

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

Thème :

*Influence de la Nature de l'Agent Polluant sur le
Comportement Diélectrique d'une Chaîne d'Isolateurs
sous Tension Alternative 50 Hz*

Proposé par :

Pr. A.MEKHALDI

Mr. B.MOULA

Etudié par :

Hamid MAHAMMED

Mohamed Omar YOUNSI

Promotion JUIN 2012

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.

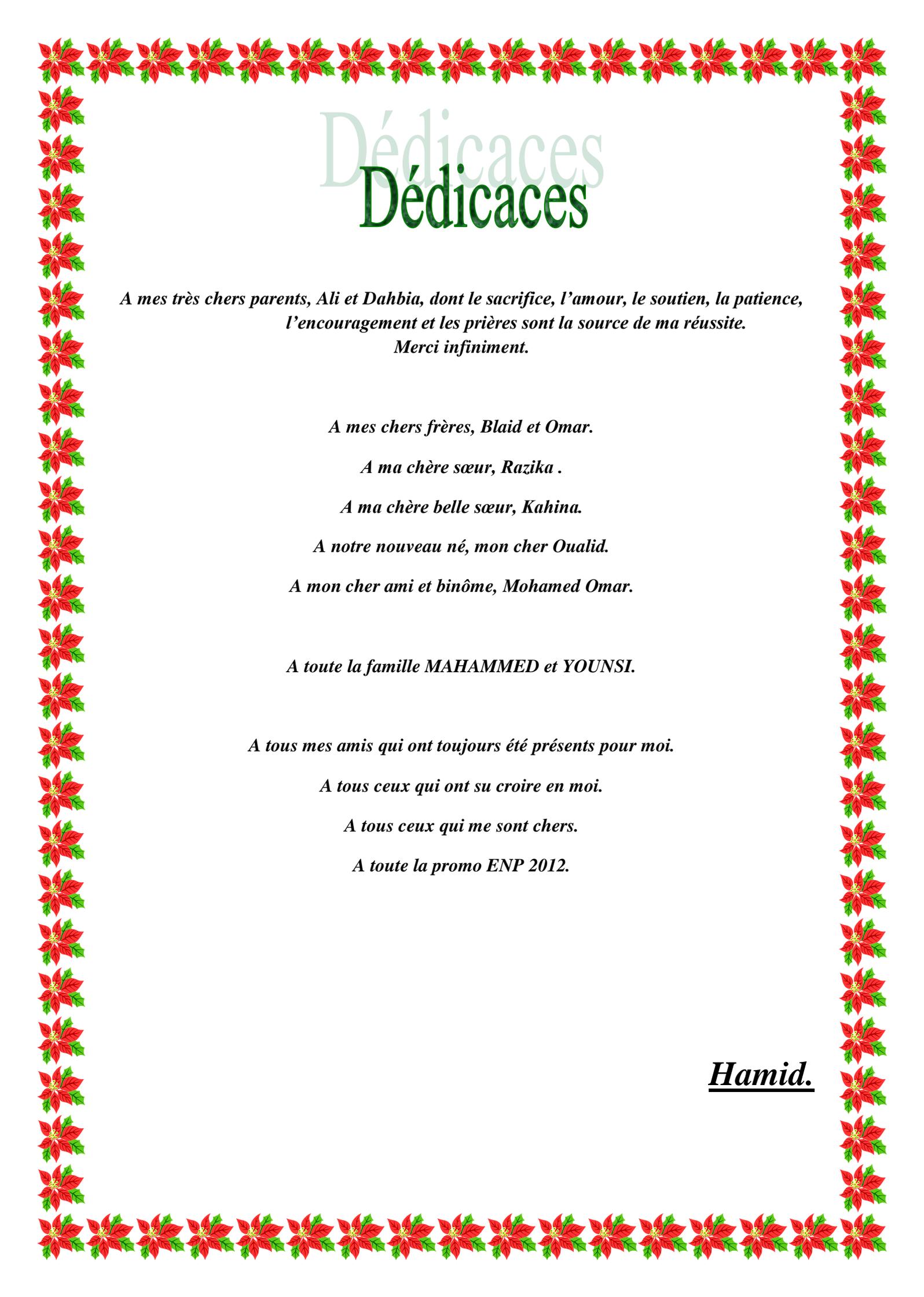
Nous tenons à remercier notre promoteur Mr. A.Mekhaldi pour sa constante présence au sein du laboratoire de Haute Tension ainsi que ses précieux conseils dans le domaine de la recherche scientifique.

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

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

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 Dédicaces

*A mes très chers parents, Ali et Dahbia, dont le sacrifice, l'amour, le soutien, la patience, l'encouragement et les prières sont la source de ma réussite.
Merci infiniment.*

A mes chers frères, Blaid et Omar.

A ma chère sœur, Razika .

A ma chère belle sœur, Kahina.

A notre nouveau né, mon cher Oualid.

A mon cher ami et binôme, Mohamed Omar.

A toute la famille MAHAMMED et YOUNSI.

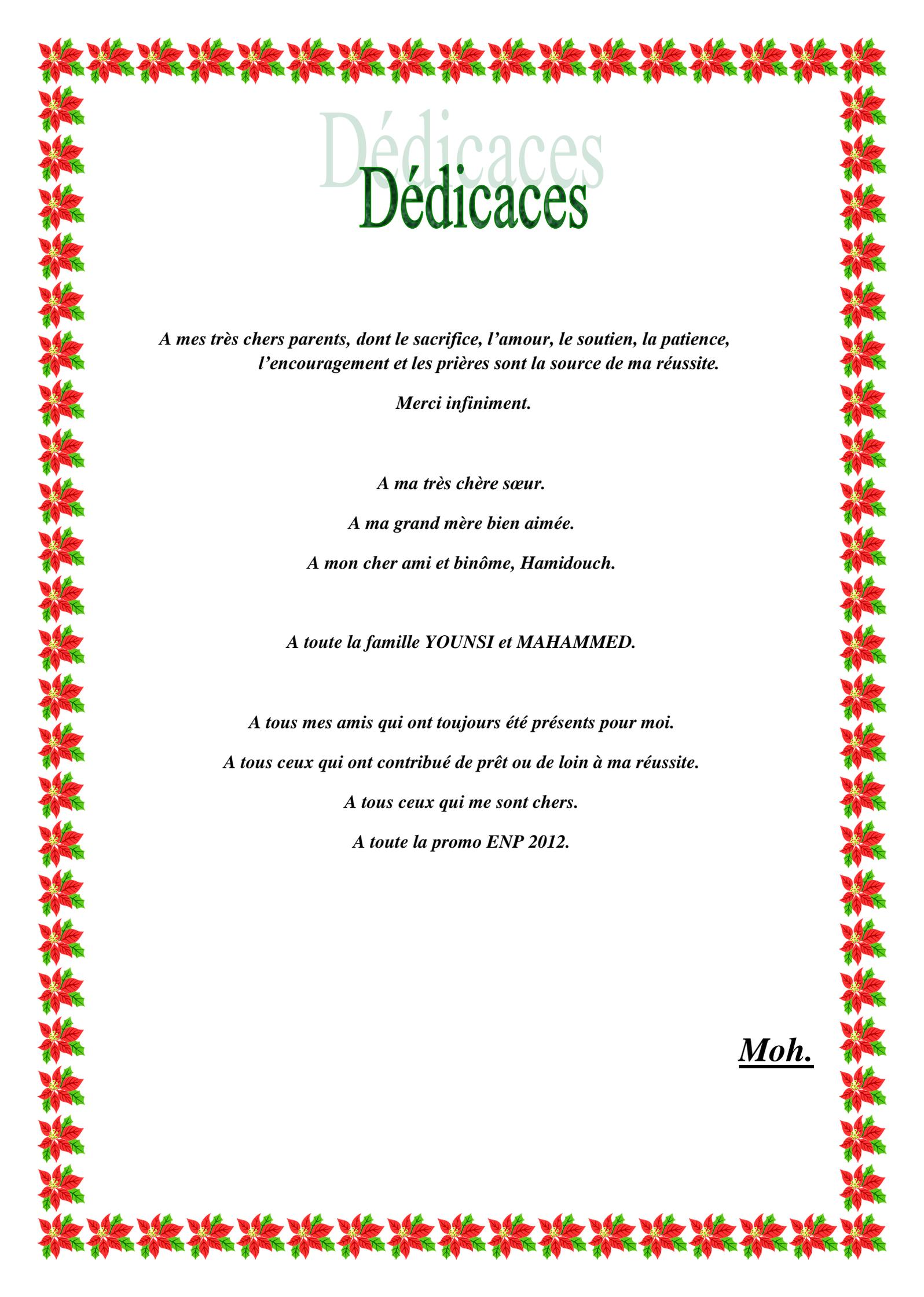
A tous mes amis qui ont toujours été présents pour moi.

A tous ceux qui ont su croire en moi.

A tous ceux qui me sont chers.

A toute la promo ENP 2012.

Hamid.



Dédicaces

Dédicaces

*A mes très chers parents, dont le sacrifice, l'amour, le soutien, la patience,
l'encouragement et les prières sont la source de ma réussite.*

Merci infiniment.

A ma très chère sœur.

A ma grand mère bien aimée.

A mon cher ami et binôme, Hamidouch.

A toute la famille YOUNSI et MAHAMMED.

A tous mes amis qui ont toujours été présents pour moi.

A tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à ma réussite.

A tous ceux qui me sont chers.

A toute la promo ENP 2012.

Moh.

ملخص :

في هذا العمل تم دراسة مدى خطورة طبيعة المادة الملوثة تحت التيار المتناوب ذو التوتر 50 هرتز على سطح العازل الحقيقي B120U . لهذا تم القيام بالعديد من التجارب للتلوث المنتظم و الغير المنتظم بمخبر عالي التوتر للمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات لتمييز حالة السطح العازل اعتمادا على اشارات التيار المتسرب. أولا , ركزنا على قياس التوتر الإحاطة , سعة التيار المتسرب , سعة الشحنة الكهربائية و على حساب المقاومة المشاهدة . ثانيا , اقترحنا نموذجين تجريبيين لحساب كلا من التوتر الإحاطة و سعة التيار المتسرب و هذا لمختلف انواع المادة الملوثة لكلا من التلوث المنتظم و الغير المنتظم استنادا على النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها, تم ايضا دمج واجهة رسومية للتنبؤ لسلوك العازل للقيم الأخرى غير تلك التي تم دراستها

كلمات مفتاحية : التوتر الإحاطة , سعة التيار المتسرب , سعة الشحنة كهربائية , التلوث المنتظم , التلوث الغير المنتظم , واجهة رسومية.

Résumé :

Dans le présent travail, l'étude de la sévérité de l'agent polluant est effectuée sous tension alternative 50 Hz sur une chaîne d'isolateur réel **U 120 B**. Pour cela, plusieurs essais sous pollution uniforme et non-uniforme sont effectués au laboratoire de haute tension de L'ENP pour trois natures de pollution afin de pouvoir caractériser l'état de surface de l'isolateur en exploitant les résultats expérimentaux obtenus tel que les signaux du courant de fuite. En premier lieu, nous nous intéressons à la mesure de la tension de contournement, à l'amplitude du courant de fuite, à l'amplitude de la charge électrique et au calcul de l'impédance vue des électrodes. En deuxième lieu, nous proposons deux modèles empiriques de calcul de la tension de contournement et de l'amplitude maximale du courant de fuite pour les différentes natures de pollution et les différentes tensions appliquées pour les deux configurations étudiées, uniforme et non-uniforme. Ces modèles sont basés sur les résultats des essais obtenus. Une interface graphique a été développée pour pouvoir prédire le comportement diélectrique de l'isolateur pour d'autres valeurs que celles étudiées.

Mots-clés : Courant de fuite, tension de contournement, charge électrique, pollution uniforme, pollution non-uniforme, isolateur réel, modèle empirique, interface graphique.

Abstract:

In this work, the study of the severity of the agent polluting is carried out under alternative voltage 50 Hz on real insulator **U 120 B**. For that, several tests under uniform and non-uniform pollution are carried out at the laboratory of high voltage of the ENP for three natures of pollution in order to be able to characterize the surface quality of the insulator by exploiting the experimental results obtained such as the signals of the leakage current. Initially, we are interested in measurement of the flashover voltage, with the amplitude of the leakage current, the amplitude of the electric charge and the calculation of the impedance seen of the electrodes. Secondly, we propose two empirical models of calculation of the flashover voltage and the amplitude maximum of the leakage current for various natures of pollution and the various applied voltage for the two studied configurations, uniform and non-uniform. These models are based on our experimental results. A graphical interface was integrated to be able to predict the dielectric behavior of the insulator for other values that those studied.

Key-works: Leakage current, flashover voltage, electric charge, uniform pollution, non-uniform pollution, real insulator, empirical model, graphical interface.

Liste des symboles

ACF	: AutoCorrelation Function
ANN	: Artificial Neuron Network
C.A.	: Courant Alternatif
C.C.	: Courant Continu
CEC	: Capacité d'Echange Cationique
CEI	: Commission Electrotechnique Internationale
CF	: Courant de Fuite
COV	: Coefficient of Variation
d	: Paramètre correspondant au type de noyau
d_c	: Constante dimensionnelle
DAS	: Data Acquisition System
DP	: Décharges Partielles
EAP	: Early Aging Period
EPDM	: Ethylène-Propylène-Diène Monomère
ESDD	: Equivalent Salt Deposit Density
et	: Temps d'exposition
FFT	: Fast Fourier Transform
HDPE	: High-Density PolyEthylene
H.T.	: Haute Tension
HVDC	: High Voltage Direct Current
I_{fm}	: Amplitude maximale du courant de fuite
Ka	: Kaolin
Ki	: Kieselguhr
LAP	: Late Aging Period
LS-SVM	: Least Square Support Vector Machine

MEF	: Mean Error Function
MRSD	: Multi Resolution Signal Decomposition
NaCl	: Chlorure de sodium
NH₄Cl	: Chlorure d'Ammonium
RBF	: Polynôme radial de base
RMSE	: Root-Mean-Square Error
RNA	: Réseaux de Neurones Artificiels
R²	: La fraction absolue de la variance
SIR	: Silicon Rubber
SR	: Surface Resistivity
STD_MRA	: Standard Deviation-Multi-Resolution Analysis
SVM	: Support Vector Machine
T.H.T.	: Très Haute Tension
TP	: Transition Period
TSM	: Time Series Modeling
q	: Débit unitaire d'électrolyte
w_v	: Wind Velocity
γ	: Paramètre de régularisation
ρ_d	: Résistivité du canal de la décharge
σ	: Conductivité de l'électrolyte
σ'	: La partie réelle de la conductivité complexe
σ''	: La partie imaginaire de la conductivité complexe
ε_p	: Permittivité de la couche de pollution

Sommaire

Sommaire

Introduction générale : 1

Chapitre 1 : Travaux antérieurs sur les isolateurs pollués

I.1. Introduction : 6

I.2. Détermination du dépôt de sel équivalent (ESDD) en utilisant la vitesse du vent pour des isolateurs pollués : 6

I.3. Etude des décharges partielles sur les isolateurs sous tension continue pendant une accumulation de glace : 9

I.4. Estimation de l'état de surface des isolateurs non en céramique (SIR) en utilisant le courant de fuite : 12

I.5. Analyse des contournements des bandes sèches lors de compression de la longueur d'arc : 16

I.6. Diagnostic de l'état de surface des isolateurs en polymère à l'aide de la transformée en ondelette et les réseaux de neurones : 22

I.7. Les différentes caractéristiques de la pollution artificielle des isolateurs composites de haute tension : 26

I.8. Influence d'une couche de pollution non uniforme sur le contournement d'un isolateur sous tension de choc (tension impulsionnelle) : 28

I.9. la prédiction de la tension de contournement en utilisant des machines des moindres carrés de vecteur de soutien (LS-SVM) : 33

I.10. Modélisation dynamique des décharges se propageant sur des surfaces isolantes polluées avec des dépôts discontinus : 37

I.11. Mesure du courant de fuite et de la charge électrique d'un isolateur de haute tension pollué : 39

I.12. Étude temporelle du courant de fuite des isolateurs de poste recouverts de glace : 42

I.13. Conclusion : 45

Chapitre 2 : techniques expérimentales

II.1. Introduction :	48
II.2. Dispositif expérimental :	48
II.3. Caractéristiques de l'objet d'essai :	49
II.4. Le nettoyage des isolateurs réels étudiés :	51
II.5. Préparation des solutions :	51
II.6. Méthode d'application de la pollution :	52
II.7. Mesure de la tension de contournement :	52
II.8. Mesure du courant de fuite :	53
II.9. Mesure de la charge électrique :	53
II.10. Conclusion :	53

Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et Discussions

III.1. Introduction :	56
III.2. Tensions de contournements :	56
III.2.1. Tension de contournement pour le cas uniforme :	56
III.2.2. Tension de contournement pour le cas non-uniforme :	59
III.2.3. Discussion :	61
III.3. Courant de fuite :	61
III.3.1. Résultats obtenus sous pollution uniforme :	62
III.3.2. Visualisation des signaux du courant de fuite dans le cas de la pollution uniforme :	64
III.3.3. Résultats obtenus sous pollution non-uniforme:	68
III.3.4. Visualisation des signaux du courant de fuite dans le cas de la pollution non-uniforme :	71
III.3.5. Discussion :	74
III.4. Calcule de l'impédance équivalente vue entre les électrodes :	74
III.4.1. Résultats obtenus pour le cas de la pollution uniforme :	75
III.4.2. Résultats pour le cas non-uniforme :	77
III.5. Tension d'apparition des décharges électriques :	80

III.6. Charge électrique :	82
III.6.1. Résultats obtenus sous pollution uniforme :	82
III.6.2. Résultats obtenus sous pollution non-uniforme :	84
III.6.3. Discussion :	87
III.7. Conclusion :	87

Chapitre 4 : Modélisation de la tension de contournement et de l'amplitude du courant de fuite

IV.1. Introduction :	90
IV.2. Modélisation de la tension de contournement :	90
IV.2.1. Dans le cas de la pollution uniforme :	90
IV.2.2. Dans le cas de la pollution non-uniforme :	92
IV.3. Modélisation du courant de fuite :	94
IV.3.1. Dans le cas de la pollution uniforme :	94
IV.3.2. Dans le cas de la pollution non uniforme :	100
IV.4. Discussion :	107
IV.5. Réalisation d'une interface graphique :	107
IV.6. Conclusion :	111

Conclusion générale :	113
-----------------------------	-----

Références Bibliographiques

Introduction

Générale

Les besoins économiques et le bien être des populations font partie aujourd'hui des raisons d'un développement croissant des installations de production, de transport et de transformation de l'énergie électrique. L'électricité est un agent énergétique lié à la puissance. Son approvisionnement provenant des centrales exige l'installation de lignes aériennes permettant l'alimentation des consommateurs. Les lignes aériennes qui sont conçues, réalisées, entretenues et exploitées conformément aux normes, prescriptions et directives de sécurité, sont exposées à diverses contraintes, en particuliers, la pollution des isolateurs [1]. Par définition, leur rôle est de maintenir et d'isoler une ou plusieurs pièces électriques conductrices entre elles, comme les parties se trouvant du côté conducteur haute tension et les parties mises à la terre. Depuis plusieurs années, l'une des principales cibles dans les travaux de recherche et de développement dans le domaine de la transmission et de la distribution électrique, a été la diminution du nombre et de la durée des interruptions de l'alimentation en énergie électrique des consommateurs.

Une quantité importante des isolateurs utilisés dans les réseaux aériens de transport d'énergie électrique peut souvent être amenée à opérer sous différentes contraintes. Parmi celles-ci, la pollution des isolateurs constitue un facteur de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie. En effet, la pollution qui recouvre la surface du système d'isolation peut engendrer son contournement par un arc électrique dans le cas où il est soumis à une humidification. Ceci peut endommager l'isolateur ou engendrer la mise hors service de la ligne [2].

En pratique, les isolateurs des lignes aériennes sont soumis à différentes natures de pollutions de sources différentes : naturelle, industrielle ou mixte [3]. La sévérité de pollution devient ainsi une donnée nécessaire au dimensionnement des isolateurs. Cette sévérité est généralement caractérisée par l'intensité de précipitations ainsi que par la conductivité des dépôts polluants [4]. Bien que la répartition des couches de pollution dépend principalement du profil des isolateurs, la nature de la pollution dépend quant à elle du site d'exploitation [5]. Ainsi des particules de différentes natures se déposent petit à petit sur la surface des isolateurs. Lorsqu'elles sont sèches, ces particules n'engendrent pas de dégradation des propriétés diélectriques des isolateurs. Cependant, l'humidification d'un dépôt solide accumulé à la surface des isolateurs provoque la dissolution des sels présents dans ce dernier, formant ainsi une couche conductrice sur la surface de l'isolateur [6]. Une fois leur rigidité diélectrique affaiblie par ces dépôts, ces isolateurs subissent des contournements électriques pouvant entraîner des interruptions partielles, voire totales, de la distribution électrique. Un contournement électrique se traduit par un court-circuit entre le conducteur haute tension et la partie mise à la terre. Il en résulte des interruptions de l'énergie électrique qui peuvent être plus ou moins longues selon la localisation et la sévérité de la pollution du site.

Dans ce contexte, il est primordial de réaliser des tests en laboratoire afin de récolter le plus de données possibles sur les causes de ces contournements et d'approfondir les

connaissances sur le sujet, tant du point de vue théorique que pratique. Les informations ainsi récoltées pourront permettre de développer des méthodes pouvant, dans le meilleur des cas, prédire l'instant de contournement, ou tout au moins, suivre l'évolution des dépôts de pollution sur les isolateurs afin d'en évaluer la sévérité.

Les recherches menées dans différents laboratoires sur la problématique du contournement des isolateurs pollués ont permis de démontrer que, le contournement électrique à la surface d'un isolateur pollué est un processus dynamique fort complexe dont la compréhension passe par l'identification des paramètres qui peuvent l'influencer. Ces recherches auront aussi permis de démontrer que, du fait de la complexité inhérente au processus d'établissement de l'arc électrique en présence d'une couche conductrice, il est difficile de prédire le contournement des isolateurs pollués. A ce sujet, de nombreuses études ont été réalisées afin de modéliser le phénomène. Quelques uns des modèles théoriques, numériques et dynamiques qui ont été développés permettent d'ailleurs de déterminer, avec une certaine précision, la tension de contournement d'un isolateur pollué.

Notre étude a ainsi pour objectif d'étudier l'influence de la nature de l'agent polluant sur le comportement diélectrique des isolateurs réels afin d'en améliorer la conception et la fiabilité. Pour ce faire, nous allons utiliser trois natures de pollution (marine, mixte à base de Kaolin et mixte à base de Kieselguhr), et cela pour deux configurations de pollution différentes, uniforme et non-uniforme.

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

Le troisième chapitre, quant à lui, comprendra l'étude du comportement diélectrique de l'isolateur réel pour les trois natures et les deux configurations de pollution étudiées. Nous présenterons les résultats concernant la tension de contournement, la tension d'apparition de la première décharge, la charge électrique à la surface de l'isolateur et le courant de fuite, à partir duquel nous calculerons l'impédance équivalente vue des électrodes.

Le quatrième et dernier chapitre est entièrement consacré à la modélisation de la tension de contournement et du courant de fuite. En se basant sur nos résultats expérimentaux, nous présenterons quatre modèles empiriques pour caractériser la variation de la tension de contournement et du courant de fuite pour les trois natures de pollution et dans les deux cas étudiés, uniforme et non-uniforme. Nous utiliserons ensuite ces modèles afin de réaliser une

interface graphique qui permet de simuler la tension de contournement et l'amplitude maximale du courant.

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

Chapitre I :
Travaux Antérieurs
sur les
Isolateurs Pollués

I.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique de quelques travaux antérieurs, et cela afin de mieux comprendre les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs pollués. Nous citons aussi quelques méthodes utilisées pour la prédiction du comportement des isolateurs sous pollution.

I.2. Détermination du dépôt de sel équivalent (ESDD) en utilisant la vitesse du vent pour des isolateurs pollués :

Le niveau de contamination d'un isolateur est représenté par le dépôt de sel équivalent (ESDD). Le ESDD dépend principalement des conditions météorologiques, dont la vitesse du vent est d'une importance primordiale. En effet, pour de basses vitesses du vent, l'accumulation des contaminants sur la surface de l'isolateur augmente. D'un autre côté, le vent à grande vitesse a pour effet d'enlever une partie de la pollution de la couche extérieure de l'isolateur, néanmoins quelques particules restent accrochées sur la surface intérieure de l'isolateur, ce qui peut avoir pour effet l'apparition de fort courant de fuite sur la surface de l'isolateur, qui peut même conduire à une décharge disruptive à la surface de l'isolateur. Quelques recherches ont abouti au résultat que les décharges de contournement se produisent pour des vitesses de vent inférieures à 3.5 m/s. D'autres recherches ont établi une relation empirique, basée sur des données expérimentales, entre le ESDD et la vitesse du vent [7].

Md. Abdus Salam et al. [7] ont consacré toute une recherche à l'élaboration d'une relation mathématique entre le ESDD et la vitesse du vent en utilisant une technique d'analyse dimensionnelle. La valeur du ESDD dépend de la vitesse du vent (w_v), de la distance de fuite de l'isolateur, du temps d'exposition (et), de la tension d'alimentation (V), mais aussi de la constante statique de l'arc (N). La matrice dimensionnelle en terme d'exposants peut être exprimée comme suite :

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
	ESDD	w_v	et	N	V
L	-2	1	0	1	2
M	1	0	0	1	1
T	0	-1	1	-3	-3
C	0	0	0	$n-1$	-1

Où k_1, k_2, k_3, k_4 et k_5 représentent les exposants des variables ESDD, w_v , et , N , V , respectivement, et L, M, T, C représentent respectivement la longueur du fondamental, la masse du fondamental, la période du fondamental et le courant du fondamental dans le système d'unités international SI, et n est la constante de l'arc.

Pour $k_1=1$, les solutions peuvent être écrites sous la forme matricielle comme donnée ci-dessous :

$$\pi \begin{matrix} \text{ESDD} & w_v & et & N & V \\ \left| \begin{array}{ccccc} 1 & \frac{4n-1}{n} & \frac{n-1}{n} & -\frac{1}{n} & -\frac{n-1}{n} \end{array} \right. \end{matrix}$$

En appliquant le π -théorème de Buckingham, le ESDD peut s'écrire sous la forme suivante :

$$ESDD = (d_c)(w_v)et^{-(n-1)/n}N^{-1/n}V^{(n-1)/n} \quad (I-1)$$

Où d_c est la constante dimensionnelle.

Pour accentuer la relation entre le ESDD et la vitesse du vent, l'équation (I-1) peut être modifier en considérant les valeurs de e , N et V comme constantes.

Finalement la relation entre le ESDD et la vitesse du vent a été exprimée comme suite :

$$ESDD = (d_c)(w_v)^{-(4n-1)/n}. \quad (I-2)$$

Pour valider leur modèle, les auteurs ont effectué des essais dans la centrale thermique de Paka située à 50 m de la région côtière de la mer du sud de la Chine. Le type de pollution principalement rencontré dans cette région est la pollution marine, avec une configuration générale d'écoulement du vent très significative. Des tours en acier galvanisé ont été installé pour maintenir les isolateurs de type capot et tige en suspension à une hauteur de 3 m, comme représenté sur la figure (I.1).



Figure I.1 : Photographie de la station de mesure [7].

Le ESDD et la vitesse du vent sont mesurés chaque jour pendant une durée de deux mois, et les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux (I.1) et (I.2).

Wind velocity (m/s)	ESDD (mg/cm ²)
2.0	0.0025
2.5	0.0052
3.0	0.0091
3.5	0.0129
4.0	0.0199

Tableau I.1 : Résultats du ESDD pour des vitesses du vent entre 2.0 et 4.0 m/s [7].

Wind velocity (m/s)	ESDD (mg/cm ²)
4.5	0.0184
5.0	0.0365
5.5	0.0563
6.0	0.0823
6.5	0.1023

Tableau I.2 : Résultats du ESDD pour des vitesses du vent entre 4.5 et 6.5 m/s [7].

Ces résultats ont permis aux auteurs de calculer la constante dimensionnelle (d_c) et la constante de l'arc (n). Les résultats sont donnés dans le tableau (I.3).

	First group of wind velocity	Second group of wind velocity
d_c	0.000236	0.000696
n	0.14	0.15

Tableau I.3 : Valeurs des constantes d_c et n [7].

En tenant compte des valeurs de d_c et de n , différentes valeurs du ESDD sont calculées en fonction de la vitesse du vent. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure (I.2).

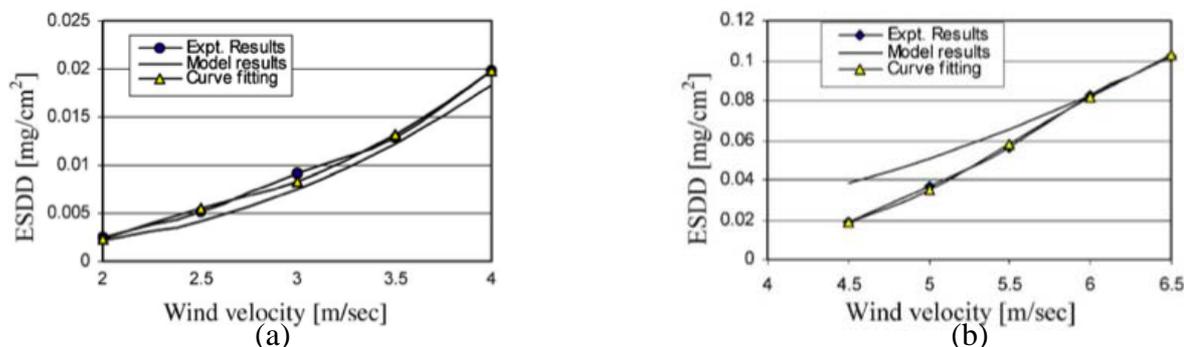


Figure I.2 : Variation du ESDD en fonction de la vitesse du vent :

(a) entre 2.0 et 4.0 m/s ; (b) entre 4.5 et 6.5 m/s [7].

Il apparaît clairement à partir de la figure (I.2.a) que les résultats du modèle pour des vitesses variant entre 2.0 et 4.0 m/s sont quasiment identiques à ceux mesurés sur le site d'essai.

La variation du ESDD est linéaire jusqu'à une vitesse du vent de 3.5 m/s, une vitesse après laquelle le ESDD a tendance à augmenter avec l'augmentation de la vitesse du vent.

Pour des vitesses du vent allant de 2 à 4 m/s, la valeur du ESDD varie entre 0.0025 et 0.0199 mg/cm². Ces valeurs du ESDD peuvent être considérées en tant que contamination légère [7].

A partir de la figure (I.2.b), il est observé que la courbe des valeurs mesurées sur le site d'essai est en dessous de la courbe du modèle, et cela jusqu'à une valeur de la vitesse du vent de 5.5 m/s. Une fois cette valeur dépassée, les deux courbes sont superposées.

En se basant sur les résultats et les figures obtenus, les auteurs ont conclu que le modèle mathématique élaboré peut être utilisé pour l'évaluation du ESDD à partir de la vitesse du vent.

I.3. Etude des décharges partielles sur les isolateurs sous tension continue pendant une accumulation de glace :

Avec la rapide augmentation de l'utilisation du HVDC dans le transport de l'énergie électrique, la connaissance du comportement des isolateurs recouverts de glace est devenue essentielle pour la fiabilité dans la conception des isolateurs destinés à être mis en service dans les zones froides.

Au Québec, M. Farzaneh et al. [8] ont consacré toute une recherche à l'analyse des caractéristiques des décharges partielles sous tension continue des isolateurs recouverts de glace, et ce, dans le but de déterminer les constantes de décharge (A) et (n). Les auteurs ont effectué des tests sur plusieurs échantillons triangulaires de glace sous tension continue et différents niveaux de contaminations en utilisant le chlorure de sodium comme polluant, pour étudier les caractéristiques des décharges partielles sur les échantillons de glace.

Pour former les échantillons de glace, un moule en verre de forme triangulaire est rempli d'eau et mis dans une chambre où la température est maintenue à -12°C. La hauteur, la base et l'épaisseur des échantillons de glace étaient de 280 mm, 200 mm et 15 mm respectivement. Cette géométrie assure la formation d'une décharge partielle à un endroit désigné, auquel il est facile de mesurer la chute de tension à travers l'arc. Afin de réduire au minimum le courant de fuite à l'interface situé entre la glace et la base triangulaire du moule en verre et éviter son influence sur la mesure du courant de fuite, de l'eau distillée est utilisée pour former une couche de 1 cm de glace au fond du moule, suivi d'une couche de 0.5 cm de glace formée à partir d'une eau salée avec une conductivité ajustée. Pour relever les caractéristiques tension-courant des décharges, une électrode de mesure a été installée à la surface de la glace, à une position correspondant à une longueur d'arc donnée, et l'échantillon

à été alors placé verticalement dans une chambre où la température ambiante est ajustée à 0°C. L'augmentation de la tension est faite selon les recommandations de la CEI [9]. La tension appliquée (V_1), la tension mesurée au niveau de l'électrode de mesure (V_2) et le courant de fuite (I) ont été enregistré simultanément à l'aide d'un système d'acquisition de données DAS. Le diagramme schématique du dispositif expérimental est représenté dans la figure (I.3).

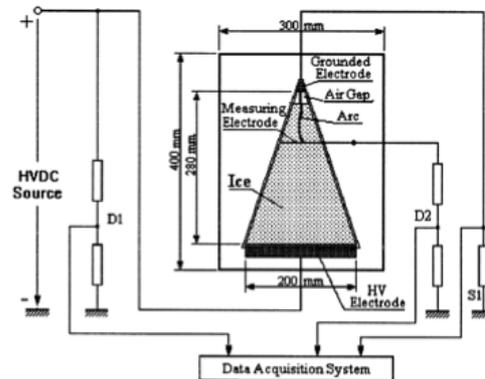


Figure I.3 : Diagramme schématique du dispositif expérimental [8].

Il a été prouvé lors de recherches plus anciennes que le processus de contournement sur des surfaces recouvertes de glace peut être analysé selon le concept de Obenaus comme suite [8] :

$$V = V_e + AI^{-n}x + IR(x) \quad (\text{I-3})$$

où V est la tension appliquée; V_e la chute de tension au niveau de l'électrode; x la longueur de l'arc; I le courant de fuite; $R(x)$ la résistance résiduelle uniforme et A et n sont les constantes de l'arc.

Pour déterminer les valeurs de V_e , A et n , les auteurs ont effectué une série d'essais, et cela dans le but de mesurer les caractéristiques dynamique et statique de l'arc. La caractéristique dynamique d'un arc correspond à la caractéristique tension-courant de l'arc en extension. La caractéristique statique d'un arc correspond à la caractéristique tension-courant de l'arc final.

Afin de déterminer la valeur de V_e , une série de tests avec différentes longueurs d'arc et différents courants de fuite fut effectuée. Les résultats obtenus sont donnés dans la figure (I.4).

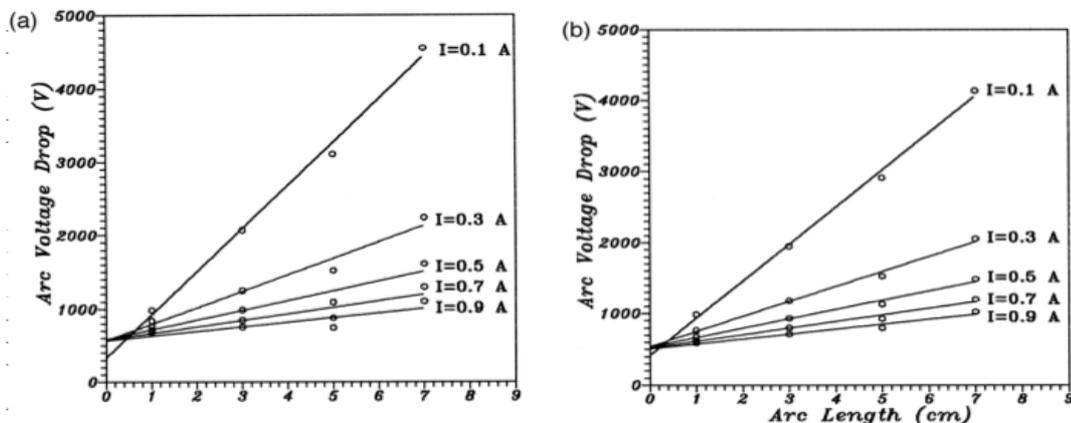


Figure I.4 : Chute de tension à travers l'arc et les électrodes : (a) pour un arc dynamique (b) pour un arc statique [8].

Il est observé clairement à partir de la figure (I.4) qu'il existe une relation linéaire entre la chute de tension globale le long de l'arc et des électrodes V_{ae} et la longueur de l'arc x . Cependant, lorsque la longueur d'arc tend vers zéro, la chute de tension V_{ae} n'est pas nulle, et cette valeur correspond à la chute de tension d'électrode V_e . Pour les arcs dynamique et statique, les valeurs de V_e sont 526 V et 502 V respectivement.

La chute de tension globale le long de l'arc et des électrodes peut être exprimée à partir de l'équation (I-3) comme suite [8] :

$$V_{ae} = V - IR(x) = V_e + AI^{-n}x \quad (I-4)$$

Par conséquent, le gradient de tension de l'arc (E_{arc}) est [8] :

$$E_{arc} = (V_{ae} - V_e)/x = AI^{-n} \quad (I-5)$$

Les valeurs de V_{ae} et de V_e étant connues pour une longueur d'arc donnée, les auteurs ont effectué une large série d'essais sur différents échantillons de glace formés à partir de solutions de conductivités différentes, dans le but d'obtenir les valeurs de E_{arc} et du courant de fuite (I) correspondantes. Les résultats obtenus sont donnés dans la figure (I.5).

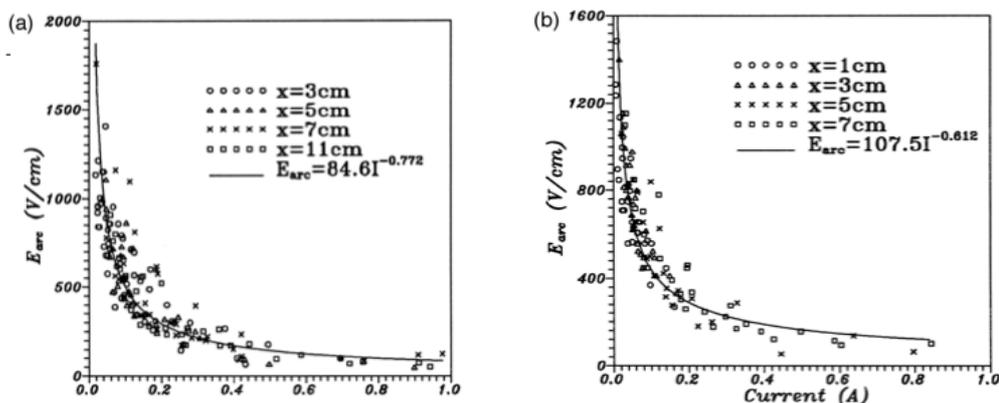


Figure I.5 : Relation entre le gradient de la tension de l'arc et le courant de fuite : (a) pour un arc dynamique (b) pour un arc statique [8].

En utilisant la méthode de régression sur les données obtenues, Les constantes d'arc A et n peuvent être obtenues et les équations de régression peuvent être exprimées comme suite [8] :

$$E_{arc} = 84.6 I^{-0.772} \text{ pour l'arc dynamique} \quad (\text{I-6})$$

$$E_{arc} = 107.5 I^{-0.612} \text{ pour l'arc statique.} \quad (\text{I-7})$$

A partir des essais réalisés et des résultats obtenus, les auteurs ont conclut que :

- Sous tension continue, les chutes de tension d'électrode pour les arcs dynamique et statique sur les surfaces recouvertes de glace sont 526 V et 502 V respectivement.
- Sous tension continue, les caractéristiques E_{arc} -I ne sont pas influencées par la longueur de l'arc, et les valeurs des constantes d'arc dynamique A et n sont 84.6 et 0.772 respectivement, et 107.5 et 0.612 pour l'arc statique.

I.4. Estimation de l'état de surface des isolateurs non en céramique (SIR) en utilisant le courant de fuite :

Les recherches réalisées par Ayman H. El-Hag [10] sur les isolateurs non céramique ont abouti à une approche mathématique pour la détection de l'apparition des bandes sèches, mais aussi à la possibilité de l'élaboration d'une corrélation entre les composantes harmoniques du signal du courant de fuite (CF) et l'état de surface de l'isolateur. Les essais sur les différents échantillons d'isolateurs pollués, la mesure du courant de fuite ainsi que l'acquisition des données ont été effectués au laboratoire.

Les essais ont été effectués dans une chambre de brouillard salé sur cinq types d'isolateurs SIR (Silicon Rubber) comme montré sur le tableau suivant.

Numéro	Type d'isolateur	Nombre d'échantillons testés
1	RTV rods	9
2	HTV rods	9
3	Simple shed	15
4	Double shed	15
5	Chaîne complète 15kV	9

Tableau I.4 : Type d'échantillons d'isolateurs testés [10].

Dans ce travail, la fonction d'autocorrélation ACF a été utilisée pour détecter l'aspect non-aléatoire dans les données. La fonction d'autocorrélation a été calculée jusqu'au 16^{ème} nombre de retard (lag) avec une limite de fiabilité de 97.5%.

Durant les essais, la variation du signal du CF dans le temps passe par trois phrases distinctes : étape initiale EAP (Early aging period), étape intermédiaire TP (Transition period), et l'étape de décharge de contournement LAP (Late aging period). Une variation typique du signal du CF dans le temps pendant les essais de contournement dans une chambre de brouillard salé est illustrée dans la figure ci-dessous.

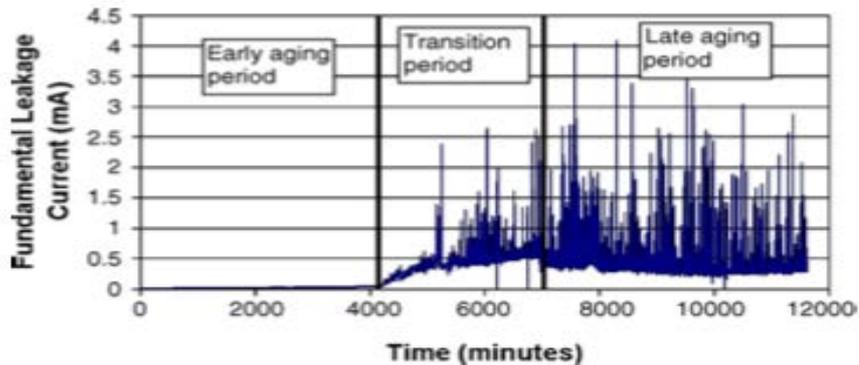


Figure I.6 : Evolution du signal du CF dans le temps durant les essais effectués dans la chambre de brouillard salé [10].

Il a été observé qu'il existe des différences distinctes entre le comportement du fondamental et celui de la troisième composante harmonique du CF pendant l'étape initiale EAP. En effet, la composante fondamentale commence à croître dès le début de l'essai, tandis que la troisième composante harmonique du CF a besoin d'un certain temps pour commencer à croître. Pour mesurer cette différence entre les composantes harmoniques fondamentale et troisième, la modélisation en série chronologique TSM (Time series modeling) est employée.

Par exemple, pour un échantillon d'isolateur de type no. 3 (Tableau (I.4)), les signaux des composantes fondamentale et troisième du courant de fuite durant les premières 120 min sont données dans la figure (I.7). Les fonctions d'autocorrélation correspondantes sont données à la figure (I.8).

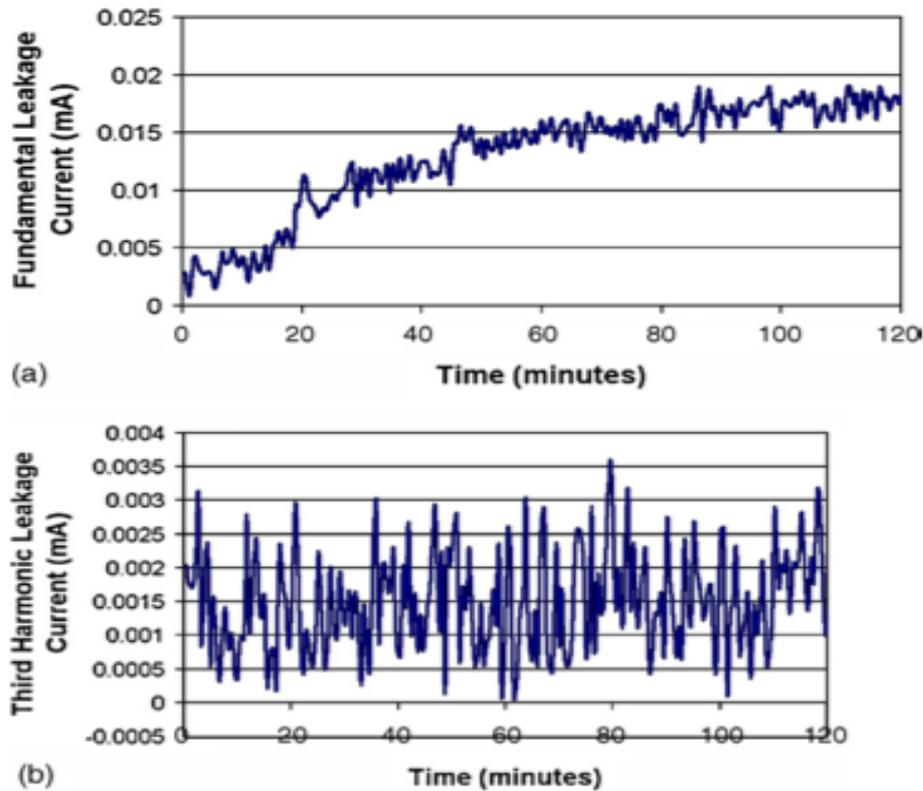


Figure I.7 : Signaux du CF durant les 120 premières minutes pour le type no. 3 : (a) composante fondamentale ; (b) troisième composante harmonique [10].

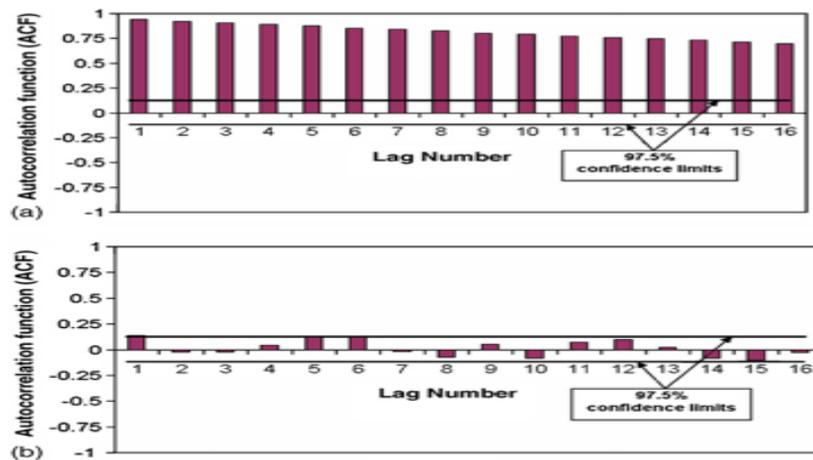


Figure I.8 : Fonctions d'autocorrélations correspondantes pour les deux composantes du CF de la figure (I.7) : (a) composante fondamentale ; (b) troisième composante harmonique [10].

Il a été constaté à partir de la figure (I.7) que pendant que la composante fondamentale du courant de fuite a tendance à augmenter, ce qui peut être attribué à l'augmentation de la partie linéaire résistive du courant de fuite, la troisième composante harmonique n'a aucune tendance. D'une autre part, il est clair que la composante fondamentale est fortement autocorrélée, tandis que la troisième composante harmonique ne l'est pas. L'apparition des

bandes sèches étant corrélée avec le troisième harmonique et non pas avec la composante fondamentale, l'aspect aléatoire dans la fonction d'autocorrélation de la troisième composante harmonique est une indication évidente de l'absence de bandes sèches.

La fonction d'autocorrélation est calculée à des intervalles de 120 minutes pour trouver l'intervalle de temps spécifique auquel les bandes sèches commencent à apparaître. Pour l'isolateur de type no. 3, il a été trouvé que la troisième composante harmonique a tendance à augmenter après une durée approximative de 18 h comme montré sur la figure (I.8.a), et la fonction d'autocorrélation correspondante, qui est donnée à la figure (I.8.b). L'intensité de la composante fondamentale du courant de fuite à laquelle la troisième composante harmonique commence à augmenter est approximativement de 0.06 mA. Or, les mêmes essais ont été effectués pour des échantillons d'isolateurs de type no. 5, et il a été observé que la troisième composante harmonique commence à croître après une durée de 20 h, et que l'intensité de la composante fondamentale du courant de fuite à ce moment est de 0.12 mA, qui est le double de celle trouvée pour les isolateurs de type no. 3. Il a été donc conclut que c'est plus approprié d'utiliser la fonction d'autocorrélation de la troisième composante harmonique du courant de fuite comme indicateur de l'apparition des bandes sèches plutôt que d'une simple valeur seuil du courant de fuite.

