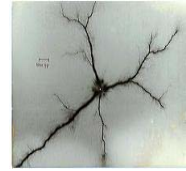




المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**LABORATOIRE DE HAUTE TENSION**

Mémoire du projet de fin d'études pour l'obtention du  
Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

**Thème :**

# **Caractérisation de l'état de surface d'un isolateur par technique d'ondelettes et modélisation**

**Proposé et dirigé par**

Pr. A.MEKHALDI.

**Etudié par :**

AHMED SEDDIK Bouhadjar

AMOKRANE Mounir

## *Remerciement*

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

*Nos sincères et chaleureux remerciement à Mr M.Teguar pour son aide, son appuis moral, et ses qualités humaines.*

*Nous remercions également Mr A.BOUBAKEUR pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail.*

*Nous remercions également Mr R.AMOKRANE pour ses précieux conseils*

*Nous tenons également à remercier le président et les membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.*

*Que tous les professeurs ayant contribué à notre formation trouvent ici notre profonde reconnaissance.*

# *Dédicaces*

Je dédicace ce travail :

A ma mère, exemple de courage et de sérieux qui m'a tout donné pour me permettre de réaliser mes rêves. En ces quelques mots, je lui exprime tout mon amour et mon respect pour tout ce qu'elle m'a offert comme soutien, encouragement et aide.

A mes frères et mes chères sœurs, pour leurs aides et leurs précieux conseils.

A mes amis, pour leurs amitiés sincères.

A tous mes camarades de la promotion 2008 pour les bons moments passés ensemble.

*Bouhadjar*

# *Dédicaces*

Je dédicace ce travail :

A mes parents, exemple de courage et de sérieux qui m'ont tout donné pour me permettre de réaliser mes rêves. En ces quelques mots, je leur exprime tout mon amour et mon respect pour tout ce qu'ils m'ont offert comme soutien, encouragement et aide.

A mon grand frère, pour son aide et ses précieux conseils.

A toute la famille AMOKRANE.

A toute la famille ZOUAI.

A toute la famille OUZIT.

A toute la famille BENAHMED.

A Yasmina, pour son appui et sa gentillesse.

A mes amis (la bande), pour leurs amitiés sincères.

A tous mes camarades de la promotion 2008 pour les bons moments passés ensemble.

*Mounir*

---

## ملخص

يعرض هذا العمل دراسة ظاهرة تلوث عوازل شبكة التوتر العالي (توتر متناوب 50 هرتز). ولهذا الغرض أجرينا سلسلة من التجارب على العازل ذو الصنف 1512 L بمختبر التوتر العالي بالمدرسة الوطنية متعددة التقنيات. وتضمنت هذه السلسلة قياس توتر الإحاطة من اجل 5 طبقات ملوثة مختلفة الناقلية, كما تضمنت تسجيل إشارة تيار التسرب و التوتر المطبق وذلك من اجل إجراء عملية معالجة الإشارة باستعمال تقنية الموجات و التحليل ب FFT لغرض تحديد خصائص سطح العازل, كما يعرض هذا العمل نمطا هندسيا يحاكي سلوك العازل المدروس, وعددا من الأنماط الرياضية (الخاصة بالممانعة, فرق الصفحة بين التوتر و التيار) في حالات مختلفة من التوتر المطبق و ناقلية الطبقة الملوثة, و في الأخير يعرض هذا العمل نمطين على شكل دائرة كهربائية تحتوي على مقاومة و مكثفة, الأول على التسلسل, والثاني على التفرع.

**كلمات مفتاحيه :** تيار التسرب, توتر الإحاطة, عوازل التوتر العالي, تقنيات الموجات, الشحنة المكثفة, التحليل ب FFT.

## RESUME

Dans ce travail, nous nous proposons d'étudier le phénomène de pollution des isolateurs de ligne haute tension (tension alternative 50 Hz). Pour cela, nous avons effectué une série d'essais sur un modèle d'isolateur (1512 L), au niveau du Laboratoire de Haute Tension de l'ENP, les données courant et tension sont enregistrées, afin, d'effectuer un traitement de signal, pour en tirer les informations sur l'état de surface de l'isolateur. Pour cela, nous utilisons un algorithme basé sur la technique d'ondelettes (transformée en ondelettes). Après avoir, caractériser l'état de surface de l'isolateur, nous proposons un modèle de laboratoire qui simule le comportement de l'isolateur, vis-à-vis du contournement et du courant de fuite, et cela pour différentes conductivités des couches polluantes et différents niveaux de tension. En suite, l'analyse harmonique du courant de fuite et de la tension appliquée seront effectués, pour déterminer les harmoniques caractérisant l'état de surface de l'isolateur. En fin, une modélisation du rapport tension courant de la couche polluante sera proposée ; et nous définirons les paramètres résistance et capacité de cette couche polluante, dans les deux cas, série et parallèle.

**Mots clés :** courant de fuite – contournement – isolateur – transformée en ondelettes – haute tension – modélisation – charge cumulative – analyse harmonique.

## ABSTRACT

In this work, we propose to study the phenomenon of polluted outdoor insulators on high-voltage line (AC 50 Hz). For this, we conducted a series of test on a model insulator (1512 L), at the Laboratory for High Voltage of the ENP, current and voltage data are recorded, in order to carry out treatment signal, to get information on the state surface of the insulator. For this, we use an algorithm based on a wavelet (wavelet transform). After characterizing the surface of the insulator, we offer a laboratory model that simulates the behaviour of the insulator (flashover and leakage current), for different conductivity of the polluting layers and different levels of applied voltage. Then, harmonic analysis of leakage current and applied voltage is carried out to determine the harmonics characterizing the state of the surface of the insulator. At the end, a model of the ratio voltage current of the polluting layer will be proposed and we will define the parameters strength and capacity of this layer polluting, in both cases, serial and parallel.

**Key words:** leakage current – flashover – insulator – wavelet transform – high voltage – modelling – cumulative charge – harmonic analyze.

---

---

---

***Nomenclature***

---

---

## Liste des symboles

ESDD	: Equivalent salt deposit density.
CEI	: Commission d'Electrotechnique Internationale.
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
$V_{50\%}$	: Tension dont la probabilité de contournement est égale 0.5.
$\sigma_{s20}$	: Conductivité superficielle.
$\sigma_{v20}$	: Conductivité volumique.
T	: Température.
$S_a$	: Salinité.
V	: Volume récupéré.
A	: Surface nettoyée.
SIR	: Silicon Rubber.
EPDM	: Ethylène Propylène Diène Mytilène.
RTV	: Room Temperature Vulcanized.
SFT	: Salt Fog Test.
ATH	: Aluminium Try Hydrate.
LMW	: Low Molar Weight.
$\psi(t)$	: Ondelette mère
$a$	: Paramètre d'échelle
$b$	: Paramètre de translation.
$\sigma_t$	: Résolution temporelle.
$\sigma_\omega$	: Résolution fréquentielle.
$\hat{\psi}$	: Transformée de Fourier de la fonction ondelette mère.
$\eta$	: Centre des fréquence.
$f$	: Fréquence du réseau.
$f_c$	: Fréquence centrale.
$\Delta t$	: Période d'échantillonnage.
$S_{lag}$	: Coefficient caractérisant la demi onde d'arc local.
$S_{sin}$	: Coefficient caractérisant la forme de la demi onde sinusoïdale.
$\eta_{arc}$	: Coefficient caractérisant la forme de la demi onde.
$t_{to\ onst}$	: Time Lag to Onset.
$L_{distortion}$	: Facteur de distorsion.
$L_{sin-triangle}$	: Facteur de distorsion d'une onde composée d'une onde sinusoïdale et d'une onde triangulaire.
$\eta_{sin-triangle}$	: Facteur d'ajustement.
$R_p$	: Résistance de la surface de pollution.
$\gamma_s$	: Conductivité surfacique
$r_0$	: Rayon interne de l'électrode HT.
$r_a$	: Rayon électrode terre.
$L$	: Longueur inter électrodes.
$x$	: largeur de la bande sèche.
$r$	: Rayon de la décharge.
$w$	: Largeur de la bande de pollution.
$I_{arc}$	: Courant de l'arc.

$Z_{od}$	: Impédance de l'assiette à l'état propre.
$Z_d$	: Impédance de la bande sèche.
$y$	: Longueur de la bande polluée.
$R$	: Rayon de l'électrode Haute Tension.
$Z_t$	: Impédance inter électrode.
$k_t$	: Constante expérimentale du modèle plan.
$R_i$	: Rayon interne de l'électrode terre.
$r_e$	: Rayon d'électrode Haute Tension.
$R_e$	: Rayon externe de l'électrode terre.
$R_{ic}$	: Rayon interne de l'électrode terre pour modèle de contournement.
$r_{ec}$	: Rayon d'électrode Haute Tension pour modèle contournement.
$R_{ibp}$	: Distance capot tige pour une pollution de faible conductivité.
$L_c$	: Largueur de l'électrode de terre.
$R_{ic}$	: Rayon interne de l'électrode de terre dans le modèle de contournement.
$r_{ec}$	: Rayon d'électrode Haute Tension du modèle de contournement.
$R_{ifp}$	: Distance entre le capot et la tige pour une pollution de forte conductivité.
$R_i$	: Rayon interne de l'électrode terre.
$r_{ef}$	: Rayon d'électrode Haute Tension pour une pollution de forte conductivité.
C1	: capacité du diviseur.
HT	: haute tension
T.R	: transformateur de réglage.
T.H.T	: transformateur haute tension
NaCl	: Chlorure de Sodium
PCT	: proportion en terme de charge cumulative de la composante transitoire.
PCS	: proportion en terme de charge cumulative de la composante sinusoïdale.
PCA	: proportion en terme de charge cumulative de la composante d'arc local.
CA	: charge cumulative de la composante d'arc local.
CS	: charge cumulative de la composante sinusoïdale.
CT	: charge cumulative de la composante transitoire.
$K$	: gain de la fonction de transfert.
$T_1, T_2, T_3$	: constantes de temps de la fonction de transfert
$I$	: valeur efficace du courant de fuite.
$U$	: valeur efficace de la tension appliquée.
PI	: proportional integrator.
P2I	: proportional integrator avec 2 poles.
P3I	: proportional integrator avec 3 poles.
P4I	: proportional integrator avec 4 poles.
$Z$	: impédance de la surface de l'isolateur.
$R_s$	: Résistance équivalente série de la surface de l'isolateur.
$C_s$	: Résistance équivalente série de la surface de l'isolateur.
$R_p$	: Résistance équivalente série de la surface de l'isolateur.
$C_p$	: Résistance équivalente série de la surface de l'isolateur.



## Sommaire des figures

### Chapitre I : Généralités

Figure I.1. Isolateur uniformément pollué.	5
Figure I.2. Tension et courant de fuite relevé de l'isolateur de la figure précédente, (bleu : tension, rouge : courant)	6
Figure I.3. Isolateur non uniformément pollué.	6
Figure I.4. Tension et courant de fuite relevés de l'isolateur de la figure précédente. (Bleu : tension, Rouge : courant)	6
Figure I.5 Modèle envisagé	7

### Chapitre II : Technique d'Ondelettes

Figure II.1 Représentation de l'ondelette de Morlet pour $a=2$ et $b=4$ .	22
Figure II.2 Représentation de l'ondelette de Morlet pour $a=4$ et $b=5$ .	22
Figure II.3. Boîtes Temps-fréquence des deux ondelettes $\psi_{u,s}$ et $\psi_{u_0, S_0}$ quand l'échelle 'a' diminue, le support du temps est réduit mais la diffusion de fréquence augmente et couvre un intervalle qui est décalé vers des hautes fréquences.	24
Figure II.4 Résolution	24

### Chapitre III

#### Décomposition du Courant de Fuite et Modélisation

Figure III.1. Formes d'onde typique des composantes sinusoïdales, d'arcs locaux, et de transition : (a), composante sinusoïdale ; (b), composante d'arc local, (c), composante de transition (les portions encerclées appartiennent à la composante d'arc local).	27
Figure III.2. Résultats de l'ondelette sur le signal d'un courant de fuite (a) courant de fuite, (b) phase, (c) module.	29
Figure III.3. Représentation des paramètres $S_{lag}$ et $S_{sin}$ .	30
Figure III.4. Signaux de courant de fuite attribués par demi-ondes à l'une des trois composantes (CA : arc local, CS sinusoïdale, CT : transitoire)	32
Figure III.4 Disque isolant comme modèle étudié par McElroy [1].	34
Figure III.5 Le modèle de Wilkins de contournement [76].	34
Figure III.6. Isolateur capot tige et son modèle (modèle avion) [77].	35
Figure III.7 Modèle plan couche de la pollution, (a) côté haute tension et (b) côté terre [78].	36
Figure III.8. Isolateur réel de type (15 12L)	37

Figure III.9.	Forme générale du modèle et grandeurs principales	37
Figure III.10.	Grandeurs du modèle dans le cas sec ou pour les faibles conductivités.	38
Figure III.10.	Longueurs de fuite dans le cas pollué.	39

---

---

## Chapitre IV

---

---

### Techniques Expérimentales et Résultats d'Essais

---

---

Figure IV.1.	Circuit d'essai.	42
Figure IV.2.	Isolateur étudié : (a) Vue latérale ; (b) Face inférieure ; (c) Face supérieure.	43
Figure IV.3.	Modèle plan équivalent à l'isolateur réel.	43
Figure IV.4.	Grandeur de l'isolateur.	44
Figure IV.5.	Forme générale du modèle.	45
Figure IV.6.	Méthode de pulvérisation sur l'isolateur réel.	47
Figure IV.7.	Mode de pulvérisation du modèle.	48

---

---

#### *IV.2. Etude de la tension de contournement*

---

---

Figure IV.8.	Tension de contournement de l'isolateur et du modèle.	52
--------------	---	----

---

---

#### *IV.3. Décomposition du courant de fuite et analyse de l'influence de la tension appliquée*

---

---

Figure IV.9.	(a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	54
Figure IV.10.	(a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	55
Figure IV.11.	(a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	56
Figure IV.12.	(a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	57

Figure IV.13. Influence de la contrainte électrique ; (a) Charge cumulative de la composante d'arc local ; (b) Charge cumulative de la composante sinusoïdale ; (c) Charge cumulative de la composante transitoire ; (d) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps ; (e) Amplitude du courant de fuite en fonction du niveau de tension. 58

Figure IV.14. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 59

Figure IV.15 (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 60

Figure IV.16 (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 61

Figure IV.17. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 61

Figure IV.18. Influence de la contrainte électrique ; (a) Charge cumulative de la composante sinusoïdale ; (b) Charge cumulative de la composante transitoire ; (c) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps ; (d) Amplitude du courant de fuite en fonction du niveau de tension. 62

Figure IV.19. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 63

Figure IV.20. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 64

Figure 4.21. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 65

Figure IV.22. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 66

Figure IV.23. Influence de la contrainte électrique ; (a) Charge cumulative de la composante d'arc local ; (b) Charge cumulative de la composante sinusoïdale ; (c) Charge cumulative de la composante transitoire ; (d) Amplitude du courant de fuite en

fonction du temps ; (e) Amplitude du courant de fuite en fonction du niveau de tension. 67

Figure VI.24. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 68

Figure IV.25. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 69

Figure IV.26. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 70

Figure IV.27. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 71

Figure IV.28. Influence de la contrainte électrique ; (a) Charge cumulative de la composante sinusoïdale ; (b) Charge cumulative de la composante transitoire ; (c) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps ; (d) Amplitude du courant de fuite en fonction du niveau de tension. 72

Figure IV.29. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 73

Figure IV.30. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) proportion des différentes composantes en fonction du temps. 74

Figure IV.31. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) proportion des différentes composantes en fonction du temps. 75

Figure IV.32. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 76

Figure IV.33. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée ; (b) Charge cumulative de la composante d'arc local en fonction du temps ; (c) Charge cumulative de la composante sinusoïdale en fonction du temps ; (d) Charge cumulative de la composante en fonction du temps ; (e) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps pour différents niveaux de tension. 77

Figure IV.34. Variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction du niveau de tension appliquée pour les différentes conductivités utilisées.	80
Figure IV.35. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	81
Figure IV.38. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	82
Figure IV.39. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	83
Figure IV.40. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	84
Figure IV.41. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée ; (b) Charge cumulative de la composante d'arc local en fonction du temps ; (c) Charge cumulative de la composante sinusoïdale en fonction du temps ; (d) Charge cumulative de la composante en fonction du temps.	84
Figure IV.42 (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	85
Figure IV.43. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	86
Figure IV.44. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	87
Figure IV.45. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	88
Figure IV.46. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée ; (b) Charge cumulative de la composante d'arc local en fonction du temps ; (c) Charge cumulative de la composante sinusoïdale en fonction du temps ; (d) Charge cumulative de la composante en fonction du temps ; (e) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps.	89
Figure IV.47. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	90

Figure IV.48. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 91

Figure IV.49. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 92

Figure IV.50. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 93

Figure IV.51. (a) Amplitude du courant de fuite de la tension appliquée ; (b) Charge cumulative de la composante d'arc local en fonction du temps ; (c) Charge cumulative de la composante sinusoïdale en fonction du temps ; (d) Charge cumulative de la composante en fonction du temps ; (e) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps. 94

Figure IV.52. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 95

Figure IV.53. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 96

Figure IV.54 (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 97

Figure IV.55. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 98

Figure IV.56. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée ; (b) Charge cumulative de la composante d'arc local en fonction du temps ; (c) Charge cumulative de la composante sinusoïdale en fonction du temps ; (d) Charge cumulative de la composante en fonction du temps ; (e) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps. 99

Figure IV.57. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps. 100

Figure IV.58. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	101
Figure IV.59. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	102
Figure IV.60. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	103
Figure IV.61. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.	104
Figure IV.62. Evolution de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la conductivité.	105
Figure IV.63. Variation de l'amplitude du courant de fuite de l'isolateur et du modèle en fonction de la conductivité sous une tension de 5 kV.	107
Figure IV.64. Variation de l'amplitude du courant de fuite de l'isolateur et du modèle en fonction de la conductivité sous une tension de 10 kV.	108
Figure IV.65. Variation de l'amplitude du courant de fuite de l'isolateur et du modèle en fonction de la conductivité sous une tension de 15 kV.	108
Figure IV.66. Influence de la contrainte climatique (conductivité de la couche polluante) pour l'isolateur réel sous différents niveaux de tension.	111
Figure IV.67. Influence de la contrainte climatique (conductivité de la couche polluante) pour le modèle de laboratoire sous différents niveaux de tension.	112

---

## ***V. Analyse Harmonique du Courant de Fuite et de la Tension Appliquée***

---

Figure V.1. Etude d'harmonique de la tension appliquée (5kV).	114
Figure V.2. Etude d'harmonique du courant de fuite (5kV).	114
Figure V.3. Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).	115
Figure V.4. Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).	115
Figure V.5. Etude d'harmonique de la tension appliquée (15kV).	115
Figure V.6. Etude d'harmonique du courant de fuite (15kV).	115
Figure V.7. Etude d'harmonique de la tension appliquée (20 kV).	116

---

## Table des figures

---

Figure V.8.	Etude d'harmonique du courant de fuite (20 kV).	116
Figure V.9.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV).	116
Figure V.10.	Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).	116
Figure V.11.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).	117
Figure V.12.	Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).	117
Figure V.13.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (15 kV).	117
Figure V.14.	Etude d'harmonique du courant de fuite (15 kV).	117
Figure V.15.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (20 kV).	118
Figure V.16.	Etude d'harmonique du courant de fuite (20 kV).	118
Figure V.17.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV)	118
Figure V.18.	Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).	118
Figure V.19.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (7,5 kV).	118
Figure V.20.	Etude d'harmonique courant de fuite (7,5 kV).	118
Figure V.21.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).	120
Figure V.22.	Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).	120
Figure V.23.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (15 kV).	120
Figure V.24.	Etude d'harmonique du courant de fuite (15 kV).	120
Figure V.25.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (2,5 kV).	121
Figure V.26.	Etude d'harmonique du courant de fuite (2,5 kV).	121
Figure V.27.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV).	121
Figure V.28.	Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).	121
Figure V.29.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).	122
Figure V.30.	Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).	122
Figure V.31.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (15kV).	122
Figure V.32.	Etude d'harmonique du courant de fuite (15kV).	122
Figure V.33.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV).	123
Figure V.34.	Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).	123
Figure V.35.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (7,5 kV).	123
Figure V.36.	Etude d'harmonique du courant de fuite (7,5 kV).	123



## Table des figures

---

Figure V.37.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).	124
Figure V.38.	Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).	124
Figure V.39.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (15 kV).	124
Figure V.40.	Etude d'harmonique du courant de fuite (15 kV).	124
Figure V.41.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV).	125
Figure V.42.	Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).	125
Figure V.43.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).	125
Figure V.44.	Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).	125
Figure V.45.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (15 kV).	126
Figure V.46.	Etude d'harmonique du courant de fuite (15 kV).	126
Figure V.47.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (20 kV).	126
Figure V.48.	Etude d'harmonique du courant de fuite (20 kV).	126
Figure V.49.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV).	127
Figure V.50.	Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).	127
Figure V.51.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).	127
Figure V.52.	Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).	127
Figure V.53.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (15 kV).	127
Figure V.54.	Etude d'harmonique du courant de fuite (15 kV).	127
Figure V.55.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (20 kV).	128
Figure V.56.	Etude d'harmonique du courant de fuite (20 kV).	128
Figure V.57.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV).	128
Figure V.58.	Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).	128
Figure V.59.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (7,5 kV).	129
Figure V.60.	Etude d'harmonique du courant de fuite (7,5 kV).	129
Figure V.61.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).	129
Figure V.62.	Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).	129
Figure V.63.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (15 kV).	129
Figure V.64.	Etude d'harmonique du courant de fuite (15 kV).	129
Figure V.65.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (5kV).	130

## Table des figures

---

Figure V.66.	Etude d'harmonique du courant de fuite (5kV).	130
Figure V.67.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (10kV).	130
Figure V.68.	Etude d'harmonique du courant de fuite (10kV).	130
Figure V.69.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (12.5kV).	130
Figure V.70.	Etude d'harmonique du courant de fuite (12.5kV).	130
Figure V.71.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (15 kV).	131
Figure V.72.	Etude d'harmonique du courant de fuite (15 kV).	131
Figure V.73.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV).	131
Figure V.74.	Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).	131
Figure V.75.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).	132
Figure V.76.	Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).	132
Figure V.77.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (12,5 kV).	132
Figure V.78.	Etude d'harmonique du courant de fuite (12,5 kV).	132
Figure V.79.	Etude d'harmonique de la tension appliquée (15 kV).	132
Figure V.80.	Etude d'harmonique du courant de fuite (15 kV).	132

---

## *VI. Modélisation du Comportement de l'Isolateur*

---

Figure VI.1 Evolution du gain de la fonction transfert en fonction de la conductivité ces isolateur réel.	136
Figure VI.2 Evolution du gain de la fonction transfert en fonction de la conductivité cas modèle du laboratoire.	137
Figure VI.3. Rapport tension-courant de l'isolateur en fonction de la conductivité de la couche polluante. Cas de l'isolateur réel.	138
Figure VI.4 Rapport tension-courant en fonction de la conductivité de la couche polluante. Cas du modèle de laboratoire.	138
Figure VI.5 Rapport tension-courant de l'isolateur en fonction du temps pour une conductivité de 9.5 $\mu$ S/cm.	139
Figure VI.6 Rapport tension-courant de l'isolateur en fonction du temps pour une conductivité de 10mS/cm.	139
Figure VI.7 Rapport tension-courant de l'isolateur en fonction du temps pour une conductivité de 20mS/cm.	140
Figure VI.8 Rapport tension-courant de l'isolateur en fonction du temps pour une conductivité de 29mS/cm.	140

Figure VI.9. Rapport tension-courant de l'isolateur en fonction du temps pour une conductivité de 50mS/cm.	140
Figure VI.10. Rapport tension-courant du modèle en fonction du temps pour une conductivité de 9.5 $\mu$ S/cm.	140
Figure VI.11. Rapport tension-courant du modèle en fonction du temps pour une conductivité de 10mS/cm.	140
Figure VI.12. Rapport tension-courant du modèle en fonction du temps pour une conductivité de 20mS/cm.	141
Figure VI.13. Rapport tension-courant du modèle en fonction du temps pour une conductivité de 29mS/cm.	141
Figure VI.14. Rapport tension-courant du modèle en fonction du temps pour une conductivité de 50mS/cm.	141
Figure VI.15. Circuit série équivalent.	145
Figure VI.16. Circuit parallèle équivalent.	145
Figure VI.17. Variation de la résistance du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 9,5 $\mu$ S/cm.	146
Figure VI.18. Variation de la résistance du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 9,5 $\mu$ S/cm.	147
Figure VI.19. Variation de la capacité du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 9,5 $\mu$ S/cm.	147
Figure VI.20. Variation de la capacité du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 9,5 $\mu$ S/cm.	148
Figure VI.21. Variation de la résistance du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 10mS/cm.	148
Figure VI.22. Variation de la résistance du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 10mS/cm.	148
Figure VI.23. Variation de la capacité du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 10mS/cm.	149
Figure VI.24. Variation de la capacité du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 10mS/cm.	149
Figure VI.25. Variation de la résistance du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 20mS/cm.	150
Figure VI.26. Variation de la résistance du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 20mS/cm.	150
Figure VI.27. Variation de la capacité du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 20mS/cm.	150

Figure VI.28. Variation de la capacité du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 20mS/cm.	151
Figure VI.29. Variation de la résistance du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 29mS/cm.	151
Figure VI.30. Variation de la résistance du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 29mS/cm.	151
Figure VI.31. Variation de la capacité du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 29mS/cm.	152
Figure VI.32. Variation de la capacité du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 29mS/cm.	152
Figure VI.33. Variation de la résistance du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 50mS/cm.	153
Figure VI.34. Variation de la résistance du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 50mS/cm.	153
Figure VI.35. Variation de la capacité du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 50mS/cm.	153
Figure VI.36. Variation de la capacité du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 50mS/cm.	154
Figure VI.37. Variation de la résistance parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 9,5 $\mu$ S/cm.	154
Figure VI.38. Variation de la résistance série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 9,5 $\mu$ S/cm.	155
Figure VI.39. Variation de la capacité série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 9,5 $\mu$ S/cm.	155
Figure VI.40. Variation de la capacité parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 9,5 $\mu$ S/cm.	156
Figure VI.41. Variation de la résistance parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 10mS/cm.	156
Figure VI.42. Variation de la résistance série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 10mS/cm.	157
Figure VI.43. Variation de la capacité série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 10mS/cm.	157
Figure VI.44. Variation de la capacité parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 10mS/cm.	157
Figure VI.45. Variation de la résistance parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 20mS/cm.	158

Figure VI.46. Variation de la résistance série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 20mS/cm.	158
Figure VI.47. Variation de la capacité série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 20mS/cm.	159
Figure VI.48. Variation de la capacité parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 20mS/cm.	159
Figure VI.49. Variation de la résistance parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 29mS/cm.	159
Figure VI.50. Variation de la résistance série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 29mS/cm.	160
Figure VI.51. Variation de la capacité série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 29mS/cm.	160
Figure VI.52. Variation de la capacité parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 29mS/cm.	160
Figure VI.53. Variation de la résistance parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 50mS/cm.	161
Figure VI.54. Variation de la résistance série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 50mS/cm.	161
Figure VI.55. Variation de la capacité série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 50mS/cm.	162
Figure VI.56. Variation de la capacité parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 50mS/cm.	162

# Sommaire

---

## *Chapitre I : Généralités*

---

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>I. Généralités</b>	<b>4</b>
<b>I.1. Problématique</b>	<b>4</b>
<b>I.2. But du présent travail</b>	<b>4</b>
<b>I.3. Principaux travaux antérieurs dans le domaine de l'étude de la pollution des isolateurs</b>	<b>4</b>
<b>I.3.1 Introduction</b>	<b>4</b>
<b>I.3.2. Principaux travaux</b>	<b>4</b>
<b>I.4. L'origine de la pollution</b>	<b>8</b>
<b>I.5. Sources de pollution</b>	<b>9</b>
<b>I.5.1. Pollution naturelle</b>	<b>9</b>
<b>I.5.1.1.Pollution marine</b>	<b>9</b>
<b>I.5.1.2.Pollution désertique</b>	<b>9</b>
<b>I.5.4. Pollution industrielle</b>	<b>9</b>
<b>I.5.5. Pollution mixte</b>	<b>10</b>
<b>I.6. Evaluation du degré de la pollution</b>	<b>10</b>
<b>I.7. Influence de la nature du matériau sur le comportement du courant de fuite</b>	<b>11</b>
<b>I.8. Influence du temps de repos sur le comportement du courant de fuite et les propriétés des isolateurs</b>	<b>11</b>
<b>I.9. Corrélation entre le courant de fuite et les performances des isolateurs</b>	<b>11</b>
<b>I.9.1. Investigations sur site</b>	<b>11</b>
<b>I.9.2. Investigations au laboratoire</b>	<b>12</b>
<b>I.9.3. Description de quelques méthodes</b>	<b>13</b>
<b>I.9.3.1. Méthode du brouillard propre ou de la couche solide</b>	<b>13</b>

I.9.3.2. La méthode de la pollution liquide	13
I.9.3.3. La méthode de brouillard salin	13
<b>I.10. Défauts des isolateurs</b>	<b>15</b>
I.10.1. Défauts électriques (problèmes de surfaces)	15
I.10.2. Défauts mécaniques	16
I.10.2.1. Défauts dus à la manipulation	16
I.10.2.2. La destruction	16
<b>I.11. Méthodes de diagnostic</b>	<b>16</b>
I.11.1. Techniques d'inspection en service	16
I.11.1.1. L'inspection visuelle	17
I.11.1.2. Emission des photons lumineux	17
I.11.1.3. Mesures thermiques	17
<b>I.12. Principaux moyens mis en oeuvre pour la prévention du contournement</b>	<b>17</b>
I.12.1. Augmentation de la ligne de fuite	18
I.12.2. Utilisation des isolateurs composites	18
I.12.3. Nettoyage de l'isolateur	18
I.12.4. L'huile et la graisse de Silicone	18
I.12.5. Couche RTV	18

---

## *Chapitre II : Utilisation de la Technique d'Ondelette*

---

<b>II.1. Historique</b>	<b>20</b>
<b>II.2. Introduction</b>	<b>20</b>
<b>II.3. Transformé en Ondelette Continue</b>	<b>21</b>
II.3.1 Définition	21
II.3.2. EXEMPLE DE L'ONDELETTE DE MORLET (COMPLEXE)	21

---

## **Chapitre III : Décomposition du Courant de Fuite et Modélisation**

---

<b>III.1. Introduction à la corrélation</b>	<b>26</b>
<b>III.2. Présentation des différentes composantes</b>	<b>27</b>
<b>III.3. Utilisation de la technique d'ondelette</b>	<b>28</b>
<b>III.4. Assignment des différentes demi-ondes</b>	<b>30</b>
III.4.1. Assignment de la composante d'arc local	30
III.4.2. Assignment des composantes transitoires et sinusoïdales	31
III.4.3. Validation de la procédure de décomposition du courant de fuite	31
<b>III.5. Modélisation (élaboration d'un modèle de laboratoire)</b>	<b>33</b>
III.5.1. Introduction	33
III.5.2. Principaux modèles précédemment proposés	33
a) Modèle du disque circulaire	33
b) Modèle de Wilkins	34
c) Modèle avion de Zhicheng	35
c) Impédance des bandes sèches et polluées	35
III.5.3. Description du modèle proposé	36
III.5.4. Dimensionnement du modèle	38
a) Pour l'étude du contournement	38
a.1) Modèle pour le contournement pour de faibles conductivités	38
a.2) Modèle pour le contournement pour des conductivités élevées	39
b) Modèle pour la mesure du courant de fuite	40

---

## **Chapitre IV : Technique Expérimentale et Résultats d'essais**

---

<b>IV.0. Introduction</b>	<b>42</b>
<b>IV.1. Dispositif expérimental</b>	<b>42</b>
IV.1.1. Circuit d'essai du laboratoire de l'ENP	42



<b>IV.1.2. Objets d'essais</b>	<b>43</b>
<b>IV.1.3. Caractéristique géométrique des objets d'essais</b>	<b>43</b>
<b>IV.1.3.1. Cas de l'isolateur réel</b>	<b>43</b>
<b>IV.1.3.2. Cas du modèle de laboratoire</b>	<b>45</b>
<b>IV.1.4. Préparation des solutions polluantes</b>	<b>45</b>
<b>IV.1.5. Préparation du modèle</b>	<b>45</b>
<b>IV.1.6. Préparation de l'isolateur réel et du modèle avant chaque essai</b>	<b>46</b>
<b>IV.1.7. Méthode de pulvérisation</b>	<b>46</b>
<b>IV.1.8. Phénomènes observés lors des essais</b>	<b>48</b>

---

---

## ***IV.2. Etude de la tension de contournement***

---

---

<b>VI.2.1</b>	<b>Etude de la tension de contournement</b>	
<b>IV.2.1.1. Introduction</b>		<b>51</b>
<b>IV.2.1.2. Mode opératoire</b>		<b>51</b>
<b>IV.2.1.3. Résultats des essais</b>		<b>51</b>
<b>IV.2.1.4. Conclusion</b>		<b>52</b>

---

---

## ***IV.3. Décomposition du courant de fuite et analyse de l'effet de la contrainte électrique***

---

---

<b>IV.3. Décomposition du courant de fuite et analyse de l'influence de la tension appliquée</b>	<b>54</b>
<b>IV.3.1. Introduction</b>	<b>54</b>
<b>IV.3.2. Cas de l'isolateur réel</b>	<b>54</b>
<b>IV.3.2.1. Couche de pollution de conductivité 9.5 <math>\mu</math>S/cm</b>	<b>54</b>
<b>IV.3.2.2. Couche de pollution de conductivité 10mS/cm</b>	<b>59</b>
<b>IV.3.2.3. Couche de pollution de conductivité 20mS/cm</b>	<b>63</b>
<b>IV.3.2.4. Couche de pollution de conductivité 29mS/cm</b>	<b>68</b>
<b>IV.3.2.5. Couche de pollution de conductivité 50mS/cm</b>	<b>73</b>

IV.3.3. Discussion	78
IV.3.4. Influence de la conductivité	79
IV.3.4. Cas du modèle de laboratoire	81
IV.3.4.1. Couche de pollution de conductivité 9.5 $\mu$ S/cm	81
IV.3.4.2. Couche de pollution de conductivité 10mS/cm	85
IV.3.4.3. Couche de pollution de conductivité 20mS/cm	90
IV.3.4.4. Couche de pollution de conductivité 29mS/cm	95
IV.3.4.5. Couche de pollution de conductivité de 50mS/cm	100
IV.3.5. Influence de la conductivité	105
IV.3.6 Discussion	105
IV.3.7. Comparaison des résultats du modèle et de l'isolateur	107
IV.3.8. Conclusion	109

---

---

### *VI.4 Influence de la conductivité de la couche de pollution*

---

---

VI.4.1. Introduction	111
VI.4.2. But	111
VI.4.3. Résultats expérimentaux	111
VI.4.3.1. Résultat de l'isolateur réel	111
VI.4.3.2. Résultat du modèle de laboratoire	112
VI.4.4. Conclusion	112

---

---

### *V. Analyse Harmonique du Courant de Fuite et de la Tension*

#### *Appliquée*

---

---

V.0. Introduction	114
V.1 Analyse fréquentielle de la tension du réseau	114
V.2.1. Eau distillée de conductivité de 9,5 $\mu$ S/cm	115
V.2.2. Couche de pollution de conductivité 10mS/cm	117
V.2.3. Couche de pollution de conductivité 20mS/cm	119
V.2.4. Couche de pollution conductivité 29mS/cm	121
V.2.5. Couche de pollution de conductivité 50mS/cm	123

<b>V.3. Etude harmonique des signaux de l'isolateur réel</b>	<b>124</b>
V.3.1. Eau distillée de conductivité 9,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$	123
V.3.2. Couche de pollution de conductivité 10mS/cm	126
V.3.3. Couche de pollution de conductivité 20mS/cm	128
V.3.4. Couche de pollution de conductivité 29mS/cm	129
V.3.5. Couche de pollution de conductivité 50mS/cm	131
<b>V.4. Discussion</b>	<b>132</b>

---

## **VI. Modélisation du Comportement de l'Isolateur**

---

<b>VI.1. Modélisation</b>	<b>135</b>
VI.1.1. Utilisation de la méthode d'identification du processus	135
VI.1.1.1.Introduction	135
VI.1.1.2.But	135
VI.1.1.3. Cas de l'isolateur réel	135
VI.1.1.4. Cas du modèle de laboratoire	136
<b>VI.2. Modèle de l'impédance de la couche de pollution en fonction de la conductivité</b>	<b>137</b>
VI.2.1. But	137
VI.2.2. Variation de l'impédance en fonction de la conductivité	137
• Cas de l'isolateur réel	138
• Cas du modèle de laboratoire	138
VI.2.3. Modélisation	138
<b>VI.3.Modélisation de la variation de l'impédance en fonction du temps</b>	<b>139</b>
VI.3.1.But	139
VI.3.2.Variation de l'impédance en fonction du temps	139
• Cas de l'isolateur réel	139
• Cas du modèle de laboratoire	140
VI.3.3. Modélisation de la variation de l'impédance en fonction du temps	141

• Cas du modèle de laboratoire	142
• Cas de l'isolateur réel	142
<b>VI.4. Modèle de variation du déphasage courant tension en fonction de tension</b>	<b>143</b>
<b>VI.4.1. But</b>	<b>143</b>
<b>VI.4.2. Modélisation</b>	<b>143</b>
• Cas de l'isolateur réel	143
• Cas du modèle du laboratoire	144
<b>VI.5. Modélisation par un circuit équivalent (série parallèle)</b>	<b>144</b>
<b>VI.5.1. Introduction</b>	<b>144</b>
<b>VI.5.2. Modèle série</b>	<b>145</b>
<b>VI.5.3. Modèle parallèle</b>	<b>145</b>
<b>VI.6. Résultats du traitement</b>	<b>146</b>
<b>VI.6.1. Cas de l'isolateur réel</b>	<b>146</b>
<b>VI.6.1.1. Solution polluante de conductivité 9,5 µS/cm</b>	<b>146</b>
<b>VI.6.1.2. Solution polluante de conductivité 10 mS/cm</b>	<b>148</b>
<b>VI.6.1.3. Solution polluante de conductivité 20mS/cm</b>	<b>150</b>
<b>VI.6.1.4. Solution polluante de conductivité 29 mS/cm</b>	<b>151</b>
<b>VI.6.1.5. Solution polluante de conductivité 50mS/cm</b>	<b>153</b>
<b>VI.6.1.6. Conclusion</b>	<b>154</b>
<b>VI.6.2. Cas du modèle de laboratoire</b>	<b>154</b>
<b>VI.6.2.1. Solution de conductivité de 9,5µS/cm</b>	<b>154</b>
<b>VI.6.2.2. Solution de conductivité de 10mS/cm</b>	<b>156</b>
<b>VI.6.2.3. Solution de conductivité de 20mS/cm</b>	<b>158</b>
<b>VI.6.2.4. Solution de conductivité de 29mS/cm</b>	<b>159</b>
<b>VI.6.2.5. Solution de conductivité de 50mS/cm</b>	<b>161</b>
<b>VI.6.2.6. Conclusion</b>	<b>162</b>
<b>VI.6.3. Conclusion générale sur la modélisation par un circuit équivalent</b>	<b>162</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>164</b>

---

---

# *Introduction générale*

---

---

## ***Introduction Générale***

Le domaine de l'énergie électrique comprend la conception et l'exploitation des systèmes de production, de transport et de distribution. Le génie électrique a connu diverses avancées majeures en ce domaine depuis la fin des années soixante-dix.

On peut citer le développement des lignes de haute tension, dont l'utilisation réduit les pertes en énergie et les coûts de transport. Mais en contre partie, les lignes haute tension sont sujet à des avaries qui peuvent les mettre hors service; parmi ces avaries, on peut citer le contournement des chaînes d'isolateurs. A proximité des régions industrielles, agricoles et côtières, la pollution est la cause principale du contournement des chaînes d'isolateurs, pouvant engendrer de longues interruptions de service. Les entreprises chargées de l'entretien des réseaux, déboursent d'importantes sommes d'argent pour effectuer des opérations de lavages et de nettoyages avant la remise en marche de la ligne. Les recherches et les tests industriels ont montré que la pollution et le mouillage sont des paramètres qui favorisent l'occurrence du contournement; ce phénomène commence par l'apparition du courant de fuite, le courant menant au contournement présente des caractéristiques distinctives. Le contournement est précédé par l'apparition des arcs aux bornes des bandes sèches, ces arcs se prolongent sur les surfaces de l'isolateur jusqu'au contournement. Ce phénomène modifie d'une manière significative l'amplitude et la forme du courant de fuite [1].

L'importance de la prédiction du contournement est capitale ; pour prévenir tout risque de contournement, les services concernés prévoient des cycles périodiques de nettoyage et de graissage, ce cycle est établi par expérience en se basant sur le nombre d'heures de service de l'isolateur. La prédiction exacte du contournement et l'identification du moment où le contournement est imminent sont de grande importance. Evidemment, un critère de diagnostic exact est nécessaire pour déterminer l'état de surface de l'isolateur ainsi que le risque d'occurrence du contournement. Les recherches des laboratoires et les expériences industrielles ont montré que le courant de fuite circulant sur la surface de l'isolateur, facilement mesurable, donne des informations sur l'état de surface de l'isolateur et le risque de contournement. Par conséquent, nous nous proposons d'analyser le signal du courant de fuite, afin d'établir une estimation de l'état de surface de l'isolateur et par la suite, prévenir le phénomène de contournement. Les avantages d'une telle méthode de prédiction, par rapport aux cycles de nettoyages programmés, sont les suivants :

- Les techniques d'acquisition et d'analyse des signaux ne sont ni chères ni invasives.
- La contamination invisible pouvant causer un contournement peut être réduite en contrôlant constamment la surface de l'isolateur.
- Les cycles de nettoyages peuvent être optimisés, les coûts globaux de ces opérations seront réduits et le système de transport et de distribution sera plus fiable.

Les objectifs de notre travail sont :

- Développement des critères liant le courant de fuite enregistré (forme, amplitude et déphasage) à l'état de surface de l'isolateur et qui sont nécessaires pour la prévention contre le contournement.
- Validation du modèle de laboratoire proposé.
- Validation du modèle simulant le comportement de l'isolateur sous la contrainte électrique (tension appliquée) et le degré de sévérité de la couche polluante recouvrant la surface de l'isolateur.

Notre travail est constitué de six chapitres :

Dans le premier chapitre intitulé « généralités », nous présentons d'une manière succincte, les principaux travaux antérieurs dans le domaine de l'étude de la pollution des isolateurs, les sources et les différents types de pollution, les paramètres influençant le courant de fuite, la corrélation courant de fuite et les performances des isolateurs, différents types d'investigations, différents types de défauts des isolateurs et différents moyens de prévention du contournement.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons l'historique de la transformée en ondelettes ; sa définition et quelques unes de ses propriétés. La transformée en ondelettes est la base sur laquelle repose notre étude. Nous donnerons quelques exemples d'ondelettes pour illustrer cette partie.

Le chapitre trois traite de la décomposition du courant de fuite. En premier lieu, nous commençons par l'introduction à la corrélation, puis nous présentons les différentes composantes, enfin, nous présentons l'application de la méthode d'ondelettes, pour l'assignement des différentes composantes.

A la fin de cette partie, nous présentons le modèle de laboratoire, en commençant par un récapitulatif des différents modèles existants dans la littérature ; puis nous présentons le modèle de laboratoire, que nous proposons.

Dans le chapitre IV, nous présentons les différents résultats obtenus après traitement des données ; nous présentons l'amplitude du courant de fuite, la charge cumulative des différentes composantes et la proportion de chaque composante. Cela est précédé par les essais de la tension de contournement dans les deux cas de l'isolateur et du modèle de laboratoire. Enfin, nous étudions l'influence de la conductivité de la couche polluante sur le phénomène de contournement.

Nous étudions dans le chapitre V, le taux d'harmoniques des signaux tension et courant ; et cela dans l'optique de déterminer lesquels des harmoniques nous informent le plus sur l'état de surface de l'isolateur, autrement, les harmoniques les plus significatifs.

Dans le dernier chapitre, nous nous proposons de modéliser la variation du rapport tension-courant de l'isolateur pollué et du déphasage entre la tension et le courant, en fonction de plusieurs paramètres (temps d'application, niveau de tension et conductivité de la couche polluante). D'autre part, nous proposons également, dans ce même chapitre, une modélisation à l'aide d'un circuit électrique (série ou parallèle) de l'isolateur pollué.

---

---

# *Chapitre I : Généralités*

---

---



## **I. Généralités**

### **I.1. Problématique**

Les isolateurs dans les lignes aériennes et les postes de réseaux de transport d'énergie électrique sont sujet à différents incidents dus, dans la majorité des cas, au dépôt de la pollution suite à une interaction entre le vent et les poussières diverses ; une couche de pollution se dépose sur la surface de l'isolateur. Cette couche de pollution, plus ou moins conductrice, donne naissance à un courant de fuite circulant à travers la surface de l'isolateur. Le passage de ce courant provoque des assèchements locaux sur cette surface ; des arcs électriques prennent naissance et peuvent se développer le long de la surface isolante jusqu'au contournement de l'isolateur et la mise hors service de l'ouvrage.

### **I.2. But du présent travail**

L'importance des informations fournies par le courant de fuite est reconnue. Une commission spéciale d'IEEE s'est constituée en partenariat avec un certain nombre de laboratoires pour la mesure de la résistance surfacique, et avec comme objectif d'établir des procédures de mesures standard [2].

L'interaction entre la contrainte électrique et celle environnementale, conduit à un processus de dégradation qui se développe le long de la surface de l'isolateur, à cause de l'apparition du courant de fuite ; d'où l'importance de la mesure du courant de fuite pour l'évaluation du degré de dégradation de l'état de surface des isolateurs.

Dans ce présent travail, nous étudions la corrélation qui pourrait exister entre le courant de fuite (en terme de forme, d'amplitude et de déphasage par rapport à la tension de service) et la sévérité de la pollution caractérisant l'état de surface de l'isolateur.

### **I.3. Principaux travaux antérieurs dans le domaine de l'étude de la pollution des isolateurs**

#### **I.3.1. Introduction**

Après avoir posé le problème de la pollution des isolateurs, ce chapitre présente les principaux travaux recensés dans la littérature et qui traitent l'analyse et l'étude de ce phénomène.

#### **I.3.2. Principaux travaux**

B.Subba et al [3], ont étudié le comportement du courant de fuite sur les surfaces isolantes artificiellement polluées, pour différentes distances inter électrodes et différents niveaux de tensions. Les résultats trouvés ont montré, qu'au moment de l'application de la tension, le courant de fuite augmente avec l'augmentation de celle-ci (c'est-à-dire que la résistance surfacique diminue) ; quand la tension commence à diminuer ce courant diminue, mais il prend des valeurs inférieures à celles prises au moment de l'application de la tension (Phénomène similaire à celui de l'hystérésis). Ce phénomène a été expliqué par le fait que, durant la première étape, la diminution de la résistance surfacique peut être due à l'augmentation de la conductivité, à cause de l'effet Joule, provoquant l'augmentation de la température de la couche conductrice. L'augmentation ultérieure de la résistance est due à l'assèchement de la couche conductrice. Il a été observé aussi que les bandes sèches

apparaissent uniquement sur 2 mm, à partir des électrodes haute tension, le reste de la couche de pollution garde l'état mouillé.

En Afrique du Sud, Bologna et AC Britten [4] ont effectué des essais sur des isolateurs légèrement pollués au laboratoire et en service. Leurs études montrent que la majorité des contournements ont lieu entre 20h00 et 06h00. Ce mécanisme doit être lié à la combinaison du léger mouillage dû à la condensation et la légère couche de pollution, probablement non uniforme, déposée sur l'isolateur. Dans ces conditions, un courant de fuite s'établit sur la surface de l'isolant, ce qui provoque un contournement. Les investigations se sont basées sur des tests réalisés sur des isolateurs de 400 kV en service et au laboratoire, en mesurant l'amplitude du courant de fuite et en analysant sa forme. Les isolateurs des lignes de 400 kV comportaient 23 disques en verre. Les données ont été relevées en continu (sans interruption) durant une période de 8 mois. Une analyse des données a montré la relation entre les conditions environnementales (généralement l'humidité) et l'amplitude du courant de fuite. Il a été remarqué, effectivement, que le courant de fuite est fonction de la sévérité de la pollution sur la surface des isolateurs caractérisée par l'ESDD (Equivalent Salt Deposit Density) utilisée pour l'évaluation de la sévérité de la pollution.

Pour les tests au laboratoire, les isolateurs ont été pollués artificiellement ; la sévérité de la pollution utilisée durant l'expérimentation est de 5 g de sel pour un litre d'eau. Celle-ci est considérée comme une pollution légère [5], la tension est la même qu'en service soit 15.33 kV/mm. Les paramètres de surveillance sont le courant de fuite (amplitude et forme d'onde) et la tension.

Dans le cas d'un mouillage uniforme (simulation du cas d'une pollution uniforme), il a été remarqué, une minute approximativement après la mise sous tension, l'apparition de micro-étincelles sur les éléments, l'élément le plus loin du bout de la chaîne marquant le plus d'activité (côté terre).



Figure I.1. Isolateur uniformément pollué.

Le courant de fuite, a été trouvé en phase avec la tension, ce qui correspond à la présence d'une couche de pollution répartie uniformément sur la surface.

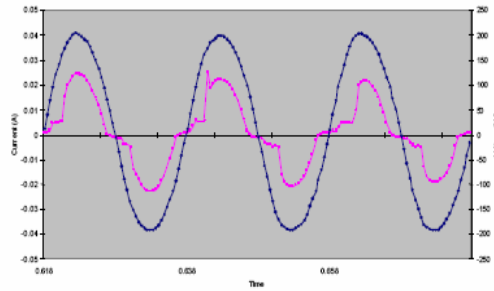


Figure I.2. Tension et courant de fuite relevés de l'isolateur de la figure précédente, (bleu : tension, rouge : courant)

Dans le cas d'un mouillage non uniforme, le coté bas de chaque élément de l'isolateur est mouillé, le haut est gardé propre. Des micro-étincelles sont remarquées sur les deux côtés de l'élément (bas et haut) (Figure I.3), les éléments loin de la borne HT marquent le plus d'activité en termes d'apparition d'étincelles.



Figure I.3. Isolateur non uniformément pollué.

Ainsi, l'amplitude du courant de fuite était faible (25 mA), le courant était en avance par rapport à la tension (Figure I.4). Cela veut dire que c'est la composante capacitive du courant de fuite qui domine (la capacité est créée par la zone propre du haut de l'élément). La forme du courant contient aussi des pics qui sont dus aux étincelles.

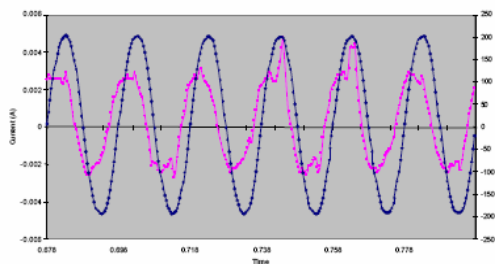


Figure I.4. Tension et courant de fuite relevés de l'isolateur de la figure précédente. (Bleu : tension, Rouge : courant)

Ali Bouhafs et al [6] met en évidence l'influence de la longueur ainsi que la répartition non uniforme de la pollution sur le comportement des isolateurs. L'étude est faite sur un modèle de laboratoire (Figure I.5), ce modèle est soumis à différentes contraintes à savoir, la tension appliquée, la répartition de la pollution non uniforme ainsi que la position de la couche fortement conductrice par rapport à la borne haute tension et sa largeur par rapport à la longueur de fuite du modèle de laboratoire.

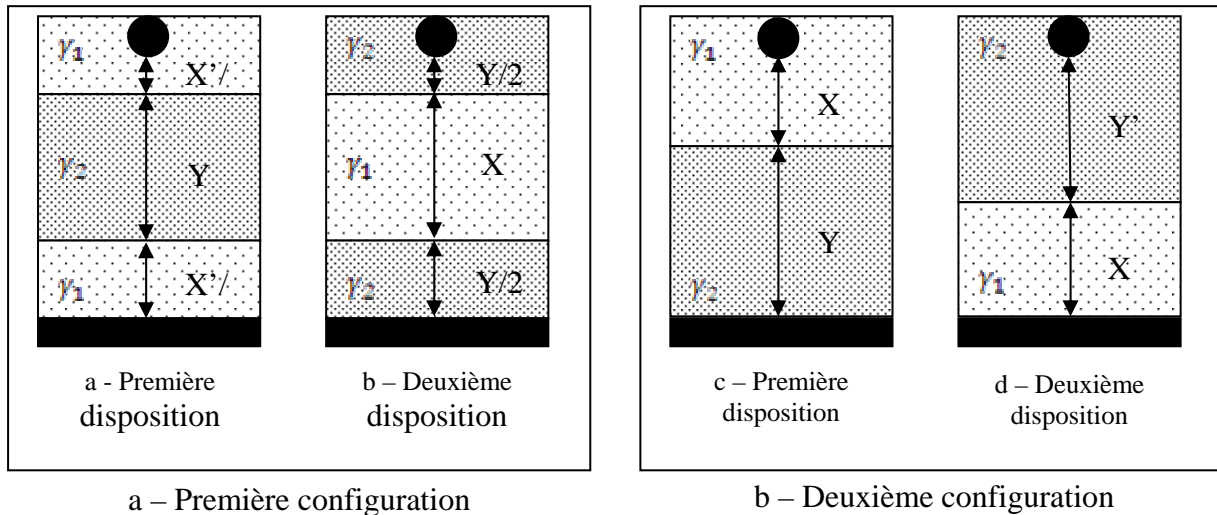


Figure I.5 Modèle envisagé

$Y, Y'$  : la largeur de la partie fortement conductrice.

$X, X'$  : la largeur de la partie la moins conductrice.

Concernant la deuxième configuration (Figure I.5.b) le contournement présente un minimum dans le cas où la largeur de la couche fortement conductrice de l'isolateur est au voisinage de 90% par rapport à la distance inter-électrodes. Dans tous les cas, les courants de fuite ainsi que la longueur de l'arc augmentent avec la tension appliquée et avec la largeur de la couche fortement conductrice.

Contrairement à la tension de contournement, les configurations des couches de pollution influent sur le comportement du courant de fuite, comme illustré dans le cas de la deuxième configuration où le courant de fuite est plus important que celui de la première.

Sur la base des caractéristiques expérimentales obtenues, il a été mis au point un algorithme permettant de simuler le comportement des isolateurs non-uniformément pollués. Grâce à ce dernier, d'autres caractéristiques ont été mises au point, décrivant le comportement des surfaces isolantes non-uniformément polluées, telles que les évolutions du courant de fuite et la tension appliquée en fonction de la longueur de l'arc électrique, le courant de fuite et la tension critique en fonction de la longueur de l'arc et ce pour différentes conductivités, les résistances équivalentes en fonction de la longueur d'arc, le coefficient de sécurité en fonction du produit relatif. Cette dernière caractéristique permet de surveiller le degré de la pollution des isolateurs et d'éviter ainsi le contournement total de l'isolateur qui peut être préjudiciable pour les installations électriques.

F.Meghnefi, C Volat et M. Farzaneh [7] ont fait une analyse en temps et en fréquence du courant de fuite circulant sur la surface de l'isolateur pendant l'accumulation de la glace sur celle-ci. Ce travail a montré la variation du courant de fuite (en forme et en amplitude) en fonction du temps d'application de la tension ; cette variation, qui a eu lieu sous la contrainte climatique (dépôt de la glace), présente deux zones distinctes, caractérisées chacune par une forme et un spectre particuliers du courant de fuite. La première zone est caractérisée par une amplitude de courant de fuite quasi constante et relativement faible ; ce courant garde une forme sinusoïdale en avance par rapport à la tension. Le déphasage est principalement dû à la phase initiale du dépôt de la glace sur la surface isolante.

Une phase de transition entre les deux zones était marquée par des décharges électriques autour des assiettes ; au fur et à mesure que la sévérité augmente (augmentation de la quantité de la glace), l'amplitude du courant de fuite augmente ainsi que le nombre de pics de courte durée. Durant cette phase, la forme du courant de fuite commence à marquer des distorsions et tend à devenir en phase avec la tension ; ainsi l'analyse spectrale montre l'augmentation de l'amplitude des harmoniques (les plus importants sont le cinquième et le troisième). Il a été remarqué que la durée de la première phase dépend du taux de formation de la glace.

#### I.4. L'origine de la pollution

Les sources de pollution peuvent être d'origine naturelle ou anthropogénique [8]. En effet, dans le cas des lignes aériennes et des postes installés au bord de la mer, les embruns portés par le vent déposent sur les isolateurs une couche de sel. Lorsque cette couche est humidifiée par un brouillard, elle devient conductrice. De plus, au voisinage des usines polluantes, par exemple les usines métallurgiques ou chimiques, les isolateurs se recouvrent de particules solides infimes, faiblement conductrices mais hygroscopiques. Dans des conditions de forte humidité, à savoir le brouillard ou la pluie, la dissolution des sels contenus dans ces particules provoque la formation d'un électrolyte. Ces deux concepts constituent les deux cas typiques de pollution où la contamination des surfaces isolantes est poussée à l'extrême. Il serait pourtant erroné de penser que les régions éloignées de la mer ou des centres industriels sont exemptées de pollution. La pollution domestique produite par les appareils de chauffage des habitations, les véhicules et la pollution agricole sont aussi omniprésents dans notre environnement [2].

Le tableau suivant résume certains contaminants, leurs sources et les méthodes utilisées pour leur détermination.

<b>Contamination naturelle et anthropogénique</b>	<b>Sources probables de pollution</b>	<b>Méthodes de mesure</b>
$H^+$	Atmosphère	Procédé d'électrolyse
$NO, NO_2, CO_2, SO_2, NO_4^-, NH_3, NH_4^+$	Atmosphère, fertilisation, combustion.	Spectrométrie
$SO_4, NO_3^-, NH_4^+, Cl^-$	Mer, brouillard, précipitations.	Chromatographie
$Na^+, Mg^{++}, Ca^{++}, K^+$	Mer	Emission atomique ou absorption.

Tableau I.1. Contaminants: sources et méthodes de mesure.

A.Cherney et al [9] présentent les moyennes des tensions de tenue à 50 %, mesurées dans différents laboratoires, en fonction de la densité du dépôt de sel (ESDD) mesurée sur des chaînes d'isolateurs de porcelaine standard IEEE. Les résultats de cette étude sont résumés dans le tableau I.2.

