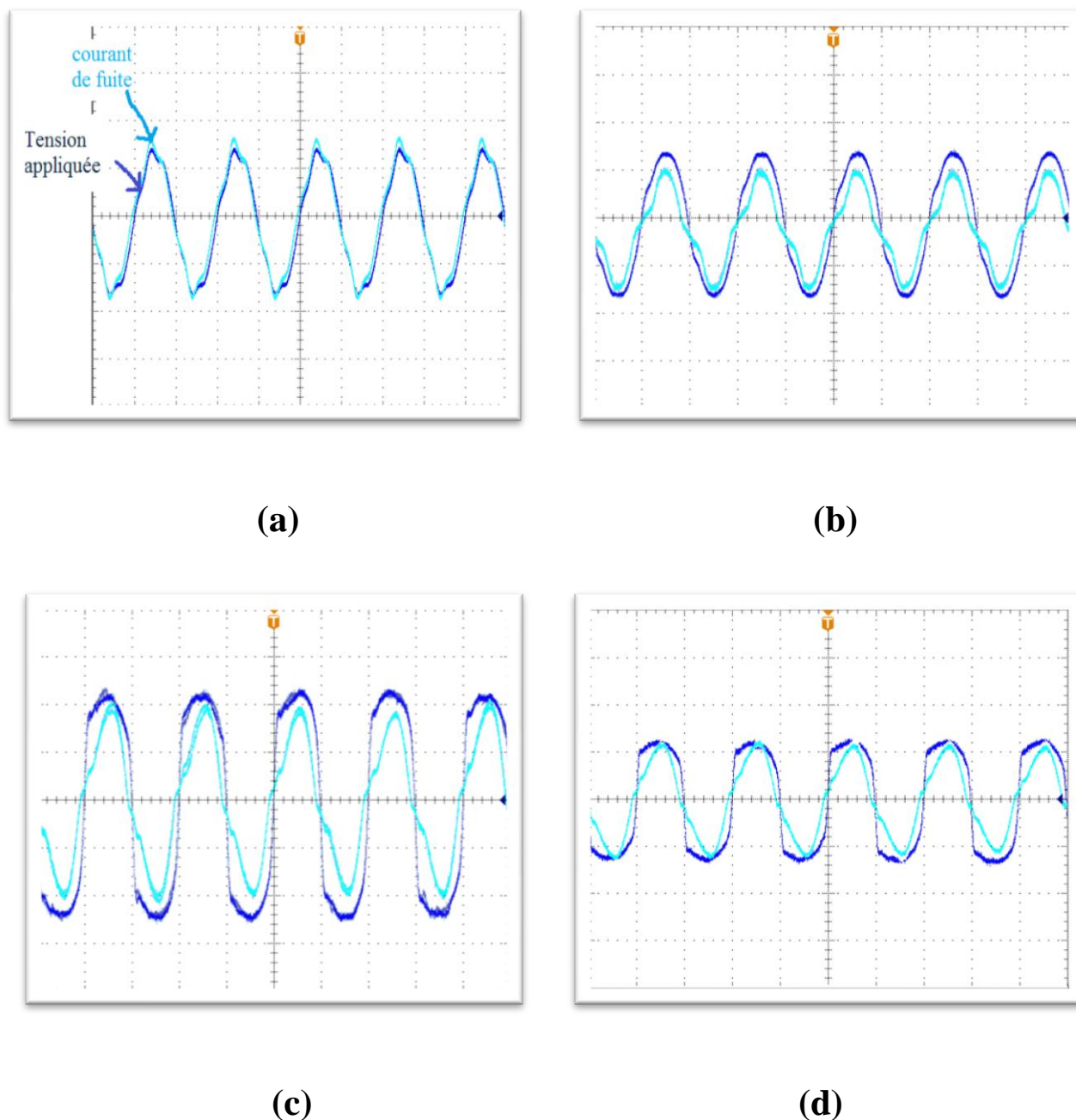
Pour la figure IV.7, nous remarquons que le courant de fuite augmente en fonction de la tension appliquée d'une manière progressive pour les conductivités (1.2, 3.5, 6 et 10 mS/cm), par contre, pour la conductivité 20 mS/cm, nous remarquons une baisse de l'amplitude maximale du courant de fuite à partir de la tension 15kVeff. Cette baisse est très remarquable à cause d'un assèchement beaucoup plus important de la surface isolante (signe d'activité de décharges très développée). Cette baisse peut être expliquée par le temps d'application de la tension pendant lequel l'eau présente à la surface se vaporise petit à petit par effet joule menant à une augmentation de l'impédance équivalente de l'isolateur, ce qui participe à l'augmentation de la rigidité diélectrique du modèle. Ainsi la valeur du champ électrique dans ces zones sèches devient trop faible pour engendrer des décharges électriques, ce qui réduit de manière importante le courant de fuite.

D'après les résultats obtenus dans la figure IV.8, nous remarquons que le courant de fuite augmente en fonction de la tension appliquée d'une manière progressive pour les petites conductivités (1.2 et 3.5mS/cm), pour les grandes conductivités volumiques (6,10 et 20 mS/cm), le comportement des décharges électriques diffère des conductivités précédentes. En réalité, l'amplitude maximale du courant de fuite est la plus élevée et commence à baisser à partir de 20 kVeff puisque des décharges continuent d'avoir lieu à la surface de l'isolateur. Cette activité permanente des décharges électriques provient du champ électrique très élevé dans la triple jonction air-isolant-électrolyte qui favorise leur initiation pour de très faibles niveaux de tension, et donc participe à l'augmentation de l'amplitude du courant de fuite car l'impédance équivalente du milieu est la plus faible.

#### IV.4.2 Visualisation des signaux :

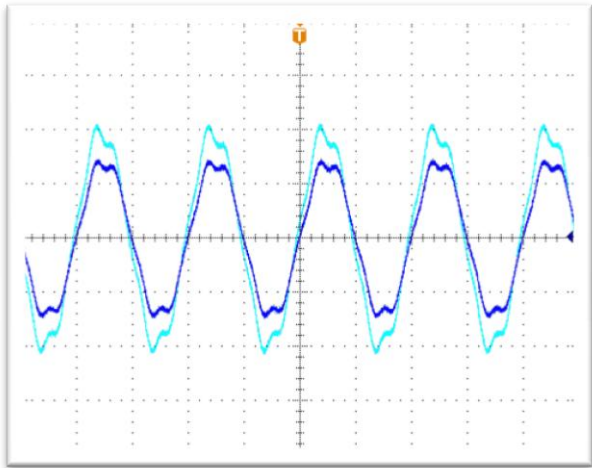
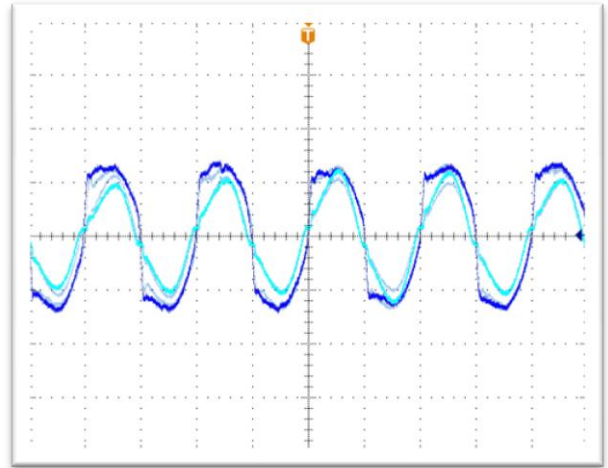
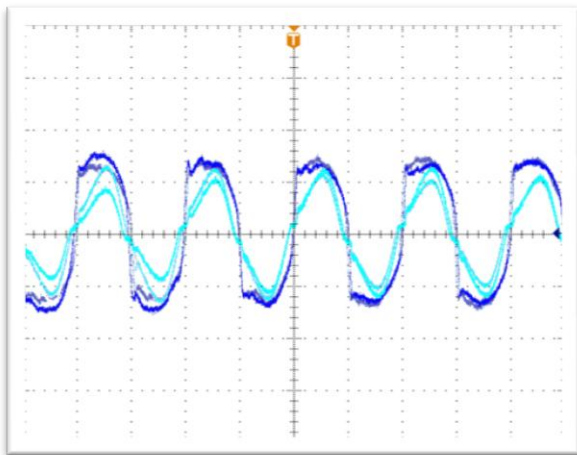
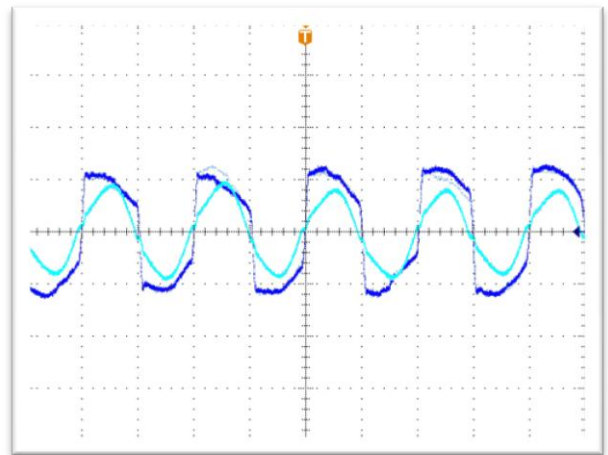
Les formes d'ondes du courant de fuite et de la tension appliquée pour la pollution uniforme sont montrées pour les différentes conductivités volumiques et les concentrations distinctes en kaolin pour un niveau de tension de  $20\text{kV}_{\text{eff}}$ .

##### Les signaux pour 40 g/l



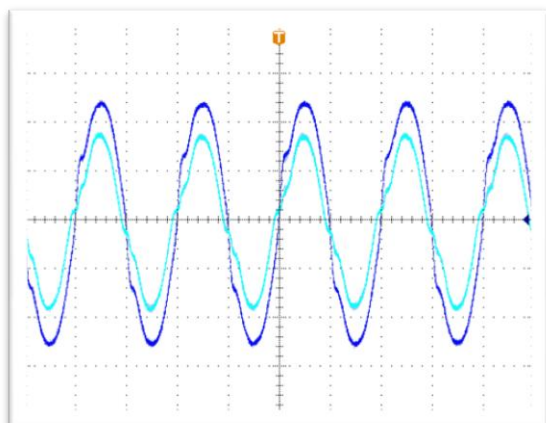
**Figure IV.9 :** Les signaux de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec le même niveau de la tension appliquée :  $U_{\text{eff}} = 20\text{ kV}$ .

(a) :  $\sigma = 1,2\text{ mS/cm}$  (b) :  $\sigma = 6\text{ mS/cm}$  (c) :  $\sigma = 10\text{ mS/cm}$  (d) :  $\sigma = 20\text{ mS/cm}$

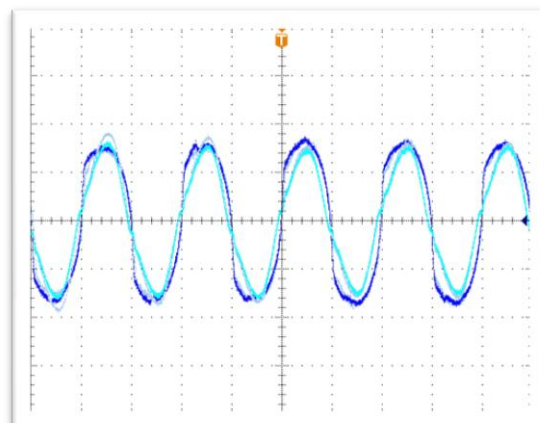
**Les signaux pour 100 g/l****(a)****(b)****(c)****(d)**

**Figure IV.10 :** Les signaux de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec le même niveau de la tension appliquée :  $U_{\text{eff}} = 20 \text{ kV}$ .

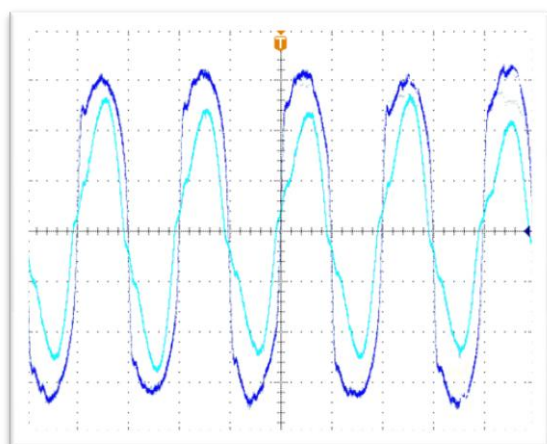
(a) :  $\sigma = 1,2 \text{ mS/cm}$  (b) :  $\sigma = 6 \text{ mS/cm}$  (c) :  $\sigma = 10 \text{ mS/cm}$  (d) :  $\sigma = 20 \text{ mS/cm}$

**Les signaux pour 200 g/l**

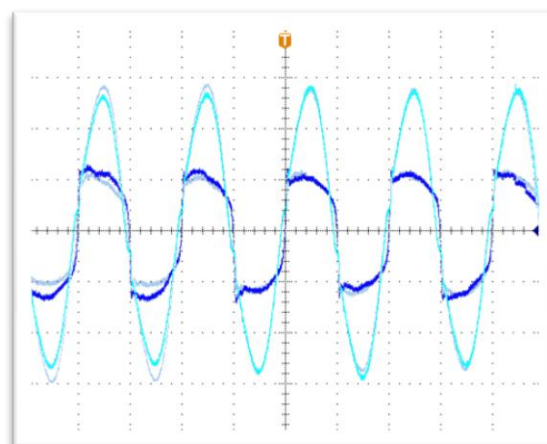
(a)



(b)



(c)



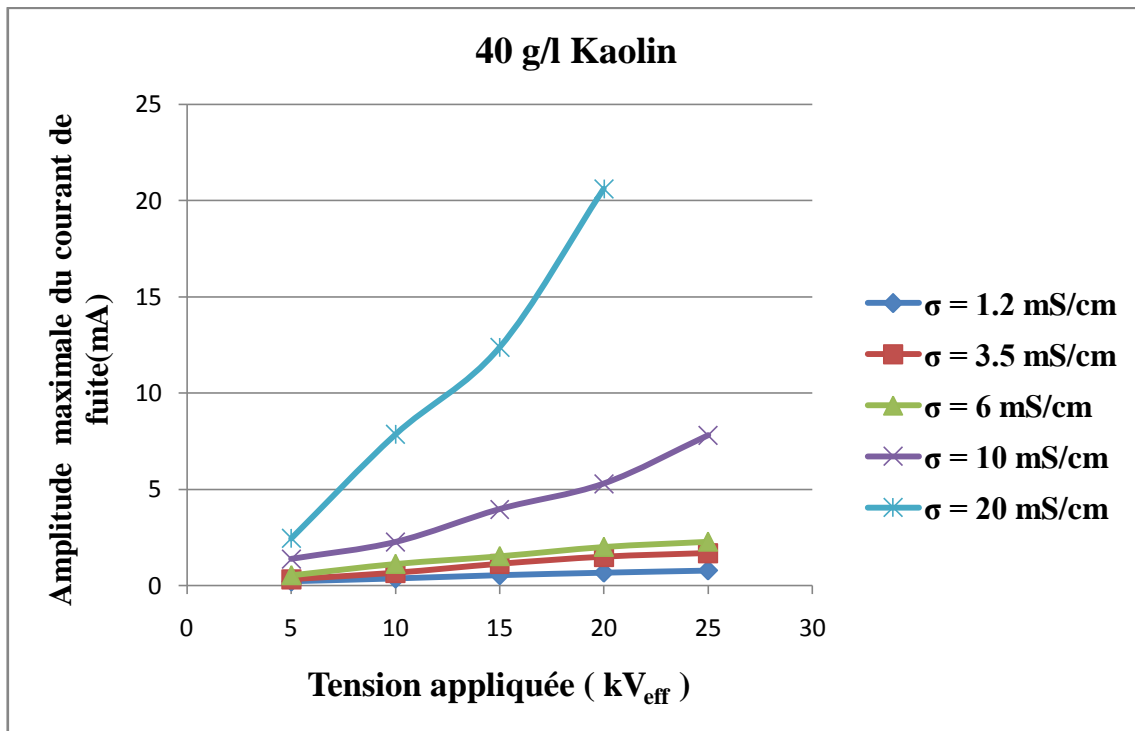
(d)

**Figure IV.10 :** Les signaux de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec le même niveau de la tension appliquée :  $U_{\text{eff}} = 20 \text{ kV}$ .

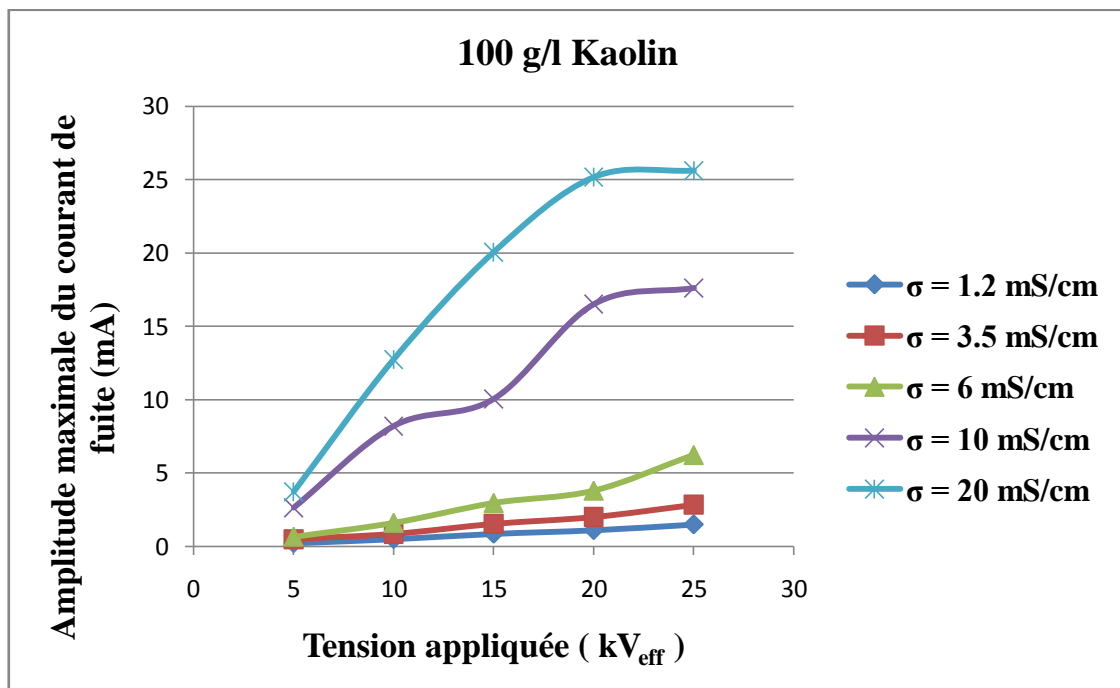
(a) :  $\sigma = 1,2 \text{ mS/cm}$  (b) :  $\sigma = 6 \text{ mS/cm}$  (c) :  $\sigma = 10 \text{ mS/cm}$  (d) :  $\sigma = 20 \text{ mS/cm}$

**IV.4.3. Résultats des essais sous pollution non-uniforme:**

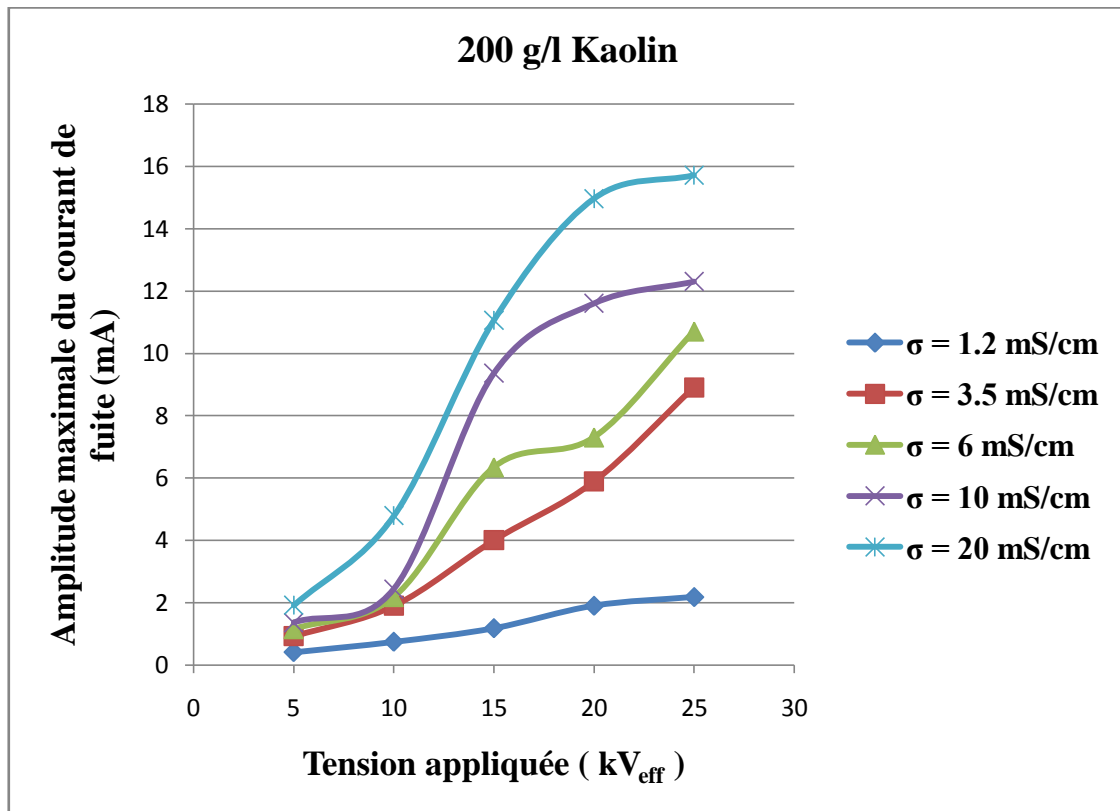
Pour le cas de la pollution non-uniforme, nous avons mesuré les valeurs maximales du courant de fuite pour différents niveaux de la tension appliquée et pour plusieurs conductivités volumiques, et différentes concentrations en kaolin. Les résultats sont montrés dans les figures IV.11 à IV.13.



**Figure IV.11:** Valeurs maximales du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités avec une concentration de 40 g/l en kaolin sous pollution non-uniforme.



**Figure IV.12:** Valeurs maximales du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités avec une concentration de 100g/l en kaolin sous pollution non-uniforme.



**Figure IV.13:** Valeurs maximales du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités avec une concentration de 200g/l en kaolin sous pollution non-uniforme.

D'après les figures IV.11 à IV.13 nous remarquons que le courant de fuite augmente en fonction de la tension appliquée de manière non-linéaire pour toutes les conductivités étudiées et pour les différentes concentrations de kaolin (40, 100, 200) g/l.

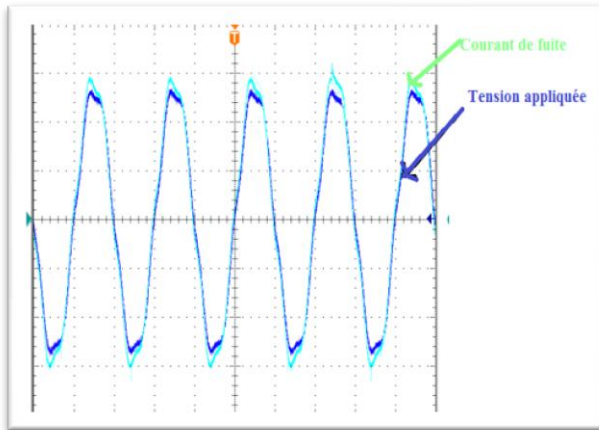
Pour les conductivités volumiques (1.2, 3.5, 6) mS/cm et des concentrations (40,100) g/l de kaolin, on constate que l'augmentation des courants de fuite est relativement faible à cause des faibles conductivités. Par contre pour 10 et 20 mS/cm, pour 40 g/l de kaolin, le courant augmente d'une manière remarquable due à la grande conductivité volumique qui court-circuite les zones sèches ceci induit une augmentation énorme de l'amplitude maximale du courant de fuite et il n'y pas eu d'assèchement important car les décharges dans les zones humidifiées apparaissent juste avant le claquage. Mais à partir des grands paliers des tensions appliquées 20 et 25 kV<sub>eff</sub> le courant commence à se stabiliser à cause de l'effet de saturation comme dans le cas d'une concentration de 100 g/l.

L'augmentation subite du courant de fuite pour 200 g/l notamment à partir de la conductivité 3.5 mS/cm et 10 kV<sub>eff</sub> de tension appliquée est causée par les décharges parallèles qui court-circuitent les intervalles d'air existant entre les zones sèches (les extrémités de la couche polluée) et chaque électrode et diminue visiblement l'impédance équivalente du modèle.

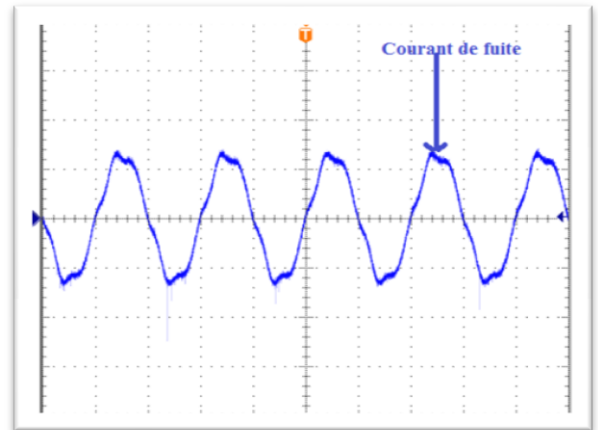
#### IV.4.4. Visualisation des signaux:

Les formes d'ondes du courant de fuite et de la tension appliquée pour la pollution non-uniforme sont montrées pour les différentes conductivités volumiques et les concentrations distinctes en kaolin pour un niveau de tension de  $20\text{kV}_{\text{eff}}$ .

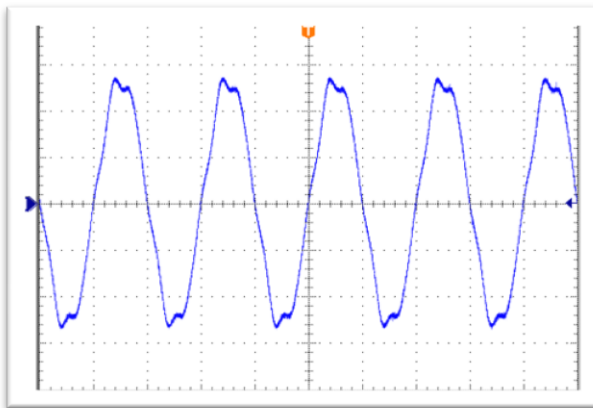
##### Les signaux pour 40 g/l :



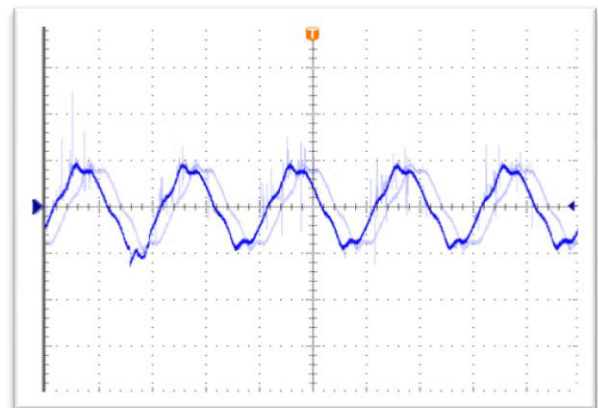
(a)



(b)



(c)



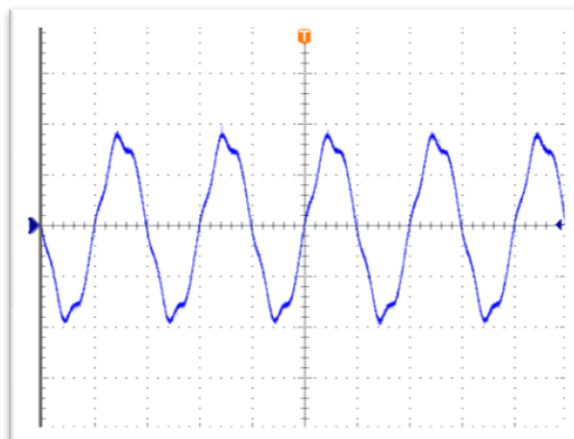
(d)

**Figure IV.14 :** Les signaux du courant de fuite pour différentes conductivités avec le même niveau de la tension appliquée :  $U_{\text{app}} = 20\text{ kV}$ .