Selon le niveau de saturation du courant de fuite durant l'étape de décharge de contournement, différentes formes de vieillissement ont été observées sur les isolateurs SIR à savoir : type-1 sans dommages évidents à l'œil nue, type-2 avec des dommages modérés montrant l'érosion, type-3 avec des dommages graves indiquant l'érosion et le dépistage. Une corrélation a été découverte entre les valeurs moyennes des composantes harmoniques du courant de fuite et les différentes formes de dégradations. Les valeurs moyennes des composantes harmoniques fondamentale et troisième sont suffisantes pour distinguer les dégradations entre le type-1 et le type-2 de dégradation comme représenté sur la figure (I.9).

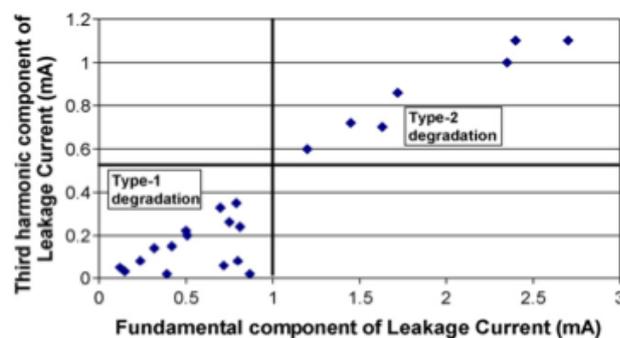


Figure I.9 : Troisième composante harmonique en fonction de la Composante fondamentale pour des isolateurs atteints de dégradations de type-1 et type-2 [10].

Il apparaît clairement à partir de la figure (I.9) qu'il existe une valeur seuil, après laquelle l'état de dégradation de l'isolateur passe du type-1 au type-2, qui est de 1 mA pour la composante fondamentale et de 0.5 mA pour la troisième composante harmonique.

Pour la détection des isolateurs ayant une dégradation de type-3, la troisième composante harmonique est utilisée. Pour cela, des essais ont été effectués sur quatre isolateurs de type no. 3 (Tableau (I.4)). Les résultats obtenus sont donnés sur la figure (I.10).

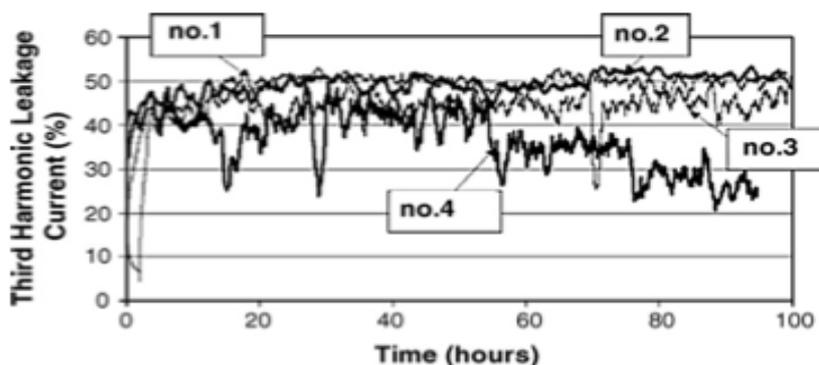


Figure I.10 : Pourcentage du troisième harmonique pour quatre isolateurs différents de type no.3 (tableau (I.4)) [10].

50 h après le début des essais, il y a eu rupture d'isolement pour le quatrième isolateur, ce qui s'est traduit par la tendance à diminuer la troisième composante du courant de fuite, donc la dégradation de type-3 peut être identifiée en observant la diminution de la troisième composante harmonique du courant de fuite.

I.5. Analyse des contournements des bandes sèches lors de compression de la longueur d'arc :

Les recherches effectuées sur le vieillissement accéléré des câbles de haute tension ont abouti au résultat que le vieillissement des isolateurs peut être accéléré si les décharges à travers les bandes sèches sont physiquement comprimées en longueur.

X. Zhang et al. [11] ont étudié les caractéristiques électriques des décharges subissant une compression en longueur. Cette étude leur a permis d'élaborer un modèle à double sinusoïde pour simuler la caractéristique courant-tension des décharges comprimées en longueur à travers les bandes sèches. La compression en longueur est due au mouvement de l'humidité au bord de la bande sèche à travers laquelle une décharge survient. La tension superficielle de l'eau est réduite aux extrémités de la décharge, ce qui contribue à la probabilité du mouvement de l'humidité sur la surface de la bande sèche.

Pour leurs essais, les auteurs ont utilisé des échantillons de 300 mm de long, 22 mm de diamètre, se composant de 4 mm d'épaisseur radiale de SIR sur un noyau renforcé en verre de polymère. La surface en caoutchouc de silicone (SIR) est uniformément entourée de papier abrasif pour réduire son hydrophobicité extérieur et encourager la formation rapide de films continus d'eau sur la surface et ainsi la formation initiale d'une décharge stable de bande sèche. Des électrodes, séparées par 200 mm, ont été constituées enveloppant étroitement l'échantillon par deux bandes de cuivre. L'échantillon est placé dans une chambre à brouillard

salé, avec une conductivité de 16 mS/cm et un taux de précipitation de 0.4 ± 0.1 l/m³/h, pour assurer la formation de film d'eau conductrice. Un système télécommandé de poulie soulève une extrémité de l'échantillon pour créer une pente. Le diagramme schématique du montage expérimental est donné sur la figure (I.11).

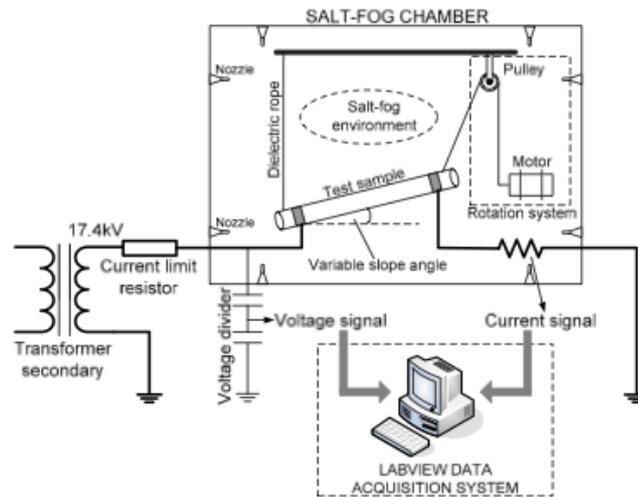


Figure I.11 : Diagramme schématique du montage expérimental [11].

L'angle de la pente a été incrémenté entre 5 et 40° de l'horizontale, et les signaux de la tension et du courant, ainsi que les longueurs de décharge associées à chaque pente ont été enregistrés. Les résultats obtenus sont donnés sur les figures (I.12), (I.13), (I.14) et (I.15).

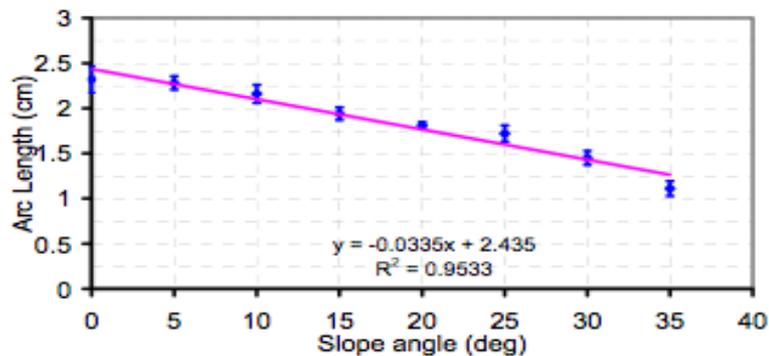


Figure I.12 : Relation entre la longueur des décharges et l'angle de la pente [11].

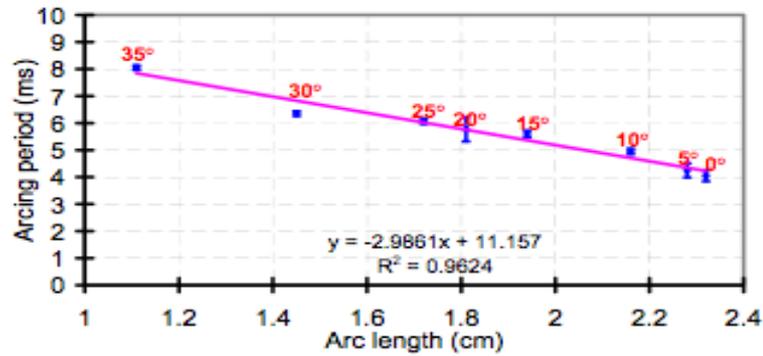


Figure I.13 : Relation entre la durée de la décharge et sa longueur [11].

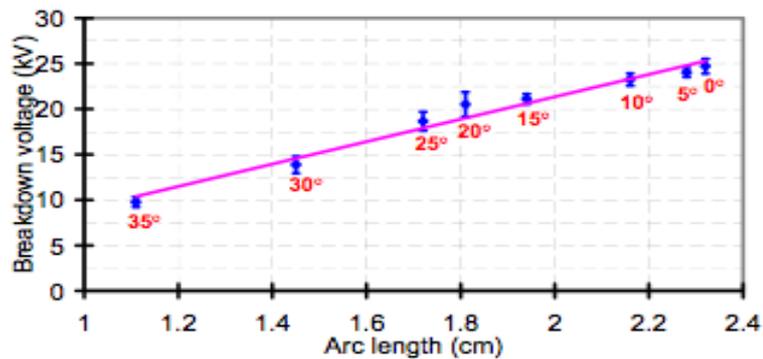


Figure I.14 : Relation entre la tension de contournement et la longueur de la décharge [11].

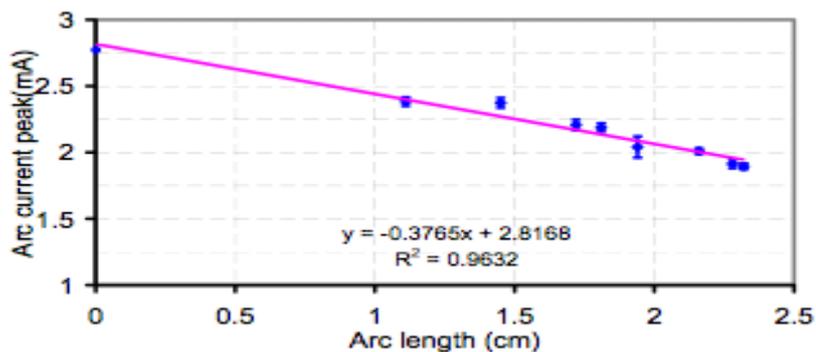


Figure I.15 : Relation entre la valeur crête du courant et la longueur des décharge [11].

Des recherches effectuées par les mêmes auteurs [12] ont démontré que les caractéristiques électriques des décharges compressées en longueur à travers les bandes sèches peuvent être simulées par un modèle à double sinusoïde. Dans ce travail, les auteurs ont développé ce modèle pour permettre l'étude de la variation des pics de courant en fonction de la longueur des décharges. Deux sinusoïdes sont introduites pour simuler les caractéristiques expérimentales de la tension et du courant. Trois phases sont identifiées dans chaque demi-période. Le modèle est représenté par les équations suivantes [11] :

- Phase avant la décharge : $0 < t < t_1$

$$i_a(t) = 0 \tag{I-8}$$

$$u_a(t) = \sqrt{2}U_a \sin \omega_u t \tag{I-9}$$

➤ Phase de décharge : $t_1 < t < t_2$

$$i_a(t) = \sqrt{2}I_a \sin \omega_i [t - (\frac{\pi}{\omega_u} - t_2)] \tag{I-10}$$

$$u_a(t) = U_0 \tag{I-11}$$

➤ Phase après la décharge : $t_2 < t < 10$ ms

$$i_a(t) = 0 \tag{I-12}$$

$$u_a(t) = \sqrt{2}U_a \sin \omega_u t \tag{I-13}$$

Où $i_a(t)$ et $u_a(t)$ représentent les courbes du courant (mA) et de la tension (kV). I_a et ω_i sont respectivement la valeur efficace (mA) et la pulsation (rad/ms) de l'onde sinusoïdale du courant. U_a et ω_u sont respectivement la valeur efficace (kV) et la pulsation (rad/ms) de l'onde sinusoïdale de la tension. U_0 est la tension (kV) de l'arc durant la phase de décharge. t_1 est l'instant d'apparition de la décharge (ms), et t_2 l'instant d'extinction de la décharge (ms).

Les détails des paramètres du modèle sont donnés sur le tableau (I.5).

I-V curves [mA & kV]	Double Sinusoidal Model	
	$i_s(t)$	$u_s(t)$
Equation	(11)	(12)
U_a [kV]	—	17.4
I_s [mA]	$I_s = f(L_p)$	—
U_0 [kV]	—	8.7
ω_u [rad/ms]	0.314	0.314
ω_i [rad/ms]	0.408	—
t_1 [ms]	$t_1 = f(L_p, t_2)$	$t_1 = f(L_p, t_2)$
t_2 [ms]	8.88	8.88
L_p [cm]	$1.1 < L_p < 2.3$	$1.1 < L_p < 2.3$
t [ms]	$0 < t < 10$	$0 < t < 10$

Tableau I.5 : Détails sur les paramètres du modèle à double sinusoïde [11].

Les résultats obtenus, pour une longueur de décharge de 1.7 cm, à partir du modèle à double sinusoïde ont été comparé aux résultats obtenus à partir des essais, et les résultats sont représentés sur la figure (I.16).

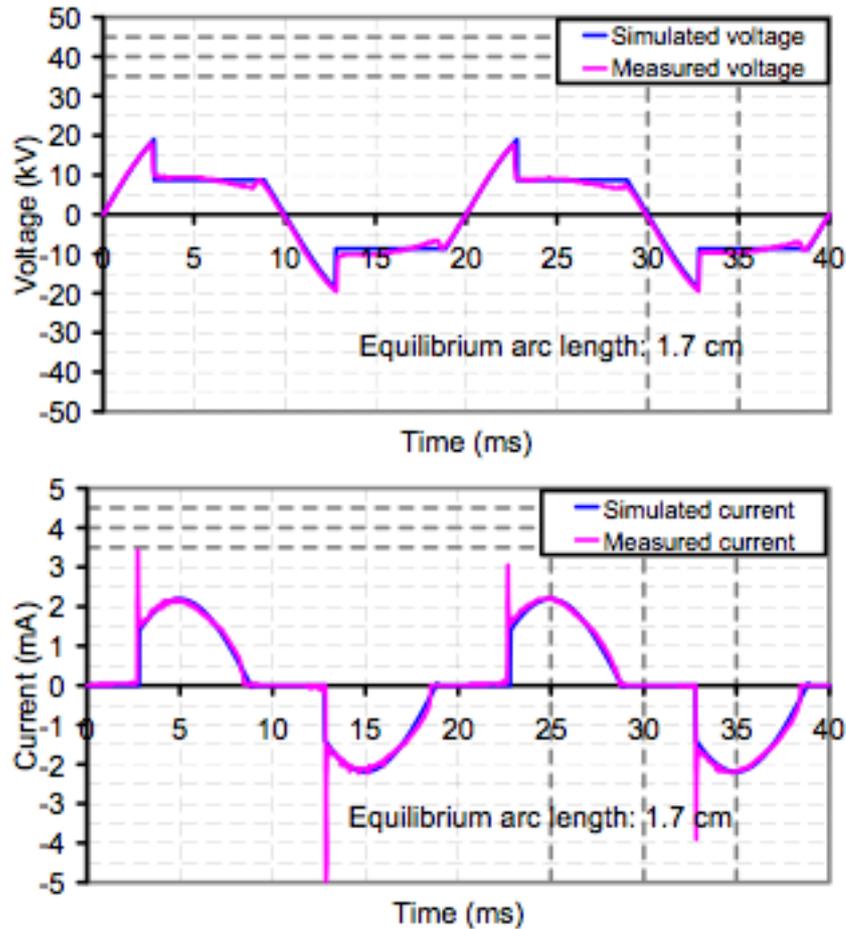


Figure I.16 : Comparaison de la courbe obtenue avec le modèle à double sinusoïde à celle mesurée expérimentalement pour une longueur de décharge de 1.7 cm [11].

Dans le but de calculer l'énergie de la décharge, les auteurs ont mesuré la puissance de la décharge à des intervalle de temps t_n de 0.025 ms. A chaque demi-période de la décharge à travers la bande sèche 800 points de mesures sont effectués. La variation de la puissance en fonction de l'angle d'inclinaison de l'échantillon est donnée dans la figure (I.17).

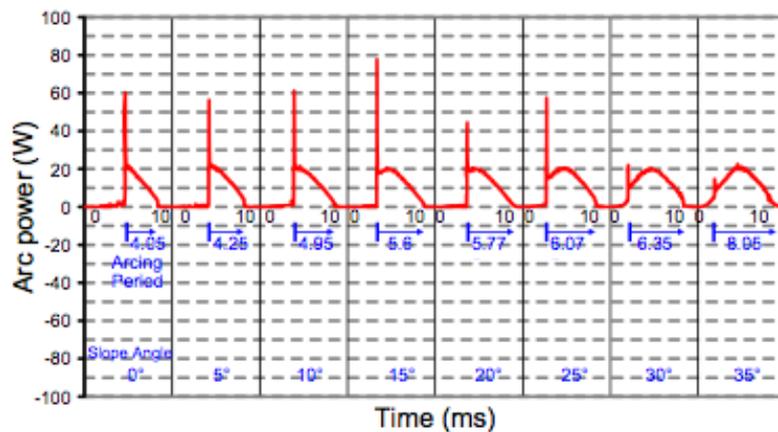


Figure I.17 : Variation de la puissance de la décharge en fonction de l'angle d'inclinaison de l'échantillon [11].

A partir de ces mesures discrètes de la puissance de la décharge, l'énergie de l'arc peut être calculée comme suite [11] :

$$E = \sum_{n=1}^{800} [P(t_n) + P(t_{n+1})] \times t_n / 2 \quad (\text{I-14})$$

Où E est l'énergie de l'arc pour une demi période, $P(t_n)$ est la puissance de la décharge au n^{ième} point échantillonné et t_n est la période d'échantillonnage (0.025 ms).

L'énergie de la décharge a aussi été calculée à partir du modèle à double sinusoïde, qui a été élaboré au paravent, et l'équation de l'énergie calculée peut être exprimé comme suite [11] :

$$E_a = \int_{t_1}^{t_2} \{ \sqrt{2} U_0 I_a \sin \omega_i [t - (\frac{\pi}{\omega_u} - t_2)] \} dt \quad (\text{I-15})$$

L'énergie de la décharge obtenue à partir des mesures (équation (I-14)), et le résultat de la simulation de l'énergie de la décharge obtenue à partir de l'équation (I-15) sont représentées et comparées dans la figure (I.18).

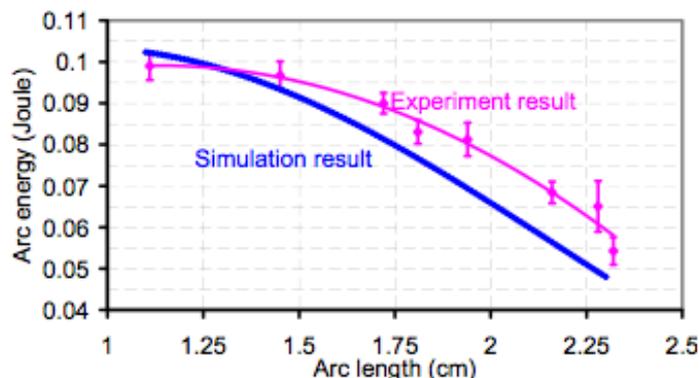


Figure I.18 : Energies de la décharge obtenue par mesure et par simulation en fonction de la longueur de l'arc ayant subit une compression en longueur [11].

Suite aux essais et aux résultats obtenus, les auteurs ont conclut que :

- La longueur des décharges à travers les bandes sèches peut être compressées lorsque l'angle d'inclinaison de l'isolateur par rapport à l'horizontal augmente.
- Les courbes de la tension et du courant peuvent être modélisées en utilisant le modèle à double sinusoïde.
- Sur les surfaces des isolateurs inclinés, la largeur de la bande sèche, et donc la longueur de l'arc à travers cette bande diminue, ce qui a pour conséquences l'augmentation de la durée de la décharge, l'augmentation de la valeur crête du courant de fuite et l'augmentation de l'énergie de la décharge.

- La compression de la longueur de la bande sèche, et donc de l'arc peut mener à des dégradations plus importantes de la surface des isolateurs composites, et pourrait probablement accélérer le vieillissement des l'isolateurs.

I.6. Diagnostique de l'état de surface des isolateurs en polymère à l'aide de la transformée en ondelette et les réseaux de neurones :

Les isolateurs fabriqués à base de polymère sont de plus en plus utilisés dans le transport de l'énergie électrique, et cela est dû au fait que ces isolateurs possèdent des propriétés diélectriques supérieures à celles des isolateurs en porcelaine ou en verre. Dans la majeure partie des cas, la perte de la rigidité diélectrique à travers ces isolateurs est le résultat du dépistage, un phénomène particulier qui se produit sur la surface de l'isolateur en raison des décharges. Dans le but d'améliorer la fiabilité de ces isolateurs, le phénomène d'érosion a été étudié dans le monde entier [13].

R. Sarathi et al. [13] ont proposé une nouvelle méthode, en se basant sur l'analyse du courant de fuite, pour évaluer l'état de surface des isolateurs en polymère à haute densité de polyéthylène (HDPE). Les auteurs ont effectué leurs essais sous tension alternative, sur des échantillons de HDPE. Les essais ont été effectués selon la norme CEI-587 [14]. La distance entre la borne haute tension et la borne terre a été ajustée à 50 mm, et la nature de pollution utilisée est le chlorite d'ammonium. Le débit de polluant appliqué est contrôlé par une pompe, et sa conductivité est mesurée. Le diagramme schématique du montage expérimental est donné dans la figure (I.19)

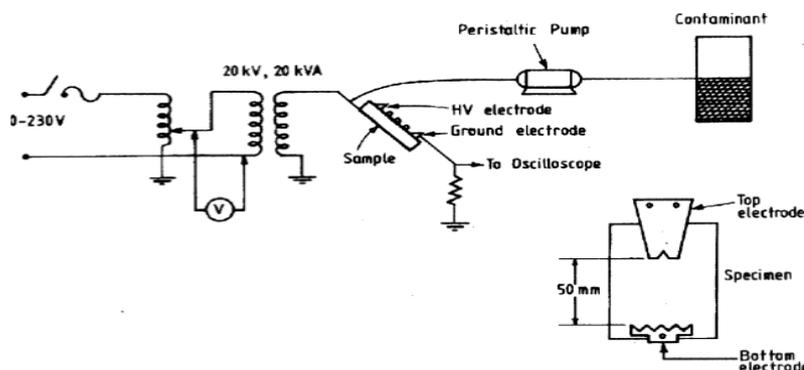


Figure I.19 : Diagramme schématique du montage expérimental [13].

Le dépôt du polluant provoque la formation d'une couche conductrice sur la surface de l'échantillon étudié et la circulation du courant de fuite à travers ces couches conductrices cause l'évaporation partielle du polluant et donc la formation de bandes sèches. Les bandes sèches sont des zones fortement résistives et l'intensité du courant de fuite s'effondre à zéro comme illustré dans la figure (I.20.a). Les variations de la forme du courant de fuite pendant les décharges et pendant le phénomène d'érosion sont données dans la figure (I.20.b) et la figure (I.20.c) respectivement.

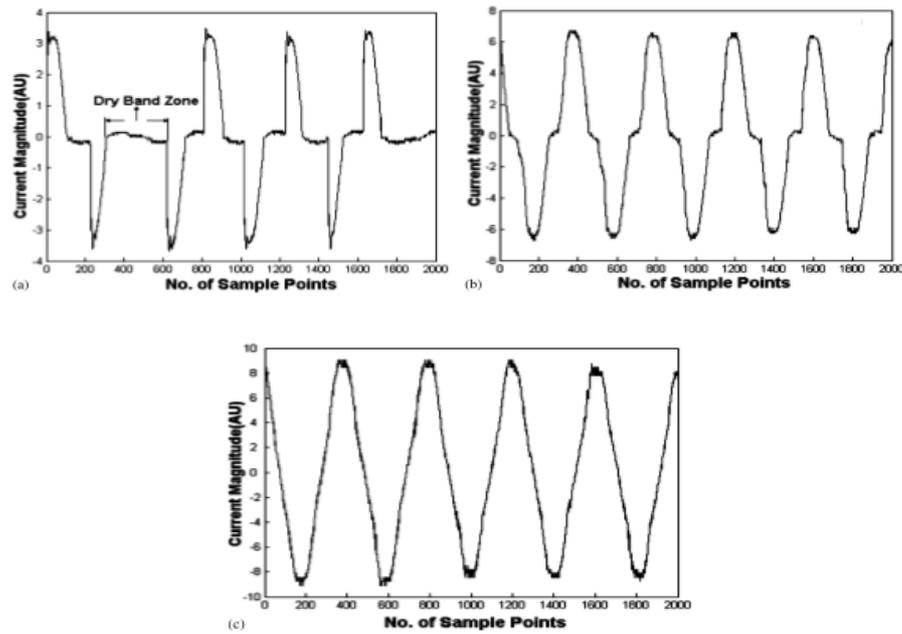


Figure I.20 : Courbes typiques des signaux des courants de fuite obtenus : (a) formation de bandes sèches (b) pendant les décharges (c) pendant le phénomène d'érosion [13].

L'augmentation de la température causée par les décharges conduit au changement des propriétés chimiques de l'échantillon, ce qui cause sa carbonisation aux extrémités de l'arc, résultant ainsi un phénomène d'érosion à la surface du matériel. Le processus complet peut être résumé comme montré sur la figure (I.21).

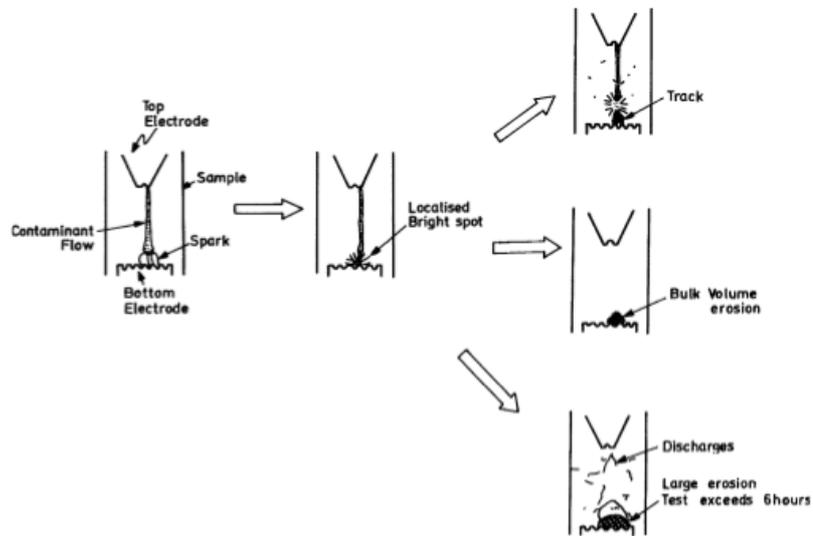


Figure I.21 : Représentation schématique du processus d'érosion [13].

Les auteurs ont utilisé la technique de décomposition multi-résolution du signal du courant de fuite, et cela dans le but de déterminer deux propriétés importantes :

- La première étant la propriété de localisation dans le temps de tous phénomène passer. Ceci apparaît par la présence de coefficients de grandes valeurs à l'instant de l'apparition du phénomène passer.
- La seconde est de diviser l'énergie du signal dans différentes bandes de fréquences, ce qui donne une idée sur les composantes dans le domaine fréquentiel d'un signal distordu.

L'écart-type peut être considéré comme moyen de mesure de l'énergie présente dans un signal. Le but de la détermination de l'écart-type est de déterminer le transit d'énergie à un instant donné. Ainsi pour calculer l'écart-type aux différents niveaux de résolution du signal décomposé, la technique d'analyse multi résolution du signal (STD_MRA) a été utilisée.

Dans le but d'étudier la variation de la durée de dépistage des échantillons de HDPE en fonction de la tension appliquée, de la conductivité ainsi que du débit du polluant, les auteurs ont effectué plusieurs séries d'essais sous tension alternative et en utilisant le NH_4Cl comme polluant, et les résultats obtenus sont illustrés dans les figure (I.22), (I.23) et (I.24).

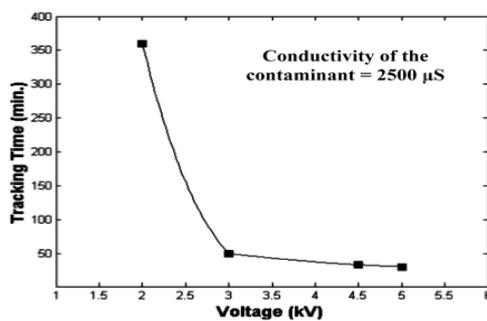


Figure I.22 : Variation de la durée d'érosion des échantillons de HDPE en fonction de la tension appliquée.

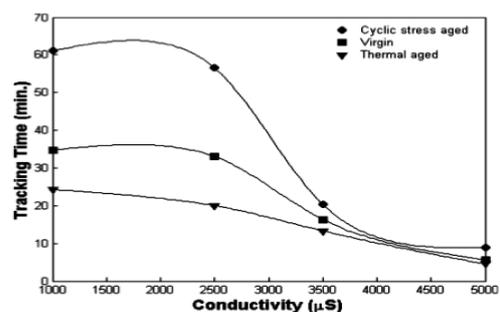


Figure I.23 : Variation de la durée d'érosion des échantillons de HDPE en fonction de la conductivité du polluant.

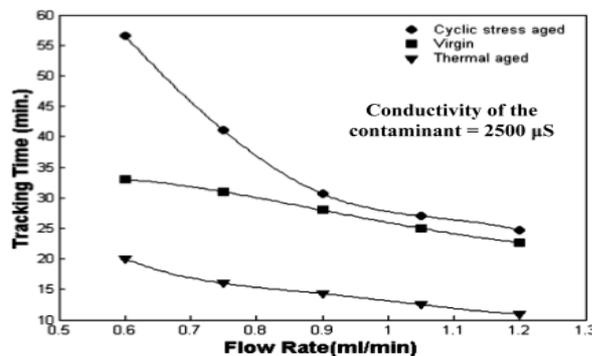


Figure I.24 : Variation de la durée d'érosion des échantillons de HDPE en fonction du débit du polluant.

Il apparaît clairement à partir de la figure (I.22) que l'augmentation de la tension appliquée engendre la diminution de la durée de dépistage des échantillons, donc les auteurs

ont conclut que les isolateurs en HDPE sont à utiliser de préférence pour l'isolation dans le cas des faibles tensions, ou le champ électrique ne dépasse pas 0.4 kV/cm. Les auteurs ont constaté à partir de la figure (I.23) que l'augmentation de la conductivité du polluant conduit à la diminution de la durée de dépistage des différents échantillons étudiés. Une caractéristique similaire a été observée par Sarathi et al. [15] pour des échantillons de EPDM. La figure (I.24) montre la variation de la durée de dépistage des échantillons de HDPE en fonction du débit de NH_4Cl , sous tension alternative et pour une conductivité de 2500 μS . Il apparaît clairement à partir de la figure (I.24) que l'augmentation du débit de polluant provoque la diminution de la durée de dépistage des échantillons de HDPE.

Pour déterminer l'état de surface des isolateurs, les auteurs ont utilisé les études effectuées par Suda [13] qui s'est basé sur les harmoniques de rangs supérieur contenus dans le signal du courant de fuite pour classer l'état de surface de l'isolateurs en trois catégorie : état de surface sous condition normale, surface subissant des décharges et surface sous le phénomène de dépistage. La FFT a été utilisée pour déterminer le contenu du signal dans le domaine fréquentiel, et la technique des ondelettes pour détecter l'occurrence de changement dans la caractéristique du signal du courant de fuite. Ainsi la MRSD a été utilisée pour l'analyse des données en temps réel (online).

Dans le même travail, et dans le but d'automatiser l'évaluation de l'état de surface des isolateurs HDPE, les auteurs ont utilisé un réseau de neurones artificiel (ANN). Le réseau multicouche vers l'avant alimenté par l'algorithme d'étude arrière de propagation (multilayer Feed Forward network with back propagation learning algorithm) a été employé dans cette étude, et cela en raison de son approche simple et des bonnes possibilités de généralisation qu'il offre. Les détails des spécifications du réseau de neurones artificiel utilisé sont donnés dans le tableau (I.6).

No. of inputs	9
No. of neurons in hidden layer	16
No. of neurons in output layer	3
Learning rate (η)	0.01
No. of iterations	5000
No. of training sets	70
No. of test input sets	60
Convergence criteria	0.001

Tableau I.6 : Spécifications du réseau de neurones artificiel utilisé [13].

Les 9 niveaux de décomposition du signal obtenus par la STD_MRA ont été indiqués comme entrées du réseau de neurones. En se basant sur la condition d'erreur minimale, le nombre de couches cachées a été évalué à 16, et trois neurones de sortie ont été utilisés pour la classification de l'état de surface des échantillons : condition normale, condition de décharge et condition de dépistage. Les résultats obtenus à partir du réseau de neurone artificiel sont illustrés dans la figure (I.25).

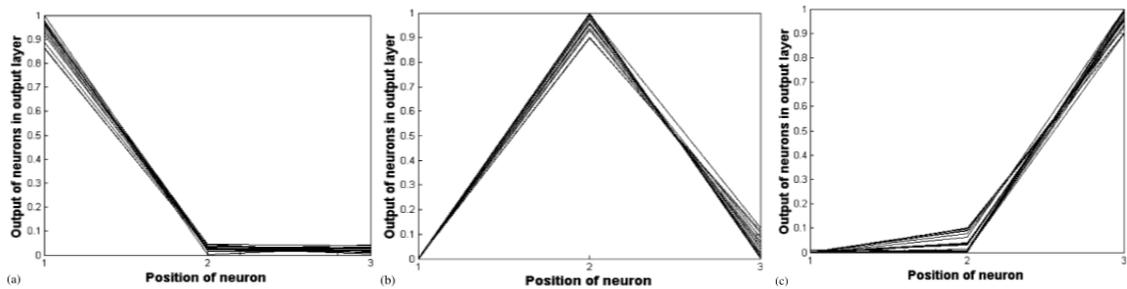


Figure I.25 : Résultats obtenus dans les couches de sortie du réseau de neurones artificiel, (a) courant de fuite normal, (b) courant de fuite pendant le phénomène d'érosion, (c) courant de fuite après érosion [13].

Il a été observé à partir des résultats obtenus que le taux d'identification dans la majeure partie des cas est supérieur à 0.85. Ceci indique que le réseau de neurones peut évaluer l'état de surface des isolateurs sans interruption, et que ce système fonctionne avec une grande précision.

I.7. Les différentes caractéristiques de la pollution artificielle des isolateurs composites de haute tension :

L'estimation de la durée de vie des isolateurs H.T est réalisée sur la comparaison des valeurs mesurées de leurs courants de fuite.

Le courant de fuite des isolateurs dépend de plusieurs paramètres, tel que le champ électrique appliqué (E), le débit unitaire d'électrolyte (q), la conductivité de l'électrolyte (σ), l'humidité environnementale (H) et la pression environnementale (P), d'ou la relation liant le courant de fuite à ces paramètres [16] :

$$I = f(E, q, \sigma, P, H) \tag{I-16}$$

M.A.M.Piah et A.Darus [16] ont montré que la relativité de surface de courant de fuite et le champ électrique appliqué dépendent d'autres paramètres. Les expressions du courant de fuite et du champ électrique en fonction du débit unitaire de l'électrolyte et de la conductivité de l'électrolyte sont données par :

$$I = f_1(q, \sigma) = A. (q^3. \sigma^{-2}) \tag{I.17}$$

$$E = f_2(q, \sigma) = B. (q^{-1}. \sigma^{-2})^{0.25} \tag{I.18}$$

Les résultats de simulation montrent que l'intensité du courant de fuite dépend également de la densité de la pollution et du débit unitaire d'électrolyte. La figure (I.26) représente la relation entre le courant de fuite et le débit unitaire d'électrolyte et sa conductivité. Il a été constaté à partir de la figure (I.26) que le courant de fuite augmente presque linéairement avec l'augmentation du débit unitaire ou de la conductivité d'électrolyte.

La figure (I.27) représente la relation entre le débit unitaire de l'électrolyte et sa conductivité, on note aussi que pour un niveau constant du courant de fuite sur la surface de l'isolateur et avec une augmentation de la conductivité de l'électrolyte, le débit unitaire diminue et l'augmentation du débit unitaire va engendrer ainsi la diminution de la conductivité de l'électrolyte. La figure (I.28) montre que le champ électrique appliqué diminue avec l'augmentation du débit unitaire et la conductivité de l'électrolyte.

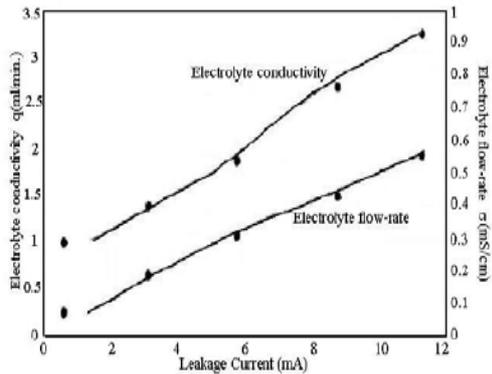


Figure I.26 : Variation du courant de fuite en fonction des débits et de la conductivité de l'électrolyte [16].

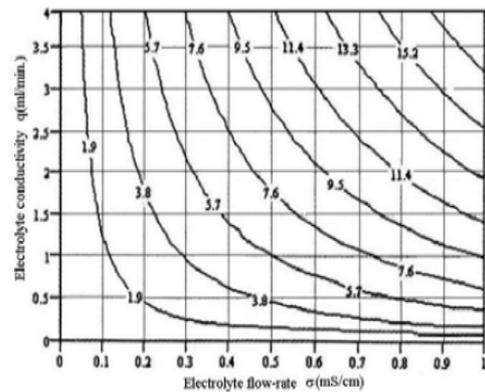


Figure I.27 : Relation entre le débit et la conductivité de l'électrolyte pour différentes intensités du courant de fuite [16].

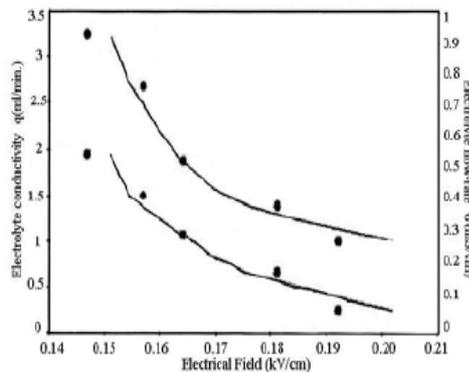


Figure I.28 : Variation du champ électrique en fonction du débit et de la conductivité de l'électrolyte [16].

La densité équivalente de sel déposé (ESDD) est un paramètre qui détermine la sévérité de la pollution à la surface des isolateurs, cette pollution est responsable du vieillissement de l'isolateur.

Dans la figure (I.29) est représentée la variation de la résistivité de surface (SR) en fonction du temps de trois types d'isolateurs, silicone de caoutchouc SIR (isolateur composite), EPDM et l'isolateur de porcelaine (isolateur non composite), en les exposant aux mêmes conditions de pollution.

La diminution de la résistivité de surface est évidente au début pour les trois isolateurs, on remarque aussi que la SR de l'isolateur de silicone de caoutchouc (SIR) est élevée par rapport à celles des deux autres isolateurs pour les secteurs pollués.

Les résultats des essais de la mesure de la SR pour les isolateurs SIR et les isolateurs en EPDM exposés au brouillard sont représentés dans la figure (I.30). On obtient toujours une diminution de la SR pour les deux types d'isolateurs, mais celle de l'isolateur de SIR est meilleure.

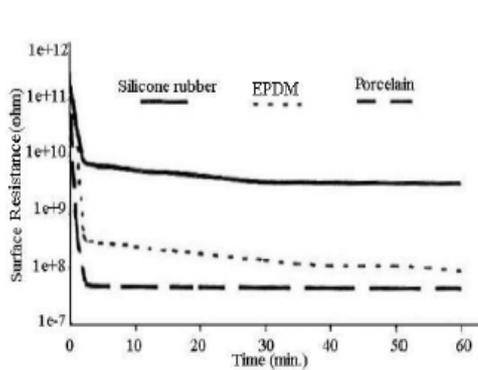


Figure I.29 : Mesure de la SR pour trois isolateurs différents mouillés [16].

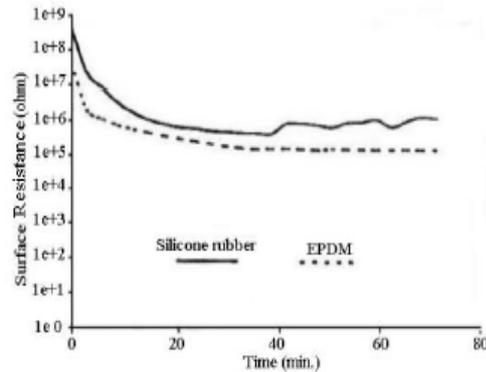


Figure I.30 : Mesures de la SR pour deux isolateurs différents exposés au brouillard.

I.8. Influence d'une couche de pollution non uniforme sur le contournement d'un isolateur sous tension de choc (tension impulsionnelle) :

L'étude des isolateurs pollués est l'un des facteurs primordial pour la conception et le calcul des dimensions des isolateurs dans le transport de l'énergie électrique. Cependant le dépôt de pollution sur les surfaces isolantes peut engendrer une diminution significative de la rigidité diélectrique des systèmes, ce qui peut mener à l'étincelle de rupture.

Dans la réalité, la couche de pollution n'est pas uniformément déposée, et sa distribution sur la longueur de fuite des isolateurs présente une grande fluctuation.

L'accumulation et la distribution de la pollution dépendent des conditions environnementales (le vent, la pluie..) et de la forme de l'isolateur. D'autre part, comme sous le C.A et le C.C, l'étude du contournement des isolateurs pollués sous tension de choc est également indispensable.

La distribution non uniforme de la pollution sur la surface des isolateurs a fait l'objet de nombreuses études et plusieurs modèles expérimentaux et théoriques ont été proposés.

Selon A. Sundararajan et autres [17], la différence entre la tension de contournement d'un isolateur uniformément pollué et d'un isolateur non uniformément pollué est négligeable, par contre la tension de tenue pour la pollution non uniforme est plus grande que celle de la pollution uniforme. En revanche R. Boudissa et autres ont montré le contraire [17].

Les auteurs ont proposé d'abord d'étudier le modèle analytique suivant:

Une décharge électrique en série avec le dépôt de pollution peut être représentée par le circuit électrique donné sur la figure (I.31). En supposant que tout le courant dérivé s'écoule à travers la couche de pollution, on peut écrire [17] :

$$V = R_d(X)I + j\omega\Gamma_d(X)I + \frac{R_p(X)I}{1+j\omega R_p(X)C_p(X)} \quad (I-19)$$

R_d et Γ_d représentent respectivement la résistance et l'inductance du canal de la décharge

R_p et C_p représentent respectivement la résistance et la capacité de la couche de pollution .

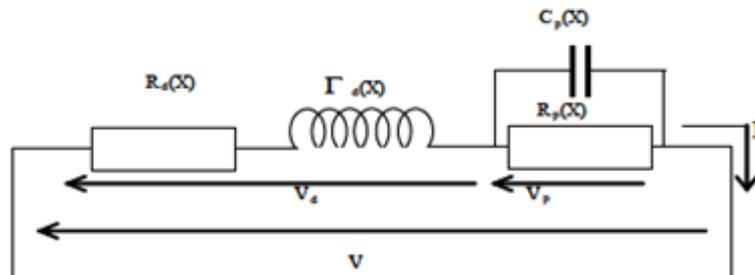


Figure I.31 : Circuit électrique équivalent [17].

L'impédance équivalente du système peut s'écrire sous la forme suivante [17] :

$$Z_{eq}(X) = \frac{V}{I} = R_d(X) + j\omega\Gamma_d(X) + \frac{R_p(X)}{1+j\omega R_p(X)C_p(X)} \quad (I-20)$$

D'ou : $R_d(X) = r_d X = X \frac{\rho_d}{S_d}$ et $\Gamma_d(X) = l_d X$

$$C_p(X) = \frac{c_p}{L - X} = \epsilon_p \frac{S_p}{L - X}$$

r_d et l_d représentent respectivement la résistance et l'inductance linéaire du canal de la décharge.

S_d et S_p représentent respectivement la section du canal de la décharge et la section de la couche de pollution.

ρ_d : la résistivité du canal de la décharge.

c_p : la capacité linéaire de la couche de pollution.

ϵ_p : la permittivité de la couche de pollution.

La dérivée totale du carré du module de l'impédance équivalente par rapport à X donne [17]:

$$\frac{d|Z_{eq}|^2}{dX} = \frac{2\beta X - 2LY}{(\beta S_d S_p)^2} \quad (I-21)$$

Avec $\beta = 1 + (\omega \rho_p \epsilon_p)^2$

$$\delta = (S_p \beta \rho_d - S_d \rho_p)^2 + (S_d \omega)^2 \cdot (S_p \beta l_d + \rho_p^2 \varepsilon_p)^2$$

$$\gamma = S_p \rho_d \beta (S_d \rho_p - S_p \rho_d \beta) + (S_d \varepsilon_p \rho_p^2 \omega)^2 \cdot (\varepsilon_p \rho_p^2 - S_p l_d \beta)$$

Selon Dhabbi et autres, la condition de l'instabilité de la décharge est la suivante [17] :

$$\frac{d|Z_{eq}|^2}{dX} \leq 0 \tag{I-22}$$

Ceci mène à définir la longueur de la décharge [17] :

$$X = L \left[\frac{S_p \rho_d \beta (S_d \rho_p - S_p \rho_d \beta) + (S_d \rho_p)^2 \varepsilon_p \cdot (\rho_p^2 \varepsilon_p - S_p l_d \beta)}{(S_d \rho_p - S_p \rho_d)^2 + (S_d \omega)^2 \cdot (\rho_p^2 \varepsilon_p + S_p l_d \beta)^2} \right] \tag{I-23}$$

Aux hautes fréquences, l'effet de la capacité du dépôt de la pollution est considéré comme étant négligeable devant sa résistance et l'effet de l'inductance de la décharge est très faible devant sa résistance. D'ou la longueur de la décharge peut être écrite comme suit [17] :

$$X_{cri} = L \frac{S_p \rho_d}{S_d \rho_p - S_p \rho_d} = L \cdot \frac{b e_p \rho_d}{S_d \rho_p - b e_p \rho_d} \tag{I-24}$$

Le calcul de l'épaisseur critique d'une couche de pollution et son angle d'inclinaison dépend de la configuration de la pollution. Dans cette étude, les auteurs ont considéré deux types de configurations :

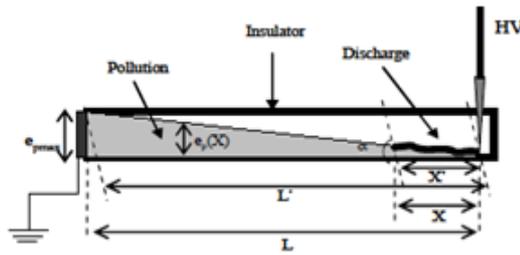


Figure I.32 : Configuration 1 [17].

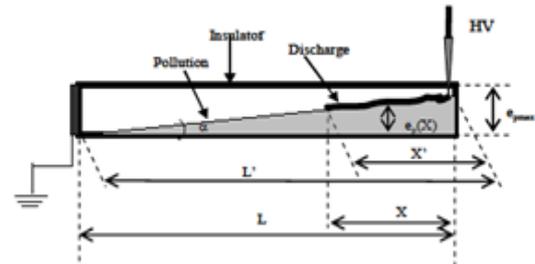


Figure I.33 : Configuration 2 [17].