$V_{50\%} (kV)$	18,94	13,35	11,0
ESDD ( $mg/cm^2$ )	0,02	0,07	0,20
Ecart type ( $kV/m$ )	2,328	2,088	1,91

Tableau I.2. Tension de tenue 50 %,  $V_{50\%}$ , des isolateurs IEEE en fonction de la densité équivalente du dépôt de sel (ESDD) par isolateur.

Ces valeurs peuvent être exprimées à l'aide de la formule de régression suivante:

$$V_{50\%} = 7,35.(ESDD)^{-0,24} \quad (I.1)$$

Où  $V_{50\%}$  est la tension de tenue 50 % calculée par isolateur et ESDD est la densité équivalente du dépôt de sel en  $mg/cm^2$ .

## I.5. Sources de pollution

Du fait de la variété des origines de la pollution, la nature de celle-ci peut être classée en trois catégories, à savoir la pollution naturelle, industrielle et la pollution mixte.

### I.5.1. Pollution naturelle

La pollution naturelle provient:

- Des sels marins dans les régions côtières.
- Des poussières du sol (notamment lors de chantiers importants ou des régions agricoles).
- Des sables véhiculés par le vent en régions désertiques [10].

#### I.5.1.1. Pollution marine

Les installations situées en bord de mer sont exposées aux embruns portés par le vent et qui se déposent progressivement sur les isolateurs, formant une couche de pollution de sel qui devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée par le brouillard ou simplement par condensation. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance. Dans certaines conditions, ils se développent jusqu'à provoquer le contournement total de l'isolateur [10,11].

#### I.5.1.2. Pollution désertique

Parmi les phénomènes qui caractérisent la nature désertique, figure le vent de sable. Celui-ci induit des dépôts de sable sur les surfaces des isolateurs. De la même façon que précédemment, lorsque ces dépôts sont humidifiés, les couches de sable deviennent plus ou moins conductrices à cause de l'existence de sels dans le sable [11, 12]. Après, nous assistons aux mêmes phénomènes constatés dans le cas précédent.

### I.5.2. Pollution industrielle

Le problème de la pollution industrielle concerne les lignes qui passent près des zones industrielles (les fumées dégagées par des usines, raffineries, cimenteries, minerais ... etc.), près des grandes villes (les gaz d'échappement des véhicules) ou près des terrains agricoles (les engrais utilisés en agriculture) [13].

### I.5.3. Pollution mixte

Ce type de pollution est le plus dangereux ; c'est la résultante de l'existence de différents types de pollution dans la même zone, comme dans le cas des zones industrielles se trouvant en régions côtières [14].

## I.6. Evaluation du degré de la pollution

Généralement, la plus grande partie de la couche de pollution n'est conductrice qu'en présence de l'humidité ; la conductivité de la couche résultante va dépendre du taux d'humidité et de la composition chimique de la couche de pollution. Le niveau de la sévérité de la pollution est souvent caractérisé par l'ESDD (Equivalent Salt Deposit Density). Pour déterminer l'ESDD, on verse une quantité d'eau distillée sur la surface de l'isolateur puis on la récupère soigneusement. Puis après, on mesure la conductivité du volume d'eau récupérée et on détermine la quantité de sel qui produit la même conductivité. Enfin, nous procédons par le calcul suivant [15] :

$$\sigma_{S20} = \sigma_{V20}[1 - 0.0227(T - 20)] \quad (I.2)$$

Où :

$\sigma_{S20}$  est la conductivité de la couche de la pollution à la température 20°C (en S) ;

$\sigma_{V20}$  est la conductivité volumique à la température 20°C (en S/m) ;

T est la température de l'isolateur ;

- La salinité  $S_a$  en  $kg/m^3$  et l'ESDD en  $mg/cm^2$  sont respectivement donnés par :

$$S_a = (5.7\sigma_{S20})^{1.03} \quad (I.3)$$

$$ESDD = \frac{S_a V}{A} \quad (I.4)$$

V est le volume récupéré ;

A est la surface nettoyée ;

- Les valeurs standard du degré de contamination fournies par EPRI (Electrical Power Research Institut) sont données aux tableaux suivants [2] :

Description	ESDD $g/cm^2$
Very Light	0-0.03
Light	0.03-0.06
Moderate	0.06-0.1
Heavy	$\geq 0.1$

Tableau I.3. Correspondance entre la sévérité de la pollution et ESDD

Description	$S_a (kg/m^3)$
Very Light	0-10
Light	10-20
Moderate	20-40

Heavy	40-80
Severe	$\geq 80$

Tableau I.4. Correspondance entre la conductivité et la sévérité de la pollution

## I.7. Influence de la nature du matériau sur le comportement du courant de fuite

Les travaux de Gubanski et al [16] ont été effectués sur des isolateurs composés de différents types de matériaux. Il a basé son étude sur le comportement du courant de fuite. Il conclut que le courant de fuite est souvent capacitif en caractère et sinusoïdal en forme ; une fois l'hydrophobie perdue, le courant de fuite devient de plus en plus résistif, avec des pics dus aux décharges dans les zones sèches et ceci engendre l'apparition de nouveaux harmoniques.

- Pour les isolateurs qui gardent leur hydrophobicité, le courant de fuite est capacitif, sinusoïdal et de l'ordre du  $\mu\text{A}$ .
- Pour les isolateurs dont la surface est complètement mouillée, le courant de fuite est sinusoïdal à caractère résistif d'ordre relativement élevé.
- Pour les isolateurs ayant perdu totalement ou partiellement leur hydrophobicité, le courant de fuite a une forme non linéaire avec une amplitude dont l'ordre de grandeur est relativement élevé [16].

## I.8. Influence du temps de repos sur le comportement du courant de fuite et les propriétés des isolateurs

Il a été montré que le temps de repos a une influence sur le comportement du courant de fuite et donc sur l'état de surface de certains isolateurs [16]. Dans le cas des isolateurs composites, le temps de repos leur permet de réacquérir leurs propriétés hydrophobes, par contre, pour les isolateurs en céramique, cette influence est moins importante.

Il a été remarqué aussi que le temps de repos a un effet sur le comportement de l'amplitude du troisième harmonique ; ce dernier caractérise le degré de distorsion relatif au courant de fuite.

## I.9. Différentes méthodes d'investigation

Le facteur le plus important influençant les isolateurs en général et particulièrement les isolateurs non céramiques, est la perte de l'hydrophobie ; ceci est suivi par un vieillissement sous la contrainte électrique et celle environnementale. En effet, l'interaction entre ces deux contraintes conduit à un processus de dégradation qui se développe le long de la surface de l'isolateur, à cause de l'apparition d'un courant de fuite, d'où la nécessité de mesurer ce dernier afin d'évaluer le degré de vieillissement et les performances des isolateurs.

### I.9.1. Investigations sur site

Les premiers essais, entrepris depuis plusieurs années d'ailleurs, ont donc tout naturellement consisté à installer, dans différents sites pollués, des stations dans lesquelles on observait le comportement d'un certain nombre de chaînes d'isolateurs ou de colonnes isolantes de longueurs ou de profils différents. Les qualités respectives de ces isolateurs,



placés sous la même tension, étaient appréciées en comparant, par exemple, les temps au bout desquels ils avaient contourné, ou plus simplement encore, en classant les isolateurs en deux catégories, en distinguant ceux qui avaient contourné de ceux qui avaient tenu durant deux ou trois ans d'exposition, par exemple.

Cependant, l'inconvénient majeur de ces essais « in situ » apparaît immédiatement : la pollution étant un phénomène à évolution lente puisque dû à une accumulation progressive de dépôt, plusieurs années étaient nécessaires pour pouvoir comparer valablement les performances des isolateurs essayés « in situ ». Ce délai étant jugé trop long, à juste titre d'ailleurs, on a rapidement cherché à reproduire en laboratoire les conditions de la pollution naturelle, afin d'obtenir des résultats et d'effectuer des comparaisons, plus rapidement, plus facilement, et à un moindre coût que dans les stations « in situ » [17].

L'étude du courant de fuite mesuré particulièrement sur site se base sur sa forme, sur le nombre de pics enregistrés durant chaque demi-onde ainsi que leurs amplitudes sous différentes sources de contaminations, à savoir : la pluie, la neige, l'exposition aux rayons de soleil, la vitesse du vent et sa direction, les différents niveaux de température ainsi que l'humidité.

Certains résultats de la mesure de courant de fuite sur site indiquent que le comportement de celui-ci, dans le cas des isolateurs en Silicone Rubber (SIR) et en EPDM, est similaire à celui des isolateurs en Porcelaine [18]. Cependant sous des conditions climatiques sévères, les performances de l'EPDM se détériorent rapidement.

Les résultats de mesure de courant de fuite obtenus sur des isolateurs exposés aux conditions marines [19,29] montrent que les SIR et les isolateurs type « Room Temperature Vulcanizing » (RTV) présentent de bonnes performances par rapport à la porcelaine.

## **I.9.2. Investigations au laboratoire**

Les méthodes déjà proposées sont relativement nombreuses. Cette variété se comprend aisément quand on se réfère aux objectifs que l'on peut se proposer d'atteindre. Une première approche consiste à rechercher une méthode qui simule le mieux possible les conditions naturelles de pollution. Le choix de la méthode dépend du type des conditions qu'on veut simuler, (pollution marine, pollution industrielle ou tout autre type de pollution).

Une deuxième approche consiste à rechercher une méthode au laboratoire susceptible de fournir des résultats reproductibles afin de faciliter la comparaison des performances des différents types d'isolateurs. Ajoutons qu'à ce choix, se superpose le problème, subalterne au plan scientifique mais toujours important au plan économique, de l'investissement en moyens d'essais que l'on est prêt à consentir. Ces méthodes peuvent être classées en trois grandes catégories : les méthodes du '**brouillard propre**', de '**la pollution liquide**' et du '**brouillard salin**'. Ces investigations permettent non seulement une meilleure compréhension du phénomène de vieillissement sous pollution artificielle mais aussi de faire la corrélation entre les paramètres mesurés et l'état de surface du matériau isolant ainsi que la détermination de l'influence de chaque contrainte prise individuellement sur le vieillissement. Pour cela, différents types de tests ont été élaborés [17].

## **I.9.3. Description de quelques méthodes**

### **I.9.3.1. Méthode du brouillard propre ou de la couche solide [21]**

Après avoir soigneusement nettoyé l'isolateur à essayer, celui-ci est enduit d'un mélange d'eau, de sel (Na Cl) et d'un absorbant inerte. La conductivité du mélange est réglée par la quantité de sel. Les absorbants généralement utilisés sont le kaolin, le kieselguhr (terre

d'infusoire, diatomée) ou la silice pulvérisée. Ce mélange est appliqué sur les isolateurs par pulvérisation, par trempage ou au pinceau ; les isolateurs sont alors séchés. L'essai proprement dit consiste à humidifier le dépôt préparé comme indiqué ci-dessus, au moyen d'un « brouillard propre » c'est-à-dire d'eau pure. Différentes variantes peuvent se rencontrer selon que le brouillard est produit d'eau froide ou chaude ou même que la vapeur d'eau provenant d'une chaudière lui est substituée.

La tension peut être appliquée avant ou après humidification de la couche polluante. L'essai est sanctionné par le contournement ou la tenue de l'isolation au bout d'un temps donné. Diverses procédures peuvent être employées : on peut par exemple déterminer le degré de pollution tenu en répétant l'essai un certain nombre de fois, pour la tension nominale de l'isolation, et en recherchant le degré de pollution maximale qui ne provoque pas le contournement.

L'étude du mécanisme de contournement par ce type de test se base sur les résultats du courant de fuite obtenus ; ces résultats ont montré que ce mécanisme est différent selon que l'on a affaire à des surfaces hydrophobes ou hydrophiles [22,23].

Dans le cas où la surface de l'isolateur est hydrophobe, le courant de fuite est sinusoïdal, les décharges aux bornes des bandes sèches causent une déformation de l'onde de ce courant [23,24]. Cependant, il a été montré que cette déformation de l'onde peut être le résultat de la perte de l'hydrophobie même sans décharge [26,27]. Ainsi, il a été montré qu'à partir du spectre du courant de fuite une décision peut être prise concernant le nettoyage ou le changement de l'isolateur [27,28].

### **I.9.3.2. La méthode de la pollution liquide [21]**

Cette méthode, connue également sous l'appellation de « **méthode de la méthylcellulose** », s'apparente à la méthode du brouillard propre dans la mesure où un mélange liquide est appliqué sur l'isolateur avant l'essai. Cependant, dans ce cas, la pollution n'est pas sèche avant l'essai. Elle est constituée d'eau, de craie et de méthylcellulose ou de kaolin. Comme pour le brouillard propre, la conductivité du mélange est ajustée par addition de chlorure de sodium.

Après quelques minutes d'égouttage, la tension d'essai est appliquée à l'isolateur. Il est important de signaler que la couche polluante n'est pas humidifiée en cours d'essai. Ainsi, après quelques minutes d'essai, le courant de fuite assèche la couche et la probabilité de contournement décroît rapidement.

### **I.9.3.3. La méthode de brouillard salin**

Le test du brouillard salin SFT (Salt Fog Test) est utilisé plus particulièrement pour l'évaluation de la résistance contre l'érosion et le cheminement du courant de fuite [29,30]. Dans ce type de test, les isolateurs sont mis sous tension et y sont exposés au brouillard. L'amplitude du courant de fuite, la charge cumulative, la perte du poids et le temps d'échec sont les principaux paramètres relevés à partir de ce type de test caractérisant les performances de l'isolateur.

Après un nettoyage préalable, l'isolateur est soumis à un brouillard d'eau salée alors qu'une tension constante lui est appliquée. Le brouillard est produit par deux rangées de pulvérisateurs disposés de part et d'autre de l'isolateur. Chaque pulvérisateur est constitué de deux ajutages : l'un délivrant la solution salée, l'autre disposé perpendiculairement au

précédent, fournit un courant d'air comprimé afin d'atomiser la solution en fines gouttelettes. Les ajutages sont constitués de matériaux résistants à la corrosion.

Généralement, la tension appliquée à l'isolateur est la tension maximale de service. On cherche alors la « salinité tenue » c'est-à-dire la plus forte salinité qui, pour trois essais sur quatre, ne conduit pas au contournement.

On peut également rechercher la tension de contournement pour une salinité donnée. Partant d'une valeur de tension approximativement égale à 90% de la tension de contournement, on accroit, toutes les 5 minutes, la tension de 2 à 2.5% jusqu'à obtenir la tension de contournement. Une alternative consiste à employer la méthode « up and down » où la tension varie par pas de 5%, la tenue étant caractérisée par l'absence de contournement pendant 5 minutes [31].

Les résultats de ce test montrent que pour les faibles conductivités, les surfaces des isolateurs en SIR se comportent mieux que ceux en EPDM. Dans le cas des conductivités élevées, les deux présentent pratiquement le même comportement. Les SIR présentent généralement une surface plus hydrophobe que les EPDM. Cependant, l'utilisation des ATH (Aluminium Tri Hydrate) présente un avantage dans le cas d'un état de surface hydrophile ; son introduction permet l'augmentation de la résistance contre le cheminement du courant de fuite sur la surface de l'isolateur et par la suite la non dégradation des matériaux [32]. D'autre part, une augmentation de la quantité d'ATH augmente le courant de fuite et rend la surface plus hydrophile, mais une fois la surface devenue hydrophile, l'amplitude du courant de fuite reste inférieure au cas où l'ATH n'est pas introduit [33, 34].

Ainsi, les résultats de ce type de tests ont montré que :

- Les performances du RTV dépendent des dimensions des particules de l'ATH introduites. Initialement, la surface de l'isolateur s'est détériorée à cause des arcs court-circuitant les bandes sèches, après un certain temps, la surface réacquiert ses propriétés hydrophobes après une diffusion des LMW (Low Molar Weight) [35].
- L'épaisseur de la couche en ATH affecte les propriétés thermiques de l'isolateur ; une grande épaisseur empêche l'évacuation de la chaleur produite par les décharges [36,37]. Il a été trouvé ainsi, que des couches minces génèrent un courant de fuite inférieur à celui circulant à travers des couches épaisses. En effet, tenant compte de la résistance contre l'érosion, une épaisseur optimale est choisie, de l'ordre de 0.38 mm.
- L'utilisation du SFT (Salt Fog Test) a montré la variation linéaire de la charge cumulative avec le temps de vieillissement [38] et un écoulement de courant de fuite relativement plus important dans le cas d'un isolateur horizontal que dans le cas d'un isolateur vertical. L'étude de l'influence de l'intensité du brouillard et sa conductivité a mené à une modification de la procédure du test de brouillard salin [39,40] ; le temps du test a été divisé en 3 temps ; période transitoire: le courant de fuite change de manière importante, la surface devient hydrophile et le courant de fuite commence à devenir de plus en plus résistif ; période du début (early period) : le courant de fuite a un caractère résistif, la surface de l'isolateur est hydrophobe ; la dernière période de vieillissement (late period aging) : le courant de fuite reste toujours élevé et l'érosion commence à apparaître.

Parmi les paramètres influençant les résultats du test, nous distinguons la salinité de l'électrolyte, la distribution du champ électrique, l'arrangement ainsi que la procédure du test. Il a été remarqué que le vieillissement artificiel, durant une période de trois semaines, correspond à l'équivalent d'une année en service [41,42]. Une étude a montré qu'un vieillissement, sous une tension de 500 kV et une faible contamination, entraîne une dégradation significative même pour un faible courant de fuite circulant sur la surface.

## **I.10. Défauts des isolateurs**

Les isolateurs composites des générations précédentes ont présenté comme principaux problèmes l'érosion, l'acheminement, la décharge de couronne...etc. Ces problèmes ont été éliminés par le bon choix des matériaux et le développement de nouvelles techniques de fabrication. L'inconvénient des isolateurs composites est la difficulté d'identifier l'isolateur défectueux de l'isolateur sain, d'où la nécessité de développer une méthode de diagnostic pour différencier entre un isolateur défectueux et un isolateur sain.

On peut distinguer deux types de défauts : défauts électriques et défauts mécaniques. Ces deux types de défauts sont mutuellement dépendants [43].

### **I.10.1. Défauts électriques (problèmes de surfaces)**

Le vieillissement des isolateurs est causé par les conditions climatiques auxquelles l'isolateur est exposé ainsi que son profil. Un profil qui permet l'accumulation des agents polluants favorise l'apparition des décharges locales menant à l'érosion et par la suite au cheminement.

L'effet de couronne est considéré comme agent principal de vieillissement des isolateurs. Cet effet se caractérise par la réduction de l'hydrophobie, la décoloration de la surface de l'isolateur ainsi que l'érosion sous l'effet des gaz de décharge.

Les gouttelettes d'eau sur la surface de l'isolateur affectent la distribution du champ sur cette surface (la permittivité relative de l'eau est élevée ce qui augmente l'intensité du champ aux voisinages des gouttelettes), les gouttelettes se déforment dans la direction du champ.

Les étapes de développement du vieillissement et du processus de contournement ont été établies dans des travaux antérieurs [44, 45, 46]. Un excellent isolateur est caractérisé par son hydrophobicité, cette hydrophobie peut être perdue suite à l'accumulation des agents polluants sur la surface de l'isolant, ou même après avoir subi des chocs électriques (arcs locaux) ; certains isolateurs peuvent réacquérir leurs états hydrophobes après immigration des molécules de faible poids (Low Molar Weight) du centre de l'objet jusqu'à la surface [43].

Le mouillage de la surface favorise l'apparition de l'effet couronne dans les régions de forte intensité de champ, d'où la perte locale de l'hydrophobie ; une quantité de pollution se dissout et forme une couche plus ou moins conductrice, par conséquent une nouvelle distribution du champ s'établit. Ce processus se poursuit et le chemin conducteur mouillé se développe à travers l'isolateur, par la suite le courant circulant à travers ce chemin cause l'assèchement des régions à forte densité de courant ce qui conduit au développement d'un arc local ; celui-ci provoque d'avantage de perte d'hydrophobie, d'érosion de surface et augmente l'amplitude du courant de fuite. Dans le cas d'un isolateur en polymère, le séchage de sa surface lui permet de réacquérir ses propriétés hydrophobes [45,47].

Dans le cas des isolateurs en verre ou en porcelaine, le mécanisme de décharge est différent de celui des isolateurs en polymère, le mouillage de la pollution accumulée sur la surface des isolateurs en verre ou en porcelaine conduit à l'apparition d'un film d'eau continu, donc l'arc peut se développer directement. Le séchage de la partie restante et l'élongation de l'arc causent le contournement de l'isolateur. Les premières étapes sont similaires à celles des SIR. De plus, la couche de pollution développée est souvent mince, ce qui limite l'intensité du courant de fuite et par la suite, la tension de contournement augmente [44, 45, 46].

### **I.10.2. Défauts mécaniques**

Les échecs mécaniques d'un isolateur peuvent mener à des conséquences fatales. Dans le cas des isolateurs en SIR, la plupart des échecs sont des échecs d'ordre mécanique [44, 48].

#### **I.10.2.1. Défauts dus à la manipulation**

Les isolateurs en porcelaine peuvent être endommagés facilement mais le taux de tels endommagements est toujours faible. Les isolateurs composites ne sont pas fragiles mais marquent un taux relativement élevé d'endommagements. En effet, un nombre d'endommagements plus ou moins important a été constaté dû à la manipulation à la main durant le transport et l'installation [49, 50, 51]. Pour prendre en charge ce problème de manipulation à la main, le groupe CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques) prépara un guide de manipulation qui contient des recommandations relatives aux méthodes de manipulation de ce type d'isolateurs [52], en commençant de l'endroit de fabrication jusqu'à sa mise sous tension.

#### **I.10.2.2. La destruction**

Elle a pour origine les jets de pierres, tirs de balles, provoquant la destruction de l'isolateur en causant des problèmes majeurs tels que la fracture de l'isolateur [53]. Dans le cas des isolateurs en porcelaine, ce genre d'incidents ne constitue pas un vrai problème car ce type d'isolateurs est caractérisé par une bonne rigidité mécanique.

## **I.11. Méthodes de diagnostic**

Le diagnostic permet d'obtenir des informations concernant l'état technique du système [54]. Dans le cas des isolateurs, cela veut dire que le diagnostic est un moyen de prise de décision de changement ou de maintenance du système envisagé. Ceci a un effet économique, il permet non seulement la prévention des risques mais aussi la réduction du coût. Pour les isolateurs en porcelaine et en verre, plusieurs méthodes sont disponibles pour le diagnostic en service [49]. Dans le cas des isolateurs composites, la situation est plus complexe, bien que plusieurs techniques ont été proposées pour l'évaluation de l'état des isolateurs [48, 55,56] :

### **I.11.1. Techniques d'inspection en service**

En 1996, le groupe CIGRE 22.03 [55] présenta une revue discutant les avantages et les inconvénients des techniques les plus utilisées pour l'évaluation de l'état des isolateurs en service y compris : l'inspection visuelle, l'émission acoustique directionnelle et la mesure du champ électrique. Il conclue qu'aucune méthode ne pourrait faire l'identification du type de défaut indépendamment des autres méthodes.

#### **I.11.1.1. L'inspection visuelle**

C'est la technique la plus couramment utilisée pour l'identification des isolateurs défectueux [48, 53, 55, 57]. Pour avoir des résultats fiables, l'observateur doit être positionné prêt de l'isolateur, d'où la nécessité d'utiliser des moyens nécessaires (hélicoptère). L'examen permet d'identifier les défauts apparents (érosion, perforation et les dommages du contournement). Ces données fournissent des informations sur les défauts internes tels que le cheminement ; lorsque le contournement se produit sur la surface elle-même, on parle plus volontiers de *cheminement*, surtout lorsqu'il subsiste des traces qui dégradent la surface de l'isolant.

### **I.11.1.2. Emission des photons lumineux**

Les équipements d'amplification de la lumière peuvent être utilisés pour la détection des décharges de surface [56], ceci est souvent une indication d'un début d'érosion. Cependant, la plupart des photons émis par les décharges ont une énergie qui correspond à une longueur d'onde entre 300 et 400 nm, par conséquent l'utilisation des capteurs sensibles aux rayons Ultra Violet (UV) permet d'augmenter la limite de détection, d'où la possibilité de prédiction des défauts.

### **I.11.1.3. Mesures thermiques**

La dégradation des matériaux, sous la contrainte du champ électrique, est souvent accompagnée par un échauffement. Ainsi, les décharges de surface peuvent être détectées en utilisant la thermographie infrarouge (IR thermography). Cependant, cette méthode est sensible aux variations de la température dues aux raisons climatiques [58,59].

Il existe d'autres méthodes de diagnostic telles que la mesure acoustique, la mesure de la distribution du champ électrique et la mesure d'hydrophobicité. D'autres méthodes sont encore en développement telles que : Laser Induced Florescence (LIF), contrôle de qualité des interfaces internes.

## **I.12. Principaux moyens mis en oeuvre pour la prévention du contournement**

La pollution accumulée graduellement sur les isolateurs et la présence des conditions climatiques humidifiant l'isolateur tel que le brouillard, la brume, la bruine et la neige favorisent l'apparition de films d'eau sur la surface de l'isolateur et par conséquent, la dissolution du sel contenu dans la couche de pollution. Ceci mène à l'apparition d'un courant de fuite sur la surface de l'isolateur qui pourrait se terminer par un contournement pouvant mettre hors service l'ouvrage en question.

En fait, ce problème inquiète les ingénieurs chargés des opérations de distribution et de transport de l'énergie électrique depuis la naissance de l'électricité ; plusieurs recherches ont été menées dans le but de maintenir une bonne isolation. Plusieurs technologies ont été utilisées avec différents degrés de succès ; parmi ces technologies il y a le RTV (Room Temperature Vulcanized) avec des couches du SR (Silicone Rubber) [60] qui est devenu très populaire ces deux dernières décades.

Les différentes méthodes et leurs avantages sont présentés dans ce qui suit :

### **I.12.1. Augmentation de la ligne de fuite**

Dans cette méthode de base adoptée par plusieurs entreprises des réseaux électriques, on procède à l'augmentation de la ligne de fuite soit en agissant sur le profil de l'isolateur, soit en augmentant le nombre d'assiettes utilisées dans une chaîne d'isolateurs. Cependant, les performances de cette technique dépendent des conditions d'application. Le nombre d'assiettes qui peuvent être utilisées est limité, pour des raisons économiques. De plus, les isolateurs requièrent toujours des opérations de nettoyages.

### **I.12.2. Utilisation des isolateurs composites**

SIR (Silicon Rubber), type d'isolateurs composites ayant des performances supérieures, en présence de la pollution, par rapport aux isolateurs en verre ou en céramique. Ces isolateurs ont été adoptés pour remplacer une gamme importante des isolateurs en céramique ; cette substitution a lieu généralement dans les zones classées à pollution modérée et lourde [61].

### **I.12.3. Nettoyage de l'isolateur**

Le nettoyage manuel des isolateurs est un moyen très efficace pour éliminer la pollution de la surface de l'isolateur. Cependant, cela nécessite une dépense importante, vu que ces isolateurs doivent être nettoyés, deux fois par an dans une zone classée à conditions de pollution modérées, quatre fois dans une zone classée à conditions de pollution lourdes. En outre, quelques types de pollution ne peuvent pas être nettoyés tels que le ciment. Le rinçage avec de l'eau est une autre manière de nettoyage. L'idéal, c'est de procéder au nettoyage avant d'atteindre le niveau de contamination critique. Comme il n'y a pas un moyen pour déterminer le niveau de contamination d'une manière exacte, la période d'occurrence du contournement permet d'estimer la fréquence du nettoyage.

### **I.12.4. L'huile et la graisse de Silicone**

Ces deux substances permettent d'absorber la pollution et par suite de prévenir le contournement. Ils réduisent la tendance des gouttelettes d'eau à former un film. Quand une grande quantité de pollution est absorbée par la couche de ces substances, ces dernières perdent leur mobilité et par la suite leur performance à prévenir le contournement. Cependant, le grand problème avec ces deux substances, est leur courte durée de vie, qui varie généralement de 6 mois à 2 ans.

### **I.12.5. Couche RTV**

Le recouvrement RTV en Silicone Rubber a connu un grand succès dès sa première utilisation en 1986 avec un produit expérimental et à grande échelle d'application en 1991 avec des produits commerciaux [62]. Quelques problèmes ont été signalés durant la première génération de recouvrement, tels que la faible adhésion à la surface de l'isolateur, la faible résistance à l'érosion et la complexité de la procédure d'application. Ces problèmes ont été corrigés à la deuxième et à la troisième génération. Le recouvrement RTV a été adopté dans différentes zones de contamination comme un moyen principal de prévention du contournement.

---

## *Chapitre II : Technique d'Ondelettes*

---



## II.1. Historique

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

Dans ce contexte, les transformations linéaires ont toujours joué un très grand rôle, et parmi ces dernières, la plus célèbre et la plus anciennement étudiée est la transformation de Fourier (1822). Cette transformation permet, comme chacun sait, d'explorer la composition fréquentielle du signal et, par ses propriétés, de lui appliquer facilement des opérateurs de filtrage. Lors de cette transformation, le signal est décomposé sur un ensemble de signaux de « base » qui sont cosinus et sinus ou l'exponentielle imaginaire, mais, très tôt dans l'histoire du traitement du signal, il est apparu que la décomposition obtenue n'était pas toujours la plus satisfaisante et la première transformation en ondelettes (le nom n'était pas encore utilisé) est proposée par Haar en 1910 ; il serait plus judicieux de parler alors de « paléo-ondelette ».

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

Les précurseurs conscients de cette technique ont été des mathématiciens (Calderon 1964), des physiciens (Aslaken et Klauder en 1968, Paul en 1985), et surtout des ingénieurs comme Esteban et Galand (1977), Smith et Barnwell (1986), Vetterli (1986) ; nous pourrions parler dans leur cas de « pré-ondelette », Mais le premier à avoir utilisé la méthode et le premier à avoir proposé le nom d'ondelettes fut Jean Morlet (1983). Le problème traité par Morlet était celui de l'analyse de données issues de sondages sismiques effectués pour des recherches géologiques ; ces données, faites de nombreux transitoires, sont particulièrement adaptées à une technique d'analyse conservant la notion de localisation de l'événement tout en fournissant une information sur son contenu fréquentiel ce qui est tout l'intérêt de ce type de transformation. Les résultats obtenus par Morlet et formalisés par le physicien Alex Grossmann ont rapidement éveillé l'attention de nombreux chercheurs et bientôt des bases mathématiques solides ont été mises en place faisant apparaître la notion de base orthogonale (Y.Meyer 1985), d'analyse multi résolution (S.Mallat 1989) [63].

## II.2. Introduction

La plupart des signaux du monde réel ne sont pas stationnaires, et c'est justement dans l'évolution de leurs caractéristiques (statistiques, fréquentielles, temporelles, spatiales) que réside l'essentiel de l'information qu'ils contiennent. Or l'analyse de Fourier propose une approche globale du signal, les intégrations sont faites de moins l'infini à plus l'infini, et toute notion de localisation temporelle (ou spatiale pour les images) disparaît dans l'espace de Fourier ; il faut donc trouver un compromis, une transformation qui nous renseigne sur le contenu fréquentiel tout en préservant la localisation afin d'obtenir une représentation temps/fréquence ou espace/échelle du signal [63].

## II.3. Transformé en Ondelettes Continue

### II.3.1 Définition [64-65]

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

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (\text{II.1})$$

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

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{II.2})$$

Parmi une grande famille des ondelettes, on trouve:

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

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

### II.3.2. EXEMPLE DE L'ONDELETTE DE MORLET (COMPLEXE)

$$\psi(x) = e^{-\pi x^2} e^{10i\pi x} \quad (\text{II.3})$$

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

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} e^{-\pi\left(\frac{x-b}{a}\right)^2} e^{10i\pi\left(\frac{x-b}{a}\right)} \quad (\text{II.4})$$

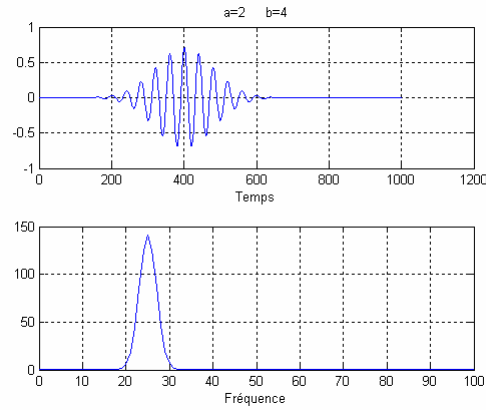


Figure II.1 Représentation de l'ondelette de Morlet pour  $a=2$  et  $b=4$ .

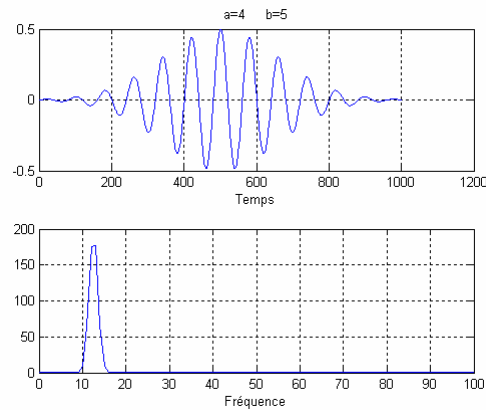


Figure II.2 Représentation de l'ondelette de Morlet pour  $a=4$  et  $b=5$ .

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

$$Wf(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi * \left(\frac{t-b}{a}\right) dt \tag{II.5}$$

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

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 |\psi(x)|^2 dx \tag{II.6}$$

$$\sigma_t^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} t^2 |\psi_{a,b}(t)|^2 dt \tag{II.7}$$

$$\sigma_\omega^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \omega^2 |\hat{\psi}_{a,b}(\omega)|^2 d\omega \tag{II.8}$$

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

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

Sous la condition :

$$C_\psi = \int_0^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \quad (\text{II.9})$$

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

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

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

$$Wf(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_{a,b}^*(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega) \hat{\psi}_{a,b}(\omega) d\omega \quad (\text{II.7})$$

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

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

$$\hat{\psi}_{a,b}(\omega) = e^{-jb\omega} \sqrt{a} \hat{\psi}(a\omega) \quad (\text{II.8})$$

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

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

La diffusion de temps et de fréquence est respectivement proportionnelle à ' $b$ ' et à ' $1/a$ '. Quand ' $a$ ' change, la longueur et la largeur du rectangle changent mais sa surface reste toujours constante, comme illustré par la figure II.3. [67]

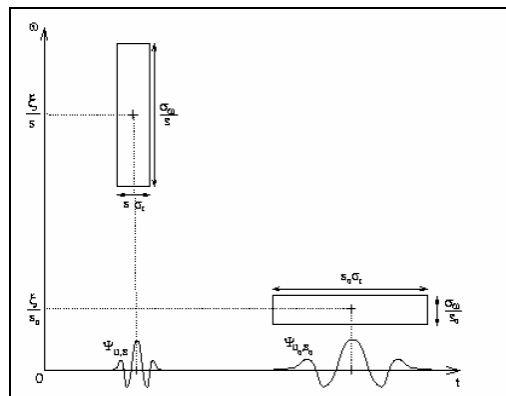


Figure II.3. Boîtes Temps-fréquence des deux ondelettes  $\psi_{u,s}$  et  $\psi_{u_0,s_0}$  quand l'échelle ' $a$ ' diminue, le support du temps est réduit mais la diffusion de fréquence augmente et couvre un intervalle qui est décalé vers des hautes fréquences.

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

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

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

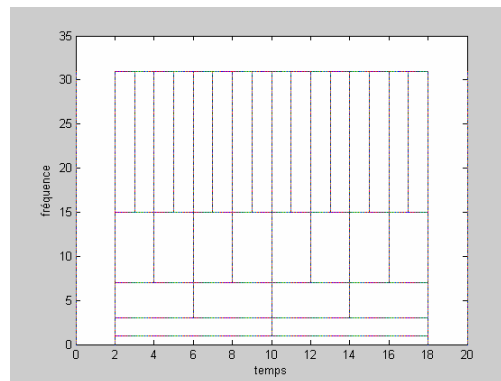


Figure II.4 Pavage temps-fréquence pour la transformée en ondelettes (illustration du fait que le produit de la résolution temporelle par la résolution fréquentielle est constant).

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

---

***Chapitre III***  
***Décomposition du Courant de Fuite et***  
***Modélisation***

---

### III.1. Introduction à la corrélation

Le résultat de la décharge implique la survenance d'un événement spécifique. L'apparition de l'effet couronne est un signe de début de la réduction d'hydrophobie. La survenance d'arcs locaux indique que l'état hydrophobe de la surface des isolateurs a changé et qu'elle a été soumise à des chocs thermiques durs [68]. Lopes et al [69] proposent une méthode pour surveiller la réduction de l'hydrophobie d'un isolateur en polymère, en se référant aux décharges partielles détectées par le système de mesure de décharge partielle.

L'onde sinusoïdale est temporairement observée avant la survenance des arcs aux bornes des bandes sèches et est constamment observée lorsque l'épaisseur, l'humidité, la conductivité de la couche de contamination se situent dans une fourchette insuffisante pour provoquer l'évaporation de l'électrolyte présent dans la couche. Le courant de fuite, composé d'une onde sinusoïdale avec un retard appelé « **Time Lag to Onset** » dans le temps, est attribué aux arcs locaux ; ceci nous informe que la surface des isolateurs est soumise à la présence d'arcs des bandes sèches, accompagnée par l'évaporation de la solution électrolytique. Une série de formes d'onde sinusoïdale implique la présence d'un dépôt humide et d'une épaisse couche non soluble à une certaine conductivité. Un isolateur, dans cet état, est sujet au phénomène de contournement et nécessite des traitements adéquats, tels que le lavage pour prévenir tout risque de contournement. Dans une transition, d'une surface hydrophobe à une surface hydrophile, la surface de l'isolateur est en partie recouverte de petites gouttelettes sous forme de demi-cercle et en partie couverte avec un film de cette solution ; par suite, la forme du courant devient distordue. L'effet couronne implique un assèchement non décelable entre les gouttelettes, la formation de bandes sèches se produit entre les gouttelettes déformées. Le courant pulsionnel qui résulte de l'effet couronne est superposé aux pics (autour des phases suivantes  $\pi/4 - 3\pi/4$  ou  $5\pi/4 - 7\pi/4$ ) du courant de forme sinusoïdale : c'est la composante transitoire [68].

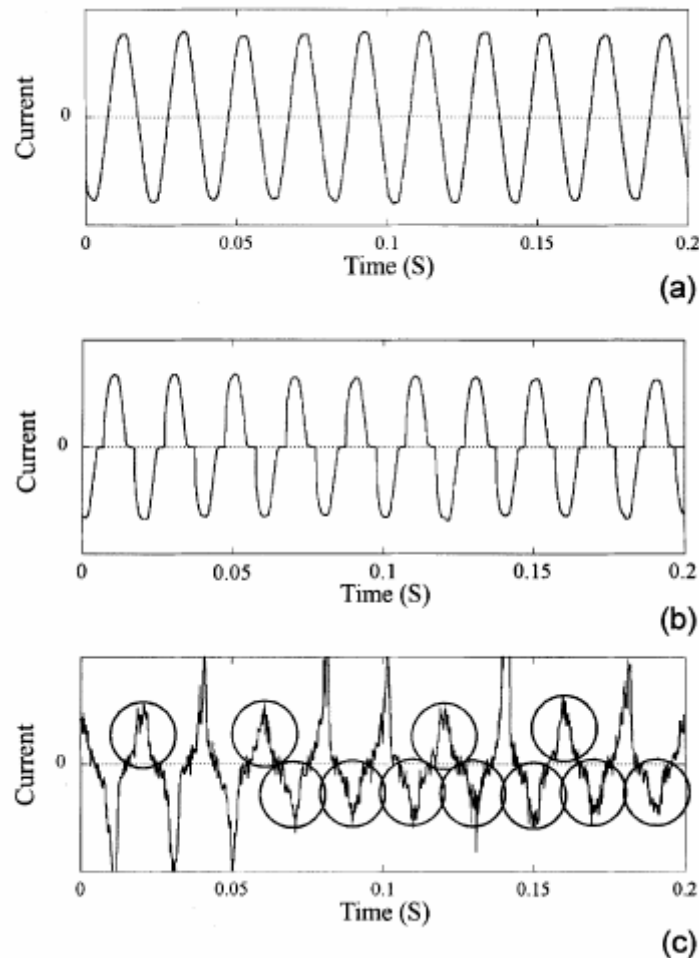


Figure III.1. Formes d'onde typique des composantes sinusoïdales, d'arcs locaux, et de transition : (a), composante sinusoïdale ; (b), composante d'arc local, (c), composante de transition (les portions encerclées appartiennent à la composante d'arc local).

### III.2. Présentation des différentes composantes

Le courant de fuite parcourant la surface de l'isolateur en raison de la contamination de la surface est caractérisé par des demi-ondes. Chaque demi-onde est assignée à l'un des trois types d'ondes ; à savoir sinusoïdale, arc local, ou composante transitoire ; chacune des formes d'onde est représentée dans la figure III.1. La composante sinusoïdale du courant à travers un électrolyte, ne provoque pas de chocs thermiques à la surface de l'isolateur. La composante d'arc local est quasi sinusoïdale ou quasi triangulaire avec un certain retard à l'apparition de courants à la phase  $0 \sim \pi/4$  ou  $\pi \sim 5\pi/4$  causée par les arcs de bande sèche, ce retard est dû d'une part, à la tension seuil d'apparition des décharges, le courant de décharge n'a lieu qu'à partir d'un certain niveau de tension, d'autre part, ce temps représente le temps à l'ionisation de l'air situé sur la zone sèche.

La composante transitoire est entre la composante sinusoïdale et d'arc local, affichant une forme d'onde quasi triangulaire. Le changement, de la forme d'onde sinusoïdale vers la forme d'onde triangulaire, est associé à une augmentation du facteur de distorsion produisant de nombreux harmoniques impairs [70, 71].



### III.3. Utilisation de la technique d'ondelette

La décomposition du courant de fuite en demi-ondes se fait après détermination des points de passage par zéro du courant fondamental, d'où l'importance de l'étude temps-fréquence du signal ; de plus, l'information temps-fréquence du courant de fuite est nécessaire pour calculer le taux de distorsion de chaque demi-onde, ce qui permet la différenciation entre les composantes sinusoïdales et celles transitoires.

Dans cette étude, un niveau de distorsion est défini en utilisant le fondamental et le troisième harmonique du courant de fuite ( $I_{150\text{ Hz}}/I_{50\text{ Hz}}$ ). Dans ce postulat, le courant de fuite sur la surface d'un isolateur contaminé est séparé en trois composantes : sinusoïdale, arc local, et composante transitoire et cela en se basant sur le calcul de la durée du retard et le taux de distorsion du courant. La technique de la transformée en ondelettes permet simultanément de faire passer le courant de fuite au domaine temps-fréquence et de détecter les points de passage par zéro du fondamental du courant.

La transformée en ondelettes de  $x(t)$  est obtenue par le calcul des coefficients de la transformée en ondelette  $W(a,b)$  :

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (\text{III.1})$$

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (\text{III.2})$$

Où  $x(t)$  est le signal dans le domaine temporel (courant de fuite),  $\psi_{a,b}(t)$  et  $\psi_{a,b}^*(t)$  sont l'ondelette mère complexe et sa conjuguée, 'a' et 'b' sont l'échelle et le décalage correspondant à la fréquence et au temps, respectivement.

L'ondelette mère choisie devrait être une fonction de décomposition oscillation. La Gaussienne (fonction Gabor) décrite en (III.3) est employée comme ondelette mère parce qu'elle a une fenêtre optimale pour le temps de localisation et est en accord avec la fonction utilisée dans la transformée de Fourier [72,73].

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} (e^{j\omega t} - e^{-\frac{\omega^2}{2}}) \quad (\text{III.3})$$

Venkataraman et al [74] ont appliqué l'ondelette de Daubechies-4 pour détecter les changements d'état des isolateurs en polymère, ce qui permet une prédiction de la défaillance des matériaux.

Le module et la phase du complexe  $W(a,b)$  nous donnent les informations temps-fréquence sur le signal source. L'échelle 'a' et le décalage 'b' correspondent à la fréquence et au temps, respectivement.

L'échelle 'a' est fonction de la fréquence :

$$a = \frac{f_c}{f\Delta t} \quad (\text{III.4})$$

$$f_c = \int_{-\infty}^{+\infty} f |\hat{\psi}(\omega)|^2 d\omega \quad (\text{III.5})$$

Où :

$f_c$  : est la fréquence centrale (pour la fonction choisie elle vaut 0.5).

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

Le module du complexe  $W(a,b)$  indique l'intensité de localisation du signal en question, à la fréquence correspondante à l'échelle 'a', comme une fonction du temps représentée par le paramètre 'b'. La phase du signal, à la fréquence  $f_a$ , est fournie par la phase du complexe  $W(a,b)$ .

**Exemple :**

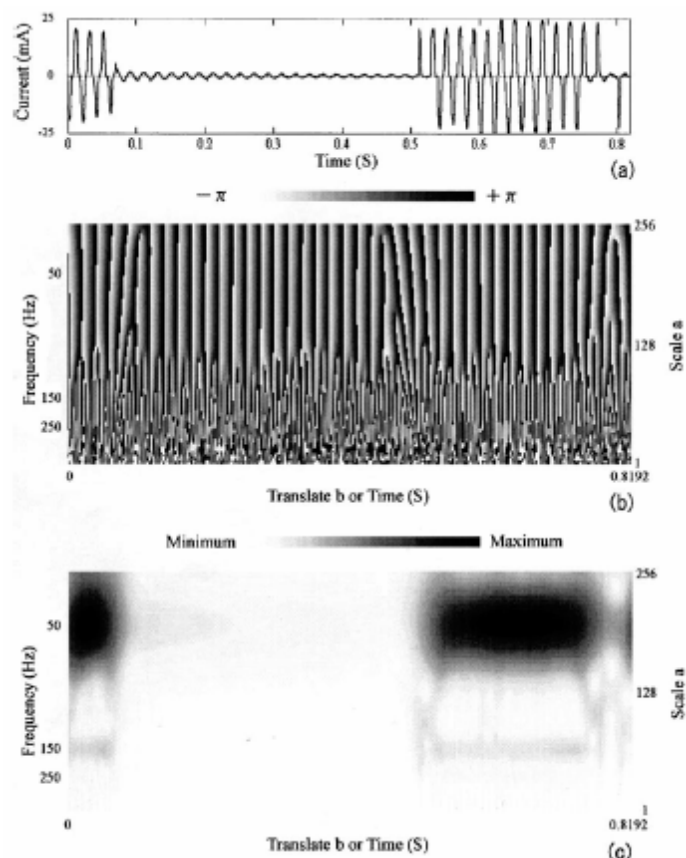


Figure III.2. Résultats de l'ondelette sur le signal d'un courant de fuite (a) courant de fuite ; (b) phase ; (c) module.

Il est clairement observable, par la présence des bandes sombres dans les figures III.2.b et III.2.c, que le courant de fuite est composé de demi ondes de 50 Hz. Le module de

$W(a,b)$  pour le quel 'a' est fixé à 50 Hz et le module de 150 Hz indiquent l'intensité du courant localisé à 50Hz ( $I_{50\text{Hz}}$ ) et à 150Hz ( $I_{150\text{Hz}}$ ), respectivement.

### III.4. Assignment des différentes demi-ondes

Un algorithme est nécessaire afin d'attribuer chaque-demi onde à l'une des composantes sinusoïdale, arc local et transitoire. Les composantes d'arc local présentent un décalage dans le temps d'apparition du courant, à la phase  $0 \sim \pi/4$  ou  $\pi \sim 5\pi/4$ . L'effet couronne apparaissant dans la composante transitoire du courant se superpose sur les sommets de l'onde sinusoïdale (autour des phases  $\pi/4 - 3\pi/4$  ou  $5\pi/4 - 7\pi/4$ ) produisant une forme d'onde triangulaire avec une augmentation du facteur de distorsion.

L'assignment des composantes à l'onde sinusoïdale ou transitoire est basée sur le calcul du taux de distorsion ( $I_{150\text{Hz}}/I_{50\text{Hz}}$ ) des demi-ondes, tandis que pour la composante d'arc local, elle se fait par le calcul du retard d'apparition (**Time Lag to Onset**).

#### III.4.1. Assignment de la composante d'arc local

L'existence du décalage, dans le temps d'apparition du courant à la phase  $0 \sim \pi/4$  ou  $\pi \sim 5\pi/4$ , est examinée au moyen des informations supplémentaires présentées dans la figure suivante où  $x(t)$  est le courant enregistré, qui a été séparé en une demi-onde en utilisant une transformée en ondelette, et  $y(t)$  est une onde sinusoïdale dont la valeur moyenne est égale à celle de  $x(t)$ . Le temps de retard du courant est désigné par le 'time Lag to Onset'  $t_{\text{to onset}}$ . Les intégrations temporelles des valeurs de  $x(t)$  et  $y(t)$  de 0 à  $t_{\text{to onset}}$  sont notées respectivement  $S_{\text{lag}}$  et  $S_{\text{sin}}$ . Si  $S_{\text{lag}}$  et  $S_{\text{sin}}$  satisfont l'inégalité III.6 :

$$S_{\text{lag}} \leq \eta_{\text{arc}} S_{\text{sin}} \quad (\text{III.6})$$

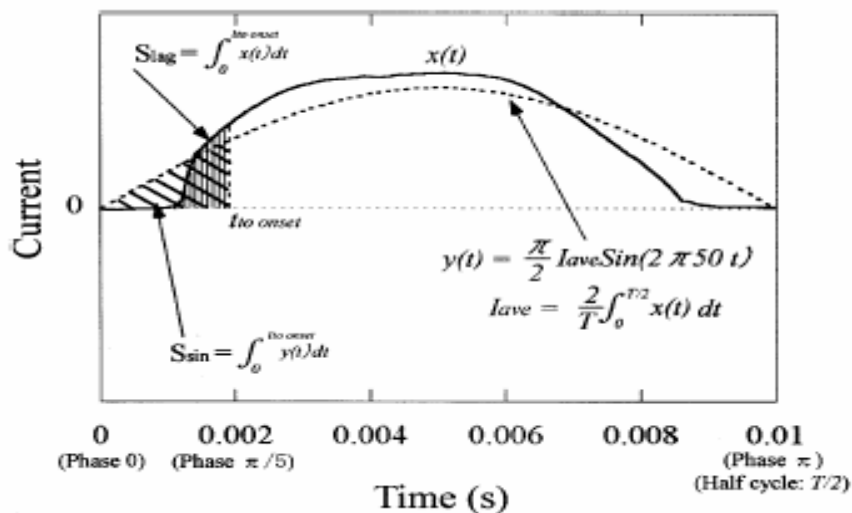


Figure III.3. Représentation des paramètres  $S_{\text{lag}}$  et  $S_{\text{sin}}$ .

Où  $\eta_{\text{arc}}$  est un coefficient d'ajustement allant de 0 à 1. La détermination de  $t_{\text{to onset}}$  et  $\eta_{\text{arc}}$  exige des essais sur des données de forme d'ondes réelles substantielles de manière à satisfaire le postulat décrit. Dans cette étude nous avons pris  $\eta_{\text{arc}}=0,2$  ;  $t_{\text{to onset}}=1\text{ms}$ .

### III.4.2. Assignment des composantes transitoires et sinusoïdales

La demi-onde qui n'a pas été affectée à un arc local, est affectée soit à une composante transitoire soit à une composante sinusoïdale après calcul du facteur de distorsion. Le module de  $W(a,b)$  dans le cas où l'échelle est fixée à 50 Hz puis à 150 Hz indique l'intensité du courant localisé à 50 Hz ( $I_{50Hz}$ ) et 150 Hz ( $I_{150Hz}$ ), respectivement. Le module de  $W(a \rightarrow 50Hz, t) (= I_{50 Hz})$  et le module de  $W(a \rightarrow 150Hz, t) (= I_{150Hz})$  ne sont pas constants et sont variables dans la demi-onde.

Ainsi, le taux de distorsion ( $L_{distortion}$ ) de la demi-onde est défini à l'aide de la moyenne temporelle des valeurs de  $W(a \rightarrow 50Hz, t)$  et  $W(a \rightarrow 150Hz, t)$  comme décrit dans l'équation (III.7) :

$$L_{distortion} = \frac{\frac{1}{(T/2)} \int_0^{T/2} W(a \rightarrow 150Hz, t) dt}{\frac{1}{(T/2)} \int_0^{T/2} W(a \rightarrow 50Hz, t) dt} \quad (III.7)$$

Où  $T/2$  est la demi période du fondamental du courant (50 Hz), qui est égale à 10 ms. Si le niveau de distorsion de la demi-onde satisfait l'inégalité (III.8), elle est assignée à la composante sinusoïdale, sinon, la demi-onde est assignée à la composante transitoire,

$$L_{distortion} < \eta_{sin-triangle} L_{sin-triangle} \quad (III.8)$$

Où  $\eta_{sin-triangle}$  est un coefficient d'ajustement allant de 0 à 1, et il est déterminé tout au long des essais en utilisant les données d'onde réelles. Dans cette étude il est choisi égal à 1.

### III.4.3. Validation de la procédure de décomposition du courant de fuite

La validation de cette procédure, est faite après un certain nombre d'essais préliminaires, qui nous ont permis de définir les paramètres de l'algorithme de décomposition, ( $\eta_{sin-triangle}$ ,  $\eta_{sin-triangle}$ , Time Lag to Onset). Les signaux sont enregistrés au moment des arcs locaux pour dimensionner les paramètres relatifs à la composante d'arc local. Les signaux enregistrés au moment d'application de la tension et ceux juste avant l'occurrence des arcs locaux définissent les paramètres relatifs à la composante transitoire et qui font la différence entre la composante sinusoïdale et celle transitoire. La figure suivante (Figure III.4) présente une série de signaux typiques attribués par demi onde à l'une des trois composantes.

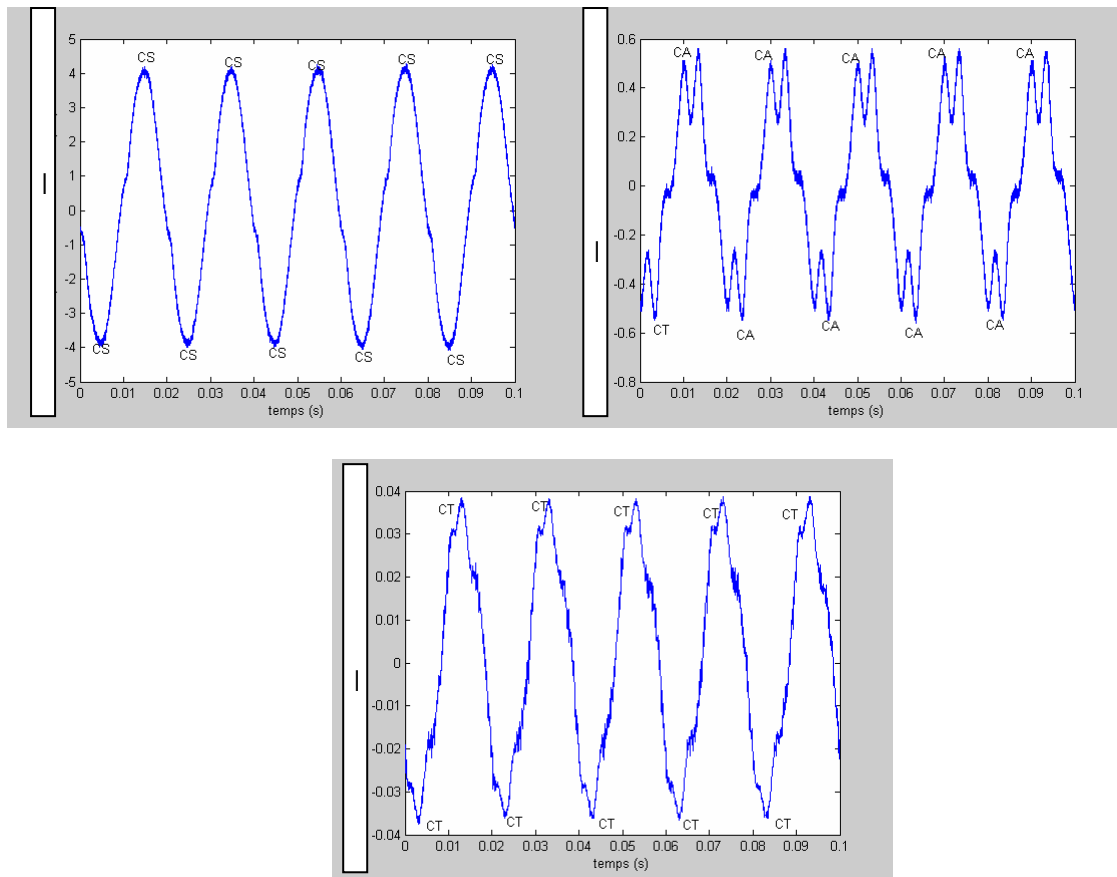


Figure III.4. Signaux de courant de fuite attribués par demi-ondes à l'une des trois composantes (CA : arc local, CS sinusoïdale, CT : transitoire)

### III.5. Modélisation géométrique (élaboration d'un modèle de laboratoire)

#### III.5.1. Introduction

L'étude des isolateurs peut se faire de manières différentes (essais sur site, essais en laboratoire, simulations...). L'une de ces méthodes est la méthode s'appuyant sur les essais en laboratoire. Cette méthode permet de se focaliser sur un aspect précis de l'isolateur ; elle permet aussi d'éliminer des paramètres qui pourraient influencer l'étude. Ces essais nous informent sur les caractéristiques principales de l'isolateur ainsi que sur ses propriétés physiques et chimiques (Hydrophobie, température de choc thermique). Mais les résultats sont souvent difficiles à traiter et cela à cause de la complexité du système (forme de l'isolateur, complexité de sa géométrie).

Pour faire face aux problèmes causés par la géométrie des isolateurs ainsi que leur encombrement et afin de mieux étudier le comportement des isolateurs, différents modèles de laboratoire ont été proposés dans la littérature. En effet, les isolateurs réels sont souvent remplacés par des modèles de géométrie simple. Dans ces modèles, les formes complexes des isolateurs sont représentées par des rectangles équivalents et la ligne de fuite de l'isolateur par la longueur inter-électrodes. Même si ces isolateurs ne reflètent pas exactement le comportement des isolateurs réels, ils permettent tout de même une meilleure visualisation du phénomène des décharges électriques. Cela revient à remplacer l'isolateur par un modèle qui a des caractéristiques similaires aux siennes. Le modèle est valable dans des conditions particulières ; il varie suivant l'objectif de l'étude.

Le but de ce chapitre est de concevoir et réaliser un modèle expérimental qui tient compte de la forme géométrique de l'isolateur et dont les résultats obtenus seront comparés à ceux obtenus sur un isolateur réel (tension de contournement et courant de fuite).

