

Université Mohamed Khider - Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département: Genie Electrique
Réf :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم : الهندسة الكهربائية
المرجع :

Mémoire présenté en vue de l'obtention
Du Diplôme de
Magister en Electrotechnique
Option : Réseaux Electriques

Etude du Comportement d'un Isolateur de Haute Tension Soumis à Diverses Conditions de Pollution

Présenté par : Hani BENGUESMIA

Soutenu publiquement le 11/03/2012.

Devant le jury composé de :

Salah Eddine ZOUZOU	Professeur	U. de Biskra	Président
Ahmed BOUBAKEUR	Professeur	E.N.P.	Rapporteur
Souri Mohamed MIMOUNE	Professeur	U. de Biskra	Examineur
Leïla MOKHNACHE	Professeur	U. de Batna	Examineur
Nassima M'ZIOU	Maître de conférences	U. de Biskra	Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ
وَالَّذِي يُضَوِّبُ الْمَوْتَى
إِنَّ رَبَّهُ لَسَدِيدٌ
إِلَىٰ عَرْشِهِ الرَّحِيمُ
الَّذِي يُرْسِلُ الرِّيَّاحَ
تُضَوِّبُ السَّحَابَ الْمَوْبِقَ
فَيَأْتِي السَّمَاءَ بِسُحُبٍ
مَوْبِقَةٍ فَيُمْطِرُ
مَاءً غَدِيقًا إِنْ
رَبُّكَ لَعَلِيمٌ خَبِيرٌ
الَّذِي يُصَوِّرُ الْإِنْسَانَ
عِندَ حَبْلِ الْوَمِيمِ

ملخص

في هذا العمل، قمنا بدراسة تأثير طبيعة، ناقلية و كذا توزيع التلوث على سلوك العازل الكهربائي ذي قبعة و دبوس نوع 1512L ملوث اصطناعيا. لأجل هذا، استعملنا محلول كلوريد الصوديوم مع الماء المقطر، لها ناقلية مختلفة متقطع من التلوث عن طريق الرش بالنسبة لنموذج عازل مخبري، و المأل بالنسبة للنموذج الحقيقي، تحت توتر متناوب . تمت دراسة تأثير هذه العوامل على توتر الإحاطة، سعة تيار التسرب، و فرق الصفحة بين التوتر و تيار التسرب.

الكلمات المفتاحية: التلوث، عازل، توتر الإحاطة، تيار التسرب، فرق الصفحة بين التوتر و تيار التسرب، ناقلية.

Résumé

Dans ce travail, nous examinons l'impact de la conductivité ainsi que la répartition de la pollution sur le comportement de l'isolateur capot et tige 1512L, artificiellement pollué. Pour cela, une solution (saline à base de NaCl, et eau distillée), ayant différentes conductivités est utilisée pour une distribution discontinue de la pollution par pulvérisation de la surface du modèle expérimental, et remplissage de modèle réel ont été appliquées sous tension alternative. L'influence de ces paramètres sur la tension de contournement, le courant de fuite, ainsi le déphasage courant-tension a été étudiée.

Mots-clés : pollution, isolateur, tension de contournement, courant de fuite, déphasage courant-tension, conductivité.

Abstract

In this work, we examine the impact of the conductivity as well as the distribution of pollution on the behavior of the 1512L cap and pin insulator, artificially polluted. For that purpose, saline solution (containing NaCl, and distilled water), having various conductivities is used for a distributions discontinuous of the pollution by pulverizing the surface of the experimental model, and real insulator-filling were applied under alternative voltage. The influence of these parameters on the flashover voltage, the leakage current, and the phase angle current-voltage was studied.

Key-words: pollution, insulator, flashover voltage, leakage current, phase angle (current-voltage), conductivity.

Remerciements

*En premier lieu, nous remercions DIEU tout puissant, qui nous a donné le courage,
la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.*

*Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Haute Tension du département de génie
électrique de l'université de BISKRA, sous la direction scientifique du
Dr. Nassima M'ZIOU.*

*Nous remercions particulièrement notre promoteur **Pr.A.BOUBAKEUR**,
pour son dévouement exceptionnel, sa précieuse directive et son suivi constant.*

*Nos remerciements les plus vifs et chaleureux, **Dr.N.M'ZIOU**, pour son
aide, son orientation et sa disponibilité, aussi pour la confiance, la patience et la
compréhension qu'elle nous a toujours manifesté.*

*Nos sincères et chaleureux remerciement à **Mr.T.GUIA** Enseignant à
l'université d'el oued pour son aide, son appuis moral, et ses qualités humaines.*

*Mes remerciements vont également à monsieur **Salah Eddine ZOUIZOU**,
Professeur a l'université de Biskra, pour avoir accepté de présider le jury de
soutenance. Je le remercie vivement pour ces encouragements et son soutien durant
tout mon cursus de magister.*

*Nous tenons également à remercier et les membres du jury **Pr.Souri
Mohamed MIMOUNE** Enseignant à l'université de Biskra, **Pr.Leïla
MOKHACHE** Enseignante à l'université de Batna , **Dr. Nassima M'ZIOU**
Enseignante à l'université de Biskra, pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre
travail.*

*Nous tenons à remercier nos parents car ce travail représente un petit fruit de leur
souffrance et qui sans eux nous ne pouvons traverser ces longues années d'études et
de travail.*

*J'adresse mes vifs remerciements à tous les enseignants ayant contribué à
notre formation trouvent ici notre profonde reconnaissance.*

*Enfin, nous remercions tous ce qui ont contribué de près ou de loin à
l'élaboration de ce travail.*

تَوَطُّئ

إني رأيت أنه لا يكتب إنسان كتابا في يومه

إلا قال في غده

لو زيد هذا لكان أحسن.

ولو قدم هذا لكان أفضل.

ولو ترك هذا لكان أجمل.

و هذا من أعظم العبر وهو دليل على

إستلاء النقص على جملة البشر.

ابن خلدون

الإهداء

أحمد لله الذي تتم بنعمته الصالحات
إلى رمزنا كحنان والدتي الكريمة
إلى رمز العطاء والكفاح أبي الفاضل
إلى كل أساندة الكهرباء التقنية
إلى إخوتي وأخواتي الأعزاء
إلى أعمامي وعماتي وأبنائهم
إلى أخوالي وخالاتي وأبنائهم
إلى كافة الأقارب والأحباب
إلى زملائي الذين رافقوني في حياتي الدراسية.
إلى كل الأصدقاء القريب منهم والبعيد.
إلى كل من درسني كان معلماً أو أستاذاً
أهدي ثمرة هذا الجهد

هاني بن قسمية

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents et ma grande famille.

*A tous les enseignants de département génie
électrique filière électrotechnique a l'université
de Biskra.*

A mes très chers frères et mes sœurs.

A tous mes amis.

A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

A vous.

Hani BENGUESMIA

Listes des Symboles et Acronymes

Liste des Symboles et Acronymes

Symboles	Acronymes
ℓ	Plus courte distance dans l'air, extérieur à l'isolateur
P	Pas nominal
$^{\circ}\text{C}$	Degré celsius
C_m	Condensateur de mesure
r	Rayon
e	Epaisseur
d	La distance inter électrodes (la ligne de fuite de l'isolateur réel)
NaCl	Chlorure de sodium
T_0	Température ambiante
P_0	Pression atmosphérique
∂	Facteur de correction de la densité du l'air
Z_i	Zone de pollution
Z_e	Impédance d'entrée de l'oscilloscope
R_m	Résistance d'adaptation du câble de mesure
R_1	Résistance pour diviser la tension d'entrée
R_2	Résistance pour mesurer l'image du courant de fuite
I_0	Courant de fuite
V_{in}	Tension d'entrée de l'amplificateur
V_1	La tension lue sur l'oscilloscope
V_{out}	Tension de sortie de l'amplificateur
V_{lue}	La tension lue sur l'oscilloscope
mS	Méli siemens
U_c	Tension de contournement
T	Température
h	Humidité
N_i	Niveau de pollution
g	Gramme
l	Litre
S	Siemens
m	Mètre

v	Volt
A	Ampère
δ	Conductivité superficielle
U	Tension appliquée
cm	Centimètre

Listes des Figures et Photographies

Liste des figures

Figure		Page
I.1	Isolateur rigide.	08
I.2	Isolateur à long fût en porcelaine.	09
I.3	Isolateur à capot et tige.	10
I.4	Différents profils d'isolateurs à capot et tige.	11
I.5	Isolateurs en matériaux synthétiques.	14
I.6	Etapas du contournement d'une couche polluée.	20
II.1	Circuit d'essai à fréquence industrielle.	27
II.2	Isolateur de haute tension 1512L propre.(a- modèle expérimental, b- Modèle réel).	30
II.3	Le modèle expérimental, a-modèle expérimental complètement propre, b- modèle expérimental sous pollution discontinue.	31
II.4	Grandeurs de l'isolateur 1512L.	32
II.5-(a)-	Le modèle réel <VS> Le modèle expérimental (Cas d'apparition trois bandes de pollutions).	34
II.5 -(b)-	Le modèle réel <VS> Le modèle expérimental (Cas d'apparition quatre bandes de pollutions).	35
II.6	Modèle réel de l'isolateur 1512L. plein pollution.	37
II.7	Méthode de pulvérisation pour le cas plein pollution.	40
II.8	Les zones de la pollution discontinue, (Conductivité superficielle), a- Modèle réel, b-Modèle expérimental.	43
II.9	Circuit réalisé pour la mesure du courant de fuite.	44
III.1	Les visualisations des ondes de courant de fuite pour différente valeur de la tension appliquée (N5, 1,823 mS/cm).	52
III.2	Tension de contournement-largeur de la couche polluante pour différentes conductivités. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	54
III.3	Tension de contournement-conductivités superficielle pour différentes largeur de la couche polluante. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	55
III.4	Courant de fuite -Tension appliquée pour différentes largeur de couche polluante. ($\delta=1,823\text{mS/cm}$), a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	57
III.5	Courant de fuite -Tension appliquée pour différentes largeur de couche polluante. ($\delta=3,33\text{mS/cm}$), a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	58
III.6	Courant de fuite -Tension appliquée pour différentes largeur de couche polluante. ($\delta=8,02\text{mS/cm}$), a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	59
III.7	Courant de fuite -Tension appliquée pour différentes largeur de couche polluante. ($\delta=12,61\text{mS/cm}$), a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	60
III.8	Courant de fuite -Tension appliquée pour différentes largeur de couche polluante. ($\delta=16,32\text{mS/cm}$), a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	61

III.9	Courant de fuite -Tension appliquée pour différentes largeur de couche polluante. ($\delta=30,5\text{mS/cm}$), a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	62
III.10	Courant de fuite -Tension appliquée pour différentes largeur de couche polluante. ($\delta=50,4\text{mS/cm}$), a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	63
III.11	Courant de fuite -Tension appliquée pour différentes largeur de couche polluante. ($\delta=93,7\text{mS/cm}$), a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	64
III.12	Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. $N1=Cste.$ a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	65
III.13	Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. $N2=Cste.$ a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	66
III.14	Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. $N3=Cste.$ a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	67
III.15	Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. $N4=Cste.$ a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	68
III.16	Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. $N5=Cste.$ a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	69
III.17	Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. $N6=Cste.$ a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	70
III.18	Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. $N7=Cste.$ a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	71
III.19	Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. $N8=Cste.$ a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	72
III.20	Courant de fuite – largeur de pollution pour différentes conductivité superficielle, avec $U=5\text{kV}=Cste.$ a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	74
III.21	Courant de fuite – largeur de pollution pour différentes conductivité superficielle, avec $U=10\text{kV}=Cste.$ a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	75
III.22	Les visualisations des déphasages pour différente valeur de la tension appliquée. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.	77
III.23	Déphasage courant-tension en fonction de la largeur de la couche polluante, pour différentes conductivités. $5\text{kV}=Cste.$ a- Modèle réel, b-Modèle expérimental.	78
III.24	Déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités. $N6=Cste.$ a- Modèle réel, b-Modèle expérimental.	79

Liste des Photographies

Photographies		Page
II.1	Circuit d'essai à fréquence industrielle. a -Modèle réel, b -Modèle expérimental.	27
II.2	Photographie du pupitre de commande et oscilloscope numérique du laboratoire de haute tension de l'université de Biskra.	29
II.3	Circuit de mesure du courant de fuite réalisé au labo de HT, a -Modèle réel, b -Modèle expérimental.	44
III.1	Evolution des étincelles(initiation des arcs), a -Modèle réel, b -Modèle expérimental.	49
III.2	Evolution des arcs, a -Modèle réel, b -Modèle expérimental.	50
III.3	Contournement totale, a -Modèle réel, b -Modèle expérimental.	50

Listes des tableaux

Liste des Tableaux

Tableaux		Page
II.1	Les dimensions de l'isolateur 1512 L.	32
II.2	Partition des zones polluées sur les niveaux	38-39

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	2
------------------------------	----------

Chapitre I : POLLUTION DES ISOLATEURS DE HAUTE TENSION

I.1	INTRODUCTION	6
I.2	ISOLATEURS DE HAUTE TENSION	6
I.3	FONCTIONNEMENT ET CONSTITUTION D'UN ISOLATEUR	7
I.4	TYPES D'ISOLATEURS	8
I.4.1.	Isolateurs rigides	8
I.4.2.	Isolateurs suspendus ou élément de chaîne	8
I.4.2.1.	Isolateur à long fut	9
I.4.2.2.	Isolateurs capot et tige	10
a)	Profil standard	12
b)	Profil antibrouillard (forme A)	12
c)	Profil antibrouillard (forme B)	12
d)	Profil ouvert (plat)	12
e)	Profil sphérique	12
I.5.	MATERIAUX ISOLANTS UTILISES POUR LA FABRICATION DES ISOLATEURS	12
I.5.1	Céramique	13
I.5.2	Verres	13
I.5.2.1.	Le verre trempé	13
I.5.2.2.	Le verre recuit	13
I.5.2.3.	Matériaux synthétiques (composites)	14
I.6.	CHOIX DES ISOLATEURS	14
I.7.	POLLUTION DES ISOLATEURS DE HAUTE TENSION	15
I.7.1.	Quelques Définition	15
I.7.1.1.	Contournement	15

I.7.1.2.	Contrainte de contournement	15
I.7.1.3.	Tension de contournement	15
I.7.1.4.	Tension de tenue (Tension d'essai)	16
I.7.1.5.	Courant de fuite	16
I.7.1.6.	Courant de fuite critique	16
I.7.1.7.	Conductance superficielle	16
I.8.	FORMATION ET REPARTITION DE LA COUCHE DE POLLUTION	16
I.9.	SOURCES DE POLLUTION	16
I.9.1.	Pollution naturelle	17
I.9.1.1.	Pollution marine	17
I.9.1.2.	Pollution désertique	17
I.9.1.3.	Autre type de Pollution naturelle	17
I.9.2.	Pollution industrielle	17
I.9.3.	Pollution mixte	18
I.10.	CONSEQUENCES DE LA POLLUTION	18
I.10.1.	Arc non localisé	18
I.10.2.	Arc permanant (fixe)	18
I.10.3.	Contournement des isolateurs	19
I.11.	METHODES D'ESSAIS SOUS POLLUTION	20
I.11.1.	Essais sous pollution naturelle	21
I.11.2.	Essais sous pollution artificielle	21
I.11.2.1.	Méthodes des couches solides	21
I.11.2.2.	Méthodes du brouillard salin	21
I.11.2.3.	Méthodes de la chambre de poussière	22
I.11.3.	Critiques de ces méthodes d'essai	22
I.12.	TECHNIQUES DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION	22
I.12.1.	Allongement de la ligne de fuite	22

I.12.2.	Isolateurs plats	23
I.12.3.	Graissage périodique	23
I.12.4.	Revêtement silicone	23
I.12.5.	Les isolateurs composites	23
I.12.6.	Nettoyages des isolateurs	24
I.13.	CONCLUSION	24

CHAPITRE II :TECHNIQUES EXPERIMENTALES

II.1.	INTRODUCTION	26
II.2.	DISPOSITIF EXPERIMENTAL	26
II.2.1.	Circuit d'essai du laboratoire de Haute tension (Université de Biskra)	26
II.2.1.1.	Transformateur d'essai	28
II.2.1.2.	Transformateur de réglage	28
II.2.1.3.	Oscilloscope numérique	28
II.2.1.4.	Pupitre de commande	28
II.2.1.5.	Appareils de mesure et de protection	29
II.2.1.6.	Diviseur de tension	29
II.2.1.7.	Objet d'essai	30
II.3.	MODE OPERATOIRE	32
II.3.1.	Modèle expérimental	33
II.3.2.	Préparation de l'isolateur réel 1512L et le modèle expérimentale	36
II.3.3.	Application de la couche de pollution	36
II.3.3.1.	Cas d'un isolateur réel 1512L	36
II.3.3.2.	Cas d'un modèle expérimentale	40
II.4.	CORRECTION ATMOSPHERIQUE	41
II.4.1.	Influence de la densité relative de l'air	41

II.4.2.	Influence de l'humidité	41
II.5.	PROCEDE D'ESSAIS	41
II.5.1.	Mesure de la tension du contournement	42
II.5.1.1.	Pollution discontinue	42
II.5.2.	Mesure du courant de fuite	43
II.5.3.	Expression du courant de fuite I_0 en fonction de V_{luc}	45
II.5.4.	Déphasage courant-tension	45
II.6.	CONCLUSION	46

CHAPITRE III :RESULTATS OBTENUS ET INTERPRÉTATIONS

III.1.	INTRODUCTION	48
III.2.	PHENOMENE OBSERVES LORS DES ESSAIS	48
III.2.1.	Etapas de contournement	48
III.2.2.	Evolution de l'onde du courant de fuite	50
III.3.	POLLUTION DISCONTINUE	53
III.3.1.	Tension de contournement	53
III.3.1.1.	Influence de la largeur de la couche de pollution	53
III.3.1.2.	Influence de la conductivité superficielle	53
III.3.2.	Courant de fuite	56
III.3.2.1.	Influence de la tension appliquée	56
III.3.2.2.	Influence de la conductivité	56
III.3.2.3.	Influence de la largeur de pollution	73
III.3.3.	Déphasage tension-courant	76
III.4.	CONCLUSION	80
	CONCLUSION GENERALE	82
	BIBLIOGRAPHIE	85

Introduction Générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

De nos jours, l'énergie électrique joue un rôle très important dans le développement et l'évolution de l'industrie et l'économie du pays. De ce fait, il faut assurer, à tout instant, un équilibre entre la demande croissante et la production de l'énergie. C'est pour cela, qu'une très grande part d'importance est attachée aux réseaux électriques, principalement aux lignes de haute tension [1].

Les isolateurs sont des éléments essentiels dans la conception d'une ligne aérienne. Leur rôle est de relier les conducteurs sous tension aux supports et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux parties constitutives de la ligne. En effet, le choix du type d'isolateur, les contrôles de réception, la surveillance en exploitation doivent être faits avec un maximum de soin, pour assurer le bon fonctionnement de la ligne.

Les isolateurs des lignes et de poste de transport d'énergie électrique sont le siège de plusieurs contraintes. Entre autres, la pollution des isolateurs constitue l'un des facteurs de première importance dans la qualité et la fiabilité du transport d'énergie [2,3].

Des observations sur site ont montré que les dépôts, constitués de couches de sable, sur les isolateurs capot et tige (type 1512-L), installés dans les régions désertiques algériennes, se concentrent dans les parties les plus protégées contre les facteurs autonettoyants. La répartition ainsi discontinuée des couches de pollution dépend principalement du profil d'isolateurs, de la direction du vent et des tempêtes de sable, du taux de pluie ainsi que de la disposition des chaînes d'isolateurs et de leurs distances par rapport au sol [4].

Le phénomène de pollution des isolateurs peut être considéré comme un déversement continu ou intermittent d'impuretés d'origines diverses. Ces impuretés peuvent provenir des flots de fumées qui s'échappent des appareils d'évacuation (pollution industrielle ou urbaine [5]), ou alors de fines particules salines dans les régions situées au bord de la mer (pollution marine) [6-8], et même de particules de sable plus ou moins fines dans les régions désertiques (pollution désertique [9-14]).

Ces particules, souvent constituées d'une combinaison de plusieurs types de pollution (pollution mixte[15-17]), portées par les vents et déposées sur les isolateurs peuvent s'accumuler sur une longue période et provoquer, lorsque l'humidité est importante, de nombreux désagréments. En effet, le dépôt polluant provoque l'existence et la persistance d'un courant de fuite plus ou moins notable sur les isolateurs, suivant la sévérité de la pollution du site considéré. Il arrive même, lorsque le courant de fuite critique est atteint [18-19], que le contournement se produise et entraîne donc l'interruption de la ligne.

Les essais sous pollution naturelle ont l'avantage de tenir compte de l'effet de toutes les contraintes, dans toute leur complexité, dans un site donné. L'inconvénient majeur de nécessiter plusieurs années pour permettre d'étudier le comportement des isolateurs essayés. A cet égard, on a désormais cherché à reproduire artificiellement au laboratoire les conditions naturelles de pollution, afin d'obtenir des résultats et d'effectuer des comparaisons plus rapidement, plus facilement et à moindre coût que dans des stations sur sites.

Le présent travail consiste à mettre en évidence l'impact de la conductivité ainsi que de la distribution de la pollution discontinue sur le comportement d'un modèle réel et d'un modèle expérimental, artificiellement pollués, sous tension alternative.

Le modèle réel et de laboratoire est soumis à une répartition de la pollution discontinue reproduisant l'état de surface de l'isolateur capot et tige type 1512L installé dans la région électrique de Hassi-R'mel au Sahara Algérien [14, 24].

Notre travail comporte trois chapitres distincts:

Nous entamons le premier chapitre par une présentation d'une synthèse bibliographique sur les isolateurs de haute tension, ainsi que les phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique. Des méthodes d'essais sous pollution naturelle et artificielle, ainsi que des techniques de lutte contre ces phénomènes y sont présentés.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les techniques expérimentales. Pour cela, nous présentons l'équipement de la station d'essai à fréquence industrielle (50 Hz) du Laboratoire de Haute Tension de l'université de BISKRA. L'objet d'essai (l'isolateur réel et le

modèle) ainsi que les méthodes de mouillage (pulvérisation) y sont également présentés pour le modèle ainsi que la méthode de remplissage pour le modèle réel.

Les résultats expérimentaux obtenus concernent les évolutions de la tension de contournement, du courant de fuite, et du déphasage courant-tension en fonction des paramètres susmentionnés. La variation du courant de fuite en fonction de largeur de pollution a été également étudiée, sont représentés dans le troisième chapitre.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre travail.

Chapitre I

Pollution des Isolateurs
de Haute Tension

I.1 Introduction

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique [15]. Leur rôle est de relier les conducteurs aux supports en assurant leur isolation électrique [26,27].

Dans la plupart des lignes électriques de haute tension les isolateurs sont menacés par le phénomène de pollution.

Cette pollution mène à une diminution de la rigidité diélectrique et donc de la résistivité superficielle des matériaux isolants. Par conséquent, des pertes d'énergie, parfois énormes peuvent avoir lieu et conduisent à la mise hors service de la ligne, avec destruction éventuelle de matériels [28].

La tension de contournement d'un isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité des dépôts polluants, c'est à dire du degré de pollution, ainsi que de la répartition de cette couche sur sa surface [29].

Le présent chapitre porte sur l'étude des phénomènes de conduction et de décharges électriques sur des isolateurs sous pollution. Ce chapitre comporte deux parties. Dans la première partie, nous présentons l'importance des isolateurs, leur utilité et leurs principaux types, profils et matériaux avec lesquels ils sont fabriqués. La deuxième partie est consacrée à l'étude des phénomènes de pollution et leurs conséquences sur le transport de l'énergie électrique. Les principaux paramètres associés ainsi que les méthodes de mesure et les moyens de lutte contre ce phénomène, y sont également présentés.

I.2 Isolateurs de haute tension

L'isolateur est un matériau isolant solide, capable de résister à la contrainte électrique. Il est caractérisé par une grande impédance au passage du courant électrique. Son rôle est de séparer deux corps conducteurs, soumis à deux potentiels différents afin d'empêcher les courts-circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution [3, 30, 31].

Dans les réseaux de transport d'énergie électrique, l'isolement pylône-conducteur est assuré par une chaîne d'isolateurs. Chaque chaîne est caractérisée principalement par sa longueur de faite (nombre d'éléments). Cette longueur dépend du niveau de la tension de service [31].

I.3 Fonctionnement et constitution d'un isolateur

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport, et à la distribution de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes. Ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage), ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF₆) et l'isolation externe (air atmosphérique), ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure) [32].

Les isolateurs utilisés dans les réseaux électriques peuvent être classés selon leurs constitutions en deux groupes :

- Les isolations internes qui sont hermétiquement isolées (isolation des câbles, des transformateurs, gaz comprimés,..... etc.).
- Les isolations externes sont constituées par les distances dans l'air et par les lignes de fuite le long des isolants solides tels que les supports de l'appareillage, les traversées de transformateurs et les chaînes d'isolateurs.

Les matériaux isolants solides les plus utilisés sont essentiellement le verre trempé et la porcelaine. Mais les résines synthétiques commencent aussi à être utilisées.

L'isolateur est considéré comme deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents, qui sont les suivants:[3,4]

- L'intervalle d'air
- Le matériau diélectrique
- L'interface air matériau diélectrique

I.4 Types d'isolateurs

Selon les différentes façons d'utilisation et les conditions de fonctionnement des isolateurs, on distingue plusieurs types d'isolateurs.

I.4.1 Isolateurs rigides

Un isolateur rigide (figure (I.1)) est relié au support par une ferrure fixe. Tous les isolateurs rigides normalisés sont livrés avec une douille scellée de telle façon qu'ils puissent être vissés directement sur les ferrures correspondantes. La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides [3, 30].

Ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 kV [34].

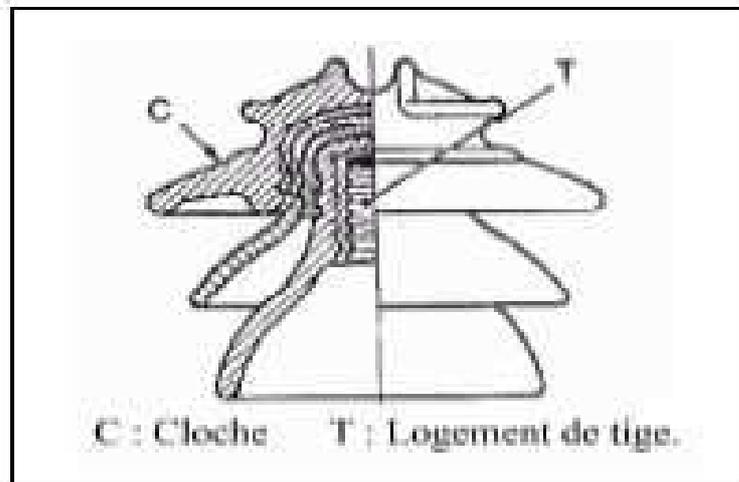


Figure I.1 Isolateur rigide [38].

I.4.2 Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

Ils sont constitués par le matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et à donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs [34-37]. La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (Chaîne d'alignement), soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage). Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

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

I.4.2.1 Isolateur à long fût

Il est constitué d'un bâton cylindrique plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes. A chaque extrémité, il y a une pièce métallique pour les liaisons [37]. Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, soit elle enveloppe les extrémités tronconiques sur le cylindre (figure (I.2.b)), soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet (figure (I.2.a)) [34, 37].

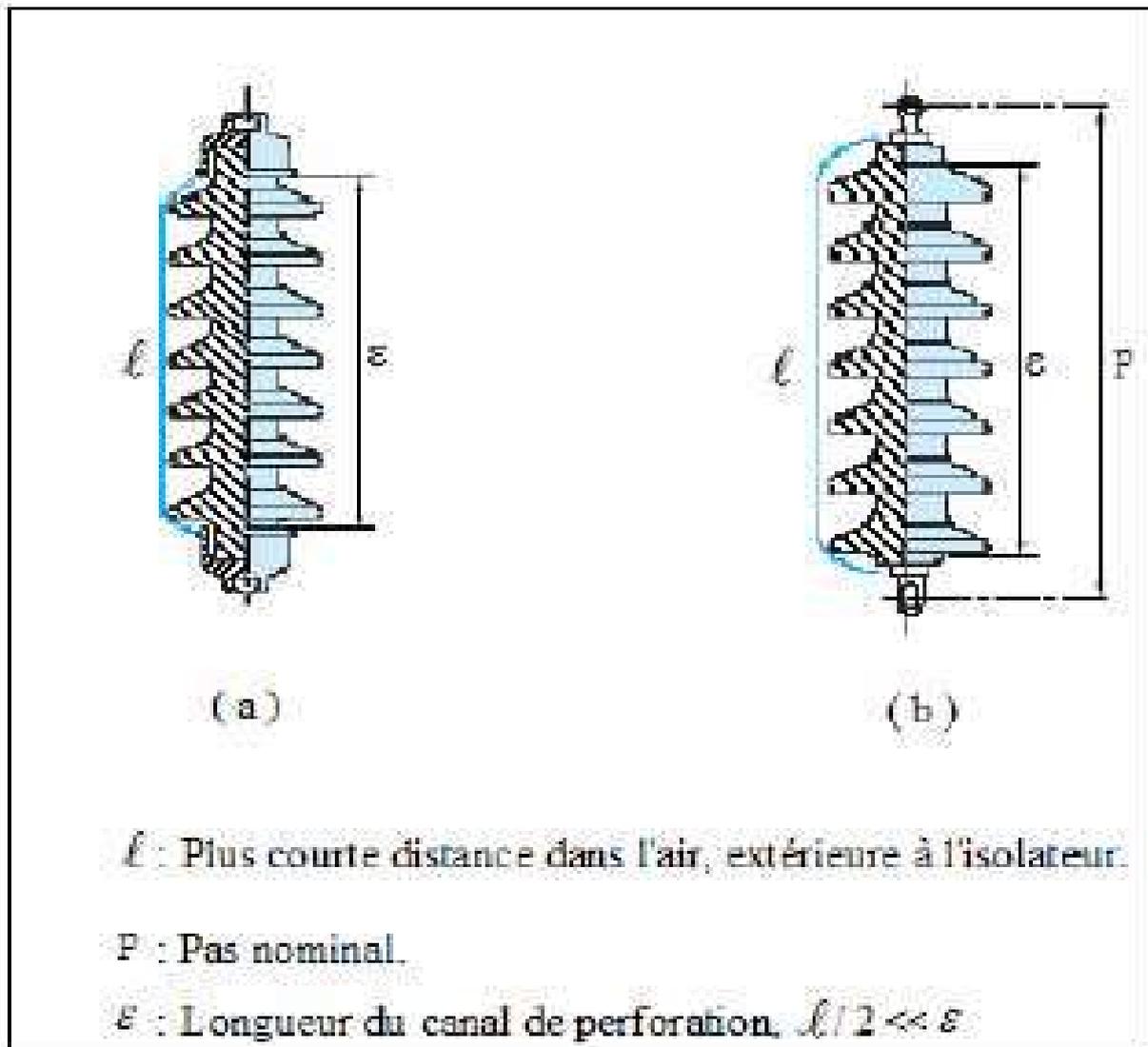


Figure I.2 Isolateur à long fût en porcelaine [28].