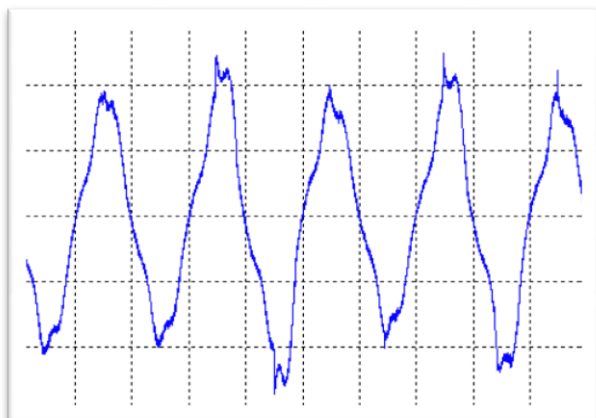
(a):  $\sigma = 1.2\text{ mS/cm}$  (b):  $\sigma = 6\text{ mS/cm}$  (c):  $\sigma = 10\text{ mS/cm}$  (d):  $\sigma = 20\text{ mS/cm}$

**Les signaux pour 100 g/l :**

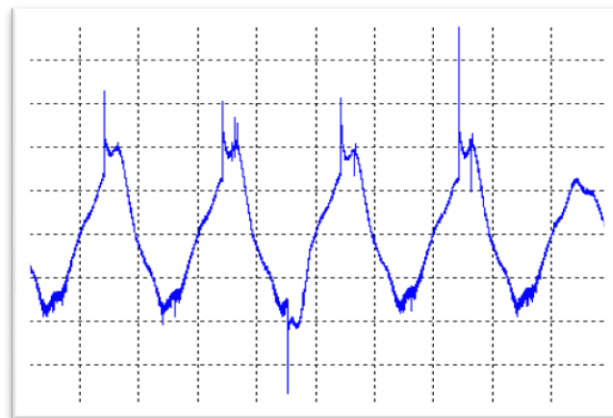
(a)



(b)



(c)

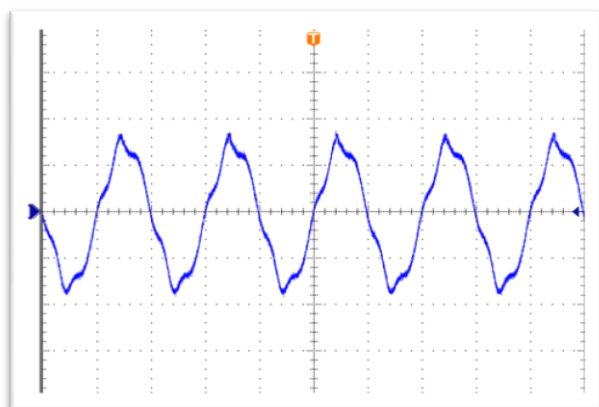


(d)

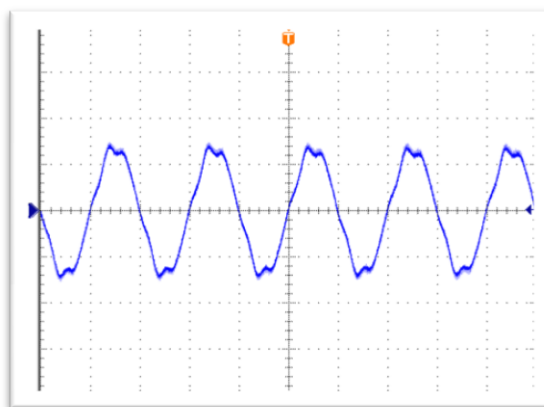
**Figure IV.15 :** Les signaux du courant de fuite pour différentes conductivités avec le même niveau de la tension appliquée :  $U_{app} = 20$  kV.

(a):  $\sigma = 1.2$  mS/cm (b):  $\sigma = 6$  mS/cm (c):  $\sigma = 10$  mS/cm (d):  $\sigma = 20$  mS/cm

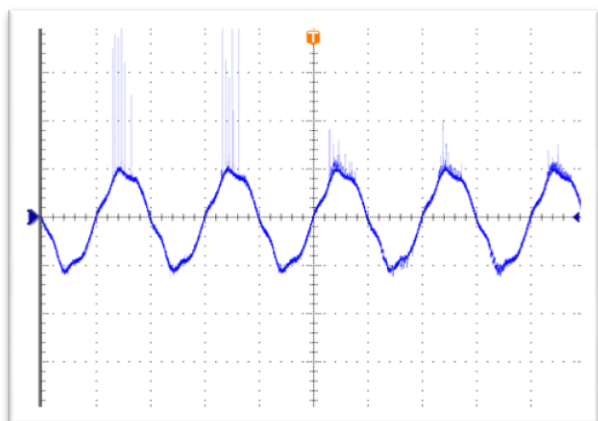


**Les signaux pour 200 g/l :**

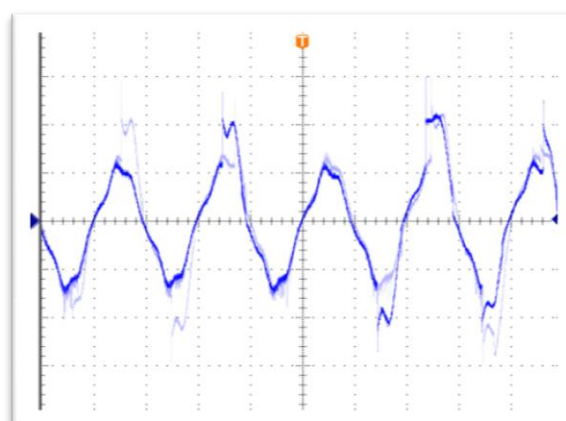
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure IV.16:** Les signaux du courant de fuite pour différentes conductivités avec le même niveau de la tension appliquée :  $U_{app} = 20$  kV.

(a):  $\sigma = 1.2$  mS/cm (b):  $\sigma = 6$  mS/cm (c):  $\sigma = 10$  mS/cm (d):  $\sigma = 20$  mS/cm.

#### **IV.4.5. Discussion :**

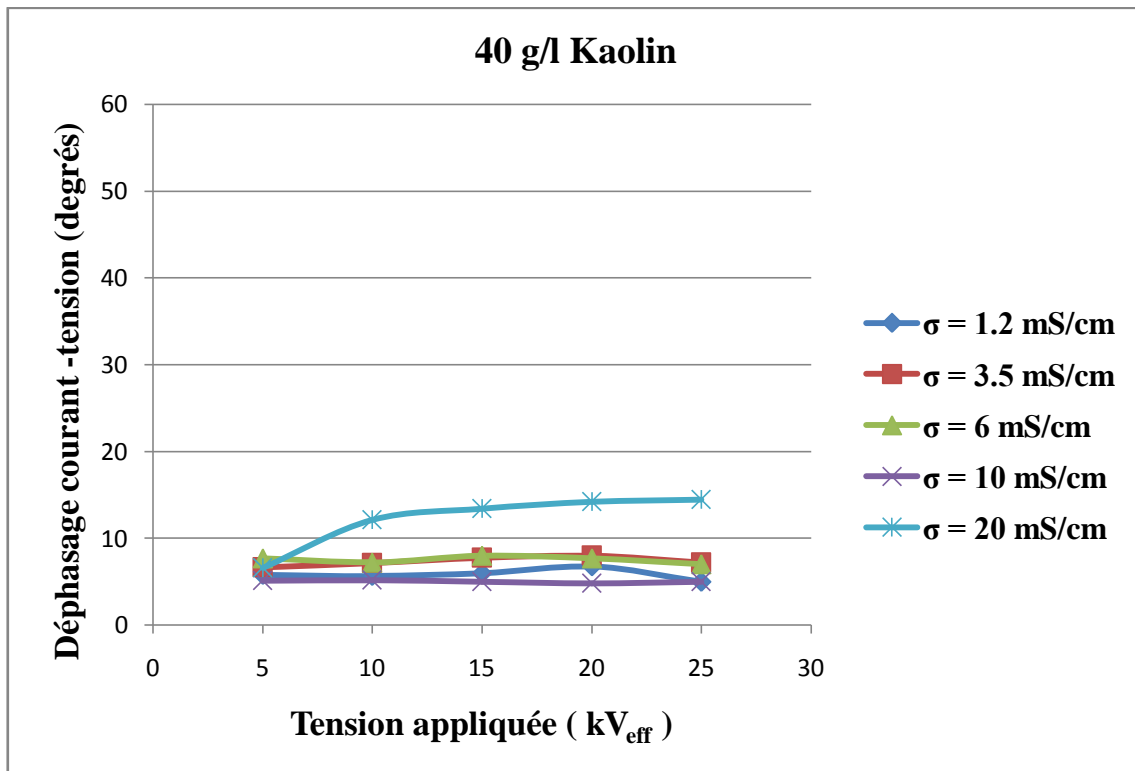
L'analyse du courant de fuite nous permet de conclure que l'amplitude de celui-ci augmente en fonction de la tension appliquée, de la conductivité de l'agent polluant et sa concentration en kaolin.

La diminution de la largeur de la couche polluée « pollution non-uniforme » du modèle plan fait diminuer l'amplitude du courant de fuite par rapport à la pollution continue.

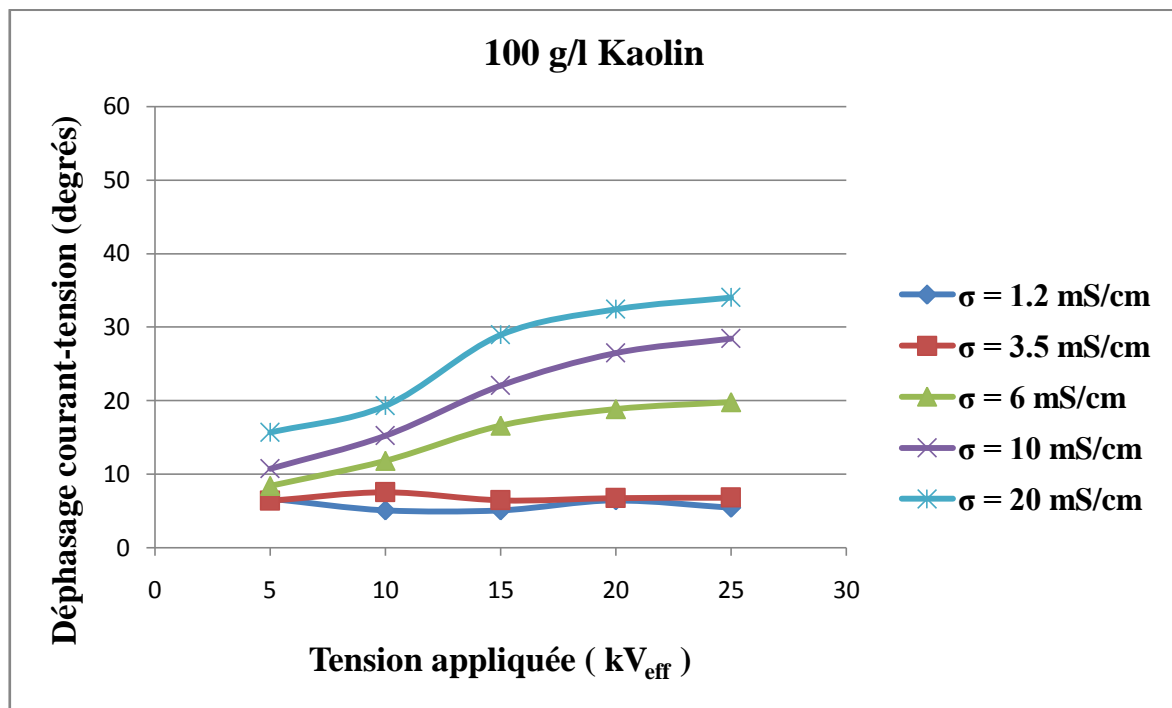
Nous constatons pour le cas uniforme que l'apparition des décharges parallèles contribue à la diminution du courant de fuite pour la conductivité 20 mS/cm et pour une concentration de kaolin de 100 g/l et pour les conductivités (6,10 et 20) mS/cm, pour la concentration de kaolin de 200g/l, à cause de l'assèchement progressif de certaines zones du modèle plan. Cet assèchement est plus rapide pour la conductivité 20 mS/cm et pour les différentes concentrations en kaolin qui représente un cas de pollution extrême mais ne contribue pas pour autant à diminuer l'amplitude maximale du courant de fuite. Pour la pollution non-uniforme, la formation des décharges parallèles dans les intervalles d'air entre la couche polluée et les électrodes se fait juste avant le contournement, pour cela on ne remarque pas la diminution de la valeur maximale du courant de fuite. Ces décharges augmentent la valeur du courant de fuite à la surface de l'isolateur conduisant à un contournement très probable.

#### **IV.5. Analyse du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée sous pollution uniforme:**

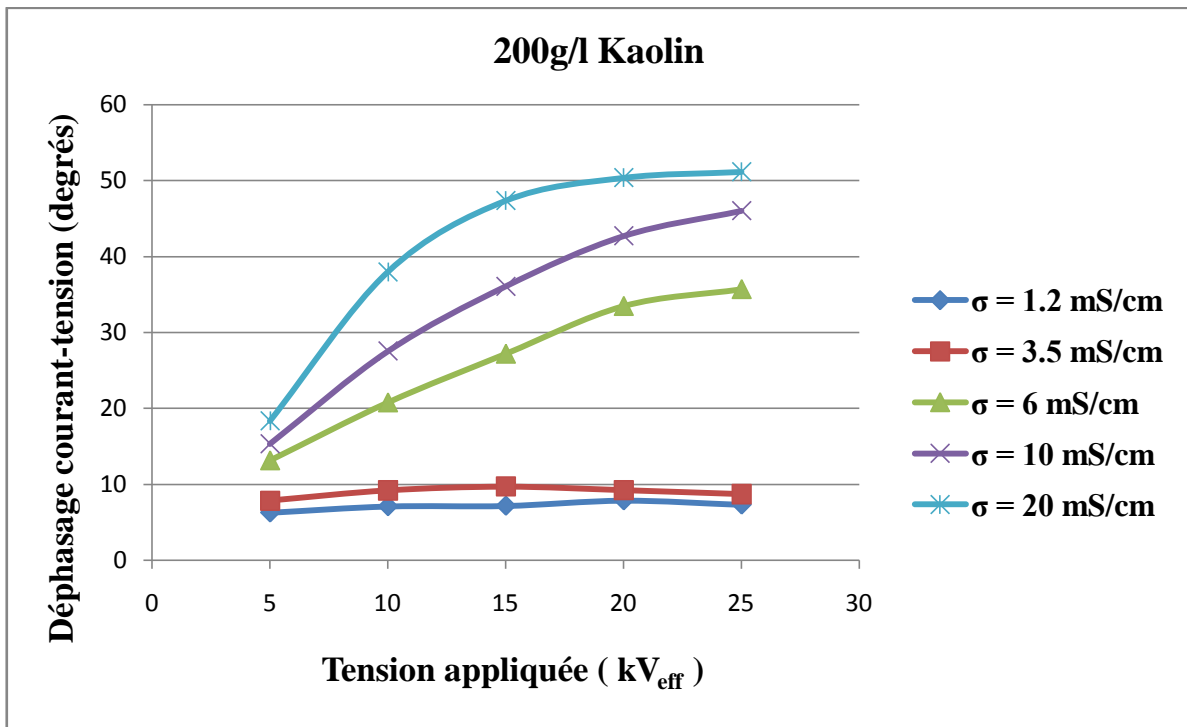
La détermination du déphasage entre le courant de fuite et la tension appliquée est indispensable pour comprendre l'attitude adoptée par le circuit équivalent de l'isolateur. Ceci nous a permis d'étudier l'influence de la tension appliquée, de la conductivité et de la concentration en kaolin de l'agent polluant sur le déphasage, pour le cas de la pollution uniforme. Les résultats obtenus à partir des essais effectués sur le modèle plan sont représentés sur les figures IV.17 à IV.19.



**Figure IV.17:** Variation du déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités avec une concentration en kaolin de 40g/l sous pollution uniforme.



**Figure IV.18:** Variation du déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités avec une concentration en kaolin de 100 g/l sous pollution uniforme.



**Figure IV.19:** Variation du déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités avec une concentration en kaolin de 200 g/l sous pollution uniforme.

D'après la figure IV.17, pour une concentration de 40g/l de kaolin, nous remarquons que le déphasage (courant-tension) a tendance à diminuer avec l'augmentation de la conductivité du milieu et cela pour 1,2 mS/cm, 3,5 mS/cm, 6 mS/cm et 10 mS/cm quelle que soit la tension appliquée. Ceci nous indique que le comportement de l'isolateur est en grande partie résistif avec un très léger effet capacitif. Pour la conductivité 20 mS/cm, nous constatons que la valeur du déphasage (courant-tension) est plus importante par rapport aux autres conductivités. Ceci montre qu'à partir de la tension 5 kV<sub>eff</sub>, l'activité des décharges est déjà importante, causant l'augmentation des zones sèches sous l'effet de l'augmentation de la température. Cette activité prend de l'ampleur avec l'augmentation de la tension appliquée créant d'avantage de zones sèches qui font augmenter l'effet capacitif et donc diminuer l'effet résistif de la couche polluée.

Pour la figure IV.18, pour une concentration de 100g/l de kaolin, nous remarquons que le déphasage (courant de fuite- tension appliquée) a tendance à diminuer avec l'augmentation de la conductivité du milieu et cela pour 1,2 mS/cm et 3,5 mS/cm quelle que soit la tension appliquée. Le comportement de l'isolateur est en grande partie résistif, le déphasage devient inférieur à 10°. Pour les conductivités 6 mS/cm, 10 mS/cm et 20 mS/cm, nous constatons qu'il y a une augmentation du déphasage courant-tension lorsqu'on atteint  $U_{app} = 15 \text{ kV}_{eff}$ . Cette augmentation est due à l'activité des décharges qui devient très importante causant l'assèchement de certaines zones du plan qui ont pour effet d'augmenter l'effet capacitif de l'isolateur.

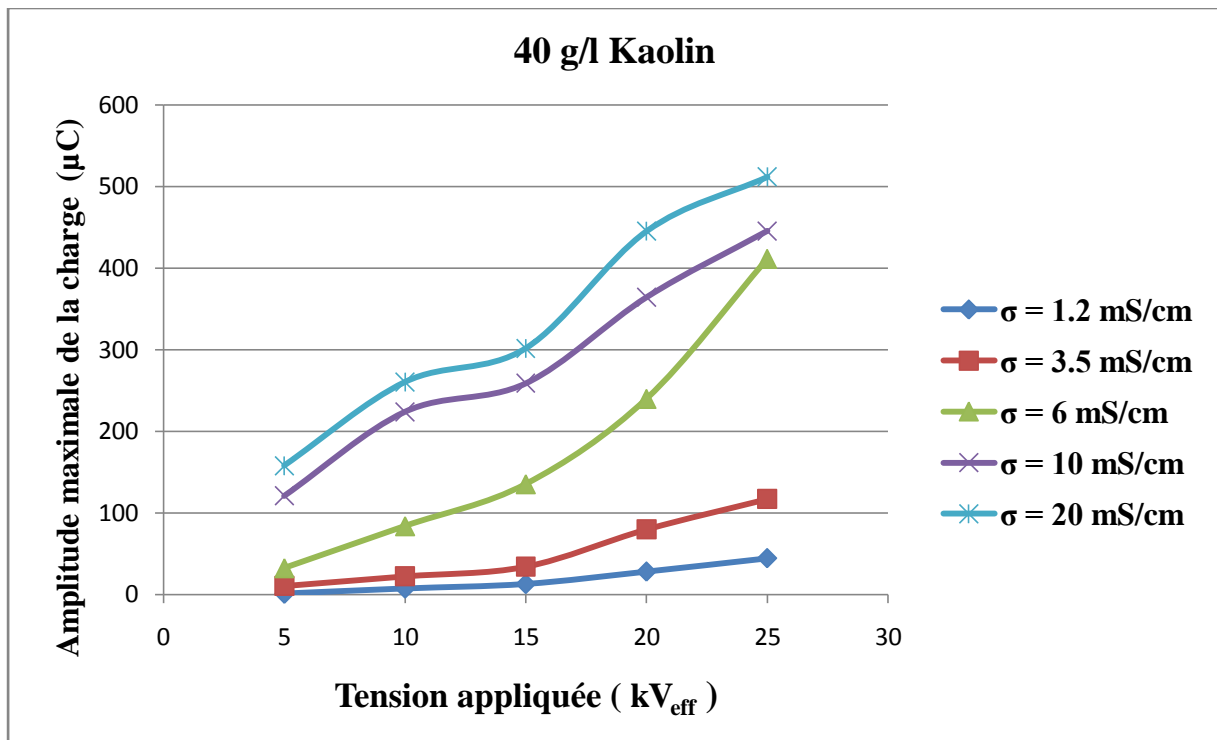
D'après les résultats obtenus dans la figure IV.19, pour la concentration de 200g/l en kaolin, nous remarquons que le déphasage (courant-tension) a tendance à diminuer avec l'augmentation de la conductivité du milieu et cela pour 1,2 mS/cm et 3,5 mS/cm quelle que soit la tension appliquée. Ceci nous indique que le comportement de l'isolateur est en grande partie résistif avec un très léger effet capacitif. Pour les conductivités 6 mS/cm, 10 mS/cm et 20 mS/cm, nous constatons que la valeur du déphasage (courant-tension) est plus importante par rapport aux autres conductivités. Ceci montre qu'à partir de la tension 10 kV<sub>eff</sub>, l'activité des décharges est déjà importante, l'effet capacitif s'intensifie sur le modèle de l'isolateur.

## IV.6. Etude de la charge électrique:

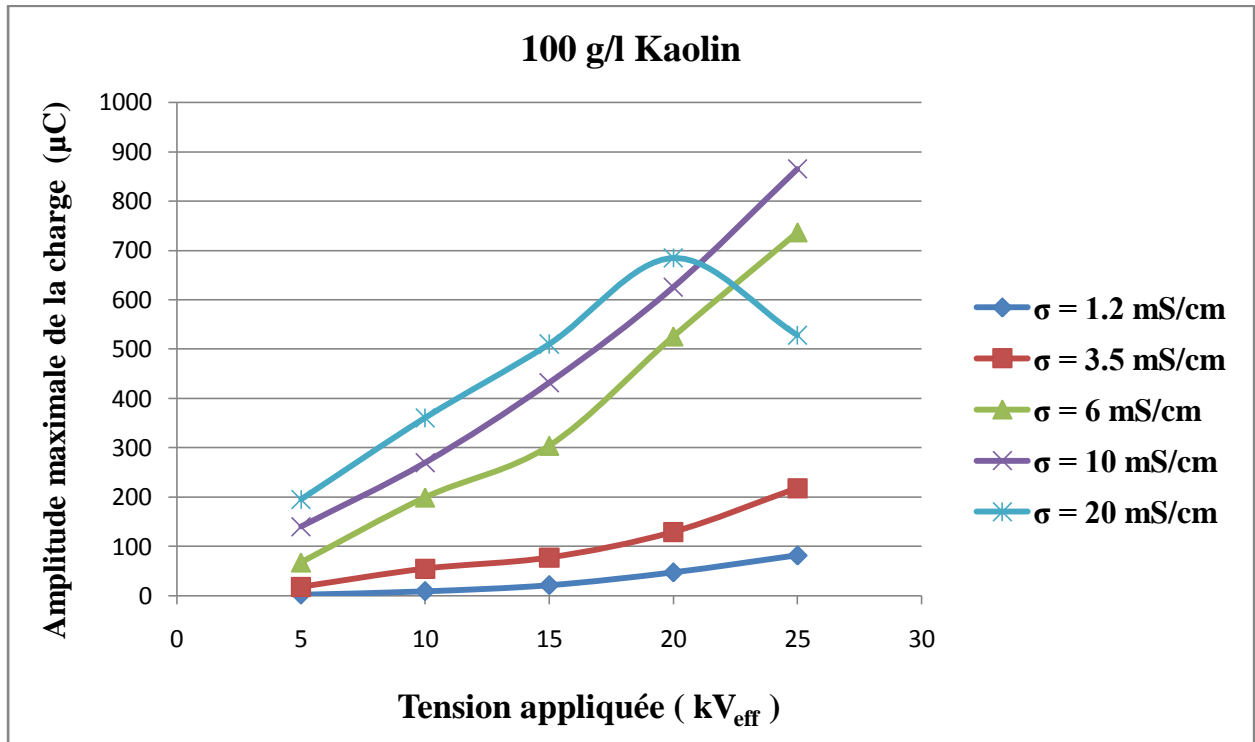
Afin de mettre en évidence l'influence de la conductivité et de la concentration en kaolin. De la couche polluée, plusieurs essais ont été effectués pour plusieurs niveaux de tensions afin déterminer la charge électrique qui est l'un des paramètres important pour connaître l'énergie dissipée sur le modèle de l'isolateur. A l'aide de l'oscilloscope, nous mesurons l'amplitude maximale de la charge électrique.

### IV.6.1. Résultats des essais sous pollution uniforme:

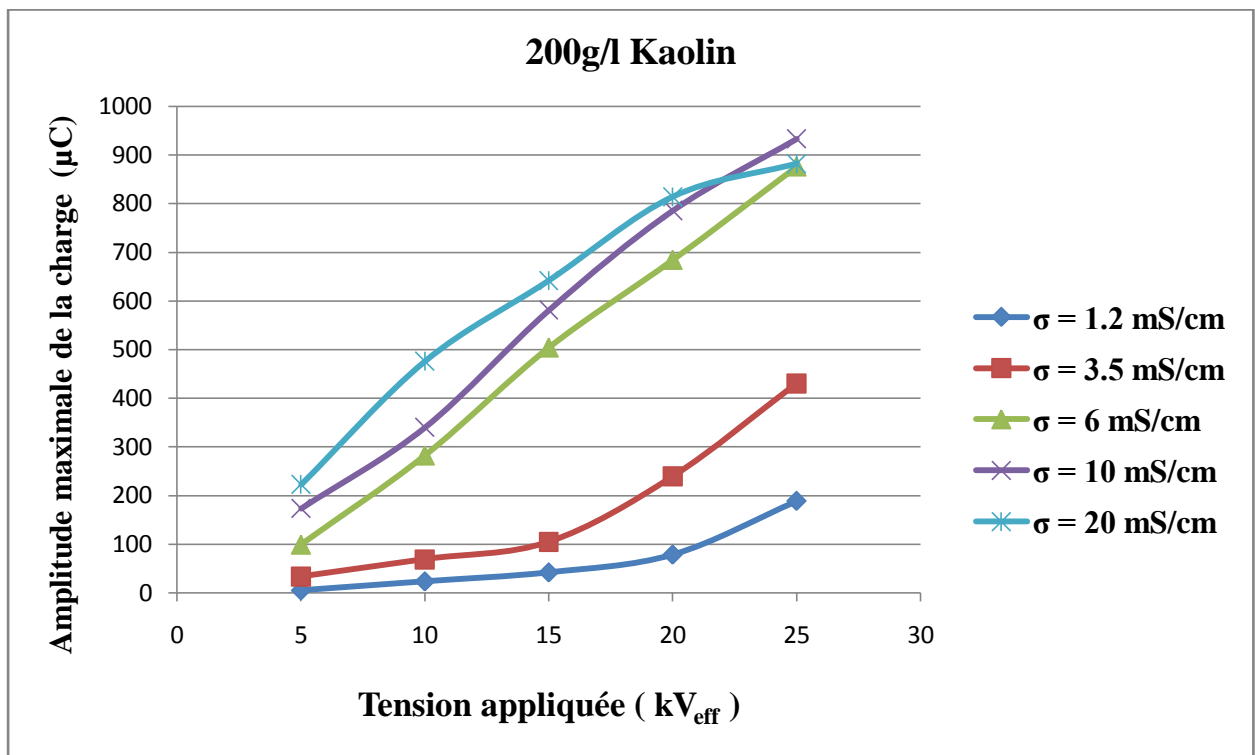
Dan ce cas, et à l'aide de l'oscilloscope, nous mesurons l'amplitude maximale de la charge électrique, pour chaque conductivité avec la même concentration de kaolin et pour plusieurs paliers de tension. Les résultats d'essais sont montrés dans les figures IV.23 à IV.25.



**Figure IV.20:** Variation de la valeur maximale de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités avec une concentration de 40 g/l sous pollution uniforme.



**Figure IV.21:** Variation de la valeur maximale de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités avec une concentration de 100 g/l sous pollution uniforme.



**Figure IV.22:** Variation de la valeur maximale de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités avec une concentration de 200 g/l sous pollution uniforme.