#### III.5.2. Principaux modèles précédemment proposés

Il existe un grand nombre de modèles de laboratoire qui sont proposés pour simuler le comportement de l'isolateur réel dans certaines conditions :

##### a) Modèle du disque circulaire

Woodson et McElroy [75] ont utilisé la géométrie de la figure III.4. Ils expriment la résistance de la surface humide polluée du disque isolant en ne tenant pas compte de l'effet de la longueur de l'arc, le résultat peut être écrit comme suit :

$$R_p = \frac{const}{\gamma_s} (r_0 - r_a)^m \quad (III.9)$$

Où 'const' et 'm' sont déterminés expérimentalement, et valent  $1.6 \times 10^{-2}$  et 1.4, respectivement.

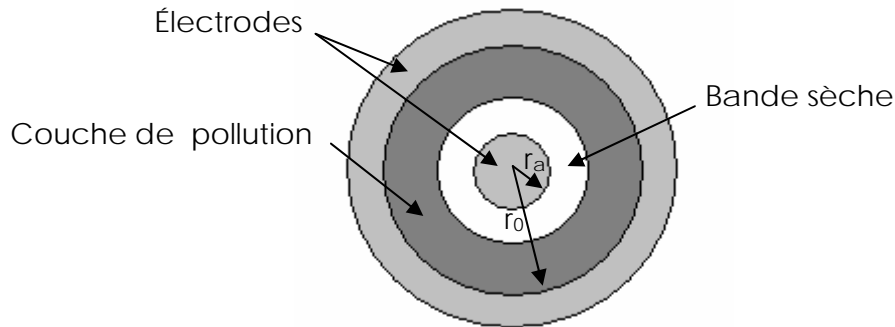


Figure III.5. Disque isolant comme modèle étudié par McElroy [1].

### b) Modèle de Wilkins

Nàcke fut le premier à avoir étudié l'effet de la concentration du courant, au niveau du centre de l'arc, sur la résistance d'une couche conductrice humide [76]. En supposant que la forme de la décharge (l'arc) est circulaire, comme le montre la figure III.5. Le calcul de la résistance  $R$  de la surface polluée, entre chaque bord de la décharge, et son électrode, devient un problème de calcul de champs bidimensionnel qui peut être résolu en utilisant la théorie des fonctions conjuguées. Les relations qui donnent la résistance de la pollution sont composées de deux parties, une interne, en raison des deux demi-cercles, et une résistance externe entre les deux demi-cercles, représentant les limites extérieures de l'arc (début, bout de l'arc).

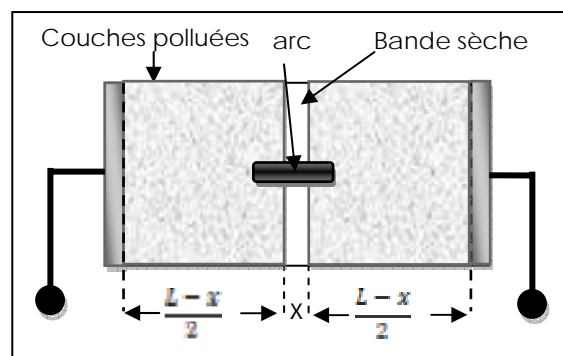


Figure III.6. Le modèle de Wilkins de contournement [77]

Cette solution a été développée par Wilkins qui a obtenu deux cas intéressants [77]:

- Cas de petite bande, où la largeur de la couche résistive (polluante) est inférieure à sa longueur. Pour ce cas, la résistance série est donnée par :

$$R_p = \frac{1}{\pi\gamma_s} \left( \frac{\pi(L-x)}{w} - \log\left(\frac{w}{2\pi r}\right) \right) \quad (\text{III.10})$$

Où ' $r$ ' est le rayon de la décharge et  $w$  est la largeur de la bande de pollution supposée être constante.

- Cas de bande large, où la largeur de la couche résistive (polluante) est supérieure à trois fois sa longueur. Pour ce cas :

$$R_p = \frac{1}{\pi\gamma_s} \left( \log\left(\frac{2L}{\pi r}\right) - \log\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \right) \quad (\text{III.11})$$

Pour calculer  $r$ , Wilkins a défini les relations entre l'arc et son rayon par:

$$k = \frac{I_{arc}}{\pi r^2} \quad (\text{III.12})$$

Où  $k$  est une constante [70].

### c) Modèle avion de Zhicheng

Pour modéliser un isolateur capot et tige, Zhicheng et Renyu [78] ont remplacé l'isolateur à capot et tige par le modèle représenté dans la figure III.6.

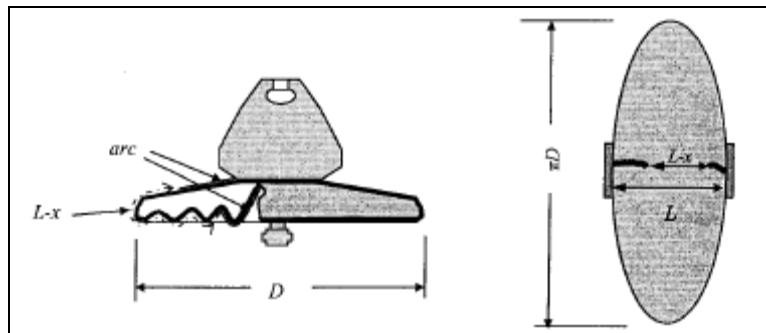


Figure III.7. Isolateur capot tige et son modèle (modèle avion) [78].

Bien que le modèle plan obtenu soit large, la résistance de la couche polluée entre les deux électrodes peut être exprimée comme la résistance entre deux petites électrodes circulaires. Ainsi, l'expression suivante pour la résistance de la couche polluée a été obtenue :

$$R_p = \frac{1}{\pi \gamma_s} \ln\left(\frac{L-x}{r}\right) \quad (\text{III.13})$$

### d) Impédance des bandes sèches et polluées

La géométrie illustrée à la figure III.8. a été utilisée par le Pr. Mekhaldi et al. Pour arriver à un Modèle semi-empirique [79] :



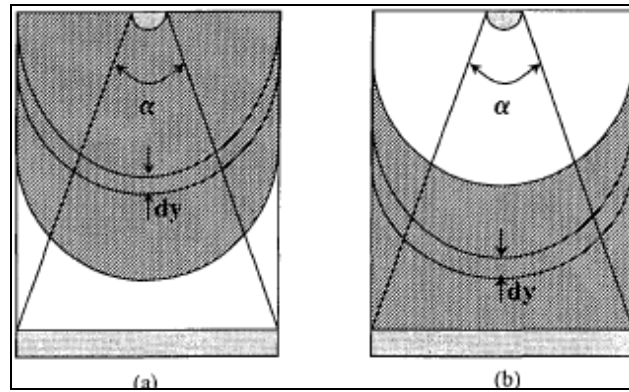


Figure III.8. Modèle plan couche de la pollution, (a) côté haute tension et (b) côté terre [79].

On a supposé que la surface de l'isolant est composée d'une bande sèche en série avec une bande polluée. La bande polluée est située soit près de l'électrode haute tension ou près de l'électrode de terre. L'impédance de la bande sèche a été exprimée par la relation empirique suivante :

$$Z_d = Z_{od} \left( \frac{L-y}{L} \right)^{0.42} \quad (\text{III.14})$$

Où  $y$  est la longueur de la bande polluée,  $L$  est la longueur totale de la plaque, et  $Z_{od}$  est l'impédance mesurée de l'assiette propre.

Afin de simplifier le modèle, l'impédance de la bande polluée était supposée être purement résistive et donc la relation suivante, pour la résistance de la bande polluée, a été obtenue :

$$R_p = \frac{k_t}{\gamma_s} \log \left[ \frac{R+y}{R} \right] \quad (\text{III.15})$$

Avec,  $R$  est le rayon de l'électrode haute tension,  $\gamma_s$  est la conductivité de surface, et  $k_t$  est une constante.

L'impédance équivalente  $Z_t$ , entre les électrodes peut ensuite être exprimée comme suit:

$$Z_t(y) = Z_d(y) + R_{p(y)} \quad (\text{III.16})$$

Pour  $L = 40$  cm et  $R = 2,5$  mm,  $k_t$  a été trouvée expérimentalement égale à  $8.26 \times 10^8$  [79].

### III.5.3. Description du modèle proposé

L'isolateur « 15 12L » a la forme représentée dans la figure III.8 ; il présente un axe de révolution, il est donc symétrique. Il est composé d'un capot, d'une tige et d'une assiette de verre présentant des nervures.

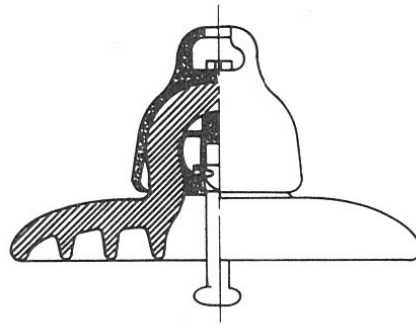


Figure III.9. Isolateur réel de type (15 12L)

Si on le déploie suivant son axe de révolution, on voit qu'il peut être représenté par un cercle central représentant l'électrode haute tension (le conducteur haute tension ou la tige) et une couronne circulaire représentant le capot. Ce qui nous donne le modèle circulaire de McElroy [2].

Supposons maintenant que l'on prenne un quart de ce modèle, la probabilité que la décharge ait lieu dans l'une des quatre parties de ce modèle est égale à celle des trois parties restantes. Donc, il est possible de simplifier notre modèle en un quart de cercle de diamètre  $r_e$  distant d'une certaine distance  $L$ , d'un quart de couronne de cercle de rayon interne  $R_i$  et de rayon externe  $R_e$ . Tel que :

$$L = R_i - r_e \quad (\text{III.17})$$

Les grandeurs  $R_i$ ,  $R_e$  et  $r_e$  sont tirées expérimentalement, par mesure des dimensions de l'isolateur réel.

Le modèle aura la forme représentée dans la figure III.9 :

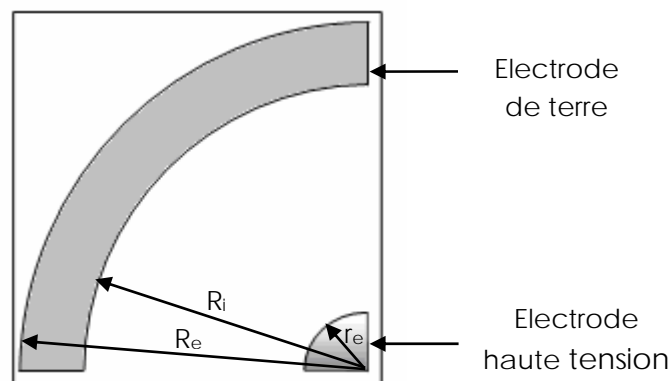


Figure III.10. Forme générale du modèle et grandeurs principales.

### III.5.4. Dimensionnement du modèle

#### a) Pour l'étude du contournement

Le modèle variera selon la sévérité de la pollution. On peut représenter l'isolateur réel par deux modèles selon la conductivité de la couche polluante.

Le modèle a pour grandeurs (tirées des dimensions de l'isolateur):

$$R_{ic} = R_{ic} \quad (\text{III.18})$$

$$R_{ec} = R_{ec} \quad (\text{III.19})$$

$$r_{ec} = r_e \quad (\text{III.20})$$

$R_{ic}$  est le diamètre interne de l'électrode de terre dans le modèle de contournement.

$R_{ec}$  est le diamètre externe de l'électrode de terre dans le modèle de contournement.

$r_{ec}$  rayon de l'électrode haute tension dans le modèle de contournement.

#### a.1) Modèle pour le contournement pour de faibles conductivités

Lorsque la conductivité de la couche de pollution est faible, le modèle a pour dimensions les grandeurs suivantes représentées dans la figure III.10:

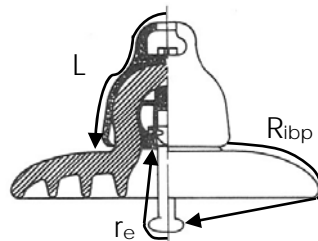


Figure III.11. Grandeurs du modèle dans le cas sec ou pour les faibles conductivités.

Les grandeurs du modèle sont comme suit :

$$R_{ic} = R_{ibp} + r_e \quad (\text{III.21})$$

$$R_{ec} = R_{ic} + L \quad (\text{III.22})$$

$$r_{ec} = r_e \quad (\text{III.23})$$

$$L_c = L \quad (\text{III.24})$$

Avec :

$R_{ibp}$  est la distance capot tige pour une pollution de faible conductivité.

$R_{ic}$  est le diamètre interne de l'électrode de terre dans le modèle de contournement.

$R_{ec}$  est le diamètre externe de l'électrode de terre dans le modèle de contournement.

$L_c$  est la largeur de l'électrode de terre.

$r_{ec}$  rayon de l'électrode haute tension dans le modèle de contournement.

### a.2) Modèle pour le contournement pour des conductivités élevées

Dans le cas où la surface est polluée par une pollution de conductivité élevée les dimensions du modèle sont les même pour  $r_{ec}$  et  $L$  la largeur de l'électrode de terre. Mais  $R_{ic}$  le rayon intérieur de l'électrode de terre, change, comme illustré dans la figure suivante :

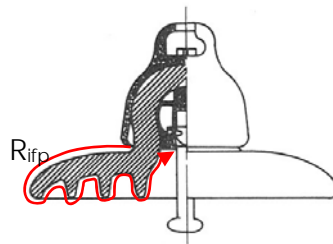


Figure III.12. Longueurs de fuite dans le cas pollué.

La valeur du rayon interne, du rayon externe et la largeur de l'électrode de terre sont comme suit :

$$R_{ic} = \frac{R_{ibp} + R_{ifp}}{2} + r_e \quad (\text{III.25})$$

$$R_{ec} = R_{ic} + L \quad (\text{III.26})$$

$$L_c = L \quad (\text{III.27})$$

Où :

$R_{ibp}$  est la distance entre le capot et la tige de l'isolateur réel (Figure III.10) pour une pollution de faible conductivité.

$R_{ifp}$  est la distance entre le capot et la tige de l'isolateur réel (Figure III.11) pour une pollution de forte conductivité.

$R_{ic}$  est le diamètre interne de l'électrode de terre dans le modèle de contournement.

$R_{ec}$  est le diamètre externe de l'électrode de terre dans le modèle de contournement.

$L_c$  est la largeur de l'électrode de terre.

$r_{ec}$  est le rayon de l'électrode haute tension dans le modèle de contournement et égal au rayon de l'électrode pour les faibles conductivités.

**b) Modèle pour la mesure du courant de fuite**

Pour ce modèle, les dimensions sont fixes pour les différentes conductivités. La forme du modèle est la même que pour le modèle de contournement. Les différentes grandeurs sont comme suit :

$$R_t = R_{if} = R_{ifp} + r_e \quad (\text{III.28})$$

$$L_f = L \quad (\text{III.29})$$

$$R_e = R_{ef} = R_{if} + L \quad (\text{III.30})$$

$$r_{ef} = r_e \quad (\text{III.31})$$

Cela s'explique par la présence d'une couche de pollution (plus ou moins conductrice) sur l'assiette de l'isolateur, ce qui modifie le chemin emprunté par le courant de fuite.

---

# Chapitre IV :

## Techniques Expérimentales et Résultats d'Essais

---

## Introduction

Nous nous proposons, dans un premier temps, d'étudier l'évolution du courant de fuite circulant à travers une couche de pollution d'un isolateur réel. Ceci se fera pour différentes conductivités de la couche polluante afin de corrélérer l'état de surface de l'isolateur avec le courant de fuite (forme, amplitude et déphasage), la corrélation est faite en se basant sur l'analyse du courant de fuite ce qui peut permettre le contrôle et la supervision, en temps réel, des isolateurs pour prévoir les cycles de nettoyage et le remplacement des isolateurs.

L'algorithme permettant cette analyse est écrit sous MATLAB®, et repose sur la transformée en ondelettes ; il sert à décomposer le signal récolté et à le traduire en terme d'état de pollution.

Les essais sont effectués au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (ENP) sur un modèle d'isolateur de ligne standard.

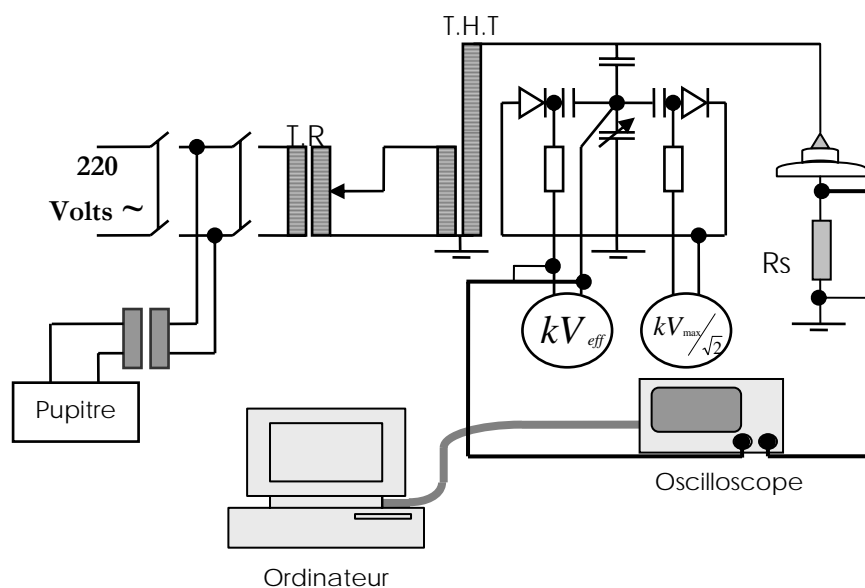
## IV.1. Dispositif expérimental

### IV.1.1. Circuit d'essai du laboratoire de l'ENP

La station d'essai du laboratoire de haute tension de l'ENP est de marque « HAEFELY ». Elle contient :

- Un transformateur d'essai : 500V/300 kV, 50 kVA.
- Un transformateur de réglage : 220V/ (0 à 500) V, 50 kVA.
- Un diviseur capacitif de tension :  $C1= 400$  pF.
- Un pupitre de commande.
- Des appareils annexes de mesure et de protection.
- Un oscilloscope numérique de fréquence d'échantillonnage de 500 MHz "TEKTRONIX".

Le circuit d'essai est représenté dans la figure (IV.1).



**Figure IV.1 :** Circuit d'essai.

### IV.1.2. Objets d'essais

Les essais sont effectués sur l'isolateur réel (Figure IV.2) et le modèle plan correspondant (Figure IV.3).

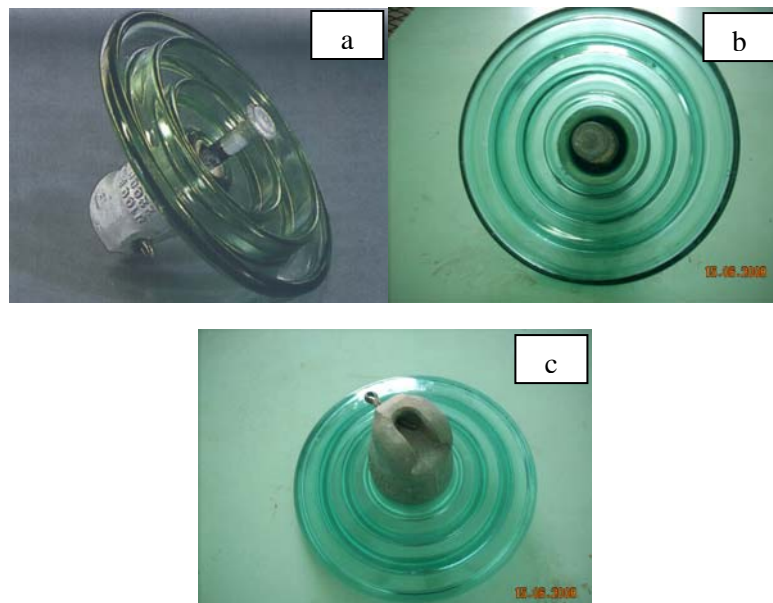


Figure IV.2. Isolateur étudié : (a) Vue latérale ; (b) Face inférieure ; (c) Face supérieure.



Figure IV.3. Modèle plan proposé.

### IV.1.3. Caractéristiques géométriques des objets d'essais

#### IV.1.3.1. Cas de l'isolateur réel

Les dimensions de l'isolateur réel sont mesurées grâce à un mètre ruban non extensible. Nous mesurons la longueur de la ligne de fuite, la distance de contournement dans l'air (capot tige), le profil du capot et le profil de la tige. Ces grandeurs sont représentées dans le tableau IV.1.

Grandeur	Taille en mm
Longueur de fuite	295
Distance de contournement dans l'air	205
Profil du capot	244
Profil de la tige	128

Tableau IV.1. Grandeurs mesurées de l'isolateur réel.



La figure IV.4 représente les grandeurs mesurées.

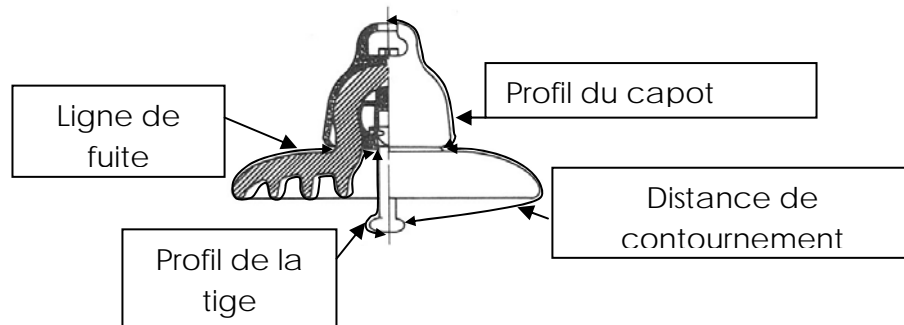


Figure IV.4. Grandeur de l'isolateur.

#### IV.1.3.2. Cas du modèle de laboratoire

Les dimensions du modèle sont déduites de celles de l'isolateur réel comme décrit dans la partie modélisation du chapitre III. Les grandeurs principales du modèle sont décrites dans les tableaux IV.2, IV.3 et IV.4.

Rayon de l'électrode HT (mm)	62
Rayon interne de l'électrode de terre (mm)	354
Largueur de l'électrode de terre (mm)	122
Dimension de la plaque de verre (mm×mm)	500×500
Epaisseur du verre (mm)	7

Tableau IV.2. Dimensions du modèle de courant de fuite (contournement dans le cas des conductivités moyennes 10 et 20 mS/cm).

Rayon de l'électrode HT (mm)	62
Rayon interne de l'électrode de terre (mm)	268
Largueur de l'électrode de terre (mm)	122
Dimension de la plaque de verre (mm×mm)	500×500
Epaisseur du verre (mm)	7

Tableau IV.3. Dimensions du modèle de contournement pour les basses conductivités (9,5  $\mu$ S/cm).

Rayon de l'électrode HT (mm)	62
Rayon interne de l'électrode de terre (mm)	307
Largueur de l'électrode de terre (mm)	122
Dimension de la plaque de verre (mm×mm)	500×500
Epaisseur du verre (mm)	7

Tableau IV.4. Dimensions du modèle de contournement pour les fortes conductivités (29 et 50 mS/cm).

#### IV.1.4. Préparation des solutions polluantes

Les solutions polluantes ont été préparées au laboratoire du département du Génie de l'environnement. Elles sont composées de différentes quantités de NaCl dilué dans un litre d'eau distillée. Les différentes concentrations de NaCl sont données par la CEI 60507 [4].

Pour nos essais, nous avons choisi d'utiliser six solutions de conductivités différentes ; quatre concentrations différentes de NaCl (5 g/l, 10 g/l, 14 g/l, 40 g/l), ainsi que l'eau distillée (conductivité 9,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Les propriétés des solutions polluantes utilisées sont données dans le tableau IV.5.

L'eau distillée est obtenue par condensation de la vapeur d'eau du robinet ; cette opération a été exécutée au niveau du laboratoire du département de l'environnement.

Solution	Concentration de NaCl (g/l)	Conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
Eau distillée	/	9.5
1 <sup>ère</sup> solution de NaCl	5	10600
2 <sup>ème</sup> solution de NaCl	10	20500
3 <sup>ème</sup> solution de NaCl	14.4	29500
4 <sup>ème</sup> solution de NaCl	40	51500

Tableau IV.5. Propriétés des solutions polluantes.

#### IV.1.5. Préparation du modèle

Le modèle est constitué par une plaque en verre de 500 mm  $\times$  500 mm et de 7 mm d'épaisseur sur laquelle sont posées deux électrodes, l'une de terre et l'autre de haute tension. L'électrode haute tension a la forme d'un quart de cercle de 62 mm de rayon, en aluminium, tandis que l'électrode de terre a la forme d'un quart de couronne de cercle en aluminium. Les dimensions des électrodes sont données par les tableaux IV.2, IV.3, et IV.4. La figure IV.5 représente la forme générale du modèle.

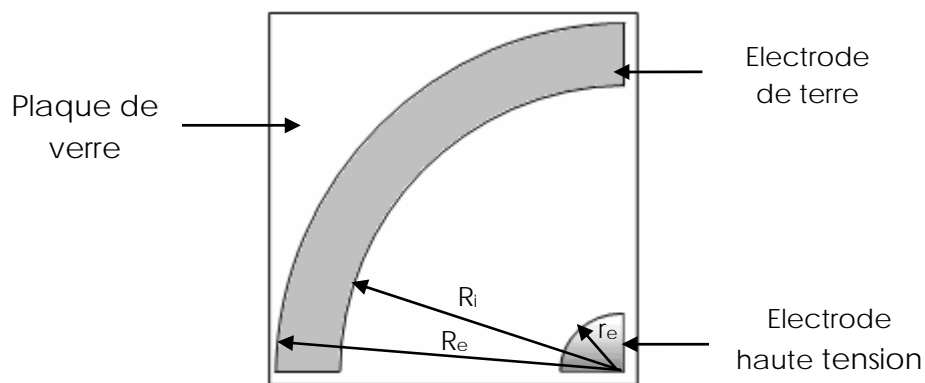


Figure IV.5. Forme générale du modèle.

La découpe des électrodes, à partir d'un film d'aluminium, est effectuée à l'aide d'un cutter, de telles sortes à ne pas avoir des pointes sur les faces des électrodes. La surface de la plaque de verre est lavée à l'eau de robinet, puis à l'eau distillée. Nous passons du gasoil sur les zones où les électrodes vont être placées, les électrodes sont collées une par une de façon à ne pas laisser de bulles d'air entre le verre et l'électrode. Nous passons un coton avec du gasoil sur l'électrode en même temps que nous la plaçons, puis nous nettoyons ces mêmes

endroits avec de l'alcool pour supprimer toute trace de gasoil ou de poussière. Après ces différentes étapes, nous pulvérisons la solution polluante suivant le mode décrit ci-dessous.

#### **IV.1.6. Préparation de l'isolateur réel et du modèle avant chaque essai**

Il est lavé à l'eau du robinet, séché en utilisant des serviettes en papier, et finalement lavé à l'eau distillée et laissé sécher naturellement. Après cela, nous pulvérisons la solution polluante. Le lavage est répété à chaque essai (entre chaque niveau de tension et pour chaque conductivité utilisée).

#### **IV.1.7. Méthode de pulvérisation**

L'humidification de la surface de l'isolateur par une solution de conductivité donnée, est obtenue par pulvérisation. L'ouverture du pulvérisateur est gardée tout au long des essais à la même position, la pulvérisation est faite à une distance d'un demi-mètre de l'objet d'essai. Pour l'isolateur réel, quatre pulvérisations sont appliquées à la surface supérieure, suivant quatre orientations différentes, de telle sorte que le pulvérisateur se trouve au même niveau que l'isolateur et horizontalement par rapport au sol. Pour la surface inférieure, nous appliquons huit pulvérisations, suivant huit directions différentes (sans qu'il y ait ruissellement). La pulvérisation se fait approximativement sous un angle de 45° en dessous de l'isolateur (Figure IV.6.a, b, et c).

Concernant le modèle, nous appliquons six pulvérisations, suivant six directions, horizontalement et à une distance d'un demi-mètre (Figure IV.7).

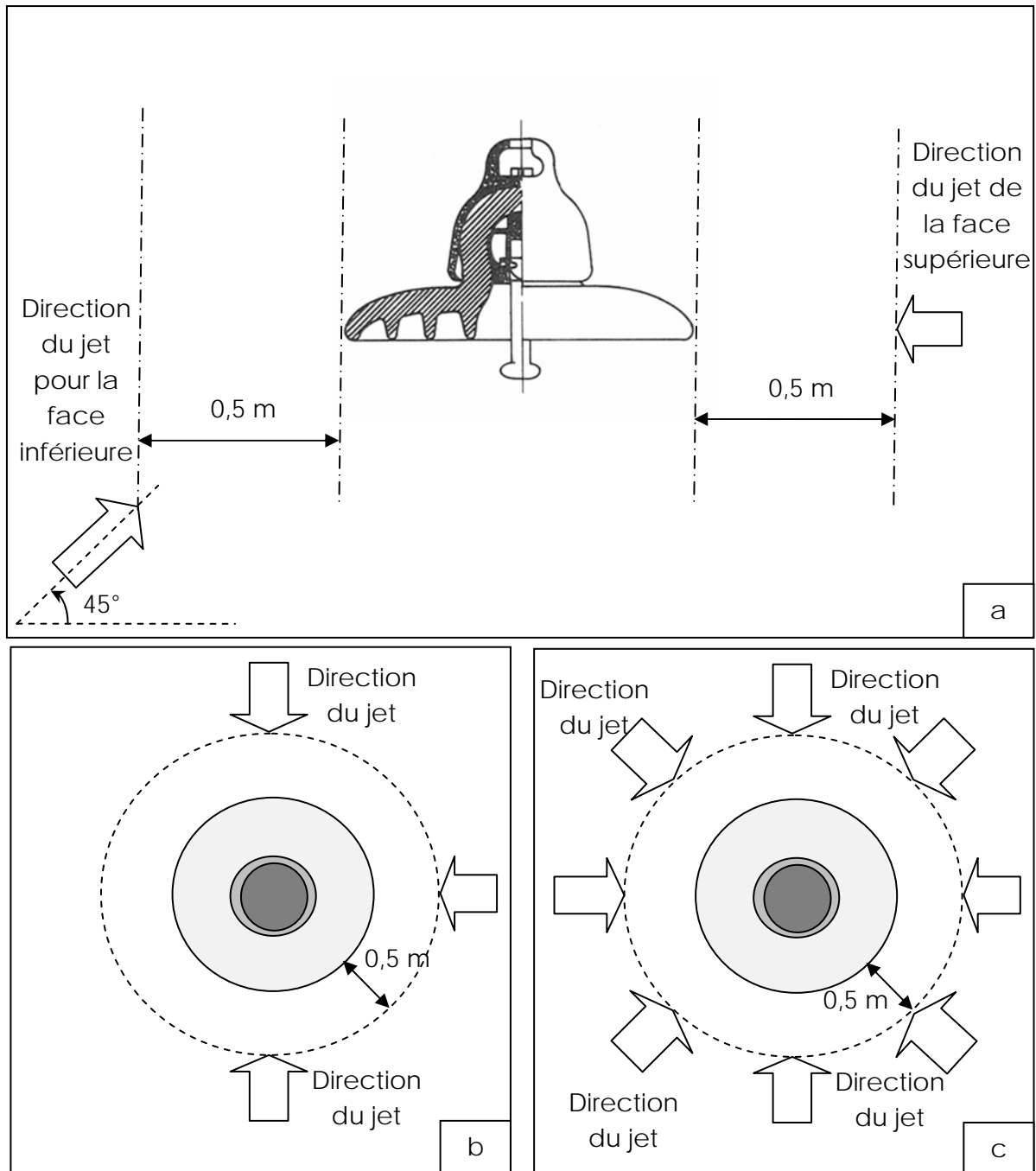


Figure IV.6. Méthode de pulvérisation sur l'isolateur réel.

La figure IV.6.a montre le mode de pulvérisation latéral, la figure IV.6.b le mode de pulvérisation de la couche supérieure, et finalement la figure IV.6.c le mode de pulvérisation de la face inférieure.

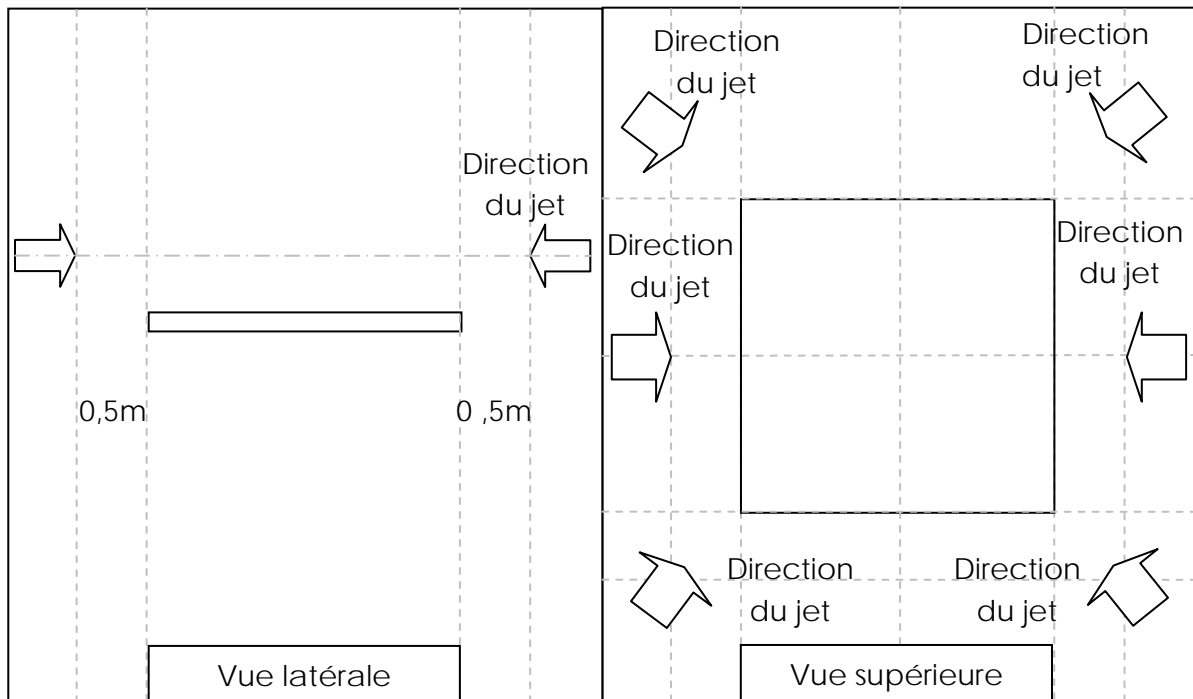


Figure IV.7. Mode de pulvérisation du modèle.

#### IV.1.8. Phénomènes observés lors des essais

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

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

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

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

Généralement, le courant a la même forme que la tension aux premiers instants d'application de celle-ci, avec une légère non linéarité ; cette non linéarité est similaire au

phénomène d'hystérésis ; une fois que les étincelles commencent à apparaître, il y a déformation de l'onde de courant avec apparition de nouveaux harmoniques, l'amplitude de ces harmoniques varie en fonction du temps.

---

---

## ***IV.2. Etude de la tension de contournement***

---

---

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

### IV.2.1.1. Introduction

La tension de contournement est le paramètre essentiel de l'isolateur de ligne. Il est alors nécessaire de la connaître pour pouvoir choisir le type d'isolateur à utiliser sur une ligne donnée, cela pour éviter tout risque de contournement pendant le fonctionnement de la ligne.

Pour éviter qu'il y ait contournement durant les essais de mesure de courant de fuite, il est nécessaire d'étudier la tension de contournement de l'isolateur, en fonction de la conductivité de la solution polluante. Le modèle subit la même série d'essais ; les résultats obtenus, dans les deux cas (cas modèle et isolateur), seront comparés.

### IV.2.1.2. Mode opératoire

L'isolateur et le modèle sont lavés et séchés avant chaque essai de contournement, puis à l'aide d'un coton imbibé d'alcool nous éliminons toutes les poussières éventuelles. Enfin, l'isolateur ou le modèle est humidifié à l'aide d'un pulvérisateur contenant la solution polluante d'une conductivité préalablement choisie.

Pour chaque configuration, nous effectuons cinq fois la même mesure de la tension de contournement. La valeur que nous prenons en considération est la valeur moyenne des cinq valeurs obtenues. Le même mode opératoire est appliqué lors de chaque essai.

### IV.2.1.3. Résultats des essais

Les tableaux suivants donnent les tensions obtenues pour chaque essai et leurs moyennes ; et cela pour les différentes conductivités :

Essai		1	2	3	4	5	Moyenne
Tension (kV)	isolateur	61	57	66	65	67	63,2
	Modèle	68	66	68	66	67	67

Tableau IV.6. Tension de contournement pour une solution de conductivité de  $9,5\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Essai		1	2	3	4	5	Moyenne
Tension (kV)	isolateur	36	38	38	43	40	39
	Modèle	35	40	37	41	39	38,4

Tableau IV.7. Tension de contournement pour une solution de conductivité de  $10\text{mS}/\text{cm}$ .

Essai		1	2	3	4	5	Moyenne
tension (kV)	Isolateur	39	37	38	36	35	37
	Modèle	37	37	35	36	37	36,4

Tableau IV.8. Tension de contournement pour une solution de conductivité de  $20\text{mS}/\text{cm}$ .



Essai		1	2	3	4	5	Moyenne
Tension (kV)	Isolateur	36	32	31	34	33	33,2
	Modèle	33	36	36	35	35	35

Tableau IV.9. Tension de contournement pour une solution de conductivité de 29mS/cm.

Essai		1	2	3	4	5	Moyenne
tension (kV)	Isolateur	29	31	27	26	28	28,2
	Modèle	30	28	24	24	25	26,2

Tableau IV.10. Tension de contournement pour une solution de conductivité de 50mS/cm.

Les valeurs moyennes des tensions de contournement sont représentées sur la figure IV.8 pour l'isolateur et le modèle. Les deux courbes représentent la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité de la solution polluante.

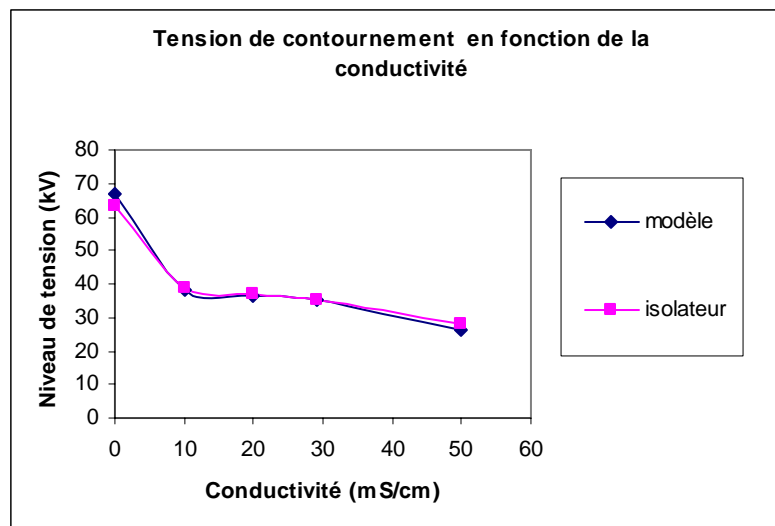


Figure IV.8. Tension de contournement de l'isolateur et du modèle.

D'après la figure IV.8, la tension de contournement diminue de manière exponentielle en fonction de la conductivité. Nous remarquons qu'à partir de la conductivité 10 mS/cm, la conductivité de la couche de pollution n'a plus une influence importante. Ceci est tout à fait logique car l'apparition des bandes sèches a lieu pour des niveaux de tensions inférieures, dans le cas de fortes conductivités, d'où la diminution de la tension de contournement.

Les résultats obtenus pour le modèle sont très proches de ceux de l'isolateur réel ; la différence entre les valeurs des tensions de contournement ne dépasse pas les 8%, et cela dans le cas le plus défavorable.

#### IV.2.1.4. Conclusion

La tension de contournement diminue de manière non linéaire. Pour des conductivités relativement élevées, la tension de contournement est légèrement affectée par l'augmentation de la conductivité de la couche de pollution. Le modèle de laboratoire proposé se comporte quasiment comme l'isolateur réel, pour les différentes conductivités utilisées, en donnant des résultats très proches de ceux de l'isolateur réel.

---

***IV.3. Décomposition du courant de fuite et analyse de l'influence de la tension appliquée***

---

### IV.3. Décomposition du courant de fuite et analyse de l'influence de la tension appliquée

#### IV.3.1. Introduction

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus après traitements des signaux aussi bien de la tension appliquée que du courant de fuite, pour différentes conductivités de la couche de pollution et différents niveaux de tensions. Nous présentons aussi la variation de la charge cumulative de chaque composante du courant de fuite, son amplitude ainsi que la proportion de chacune de ses composantes dans le signal enregistré en fonction du temps.

#### IV.3.2. Cas de l'isolateur réel

##### IV.3.2.1. Couche de pollution de conductivité $9.5 \mu\text{S/cm}$

##### Niveau de tension de 5 kV

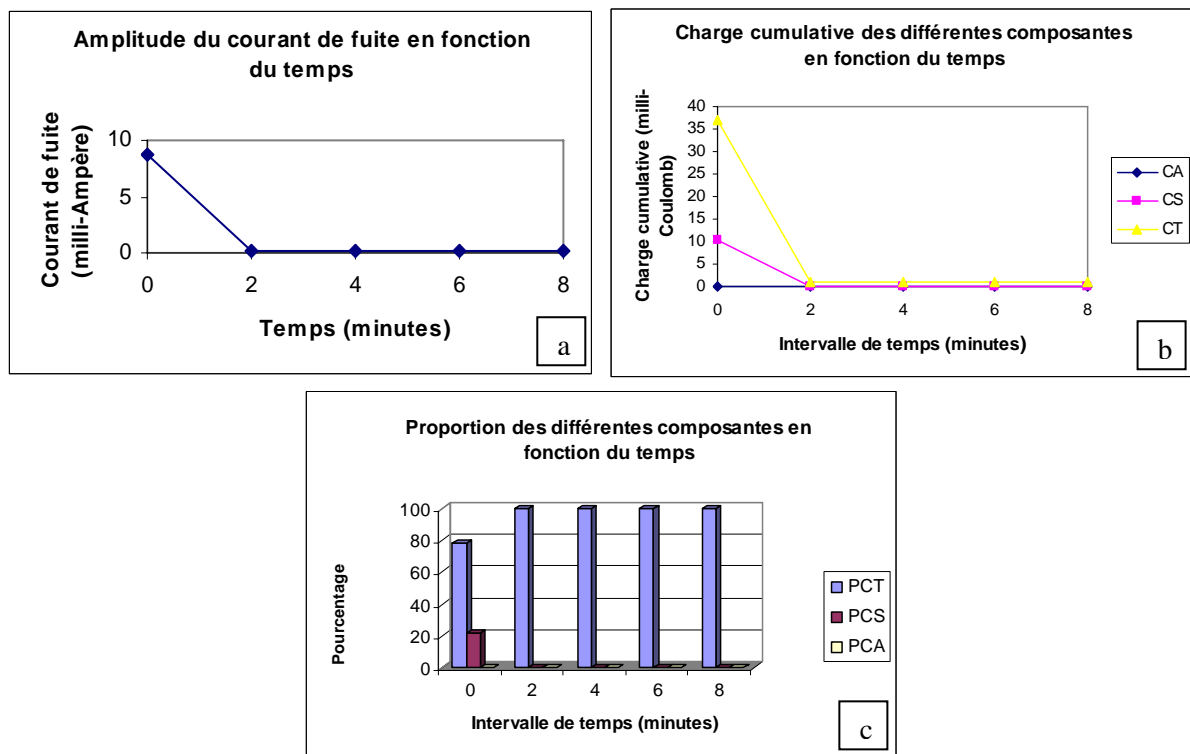


Figure IV.9. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Pour ce niveau de tension, nous remarquons qu'au premier instant, il y a présence de la composante transitoire, vu le faible niveau de tension et la faible conductivité. Au deuxième instant, il y a présence de la composante d'arc local (apparition des micro-étincelles sur la surface de l'isolateur) ; la proportion de cette composante augmente pendant le deuxième instant (augmentation de l'intensité du bruit émis par les décharges). Pendant le quatrième instant, il y a présence de deux composantes, sinusoïdale et transitoire, les décharges ont pu modifier l'état d'humidification à la surface de l'isolateur et par la suite il y a apparition d'un film d'eau continu d'où l'apparition de la composante sinusoïdale. Le dernier instant marque la présence d'une seule composante qui est la composante transitoire, cette composante

apparaît après l'assèchement local causé par les décharges. Nous remarquons aussi que la variation de l'amplitude de courant est une exponentielle décroissante ; cela veut dire que l'impédance équivalente augmente d'une manière exponentielle. Nous voyons aussi que la charge cumulative de la composante transitoire diminue et garde un certain niveau en régime permanent.

### Niveau de tension de 10 kV

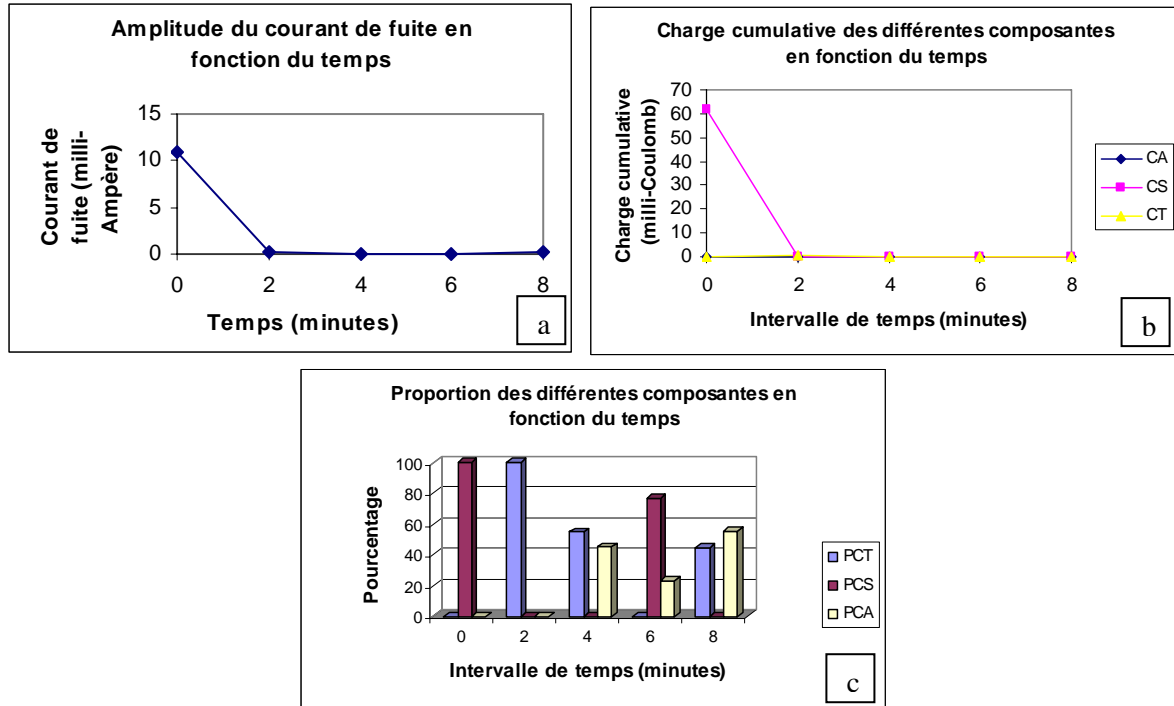


Figure IV.10. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Ce niveau de tension est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale durant tout le premier instant ce qui montre la présence d'un film continu de pollution. Le deuxième instant (à la deuxième minute) est marqué par la présence de la composante transitoire (déformation de la forme du courant de fuite après un léger assèchement causé par la composante sinusoïdale). A partir du troisième instant, les décharges commencent à apparaître et persistent jusqu'au dernier instant (apparition de la composante d'arc local). Nous remarquons aussi que la composante d'arc local est accompagnée d'une certaine proportion de la composante sinusoïdale, cette dernière pouvant avoir lieu après déformation des gouttelettes qui augmente l'intensité du champ entre gouttelettes. La variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction du temps, (Figure IV.10.a) a la même allure que pour le niveau de la tension précédent (5 kV) (Figure IV.9.a), ce qui signifie que l'impédance augmente d'une manière exponentielle.

## Niveau de tension de 15 kV

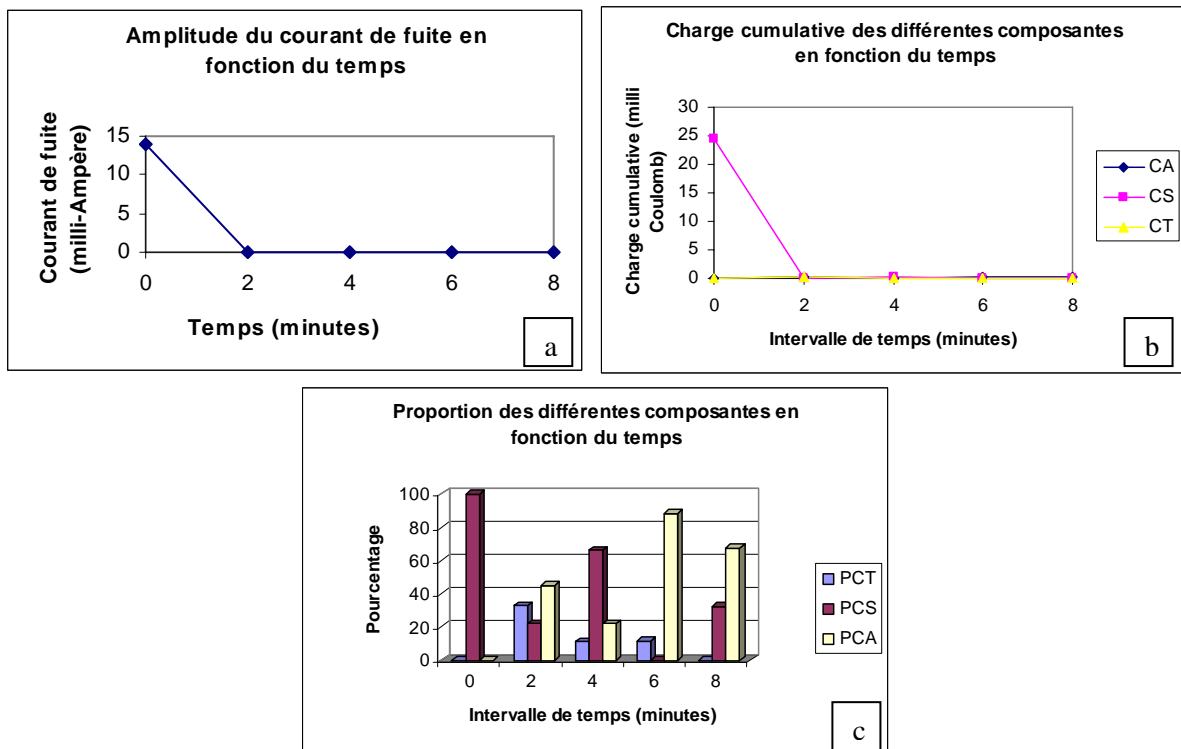


Figure IV.11. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Pour ces deux derniers niveaux de tension appliquée, la composante sinusoïdale apparaît en grande proportion ; or pour le premier niveau de tension (figure IV.9), cette composante apparaît jusqu'au deuxième instant. Pour la conductivité précédente, (figure IV.10) les deux autres types de composantes s'ajoutent à la composante sinusoïdale au deuxième instant. Suite au léger assèchement provoqué par cette composante. La fluctuation de l'intensité du bruit émis par les décharges est constatée par cette analyse (fluctuation de la proportion de la composante d'arc local) ; la présence de la composante sinusoïdale jusqu'au dernier instant est due à la faible conductivité de la couche de pollution (courant insuffisant pour provoquer un assèchement total de la surface de l'isolateur). Nous remarquons aussi le même sens de variation de la charge cumulative des différentes composantes ainsi que l'amplitude du courant que pour les niveaux précédents.

Niveau de tension de 20kV

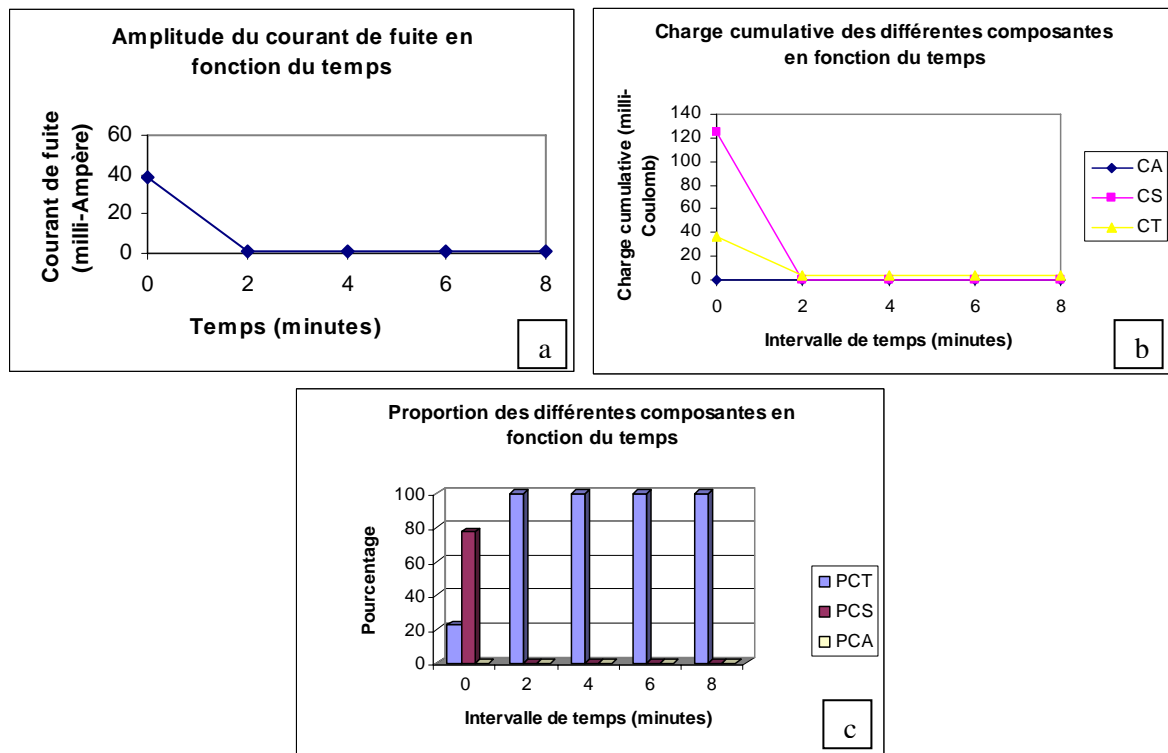
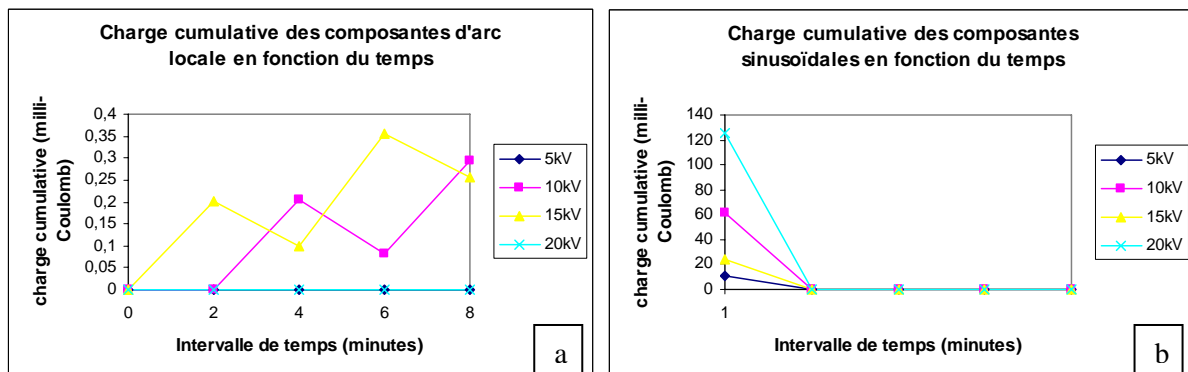


Figure IV.12. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Dans ce cas de figure, nous remarquons la présence de la composante sinusoïdale en grande proportion au premier instant, accompagnée néanmoins d'une faible proportion de la composante transitoire du courant de fuite (charge cumulative). La présence de cette dernière à cet instant ci (instant 1), peut être due à l'assèchement provoqué lors de l'augmentation de la tension. La présence de la composante transitoire, à partir du deuxième instant, peut être due à l'assèchement provoqué par les décharges qui ont eu lieu, entre le premier et le deuxième instant.

Influence de la tension appliquée



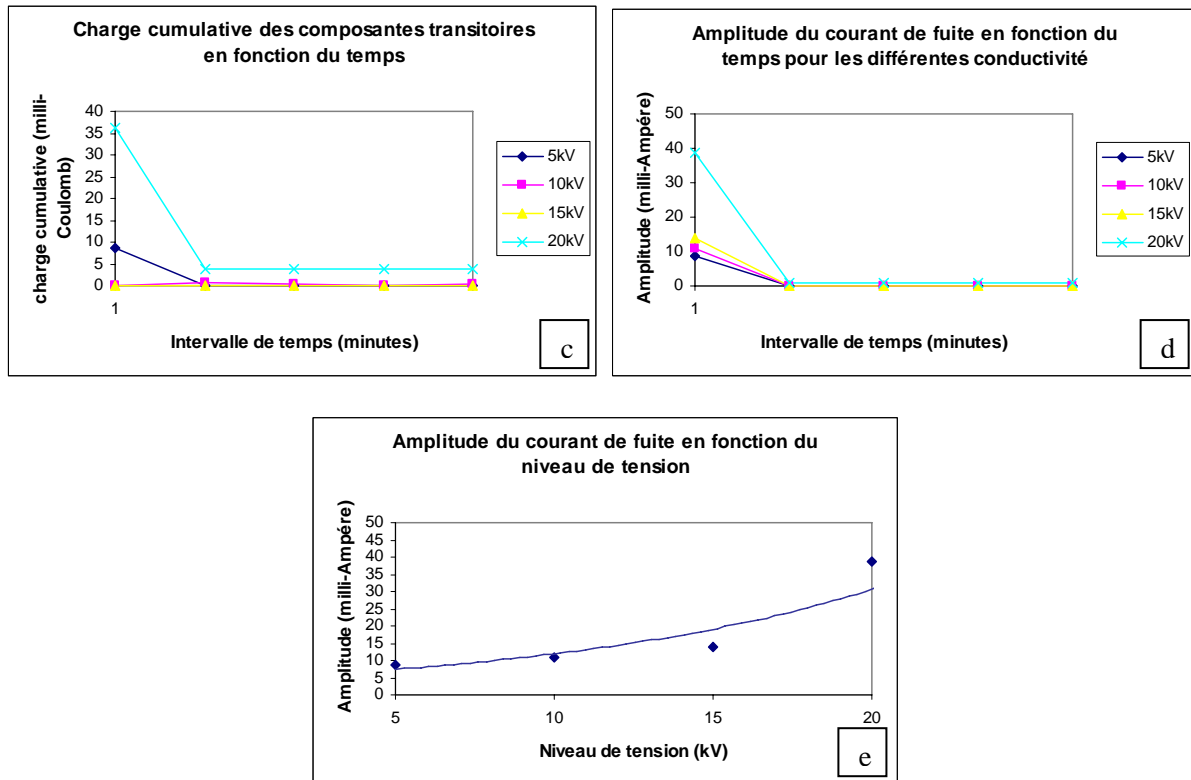


Figure IV.13. Influence de la contrainte électrique ; (a) Charge cumulative de la composante d'arc local ; (b) Charge cumulative de la composante sinusoïdale ; (c) Charge cumulative de la composante transitoire ; (d) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps ; (e) Amplitude du courant de fuite en fonction du niveau de tension.