I.4.2.2 Isolateurs capot et tige

L'isolateur capot et tige est constitué d'un corps isolant qui porte à l'intérieur une tige en acier, où la tête conique de cette tige est scellée dans le matériau isolant, soit le verre, soit la porcelaine. L'extrémité supérieure de l'isolateur porte un capot scellé en fonte malléable. Cette dernière est trouée de telle sorte qu'on peut faire entrer l'extrémité inférieure dans ce trou, et le scellement des éléments de chaîne capot et tige se fait de cette façon, où la partie inférieure de l'isolateur pénètre dans le capot de l'élément inférieur, en utilisant du ciment (figure (I3)) [26, 38].

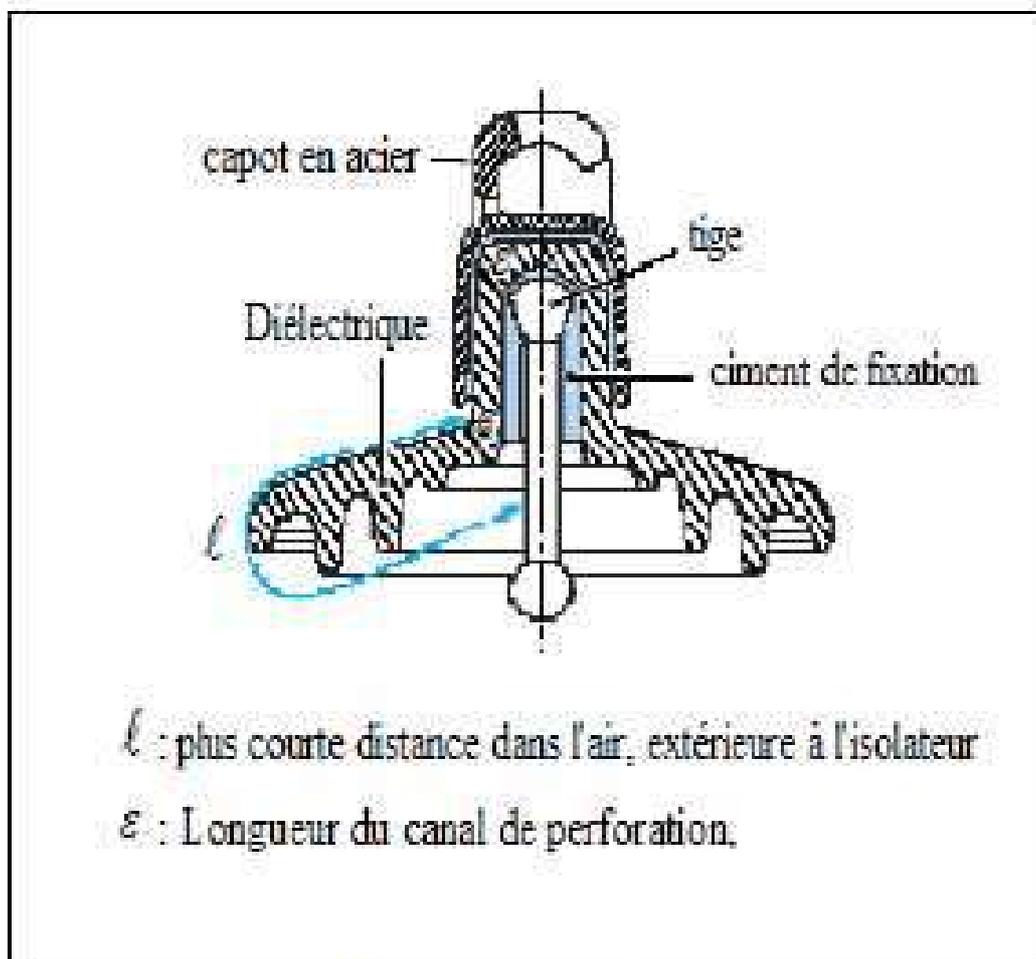


Figure I3 Isolateur à capot et tige [29].

Différents profils des isolateurs à capot et tige:

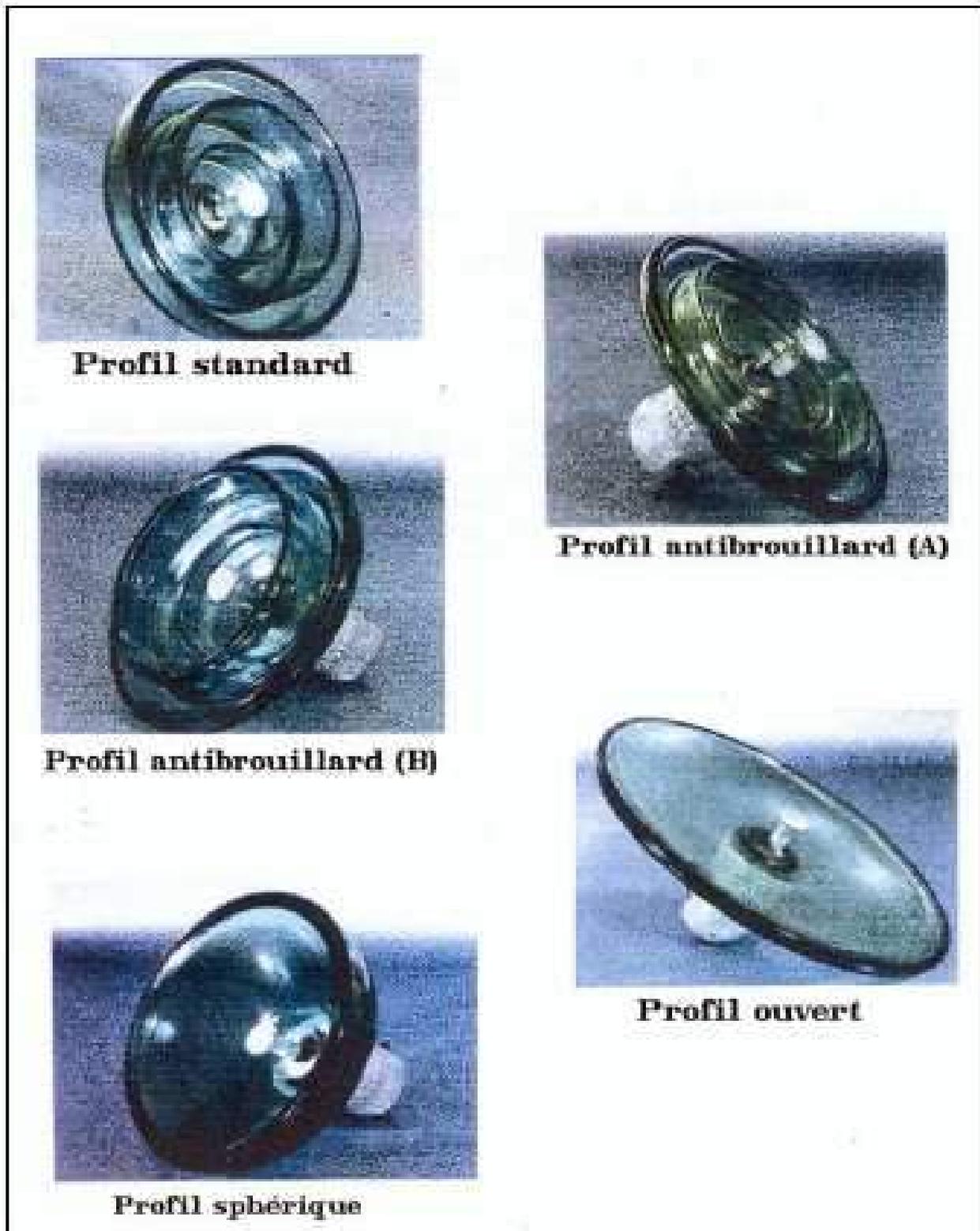


Figure I.4 Différents profils d'isolateurs à capot et tige [38].

La figure (I.4) présente les différents profils des isolateurs à capot et tige qui sont :

a) Profil standard

La faible profondeur, l'espacement entre les anneaux (nervures) et la ligne de fuite moyenne permettent l'utilisation de ce profil dans une zone de pollution modérée [38].

b) Profil antibrouillard (forme A)

Son diamètre est plus grand que celui du profil standard. Il est muni de deux ou trois rainures à grande profondeur. Le profil et les grands espacements des rainures permettent un auto-lavage par action de vent et de la pluie. Cette conception permet également un lavage manuel facile, si c'est nécessaire [34, 38].

c) Profil antibrouillard (forme B)

Dans cette conception, l'épaisseur de la rainure extérieure agit comme une barrière contre l'action du brouillard et de dépôt des sels minéraux sur la surface de l'isolateur, empêchant alors la formation d'un électrolyte conducteur sur la surface. Ce type d'isolateur est efficace dans les zones côtières [26].

d) Profil ouvert (plat)

L'élimination complète des rainures internes réduit l'accumulation des agents polluants sur la surface basse, grâce au courant d'air. Cette conception est particulièrement efficace dans les zones désertiques où l'auto-lavage est peu fréquent par la pluie [26].

e) Profil sphérique

Ce type de profil donne une ligne de fuite équivalente au profil standard, mais l'absence d'anneaux facilite le nettoyage manuel [38].

I.5 Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine. Mais durant ces dernières années, la porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients principaux qui sont : le poids lourd des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages. Ces dernières années on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères [34, 37].

I.5.1 Céramique

Le développement et la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs installés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence la céramique à grains très fins.

Souvent, on trouve la céramique dans les postes : isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance, ...etc. [34, 38].

I.5.2 Verres

En Algérie, les isolateurs utilisés dans les lignes de moyenne et haute tension sont en verre. Parmi les avantages que présente le verre, le bas prix et l'observation des défauts est très facile [34-37, 39]. Nous trouvons deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit [26].

I.5.2.1 Le verre trempé

Celui-ci est obtenu par réchauffage de l'isolant retiré du moule à une température d'environ 700 °C, puis refroidi par des jets d'air sous pression judicieusement répartis sur toute sa surface; les couches extérieures de la pièce isolante acquièrent rapidement une rigidité qui ne leur permet plus aucune déformation [3]. Le verre trempé présente une contrainte mécanique en traction environ 5 à 6 fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100° C [3, 26].

La couleur verte de l'isolateur en verre provient de l'oxyde de fer présent dans sa composition, si celui-ci est absent le verre est transparent [3].

Outre son bas prix, le verre présente l'avantage de permettre de détecter les défauts par une simple observation [40].

I.5.2.2 Le verre recuit

Il a surtout été utilisé pour faire des isolateurs rigides, mais on s'est aperçu que les isolateurs un peu épais ne résistaient pas aux variations brusques de températures. De plus, le verre recuit ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles, ce qui interdit son emploi pour les isolateurs de suspension [3, 34, 38].

I.5.2.3 Matériaux synthétiques (composites)

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique (figure (I.5)).

La figure (I.5) représente les isolateurs des matériaux synthétiques.

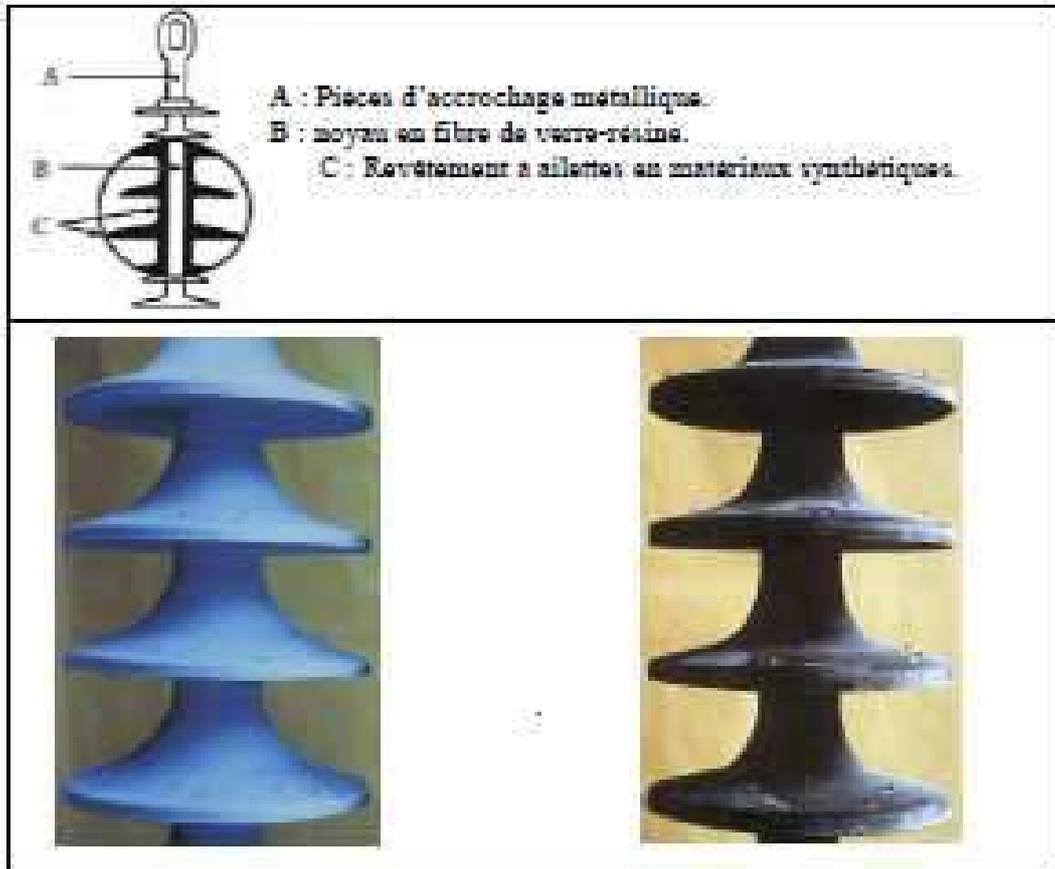


Figure I.5 Isolateurs en matériaux synthétiques [26, 38].

I.6 Choix des isolateurs

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité du service.

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage [38].

I.7 Pollution des isolateurs de haute tension

La pollution des isolateurs est un phénomène qui agit négativement sur le comportement des isolateurs de haute tension [34, 37].

La pollution des isolateurs constitue un problème majeur dans la dégradation de l'isolement des ouvrages (postes et lignes) de haute tension [41, 42]. Portés par le vent et déposés sur la surface isolante des chaînes des isolateurs, et en présence d'humidité, les divers dépôts polluants deviennent plus ou moins conducteurs. Ce qui engendre une diminution conséquente de la tension de tenue des isolateurs. Des arcs électriques prennent naissance à la surface isolante et peuvent éventuellement, se développer en provoquant le contournement total des isolateurs [43].

Notons que cette couche de pollution n'est pas homogène et sa distribution n'est pas uniforme. La non-homogénéité est due à la présence de différents agents polluants dans une même région, et la non-uniformité de la répartition sur les surfaces des isolateurs est due aux profils des isolateurs, le sens et la direction des vents dans cette région, la pluie, la position de la chaîne d'isolateurs par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), la position de l'isolateur dans la chaîne, le degré de pollution du site où se trouve les isolateurs ainsi que la surface inférieure ou supérieure de l'isolateur [34, 37].

I.7.1 Quelques Définitions**I.7.1.1 Contournement**

Le contournement est représenté par une décharge disruptive le long d'une surface solide dont la trajectoire contourne cette dernière. Aussi, le terme contournement est employé pour des décharges par amorçage dans l'air [38].

I.7.1.2 Contrainte de contournement

La contrainte de contournement d'isolateur est le rapport de la tension de contournement à la longueur totale de l'isolateur [38].

I.7.1.3 Tension de contournement

C'est le niveau de tension le plus bas au-delà duquel des arcs électriques joignent les deux électrodes [44].

L7.1.4 Tension de tenue (Tension d'essai)

C'est le niveau de tension le plus important que peut supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive, (contournement dans le cas des isolateurs) [38].

L7.1.5 Courant de fuite

C'est un courant de faible amplitude circulant à travers la couche polluante humectée le long de la surface isolante. Il est de type électrolytique et peut être un courant résistif pour une isolation totalement polluée ou un courant capacitif dans le cas d'une isolation parfaitement propre [3].

L7.1.6 Courant de fuite critique

C'est le courant minimal nécessaire pour provoquer le contournement total de l'isolateur [28,30].

L7.1.7 Conductance superficielle

La conductance superficielle est le rapport du courant de fuite circulant à la surface de l'isolateur sur la tension appliquée. Elle caractérise l'état global de la surface isolante [38].

L8 Formation et répartition de la couche de pollution

L'ensemble des composants du réseau est soumis aux effets de la pollution, [45] suite à l'écoulement d'un air transportant des poussières diverses, et à l'obstacle formé par les isolateurs, [46,47] une couche de pollution se forme à la surface des isolateurs. La répartition non-uniforme et non-homogène de cette couche dépend du profil de l'isolateur, de la position de la chaîne par rapport au sol (verticale, horizontale, inclinée), du niveau de tension ainsi que du degré de pollution du site où est situé l'isolateur [48].

En général, la couche de pollution se concentre sur les éléments de la chaîne d'isolateurs situés du côté du conducteur de haute tension et dans les parties les mieux protégées contre les facteurs d'auto-nettoyage (vent et forte pluie) [8, 47].

L9 Sources de pollution

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

1.9.1 Pollution naturelle

La pollution naturelle provient :

- Des sels marins dans les régions côtières.
- Des poussières du sol (notamment lors des chantiers importants).
- Des sables véhiculés par le vent en régions désertiques [48, 49]

Ces dépôts, et selon leur nature, se présentent comme suit :

1.9.1.1 Pollution marine

Les lignes de haute tension qui passent près de la mer dans les zones côtières sont exposées au vent qui vient de la mer et qui porte des embruns causant la formation d'une couche polluante de sel sur les surfaces des isolateurs [50].

Cette couche peut devenir conductrice lorsqu'elle est humidifiée ou mouillée ce qui conduit à la circulation d'un courant de fuite et par suite, la génération d'arcs électriques ou même la génération d'un contournement [3, 34].

1.9.1.2 Pollution désertique

Parmi les phénomènes qui caractérisent la nature désertique, les vents de sable. Malheureusement, après ces vents, des dépôts de sable se déposent sur les surfaces des isolateurs. Lorsque ces dépôts seront humidifiés, les couches de sable deviennent plus ou moins conductrices à cause de l'existence de sels dans le sable [34, 36].

1.9.1.3 Autre type de Pollution naturelle

La pluie est un phénomène naturel. Dans certaines conditions de pluie violente, un film continu d'eau peut s'établir d'une extrémité à l'autre de la chaîne d'isolateur. Comme l'eau n'est jamais parfaitement isolante, ce phénomène peut conduire au contournement, c'est le contournement sous pluie [51].

1.9.2 Pollution industrielle

Dans des zones à forte concentration industrielle, au voisinage des usines de pétrochimie, de cimenteries, ... etc, les isolateurs se recouvrent peu à peu de poussières résultant des fumées dégagées par ces dernières, et qui sont faiblement conductrices, mais hygroscopique, à la

Présence d'une humidité intense. Le sel contenu dans ces poussières abaisse considérablement la résistivité superficielle des isolateurs.

De plus, dans les régions agricoles, les agents polluants peuvent être insecticide, engrais, grains de pollens.....etc.

Cette pollution peut aussi être d'origine domestique, quand il s'agit des facteurs tels: fumées et gaz résultant des moyens de réchauffement des habitations ou de moyens de transport [14].

I.9.3 Pollution mixte

Ce type de pollution est le plus dangereux [26, 52], car elle résulte de la combinaison entre deux ou plusieurs pollutions pré-citées [48, 51].

I.10 Conséquences de la pollution

Les couches polluantes qui s'accumulent à la surface des isolateurs provoquent une conductivité électrique superficielle. Celle-ci modifie la répartition du potentiel le long de la ligne de fuite. Suivant les conditions atmosphériques (pluie fine, brouillard...), la tension de rupture diélectrique de l'air peut être atteinte entre deux points de la surface isolante entraînant l'amorçage d'un arc électrique qui court-circuite une partie de la ligne de fuite.

Trois cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles est soumis l'isolateur-[3, 14, 53]

I.10.1 Arc non localisé

L'arc électrique s'éteint rapidement, puis se réamorçe à un autre endroit et ainsi de suite. Il y a apparition de courant de fuite entraînant une petite perte d'énergie, généralement supportable par le réseau de distribution (l'installation) [2].

I.10.2 Arc permanent (fixe)

L'arc électrique se fixe à la surface, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en s'y réamorçant au même endroit (courant alternatif). Cet arc peut entraîner, par effet thermique, une dégradation de support isolant nécessitant le remplacement de l'élément défaillant [50, 51].

I.10.3 Contournement des isolateurs

Le contournement d'une surface polluée et humidifiée est le résultat d'une évolution qui comprend quatre phases principales, schématisées à la figure (I.6). Pour simplifier la présentation, considérons le cas d'une plaque plane rectangulaire avec deux électrodes :

- dans une première phase, le courant de fuite s'écoule à travers l'électrolyte qui recouvre l'isolant. Il provoque un échauffement de l'électrolyte qui a pour effet d'accroître la conductivité du milieu et par suite le courant (phase 1).
- L'échauffement croissant par effet joule créé par le courant de fuite, provoque un assèchement de la couche polluante. La zone sèche formée a tendance à s'étendre latéralement jusqu'à l'interruption complète du courant (phase 2).
- La tension appliquée se trouve pratiquement totalement reportée aux bornes de la zone sèche et des arcs locaux sont susceptibles d'apparaître. Au voisinage de la tête d'un arc local la construction des lignes de courant conduit à un élargissement de la zone sèche (phase 3).
- A partir de ce stade, l'évolution de la décharge peut se faire de différentes façons : l'arc local peut s'éteindre (phase 4), ou bien il peut se déplacer latéralement pour retrouver une position plus stable correspondant à une plus faible longueur d'arc (phase 5), ou encore, il peut s'allonger jusqu'à atteindre l'électrode et provoquer ainsi le contournement. Dans ce cas, l'allongement de l'arc se fait à la surface de l'électrolyte sans formation de zone sèche (phase 6).

Bien entendu, en pratique le phénomène s'initie et évolue en fonction de la forme des isolateurs, de l'hétérogénéité des dépôts et de l'humidification de telle ou telle autre partie de l'isolateur. Il est aussi fréquent que plusieurs arcs naissent simultanément le long d'une chaîne ou d'une colonne isolante. Enfin, nous avons implicitement admis que la tension appliquée à l'isolateur était constante. La tension alternative présente, à cet égard, une différence importante du fait de son annulation périodique. Les arcs locaux s'éteignent à chaque passage par zéro et se réamorcent d'une façon aléatoire aux maxima de tension [54].

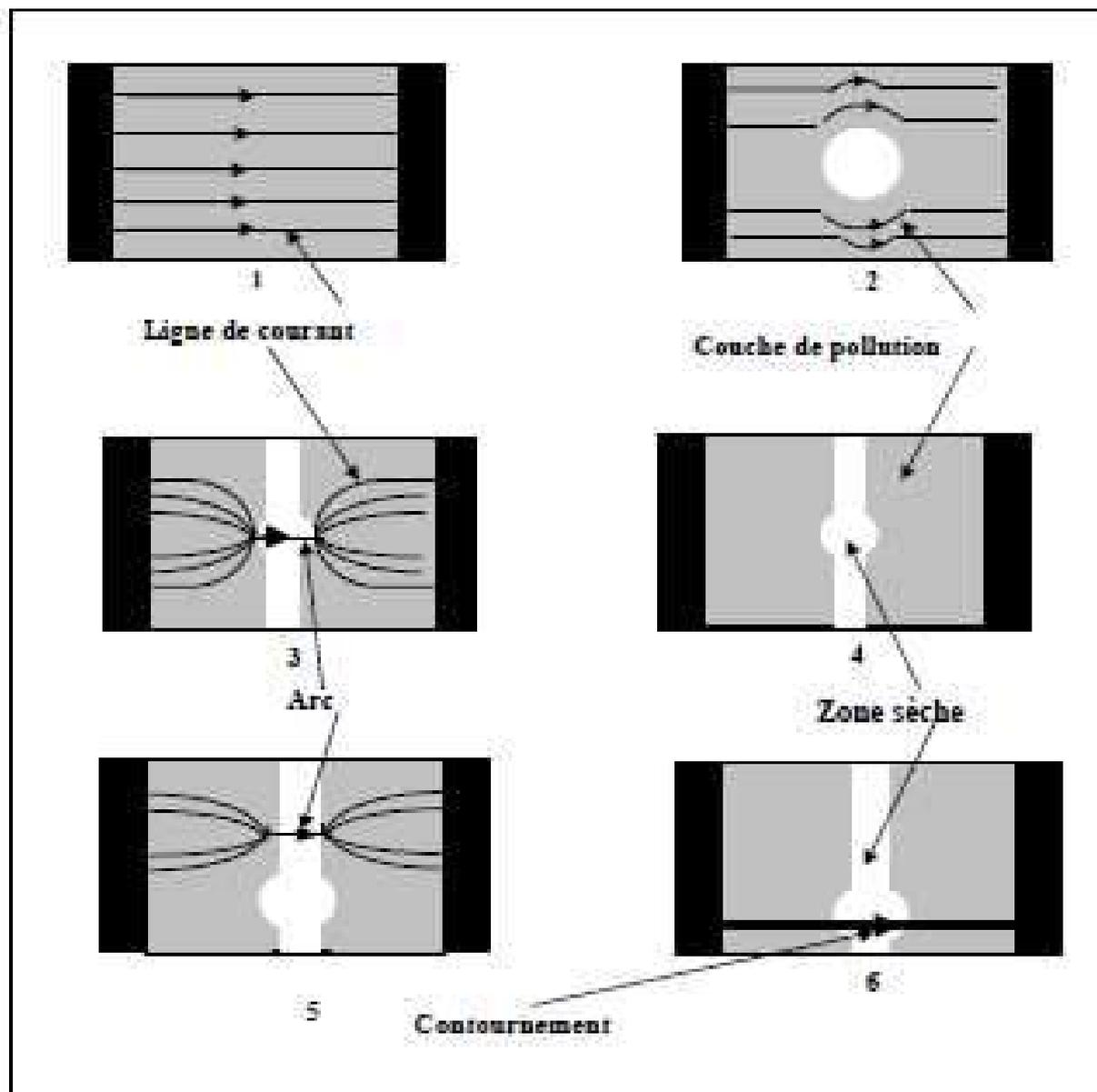


Figure I. 6. Etapes du contournement d'une couche polluée [1].

I.11 Méthodes d'essais sous pollution

Avant de mettre en service un isolateur quelconque, il faut le soumettre à certains essais prescrits par la CEI [49].

Les isolateurs destinés à être utilisés dans les régions très polluées sont soumis aux essais sous pollution. Ces essais peuvent être classés en deux groupes :

- Essais sous pollution naturelle sur site (in situ).
- Essais sous pollution artificielle au laboratoire.

I.11.1 Essais sous pollution naturelle

Ces essais consistent à installer dans différents sites pollués, des stations dans lesquelles on observe et analyse le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs ou colonnes isolantes, de longueurs et de profils différents [55]. Ils ont l'avantage de tenir compte de l'effet de toutes les contraintes, dans toute leur complexité dans un site donné [14, 54].

L'inconvénient majeur est qu'ils nécessitent plusieurs années pour pouvoir étudier valablement les performances des isolateurs [49]. Pour cela, plusieurs méthodes de laboratoire ont été proposées en vue de simuler convenablement les conditions naturelles d'exploitation [1].

I.11.2 Essais sous pollution artificielle

Vu leur rapidité et leur coût relativement bas, de nos jours, sont largement utilisés par les chercheurs. Ils consistent à reproduire en laboratoire les conditions de la pollution naturelle [50]. Les méthodes d'essais qui demeurent actuellement normalisées peuvent être classées en trois grandes catégories :

- Méthodes de la couche solide;
- Méthode du brouillard salin;
- Méthode de la chambre de poussière.

I.11.2.1 Méthodes des couches solides

Dans ces méthodes, la surface isolante est recouverte par pulvérisation d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte. La conductivité de cette suspension est réglée par addition d'une certaine quantité de chlorure de sodium.

Si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), le paramètre de sévérité est défini par la densité de dépôt de sel en mg/cm^2 .

Par ailleurs, si l'humidification a lieu avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini par la conductivité de la couche polluante [44].

Dans certains cas, les chercheurs ont utilisé une couche semi-conductrice qui garde après séchage une conductivité constante [56].

I.11.2.2 Méthodes du brouillard salin

Dans cette méthode, l'isolateur soumis à la tension d'essai, est placé dans un brouillard salin dont le taux de salinité définit la sévérité de pollution. Ce taux peut être caractérisé soit, par

le poids de sel contenu dans un litre d'eau en g/l, soit par la mesure de la résistivité ou de la densité de la solution saline. Selon la classification des sites pollués, les valeurs de salinité appliquées sont choisies selon une progression allant de 2,5 à 160 g/l.

La méthode du brouillard salin représente assez bien la pollution marine. Elle est également valable pour représenter de nombreux dépôts de pollution industrielle ayant une couche de pollution relativement mince [57].

L11.2.3 Méthodes de la chambre de poussière

Afin de représenter le niveau de pollution et la distribution de polluants de la même manière que dans les conditions naturelles, dans une chambre d'essai, on génère un débit d'air lent transportant du sel et des matériaux inertes avec une distribution uniforme que possible, l'objet d'essai étant positionné au milieu de la chambre. Un vaporisateur va mouiller le dépôt de pollution généré précédemment [57, 58].

L11.3 Critiques de ces méthodes d'essai

Parmi les méthodes que nous avons décrites, la méthode du brouillard salin est d'une grande facilité de mise en œuvre et permet d'obtenir une bonne reproductibilité des essais elle est donc la plus utilisée.

De plus, sa validité a été vérifiée dans un certain nombre de régions côtières et zones industrielles.

D'autre part, la méthode de la chambre de poussière offre un atout considérable pour les essais au laboratoire en tension continue. Cependant son utilisation est limitée vu les complexités qu'elle présente en terme de faisabilité.

Notons que ces méthodes sont moins représentatives pour simuler la pollution désertique [14].

L12 Techniques de lutte contre la pollution

L'augmentation du degré de pollution représente un risque immense pour les installations électriques. Pour cela plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées [52].

Les différentes techniques utilisées pour la lutte contre la pollution sont :

L12.1 Allongement de la ligne de fuite

Elle permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution.