➤ **Configuration 1:**

L'angle de l'inclinaison α est défini par [17]:

$$\tan \alpha = \frac{e_{pmax}}{L} = \frac{e_p(X)}{X} \tag{I-25}$$

Alors l'épaisseur de la pollution peut être écrite comme suit [17] :

$$e_p(X) = X \frac{e_{pmax}}{L} \tag{I-26}$$

Avec: $X = X' \cos \alpha$ et $L' = \frac{L}{\cos \alpha}$

Donc : $e_p(X) = X' \frac{e_{p\max}}{L} \cos \alpha$ (I-27)

On remplace X' de l'équation (I-27) par X_{cri} de l'équation (I-24) on obtient:

$$e_p(X) = \frac{\rho_p - r_d b e_{p\max} \cos \alpha}{r_d b}$$
 (I-28)

➤ **Configuration 2:**

Dans ce cas, l'angle de l'inclinaison α est défini par [17] :

$$\tan \alpha = \frac{e_{p\max}}{L} = \frac{e_p(X)}{L' - X}$$
 (I-29)

De l'équation (I-29) et (I-24) on obtient une équation du 2^{ème} degré :

$$-r_d \frac{b e_{p\max}}{L} X_{\text{cri}}^2 + (r_d \frac{b e_{p\max}}{\cos \alpha} + \rho_p) X_{\text{cri}} - L \rho_p$$
 (I-30)

Avec: $\Delta = (r_d \frac{b e_{p\max}}{\cos \alpha} + \rho_p)^2 - 4 r_d b e_{p\max} \rho_p$

Notons que la deuxième solution de l'équation (I-30) n'est pas réaliste. Par conséquent, l'épaisseur de la couche de pollution qui correspond à la longueur critique de la décharge s'écrit sous la forme suivante [17] :

$$e_p(X) = \left(\frac{L}{\cos \alpha} - L \frac{\sqrt{\Delta} - r_d \frac{b e_{p\max}}{\cos \alpha} - \rho_p}{2 b e_{p\max} r_d} \right) \tan \alpha$$
 (I-31)

Le dispositif expérimental utilisé se compose d'un générateur de choc, un pupitre de commande, une cellule d'essai et un système d'acquisition de données (figure (I.34)). La tension de choc est fournie par un Générateur Marx type (220 kilovolts, 2 kJ, 1.2/50 μ s). Le modèle de l'isolateur utilisé se compose d'un canal rectangulaire réalisé en verre de 1.8 centimètre de profondeur, d'une largeur b de 5 centimètres et une longueur de fuite totale L de 20 centimètres (figure (I.35)).

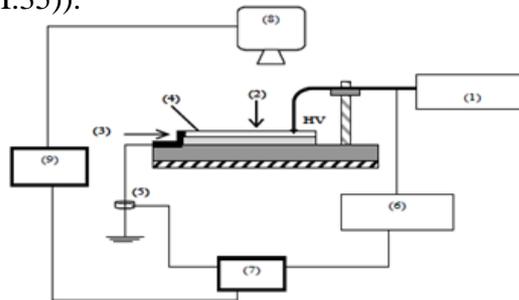


Figure I.34 : Le dispositif expérimental: (1) 220kV Marx generator; (2) l'isolateur utilisé; (3) électrode fondée; (4) pollution (électrolyte); (5) sonde; (6) diviseur capacitif; (7) oscilloscope; (8) CDD camera ; (9) ordinateur [17].

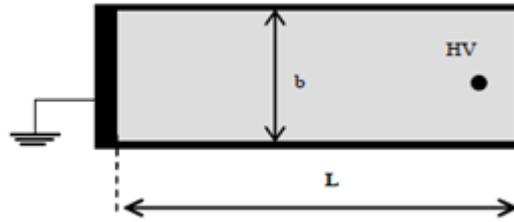


Figure I.35 : Modèle plan utilisé [17].

La pollution est un électrolyte simple ($\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$) avec une résistivité s'étendant de $2 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ à $100 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$. L'analyse de l'influence de l'effet de la non uniformité linéaire fait appeler une installation permettant de changer l'épaisseur de la pollution sur toute la longueur de fuite. La non uniformité de la pollution est en fonction de l'angle de inclinaison α de l'électrolyte. L'angle de inclinaison α est choisi pour avoir une épaisseur minimum de pollution du côté de l'électrode HT (pointe) et une épaisseur de 1.5 centimètre du côté de l'électrode de plan (la terre) et inversement. Trois cas sont étudiés :

- a) Pollution uniforme avec une épaisseur constante de 4 millimètres.
- b) Pollution non uniforme avec une épaisseur décroissante de l'électrode HT (configuration1).
- c) Pollution non uniforme avec une épaisseur croissante de l'électrode HT (configuration2).

Pour comparer les deux configurations, nous considérons à chaque fois la même résistance totale de la pollution (pour chaque résistivité).

Il a été observé qu'avec une polarité positive, les tensions de contournements de la pollution uniforme sont entre les tensions de contournements des deux configurations polluées non uniformément (figure (I.36)). Le système le moins rigide est la configuration 1. On constate aussi une variation restreinte des tensions de contournement entre la pollution uniforme et la configuration 2 (jusqu'à une résistivité de $20 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$). La configuration de pollution 2 présente le système le plus rigide.

Pour une polarité négative, la configuration 1 présente toujours le système le moins rigide par rapport à la configuration 2 et la pollution uniforme. Les tensions de contournement du système pollué uniformément sont plus élevées que celles de la configuration 2 jusqu'à une résistivité de $20 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ (figure (I.37)). Au delà de cette résistivité, les tensions de contournements sont pratiquement les mêmes.

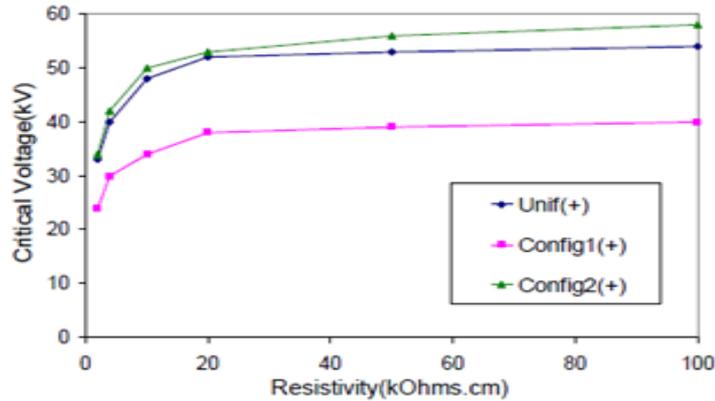


Figure I.36 : La variation de la tension de contournement en fonction de la résistivité de la zone polluée pour une polarité positive.

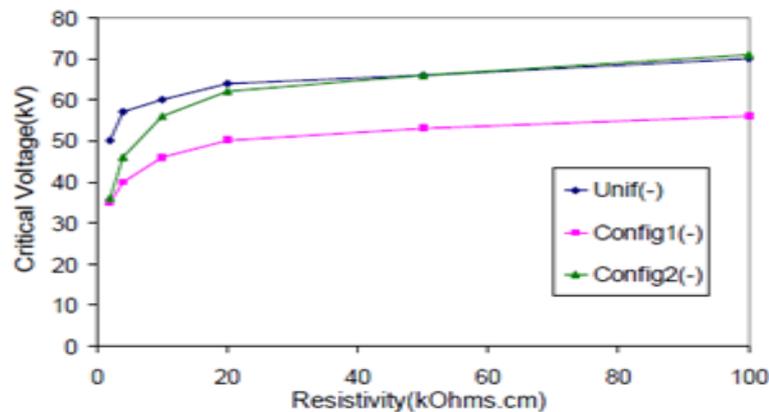


Figure I.37 : La variation de la tension de contournement en fonction de la résistivité de la zone polluée pour une polarité négative

I.9. la prédiction de la tension de contournement en utilisant des machines des moindres carrés de vecteur de soutien (LS-SVM) :

Les isolateurs de haute tension sont une partie essentielle dans les systèmes de transmission d'énergie électrique. Tout échec dans l'exécution des isolateurs de haute tension aura comme conséquence des pertes considérables, en tant que là sont de nombreuses industries qui dépendent au moment de la disponibilité d'une alimentation d'énergie non interrompue. Les isolateurs extérieurs sont soumis aux diverses conditions de fonctionnement et d'environnement [18].

La contamination de la surface des isolateurs augmente les chances de contournement. L'étincelle de rupture des isolateurs pollués peut causer à la ligne de transmission une panne de longue durée. Ce problème engendrant la motivation pour l'installation d'une station d'essai afin d'exécuter des essais en laboratoire sur des isolateurs artificiellement pollués. Bien que les essais mentionnés soient indispensables pour l'étude du comportement de l'isolateur sous pollution. Le coût de l'équipement nécessaire pour ces expériences est très élevé [18].

Pour les raisons ci-dessus, il semble être très utile de prévoir l'étude des isolateurs sous pollution conditionnée en utilisant des expressions analytiques et l'ordinateur.

Dans les deux dernières décennies, une variété de modèles de prédiction ont été proposés dans la littérature qui incluent les modèles de série du temps, le modèle de régression, les modèles artificiels de réseau neurologique (ANN) et les modèles du vecteur de soutien (SVM). Récemment, les SVM ont été employé comme algorithme populaire développé à partir de la communauté d'étude de machine [18].

Pour réaliser un niveau élevé d'exécution avec le modèle LS-SVM, quelques paramètres doivent être accordés, y compris le paramètre de régularisation (γ) et le paramètre du noyau correspondant au noyau de dactylographier (σ ou d). Le choix des paramètres est une tâche importante, elle dépend la plupart du temps du type de l'application à réaliser. Pour LS-SVM, il y a beaucoup de fonctions de noyau, fonction du polynôme radial de base (RBF) (radial basis function), cannelure (spline), bspline, sigmoïde (sigmoid), etc. Cependant, la fonction du noyau la plus utilisée est RBF. Ces noyaux sont linéaires.

Par conséquent, une stratégie efficace de recherche est nécessaire. Nous avons dentelé pour utiliser un processus à deux étages de recherche de grille sur l'espace de paramètres. À cette fin, la recherche brute de grille est premièrement utilisée pour se rétrécir en bas de la région de recherche de l'espace de paramètre. Dans le processus brut de recherche, les étapes d'accroissement des grilles sont considérablement grandes pour obtenir assez d'espace de recherche. Pour chaque pointe de la grille, la valeur moyenne de la racine carrée de l'erreur (RMSE) est déterminée puis minimisée, ce qui détecte l'intervalle de RMSE.

Dans L-plier de la contre-vérification, les données de formation sont aléatoirement coupées en L sous-ensembles rudement égaux. Le RMSE est donné par [18] :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (U_{ac,k} - y_{pre,k})^2}. \quad (\text{I-32})$$

N est le nombre de modèles de données dans le Modem, $y_{pre,k}$ est une indication de prédiction, $U_{ac,k}$ et la valeur d'essai d'un point de repères k.

Plusieurs méthodes statistiques, la fraction absolue de désaccord (R^2), la fonction d'erreur moyenne (MEF) et le coefficient de variation (COV), sont employées pour comparer les valeurs prédites et les valeurs obtenues par pour le calcul de la validation du modèle. Les paramètres R^2 , MEF et COV sont calculés à partir de [18] :

$$R^2 = 1 - \sum_{k=1}^N \left[\frac{|U_{ac,k} - y_{pre,k}|}{U_{ac,k}} \right]^2. \quad (\text{I-33})$$

$$\text{MEF} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\frac{|U_{ac,k} - y_{pre,k}|}{\max(U_{ac,k}) - \min(U_{ac,k})} 100 \right). \quad (\text{I-34})$$

$$\text{COV} = \frac{\text{RMSE}}{|\bar{U}_{ac,k}|} 100. \quad (\text{I-35})$$

Pour obtenir les meilleurs paramètres, la figure (I.38) présente une parcelle de terrain de maille d'une recherche plus fine. Après application du processus plus fin de recherche pour le noyau de RBF, les valeurs de γ et de σ^2 obtenues étaient 2521.4 ($2^{11.3}$) et 0.010309 ($2^{-6.6}$) respectivement. Ainsi, un modèle robuste a été obtenu en choisissant ces paramètres optimaux. Cette élasticité présente la plus basse valeur de RMSE dans le sous-domaine.

Une comparaison entre les données prédites et les données obtenues par les essais a été alors faite pour évaluer la performance du modèle de prédiction. Ceci est présenté dans les figures (I.39) et (I.40). Le RMSE correspondant, des valeurs de R^2 , MEF et de COV pour cette comparaison sont indiquées dans le tableau (I.7).

La figure (I.39) présente la variation de la tension de contournement obtenue en utilisant le modèle de prédiction LS-SVM ainsi que celle obtenue par les essais expérimentaux, en fonction du nombre des échantillons teste, la figure (I.40) présente la variation de la tension de contournement prédite par le modèle LS-SVM en fonction de la tension de contournement obtenue par les essais.

On remarque une superposition des deux courbes sur la figure (I.39) et on constate une erreur de $\pm 5\%$ du RMSE entre les valeurs obtenues par le modèle de prédiction et celles obtenues par les résultats expérimentaux pour $R^2 = 0.99975$, sur la figure (I.40). Ceci nous a permis de dire que le modèle des LS-SVM présente une grande performance et des bons résultats.

LS-SVM and MFNN model with optimum parameters	Statistical model validation parameters			
	RMSE	R^2	MEF	COV
RBF kernel	0.002877	0.99975	0.94214	1.6746
Poly-kernel	0.002386	0.99983	0.77625	1.3887
MFNN	0.005940	0.99894	1.59040	3.4574

Tableau I.7 : Performance comparison in terms of statistical model validation parameters of different kernel functions and MFNN for Test-I [18].

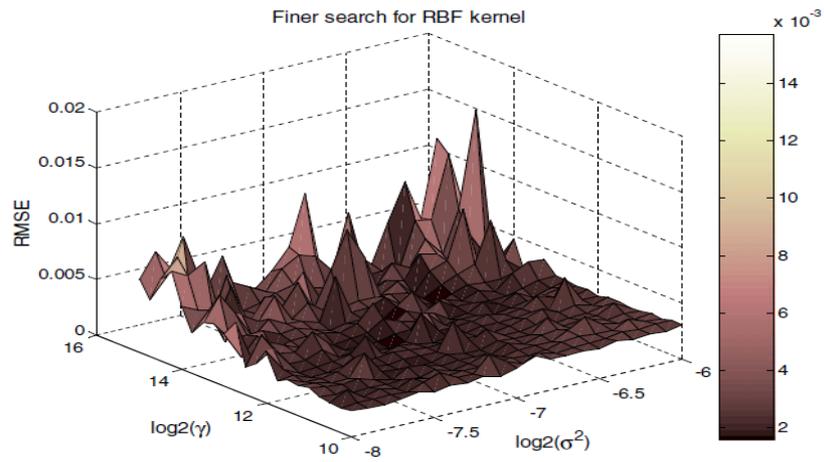


Figure I.38: RMSE vs. $\log_2(\gamma)$ and $\log_2(\sigma^2)$ for RBF kernel after applying the finer search.

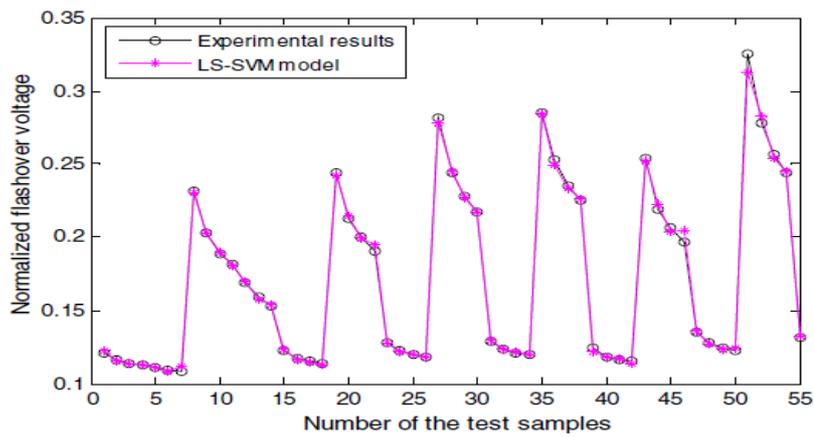


Figure I.39: The performance of LS-SVM model with RBF kernel for Test-I [18].

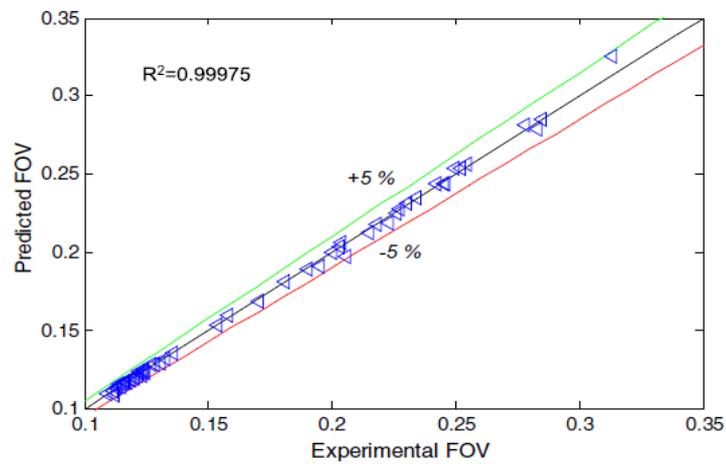


Figure I.40: The LS-SVM predictions vs. experimental results with $\pm 5\%$ error band for RBF kernel [18].

I.10. Modélisation dynamique des décharges se propageant sur des surfaces isolantes polluées avec des dépôts discontinus :

A l'Ecole Centrale de Lyon, S. Diampeni Kimbakala [1] a proposé un modèle dynamique autonome permettant de prédire la tension de contournement critique en tenant compte de l'évolution temporelle des différents paramètres électriques, thermiques et géométriques impliqués dans le phénomène de contournement. Ce modèle est similaire à celui proposé par Dhahbi et Beroual [19] pour les isolateurs uniformément pollués. La seule différence réside dans le fait que l'auteur a considéré des couches de pollution discontinues.

Le modèle consiste à représenter l'isolateur pollué par ses différentes bandes de pollution et la décharge se propageant à sa surface par un circuit électrique équivalent. La figure (I.41) donne un exemple pour une telle configuration.

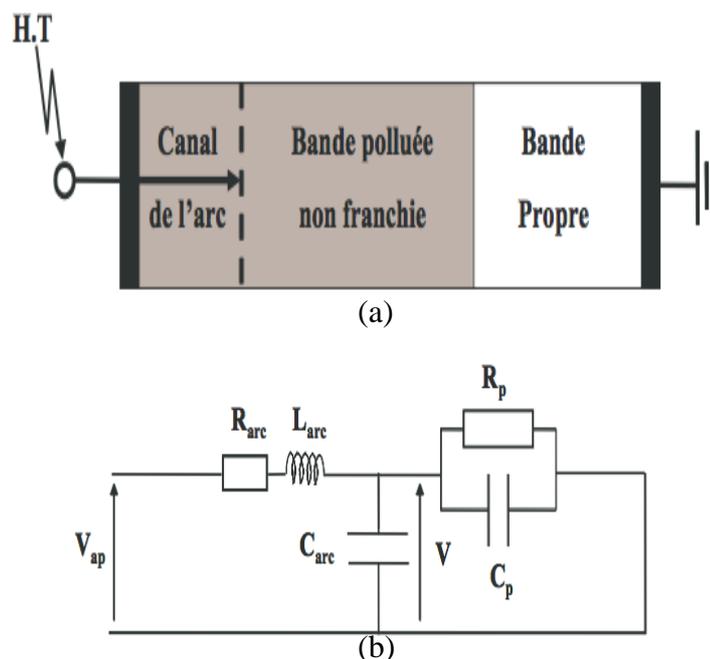


Figure I.41 : (a) : Configuration d'une surface isolante polluée constituée de deux bandes (polluée et propre), (b) : circuit électrique équivalent d'un canal de décharge en série avec la couche de pollution restante [1].

R_{arc} , L_{arc} et C_{arc} sont respectivement la résistance, l'inductance et la capacité représentant le canal d'arc. R_p et C_p sont la résistance et la capacité représentant la couche de pollution. V_{ap} représente la tension appliquée aux bornes des électrodes et V la tension de l'arc.

Chaque fois que le critère de propagation de la décharge locale [19] est satisfait, la décharge avance d'un pas. Après chaque déplacement partiel de la décharge, une nouvelle cellule RLC viendra se connecter à la précédente. La propagation de la décharge est donc décrite par des cellules $R_i L_i C_i$ en série comme indiqué dans la figure (I.42), où N est le nombre de bonds de la décharge, R_{pi} la résistance de la surface de la bande non franchie, x_0 , R_0 , L_0 et C_0 sont respectivement la longueur, la résistance, l'inductance et la capacité de la

décharge initiale. La valeur de x_0 utilisée par les chercheurs est de 1% de la longueur de fuite totale [1].

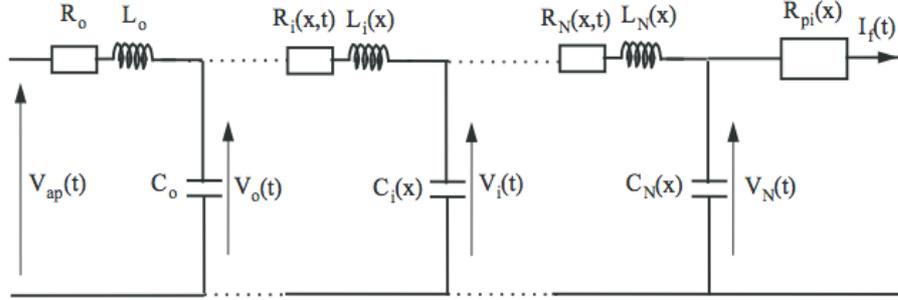


Figure I.42 : Modèle du circuit électrique équivalent décrivant la propagation de la décharge sur une bande de pollution donnée de la surface de l'isolateur [1].

Les équations donnant la tension et le courant pour un tel circuit sont [1] :

$$V_{(N-1)}(t) - V_N(t) = R_N I_N + L_N \frac{dI_N}{dt} \quad (\text{I-36})$$

$$I_N(t) = C_N \frac{dV_N}{dt} + I_f(t) \quad (\text{I-37})$$

$$I_f(t) = \frac{V_N(t)}{Z_p} \quad (\text{I-38})$$

Z_p étant l'impédance équivalente de la couche de pollution (R_p en parallèle avec C_p).

En utilisant la représentation d'état du système d'équation ci-dessus, l'auteur a calculé les différentes caractéristiques de la décharge en fonction de la géométrie de la surface, la largeur, l'épaisseur et la résistivité des différentes bandes de pollution de la surface de l'isolateur. Ainsi, le courant est donné par la relation [1] :

$$I_{arc} = \frac{V_{(N-1)}(t) - V_N(t)}{R_N} \quad (\text{I-39})$$

La charge injectée étant la somme des charges élémentaires, elle est donnée par la relation [1] :

$$Q(t) = \sum_{i=1}^N q_i = \sum_{i=1}^N C_i V_i(t) \quad (\text{I-40})$$

Où N est le nombre de sauts de l'arc, C_i la capacité à la tête de l'arc et V_i représente la tension à la tête de l'arc.

La chute de tension dans l'arc est alors donnée par l'expression ci-dessous [1] :

$$V_{arc}(t) = V_{ap}(t) - V_N(t) \quad (I-41)$$

La formule proposée par Wilkins a été utilisée pour calculer le rayon du canal de la décharge [1]. Pour ce qui est de la vitesse de propagation, elle a été calculée par la relation proposée par Beroual [1].

A partir des différentes simulations effectuées, l'auteur a conclu que :

Sous tensions impulsionnelles, la propagation de la décharge s'effectue en général par bonds. Durant les instants de pause observés entre chaque bond, la charge à la tête de la décharge se reconstitue de manière à ce que le champ puisse atteindre des valeurs permettant à la décharge d'avancer. La disposition des bandes de pollution par rapport aux électrodes, leurs largeurs, leurs épaisseurs et leurs conductivités ont une grande influence sur les paramètres de la décharge.

Sous tension alternative, si le contournement n'intervient pas dans la première alternance, il est nécessaire que la condition de réamorçage soit satisfaite. En alternatif, le courant augmente quand la résistivité de la couche de pollution diminue.

La tension de contournement sous tension continue est nettement inférieure à celle sous tension alternative. Le courant de décharge d'un isolateur pollué sous tension continue augmente avec la conductivité des bandes de pollution mais surtout celle de la dernière bande sur laquelle intervient le saut final. La longueur de propagation sous tension continue évolue toujours de manière quasi-linéaire. Les tensions de contournement d'un isolateur pollué donné, sont plus élevées sous tension impulsionnelle que sous tension alternative. Et elles sont plus élevées en alternatif qu'en continu.

I.11. Mesure du courant de fuite et de la charge électrique d'un isolateur de haute tension pollué :

Dans le cadre de leur projet de fin d'étude, I. Harzelli et Y. Maanani [20] ont étudié la sévérité de la pollution sur un modèle plan (figure (I.43)) simulant l'isolateur standard PSV 120B, et cela sous tension alternative 50 Hz. Dans le but de caractériser l'état de surface de l'isolateur étudié, les auteurs ont exploité les signaux du courant de fuite. Afin de mesurer la tension de contournement, l'amplitude du courant de fuite et la charge électrique, plusieurs essais ont été effectués, sous pollution uniforme et non-uniforme, au laboratoire de haute tension de L'ENP.



Figure I.43 : Modèle plan étudié vue de haut [20].

Pour leurs essais, les auteurs ont utilisé cinq solutions de conductivités différentes et trois concentrations distinctes en Kaolin. Les propriétés des solutions polluantes utilisées sont données dans le tableau (I.8).

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

Tableau I.8 : Propriétés des solutions polluantes [20].

Dans les deux cas de pollution de la surface du modèle, l’acquisition des signaux du courant de fuite et de la charge électrique a été faite à travers un oscilloscope TEKTRONIX. La mesure du courant de fuite est faite par l’intermédiaire d’une résistance de 36Ω dans le cas de la pollution uniforme et 1kΩ dans le cas de la pollution non uniforme. La tension qui reflète l’image de la charge électrique est récupérée aux bornes d’une capacité de 20μF dans le cas de la pollution uniforme et 33μF dans le cas de la pollution non-uniforme.

Les résultats obtenus pour une concentration de 100g/l en Kaolin sont donnés dans les figures (I.44) et (I.45).

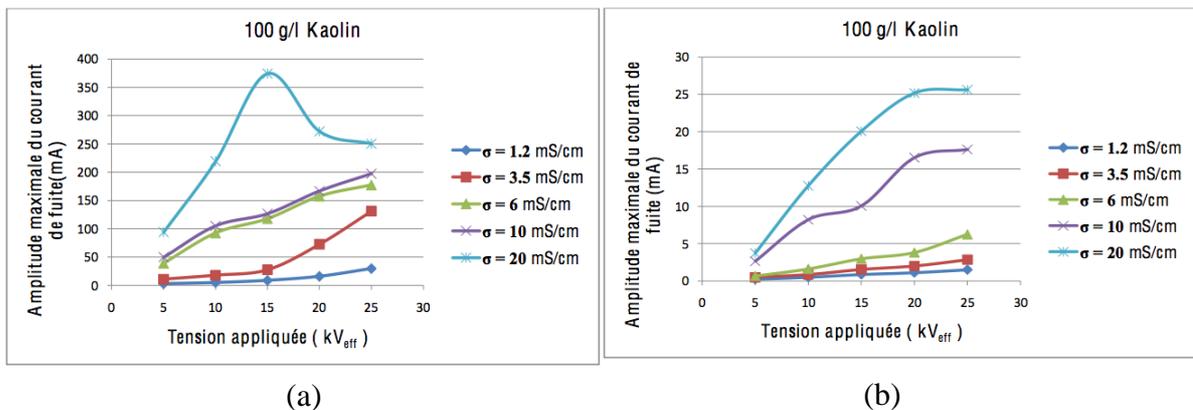


Figure I.44 : Amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée : (a) cas uniforme, (b) cas non uniforme [20].

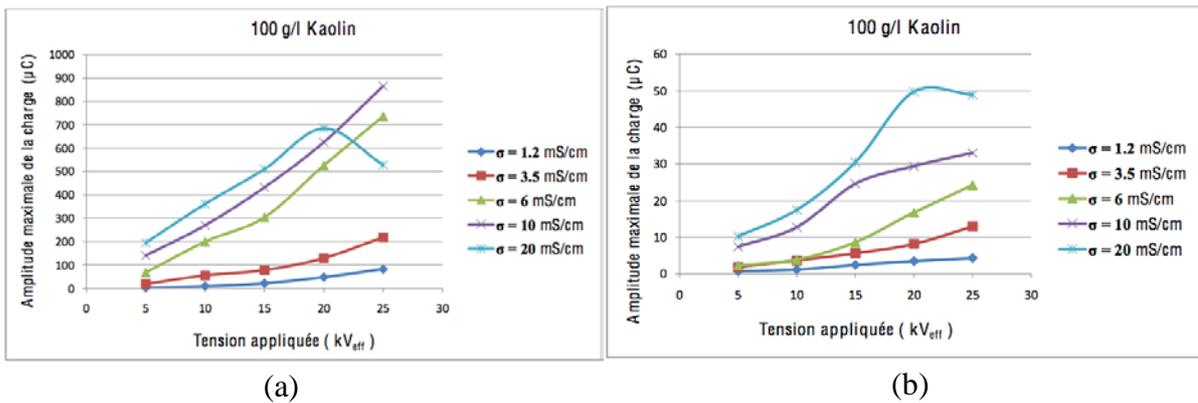


Figure I.45 : Valeur maximale de la charge électrique en fonction de la tension appliquée :
(a) cas uniforme, (b) cas non uniforme [20].

Les auteurs ont constaté à partir des figures (I.44.a) et (I.45.a), que dans le cas uniforme, le courant de fuite comme la charge électrique augmente en fonction de la tension appliquée de manière progressive pour les conductivités (1.2, 3.5, 6 et 10 mS/cm). Ils ont aussi expliqué la baisse de l'amplitude maximale du courant de fuite pour la conductivité 20 mS/cm 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. Ils ont observé également que les amplitudes du courant de fuite et de la charge électrique augmentent avec l'augmentation de la conductivité de l'agent polluant.

Dans le cas de la pollution non-uniforme, les auteurs ont constaté d'après les figures (I.44.b) et (I.45.b), que les amplitudes du courant de fuite et de la charge électrique augmentent en fonction de la tension appliquée de manière non-linéaire pour toutes les conductivités étudiées. Une augmentation de l'amplitude du courant de fuite et de la charge en fonction de la conductivité volumique de la pollution a été constatée. Cette augmentation est faible pour des niveaux faibles de la tension appliquée (inférieure à 15kV_{eff}). Cependant, pour des tensions supérieures à 15kV_{eff}, cette augmentation est remarquable car les décharges électriques court-circuitent les bandes sèches, ce qui induit une augmentation de l'amplitude du courant de fuite, et par conséquent celle de la charge électrique.

Cette étude a permis aux auteurs de conclure que :

- Les amplitudes du courant de fuite et de la charge électrique augmentent 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 discontinue, les amplitudes du courant de fuite et de la charge électrique sont plus faibles par rapport au cas continu (uniforme).
- Une forte activité des décharges parallèles contribue à la diminution des amplitudes du courant de fuite et de la charge électrique. Cette diminution est due à l'apparition de zones sèches sur la surface de l'isolateur. Cet assèchement est plus rapide pour la conductivité la plus élevée (20mS/cm).

I.12. Étude temporelle du courant de fuite des isolateurs de poste recouverts de glace :

F. Meghnefi [21] a montré que l'évolution de l'enveloppe du courant de fuite de l'isolateur standard de poste (figure (I.46)) présente deux périodes distinctes, numérotées respectivement 1 et 2. Pour des raisons de simplification, le temps de transition entre ces deux périodes est identifié par t_s , comme le montre la figure (I.47). Ainsi, il est possible de noter que la période 1 est caractérisée par une valeur du courant de fuite faible, inférieure à 1 mA, et quasi constante. La période 2, quant à elle, est caractérisée par une valeur du courant de fuite croissante au fur et à mesure que l'accumulation de glace progresse.

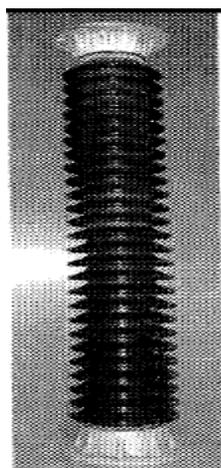


Figure I.46 : Isolateur standard de poste en porcelaine [21].

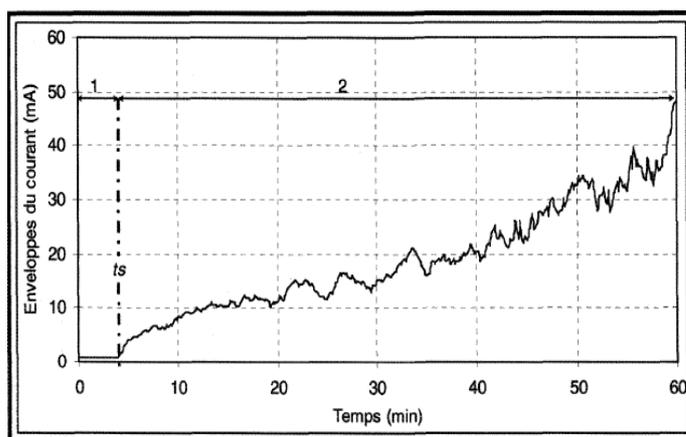


Figure I.47 : Enveloppe moyenne du courant de fuite de l'isolateur standard de poste pour une accumulation de 60 min [21].

L'auteur a remarqué qu'au cours de la période 2, lorsque l'espace entre les jupes devient de plus en plus obstrué par la glace, la résistance du dépôt de glace diminue. Cela est principalement dû à la formation du pont de glace qui crée un canal de plus en plus conducteur pour le courant de fuite à la surface de l'isolateur. Cela explique la tendance moyenne de l'enveloppe du courant de fuite qui augmente constamment avec l'augmentation de l'épaisseur du dépôt de glace. Les fluctuations de l'enveloppe du CF sont causées par le processus de croissance et de fonte des glaçons au niveau des intervalles d'air. La faible valeur du courant de fuite de période 1 est due à l'effet capacitif de l'isolateur combiné aux activités des décharges couronnes initiées aux extrémités des glaçons.

Un exemple de la forme d'onde du courant de fuite obtenue au cours de la période 1 est présenté à la Figure (I.48). La forme d'onde du courant de fuite, obtenue à un temps d'accumulation de 2,5 min, présente effectivement un déphasage d'environ 90° par rapport à la tension, ce qui démontre bien la dominance capacitive du courant. La forme de ceci est

quasi-alternative mais présente néanmoins quelques petites discontinuités qui sont en fait les pics relatifs aux décharges couronnes.

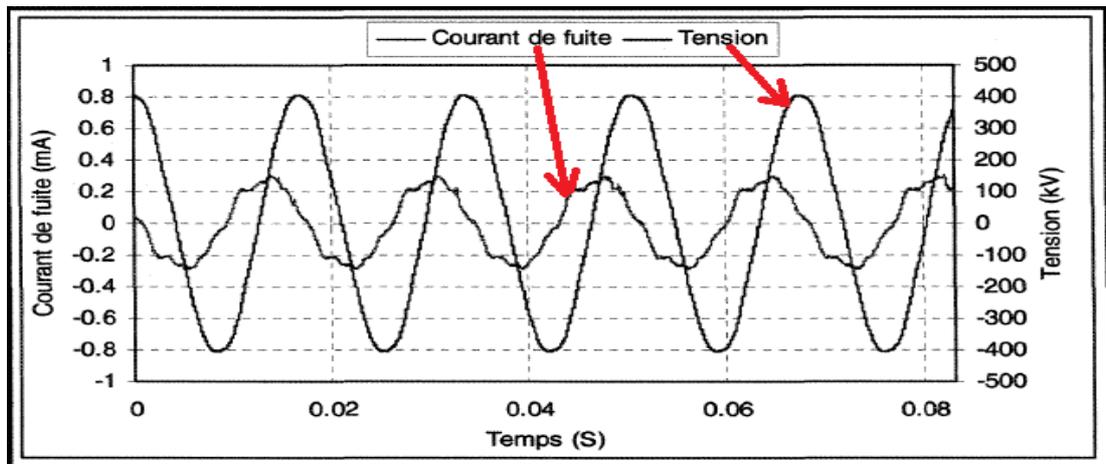


Figure I.48: Forme d'onde du courant de fuite pour l'isolateur standard de poste pendant la période 1 [21].

La forme d'onde du courant de fuite de la Figure (I.48), représentant un régime de décharges couronnes, demeure sensiblement identique jusqu'à l'apparition des premières décharges partielles (DP) visibles qui sont des arcs électriques partiels de couleur violette.

Ces décharges partielles visibles à l'extrémité des glaçons se caractérisent par des pics d'intensité élevée, d'une durée de quelques millisecondes et qui sont synchronisés avec la valeur crête de la tension appliquée, comme illustré à la Figure (I.49). Cette transition entre décharges couronnes et arcs partiels correspond en fait à la transition t_s identifiée sur la Figure (I.47). De plus, à partir des résultats de la Figure (I.49), il est possible d'observer que le courant de fuite est presque en phase avec la tension appliquée. Cela démontre ainsi que le CF peut librement circuler à la surface de l'isolateur. Cela est rendu possible de part la formation du pont de glace, la présence du film d'eau à la surface de l'isolateur ainsi que la présence des arcs électriques partiels le long des intervalles d'air dont la combinaison contribue à créer un canal conducteur à la surface du dépôt de glace et permettant ainsi au courant de fuite de s'écouler librement. Ainsi, la transition t_s marque le passage, pour le courant de fuite, d'un régime capacitif à un régime résistif qui peut aussi être observé visuellement par l'apparition des arcs électriques partiels.

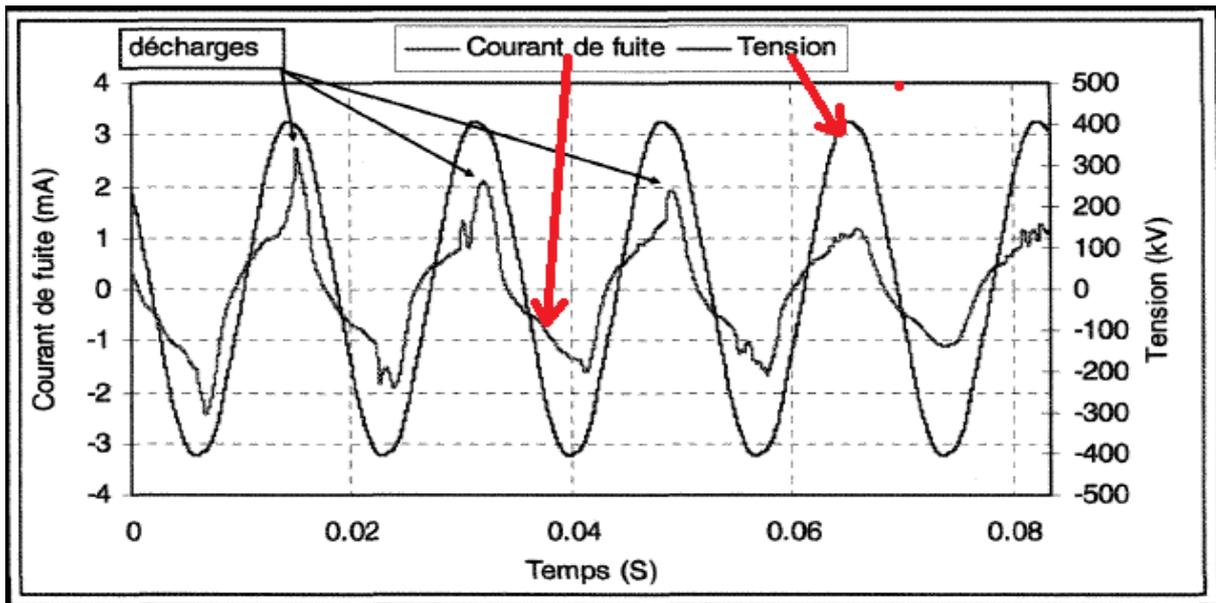


Figure I.49 : Forme d'onde du courant de fuite pendant la période de transition entre les périodes 1 et 2 à temps d'accumulation de 6 min [21].

La période 2 débute donc avec l'apparition des arcs électriques partiels de couleur violette due à la faible amplitude du courant de fuite. Ces arcs sont surtout visibles au niveau des électrodes où l'intensité du champ électrique est la plus élevée. Avec la formation du pont de glace et la diminution de la résistance surfacique due au dépôt de glace, les chutes de tension au niveau des intervalles d'air augmentent en conséquence. Les arcs électriques partiels ne sont plus intermittents, ils se rallument à chaque demi-période, ce qui explique la forme d'onde particulière du courant de fuite comme illustré à la Figure (I.50). On tombe alors dans un régime permanent d'arcs électriques au niveau des intervalles d'air. Le courant de fuite devient purement résistif avec un déphasage nul par rapport à la tension.

Lorsque l'amplitude du courant de fuite augmente avec l'augmentation de l'épaisseur du dépôt de glace, les arcs électriques partiels passent de la couleur violette à la couleur blanche. Au cours des différents tests, il a été observé que la transition arcs violets/arcs blancs survenait pour une amplitude d'environ 20 mA, confirmant la valeur avancée par Hara et Phan [21]. Le régime permanent d'arcs électriques demeure toujours mais avec des amplitudes du CF plus importantes, comme le montre la Figure (I.51).

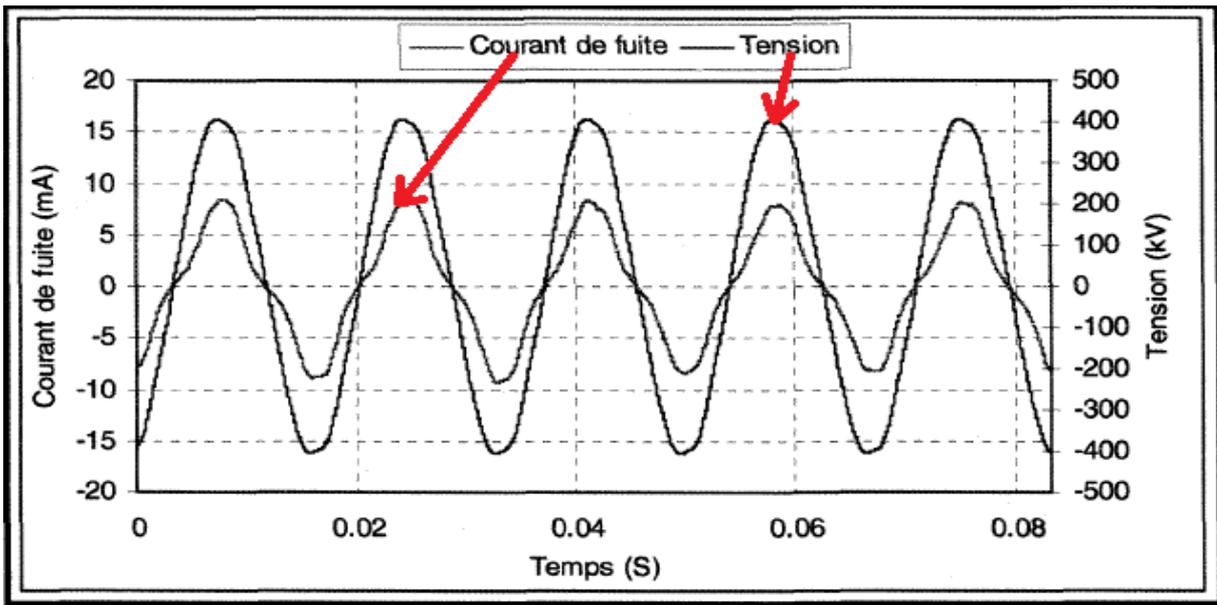


Figure I.50: Forme d'onde du courant de fuite pour l'isolateur standard de poste pendant la période 2 après un temps d'accumulation de 12 min [21].

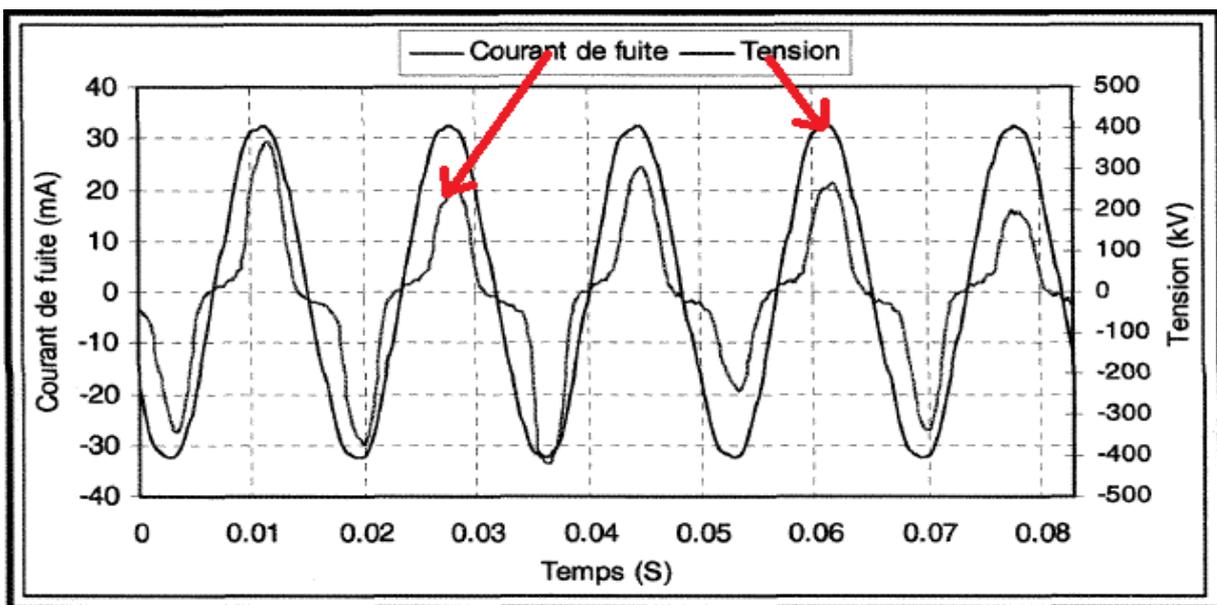


Figure I.51 : Forme d'onde du courant de fuite pour l'isolateur standard de poste pendant la période 2 après un temps d'accumulation de 55 min [21].

I.13. Conclusion :

La synthèse bibliographique des différents travaux antérieurs effectués dans le présent chapitre nous permet de comprendre d'une manière approfondie les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs sous pollution.

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 telles que les transformées en ondelettes et les modèles de prédiction développés à partir des résultats expérimentaux tels que LS – SVM et les réseaux de neurones artificiels. 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 :

Techniques

Expérimentales

II.1. Introduction :

Dans notre travail, nous avons étudié le comportement diélectrique d'une chaîne d'isolateurs réels U120B. Deux configurations de pollution ont été étudiées, uniforme et non uniforme. Les expériences se sont déroulées au laboratoire de haute tension de l'ENP.

Les essais effectués sous pollution uniforme et non uniforme nous ont permis de décrire l'évolution de la tension de contournement, de la tension d'apparition de la première décharge, du courant de fuite, ainsi que de la charge électrique, et ceci pour différentes natures de pollution et différentes conductivités volumiques des solutions polluantes.

II.2. Dispositif expérimental :

Le laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Polytechnique est muni d'une station d'essai à fréquence industrielle (50 Hz) de marque HEAFELY composée par les équipements suivants :

- Un transformateur d'essai : 500V/300kV, 50kVA, 50Hz.
- Un transformateur de réglage : 0/220V à 500V, 50kVA, 50Hz.
- Un diviseur de tension capacitif qui est relié au secondaire du transformateur d'essai pour réduire la tension aux bornes du voltmètre, situé près du pupitre de commande. Il est composé d'une capacité $C_1=400 \mu\text{F}$ et d'une capacité variable qui permet de régler 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 électriques en fonction de la tension appliquée et de l'état de surface de l'isolateur.
- Un ordinateur pour l'acquisition des données du courant de fuite qui traverse la surface de l'isolateur.

Le circuit d'essai ainsi que le dispositif expérimental sont donnés dans la figure (II.1).

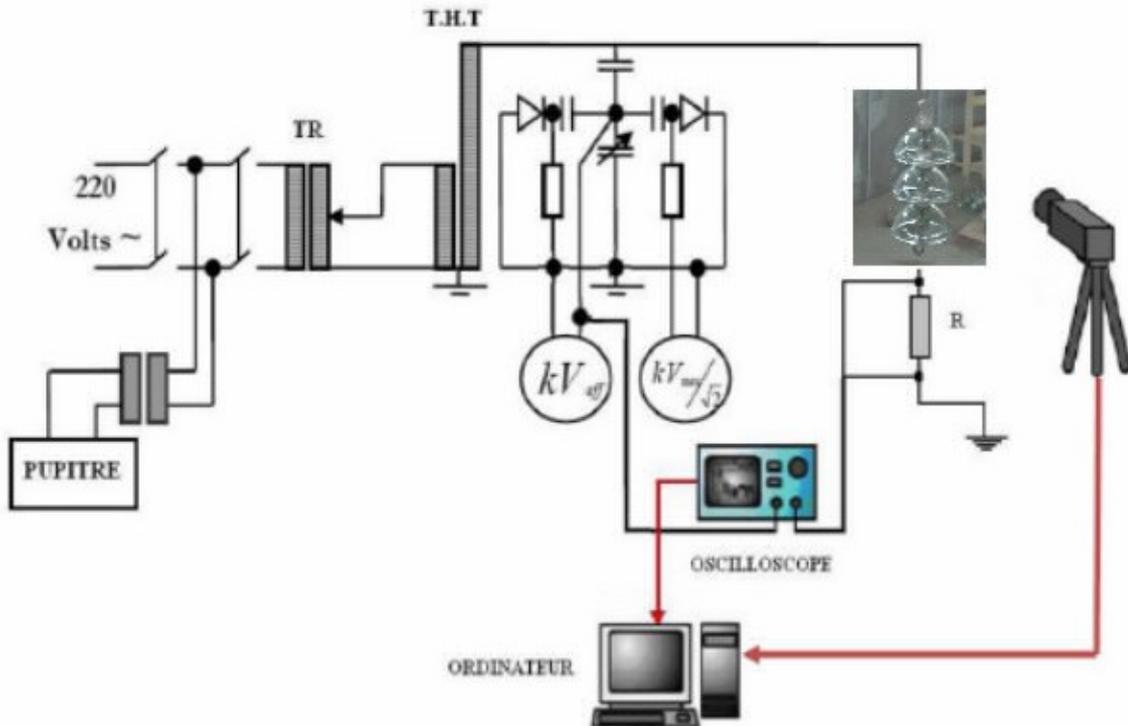


Figure II.1 : Circuit d'essai et dispositif expérimental.