Le graphe représentant la variation de la charge cumulative de la composante d'arc local en fonction du temps (Figure IV.13.a) nous informe sur l'instant de l'apparition de l'arc. Cet instant varie en fonction de la tension appliquée. En effet, plus le niveau de la tension augmente, plus cette composante apparaît plutôt.

Pour cette conductivité, l'apparition de la composante sinusoïdale, dès le premier instant, en grande proportion, a lieu pour des niveaux supérieurs à 10 kV.

## Conclusion

L'effet de la tension sur le comportement de l'isolateur apparaît, non seulement sur la caractéristique amplitude du courant de fuite – tension appliquée, mais aussi sur l'instant d'apparition et la nature des événements qui ont lieu sur la surface de l'isolateur, pendant l'application de la tension.

## IV.3.2.2. Couche de pollution de conductivité 10 mS/cm

Niveau de tension de 5kV

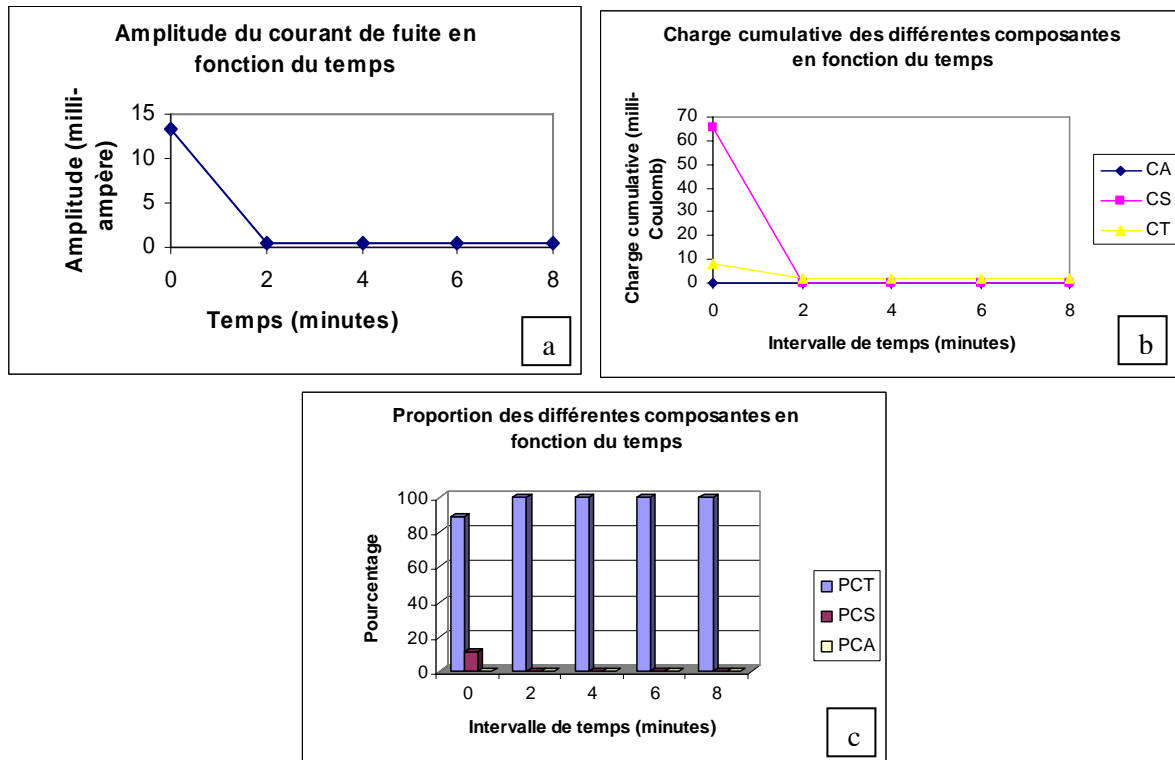


Figure IV.14. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Pour ce niveau de tension, le premier instant est marqué par la présence de la composante transitoire et sinusoïdale (en faible proportion). A partir du deuxième instant, la composante transitoire apparaît seule, ce qui implique la déformation de la forme du signal à cause de l'assèchement partiel de la couche d'humidité.



Niveau de tension de 10kV

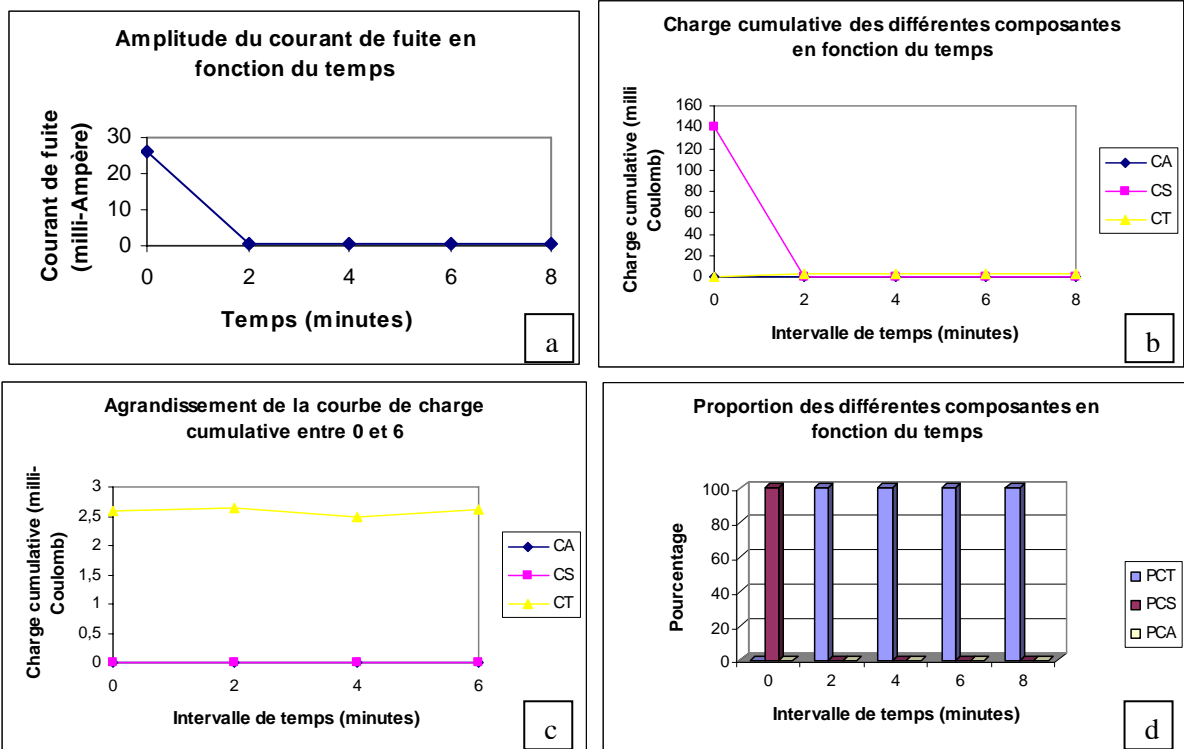
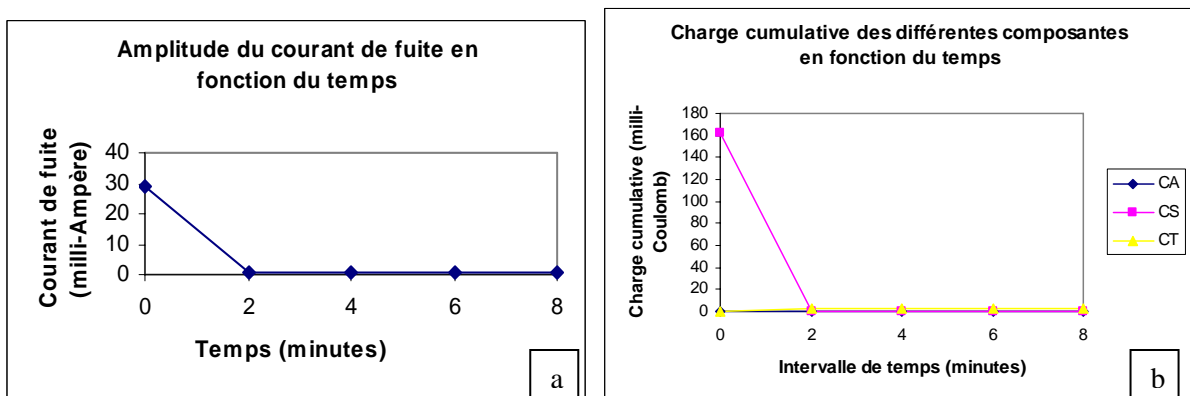


Figure IV.15 (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Niveau de tension de 15kV



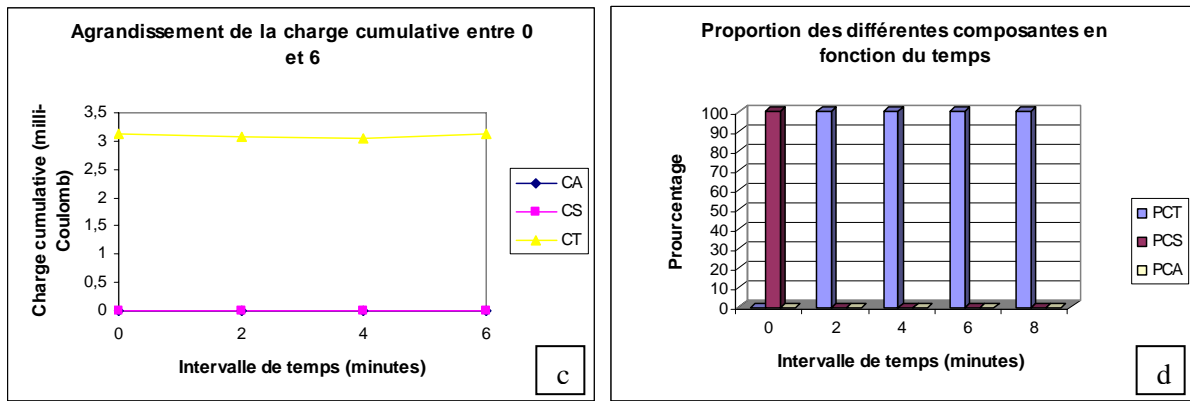


Figure IV.16 (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Niveau de tension de 20kV

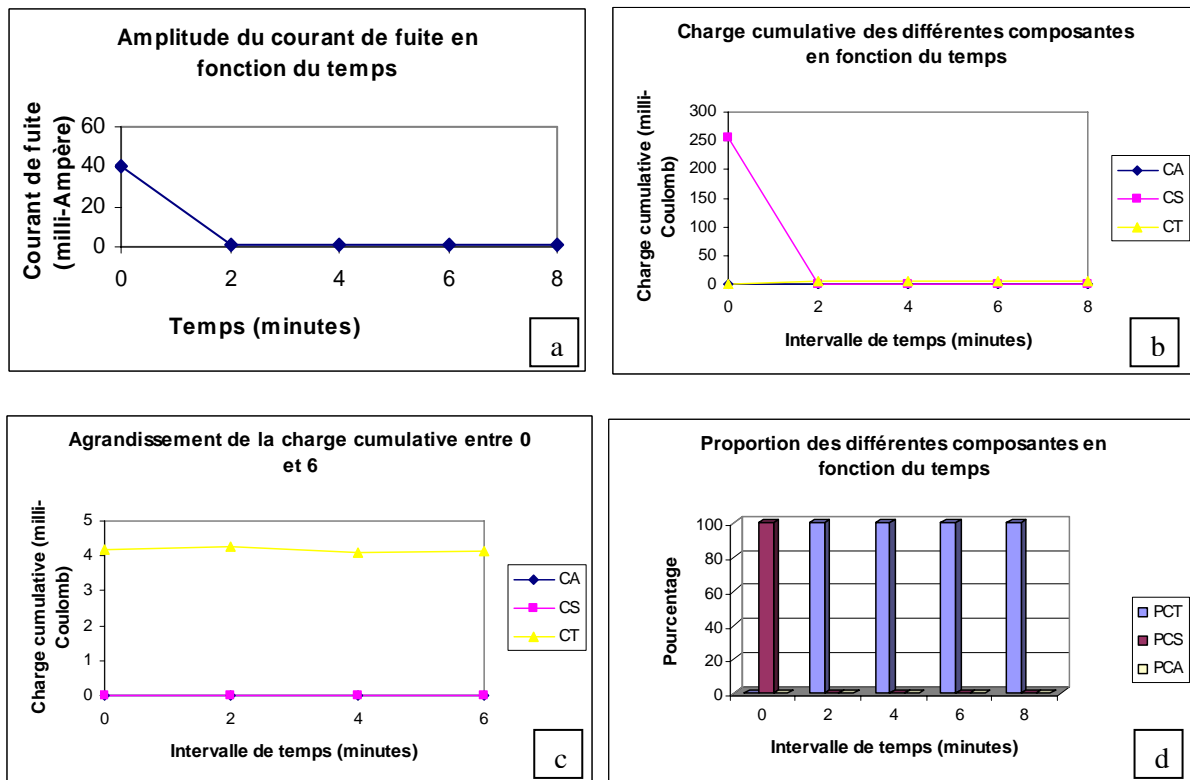


Figure IV.17. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Les mêmes observations sont faites pour ces 3 derniers niveaux de tension. Le premier instant est toujours marqué par la présence de la composante sinusoïdale, la composante transitoire n'apparaît qu'à partir du deuxième instant et ce en totalité, à cause de l'assèchement provoqué par les décharges qui ont lieu entre le premier et le deuxième instant.

## Influence du niveau de tension appliquée

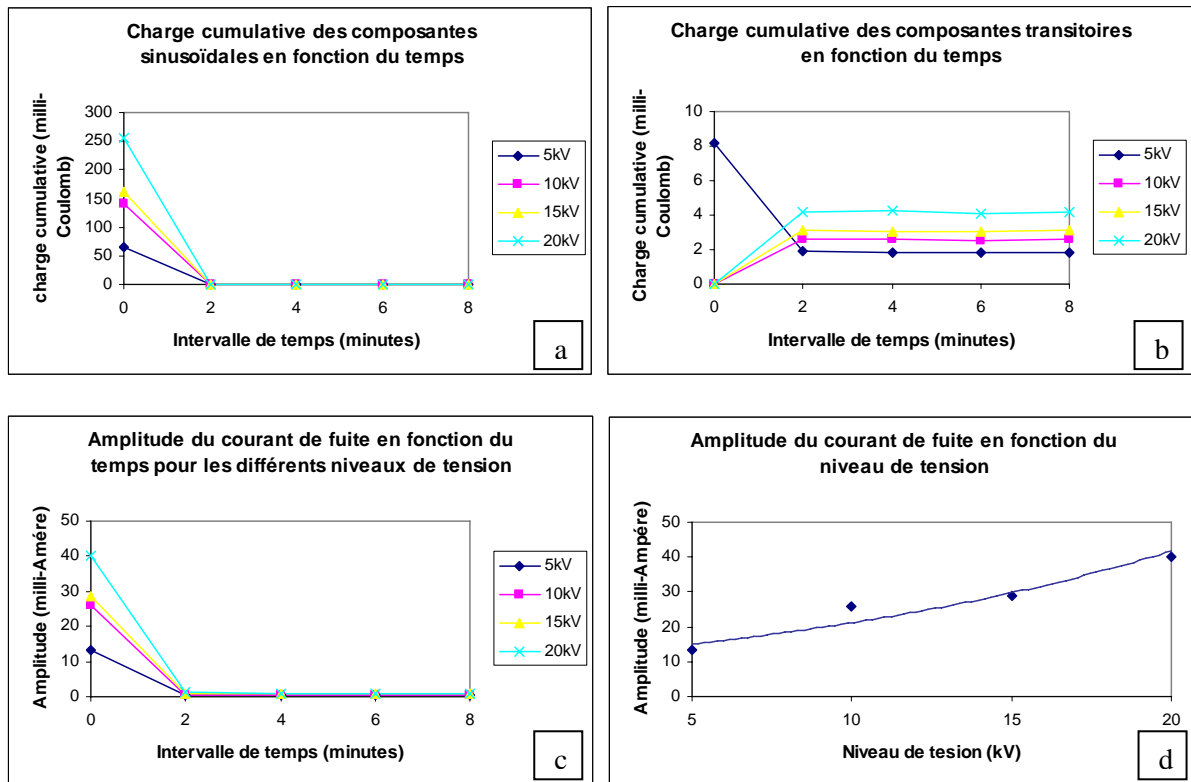


Figure IV.18. Influence de la contrainte électrique ; (a) Charge cumulative de la composante sinusoïdale ; (b) Charge cumulative de la composante transitoire ; (c) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps ; (d) Amplitude du courant de fuite en fonction du niveau de tension.

Nous remarquons que, plus le niveau de tension augmente, plus la charge cumulative et l'amplitude du courant de fuite augmentent. Nous remarquons aussi que la pente de variation du courant de fuite en fonction de la tension appliquée augmente avec le niveau de tension appliquée, et donc il y a augmentation du niveau du risque de contournement.

### Conclusion

Pour cette conductivité et pour les niveaux de tension élevés (10, 15 et 20 kV) (Figure IV.15, IV.16 et IV.17), la composante sinusoïdale est présente seule, au premier instant. A partir du deuxième instant, la composante transitoire apparaît seule. Pour un niveau de tension plus faible (5 kV) (Figure IV.14), au premier instant, cette composante est accompagnée d'une autre composante qui est la composante transitoire.

## IV.3.2.3. Couche de pollution de conductivité 20mS/cm

## Niveau de tension de 5 kV

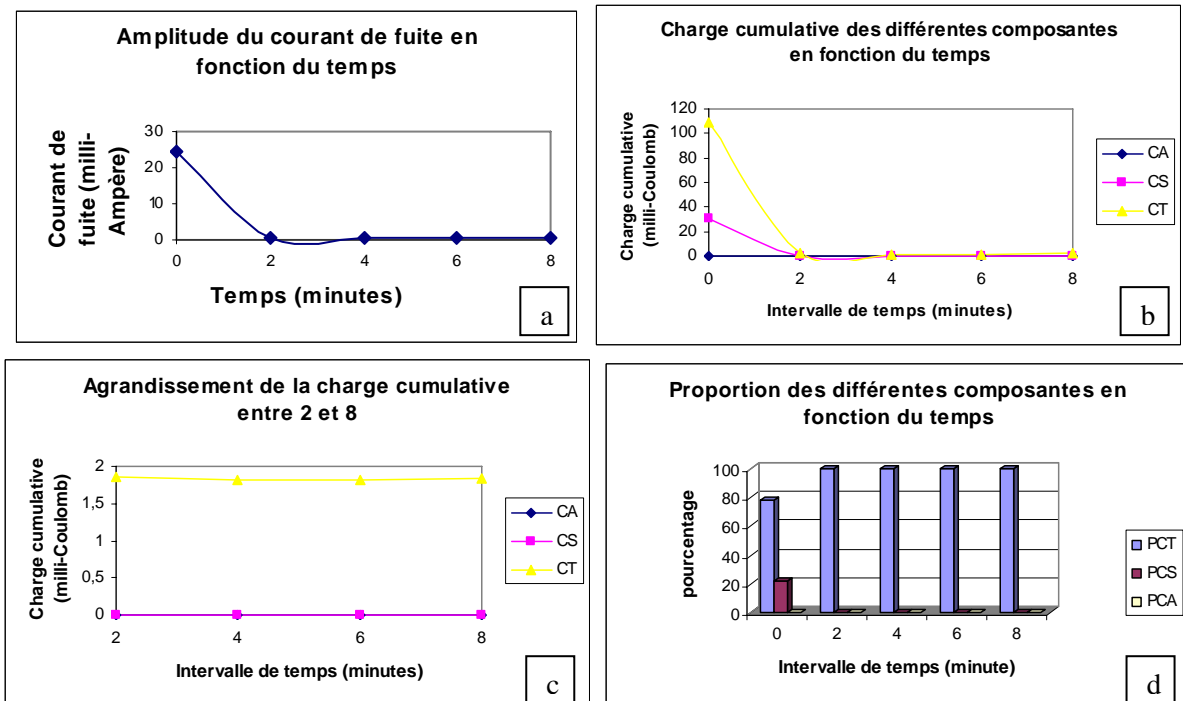


Figure IV.19. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Le premier instant de ce niveau de tension est marqué par la présence de la composante sinusoïdale, accompagnée d'une proportion plus importante de la composante transitoire. Le deuxième instant est marqué par la présence de la composante transitoire, seule, cela nous informe sur l'occurrence d'arcs locaux qui ont provoqué l'assèchement de certaines zones (ces arcs n'ont pas été enregistrés), ce qui a donné lieu à l'apparition de la composante transitoire durant les instants suivants. La charge cumulative de la composante sinusoïdale diminue avec le temps pour atteindre la valeur zéro à partir du troisième instant, tandis que la composante transitoire augmente pour atteindre une valeur limite à partir de ce même instant (Figure IV.19.c).

L'amplitude du courant de fuite diminue de manière exponentielle, comme pour tous les niveaux de tension.

## Niveau de tension de 7,5 kV

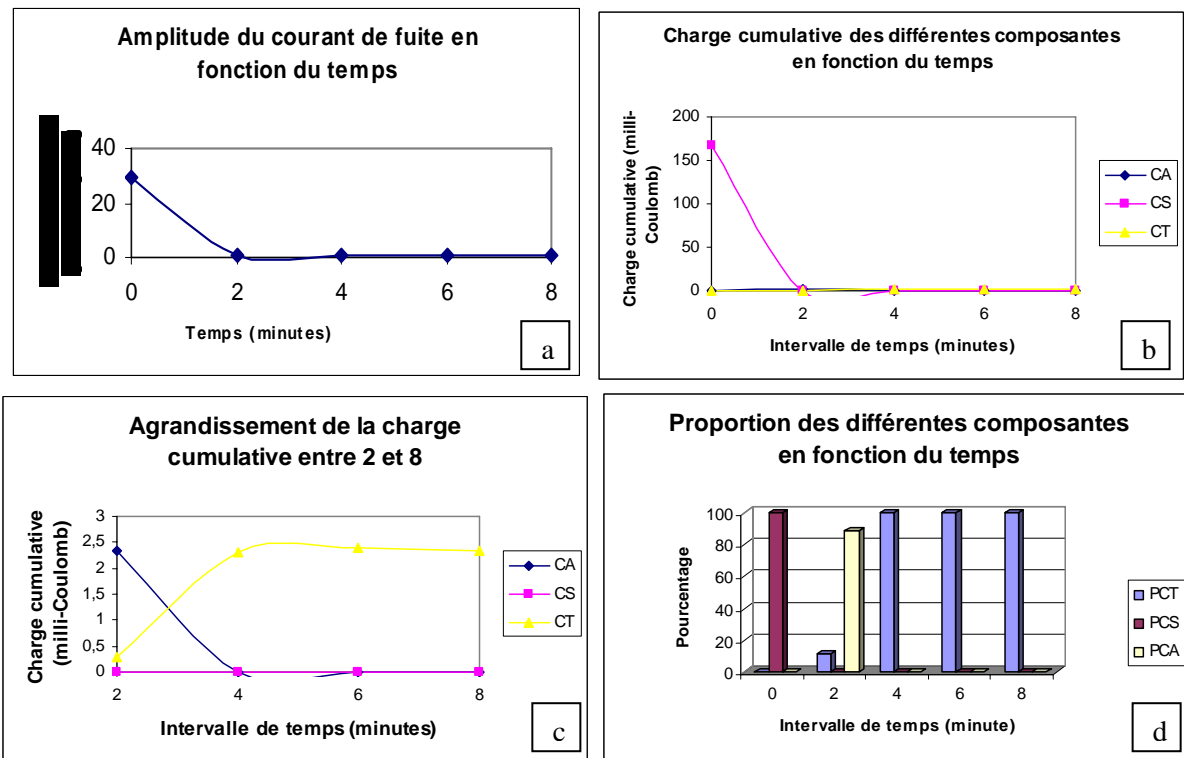


Figure IV.20. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

La composante sinusoïdale apparaît au premier instant. Cela veut dire que pour une telle conductivité ; une tension de 7,5 kV est suffisante pour faire circuler un courant sinusoïdal. Entre le premier et le deuxième instant, il y a apparition de la composante d'arc local (début d'apparition des décharges). Ces décharges provoquent des assèchements locaux (autour des deux électrodes) d'où l'apparition de la composante transitoire à partir de l'instant deux ; cette composante est accompagnée par la composante d'arc local en forte proportion. La charge cumulative de la composante transitoire augmente avec le temps jusqu'à atteindre une valeur limite (2,2 mC/cm) ; cette augmentation a lieu en même temps que la diminution de la charge cumulative de la composante sinusoïdale et l'annulation de la composante d'arc local dès le troisième instant.

Niveau de tension de 10kV

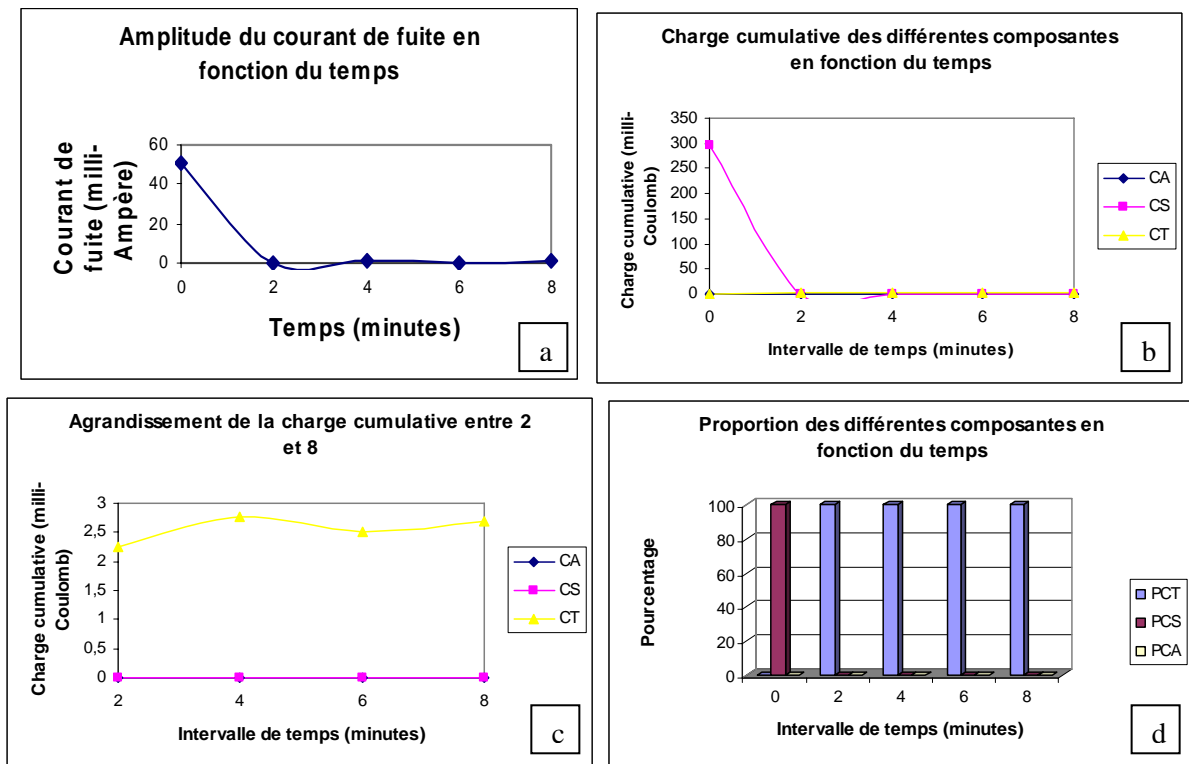


Figure 4.21. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Pour ce niveau de tension, la même constatation est faite que pour le niveau précédent, la seule différence est l'absence de la composante d'arc local. En fait, la composante d'arc local a eu lieu entre l'instant 1 et l'instant 2.

Niveau de tension de 15 kV

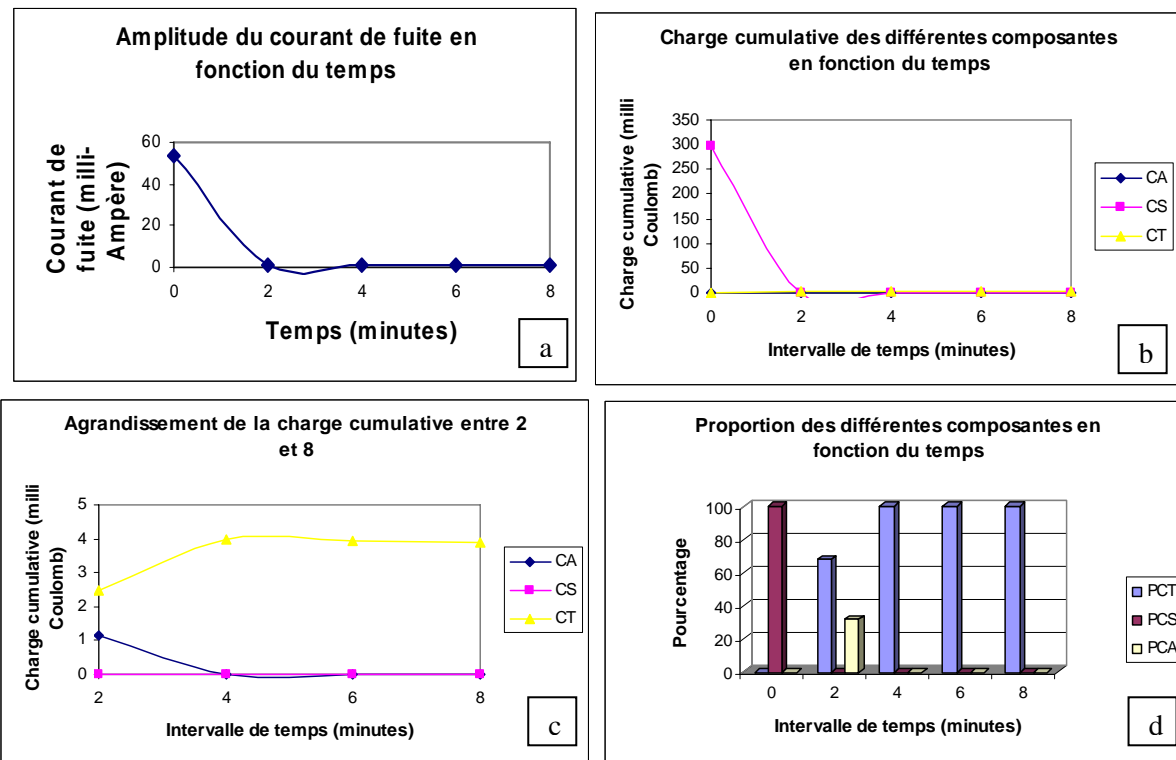


Figure IV.22. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

La composante sinusoïdale est présente seule durant le premier instant, le deuxième instant est marqué par la présence de la composante d'arc local et la composante transitoire. La présence de la composante d'arc local nous informe sur l'occurrence de décharges locales qui assèchent la surface, d'où l'apparition d'une série de composantes transitoires, cela est caractérisé par la distorsion du signal du courant de fuite.

**Influence du niveau de tension appliquée**

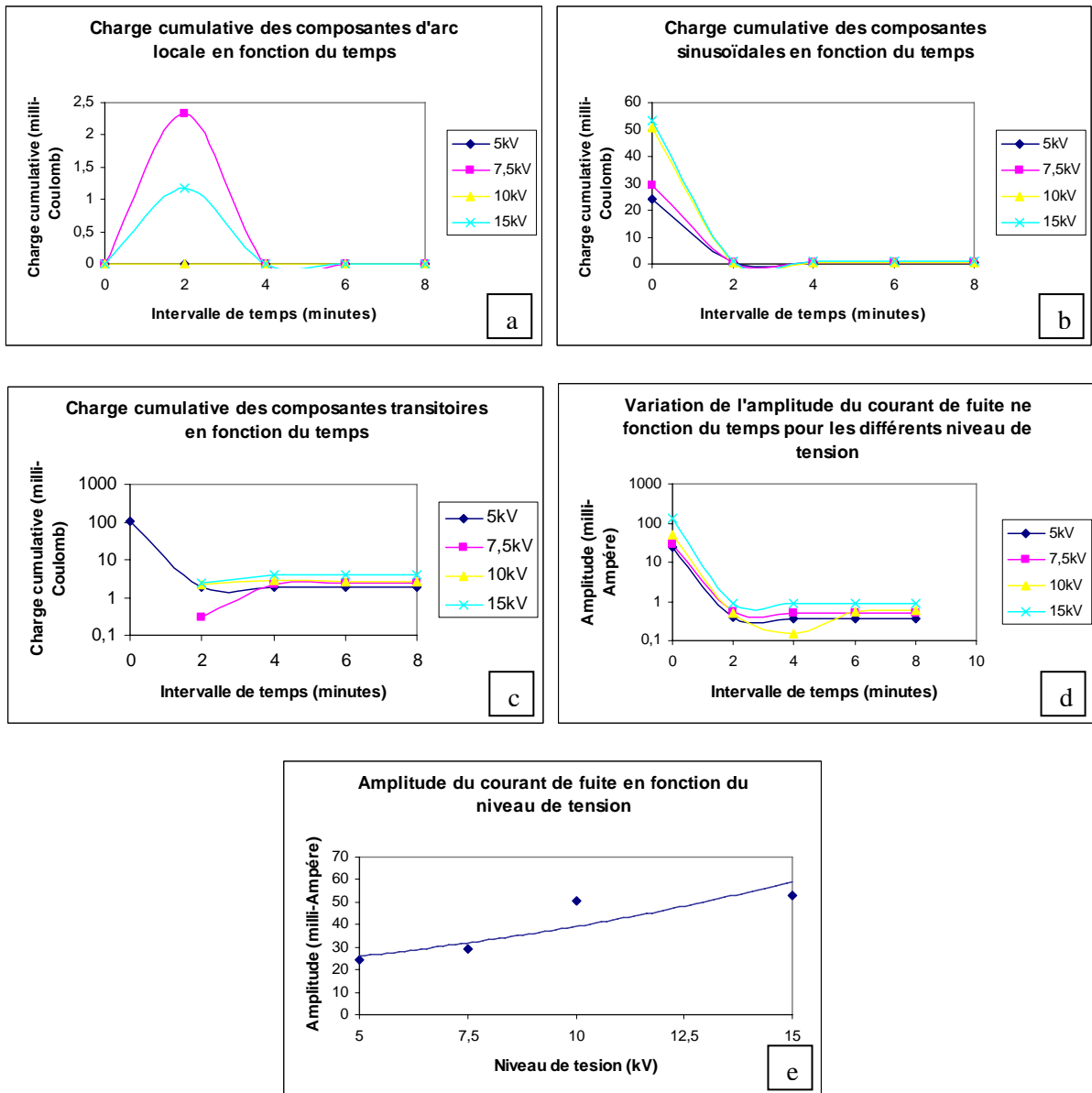


Figure IV.23. Influence de la contrainte électrique ; (a) Charge cumulative de la composante d'arc local ; (b) Charge cumulative de la composante sinusoïdale ; (c) Charge cumulative de la composante transitoire ; (d) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps ; (e) Amplitude du courant de fuite en fonction du niveau de tension.

Nous constatons que plus la tension augmente plus la charge cumulative augmente. Cela a lieu pratiquement pendant toute la séquence d'enregistrement dont la durée est de 8 minutes. Ainsi, nous remarquons que l'amplitude du courant au premier instant, augmente avec l'augmentation de la tension ; cette augmentation est de forme exponentielle.

**Conclusion**

Pour cette conductivité, la composante sinusoïdale est présente au premier instant pour les quatre niveaux de tension. Les décharges commencent quelques secondes après l'application de la tension, la durée de ces décharges diminue avec le niveau de tension.



## IV.3.2.4. Couche de pollution de conductivité 29 mS/cm

## Niveau de tension de 5 kV

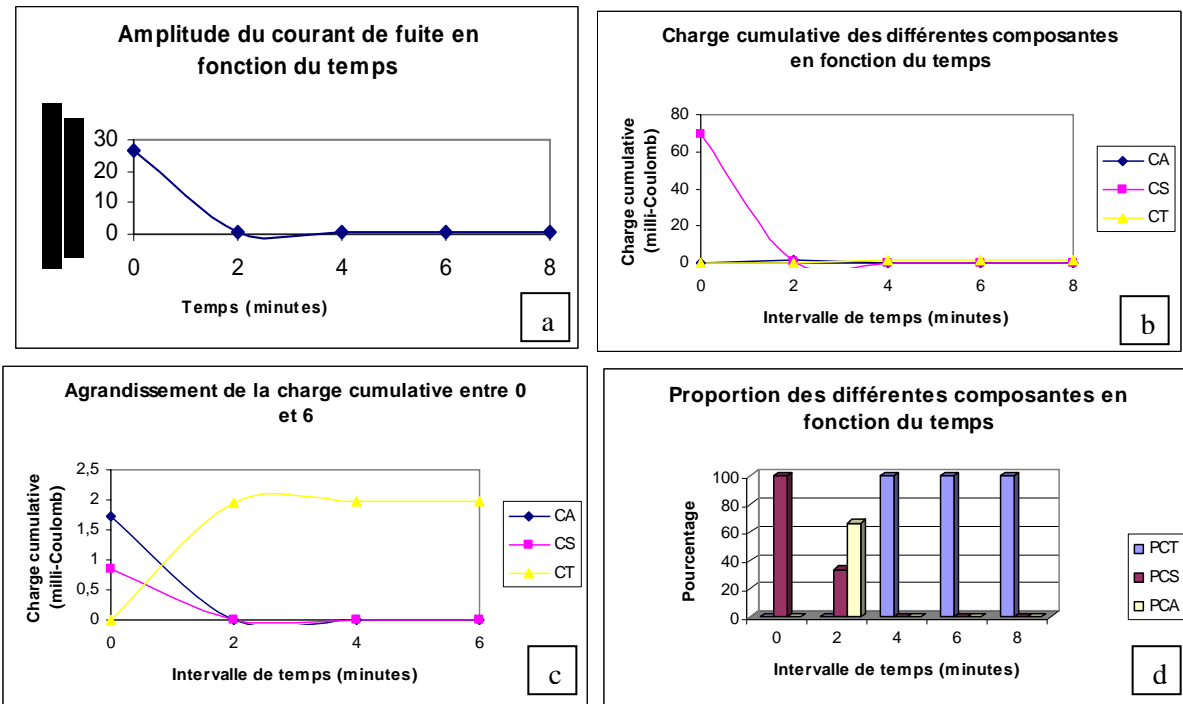


Figure VI.24. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Dans ce cas, nous remarquons que le premier instant est marqué par la présence de la composante sinusoïdale en totalité. Durant le deuxième instant, la composante d'arc local apparaît en grande proportion. En pratique, l'apparition des arcs locaux a lieu quelques secondes après la mise sous tension de l'objet d'essai, leur bruit augmente avec le temps d'application de la tension, jusqu'à atteindre un niveau maximum puis commence à diminuer jusqu'à extinction totale (instant 3). A partir de cet instant 3, nous remarquons la présence en totalité de la composante transitoire, ce qui nous informe sur la déformation du courant de fuite après l'assèchement de la couche d'humidité.

Nous observons la même évolution de l'amplitude du courant de fuite que pour les conductivités précédentes.

Niveau de tension de 7.5 kV

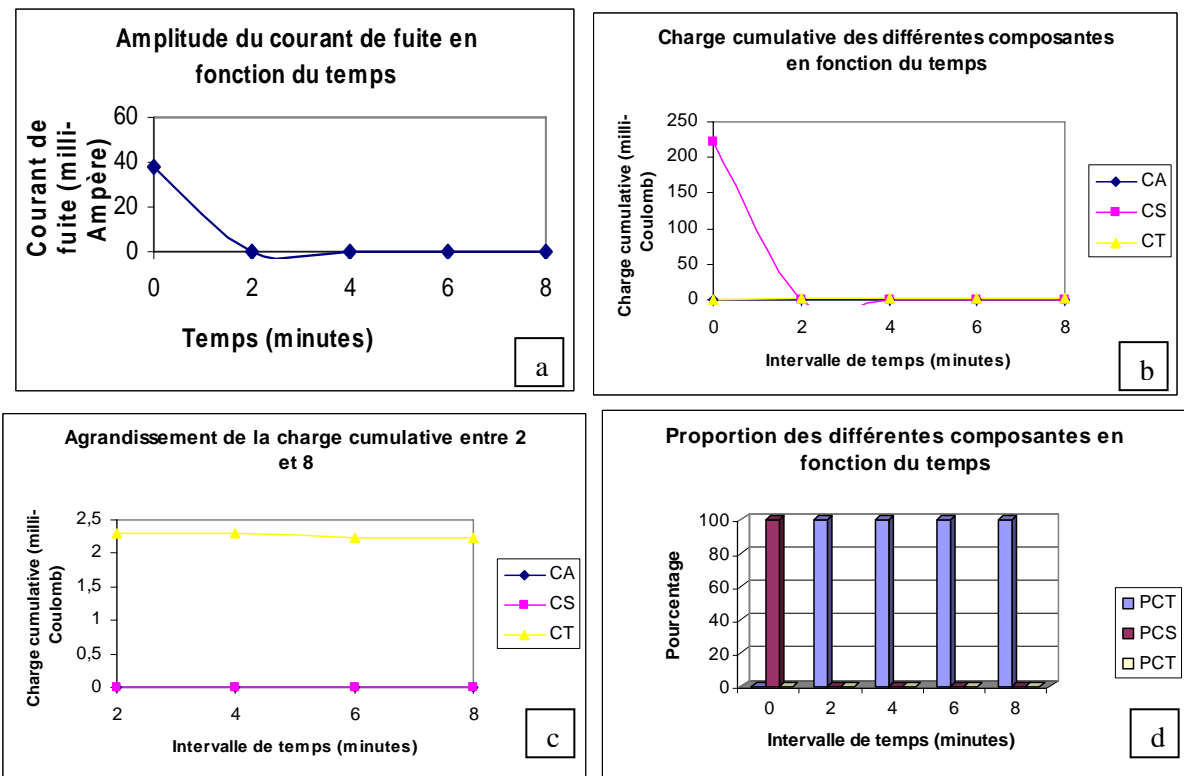


Figure IV.25. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Dans ce cas, le premier instant est marqué par la présence de la composante sinusoïdale en totalité. A partir du deuxième instant, c'est la composante transitoire qui apparaît en totalité ; cela est due à l'assèchement causé par les arcs locaux qui ont eu lieu entre l'enregistrement du premier instant et du deuxième instant.

Niveau de tension de 10 kV

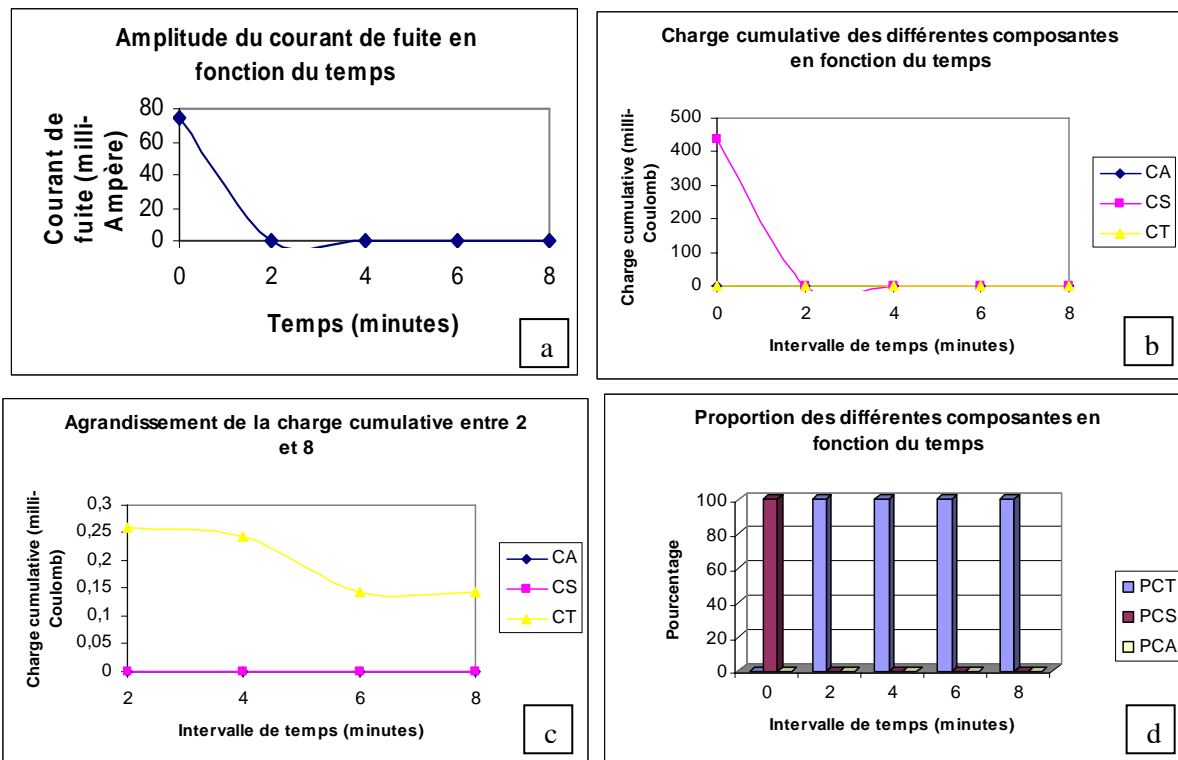


Figure IV.26. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

## Niveau de tension de 15 kV

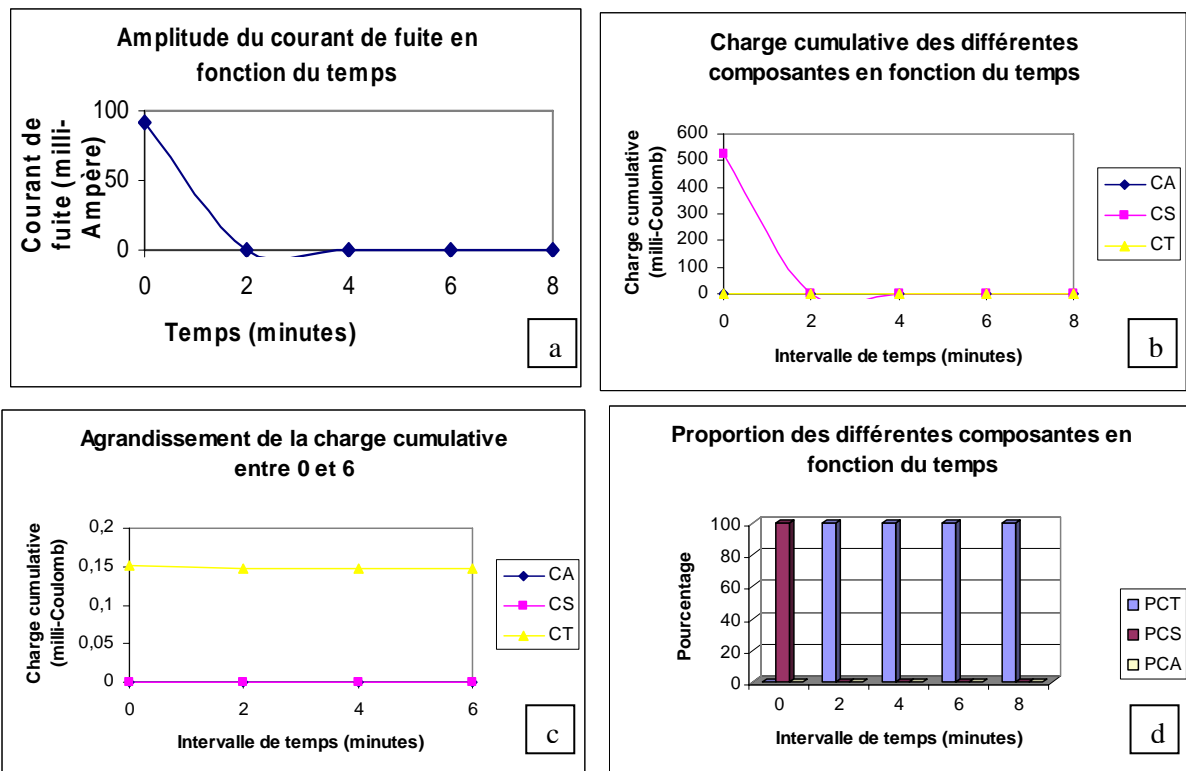


Figure IV.27. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Ces trois derniers niveaux présentent pratiquement les mêmes proportions des composantes, durant toute la séquence d'enregistrement ; cela veut dire que pour une telle conductivité, la surface humidifiée (pour le degré d'humidification choisi lors des essais), devient sèche en quasi-totalité à partir du deuxième instant, pour des tensions supérieures à 7,5 kV.

**Influence de la tension appliquée**

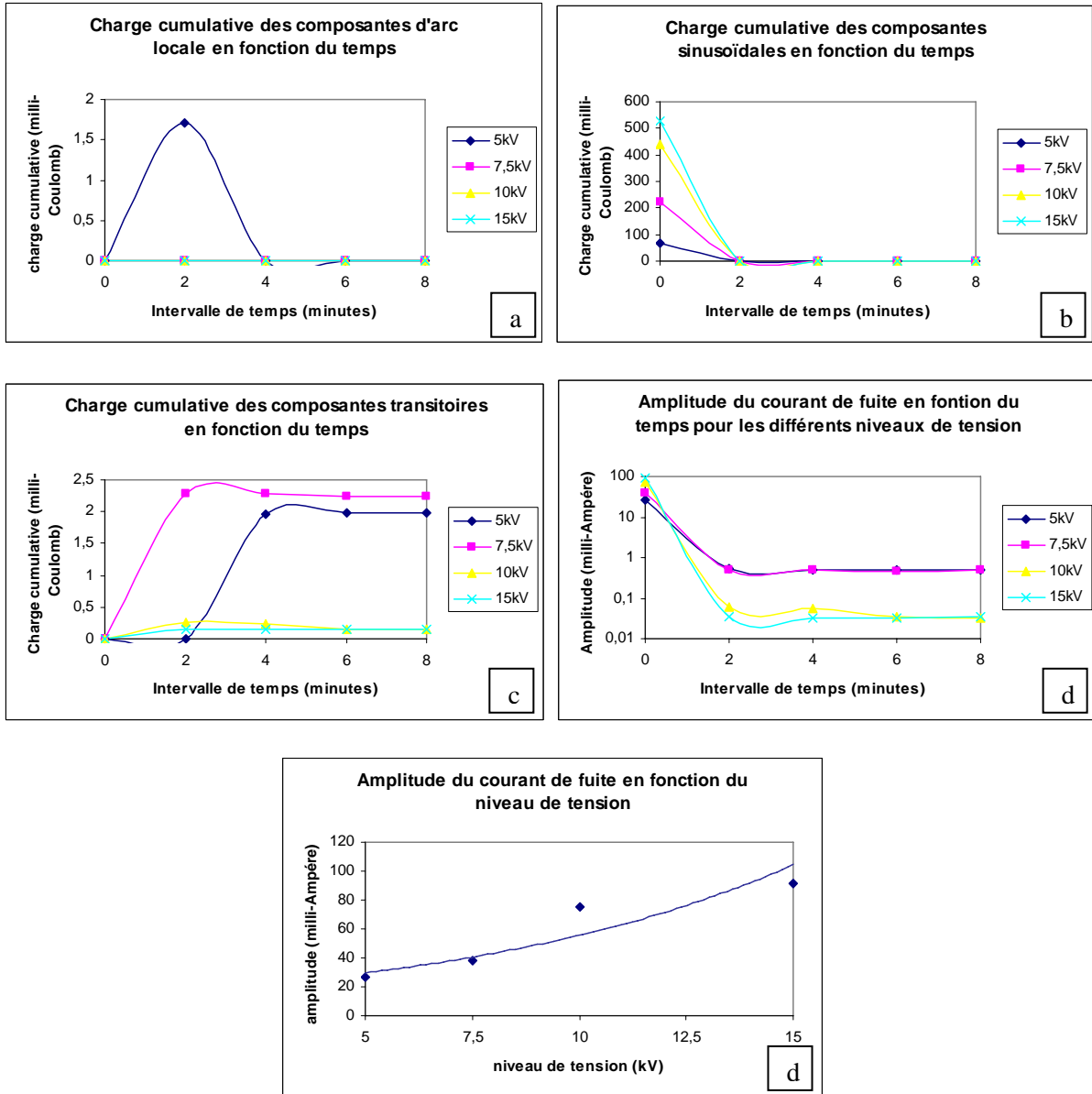


Figure IV.28. Influence de la contrainte électrique ; (a) Charge cumulative de la composante sinusoïdale ; (b) Charge cumulative de la composante transitoire ; (c) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps ; (d) Amplitude du courant de fuite en fonction du niveau de tension.

Nous remarquons que le niveau de tension influe effectivement sur le niveau de la charge cumulative et l'amplitude du courant de fuite, aussi bien pour le premier instant que pour tous les instants qui suivent. Sur le graphe des amplitudes de courant de fuite, nous remarquons que la pente de variation de la fonction courant en fonction de la tension appliquée  $I(U)$  augmente.

## IV.3.2.5. Couche de pollution de conductivité 50 mS/cm

## Niveau de tension de 5 kV

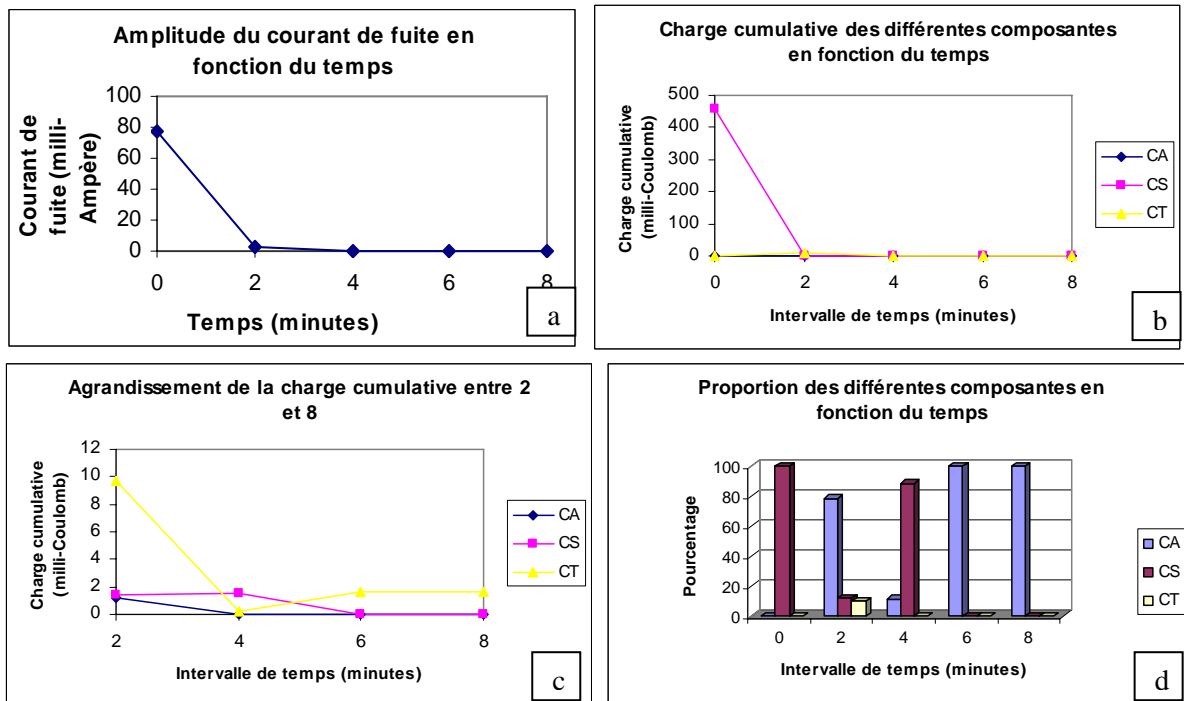


Figure IV.29. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Dans ce cas, le premier instant est marqué par la présence de la composante sinusoïdale en totalité, puis il y a déformation de la forme du courant de fuite, d'où l'apparition de la composante transitoire, en grande partie, durant le deuxième instant. L'apparition de la composante sinusoïdale est peut être due à la forte intensité du champ électrique existant au niveau de la triple jonction (eau air isolant solide).