Deux méthodes sont employées :

- Le changement de type d'isolateurs (pour allonger la ligne de fuite) : c'est une opération très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste [54].
- L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [59].

I12.2 Isolateurs plats

Les isolateurs sans nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto nettoyant très bien sous l'effet du vent [18].

I12.3 Graissage périodique

Cette méthode est utilisée seulement pour les isolateurs de poste. Par mesure économique, on utilise des graisses à base de silicone grâce à leurs propriétés hydrophobes. La longévité du graissage dépend à la fois de l'environnement (pollution, conditions climatiques) et de la qualité des graisses.

I12.4 Revêtement silicone

Il consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Il protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre, sa longévité est nettement supérieure à celle du graissage [11, 60].

I12.5 Les isolateurs composites

Ils ont en plus l'avantage d'être légers et d'avoir une grande résistance mécanique que leur confère le noyau. Ils ont aussi de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères [38].

Ils sont constitués d'un noyau en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère.

Cependant, ces isolateurs présentent le désavantage de vieillir sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électrique et mécanique) [54].

I.12.6 Nettoyages des isolateurs

Le nettoyage manuel et le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde. Néanmoins, ce choix pose des problèmes majeurs à cause des interruptions de service, parfois assez longues. Pour éviter ces interruptions, on effectue un lavage sous tension des isolateurs à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas et afin d'éliminer tout risque de contournement, le lavage est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau, le processus et les distances de sécurité à respecter [52].

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre introductif, une synthèse bibliographique des différents aspects des phénomènes de pollutions est présentée.

Les principales conclusions que l'on tire de cette synthèse sont :

- Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité du service.

- Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire les isolateurs qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

- La pollution reste un facteur déterminant pour le dimensionnement des isolateurs dans les ouvrages de haute tension.

- La méthode d'essai sous pollution artificielle est largement utilisée. Elle consiste à reproduire au laboratoire les conditions de la pollution naturelle, ainsi qu'elle possède l'avantage d'être rapide.

- Les techniques de lutte contre la pollution actuellement connues (graissage, lavage, nouveaux types d'isolateurs, revêtements hydrophobes...), permettent de disposer aujourd'hui de solutions curatives à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants sur le réseau.

Dans le deuxième, nous présentons la station d'essais de l'université de BISKRA où nous avons réalisé nos expériences, et décrivons les différentes procédures et étapes de notre travail expérimental.

Chapitre II

Techniques
Expérimentales

II.1 Introduction

Le but de cette étude expérimental est d'étudier l'impact de la conductivité ainsi que la largeur de pollution sur le comportement d'un isolateur de haute tension soumis à une tension alternative a fréquence industrielle 50 Hz. L'isolateur utilisé est de type capot-tige 1512L exploité dans les régions désertiques algériennes [14].

Les essais réalisés au laboratoire de haute tension de l'université de Biskra, concernent la tension de contournements et la visualisation du courant de fuite ainsi que le déphasage tension-courant sur un isolateur réel et sur un modèle de haute tension (1512L).

Dans ce chapitre nous présentons l'équipement de la station d'essais. Nous présentons aussi les différents types d'essais, et les modèles opératoires utilisés pour les essais de haute tension ainsi que les procédés d'essais.

II.2 Dispositif expérimental

II.2.1 Circuit d'essai du laboratoire de Haute tension (Université de Biskra)

Les essais ont été effectués à l'aide de la station d'essais (figure (II.1)) du laboratoire de haute tension de l'université de Biskra.

L'équipement de notre laboratoire est de marque PHYWE composé de :

- Un transformateur d'essai.
- Un transformateur de réglage.
- Un diviseur capacitif de tension $C_m=100$ pF.
- Un pupitre de commande et des appareils de mesure et de protection.
- Un oscilloscope numérique.
- L'objet d'essai.

La Photographie (II.1) correspond au montage réalisé au laboratoire de haute tension.



Photographie II.1 Circuit d'essai à fréquence industrielle.
a-Modèle réel, b-Modèle expérimental.

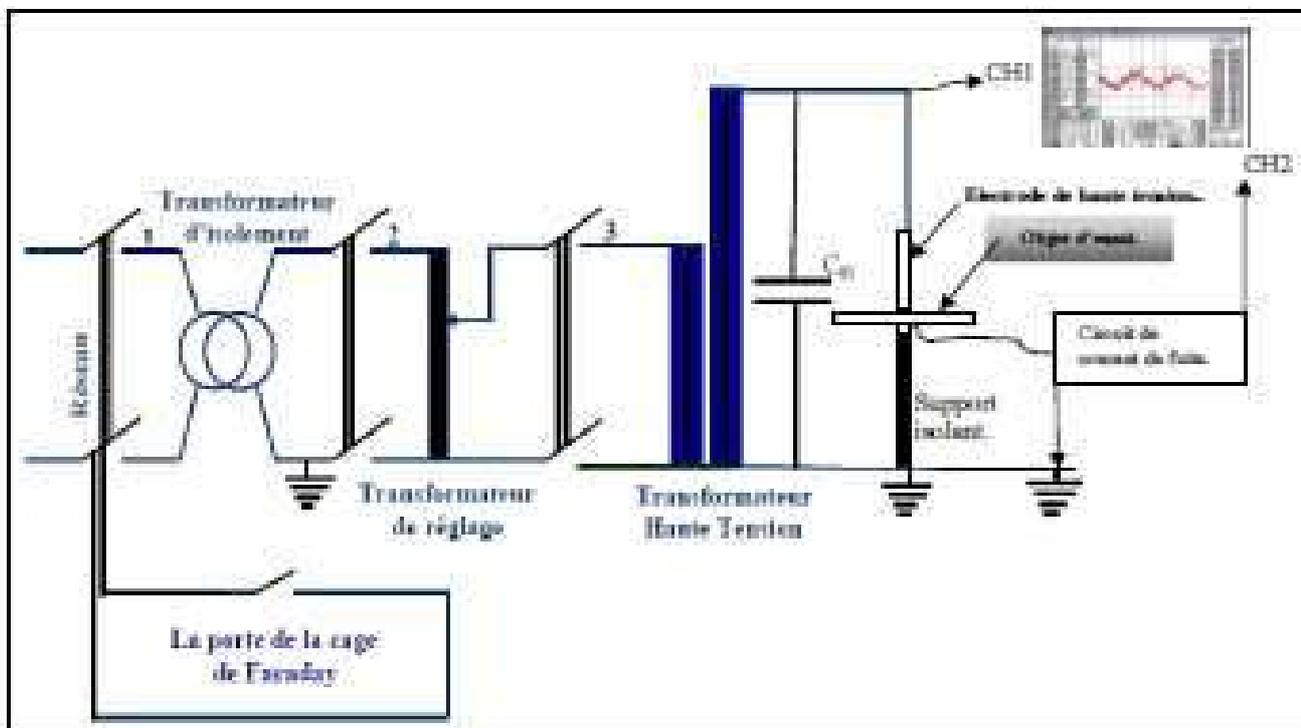


Figure II.1 Circuit d'essai à fréquence industrielle.

II.2.1.1 Transformateur d'essai

Il alimente l'objet d'essai. Il est de type monophasé, ses caractéristiques sont les suivantes :

- Tension primaire nominale $U_{1n} = 250V$ (50Hz).
- Tension secondaire nominale $U_2 = 140kV$.
- Puissance apparente nominale $S_n = 5kVA$.
- Tension de court-circuit $U_{cc} = 3.5\%$.

II.2.1.2 Transformateur de réglage

Il permet le réglage de la tension secondaire à la sortie du transformateur d'essai de zéro à la pleine tension. Le réglage est fait manuellement à l'aide d'un volant. Ses caractéristiques sont :

- Tension primaire nominale $U_{1n} = 220V$.
- Tension secondaire réglable (de 0 à 500V).
- Puissance apparente nominale $S_n = 5500 VA$.

II.2.1.3 Oscilloscope numérique

C'est un appareil qui permet de donner la forme de l'onde des phénomènes enregistrés. (Courant de fuite, tension appliquée) (Digital Storage Oscilloscope 25 Mhz, 250M Sa/s, 18W, 40 VA). Photographie (II.2).

II.2.1.4 Pupitre de commande

Ce pupitre est alimenté en 220V indépendamment du régulateur de tension et du transformateur d'essai à travers un transformateur d'isolement. Photographie (II.2).



Photographie II.2 Photographie du pupitre de commande et oscilloscope numérique du laboratoire de haute tension de l'université de Biskra.

II.2.1.5 Appareils de mesure et de protection

L'alimentation du laboratoire se fait à partir d'un pupitre de commande situé dans le laboratoire, mais à l'extérieur de la plate-forme d'essai (la cage de Faraday). Le transformateur de haute tension et son régulateur sont protégés indépendamment par un fusible et un relais thermique de 250A. Ces protections sont liées avec le circuit de la bobine du contacteur principal, ce qui donne une protection suffisante contre les surcharges du transformateur et les courants de court-circuit.

Pour les mesures de tension on a :

DSM : un voltmètre numérique pour mesurer la tension alternative.

DGM : un voltmètre numérique pour mesurer la tension continue.

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

II.2.1.6 Diviseur de tension

Il existe deux diviseurs de tension :

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

II.2.1.7 Objet d'essai

Notre travail consiste à travailler sur un isolateur réel et sur un model de laboratoire (1512L) (figure (II.2, II.3)).

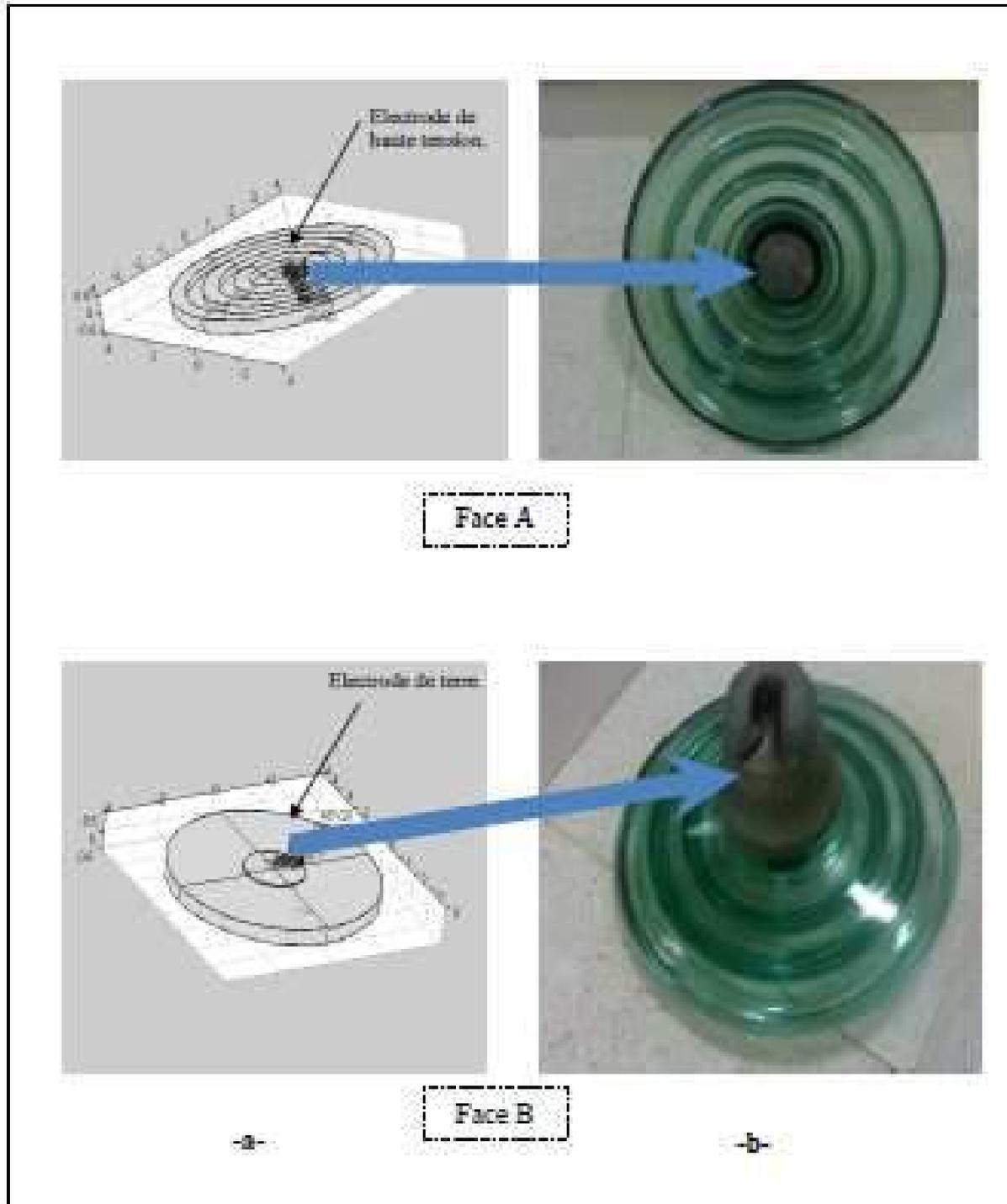


Figure II.2 Isolateur de haute tension 1512L propre (a- modèle du laboratoire (expérimental), b- Modèle réel).

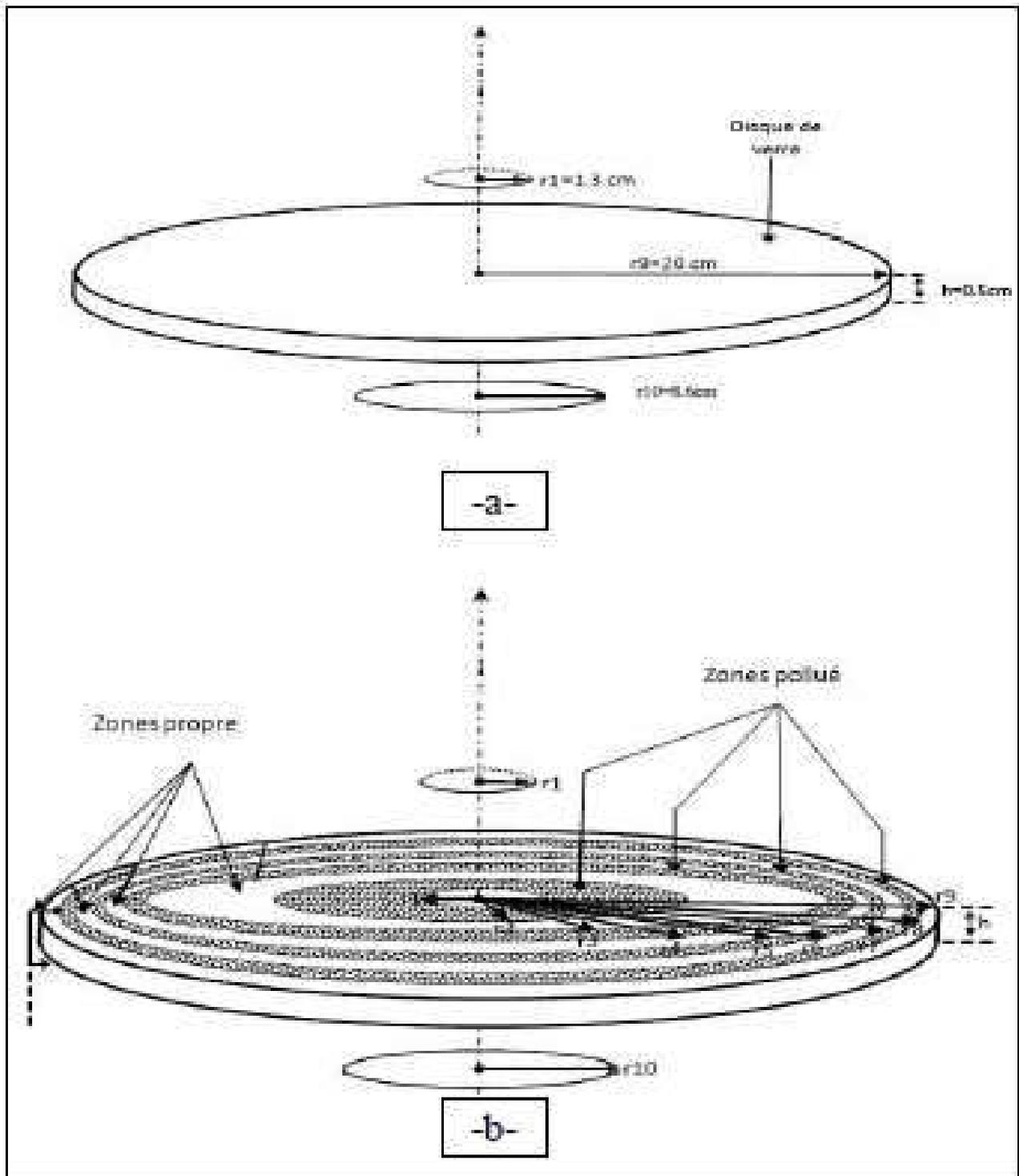


Figure II.3 Le modèle expérimental. a-Modèle expérimental complètement propre, b- Modèle expérimental sous pollution discontinue

Les dimensions concernant l'isolateur 1512 L sont mentionnées dans le (Tableau II.1).

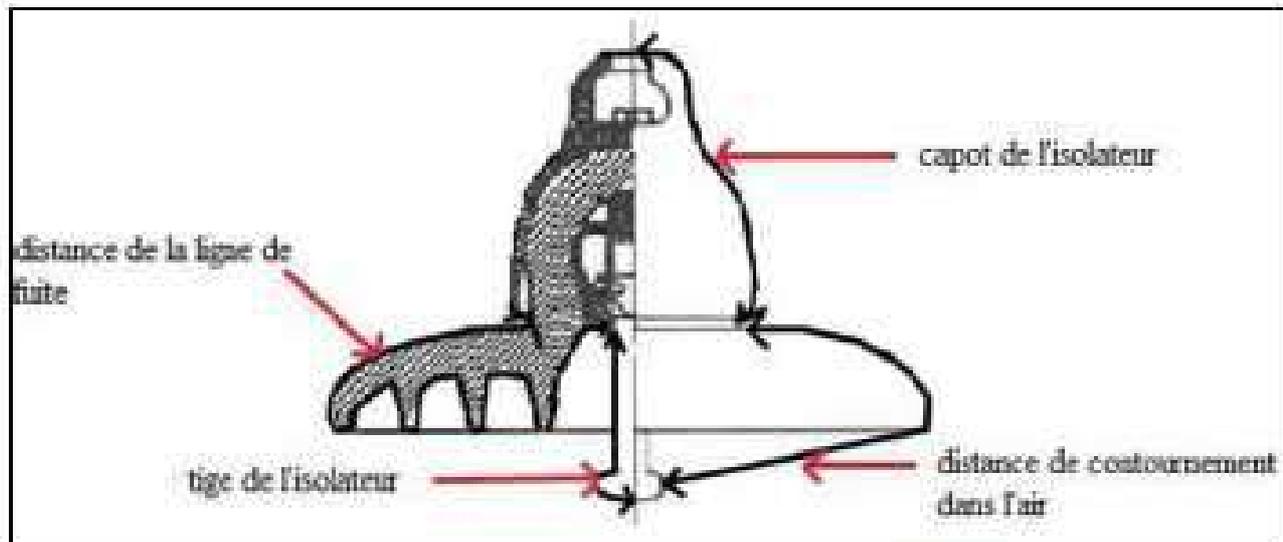


Figure II.4 Grandeurs de l'isolateur 1512L [29].

Grandeur	Valeur
Longueur de la ligne de fuite	306 mm
Distance de contournement dans l'air	230 mm
Capot de l'isolateur	244 mm
Tige de l'isolateur	125 mm
Poids net de l'isolateur	3.75 Kg

Tableau II.1 Les dimensions de l'isolateur 1512 L.

II.3 Mode opératoire

Le modèle (réel ou expérimental) est disposé horizontalement sur un support en aluminium, le tout étant posé sur une table en bois. Le modèle se trouve ainsi placé à environ un mètre du sol, et environ deux mètres du transformateur de haute tension de manière à éviter tout phénomène de parasite dû au sol et aux bobinages du transformateur.

II.3.1 Modèle expérimental

Notre travail consiste à faire les essais sur l'isolateur réel 1512L, et sur un modèle de laboratoire :

➤ L'isolateur réel 1512L est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malleable et à l'intérieur une tige en acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre. L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les dimensions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant et y être maintenue par une goupille.

L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique (figure (II.5 (a, b))).

➤ A cause de la symétrie de l'isolateur, le modèle expérimental que nous avons proposé, est un modèle dont la forme est en disque. Il est constitué d'une plaque de verre de rayon ($r = 200\text{mm}$) et épaisseur ($e = 5\text{mm}$) ayant la propriété de résister à la chaleur due aux décharges électriques.

Notre modèle proposé est muni de deux électrodes en papier aluminium. L'une circulaire (représente le capot) de rayon $r = 86\text{mm}$, reliée à la terre, et l'autre aussi circulaire de rayon $r = 13\text{mm}$ mise à la borne de haute tension. Le modèle du laboratoire proposé est soumis à une répartition discontinue circulaire de la pollution reproduisant l'état critique de surface de l'isolateur capot et tige type 1512L, prélevé de la région de Hassi R'mel [14], (figure (II.5 (a, b))).

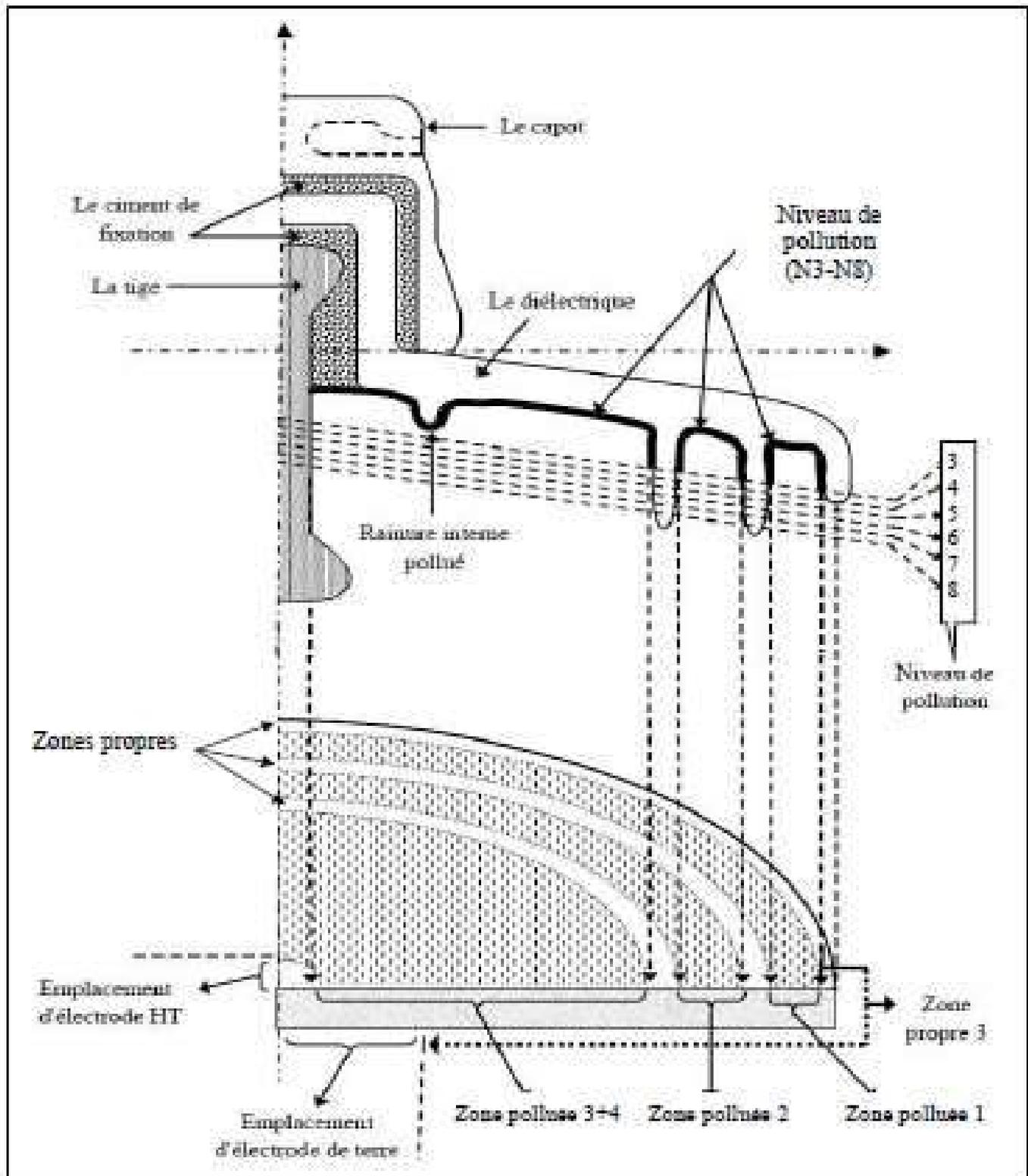


Figure II.5.(a) Le modèle réel <VS> Le modèle expérimental (Cas d'apparition de trois bandes de pollutions).

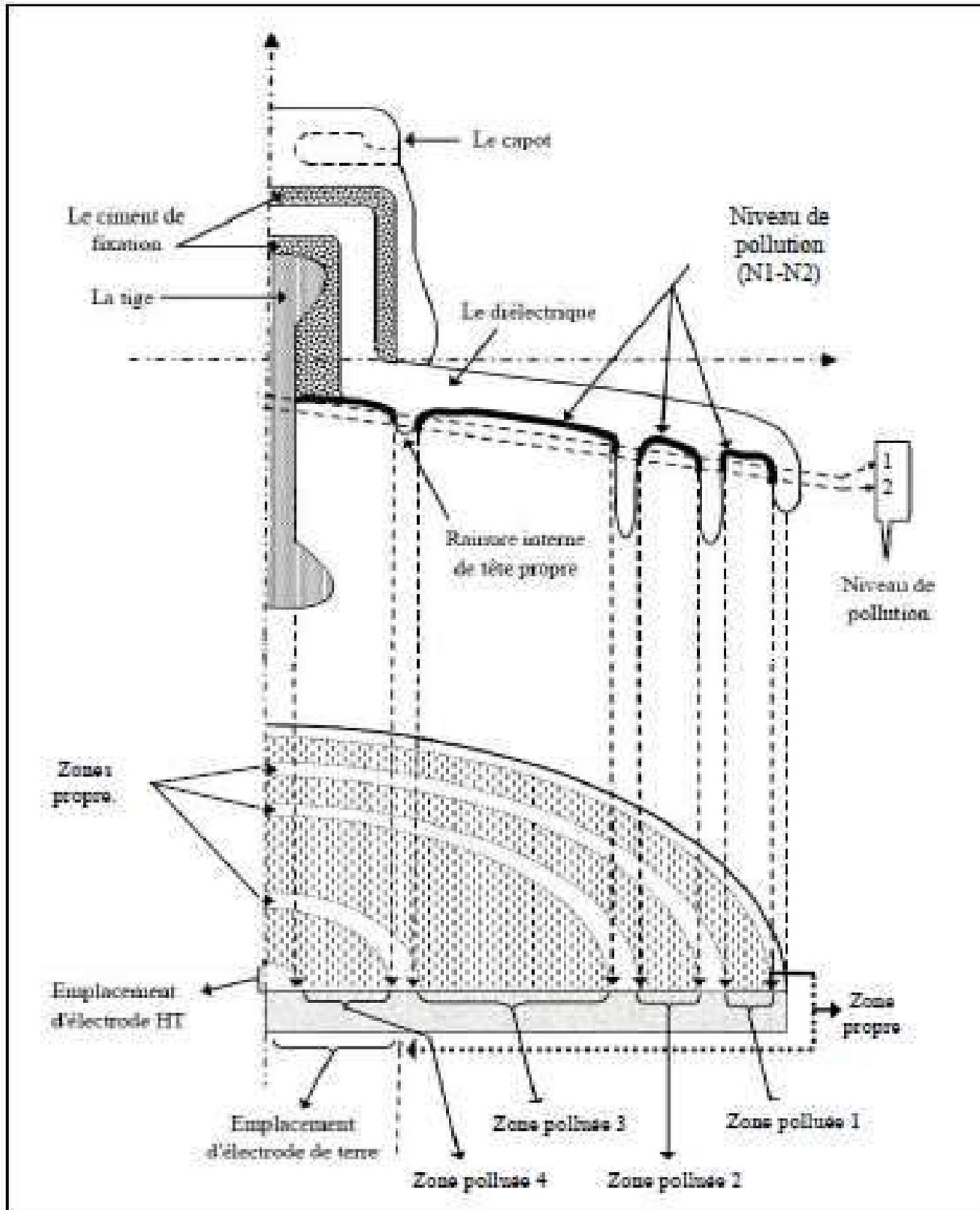


Figure II.5.(b) Le modèle réel <VS> Le modèle expérimental (Cas d'apparition de quatre bandes de pollutions).

La distance inter électrodes du modèle expérimental ($d=306$ mm) correspond à la ligne de fuite de l'isolateur réel. Afin de simuler les couches polluantes nous avons utilisé la pulvérisation.

II.3.2 Préparation de l'isolateur réel 1512L et le modèle expérimental

➤ Avant chaque essai, l'isolateur est bien nettoyé avec de l'eau distillée et séché en utilisant des serviettes en papier. Un deuxième nettoyage est effectué à l'aide d'un coton imbibé d'alcool chirurgical, afin d'assurer une propriété quasi-totale de l'isolateur.

➤ Avant chaque série d'essai, le modèle expérimental est bien nettoyé, puis imbibé de gaz oil dans les endroits d'emplacement des électrodes en aluminium, de manière à ce qu'aucun espace d'air ne reste entre la plaque et les électrodes. La plaque est ensuite essuyée avec du coton imbibé d'alcool chirurgical pour éliminer toute trace de gaz oil sur le modèle isolant. Le modèle est disposé horizontalement sur un support isolant.

II.3.3 Application de la couche de pollution

II.3.3.1 Cas d'un isolateur réel 1512L

Les solutions polluantes ont été préparées au Laboratoire de chimie de notre université, nous avons utilisé une solution saline (à base de NaCl). Pour la solution saline, nous avons rajouté à l'eau distillée, des quantités de chlorure de sodium pour préparer la solution saline. La conductivité est mesurée à l'aide d'un conductimètre. Nous fixons, à chaque fois, la conductivité de la solution à la valeur désirée grâce à un conductimètre, en variant la concentration de NaCl dans l'eau distillée. Les conductivités ainsi choisies sont les suivantes : 1.823 mS/cm, 3.33 mS/cm, 8.02 mS/cm, 12.61 mS/cm, 16.32 mS/cm, 30.05 mS/cm, 50.04 mS/cm, 93.7 mS/cm (figure(II.6)).

Par ailleurs, la conductivité de l'eau distillée ainsi utilisée est de $10 \mu\text{S/cm}$.