II.3. Caractéristiques de l'objet d'essai :

Les essais sont effectués sur une chaîne composée de trois isolateurs réels. La chaîne est disposée verticalement à une hauteur de 150 cm du sol afin de limiter l'effet des capacités parasites qui peuvent altérer la mesure de la tension appliquée, du courant de fuite et de la charge électrique.

La chaîne d'isolateurs réels U120B sur laquelle les expériences ont été effectuées est montrée à la figure (II.2).



Figure II.2 : Chaîne d'isolateurs réels U120B étudiée.

Les principales caractéristiques de l'isolateur réel U120B sont données dans le tableau II.1.

Caractéristiques de l'isolateur	Grandeurs
Résistance mécanique	120 kN
Diamètre du disque	255 mm
Pas	146 mm
Ligne de fuite	300 mm
Tension tenue à fréquence industrielle à sec	60 kV
Tension tenue sous pluie	45 kV
Tension tenue au choc	95 kV
Poids net approx.	4,6 kg

Tableau II.1 : Principales caractéristiques de l'isolateur réel U120B [22].

II.4. Le nettoyage des isolateurs réels étudiés :

Le nettoyage de la chaîne d'isolateurs a été effectué pour chaque essai. En premier lieu, l'eau du robinet est utilisée pour éliminer le maximum d'impuretés. Puis l'isolateur est séché avec des serviettes en coton. Un deuxième nettoyage est effectué à l'aide d'un bout de coton imbibé d'alcool chirurgical à 70° afin d'assurer une propreté quasi-totale de l'isolateur. Cette méthode de nettoyage est adoptée pour les deux cas de pollution, uniforme et non-uniforme.

II.5. Préparation des solutions :

Les solutions polluantes sont composées de 100 g de Kaolin ou de Kieselguhr dilué dans un litre d'eau distillée, et auxquelles nous avons ajouté différentes quantités de chlorure de sodium NaCl.

Dans notre travail, nous avons étudié le comportement diélectrique de la chaîne d'isolateurs en fonction des mêmes concentrations en chlorure de sodium des différentes solutions, et cela pour voir l'influence de la nature de la pollution sur le comportement de l'isolateur. Les quantités de NaCl rajoutées sont 5, 10, 20, 30 et 40 g et ont été pesées au laboratoire du département du Génie Minier, à l'aide d'une balance dont la précision est de 10^{-4} g. Les conductivités volumiques des solutions polluantes ont été mesurées au département du Génie de l'Environnement en utilisant un conductimètre. Les propriétés des solutions polluantes étudiées sont données dans le tableau II.2.

	1 litre H ₂ O + NaCl	1 litre H ₂ O + NaCl + 100g Kaolin	1 litre H ₂ O + NaCl + 100g Kieselguhr
Concentrations en NaCl [g/l]	Conductivités volumiques à 20°C [mS/cm]	Conductivités volumiques à 20°C [mS/cm]	Conductivités volumiques à 20°C [mS/cm]
5	3.3	2.6	5.8
10	5.9	4.9	9.5
20	14.7	8.5	19.8
30	19.6	15.8	27
40	20.6	19.6	32.5

Tableau II.2 : Propriétés des solutions polluantes étudiées.

II.6. Méthode d'application de la pollution :

La couche de pollution est déposée sur la surface isolante de l'isolateur réel par le procédé de pollution liquide pré-déposée. Pour cela nous avons utilisé un pinceau de largeur égale à 8 cm afin que la couche de pollution soit déposée le plus uniformément possible sur la surface isolante de l'isolateur.

Pour simuler la configuration uniforme de la pollution, nous utilisons le pinceau pour pré-déposer la couche de pollution de la manière la plus uniforme possible sur la surface isolante de l'isolateur et cela afin de reproduire les mêmes conditions initiales.

Afin de simuler le phénomène d'auto lavage (par la pluie et le vent) de l'isolateur réel, nous avons utilisé le pinceau pour pré-déposer une couche de pollution sur la surface interne de l'isolateur seulement. La surface externe est laissée propre. La figure (II.3) illustre la méthode d'application de la pollution non-uniforme.



Figure II.2 : Méthode d'application de la pollution non-uniforme.

II.7. Mesure de la tension de contournement :

Dans un premier temps, nous avons effectué la mesure des tensions de contournement pour les différentes natures de pollutions et différentes concentrations en chlorure de sodium pour les deux configurations de pollutions, uniforme et non uniforme. Ces mesures ont été effectuées afin d'avoir une idée sur les différents phénomènes précédant la phase de

contournement, ainsi que sur l'évolution des décharges sur la surface de l'isolateur, mais aussi pour déterminer les différents paliers de tension à appliquer lors de la mesure du courant de fuite et de la charge électrique.

II.8. Mesure du courant de fuite :

Pour les différentes configurations de pollution de la surface de l'isolateur, la mesure du courant de fuite a été faite grâce à un oscilloscope TEKTRONIX, et cela en récupérant le signal de la tension aux bornes d'une résistance insérée en série entre l'objet d'essai et le retour de la terre. Le signal de la tension aux bornes de la résistance représente l'image du courant qui la traverse, et donc du courant de fuite.

Dans le cas de la pollution uniforme, la valeur de la résistance a été fixée à $R=100 \Omega$ afin d'éviter que la valeur crête du signal obtenu ne dépasse la valeur maximale du calibre le plus important de l'oscilloscope. Cependant, dans le cas de la pollution non-uniforme, et afin de limiter l'effet des parasites qui altèrent la qualité du signal du courant de fuite, une résistance de valeur $R=1 \text{ k}\Omega$ est choisie.

Un câble coaxial connecté à l'oscilloscope est utilisé pour récupérer le signal du courant de fuite. La fréquence d'échantillonnage est fixée à 100 kHz pour les deux cas de pollution, uniforme et non uniforme, ce choix permet d'avoir une vision plus large des ondes du courant de fuite.

II.9. Mesure de la charge électrique :

Pour les deux cas de pollutions, uniforme et non-uniforme, de la surface de l'isolateur, la mesure de la charge électrique a été faite en utilisant l'oscilloscope TEKTRONIX. Nous avons utilisé le même circuit d'essai qui a été adopté pour la mesure du courant de fuite, sauf que pour la mesure de la charge électrique, la résistance est remplacée par une capacité de 20 μF pour la pollution uniforme et une capacité de 0.5 μF pour la pollution non-uniforme.

La tension aux bornes de la capacité, qui reflète l'image de la charge électrique, est récupérée via un câble coaxial sur l'oscilloscope qui est relié à un ordinateur par un câble réseau.

II.10. Conclusion :

Afin de nous rapprocher au maximum des conditions réelles, nos essais sont effectués sur une chaîne d'isolateurs réels U120B. Ces isolateurs sont utilisés en bord de mer, car leur forme sphérique facilite remarquablement le phénomène de nettoyage naturel par la pluie et le vent. Ce phénomène, nous l'avons simulé au laboratoire lors de l'application de la pollution seulement sur la surface interne de l'isolateur.

En plus de l'étude de la pollution marine simulée par la présence du NaCl seulement dans les solutions polluantes, et dans le but d'étudier le comportement diélectrique des

isolateurs de lignes fonctionnant dans les zones industrielles, nous avons utilisé deux natures de pollutions mixtes, l'une à base de Kaolin et l'autre à base de kieselguhr.

Dans le but d'étudier le comportement de la chaîne d'isolateurs en fonction de la concentration en sel, différentes quantités de chlorure de sodium ont été utilisées pour préparer les solutions polluantes, et cela pour les trois natures de pollution étudiées. Les quantités de chlorure de sodium utilisées ont été choisies de façon à parcourir les conductivités volumiques données dans la norme CEI 60-1 [23].

Chapitre III :
Résultats
expérimentaux
Et Discussions

III.1. Introduction :

Dans cette partie expérimentale concernant l'étude du comportement diélectrique de la chaîne composée de trois isolateurs réels U120B, nous proposons dans un premier temps de mesurer la tension de contournement et la tension d'apparition de la première décharge pour les différentes natures de pollutions, les différentes concentrations en chlorure de sodium, et cela dans les deux cas de pollution, uniforme et non-uniforme.

En deuxième lieu, nous nous intéressons à l'évolution du courant de fuite qui est un paramètre essentiel pour la prédiction de la sévérité de pollution, et donc de l'état de surface de l'isolateur. Pour les deux configurations de la distribution de la pollution, nous étudions la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour les différentes natures de pollution et les différentes concentrations en NaCl.

En dernier lieu, nous étudions la charge électrique qui est l'un des paramètres important pour connaître la quantité d'énergie dissipée au niveau de la chaîne d'isolateurs. Pour les deux cas de pollution étudiés, nous mesurons la variation de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour les différentes natures de pollutions et les différentes concentrations en NaCl.

III.2. Tensions de contournements :

La tension de contournement est un paramètre essentiel pour l'isolateur, elle permet de définir la rigidité diélectrique du système. Dans notre cas, nous devons parfaitement connaître la rigidité diélectrique du système pour déterminer les paliers de tensions utilisés lors de la mesure du courant de fuite ainsi que la charge électrique sans qu'il y ait contournement et cela dans le but de protéger les appareils de mesures, en particulier l'oscilloscope. Pour chaque cas, nous effectuons cinq fois la même mesure de la tension de contournement, et nous calculons les valeurs moyennes des résultats obtenus.

III.2.1. Tension de contournement pour le cas uniforme :

Dans cette partie, nous analysons l'influence de la concentration en chlorure de sodium, dans le cas d'une pollution uniformément appliquée, sur la tension de contournement de la chaîne d'isolateurs réels U120B, et cela pour les trois natures de pollution utilisées. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (III.1).

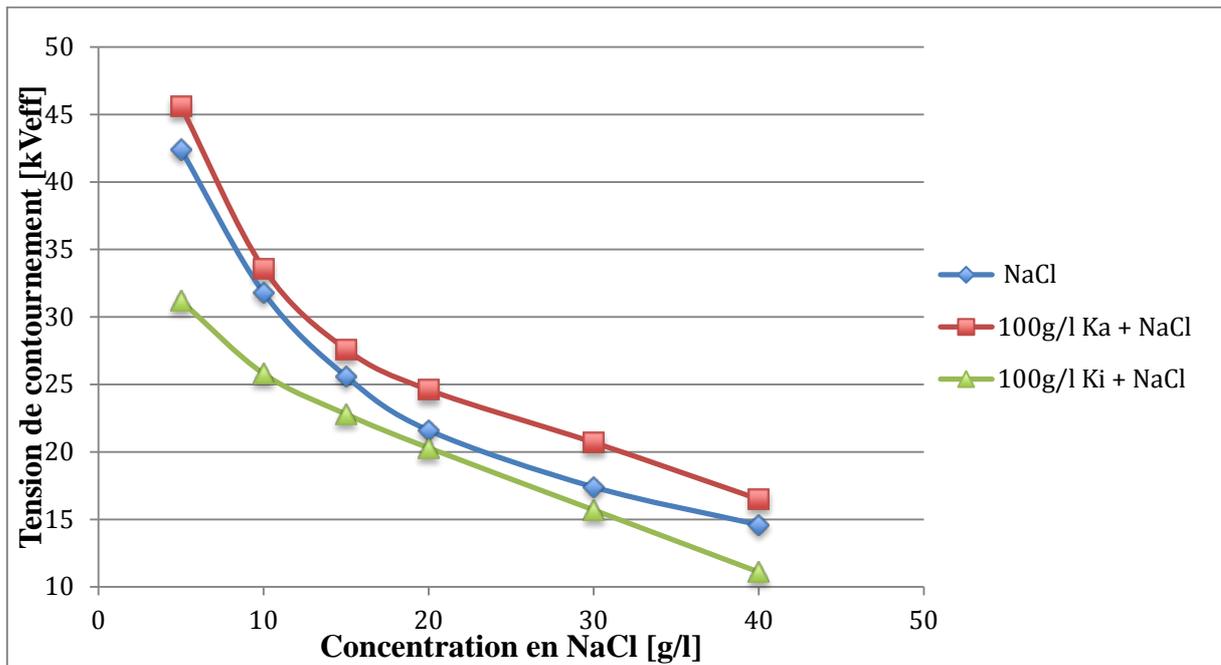


Figure III.1 : Influence de la concentration en NaCl sur la tension de contournement pour les trois natures de pollution étudiées. Cas d'une pollution uniforme.

D'après la figure (III.1), nous remarquons que dans le cas d'une pollution uniforme, la tension de contournement diminue d'une manière non-linéaire avec l'augmentation de la concentration en NaCl, et cela pour les deux natures de pollution, marine et mixte contenant 100 g/l de Kaolin. Par contre, pour la nature de pollution mixte contenant 100 g/l de Kieselguhr, la rigidité diélectrique du système diminue en fonction de la concentration en NaCl, mais cette diminution a tendance à être linéaire particulièrement pour des concentrations variant entre 10 g/l et 40 g/l.

Nous avons aussi constaté à partir de la figure (III.1) que dans le cas où la pollution est uniformément répartie sur la surface de l'isolateur, la pollution la plus sévère est la pollution mixte contenant 100 g/l de Kieselguhr. En effet, les tensions de contournement obtenues, pour les mêmes concentrations en chlorure de sodium, lors de l'application de cette nature de pollution sont plus basses que celles mesurées pour les deux autres natures de pollutions. Par contre, la présence de 100 g/l de kaolin dans les solutions polluantes a pour effet d'augmenter la rigidité diélectrique du système. Le point précédent peut être expliqué par la variation de la conductivité en fonction de la nature de pollution. Effectivement, pour les mêmes concentrations en NaCl, l'ajout de 100 g/l de Kieselguhr a pour effet l'augmentation des conductivités volumiques. Par ailleurs, l'ajout de 100 g/l de Kaolin contribue à la diminution des conductivités volumiques.

Malgré la difficulté de l'observation de l'évolution des décharges électriques présentes avant le contournement à cause de la forme géométrique des isolateurs réels, ce travail nous a aussi permis de constater que, dans le cas de la pollution uniforme, le phénomène de contournement se fait sur plusieurs étapes. Nous remarquons d'abord l'apparition de

décharges électriques entre le verre et les parties métalliques, qui sont les capots et les tiges des différents isolateurs composant la chaîne (Figure III.2.a). Ce phénomène est accompagné par un bruit qui croît de manière conséquente avec l'augmentation de la tension appliquée jusqu'au contournement de l'isolateur. Ce bruit est généralement attribué à l'effet de couronne qui est une phase initiale du contournement. Les décharges ont tendance à s'allonger le long de la surface de chaque isolateur causant ainsi une évaporation progressive de la couche de pollution due à la chaleur dégagée par effet Joule. Cette évaporation cause une augmentation de l'intensité du champ électrique qui atteint la valeur critique dans les contours secs et court-circuite les micro-capacités formées par ces zones sèches, ce qui engendre l'apparition d'arcs électriques à travers ces bandes sèches (Figure III.2.b). Ce phénomène se poursuit et la longueur des décharges augmente (Figure III.2.c) jusqu'au contournement final (Figure III.2.d).

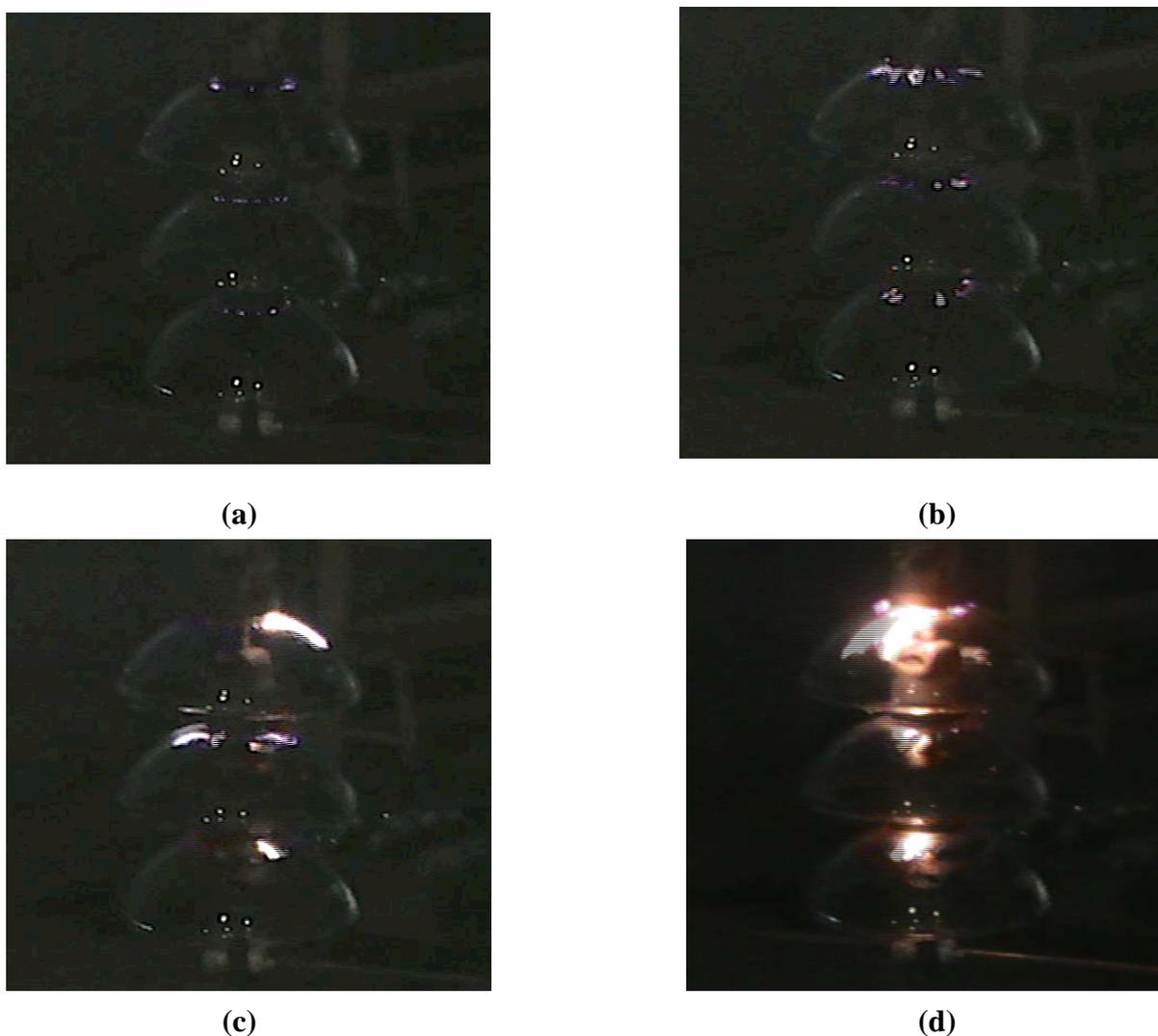


Figure III.2 : Comportement de la chaîne d'isolateur dans le cas d'une pollution uniforme (5 g/l NaCl) : (a) niveau de tension 11kV_{eff} ; (b) niveau de tension 20kV_{eff} ; (c) niveau de tension 35kV_{eff} ; (d) tension du contournement 42kV_{eff} .

III.2.2. Tension de contournement pour le cas non-uniforme :

Dans le cas de la pollution non-uniforme, nous mesurons la tension de contournement de l'isolateur réel.

Les résultats obtenus pour les trois natures étudiées sont donnés à la figure (III.3).

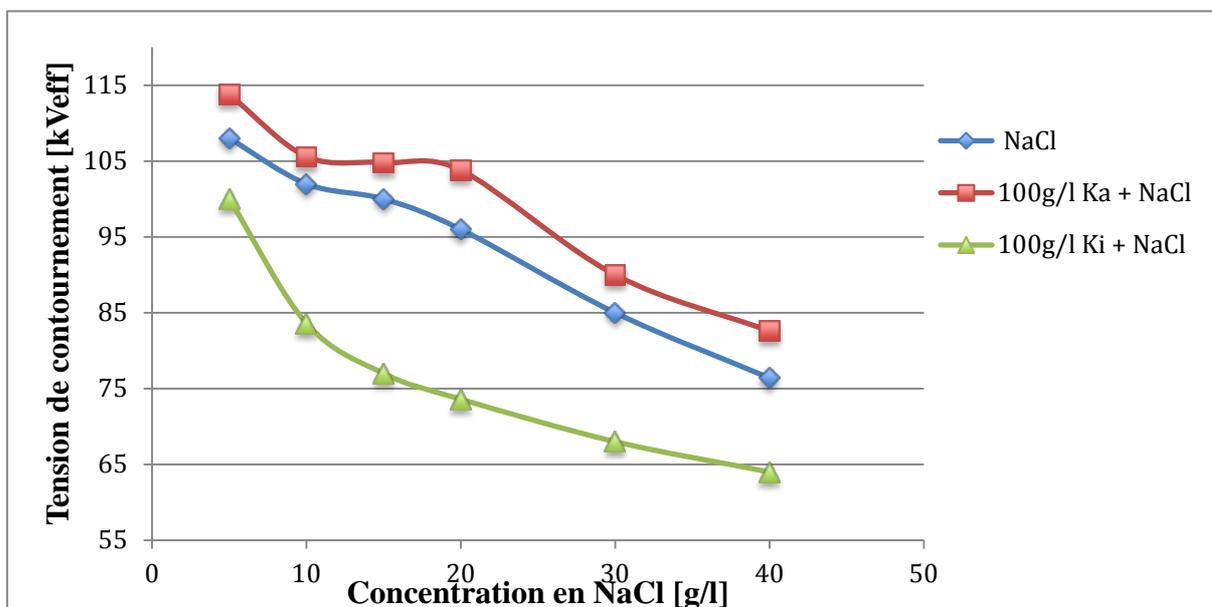


Figure III.3 : Influence de la concentration en NaCl sur la tension de contournement pour la pollution non uniforme.

Nous remarquons d'après la Figure (III.3) que la tension de contournement varie d'une manière non linéaire et inversement proportionnelle avec la concentration en chlorure de sodium (conductivité volumique). La tension de contournement de la pollution mixte à base de l'eau salée et du Kaolin est plus importante par rapport aux deux autres natures. Cependant, les tensions de contournement mesurées lors de l'application des solutions polluantes constituées d'eau salée et d'une concentration de 100 g/l en kieselguhr sont les moins importantes.

Nous avons constaté que la présence d'une quantité de Kaolin dans une solution salée diminue la conductivité volumique de cette solution, d'où l'augmentation de la rigidité diélectrique du système étudié. Toutefois, la présence d'une concentration en kieselguhr de 100 g/l a pour effet l'augmentation de la conductivité volumique et donc la diminution de la rigidité diélectrique de l'isolateur.

Nous remarquons aussi l'apparition de décharges dans la zone polluée. Ces décharges se développent du côté terre vers le côté haute tension (Figure III.4.a, b, c) 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 III.4.d, e). Ceci est valable pour les trois natures de pollution étudiées et pour différentes concentrations en sel.

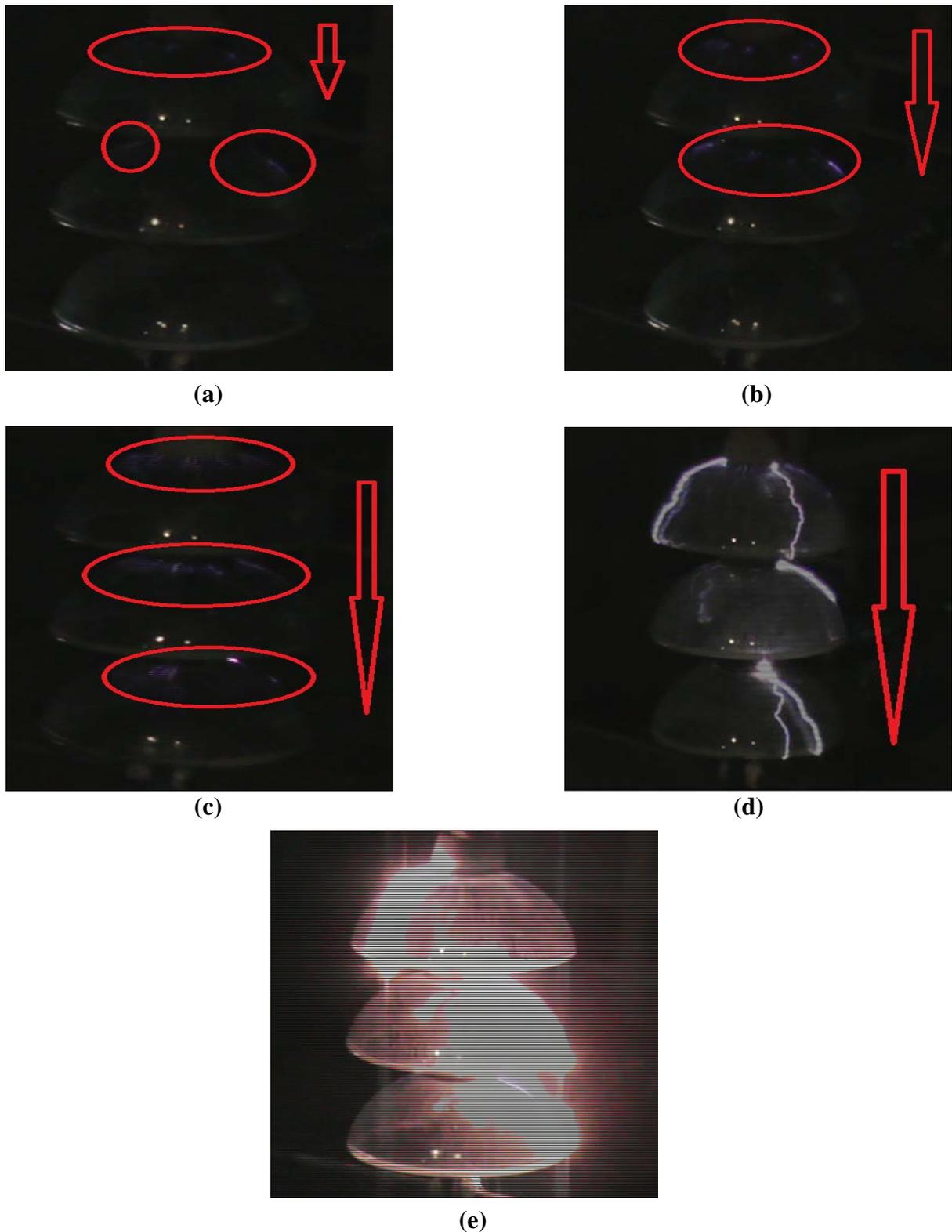


Figure III.4 : Comportement du modèle réel dans le cas d'une pollution mixte non uniformément répartie pour une concentration de 100g/l en Kieselguhr et de 40g/l en NaCl ($\sigma=32.5$ mS/cm) : (a) niveau de tension 45 kV_{eff} ; (b) niveau de tension 50 kV_{eff} ; (c) niveau de tension 60 kV_{eff} ; (d) niveau de tension 64 kV_{eff} ; (e) saut final à 64 kV_{eff} .

III.2.3. 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 nature de la pollution.
- La concentration en sel.

Cette étude nous a aussi permis de conclure que, pour les deux configurations de pollutions étudiées, la nature de pollution la plus sévère est la pollution mixte contenant une concentration de 100 g/l en Kieselguhr.

Nous avons aussi constaté que comparé à la pollution marine, la présence d'une concentration de 100 g/l en Kaolin dans une solution possédant une concentration en NaCl donnée, contribue à l'augmentation de la tension de contournement donc de la rigidité diélectrique du système, et cela pour les deux configurations de pollution, uniforme et non-uniforme.

III.3. Courant de fuite :

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'évolution du courant de fuite en fonction des différents paramètres suivants : concentration en sel, niveau de la tension appliquée, nature de l'agent polluant, configuration de la pollution. En effet, le courant de fuite est un paramètre essentiel pour la prédiction de la sévérité de la pollution, et donc de l'état de surface de l'isolateur.

Les tensions de contournement mesurées précédemment nous ont servi à fixer le niveau maximal de la tension à appliquer lors de la mesure du courant de fuite en évitant tout risque de contournement. Pour les concentrations en NaCl de 40 g/l où les niveaux des tensions de contournement sont faibles et de l'ordre de 15 kV_{eff}, nous avons jugé utile de ne pas étudier, dans ce cas, l'évolution du courant de fuite. Pour les deux premières natures de pollution, qui sont la pollution marine et la pollution mixte contenant 100 g/l de Kaolin, et dans le but de bien étudier l'évolution du courant de fuite, nous nous sommes proposés de fixer la valeur maximale de la tension appliquée à 70% de la tension de contournement la plus basse, cette dernière correspond à une pollution marine dont la concentration en NaCl est égale à 30 g/l. Nous avons relevé le courant de fuite à l'aide d'un oscilloscope pour cinq niveaux de tension inférieurs à cette tension maximale. Ces cinq niveaux de tensions sont égaux à : 3, 6, 9, 12 et 15 kV_{eff}. En tenant compte du fait que la rigidité diélectrique du système diminue considérablement lors de l'application de la pollution mixte avec une concentration en Kieselguhr de 100 g/l, nous fixons la valeur maximale de la tension appliquée à 70% de la tension de contournement la plus basse pour cette nature de pollution. Les cinq paliers de tension pour lesquels nous avons relevé les courants de fuite sont 3, 6, 9, 11 et 13 kV_{eff}. Chaque point expérimental représente une moyenne de cinq essais.

III.3.1. Résultats obtenus sous pollution uniforme :

Dans le cas où la pollution est uniformément répartie sur la surface de l'isolateur, nous mesurons l'amplitude maximale du courant de fuite à l'aide de l'oscilloscope pour les différentes concentrations en chlorure de sodium, pour les différents paliers de la tension appliquée et pour chacune des trois natures de pollution étudiées. Les résultats des essais sont représentés sur les figures (III.5.1) à (III.5.3).

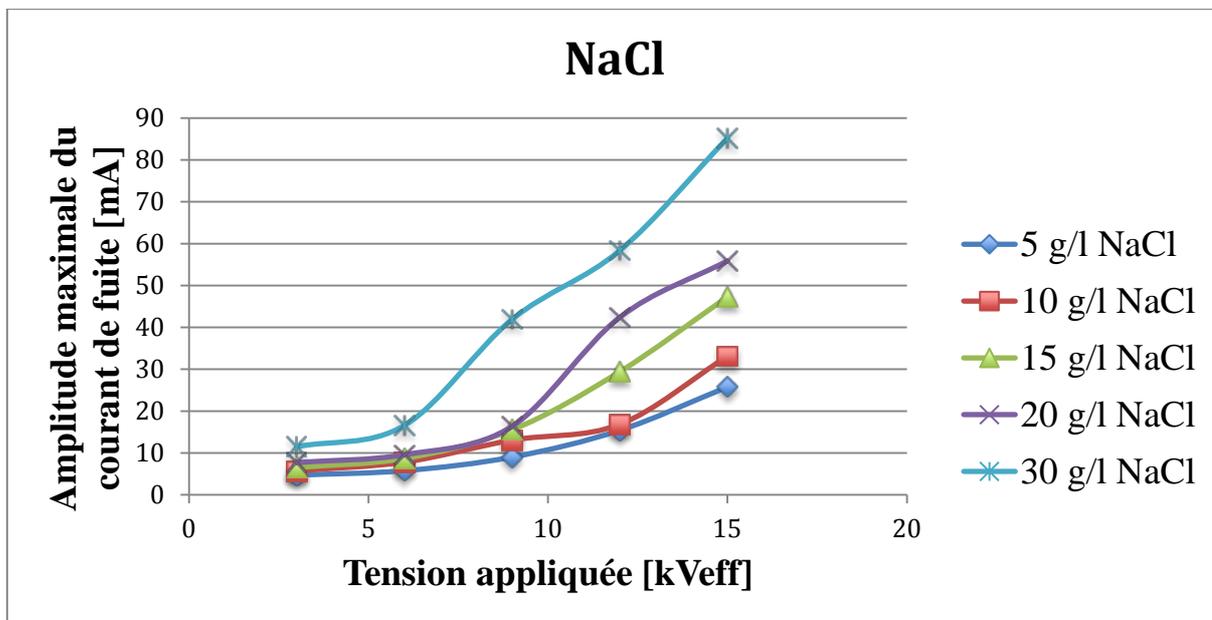


Figure III.5.1 : Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl. Cas de la pollution uniforme.

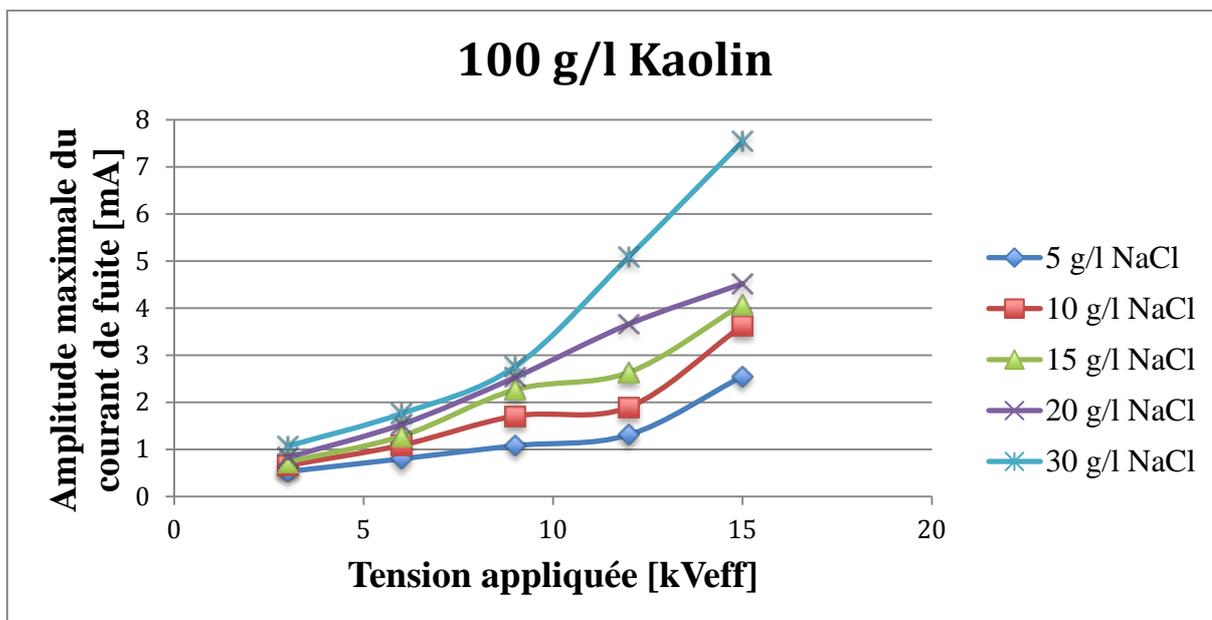


Figure III.5.2 : Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration de 100 g/l en Kaolin. Cas de la pollution uniforme.

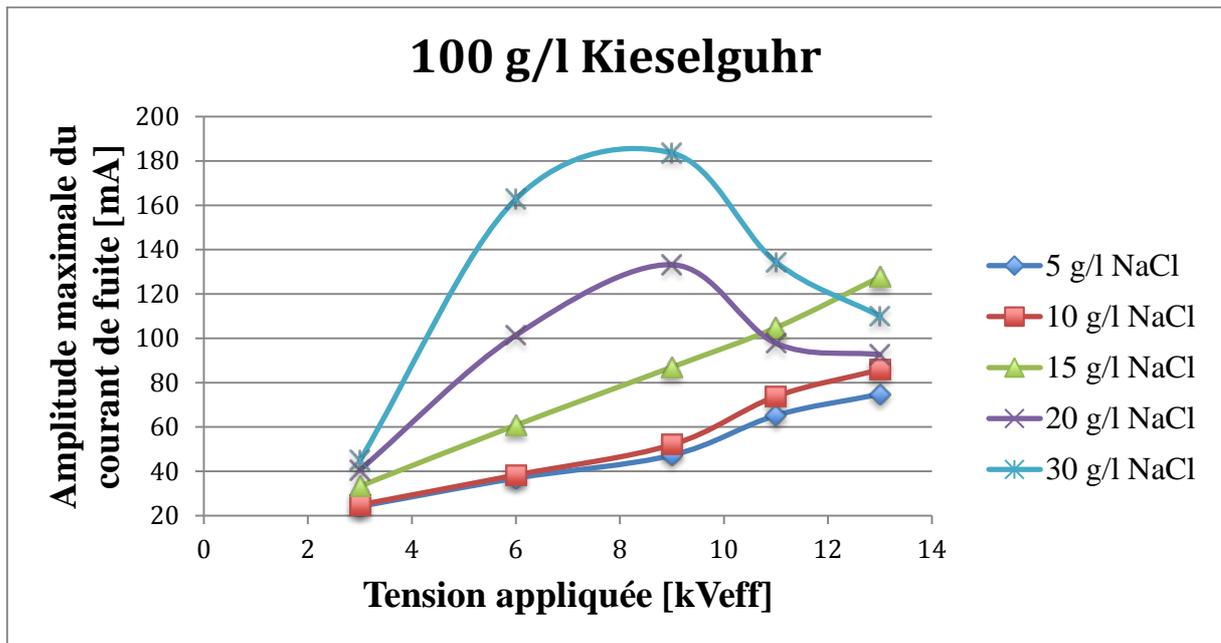


Figure III.5.3 : Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration de 100 g/l en Kieselguhr. Cas de la pollution uniforme.

D'après la figure (III.5.1), nous remarquons que l'amplitude maximale du courant de fuite augmente d'une manière non-linéaire avec l'augmentation de la tension appliquée, et cela pour les différentes concentrations en NaCl. Nous constatons aussi que malgré la présence de décharges électriques à partir de 5kV_{eff}, l'amplitude du courant continue à augmenter car ces décharges ne provoquent pas un assèchement important de la couche polluante à la surface de l'isolateur.

Pour le cas de la pollution mixte avec une concentration en Kaolin de 100 g/l, nous remarquons à partir de la figure (III.5.2) que l'amplitude maximale du courant de fuite, comme pour le cas de la pollution marine, augmente d'une manière non-linéaire en fonction de la tension appliquée. Cette augmentation a lieu d'une manière progressive car les temps d'application de la tension sont relativement courts, et par conséquent il n'y a pas eu formation de zones sèches malgré l'apparition de décharges non localisées à la surface de l'isolateur à partir de 9 kV_{eff}.

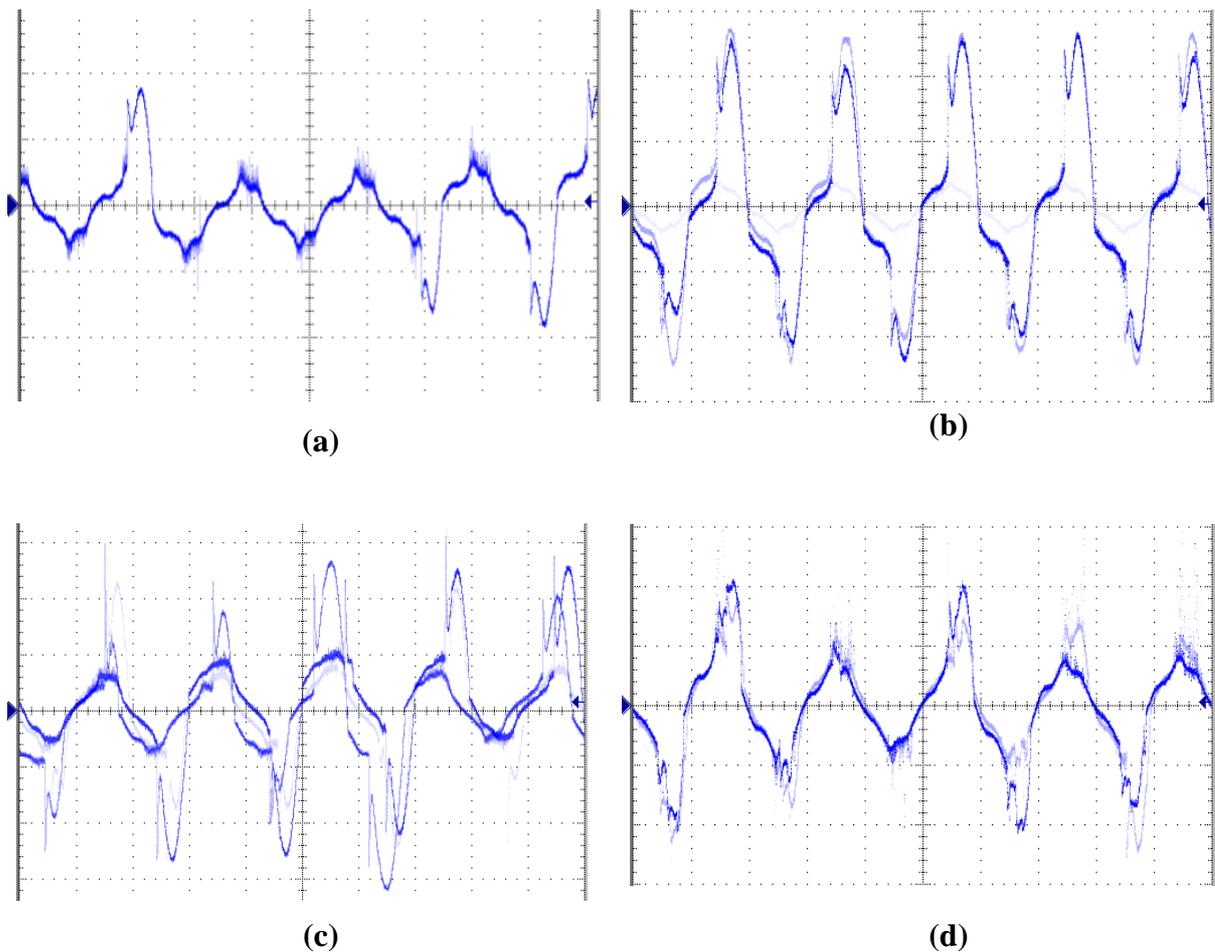
D'après les résultats représentés sur la figure (III.5.3), nous constatons que, lors de l'application d'une couche uniforme de la pollution mixte avec une concentration en Kieselguhr de 100 g/l, l'amplitude maximale du courant de fuite augmente d'une manière progressive pour les faibles concentrations en NaCl (5 g/l et 10 g/l). Toutefois, pour des concentrations en NaCl plus importante (20 g/l et 30 g/l), l'évolution du courant de fuite diffère de celle observée précédemment. En effet, pour les fortes concentrations en NaCl et pour des niveaux de tension allant jusqu'à 9 kV_{eff}, l'amplitude maximale du courant de fuite augmente en fonction de la tension appliquée, mais à partir de 9 kV_{eff} nous constatons une

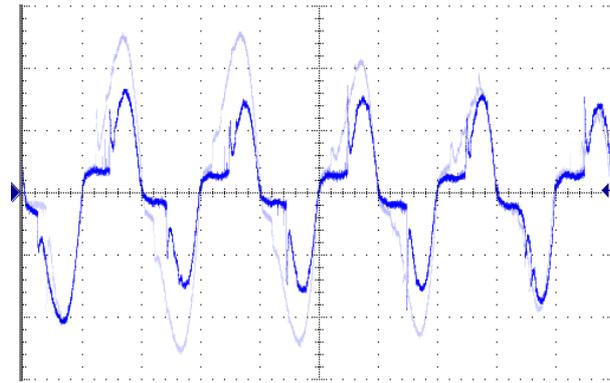
baisse de l'amplitude maximale du courant de fuite malgré l'augmentation de la tension appliquée. Cette baisse peut être expliquée par le temps d'application de la tension pendant lequel l'eau présente à la surface se vaporise petit à petit par effet joule menant à une augmentation de l'impédance équivalente 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. Nous avons aussi remarqué pour cette nature de pollution, un assèchement beaucoup plus important de la couche polluante sur la surface du verre, surtout à proximité des parties métalliques (le capot et la tige) de chaque isolateur.

III.3.2. Visualisation des signaux du courant de fuite dans le cas de la pollution uniforme :

Les formes d'ondes du courant de fuite dans le cas de la pollution uniforme sont montrées pour les trois natures de pollutions étudiées et les différentes concentrations en chlorure de sodium pour un niveau de tension de $9 \text{ kV}_{\text{eff}}$.

a. Les formes d'ondes du signal du courant de fuite pour la pollution marine :





(e)

Figure III.6 : Représentation des signaux du courant de fuite dans le cas de la pollution marine pour les différentes concentrations en NaCl et un niveau de la tension appliquée de $9 \text{ kV}_{\text{eff}}$.

(a) : 5 g/l ; (b) : 10 g/l ; (c) : 15 g/l ; (d) : 20 g/l ; (e) : 30 g/l.

b. Les formes d'ondes du signal du courant de fuite pour la pollution mixte avec une concentration en Kaolin de 100 g/l :

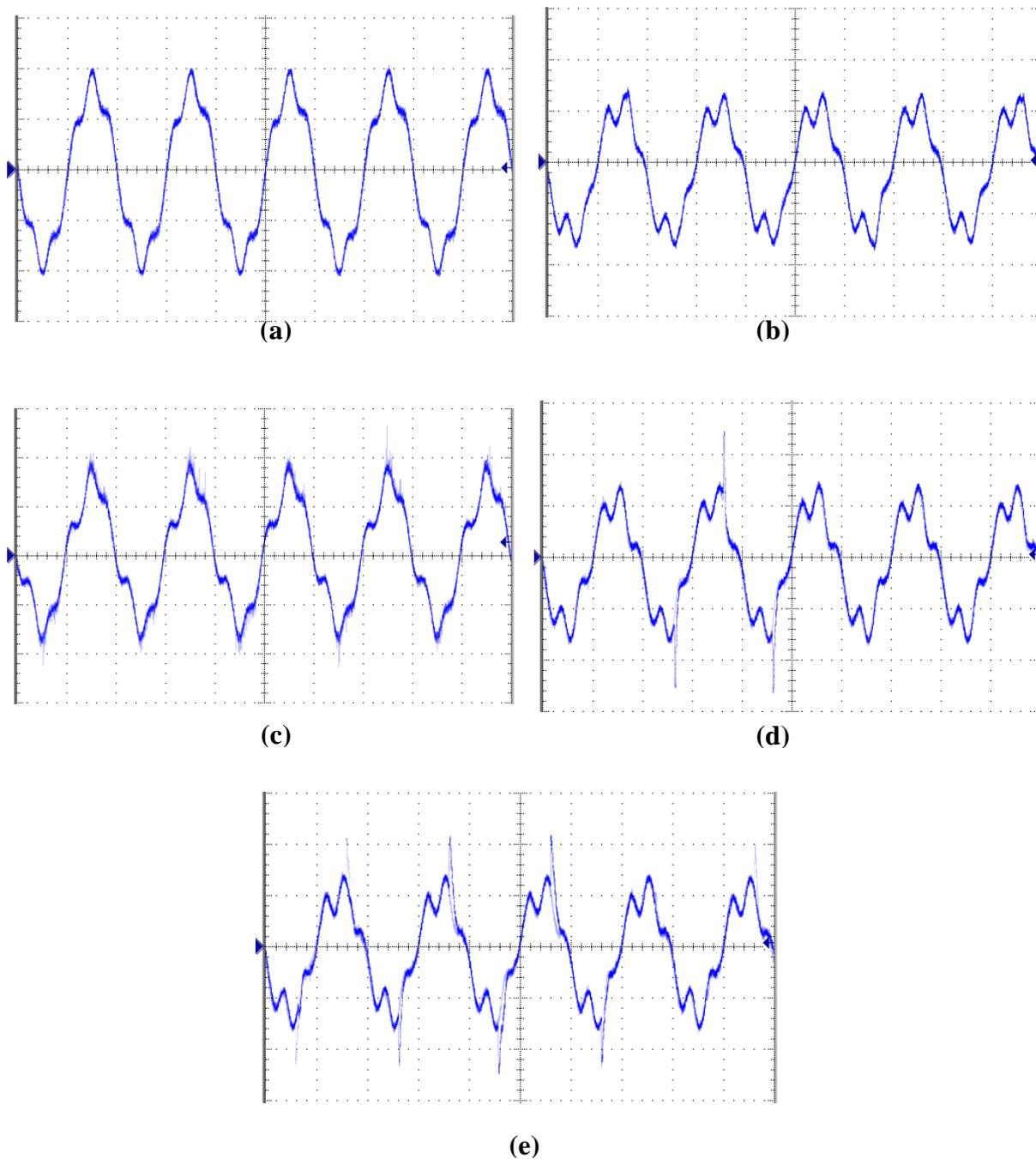


Figure III.7 : Représentation des signaux du courant de fuite dans le cas de la pollution uniforme avec une concentration en Kaolin de 100 g/l et différentes concentrations en NaCl, pour un niveau de la tension appliquée de 9 kV_{eff}.