Niveau de tension de 10 kV

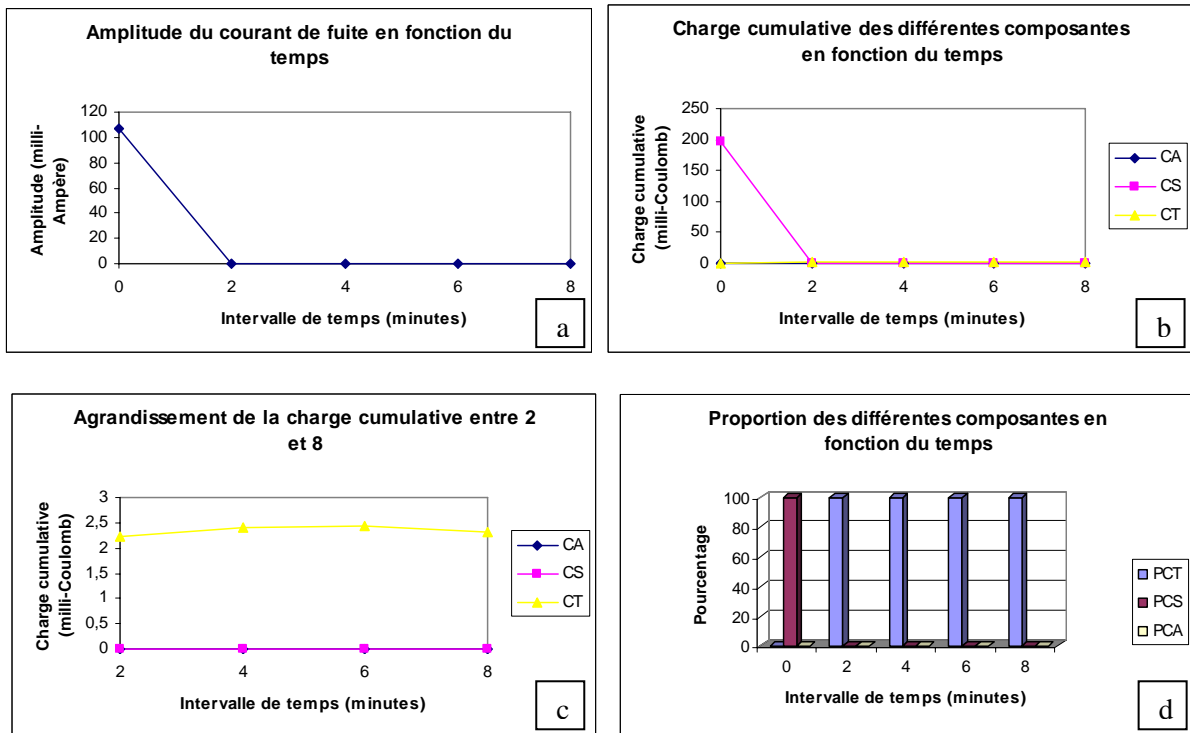


Figure IV.30. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulée des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulée ; (d) proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Dans ce cas, nous remarquons la présence de la composante sinusoïdale pendant le premier instant, sa présence durant cet instant est prévisible vu la conductivité de la couche humidifiée, la présence de la composante transitoire en grande proportion est due à l'assèchement partiel après apparition des arcs locaux.

Niveau de tension de 12,5 kV

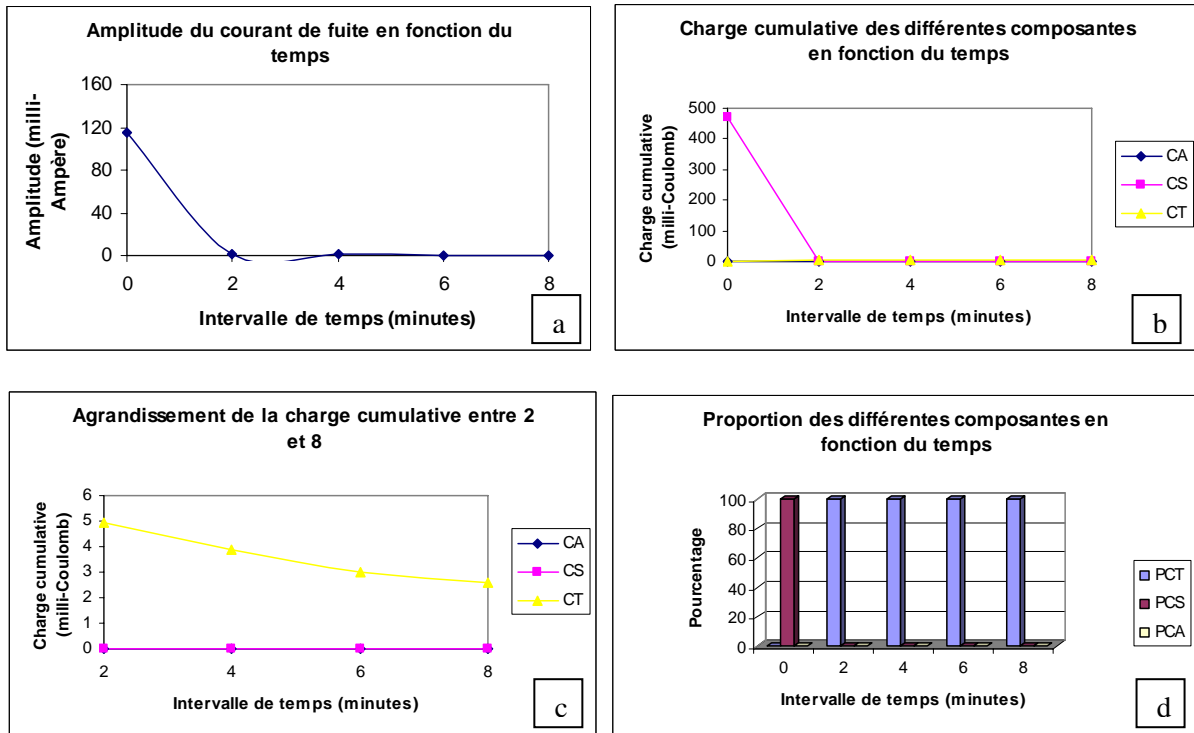
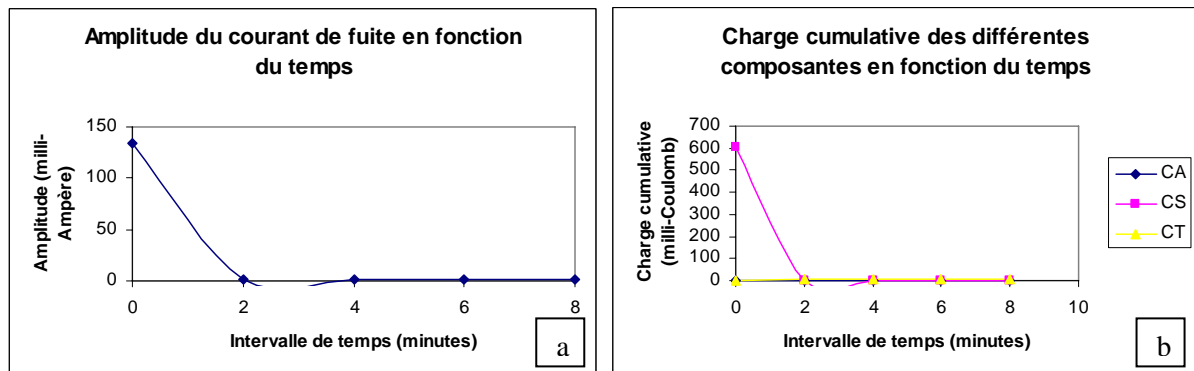


Figure IV.31. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Niveau de tension de 15 kV





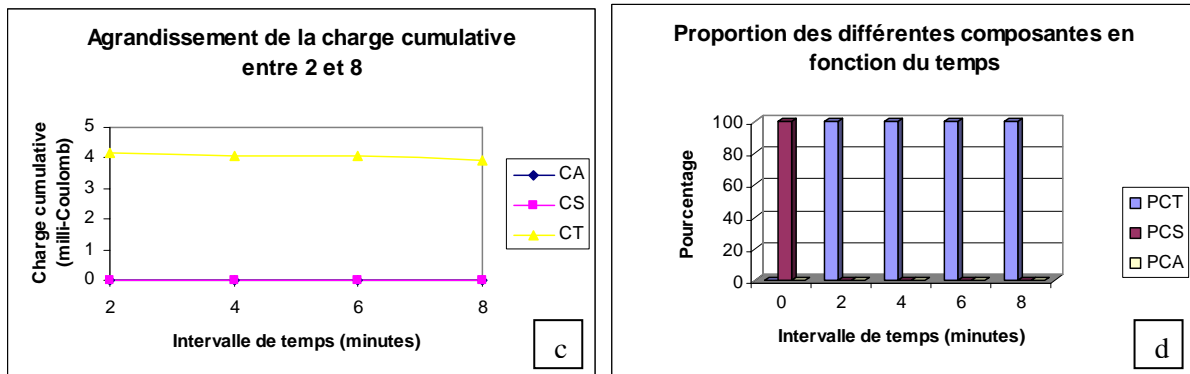


Figure IV.32. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Pour les trois derniers niveaux de tension, nous remarquons que les deux composantes apparaissent aux mêmes instants avec les mêmes proportions, les décharges sont de courtes durées et ont lieu entre le premier et le deuxième instant à cause de la sévérité élevée de la pollution ; d'où l'apparition de la composante transitoire dès le deuxième instant et l'absence de la composante d'arc local au deuxième instant.

**Influence de la tension appliquée**

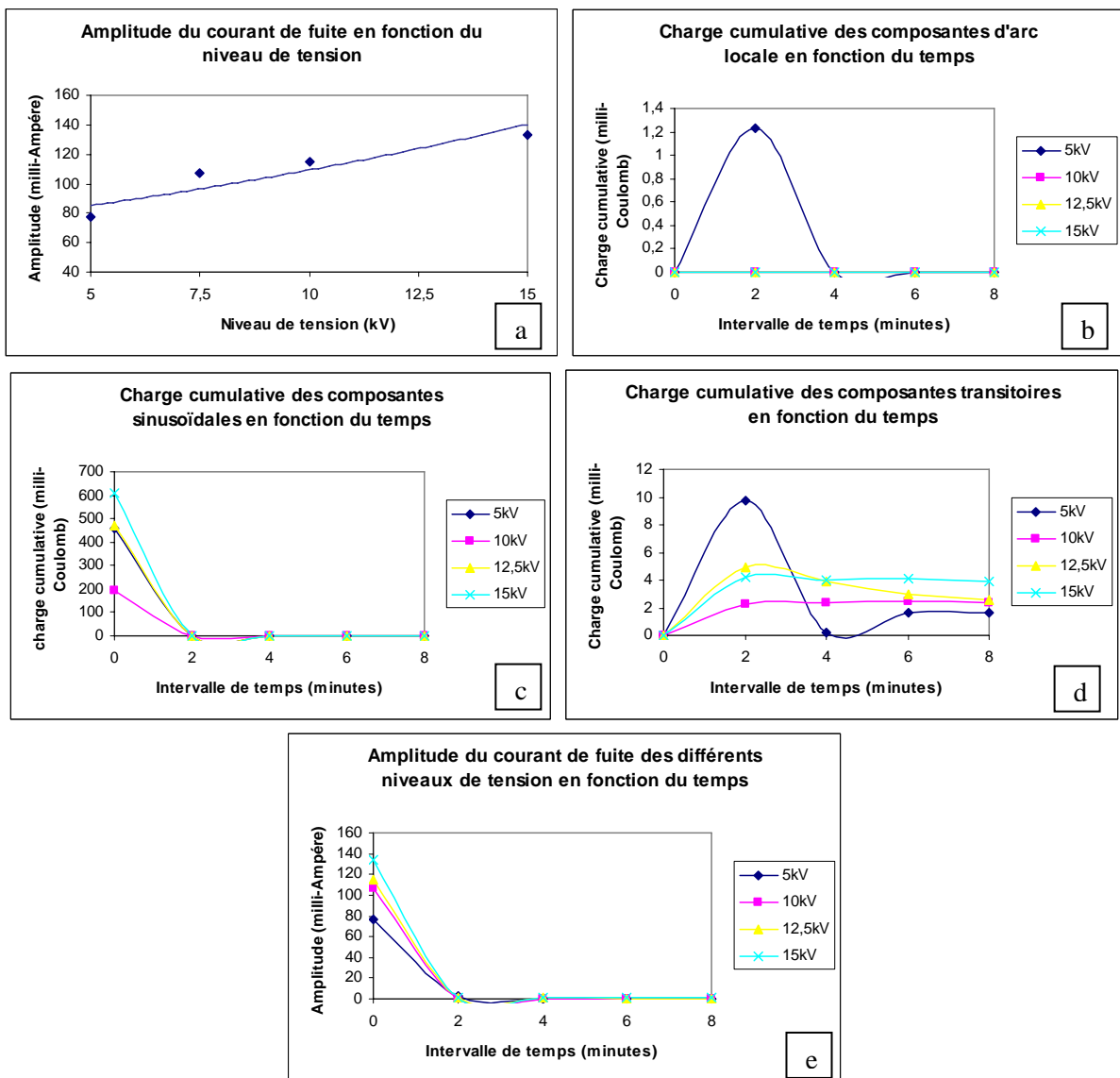


Figure IV.33. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée ; (b) Charge cumulative de la composante d'arc local en fonction du temps ; (c) Charge cumulative de la composante sinusoïdale en fonction du temps ; (d) Charge cumulative de la composante en fonction du temps ; (e) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps pour différents niveaux de tension.

L'amplitude du courant de fuite augmente en fonction de l'augmentation du niveau de tension appliquée. La composante sinusoïdale est dominante durant le premier instant dans tous les cas de figures considérés, puis il y a apparition de la composante transitoire seule à partir du deuxième instant, à l'exception du niveau 5 kV, car pour ce niveau de tension, la durée des décharges a été suffisamment longue pour être enregistrée au deuxième instant ; ce qui n'est pas le cas pour les autres niveaux plus élevés, où la durée des décharges est courte.

### IV.3.3 Discussion

#### 1. Conductivité faible ( $9.5\mu\text{S/cm}$ ) ;

- Pour un niveau de tension de 5 kV, le premier instant est caractérisé par la présence de la composante transitoire, le signal de courant apparaît avec des distorsions. Donc un tel niveau de tension (5 kV) et une telle conductivité ( $9.5\mu\text{S/cm}$ ) ne favorisent pas la circulation d'un courant sinusoïdal sur la surface de l'isolateur. Le deuxième et le troisième instant sont caractérisés par la présence de la composante d'arc local et transitoire ; l'apparition de la composante d'arc local a lieu après le léger assèchement provoqué par la composante transitoire du premier instant. Au quatrième instant, nous remarquons qu'il y a présence de la composante sinusoïdale due à la déformation des gouttelettes discrètes d'eau se trouvant sur la surface de l'isolateur, sous l'effet du champ électrique appliqué. Au début, les gouttelettes ont une forme semi-aigüe, l'isolation électrique est maintenue entre les gouttelettes, sous l'effet du champ électrique, ces gouttelettes prennent la forme semi-ovale. Le champ électrique au niveau de la triple jonction (eau-air-isolant solide) devient plus intense au fur et à mesure que les gouttelettes d'eau se déforment [68], d'où la circulation d'un courant sinusoïdal à travers la surface de l'isolateur ;

- Pour des niveaux de tension allant de 10 kV à 15 kV, le premier instant est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale en totalité, le champ électrique au niveau de la triple jonction est suffisamment intense pour causer le passage d'un courant sinusoïdal, les instants qui suivent sont caractérisés par la présence des trois composantes, la composante d'arc local persiste jusqu'au dernier instant ;

- Pour le niveau de tension 20 kV, le premier instant est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale en grande proportion et de la composante transitoire (en faible proportion). A partir du deuxième instant, il y a apparition de la composante transitoire seule, après l'assèchement partiel causé par les arcs locaux entre le premier et le deuxième instant, ces arcs sont de courtes durées à cause du niveau de tension élevé (taux d'assèchement plus rapide) ;

L'apparition de la composante sinusoïdale nécessite la présence d'un champ électrique suffisamment intense entre les gouttelettes, l'instant d'apparition des arcs locaux ainsi que leurs durées sont fonction du niveau de tension appliqué pour une conductivité donnée.

#### 2. Conductivité intermédiaire (10 et 20 mS/cm) ;

- Pour le niveau de tension 5 kV, le premier instant est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale et transitoire. Pour la première conductivité (10 mS/cm), les instants qui suivent sont caractérisés par la présence de la composante transitoire, tandis que pour la deuxième conductivité (20 mS/cm) le courant est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale seule, au premier instant, le deuxième instant, de cette conductivité (20 mS/cm), est marqué par la présence de la composante d'arc local, les instants qui suivent sont caractérisés par la présence de la composante transitoire seule pour les deux conductivités ;

- Pour les niveaux de tension allant de 10 à 20 kV, pour la majorité des cas, le premier instant est caractérisé par la composante sinusoïdale. A partir du deuxième

instant, le courant est caractérisé par la présence de la composante transitoire seule, sauf pour les cas 7,5 et 15 kV (20 mS/cm), qui marquent, en plus, la présence de la composante d'arc local. Dans ces cas, la durée des arcs locaux est suffisamment longue pour être encore présents au deuxième instant, ceci est peut être dû à une forte pulvérisation de notre part, de la solution polluante sur la surface de l'isolateur ;

Dans ce cas d'une conductivité modérée, l'intensité du champ au niveau de la triple jonction est suffisante pour faire circuler un courant sinusoïdal et cela pour pratiquement tout les niveaux de tension étudiés, les arcs locaux ont lieu entre le premier et le deuxième instant pour pratiquement la majorité des cas, à cause de l'assèchement partiel causé par la composante sinusoïdale menant à l'apparition des bandes sèches de dimensions suffisantes pour favoriser l'apparition des arcs locaux.

### 3. Conductivité élevée (30, 50 mS/cm) ;

Dans le cas d'une telle sévérité de pollution, le courant du premier instant est caractérisé par la composante sinusoïdale pour tous les niveaux de tension étudiés (de 5 à 15 kV),

- Pour le niveau de tension (5 kV), le deuxième instant est caractérisé par la présence de la composante d'arc local (sa proportion dans le cas de la deuxième conductivité (50 mS/cm) est moins importante que dans le cas de la première (30 mS/cm)), la durée des arcs locaux est suffisamment longue, pour ce niveau de tension et pour cette sévérité de pollution, pour être enregistrée au deuxième instant ;

- Pour le niveau de tension allant de 7,5 à 15 kV, le courant est caractérisé par la présence de la composante transitoire seule à partir du deuxième instant, il y a déformation de la forme d'onde du signal du courant de fuite et un assèchement plus rapide de la surface de l'isolateur.

Dans le cas d'une sévérité de pollution élevée, le champ électrique du premier instant est suffisamment intense (à partir d'une tension appliquée de 5 kV) pour favoriser la circulation d'un courant sinusoïdal. La durée de la composante d'arc local diminue avec l'augmentation de la tension, ces arcs commencent quelques secondes après la mise sous tension. L'intensité du champ au niveau de la triple jonction dépend à la fois du niveau de tension appliqué et de la conductivité de la couche de pollution, lorsque l'intensité de ce champ dépasse un certain niveau de tension il y a apparition de la composante sinusoïdale.

#### IV.3.4. Influence de la conductivité

La figure IV.34 représente les variations de l'amplitude du courant de fuite en fonction du niveau de tension appliquée et cela pour les différentes conductivités utilisées.

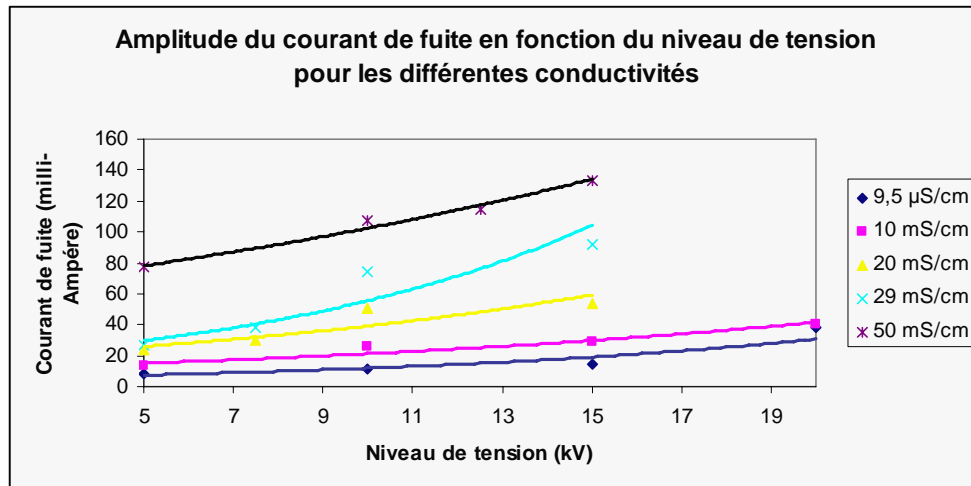


Figure IV.34. Variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction du niveau de tension appliquée pour les différentes conductivités utilisées.

Nous constatons que l'amplitude du courant de fuite augmente en fonction du niveau de la tension appliquée et de la conductivité de la couche polluante. Cela montre l'importance de l'étude de l'état de surface de l'isolateur en fonction de la contrainte climatique. L'influence de la conductivité est importante ; il est visible que le courant de fuite augmente avec l'augmentation de la conductivité.

### IV.3.4. Cas du modèle de laboratoire

Afin d'obtenir une corrélation entre l'état de surface d'un matériau isolant et les informations tirées du signal du courant de fuite, nous effectuons une série d'essais au laboratoire de haute tension à l'ENP sur un modèle plan.

Cette corrélation permet de connaître l'état de surface du matériau et donc de proposer une solution afin de prévenir tout risque de contournement. Cela nous permet aussi de valider notre modèle par la comparaison des résultats de ces essais avec les résultats trouvés sur un isolateur réel.

Ces essais concernent, d'une part, la détermination des tensions de contournement du modèle, d'autre part, l'acquisition du courant de fuite et ceci pour différentes conductivités, et à différents instants après la mise sous tension (en ce qui concerne le courant de fuite).

Les essais ont été effectués suivant le mode opératoire précédent. Les résultats obtenus sont présentés dans ce qui suit :

#### IV.3.4.1. Couche de pollution de conductivité $9.5 \mu\text{S/cm}$

##### Niveau de tension de 5 kV

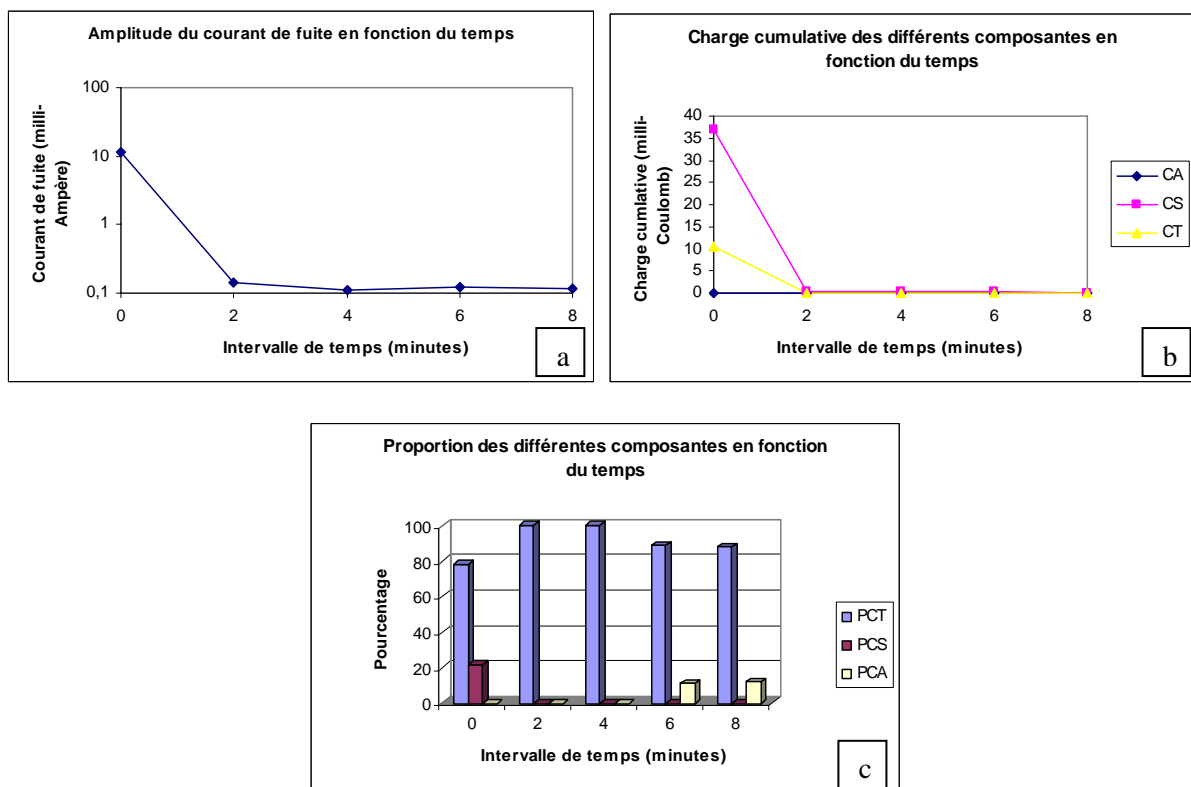


Figure IV.35. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Dans ce cas (Figure IV.35.c), le courant est caractérisé, au premier instant, par la présence de la composante transitoire (en grande proportion) et de la composante sinusoïdale (qui apparaît en faible proportion). Le deuxième et le troisième instant sont caractérisés par la présence de la composante transitoire seule. Nous remarquons aussi que les arcs locaux

prennent naissance à partir de l'instant quatre (apparition de la composante d'arc local), à cet instant les bandes sèches ont des dimensions suffisantes pour favoriser les décharges.

### Niveau de tension de 10 kV

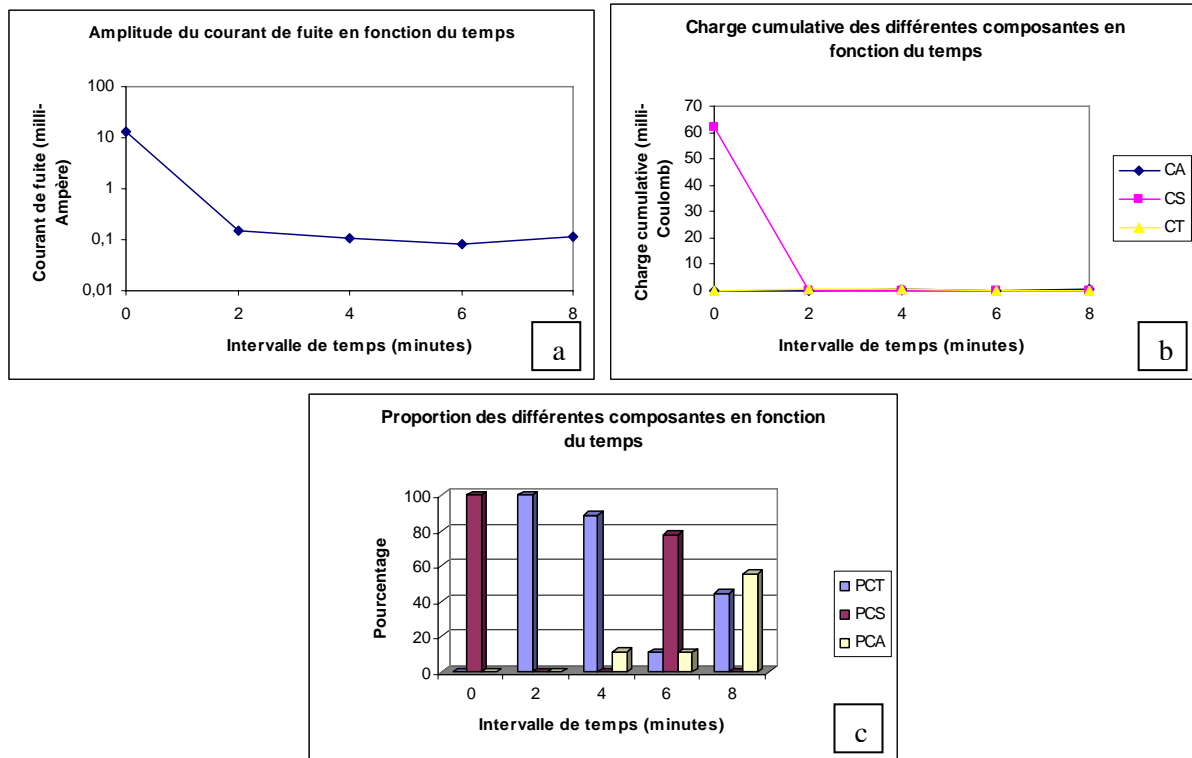


Figure IV.38. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Pour ce niveau de tension, le premier instant est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale, en totalité, qui cause un léger assèchement de la surface et par suite la déformation du courant de fuite, d'où la présence de la composante transitoire en totalité à partir du deuxième instant jusqu'au troisième instant. A partir du quatrième instant, les dimensions des bandes sèches sont suffisantes pour favoriser des décharges (apparition des proportions de la composante d'arc local (Figure IV.38.c)) ; l'apparition de la composante sinusoïdale à l'instant quatre est peut être due à l'augmentation du champ électrique entre gouttelettes après leurs déformation.

**Niveau de tension de 15 kV**

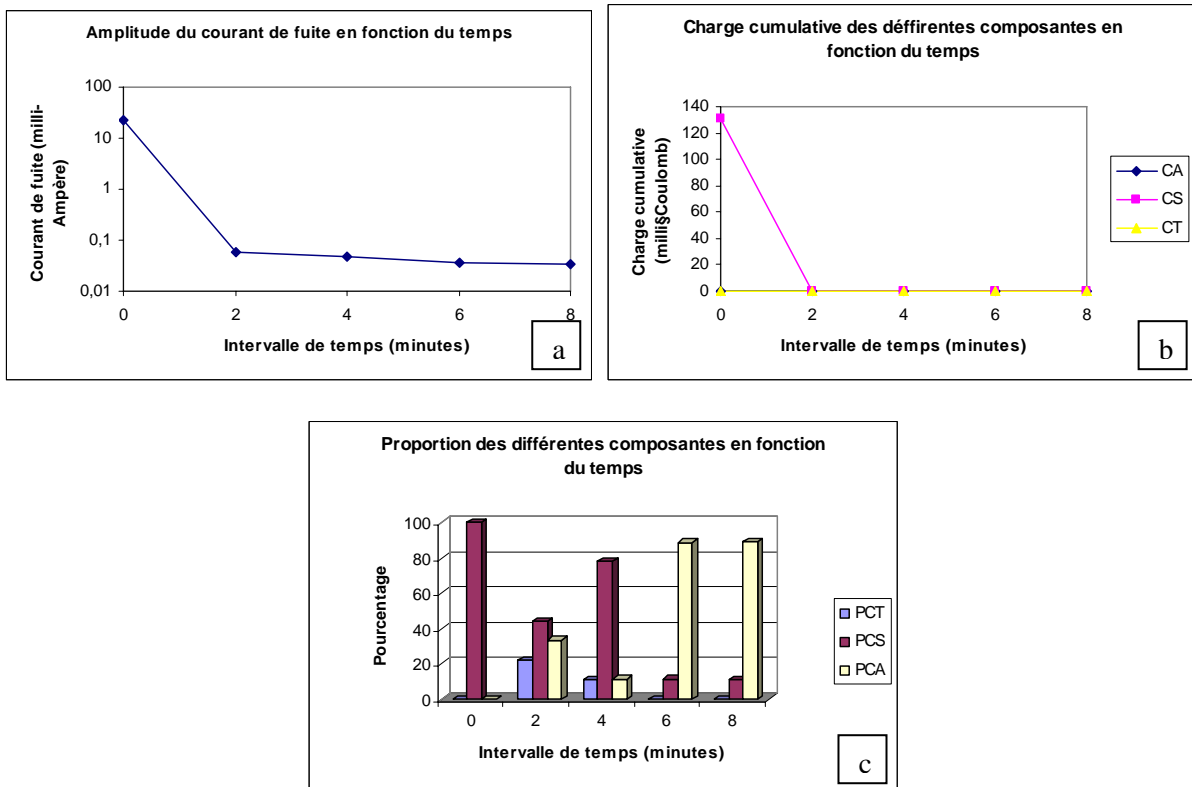
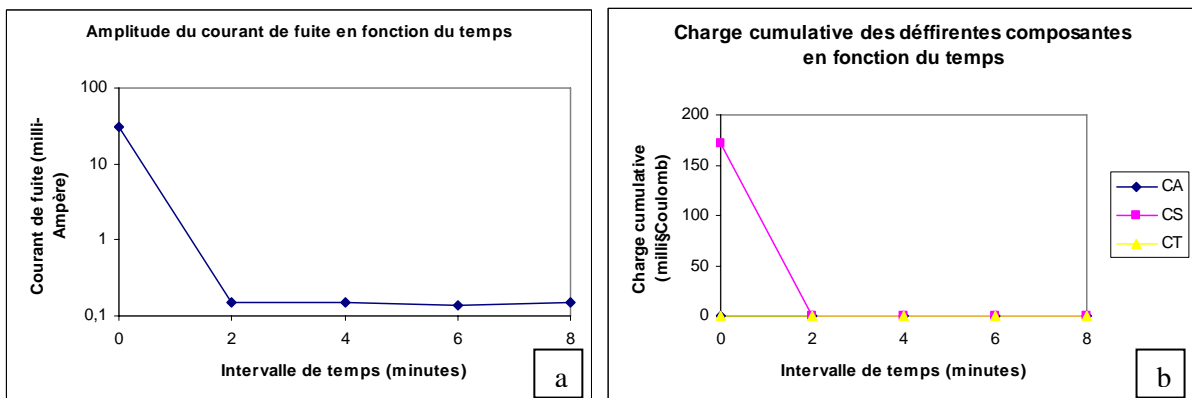


Figure IV.39. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Pour ce niveau de tension, le courant est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale en totalité, cette composante est présente pendant toute la séquence d'enregistrement. Nous remarquons aussi que la composante d'arc local est présente à partir du deuxième instant, la proportion de cette composante varie en fonction du temps (elle diminue d'abord puis elle augmente) ; cela explique la discontinuité de l'intensité du bruit émis par les décharges.

**Niveau de tension de 20 kV**





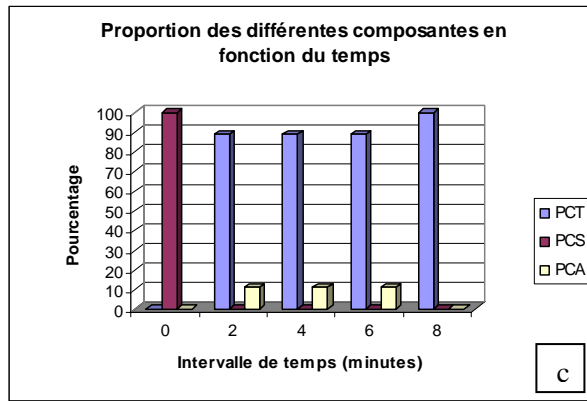


Figure IV.40. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Pour ce niveau de tension, nous remarquons que le premier instant est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale ; ceci est suivi d'une série de composantes transitoires accompagnées d'une légère proportion de la composante d'arc local (Figure IV.40.c).

**Influence du niveau de tension appliquée**

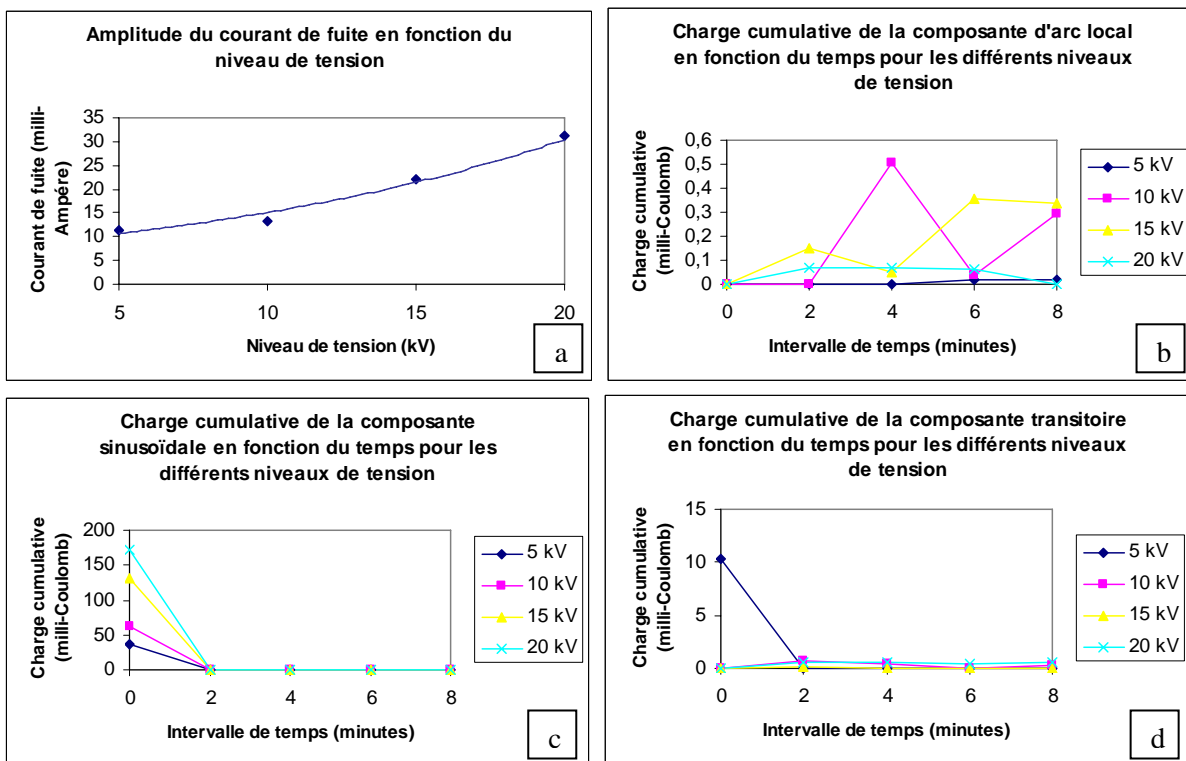


Figure IV.41. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée ; (b) Charge cumulative de la composante d'arc local en fonction du temps ; (c) Charge cumulative de la composante sinusoïdale en fonction du temps ; (d) Charge cumulative de la composante transitoire en fonction du temps.

La variation de l'amplitude du courant de fuite augmente avec l'augmentation de la tension. Cette variation est de forme exponentielle ; la composante sinusoïdale est présente au premier instant dans la totalité des cas, l'apparition de la composante d'arc local a lieu à

l'instant quatre pour le niveau 5 kV, l'instant trois pour le niveau 10 kV et l'instant deux pour les deux derniers niveaux de tensions appliquées (Figure IV.41.a).

### Conclusion

La variation de l'impédance surfacique du modèle varie d'une manière exponentielle décroissante ; l'augmentation de la tension fait apparaître des arcs locaux, plutôt.

#### IV.3.4.2. Couche de pollution de conductivité 10 mS/cm

L'étude a été effectuée pour différents niveaux de tension.

##### Niveau de tension de 5 kV

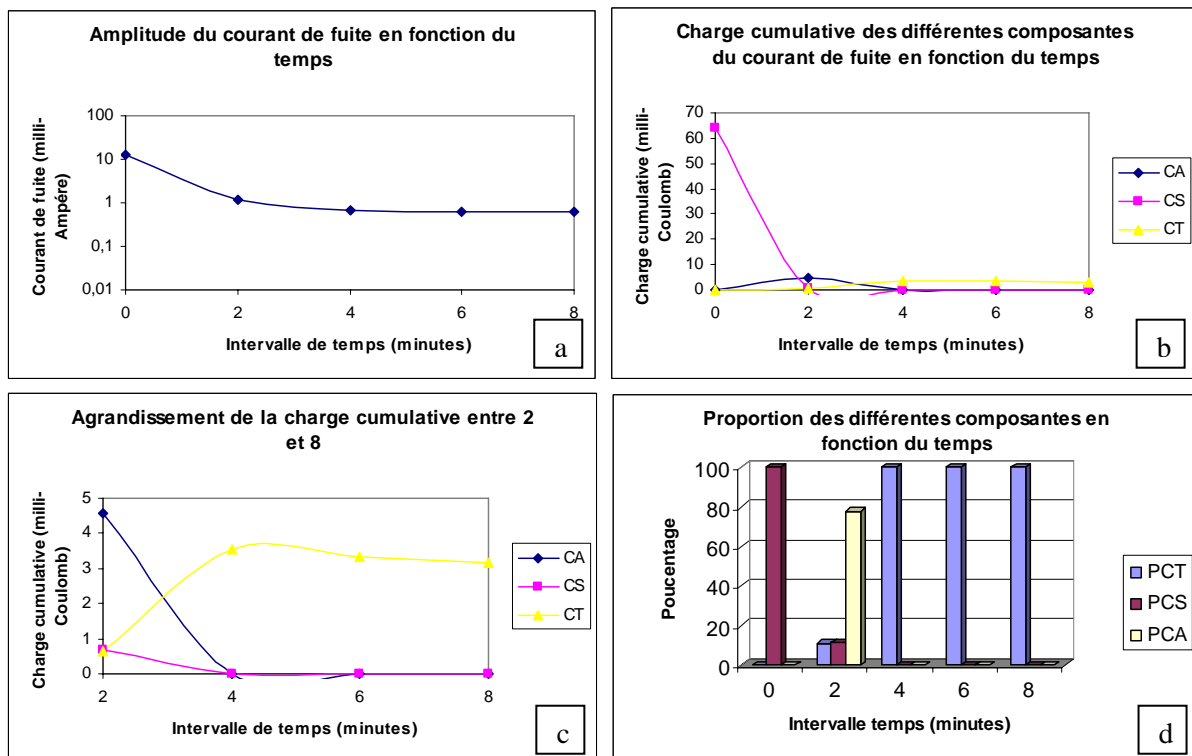


Figure IV.42 (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Nous remarquons que la composante sinusoïdale est présente, seule, pendant le premier instant à cause de la couche continue d'humidité, puis durant le second instant, il y a apparition des composantes transitoires et d'arc local (Figure IV.42.c). Les arcs locaux causent l'assèchement partiel de la surface du modèle (autour de l'électrode haute tension); à partir de l'instant trois, la composante transitoire domine et les deux autres s'annulent ; c'est cette composante transitoire qui cause par la suite l'assèchement total de la surface du modèle. L'amplitude du courant de fuite diminue avec le temps et tend vers des valeurs faibles.

Niveau de tension de 10 kV

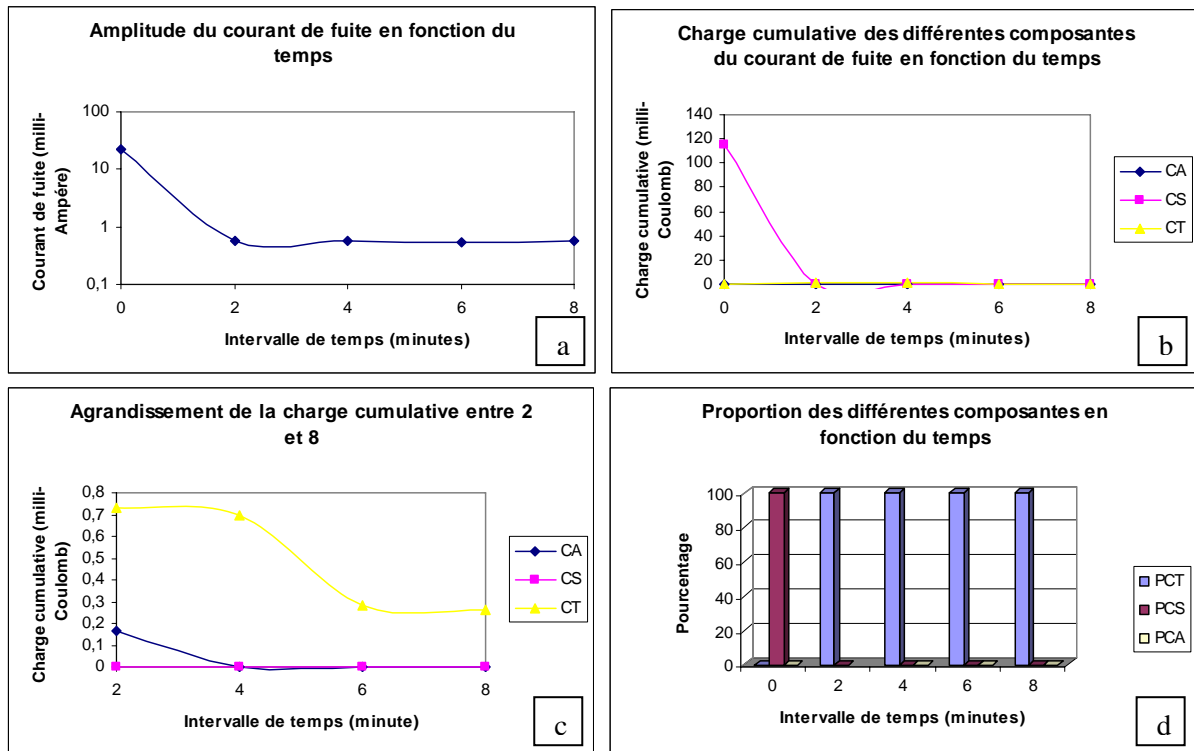


Figure IV.43. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

La composante sinusoïdale est présente, seule, pendant le premier instant. Le second instant est marqué par la présence de la composante transitoire et celle d'arc local. A partir du troisième instant, la composante transitoire apparaît seule après l'assèchement causé par les arcs locaux. L'amplitude du courant de fuite chute de plusieurs milli-Ampères à moins d'un milli-Ampère, ce qui traduit l'assèchement de la surface polluée (évaporation de l'électrolyte).

Niveau de tension de 15 kV

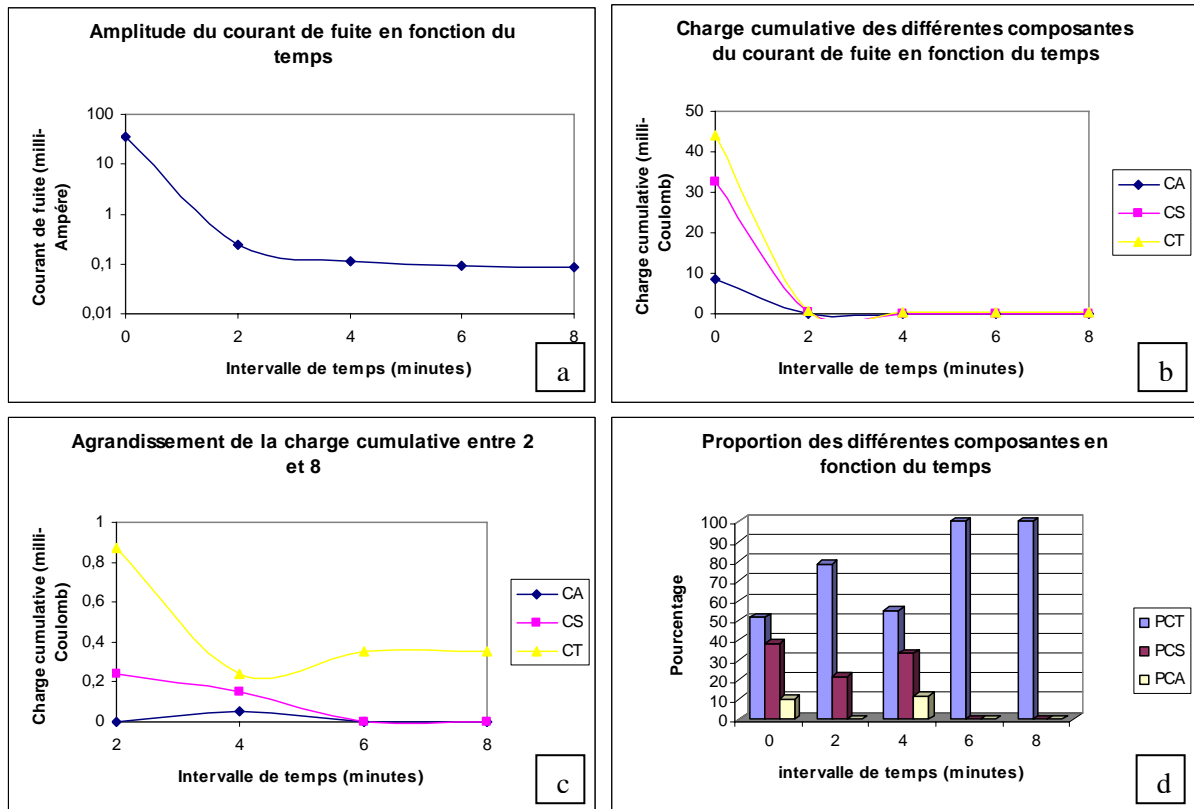


Figure IV.44. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulée des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulée (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Il y a apparition des trois différentes composantes durant le premier et le troisième instant ; tandis que pour les instants qui suivent, la composante d'arc local et la composante sinusoïdale s'annulent ce qui traduit l'assèchement partiel autour de l'électrode haute tension. Après cet instant, il y a apparition de la composante transitoire seule (Figure IV.44.d).

Niveau de tension de 20 kV

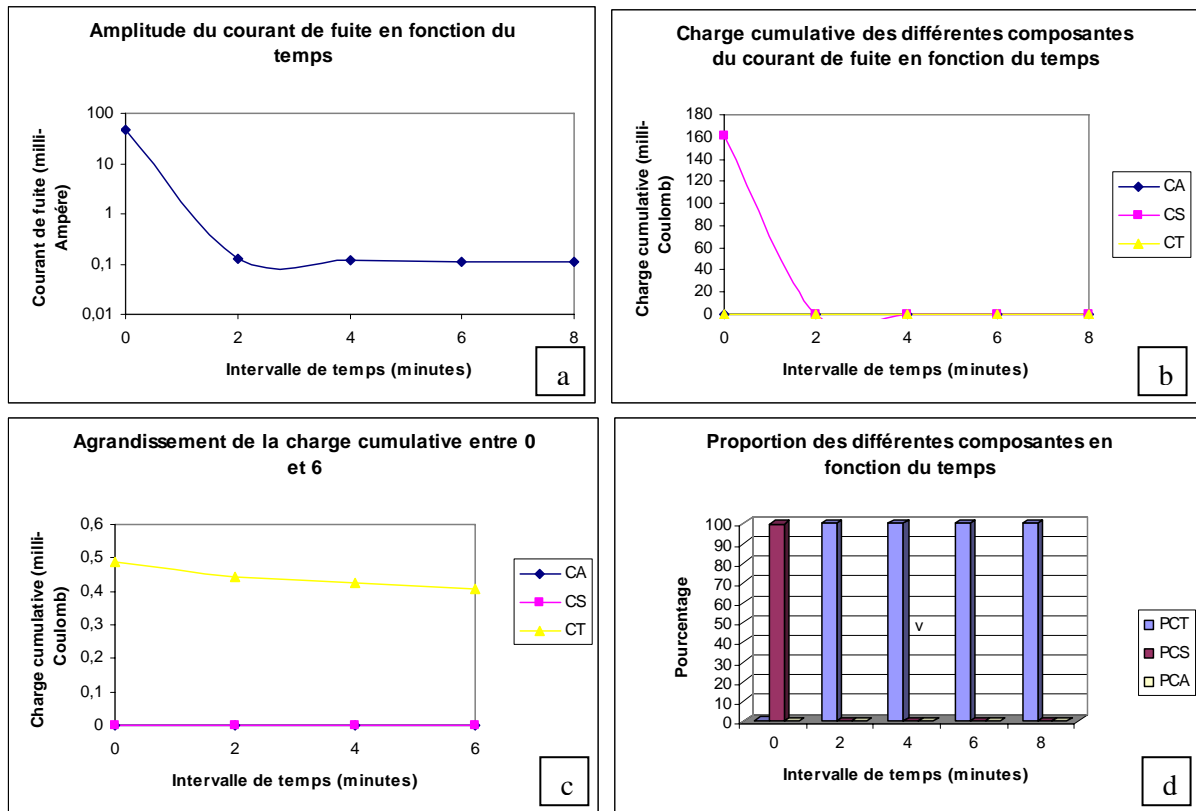


Figure IV.45. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Pendant le premier instant, il n'y a que la composante sinusoïdale qui est présente. Dès le deuxième instant, elle s'éteint et laisse place à la composante transitoire qui reste seule jusqu'au dernier instant; cela est due à l'assèchement partiel de la couche polluante autour de l'électrode haute tension entre le premier et le second instant sous l'effet des arcs locaux qui sont de courte durée. Quant à l'amplitude du courant de fuite, elle chute brusquement entre le premier et le deuxième instant (Figure IV.45.a).

**Influence du niveau de tension appliquée**

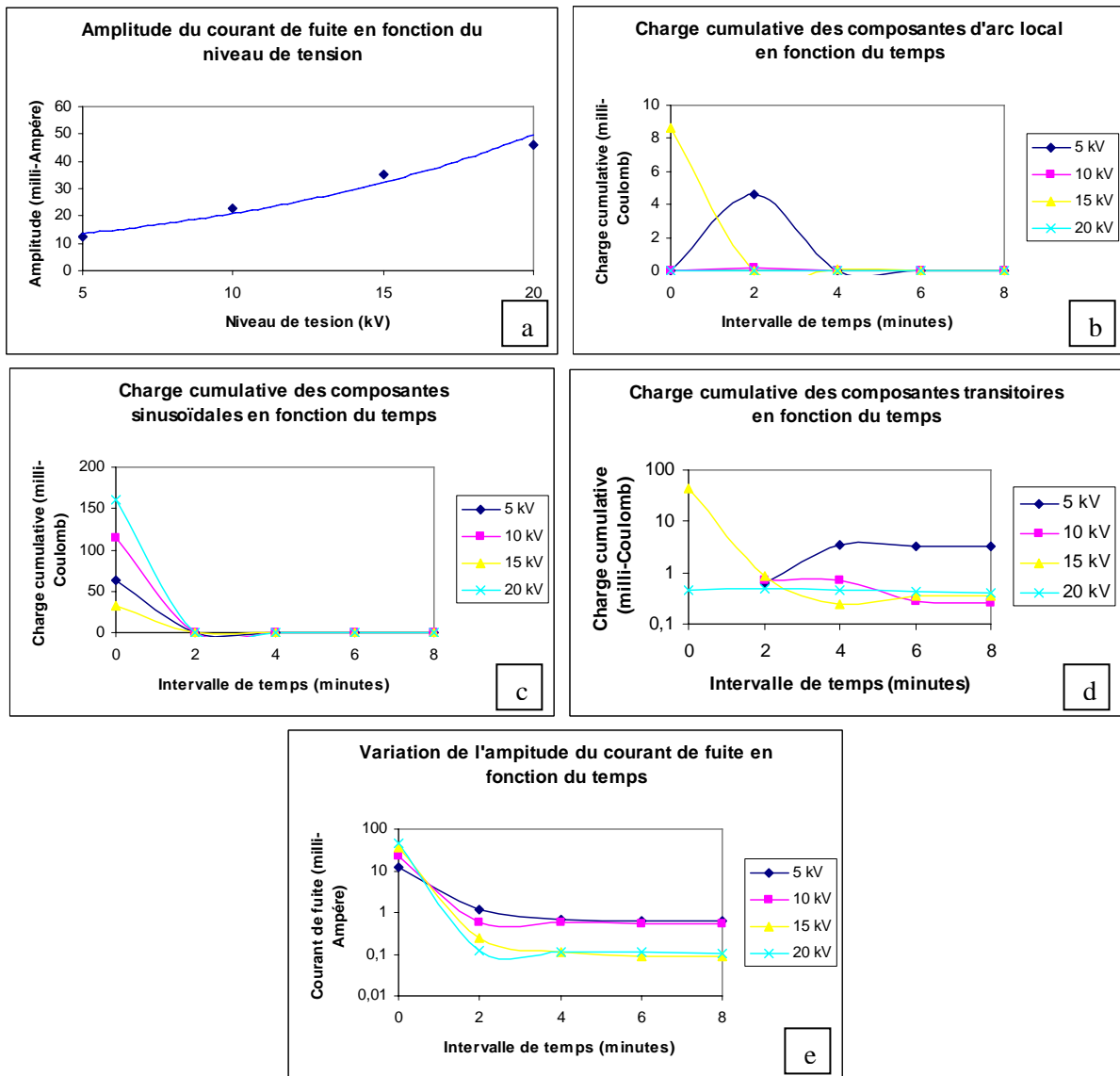


Figure IV.46. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée ; (b) Charge cumulative de la composante d'arc local en fonction du temps ; (c) Charge cumulative de la composante sinusoïdale en fonction du temps ; (d) Charge cumulative de la composante transitoire en fonction du temps ; (e) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps.

Au premier instant, l'amplitude du courant de fuite ainsi que la charge cumulative des différentes composantes augmentent avec l'augmentation de la tension d'alimentation (Figure IV.46.a). Pour les niveaux de tension élevés, les composantes transitoires et d'arc local apparaissent plutôt, ceci est dû à un assèchement plus rapide de la surface polluée (en raison d'un courant de fuite plus élevé).

**Conclusion**

La variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée est de forme exponentielle (Figure IV.46.a). Après assèchement de la surface du modèle, il y a inversion de la variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée (plus la tension appliquée augmente plus l'amplitude de courant de fuite diminue). Pour des

niveaux de tension élevés, la composante d'arc local apparaît plutôt, avec une durée moins importante.

#### IV.3.4.3. Couche de pollution de conductivité 20 mS/cm

##### Niveau de tension de 5 kV

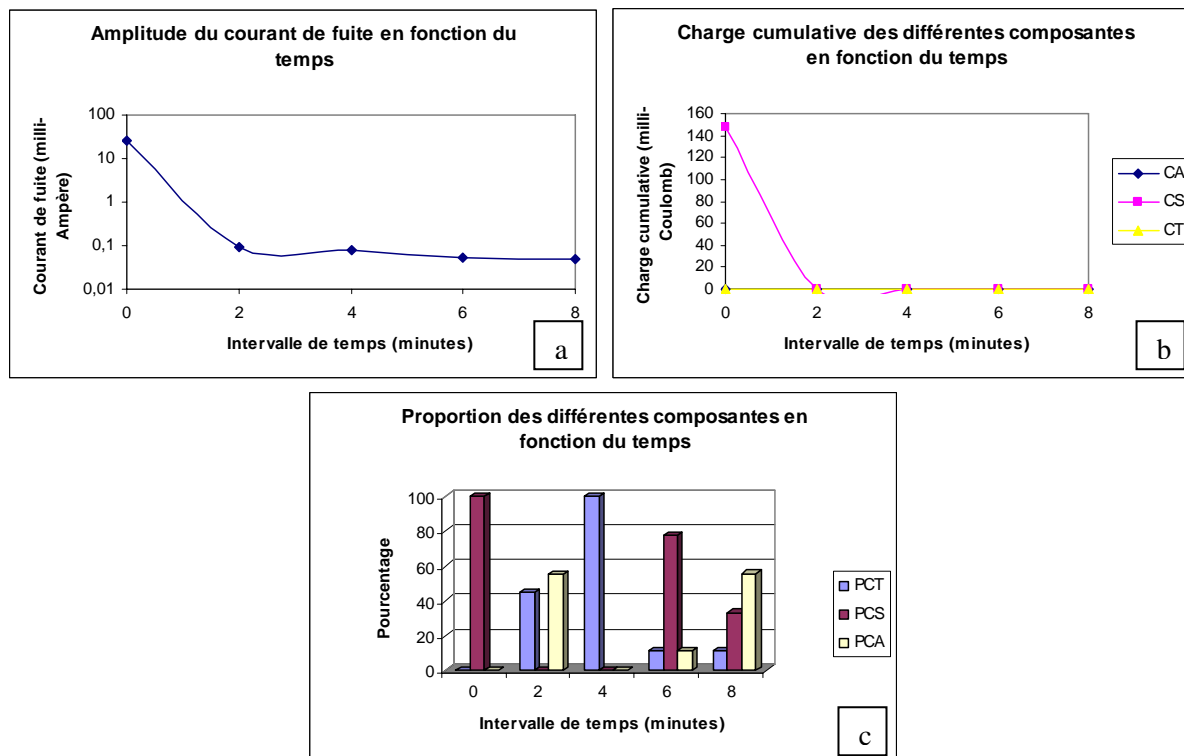


Figure IV.47. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

La composante sinusoïdale apparaît en totalité pendant le premier instant. En effet, dans ce cas, nous avons la présence d'un film d'humidité continu et de conductivité suffisante pour favoriser la circulation d'un courant sinusoïdal sur la surface du modèle. Quant au deuxième instant, nous sommes en présence de la superposition des deux autres composantes (d'arc local et transitoire). Pendant l'instant suivant (instant trois), la composante transitoire apparaît seule. L'instant cinq est dominé par la composante sinusoïdale et par la réapparition de la composante d'arc local en faible proportion (qui est de même ordre de grandeur que celle de la composante transitoire). Cette réapparition traduit le bruit discontinu émis par les décharges lors de l'application de la tension. Le courant obtenu lors du dernier instant est dominé par la composante d'arc local, la présence de la composante sinusoïdale peut être due à la déformation des gouttelettes qui forment des chemins conducteurs. Nous remarquons aussi que le courant de fuite diminue brusquement dès le deuxième instant.