La pollution artificielle (conductivité) est préparée selon la norme CEI 507 (figure. (II.6)).

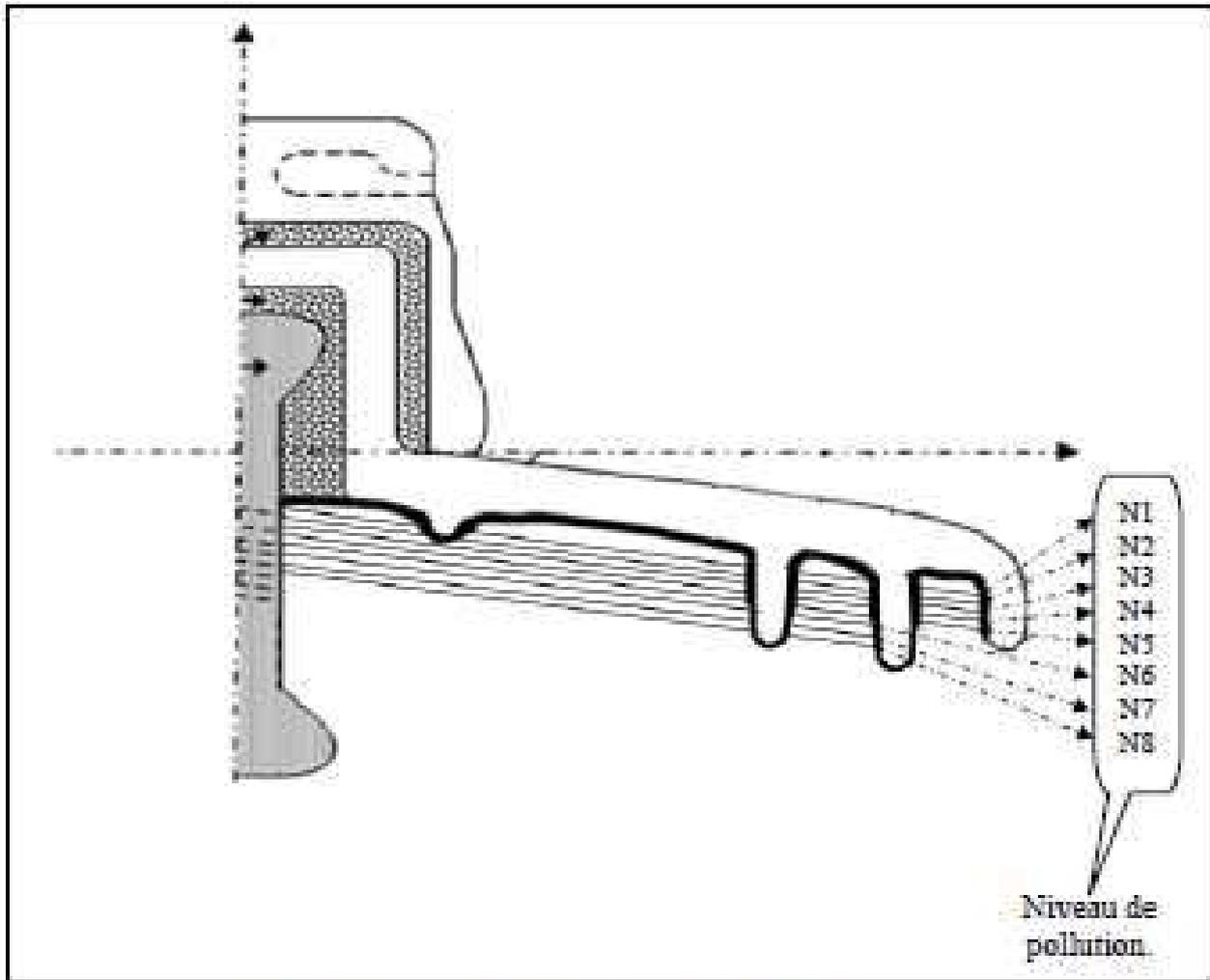


Figure II 6 Modèle réel de l'isolateur 1512L, plein pollution.

La pollution est introduite comme suit :

		Modèle réel				Modèle expérimental	Représentation dans les courbes (cm)
Les zones Les niveaux (ml)	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	<div style="display: inline-block; border: 1px dashed black; width: 10px; height: 10px; margin-right: 5px;"></div> Electrode de haute tension. <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; width: 10px; height: 10px; margin-right: 5px; background-color: white;"></div> Zones propres. <div style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; margin-right: 5px; background-color: blue;"></div> Zones polluées.		
	N1	30	15	11	15		1
N2	60	30	22	30		2	
N3	90	45	87.5			3	
N4	120	60	123			4	
N5	150	75	158.5			5	

N6	-	90	194		6
N7	-	105	229,5		7
N8	-	120	265		8

Tableau II.12 Répartition des zones polluées sur les niveaux.

II.3.3.2 Cas d'un modèle expérimental

➤ La couche polluante est réalisée par des solutions polluantes, des coupes circulaires des papiers aluminium à la surface de l'isolateur pour la conception de l'électrode active et celle de la terre, en humidifiant les surfaces de l'isolateur, à chaque fois que nous changeons la couche polluante. Nous appliquons une tension alternative, et mesurons la tension de contournement.

➤ Les solutions polluantes sont composées de différentes quantités de NaCl mélangées à de l'eau distillée, comme déjà indiqué précédemment afin d'obtenir les conductivités volumiques désirées. Le choix de ces conductivités est fait pour avoir une bonne visibilité concernant l'élongation des décharges parallèles et aussi pour une bonne étude de la tension de contournement et du courant de fuite pour le cas de la pollution discontinue.

Dans ce cas la méthode utilisée est la méthode de pulvérisation.

a) Méthode de pulvérisation

La méthode de pulvérisation a été choisie pour polluer artificiellement la surface du modèle de l'isolateur.

En effet, nous avons pulvérisé uniformément la surface du modèle (pollution discontinue), pour assurer une répartition uniforme et une bonne reproductibilité de la couche polluante.

Pour une bonne reproductibilité de la couche polluante, nous avons gardé, durant tous les essais, le même nombre de pulvérisations (six pulvérisations) pour les quatres côtés. La figure (II.7) illustre le mode de pulvérisation.

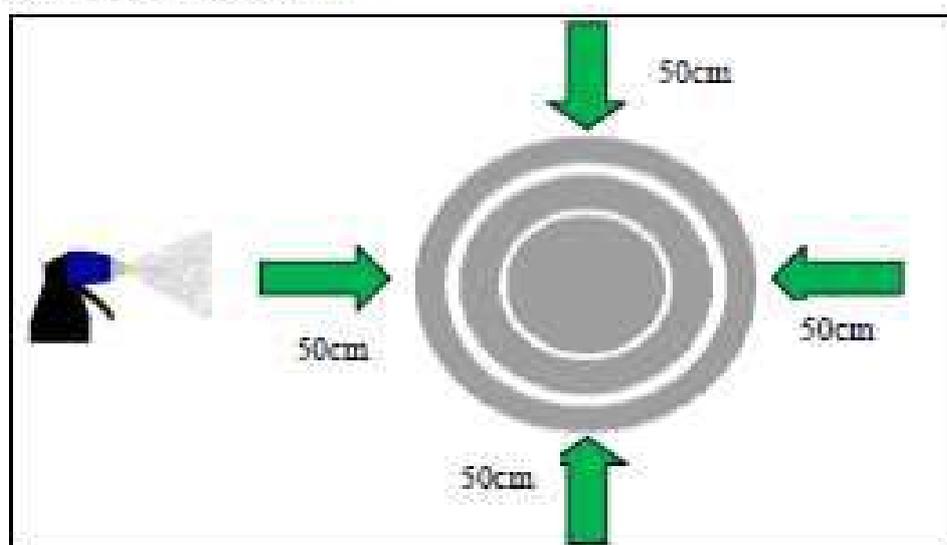


Figure II.7 Méthode de pulvérisation pour le cas d'une pollution uniforme.

II.4 Correction atmosphérique

II.4.1 Influence de la densité relative de l'air

Dans la CEI 60, on trouve la notion de densité relative qui est définie comme étant le rapport de la densité de l'air dans les conditions de pression P et de température T , à la densité de l'air dans les conditions atmosphériques de référence dites normales, c'est à dire:

- ❖ Température ambiante $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ❖ Pression atmosphérique $P_0 = 1013\text{ mbar}$ (= 760 mmHg)

$$\delta = 0.289 \frac{P}{273 + T} \quad (\text{II.1})$$

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

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

Cette équation (II.1) est utilisée pour convertir la tension de décharge U mesurée dans les conditions atmosphériques d'essais (température T et pression P) à la valeur U_0 qui aurait été obtenue dans les conditions normales (T_0 et P_0):

$$U_0 = \frac{U}{(\delta)^n} \quad n \leq 1 \quad (\text{II.2})$$

L'exposant n dépend de la forme d'onde, de la longueur d'intervalle et de la position des électrodes.

II.4.2 Influence de l'humidité

La tension d'amorçage est particulièrement moins sensible à la variation de l'humidité dans le cas des ondes rapides ou très rapides. C'est le cas pour les chocs de foudre [61]. Ainsi, nous ne tiendrons pas compte de ce facteur.

II.5 Procédé d'essais

Après la préparation de l'objet d'essai, nous procédons par la mesure de la tension de contournement pour les différentes largeurs de la zone la plus conductrice et pour les différentes conductivités. Cette mesure permet non seulement de déterminer l'influence de la largeur de pollution ainsi que de la conductivité sur la tension de contournement, mais aussi de prévoir

les paliers des tensions à appliquer pour l'enregistrement du courant de fuite à l'aide d'un oscilloscope numérique. Nous avons enregistré ainsi, simultanément,

l'onde du courant de fuite et l'onde de la tension appliquée, pour chaque niveau de tension, afin de déterminer le déphasage courant-tension.

La tension d'essai est appliquée d'une manière progressivement croissante jusqu'au niveau de tension désiré.

II.5.1 Mesure de la tension de contournement

Avant chaque essai, nous nettoyons toutes les zones propres avec du coton, imbibé d'alcool isopropylique, pour éliminer les traces partiellement frottées par le passage de l'arc électrique. (Modèles expérimental et réel).

La mesure de la tension de contournement représentant la moyenne arithmétique de cinq mesures, a été effectuée pour le modèle de laboratoire et le modèle réel. Ces essais ont été effectués sous tension alternative pour chaque largeur de pollution et chaque conductivité superficielle ainsi que pour les cas extrêmes à savoir la conductivité nulle ($10\mu S/cm$), et le cas de pollution uniforme.

Dans le but d'opérer avec un minimum d'erreurs dans les mesures, nous avons procédé à plusieurs essais préliminaires.

Les largeurs que nous avons adoptées sont les suivantes :

II.5.1.1 Pollution discontinue

La pollution est présentée par trois zones Z_1 , Z_2 , Z_3 . Nous commençons par une variation de la largeur de la couche de pollution (largeur de la couche polluante) de 0 (propre) à 100% (pollution uniforme), puis de la même manière pour les différentes conductivités par pulvérisation du modèle expérimental (figure (II.8.b)), pour le modèle réel 1512L, on ajoute les différentes solutions salines (différentes conductivités) dans les trois bandes (figure (II.8.a)).

La bande Z_3 représente la pollution proche de l'électrode de haute tension, elle sera décomposée en deux petites bandes (Z_4 et Z_5).

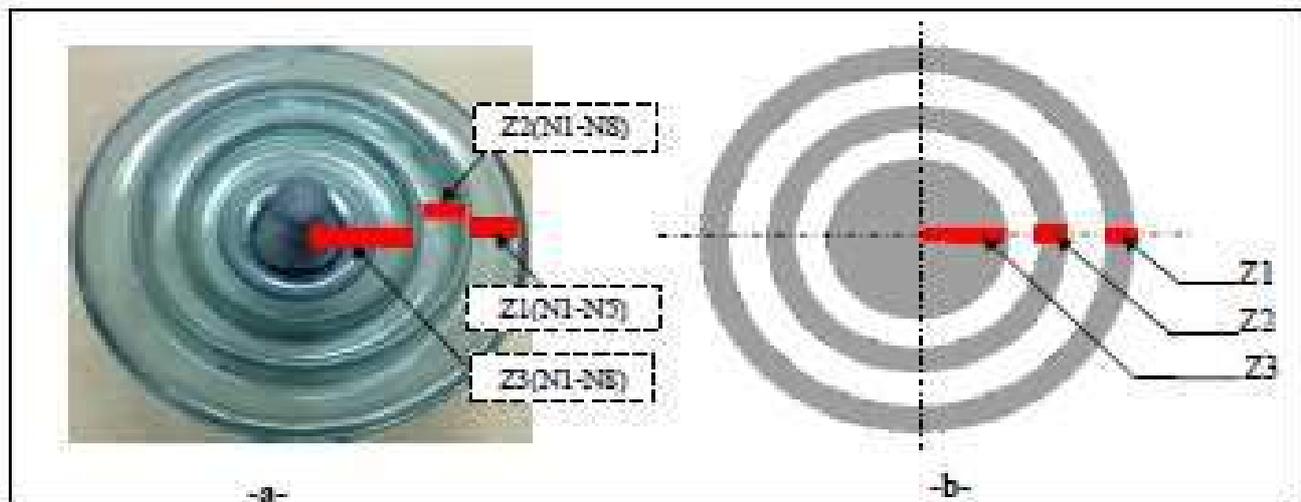


Figure II.8 Les zones de la pollution discontinue. (Conductivité superficielle).
a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

II.5.2 Mesure du courant de fuite

Nous avons mesuré et visualisé le courant de fuite pour différents paliers de tensions. Pour cette partie, nous enregistrons les formes de courants de fuites pour les différentes couches de pollution en utilisant un oscilloscope numérique pour les deux modèles, puis nous utilisons les huit salinités, pour un modèle réel et expérimental, à chaque fois nous enregistrons aussi les formes du courant de fuite. La tension appliquée choisie entre zéro et un niveau inférieur à celui de la tension de contournement correspondante à ce degré de pollution.

Les mesures du courant de fuite sont effectuées à l'aide d'un dispositif constitué par deux résistances et un amplificateur opérationnel de type UA741 inséré dans le retour à la terre (figure (II.9)). L'onde du courant est reportée à l'aide d'un câble coaxial, permettant la visualisation de la tension (image du courant de fuite) sur un oscilloscope numérique (DSO 25MHz). Afin de recueillir totalement le signal du courant, nous avons utilisé un adaptateur à l'entrée de l'oscilloscope.



Photographie II.3 Circuit de mesure du courant de fuite réalisé au labo de HT.

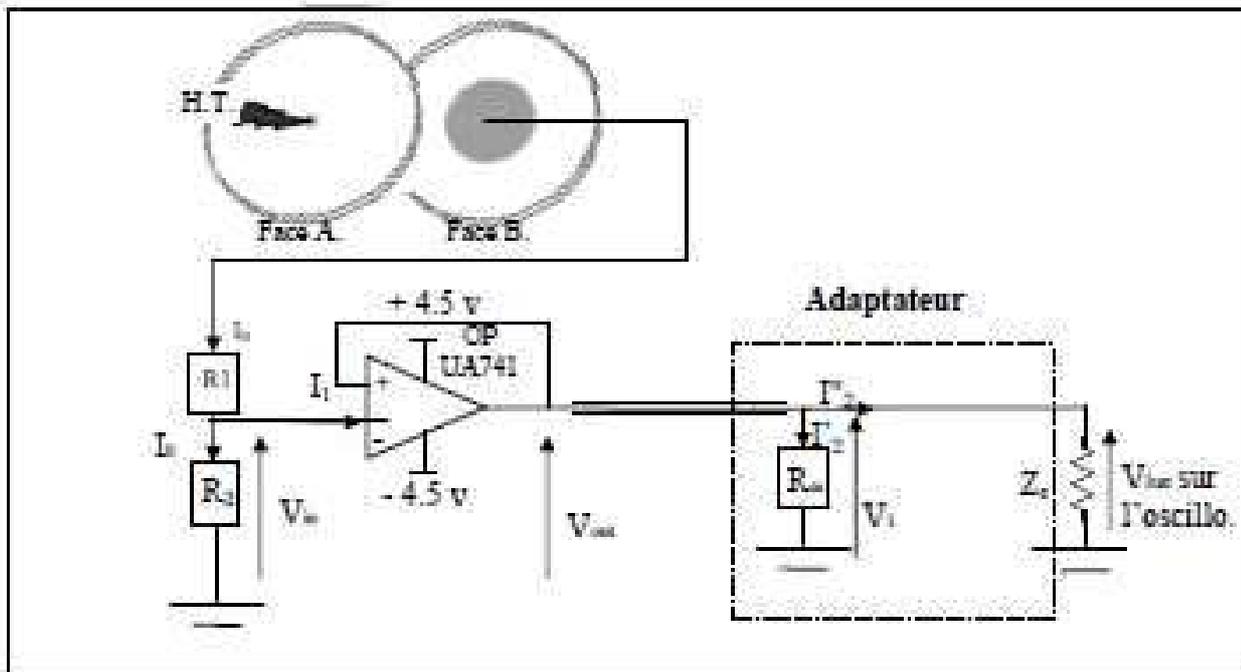


Figure II.9 Circuit réalisé pour la mesure du courant de fuite.

Avec :

Z_o : impédance d'entrée de l'oscilloscope.

R_m : résistance d'adaptation du câble de mesure.

R_2 : résistance pour diviser la tension d'entrée.

R_2 : Résistance pour mesurer l'image du courant de fuite.

V_{in} : Tension d'entrée de l'amplificateur.

V_{out} : Tension de sortie de l'amplificateur.

V_1 : La tension lue sur l'oscilloscope.

V_{inm} : La tension lue sur l'oscilloscope.

I_0 : courant de fuite.

II.5.3 Expression du courant de fuite I_0 en fonction de V_{inm}

Le courant I_0 peut être donné en fonction de la tension V_{in} et la résistance R_2 par :

$$I_0 = \frac{V_{in}}{R_2} \quad (\text{II.3})$$

Par ailleurs, le courant I_0 est nul car l'impédance d'entrée de l'amplificateur opérationnel est très grande, ce qui nous permet d'avoir les égalités suivantes :

$$V_{in} = V_{out} \text{ et } V_1 = V_{out} \quad (\text{II.4})$$

$$\text{En effet } V_{in} = I_0 R_2 \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Et } V_1 = R_2 I_0 \quad (\text{II.6})$$

D'où la relation entre le courant de fuite et le signal capté est :

$$\Rightarrow I_0 = \frac{V_1}{R_2} \quad (\text{II.7})$$

Par ailleurs,

$$\Rightarrow V_1 = V_{inm} ; V_{inm} : \text{ la tension lue sur l'oscilloscope} \quad (\text{II.8})$$

Comme $V_{inm} = V_1$:

$$V_{in} = V_{inm} \quad (\text{II.9})$$

Selon les relations (II.7) et (II.8) nous obtenons :

$$I_0(t) = (1/R_2) \cdot V_{inm}(t) \quad (\text{II.10})$$

II.5.4 Déphasage courant – tension

L'enregistrement simultané de l'onde du courant de fuite et celle de la tension appliquée permet l'obtention de l'angle de déphasage. Ce dernier peut être affiché sur l'écran de l'oscilloscope.

La mesure du déphasage est effectuée à l'aide d'un oscilloscope à fréquence d'échantillonnage de 15MHz et à deux canaux d'acquisition des signaux l'un pour la tension appliquée et l'autre pour le courant de fuite.

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'objectif de notre travail. Nous avons cité les dispositifs expérimentaux, (circuit d'essai, etc), de notre station d'essai à fréquence industrielle (50Hz) du laboratoire de Haute Tension de l'université de Biskra.

Nous avons donné les procédures d'essai pour mesurer la tension de contournement, le courant de fuite ainsi le déphasage entre courant-tension.

Notre travail consiste en l'étude de la variation de la tension de contournement, courant de fuite et le déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée pour:

- La variation de la couche de pollution en utilisant la conductivité superficielle. (modèle réel et expérimental).
- La variation de conductivité pour les deux cas. (modèle expérimental et réel).
- La variation du courant de fuite pour les deux cas. (modèle expérimental et réel).
- La variation du déphasage courant-tension pour les deux cas (modèle expérimental et réel).

Chapitre III

Résultats Obtenus et
Interprétations

III.1 Introduction

Nous présentons, dans ce chapitre, les résultats expérimentaux relatifs à l'influence de la discontinuité de la couche polluante sur le comportement d'un isolateur de haute tension capot et tige de type 1512L. Nous avons effectué de nombreux essais sur notre modèle réel et modèle de laboratoire. Plusieurs solutions de différentes conductivités (1.823mS/cm, 3.33mS/cm, 8.02mS/cm, 12.61mS/cm, 16.32 mS/cm, 30.5mS/cm, 50.4 mS/cm, 93.7mS/cm) et une répartition de la pollution (discontinue en pulvérisant la surface du modèle de laboratoire, et par remplissage pour le modèle réel) ont été appliquées.

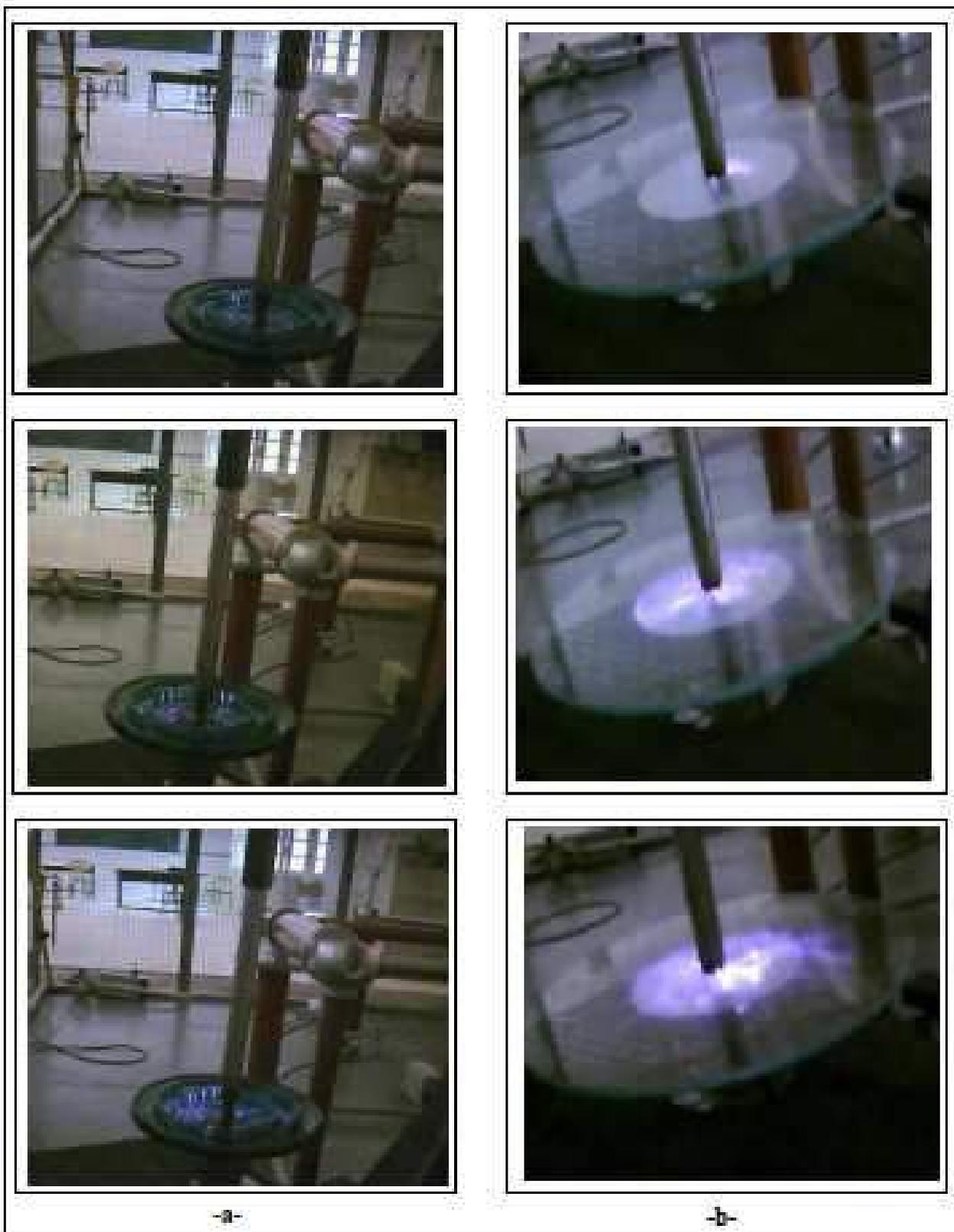
Le comportement est étudié en analysant l'évolution des principaux paramètres tels que la tension de contournement, le courant de fuite, et le déphasage courant-tension [62].

Notons que les essais de contournement effectués nous permettent, non seulement, de connaître la tension de contournement de l'isolateur, mais également, de déterminer les paliers de tension à appliquer lors de la mesure du courant de fuite et du déphasage courant-tension pour ne pas détruire les appareils de mesure et le circuit du courant de fuite.

III.2 Phénomènes observés lors des essais

III.2.1 Etapes de contournement

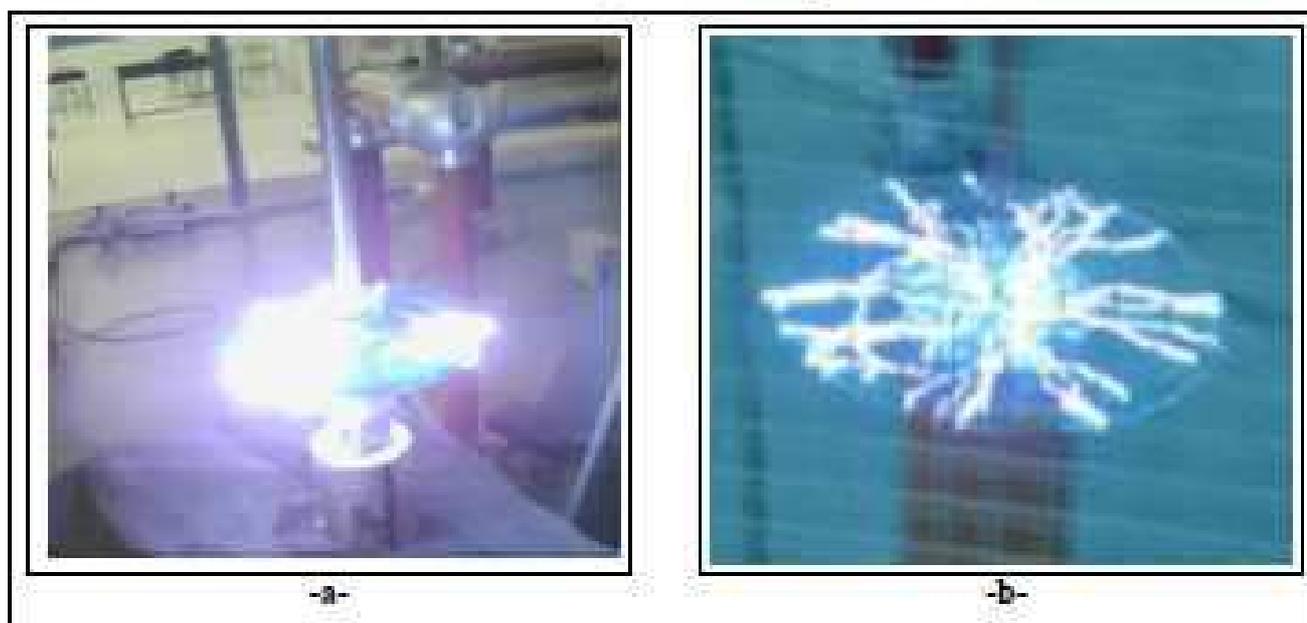
Pour une couche de pollution uniforme discontinue, nous avons constaté que l'application d'une tension de quelques kilovolts entre les électrodes, engendre un courant de fuite (apparition des étincelles (photographie(III.1))). La forte densité du courant au voisinage de l'électrode actif provoque une évaporation de la solution saline, par effet joule, et une zone sèche apparait. L'accroissement de la tension appliquée provoque l'allongement des arcs dans la direction de l'électrode opposée (photographie (III.2)). En augmentant davantage la tension, nous atteignons un état critique au-delà duquel toute nouvelle augmentation de la tension provoque un contournement total par développement des arcs aléatoires (photographie (III.3)).



Photographie III.1 Evolution des étincelles (initiation des arcs),
a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.



Photographie III.2 Evolution des arcs
a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.



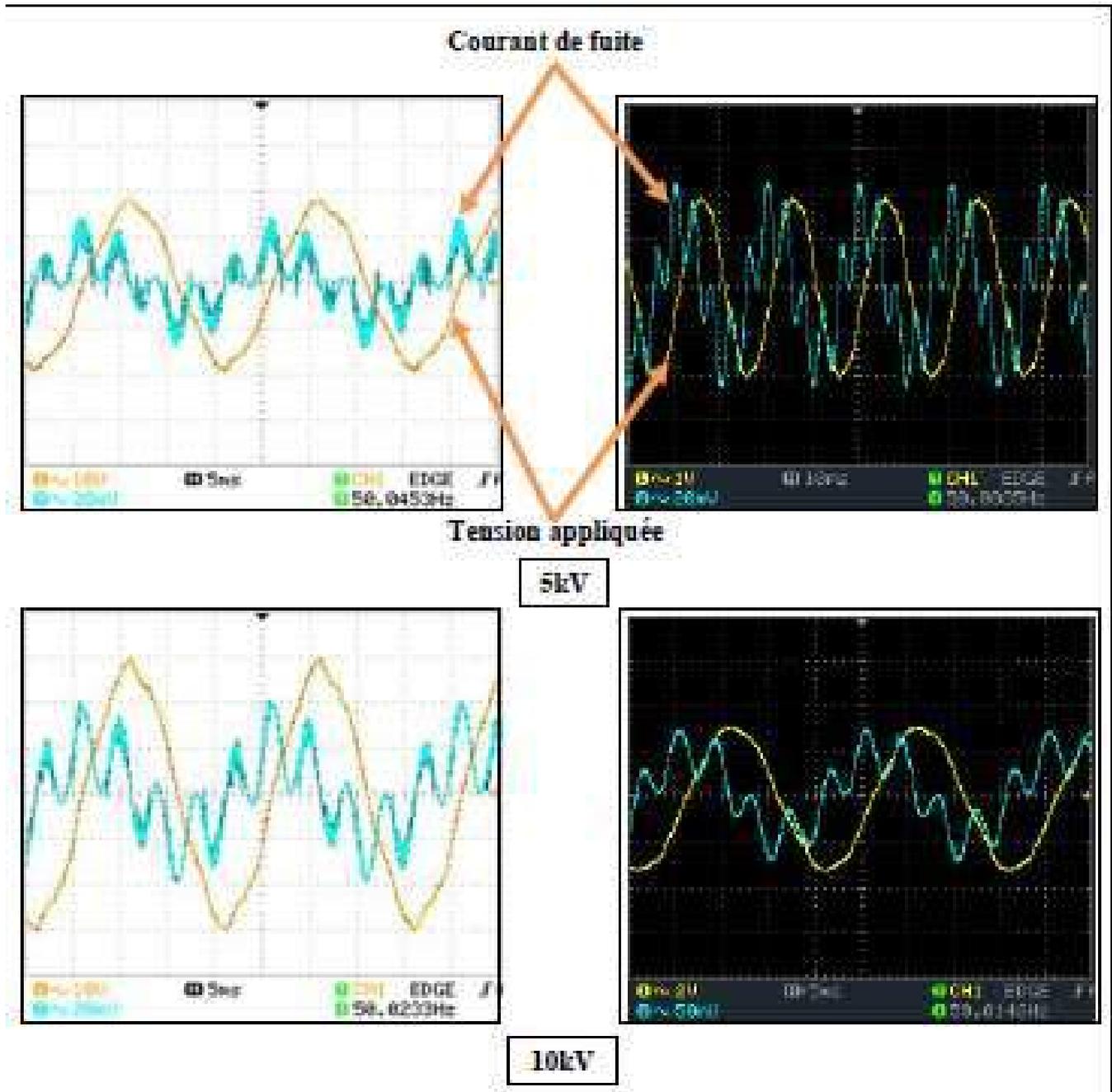
Photographie III.3 Contournement total
a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

III.2.2 Evolution de l'onde du courant de fuite

Quand la tension est augmentée graduellement jusqu'au contournement, l'évolution du signal du courant de fuite se fait à travers quatre étapes:

- Pour les faibles tensions d'alimentation, le courant de fuite est pseudo-sinusoidal. A partir d'un certain seuil estimé à 15kV, et sous l'effet couronne, chaque alternance de l'onde courant prend la forme d'un M distordu.