(a) : 5 g/l ; (b) : 10 g/l ; (c) : 15 g/l ; (d) : 20 g/l ; (e) : 30 g/l.

c. Les formes d'ondes du signal du courant de fuite pour la pollution mixte avec une concentration en Kieselguhr de 100 g/l :

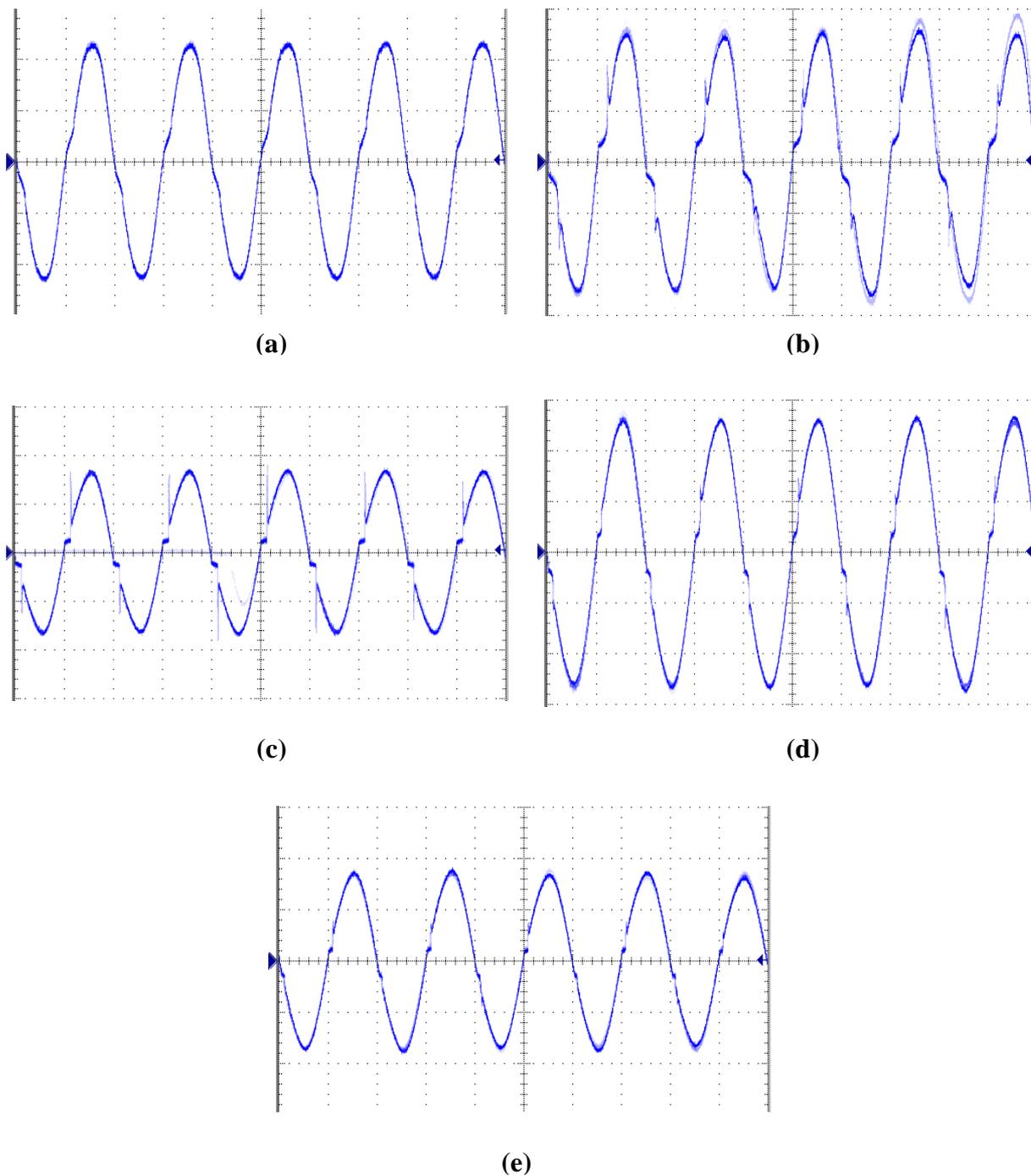


Figure III.8 : Représentation des signaux du courant de fuite dans le cas de la pollution uniforme avec une concentration en Kieselguhr de 100 g/l et différentes concentrations en NaCl, pour un niveau de la tension appliquée de 9 kV_{eff}.

(a) : 5 g/l; (b) : 10 g/l; (c) : 15 g/l; (d) : 20 g/l; (e) : 30 g/l.

Il apparaît clairement à partir des figures (III.6), (III.7) et (III.8) que les formes d'ondes du signal du courant de fuite diffèrent d'une nature de pollution à une autre. En plus de cela, nous constatons une importante déformation de l'onde du signal du courant de fuite lors de l'application de la pollution marine (figure III.6). Ces déformations sont dues à l'importante activité des décharges électriques à la surface de l'isolateur. Nous avons aussi remarqué que l'augmentation de la concentration en NaCl engendre une déformation plus importante de la forme d'onde du signal du courant de fuite. Pour la nature de pollution mixte contenant une concentration de 100 g/l de Kaolin (figure III.7), nous remarquons que l'apparition des décharges électriques à la surface de l'isolateur se traduit par l'apparition de pics dans l'onde du signal du courant de fuite. L'amplitude de ces pics augmente avec l'augmentation de la concentration en NaCl et de la tension appliquée. Pour la pollution mixte à base de Kieselguhr (figure III.8), nous constatons que la forme d'onde du signal du courant de fuite est presque sinusoïdale avec de petites déformations qui sont dues à l'activité des décharges électriques. Cependant, pour cette nature de pollution, pour un même niveau de la tension appliquée et une même concentration en NaCl, la valeur efficace du courant de fuite est plus importante comparée aux deux autres natures.

III.3.3. Résultats obtenus 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, pour différentes concentrations en NaCl et pour les trois natures de pollution étudiées. Les résultats obtenus sont montrés dans les figures (III.9), (III.10) et (III.11).

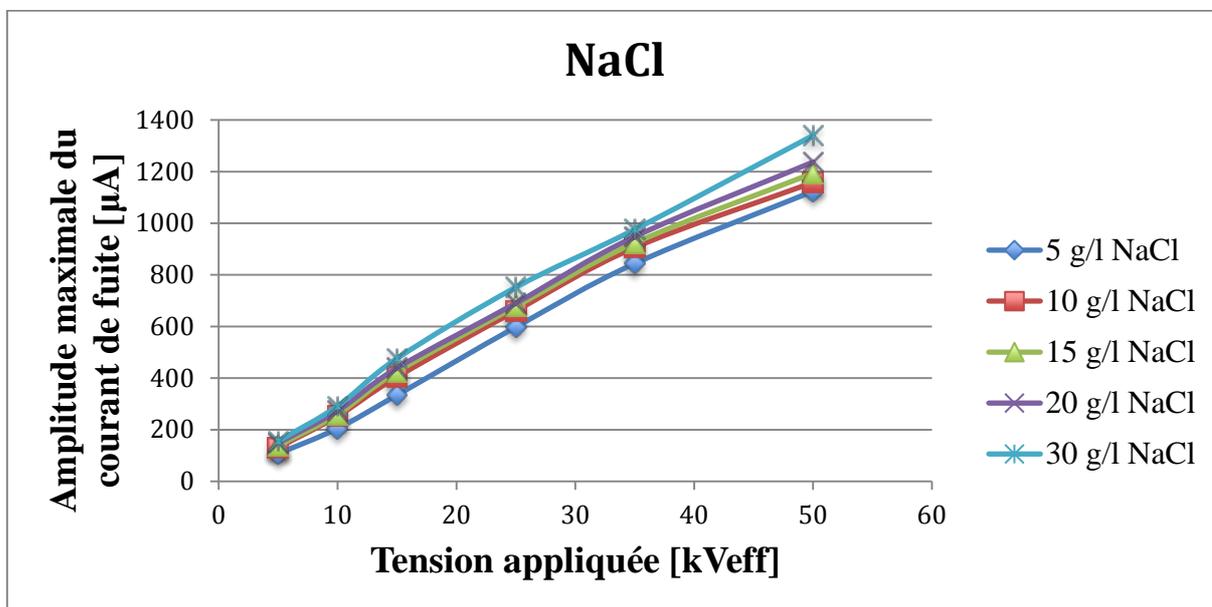


Figure III.9 : Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl. Cas de la pollution non-uniforme.

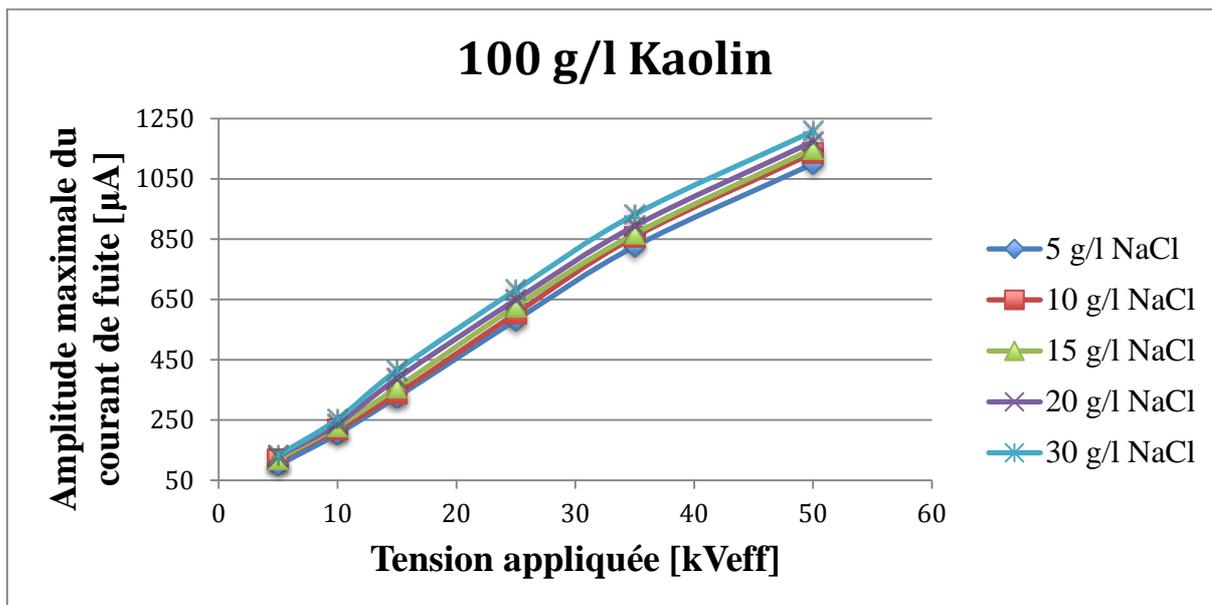


Figure III.10 : Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration de 100 g/l en Kaolin. Cas de la pollution non-uniforme.

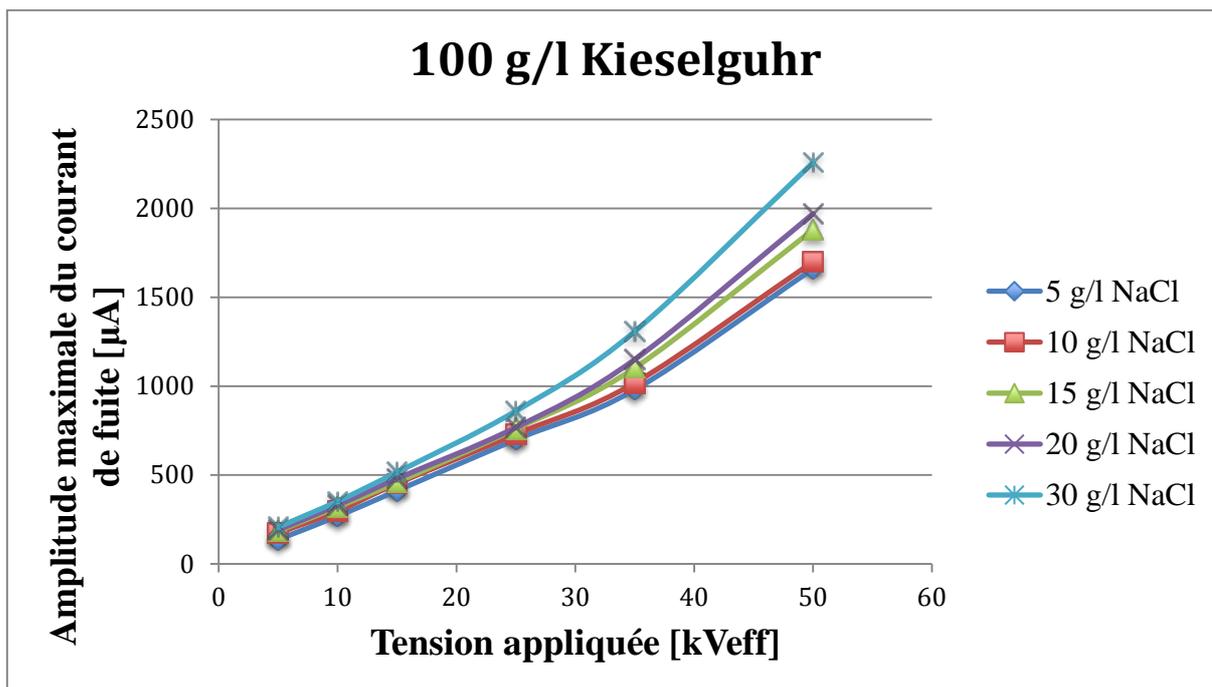


Figure III.11 : Variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration de 100 g/l en Kieselguhr. Cas de la pollution non-uniforme.

D'après les figures (III.9), (III.10) et (III.11) nous remarquons que le courant de fuite augmente en fonction de la tension appliquée. La variation est pratiquement linéaire dans le cas de la pollution marine et la pollution mixte à base du Kaolin. Cependant, cette variation

est non linéaire (exponentielle) pour la pollution mixte à base du kieselguhr. Ceci a été vérifié pour les différentes concentrations en NaCl utilisées (5, 10, 15, 20 et 30) g/l.

Nous constatons également, que l'amplitude maximale du courant de fuite est de l'ordre de micro ampère (μA), même pour les concentrations et les conductivités élevées (100g/l en Kieselguhr et 30 g/l en NaCl, $\sigma = 27 \text{ mS/cm}$). Ceci peut être expliqué par la surface importante de la couche propre qui engendre une augmentation de l'impédance équivalente de l'isolateur.

Nous constatons aussi une augmentation restreinte du courant de fuite pour les différentes concentrations en NaCl pour un même palier de la tension appliquée. Cette augmentation reste toujours restreinte pour les trois natures de pollution étudiées pour la même concentration en NaCl. Ceci est du également à la largeur de la couche propre.

D'après la figure (III.12), nous remarquons que, pour un même palier de la tension appliquée, l'amplitude maximale du courant de fuite pour la pollution mixte à base du Kieselguhr, comme dans le cas uniforme, est plus élevée par rapport aux deux autres natures étudiées. Cependant, le courant de fuite pour la pollution mixte à base du Kaolin est moins élevé par rapport aux deux autres natures. Ceci a été constaté pour les différentes concentrations en sel. Ce phénomène peut être expliqué par la forte conductivité des solutions à base de Kieselguhr.

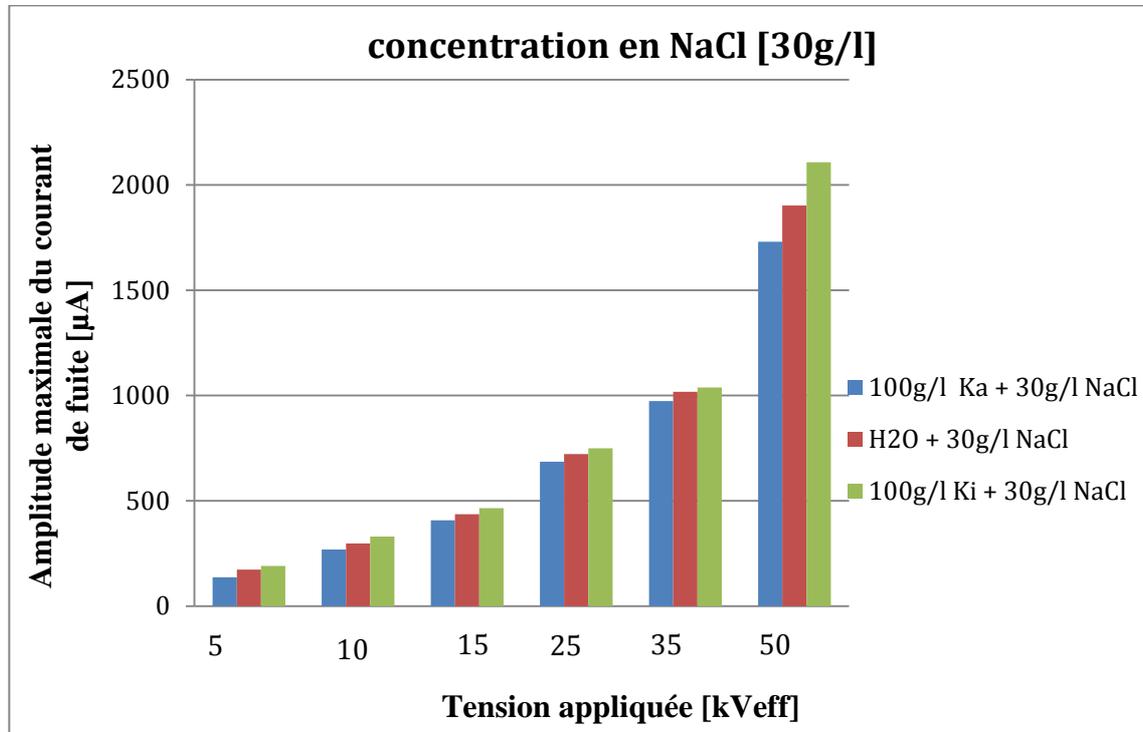


Figure III.12 : variation du courant de fuite en fonction de la nature de pollution à une concentration de 30g/l en NaCl pour chaque palier de tension appliquée. Cas non-uniforme.

III.3.4. Visualisation des signaux du courant de fuite dans le cas de la pollution non-uniforme :

Les formes d'ondes du courant de fuite dans le cas de la pollution non-uniforme sont données pour les trois natures de pollutions étudiées et les différentes concentrations en chlorure de sodium pour un niveau de tension de $50 \text{ kV}_{\text{eff}}$.

a. Les formes d'ondes du signal du courant de fuite pour la pollution marine :

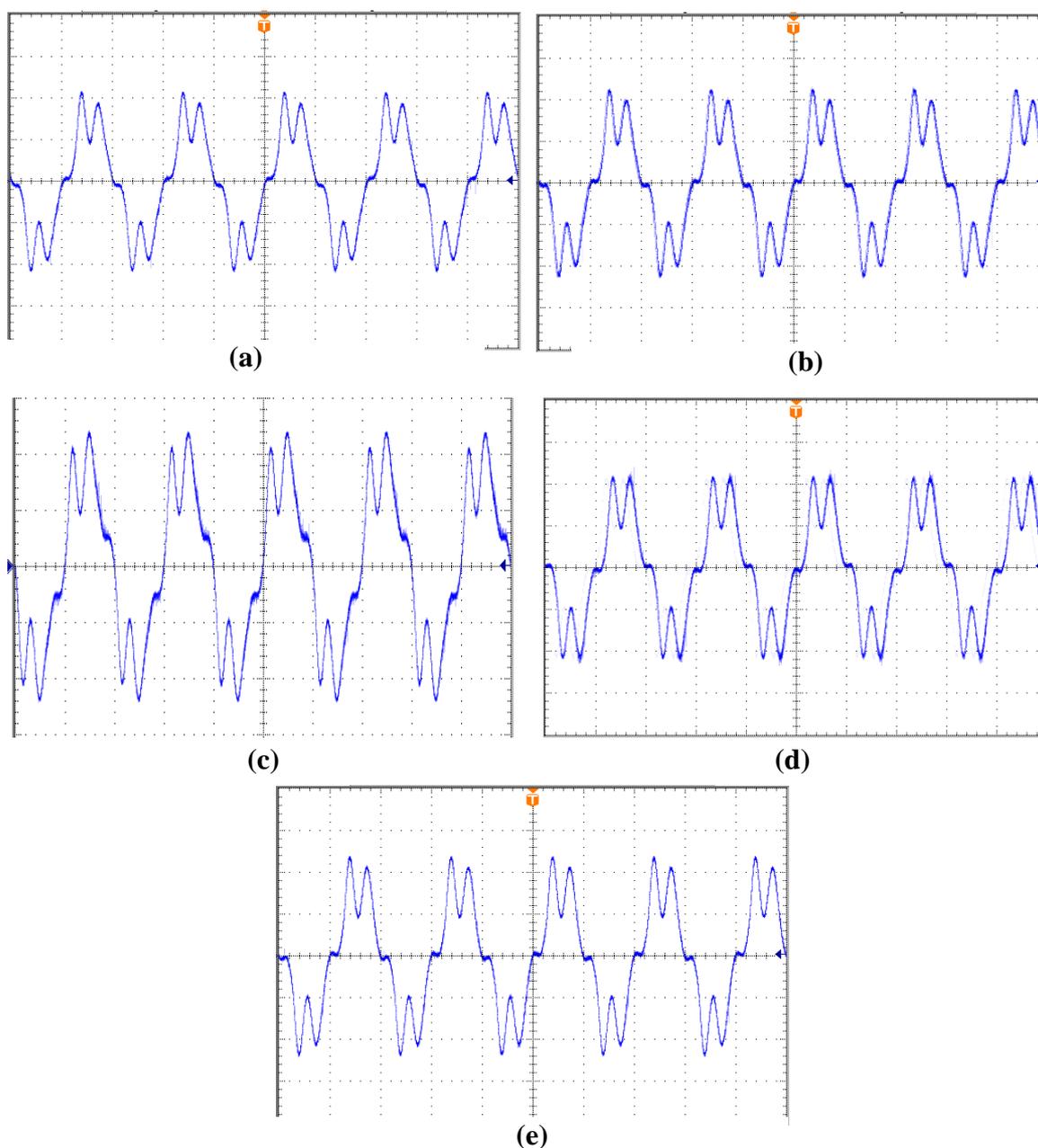


Figure III.14 : Représentation des signaux du courant de fuite pour la pollution marine pour les différentes concentrations en NaCl et un niveau de la tension appliquée de $50 \text{ kV}_{\text{eff}}$ dans le cas de la pollution non-uniforme.

(a) : 05 g/l ; (b) : 10 g/l ; (c) : 15 g/l ; (d) : 20 g/l ; (e) : 30 g/l.

b. Les formes d'ondes du signal du courant de fuite pour la pollution mixte avec une concentration en Kaolin de 100 g/l :

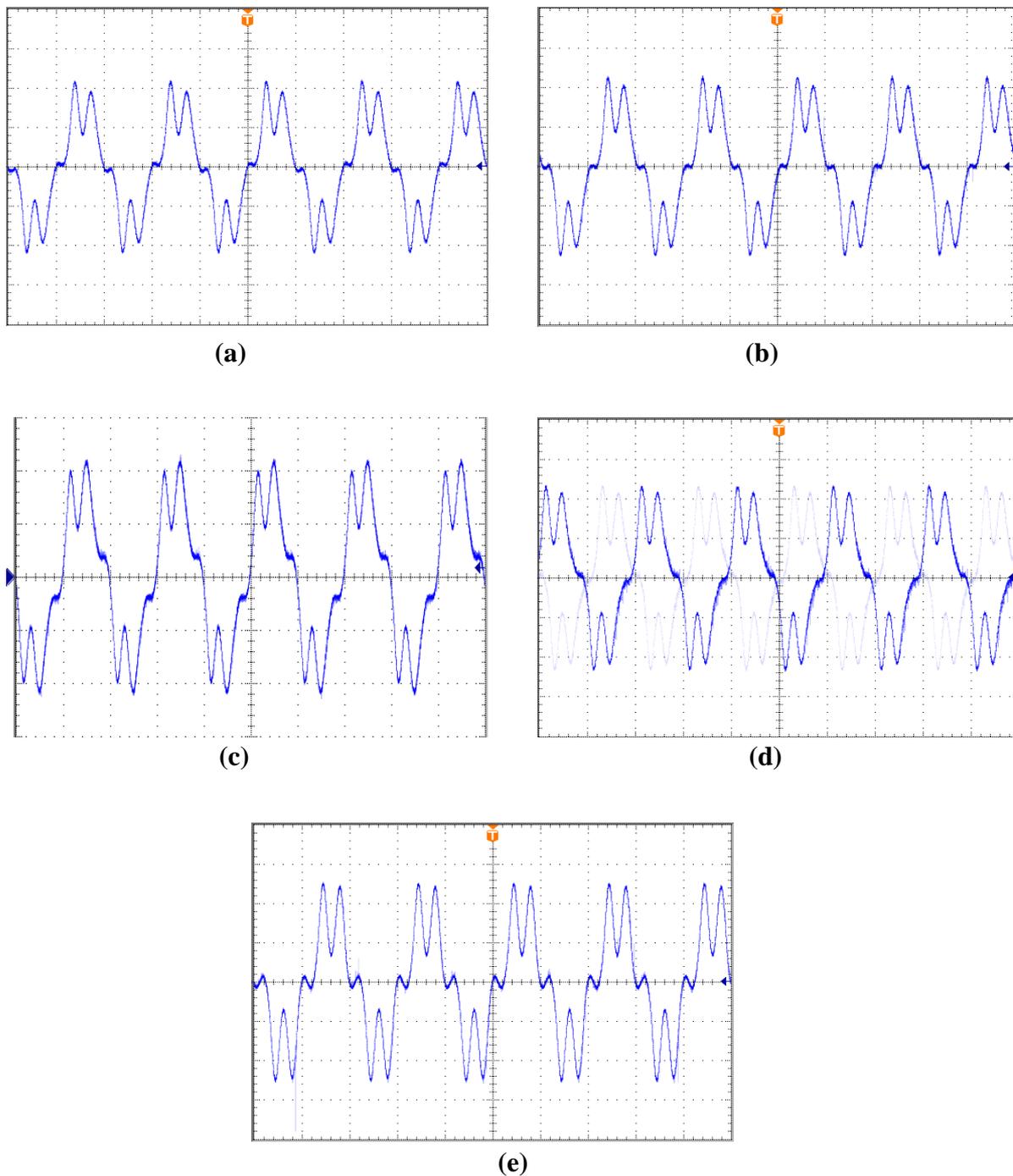


Figure III.15 : Représentation des signaux du courant de fuite dans le cas de la pollution non-uniforme avec une concentration en Kaolin de 100 g/l et différentes concentrations en NaCl, pour un niveau de la tension appliquée de $9 \text{ kV}_{\text{eff}}$.

(a) : 5 g/l ; (b) : 10 g/l ; (c) : 15 g/l ; (d) : 20 g/l ; (e) : 30 g/l.

c. Les formes d'ondes du signal du courant de fuite pour la pollution mixte avec une concentration en Kieselguhr de 100 g/l :

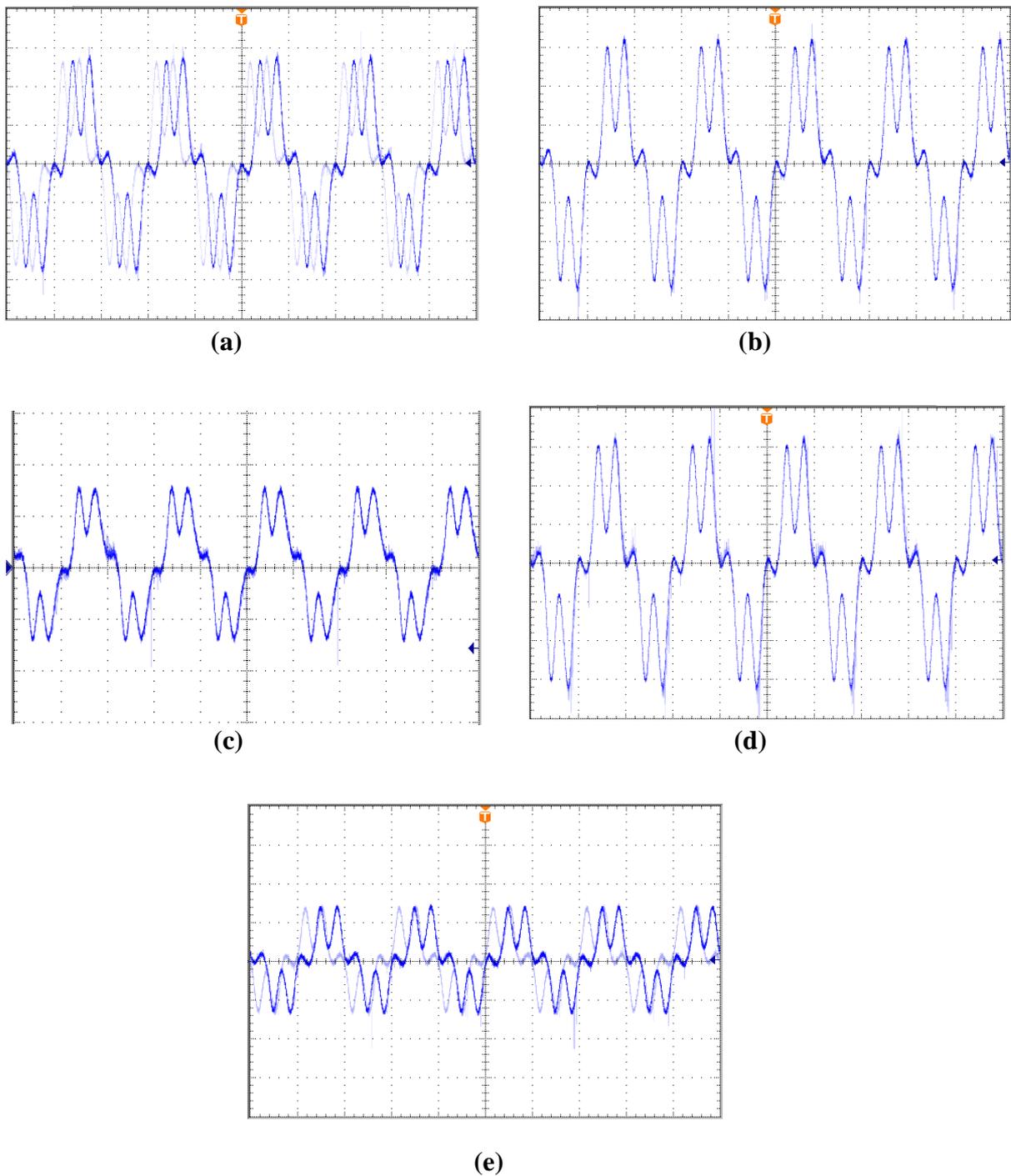


Figure III.16 : Représentation des signaux du courant de fuite dans le cas de la pollution non-uniforme avec une concentration en Kieselguhr de 100 g/l et différentes concentrations en NaCl, pour un niveau de la tension appliquée de 9 kV_{eff}.

(a) : 5 g/l ; (b) : 10 g/l ; (c) : 15 g/l ; (d) : 20 g/l ; (e) : 30 g/l.

Nous constatons à partir des figure (III.14), (III.15) et (III.16) que dans le cas de la pollution non uniforme, les formes d'ondes du signal du courant de fuite sont pratiquement les mêmes pour les trois natures de pollution étudiées. Ceci est dû à la largeur importante de la bande propre.

III.3.5. 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 nature de la pollution et sa concentration en NaCl.

Cette étude nous permet aussi de conclure que dans les deux configurations de pollution étudiées, la nature de la pollution la plus sévère est la pollution mixte contenant une concentration de 100 g/l en Kieselguhr. La présence d'une concentration de 100 g/l de Kaolin dans une solution possédant une concentration en NaCl donnée contribue à la diminution de l'amplitude maximale du courant de fuite.

La diminution de la largeur de la couche polluée de l'isolateur réel, dans le cas d'une pollution non-uniforme, fait diminuer l'amplitude du courant de fuite par rapport à la pollution uniforme.

Nous constatons également, pour le cas de la pollution uniforme, que l'apparition des décharges partielles contribue à la diminution du courant de fuite pour la pollution mixte à base du Kieselguhr et pour des concentrations de (20 et 30) g/l en NaCl, à cause de l'assèchement progressif de certaines zones de l'isolateur réel. 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, nous ne remarquons 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.

III.4. Calcule de l'impédance équivalente vue entre les électrodes :

Pour déterminer les valeurs de l'impédance équivalente de la chaîne d'isolateurs réels étudiée, nous utilisons les amplitudes maximales du courant de fuite précédemment mesurées. L'équation qui nous permet de calculer l'impédance équivalente vue entre les électrodes est donnée ci-dessous :

$$Z_{eq} = \frac{U_{eff}\sqrt{2}}{I_{fmax}} \quad (III.1)$$

Où Z_{eq} représente l'impédance équivalente vue entre les électrodes, I_{fmax} représente l'amplitude maximale du courant de fuite pour une nature de pollution et une concentration en NaCl données, U_{eff} est la valeur efficace de la tension appliquée lors de la mesure de I_{fmax} .

III.4.1. Résultats obtenus pour le cas de la pollution uniforme :

A partir des résultats obtenus lors de la mesure du courant de fuite dans le cas de la pollution uniforme, nous calculons l'impédance équivalente vue entre les électrodes à l'aide de l'équation (IV.1), et cela pour les trois natures de pollutions étudiées et les différentes concentrations en NaCl utilisées. Les résultats obtenus sont donnés dans les figures (III.17) à (III.19).

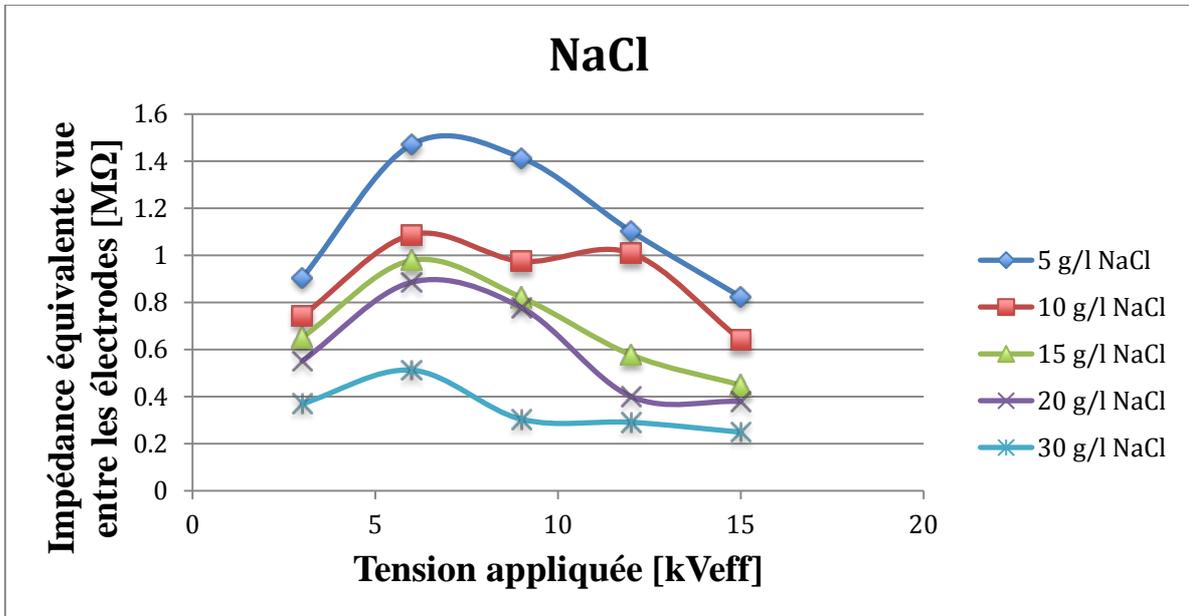


Figure III.17 : Variation de l'impédance équivalente vue entre les électrodes en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl dans le cas d'une pollution marine uniformément répartie sur la surface de l'isolateur.

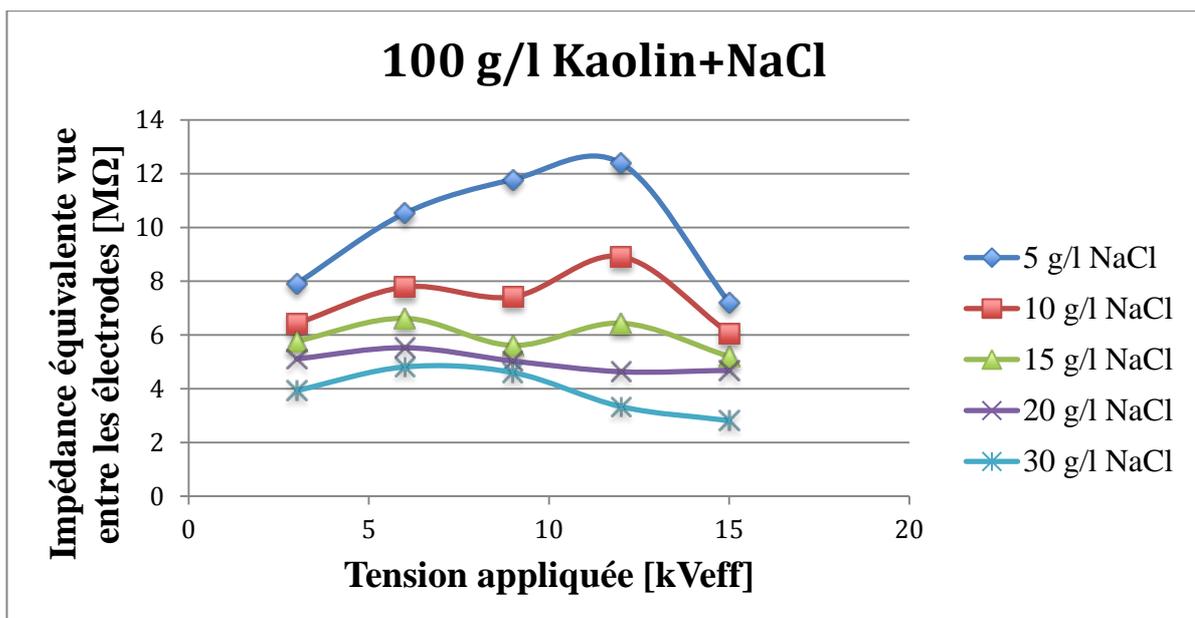


Figure III.18 : Variation de l'impédance équivalente vue entre les électrodes en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl et une concentration en Kaolin de 100 g/l. Cas de la pollution uniforme.

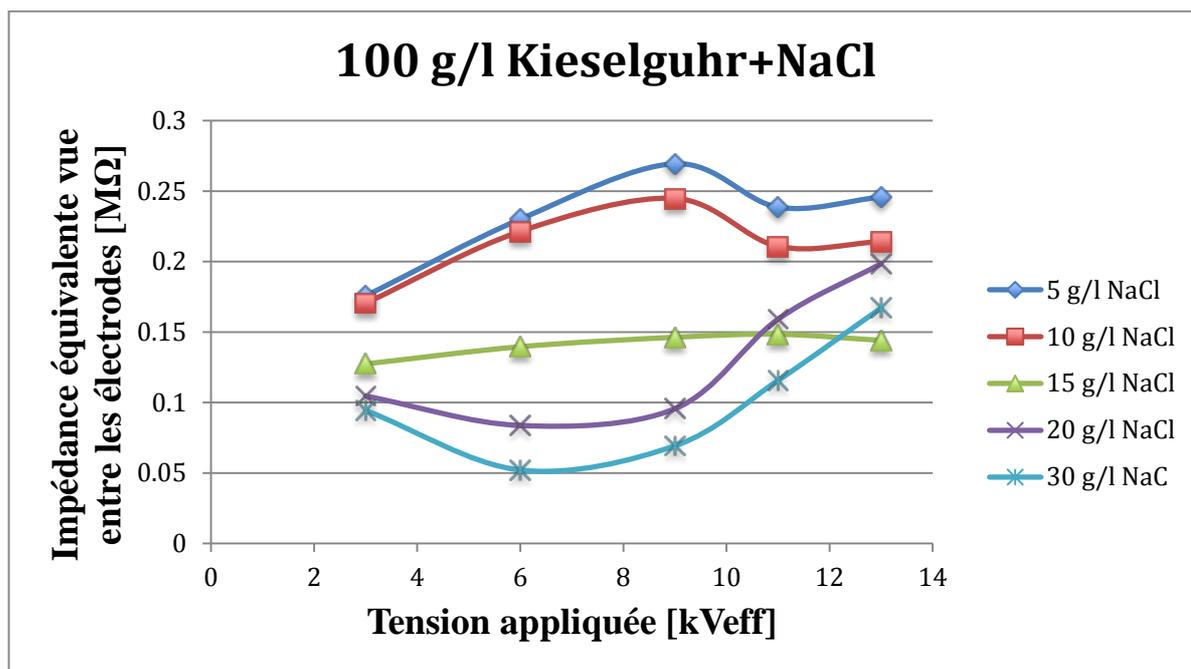


Figure III.19 : Variation de l'impédance équivalente vue entre les électrodes en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl et une concentration en Kieselguhr de 100 g/l. Cas de la pollution uniforme.

De façon générale, les résultats représentés sur la figure (III.17) montrent que l'évolution de l'impédance équivalente vue entre les électrodes en fonction de la tension appliquée est similaire pour toutes les concentrations en sel étudiées. En effet, l'impédance équivalente vue entre les électrodes commence à augmenter pour les faibles paliers de tensions (3 et 6 kV_{eff}), cependant, pour les paliers de tension variant entre 9 et 15 kV_{eff}, l'impédance équivalente a tendance à diminuer. Ceci peut être expliqué par le fait que pour ces niveaux de tensions (9, 12 et 15 kV_{eff}) il y a apparition de décharges électriques à la surface de l'isolateur. Ces décharges court-circuitent les micro-capacités formées par les bandes sèches, ce qui engendre la diminution de l'impédance équivalente. Par ailleurs, nous constatons une importante diminution (allant de quelques dizaines à quelques centaines de kΩ) de l'impédance équivalente vue entre les électrodes avec l'augmentation de la concentration en NaCl. Effectivement, plus la concentration en NaCl de l'agent polluant est importante, plus la conductivité volumique de la solution augmente et donc sa résistivité diminue. Sachant que l'isolateur uniformément pollué a un caractère résistif, la diminution de la résistivité de l'agent polluant cause la diminution de l'impédance équivalente de l'isolateur.

Les résultats de la figure (III.18) montrent que, dans le cas des pollutions contenant une concentration de 100 g/l en Kaolin et différentes concentrations en NaCl, la variation de l'impédance équivalente vue entre les électrodes en fonction de la tension a la même allure que celle obtenue pour les pollutions marines. Néanmoins, pour une concentration en NaCl et un palier de la tension appliquée donnés, la valeur de l'impédance équivalente est environ dix fois plus grande que celle obtenue lors de l'utilisation de la pollution marine.

Nous constatons à partir de la figure (III.19), que pour la nature de pollution mixte contenant une concentration en Kieselguhr de 100 g/l, la variation de l'impédance équivalente vue entre les électrodes en fonction de la tension appliquée diffère d'une concentration en chlorure de sodium à une autre. En effet, pour des concentrations en NaCl égales à 5 et 10 g/l, la variation de l'impédance a la même allure que celles observées pour les deux autres natures étudiées précédemment. Cependant, pour des concentrations en NaCl plus élevées (20 et 30 g/l), l'impédance équivalente vue entre les électrodes commence par diminuer pour les faibles paliers de la tension appliquée (3 et 6 kV_{eff}), pour ensuite augmenter pour des valeurs de la tension appliquées plus importantes (9, 12 et 15 kV_{eff}). Cette augmentation est expliquée par les valeurs relativement importantes du courant de fuite qui cause une évaporation de la pollution, et donc l'apparition de bandes sèches. Ces bandes sèches jouent le rôle de capacités, et donc augmentent l'impédance totale de l'isolateur.

Nous remarquons aussi, en vu des résultats des figure (III.17), (III.18) et (III.19), que pour une concentration en NaCl et un palier de la tension appliquée donnés, la présence d'une concentration de 100 g/l en Kaolin dans la solution polluante, engendre une augmentation d'environ dix fois de l'impédance équivalente vue entre les électrodes par rapport à celle obtenue lors de l'utilisation de l'eau distillée avec NaCl. Par ailleurs, la présence d'une concentration de 100 g/l en Kieselguhr diminue d'environ six fois la valeur de l'impédance équivalente vue entre les électrodes comparée à celle obtenue pour la pollution marine. Cette différence s'explique principalement par les différences dans la nature minéralogique et les propriétés physico-chimiques entre le Kaolin et le Kieselguhr. Nous pouvons citer à titre d'exemple que le kieselguhr possède une capacité d'échange cationique (CEC) plus grande que celle du Kaolin. Les mélanges Kieselgur-NaCl-H₂O développent donc une conductivité surfacique plus importante. En plus de cela, les solutions contenant du Kieselguhr présentent des amplitudes de la partie imaginaire de la conductivité complexe σ'' plus élevées que celles contenant du kaolin. L'amplitude des phénomènes de polarisation est donc plus importante en présence du Kieselguhr qu'en présence du kaolin. Ces phénomènes de polarisation sont liés à la CEC et à l'organisation textuelle particulière des particules mises en jeu [24].

III.4.2. Résultats pour le cas non-uniforme :

De la même manière que pour le cas de la pollution uniforme, nous calculons l'impédance équivalente vue entre les électrodes à l'aide de l'équation (IV.1), et cela pour les trois natures de pollutions étudiées et les différentes concentrations en NaCl utilisées. Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures (III.20) à (III.22)

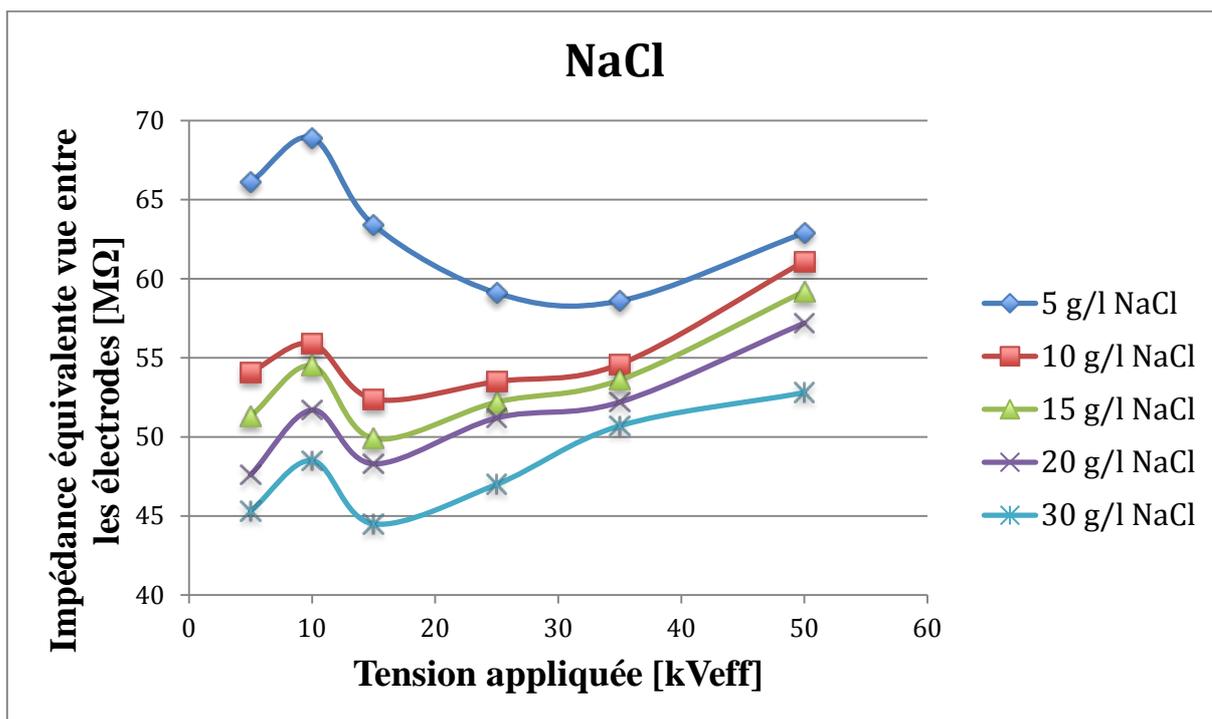


Figure III.20 : Variation de l'impédance équivalente vue entre les électrodes en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl. Cas de la pollution non-uniforme.