Niveau de tension de 7,5 kV

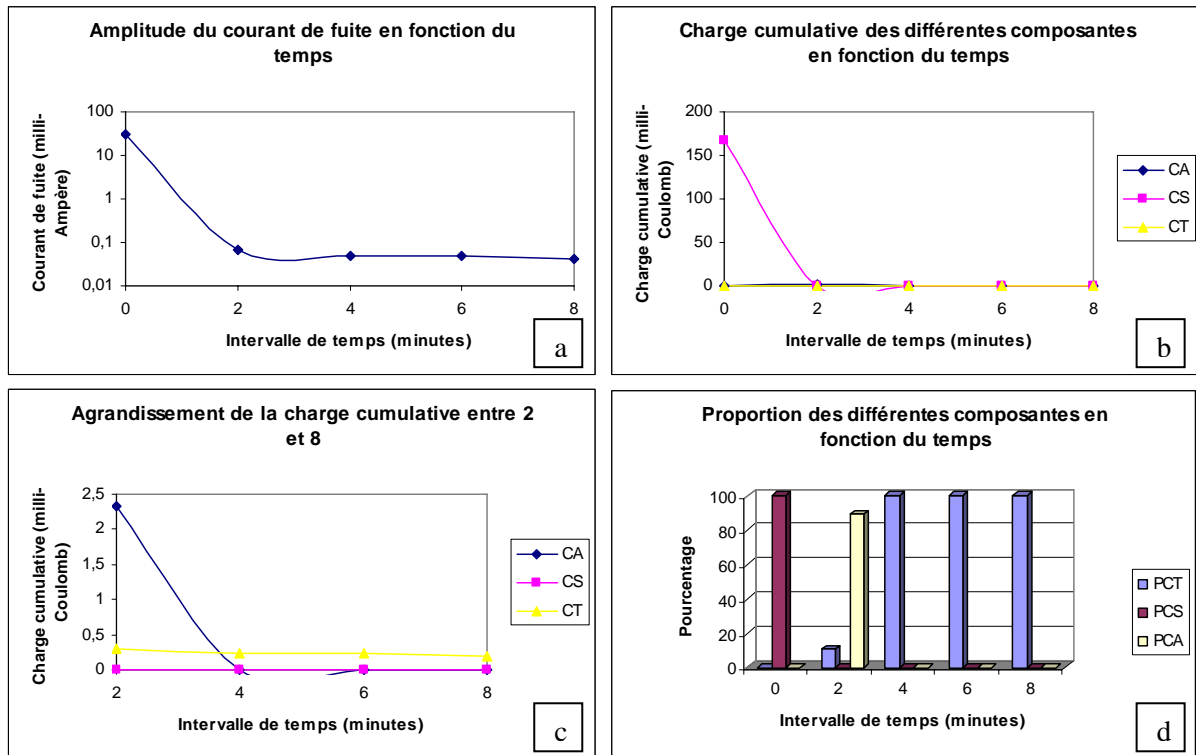


Figure IV.48. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Durant le premier instant, la composante sinusoïdale apparaît en totalité (Figure IV.48.d) ; nous remarquons, néanmoins, la présence de la composante transitoire. Au deuxième instant, la composante d'arc local domine celle transitoire ; cela traduit l'assèchement de la couche conductrice provoqué par les décharges. Au bout du troisième instant, il ne reste que la composante transitoire, alors que l'amplitude du courant de fuite chute brusquement et tend presque à s'annuler, pour la même raison que précédemment.



## Niveau de tension de 10 kV

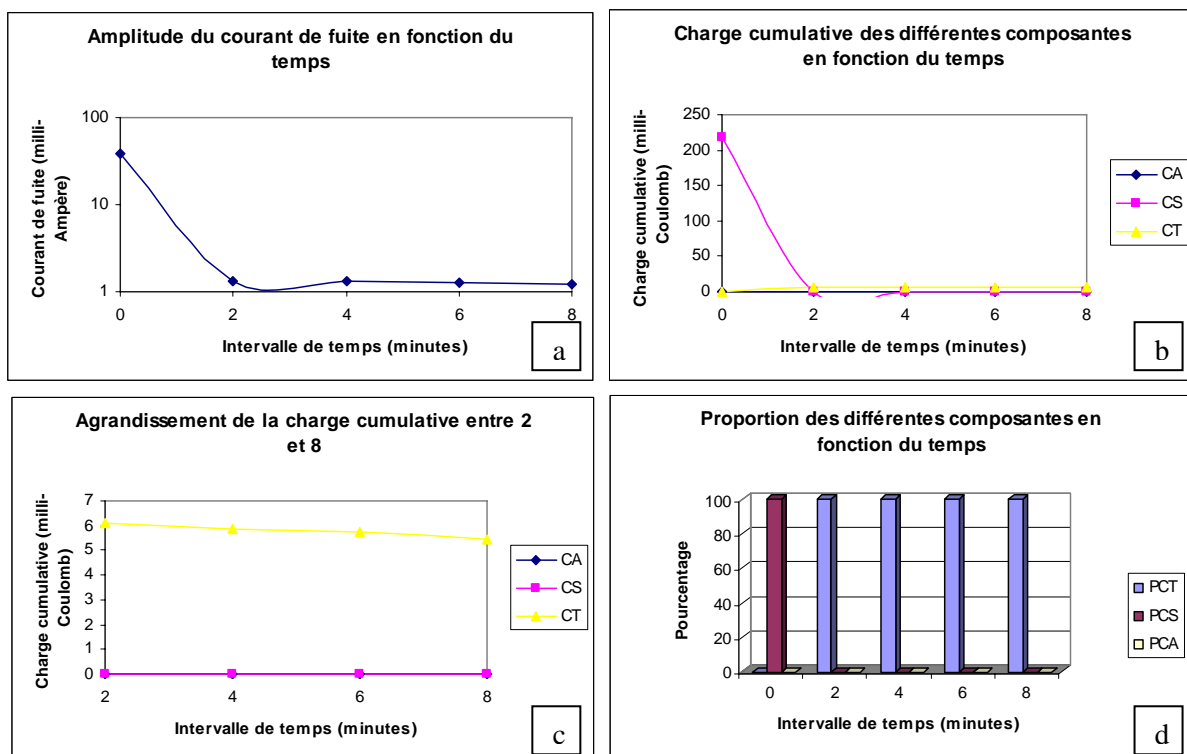


Figure IV.49. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Pour ce niveau de tension, il n'y a que deux composantes qui apparaissent sur les signaux enregistrés ; la composante sinusoïdale durant le premier instant puis la composante transitoire qui apparaît au deuxième instant et ce jusqu'au dernier. Le courant et la charge cumulative diminuent en fonction du temps d'application de la tension.

## Niveau de tension de 15 kV

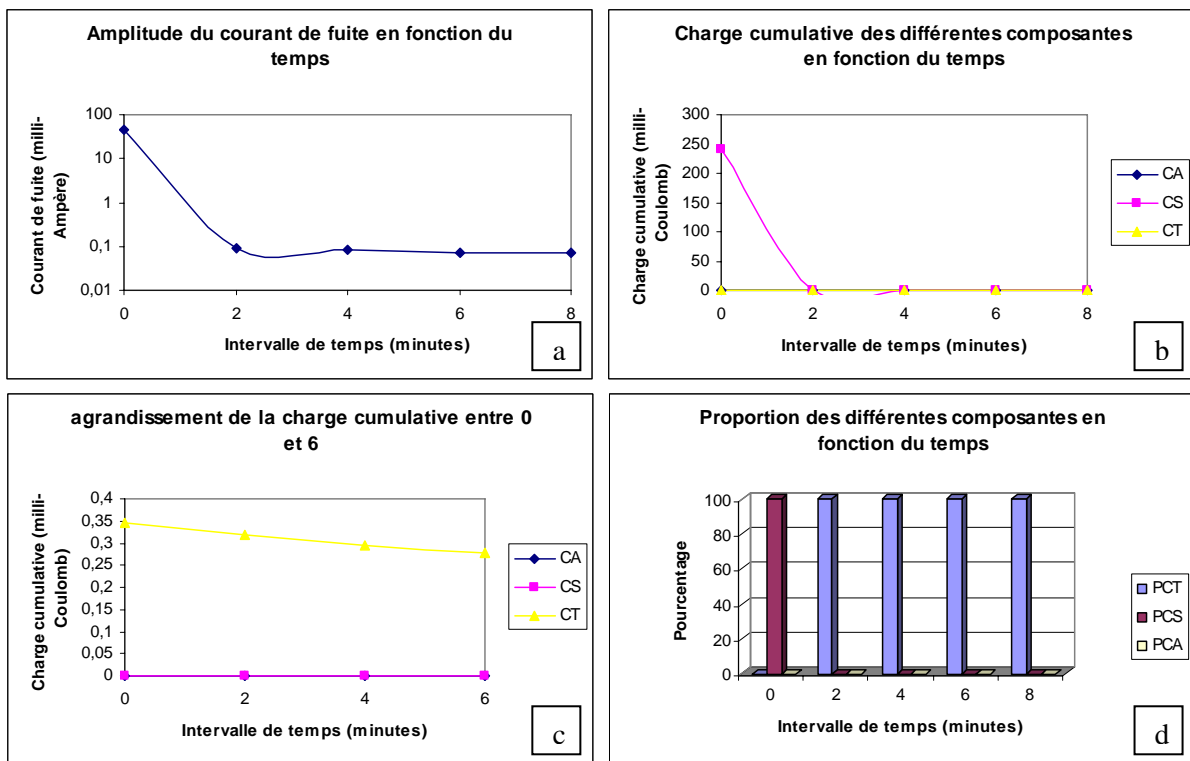


Figure IV.50. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulée des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulée ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Comme pour le niveau de tension précédent (Figure IV.49), les composantes sinusoïdale et transitoire sont les seules observées (Figure IV.50.d). Pour le premier instant, la composante sinusoïdale est présente, seule, puis elle s'éteint pour laisser place à la composante transitoire. L'amplitude du courant de fuite a le même sens de variation que pour les niveaux précédents (Figure IV.49 et Figure IV.48).

## Influence du niveau de tension appliquée

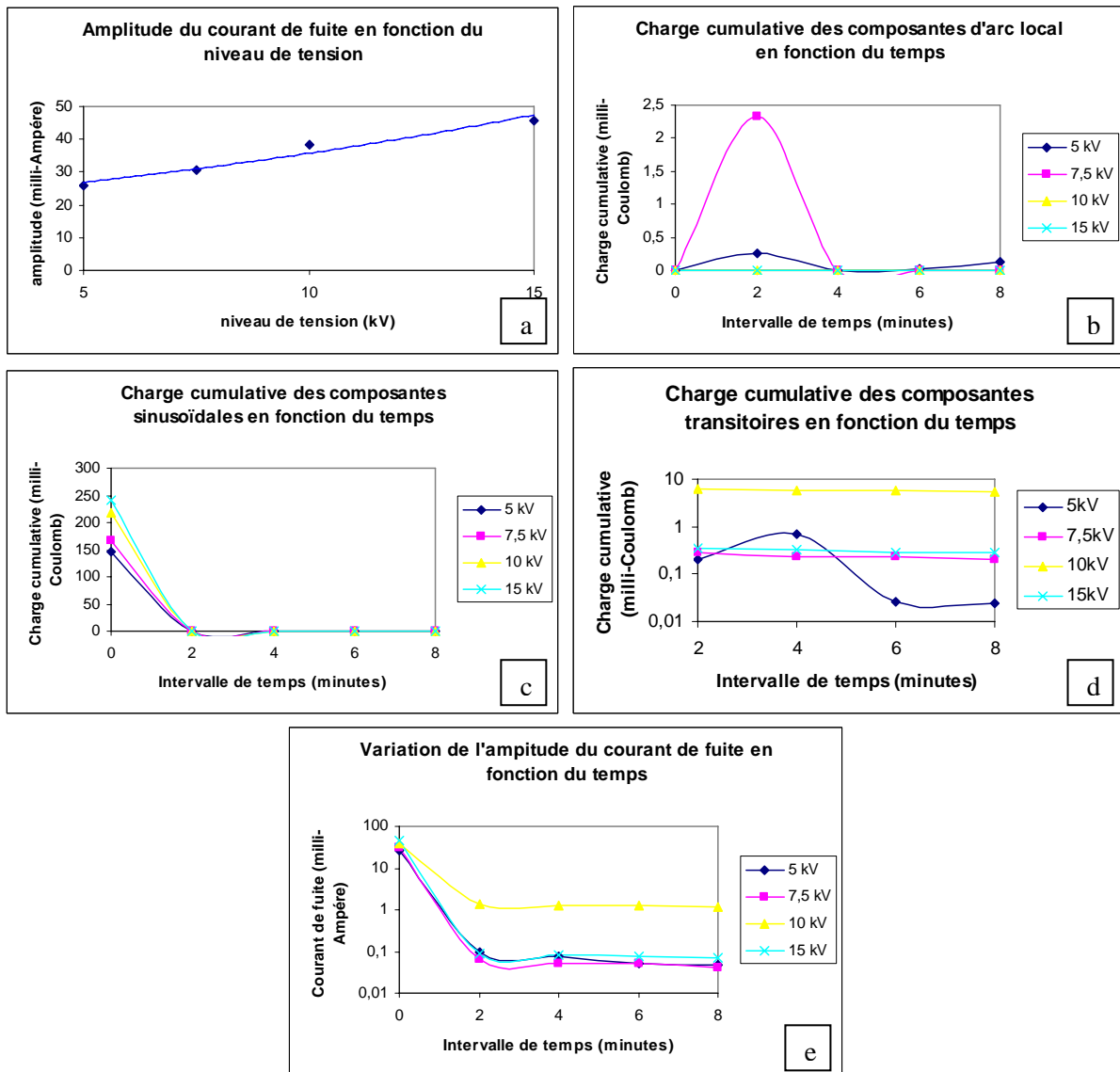


Figure IV.51. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée ; (b) Charge cumulative de la composante d'arc local en fonction du temps ; (c) Charge cumulative de la composante sinusoïdale en fonction du temps ; (d) Charge cumulative de la composante transitoire en fonction du temps ; (e) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps.

Nous remarquons que la composante sinusoïdale est présente au premier instant de tous les niveaux de tension. Elle est accompagnée de la composante transitoire pour le niveau 7,5 kV, la composante d'arc local est observée pour le plus bas niveau de tension (5 kV), et cela au deuxième instant. La composante transitoire domine à partir du deuxième instant et elle le persiste jusqu'au dernier instant. Nous remarquons aussi la disparition des deux autres composantes (composantes sinusoïdales et d'arc local) dès le troisième instant. L'amplitude du courant de fuite augmente avec l'augmentation de la tension, d'une manière exponentielle.

## Conclusion

Pour cette valeur de la conductivité, la composante sinusoïdale est présente en totalité au premier instant même pour les faibles niveaux de tension, la durée des arcs diminue en fonction de la tension appliquée (apparition de la composante d'arc local aux faibles niveaux de tension 5 et 7.5 kV), l'assèchement apparu au deuxième instant provoque une déformation suffisante de l'onde de courant de fuite pour que la composante transitoire apparaisse en totalité.

### IV.3.4.4. Couche de pollution de conductivité 29 mS/cm

#### Niveau de tension de 2,5 kV

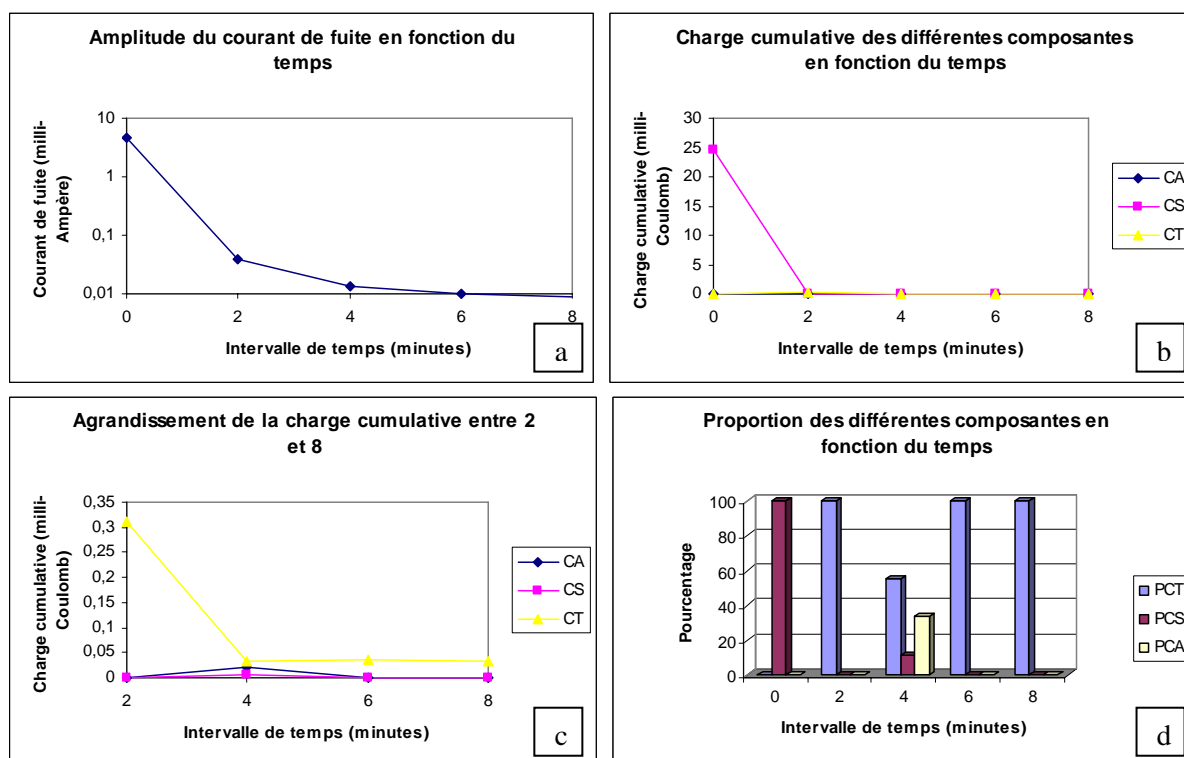


Figure IV.52. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

La composante sinusoïdale domine durant le premier instant puis disparaît et laisse place à la composante transitoire et cela pendant le deuxième instant. La disparition de la composante sinusoïdale est due à l'assèchement partiel de la couche polluante. Au troisième instant, nous remarquons la présence simultanée des trois composantes avec prédominance de la composante transitoire. Cela peut être due à la formation de zones sèches et de zones humides par intermittence. Dès le quatrième instant, et après le choc thermique provoqué par les arcs locaux, seule la composante transitoire reste, les composantes d'arc local et celle sinusoïdale s'éteignent. Le courant et la charge cumulative des différentes composantes diminuent avec le temps d'application (Figure IV.52.a).

## Niveau de tension de 5 kV

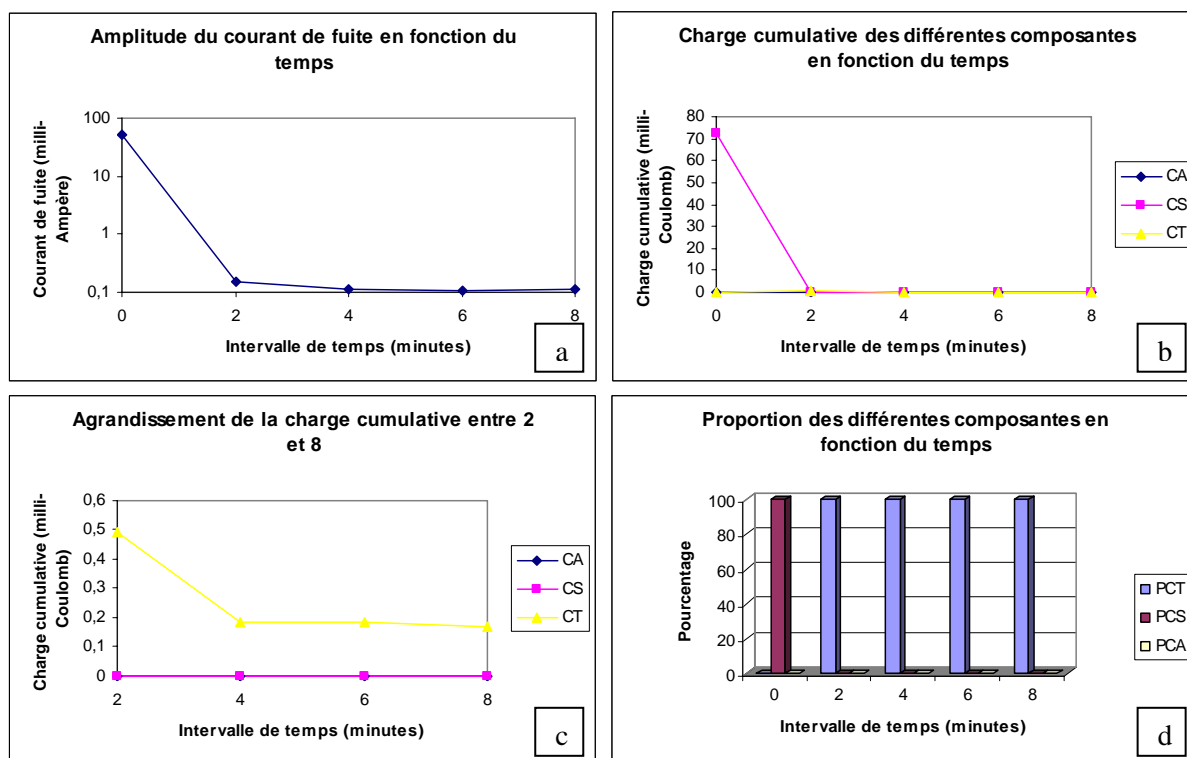


Figure IV.53. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Pour le premier instant, la composante sinusoïdale est présente seule en s'éteignant au deuxième instant à cause de l'assèchement de la couche polluante ; nous constatons alors l'apparition de la composante transitoire qui se maintient jusqu'au dernier instant, elle apparaît après l'assèchement dû d'une part aux arcs locaux et d'autre part à l'évaporation causée par le courant de conduction. L'amplitude du courant de fuite diminue d'une manière importante entre le premier et le deuxième instant (Figure IV.53.a).

## Niveau de tension de 10 kV

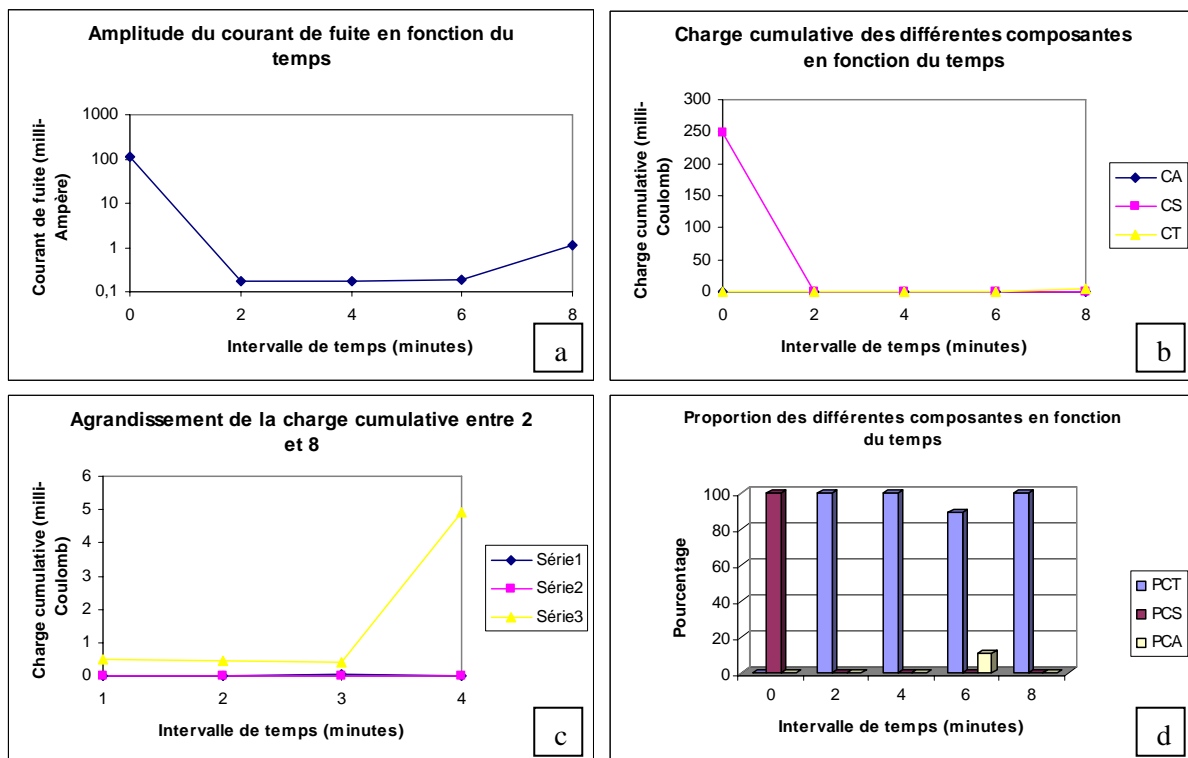


Figure IV.54 (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

La composante sinusoïdale est seule présente durant le premier instant, puis elle disparaît laissant place à la composante transitoire (déformation du courant de fuite après assèchement partiel dû au passage du courant de conduction) qui reste présente seule, jusqu'au troisième instant. La composante d'arc local apparaît durant le quatrième instant à cause de la présence de zones sèches de dimensions suffisantes pour donner lieu aux arcs locaux (Figure IV.54.d). L'amplitude du courant de fuite se comporte comme pour les conductivités précédentes (diminution exponentielle en fonction du temps).

## Niveau de tension de 15 kV

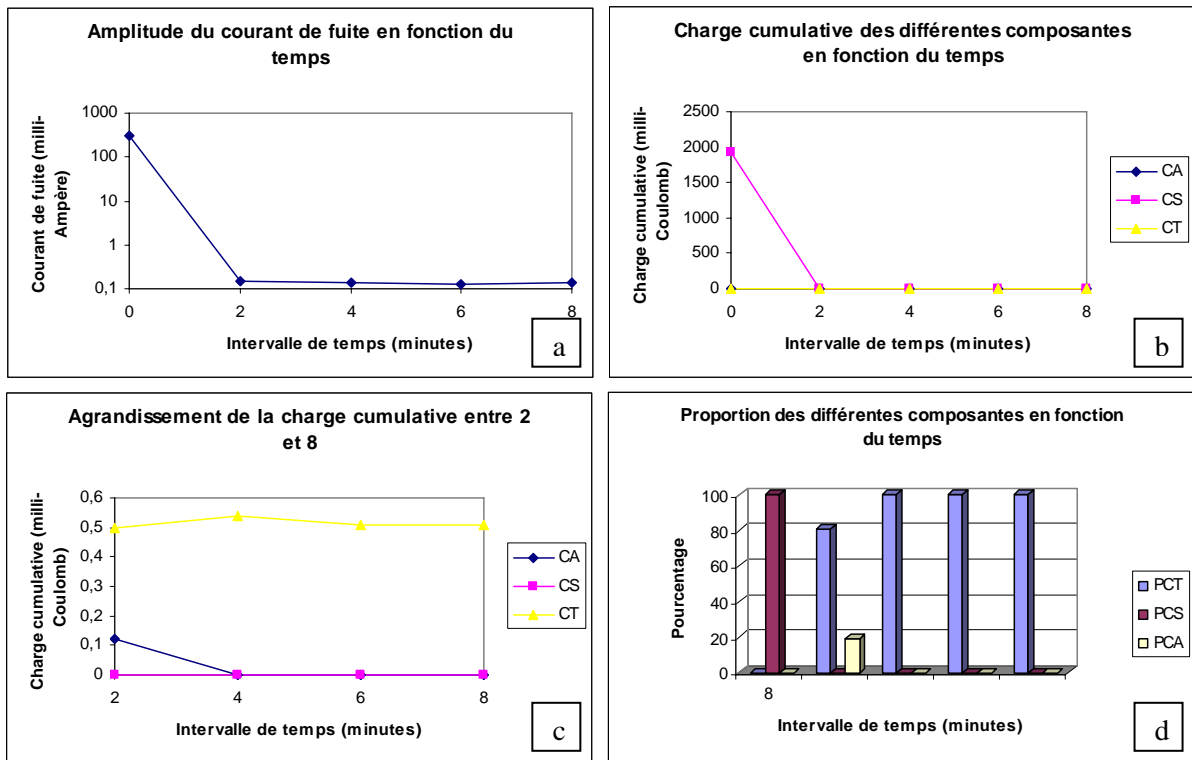


Figure IV.55. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Comme précédemment, seule la composante sinusoïdale est présente au premier instant, puis elle s'éteint au deuxième instant. Ce dernier est marqué par la présence de la composante transitoire et celle d'arc local (qui est en faible proportion) (Figure IV.55.d). A partir du troisième instant, il ne reste que la composante transitoire à cause de l'assèchement de la couche d'humidité dû aux arcs locaux. Le courant de fuite baisse très fortement après le premier instant et tend vers une faible valeur (Figure IV.55.a).

### Influence du niveau de tension appliquée

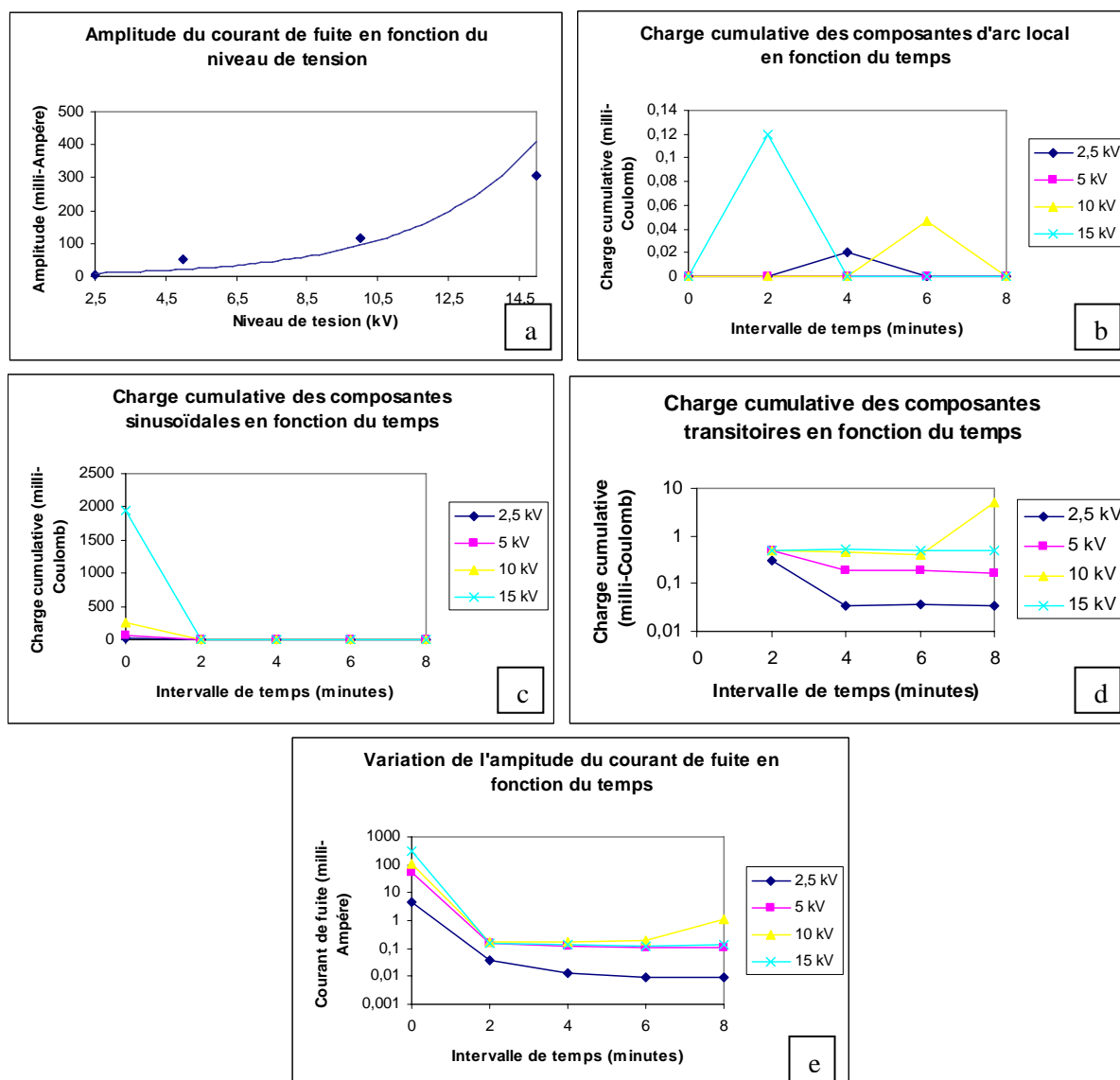


Figure IV.56. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée ; (b) Charge cumulative de la composante d'arc local en fonction du temps ; (c) Charge cumulative de la composante sinusoïdale en fonction du temps ; (d) Charge cumulative de la composante transitoire en fonction du temps ; (e) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps.

Nous remarquons que le courant de fuite augmente avec le niveau de tension appliquée (Figure IV.56.a), la composante sinusoïdale est dominante durant le premier instant, la composante transitoire apparaît durant tous les autres instants qui suivent. La composante d'arc local apparaît à partir du deuxième instant. L'amplitude de la composante sinusoïdale qui apparaît au premier instant est nettement supérieure à l'amplitude de toutes les autres composantes, dans les instants qui suivent (Figure IV.56.b, c et d).

### Conclusion

Pour cette conductivité, nous observons les mêmes évolutions des charges cumulatives et de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée. La composante sinusoïdale apparaît en totalité pour les différents niveaux de tension, sa charge cumulative



augmente en fonction du niveau de tension. La composante d'arc local apparaît plutôt pour le niveau de tension le plus élevé.

#### IV.3.4.5. Couche de pollution de conductivité 50 mS/cm

##### Niveau de tension de 5 kV

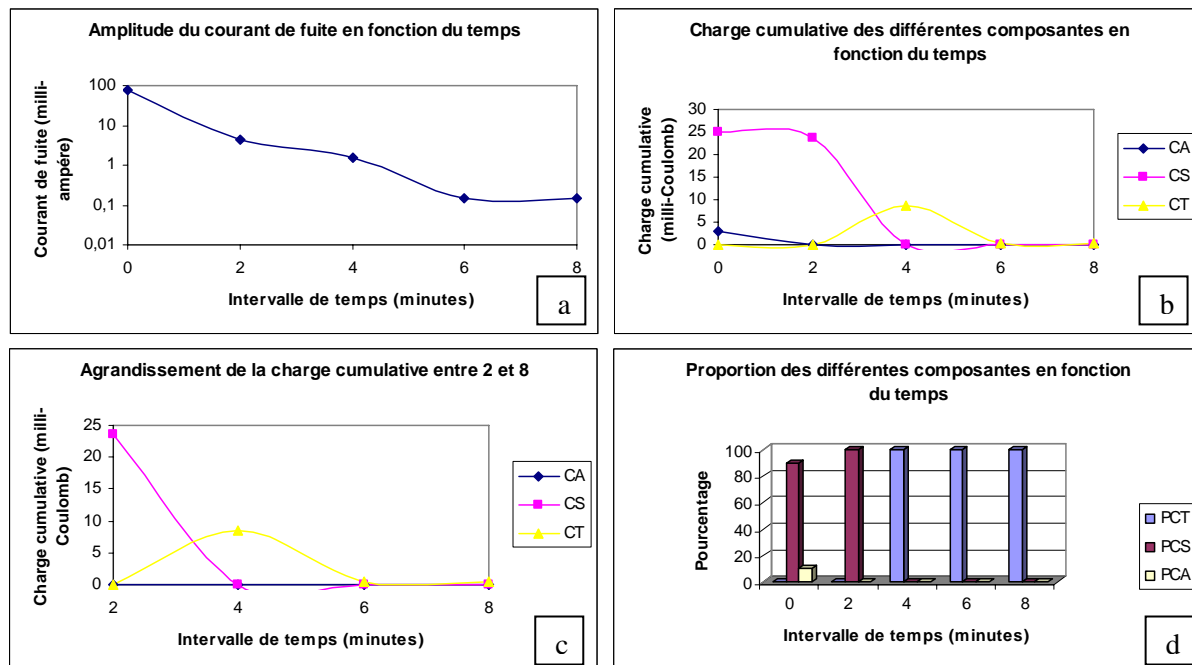


Figure IV.57. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Comme pour les niveaux de tension précédents, la composante sinusoïdale est présente durant le premier instant, accompagnée d'un faible taux de la composante d'arc local (Figure IV.57.d), probablement dû à l'apparition d'une zone sèche, qui disparaît au deuxième instant laissant seule la composante sinusoïdale. Dès le troisième instant, la composante transitoire apparaît. L'apparition de la composante transitoire s'explique par les décharges partielles qui ont asséché la couche de pollution, ainsi que la composante sinusoïdale qui fait de même. A partir du troisième instant la composante transitoire est la seule à apparaître. Toutes les autres composantes sont éteintes. Le courant de fuite chute après le premier instant (Figure IV.57.a).

## Niveau de tension de 7,5 kV

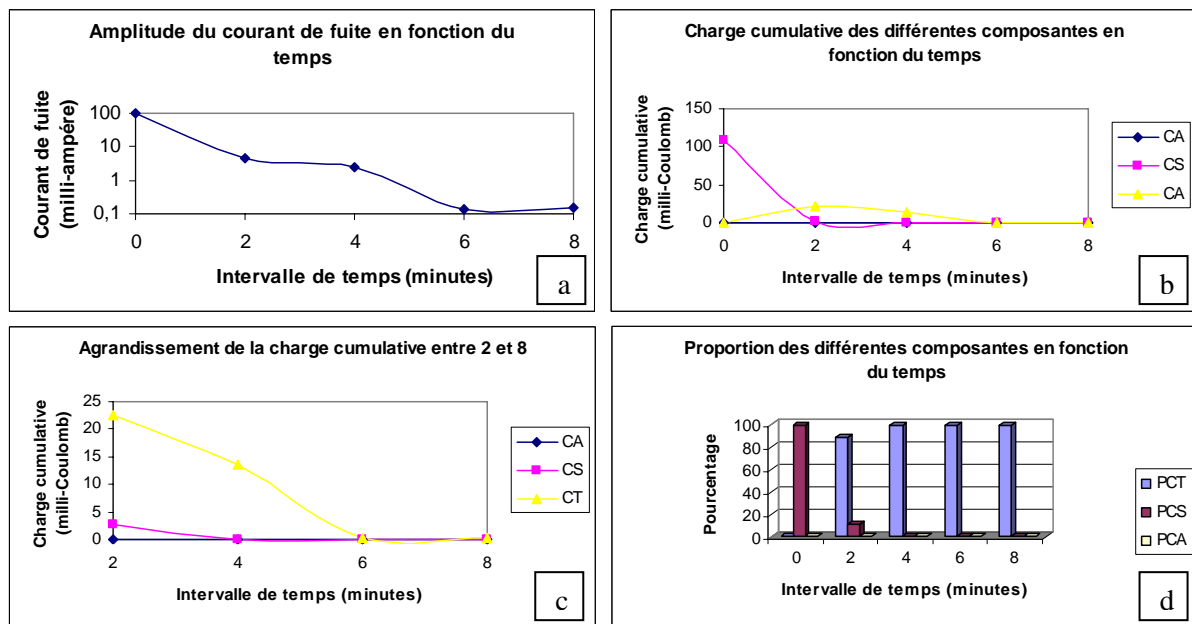


Figure IV.58. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Comme pour les niveaux de tension précédents, la composante sinusoïdale est présente durant le premier instant (Figure IV.58.d). Au deuxième instant, elle apparaît en faible proportion accompagnée de la composante transitoire. Dès le troisième instant, la composante transitoire apparaît en totalité. L'apparition de la composante transitoire traduit l'assèchement causé par le passage du courant de conduction. A partir de ce troisième instant, la composante transitoire est la seule à apparaître, toutes les autres composantes sont éteintes. Le courant de fuite chute après le premier instant (Figure IV.58.a).

Niveau de tension de 10 kV

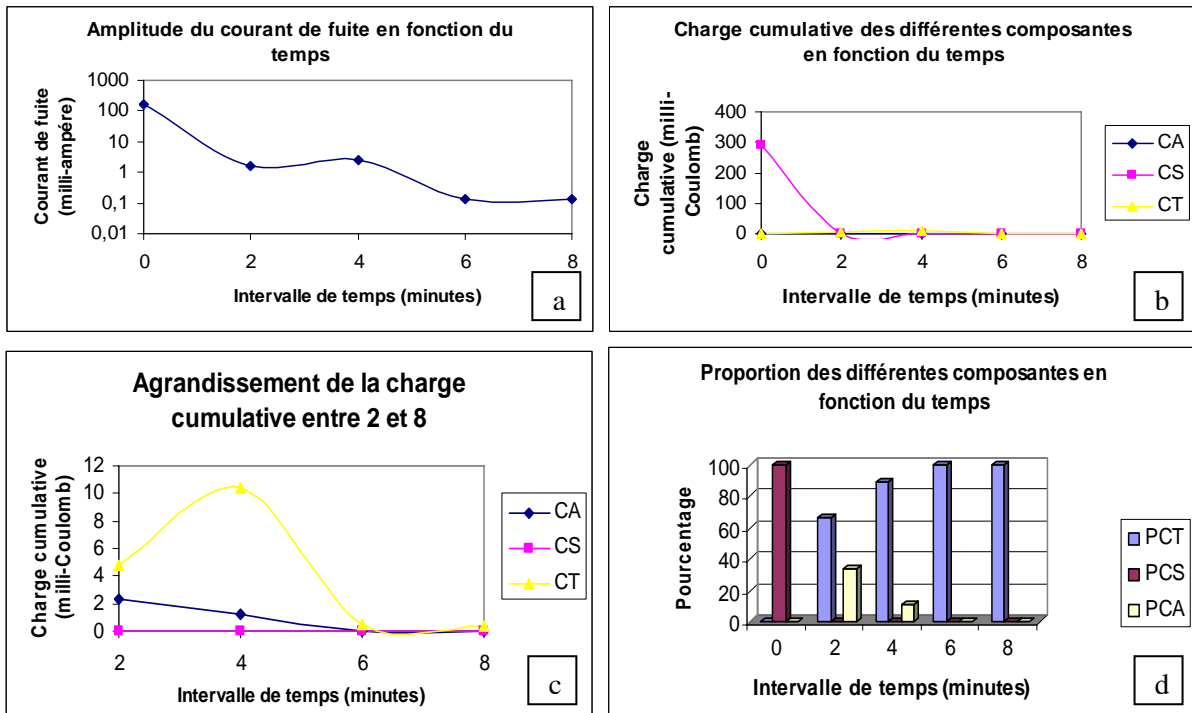


Figure IV.59. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

Le premier instant est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale. Le deuxième instant est caractérisé par la présence de la composante d'arc local et de la composante transitoire (certaines demi ondes sont attribuées à la composante d'arc local, le reste est attribué à la composante transitoire), la proportion de la composante d'arc local diminue avec la tension appliquée, jusqu'à extinction au quatrième instant ; à partir de cet instant il y a présence de la composante transitoire seule.

Niveau de tension de 15 kV

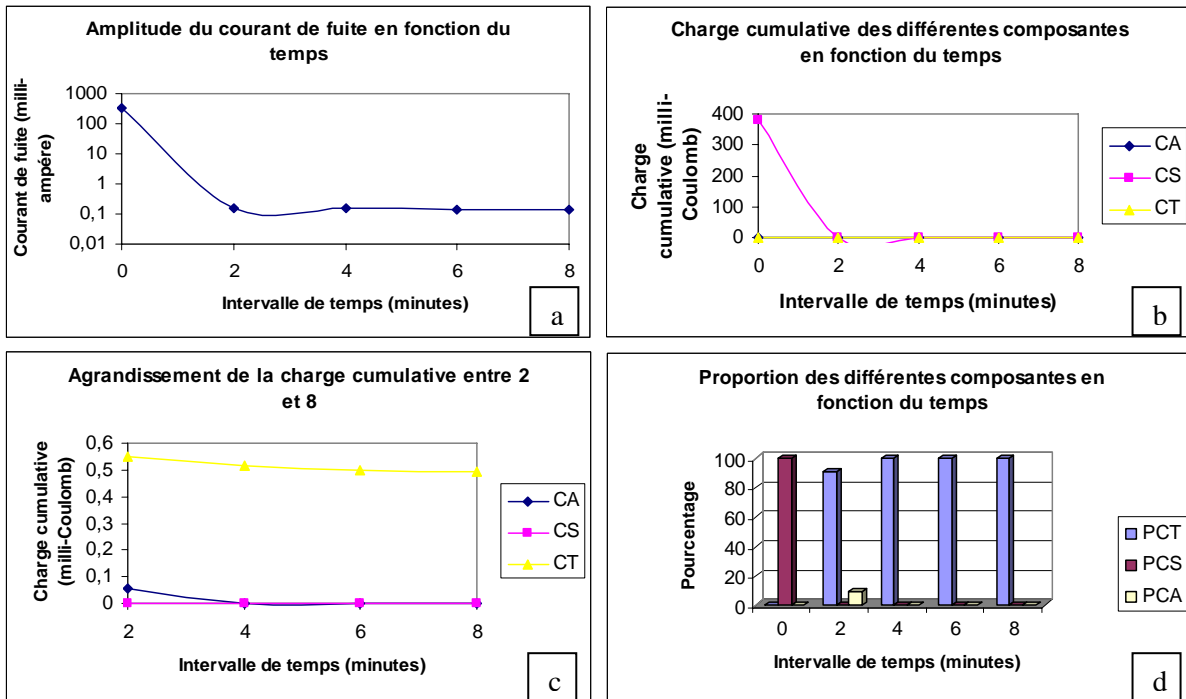


Figure IV.60. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps d'application de la tension ; (b) Charge cumulative des différentes composantes en fonction du temps ; (c) Agrandissement de la charge cumulative ; (d) Proportion des différentes composantes en fonction du temps.

La composante sinusoïdale est présente durant le premier instant dont l'amplitude est importante (Figure IV.60.b). Dès le deuxième instant elle s'éteint, et les deux autres composantes apparaissent avec une domination de la composante transitoire; la composante d'arc local disparaît à partir du troisième instant tout en remarquant que l'amplitude des composantes ne cesse de diminuer avec le temps. Le courant de fuite est important au début, puis diminue avec le temps.

### Influence de la tension appliquée

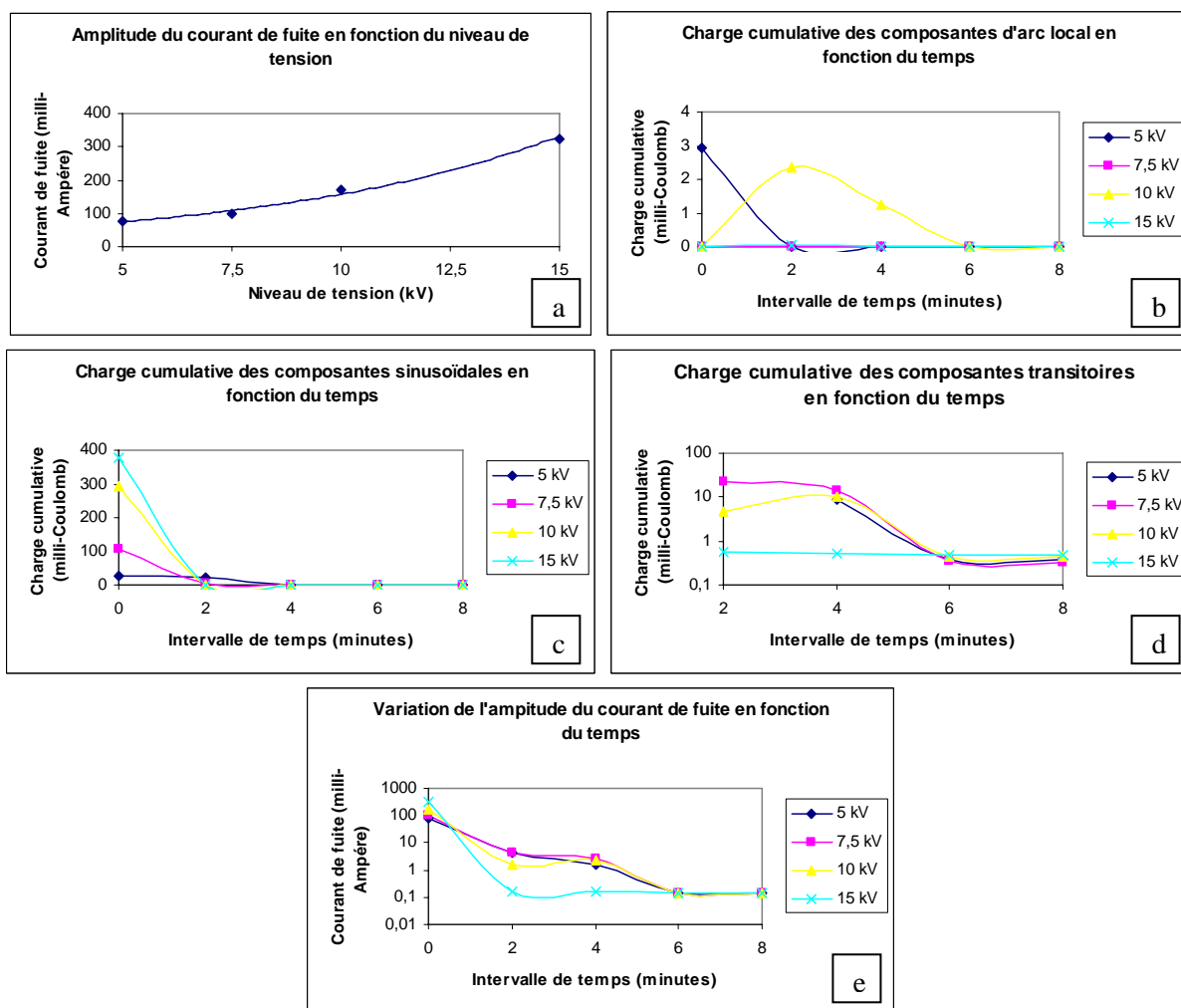


Figure IV.61. (a) Amplitude du courant de fuite en fonction de la tension appliquée ; (b) Charge cumulative de la composante d'arc local en fonction du temps ; (c) Charge cumulative de la composante sinusoïdale en fonction du temps ; (d) Charge cumulative de la composante en fonction du temps ; (e) Amplitude du courant de fuite en fonction du temps.

Au début et durant le premier instant, la composante sinusoïdale est présente à tous les niveaux de tension. Puis, soit elle est réduite soit elle disparaît pour être remplacée par les composantes transitoires ou même d'arc local, dans certains cas ; mais cette dernière ne persiste pas, elle disparaît aussi, à son tour, laissant la composante transitoire seule. La charge cumulative ainsi que le courant de fuite diminuent toujours avec le temps d'application de la tension. Nous remarquons, aussi, que l'amplitude du courant de fuite augmente avec l'augmentation de la tension appliquée.

### Conclusion

Le premier instant est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale, ce qui signifie la présence d'un film continu d'humidité de conductivité suffisante pour favoriser la circulation d'un courant de fuite non déformé ; la composante d'arc local disparaît plutôt pour des niveaux de tension élevés (diminution de la durée des arcs locaux avec l'augmentation du niveau de la tension appliquée).

### IV.3.5. Influence de la conductivité

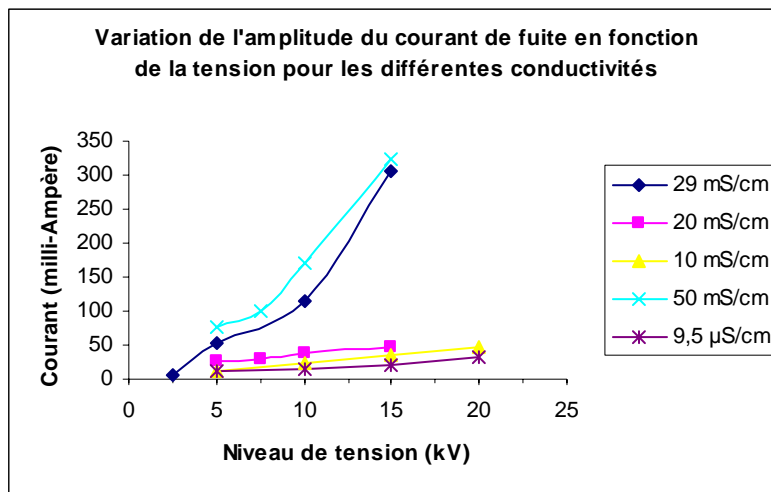


Figure IV.62. Evolution de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la conductivité.

Il est visible que l'amplitude du courant de fuite augmente en fonction du niveau de tension et en fonction de la conductivité de la couche polluante. Cela nous montre que le type d'agent polluant influe de manière significative sur l'amplitude du courant de fuite.

### IV.3.6 Discussion

#### 1. Conductivité faible (9.5µS/cm) ;

- Pour le niveau de tension de 5 kV, le premier instant est caractérisé par la présence de la composante transitoire en grande proportion et de la composante sinusoïdale. Le deuxième et le troisième instant sont caractérisés par la présence de la composante transitoire en totalité ; la surface est couverte de gouttelettes d'eau discrète et le champ électrique entre ces gouttelettes n'est pas suffisant pour provoquer le passage d'un courant de sinusoïdale. Au quatrième et au cinquième instant, il y a apparition de la composante d'arc local après apparition des bandes sèches. L'assèchement partiel de la surface de l'isolateur (faisant apparaître les bandes sèches) est provoqué par la composante transitoire des instants précédents ;

- Pour les niveaux de tension allant de 10 kV à 15 kV, le premier instant caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale en totalité, le champ électrique au niveau de la triple jonction est suffisamment intense pour causer le passage d'un courant sinusoïdale. La composante d'arc local apparaît au troisième instant pour le niveau 10 kV et au deuxième instant pour le niveau 15 kV. Pour le niveau 10 kV, la composante sinusoïdale apparaît en grande proportion au quatrième instant, tandis que pour le niveau 15 kV la composante sinusoïdale est présente pendant toute la séquence d'enregistrement ;

- Pour le niveau de tension 20 kV, le premier instant est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale en totalité. A partir du deuxième instant, il y a apparition de la composante transitoire accompagnée d'une faible proportion de la composante d'arc local, par rapport aux niveaux précédents (5, 10 et 15 kV), la composante d'arc local persiste jusqu'au quatrième instant. Le dernier instant est caractérisé par la présence de la composante transitoire seule.

L'apparition de la composante sinusoïdale nécessite la présence d'un champ électrique suffisamment intense entre les gouttelettes, l'instant d'apparition des arcs locaux ainsi que leurs durées sont fonction du niveau de tension appliquée pour une conductivité donnée.

## 2. Conductivité modérée (10, 20 mS/cm) ;

- Pour le niveau de tension 5 kV, le premier instant est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale. Pour la première conductivité (10 mS/cm), le deuxième instant est marqué par la présence des trois composantes. Les instants qui suivent sont caractérisés par la présence de la composante transitoire seule. Pour la deuxième conductivité, la composante d'arc local apparaît au deuxième instant, au quatrième et au cinquième, la composante sinusoïdale apparaît aux deux derniers instants, tandis que la composante transitoire apparaît du deuxième au cinquième instant. Les arcs locaux du deuxième instant ont provoqué un léger assèchement qui a donné lieu à l'apparition de la composante transitoire au troisième instant. Au quatrième instant, il y a apparition de nouvelles bandes qui donnent lieu à la réapparition de la composante d'arc local, ces arcs locaux augmentent l'intensité du champ entre gouttelettes ce qui justifie la réapparition de la composante sinusoïdale au dernier instant. La réapparition de la composante d'arc local au quatrième instant traduit la discontinuité du bruit ;

- Pour les niveaux de tension allant de 7,5 à 20 kV, et pour la majorité des cas, le premier instant est caractérisé par la composante sinusoïdale. A partir du deuxième instant, le courant est caractérisé par la présence de la composante transitoire seule, sauf pour les cas 7,5 kV pour la deuxième conductivité (20 mS/cm), deuxième instant, et 15 kV pour la première conductivité (10 mS/cm), premier et troisième instant, qui marquent, en plus, la présence de la composante d'arc local ;

Dans le cas d'une conductivité modérée, l'intensité du champ au niveau de la triple jonction est suffisante pour faire circuler un courant sinusoïdale, au premier instant, et cela pour pratiquement tous les niveaux de tension étudiés. Les arcs locaux ont une durée plus longue pour la deuxième conductivité (20 mS/cm) que pour le premier, malgré que la deuxième conductivité (20 mS/cm) permettant un assèchement plus rapide que la première (10 mS/cm), ceci peut être dû (à une forte pulvérisation de notre part) à la différence de quantité d'humidité mise sur la surface du modèle ;

## 3. Conductivité élevée (30, 50 mS/cm) ;

Dans le cas d'une telle sévérité de pollution, le courant du premier instant est caractérisé par la composante sinusoïdale pour tous les niveaux de tension étudiés (de 2,5 à 15 kV).