- Dès l'initiation des premières luminosités autour de l'électrode haute tension ($\geq 15\text{kV}$), nous constatons la génération d'impulsions d'amplitudes limitées.
- Pour des tensions supérieures ($\geq 25\text{kV}$), les distorsions ainsi que les amplitudes des impulsions deviennent importantes.
- Le contournement, le courant n'est constitué que par impulsions d'amplitudes variables. La figure (III.1) montre l'allure du courant de fuite avec la tension appliquée.



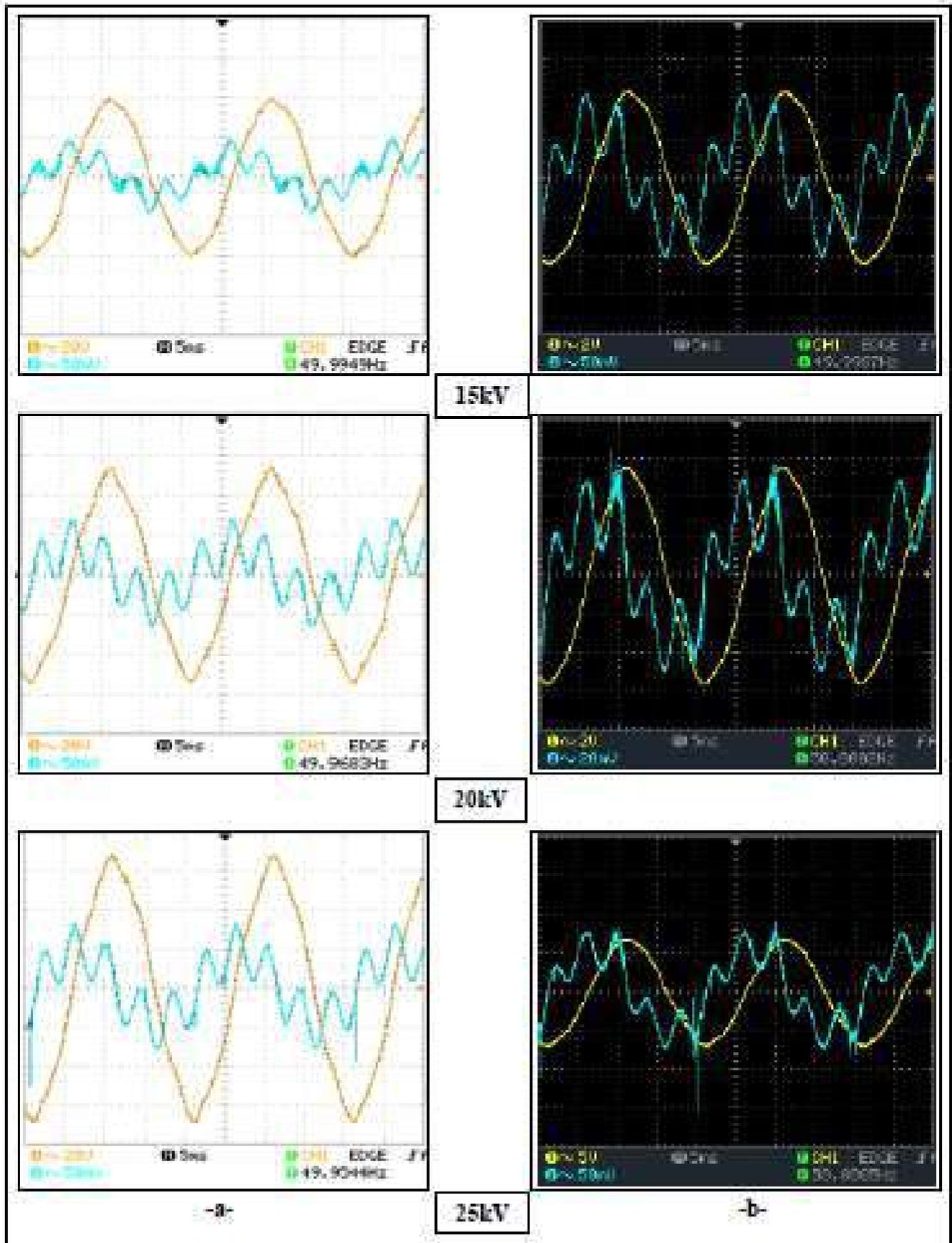


Figure III.1 Les visualisations des ondes de courant de fuite pour différentes valeurs de la tension appliquée (N5, 1,823 mS/cm)
 a-Modèle réel, b- Modèle expérimental.

III.3 Pollution discontinue

III.3.1 Tension de contournement

Dans cette section, nous nous sommes intéressés à la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité et de la largeur de la pollution (couche polluante) pour les deux modèles, réel et de laboratoire.

Ce phénomène, caractérisé par la non-génération d'arcs partiels, est dû à la fois à la nature de la pollution utilisée et au fait que la longueur totale de la bande propre équivalente (représentant la somme des différentes bandes propres partielles) dépasse la valeur critique à partir de laquelle aucune décharge stable ne se propage [63-66].

III.3.1.1 Influence de la largeur de la couche de pollution

La figure (III.2), nous présente la variation de la tension de contournement en fonction de la largeur de la pollution, pour différentes conductivités, nous nous attendions à une augmentation de la tension de contournement suite à la diminution de la largeur circulaire de la couche de pollution. Cependant, cette augmentation se montre insignifiante et ne dépasse pas dans le cas extrême 13% de la tension de contournement initiale.

III.3.1.2 Influence de la conductivité superficielle

Dans la figure (III.3), nous présentons la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité superficielle, pour différentes largeur de pollution, nous constatons que plus la conductivité est élevée, plus la tension de contournement est faible. Ceci est valable quelle que soit la largeur de la pollution.

Lorsque la conductivité augmente, la tension de contournement décroît rapidement pour des conductivités inférieures à 30.5 mS/cm et plus lentement au-delà de cette conductivité, en tendant vers une limite propre à chaque solution pour les deux cas (modèle réel et modèle expérimental).

La valeur maximale (67.1 kV pour le modèle réel, et 62.5 kV pour le modèle expérimental) de la tension de contournement est obtenue pour une conductivité de 1,823 mS/cm (niveau 1). Cette dernière correspond à la première conductivité utilisée comme référence.

En effet, il est tout à fait évident que la tension de contournement prélevée dans le cas où la pollution est plus faible (conductivité égale à 1,823mS/cm) est plus importante. Nous

pouvons déduire que le système isolant (isolateur) est plus rigide lorsque la conductivité est faible. Par voie de conséquence, le cas le plus défavorable, correspondant à une tension de contournement la plus faible en pleine pollution (conductivité égale à 93,7 mS/cm).

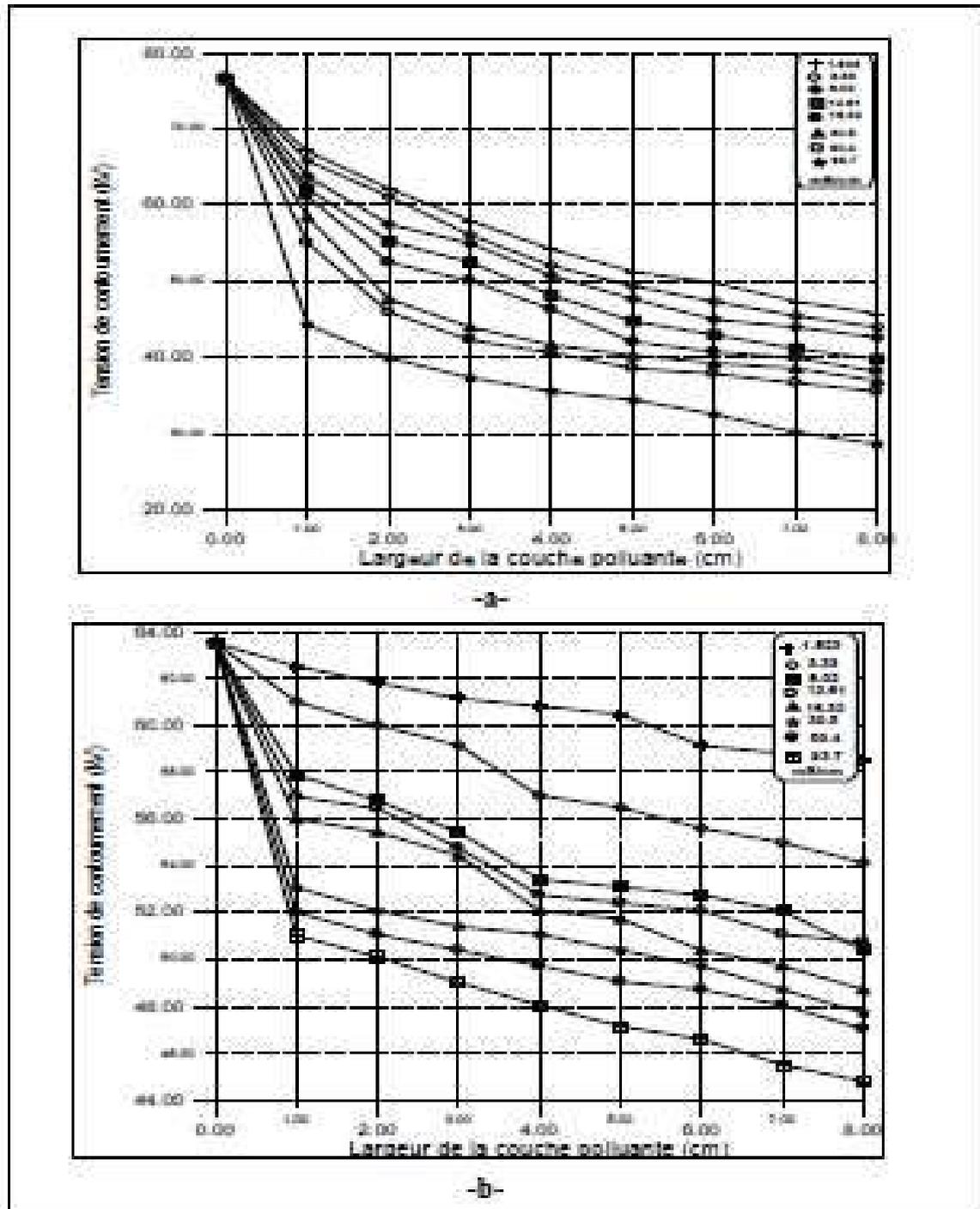


Figure III.2 Tension de contournement-largeur de la couche polluante pour différentes conductivités. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

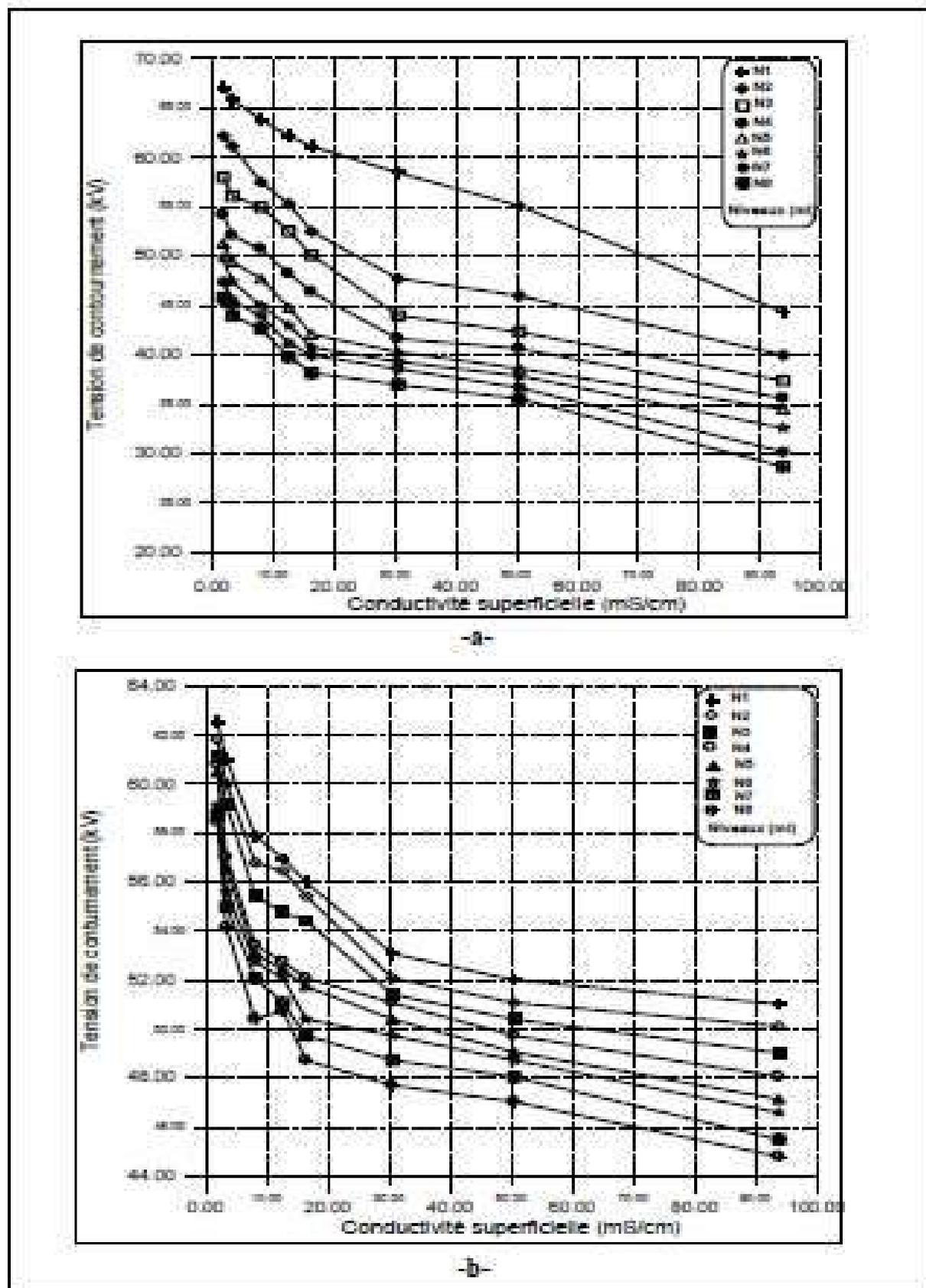


Figure III.3 Tension de contournement-conductivité superficielle pour différentes largeurs de la couche polluante. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

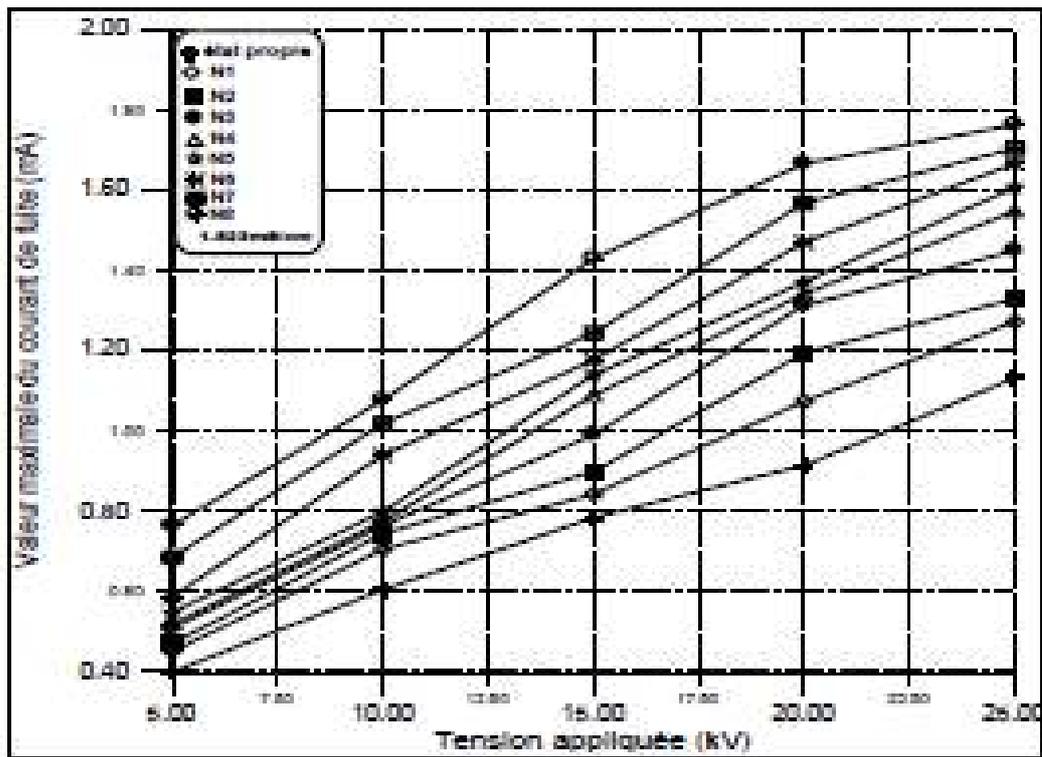
III.3.2 Courant de fuite

III.3.2.1 Influence de la tension appliquée

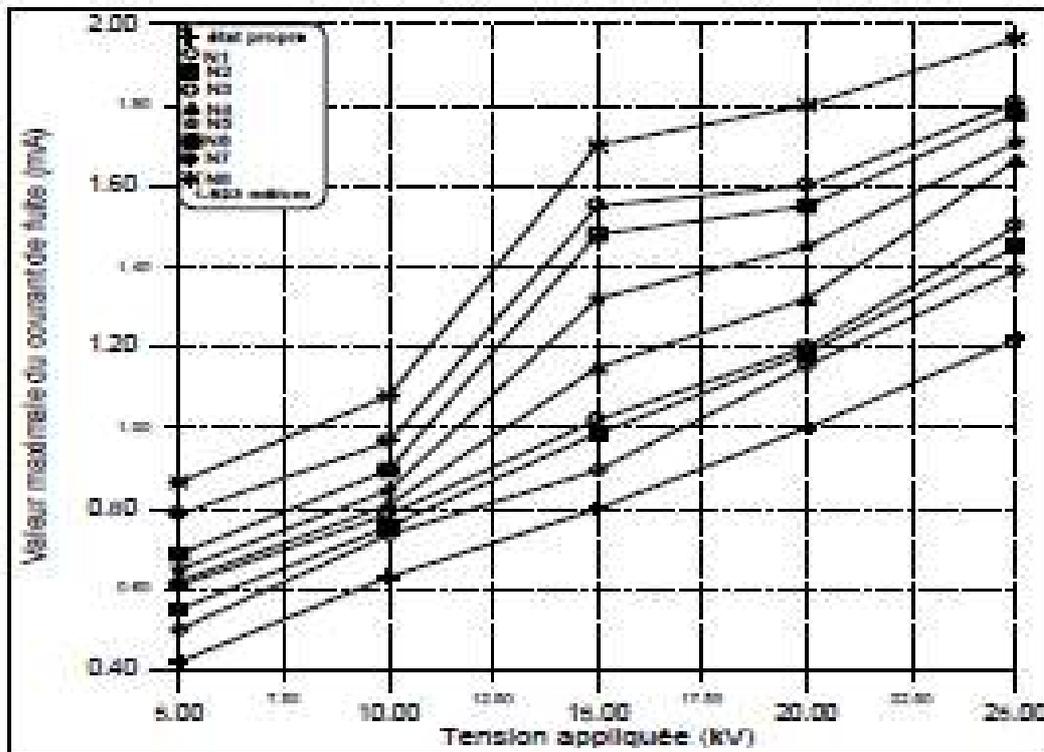
Nous présentons sur les figures (III.4 à III.11), la variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée, et ce pour toutes les conductivités étudiées. Nous constatons que le courant de fuite varie presque linéairement au tant que la tension appliquée augmente (figures III.4 à III.11) pour tout les niveaux de pollution.

III.3.2.2 Influence de la conductivité

Nous remarquons que pour toutes les caractéristiques du courant de fuite en fonction de la conductivité superficielle pour chaque niveau de tension, et ce pour toutes les largeurs de pollution, la valeur du courant de fuite augmente toujours avec l'augmentation de la conductivité et la tension appliquée, cela est vérifié pour toutes les largeurs de pollution, figures (III.12 à III.19).



-a-



-b-

Figure III.4 Courant de fuite -Tension appliquée pour différentes largeurs de couche polluante ($\delta=1,823\text{mS/cm}$) a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

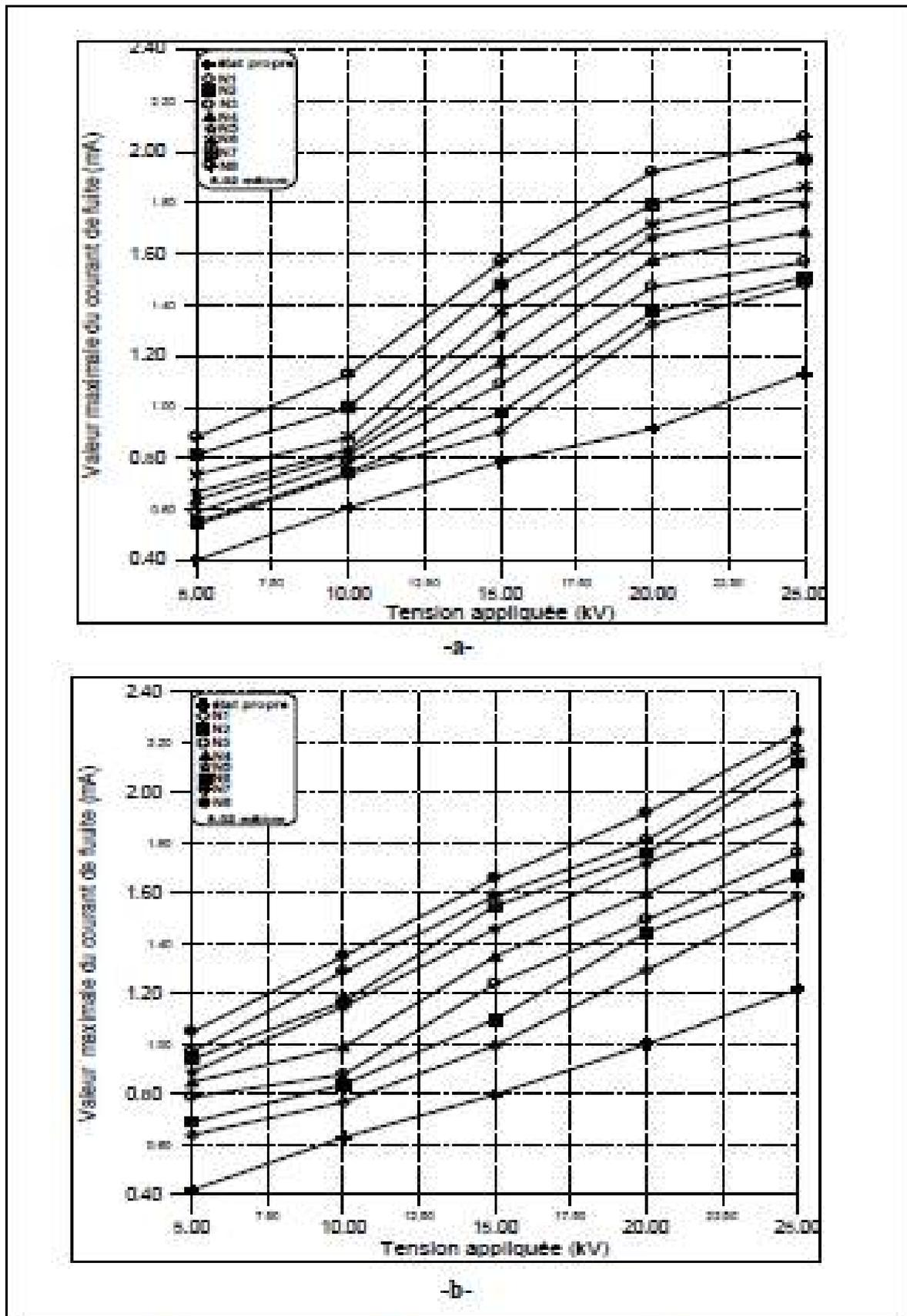


Figure III.6 Courant de fuite -Tension appliquée pour différentes largeurs de couche polluante. ($\delta=8,08mS/cm$) a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

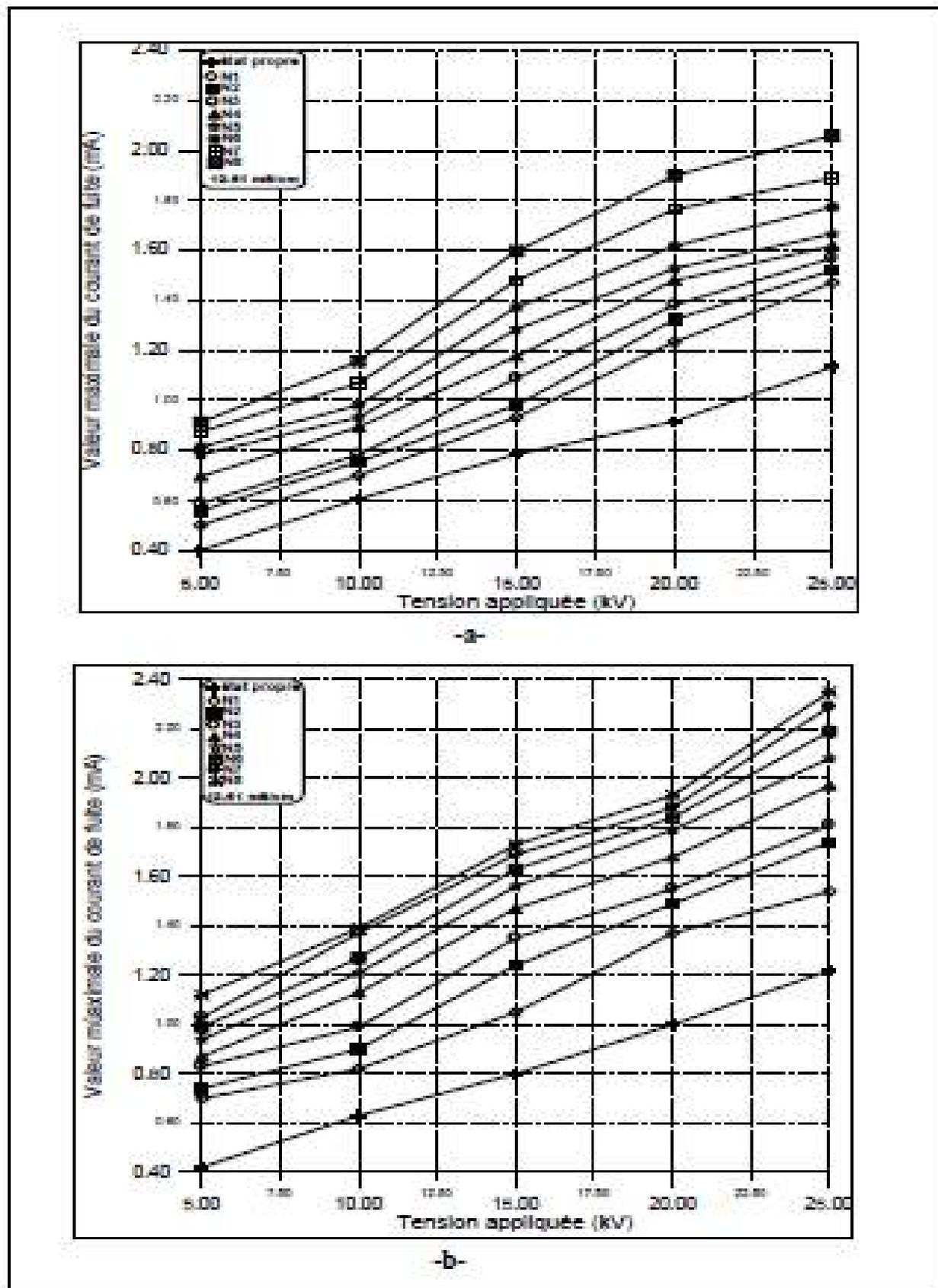


Figure III.7 Courant de fuite -Tension appliquée pour différentes largeurs de couche polluante. ($\delta=12,61\text{mS/cm}$) a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