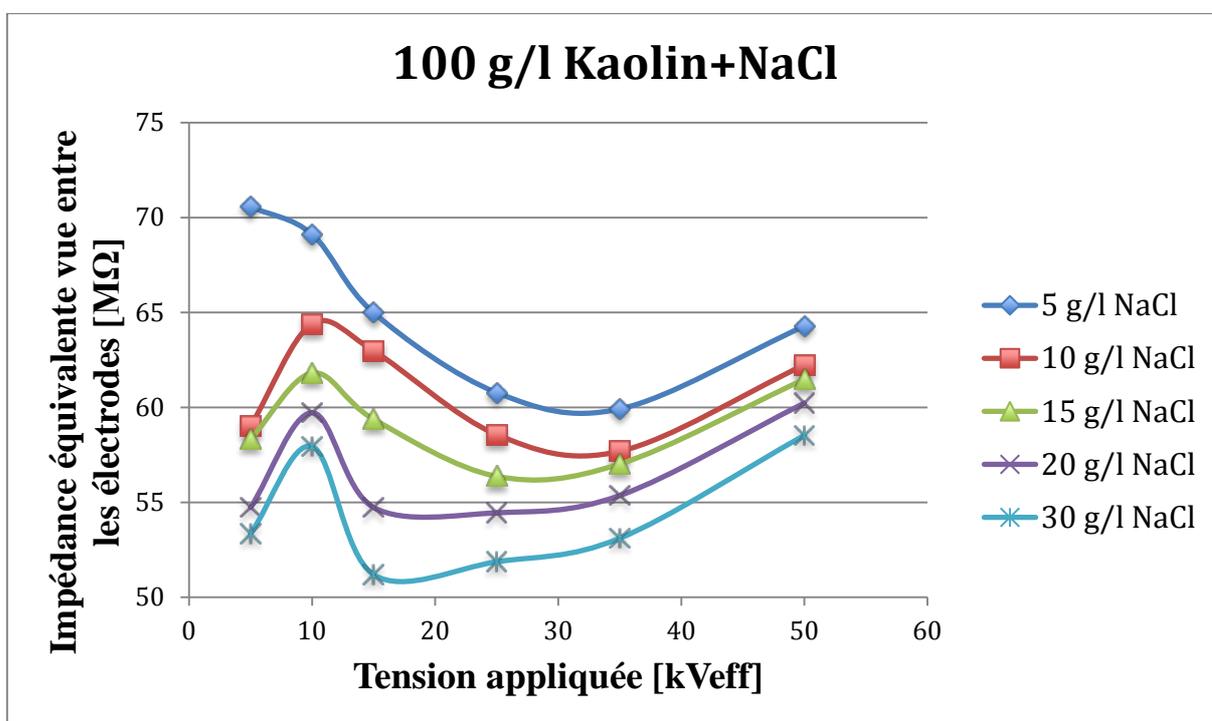


Figure III.21 : Variation de l'impédance équivalente vue entre les électrodes en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl et une concentration en Kaolin de 100 g/l. Cas de la pollution uniforme.

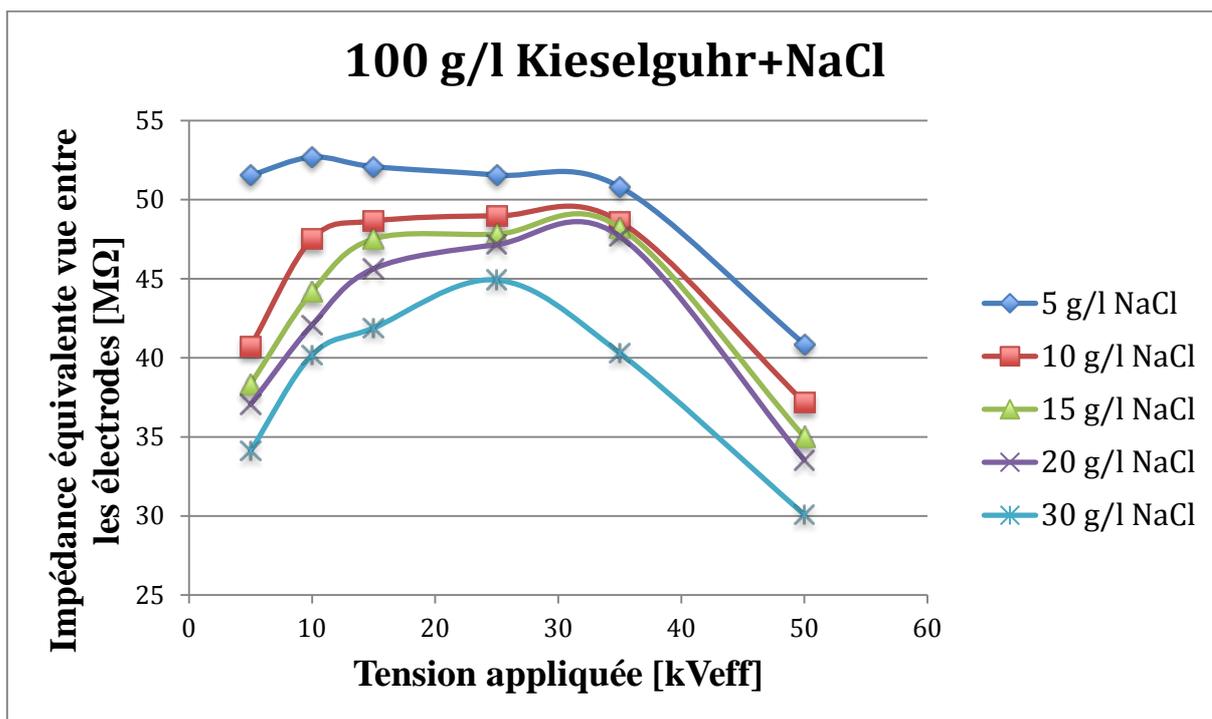


Figure III.22 : Variation de l'impédance équivalente vue entre les électrodes en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl et une concentration en Kieselguhr de 100 g/l. Cas de la pollution non-uniforme.

Nous remarquons d'après les figures (III.20), (III.21) et (III.22) que l'impédance vue entre les électrodes varie d'une manière non linéaire en fonction de la tension appliquée.

D'une façon générale, l'impédance augmente lors de l'application de faibles niveaux de tensions (de 0 à 10kV_{eff}). Ceci est dû à la variation peu significative du courant de fuite devant la variation de la tension appliquée. A partir de 10kV_{eff}, l'impédance Z_{eq} diminue avec l'augmentation de la tension appliquée jusqu'à 35kV_{eff} pour une concentration en sel de 5g/l et jusqu'à 15kV_{eff} pour les concentrations (10, 15, 20 et 30) g/l dans le cas de la pollution marine. Puis l'impédance augmente sous l'influence des décharges qui engendrent l'apparition de zones sèche sur la surface polluée de l'isolateur. En revanche l'impédance de la pollution mixte à base de Kaolin diminue en fonction de la tension appliquée jusqu'à 35kV_{eff} pour des concentrations de (5, 10 et 15) g/l, et jusqu'à 15kV_{eff} pour des concentrations de (20 et 30) g/l, pour ensuite augmenter sous effet de l'assèchement causé par l'activité des décharges.

L'impédance équivalente vue entre les électrodes dans le cas de l'application de la pollution mixte contenant 100 g/l de Kieselguhr, comme dans les deux natures précédentes, augmente en fonction des faibles tensions appliquées (0 à 10 kV_{eff}) pour les différentes concentrations en sel, après elle diminue pour la concentration de 5g/l. Pour des concentrations de (10, 15 et 20) g/l, l'impédance a tendance de se stabiliser jusqu'à une tension de 35 kV_{eff}, ensuite elle diminue. Cependant, pour une concentration plus importante

de 30 g/l en chlorure de sodium, l'impédance Z_{eq} continue à augmenter sous l'effet des décharges et cela jusqu'à un niveau de la tension appliquée égale à 25 kV_{eff}, après quoi elle diminue.

Nous constatons aussi que la valeur de Z_{eq} diminue avec l'augmentation de la concentration en sel. En effet, l'augmentation de la concentration en NaCl diminue la résistivité de la surface polluée, ce qui favorise la circulation du courant de fuite.

Nous avons aussi remarqué, comme dans le cas de l'étude de l'évolution de l'impédance équivalente sous pollution uniforme, une diminution de la valeur de Z_{eq} en fonction de la nature de l'agent polluant pour la même concentration en NaCl et le même palier de la tension appliquée étudiées. L'impédance calculée pour la pollution mixte à base de Kieselguhr est la plus petite par rapport aux impédances des deux autres natures, cependant celle de la pollution mixte à base de Kaolin est la plus grande.

III.5. Tension d'apparition des décharges électriques :

Nous nous intéressons dans cette partie à la tension d'apparition des décharges électriques sur la surface de l'isolateur. Pour les deux configurations de pollution étudiées, nous relevons la tension d'apparition de la première décharge électrique sur la surface de l'isolateur en même temps que la mesure de la tension de contournement. Les résultats obtenus sont représentés sur les figures (III.23) et (III.24).

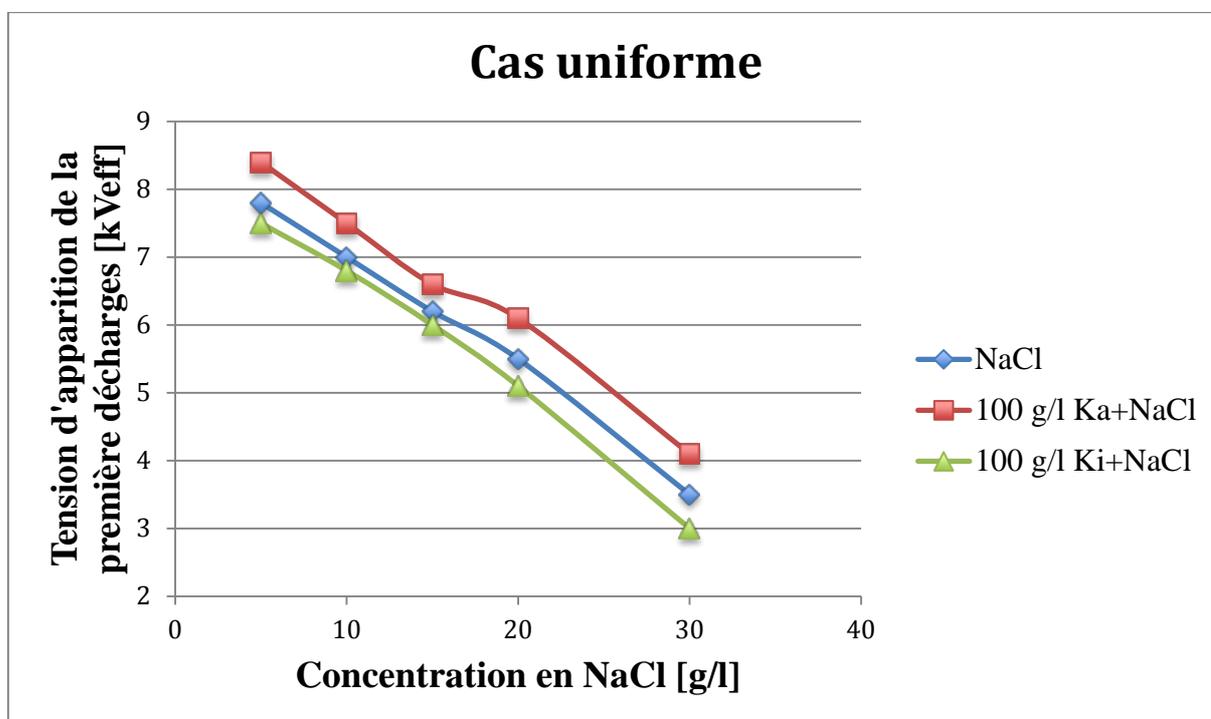


Figure III.23 : Tension d'apparition de la première décharge électrique en fonction de la concentration en NaCl pour les trois natures de pollution étudiées. Cas de la pollution uniforme.

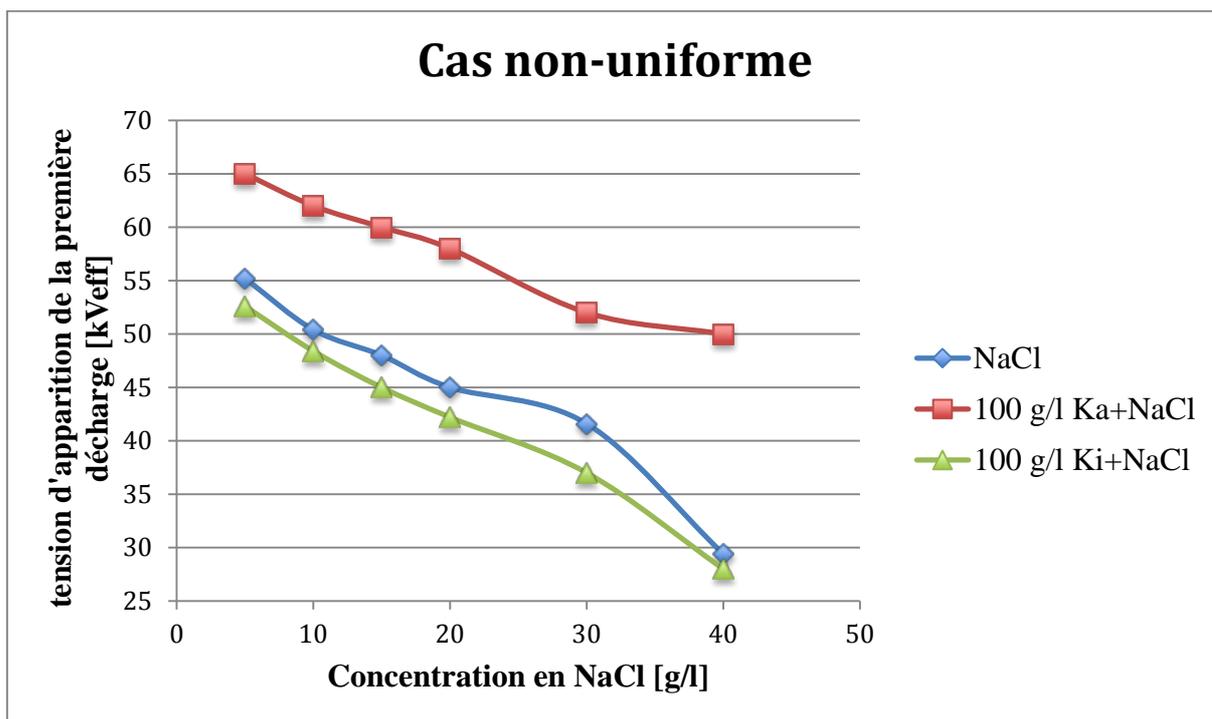


Figure III.24 : Tension d'apparition de la première décharge électrique en fonction de la concentration en NaCl pour les trois natures de pollution étudiées. Cas de la pollution non-uniforme.

Nous constatons à partir de la figure (III.23), que pour le cas de la pollution uniforme, la tension d'apparition des décharges électriques diminue d'une manière non-linéaire avec l'augmentation de la concentration en NaCl pour les trois natures de la pollution utilisées. Nous constatons également, que pour la nature de pollution contenant 100 g/l de Kieselguhr, les décharges électriques apparaissent à une valeur de la tension appliquée plus basse comparée à celle correspondante à la nature de pollution comportant du chlorure de sodium seulement. Toutefois, pour les solutions contenant une concentration de 100 g/l de Kaolin, le niveau de tension pour lequel apparaissent les décharges électriques est plus important comparé aux valeurs correspondantes lors de l'utilisation des deux autres natures de pollution.

Nous remarquons d'après la figure (III.24), que dans le cas de la pollution non-uniforme, la tension d'apparition de la première décharge varie d'une manière non linéaire et inversement proportionnelle à la concentration en sel. Ceci a été constaté pour les différentes natures de pollution étudiées.

Pour une concentration en NaCl donnée, nous remarquons que la tension d'apparition de la première décharge dans le cas de la pollution mixte à base de Kaolin est plus importante par rapport aux deux autres natures étudiées. Cependant celle de la pollution mixte à base de Kieselguhr est la moins importante. Ce phénomène a été également observé lors de la mesure

de la tension de contournement. Il peut être expliqué par les différences entre les caractéristiques physico-chimiques du Kaolin et du Kieselguhr.

D'une façon générale, la tension d'apparition de la première décharge varie entre 35 et 48% de la tension de contournement pour la pollution marine, entre 60 et 65% de la tension de contournement pour la pollution mixte à base de Kaolin et entre 44 et 50% de la tension de contournement pour la pollution mixte à base Kieselguhr.

III.6. Charge électrique :

La charge électrique est l'un des paramètres importants pour connaître l'énergie dissipée au niveau de la surface de l'isolateur. Dans le but d'étudier la variation de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour les trois natures de pollutions et les différentes concentrations en chlorure de sodium, nous mesurons l'amplitude maximale de la charge électrique, et cela dans les deux cas de pollution, uniforme et non-uniforme.

III.6.1. Résultats obtenus sous pollution uniforme :

Dans le cas de la pollution uniforme, et pour chacune des natures de pollution étudiées, nous mesurons à l'aide de l'oscilloscope l'amplitude maximale de la charge électrique pour différents niveaux de la tension appliquée et différentes concentrations en NaCl. Les résultats d'essais sont montrés sur les figures (III.25) à (III.27).

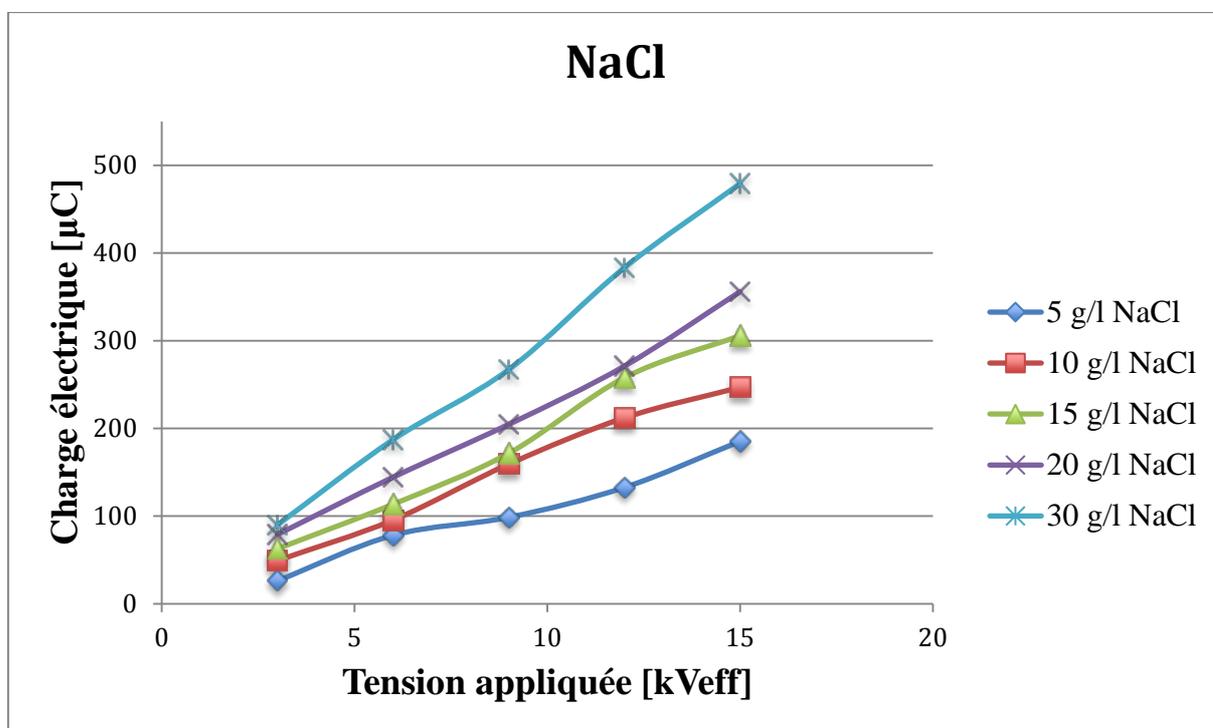


Figure III.25 : Variation de la valeur maximale de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl. Cas de la configuration uniforme.

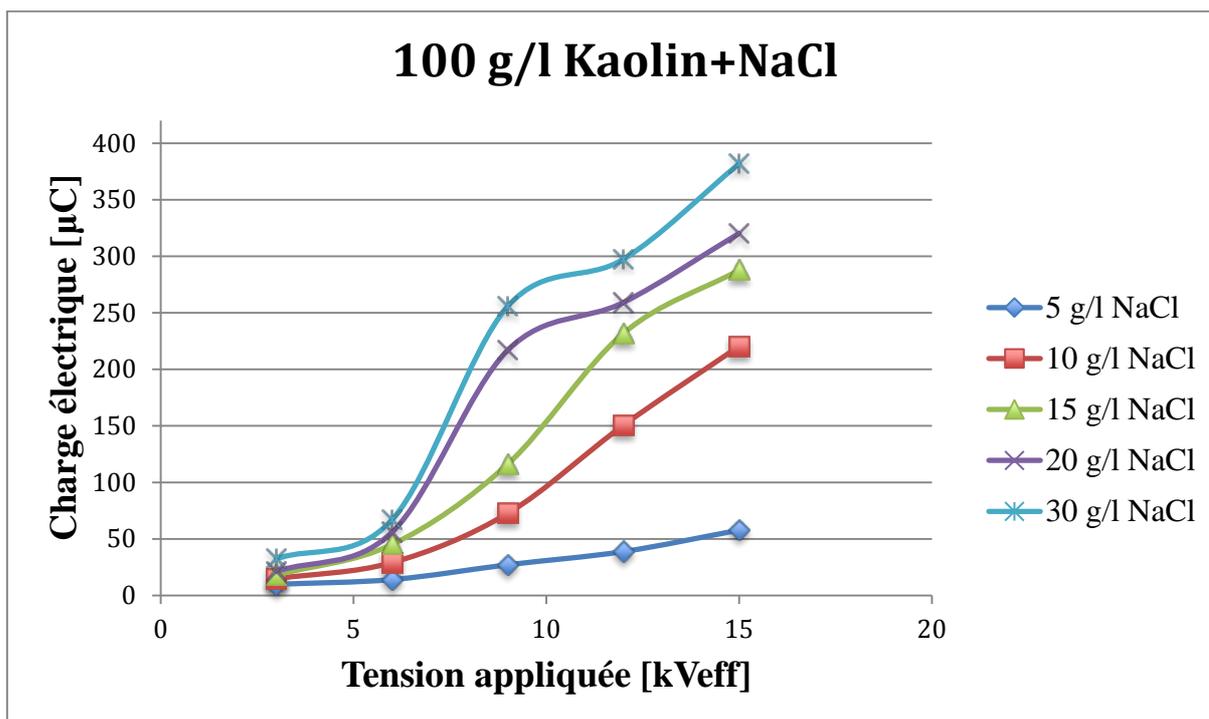


Figure III.26 : Variation de la valeur maximale de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration en Kaolin de 100 g/l. Cas de la configuration uniforme.

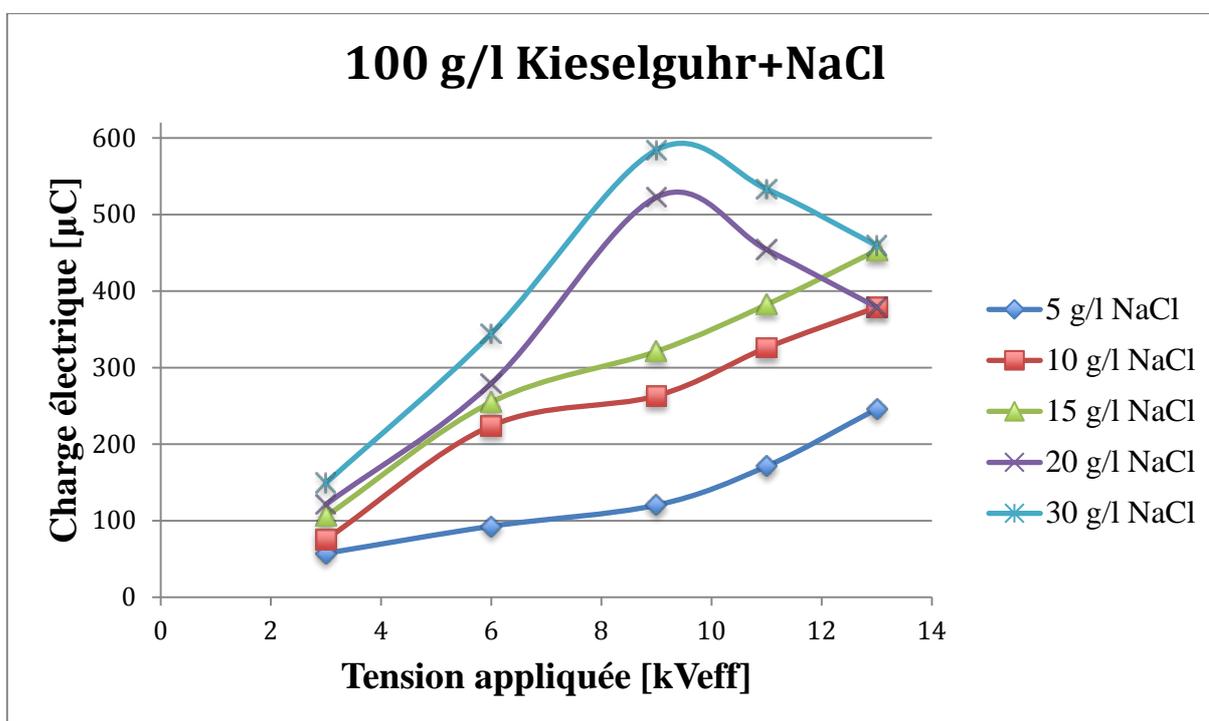


Figure III.27 : Variation de la valeur maximale de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration en Kieselguhr de 100 g/l. Cas de la configuration uniforme.

Nous remarquons à partir de la figure (III.25) que la valeur maximale de la charge électrique augmente d'une manière non linéaire avec l'augmentation de la tension appliquée, et cela pour les différentes concentrations en chlorure de sodium utilisées. Pour cette nature de pollution, la valeur crête de la charge électrique augmente d'une manière progressive car il n'y a pas d'assèchement important de la couche de pollution et cela malgré la présence de décharges non localisées à partir de $5kV_{\text{eff}}$ sur la surface de l'isolateur.

Pour la pollution mixte contenant 100 g/l de Kaolin, nous constatons à partir de la figure (III.26) que la valeur maximale de la charge électrique, comme dans le cas précédent, augmente avec l'augmentation de la tension appliquée et de la concentration en NaCl. Cette augmentation est non linéaire pour les concentrations en NaCl égales à 10, 15, 20 et 30. Cependant, pour la pollution dont la concentration en NaCl est égale à 5 g/l, l'augmentation a tendance à être linéaire. Nous avons aussi constaté que la valeur maximale de la charge électrique mesurée pour cette nature de pollution est celle de la solution constituée d'une concentration de 30 g/l en NaCl et de 100 g/l en Kaolin, et elle est égale à 386 μC . Cette valeur est inférieure à celle qui lui correspond dans le cas de la pollution marine.

D'après les résultats obtenus dans la figure (III.27), nous remarquons que la valeur maximale de la charge électrique augmente en fonction de la tension appliquée. Nous constatons aussi une augmentation de la valeur crête de la charge électrique avec l'augmentation de la concentration en NaCl de la pollution appliquée. L'augmentation est progressive pour les concentrations de 5, 10 et 15 g/l en NaCl. Cependant, pour les solutions dont les concentrations en NaCl sont égales à 20 et 30 g/l, l'amplitude de la charge électrique atteint son maximum pour une valeur de la tension appliquée égale à 9 kV_{eff} , après quoi elle diminue.

III.6.2. Résultats obtenus 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 concentrations en NaCl et pour les trois natures de pollution étudiées. Les résultats obtenus sont montrés dans les figures (III.28), (III.29) et (III.30).

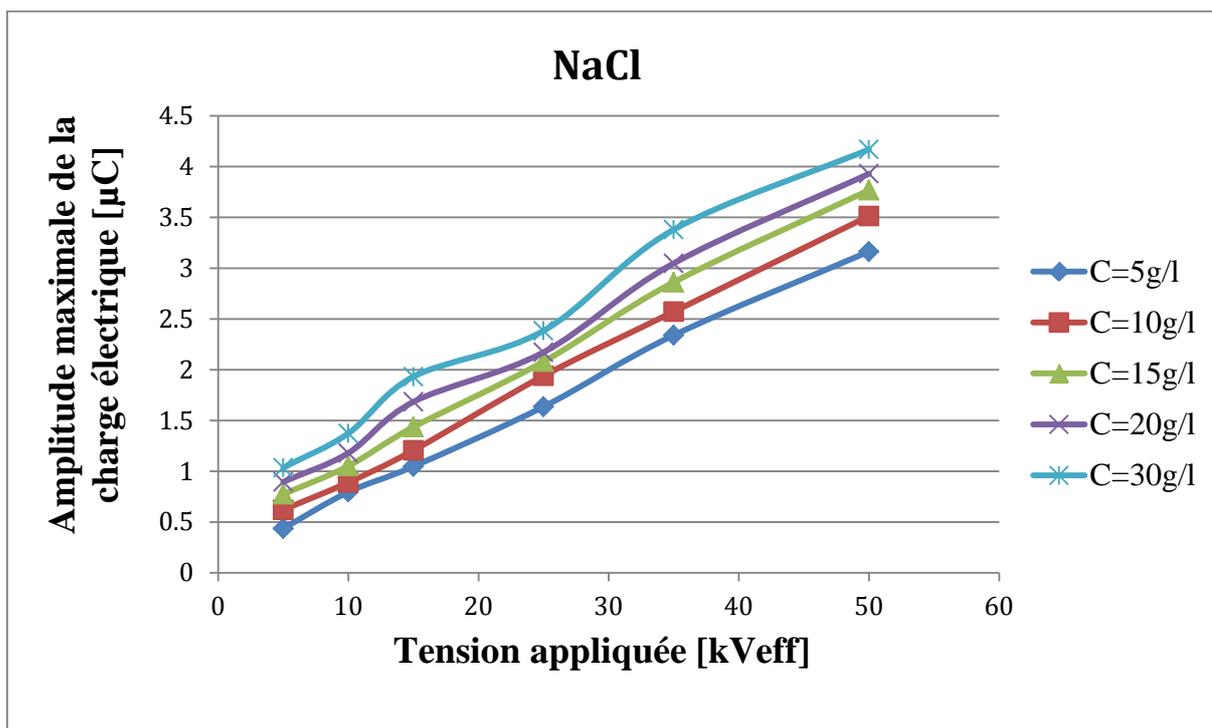


Figure III.28 : Variation de la valeur maximale de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl. Cas de la configuration non-uniforme.

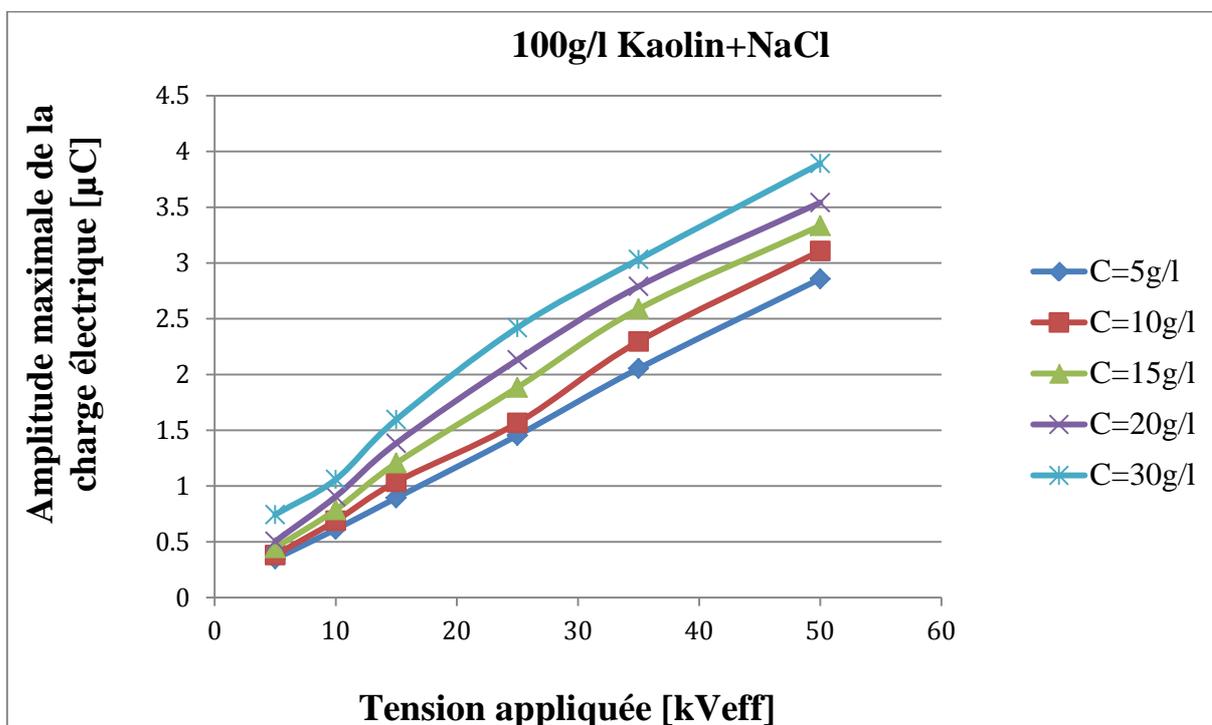


Figure III.29 : Variation de la valeur maximale de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration en Kaolin de 100 g/l. Cas de la configuration non-uniforme.

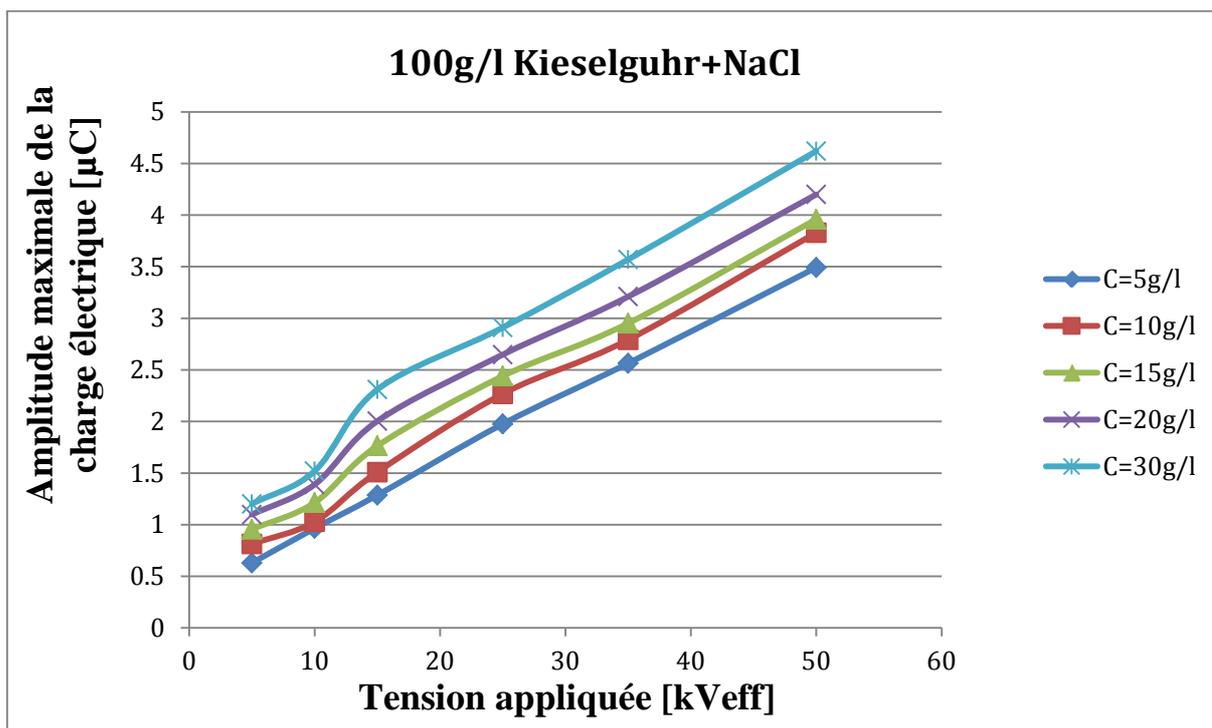


Figure III.30 : Variation de la valeur maximale de la charge électrique en fonction de la tension appliquée pour différentes concentrations en NaCl avec une concentration en Kieselguhr de 100 g/l. Cas de la configuration non-uniforme.

D'après les Figures (III.28), (III.29) et (III.30), nous constatons que la charge électrique augmente d'une manière non linéaire en fonction de la tension appliquée pour les différentes concentrations en sel et pour les trois natures de pollution étudiées.

Pour un même niveau de tension appliquée, nous constatons sur la figure (III.28) que la charge électrique augmente avec l'augmentation de la concentration en NaCl utilisée. Pour les concentrations en sel de (15, 20 et 30) g/l de la pollution marine, la charge électrique augmente d'une manière presque linéaire en fonction de la tension appliquée car il n'y pas eu d'assèchement important et cela malgré la présence de décharges à la surface de l'isolateur (à partir de 48kV_{eff} pour C=15g/l, 45kV_{eff} pour C=20g/l et 41,6kV_{eff} pour C=30g/l).

Pour la pollution mixte à base de Kaolin (figure (III.29)), nous remarquons aussi que la charge électrique pour un même palier de tension donnée augmente avec l'augmentation de la concentration en NaCl.

Pour la pollution mixte à base de Kieselguhr (figure (III.30)), comme dans le cas de la pollution marine, la charge augmente en fonction de la concentration en sel pour le même palier de tension appliquée. Pour les concentrations en sel de (10, 15, 20 et 30) g/l, la charge électrique augmente d'une manière progressive en fonction de la tension appliquée malgré la

présence de décharges à la surface de l'isolateur, ces décharges sont tellement faibles qu'elles n'arrivent pas à provoquer d'assèchement important.

III.6.3. Discussion :

Les résultats obtenus nous permettent de conclure que l'amplitude de la charge électrique augmente avec l'augmentation de la tension appliquée et la concentration en NaCl.

Nous constatons aussi que pour les deux configurations de pollution étudiées, pour un même palier de la tension appliquée et une même concentration en chlorure de sodium, l'amplitude de la charge électrique est la plus importante pour la nature de pollution mixte contenant une concentration de 100 g/l en Kieselguhr. La pollution mixte à base de Kieselguhr est donc la nature de pollution la plus sévère parmi les trois natures étudiées. Ceci confirme la conclusion que nous avons tirée de l'étude du contournement et du courant de fuite.

Nous remarquons également, que dans le cas de la pollution non-uniforme, l'amplitude de la charge électrique est plus faible par rapport au cas de la pollution uniforme.

Cette étude nous a aussi permis de constater que dans le cas de la pollution uniforme, et pour la nature de pollution mixte à base de Kieselguhr avec des concentrations en NaCl importantes (20 et 30 g/l), l'apparition de décharges partielles contribue à la diminution de la charge électrique. Ceci est dû à l'assèchement progressif de certaines zones (notamment les zones proches des capots et tiges) sur la surface des l'isolateurs réels. Cet assèchement est plus rapide pour une concentration de 30 g/l en NaCl (pollution mixte à base de kieselguhr), qui est le cas de pollution le plus sévère. Dans le cas de la pollution non-uniforme, la présence de décharges électriques sur la couche propre augmente l'amplitude de la charge électrique à la surface de l'isolateur.

III.7. Conclusion :

Cette partie expérimentale nous permet de conclure que la nature de l'agent polluant a une grande influence sur le comportement diélectrique des isolateurs de haute tension. En effet et comparé à la pollution marine, nous avons constaté que pour une même concentration en NaCl, une même configuration de la pollution et un même niveau de tension appliquée, la présence d'une concentration de 100 g/l de Kaolin a pour effet l'augmentation de la rigidité diélectrique du système, la diminution de l'amplitude de la charge électrique et l'augmentation de l'impédance équivalente ce qui engendre une diminution de l'amplitude du courant de fuite. Cependant, la présence d'une concentration de 100 g/l de Kieselguhr cause l'effet inverse, c'est à dire une importante diminution de la rigidité diélectrique ainsi que de l'impédance équivalente de l'isolateur. Ceci engendre une augmentation du courant de fuite et de la charge électrique à la surface de l'isolateur.

Nous avons aussi constaté un assèchement partiel de la couche polluante lors de l'application de la pollution mixte à base de Kieselguhr avec des concentrations en NaCl

supérieures à 20 g/l. Cet assèchement a pour effet l'augmentation de l'impédance équivalente et donc la diminution de l'amplitude du courant de fuite et de la charge électrique.

Pour les trois natures de pollution étudiées, la diminution de la largeur de la couche polluée (pollution non-uniforme) entraîne :

- Augmentation de la rigidité diélectrique de l'isolateur.
- Augmentation de l'impédance équivalente de l'isolateur.
- Diminution de l'amplitude du courant de fuite.
- Diminution de l'amplitude de la charge électrique.

Finalement, ce chapitre nous a permis de conclure que :

- La tension de contournement dépend de la nature de l'agent polluant, de la configuration de la pollution et de la concentration en NaCl.
- L'amplitude du courant de fuite augmente en fonction de la tension appliquée, de la nature de la pollution et la concentration en NaCl.
- L'impédance équivalente diminue avec l'augmentation de la concentration en NaCl et elle augmente avec l'apparition de zones sèches.
- L'amplitude de la charge électrique augmente avec l'augmentation de la tension appliquée et de la concentration en NaCl.
- Parmi les trois natures de pollution étudiées, la nature la plus sévère est la pollution mixte à base de Kieselguhr.
- Le cas de la pollution uniforme est plus sévère que le cas de la pollution non-uniforme étudié.

Chapitre IV :
Modélisation de la
Tension de
Contournement et
l'Amplitude du
Courant de Fuite

IV.1. Introduction :

La connaissance des paramètres électriques tels que la tension du contournement et l'amplitude maximale du courant de fuite pour n'importe quelle concentration en NaCl et n'importe quel niveau de la tension appliquée peut s'avérer très intéressante.

Afin de faire une analyse du comportement diélectrique de la chaîne d'isolateurs réels étudiée, nous avons élaboré quelques modèles mathématiques de calcul basés sur nos résultats expérimentaux.

En premier lieu, et pour chacune des deux configurations de la pollution étudiées, nous proposons un modèle mathématique de calcul de la tension de contournement en fonction de la nature de l'agent polluant et de la concentration en NaCl.

En deuxième lieu, nous élaborons un modèle mathématique afin de simuler la variation de l'amplitude maximale du courant de fuite, et cela pour chacun des deux cas, pollution uniforme et pollution non-uniforme.

Ensuite, et par combinaison des deux équations empiriques proposées pour les deux configurations de la pollution, nous proposons un modèle global de calcul de l'amplitude maximale du courant de fuite pour les deux configurations étudiées, uniforme et non-uniforme.

En dernier lieu, et dans le but de prédire le comportement de la chaîne d'isolateurs réels étudiée, nous utilisons les modèles mathématiques que nous avons proposé pour réaliser une interface graphique en utilisant le logiciel MATLAB. Cette interface graphique permet de calculer l'amplitude maximale du courant de fuite pour des valeurs de la concentration en NaCl et de la tension appliquée autres que celles mesurées au laboratoire. Elle permet également de prédire la tension de contournement pour une concentration en NaCl donnée, et cela pour les trois natures de l'agent polluant et les deux configurations de pollution étudiées.

IV.2. Modélisation de la tension de contournement :

IV.2.1. Dans le cas de la pollution uniforme :

En se basant sur l'allure de la courbe de la tension de contournement obtenue expérimentalement dans le cas de la pollution uniforme, nous proposons un modèle qui simule la variation de la tension de contournement en fonction de la concentration en NaCl. La fonction qui régit ce modèle est donnée par :

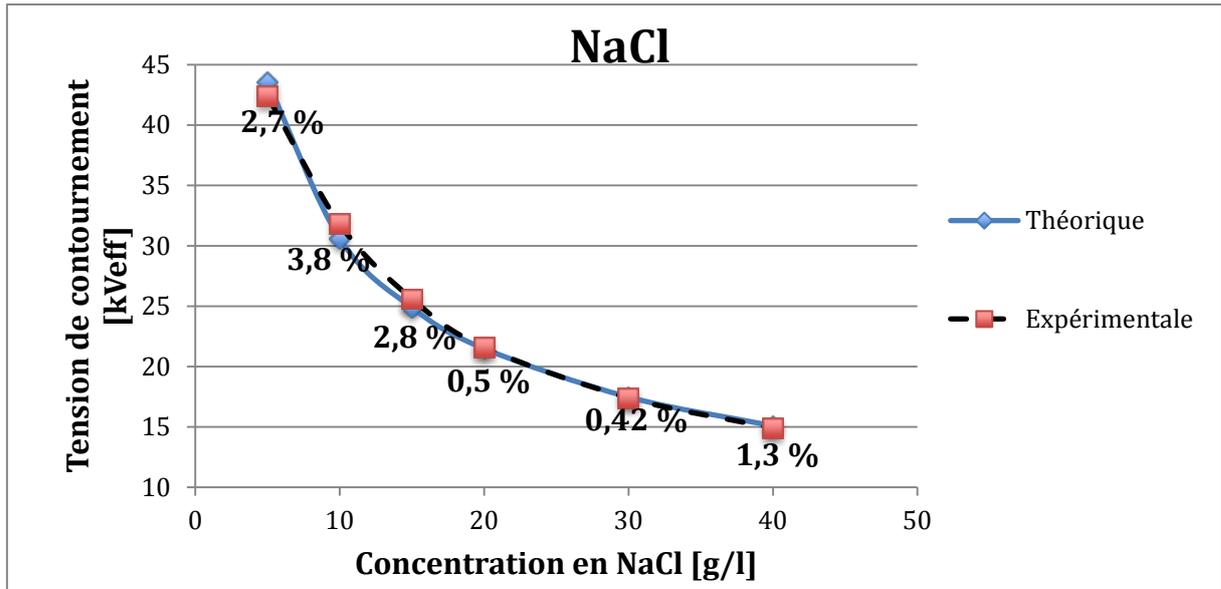
$$U_{cU} = 99C^{(-0,47n)} \quad [\text{kV}_{\text{eff}}] \quad (\text{IV-1})$$

Où U_{cU} est la tension de contournement pour le cas de la pollution uniforme [kV_{eff}], C est la concentration en NaCl [g/l] et n une constante qui caractérise la nature de la pollution. Les valeurs de n selon les trois natures de pollution utilisées sont données dans le tableau (IV.1).

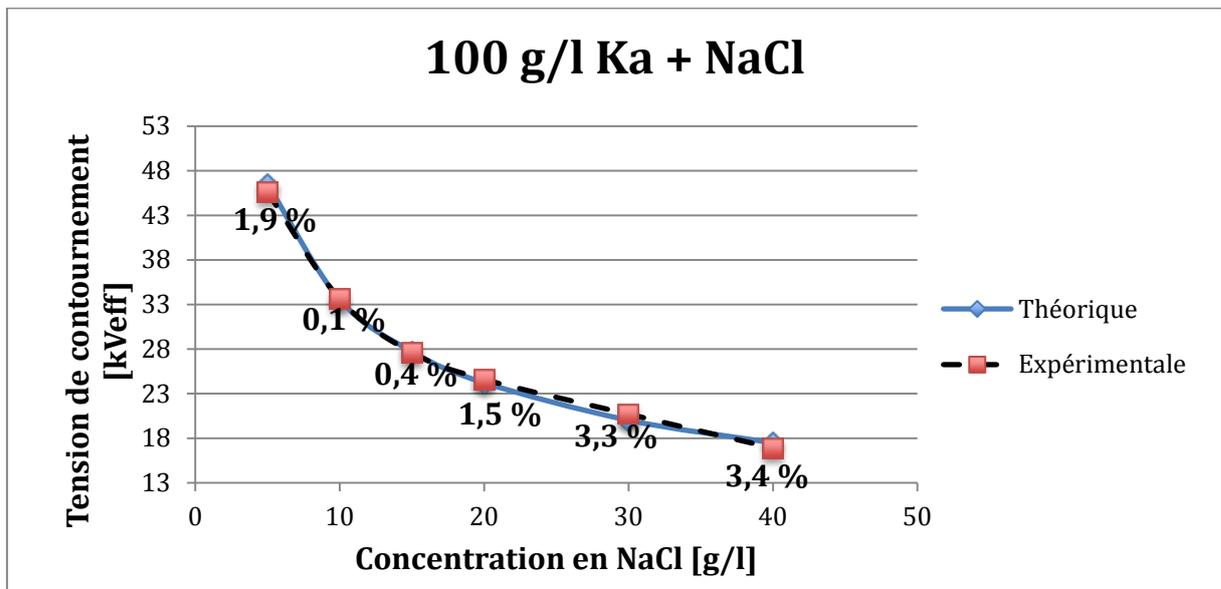
Nature de la pollution	L'eau salée	NaCl + 100 g/l Ka	NaCl + 100 g/l Ki
Valeur de n	1,085	1	1,17

Tableau IV.1 : Valeurs de n en fonction de la nature de l'agent polluant.