- Pour le niveau de tension (2,5 kV), le deuxième instant est caractérisé par la composante transitoire seule, déformation du courant après le léger assèchement provoquer par la composante sinusoïdale enregistrée au premier instant. Le troisième instant du courant de la première conductivité (30 mS/cm) est caractérisé par la présence de la composante d'arc local.

- Pour des niveaux de tension allant de 5 à 15 kV, pour la première conductivité (30 mS/cm), le courant est caractérisé par la présence de la composante transitoire seule à partir du deuxième instant (déformation de la forme d'onde du signal de courant de fuite), accompagnée dans certains cas par la présence de la composante d'arc local (4<sup>ème</sup> instant 10 kV, 2<sup>ème</sup> instant 15 kV). Tandis que pour la deuxième conductivité (50 mS/cm), le premier et le deuxième instant du niveau 5 kV sont caractérisés par la présence de la composante sinusoïdale, les arcs locaux apparaissent pour tous les niveaux de tension, leurs durées augmentent avec l'augmentation de la tension appliquée jusqu'au troisième niveau (15 kV) puis elle commence à diminuer.

Dans le cas d'une sévérité de pollution élevée, le champ électrique entre gouttelettes au premier instant est suffisamment intense pour favoriser la circulation d'un courant sinusoïdale (à partir d'une tension appliquée de 2.5 kV). La durée de la composante d'arc local diminue avec l'augmentation de la tension, sauf cas exceptionnel (50 mS/cm) où la durée des arcs locaux a marqué une augmentation puis une diminution. Ces arcs commencent quelques secondes après la mise sous tension. L'intensité du champ électrique au niveau de la triple jonction dépend à la fois du niveau de tension appliqué et de la conductivité de la couche de pollution. Lorsque l'intensité de ce champ dépasse un certain niveau de tension, il y a apparition de la composante sinusoïdale.

#### IV.3.7. Comparaison des résultats du modèle et de l'isolateur

Dans cette partie, nous nous proposons de comparer les résultats obtenus sur un isolateur réel à ceux obtenus sur le modèle plan, et cela pour déterminer l'intervalle de validité du modèle. Nous avons remarqué que le modèle donnait des formes de signaux semblables à celles de l'isolateur réel, et que son comportement en fonction du temps, s'approche de celui de l'isolateur réel.

Dans ce qui suit, nous nous limitons à la comparaison de l'amplitude du courant de fuite obtenu au premier instant en fonction de la conductivité.

Les figures IV.63, IV.64, et IV.65 représentent la variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la conductivité, et cela pour trois différents niveaux de tension.

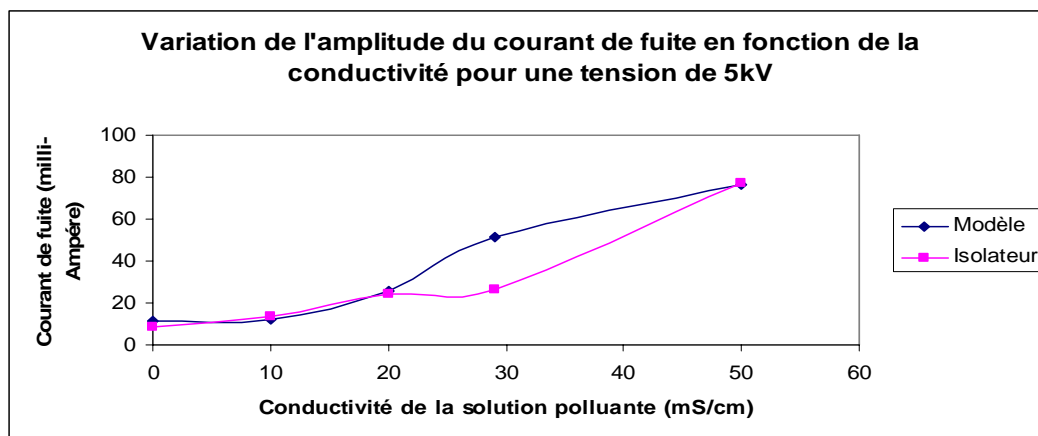


Figure IV.63. Variation de l'amplitude du courant de fuite de l'isolateur et du modèle en fonction de la conductivité sous une tension de 5 kV.



Nous remarquons sur la figure (IV.63) que les valeurs données par le modèle s'approchent des résultats obtenus sur l'isolateur ; particulièrement pour les cas des faibles conductivités et pour celle de 50 mS/cm. Pour la conductivité de 29 mS/cm, nous remarquons une différence dans les résultats obtenus, cela peut être causé d'une part par la configuration différente entre le modèle et l'isolateur (la différence de forme et de position des électrodes), ou d'autre part à la différence de quantité solution polluante mise sur la surface isolante.

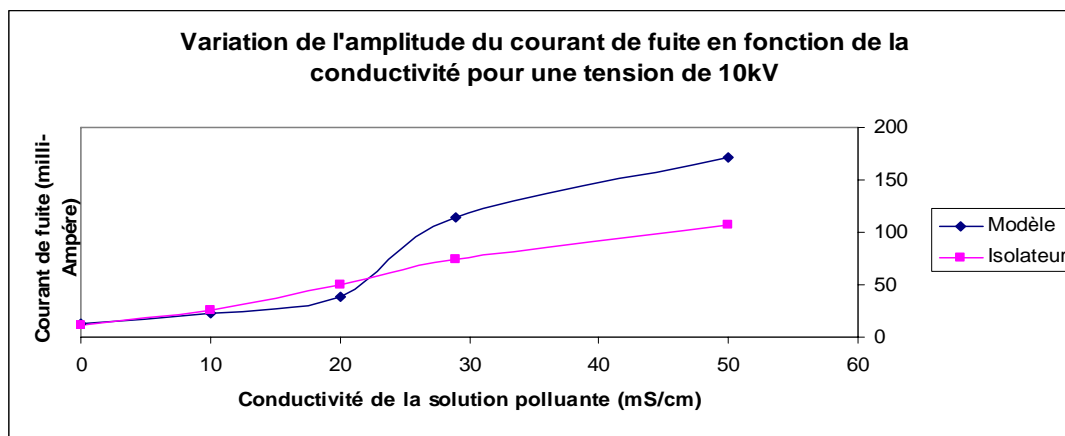


Figure IV.64. Variation de l'amplitude du courant de fuite de l'isolateur et du modèle en fonction de la conductivité sous une tension de 10 kV.

Pour la figure (IV.64), nous remarquons un comportement très proche entre le modèle et l'isolateur; les amplitudes du courant de fuite obtenues pour les faibles conductivités (0,0095, 10, et 20 mS/cm) sont du même ordre de grandeur, l'erreur (relative) dans ce cas ne dépasse pas les 25 %, ce qui montre que le modèle donne des valeurs correctes pour les faibles conductivités.

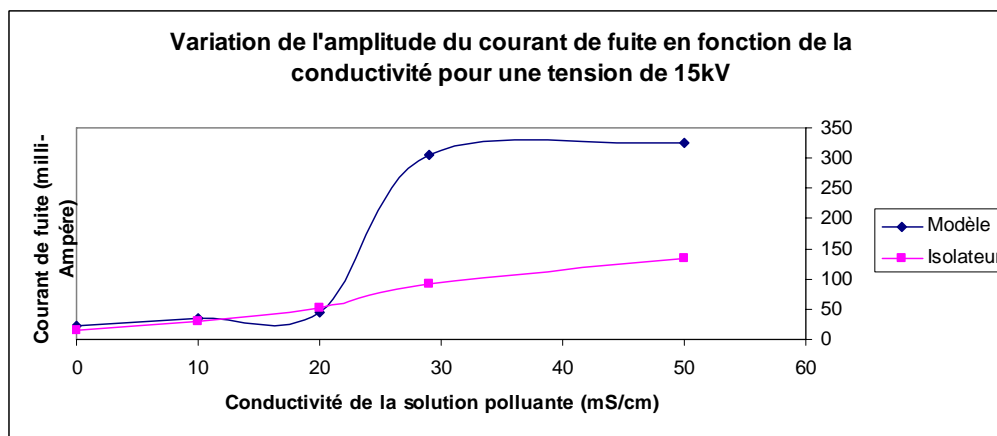


Figure IV.65. Variation de l'amplitude du courant de fuite de l'isolateur et du modèle en fonction de la conductivité sous une tension de 15 kV.

Pour ce niveau de tension, nous remarquons que pour les faibles conductivités, les valeurs de l'amplitude du courant de fuite du modèle et de l'isolateur sont proches, en particulier pour les conductivités de 10 et 20 mS/cm. Pour la conductivité de 0,0095 mS/cm, la différence est plus importante. Cette dispersion dans les résultats serait due à la moindre impureté et différence entre le modèle et l'isolateur (point au niveau des électrodes, ou simplement la différence de matière entre l'isolateur et le verre du modèle).

### IV.3.8. Conclusion

La décomposition du courant de fuite nous a permis de caractériser l'état de surface de l'isolateur, et cela en étudiant la variation des proportions et la présence ou non des différentes composantes. Il est clair que la composante sinusoïdale est signe, dans le cas d'une surface hydrophile, de la présence d'une couche uniforme de pollution de conductivité suffisante, dans le cas d'une surface hydrophobe (absence d'un film d'eau continu), cela veut dire que l'intensité champ électrique au niveau de la triple jonction est suffisamment importante pour provoquer le passage d'un courant sinusoïdal, l'intensité de ce champ électrique est fonction de la conductivité de la couche de pollution de la tension appliquée et de la forme des gouttelettes ; la composante d'arc local nous informe sur le début d'apparition de zones sèches et finalement, la composante transitoire exprime l'assèchement partiel de la surface polluée.

Cette étude comparative nous montre qu'il y a une assez bonne concordance entre les résultats obtenus sur le modèle plan par rapport à ceux obtenus sur l'isolateur réel, aussi bien pour l'étude de la caractérisation que pour l'étude de la tension de contournement et de courant de fuite (amplitude). Ce qui nous amène à dire que le modèle de courant de fuite est valable dans ces mêmes conditions.

Le comportement du courant de fuite (forme, amplitude, déphasage) dépend de deux paramètres, la tension appliquée et la conductivité de la solution polluante. Une pollution légère donne naissance à des courants caractérisés par la composante transitoire (effet capacitif dominant) lorsque les niveaux de tension sont faibles. Pour des niveaux de tension relativement élevés, il y a apparition de la composante sinusoïdale durant le premier instant, pour une pollution modérée ; le courant est caractérisé par la présence de la composante d'arc local à partir du deuxième instant. L'instant d'occurrence de ces décharges varie en fonction de la tension appliquée (plus le niveau de la tension est élevé plus les décharges apparaissent tôt). Pour des conductivités relativement sévères, les décharges ont lieu juste après l'application de la tension et ne durent que quelques secondes, engendrant un assèchement quasi-total de la couche humidifiée.

Il est clair qu'une succession de composantes sinusoïdales nous informe sur la présence d'une couche de pollution modérée en quantité relativement élevée, ce qui nécessite une opération de nettoyage. Une succession de composantes d'arc local nous informe que l'isolateur a subi un choc thermique, par conséquent il est utile de lancer une opération de diagnostic afin de s'assurer de l'état de l'isolateur. La succession de composantes transitoires nous informe sur la dominance de l'effet capacitif, l'amplitude du courant et des charges cumulatives nous informe sur la sévérité de la pollution déposée sur la surface de l'isolateur ce qui permet de prévenir un risque de contournement en cas d'humidification de cette couche de pollution.

---

---

***IV.4 Influence de la conductivité de la  
couche de pollution***

---

---

### VI.4.1. Introduction

Le courant de fuite donne de bonnes informations sur l'état de surface de l'isolateur. Il est intéressant de l'étudier et cela en fonction de toutes les variables qui l'influencent, pour pouvoir connaître son état de surface.

Dans cette optique, nous allons étudier l'influence de la conductivité de la solution polluante sur l'amplitude du courant de fuite à la surface de l'isolateur. L'amplitude permet de déterminer le type de pollution. Cette étude de la contrainte climatique entre dans la perspective de caractérisation de l'état de surface de l'isolateur et cela pour différents états de pollution.

### VI.4.2. But de l'étude

L'objectif de cette partie est de pouvoir exprimer la variation de l'amplitude du courant de fuite en fonction de la conductivité, sous forme d'une expression et de visualiser l'évolution du courant en fonction de la conductivité.

### VI.4.3. Résultats expérimentaux

#### VI.4.3.1. Résultat de l'isolateur réel

Les résultats sont donnés par la figure (IV.66) qui représente les valeurs du courant de fuite pour différentes conductivités et cela pour trois niveaux de tension différents.

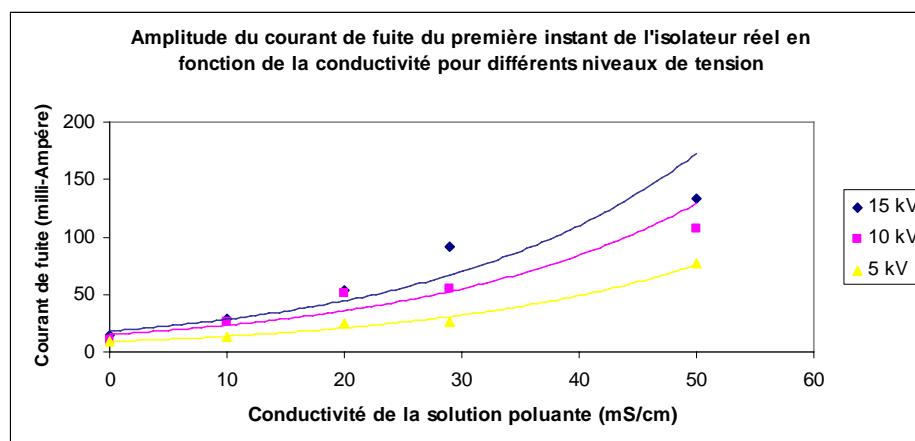


Figure IV.66. Influence de la contrainte climatique (conductivité de la couche polluante) pour l'isolateur réel sous différents niveaux de tension.

Nous remarquons que l'amplitude du courant de fuite augmente en fonction de la conductivité de la couche polluante, ce qui est normale, car plus la conductivité de la couche polluante est élevée plus sa résistance diminue. La variation de l'amplitude du courant de fuite, en fonction de la conductivité, est sous forme d'une parabole, mais on remarque que l'évolution pour les deux derniers niveaux n'est pas aussi prononcée dans les deux niveaux supérieurs que pour le premier niveau de tension.

De plus, il est clair que l'amplitude du courant de fuite augmente avec l'augmentation du niveau de tension, et cette augmentation est surtout visible pour des conductivités élevées (10 mS/cm à 50 mS/cm).

Nous tirons, comme conclusion de cette étude, que l'augmentation de l'amplitude suit une parabole en fonction de la conductivité, et que cette amplitude peut être utilisée comme référence pour déduire la sévérité de la pollution à la surface de l'isolateur.

#### VI.4.3.2. Résultat du modèle de laboratoire

L'étude de la contrainte électrique du modèle nous permet de comparer les résultats obtenus sur le modèle à ceux obtenus sur l'isolateur réel, cela dans l'optique de valider le modèle pour l'étude du courant de fuite, pour ce type d'isolateur, et de voir le comportement de ce modèle en fonction de la contrainte climatique.

Les résultats obtenus sont représentés dans la figure (IV.67).

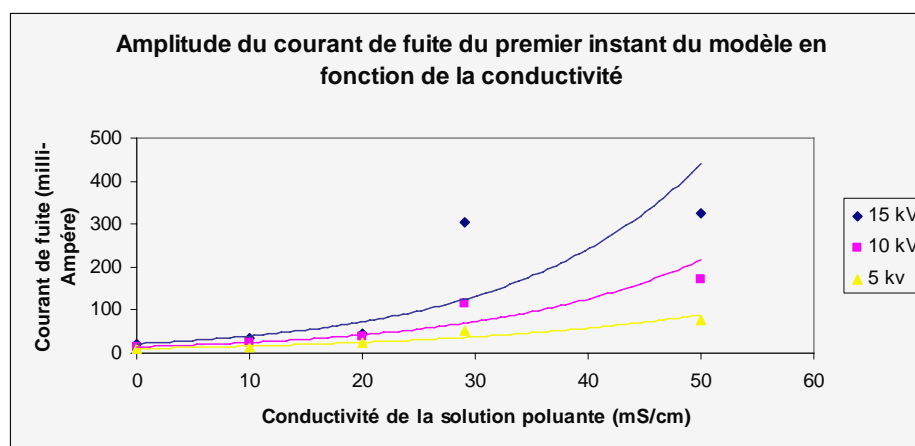


Figure IV.67. Influence de la contrainte climatique (conductivité de la couche polluante) pour le modèle de laboratoire sous différents niveaux de tension.

L'amplitude du courant de fuite augmente en fonction de la conductivité, la variation approche une exponentielle. Cela traduit l'augmentation de la sévérité de la pollution, ce qui nous permet de dire que l'amplitude du courant de fuite est un bon critère pour la caractérisation de la sévérité de la pollution.

La variation du courant de fuite en fonction de la contrainte climatique (conductivité de la couche polluante) est du même ordre que celle de l'isolateur réel, et de même ordre de grandeur pour les différentes conductivités, sauf pour la conductivité la plus élevée où l'amplitude du modèle est plus importante.

L'évolution de l'amplitude du courant de fuite suit quasiment une exponentielle et augmente en fonction du niveau de tension et de la conductivité.

#### IV.4.4. Conclusion

En analysant les résultats obtenus dans cette partie, il est clair que la conductivité de la couche polluante influe, de manière significative, sur l'augmentation de l'amplitude du courant de fuite ; ce qui peut engendrer des arcs locaux qui par la suite peuvent causer le contournement total de l'isolateur.

L'amplitude du courant de fuite est une source d'informations prolifique pour la caractérisation de la sévérité de la pollution de la couche polluante ; ce qui nous permet de dire que l'amplitude du courant de fuite représente un critère de diagnostic pour l'état de surface de l'isolateur.

---

*V. Analyse d'Harmonique du Courant de Fuite et  
de la Tension Appliquée*

---

## V. 0. Introduction

L'étude d'harmonique nous permet de déterminer les harmoniques significatifs ; ceci nous amène à nous intéresser, dans cette étude de caractérisation de l'état de surface à certaines fréquences uniquement, ce qui facilite l'étude et la rend plus aisée.

Dans cette partie de notre travail, nous nous intéressons à l'étude des taux des harmoniques de la tension et du courant. La tension d'alimentation contient des harmoniques qui induisent des harmoniques au niveau du courant de fuite qui, à leur tour, sont amplifiés par l'effet capacitif. En effet, plus l'effet capacitif augmente (conséquence de l'assèchement), plus les déformations du courant de fuite augmentent et par suite le taux des harmoniques.

Le taux des harmoniques est calculé en utilisant un algorithme MATLAB®. Les résultats sont représentés dans les figures (Figure V.1, Figure V.2, Figure V.3, Figure V.4 et etc....) qui vont suivre et qui montrent la variation des proportions des différents harmoniques (3<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup>) en fonction du temps, par rapport au fondamental.

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats obtenus pour les différentes conductivités et les différents niveaux de tension utilisés.

### V.1 Analyse fréquentielle de la tension du réseau

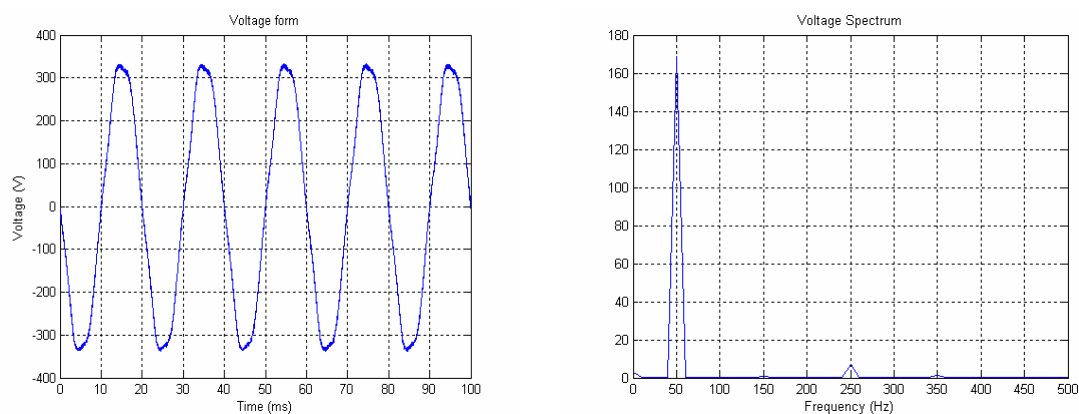


Figure V.1. Forme et Spectre de la Tension du Réseau

On remarque la présence de certains harmoniques sur la tension du réseau, le plus élevé c'est le cinquième (4.28 %), le septième (0.79%) puis le troisième (0.61%), ceci nous donne l'information sur une des sources d'harmoniques.

## V.2. Etude harmonique du modèle de laboratoire

### V.2.1. Eau distillée de conductivité 9,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$

#### Niveau de tension de 5 kV

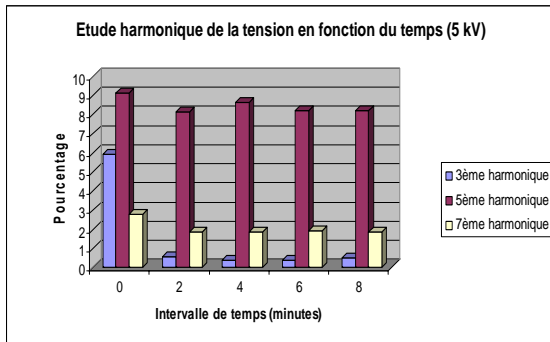


Figure V.2. Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV).

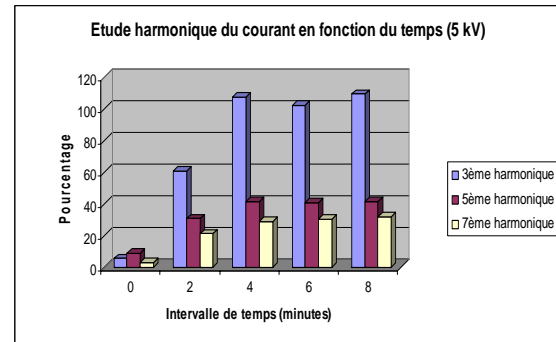


Figure V.3. Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).

Dans ce cas de figure, nous remarquons, au premier instant, que le taux des harmoniques du signal tension (Figure V.1) est pratiquement le même que celui du courant (Figure V.2). Cet instant est caractérisé par la présence de la composante transitoire avec une légère proportion de la composante sinusoïdale (Figure IV.9.a). A partir du deuxième instant, les harmoniques de la tension gardent la même proportion, tandis que pour ceux du courant, nous remarquons qu'il y a une légère augmentation du taux de différents harmoniques (le 3<sup>ème</sup>, le 5<sup>ème</sup> et le 7<sup>ème</sup>) ; à partir de ce même instant, le courant est caractérisé par la composante transitoire.

#### Niveau de tension de 10 kV

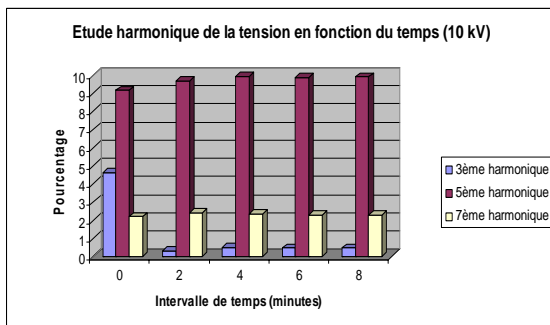


Figure V.4. Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).

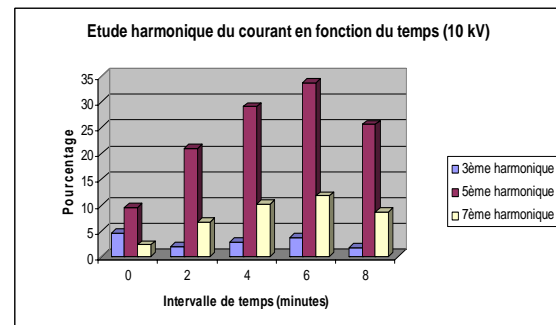


Figure V.5. Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).

Dans ce cas de figure, le premier instant est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale en totalité (Figure IV.10.a) ; nous constatons qu'à ce même instant les proportions des harmoniques du signal courant (Figure V.4) sont quasiment les mêmes que ceux du signal tension. Le taux du cinquième harmonique est pratiquement le même à partir du deuxième instant pour le signal tension, tandis que pour le courant nous remarquons que le taux de ce même harmonique augmente jusqu'au quatrième instant où il commence à diminuer ; cette différence peut être due aux arcs locaux qui ont eu lieu au deuxième instant.



## Niveau de tension de 15 kV

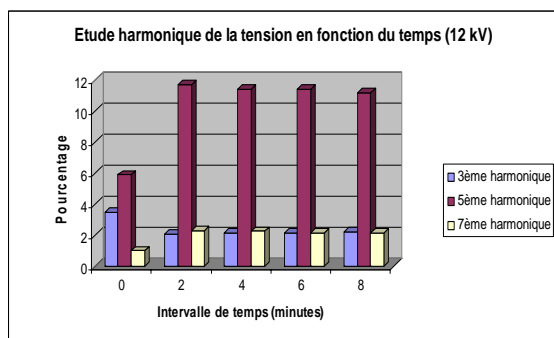


Figure V.6. Etude d'harmonique de la tension appliquée (15 kV).

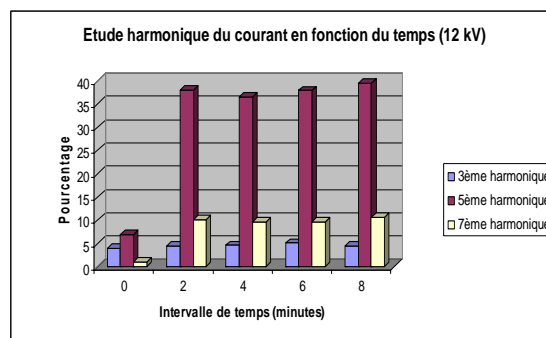


Figure V.7. Etude d'harmonique du courant de fuite (15 kV).

Dans ce cas, les mêmes constatations que dans le cas des niveaux de tension précédents sont faites. Nous remarquons que le rapport des proportions du troisième harmonique du courant (Figure V.4) et de la tension (Figure V.5) reste pratiquement le même pour les différents instants, ce qui justifie la présence de la composante sinusoïdale (Figure IV.11.a) pour pratiquement tous les instants considérés (pas de déformation significative due au troisième harmonique sur le signal courant).

## Niveau de tension de 20 kV

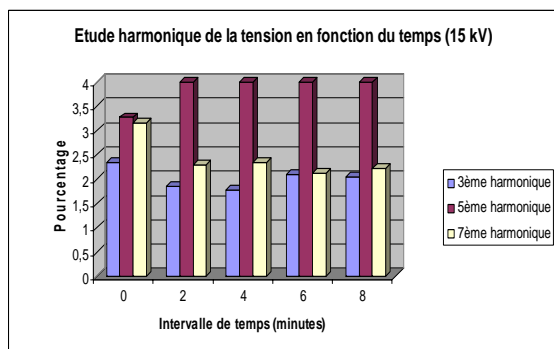


Figure V.8. Etude d'harmonique de la tension appliquée (20 kV).

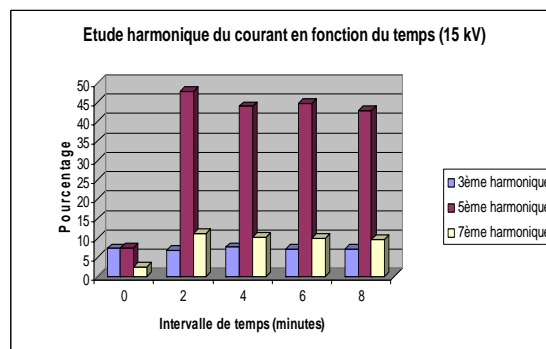


Figure V.9. Etude d'harmonique du courant de fuite (20 kV).

Ce cas ne diffère pas des cas précédents ; en effet, nous voyons bien qu'à partir du deuxième instant, les taux d'harmoniques restent pratiquement constants (Figure V.7). A partir de ce même instant, le courant est dominé par la composante transitoire, avec des légères proportions de la composante d'arc local, ce qui justifie la fluctuation de la proportion du cinquième harmonique (Figure IV.12.c).

## Conclusion

Dans le cas de cette conductivité (faible conductivité), nous remarquons que le cinquième harmonique reste dominant pour les différents instants ; cela est dû à la présence de cet harmonique dans le réseau d'alimentation. La proportion du cinquième harmonique du courant, au premier instant, est quasiment la même que celle de la tension. A partir du deuxième instant, la proportion de cet harmonique devient importante. Nous remarquons ainsi que le rapport du troisième harmonique courant-tension augmente avec le temps, dans la

majorité des cas le septième harmonique de la tension diminue avec le temps tandis que celui du courant augmente, l'origine de cette différence est peut être due à l'extinction des décharges (pas d'influence sur la tension) ; pour le courant cette augmentation peut être due à l'assèchement, non uniforme, de la couche d'humidité (augmentation de l'effet capacitif).

## V.2.2. Conductivité de la couche de pollution 10 mS/cm

### Niveau de tension de 5 kV

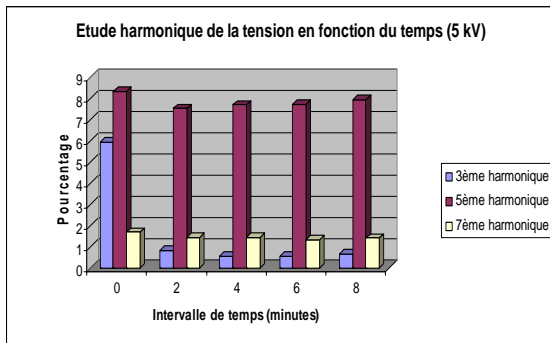


Figure V.10. Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV).

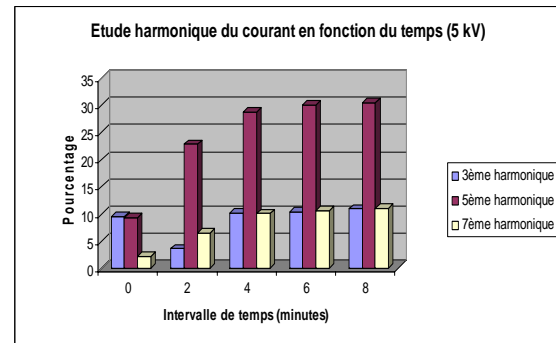


Figure V.11. Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).

Dans ce cas, nous remarquons que le cinquième harmonique du courant augmente, au fur et à mesure, avec l'augmentation du temps d'application de la tension (Figure V.9). A partir du deuxième instant les taux des différents harmoniques du courant deviennent importants par rapport à ceux de la tension. Au deuxième instant, le taux du cinquième harmonique du signal du courant est inférieur à ceux qui suivent, tandis que pour la tension (Figure V.8), les taux gardent le même niveau ; à cet instant, le signal est dominé par la composante d'arc local.

### Niveau de tension de 10 kV

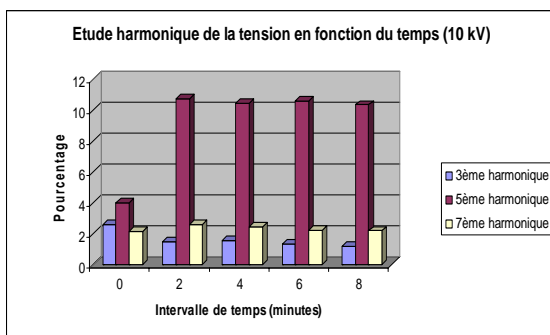


Figure V.12. Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).

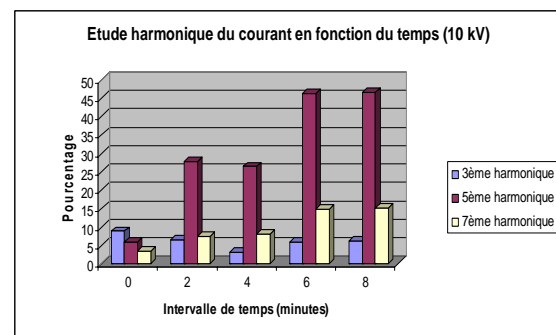


Figure V.13. Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).

Pour ce niveau de tension, nous remarquons que les taux d'harmoniques du courant augmentent du troisième au quatrième instant (Figure V.11), tandis que ceux de la tension restent toujours constants. Ceci peut être dû à l'assèchement atteint à cet instant, pour ce niveau de tension, (assèchement non uniforme) après extinction totale des décharges.

## Niveau de tension de 15 kV

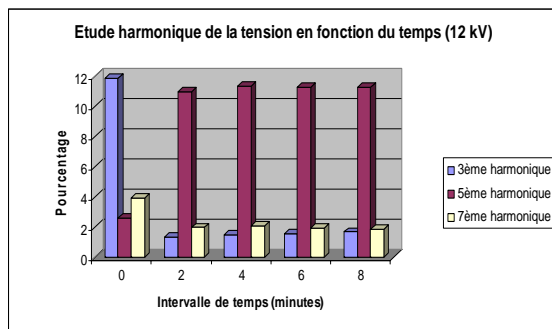


Figure V.14. Etude d'harmonique de la tension appliquée (15 kV).

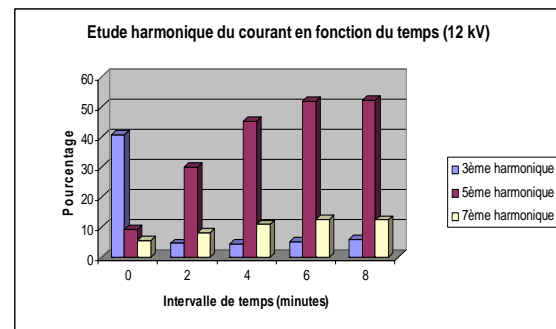


Figure V.15. Etude d'harmonique du courant de fuite (15 kV).

## Niveau de tension de 20 kV

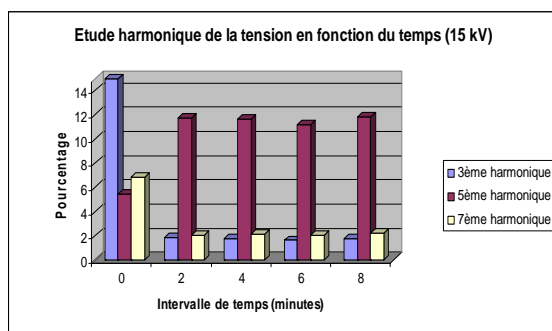


Figure V.16. Etude d'harmonique de la tension appliquée (20 kV).

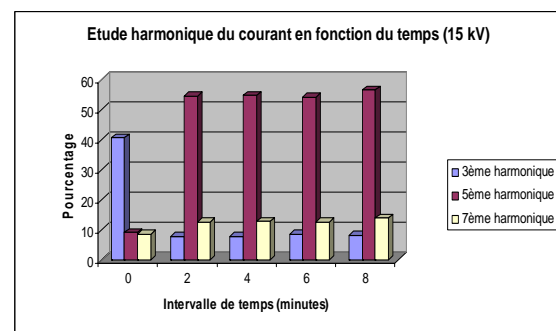


Figure V.17. Etude d'harmonique du courant de fuite (20 kV).

Pour ces deux derniers niveaux de tension, le taux du troisième harmonique est relativement élevé au premier instant (Figure V.13 et V.15), nous remarquons que le courant est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale seule à ce même instant (Figure IV.17.d) ; à partir de cet instant les différents harmoniques (tension et courant) gardent pratiquement leurs niveaux et le rapport troisième harmonique courant tension augmente, ce qui justifie la présence de la composante transitoire à partir du deuxième instant, en grande proportion.

## Conclusion

Dans ce cas de figure et pour cette conductivité, nous remarquons que pour le premier instant le cinquième harmonique n'est pas aussi dominant que dans le cas de la conductivité précédente beaucoup plus faible. A partir du deuxième instant, l'assèchement commence à se produire plus rapidement que pour la conductivité précédente et la forme du courant devient de plus en plus distordue, d'où l'augmentation des niveaux d'harmoniques déjà constatée. Nous remarquons ainsi, que la proportion du troisième harmonique du premier instant augmente avec le niveau de tension, ce qui peut être expliquée par l'augmentation de la sévérité de la contrainte électrique (tension appliquée). L'augmentation de la tension, pour une telle conductivité, a comme résultat l'augmentation de la proportion du troisième harmonique en fonction du temps.

### V.2.3. Conductivité de la couche de pollution 20 mS/cm

#### Niveau de tension de 5 kV

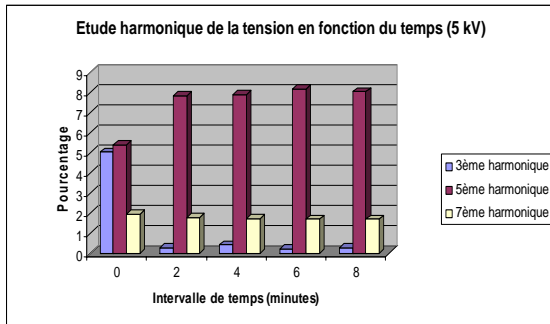


Figure V.18. Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV)

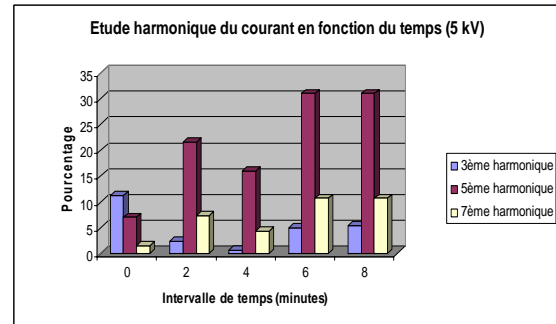


Figure V.19. Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).

Nous remarquons dans ce cas que le cinquième harmonique de la tension augmente entre le premier et le deuxième instant pour atteindre un niveau limite (Figure V.16), le cinquième harmonique du courant de fuite augmente entre le premier et le deuxième instant puis il diminue (à cet instant les proportions des différents harmoniques diminuent). Cet instant est marqué par l'apparition des composantes d'arc local, l'apparition des arcs locaux a provoqué la diminution des taux d'harmoniques.

#### Niveau de tension de 7,5 kV

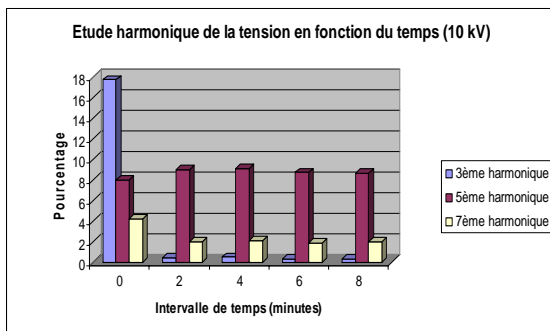


Figure V.20. Etude d'harmonique de la tension appliquée (7,5 kV).

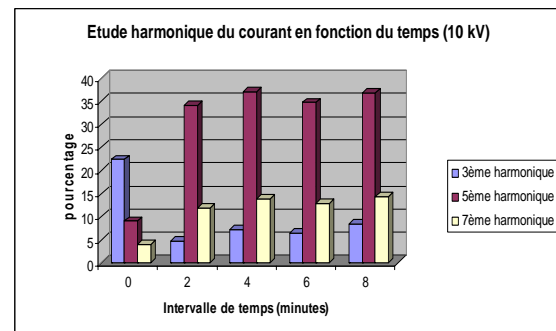


Figure V.21. Etude d'harmonique du courant de fuite (7,5 kV).

Dans le cas présent, le troisième harmonique est dominant au premier instant ; (Figure V.18 et V.19), il marque une certaine diminution au deuxième instant, instant d'apparition des arcs locaux. Après l'assèchement de la surface par ces derniers, il y a apparition de la composante transitoire durant toute la suite de la séquence, accompagnée d'une légère augmentation des taux des harmoniques de courant et d'une légère diminution de ces grandeurs pour le signal tension.

**Niveau de tension de 10 kV**

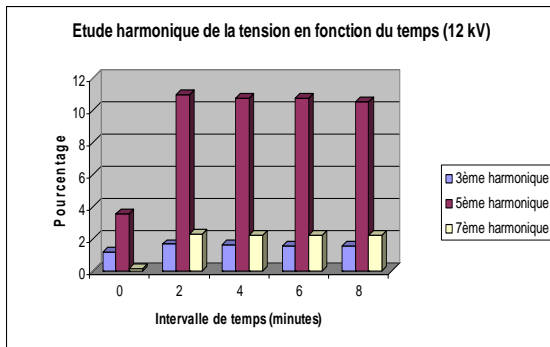


Figure V.22. Etude d’harmonique de la tension appliquée (10 kV).

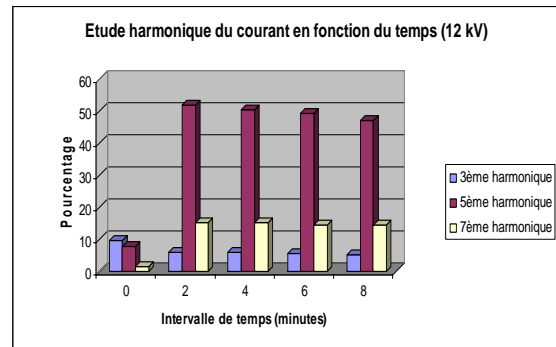


Figure V.23. Etude d’harmonique du courant de fuite (10 kV)

**Niveau de tension de 15kV**

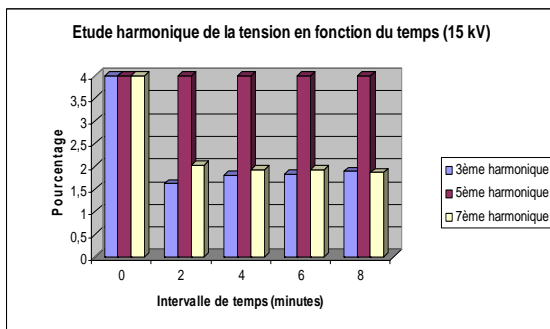


Figure V.24. Etude d’harmonique de la tension appliquée (15 kV).

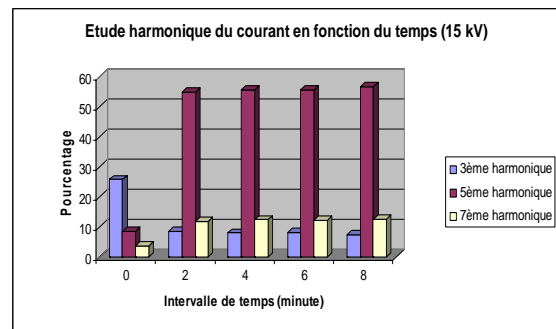


Figure V.25. Etude d’harmonique du courant de fuite (15 kV).

Dans ces deux derniers cas de figure (Figure V.22 et V.23), le premier instant est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale seule, à partir du deuxième instant ; c’est la composante transitoire qui caractérise le courant. Sur le plan fréquentiel, le troisième harmonique est très important au premier instant, par rapport aux instants qui suivent ; nous constatons aussi que le taux des harmoniques est quasiment constant à partir du deuxième instant.

**Conclusion**

Pour cette conductivité, nous remarquons sur le plan fréquentiel que les taux des harmoniques ne varient pas d’une manière significative une fois l’état sec atteint.

### V.2.4. Couche polluante de conductivité 29 mS/cm

#### Niveau de tension de 2,5 kV

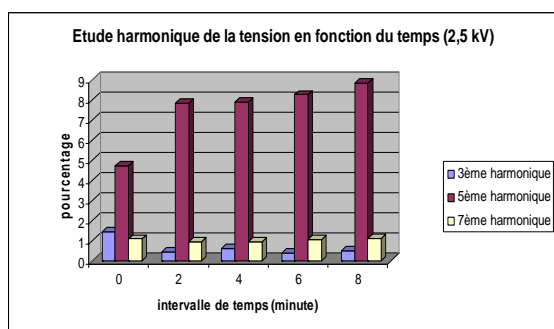


Figure V.26. Etude d'harmonique de la tension appliquée (2,5 kV).

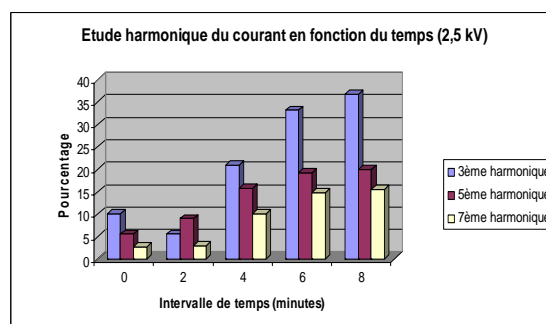


Figure V.27. Etude d'harmonique du courant de fuite (2,5 kV).

Nous remarquons, pour une telle combinaison de contraintes et contrairement aux cas déjà étudiés, que le troisième harmonique domine le signal du courant de fuite pour pratiquement toute la séquence d'enregistrement (Figure V.25), ce qui n'est pas le cas pour la tension où le cinquième harmonique domine toujours. Ceci peut être dû au faible niveau de tension appliquée ; donc les harmoniques causés par le réseau (particulièrement le cinquième) ne dominent pas. Nous remarquons ainsi que l'évolution du cinquième harmonique du courant suit celle de la tension.

#### Niveau de tension de 5 kV

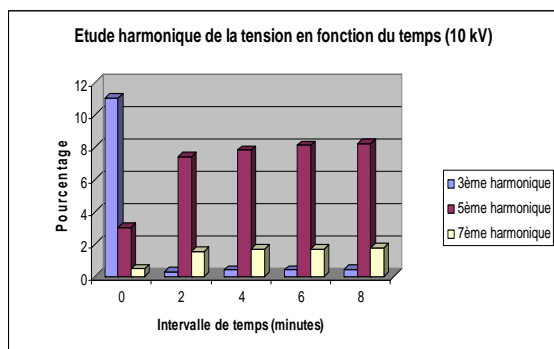


Figure V.28. Etude harmonique de la tension appliquée (5 kV).

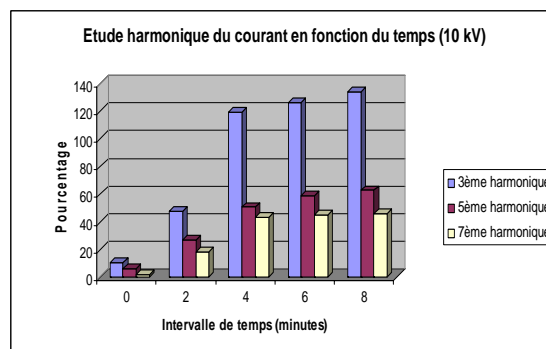


Figure V.29. Etude harmonique du courant de fuite (5 kV).

Dans ce cas, le courant est dominé par le troisième harmonique qui est présent dans toute la séquence enregistrée (Figure V.27), avec une augmentation dépassant les 100% ; ceci est dû aux signaux parasites qui dominent le signal utile. L'influence des signaux parasites est apparue à ce niveau, vu l'état de surface pour une telle conductivité et un tel niveau de tension (presque sec, donc faible courant de fuite).

### Niveau de tension de 10 kV

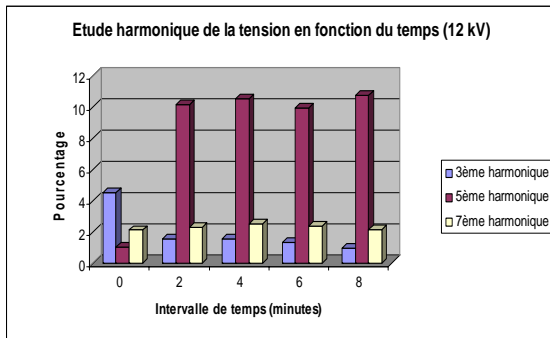


Figure V.30. Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).

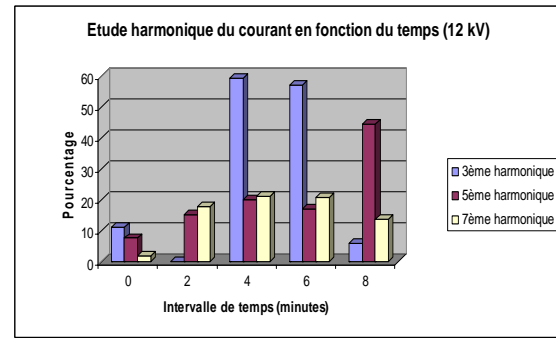


Figure V.31. Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).

Dans les deux derniers cas, nous remarquons qu'à certains instants, c'est le troisième harmonique qui domine (Figure V.29) ; ceci est peut être dû aux signaux parasites qui entrent en interférence avec le signal utile, l'amplitude de ce dernier étant suffisamment faible pour être dominée par les signaux parasites.

### Niveau de tension de 15 kV

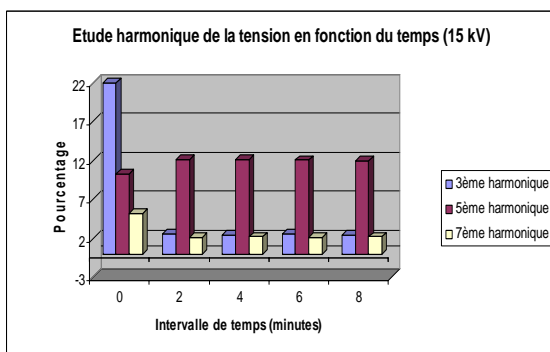


Figure V.32. Etude d'harmonique de la tension appliquée (15kV).

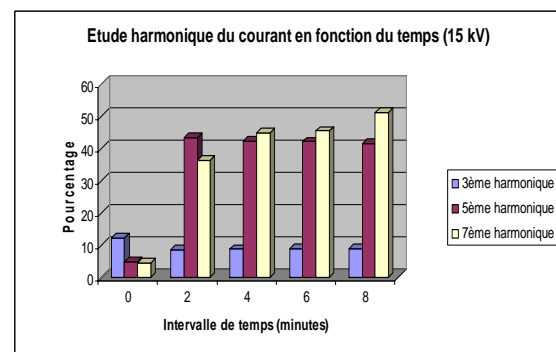


Figure V.33. Etude d'harmonique du courant de fuite (15kV).

Dans ce cas, l'harmonique qui domine le premier instant du signal tension est le troisième, ensuite c'est l'harmonique cinq qui domine après l'assèchement provoqué par les décharges entre le premier et le deuxième instant.

### Conclusion

Pour cette conductivité, nous remarquons que dans certains cas, le troisième harmonique du signal courant augmente avec le temps d'application de la tension, tandis que pour le cas du signal tension, cet harmonique diminue. Aussi, le septième harmonique de la tension diminue au fur et mesure, avec le temps d'application de la tension, tandis que dans le cas du courant, ce dernier marque une certaine augmentation du premier au deuxième instant, puis il garde un niveau quasiment constant.

**V.2.5. Couche de pollution de conductivité 50 mS/cm**

**Niveau de tension de 5 kV**

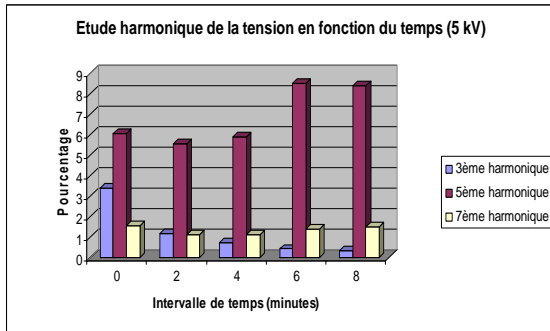


Figure V.34. Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV).

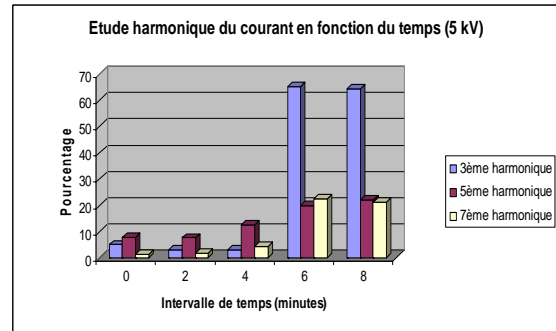


Figure V.35. Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).

**Niveau de tension de 7,5 kV**

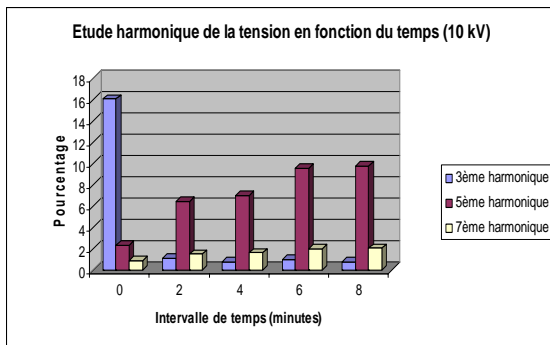


Figure V.36. Etude d'harmonique de la tension appliquée (7,5 kV).

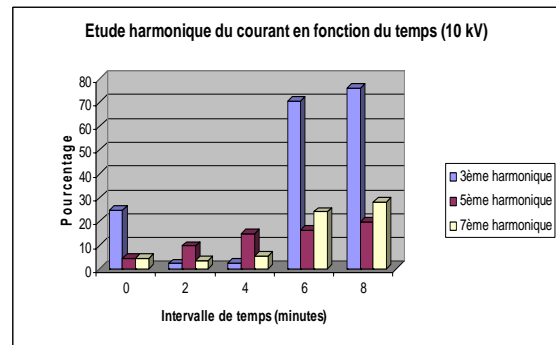


Figure V.37. Etude d'harmonique du courant de fuite (7,5 kV).

Dans ces deux derniers cas de figures, nous remarquons la présence du troisième harmonique dans le signal courant, avec un taux relativement élevé (Figure V.35) ; cela peut être dû aux signaux parasites qui sont du même ordre de grandeur que le signal utile. Nous remarquons aussi, que le niveau du cinquième harmonique est relativement faible par rapport aux cas déjà étudiés.

**Niveau de tension de 10 kV**

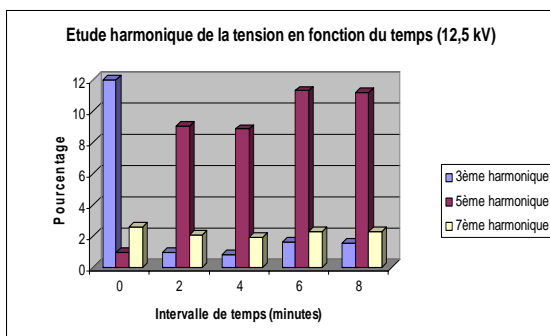


Figure V.38. Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).

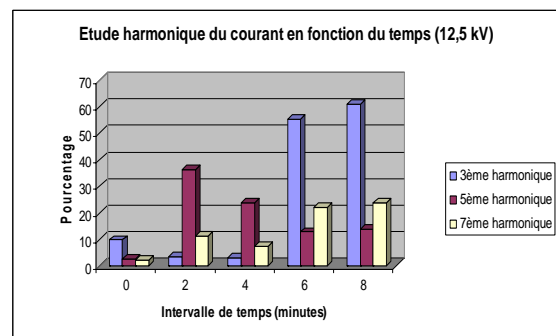


Figure V.39. Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).



Pour ces derniers cas, nous constatons la présence du troisième harmonique dans le signal courant avec un taux relativement élevé (Figure V.37), cela peut être due aux signaux parasites qui sont du même ordre de grandeur que le signal utile.

### Niveau de tension de 15 kV

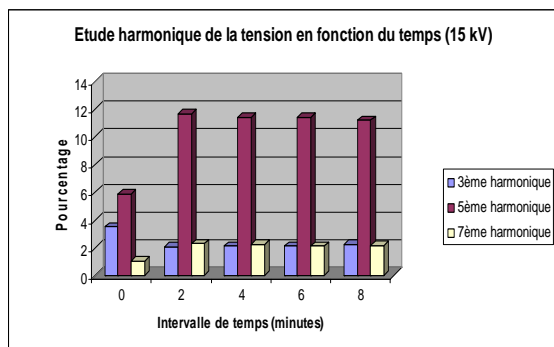


Figure V.40. Etude d'harmonique de la tension appliquée (15 kV).

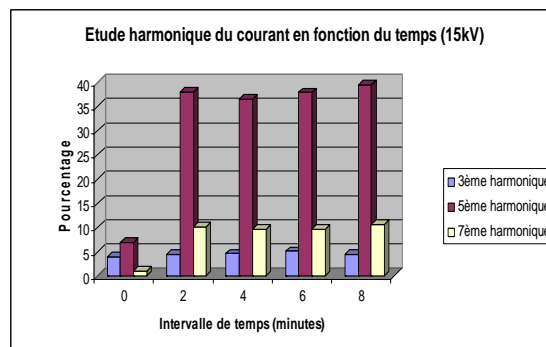


Figure V.41. Etude d'harmonique du courant de fuite (15 kV).

Nous remarquons pour ce cas, que le taux des harmoniques du courant de fuite (Figure V.39) est pratiquement le même à partir du deuxième instant ; à partir de ce même instant, la composante qui caractérise le courant de fuite est la composante transitoire.

### Conclusion

Le taux d'harmonique varie en fonction du temps d'application de la tension (augmentation du cinquième pour aussi bien le courant que la tension, diminution du troisième et septième harmonique de la tension...), tandis que pour des conductivités élevées ces taux gardent le même niveau à partir du deuxième instant. Les décharges ont pour effets la diminution des taux d'harmonique, généralement le cinquième. Pour une contrainte climatique sévère, nous remarquons que le signal courant est dominé par le troisième harmonique.

### V.3. Etude harmonique des signaux de l'isolateur réel

#### V.3.1. Couche polluante de conductivité 9,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$

##### Niveau de tension de 5 kV

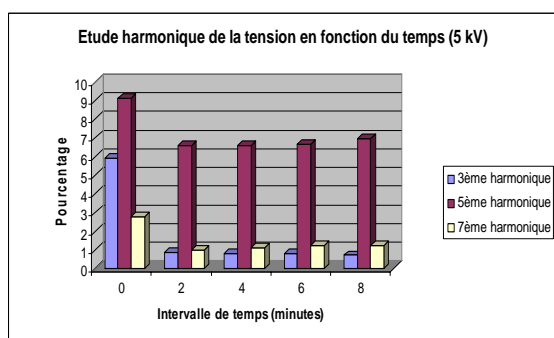


Figure V.42. Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV).