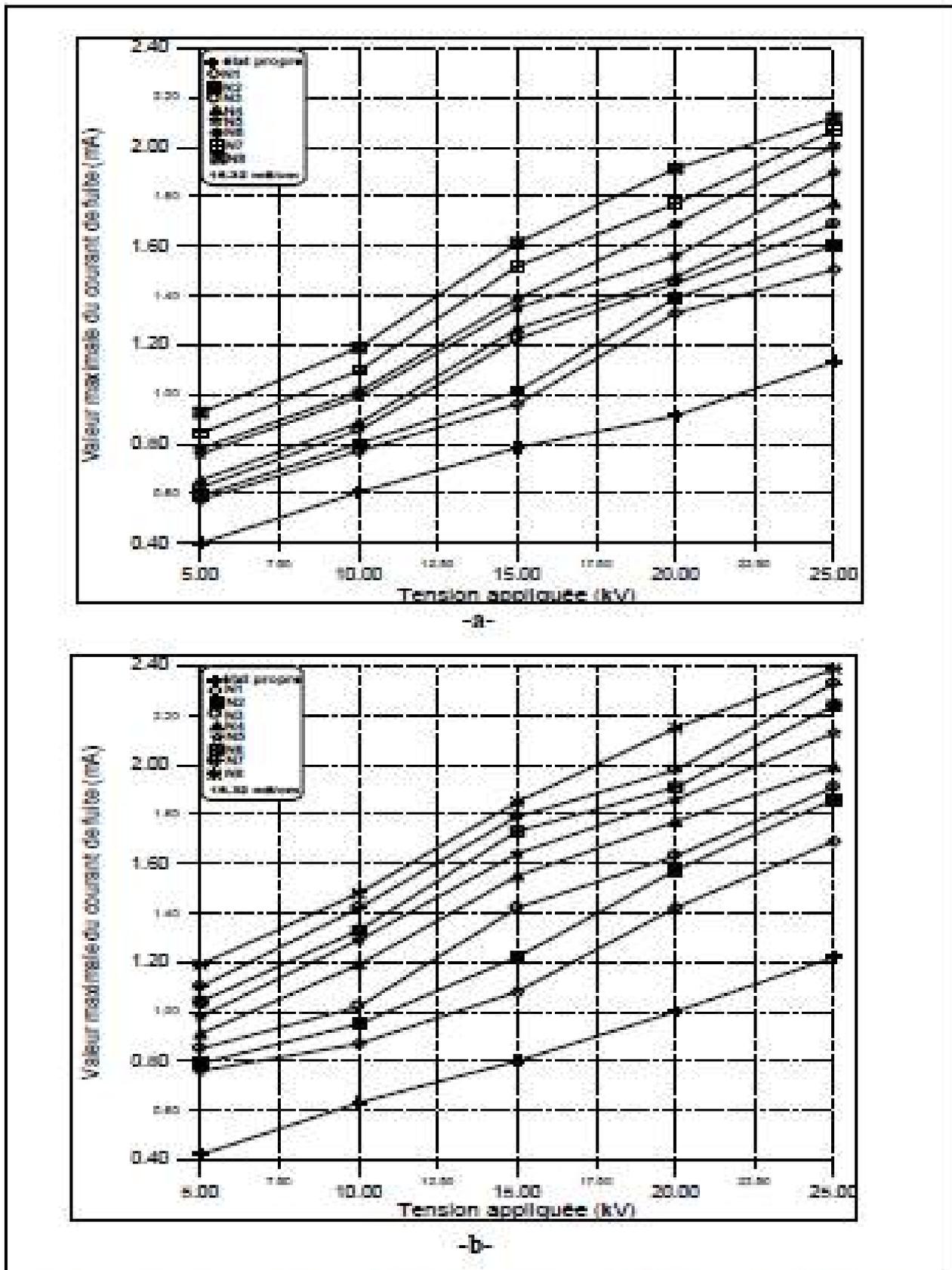
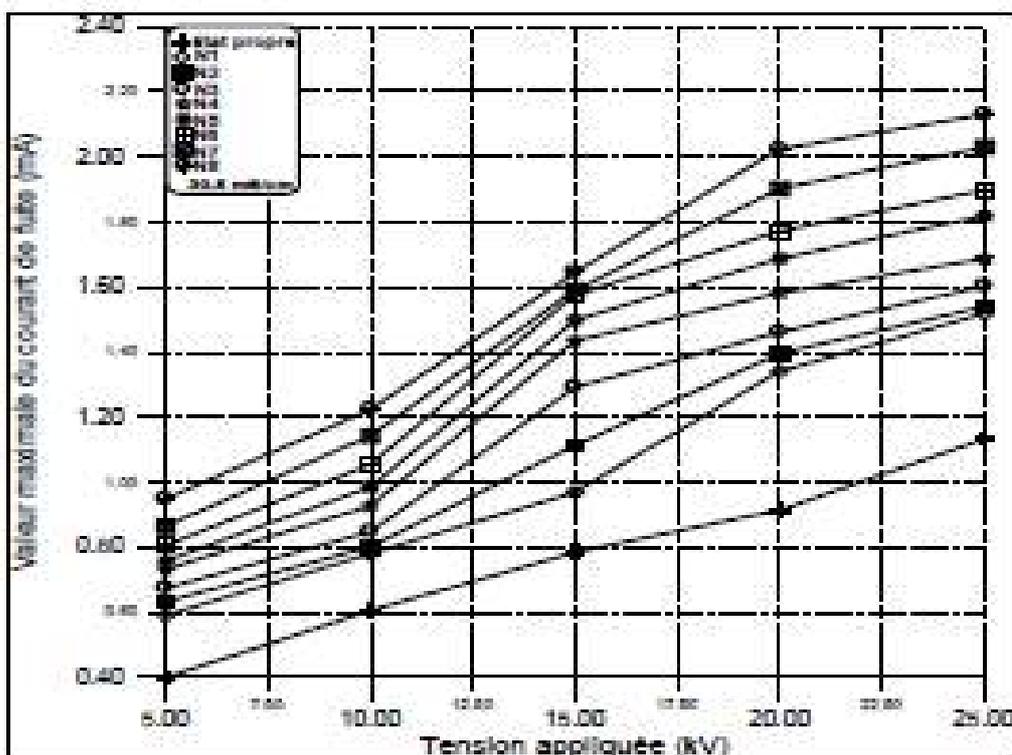
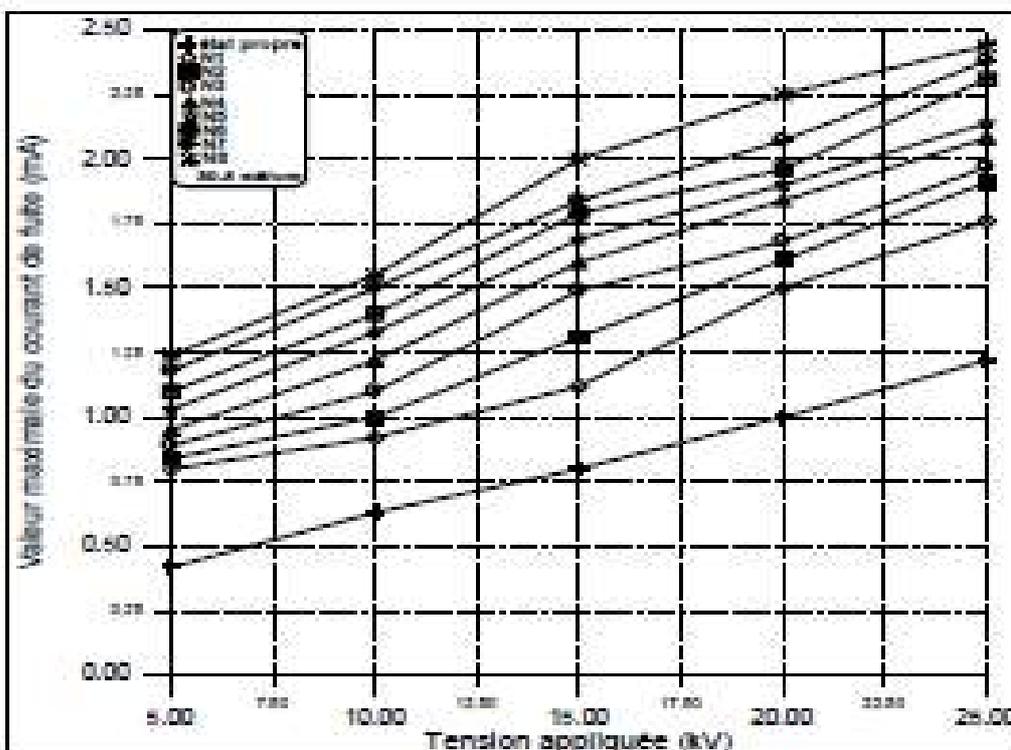


Figure III.8 Courant de fuite -Tension appliquée pour différentes largeurs de couche polluante. ($\delta=16,32\text{mS/cm}$) a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.



-a-



-b-

Figure III.9 Courant de fuite -Tension appliquée pour différentes largeurs de couche polluante. ($\delta=30,5\text{mS/cm}$) a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

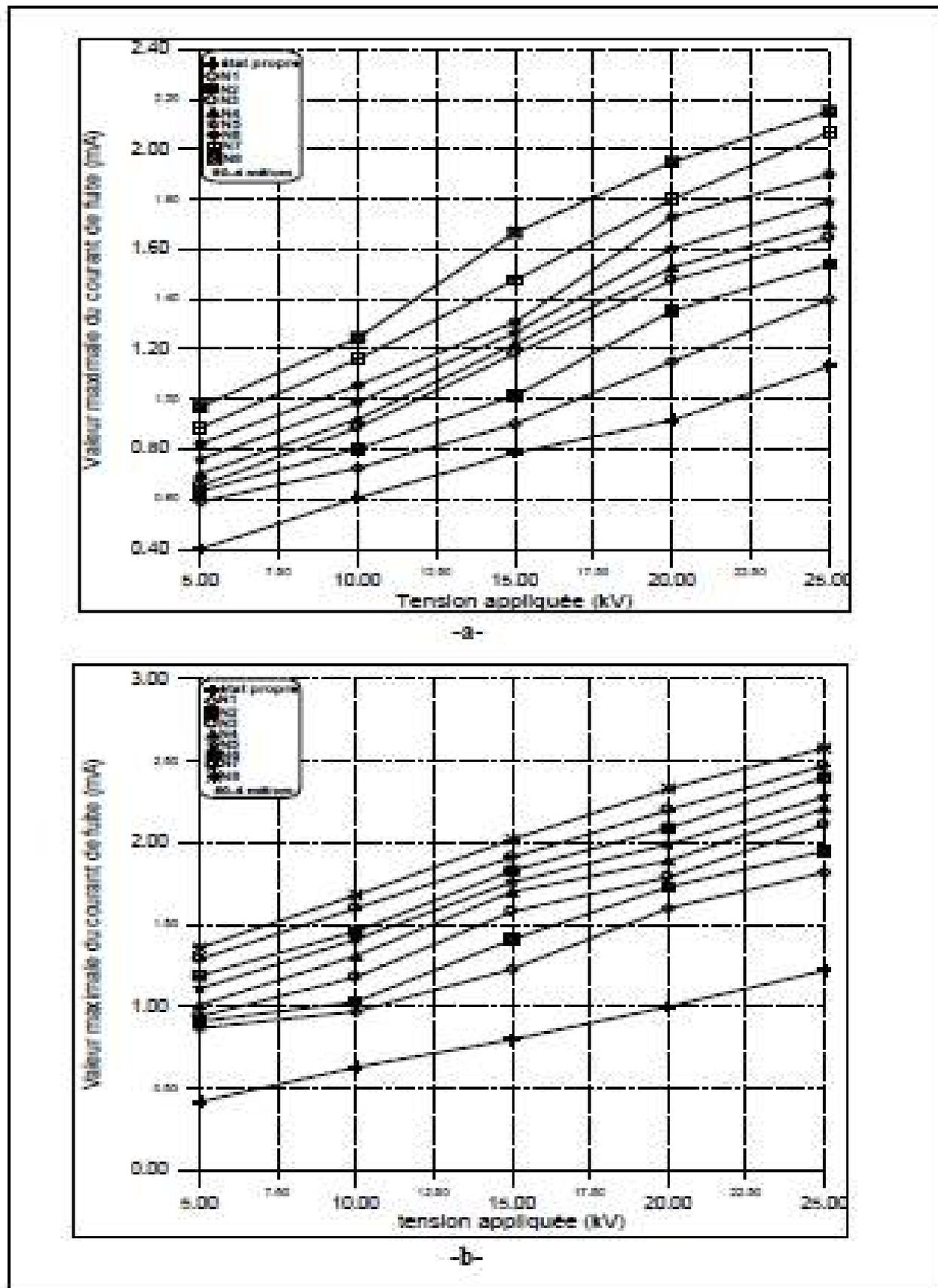


Figure III.10 Courant de fuite -Tension appliquée pour différentes largeurs de couche polluante. ($\delta=50,4\text{mS/cm}$) a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

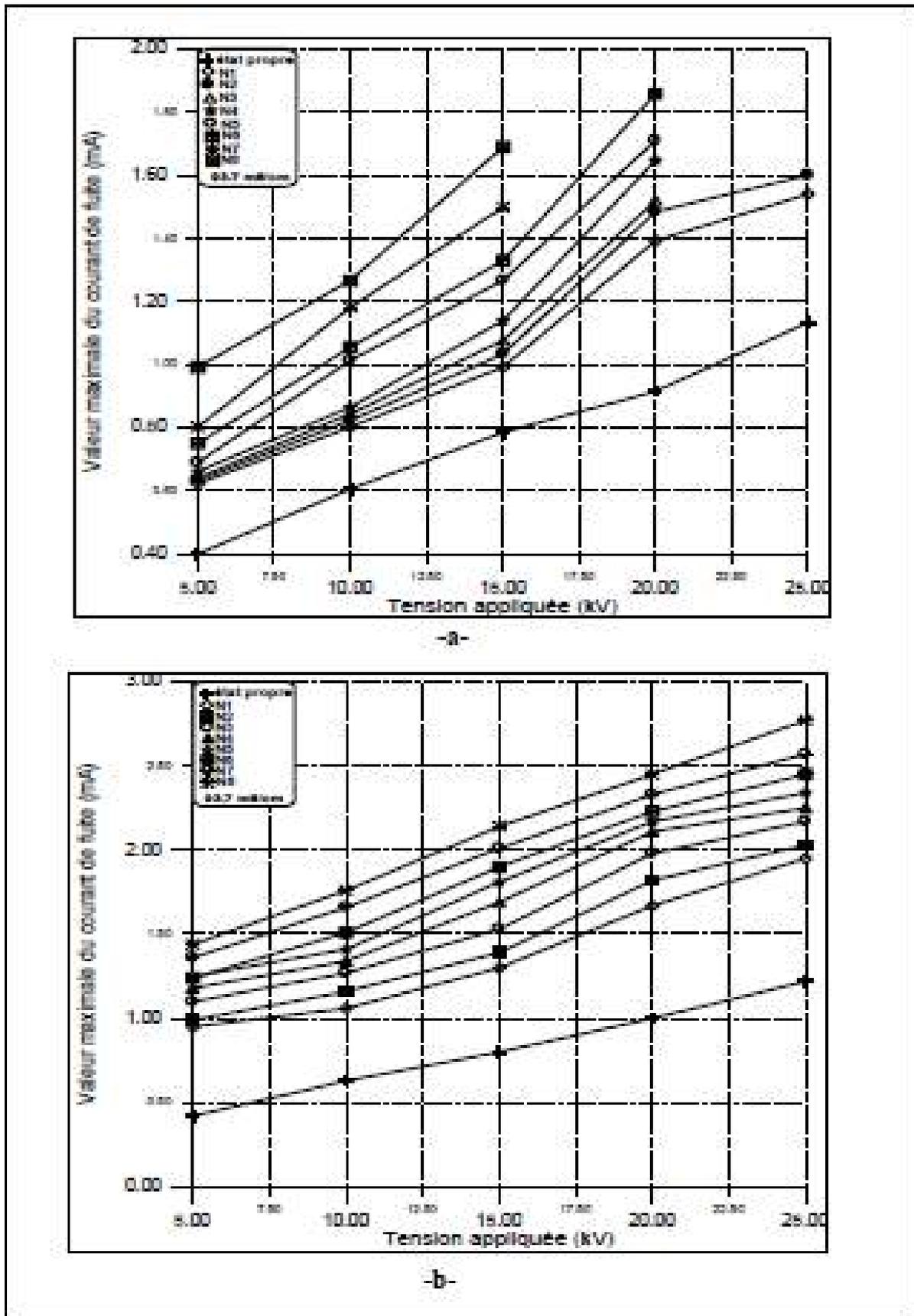


Figure III.11 Courant de fuite -Tension appliquée pour différentes largeurs de couche polluante. ($\delta=93,7\text{mS/cm}$) a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

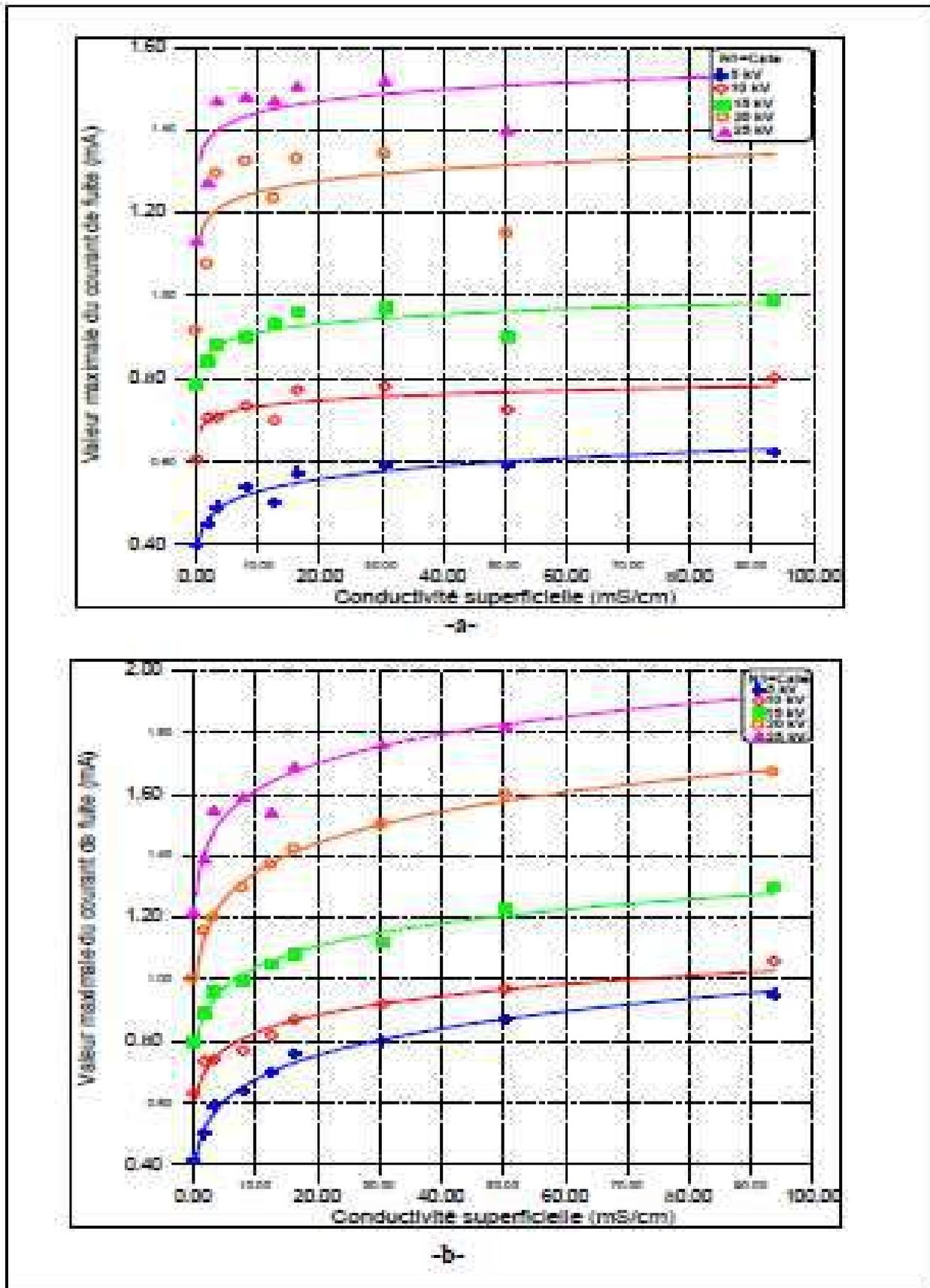
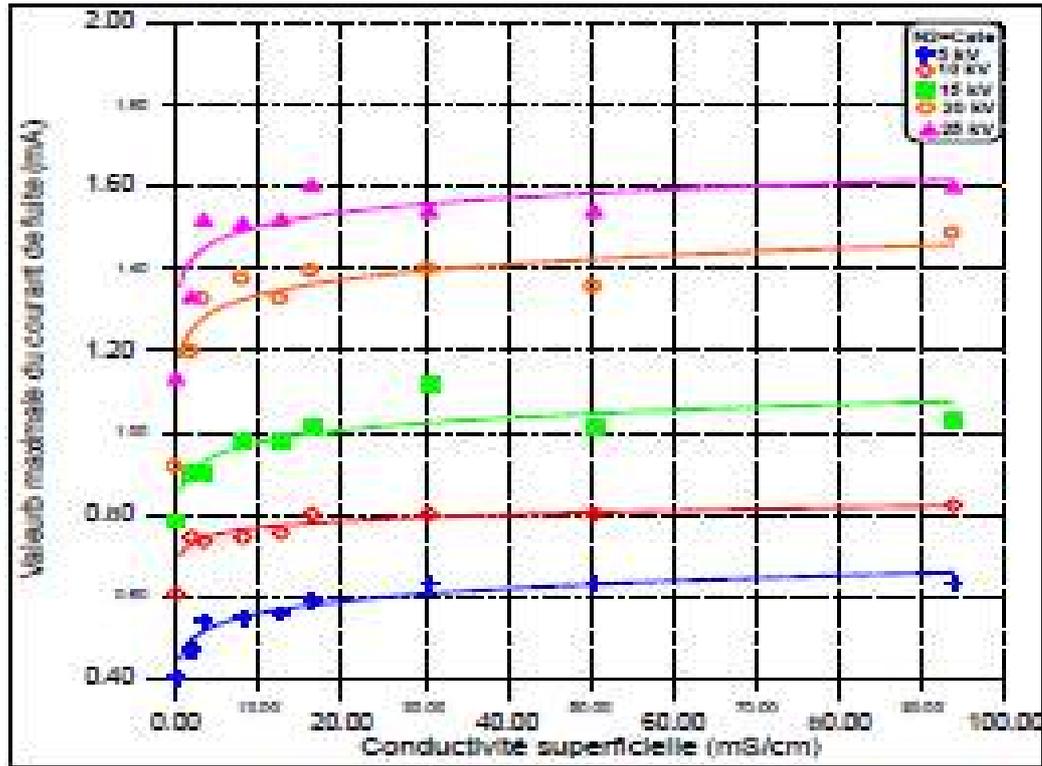
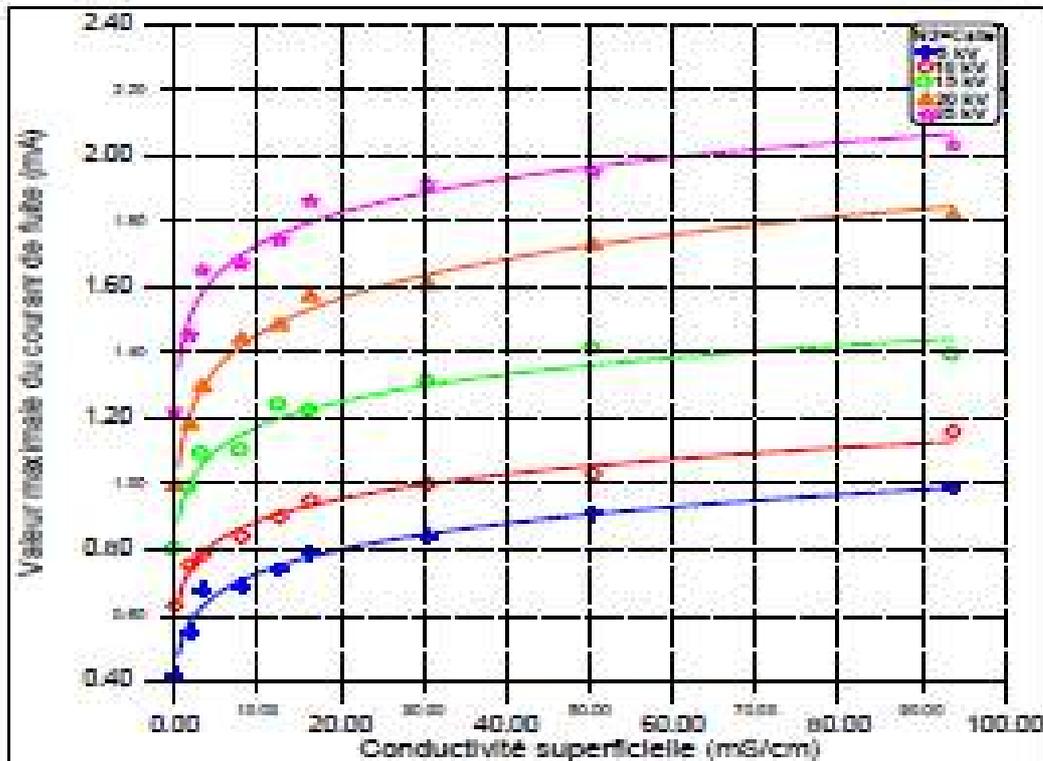


Figure III.12 Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. NI=Cste. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.



-a-



-b-

Figure III.13 Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. $N2=Cste$. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

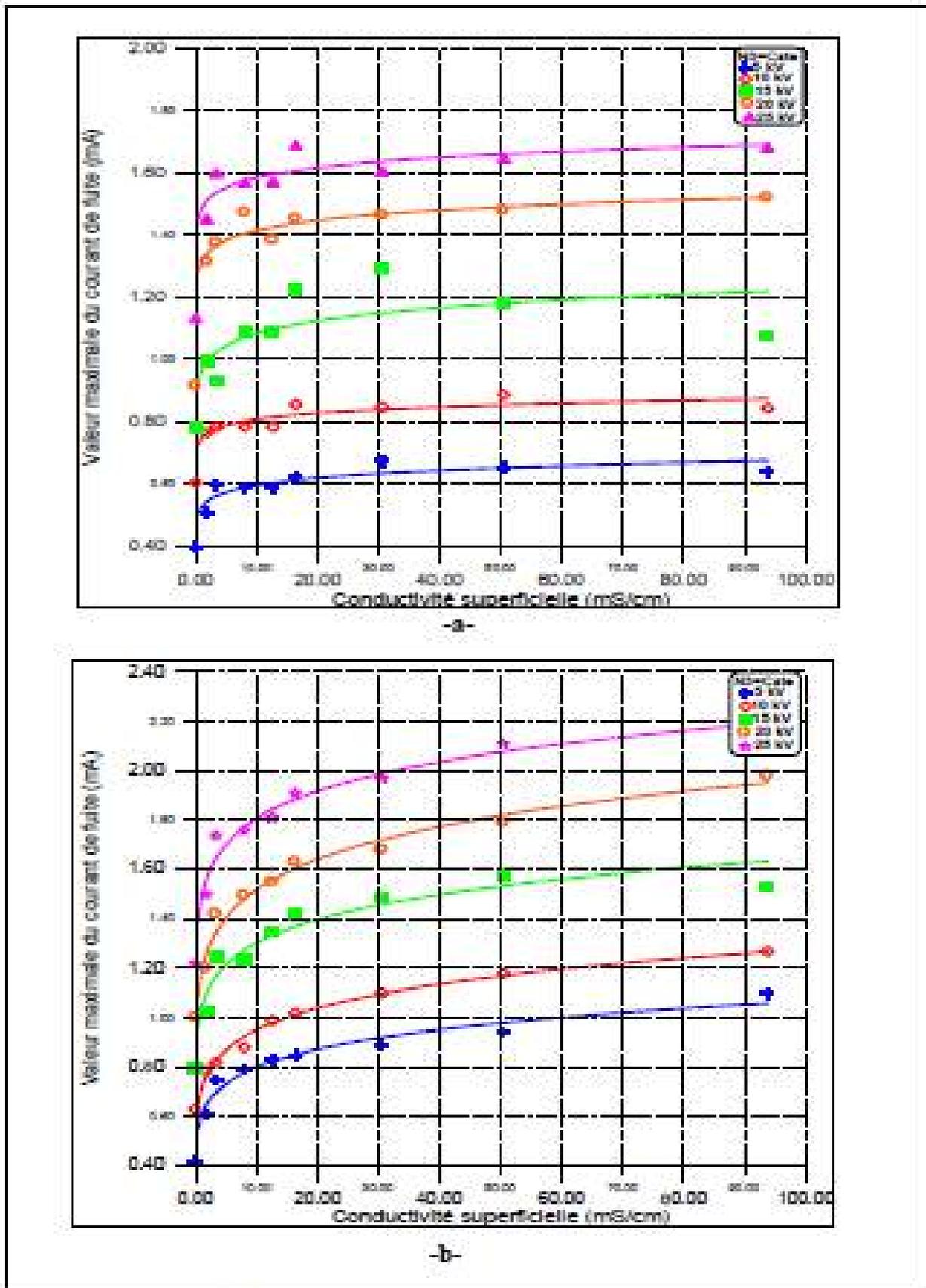


Figure III.14 Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. N3=Cste. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

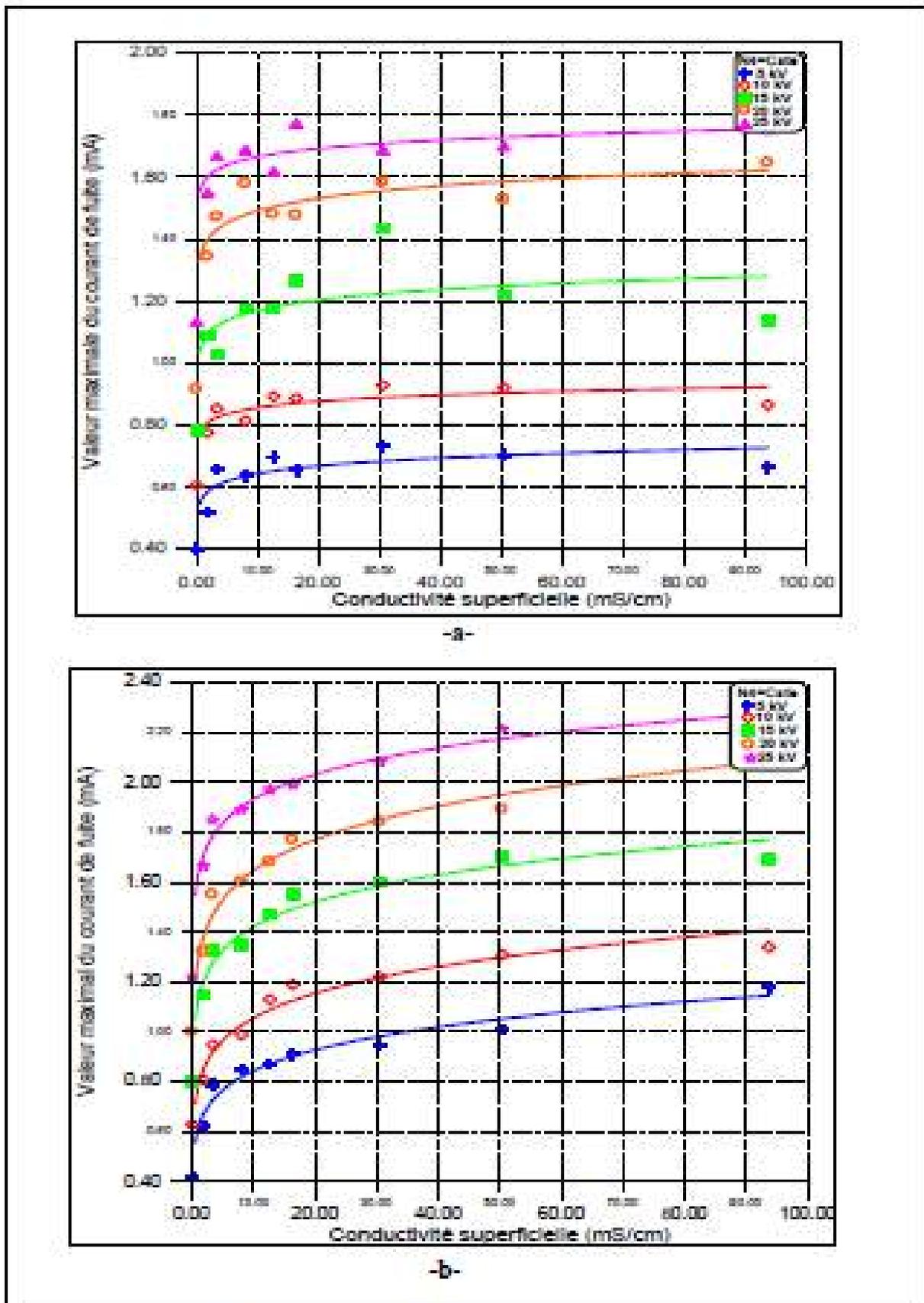


Figure III 15 Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. $N4=Cste$. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