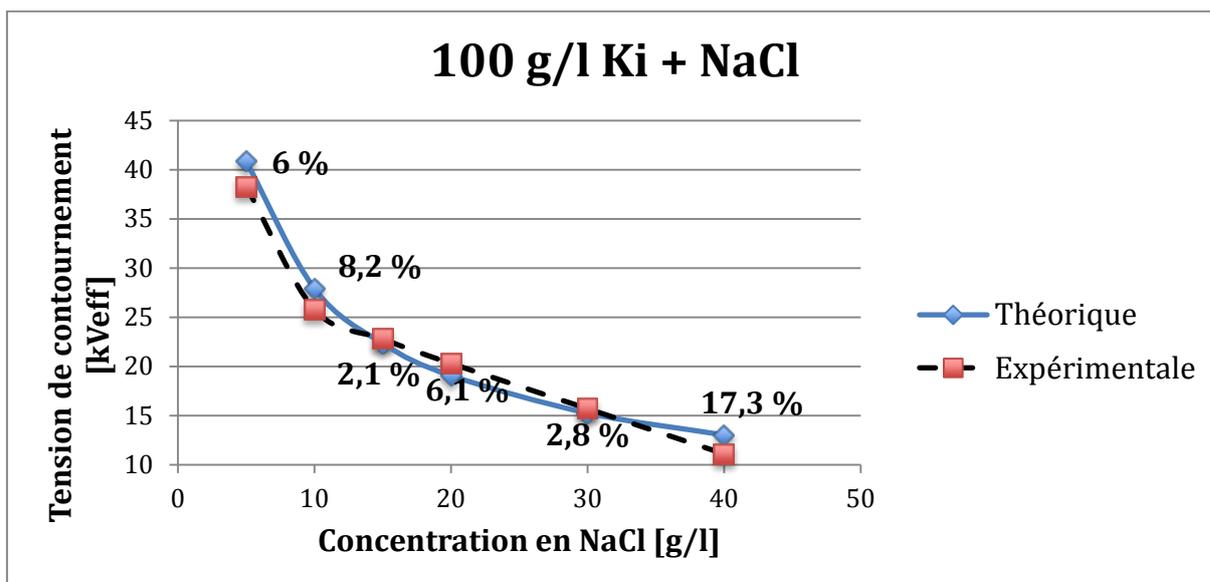
Les courbes théoriques et pratiques de la variation de tension de contournement en fonction de la concentration en NaCl de l'agent polluant dans le cas de la pollution uniforme sont données dans les figure (IV.1.a), (IV.1.b) et (IV.1.c).



(a)



(b)



(c)

Figure IV.1 : Représentation des deux caractéristiques théorique et expérimentale régissant l'évolution de la tension de contournement en fonction de la concentration en NaCl (pollution uniforme)

(a) : pollution marine ; (b) : 100 g/l Kaolin + NaCl ; (c) : 100 g/l Kiesegelguhr + NaCl.

Nous constatons à partir des figure (IV.1.a) et (IV.1.b) que les deux courbes théorique et expérimentale de l'évolution de la tension de contournement sont très proches pour les deux natures de pollution, marine et mixte à base de Kaolin, et cela pour des concentrations en NaCl variant entre 5 et 40 g/l. En effet, l'erreur relative des valeurs obtenues à partir du modèle par rapport à celles mesurées varie entre 0 et 4 %. Ces valeurs sont relativement faibles, surtout que chaque point de la courbe expérimentale représente une moyenne de cinq valeurs légèrement différentes les unes des autres. En revanche, pour la nature de pollution contenant une concentration de 100 g/l en Kiesegelguhr (figure IV.1.c), nous constatons que l'erreur relative est acceptable pour les concentrations en NaCl variant entre 10 et 40 g/l. Cependant, une valeur importante de l'erreur relative (31%) est obtenue pour une concentration en NaCl égale à 5 g/l. L'inconvénient majeur de ce modèle est que, pour une concentration en NaCl variant entre 30 et 40 g/l et une concentration de 100 g/l en Kiesegelguhr, la valeur théorique de la tension de contournement est plus grande que la valeur mesurée au laboratoire avec une erreur maximale de 2 kV_{eff}(17%). Ce point est à prendre en considération lors de l'utilisation de l'interface graphique.

IV.2.2. Dans le cas de la pollution non-uniforme :

Pour cette configuration et pour les trois natures de pollution utilisées, la fonction mathématique adéquate pour modéliser la variation de la tension de contournement en fonction de la concentration en NaCl est :

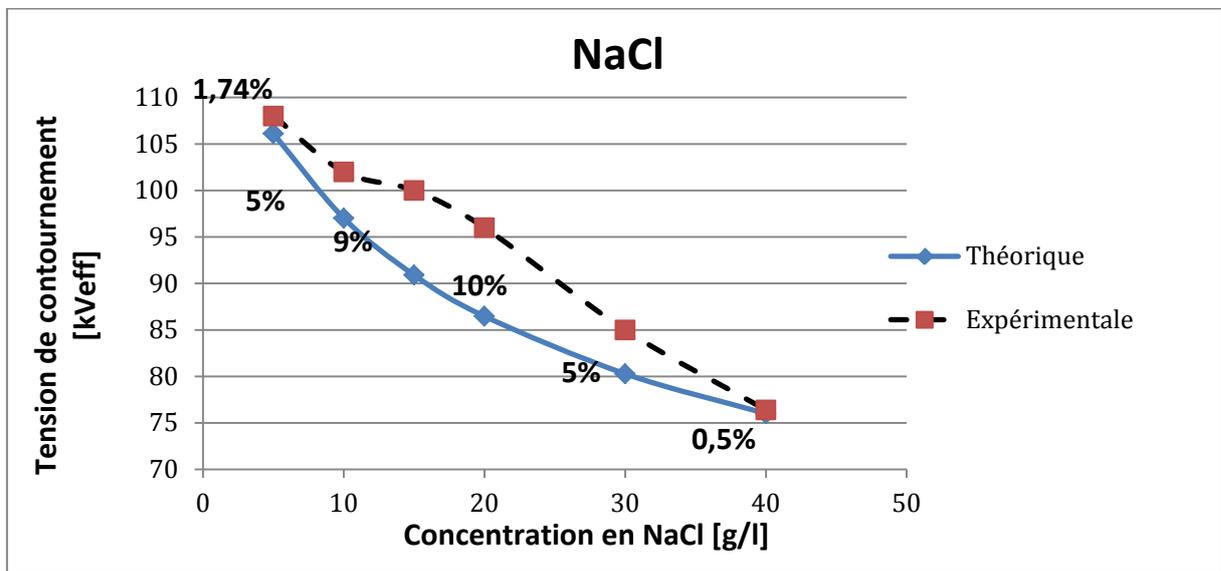
$$U_{cNU} = \frac{160C^{(0,788)} - 70}{nC} \quad [kV_{eff}] \quad (IV-2)$$

Où U_{cNU} est la tension de contournement dans le cas non-uniforme, C la concentration en NaCl et n une constante qui varie comme indiqué dans le tableau (IV.2).

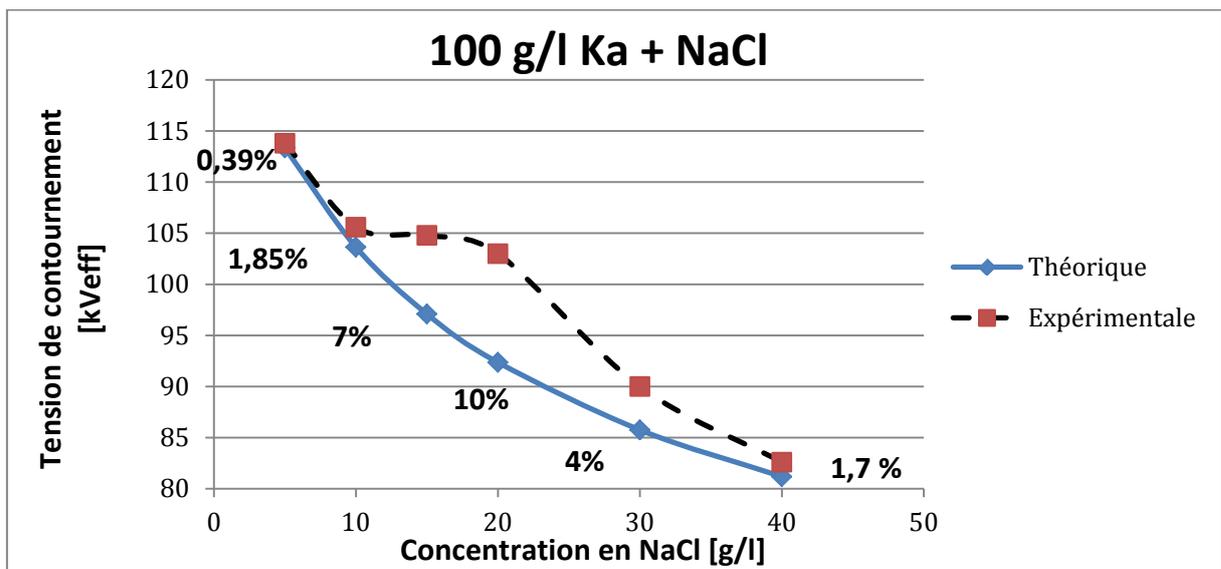
Nature de la pollution	L'eau salée	NaCl + 100 g/l Ka	NaCl + 100 g/l Ki
Valeur de n	0,94	0,88	1,20

Tableau IV.2 : Valeurs de n en fonction de la nature de l'agent polluant.

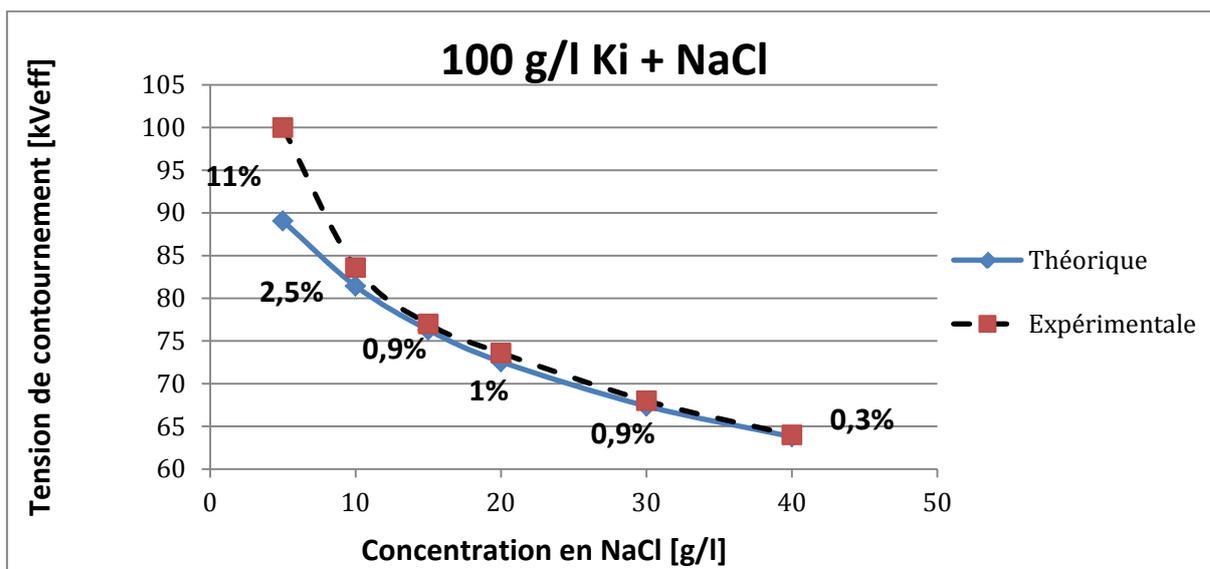
Les courbes théoriques et pratiques correspondantes à la variation de la tension de contournement en fonction de la concentration en NaCl dans le cas de la pollution non-uniforme sont données dans les figures (IV.2.a), (IV.2.b) et (IV.2.c).



(a)



(b)



(c)

Figure IV.2 : Représentation des deux caractéristiques théorique et expérimentale régissant l'évolution de la tension de contournement en fonction de la concentration en NaCl (pollution non-uniforme)

(a) : pollution marine ; (b) : 100 g/l Kaolin + NaCl ; (c) : 100 g/l Kieseluhr + NaCl.

D'après les figures (IV.2.a), (IV.2.b) et (IV.2.c), nous remarquons que les valeurs trouvées par le modèle théorique sont proches des valeurs obtenues au laboratoire avec une erreur relative maximale acceptable.

Du point de vue fiabilité, nous constatons que les courbes théoriques sont au dessous des courbes expérimentales. Une erreur relative maximale de 10% a été enregistrée dans le cas de la pollution marine (figure IV.2.a), 10% dans le cas de la pollution mixte à base de Kaolin (figure IV.2.b) et 11% pour la pollution mixte à base de Kieseluhr (figure IV.2.c), ce qui nous laisse une gamme de sécurité lors de l'utilisation de ce modèle.

D'une manière générale, les résultats obtenus à partir du modèle proposé dans le cas de la pollution non-uniforme sont acceptables, et cela dans un intervalle de concentration en NaCl allant de 5 à 40 g/l.

IV.3. Modélisation du courant de fuite :

IV.3.1. Dans le cas de la pollution uniforme :

Dans cette partie, nous exploitons les résultats expérimentaux obtenus afin d'élaborer un modèle mathématique de calcul de l'amplitude maximale du courant de fuite. Ce modèle n'est pas valable pour la nature de pollution mixte à base de Kieseluhr, car nous ne

possédons pas assez de paramètres, notamment la longueur de l'arc électrique, pour simuler la diminution de l'amplitude maximale du courant de fuite causée par l'assèchement partiel de la pollution sur la surface de l'isolateur.

Etant donné que la courbe de la variation de l'amplitude maximale du courant de fuite possède l'allure d'une exponentielle, elle peut être modélisée par la fonction suivante :

$$I_{fmU}(U, C, n) = \frac{[e^{(0.123U+3.16)}]^{(0.012C+1)}}{100n} \quad [\text{mA}] \quad (\text{IV-3})$$

avec :

I_{fmU} : amplitude maximale du courant de fuite dans le cas de la pollution uniforme ;

U : la valeur efficace de la tension appliquée [kV_{eff}] ;

C : la concentration en NaCl [g/l] ;

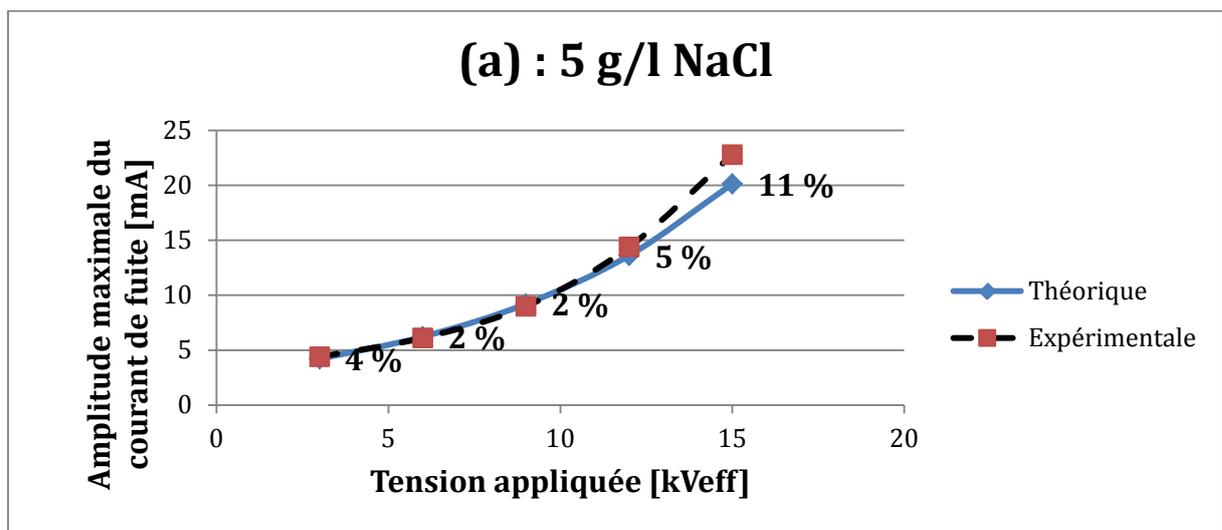
n : est une constante qui varie selon la nature de l'agent polluant.

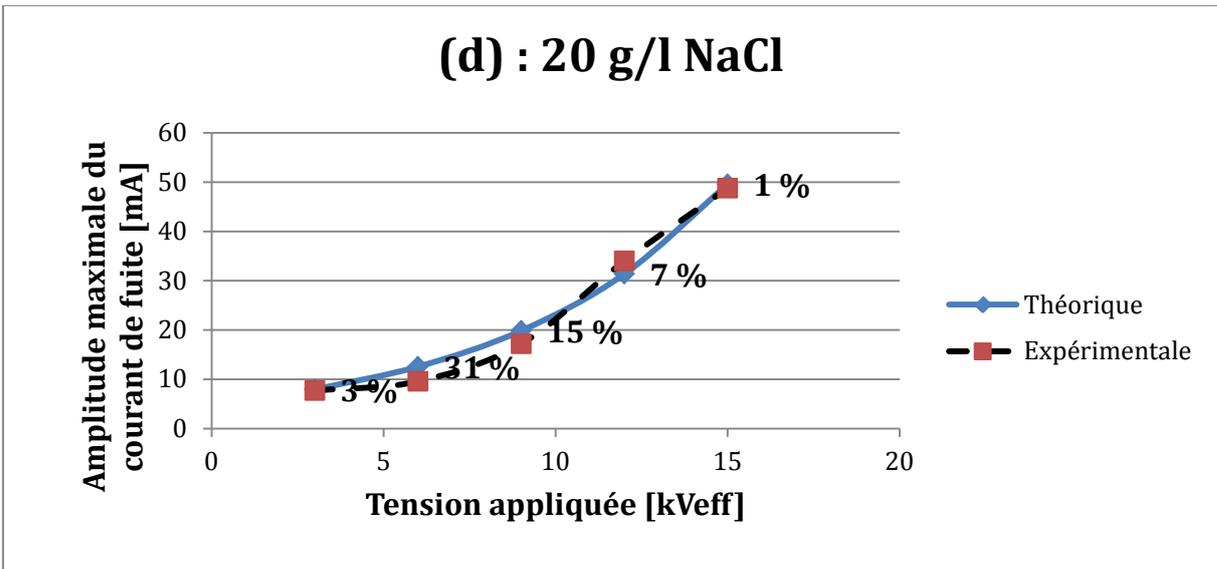
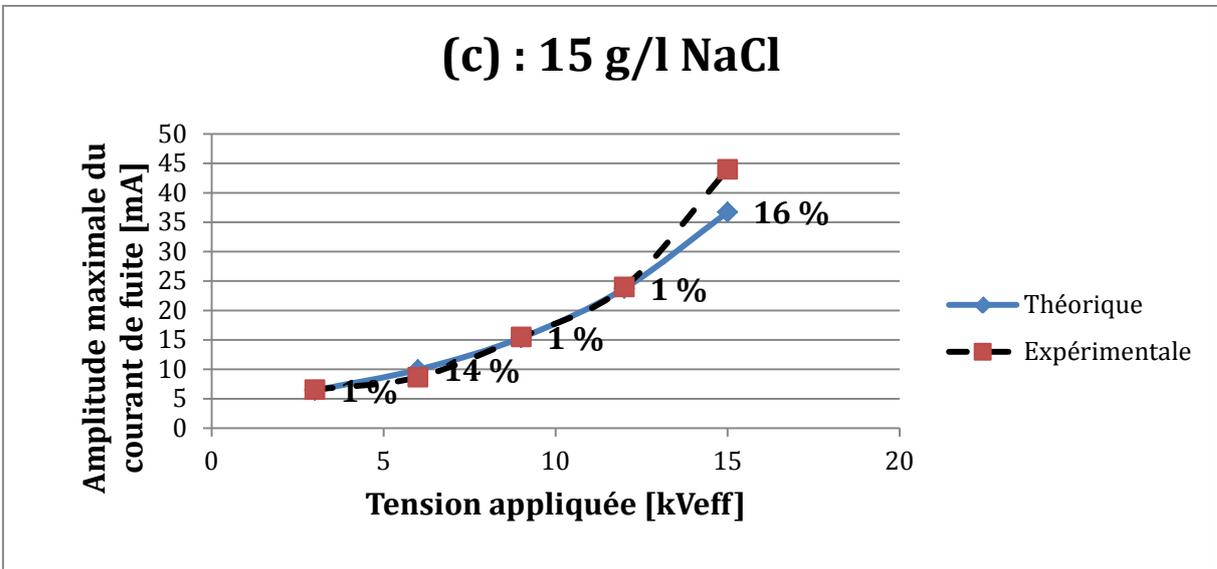
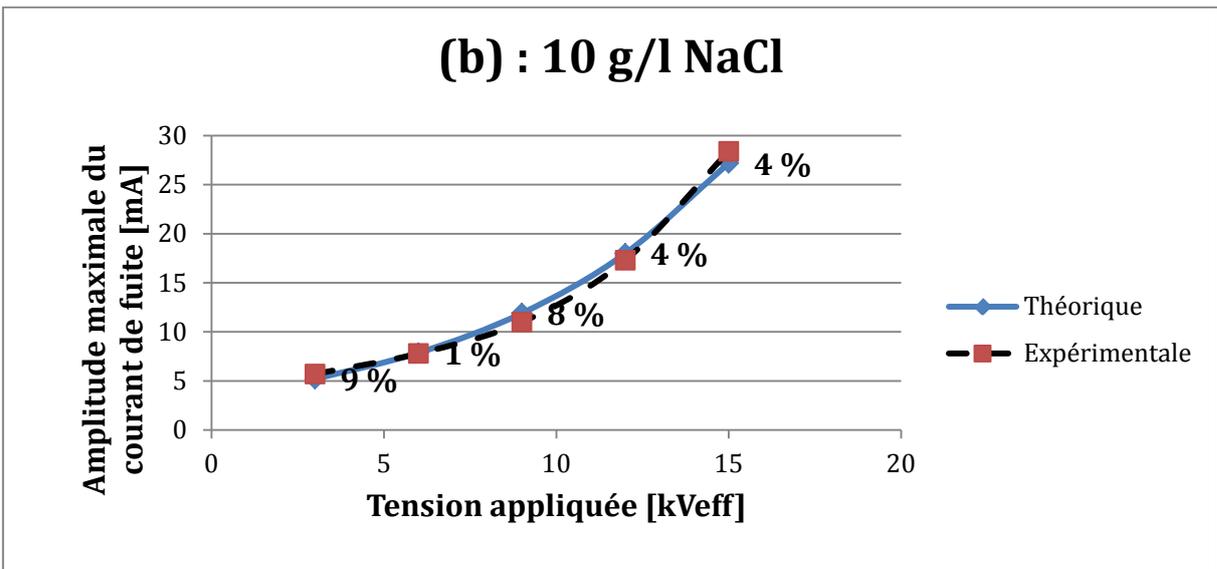
Les valeurs de la constante n correspondantes à la nature de l'agent polluant sont données dans le tableau (IV.3).

Nature de pollution	NaCl	NaCl + 100 g/l Ka
Valeur de n	0.1	1

Tableau IV.3 : Valeurs de n en fonction de la nature de l'agent polluant.

Afin de valider notre simulation, nous comparons les résultats obtenus à partir du modèle aux résultats mesurés au laboratoire. Les résultats sont illustrés dans les figure (IV.3) et (IV.4).





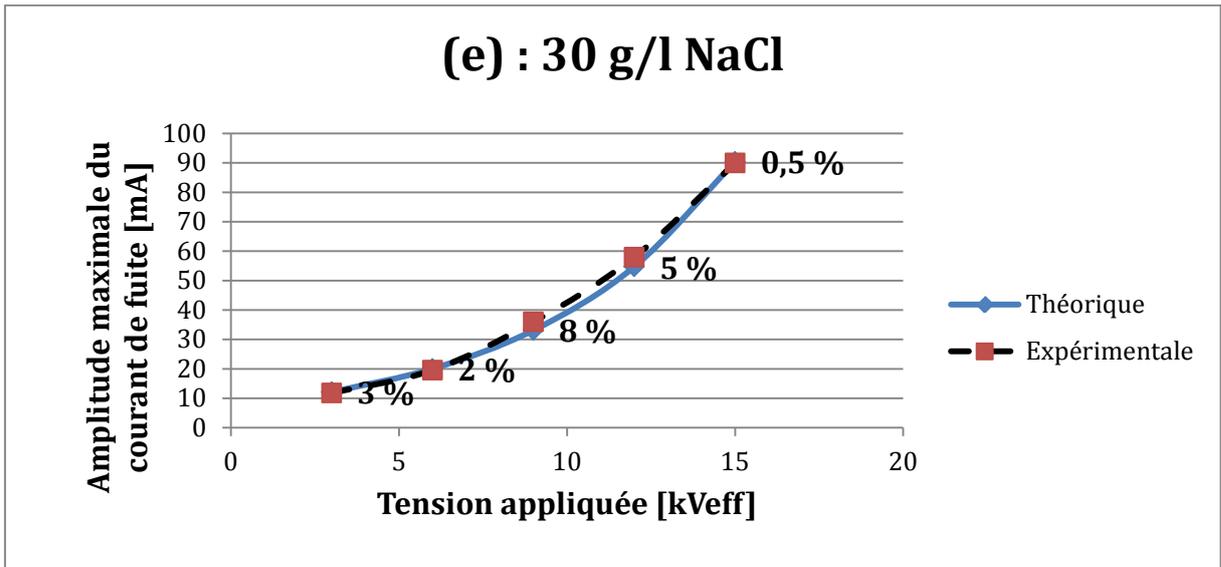
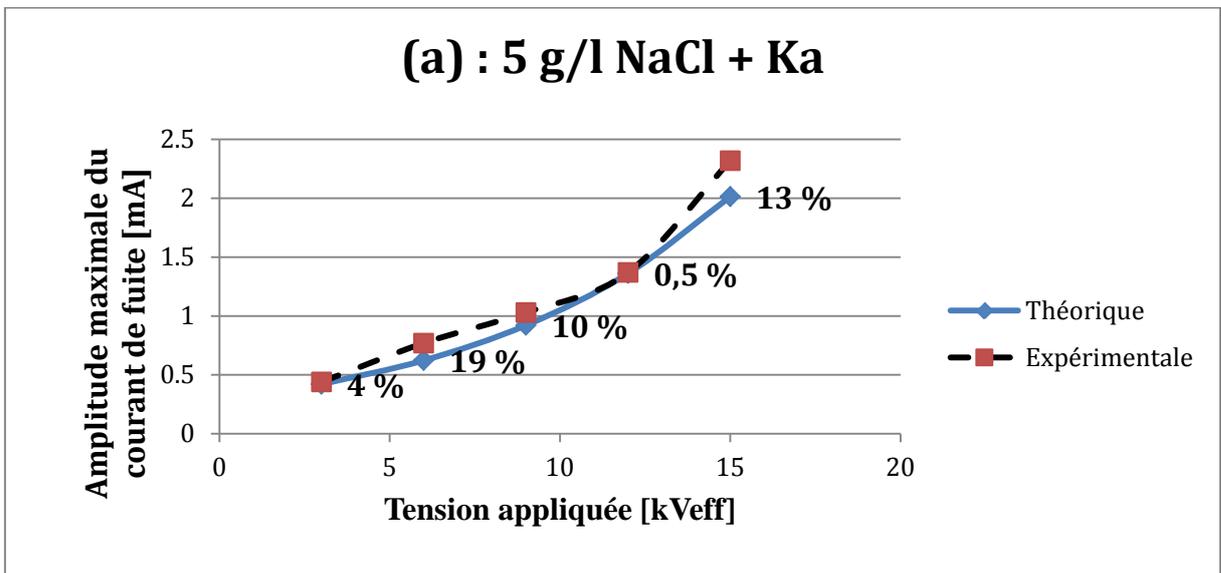
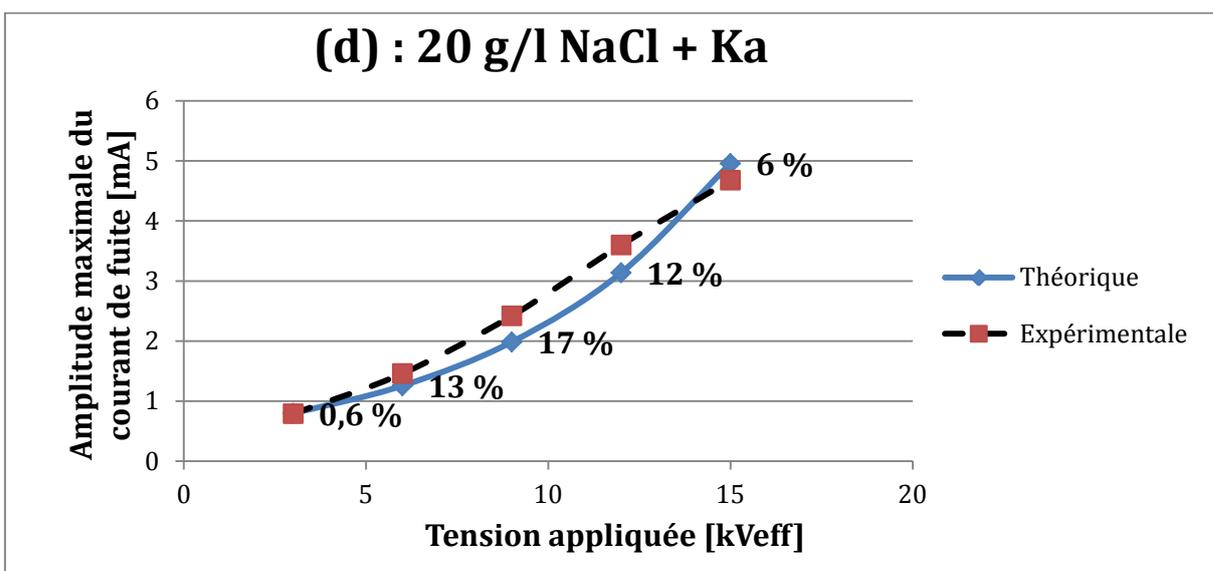
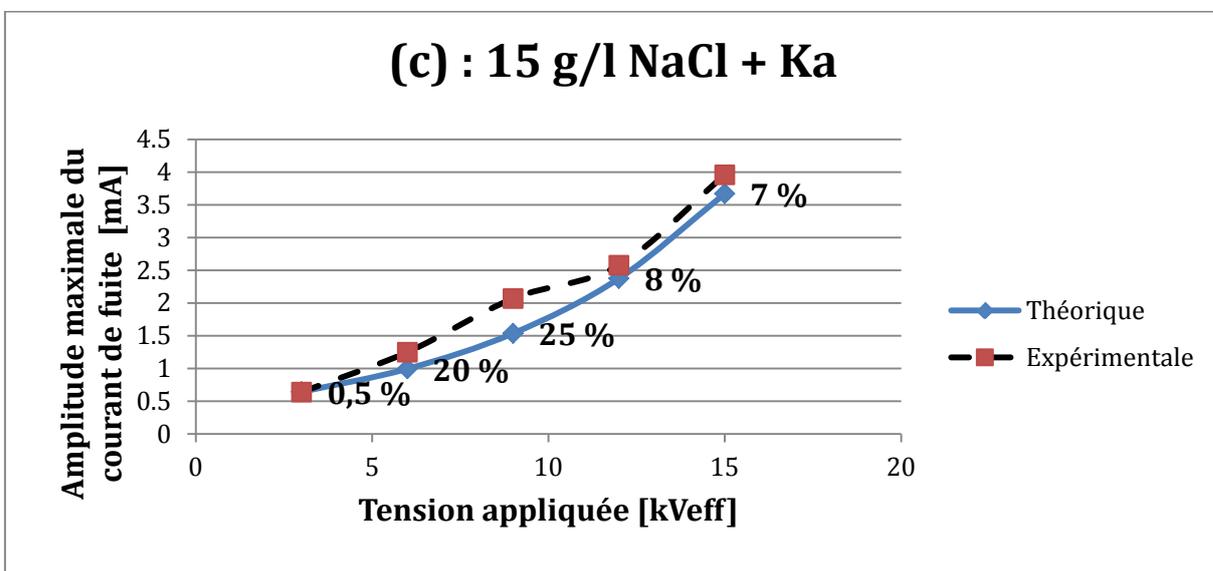
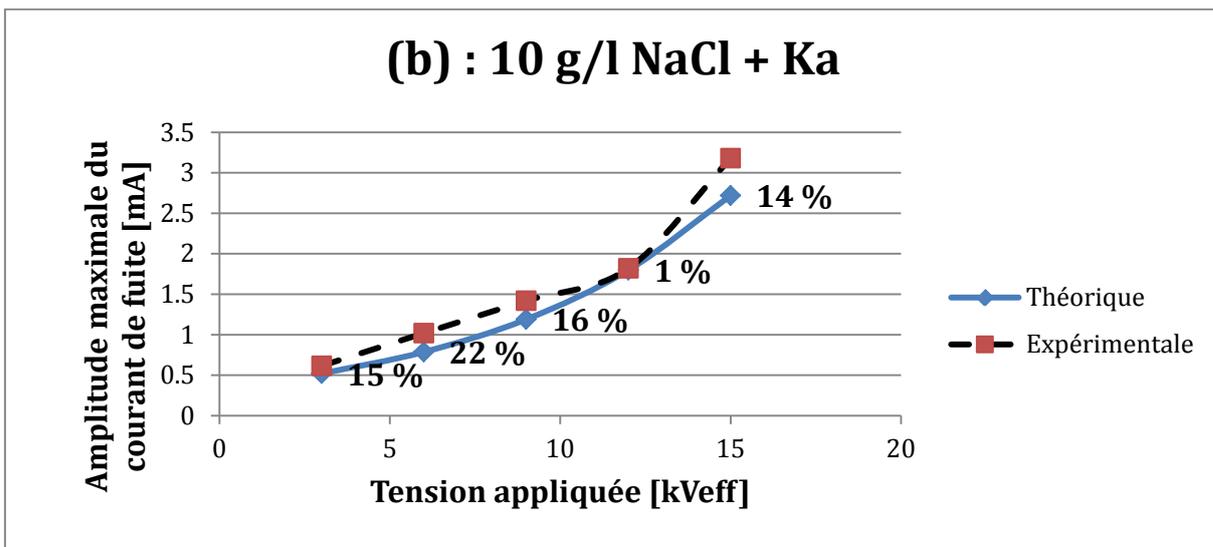


Figure IV.3 : Représentation des deux amplitudes maximales du courant de fuite théorique et expérimentale en fonction de la tension appliquée pour les différentes concentrations en NaCl étudiées (pollution uniforme) :

(a) : 5 g/l; (b) : 10 g/l; (c) : 15 g/l; (d) : 20 g/l; (e) : 30 g/l.





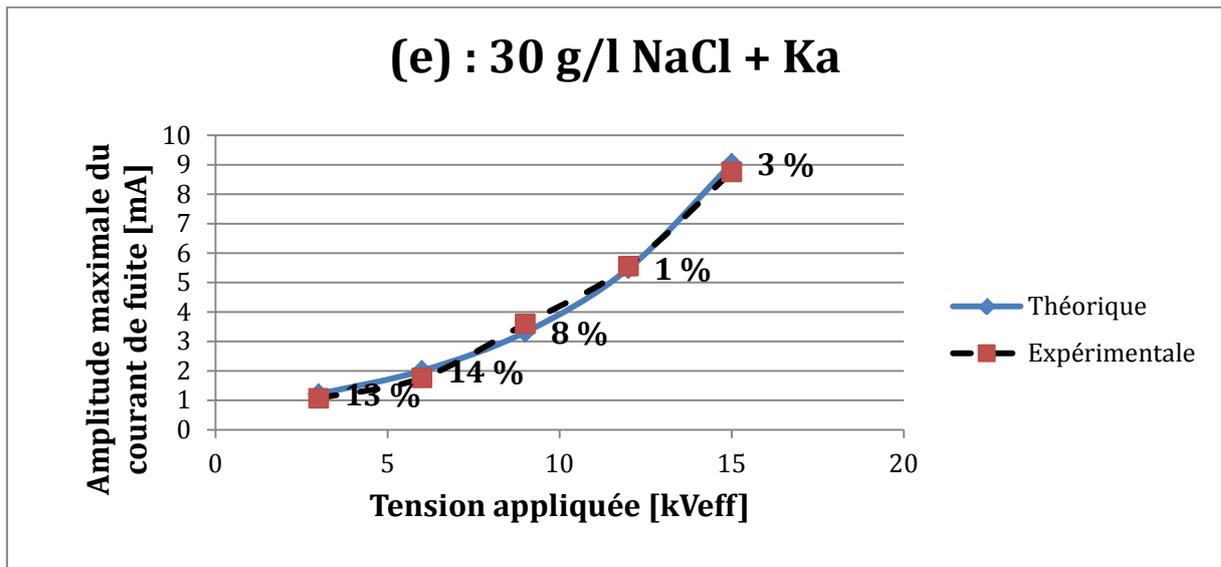


Figure IV.4 : Représentation des deux amplitudes maximales du courant de fuite théorique et expérimentale en fonction de la tension appliquée pour une concentration de 100g/l de Kaolin avec les différentes concentrations en NaCl étudiées (pollution uniforme) :

(a) : 5 g/l; (b) : 10 g/l; (c) : 15 g/l; (d) : 20 g/l; (e) : 30 g/l.

Nous observons à partir de la figure (IV.3), que dans le cas de la pollution marine uniformément répartie sur la surface de l'isolateur, les résultats obtenus à partir de l'équation (IV-3) sont très proches de ceux mesurés au laboratoire. Nous observons également que les courbes obtenues à partir du modèle proposé ont la même allure que les courbes expérimentales.

Nous constatons que l'erreur relative est relativement faible pour les différentes concentrations en NaCl et des tensions variant entre 3 et 15 kV_{eff}. En effet, d'une façon générale l'erreur relative ne dépasse pas 15 % pour les différents points mesurés. Néanmoins, nous remarquons que l'erreur relative vaut 31 % pour une concentration en NaCl de 20 g/l et une tension appliquée égale à 6 kV_{eff}.

Nous notons pour la pollution mixte contenant 100 g/l de Kaolin (Figure IV.4), que les deux caractéristiques (expérimentale et théorique) sont très proches. Effectivement, l'amplitude maximale du courant de fuite augmente lentement pour des niveaux de la tension appliquée allant de 3 à 9 kV_{eff} et rapidement ailleurs. Nous constatons également que l'erreur relative varie d'une manière générale entre 0,5 et 20 % à l'exception de deux valeurs enregistrées à 22 et 25%.

Toutefois, ce modèle ne donne pas de bons résultats pour la nature de pollution mixte contenant 100 g/l en Kieselguhr, car l'allure de la courbe de variation de l'amplitude maximale du courant de fuite est différente pour cette nature comparée aux deux autres natures étudiées. En effet, l'activité des décharges électriques intenses constatée sur la surface de l'isolateur lors de l'application de cette nature de pollution cause l'apparition de bandes

sèches. Ces dernières engendrent une augmentation de l'impédance équivalente vue entre les électrodes, et donc une diminution brusque de l'amplitude maximale du courant de fuite.

IV.3.2. Dans le cas de la pollution non uniforme :

Nous nous sommes basés sur les courbes expérimentales pour déterminer la valeur maximale du courant de fuite. Nous remarquons tout d'abord que la variation du courant de fuite est pratiquement linéaire et surtout progressive en fonction de la tension appliquée (de 0 à 30kV_{eff}) donc :

$$I_{fmNU}(U, n) = (aU)^n.$$

Où U est le niveau tension appliquée [kV_{eff}], n est une constante qui dépend de la nature de l'agent polluant.

Nature de la pollution	L'eau salée	NaCl + 100 g/l Ka	NaCl + 100 g/l Ki
Valeur de n	1,015	1	1,05

Tableau IV.4 : Valeurs de n en fonction de la nature de l'agent polluant.

L'amplitude maximale du courant de fuite augmente en fonction de la concentration en sel pour un même palier de la tension appliquée sans modifier l'allure de la courbe, cela a été constaté pour les différentes nature de pollution étudiées. Donc la pente a est une variable qui dépend de la concentration en sel tel que :

$$a = (be^{d.C}).$$

où b et d sont des constantes empiriques tel que : $b = 19,969$ et $d = 0,007$.

C est la concentration en NaCl (g/l).

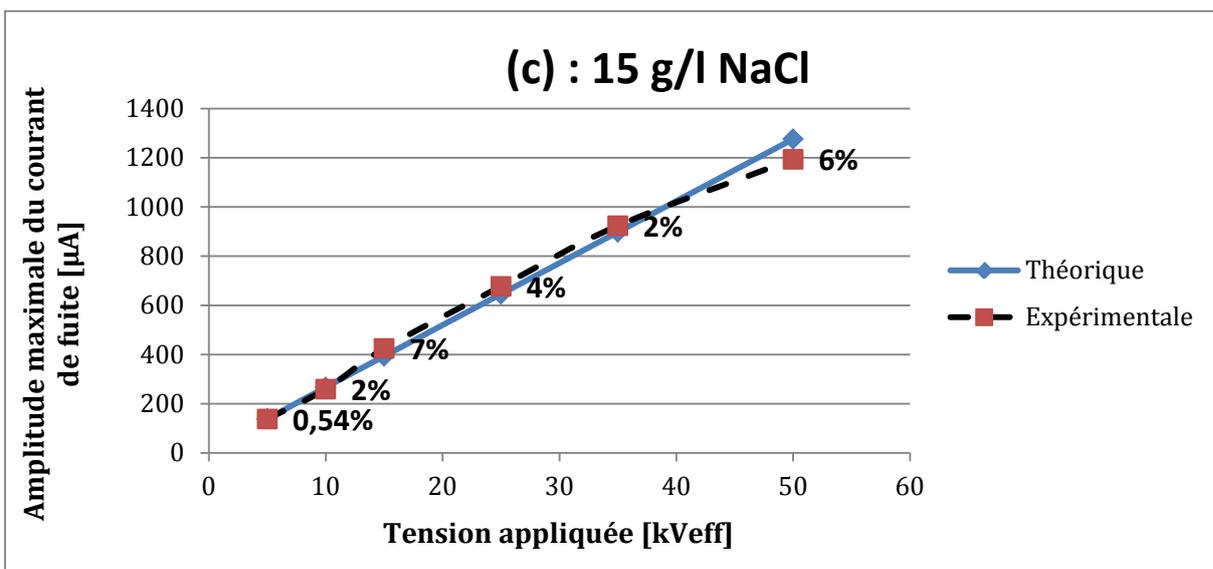
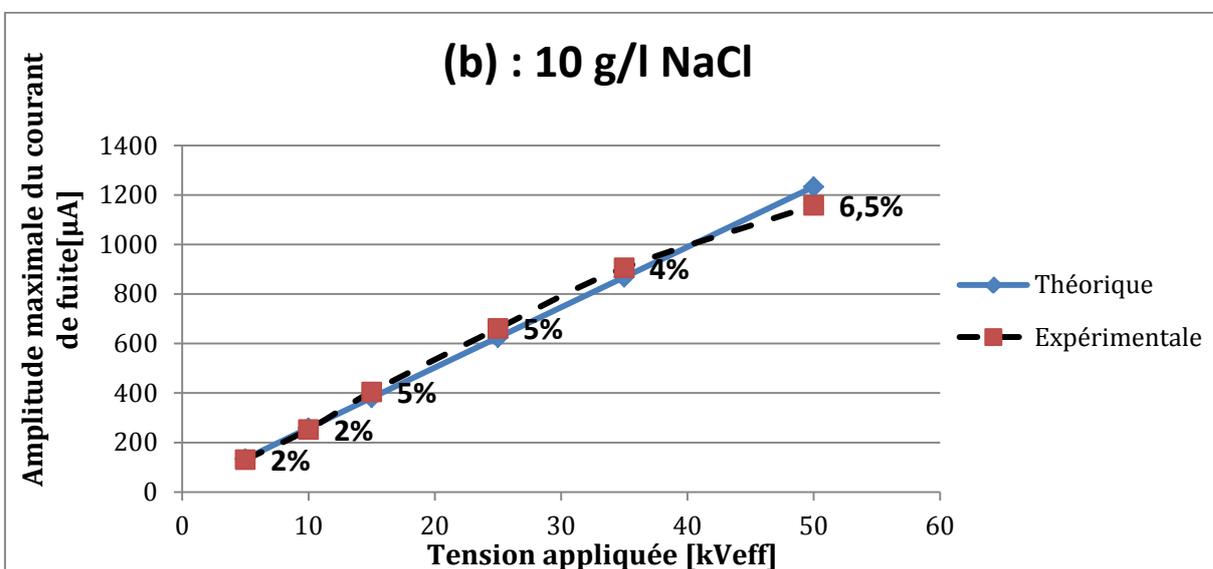
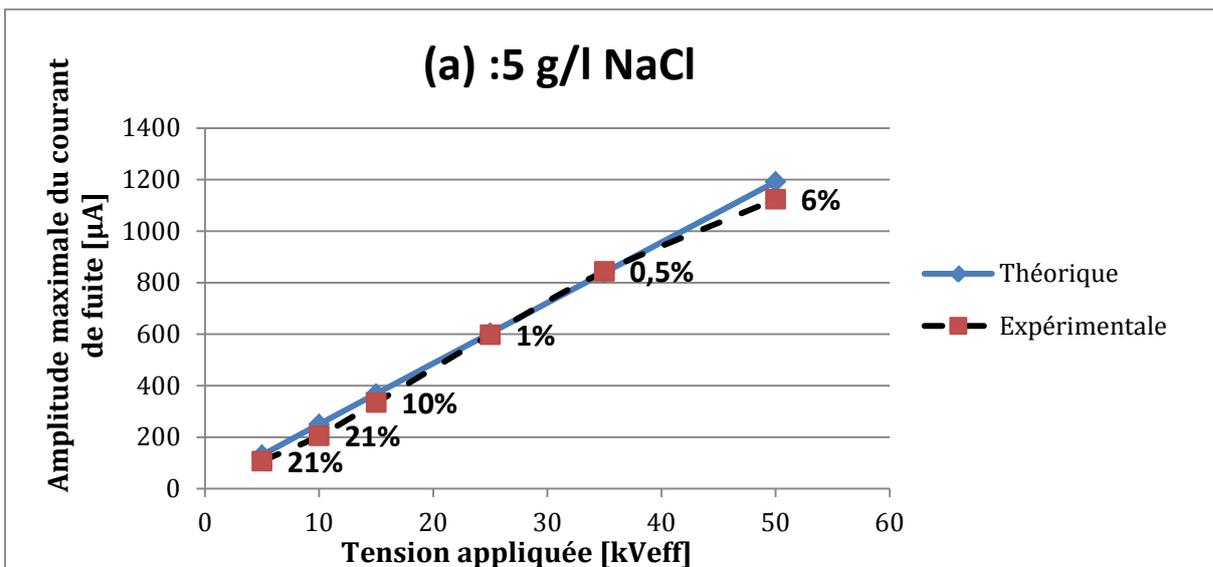
Alors l'expression du courant devient :

$$I_{fmNU}(U, C, n) = (be^{d.C} U)^n.$$

Nous remarquons aussi d'après les résultats expérimentaux que la variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction des grands paliers de tension appliquée (35 et 50 kV_{eff}) n'est pas parfaitement linéaire. C'est pour cela que nous insérons à l'équation précédente une fonction logarithmique pour mieux s'approcher de la valeur expérimentale pour les paliers supérieurs à 30 kV_{eff} sans trop modifier les résultats de la partie linéaire.

$$I_{fmNU}(U, C, n) = (19,969e^{0,007C} U + 10 \ln(U + 1))^n \quad [\mu A]. \quad (IV-4)$$

Une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats théoriques avec l'erreur relative correspondante à chaque point pour les différentes concentrations en NaCl et différentes natures de pollution est représentée sur les figures (IV. 5), (IV.6) et (IV.7).