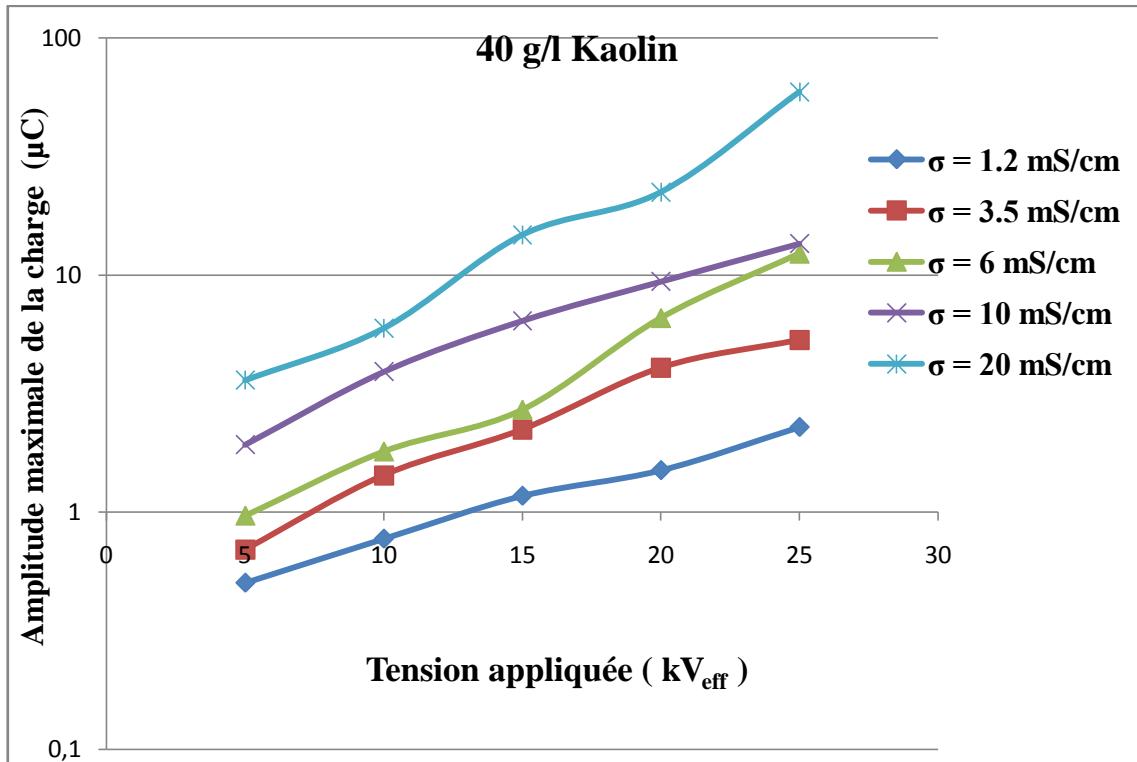
D'après la Figure (IV.20), nous constatons que la charge électrique augmente d'une manière non linéaire en fonction de la tension appliquée pour les différentes conductivités utilisées. Pour la concentration de 40 g/l en kaolin, la charge électrique augmente de manière progressive car il n'y pas eu d'assèchement important et cela malgré la présence de décharges non localisées à la surface de l'isolateur (à partir de 25 kVeff).

Pour la Figure (IV.21), les résultats expérimentaux montrent, comme dans le cas précédent, une augmentation de la charge électrique en fonction de la conductivité de la couche polluée avec une concentration 100 g/l de kaolin et l'augmentation du niveau de tension appliqué. Par contre pour la conductivité 20 mS/cm, nous remarquons une baisse de l'amplitude maximale de la charge électrique à partir de la tension 20k Veff. Cette baisse est très remarquable à cause d'un assèchement beaucoup plus important de la surface isolante (signe d'activité de décharges très développée). Cette baisse peut être expliquée par le temps d'application de la tension pendant lequel l'eau présente à la surface se vaporise petit à petit par effet joule menant à une augmentation de l'impédance équivalente de l'isolateur, ce qui participe à l'augmentation de la rigidité diélectrique du modèle. Ainsi, la valeur du champ électrique dans ces zones sèches devient trop faible pour engendrer des décharges électriques, ce qui réduit de manière importante la charge électrique.

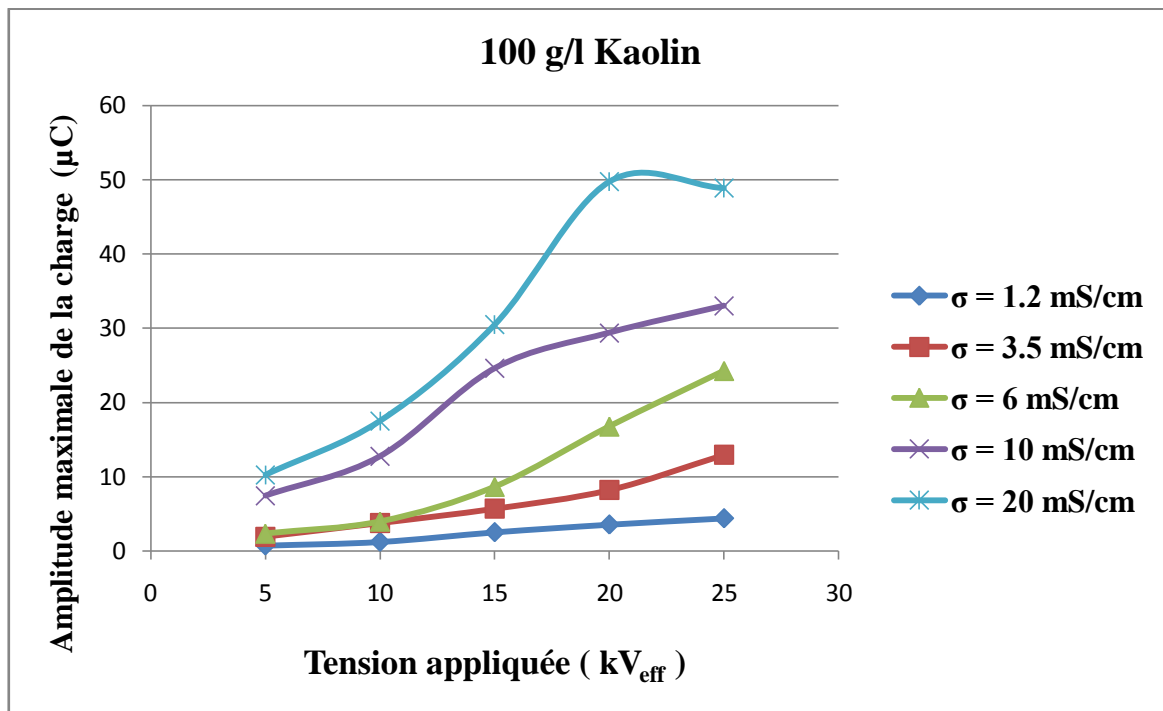
D'après les résultats obtenus dans la figure IV.22, nous remarquons que la charge électrique augmente en fonction de la tension appliquée de manière progressive pour toutes les conductivités. Néanmoins, pour la conductivité volumique 20 mS/cm, le comportement des décharges électriques diffère des conductivités précédentes. En réalité, l'amplitude maximale de la charge électrique est la plus élevée et commence à baisser à partir de 20 kVeff puisque des décharges continuent d'avoir lieu à la surface de l'isolateur. Cette activité permanente des décharges électriques provient du champ électrique très élevé dans la triple jonction air-isolant-électrolyte qui favorise leur initiation pour de très faibles niveaux de tension, par conséquent participe à l'augmentation de l'amplitude de la charge électrique car l'impédance équivalente du milieu est la plus faible.

#### **IV.6.2. Résultats des essais sous pollution non-uniforme :**

Pour le cas de la pollution non-uniforme, nous avons mesuré la charge électrique pour différents niveaux de la tension appliquée, pour plusieurs conductivités volumiques et pour différentes concentration en kaolin de l'agent polluant. Les résultats sont montrés dans les figures IV.23 à IV.25.

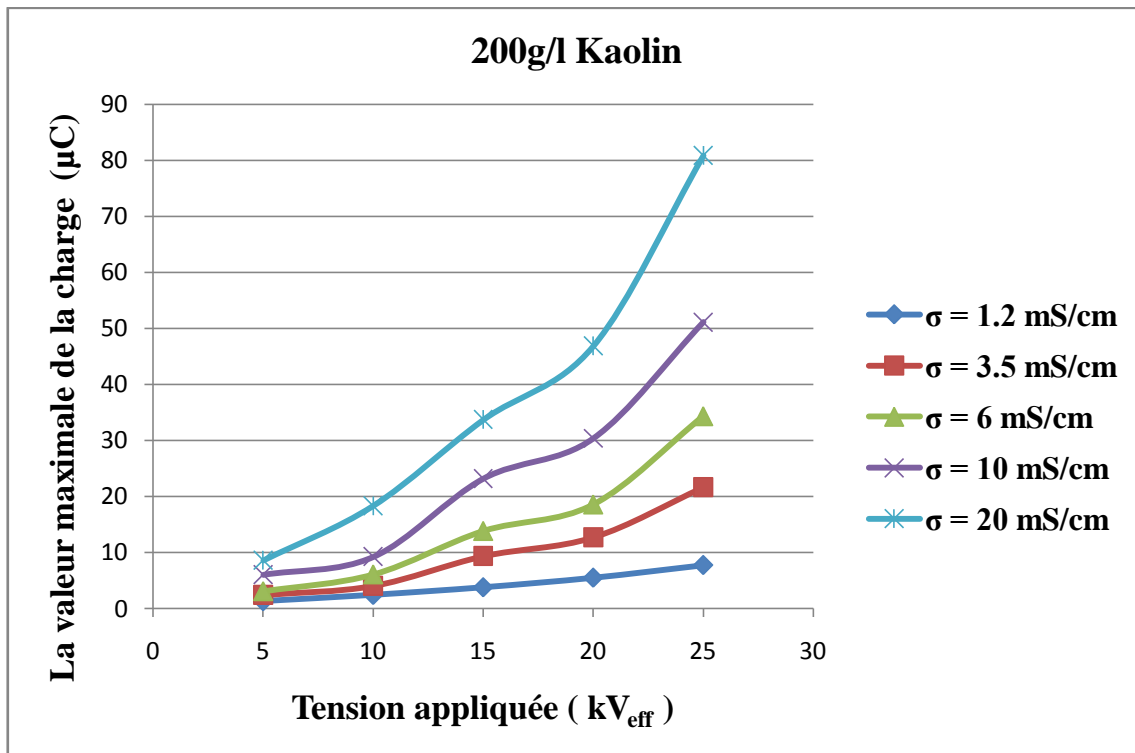


**Figure IV.23:** Variation de la valeur maximale de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités avec une concentration de 40 g/l sous pollution non-uniforme.



**Figure IV.24:** Variation de la valeur maximale de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités avec une concentration de 100 g/l sous pollution non-uniforme.





**Figure IV.25:** Variation de la valeur maximale de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités avec une concentration de 200 g/l sous pollution non-uniforme.

D'après les Figures IV 23 à IV 25, nous constatons que la charge électrique augmente d'une manière non linéaire en fonction de la tension appliquée pour les différentes conductivités utilisées pour les trois concentrations de kaolin.

Pour la concentration  $C=40$  g/l et pour les conductivités (1.2, 3.5, 6, 10) mS/cm, l'augmentation de la valeur maximale de la charge électrique est relativement faible à cause de la faible concentration, donc les décharges n'étaient pas encore intenses. Mais pour  $\sigma =20$  mS/cm et pour une tension  $U=25$  kV<sub>eff</sub>, la valeur de la charge augmente subitement. Cela est dû à l'activité des décharges dans les zones sèches qui deviennent intenses.

Pour la concentration  $C=100$  g/l et pour la conductivité  $\sigma =10$  mS/cm et à partir de la tension  $U=15$  kV<sub>eff</sub>, on constate que la valeur de la charge commence à se stabiliser (augmentation relativement faible) à cause du phénomène de saturation. En effet, pour une conductivité de  $\sigma=20$  mS/cm, nous remarquons une baisse légère dans la valeur maximale de la charge électrique à partir de la tension  $U=20$  kV<sub>eff</sub>. Cette baisse est due au phénomène d'assèchement qui a lieu durant le temps d'application de la tension, l'eau présente sur la surface du plan se vaporise par effet Joule d'où une augmentation de l'impédance équivalente de l'isolateur, ce qui réduit d'une manière importante la valeur de la charge électrique.

Pour la concentration  $C=200$  g/l et pour différentes conductivités, la charge électrique augmente d'une manière remarquable notamment pour les grands paliers de tension. Ceci est dû à l'augmentation de la concentration en kaolin qui engendre l'apparition des décharges dans les zones humidifiées.

### **IV.6.3.Discussion :**

L'analyse de la charge électrique nous permet de conclure que l'amplitude de celle-ci augmente en fonction de la tension appliquée, de la conductivité de l'agent polluant et de la concentration en kaolin.

Dans le cas de la pollution non-uniforme, l'amplitude de la charge électrique est faible par rapport à la pollution continue.

Nous constatons pour le cas uniforme, que l'apparition des décharges parallèles contribue à la diminution de la charge électrique pour la conductivité 20 mS/cm pour une concentration en kaolin de 100 et 200 g/l, à cause de l'assèchement progressif de certaines zones du modèle plan. Cet assèchement est plus rapide pour la conductivité 20 mS/cm qui représente un cas de pollution extrême. Pour la pollution non-uniforme, la formation des décharges parallèles dans les intervalles d'air entre la couche polluée et les électrodes se fait juste pour la concentration 100g/l, conductivité 20 mS/cm, à cause de la présence des décharges électriques sur le modèle plan. Ces décharges augmentent la valeur de la charge électrique sur la surface de l'isolateur.

## *Chapitre V :*

*Energie des harmoniques du  
courant de fuite et de la tension  
appliquée*

## V.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite. Pour cela nous calculons l'énergie des harmoniques les plus significatifs (1<sup>er</sup>, 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup>), à l'aide de l'analyse spectrale.

Le calcul de l'énergie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite est effectué à l'aide d'un programme écrit sous MATLAB® pour les différentes concentrations en kaolin et les différentes conductivités et ceci pour les deux configurations de la pollution uniforme et non-uniforme.

L'objectif de cette étude est de comprendre d'une part, la cause des distorsions observées sur les signaux du courant de fuite et de la tension appliquée et d'autre part, d'évaluer la quantité d'énergie du courant de fuite qui est responsable de l'évaporation de l'eau en présence des décharges électriques à la surface du plan. Notre but est de diagnostiquer la sévérité de pollution en fonction des harmoniques du courant de fuite ayant une énergie significative.

## V.2. L'analyse spectrale:

Pour analyser l'onde du courant de fuite, notre choix s'est porté sur le spectre d'amplitude qui est calculé à partir de la FFT du signal du courant de fuite, ce choix offre une bonne résolution fréquentielle donc une distinction facile des différents harmoniques.

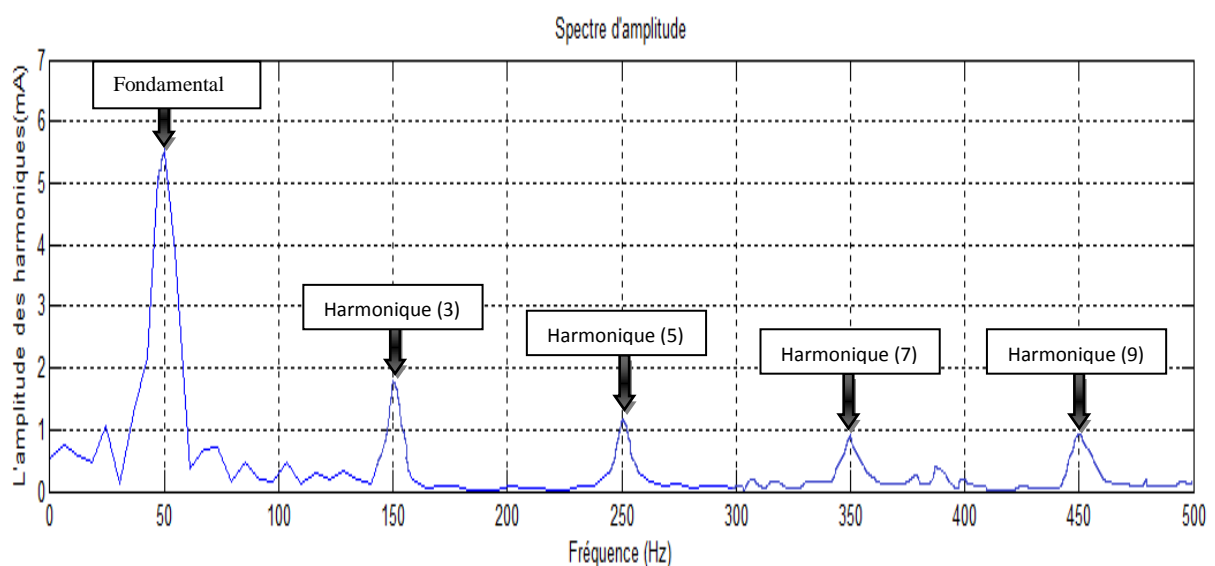
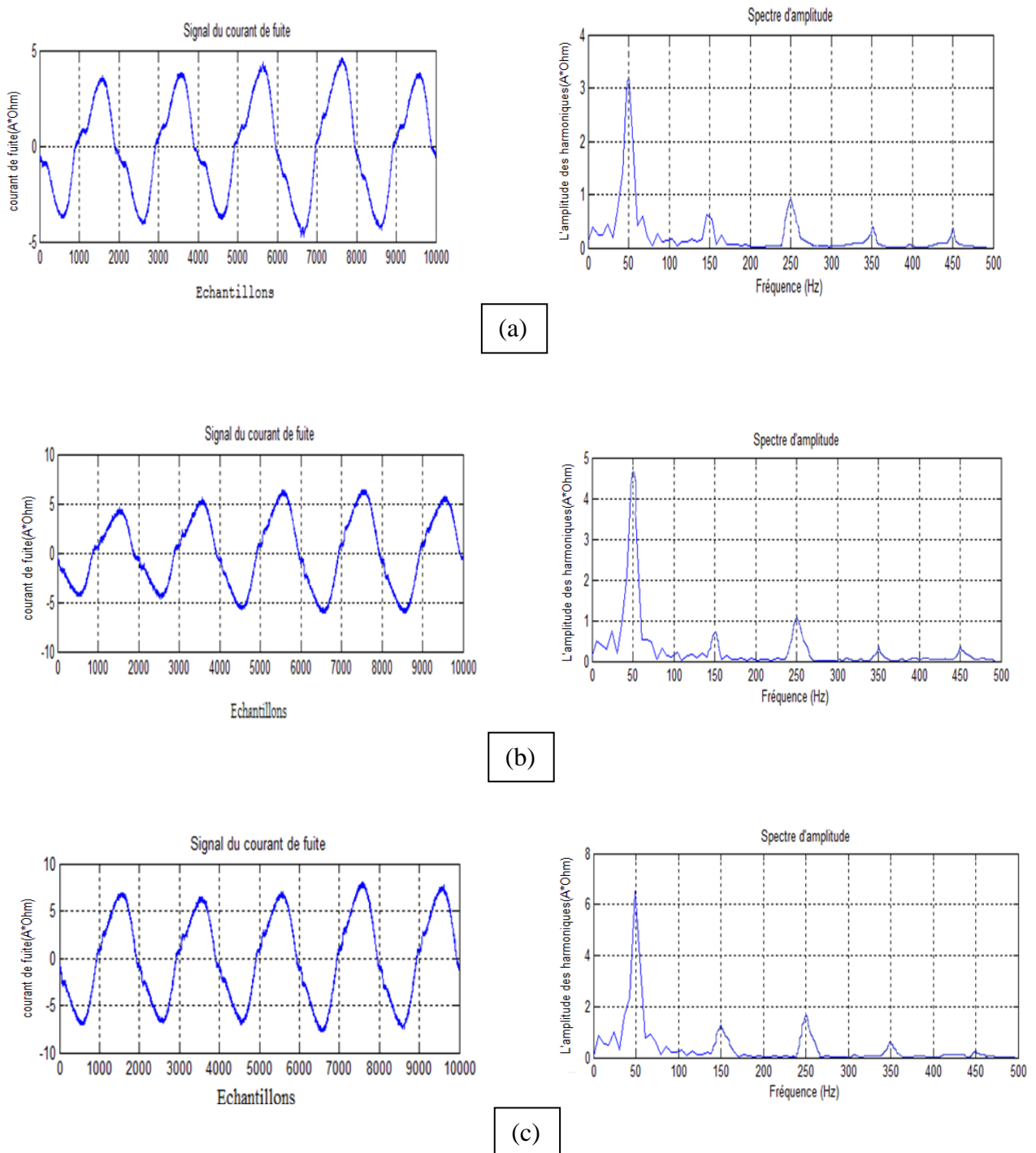


Figure V.1: Représentation du spectre d'amplitude.

### V.2.1. Pollution uniforme :

Les figures suivantes représentent les signaux du courant de fuite ainsi que les spectres d'amplitudes correspondant dans l'évolution du processus de contournement d'un isolateur plan sous pollution uniforme pour les différentes concentrations en kaolin avec une conductivité de

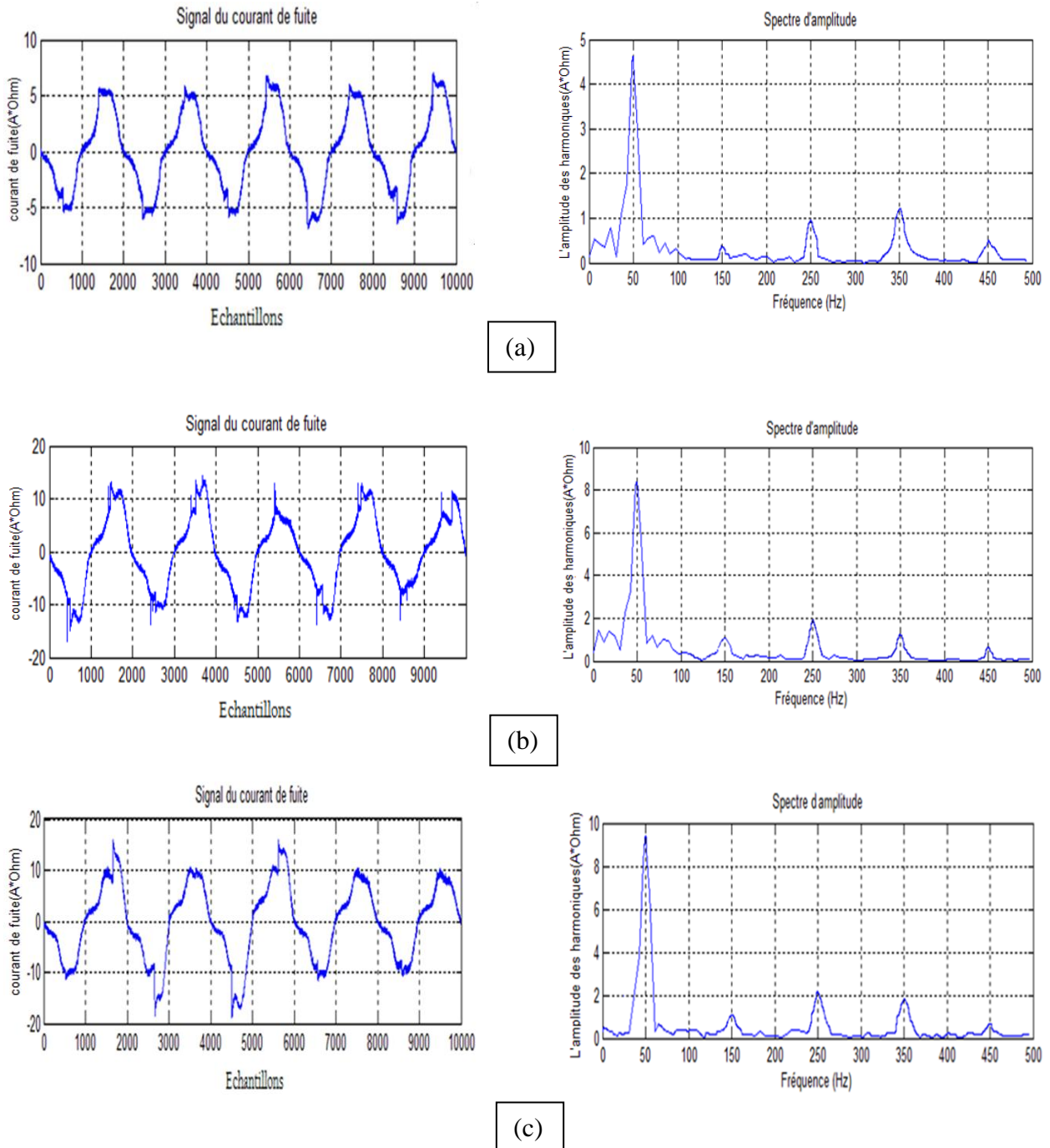
10mS/cm, pour le niveau de tension appliquée de 25kV<sub>eff</sub>.



**Figure V.2:** Signal du courant de fuite (à gauche) et le spectre d'amplitude (à droite) sous pollution uniforme (10mS/cm) et un niveau de tension de 25kV<sub>eff</sub> pour les différentes concentrations en kaolin : (a) 40g/l, (b) 100g/l, (c) 200g/l.

### V.2.2. Pollution non-uniforme :

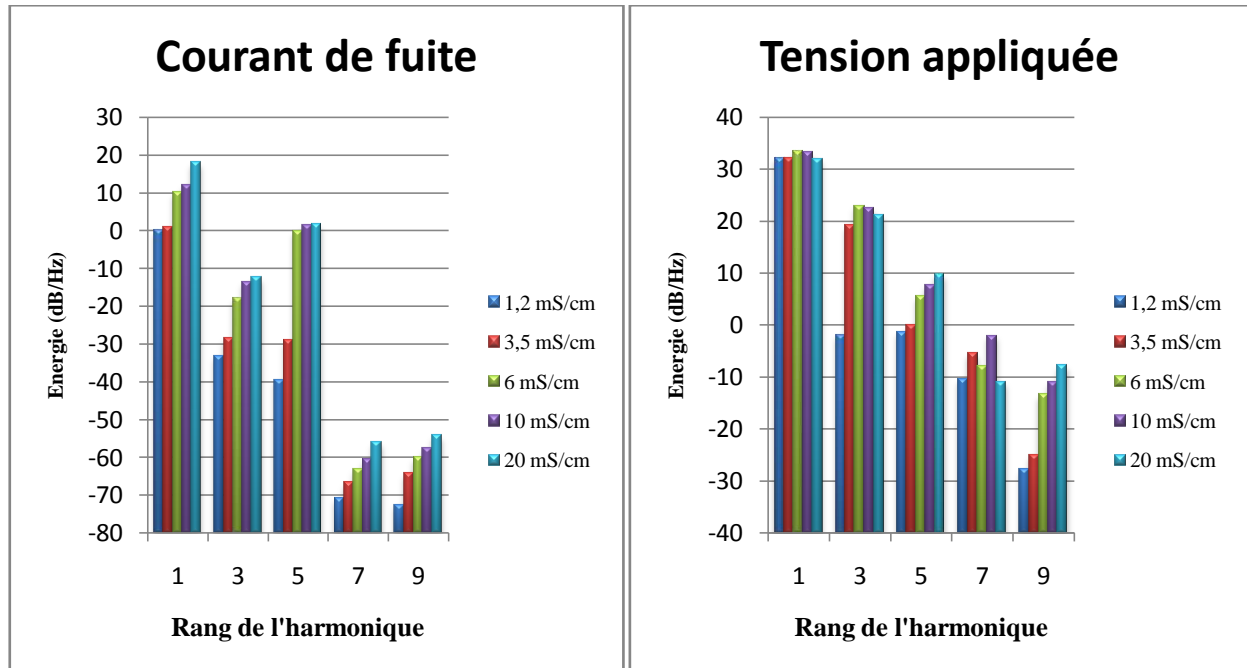
Les signaux du courant de fuite ainsi que les spectres d'amplitudes pour la tension  $25kV_{eff}$  sont représentées dans les figures suivantes afin d'illustrer l'influence de la couche propre sur le comportement de l'isolateur dans le cas de la couche polluante ayant une conductivité de  $10mS/cm$ .



**Figure V.2:** Signal du courant de fuite (à gauche) et le spectre d'amplitude (à droite) sous pollution non-uniforme ( $10mS/cm$ ) et un niveau de tension de  $25kV_{eff}$  pour les différentes concentrations en kaolin : (a)  $40g/l$ , (b)  $100g/l$ , (c)  $200g/l$ .