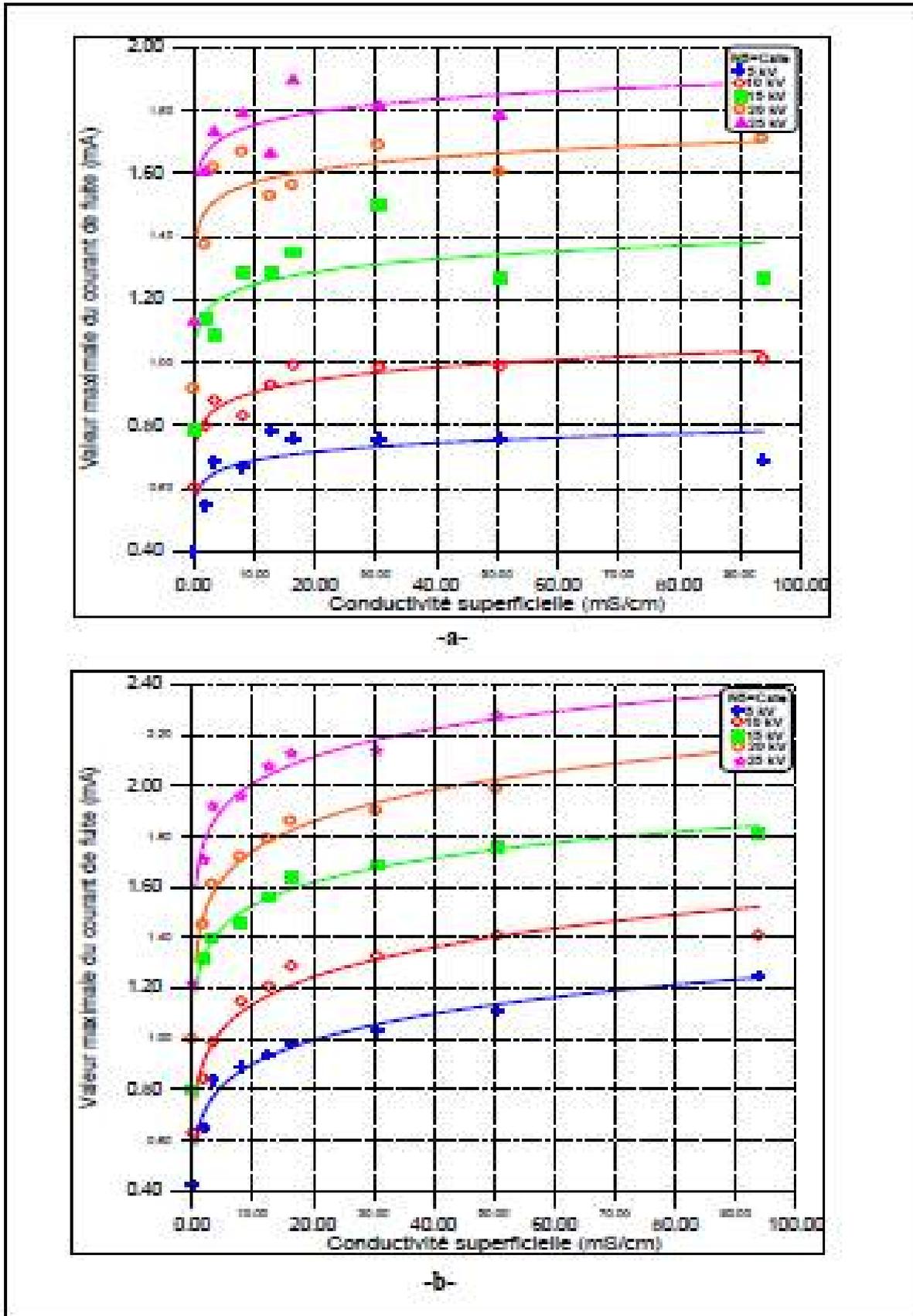


Figure III.16 Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. N5=Cste. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

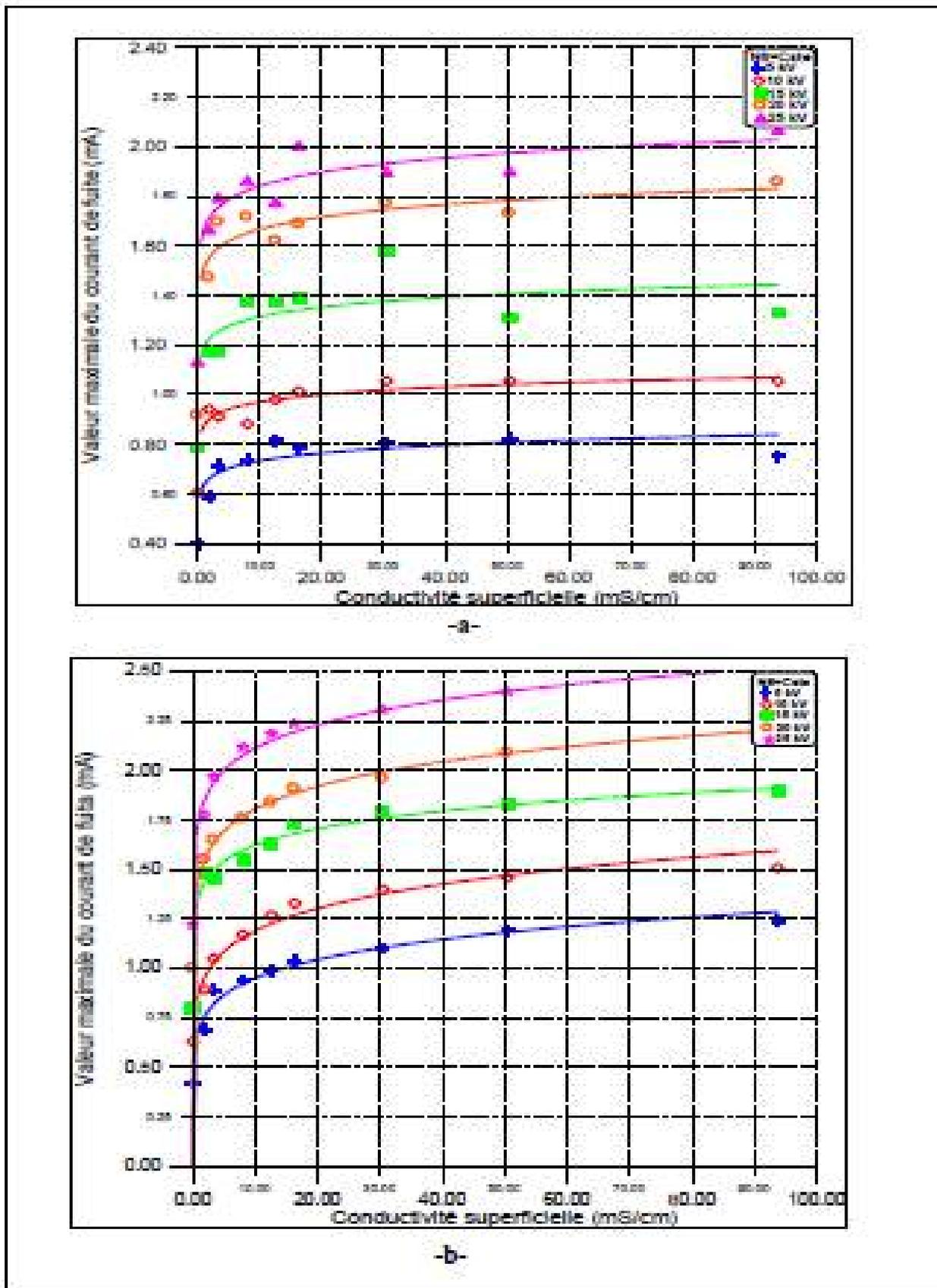
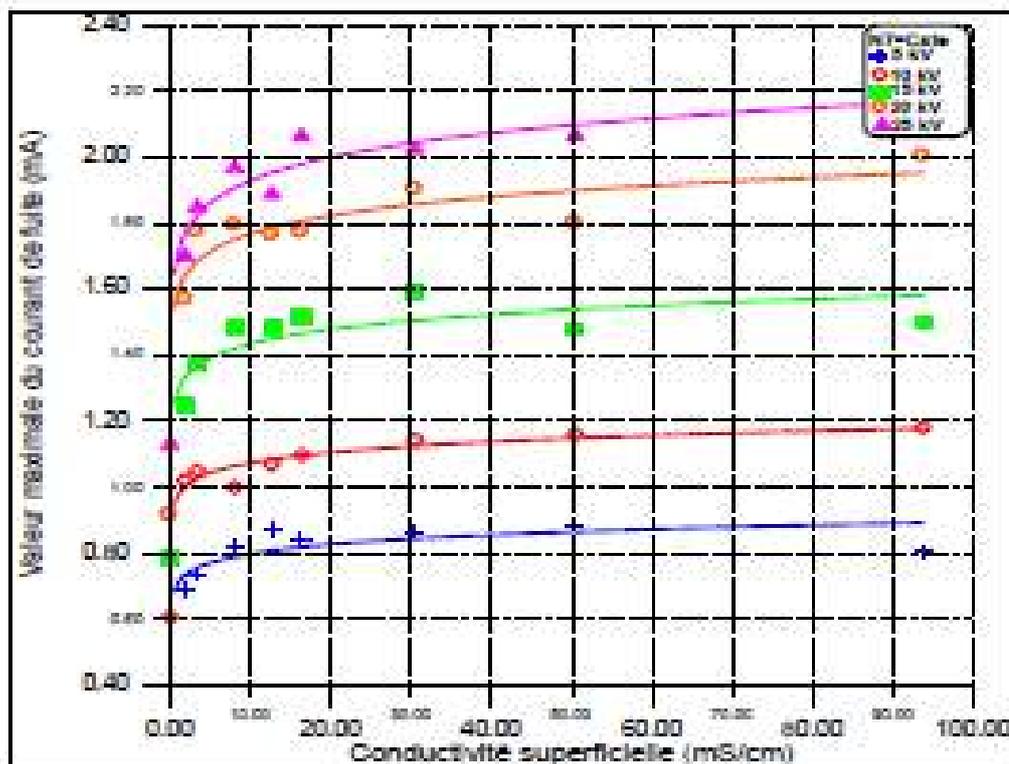
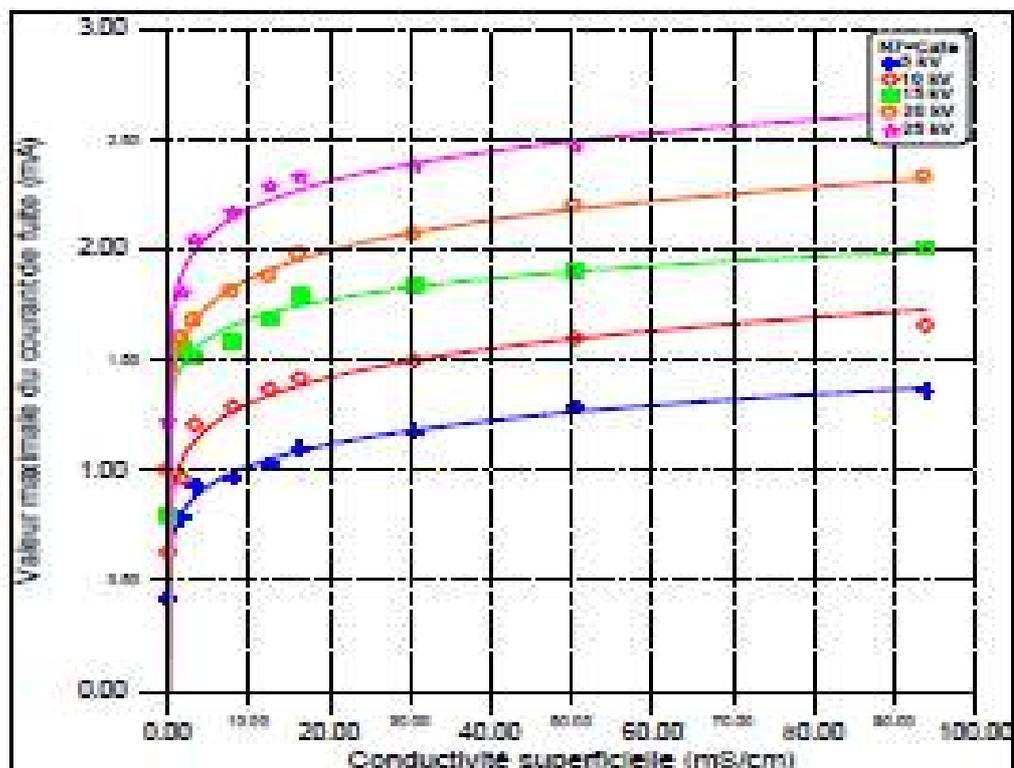


Figure III.17 Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. $N_6=Cste$. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.



-a-



-b-

Figure III.18 Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. N7=Cste. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

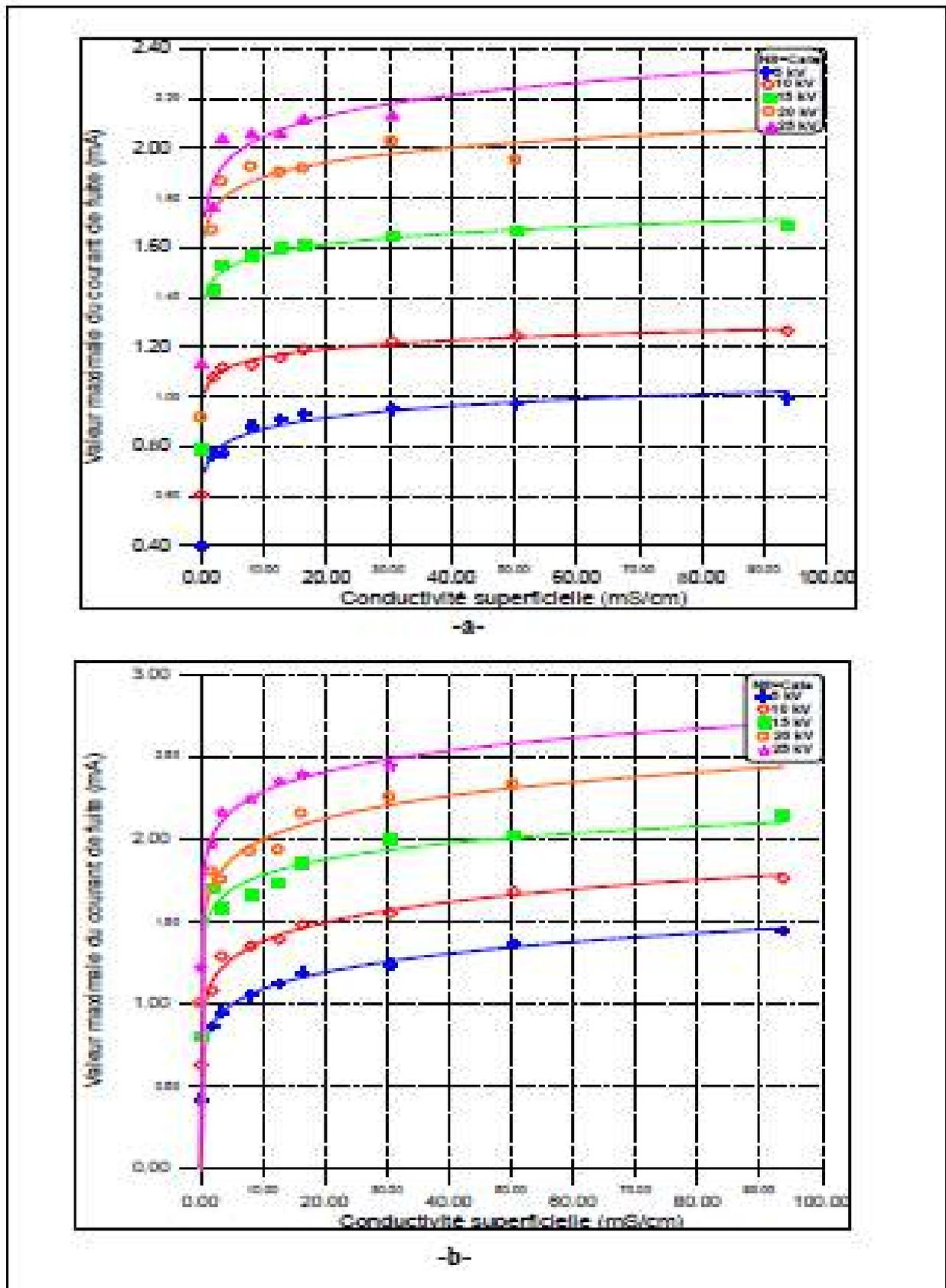


Figure III.19 Courant de fuite – conductivité superficielle pour différentes tensions. $N8=Cste$. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

III.3.2.3 Influence de la largeur de la pollution

La variation du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante est illustrée sur les figures (III.20, III.21). Un accroissement du courant est remarquable, cela s'explique par la diminution de la résistivité superficielle du l'isolateur réel ainsi que celle du modèle de laboratoire.

Par ailleurs, dans une étude fait par J. Keller-Jacobsen [8], il a été constaté que la résistivité superficielle des zones propres dépend de la température de ces derniers. L'auteur après une étude est arrivé à conclure que la simple division de la longueur de fuite en zones humides et zones sèches ne convient pas pour connaître la distribution de la tension le long de la ligne de fuite car elle est déterminée, en plus, par les températures des zones sèches (propres). En effet, l'écart de température entre les zones sèches pour le même objet d'essai varie, selon l'auteur, entre 1°C et 10°C. Par conséquent, la distribution de la tension peut être très irrégulière.

A la lumière des précédentes remarques, nous pouvons affirmer que la régularité de l'évolution de l'amplitude du courant de fuite en fonction des caractéristiques de la couche de pollution est difficilement garantie. Ce qui est le cas de cette présente étude.

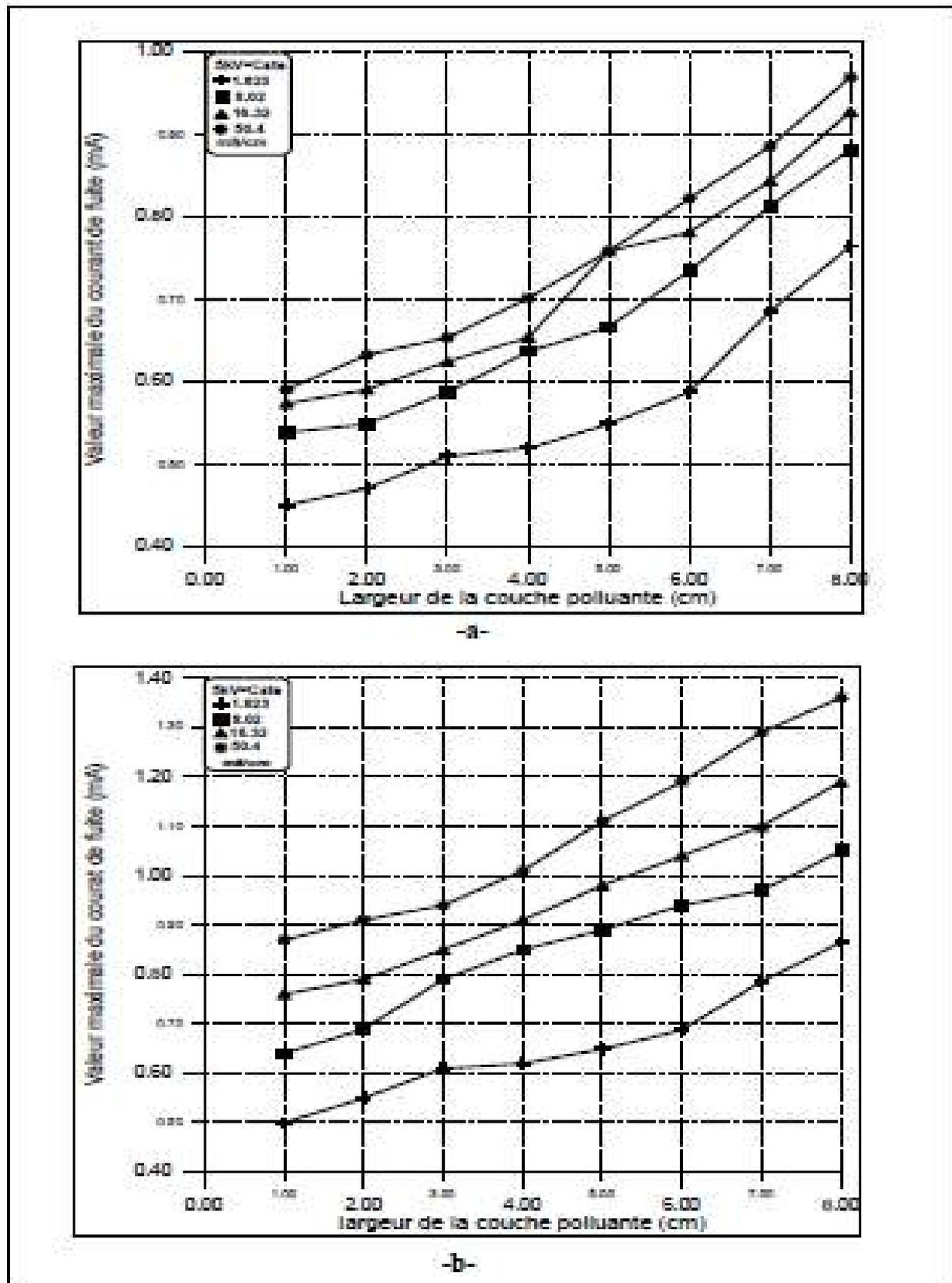
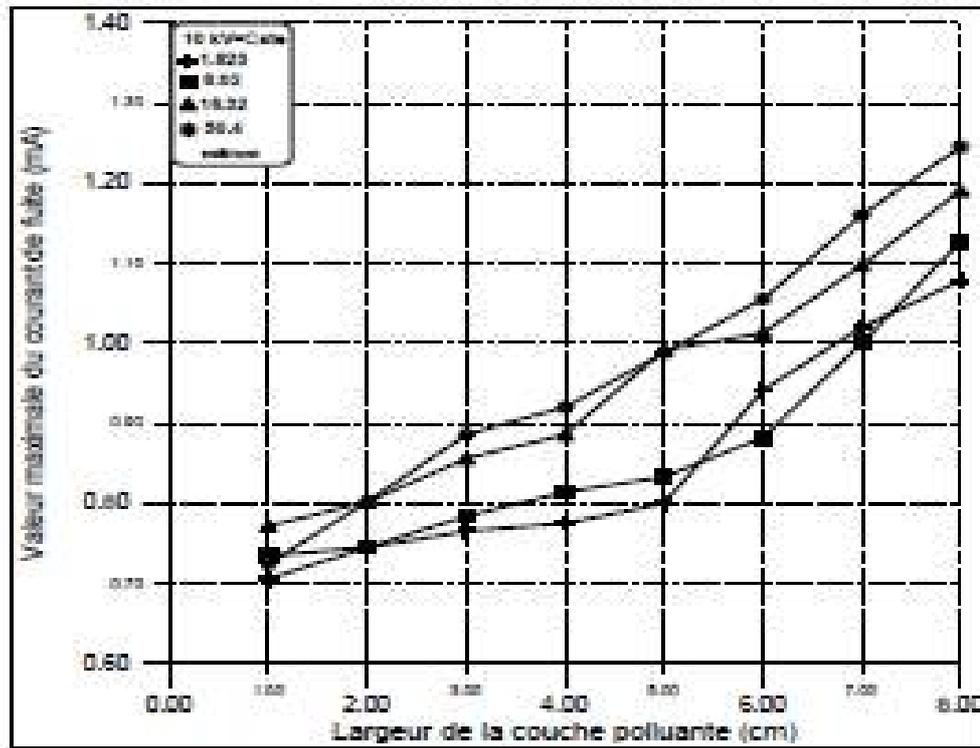
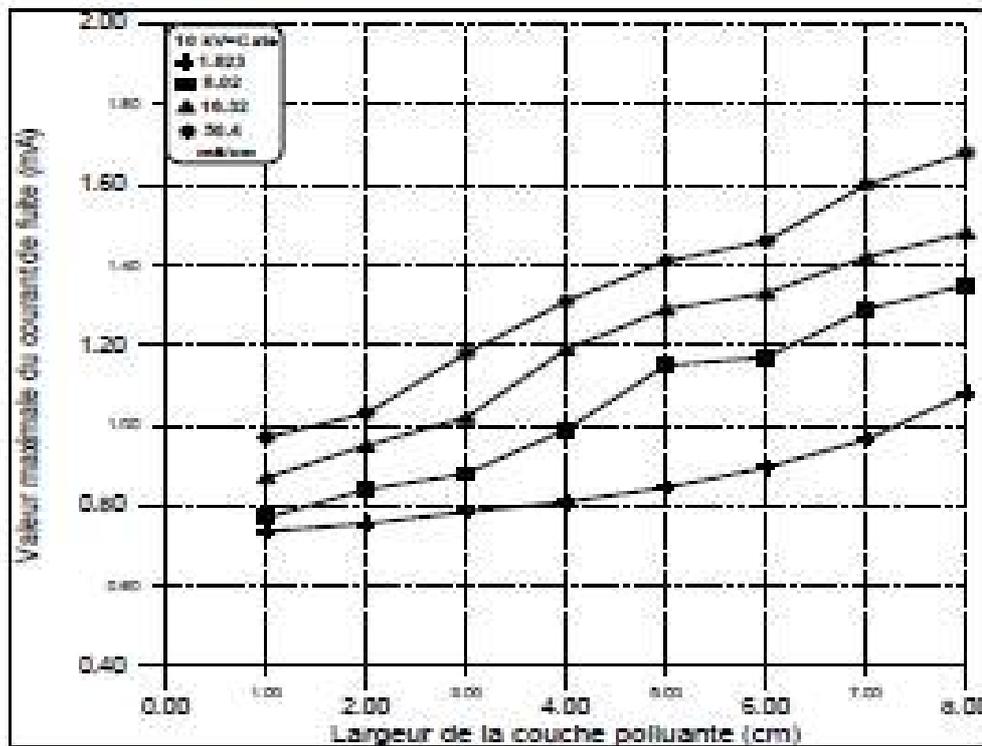


Figure III.20 Courant de fuite – largeur de pollution pour différentes conductivités superficielles, avec $U=5kV=Cste$. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.



-a-



-b-

Figure III.21 Courant de fuite – largeur de pollution pour différentes conductivités superficielles, avec $U=10kV=Cste$. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.

III.3.3 Déphasage tension-courant

Nous analysons, dans ce qui suit, le déphasage entre la tension appliquée et le courant de fuite. Pour déterminer ce déphasage nous avons étudié le cas où la pollution discontinue appliquée à la surface de l'isolateur (réel et modèle de expérimental), est de niveau 5.

En utilisant l'oscilloscope digital, l'enregistrement simultané de l'onde du courant de fuite et celle de la tension appliquée (figure (III.22)) permet l'obtention de l'angle de déphasage.

L'enregistrement des deux signaux montre qu'il existe une fluctuation aux niveaux de la tension appliqué (figure (III.22)), cette fluctuation est due probablement aux caractéristiques magnétiques non-linéaires du transformateur de haute tension.

Pour notre étude, nous pouvons entrevoir globalement le comportement du déphasage, vis-à-vis des différentes contraintes imposées, comme suit :

- Le déphasage est toujours de nature capacitive (figure (III.22)).
- La configuration de la pollution (uniforme-discontinue) est caractérisée par la non-génération des décharges électriques préliminaires [4,65-70], pour cela, le déphasage est capacitif pour toutes les largeurs et conductivités superficielles de la pollution, car l'onde du courant est en avance par rapport à celle de tension (figure(III.22)).
- Le déphasage courant-tension est évolue irrégulièrement en fonction de la largeur de la couche de pollution pour une conductivité superficielle donnée (figure (III.23)), pour les deux modèles, ces observations illustrent que le caractère capacitif est dominant.
- L'augmentation de la conductivité superficielle provoque une légère diminution du caractère capacitif, en tendant à le rendre plus résistif (figure (III.23)).
- Le déphasage courant-tension n'est pas affecté par la tension appliquée pour les deux modèles (réel et expérimental) (figure (III.24)).
- Le déphasage courant-tension maximale est obtenu dans le cas propre et vaut en moyenne 79° pour le modèle réel, et 72° pour le modèle expérimental.