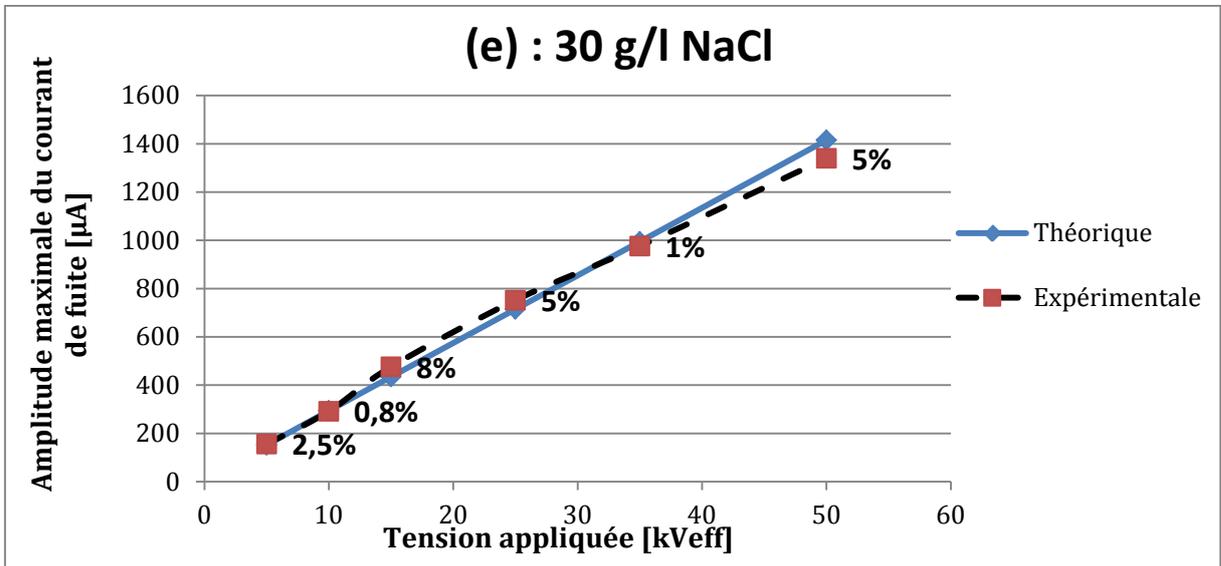
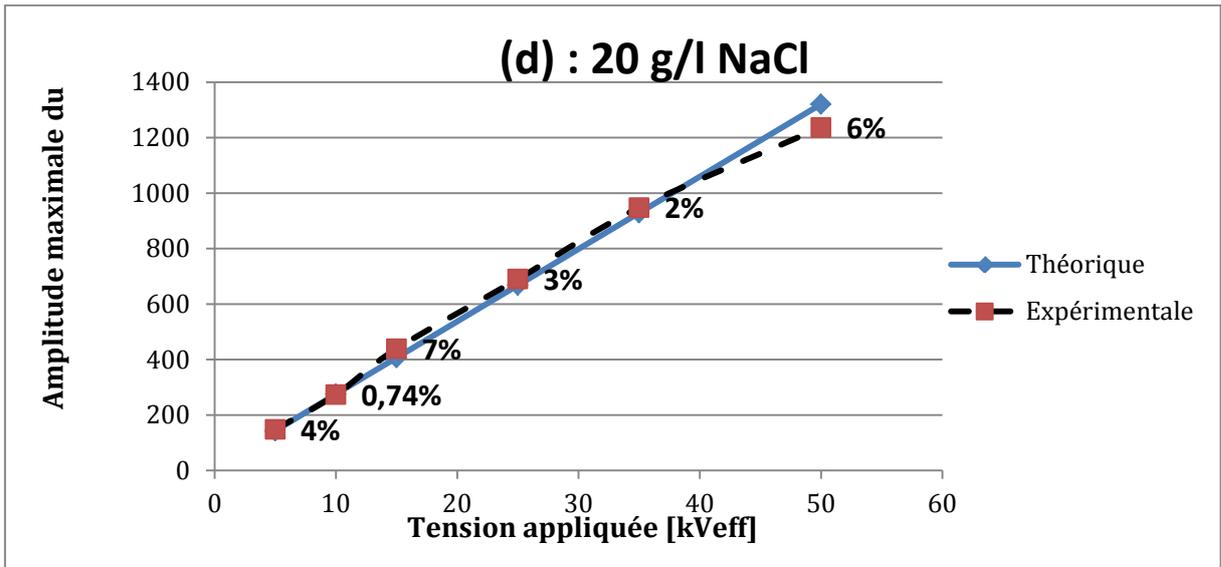
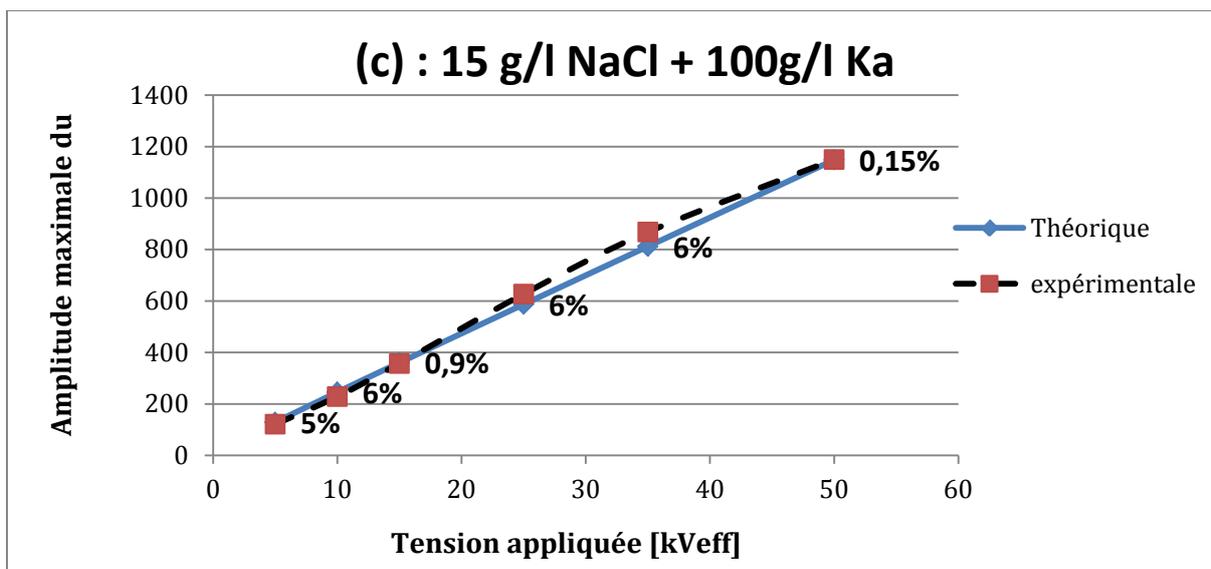
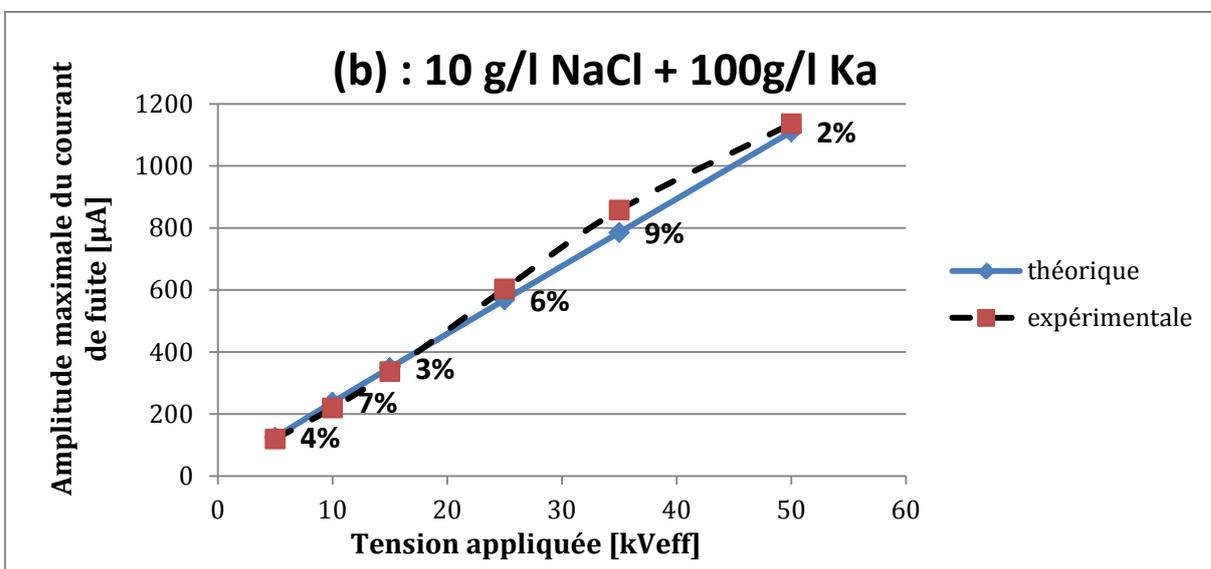
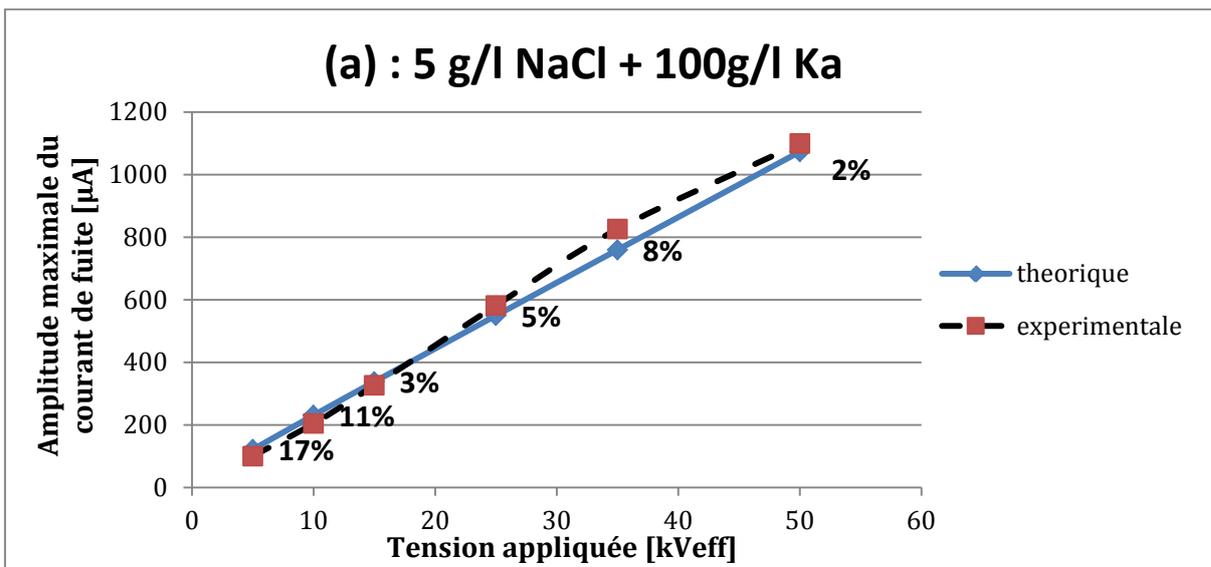


Figure IV.5 : Modèle du courant de fuite en fonction de la tension appliquée dans le cas de la pollution non-uniforme pour les concentrations en NaCl :

(a) : 5 g/l; (b) : 10 g/l; (c) : 15 g/l; (d) : 20 g/l; (e) : 30 g/l.



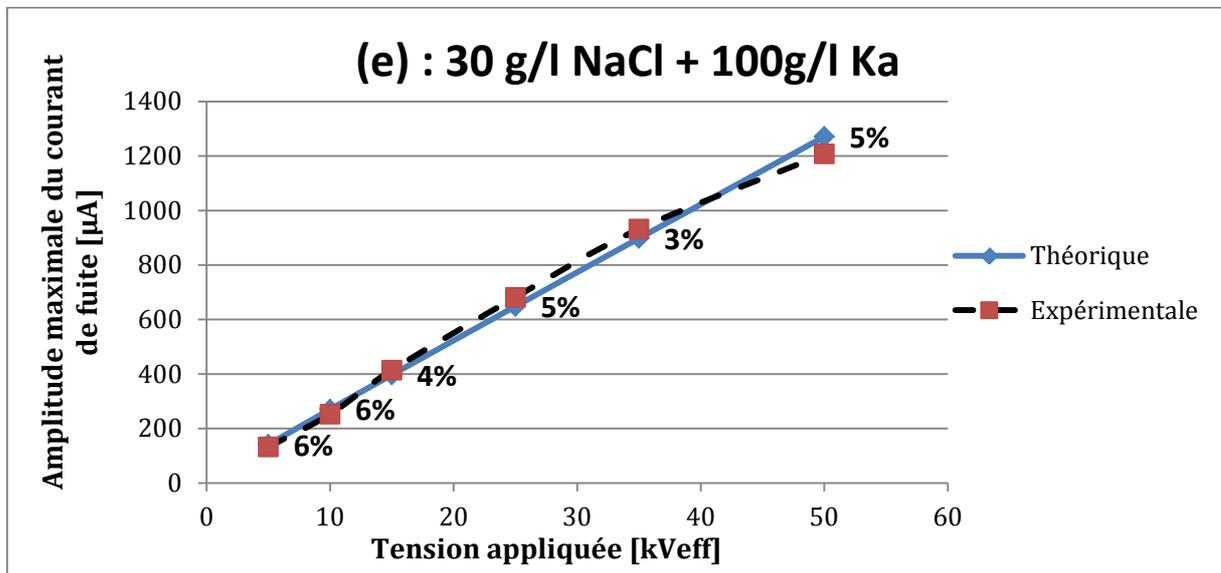
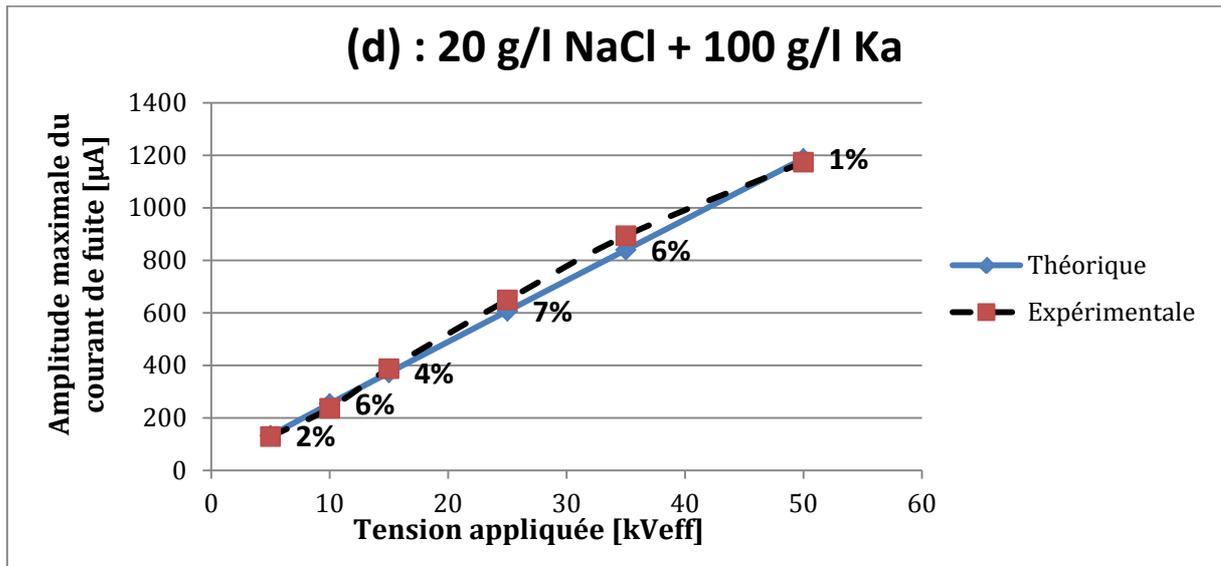
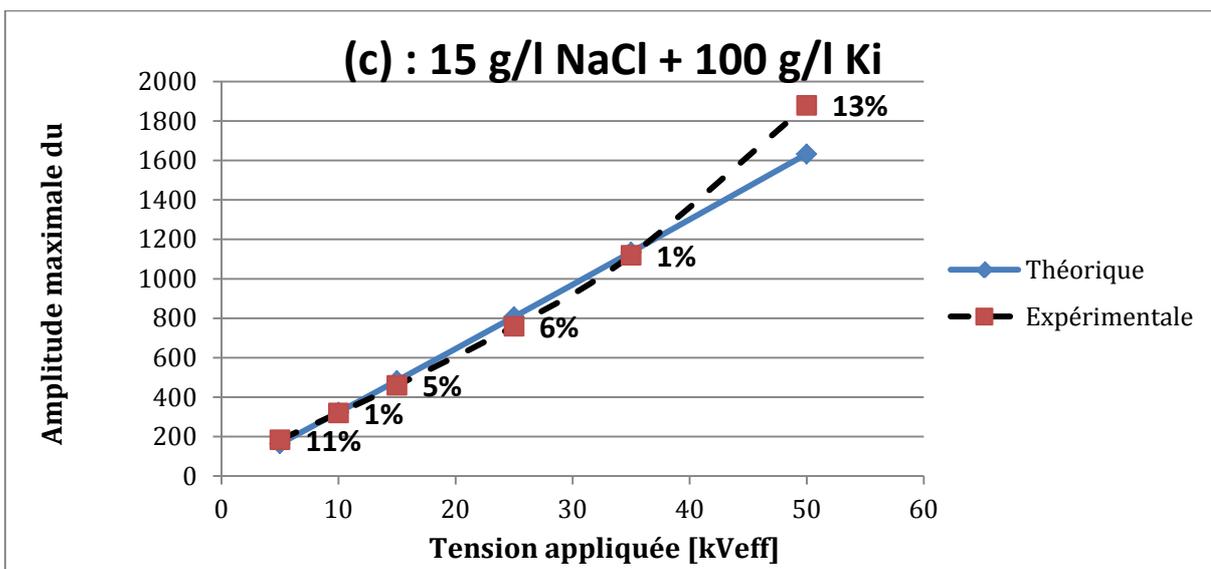
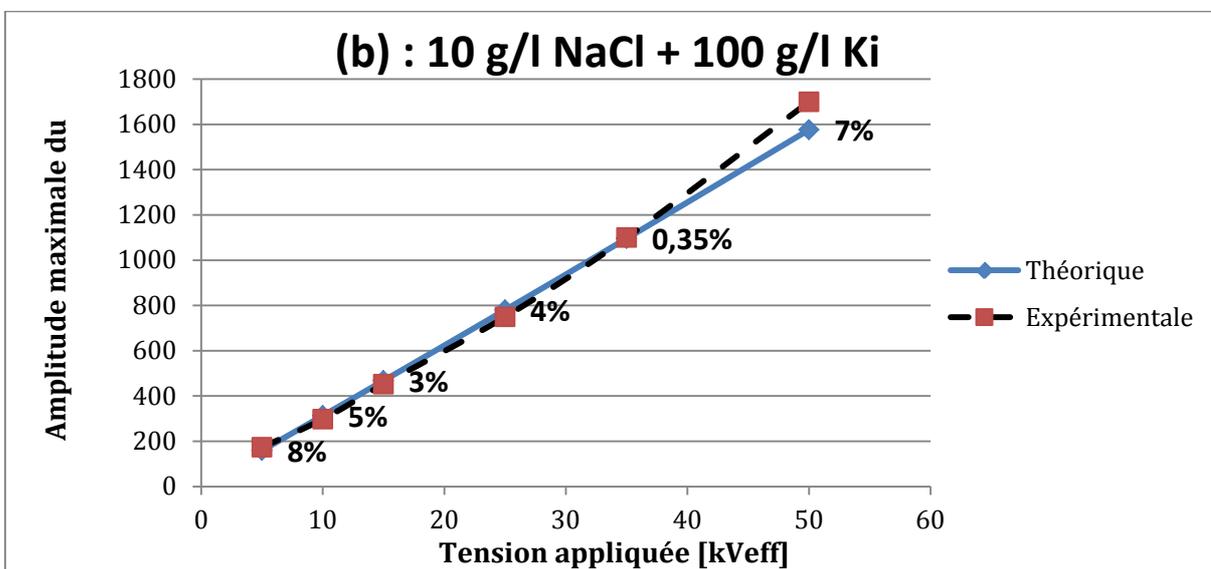
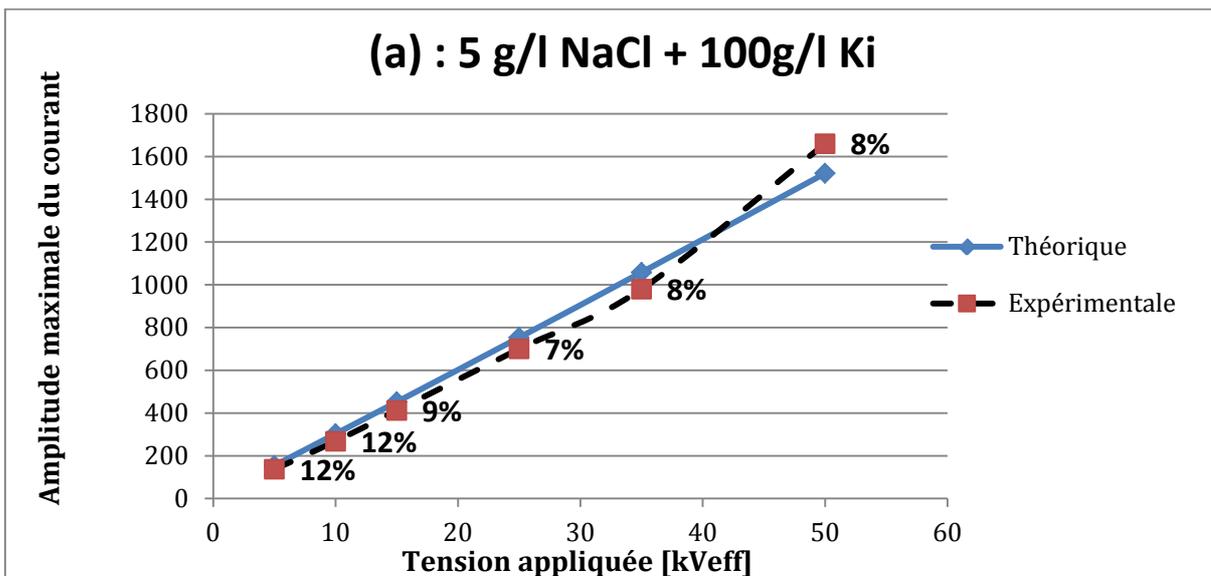


Figure IV.6 : Modèle du courant de fuite en fonction de la tension appliquée dans le cas de la pollution non-uniforme pour la pollution mixte contenant 100 g/l en Kaolin et les concentrations en NaCl :

(a) : 5 g/l; (b) : 10 g/l; (c) : 15 g/l; (d) : 20 g/l; (e) : 30 g/l.



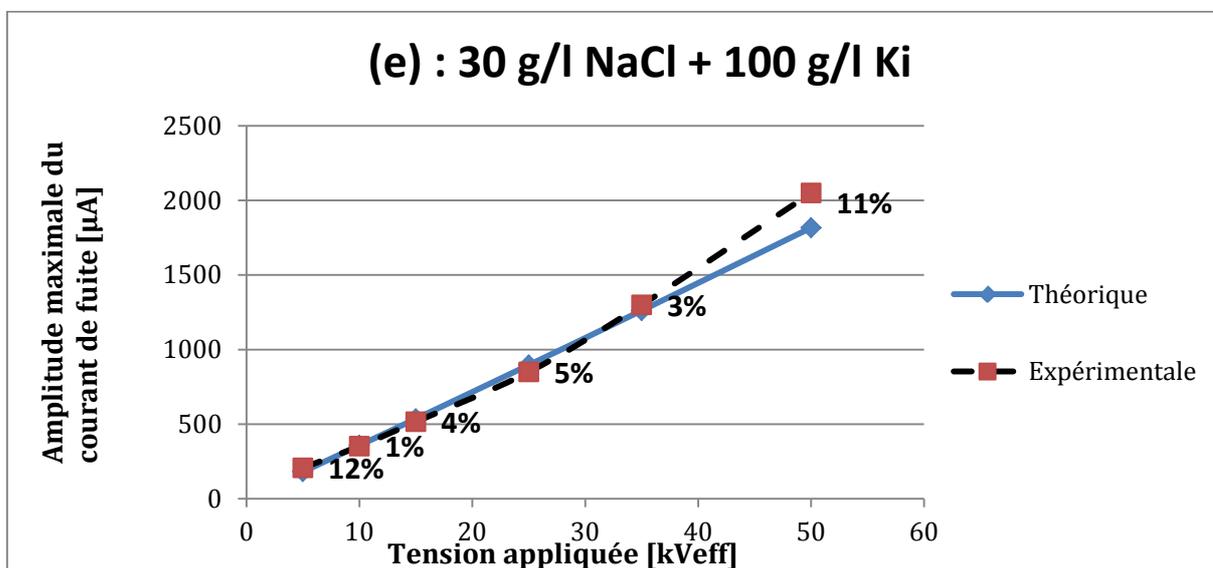
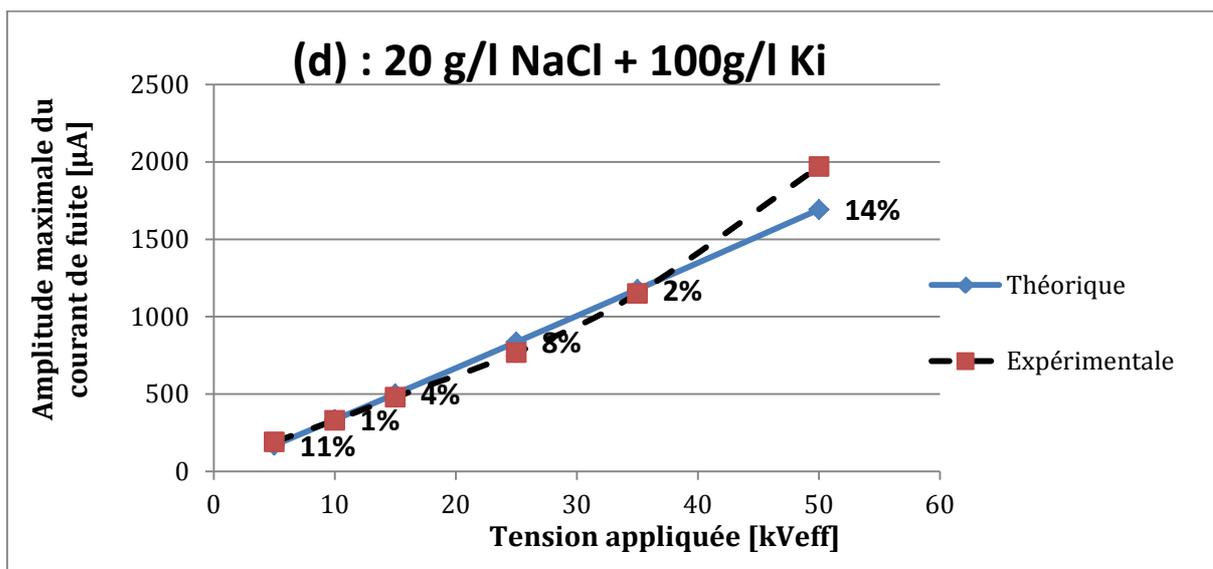


Figure IV.7 : Modèle du courant de fuite en fonction de la tension appliquée dans le cas de la pollution non-uniforme pour la pollution mixte contenant 100 g/l en Kieselguhr et les concentrations en NaCl :

(a) : 5 g/l; (b) : 10 g/l; (c) : 15 g/l; (d) : 20 g/l; (e) : 30 g/l.

D’une façon générale, les résultats théoriques obtenus à l’aide de l’équation empirique (IV-4) concordent assez bien avec les valeurs du courant de fuite mesurées au laboratoire à une erreur relative acceptable.

D’après la figure (IV.5) nous remarquons que les valeurs théoriques correspondantes à des concentrations en NaCl de (10, 15, 20 et 30) g/l sont très proches des valeurs mesurées. Cependant, pour une concentration en NaCl de 5 g/l nous enregistrons une erreur relative maximale de 21% (à 5 et 10 kV_{eff}).

Pour la pollution mixte à base de Kaolin (figure IV.6), nous remarquons aussi que les valeurs théoriques du courant de fuite pour des concentrations en NaCl de (10, 15, 20 et 30) g/l sont plus proches des valeurs expérimentales par rapport à l'autre concentration utilisée. Une erreur maximale de 17% a été enregistrée pour une concentration en NaCl de 5 g/l. Cette erreur représente une différence de 20 μA .

Cependant, pour la pollution mixte à base de Kieselguhr (figure IV.7) et pour les paliers de tension appliquée (de 0 à 35 kV_{eff}), les valeurs théoriques et les valeurs mesurées du courant de fuite sont très proches par rapport aux grands paliers de tension appliquée (40 et 50 kV_{eff}). Ceci a été constaté pour les différentes concentrations en NaCl utilisées.

Remarque :

Ce modèle mathématique est valable juste dans le cas de la pollution non-uniforme dont l'agent polluant est pré-déposé sur la surface intérieure de la chaîne d'isolateur U120B.

IV.4. Discussion :

La modélisation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, de la concentration en NaCl et de la nature de pollution pour les deux configurations de la pollution, uniforme et non-uniforme, permet de voir le comportement de l'isolateur pour des valeurs autres que celles mesurées expérimentalement.

Dans le cas de la pollution uniforme, le modèle que nous avons proposé permet de simuler l'évolution du courant de fuite en fonction du niveau de la tension appliquée et de la concentration en NaCl, et cela pour les deux natures de pollution, marine et mixte contenant une concentration de 100 g/l en Kaolin.

Les résultats obtenus à partir du modèle proposé dans le cas de la pollution non uniforme sont très proches des résultats mesurés au laboratoire. Ce modèle peut donc être utilisé pour estimer l'amplitude du courant de fuite pour toutes les concentrations en NaCl variant de 5 à 30 g/l, et pour tous les niveaux de la tension appliquée allant de 5 à 50 kV_{eff} .

IV.5. Réalisation d'une interface graphique :

En utilisant les modèles théoriques de la tension de contournement et du courant de fuite obtenus dans la partie précédente, nous réalisons une interface graphique en utilisant le logiciel MATLAB® [25], et cela afin de calculer la tension de contournement et l'amplitude maximale du courant de fuite dans les deux cas de pollution étudiés.

Dans un premier temps et afin de calculer la tension de contournement pour une concentration en NaCl donnée, nous utilisons les deux équations (IV-1) et (IV-2) selon la configuration de la pollution voulue. La fonction qui nous permet de calculer la tension de contournement est :

$$U_c = p U_{cU} + (1 - p) U_{cNU} \quad [\text{kV}_{\text{eff}}] \quad (\text{IV-5})$$

Une combinaison entre les deux équations (IV-3) et (IV-4) permet d'obtenir un modèle mathématique qui régit le comportement de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction des trois paramètres U , C et n , qui sont respectivement le niveau de tension appliquée, la concentration en NaCl et la nature de l'agent polluant, et cela pour les deux configurations de la pollution étudiées. Cette équation est donnée ci-dessous :

$$I_{fm} = p 1000 I_{fmU} + (1 - p) I_{fmNU} \quad [\mu\text{A}] \quad (\text{IV-6})$$

Où p est une constante qui varie selon la configuration de la pollution sur la surface de l'isolateur comme indiqué dans le tableau (IV.5).

Configuration de la pollution	cas uniforme	cas non-uniforme
valeur de p	1	0

Tableau IV.5 : Valeurs de p en fonction de la configuration de la pollution.

Nous insérons dans un premier lieu un menu «Choix de configuration» qui permet de choisir entre les deux cas de la configuration de la pollution, uniforme ou non-uniforme.

Ensuite, nous choisissons la nature de la pollution parmi les trois choix proposés dans le menu «Nature de la pollution», à savoir : NaCl, 100g/l Ka+NaCl ou 100g/l Ki+NaCl.

Puis, nous devons saisir une valeur qui correspond à la concentration en NaCl dans le champ réservé à cet effet. Cette valeur doit être comprise entre 2 et 80 g/l.

Une fois la concentration en NaCl saisie, le programme calcule la tension de contournement en utilisant l'équation (IV-5). La valeur calculée est affichée dans le champ «Ucontournement».

Par la suite, nous indiquons deux valeurs limites de variation de la tension appliquée «Umin» et «Umax». La valeur de «Umin» doit être supérieure à 1kV_{eff} et celle de «Umax» inférieure à la tension de contournement. Dans le cas contraire, un message d'erreur «Entrée invalide ...» est affiché à l'écran et «Umax» prend la valeur de la tension de contournement.

L'utilisateur doit aussi définir le nombre d'échantillons (N) pour lesquels le courant de fuite sera calculé avec l'équation (IV-6).

Une fois toutes ces étapes réalisées, nous obtenons deux listes, «Uappliquée» et «Ifm», qui correspondent respectivement au niveau de la tension appliquée et à l'amplitude maximale du courant de fuite. Chacune de ces deux listes contient (N) éléments et en cliquant sur un niveau de la tension appliquée donné dans la liste de gauche, nous obtenons un indicateur bleu qui se positionne sur la valeur de l'amplitude maximale du courant de fuite correspondante sur la liste de droite (Figure IV.8).

Afin de visualiser la variation de l'amplitude maximale du courant de fuite en fonction de la tension appliquée pour des paliers de tension variant entre «Umin» et «Umax», nous insérons un graphique dans la partie droite de l'interface.

Il est aussi possible d'enregistrer les vecteurs «Uappliquée» et «Ifm» sous deux formats, Fichier Matlab (*.mat) ou Fichier Excel (*.xls). Pour cela, il suffit d'appuyer sur le bouton «Enregistrer». A titre d'illustration, une simulation à l'aide de l'interface graphique est donnée dans la figure (IV.8).

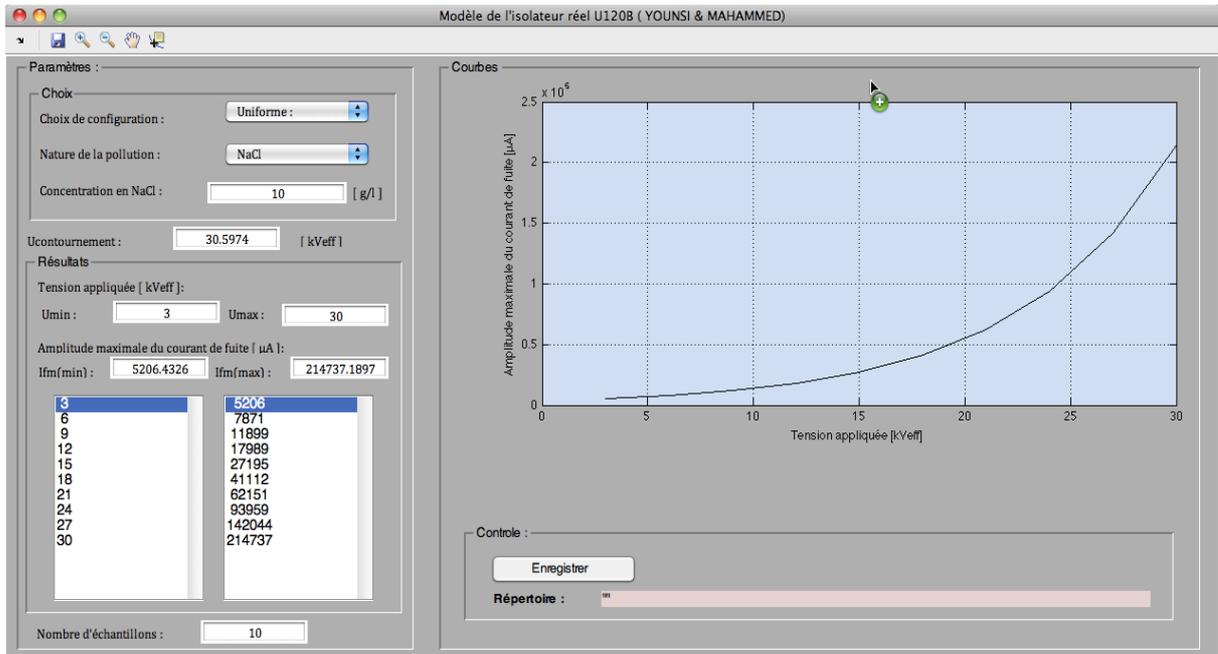


Figure IV.8 : Exemple de simulation en utilisant l'interface graphique proposée.

L'organigramme du fonctionnement de l'interface graphique que nous proposons est donné à la figure (IV.9).

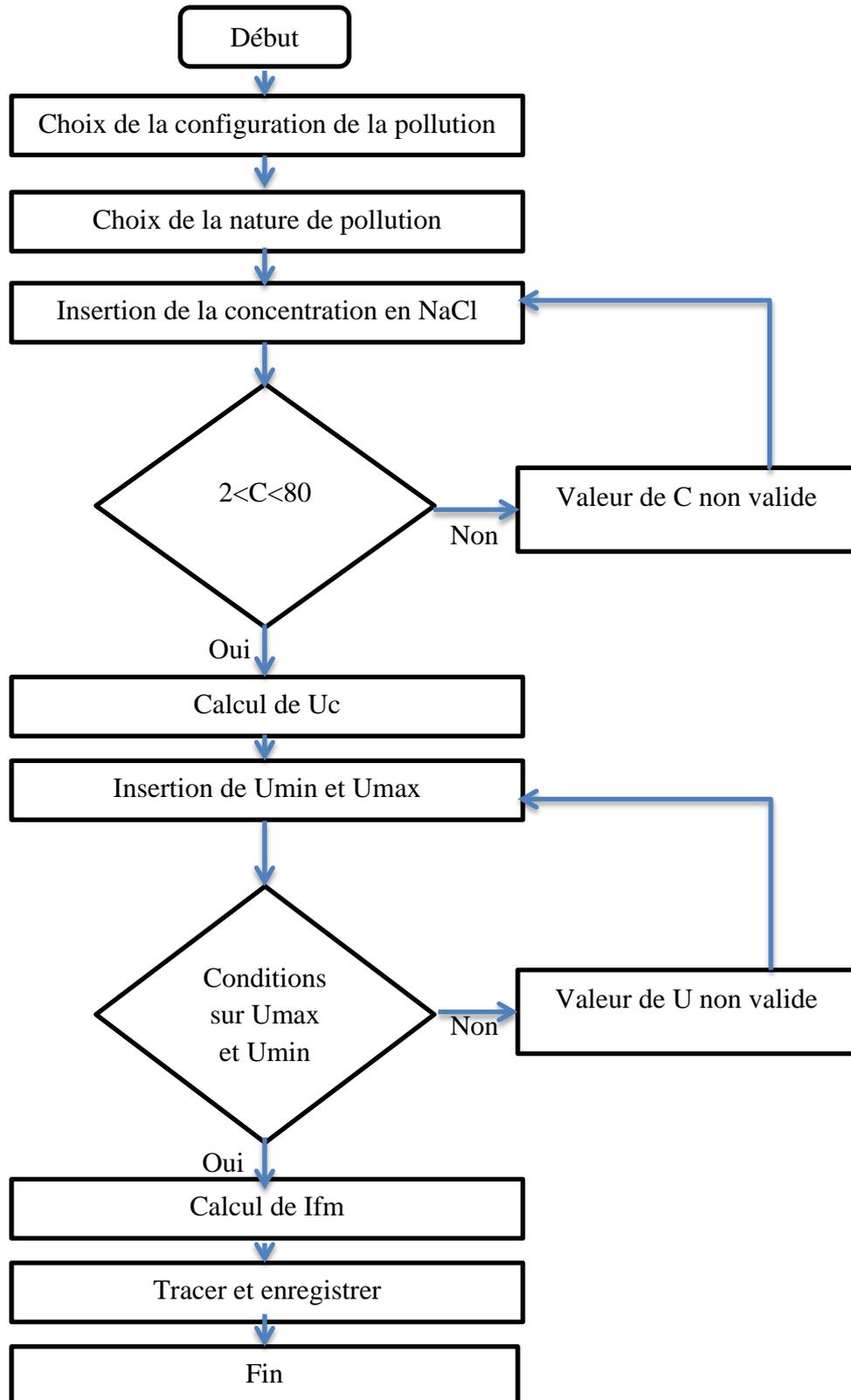


Figure IV.9 : Organigramme du fonctionnement de l'interface graphique proposée.

Afin d'utiliser cette interface graphique, l'utilisateur doit suivre l'algorithme suivant :

- Choix de la configuration de la pollution.
- Choix de la nature de pollution.
- Saisie de la concentration en NaCl.
- Saisie du nombre d'échantillons pour lesquels I_{fm} sera calculé.
- Saisie de U_{min} et U_{max} .
- Enregistrement des données.

Etant donné que cette interface est basée sur les modèles proposés précédemment pour calculer les tensions de contournement et les amplitudes maximales du courant de fuite, les résultats obtenus pour la tension de contournement ont été vérifiées lors de l'élaboration du modèle (équation (IV-5)) pour des valeurs de la concentration en NaCl variant entre 5 et 40 g/l. En ce qui concerne le courant de fuite, les valeurs calculées avec l'interface sont obtenues à partir de l'équation (IV-6), et sont donc valables pour des concentrations en NaCl allant de 5 à 30 g/l et des niveaux de la tension appliquée variant entre 3 et 15 kV_{eff} dans le cas de la pollution uniforme à l'exception de la pollution mixte à base de Kieselguhr dont nous avons mesuré le courant de fuite pour des tensions variant entre 3 et 13 kV_{eff}. Dans le cas de la pollution non-uniforme, les résultats obtenus à partir de cette interface ont été vérifiés pour des niveaux de la tension appliquée allant de 5 à 50 kV_{eff}. En dehors de ces intervalles, les résultats donnés par l'interface graphique ne sont que des prédictions car nous ne les avons pas vérifiés expérimentalement.

Il est aussi à signaler que dans le cas de la pollution mixte à base de Kieselguhr uniformément répartie sur la surface de l'isolateur, cette interface ne peut prédire que la tension de contournement car nous ne possédons pas d'équation permettant de modéliser la diminution de l'amplitude maximale du courant de fuite causée par l'assèchement partiel observé sur la surface de l'isolateur dans ce cas.

IV.6. Conclusion :

En utilisant certaines caractéristiques expérimentales, nous avons mis au point deux modèles permettant de simuler le comportement de la chaîne d'isolateurs réels U120B pour les trois natures et les deux configurations de pollution étudiées. Il permet d'avoir différents résultats à savoir :

- La tension de contournement pour une concentration en NaCl donnée.
- L'amplitude maximale du courant de fuite pour une concentration et un niveau de tension appliquée donnés.

Nous avons utilisé ces modèles afin de réaliser une interface graphique. Cette interface permet la prédiction de la tension de contournement et l'amplitude du courant de fuite pour les trois natures et les deux configurations de la pollution utilisées.

Ces deux caractéristiques s'avèrent très importantes, car elles peuvent servir comme moyen de surveillance du degré de pollution afin d'éviter le contournement total qui peut être préjudiciable pour les installations électriques.

Les résultats obtenus concordent avec ceux obtenus expérimentalement, validant ainsi notre modèle empirique.

Conclusion Générale

Dans le but d'étudier l'influence de la nature de l'agent polluant sur le comportement diélectrique d'une chaîne d'isolateurs réels de haute tension à fréquence industrielle 50 Hz, le présent travail nous a permis de conclure que parmi les trois natures de pollution utilisées et pour les deux configurations de la pollution étudiées, la nature la plus sévère est la pollution mixte contenant une concentration de 100 g/l en Kieselguhr.

Les résultats expérimentaux nous ont révélé que comparé à la pollution marine et pour une concentration en NaCl donnée, la présence d'une concentration de 100 g/l de Kaolin a pour effet :

- La diminution de la conductivité volumique.
- L'augmentation de la tension d'apparition de la première décharge et de la rigidité diélectrique du système.
- La diminution des amplitudes maximales du courant de fuite et de la charge électrique.
- L'augmentation de l'impédance équivalente vue entre les électrodes.

Comparé aux résultats obtenus pour la pollution marine, la présence d'une concentration de 100 g/l de Kieselguhr a pour effet :

- L'augmentation de la conductivité volumique.
- La diminution de la tension d'apparition de la première décharge et de la tension de contournement.
- L'augmentation des amplitudes maximales du courant de fuite et de la charge électrique.
- La diminution de la valeur de l'impédance équivalente vue entre les électrodes.

L'étude des deux configurations de pollution, uniforme et non-uniforme, nous a permis de conclure que parmi les deux cas étudiés, la configuration la plus sévère est la pollution uniforme. En effet, les tests effectués lors de la simulation du phénomène d'auto-nettoyage par le vent et la pluie (pollution non-uniforme) ont montré que, la présence d'une bande sèche de largeur importante sur la surface de l'isolateur entraîne une:

- Augmentation de la rigidité diélectrique du système.
- Augmentation de l'impédance équivalente vue entre les électrodes.
- Diminution des amplitudes maximales du courant de fuite et de la charge électrique.

En se basant sur nos résultats expérimentaux, nous avons élaboré deux modèles empiriques qui permettent de prédire la tension de contournement et l'amplitude du courant de fuite même pour des valeurs de la concentration en NaCl et de la tension appliquée autres que celles utilisées au laboratoire. Les résultats de simulation sont en bonne concordance avec ceux obtenus expérimentalement. Cependant, nous n'avons pas réussi à modéliser l'amplitude

du courant de fuite dans le cas de l'application de la pollution mixte à base de kieselguhr uniformément réparti sur la surface de l'isolateur car, nous ne disposons pas d'assez de paramètres afin de caractériser l'assèchement partiel de la couche de pollution qui survient pour les grandes concentration en NaCl.

Finalement, et en utilisant les modèles proposés, nous avons développé une interface graphique qui permet la prédiction de la tension de contournement ainsi que l'amplitude du courant de fuite pour les trois natures et les deux configurations de la pollution utilisées. Cette interface peut s'avérer très intéressante pour le diagnostic des isolateurs pollués, et cela afin d'éviter le contournement total qui peut être préjudiciable pour les installations électriques.

Notons, pour finir, que l'application développée peut être améliorée en y ajoutant d'autres modèles empiriques afin de caractériser la variation de la tension de contournement et l'amplitude du courant de fuite en fonction de :

- La concentration de l'agent polluant.
- La largeur de la zone sèche (pollution non-uniforme).
- L'utilisation d'autres natures de pollution.

Références Bibliographiques

- [1] S. Diampeni Kimbakala, « Modélisation Dynamique des Décharges se Propageant sur des Surfaces Isolantes Polluées Avec des Dépôts Discontinus », Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Ecole Centrale de Lyon, France, Décembre 2007.
- [2] R. Chaarani, « Etude de l'Influence des Caractéristiques des Isolateurs sur Leurs Performances Electriques Dans des Conditions de Givrage », Thèse de Doctorat en Ingénierie, Université du Québec, 2003.
- [3] D.Naamane, « Effet de la Discontinuité de la Couche de Pollution sur le Comportement d'Isolateurs Haute Tension, sous Fréquence 50 Hz », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 1998.
- [4] Y.A.Bencherif, « Elaboration d'un Modèle de Contournement d'un Isolateur Haute Tension Sous Pollution Uniforme et Non Uniforme », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Décembre 2011.
- [5] A.Mekhaldi, « Etude des Phénomènes de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolantes Polluées sous Tension Alternative 50 Hz », Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Septembre 1999.
- [6] M.Teguar, « Modélisation d'Isolateurs Pollués Soumis à Divers Paramètres Electrogéométriques », Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Avril 2003.
- [7] Md. Abdus Salam, H. Goswami, N. Zia, « Determination of equivalent salt deposit density using wind velocity for a contaminated insulator », Journal of Electrostatics Vol. 63, pp 37-44, 2005.
- [8] M. Farzaneh, J. Zhang, X. Chen, « DC characteristics of local arc on ice surface », Atmospheric Research Vol. 46, pp 49-56, 1998.
- [9] «Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on d.c systems», IEC Tech. Rep. 1245, 1993.
- [10] Ayman H. El-Hag, « Leakage current characterization for estimating the conditions of non-ceramic insulators' surfaces », Electrical
- [11] X. Zhang, S. M. Rowland, V. Terzija, « Increased Energy in Stable Dry-band Arcs Due to Length Compression », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 17, No. 2; April 2010.
- [12] X. Zhang, S. M. Rowland and V. Terzija, « Modelling of Dry-Band Arc Compression », Accepted for publication in 16th International Symposium on High Voltage Engineering, 2009.

- [13] R. Sarathi, S. Chandrasekar, « Diagnostic study of the surface condition of the insulation structure using wavelet transform and neural networks », Science Direct, Electric Power Systems Research 68 (2004) 137-147.
- [14] IEC publication 587, « Testing Method For Evaluating The Resistance Of Tracking and Erosion Of Electrical Insulating Materials Used Under Severe Ambient Conditions », 1984.
- [15] R. Sarathi, U.M. Rao, C. Venkataseshaiyah, « Investigations of Surface modifications in ethylene propylene diene monomer (EPDM) rubber due to tracking, Polymer Testing », Elsevier Science, 21 (4) (2002) pp. 462-471.
- [16] M.A.M. Piah and A. Darus, « Modeling leakage current and electric field behavior of wet contaminated insulators », IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, January 2004.
- [17] R. Sundararajan and R. S. Goror, « Dynamic arc modeling of pollution flashover of insulators under DC voltage », IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 28, pp. 209-218, 1993.
- [18] M. T. Gencoglu, M. Uyar, « Prediction of Flashover Voltage of Insulators Using Least Squares Support Sector Machines », Science Direct, Expert Systems with Applications Vol. 36, pp 10789–10798, 2009.
- [19] N. Dhahbi, A. Beroual and L. Krahenbuhl, « A New Proposal Model for Polluted Insulators Flashover », Journal of Physics D: Appl. Phys., Vol. 30, No. 5, pp 889-894, March 1997.
- [20] I. Harzelli et Y. Maanani, « Mesure du Courant de Fuite et de la Charge Electrique d'un Isolateur Pollué de Haute Tension. Caractérisation de son Etat de Surface en Utilisant la Transformée en Ondelette », Mémoire de Fin d'Etude, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 2011.
- [21] F. Meghnefi, « Étude Temporelle et Fréquentielle du Courant de Fuite des Isolateurs de Poste Recouverts de Glace en Vue du Développement d'un Système de Surveillance et de Prédiction en Temps Réel du Contournement Electrique », Thèse présentée à L'Université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle du doctorat en ingénierie, Québec, Canada, Aout 2007.
- [22] « Isolateurs en Verre », SGD La Granja Vidrieria, pp 24.
- [23] IEC-60-1, « Guide on High-Voltage Testing Techniques », 1989.

[24] G. Okay, A. Ghorbani, P. Cosenza, C. Camerlynck, N. Florsch, A. Revil, « Mesure de la Response PPS (Polarisation Provoquée Spectrale) de Mélanges Artificiels Argilo-Sableux Non-Consolidés. », 6^{ième} colloque GEOFCAN, pp 11-14, Bondy, France, Septembre 2007.

[25] Andy H. Register, "A Guide to MATLAB Object-Oriented Programming", Scitech Publishing : Chapman&Hall/CRC , New York-London, 2006.