### V.3. Etude de l'énergie des harmoniques sous pollution uniforme (C=40g/l) :

#### V.3.1. Tension appliquée $5kV_{eff}$ :

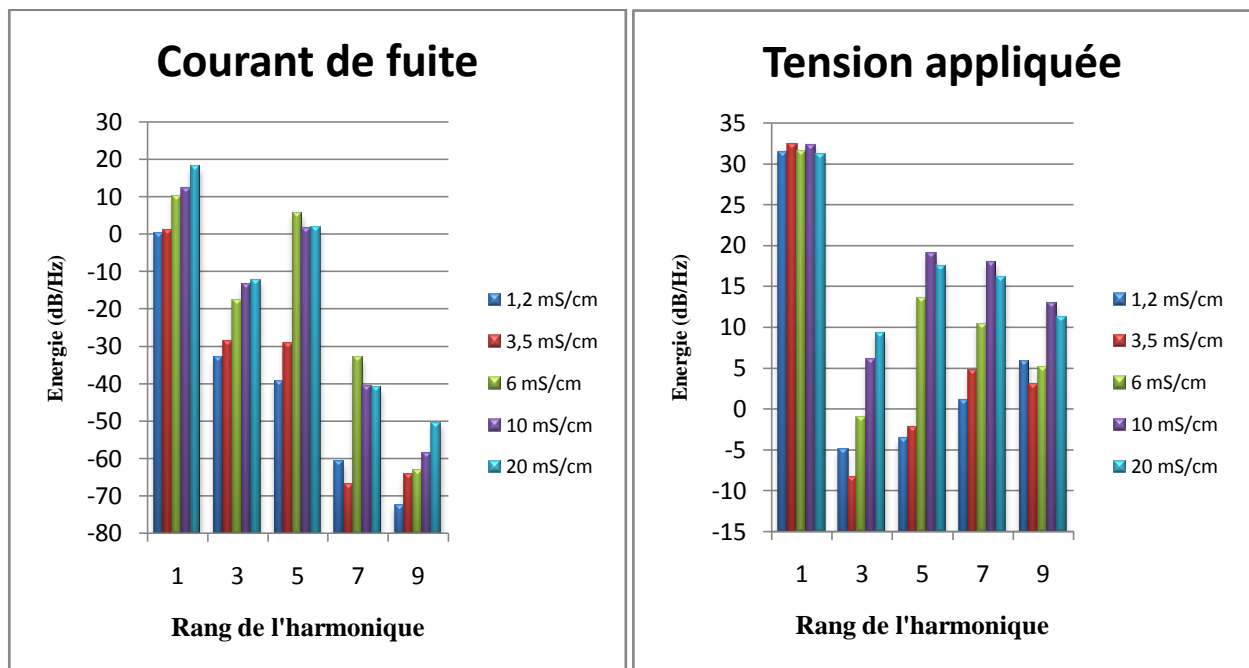


**Figure V.4 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 40 g/l en kaolin sous pollution uniforme.

Pour ce cas de figure et pour les harmoniques du courant de fuite, nous constatons que l'énergie du fondamental ainsi que les différents harmoniques augmente en fonction de la conductivité volumique de l'agent polluant. L'énergie du 5<sup>ème</sup> harmonique est la plus grande par rapport à celle du 3<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques pour toutes les conductivités, indiquant la présence de décharges électriques à la surface de l'isolateur plan.

Concernant les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental est plus ou moins constante avec l'augmentation de la conductivité du milieu avec une énergie maximale pour la conductivité 6mS/cm. L'énergie des harmoniques 3 et 7 varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmonique augmente avec l'augmentation de la conductivité du milieu. L'énergie du 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> harmonique est plus élevée que celle des 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques.

### V.3.2. Tension appliquée $15kV_{eff}$ :



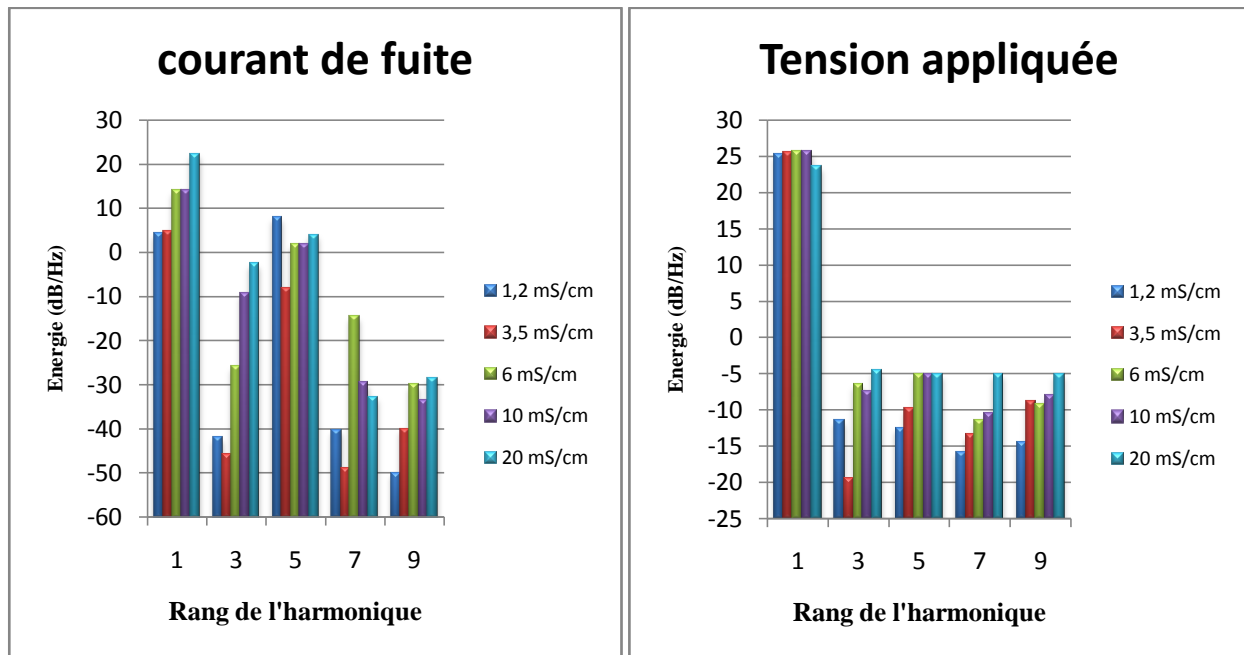
**Figure V.5 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 40 g/l en kaolin sous pollution uniforme.

Pour les harmoniques du courant de fuite, l'énergie des fondamentales, 3<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques augmentent avec l'augmentation de la conductivité du milieu. L'énergie des harmoniques 5 et 7 varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> harmonique est la plus élevée pour toutes les conductivités. Nous constatons également comme pour les niveaux précédents que l'énergie du 5<sup>ème</sup> harmonique est plus élevée que celle des 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques à cause des décharges électriques, sauf pour la conductivité 1.2 mS/cm où le 3<sup>ème</sup> est dominant.

Dans ce cas et pour les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental reste constante avec la variation de la conductivité volumique. L'énergie de l'harmonique 5 est la plus élevée pour la conductivité 10 mS/cm. Nous remarquons aussi que l'énergie des harmoniques augmente avec l'augmentation de la conductivité du milieu, ceci pour les conductivités 3.5, 6 et 10 mS/cm.



### V.3.3. Tension appliquée $25kV_{eff}$ :



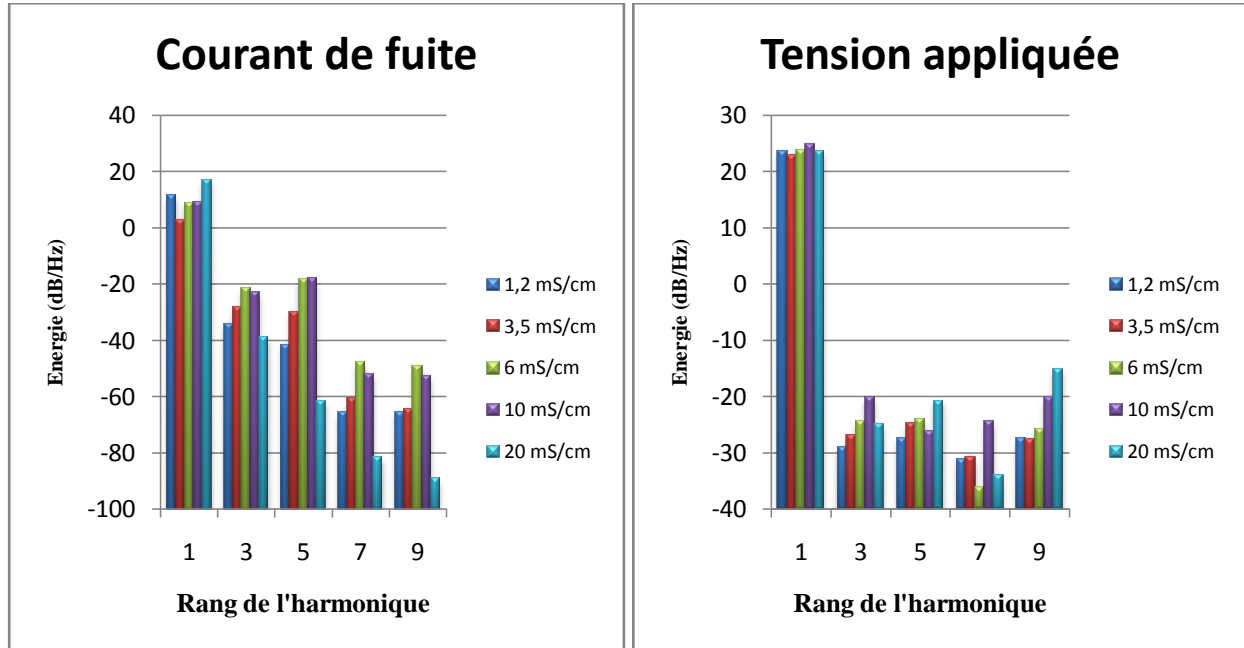
**Figure V.6 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 40 g/l en kaolin sous pollution uniforme.

Pour ce dernier palier de tension et pour les harmoniques du courant de fuite, l'énergie du fondamental, 3<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmonique augmentent avec l'augmentation de la conductivité volumique du milieu. Nous remarquons aussi que les énergies du 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> harmoniques sont pratiquement supérieures à celles des 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques pour toutes les conductivités sauf pour 20 mS/cm. Ceci nous montre encore une autre fois que l'amorçage des décharges dans les zones sèches pour les conductivités 1.2 mS/cm, 3.5 mS/cm, 6 mS/cm et 20 mS/cm fait augmenter l'énergie du 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> harmonique par rapport aux harmoniques de rang supérieur.

Pour la tension appliquée, nous constatons que l'énergie du fondamental est constante quelle que soit la conductivité du milieu. L'énergie des 5<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques augmentent pour les différentes conductivités. Nous remarquons aussi que les énergies du 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> harmoniques sont pratiquement supérieures à celles des 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques pour toutes les conductivités.

## V.4. Etude de l'énergie des harmoniques sous pollution uniforme (C=100g/l):

### V.4.1. Tension appliquée 5kV<sub>eff</sub>:

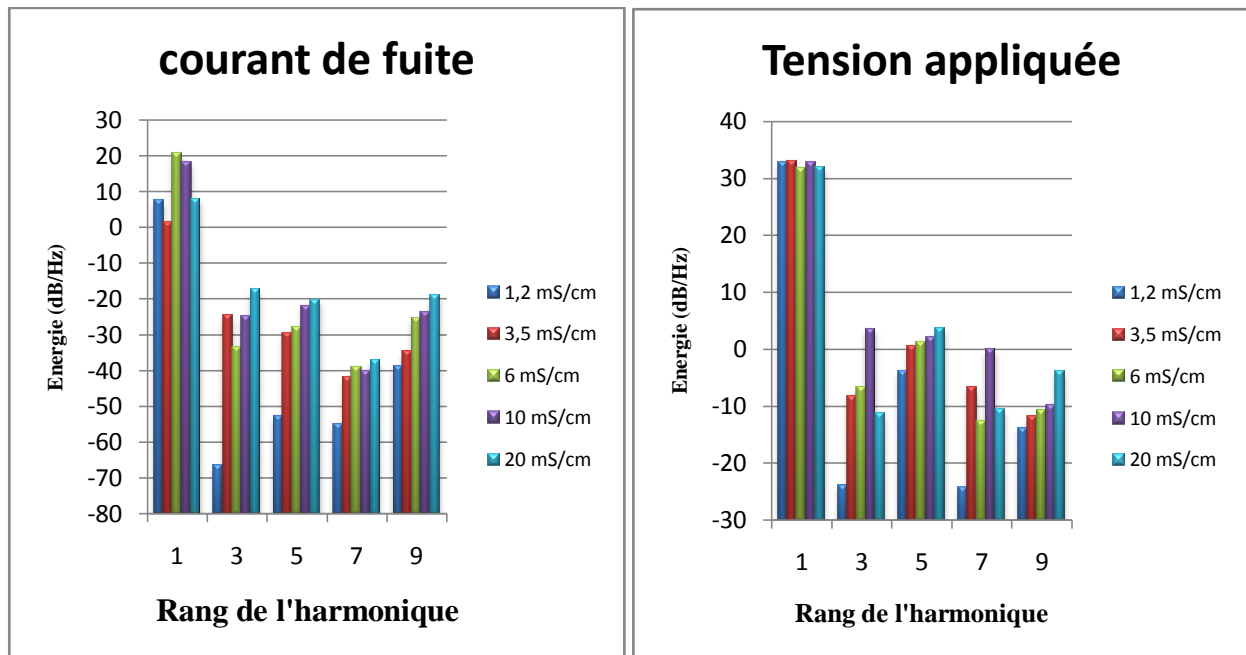


**Figure V.7 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 100 g/l en kaolin sous pollution uniforme.

Pour les harmoniques du courant de fuite, l'énergie des fondamentales, 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmoniques augmentent avec l'augmentation de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> harmonique est la plus élevée pour la conductivité 20 mS/cm. Nous constatons également que l'énergie du 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> harmonique est plus élevée que celle des 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques à cause des décharges électriques.

Concernant les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental est plus ou moins constante comme dans pratiquement tous les cas que nous avons vu précédemment, avec une énergie minimale pour la conductivité 3.5 mS/cm. L'énergie des autres harmoniques augmente en fonction de la conductivité du milieu pour les harmoniques 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup>. L'énergie du 7<sup>ème</sup> harmonique varie d'une manière aléatoire.

### V.4.2. Tension appliquée $15kV_{eff}$ :

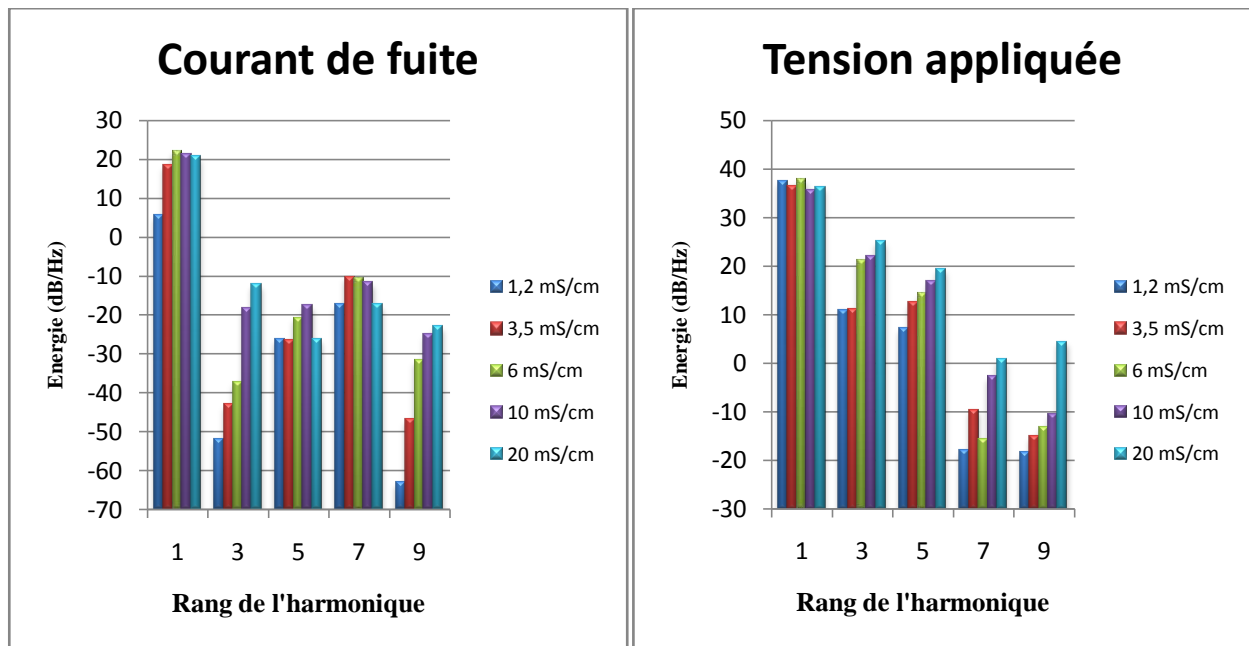


**Figure V.8 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 100 g/l en kaolin sous pollution uniforme.

Pour les harmoniques du courant de fuite, l'énergie du fondamental et du 3<sup>ème</sup> harmonique varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. Nous remarquons aussi que l'énergie des 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmoniques, augmentent avec l'élévation de la conductivité du milieu. L'énergie du 3<sup>ème</sup> harmonique est la plus grande par rapport à celle du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmoniques pour la conductivité de 20 mS/cm indiquant la présence des décharges électriques à la surface du modèle plan.

Pour ce cas de figure et pour les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental est plus ou moins constante avec une énergie minimale pour la conductivité 6 mS/cm et 20 mS/cm. L'énergie des 3<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmoniques varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie des 5<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques augmente avec l'élévation de la conductivité du milieu.

### V.4.3. Tension appliquée $25kV_{eff}$ :



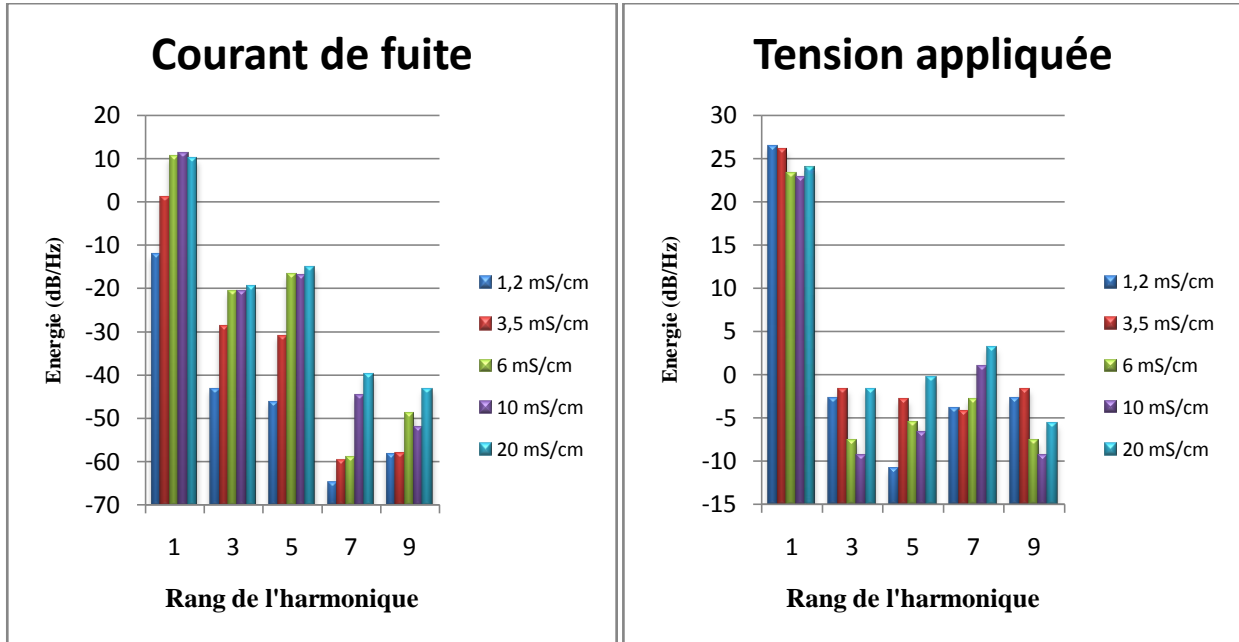
**Figure V.9 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 100 g/l en kaolin sous pollution uniforme.

Pour ce dernier palier de la tension et pour les harmoniques de courant de fuite, l'énergie du 3<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques augmente avec l'augmentation de la conductivité du milieu. L'énergie du 7<sup>ème</sup> harmonique est la plus élevée pour la conductivité 3.5 mS/cm à cause des décharges électriques. L'énergie du fondamental et des autres harmoniques varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu.

Concernant les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental est plus ou moins constante avec une énergie minimale pour la conductivité 10 mS/cm. L'énergie des autres harmoniques augmentent en fonction de la conductivité du milieu pour les harmoniques 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup>. L'énergie du 7<sup>ème</sup> harmonique varie d'une manière aléatoire.

## V.5. Etude de l'énergie des harmoniques sous pollution uniforme (C=200g/l):

### V.5.1. Tension appliquée $5kV_{eff}$ :

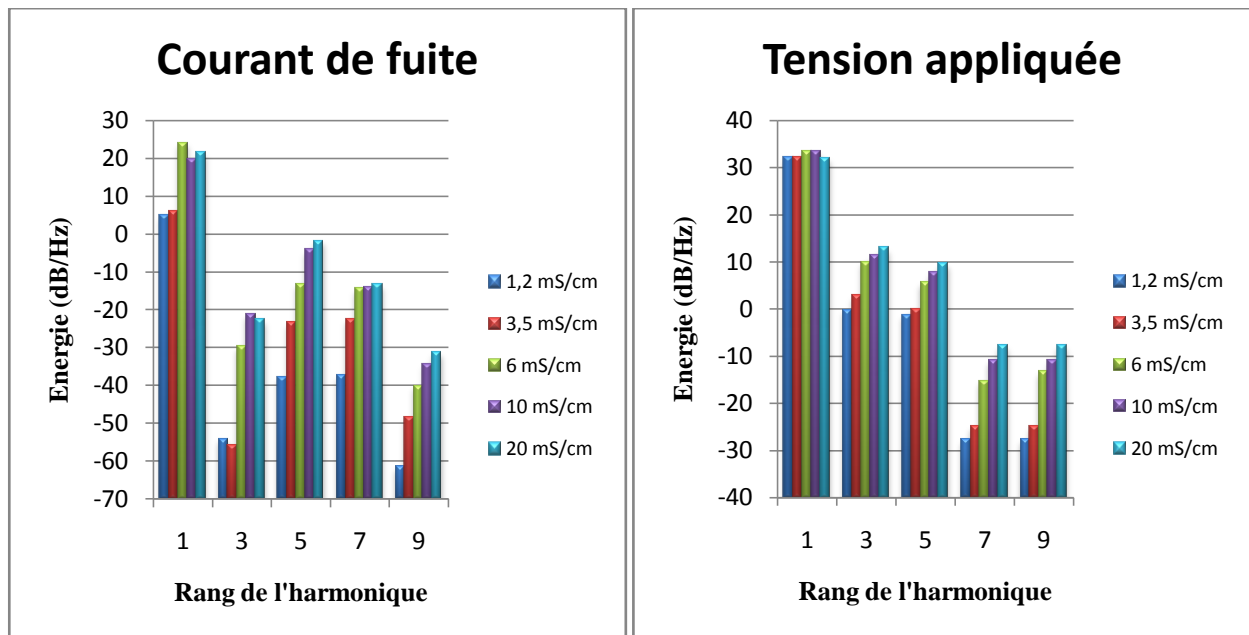


**Figure V.10 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 200 g/l en kaolin sous pollution uniforme.

Pour les harmoniques du courant de fuite, l'énergie des fondamentales, 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmoniques augmente avec l'augmentation de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> harmonique est la plus élevée pour la conductivité de 20 mS/cm. L'énergie du 9<sup>ème</sup> harmonique varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. Nous constatons également que l'énergie du 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> harmonique est plus élevée que celle des, 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques à cause des décharges électriques sur la surface du modèle plan.

Pour ce cas de figure et pour les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental diminue en fonction de l'augmentation de la conductivité du milieu avec une énergie minimale pour la conductivité 10 mS/cm. L'énergie des 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 7<sup>ème</sup> harmonique augmente avec l'augmentation de la conductivité du milieu.

### V.5.2. Tension appliquée $15kV_{eff}$ :

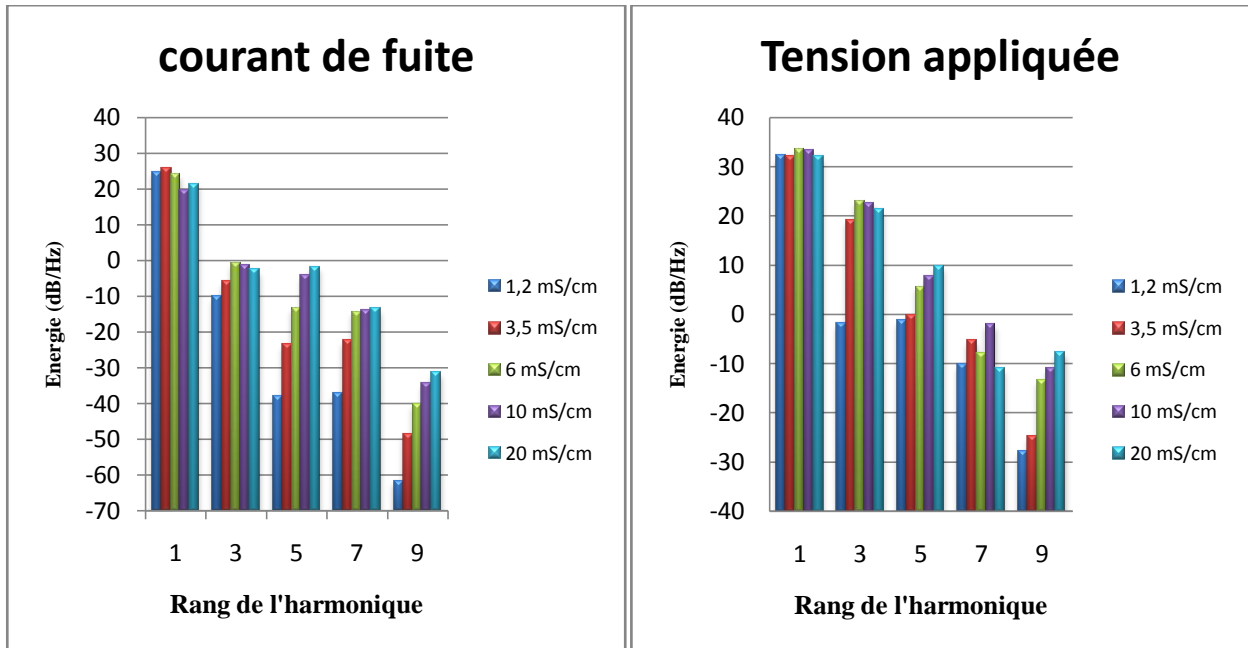


**Figure V.11 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 200 g/l en kaolin sous pollution uniforme.

Pour les harmoniques du courant de fuite, l'énergie du fondamental et du 3<sup>ème</sup> harmonique varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques augmentent avec l'augmentation de la conductivité du milieu. L'énergie de l'harmonique 5<sup>ème</sup> est la plus élevée par rapport aux autres harmoniques pour la conductivité 3.5 mS/cm. Cette augmentation marque encore une fois l'activité des décharges électriques à la surface de l'isolateur pour ces conductivités.

Concernant les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental est plus ou moins constante avec une énergie maximale pour la conductivité 6 mS/cm. L'énergie des autres harmoniques augmentent en fonction de la conductivité du milieu pour tous les harmoniques. L'énergie du 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> harmonique est plus élevée que celle des, 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques à cause des décharges électriques sur la surface du modèle plan.

### V.5.3. Tension appliquée 25kV<sub>eff</sub> :



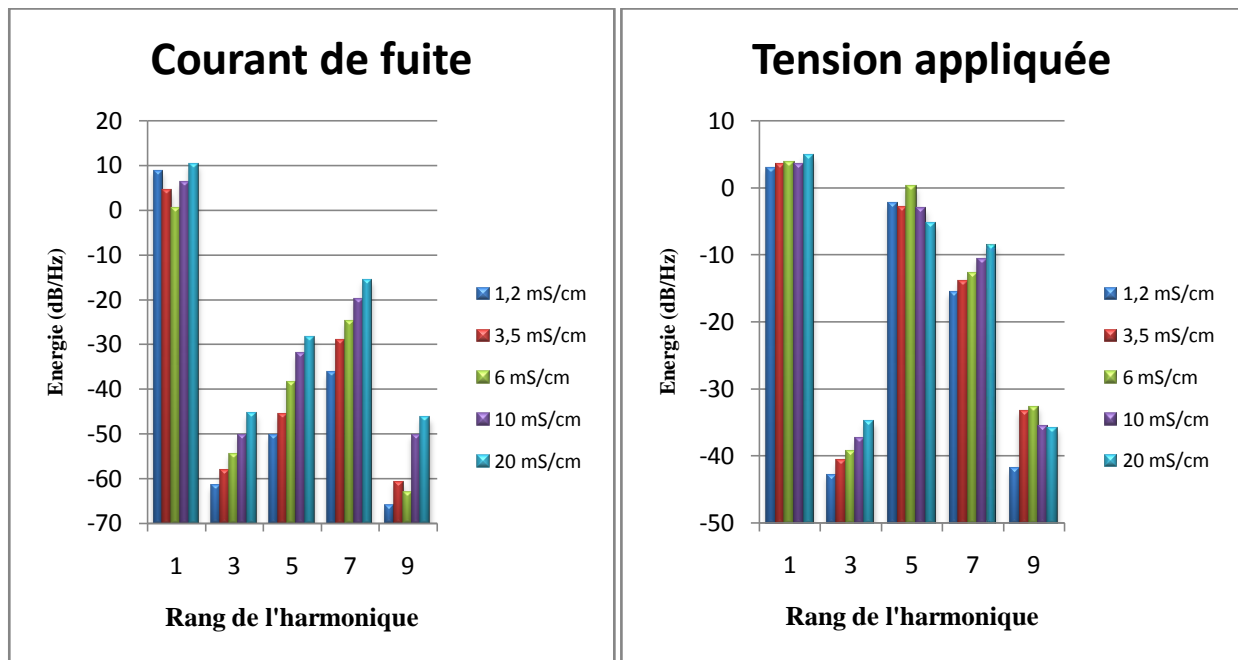
**Figure V.12 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 200 g/l en kaolin sous pollution uniforme.