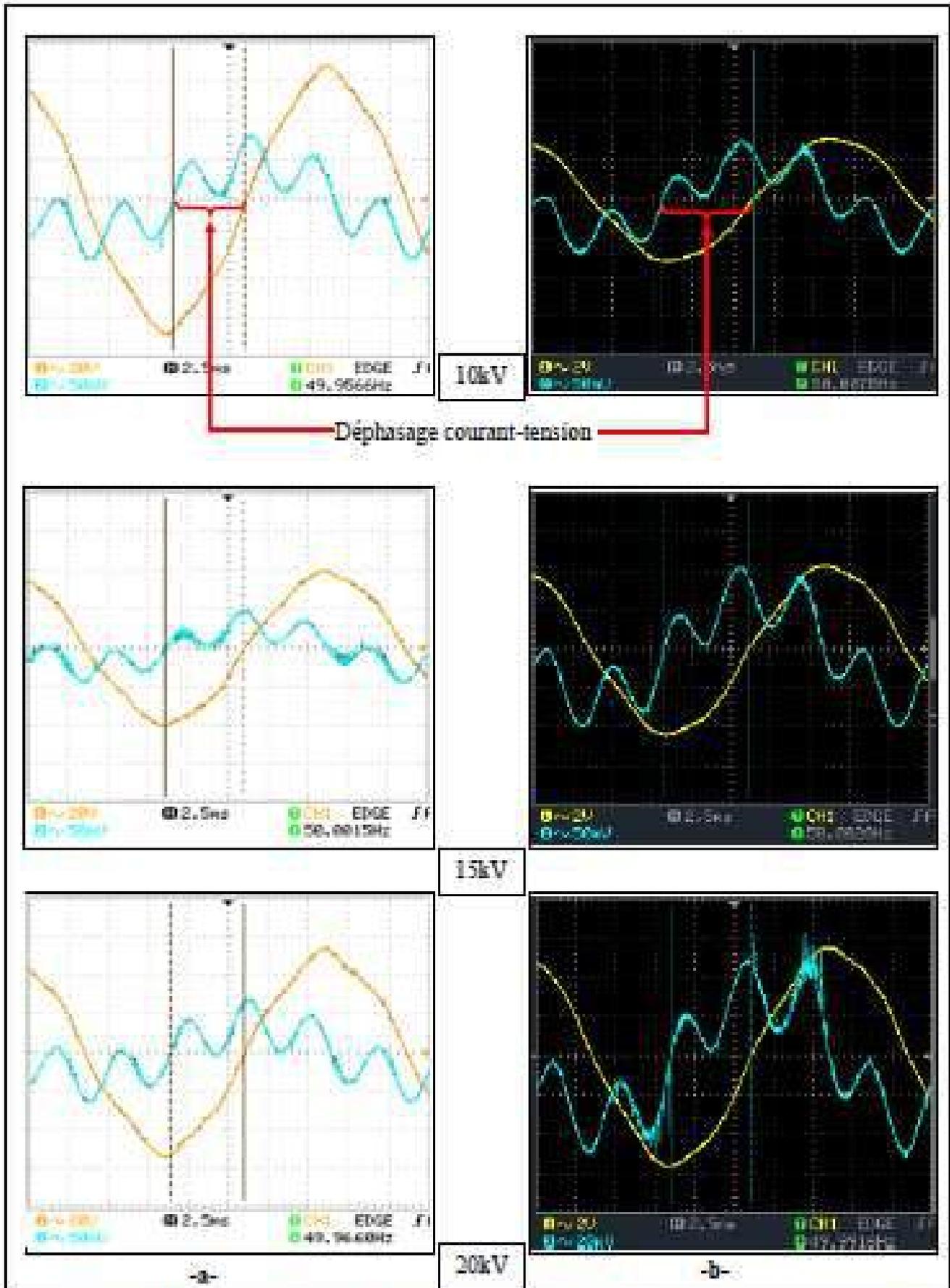
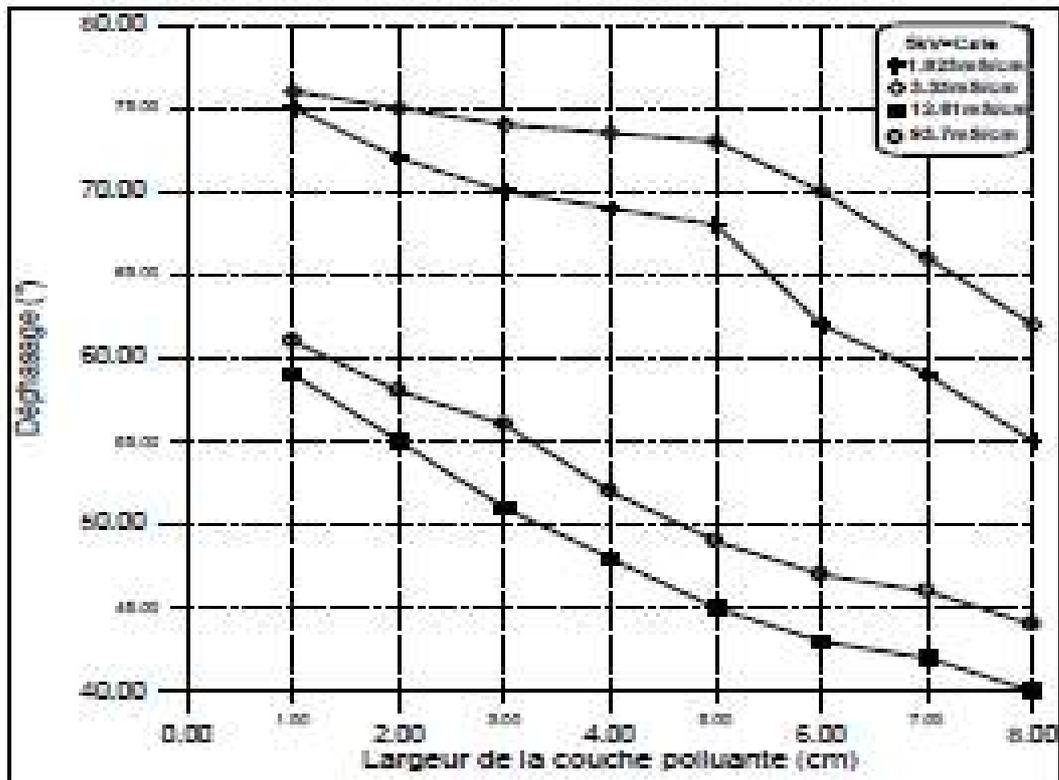
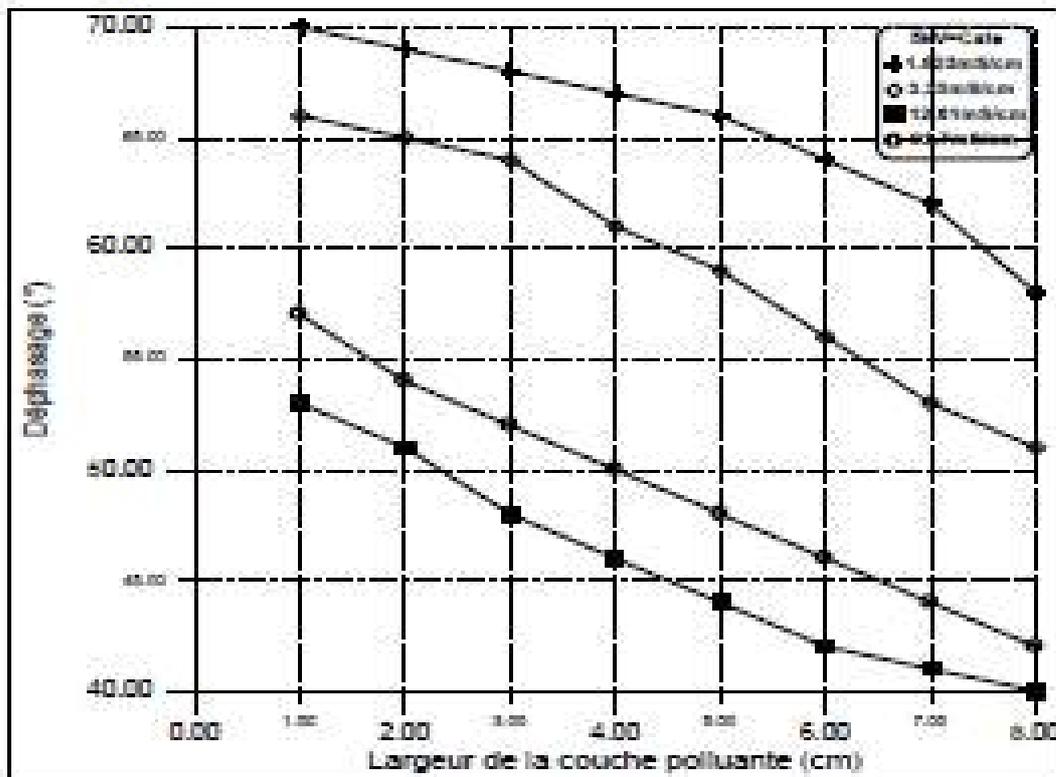


Figure III.22 Les visualisations des déphasages pour différentes valeurs de la tension appliquée. a- Modèle réel, b- Modèle expérimental.



-a-



-b-

Figure III.23 Déphasage courant-tension en fonction de la largeur de la couche polluante, pour différentes conductivités. 5kV=Cste. a- Modèle réel, b-Modèle expérimental.

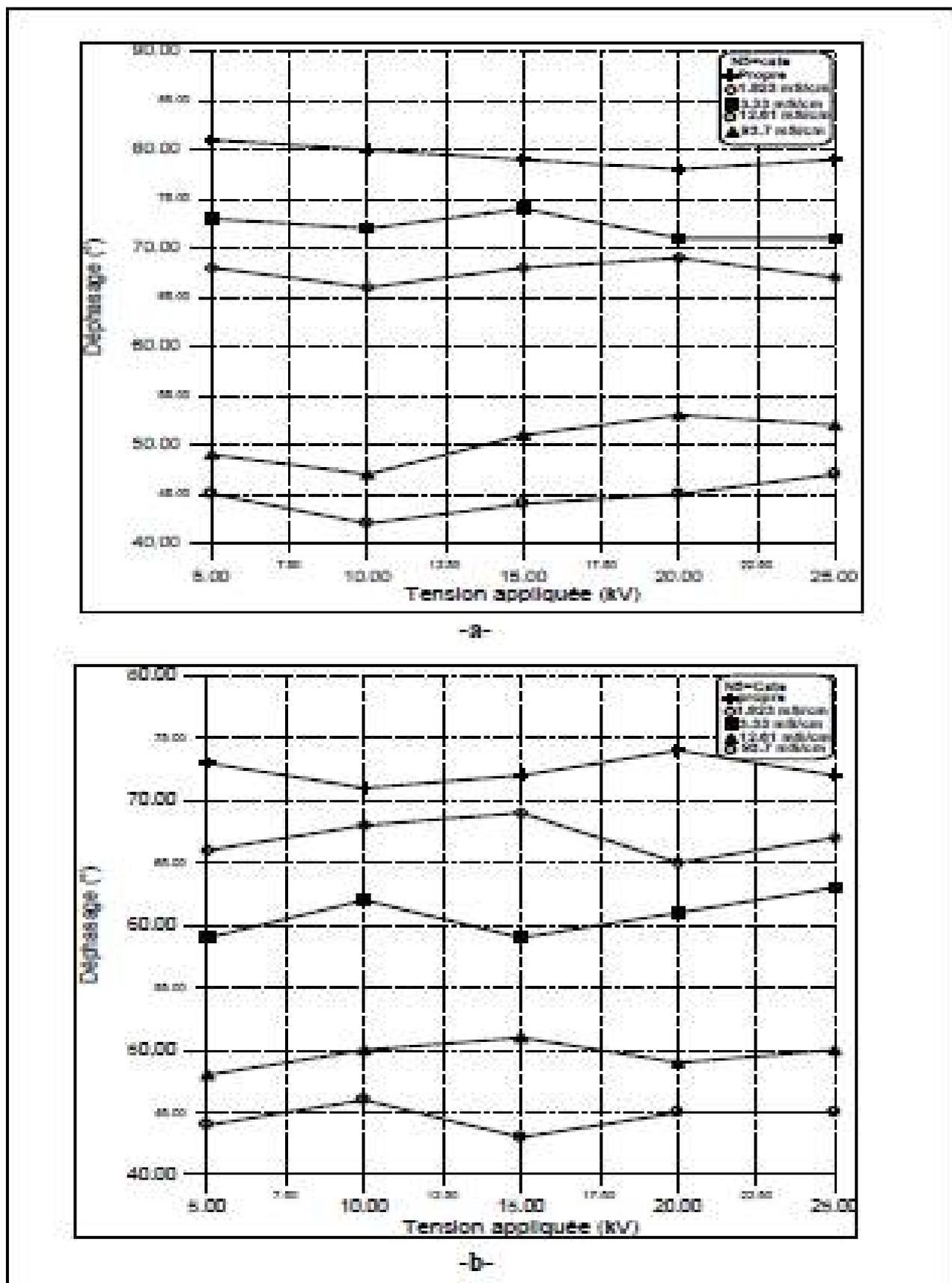


Figure. III.24 Déphasage courant-tension en fonction de la tension appliquée pour différentes conductivités. $N_6=Cste$. a- Modèle réel, b-Modèle expérimental.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats obtenus des différents essais effectués sur le modèle réel et expérimental d'un isolateur de haute tension, il s'agit de l'isolateur 1512L. Il ressort de notre étude les conclusions suivantes:

- La tension de contournement diminue en fonction de la conductivité du milieu pollué. Par ailleurs, l'isolateur est moins rigide lorsque la conductivité superficielle augmente.
- La variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la largeur de la couche polluante, montre qu'il existe une limite à partir de laquelle le courant de fuite augmente rapidement. Par ailleurs, l'amplitude du courant de fuite croît avec la conductivité superficielle et avec la tension appliquée.
- Concernant le déphasage courant-tension, il est clair que l'isolateur à l'état sec et propre est caractérisé par un effet capacitif. L'humidification ou remplissage de l'isolateur engendre, en général, une diminution de ce caractère capacitif en le rendant plus résistif.

Conclusion Générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le cadre de notre étude, les essais effectués au Laboratoire de Haute tension de l'université de BISKRA, avaient pour objectif d'étudier le comportement de l'isolateur capot et tige type 1512L artificiellement pollué, lorsqu'une tension alternative lui est appliquée.

Pour cela, des solutions chimiques salines (à base de NaCl et de l'eau distillée) de conductivités différentes ont été utilisées. En outre, une répartition discontinue (modèle réel et modèle expérimental) de la pollution a été considérée.

Lors des essais expérimentaux, nous avons suivi les variations de la tension de contournement, du courant de fuite, et du déphasage courant-tension en fonction de la conductivité et de la largeur de la pollution sur la surface de l'isolateur ainsi que l'évolution du courant de fuite en fonction de la tension appliquée.

Nous avons conclu que la tension de contournement, le courant de fuite, et le déphasage courant-tension changent en fonction de la conductivité et la largeur de la couche polluante. En effet, la tension de contournement diminue avec l'augmentation de la conductivité volumique de la pollution (modèle réel et modèle expérimental). Par voie de conséquence, l'isolateur est moins rigide lorsqu'il est appliquée une couche polluante (modèle réel et modèle expérimental). Il est évident que la tension de contournement est affectée par l'état de surface de l'isolateur. La tension de contournement est plus importante dans le cas de l'état sec que dans le cas pollué.

En fonction de la largeur et la conductivité de la pollution, la plus basse tension de contournement a été obtenue pour le niveau de pollution 8 et de conductivité 93,7 mS/cm, pour les deux modèles. La tension de contournement pour le modèle réel est plus faible que le modèle expérimental (28,7 kV pour le modèle réel et 44,8 kV pour le modèle expérimental).

Le courant de fuite augmente avec la tension appliquée, la conductivité de la pollution et la largeur de la couche polluante. Par ailleurs, la forme du courant de fuite pseudo-sinusoïdal comporte des impulsions dès l'apparition de l'effet couronne. Le nombre, l'amplitude ainsi que la distorsion de ces impulsions augmentent avec l'accroissement de la tension appliquée. Il existe un régime critique à partir duquel le courant de fuite augmente brutalement. Ce régime est obtenu pour les grandes largeurs de la couche polluante pour des tensions appliquées élevées.

La plage de variation du déphasage (courant-tension), montre que le courant de fuite, circulant à travers les surfaces isolantes polluées, possède un caractère capacitif important. Ceci est expliqué par la domination des zones propres par rapport à celles polluées.

Par comparaison, des deux modèles (réel et expérimental), nous avons conclu que le modèle expérimental ne reflète pas exactement le comportement de l'isolateur réel, et vu la forme complexe de l'isolateur 1512L, nous l'avons représenté par un modèle circulaire équivalent. Cependant ce modèle facilite par contre, les observations et les mesures nécessaires pour une bonne analyse des phénomènes physiques de contournement.

Pour la continuité de ce travail au futur, nous souhaitons l'acquisition d'un matériel, pour le laboratoire de haute tension de l'université de BISKRA, qui répondrait au mieux aux besoins de ce genre d'études très complexes et aux exigences des normes de la CEI (cabine de pollution, caméra ultra-rapide...).

Bibliographie



BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Soufi, M.Zemirline, "Conception d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué sous tension alternative 50 Hz", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, 2004.
- [2] S. Guerfi, "Modélisation des isolateurs de haute tension pollués sous tension continue", Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, UAM Bejaia.
- [3] P. Claverie, Y.Porcheron, " Les Phénomènes de Pollution des Isolateurs et l'Isolément des Ouvrages En Régions Polluées ", RGE, Tome 82, No. 3, pp. 166-194, Paris, France, Mars 1973.
- [4] M. TEGUAR, "Modélisations d'isolateurs pollués soumis à divers paramètres électrogéométriques ". Thèses de Doctorat, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, ENP, Alger, 2003.
- [5] V. M.Rutsky "Prediction of discharge characteristics of external high-voltage insulation near industrial enterprises, polluting the atmosphere" 9^{ème} international symposium on high voltage engineering, rapport 3247, Autriche, 28 Aout-1^{er} Septembre 1995.
- [6] A. Djonadi, H.Melouk, " Problème de la pollution marine des isolateurs de haute tension en algérie", PFE, ENP, Alger, 1975.
- [7] R.G. Houlgate, P.J. Lambeth, W.J. Roberts, "Performances des isolateurs en milieu maritime en très haute et ultra haute tension", CIGRE, Rapport 33-01, 1982.
- [8] J. Keller-Jacobsen, Aa. Pederson, J.K. Rasmussen, A. Henriksen, C. Lindqvist, S. Smedsfelt, " Essais au laboratoire et en plein air pour dimensionner correctement les isolateurs exposés à la pollution saline" CIGRE, rapport 33-11, 1978.
- [9] M. Dobarzik, "Formes de décharges glissantes sous tension de choc 1,2/50µs sur les surfaces de diélectrique solides polluées par le sable du Sahara", thèse de docteur-ingénieur, ENP, Alger, Juin 1975.
- [10] M.A.B El-Koshairy, El Sayed A.H Aly, A.E Abdullah, Ahmed M. El-Arбаты, E.A.A Mansour, S. El Debeiky, "Comportement des isolateurs en résine epoxy pour lignes de transport à haute tension dans les conditions de pollution rencontrées dans le désert", CIGRE, rapport 15-12, 1978.
- [11] A. El-Arбаты, A.Nosseir, S. El-debeiky, E. Nasser, A. El-Sarky, "Choix d'isolateurs utilisables dans des ambiances polluées et notamment dans des régions désertiques", CIGRE, Rapport 33-11, 1980.
- [12] M.A.B El-Koshairy, E. El-Sharkawi, M.M. Awad, H.E.M Zarzoura, M.M. Khalifa, A. Nosseir, "Performances de chaînes d'isolateurs haute tension soumises à la pollution du désert", CIGRE. Rapport 33-09, 1982.
- [13] M. Khalifa, M. Abou-Seada, H. El-Ghazaly, "Laboratory simulation of desert pollution flashover of high voltage insulators", 4^{ème} international symposium on high voltage engineering, rapport 46-03, Athènes, 5-9 Septembre 1983.
- [14] A. Mekhaldi, "Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique", Mémoire de Magister, Génie Electrique, ENP, Alger, Juillet 1990.
- [15] L. Chougui, R. Belaicha, "Contribution à l'étude de la pollution des isolateurs de haute tension dans la région d'Arzew", PFE, Génie Electrique, ENP, Alger, Janvier 1983.
- [16] A. Mekhaldi, H. Bondjelthia, "Contribution à l'étude de la pollution des isolateurs de haute tension dans la région électrique de Annaba", PFE, Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 1984.

- [17] Arnaldo G. Kanashiro, Geraldo F. Burani, "Leakage current monitoring of insulators exposed to marine and industrial pollution", IEEE, ISEL, Montréal, Québec, Canada, 16-19 Juin 1996, p.271-274.
- [18] A. Cimador, M. Cojan, P. Hautefeuille, M. Moreau, "Méthodes de dimensionnement des isolateurs de lignes aériennes en régions polluées", CIGRE, rapport 33-04, 1978.
- [19] M.P. Verma, H. Nildasch, W. Heise, H. Lipken, H. Schreiber, G.F. Lutz, "Critère de contournement par pollution et ses applications pour le dimensionnement et le contrôle de l'isolation", CIGRE, rapport 33-09, 1978.
- [20] He Fei-Zhong, Xu Cheng-Dong, "Résultats d'essais et de recherche sur des isolateurs naturellement pollués et leur application à la conception de l'isolation d'un réseau en régions polluées", CIGRE, Rapport 33-07, 1982.
- [21] E. El-Sharkawi, A.Amad, H. Said, M. Morsi, "Reappraisal of pollution severity of overhead transmission lines insulators using the highest leakage current pulses", 4^{ème} international symposium on high voltage engineering, Athènes, Grèce, , Rapport 46-07, 5-9 Septembre 1983.
- [22] Zhang Renyu, Zhu deheng, Guan zhicheng, "A study on the relation between the flashover voltage and the leakage current of naturally or artificially polluted insulators" 4^{ème} international symposium on high voltage engineering, Athènes, Grèce, , Rapport 46-01, 5-9 Septembre 1983.
- [23] Ioannis A. Stathopoulos, "Relation between pollution flashover voltage and maximum leakage current" 7^{ème} international symposium on high voltage engineering, Dresden, Rapport 43-20, 26-30 Aout 199.
- [24] A. Mekhaldi, M. Tegnar et A. Beroual, " Algorithm for pollution flashover calculations", Archives of Electrical Engineering, Vol. XLV, No. 4, pp. 385-397, 1996.
- [25] G. Riquel, E. Span genberg, "De la Céramique au Synthétique", EDE-Epure, No. 58, Avril 1998.
- [26] B.Hamoum, A.Kerbouche, "Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algerien", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 2007.
- [27] M.A. Douar, M.C. Bouzidi, "Caractéristique de l'état de surface d'un isolateur pollué à l'aide des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 2009.
- [28] M.Benakouche, R.Timghellette, "Comportement d'un modèle d'isolateur sous tension impulsionnelle", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 2005.
- [29] A. Bouleghlem, F. Taleb, "Comportement de l'isolateur capot et tige 1512L artificiellement pollué sous tension alternative 50Hz", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 2009.
- [30] D. Dumora, "Matériaux isolants céramiques en électrotechnique", Technique de l'ingénieur D275.
- [31] G. Leroy et all, "Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions ", Edition Eyrolles, Paris, France, 1984.
- [32] G.Riquel, E.Span Genberg, "De la céramique au synthétique", EDF-Epure, N° 58, Avril 1998.
- [33] Y.Porcheron, "Lignes aériennes : Matériels entrant dans la constitution d'une ligne aérienne ", Technique de l'ingénieur D4425.
- [34] M.Terkmani, M.Babouamer, "Contournement des Isolateurs des Lignes de Haute Tension" , PFE, Département de Génie Electrique, USTO, Oran, Juin 2005.

- [35] L. Chougui, R. Belaïcha, "Contribution à l'Etude de la Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région d'Arzew ", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Janvier 1983.
- [36] S. Lotfi, S. Djafri, "Contribution à l'Etude de la Pollution des Isolateurs des Lignes Ariennes de Haute Tension dans la Région de l'Arbaa", PFE, Département d'électronique et d'électrotechnique, USTHB, Alger, Juin 1982.
- [37] L. Arrabiy, "Visualisation et Traitement de Signal de Courant de Fuite sur une Surface Isolante Polluée", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, 1999.
- [38] M. Tegar, A. Boubakeur, "Pollution des Isolateurs de Haute Tension", Cours 4^{ème} Année, Département de Génie Electrique, ENP, Alger.
- [39] Z. DJEMAI, F. BENNAI, "Essais sur Site et au Laboratoire d'Isolateurs Contaminés par la Pollution Industrielle au Bord de la Mer ", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 1986.
- [40] QUILLET, "Encyclopédie des sciences industrielles", 1981.
- [41] 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, ENP, Alger, Décembre 1999.
- [42] R.Pinet, "Prévention des Incidents dus à la Pollution des Isolateurs sur les Ouvrages de Transport", RGE, Tome 82, Mars 1973.
- [43] A.K.Mujundar, N.Vasudev, K.N.Ravi Channakeshava, "Pollution Test Method of Insulators Under DC Voltage Using Dust Chamber", Ninth international symposium on high voltage engineering, 28 Aout -1 September 1995.
- [44] S. Bouazabia, T. Chikhaoui, "Méthodes d'essais sur des isolateurs pollués dans les conditions désertiques ", PFE, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juin 1988.
- [45] M.A.B El-Koshairy, F.A.M. Rizk, "Comportement des isolateurs des lignes de transport a très haute tension dans les conditions de pollution désertiques", CIGRE, Rapport 33-05, Paris, 1970.
- [46] A. El-Arabaty, A.Nosseir, S. El-debelky, A.El-Awady, E. Nasser, A. El-Sarky, "Effects of insulator shape, dimensions and material on its flashover characteristics", 4^{ème} international symposium on high voltage engineering, Rapport 46-04, Athènes, 5-9 Septembre 1983.
- [47] D.A. Swift, "AC disc insulators: Accumulation of pollution within and around the pin cavity", 7^{ème} international symposium on high voltage engineering, Rapport 44-22, Dresde, Allemagne, 26-30 Aout 1991.
- [48] D. Namane, " Effet de la discontinuité de la couche de pollution sur le comportement d'isolateur de haute tension, sous la fréquence 50Hz", Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de haute tension, ENP, Alger, Février 1998.
- [49] CEI 60 - 1, "Techniques des essais à haute tension", Définitions et Prescriptions Générales relatives aux Essais, Deuxième Edition, 1989.
- [50] B.M'hamdi, "Modélisation D'un Isolateur Naturellement Pollué Sous Tension Impulsionnelle Utilisant Des Circuits Electriques Equivalents", Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, ENP, Alger, 2008.
- [51] M. Tegar, "Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées ", Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Juillet 1993.

- [52] T. Guia, "Comportement d'un modèle isolateur sous à une tension impulsionnelle", Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, ENP, Alger, Mai 2004.
- [53] P. J. LAMBETH, H. AUXEL et M. P. VERMA, " Méthode de mesure de la sévérité de la pollution compte tenu de son influence sur le comportement des isolateurs à haute tension ", *Electra* N°. 20, pp 95-100, Janvier 1972.
- [54] A.Cimador, S. Vitet, "la pollution des isolateurs", EDF-Epure, N°.27, Paris, France, Juillet 1990.
- [55] R. Wilkins, "Flashover voltage of high voltage insulators with Unite en Surface pollution films ", *Proc. IEE*, 116, No3, MARS 1969.
- [56] W. Heise, G.F. Iuzn, G.Revrery, M. P. Verma, " Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide ", CIGRE, Rapport 33-09, Paris, France, 1982.
- [57] CIGRE groupe de travail 04 du comité d'étude n°33, "Mesure de la Sévérité de Pollution des Sites et Application au Dimensionnement des Isolateurs pour les Réseaux à Courant Alternatif ", *Electra* n°64, Paris, France, Mai 1979.
- [58] A.K.Mujundar, N.Vasudev, K.N.Ravi Channakeshava, "Pollution Test Method of Insulators Under DC Voltage Using Dust Chamber", Ninth international symposium on high voltage engineering, 28 Aout -1 September 1995.
- [59] C.H.A. Ely, P.J. Lambeth, J.S.T. Looms, D.A. Swift, C.E.G.B, "Contournement des polymères humides et polluées : l'ailette BOOSTER", CIGRE, Rapport 15-02, Paris, France, 1978.
- [60] Z.Sahli, "Etude de la non uniformité de la pollution sur des caractéristiques de contournement des isolateurs réels pollués sous tension continu", Mémoire de Magister, Génie Electrique, UAM Bejaia.
- [61] M. dobarzic, "Station d'essais de choc de laboratoire haute tension", Thèse de docteur ingénieur, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, ENP, Alger, juin 1972.
- [62] A.Abimouloud, "Comportement d'une surface isolante partiellement polluée sous tension alternative 50 Hz ", Mémoire de Magister, Département de Génie Electrique, ENP, Alger, Décembre 1999.
- [63] A.Boubakeur, M.Teguar, A.Abimouloud, A.Mekhaldi, "Simulation Expérimentale sous Tension Alternative 50 Hz du Comportement d'un Isolateur de Haute Tension Naturellement Pollué ", Quatrième Conférence Régionale des Comités CIGRE dans les Pays Arabes, Vol. 2, pp. 271-278, 19-21, Tripoli, Libye, Mars 2001.
- [64] M.Teguar, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, " Conduction Phenomenon on HV Insulators with Discontinuous Pollution under ac Voltage ", International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials, APTADM'2001, Special Issue of *Przeglad Elektryczny*, edited by Polish Electrical Society, pp. 267-270, September 17-19, Wroclaw, Poland, 2001.
- [65] M.Teguar, A.Abimouloud, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, " Influence of Discontinuous Pollution Width on the Surface Conduction. Frequency Characteristics of the Leakage Current", 2000 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 211-214, October 15-18, Victoria, British Columbia, Canada, 2000.
- [66] M.Teguar, A.Abimouloud, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, "Effect of Discontinuous Pollution Layer Conductivity on the Flashover and Leakage Current Characteristics", CIGRE Symposium, Behaviour of Electrical Equipment and Components in Tropical Environment, Report No. 200-02, September 3-7, Cairns, Australia, 2001.

- [67] A.Mekhaldi, S.Bouarabia, " Conduction Phenomena on Polluted Surface under ACHV " , 9th International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 310-74, August 28th-September 1st, Graz, Austria, 1995.
- [68] A.Mekhaldi, M.Teguar, A.Abimouloud, A.Boubakeur, " Caractéristique Fréquentielle du Courant de Fuite Sur une Surface Isolante Partiellement Polluée Sous Tension Alternative 50 Hz " , Quatrième Conférence Régionale des Comités CIGRE dans les Pays Arabes, Vol. 2, pp. 290-296, 19-21, Tripoli, Libye, Mars 2001.
- [69] A.Mekhaldi, M.Teguar, A.Boubakeur, " Leakage Current Waveform characteristics On HV Insulators under Discontinuous Pollution " , International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials, APTADM'2001, Special Issue of Przegląd Elektryczny, edited by Polish Electrical Society, pp. 263-266, September 17-19, Wrocław, Poland, 2001.
- [70] M.Teguar, A.Mekhaldi, A.Boubakeur, "Contournement d'isolateur partiellement pollué et caractéristique du courant de fuite".EJEE Vol.12/3, Juin 2009.