Pour ce dernier palier de tension et pour les harmoniques du courant de fuite, l'énergie du fondamental est plus ou moins constante avec une énergie maximale pour la conductivité 3.5mS/cm, nous remarquons aussi que l'énergie des 5<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques, augmente avec l'élévation de la conductivité du milieu. Le 3<sup>ème</sup> harmonique varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu est son l'énergie et la plus grand par rapport aux autres harmoniques, ceci indiquant la présence des décharges électriques à la surface de modèle plan.

Concernant les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental est plus ou moins constante avec une énergie maximale pour la conductivité 6 mS/cm. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmonique augmente en fonction de la conductivité du milieu pour tous les harmoniques. L'énergie des 3<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmoniques varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie des 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> harmoniques est plus élevée que celle des, 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques à cause des décharges électriques sur la surface du modèle plan.

## V.6. Etude de l'énergie des harmoniques sous pollution non-uniforme (C=40 g/l) :

### V.6.1. Tension appliquée $5kV_{eff}$ :



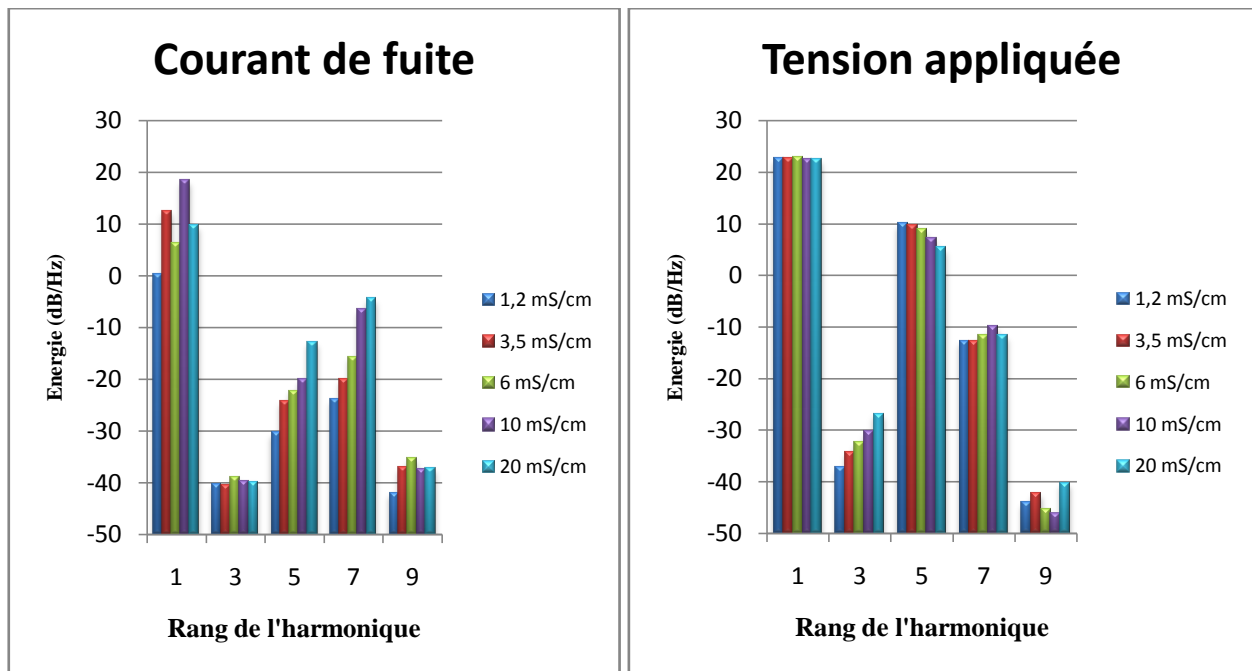
**Figure V.13 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 40 g/l en kaolin sous pollution non-uniforme.

Dans ce cas et pour les harmoniques du courant de fuite, nous remarquons que l'énergie du fondamental varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie des 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmoniques augmente avec l'augmentation de la conductivité du milieu. L'énergie du 9<sup>ème</sup> harmonique augmente avec l'augmentation de la conductivité mais présente une énergie minimale pour la conductivité 6 mS/cm. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est la plus élevée par rapport aux autres harmoniques. Nous remarquons aussi que le 7<sup>ème</sup> harmonique est plus important que le 5<sup>ème</sup> harmonique (cas inverse de la pollution uniforme) à cause de la présence d'un effet capacitif significatif qui amplifie l'énergie du 7<sup>ème</sup> harmonique. Autrement dit, l'impédance vue par le 7<sup>ème</sup> harmonique semble plus faible que celle vue par le 3<sup>ème</sup> harmonique du courant.

Concernant les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental est plus ou moins constante avec une énergie maximale pour la conductivité 20mS/cm. L'énergie du 3<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique augmente en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmonique varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est plus élevée que celle des 3<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques à cause des décharges électriques sur la surface du modèle plan.



### V.6.2. Tension appliquée $15kV_{eff}$ :

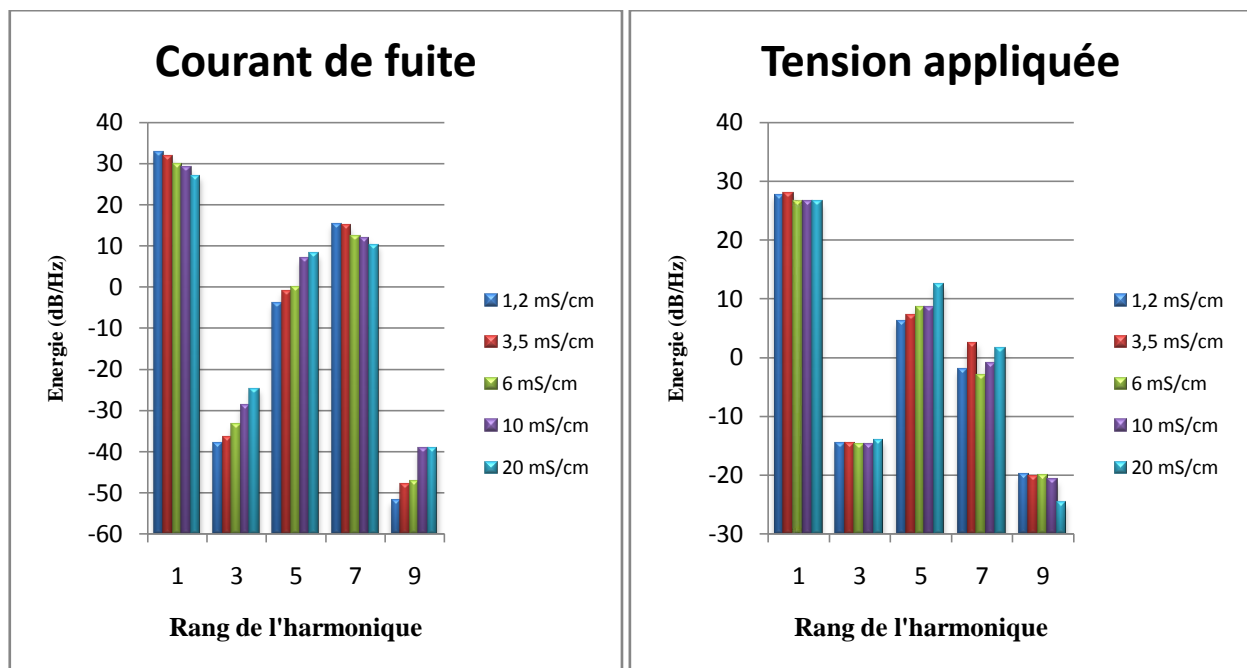


**Figure V.14 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 40 g/l en kaolin sous pollution non-uniforme.

Dans ce cas et pour les harmoniques du courant de fuite, l'énergie du fondamental et du 9<sup>ème</sup> harmonique varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique augmente en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 3<sup>ème</sup> harmonique est plus ou moins constante avec une énergie maximale pour la conductivité 6mS/cm. L'énergie de l'harmonique 9 varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu.

Concernant les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental est plus ou moins constante avec une énergie maximale pour la conductivité 6mS/cm. L'énergie du 3<sup>ème</sup> harmonique augmente en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmonique varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> l'harmonique diminue en fonction de l'augmentation de la conductivité du milieu.

### V.6.3. Tension appliquée 25kV<sub>eff</sub> :



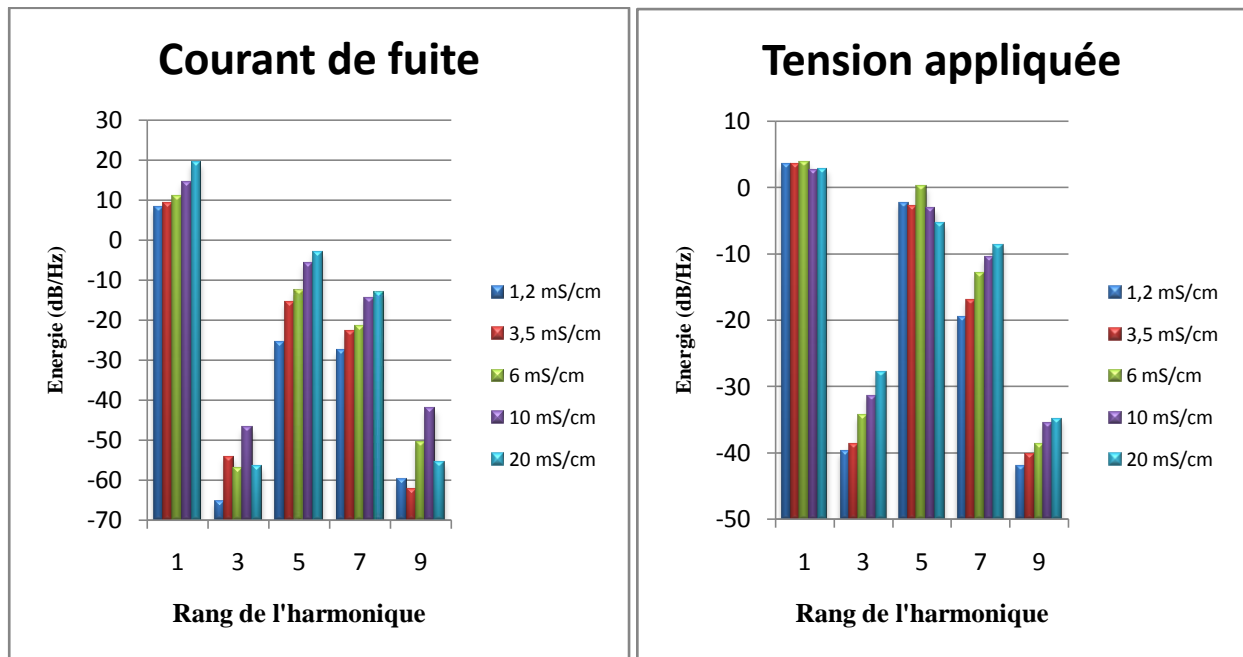
**Figure V.15 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 40 g/l en kaolin sous pollution non-uniforme.

Pour ce dernier palier de tension et pour les harmoniques du courant de fuite, l'énergie du fondamental et 7<sup>ème</sup> l'harmonique diminue en fonction de l'augmentation de la conductivité du milieu. Nous remarquons que l'énergie des autres harmoniques augmente avec l'élévation de conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est plus élevée que celle des 3<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques à cause des décharges électriques sur la surface du modèle plan.

Concernant les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental et du 3<sup>ème</sup> harmonique est plus ou moins constante avec l'évolution de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> harmonique augmente avec la conductivité du milieu. L'énergie du 7<sup>ème</sup> harmonique varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 9<sup>ème</sup> harmonique est plus ou moins constante avec une énergie minimale pour la conductivité 20mS/cm. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est plus élevée que celle des 3<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques à cause des décharges électriques sur la surface du modèle plan.

## V.7. Etude de l'énergie des harmoniques sous pollution non-uniforme (C=100g/l):

### V.7.1. Tension appliquée $5kV_{eff}$ :

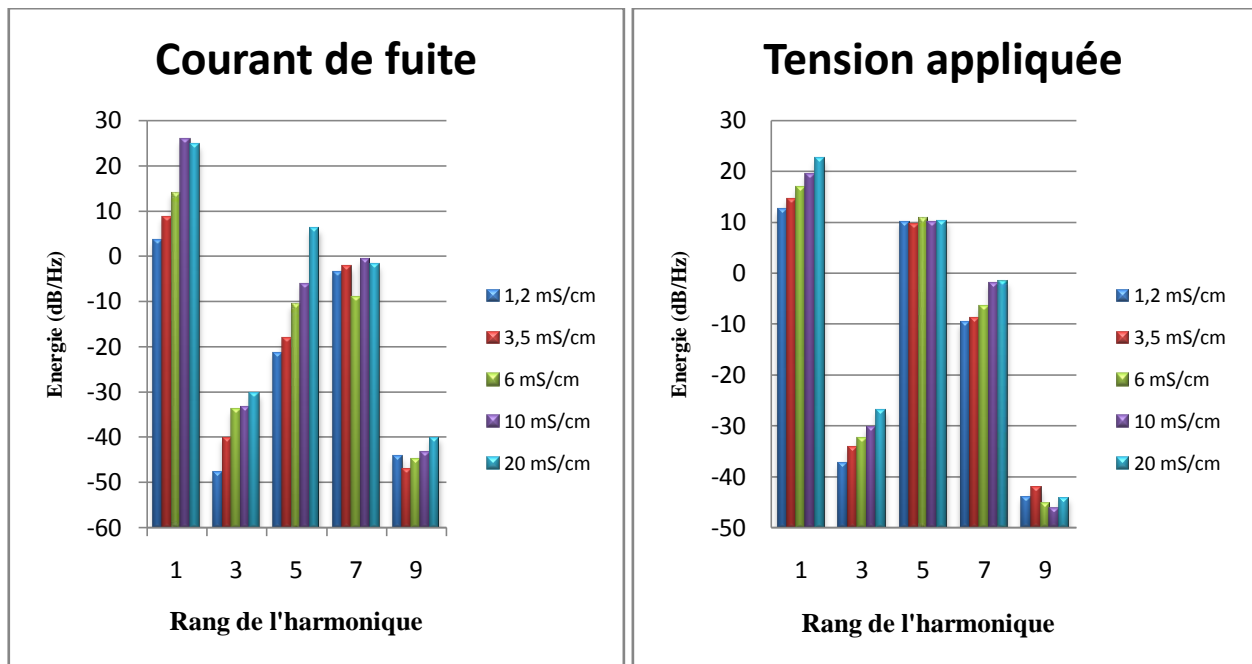


**Figure V.16 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 100 g/l en kaolin sous pollution non-uniforme.

Pour les harmoniques du courant de fuite, l'énergie du fondamental et les harmoniques 5 et 7 augmente avec l'élévation de la conductivité du milieu. L'énergie des 3<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est la plus élevée par rapport aux autres harmoniques pour toutes les conductivités. Cette augmentation marque encore une fois l'activité des décharges électriques à la surface de l'isolateur pour ces conductivités.

Concernant les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental est plus ou moins constante avec l'augmentation de la conductivité du milieu. L'énergie du 3<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique augmente en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> harmonique varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu avec une énergie maximale pour la conductivité 6mS/cm. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est plus élevée que celle des 3<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques.

### V.7.2. Tension appliquée $15kV_{eff}$ :

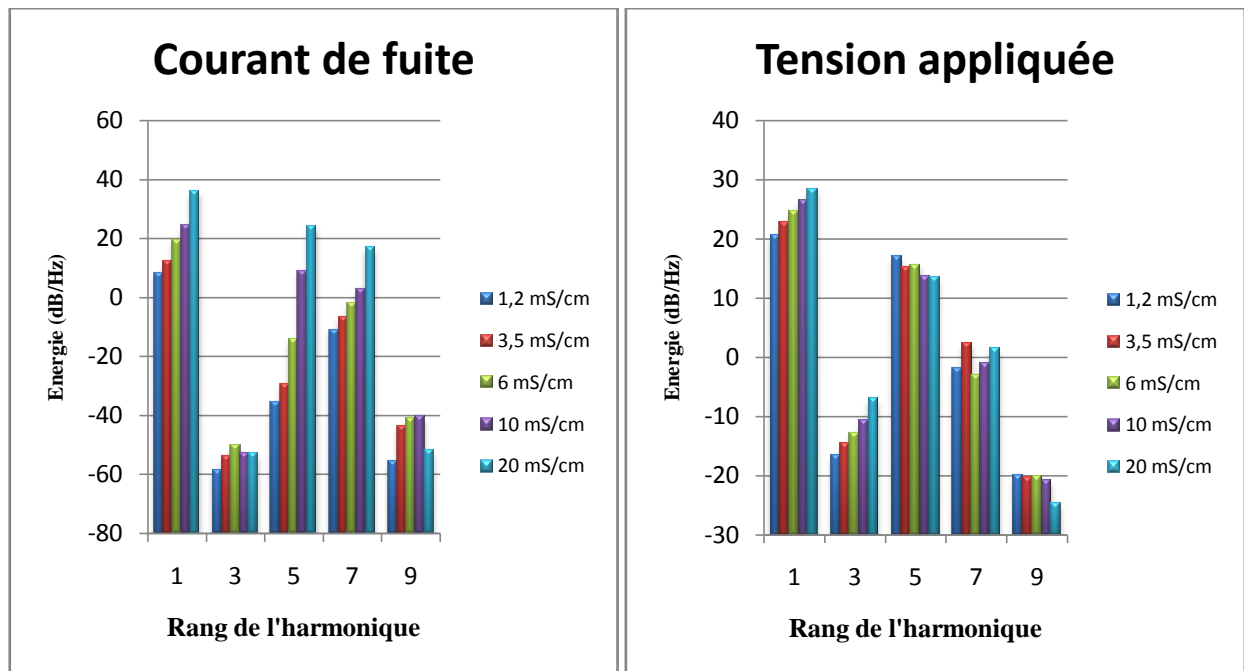


**Figure V.17 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 100 g/l en kaolin sous pollution non-uniforme.

Pour les harmoniques du courant de fuite, l'énergie du fondamental et des harmoniques 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> augmente avec l'élévation de la conductivité du milieu. L'énergie des 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est la plus élevée par rapport aux autres harmoniques pour toutes les conductivités étudiées. Cette augmentation marque encore une fois l'activité des décharges électriques à la surface de l'isolateur pour ces conductivités.

Concernant les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental, du 3<sup>ème</sup> et du 7<sup>ème</sup> harmonique, augmente avec l'augmentation de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> est plus ou moins constante avec l'augmentation de conductivité du milieu avec une énergie maximale pour la conductivité 6mS/cm. L'énergie du 5<sup>ème</sup> harmonique varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est plus élevée que celle des 3<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques.

### V.7.3. Tension appliquée $25kV_{eff}$ :



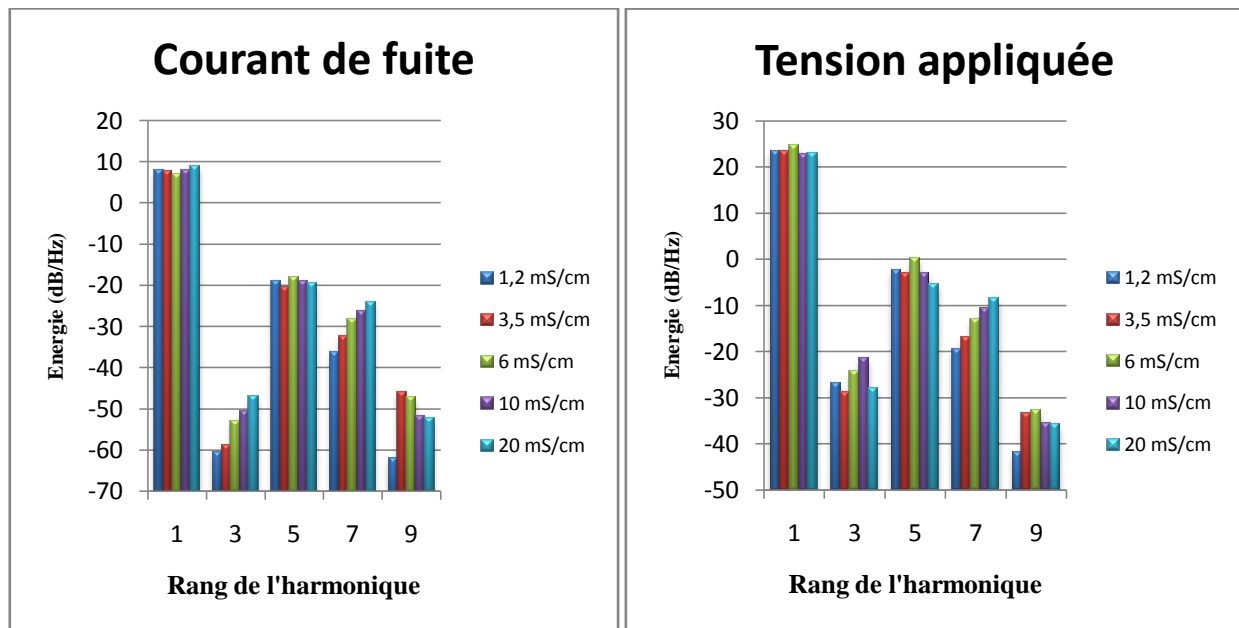
**Figure V.18 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 100 g/l en kaolin sous pollution non-uniforme.

Pour ce dernier palier de tension et pour les harmoniques du courant de fuite, l'énergie du fondamental et des harmoniques 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> augmente avec l'élévation de la conductivité du milieu. L'énergie des 3<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est la plus élevée par rapport aux autres harmoniques pour toutes les conductivités. Cette augmentation marque encore une fois une activité des décharges électriques à la surface de l'isolateur pour ces conductivités.

Concernant les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental et du 3<sup>ème</sup> harmonique augmente avec l'augmentation de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 9<sup>ème</sup> est plus ou moins constante avec l'augmentation de la conductivité du milieu avec une énergie minimale pour la conductivité 20mS/cm. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est plus élevée que celle des 3<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques.

## V.8. Etude de l'énergie des harmoniques sous pollution non-uniforme (C=200g/l) :

### V.8.1. Tension appliquée $5kV_{eff}$ :

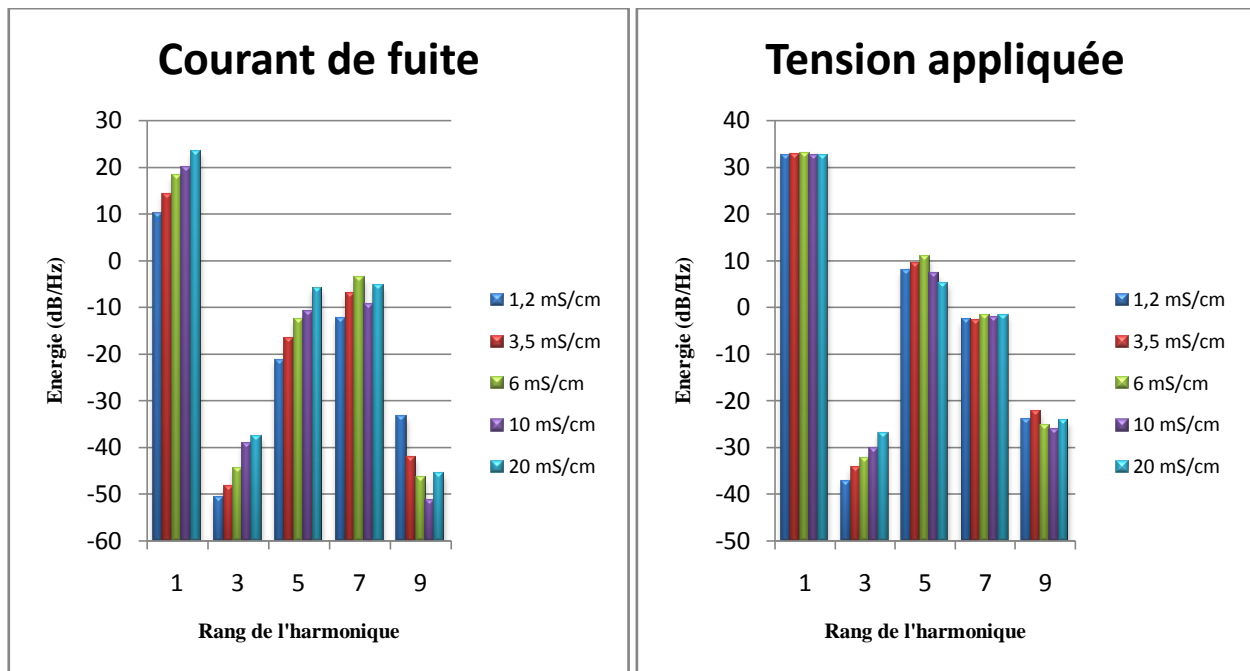


**Figure V.19 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 200 g/l en kaolin sous pollution non-uniforme.

Dans ce cas et pour les harmoniques du courant de fuite, l'énergie du fondamental et du 5<sup>ème</sup> harmonique est plus ou moins constante avec une énergie maximale pour la conductivité 20mS/cm. L'énergie du 3<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique augmente en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 9<sup>ème</sup> harmonique varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est la plus élevée par rapport à l'énergie des autres harmoniques. Nous remarquons aussi que l'énergie du 7<sup>ème</sup> harmonique est plus importante que l'énergie du 5<sup>ème</sup> harmonique (cas contraire de la pollution uniforme) à cause de la présence d'un effet capacitif significatif qui amplifie l'énergie du 7<sup>ème</sup> harmonique. Autrement dit, l'impédance vue par le 7<sup>ème</sup> harmonique semble plus faible que celle vue par le 3<sup>ème</sup> harmonique du courant.

Concernant les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental est plus ou moins constante avec l'augmentation de la conductivité du milieu avec une énergie maximale pour la conductivité 6mS/cm. L'énergie des harmoniques 3, 5 et 9 varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 7<sup>ème</sup> harmonique augmente avec l'augmentation de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est plus élevée que celle des 3<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques.

### V.8.2. Tension appliquée $15kV_{eff}$ :

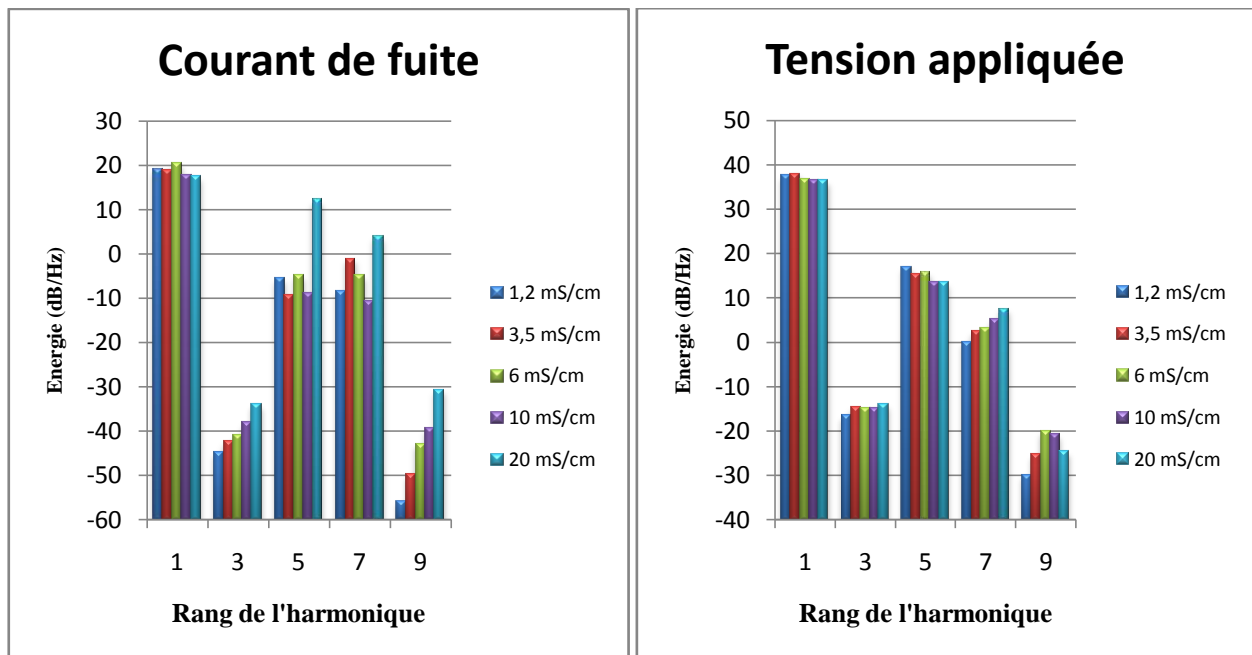


**Figure V.20 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 200 g/l en kaolin sous pollution non-uniforme.

Pour les harmoniques du courant de fuite, l'énergie du fondamental et des harmoniques 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> augmente avec l'augmentation de la conductivité du milieu. L'énergie des 7<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est la plus élevée par rapport à l'énergie des autres harmoniques pour toutes les conductivités. Cette augmentation marque encore une fois l'activité des décharges électriques à la surface de l'isolateur pour ces conductivités.

Concernant les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental et du 7<sup>ème</sup> harmonique est plus ou moins constante avec l'augmentation de la conductivité du milieu avec une énergie maximale pour la conductivité 6mS/cm. L'énergie du 3<sup>ème</sup> harmonique augmente avec l'augmentation de la conductivité du milieu. L'énergie des harmoniques 5<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est plus élevée que celle des 3<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques.

### V.8.3. Tension appliquée $25kV_{eff}$ :



**Figure V.21 :** Energie des harmoniques de la tension appliquée et du courant de fuite pour différentes conductivités avec une concentration de 200 g/l en kaolin sous pollution non-uniforme.

Pour ce dernier palier de tension et pour les harmoniques du courant de fuite, l'énergie du fondamental est plus ou moins constante avec une énergie maximale pour la conductivité 6mS/cm. L'énergie du 3<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmonique augmente en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmonique varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est la plus élevée par rapport aux énergies des autres harmoniques.

Concernant les harmoniques de la tension appliquée, nous remarquons que l'énergie du fondamental et l'harmonique 3<sup>ème</sup> est plus ou moins constante avec l'augmentation de la conductivité du milieu. L'énergie des harmoniques 5 et 9 varie aléatoirement en fonction de la conductivité du milieu. L'énergie du 7<sup>ème</sup> harmonique augmente avec l'augmentation de la conductivité du milieu. L'énergie du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmonique est plus élevée que celle des 3<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques.



## V.9. Conclusion :

Cette étude nous a permis de conclure que l'énergie des harmoniques du courant de fuite augmente avec la sévérité de la pollution, en particulier pour les 3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmoniques et ceci pour tous les niveaux de tension étudiés. Pour la pollution uniforme l'occurrence des décharges électriques dans la surface de l'isolateur, est détectée par l'augmentation des énergies des 3<sup>èmes</sup> et 5<sup>èmes</sup> harmoniques par rapport à ceux de rang supérieur. Ces observations ont été également faites par d'autres chercheurs sur des isolateurs en polymère [17]. La distorsion du signal de la tension est causée en grande partie par les 5<sup>èmes</sup> et 7<sup>èmes</sup> harmoniques. Nous avons aussi pu constater que l'occurrence des décharges électriques accentue la distorsion du signal de la tension appliquée, à cause des chutes de tension observées au niveau de la crête. L'élévation du niveau de tension appliquée participe à l'augmentation d'énergie des harmoniques de tension appliquée et par conséquent de ceux du courant de fuite qui traverse la surface isolante.

L'assèchement du plan pour les grandes conductivités (6mS/cm, 10mS/cm et 20mS/cm) est plus rapide car l'énergie apportée par les décharges fait augmenter l'amplitude des 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> harmoniques en plus du fondamental. Cette énergie est beaucoup plus importante que celle des faibles conductivités (1,2mS/cm et 3,5mS/cm).

L'amorçage des décharges électriques pour les grands niveaux de tension (25 kV<sub>eff</sub> et plus) cause une augmentation brusque de l'amplitude du courant de fuite qui a pour effet d'amplifier de façon significative l'énergie des 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> harmoniques.

Pour la pollution non-uniforme, le diagnostic de la sévérité de la pollution peut être fait en se basant sur l'énergie du fondamental et des 5<sup>ème</sup> et 9<sup>ème</sup> harmoniques du courant de fuite, pour les faibles niveaux de tension (< 15kV<sub>eff</sub>). Pour les niveaux de tension supérieurs, l'augmentation de la concentration en kaolin peut être déduite de l'augmentation d'énergie des 5<sup>èmes</sup> et 7<sup>èmes</sup> harmoniques. Les décharges électriques à la surface de l'isolateur, contiennent une quantité d'énergie considérable emmagasinée principalement dans les 3<sup>èmes</sup> et 5<sup>èmes</sup> harmoniques du courant de fuite.

L'amorçage des décharges parallèles dans les intervalles d'air est détecté de la même manière que la pollution uniforme par le 3<sup>ème</sup> harmonique, caractérisé par une grande énergie par rapport aux harmoniques de rang supérieur.

Les 3<sup>èmes</sup>, 5<sup>èmes</sup> et 7<sup>èmes</sup> harmoniques peuvent être utilisés pour différencier la pollution uniforme de la pollution non-uniforme. En effet, lorsqu'il s'agit d'une pollution uniforme, les 3<sup>èmes</sup> et 5<sup>èmes</sup> harmoniques ont une énergie plus importante par rapport à l'énergie des harmoniques de rang supérieur. Pour la pollution non-uniforme, les énergies des 5<sup>èmes</sup> et 7<sup>èmes</sup> harmoniques sont prépondérantes.

En définitif, L'activité des décharges parallèles à la surface du modèle est, pour toutes les conductivités étudiées un signe précurseur d'un contournement probable. Afin d'empêcher ce contournement, une surveillance de l'amplitude du fondamental et du 3<sup>ème</sup> harmonique du courant de fuite constitue un bon outil de diagnostic in situ. En effet, lorsque l'énergie du 3<sup>ème</sup>

harmonique est très élevée et proche de celle du fondamental, le contournement de l'isolateur est imminent. Cette énergie est d'autant plus importante avec l'augmentation de la conductivité du milieu et la concentration en kaolin pour les deux cas de pollution uniforme et non-uniforme.

*Chapitre VI :*

*Etude de la pollution par la  
technique des ondelettes*

## VI.1. Introduction :

Dans ce chapitre, l'utilisation de la technique des ondelettes a pour objectif de caractériser l'état de surface du modèle de l'isolateur. Nous exploitons en premier lieu le signal de la tension appliquée pour les différentes conductivités, puis les différentes concentrations en kaolin dans le cas de la pollution uniforme en utilisant la CWT qui étudie la nature fractale de cette onde pour chaque conductivité et concentration en kaolin. En deuxième lieu, le signal du courant de fuite est décomposé par la DWT pour comprendre le comportement des composantes fréquentielles avec l'augmentation de la concentration en kaolin. Cette étude est réalisée pour les deux cas de configuration de la pollution, pollution uniforme et non-uniforme.

## VI.2. Pollution uniforme :

Pour ce cas, un problème majeur se pose qui est celui de différencier une onde de tension déformée par les harmoniques du réseau d'une autre, qui subirait des distorsions par les décharges parallèles. Pour cela, la comparaison est faite par rapport à une onde de tension parfaitement sinusoïdale et une autre déformée par les harmoniques.

Le traitement des signaux de la tension appliquée est effectué grâce au logiciel MATLAB® qui calcule les coefficients de la CWT et la fréquence correspondante à chaque échelle.

### VI.2.1. Transformée en ondelette continue de la sinusoïde pure :

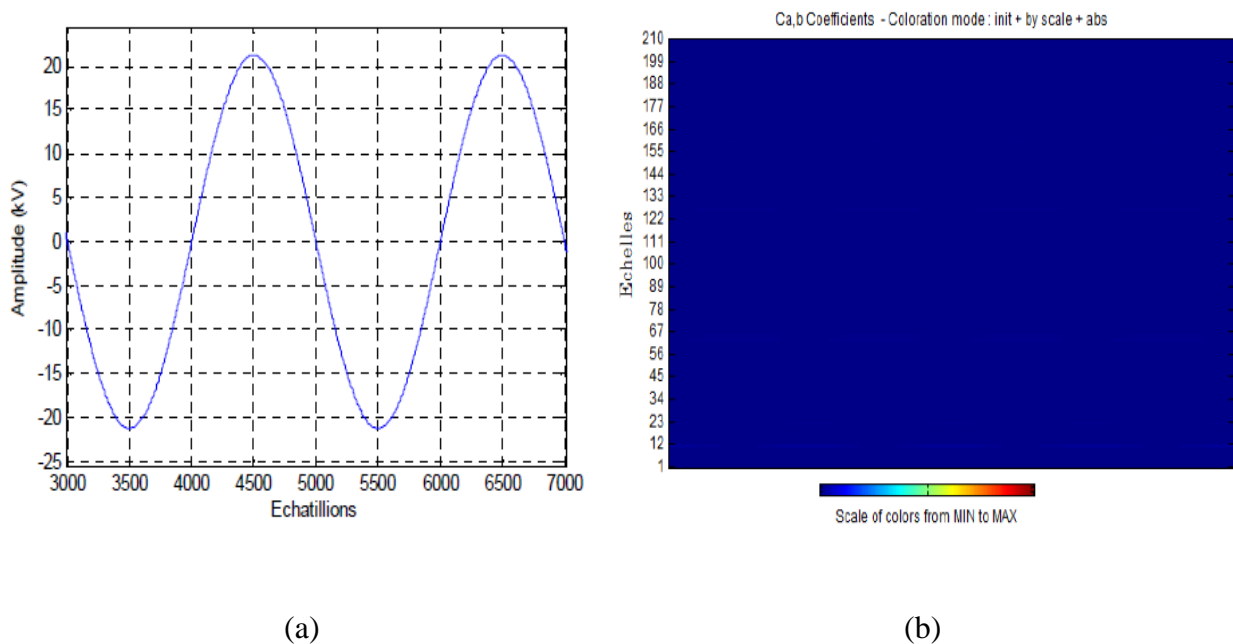


Figure V.1 : (a) sinusoïde pure à 15 kVeff, (b) scalogramme de la sinusoïde pure.

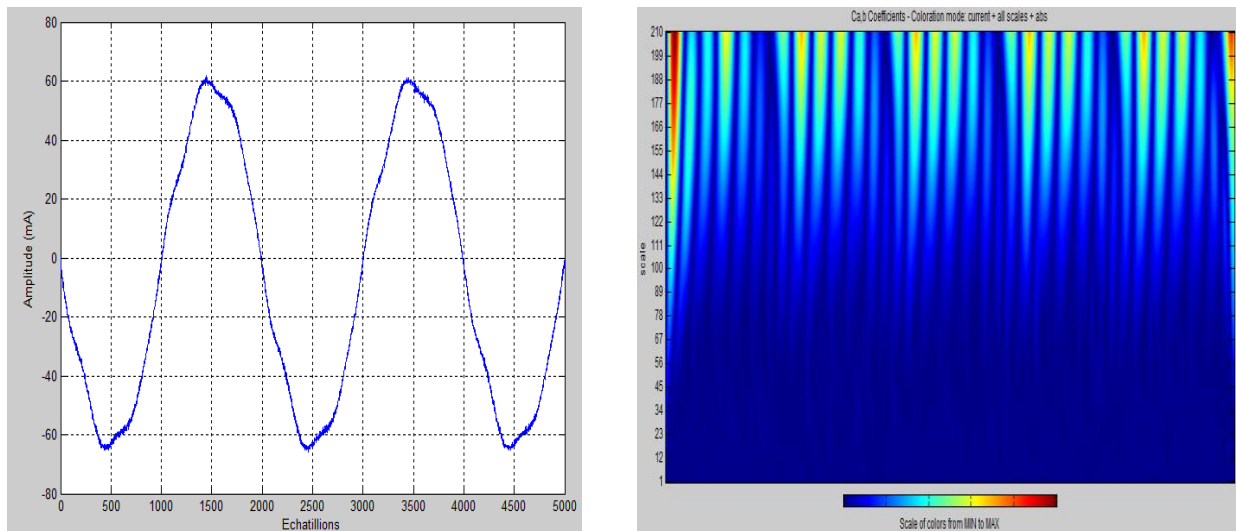
Nous constatons que le scalogramme de la sinusoïde pure n'affiche aucune corrélation entre la CWT de la tension et l'ondelette de Morlet pour toutes les échelles considérées.

### **VI.2.2. Influence de la conductivité volumique:**

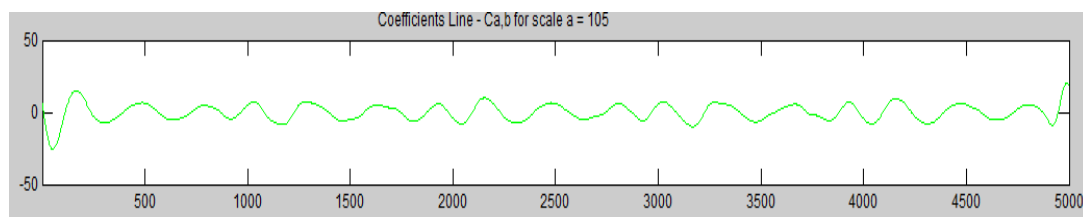
Cette partie nous a permis d'étudier l'influence de la conductivité volumique en fixant simultanément la tension appliquée à 30 kV et la concentration en kaolin à 40 g/l.

#### **VI.2.2.1. Conductivité 1.2 mS/cm et concentration 40 g/l de kaolin :**

- **Tension appliquée 30 kV<sub>eff</sub> :**



(a)



(b)

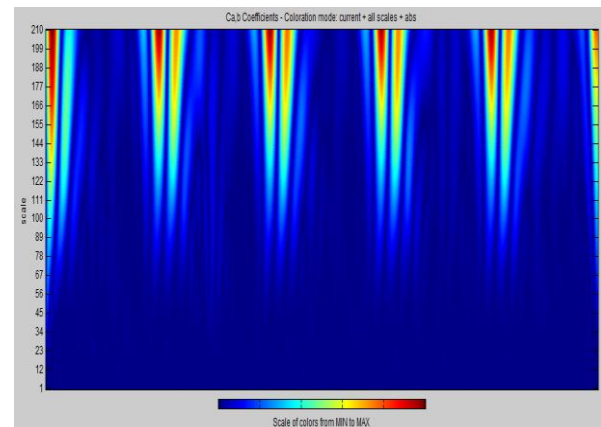
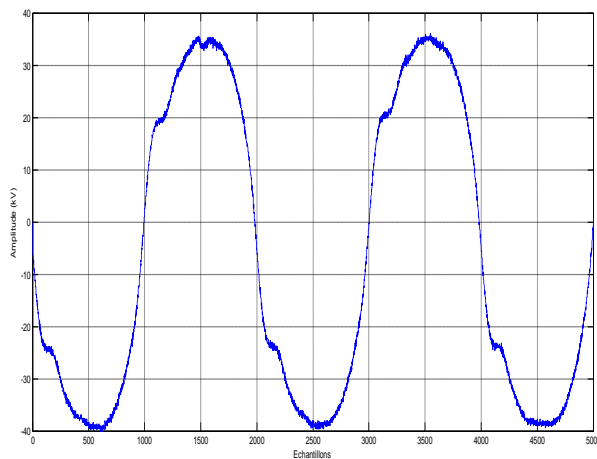
**Figure VI.2 :** Conductivité 1.2 mS/cm et 40 g/l de concentration de kaolin: (a) Forme d'onde de la tension appliquée à 30 kV<sub>eff</sub> et leur Scalogramme (b) Exemple des Coefficients de la CWT pour  $a = 105$ .

Pour cette conductivité, nous remarquons que le signal de la tension affiche une légère distorsion au niveau de la crête et au voisinage de l'axe des temps. Son scalogramme montre que les coefficients ont une valeur maximale (couleur rouge intense) pour de grandes échelles (de 188 à 210) pour les déformations observées sur la crête du signal (signe de faibles chutes de tension). Cela signifie que ces perturbations oscillent à des fréquences très faibles indiquant que l'activité des décharges parallèles à la surface est moindre.

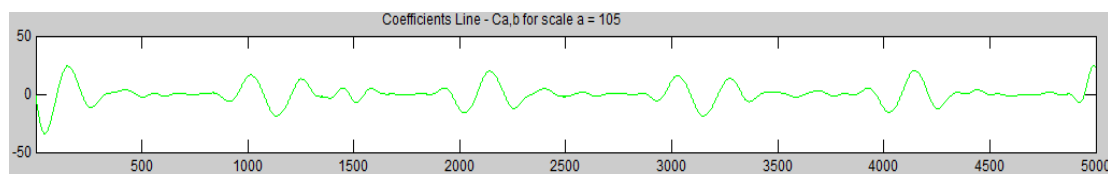
Les coefficients de la CWT pour l'échelle  $a = 105$  montrent que la corrélation entre l'oscillation de l'ondelette de Daubechies 4 et celle de la transformée en ondelette de la tension est quasi inexistante vue la faible activité des décharges. Le choix de cette échelle nous permet de bien différencier les conductivités volumiques et donc de caractériser la sévérité de la pollution.

### VI.2.2.2. Conductivité 6 mS/cm et concentration 40 g/l de kaolin :

- Tension appliquée 30 kV<sub>eff</sub> :



(a)



(b)

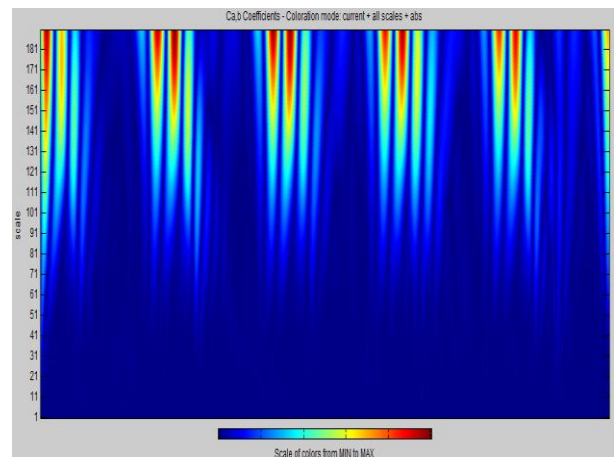
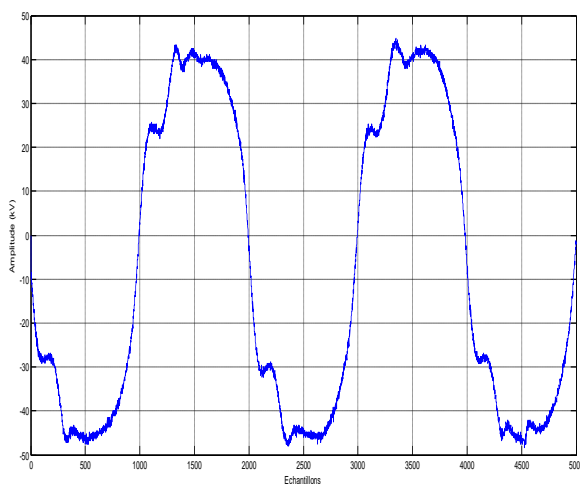
**Figure VI.3 :** Conductivité 6 mS/cm et 40 g/l de concentration de kaolin : (a) Forme d'onde de la tension appliquée à 30 kV<sub>eff</sub> et leur Scalogramme (b) Exemple des Coefficients de la CWT pour  $a = 105$ .

Pour ce cas, nous observons que l'onde de tension a une allure presque sinusoïdale avec des pics descendants sur la crête à cause d'un court-circuit partiel et brutal causé par les décharges électriques à la surface de l'isolateur. Le scalogramme correspondant à cette tension montre de manière similaire que les perturbations causées par ces décharges sont de faibles fréquences à cause de la forte corrélation entre la transformée en ondelette du signal de la tension et l'ondelette analysante pour les grandes échelles (couleur rouge intense). Toutefois ces perturbations sont un peu plus nombreuses puisqu'elles déforment la tension à des instants relativement rapprochés comparativement à la conductivité précédente.

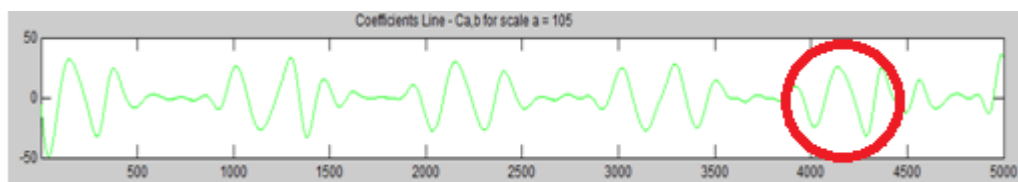
Les coefficients pour l'échelle 105 affichent toujours une faible corrélation qui indique que ces déformations sont de faibles amplitudes.

### VI.2.2.3. Conductivité 20 mS/cm et concentration 40 g/l de kaolin :

- Tension appliquée 30 kV<sub>eff</sub> :



(a)



(b)

**Figure VI.4 :** Conductivité 20 mS/cm et 40 g/l de concentration de kaolin : (a) Forme d'onde de la tension appliquée à 30 kV<sub>eff</sub> et leur Scalogramme (b) Exemple des Coefficients de la CWT pour  $a = 105$ .

Pour cette conductivité, nous constatons que les perturbations sur l'onde de la tension appliquée s'intensifient avec des chutes de tension plus remarquables au niveau de la crête. Le scalogramme montre que les chutes de tension sont causées à des instants très rapprochés avec des coefficients très élevés pour des échelles encore plus faibles comparativement aux deux conductivités précédentes ; ce qui signifie que la fréquence de 'cassure' de l'onde de tension est encore plus élevée indiquant que les décharges parallèles deviennent de plus en plus nombreuses à la surface de l'isolateur. Nous pouvons également dire que l'assèchement du modèle plan est plus rapide vue l'augmentation de l'activité des décharges électriques.

Les coefficients de la CWT pour l'échelle 105 montrent une légère corrélation entre l'ondelette et la transformée continue de la tension appliquée (zone encerclée en rouge) ; ils indiquent que les perturbations atteignent petit à petit les hautes fréquences.

- **Discussion :**

Nous déduisons d'après l'étude de l'influence de la conductivité volumique que l'augmentation de cette dernière génère davantage le taux d'apparition des décharges parallèles. Ces décharges qui deviennent plus énergétiques et rigoureuses avec l'accroissement de la conductivité intensifient la couleur rouge observée au niveau des scalogrammes.

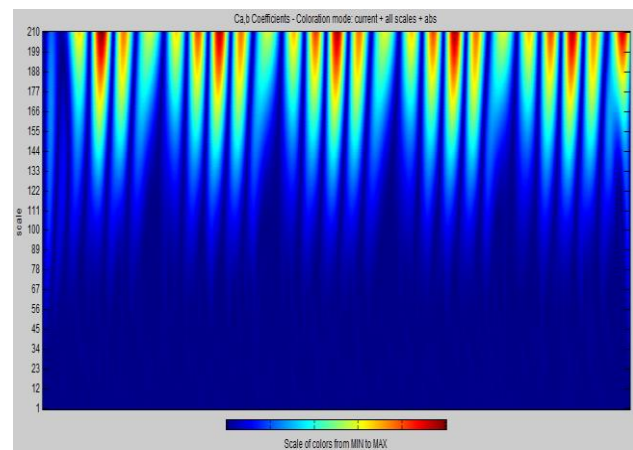
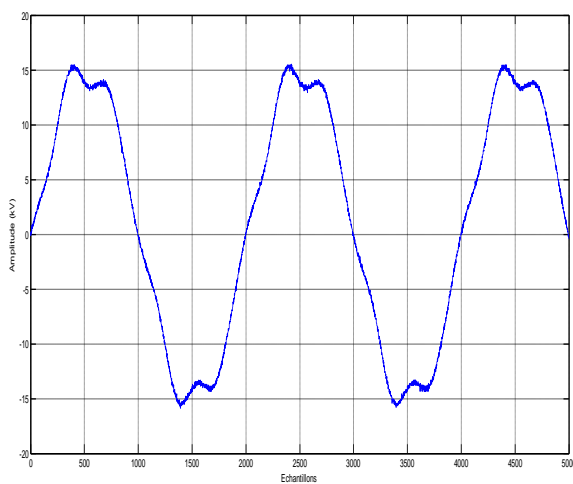


### VI.2.3. Influence de la concentration :

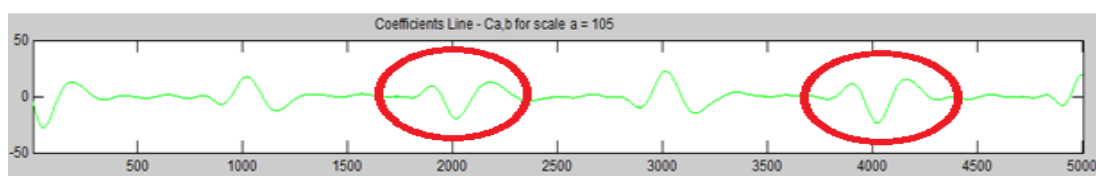
Dans cette partie, nous nous intéressons à l'étude de l'influence de la concentration en kaolin sur le comportement diélectrique de notre modèle. Pour cela nous fixons les deux paramètres à savoir la tension appliquée et la conductivité volumique et nous varions la concentration en kaolin de 100 g/l à 200 g/l.

#### VI.2.3.1. Conductivité 20 mS/cm et concentration 100 g/l de kaolin :

- Tension appliquée 15 kV<sub>eff</sub> :



(a)



(b)

**Figure VI.5** : Conductivité 20 mS/cm et 100 g/l de concentration de kaolin : (a) Forme d'onde de la tension appliquée à 15 kV<sub>eff</sub> et leur Scalogramme (b) Exemple des Coefficients de la CWT pour  $a = 105$ .

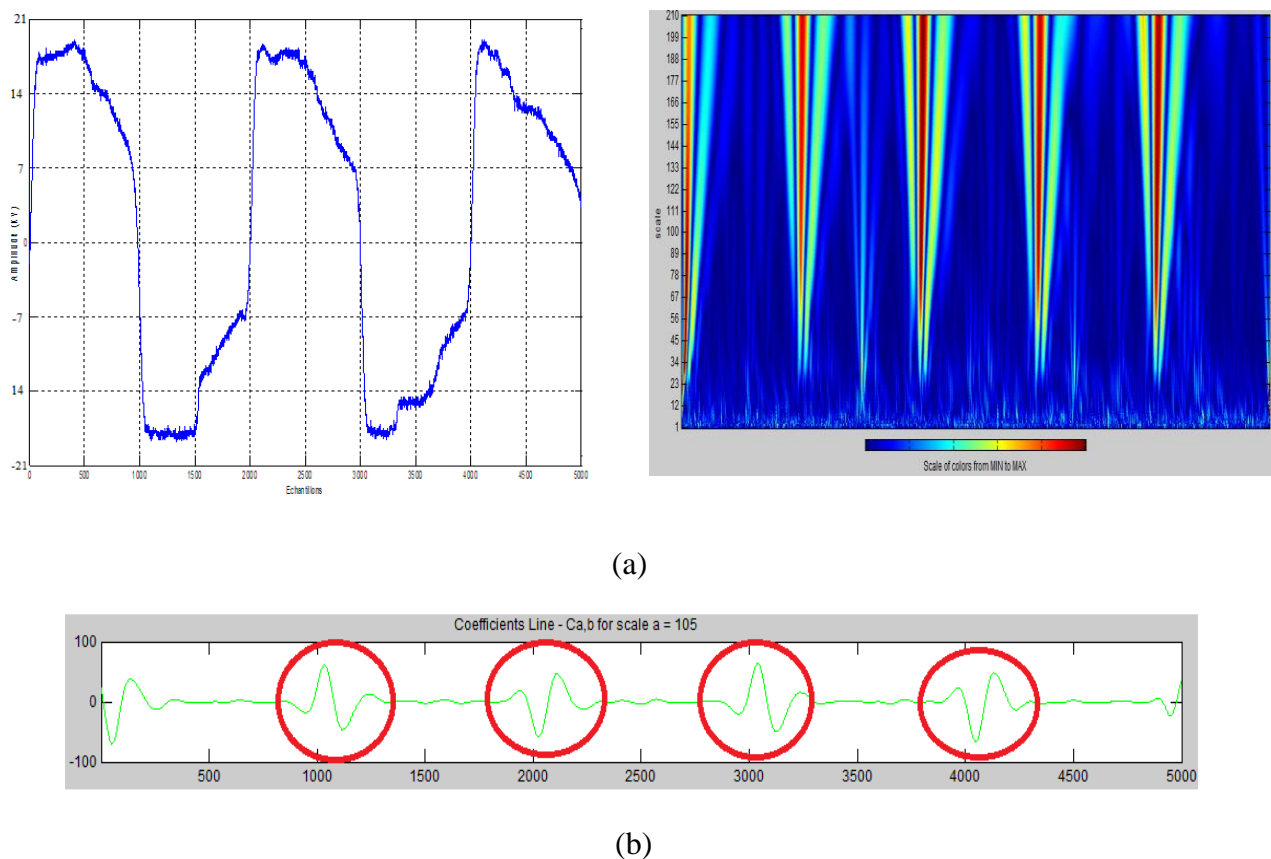
Pour cette conductivité élevée et de concentration de kaolin 100g/l, les perturbations gagnent pratiquement toutes les régions du signal de la tension appliquée. Le scalogramme indique que les coefficients de la CWT sont très élevés pour des échelles encore plus faibles;

c'est-à-dire que des perturbations de plus hautes fréquences apparaissent en plus de celles à faibles fréquences (échelle 156). Ceci peut expliquer l'assèchement encore plus rapide dû à la diminution de la résistance de la couche polluée en présence d'une solution hautement conductrice.

Les coefficients de la CWT calculés pour l'échelle  $a = 105$  montrent une corrélation de plus en plus évidente entre l'ondelette de Daubechies 4 et la transformée en ondelette continue de la tension appliquée.

### VI.2.3.2. Conductivité 20 mS/cm et concentration 200 g/l de kaolin :

- Tension appliquée 15 kVeff :



**Figure VI.6 :** Conductivité 20 mS/cm et 200 g/l de concentration de kaolin : (a) Forme d'onde de la tension appliquée à 15 kVeff et leur Scalogramme (b) Exemple des Coefficients de la CWT pour  $a = 105$ .

Pour cette très haute concentration 200 g/l de kaolin et de 20 mS/cm de conductivité, la cassure de l'onde de tension est très visible pour ce niveau de tension à cause de l'assèchement ultra rapide de la plaque qui intensifie les zones sèches à la surface de

l'isolateur. Le champ électrique est très élevé dans ces espaces, ce qui a pour effet de court-circuiter les micro-capacités existantes et par conséquent une chute de tension encore plus importante. L'analyse par le scalogramme montre que la très haute concentration accélérée l'activité des décharges électriques engendrant des déformations très sévères sur la tension appliquée qui va jusqu'aux très hautes fréquences (échelle 25).

Les coefficients de la CWT calculés pour  $a = 105$  montrent d'avantage de corrélation entre la transformée en ondelette de la tension et l'ondelette de Daubechies 4 avec une amplitude plus élevée, qui traduit la sévérité des chutes de tension observée sur le signal.

- **Discussion :**

Nous constatons d'après l'analyse de ces deux scalogrammes correspondant respectivement aux deux concentrations étudiées (100 et 200) g/l une différence au niveau de l'échelle atteinte. Le premier scalogramme correspondant à la concentration 100g/l atteint l'échelle 170 cependant celui de la concentration de 200 g/l atteint l'échelle 25. Le signal enregistré pour cette dernière concentration comporte des fréquences encore très élevée que celui enregistré pour 100 g/l.

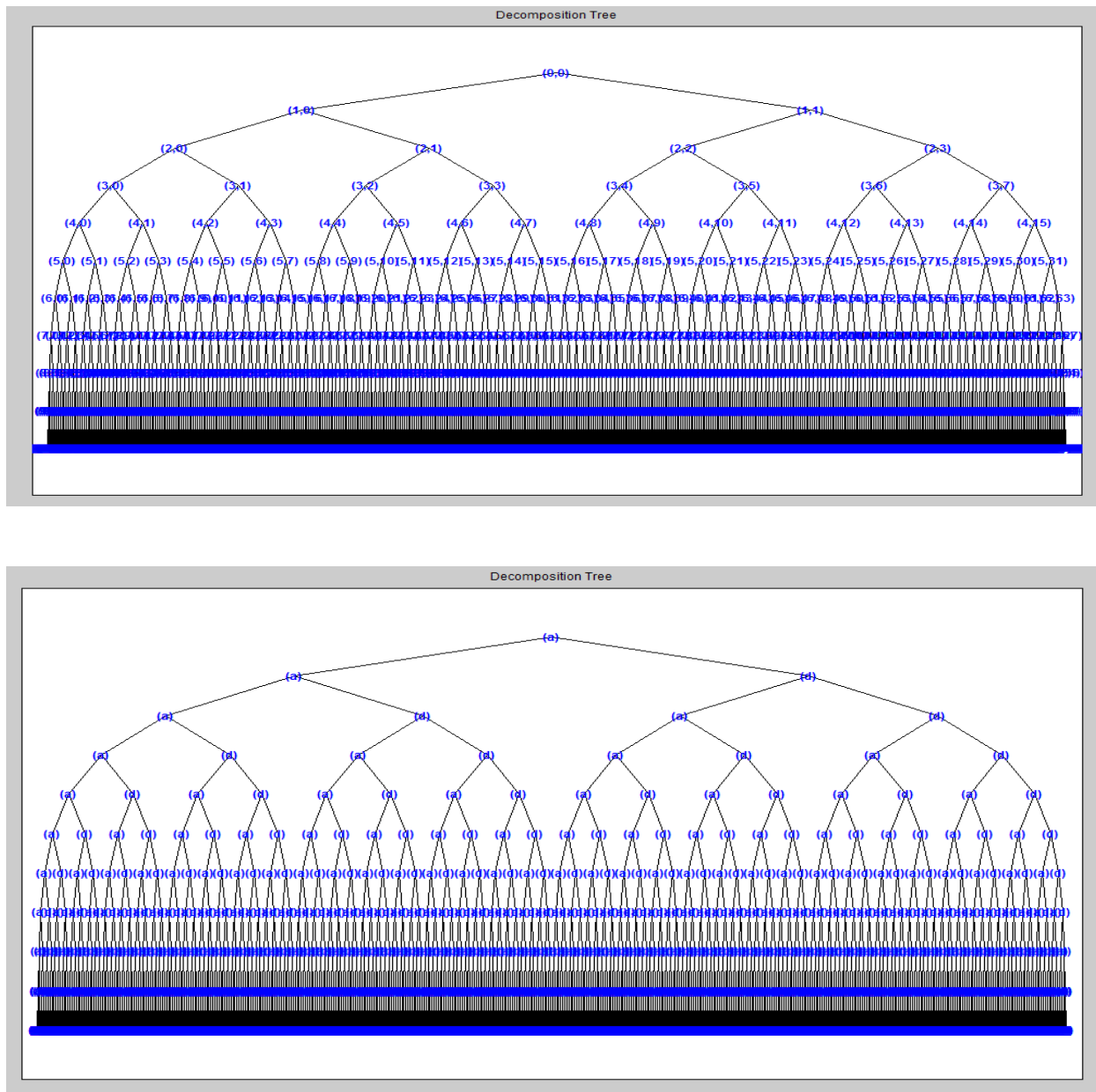
#### **VI.2.4. Conclusion sur l'analyse par la CWT :**

Possible D'après l'analyse faite par la CWT sur l'onde de tension, le diagnostic de la sévérité de la pollution peut se faire par l'intermédiaire du scalogramme qui est une projection des coefficients calculés pour des échelles données sur un plan orthogonal.

Concernant l'analyse par le scalogramme, l'augmentation de la conductivité de la couche polluée est détectée grâce aux décharges qui ont lieu à la surface de l'isolateur. Cette augmentation peut être observée par la couleur des coefficients qui spécifient leurs valeurs selon qu'elles soient faibles ou élevées. Un coefficient élevé pour une grande échelle indique une oscillation du signal à basse fréquence et inversement pour une échelle de plus petite valeur. Dans notre cas, la fréquence des perturbations occasionnées sur le signal de la tension augmente avec la sévérité de la conductivité du milieu et la concentration de la pollution utilisée. Cela montre que le diagnostic de l'état de surface de l'isolateur est grâce au signal de la tension appliquée mais pendant l'occurrence des décharges électriques.

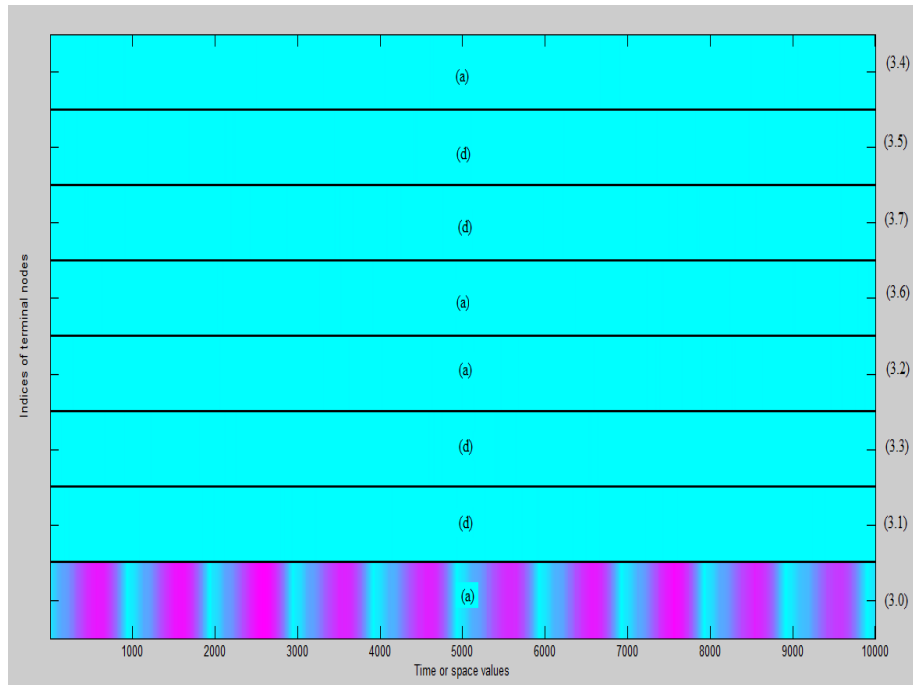
**VI.3. Pollution uniforme et non-uniforme :**

Pour les deux configurations uniforme et non-uniforme, le signal du courant de fuite subit une décomposition en paquet d'ondelettes de **Daubechies 4** jusqu'au niveau 10. La décomposition en paquet d'ondelette présente une analyse multi-résolutionnelle très fine du signal original. Cette résolution nous permet d'avoir dans la zone de fréquence [0- 100000 Hz] le comportement des différents nœuds correspondant soit au détail ou à l'approximation. Les figures représentées ci-dessous montrent l'organigramme de la décompositions du signal du courant de fuite en paquet d'ondelettes jusqu'à niveau 10.



**Figure VI.7 : Décomposition en paquet d'ondelettes jusqu'au niveau 10**

La figure VI.8 montre la variation fréquentielle des nœuds correspondant au niveau 3 de la décomposition en paquet d'ondelette et chaque nœud est référencié par deux numéros, le premier correspondant au niveau de décomposition et le deuxième c'est l'ordre de la position du nœud au niveau spécifique. Chaque nœud peut signifier aussi un détail (d) ou une approximation (a). Comme mentionné ci-dessous.

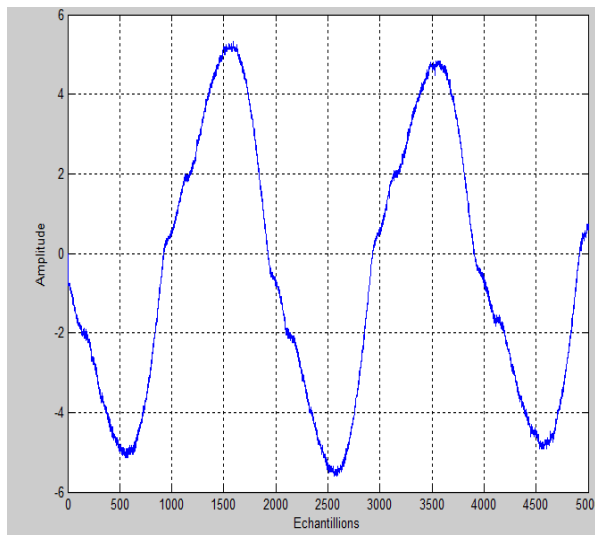


**Figure VI.8 :** la variation fréquentielle des nœuds niveau 3

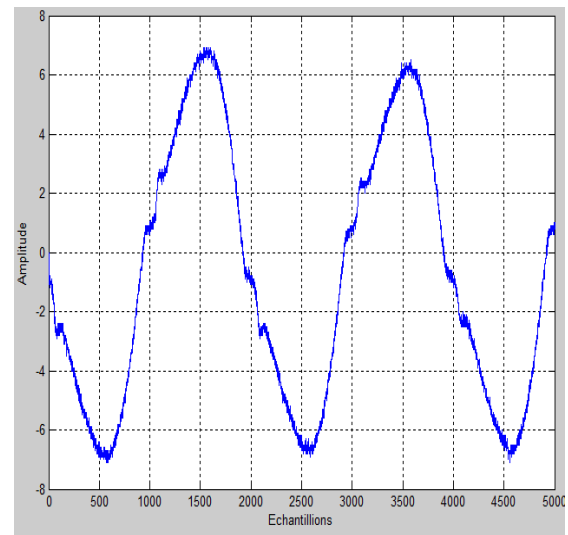
### **VI.3.1. Pollution uniforme :**

La figure VI.9 montre les différentes formes d'onde du courant de fuite obtenues pour les trois concentrations (40, 100, 200) g/l de kaolin à 25 kV<sub>eff</sub> et pour une conductivité de 10 mS/cm. Nous remarquons que les distorsions observées au niveau de ces signaux sont très importantes. Elles sont dues certainement au changement de l'état de surface du modèle de l'isolateur pollué.

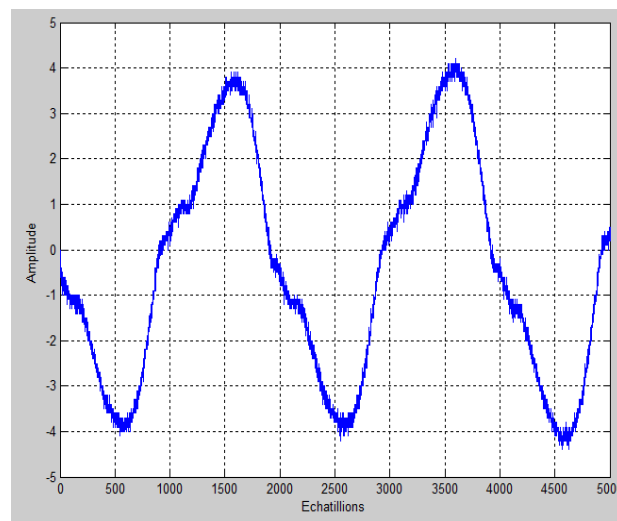
Nous constatons également la présence de déformations sur tout le signal du courant de fuite. Celles-ci augmentent avec l'accroissement de la concentration en kaolin. Pour la concentration 200 g/l, des décharges électriques intenses ont lieu à la surface de l'isolateur et elles déforment davantage la forme du courant de fuite et augmentent l'amplitude des pics. L'augmentation de l'amplitude de ces pics peut être interprétée par la diminution de la résistance de la couche polluée de l'isolateur, ce qui rend l'occurrence d'une décharge de contournement très probable.



(a)



(b)



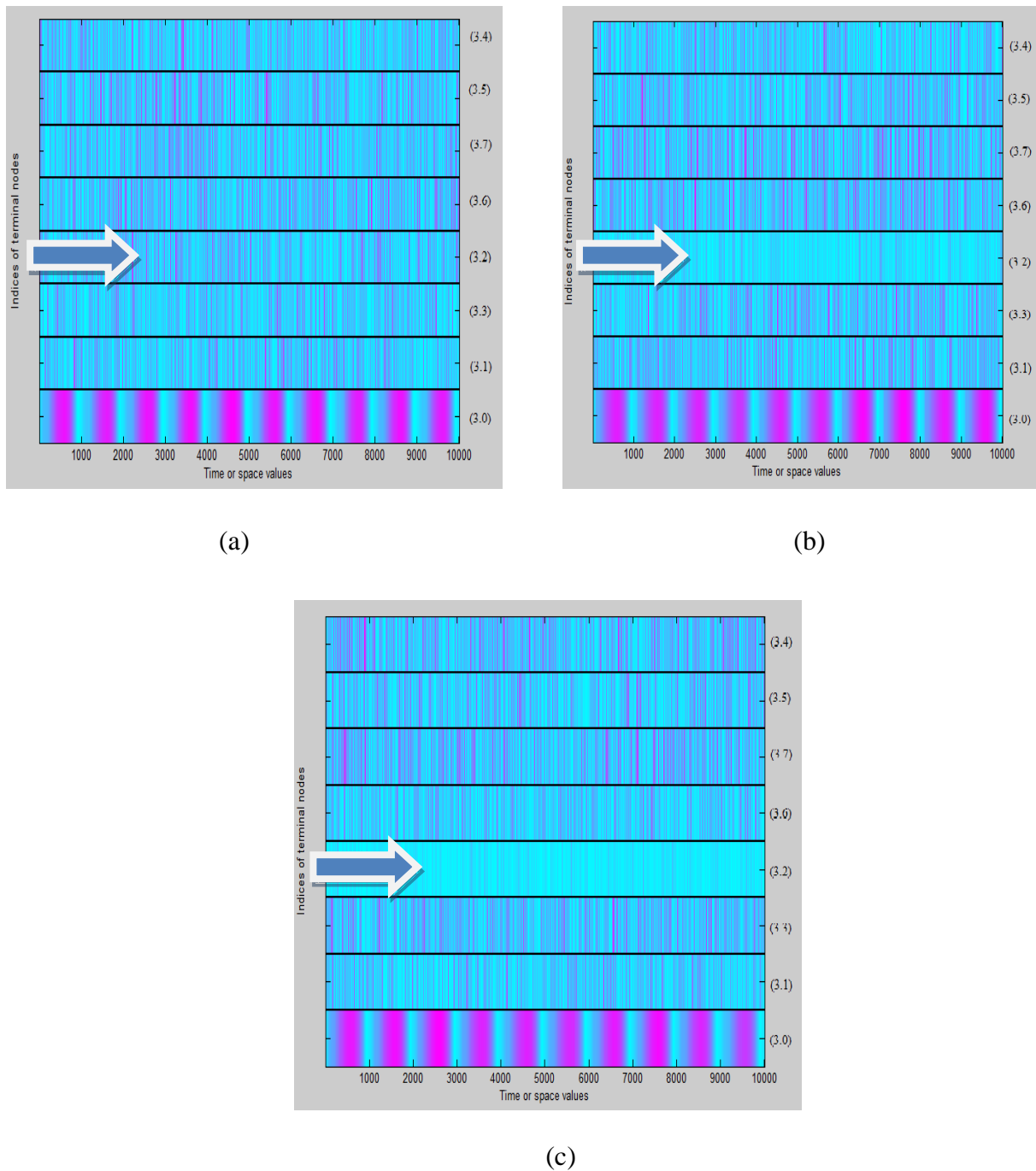
(c)

**Figure VI.9 :** Formes d'ondes du courant de fuite pour une pollution uniforme à 25 kVeff et une conductivité de 10 mS/cm: (a) 40 g/l de kaolin, (b) 100 g/l de kaolin, (c) 200 g/l de kaolin.

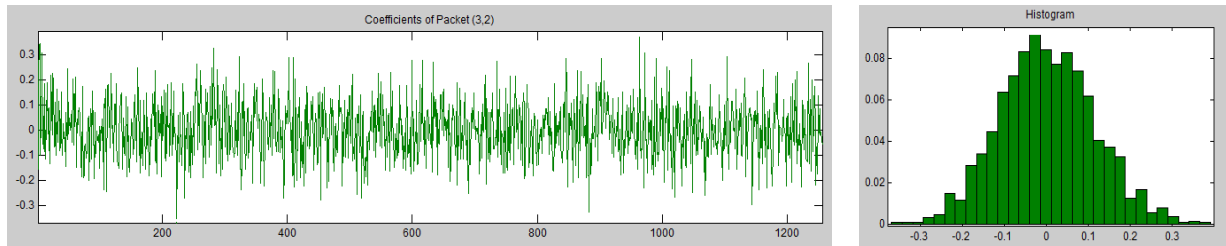
La décomposition du courant de fuite en paquet d'ondelettes permet d'identifier les composantes fréquentielles qui peuvent servir au diagnostic de l'état de surface de l'isolateur pollué.

La figure VI.10 représente des scalogrammes autrement dit représentation des coefficients des nœuds correspondant au niveau trois de décomposition en paquet d'ondelettes. L'appellation du nœud peut signifier un détail ou une approximation. Les représentations suivantes serviront comme un outil de diagnostic très efficace pour cibler le

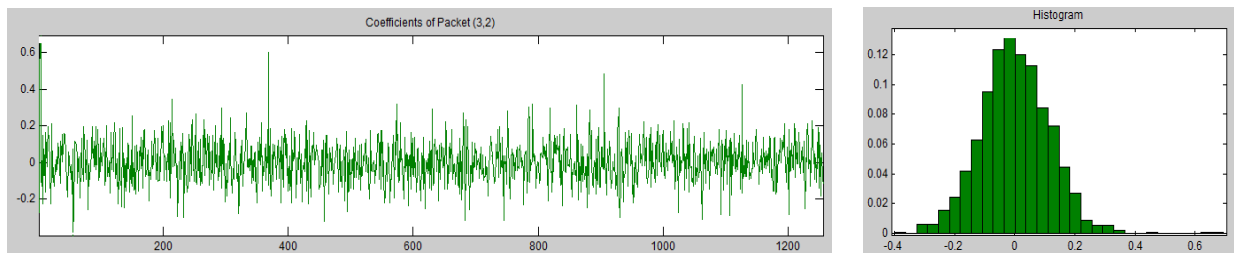
nœud intéressant qui nous permettra une éventuelle différenciation. La décomposition en paquet d'ondelettes est calculée à l'aide du logiciel MATLAB®.



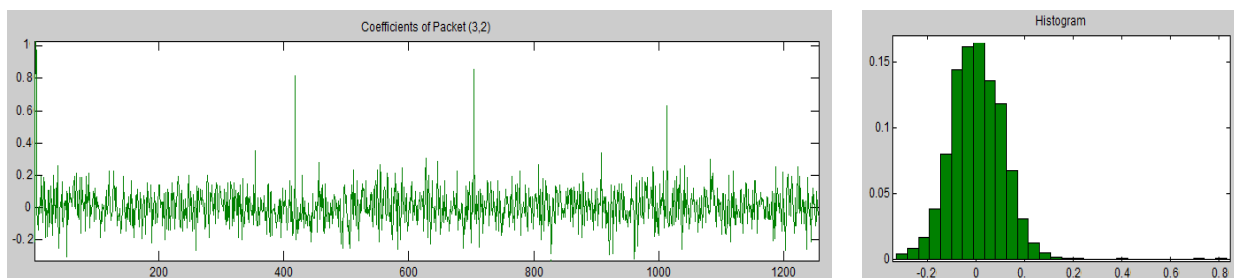
**Figure VI.10 :** Représentation de la décomposition en paquet d'ondelettes de niveau trois des différents nœuds pour la pollution uniforme (a) 40 g/l de kaolin, (b) 100 g/l de kaolin, (c) 200 g/l de kaolin.



(a)



(b)



(c)

**Figure VI.11 :** Evolution du nœud (3,2) et son histogramme du signal du courant de fuite sous la pollution uniforme à 25 kVeff et une conductivité volumique de 10 mS/cm : (a) 40 g/l, (b) 100 g/l, (c) 200 g/l.



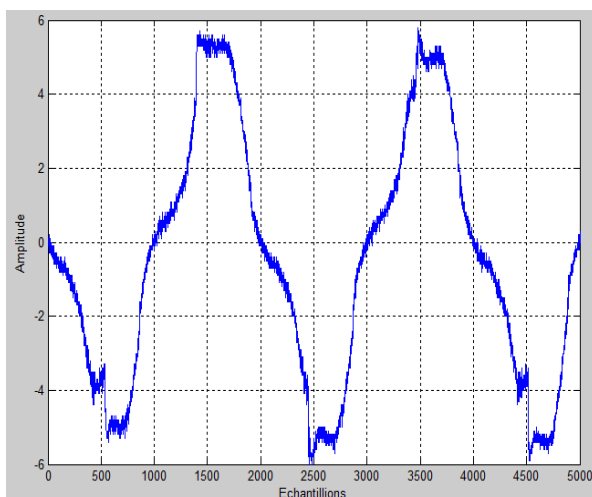
D'après la représentation de la Figure VI.10, nous constatons une variation au niveau du nœud (3.2) correspondant dans ce cas à une approximation. Cette variation est caractérisée par un changement de couleur pour les trois concentrations en kaolin étudiées. Initialement et pour une faible concentration en kaolin (40g/l), la couleur du nœud (3.2) était en bleu hachurée en violet. En augmentant la concentration du kaolin à 100g/l, le nombre d'hachures constaté précédemment diminue. Pour la plus grande concentration en kaolin à savoir 200g/l, nous constatons pratiquement la disparition totale des hachures.

La figure VI.11, représente les variations de l'amplitude du nœud (3.2) et leur distribution (histogramme) pour chaque concentration étudiée. Une analyse attentive des trois nœuds nous montre une variation au niveau de l'amplitude maximale de ces approximations. Nous notons également que cette amplitude maximale est d'autant plus importante que la concentration en kaolin est élevée. Indiquant que les décharges parallèles deviennent de plus en plus nombreuses à la surface de l'isolateur.

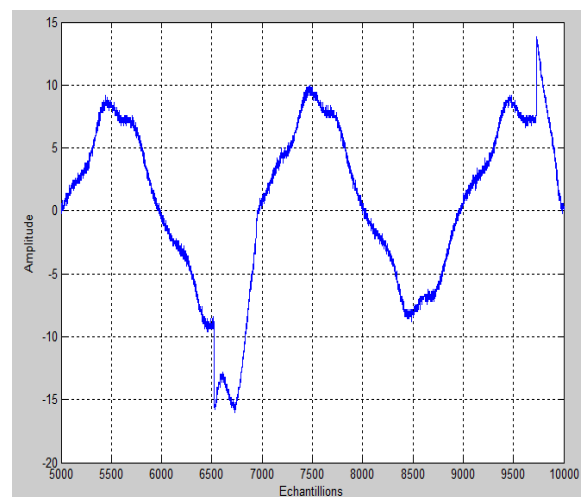
### **VI.3.2. Pollution non-uniforme :**

Pour cette configuration, les formes d'ondes du courant de fuite pour chaque concentration sont pratiquement différentes à celles obtenues pour la pollution uniforme.

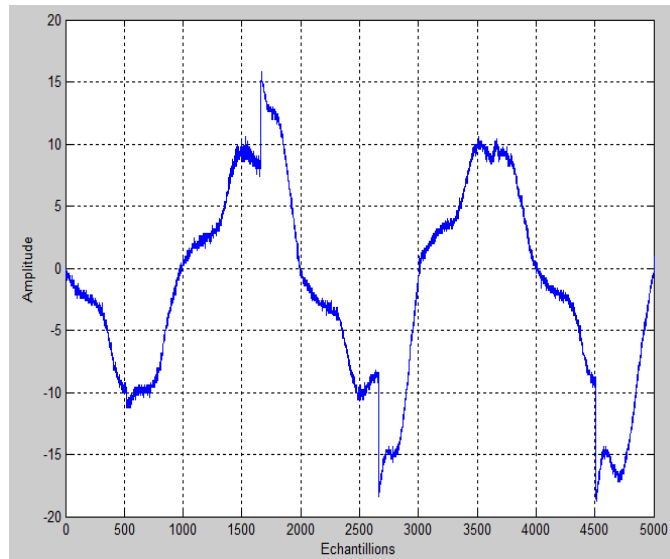
Les distorsions observées au niveau de ces signaux sont très remarquables. Celles-ci montrent une forme d'onde typique lorsque des décharges ont lieu dans les intervalles d'air formés par les électrodes. Toutefois, les pics enregistrés sur les deux crêtes des signaux du courant de fuite ont une amplitude qui varie d'une manière proportionnelle avec la concentration en kaolin. L'augmentation de l'amplitude de ces pics peut être interprétée par la diminution de la résistance de la couche polluée sur l'isolateur lorsque la concentration en kaolin croît, ce qui rend l'occurrence d'une décharge de contournement très probable.



(a)

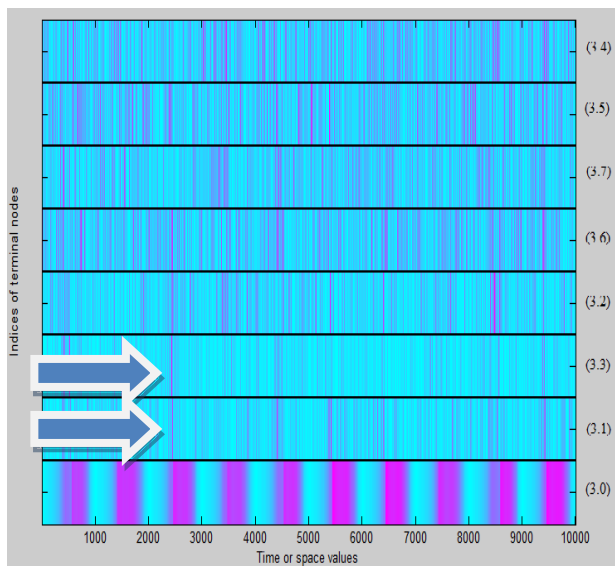


(b)

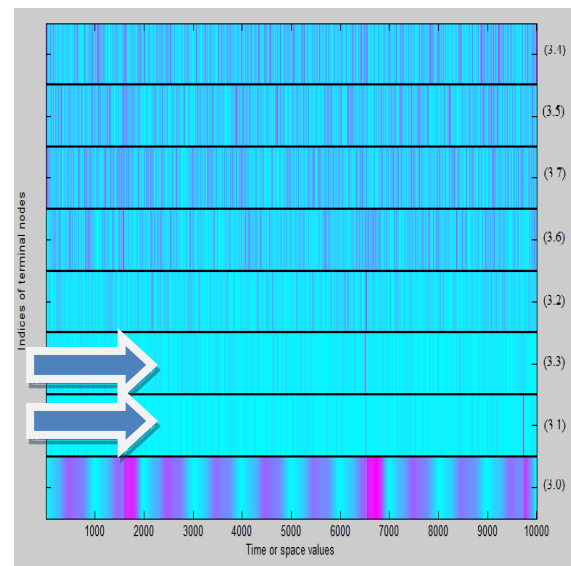


(c)

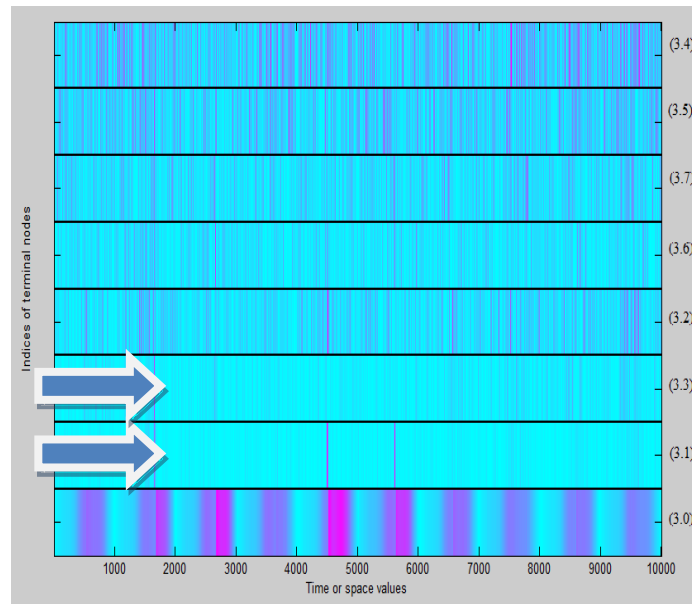
**Figure VI.12 :** Formes d'ondes du courant de fuite pour une pollution non-uniforme à 25 kVeff et une conductivité volumique de 10 mS/cm : (a) 40 g/l de kaolin, (b) 100 g/l de kaolin, (c) 200 g/l de kaolin.



(a)

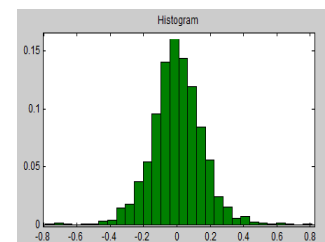
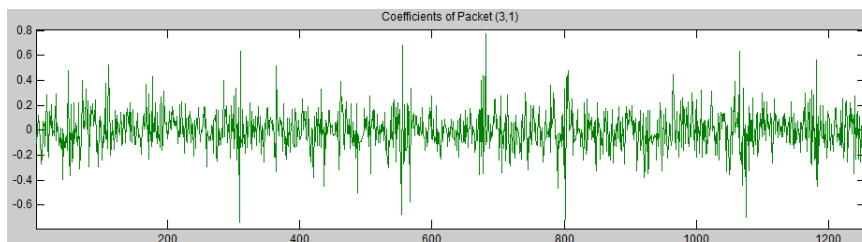


(b)

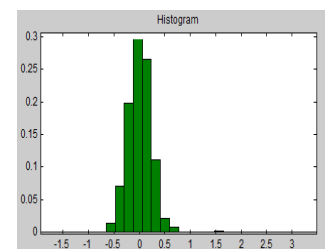
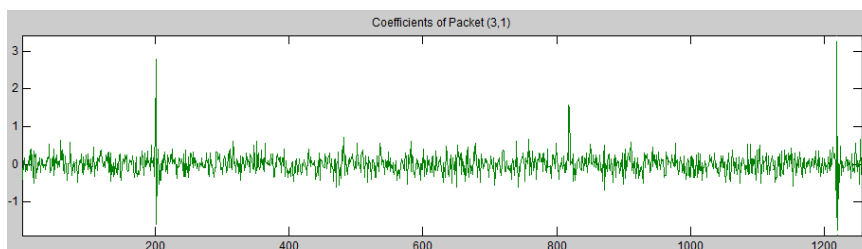


(c)

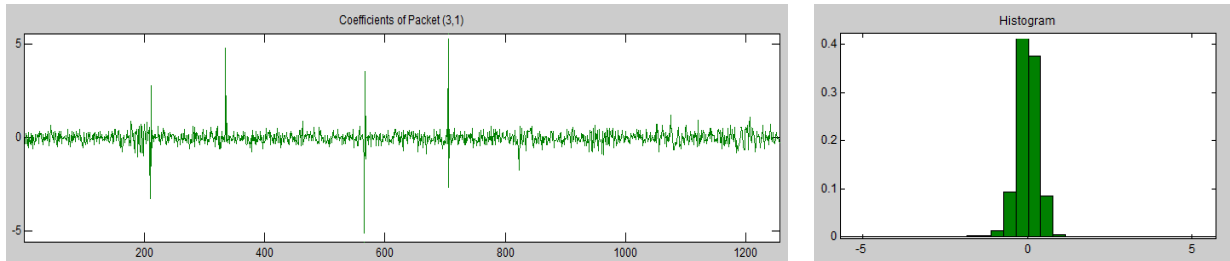
**Figure VI.13 :** Représentation de la décomposition en paquet d'ondelettes de niveau trois des différents nœuds pour la pollution non-uniforme (a) 40 g/l de kaolin, (b) 100 g/l de kaolin, (c) 200 g/l de kaolin.



(a)

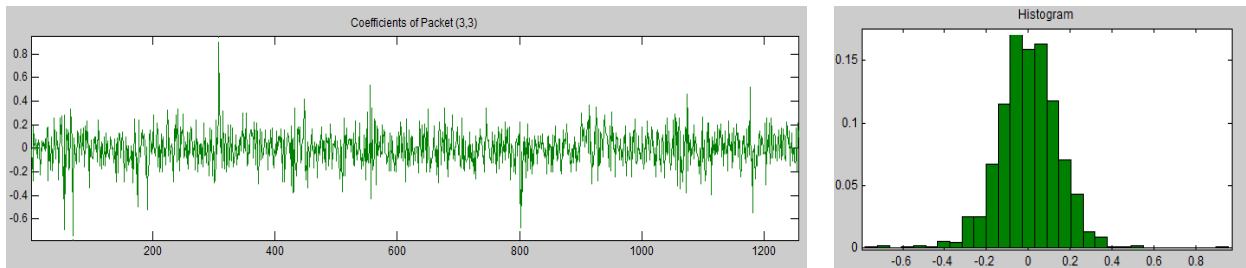


(b)

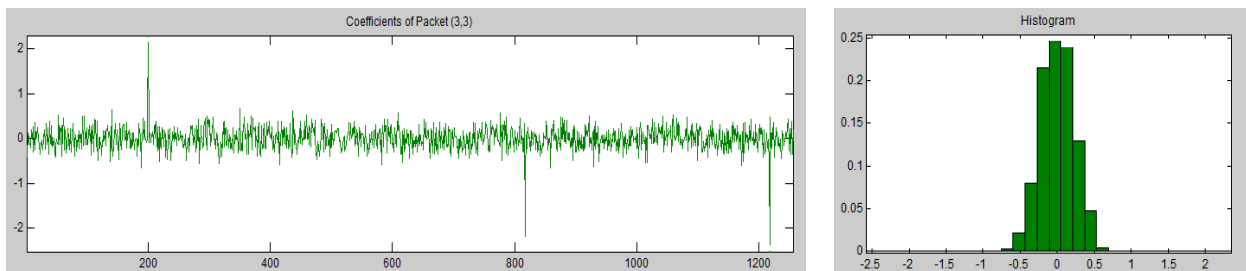


(c)

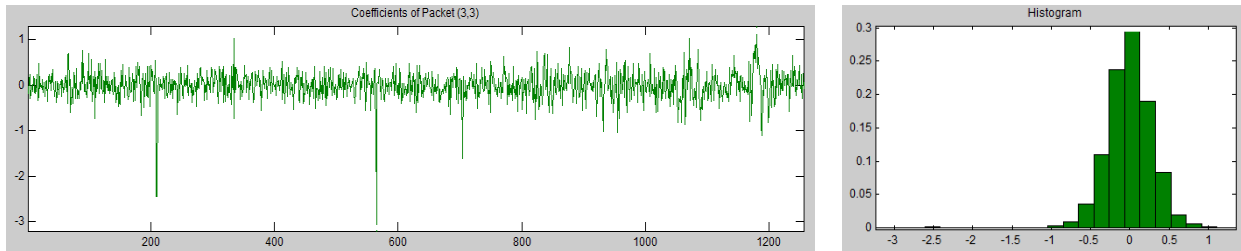
**Figure VI.14 :** Evolution du nœud (3.1) et son histogramme du signal du courant de fuite sous la pollution non-uniforme à  $25 \text{ kV}_{\text{eff}}$  et une conductivité volumique de  $10 \text{ mS/cm}$ : (a)  $40 \text{ g/l}$ , (b)  $100 \text{ g/l}$ , (c)  $200 \text{ g/l}$ .



(a)



(b)



(c)

**Figure VI.15 :** Evolution du nœud (3.3) et son histogramme du signal du courant de fuite sous la pollution non-uniforme à  $25 \text{ kV}_{\text{eff}}$  et une conductivité volumique de  $10 \text{ mS/cm}$ : (a)  $40 \text{ g/l}$ , (b)  $100 \text{ g/l}$ , (c)  $200 \text{ g/l}$ .

D'après la représentation de la figure VI.13, nous remarquons que les nœuds (3.1) et (3.3) ont une représentation déferente pour les trois concentrations. Les nœuds concernés dans ce cas de figure représentent deux détails. Cette différence s'interprète par la couleur des zones représentant les nœuds (3.1) et (3.3). La densité des hachures est très élevée pour la concentration de  $40 \text{ g/l}$ , cette densité est inversement proportionnelle à la concentration en kaolin. Nous constatons que cette densité diminue légèrement pour la concentration de  $100 \text{ g/l}$  et disparaît pratiquement pour la concentration de  $200 \text{ g/l}$ .

Pour les configurations représentées par les caractéristiques VI.14 et VI.15, les formes d'ondes des signaux des nœuds (3.1) et (3.3) et leur distribution (histogramme) sont susceptibles de prédire l'augmentation de la concentration en kaolin. L'amplitude maximale des nœuds représentant les coefficients des détails augmente avec l'accroissement de la concentration en kaolin. A cause des décharges parallèles deviennent de plus en plus nombreuses à la surface de l'isolateur. Nous pouvons également dire que l'assèchement du modèle plan est plus rapide vue l'augmentation de l'activité des décharges électriques.

### **VI.3.3. Conclusion sur l'analyse par la DWT :**

La décomposition du courant de fuite par la DWT a pu identifier la totalité de ses composants fréquentiels pour étudier l'attitude de ces dernières vis-à-vis du type de pollution uniforme ou non-uniforme. La décomposition en paquet d'ondelettes est une représentation des coefficients des différents nœuds.

Pour la pollution uniforme, la décomposition en paquet d'ondelettes indique que le nœud (3.2) distingue entre les différentes concentrations. En effet, plus la concentration est élevée et plus l'amplitude maximale du nœud (3.2) est grande.

Pour la pollution non-uniforme, les nœuds (3.1) et (3.3) sont ceux qui identifient l'augmentation la concentration. Cela signifie que la différenciation entre la pollution uniforme et non-uniforme peut se faire grâce à l'augmentation des ces derniers.

Dans le cas où la pollution de la couche n'est pas connue, nous nous basons sur la représentation en paquet d'ondelettes, pour la prédiction de la configuration de la pollution (uniforme ou non-uniforme).

# *Conclusion générale*

Le présent travail nous a permis de voir l'impact de la répartition de la couche polluée (uniforme et non-uniforme) sur le comportement d'un modèle plan simulant l'isolateur PSV 120 B. ce dernier a été choisi pour permettre une bonne visualisation du développement des décharges parallèles sur sa surface isolante.

Dans un premier temps, l'étude de la variation de la tension de contournement pour les deux cas de pollutions étudiées (uniforme et non-uniforme) révèle que la rigidité diélectrique du modèle de l'isolateur diminue au fur et à mesure que la concentration en kaolin et la conductivité volumique du milieu augmentent. Les résultats de contournement varient d'une manière similaire pour les deux configurations.

L'étude du courant de fuite et la charge électrique montre que leur amplitude maximale croit avec l'augmentation de la concentration en kaolin et le niveau de la conductivité du milieu pour les deux cas de pollution (pollution uniforme et pollution non-uniforme), ainsi que l'augmentation de la tension appliquée.

La détermination du déphasage courant de fuite-tension appliquée permet de comprendre le comportement du circuit équivalent du modèle de l'isolateur. Pour le cas de la pollution uniforme, la valeur du déphasage courant-tension diminue pour les faibles conductivités (1,2mS/cm et 3,5mS/cm) avec l'augmentation de la tension appliquée, et donc l'isolateur aura un comportement résistif. Pour les grandes valeurs de la conductivité (6 mS/cm, 10 mS/cm et 20 mS/cm) et pour (100g/l et 200g/l) la valeur du déphasage courant-tension augmente avec l'augmentation de la tension appliquée, et donc l'isolateur aura un comportement capacitif.

Dans un second temps, l'analyse de l'énergie des harmoniques du courant de fuite permet de conclure qu'un diagnostic de la sévérité de pollution est possible en se basant sur les 3èmes, 5èmes et 7ème harmoniques, que se soit pour la pollution uniforme ou pour la pollution non-uniforme. La distinction entre les deux pollutions est établie grâce au signal du courant de fuite, par la domination des 3èmes et 5ème harmoniques dans le cas uniforme et la domination des 5èmes et 7ème harmoniques dans le cas non-uniforme. L'amorçage des décharges parallèles contribue à l'assèchement de la couche polluée à cause d'une élévation significative de l'énergie des 1<sup>er</sup>, 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmoniques. Cet assèchement est plus rapide dans le cas des conductivités volumiques élevées (10 et 20 mS/cm) pour de concentration 40 g/l et plus la concentration en kaolin augmente plus l'assèchement de la couche polluée se fait d'une manière prématurée et pour des conductivités volumiques inférieures. Le niveau de tension appliquée influe également sur l'évaporation de la couche polluée ; en effet plus la tension appliquée augmente plus l'assèchement du plan est important.

Le diagnostic de l'état de surface de l'isolateur par la technique des ondelettes nous a également permis de caractériser la sévérité de la pollution grâce au signal de la tension appliquée (pollution uniforme) via la CWT par l'intermédiaire du scalogramme qui est une projection des coefficients calculés pour des échelles données sur un plan orthogonal et pendant l'activité des décharges parallèles. En effet, plus la conductivité volumique du milieu et la concentration en kaolin augmentent, plus les distorsions de la tension tendent vers les hautes fréquences. Cela signifie que



l'apparition des décharges électriques augmente en fonction de la conductivité du milieu et la concentration en kaolin.

La décomposition par la DWT du signal du courant de fuite nous a permis d'identifier l'attitude des composants fréquentiels pour les deux cas de pollution (uniforme et non-uniforme), en se basant sur la représentation en paquet d'ondelettes. C'est une approche basée sur l'étude des signaux d'approximation et de détail, résultants de la décomposition en paquet d'ondelettes. Ces signaux montrent également l'évolution dans les amplitudes des nœuds qui permettent de caractériser la sévérité de la pollution et de prédire la configuration de la pollution.

## *Références bibliographiques*

- [1] S.Guerfi, « Modélisation des isolateurs de haute tension pollués sous tension continue », Mémoire de Magister, Génie Electrique, UAM Bejaia.
- [2] M.Soufi, M.Zemirline, « Conception d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz », Mémoire de projet de fin d'études, Génie Electrique, ENP 2004.
- [3] M.T.Gencoglu, M.Cebeci, « The pollution flashover on high voltage insulators », Electric Power Systems Research 78, pp 1914–1921, 2008.
- [4] K.Amriche, S.Benayad, « Modélisation des principales caractéristiques d'un isolateur pollué sous tension continue », Mémoire de projet de fin d'études, Génie Electrique, USTHB 2004.
- [5] M.Teguar, « Modélisation d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électro géométriques », thèse de doctorat d'état, ENP, Alger 2003.
- [6] B. X. Du, Yong Liu, H. J. Liu et Y. J. Yang, « Recurrent Plot Analysis of Leakage Current for Monitoring Outdoor Insulator Performance », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 1, pp.140-144, February 2009.
- [7] A.H.El-Hag, S.H.Jayaram, E.A.Cherney, « Fundamental and Low Frequency Harmonic Components of Leakage Current as a Diagnostic Tool to Study Aging of RTV and HTV Silicone Rubber in Salt-fog », IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul., Vol. 10, No. 1, pp. 128–136, 2003.
- [8] T. Suda, « Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of a String of Suspension Insulator », IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 20, pp. 481-487, 2005.
- [9] B.X. Du and D.S. Dong, « Recurrence Plot Analysis of Discharge Current in Tracking Test of Gamma-ray Irradiated Polymer », IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul, Vol. 15, pp. 974–981, 2008
- [10] Y.C. Song and D.H. Choi, « High-frequency Components of Leakage Current as Diagnostic Tool to Study Ageing of Polymer Insulators under Salt Fog », Electronics Letters, Vol. 41, pp. 684–685, 2005.
- [11] T. Suda, « Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of a String of Suspension Insulator », IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 20, pp. 481-487, 2005.
- [12] Hussein Ahmad, M.A. Salam, Lee Yi Ying, N. Bashir « Harmonic components of leakage current as a diagnostic tool to study the aging of insulators », IEEE, H. Ahmad et al. / Journal of Electrostatics 66 (2008) 156–164.
- [13] A.H. El-Hag, S. Jayaram, E.A. Cherney, « Low frequency harmonic components of leakage current as a diagnostic tool to study aging of silicone rubber, 2001 Annual Report

- [14] S.Tomotaka, « Study on the frequency characteristics of leakage current waveforms of artificially polluted 12t suspension insulators by the clean fog method », IEE, Inter. Symposium On High Voltage Engineering, Publication no. 467, 22–27 August 1999.
- [15] A.Cavallini et G.C. Montanari , S.Chandrasekar « Investigations on Leakage Current and Phase Angle Characteristics of Porcelain and Polymeric Insulator under Contaminated Conditions »,IEEE, Trans. Electr. Insul.Vol. 16, No. 2, pp.574-577; April 2009.
- [16] IEC 60507, Artificial pollution tests on high voltage insulators to be used on AC systems, 1991.
- [17] G. Montoya, I. Ramirez, J.I. Montoya, « Correlation among ESDD, NSDD and leakage current in distribution insulators »,Proc. IEE Generation, Transmission and Distribution, Vol. 151, pp.334-340, 2004.
- [18] R.S. Gorur and H.M. Schneider, « Surface resistance measurements on non-ceramic insulators »,IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 16, pp.801805, 2001.
- [19] S. Kumagai, and N. Yoshimura, « Leakage Current Characterization for Estimating the Conditions of Ceramic and Polymeric Insulating Surfaces »,IEEE, Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 11, pp. 681-690, 2004.
- [20] M. Ugur, D.W. Auckland, B.R. Varlow, and Z. Emin, « Neural Networks to Analyze Surface Tracking on Solid Insulators »,IEEE ,Trans. Dielectr. Electr. Insul.,Vol. 4, pp. 763-766, 1997.
- [21] R. Sarathi, S. Chandrasekar and N. Yoshimura, « Investigations into the Surface Condition of the Silicone Rubber Insulation Material using Multiresolution Signal Decomposition»,IEEE, Trans. Power Delivey,Vol. 21, pp.243-252, 2006.
- [22] S. Kumagai, B. Marungsri, H. Shinokubo, R. Matsuoka and N. Yoshimura, « Comparison of Leakage Current and Aging of Silicone Rubbers and Porcelain in both Field and Salt-fog Tests »,IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 13, pp.1286-1302, 2006.
- [23]S. M. Gubanski, A. Dernfalk, J. Andersson and H. Hillborg, « Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators», IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul., Vol. 14, pp. 1065-1080, 2007.
- [24] F. Meghnefi, C. Volat and M. Farzaneh, « Temporal and Frequency Analysis of the Leakage Current of a Station Post Insulator during Ice Accretion», IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul., Vol. 14, pp. 1381-1389, 2007.
- [25] Y. Liu and B. X. Du: « Recurrent Plot Analysis of Leakage Current on Flashover Performance of Rime-iced Composite Insulator », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, No. 2; April 2010.

- [26] R. S. Gorur, H. M. Schneider, J. Cartwright, Y. Beausajour, et al. « Surface Resistance Measurements on Nonceramic Insulators », IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 16, pp. 801-805, 2001.
- [27] S. M. Gubanski, « Modern Outdoor Insulation-Concerns and Challenges », IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 21, No. 6, pp. 5-11, 2005.
- [38] A. Wolf, J. B. Swift and H. L. Swinney, « Determining Lyapunov Exponents from a Time Series », Physica D, Vol. 16, pp. 285-317, 1985.
- [29] C. L. Phan and M. Hara, « Leakage Current and Flashover Performance of Iced Insulators », IEEE Trans. Power Apparatus and Syst., Vol. 98, pp. 849-859, 1979.
- [30] T. Tanaka, G.C. Montanari and R. Mulhaupt, « Polymer Nanocomposites as Dielectrics and Electrical Insulation-perspectives for Processing Technologies, Material Characterization and Future Applications », IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 11, pp. 763-784, 2004.
- [31] M. Kozako, N. Fuse, Y. Ohki, T. Okamoto and T. Tanaka, « Surface Degradation of Polyamide Nanocomposites Caused by Partial Discharges Using IEC (b) Electrodes », IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 11, pp. 833-839, 2004.
- [32] T.Lan and T.J. Pinnavaia, «Clay-Reinforce Epoxy nano composites», Chemistry of Materials, Vol. 6, pp. 2216-2219, 1994.
- [33] P.B. Messersmith and E.P. Giannelis, « Synthesis and Characterization of Layered Silicate-Epoxy Nanocomposites », Chemistry of Materials, Vol.6, pp. 1719-1725, 1994.
- [34] B.B. Mandelbrot, « The Fractal Geometry of Nature », W.H. Freeman, San Francisco, USA, 1982.
- [35] B. Dubec, J.F. Quiniou, C.R. Carmes, C. Tricot and S.W. Zucker, «Evaluating the fractal dimension of profiles», Phys. Rev. A, Vol. 39, pp. 1500-1512, 1989.
- [36] S.G. Mallat, « A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation », IEEE Trans Pattern Anal. Mach. Intell, Vol.11,pp. 674-693, 1989.
- [37] I.M. Daniel, H. Miyagawa, E.E. Gdoutos and J.J. Luo, « Processing and characterization of epoxy/clay nanocomposites », Experimental Mechanics, Vol. 43, pp. 348-354, 2003.
- [38] B. Wang, N. Qi, W. Gong, X.W. Li and Y.P. Zhen, « Study of microstructure and mechanical properties for epoxy resin/montmorillonite nanocomposites by positron », Radiation Phys. Chem. Vol-76, pp. 146-149, 2007.
- [39] R.S. Gorur, G.G. Karady, A. Jagota, M. Shah and A.M. Yates, « Ageing in silicone rubber used for outdoor insulation », IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 7, pp. 525-533, 1992.
- [40] C. N. Richard and J. D. Renowden, « Development of a remote insulator contamination monitoring system », IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12, pp. 389-397, 1997.

- [41] S. Venkataraman and R. S. Gorur, « Flashover voltage prediction of outdoor insulators subjected to road salt contamination », IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), pp. 293–296, 2005.
- [42] Suwarno, « Study on the waveform of leakage current on the 20kV postpin ceramic insulators under various conditions », IEEE Intern. Sympos. Electrical Insulating Materials, pp. 387-390, 2001.
- [43] A. H. El-Hag, S. Jayaram, and E. A. Cherney, « Use of Low frequency harmonic components as a signature to detect arcing on HTV silicon rubber in salt fog », IEEE Intern. Symp. Electr. Insul. (ISEI), pp. 212– 215, 2002.
- [44] A. H. El-Hag, S. Jayaram, and E. A. Cherney, « Low frequency harmonic components of leakage current as a diagnostic tool to study aging of silicone rubber insulators », in Proc. 2001 Annu. Report Conf. Electrical Insulation & Dielectric Phenomena, pp. 597–600.
- [45] A. H. El-Hag, S. Jayaram, and E. A. Cherney, « Fundamental and low frequency harmonic components of leakage current as a diagnostic tool to study aging of RTV and HTV silicone rubber in salt-fog », IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 10, pp. 128-136, 2003.
- [46] A. N. Jahromi, A. H. El-Hag, E. A. Cherney, S. Jayaram, M. Sanaye- Pasand, H. Mohseni, « Prediction of leakage current of composite insulators in salt fog test using neural network », IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), pp. 309–312, 2005.
- [47] Y. Zhu, K. Haji, H. Yamamoto, T. Miyake, M. Otsubo, C. Honda, « Distribution of Leakage Current on Polluted Polymer Insulator Surface », Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006.
- [48] M. Otsubo, T. Hashiguchi, C. Honda, O. Takenouchi, T. Sakoda, Y. Hashimoto, « Evaluation of insulation performance of polymeric surface using a novel separation technique of leakage current », IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 10, pp. 1053-1060, 2003.
- [49] Y. Zhu, M. Otsubo, C. Honda and S. Tanaka, « Corona Discharge from Water Droplet on Electrically Stressed Polymer Surface », Jpn. J. Appl. Phys., vol. 45, pp. 234-238, 2006.
- [50] A. Cavallini, S. Chandrasekar, G. C. Montanari, F. Puletti, « Inferring Ceramic Insulator Pollution by an Innovative Approach Resorting to PD Detection », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 1, pp.; February 2007.
- [51] D. F. Kawa, M. J. Chavez, T. Orbeck and C. Lumb, « Practical PCA-DA system for measurements of leakage current pulses on polymer insulators under wet contaminated conditions », IEEE Electr. Insul. Mag, Vol. 8, No. 2, pp. 5-13, 1992.
- [52] Cigrè TF 33.01.01, « Polluted insulators », A Review of Current Knowledge, 2000.
- [53] Rais El'hadi BEKKA, « fondements du traitement du signal », Office des Publications Universitaires, 3<sup>ème</sup> édition, 2005.

- [54] S.V.Vaseghi, « Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction », 2<sup>ème</sup> édition, 2000.
- [55] A.Douar, C.Bouzidi « Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur pollué à l'aide des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée », Projet de fin d'étude, ENP d'Alger 2009.
- [56] M.G.E. Schneiders. « Wavelets in Control Engineering ». Master's thesis, Eindhoven University of Technology, August 2001.
- [57] A.Bouzida, « Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique d'ondelette », Mémoire de Magister, ENP d'Alger 2008.
- [58] D.C.Sorensen, R.B.Lehoucq, C.Yang, K.Maschhoff, « Five Easy Steps to a Continuous Wavelet Transform: A New Tool for Signal Analysis », Wavelet Toolbox, Help of MATLAB®, the MathWorks, 2007.
- [59] X. Zhou, C. Zhou, and I. J. Kemp, « An Improved Methodology for Application of wavelet transform to partial discharge measurement denoising », IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol.12, pp. 586-594, 2005.
- [60] Frédéric Truchetet,« Ondelettes pour le signal numérique »,EDITION HERMES, Avril 1998.
- [61] M. Misiti, Y.Misiti, G. Oppenheim, J.M.Poggi, «Wavelets Toolbox Users Guide ». Wavelet Toolbox for use with MATLAB®, 2000.