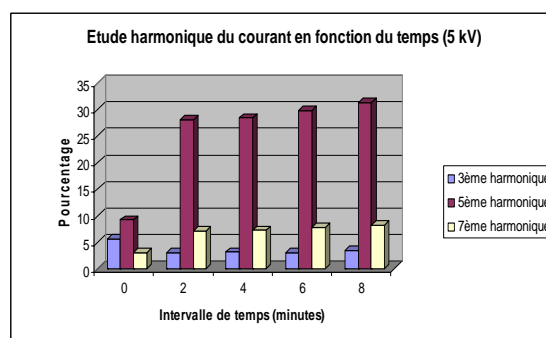


Figure V.43. Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).

Nous remarquons que le taux des différents harmoniques augmente avec le temps d'application pour le signal courant (Figure V.41) (sauf le troisième qui marque une légère diminution), tandis que pour le signal tension (Figure V.40), nous constatons une diminution du taux des différents harmoniques.

**Niveau de tension de 10 kV**

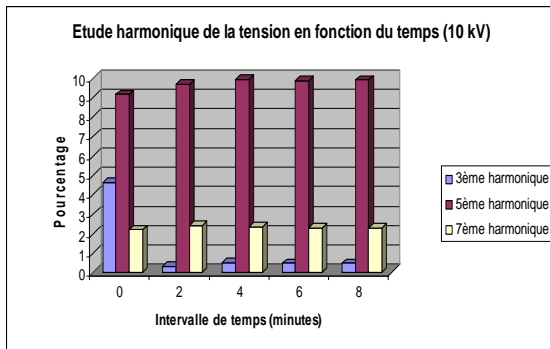


Figure V.44. Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).

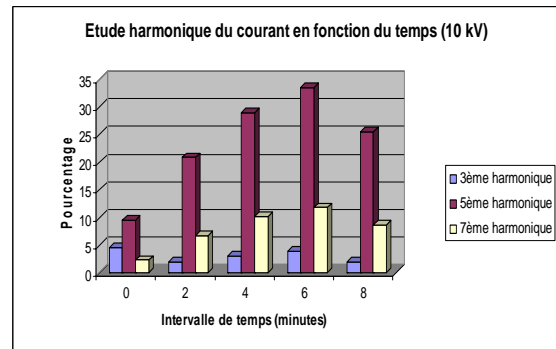


Figure V.45. Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).

Nous remarquons dans ce cas de figure, que les taux des harmoniques du signal tension gardent le même sens de variation que dans les cas précédents (Figure V.40), tandis que pour le signal courant (Figure V.41), nous observons une diminution des différents harmoniques au cinquième instant ; à cet instant c'est la composante d'arc local qui domine.

**Niveau de tension de 15 kV**

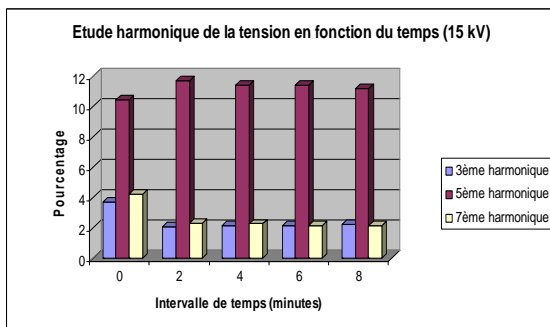


Figure V.46. Etude d'harmonique de la tension appliquée (15 kV).

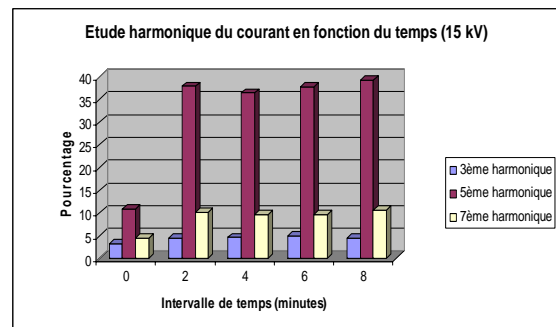


Figure V.47. Etude d'harmonique du courant de fuite (15 kV).

Dans ce cas, la composante sinusoïdale est présente à tous les instants d'enregistrement (Figure IV.39.c). Sur le plan fréquentiel (Figure V.43), nous remarquons que le rapport troisième harmonique courant troisième harmonique tension ne varie pas d'une manière significative.

## Niveau de tension de 20 kV

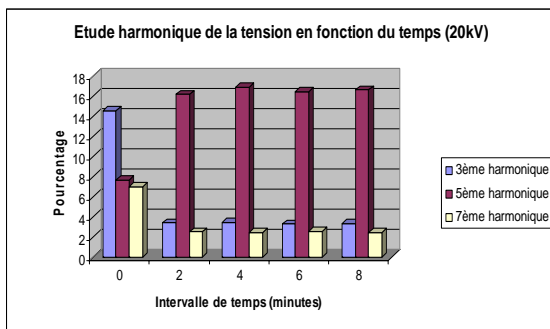


Figure V.48. Etude d'harmonique de la tension appliquée (20 kV).

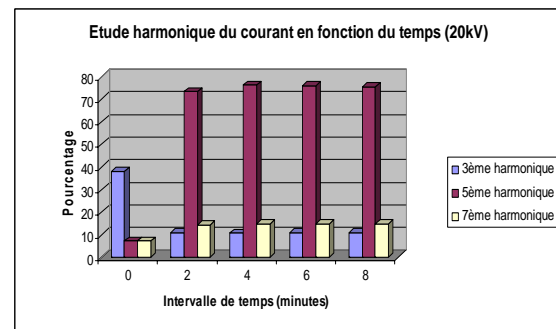


Figure V.49. Etude d'harmonique du courant de fuite (20 kV).

Dans ce cas, l'instant un est dominé par la composante sinusoïdale, tandis que les instants qui suivent sont caractérisés par la composante transitoire (Figure IV.40.c). Sur le plan fréquentiel (Figure V.45), nous remarquons que les taux d'harmonique du courant et de la tension gardent pratiquement le même niveau à partir du deuxième instant ; ce niveau de tension a provoqué un assèchement quasi-total à partir du deuxième instant.

## Conclusion

L'analyse faite sur les signaux enregistrés pour une telle conductivité ne diffère pas beaucoup des conductivités précédentes. Pour les faibles niveaux de tension, et à partir du deuxième instant, les proportions des harmoniques du signal tension diminuent à l'exception du taux du cinquième harmonique qui garde un niveau quasi constant, tandis que pour le signal courant de fuite c'est l'effet inverse qui est constaté. Pour des niveaux de tension relativement élevés, les taux des harmoniques gardent un niveau constant à partir du deuxième instant, sauf dans le cas d'apparition d'arcs locaux où les taux des harmoniques du signal courant diminuent.

## V.3.2. Couche polluante de conductivité 10 mS/cm

## Niveau de tension de 5 kV

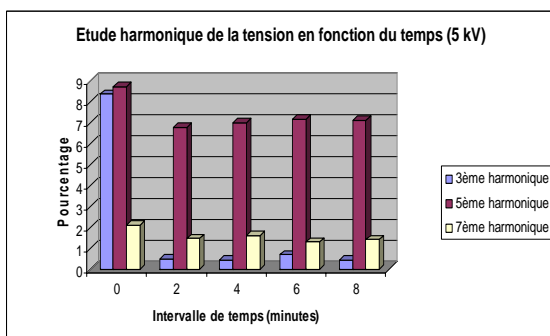


Figure V.50. Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV).

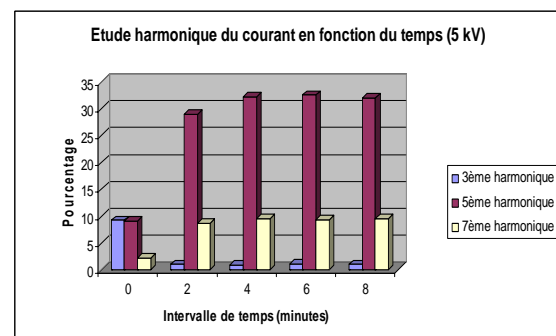


Figure V.51. Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).

**Niveau de tension de 10 kV**

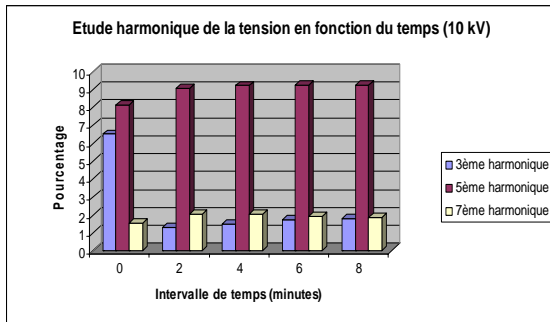


Figure V.52. Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).

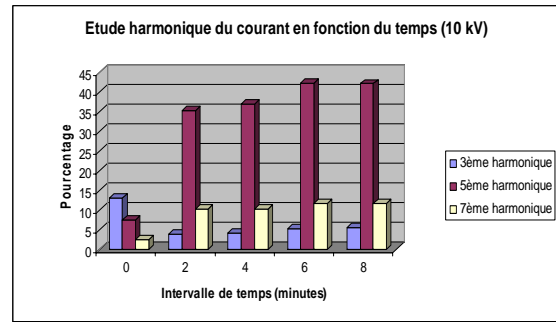


Figure V.53. Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).

**Niveau de tension de 15 kV**

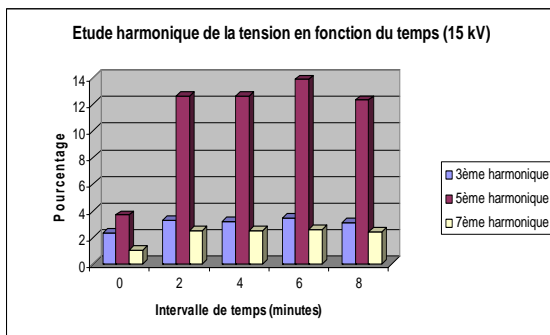


Figure V.54. Etude d'harmonique de la tension appliquée (15 kV).

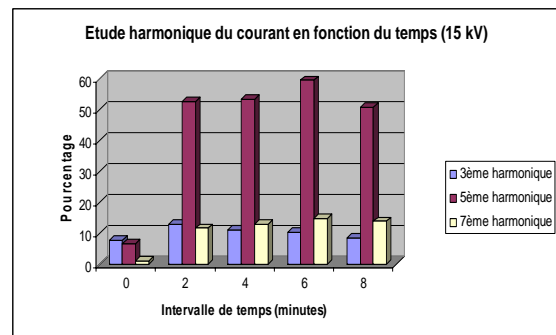


Figure V.55. Etude d'harmonique du courant de fuite (15 kV).

**Niveau de tension de 20 kV**

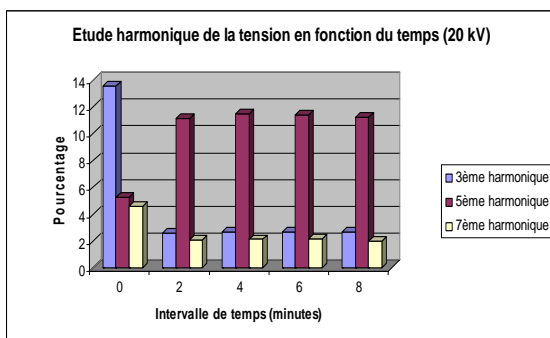


Figure V.56. Etude d'harmonique de la tension appliquée (20 kV).

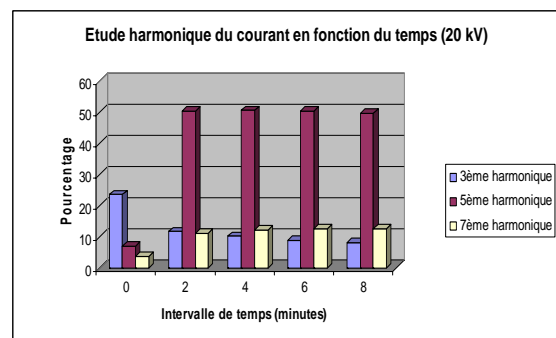


Figure V.57. Etude d'harmonique du courant de fuite (20 kV).

**Conclusion**

Pour cette conductivité, le premier instant du signal de courant de fuite est caractérisé par la composante sinusoïdale. Les instants qui suivent sont caractérisés par la composante transitoire seule. Sur le plan fréquentiel, c'est le taux du troisième harmonique qui domine le premier instant sauf pour certains cas. Pour les instants qui suivent, c'est le cinquième harmonique qui domine. A partir du deuxième instant, le taux des différents harmoniques des deux signaux est pratiquement le même.

**V.3.3. Couche polluante de conductivité 20 mS/cm**

**Niveau de tension de 5 kV**

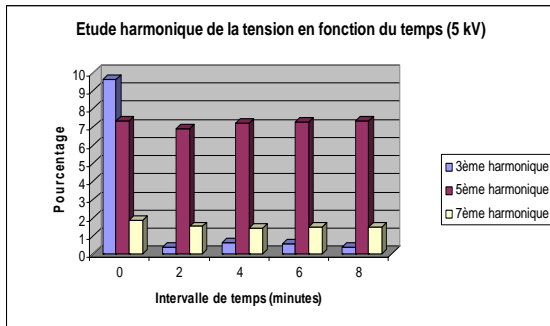


Figure V.58. Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV).

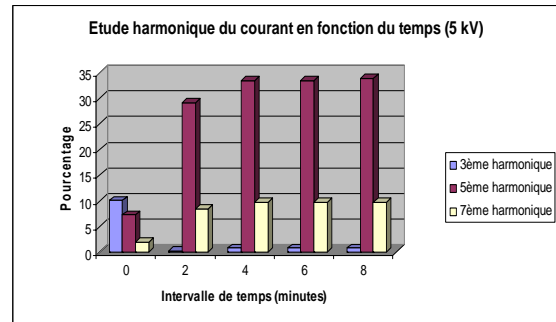


Figure V.59. Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).

**Niveau de tension de 7,5 kV**

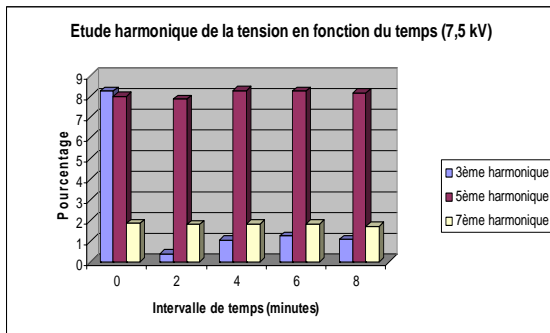


Figure V.60. Etude d'harmonique de la tension appliquée (7,5 kV).

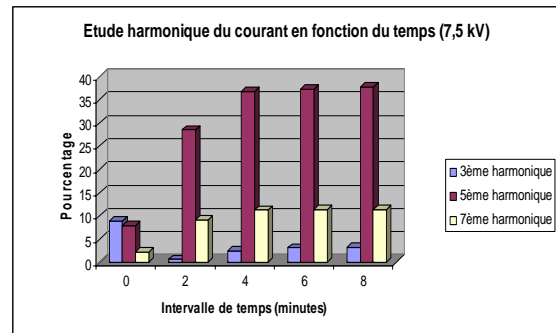


Figure V.61. Etude d'harmonique du courant de fuite (7,5 kV).

**Niveau de tension de 10 kV**

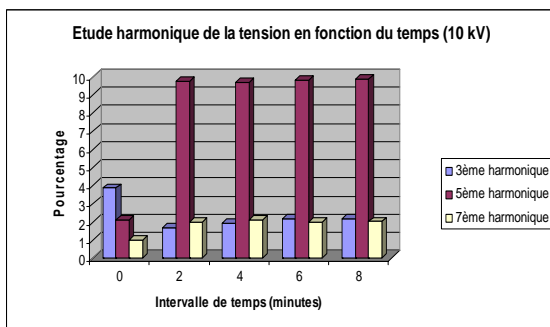


Figure V.62. Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).

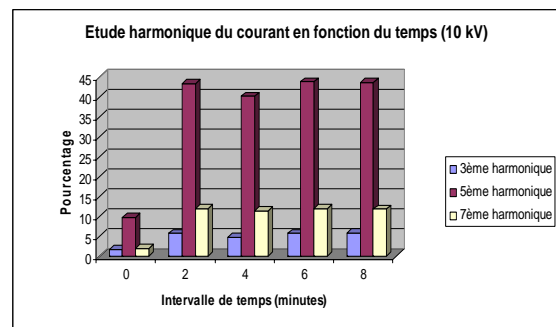


Figure V.63. Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).

**Niveau de tension de 15 kV**

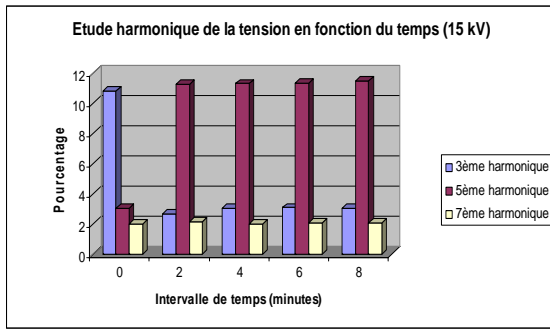


Figure V.64. Etude d’harmonique de la tension appliquée (15 kV).

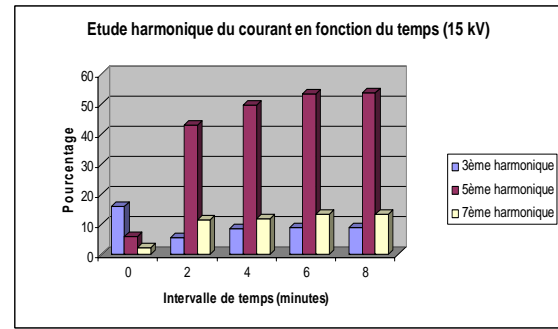


Figure V.65. Etude d’harmonique du courant de fuite (15 kV).

Nous remarquons que le troisième harmonique est dominant durant le premier instant (Figure V.59), tandis qu’à partir du deuxième instant c’est le cinquième harmonique qui domine. Dans certains cas, le deuxième instant présente une légère diminution par rapport aux instants qui suivent ; à cet instant le courant est caractérisé par la composante d’arc local.

**Conclusion**

Nous constatons qu’à partir du deuxième instant, le taux d’harmoniques du signal tension appliquée ne varie pas d’une manière significative, tandis que pour le signal courant de fuite il y a augmentation du taux de cinquième harmonique.

**V.3.4. Couche de pollution de conductivité 29 mS/cm**

**Niveau de tension de 5 kV**

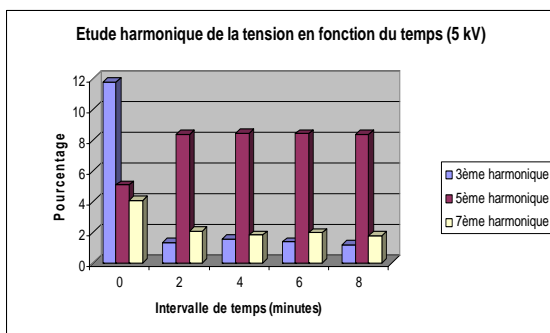


Figure V.66. Etude d’harmonique de la tension appliquée (5kV).

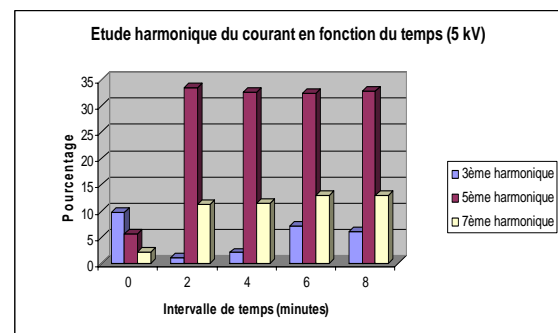


Figure V.67. Etude d’harmonique du courant de fuite (5kV).

**Niveau de tension de 10 kV**

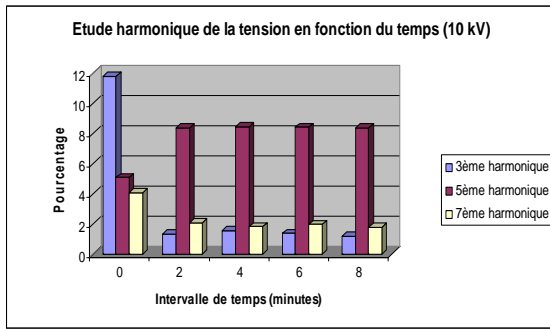


Figure V.68. Etude d'harmonique de la tension appliquée (10kV).

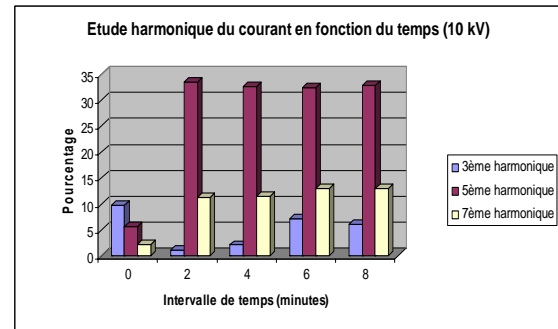


Figure V.69. Etude d'harmonique du courant de fuite (10kV).

**Niveau de tension de 12,5 kV**

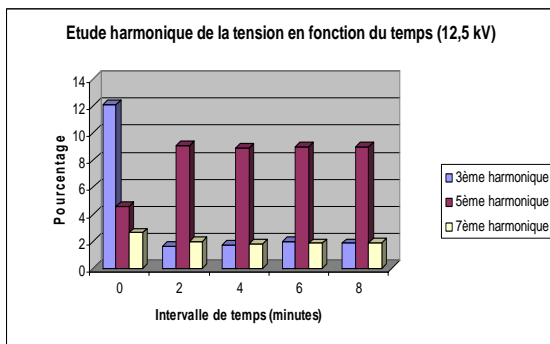


Figure V.70. Etude d'harmonique de la tension appliquée (12.5kV).

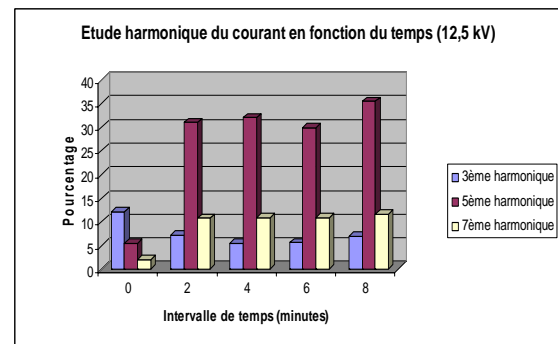


Figure V.71. Etude d'harmonique du courant de fuite (12.5kV).

**Niveau de tension de 15 kV**

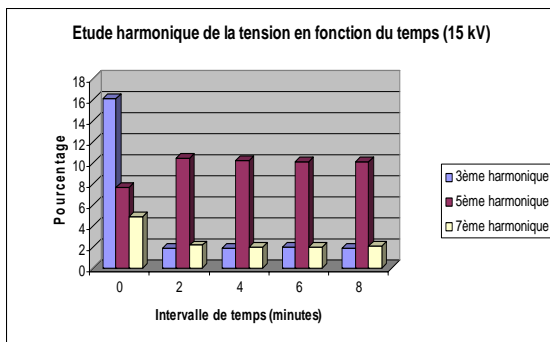


Figure V.72. Etude d'harmonique de la tension appliquée (15 kV).

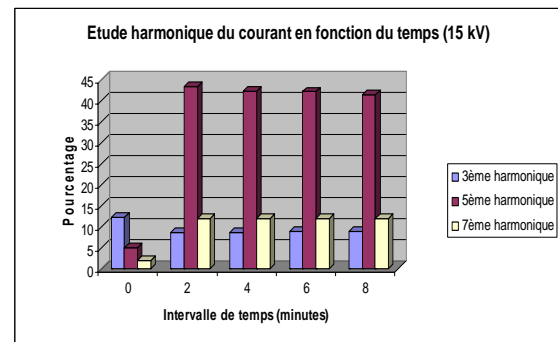


Figure V.73. Etude d'harmonique du courant de fuite (15 kV).

L'analyse, sur le plan fréquentiel, des signaux enregistrés pour cette conductivité (Figure V.61, Figure V.63, Figure V.65 et Figure V.67), présente les mêmes conclusions que pour la conductivité précédente. Pour des niveaux de tension élevés et à partir du deuxième instant, le taux des harmoniques est pratiquement le même, tandis que pour des niveaux faibles de la tension, le troisième et le septième harmonique de la tension diminuent alors que

ceux du courant augmentent à partir de ce même instant. Les taux des harmoniques du signal courant marquent une légère diminution au moment des décharges.

## Conclusion

Nous constatons qu'au premier instant le taux d'harmonique du troisième harmonique est amorti par le système (L'impédance surfacique du modèle), le taux du cinquième et septième harmonique sont pratiquement les mêmes pour les deux signaux (tension appliquée et courant de fuite).

### V.3.5. Couche polluante de conductivité 50 mS/cm

#### Niveau de tension de 5 kV

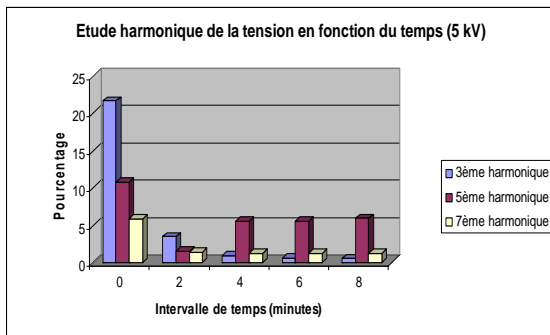


Figure V.74. Etude d'harmonique de la tension appliquée (5 kV).

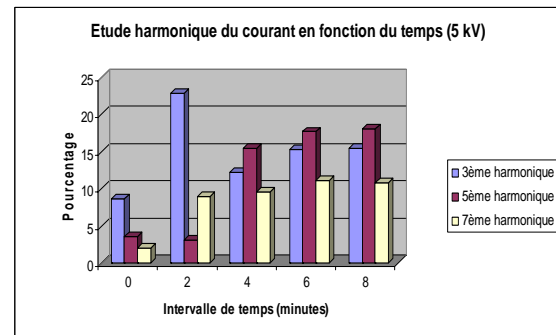


Figure V.75. Etude d'harmonique du courant de fuite (5 kV).

Nous constatons, dans ce cas, que les taux des différents harmoniques du courant (Figure V.69) sont inférieurs à ceux de la tension (Figure V.68) pour le premier instant, et que les taux d'harmonique deviennent relativement faibles à partir du deuxième instant pour la tension, par rapport aux niveaux précédents. Nous remarquons aussi que l'instant présentant le plus faible taux d'harmonique correspond au moment des décharges.

#### Niveau de tension de 10 kV

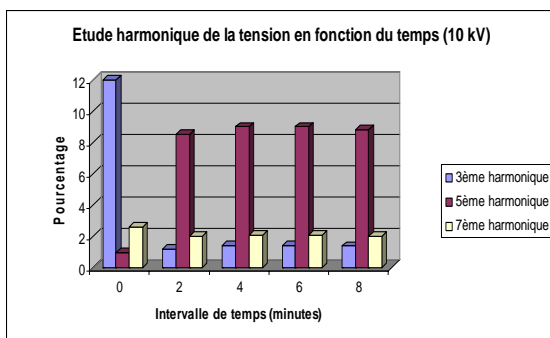


Figure V.76. Etude d'harmonique de la tension appliquée (10 kV).

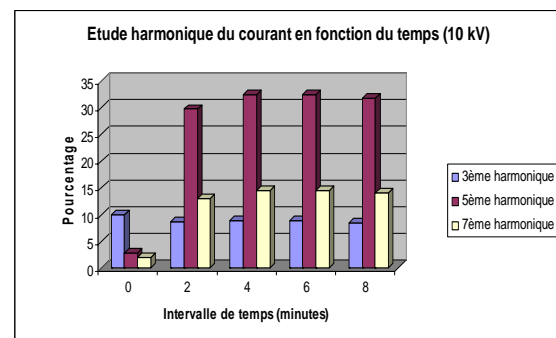


Figure V.77. Etude d'harmonique du courant de fuite (10 kV).



### Niveau de tension de 12,5 kV

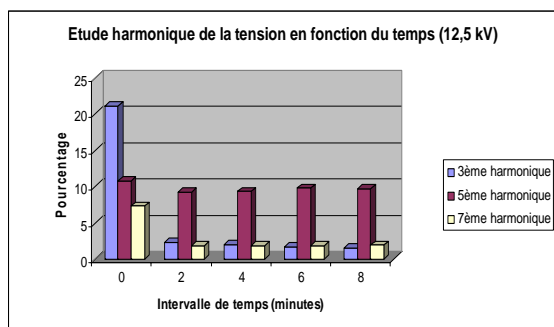


Figure V.78. Etude d'harmonique de la tension appliquée (12,5 kV).

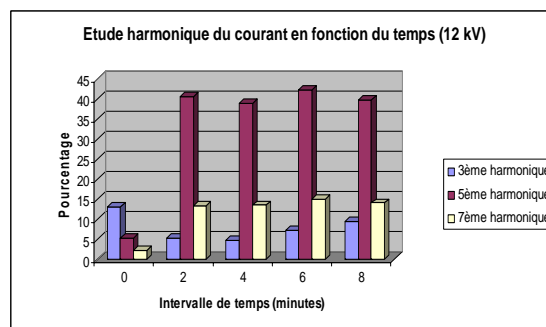


Figure V.79. Etude d'harmonique du courant de fuite (12,5 kV).

### Niveau de tension de 15 kV

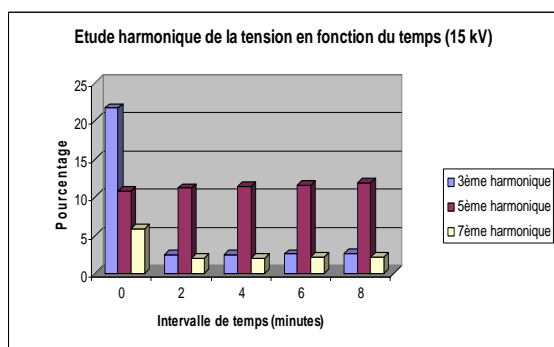


Figure V.80. Etude d'harmonique de la tension appliquée (15 kV).

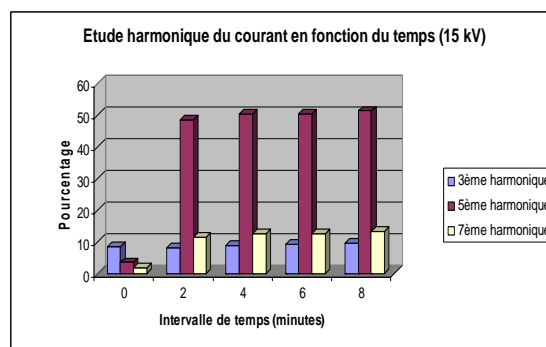


Figure V.81. Etude d'harmonique du courant de fuite (15 kV).

Pour ces derniers niveaux de tension, le premier instant est caractérisé par la présence de la composante sinusoïdale seule (Figure IV.60.c), les instants qui suivent sont caractérisés par la composante transitoire qui domine. Nous remarquons, sur le plan fréquentiel, que le taux d'harmonique ne varie pas d'une manière significative à partir du deuxième instant (Figure V.75). Au premier instant, le taux d'harmoniques du courant est inférieur à celui de la tension appliquée, tandis qu'à partir du deuxième instant, le taux des harmoniques du courant de fuite devient supérieur à celui de la tension appliquée.

### Conclusion

Après l'analyse faite sur les signaux tension appliquée courant de fuite, nous constatons qu'au premier instant les harmoniques sont amortis par le système (l'impédance surfacique du modèle). Tandis qu'à partir du deuxième instant, les harmoniques présents dans le signal tension appliquée sont amplifiés par le système (l'impédance surfacique du modèle).

### V.4. Discussion

Nous remarquons après analyse des signaux enregistrés (dans les deux cas isolateur réel et modèle du laboratoire) que la tension délivrée par le transformateur n'est pas purement sinusoïdale. En effet, le transformateur d'essai à haute tension possède, par la présence d'isolations entre les spires ainsi que l'objet en essai, un caractère capacitif constituant, avec

les inductances de fuite du transformateur, des circuits résonants série accordés à des fréquences voisines des harmoniques de tensions provenant du réseau, en plus, la saturation du circuit magnétique conduit engendre une non linéarité dans les signaux de sortie (tension et courant en aval du transformateur) [80]. Ces harmoniques apparaissent sur le signal courant, ils sont amortis au premier instant d'application de la tension pour des conductivités élevées (30 à 50 mS/cm), puis ils sont amplifiés (à partir du deuxième instant. Pour des conductivités moins importantes (de 9,5  $\mu$ S/cm à 20 mS/cm), ces harmoniques sont amplifiés dès le premier instant, cette amplification devient plus importante à partir du deuxième instant ce qui est justifié par l'augmentation de l'effet capacitif. Nous remarquons pour la majorité des cas que le taux d'amplification diminue aux moments des décharges (arcs locaux), en fait, les décharges ont pour effet de court-circuiter les bandes sèches donc diminution de l'effet capacitif, ce qui entraîne la diminution du taux d'amplification des harmoniques présents dans le signal tension.

---

*VI. Modélisation du Comportement de  
l'Isolateur*

---

## VI.1. Modélisation

### VI.1.1. Utilisation de la méthode d'identification du processus

#### VI.1.1.1. Introduction

Cette méthode consiste à identifier un système en lui attribuant une fonction de transfert d'un certain ordre. Les paramètres de cette fonction de transfert sont tirés à partir des signaux d'entrée et de sortie du processus ; dans notre cas, le système en question est un isolateur dont nous essayons d'étudier le comportement du courant de fuite qui circule à travers sa surface, le signal d'entrée est la tension d'alimentation, le signal de sortie est le courant de fuite.

#### VI.1.1.2. But

Le but d'une telle modélisation est, d'une part, la compréhension du comportement du courant de fuite à travers la surface de l'isolateur, et d'autre part, la prédiction du contournement en généralisant le modèle calculé.

#### VI.1.1.3. Cas de l'isolateur réel

Dans cette partie, nous allons définir les paramètres de la fonction de transfert qui relie l'entrée (tension appliquée) à la sortie (courant de fuite).

Le modèle a la forme suivante :

$$\frac{I(s)}{U(s)} = \frac{K}{s(1+T_1s)(1+T_2s)(1+T_3s)} \quad (\text{VI.1})$$

Le choix d'un tel type et d'un tel ordre (4 pôles type PI) est fait pour avoir le maximum de précision ; ce choix est fait après l'utilisation des principales formes (P1I, P2I, P1D, P2D, P3D). Les résultats représentés dans le tableau suivant, ont été calculés en utilisant un algorithme MATLAB® qui donne la fonction de transfert d'un système pour une entrée et une sortie données :

		Conductivité (mS/cm)				
	U (kV)	0.0095	10	20	29	50
T1	5	0.001	0.001057	0.0010769	0.001	0.0010499
	10	0.0015886	0.00109	0.0010769	0.001	0.0010847
	15	0.002154	0.0037984	0.00359	0.004011	0.0030247
T2	5	0.0011086	0.0011704	0.001023	0.0013415	1,26E-03
	10	0.0031756	0.0011784	0.0010435	0.00174	0,0019553
	15	0.0046	0.00248	0.0030937	0.0019367	0,0025436
T3	5	0.00254	0.001	0.001428	0.0017344	0,00175
	10	0.003	0.0011	0.0014286	0.0017344	0,0017832
	15	0.0036	0.00306	0.0024397	0.0017344	0,0018224

Tableau VI.1 Constantes de temps de la fonction de transfert. Cas d'un isolateur réel.

L'évolution du gain de la fonction de transfert ( $K$  déterminée précédemment) en fonction de la conductivité de la couche polluante est représentée sur la figure VI.1. Nous remarquons que le gain augmente avec l'augmentation de la conductivité de la couche

polluante. Cette évolution est presque la même pour les différents niveaux de tension jusqu'à la conductivité de 50 mS/cm où il y a un début de divergence (Figure VI.1) ; nous remarquons que, pour le niveau de tension de 15 kV et une conductivité de la couche polluante de 50 mS/cm, le gain est moins important que pour les autres niveaux de tension.

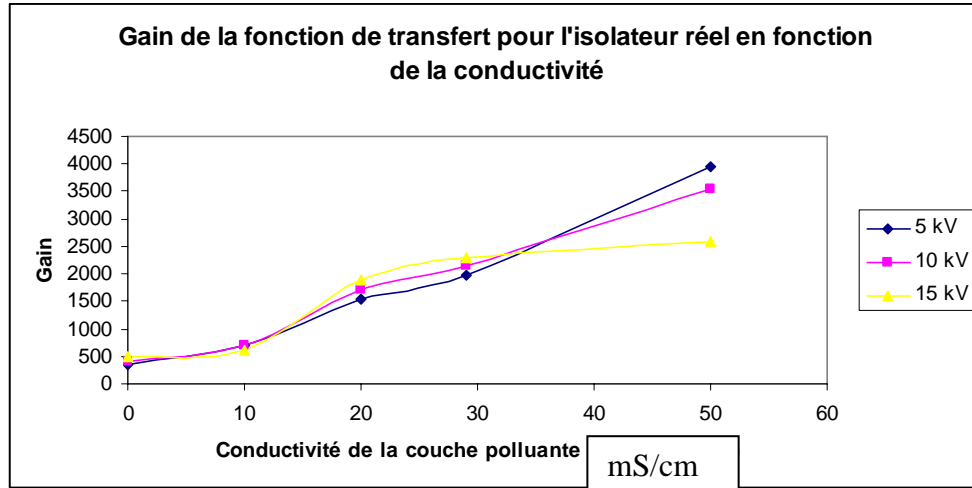


Figure VI.1 Evolution du gain de la fonction de transfert en fonction de la conductivité. Cas d'un isolateur réel.

**VI.1.1.4. Cas du modèle de laboratoire**

Le modèle de la fonction de transfert choisi, pour simuler le comportement du courant de fuite sur la surface du modèle de laboratoire, est de même forme que celui choisi pour l'isolateur. Nous avons utilisé le même algorithme que dans la partie précédente et l'expression de la fonction de transfert est comme suit :

$$\frac{I(s)}{U(s)} = \frac{K}{s(1+T_1s)(1+T_2s)(1+T_3s)} \tag{VI.2}$$

Le tableau suivant représente les valeurs des paramètres de la fonction de transfert :

		Conductivité (mS/cm)				
		0,0095	10	20	29	50
T1	5	0,00105	0,001	0,001	0,0014077	0,0012755
	10	0,0011	0,001255	0,001	0,00172	0,0012814
	15	0,002	0,0037	0,00354	0,0023396	0,0020512
T2	5	0,0010046	0,001	0,001	0,001126	0,0016736
	10	0,001186	0,0012376	0,001	0,001247	0,0021065
	15	0,0031756	0,003438	0,003178	0,002542	2,39E-03
T3	5	0,001057	0,001	0,0015	0,001	0,001
	10	0,0010781	0,0025	0,0035	0,0026134	0,0029452
	15	0,0042413	0,003	0,0040	0,002984	0,003237

Tableau VI.2 Constantes de temps de la fonction de transfert. Cas du modèle de laboratoire.

L'évolution du gain de la fonction de transfert de l'expression (VI.2) ( $K$ ) en fonction de la conductivité de la couche polluante, pour différents niveaux de tension appliquée, peut être modélisée comme suit :

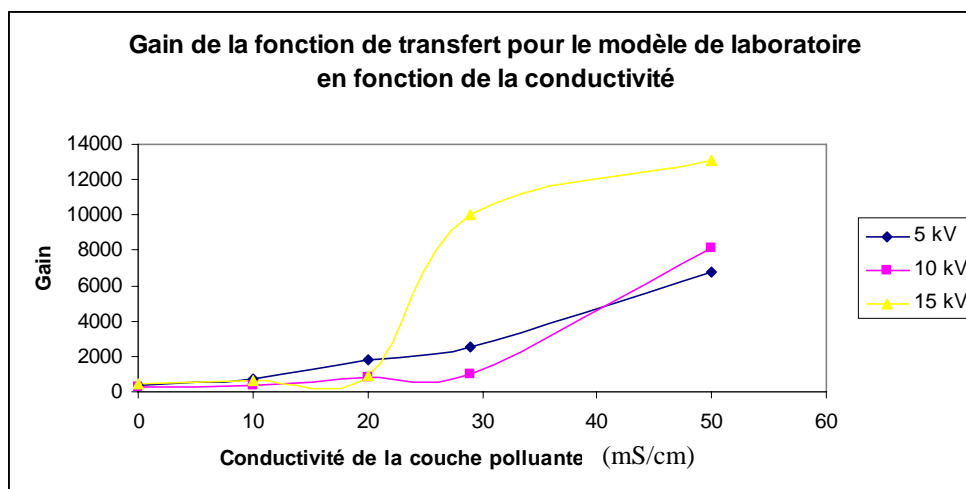


Figure VI.2 Evolution du gain de la fonction de transfert en fonction de la conductivité  
Cas du modèle du laboratoire.

Le gain de la fonction de transfert (expression VI.2) varie d'une façon exponentielle, cela veut dire que plus la conductivité augmente plus le courant augmente davantage. Dans ce cas, la divergence entre les courbes représentant la variation du gain en fonction de la couche polluante pour différents niveaux de tension, commence à partir de la conductivité 20 mS/cm. Ainsi, pour cette conductivité, le gain le plus élevé est celui correspondant à la tension 15 kV (la plus élevée), tandis que pour le cas de l'isolateur c'était l'inverse. Cette inversion peut être due à la différence de forme entre l'isolateur réel et le modèle du laboratoire ; pour l'isolateur réel, la résistance de transfert thermique est plus faible que dans le cas du modèle de laboratoire où les deux électrodes sont séparées par la distance inter - électrodes.

## VI.2. Modèle du rapport tension courant caractérisant la couche de pollution en fonction de la conductivité

### VI.2.1. But

Le but de cette modélisation est d'établir un modèle qui nous permet d'estimer la valeur du rapport tension courant caractérisant la couche de pollution. Cela peut faire l'objet d'un critère de comparaison des isolateurs conçus à l'aide de matériaux différents ou de mêmes matériaux mais de profils différents, exposés soit aux mêmes contraintes soit à des contraintes différentes.

### VI.2.2. Variation du rapport (tension courant) en fonction de la conductivité de la couche polluante

Le rapport (tension courant) est calculé à partir des résultats du courant de fuite ; nous divisons la tension appliquée par le courant de fuite mesuré. Les résultats obtenus sont illustrés dans ce qui suit :

- Cas de l'isolateur réel

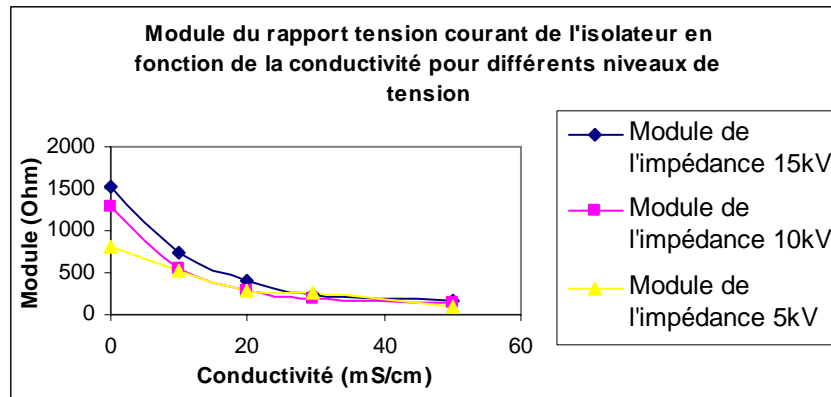


Figure VI.3. Rapport tension courant en fonction de la conductivité.  
Cas de l'isolateur réel.

- Cas du modèle de laboratoire

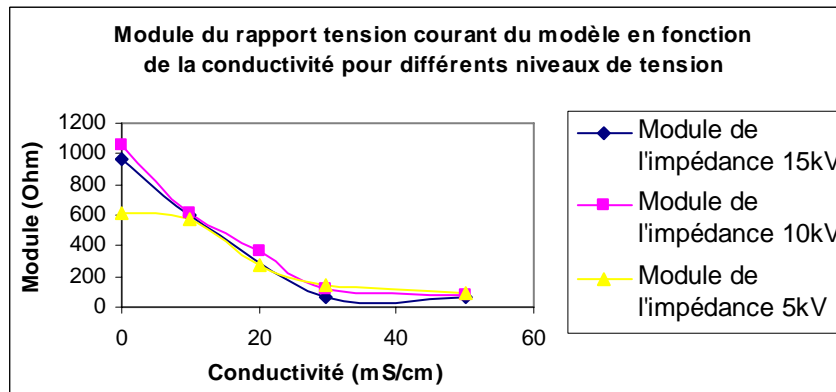


Figure VI.4 Rapport tension courant en fonction de la conductivité de la couche polluante.  
Cas du modèle de laboratoire.

La variation du rapport tension courant en fonction de la conductivité de la couche de pollution est de forme exponentielle décroissante. Nous remarquons que les courbes représentant la variation du module de l'impédance en fonction de la conductivité, pour différents niveaux de tension, tendent vers les mêmes valeurs ; cela est tout à fait normal car pour des couches de pollution de forte conductivité, nous observons un phénomène de saturation du courant (l'amplitude du courant augmente de manière moins importante).

### VI.2.3. Modélisation

La variation du rapport tension-courant en fonction de la conductivité de la couche polluante est présentée dans les figures VI.3 et VI.4. Cette variation est de forme exponentielle décroissante, d'où le choix du modèle exprimé par la formule VI.3. Ce modèle a donné des valeurs tout à fait en accord avec l'expérimentation.

Nous avons utilisé les résultats de la variation du rapport tension-courant en fonction de la conductivité, pour déterminer l'expression empirique qui relie l'impédance à la conductivité de la couche polluante. Le modèle exprimant l'impédance en fonction de la conductivité, déduit de cela, (en mS/cm) s'écrit sous la forme suivante :

$$Z(\sigma) = Ae^{-b\sigma} \quad (\text{VI.3})$$

Valeurs des constantes  $A$  et  $b$  dans le cas d'un isolateur 15 12L et d'un modèle de laboratoire.

	U (kV)	A (ohm)	$b(s^{-1})$
Isolateur réel	15	838,92	0,0452
	10	645,68	0,0444
	5	565,45	0,0426
Modèle	15	610,36	0,0596
	10	696,23	0,0541
	5	467,09	0,0423

Tableau VI.3 Constantes du modèle du rapport tension courant (isolateur réel et modèle) en fonction de la conductivité.

Nous remarquons que, pour une conductivité de la couche polluante donnée, le coefficient "A" augmente avec l'augmentation de la tension, ce qui est tout à fait en accord avec la théorie  $Z=U/I$ . Pour des niveaux de tension élevés, l'évolution du courant de fuite n'a pas été aussi rapide que l'augmentation de la tension (Figure IV.13.e, 18.a), sauf pour quelques cas particuliers. Cette différence dans l'évolution se présente surtout pour des niveaux de tension élevés. L'état de surface, au moment où le niveau de tension souhaité est atteint, diffère d'un niveau à un autre et dépend de la conductivité de la couche de pollution. Le calcul d'erreurs est en annexe 8.

### VI.3. Modélisation de la variation rapport tension-courant en fonction du temps

#### VI.3.1. But

La modélisation rapport (tension courant), en fonction du temps, nous permet de comprendre les phénomènes qui ont lieu sur la surface isolante et d'estimer le taux d'assèchement, pour différentes conductivités et différents niveaux de tension.

#### VI.3.2. Variation du rapport tension-courant en fonction du temps



• Cas de l'isolateur réel

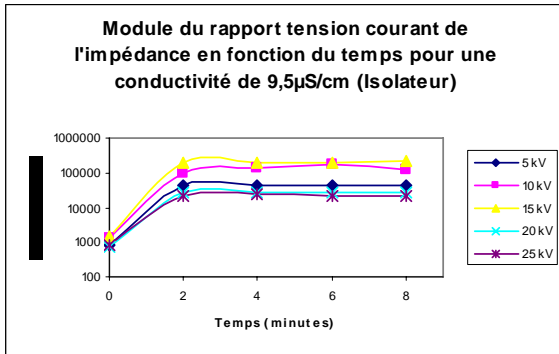


Figure VI.5. Variation du rapport tension-courant de l'isolateur en fonction du temps pour une conductivité de 9.5 μS/cm.

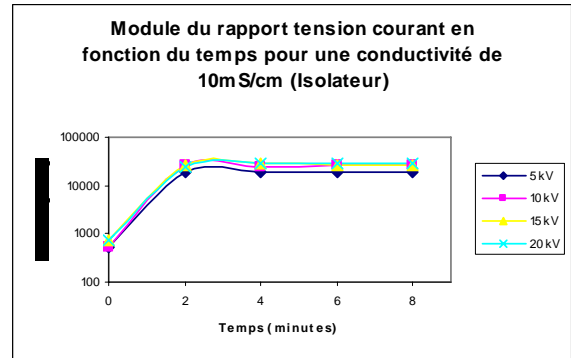


Figure VI.6. Variation rapport tension-courant de l'isolateur en fonction du temps pour une conductivité de 10 mS/cm.

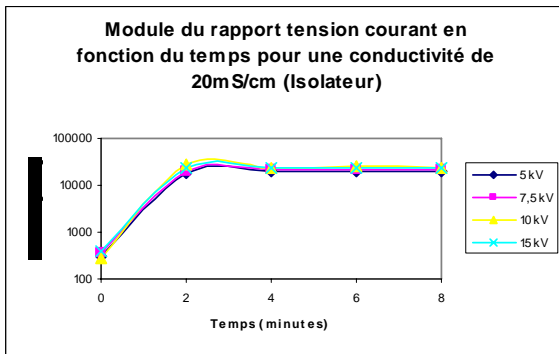


Figure VI.7. Variation du rapport tension-courant de l'isolateur en fonction du temps pour une conductivité de 20 mS/cm.

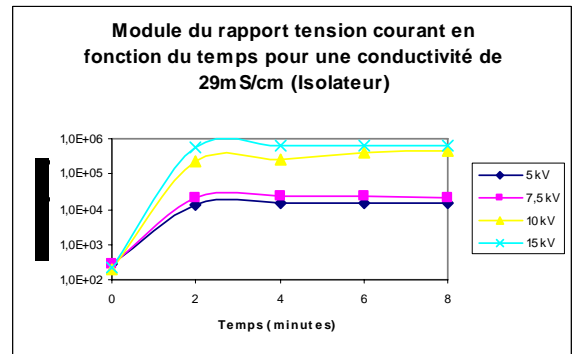


Figure VI.8. Variation du rapport tension-courant de l'isolateur en fonction du temps pour une conductivité de 29 mS/cm.

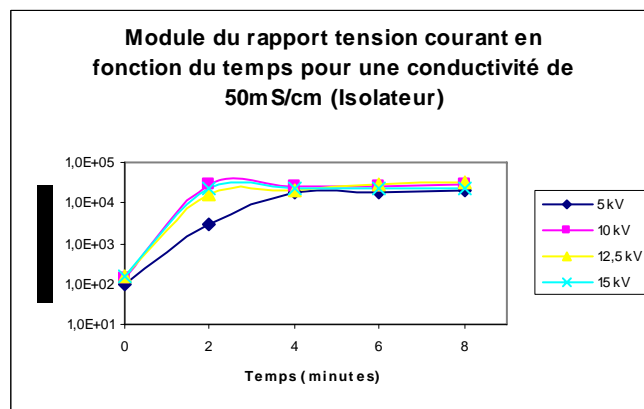


Figure VI.9. Variation du rapport tension-courant de l'isolateur en fonction du temps pour une conductivité de 50 mS/cm.

• Cas du modèle de laboratoire

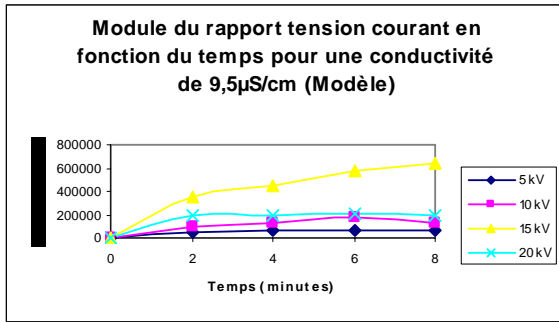


Figure VI.10. Variation du rapport tension-courant du modèle en fonction du temps pour une conductivité de 9.5 μS/cm.

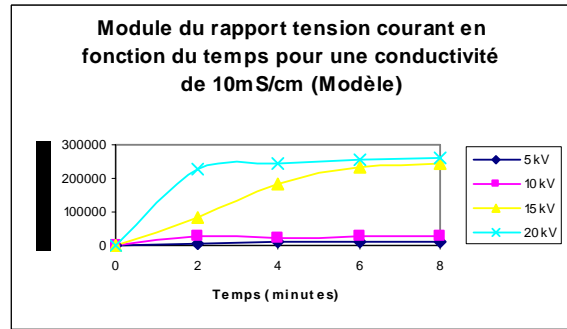


Figure VI.11. Variation du rapport tension-courant du modèle en fonction du temps pour une conductivité de 10 mS/cm.

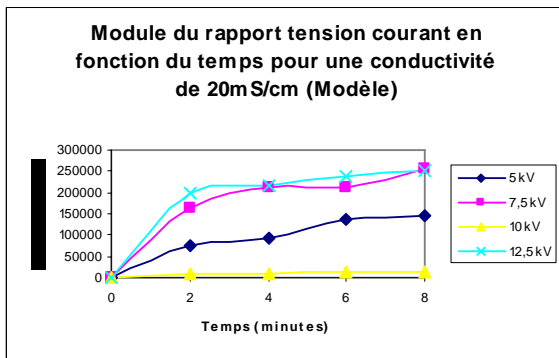


Figure VI.12. Variation du rapport tension-courant du modèle en fonction du temps pour une conductivité de 20 mS/cm.

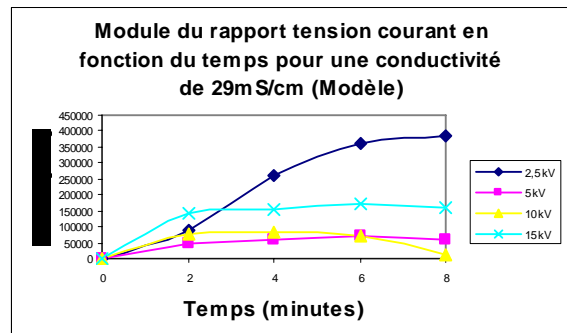


Figure VI.13. Variation du rapport tension-courant du modèle en fonction du temps pour une conductivité de 29 mS/cm.

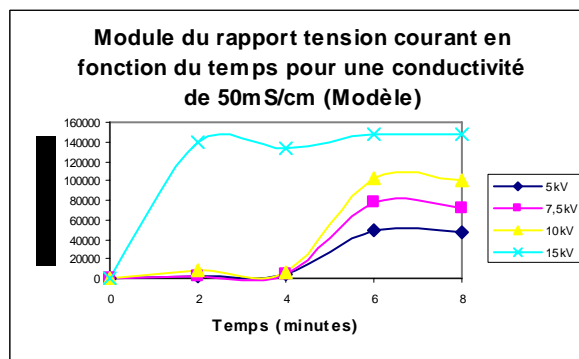


Figure VI.14. Variation du rapport tension-courant du modèle en fonction du temps pour une conductivité de 50 mS/cm.

Rapport tension-courant caractérisant l'impédance de la couche de pollution augmente en fonction du temps d'application de la tension. Généralement, ce rapport atteint sa valeur maximale autour du deuxième instant, puis il atteint son régime permanent avec une valeur légèrement inférieure à la valeur maximale ; cette légère diminution peut être due aux arcs locaux qui prennent naissance sur la surface de l'isolateur.

Le modèle qui caractérise la variation du rapport tension-courant en fonction du temps avec le plus de précision est de forme polynomiale ; la forme générale ainsi que les valeurs des différentes constantes du modèle sont présentées ci-dessous.

### VI.3.3. Modélisation de la variation du rapport tension-courant en fonction du temps

Dans ce paragraphe, nous allons modéliser le comportement du rapport tension-courant en fonction du temps et cela en utilisant une fonction polynomiale, le calcul des paramètres du modèle est fait en se basant sur un algorithme de calcul écrit sur MATLAB®. Cette fonction est de la forme :

$$Z(t) = A.t^2 + B.t + C \quad (\text{VI.4})$$

Où  $A$ ,  $B$  et  $C$  sont des constantes déterminées expérimentalement ;

Voici les valeurs des constantes  $A$ ,  $B$  et  $C$  dans le cas d'un isolateur 15 12L et d'un modèle de laboratoire humidifiés selon le mode déjà décrit ; Le calcul d'erreurs est en annexe 8.

- **Cas du modèle de laboratoire**

Conductivité (mS/cm)	U (kV)	A	B	C
0.0095	5	-1425,9	15791	3520,4
	10	-3691	40643	384,97
	15	-6802,2	107570	18516
	20	-4732,7	51907	13987
10	5	-169,88	2322,6	418,35
	10	-609,86	6658,88	2426,2
	15	-2604,5	43217	-4472,3
	20	-5601,6	64475	16659
20	5	-245,53	2791,3	1084,7
	7,5	-3530,2	48089	11332
	10	-1309,5	22841	3316,1
	12,5	-4601,2	56000	14615
30	2,5	-2476,6	56725	-11912
	5	-1437,4	16613	1734,9
	10	-3652,2	29925	2894,5
	15	-3895,3	43349	8821
50	5	454,22	1378,6	-1944,6
	7,5	710,86	2042,6	-3199,5
	10	973,86	2621,6	-3008,4
	15	-3262,6	36928	11133

Tableau VI.4 Constantes du modèle du rapport tension-courant en fonction du temps.  
Cas du modèle du laboratoire.

- **Cas de l'isolateur réel**

Conductivité (mS/cm)	U (kV)	A	B	C
0.0095	5	-1008,9	11016	3967,8
	10	-3677	40490	542,47
	15	-3996,8	48637	17140
	20	-645,31	7110,4	2605,8
10	5	-435,09	4777	1860,9
	10	-611,69	6678,5	2380,8
	15	-681,67	2744,8	2721,2
	20	-631,01	7182,1	2180,6
20	5	-481,13	5238,5	1560,4
	7,5	-499,15	5577,7	1640,3
	10	-638,24	6701,9	2638,8
	15	-589,28	6298,9	2238,6
30	5	-339,75	3786,8	1056
	7,5	-546,21	5947,5	1798,3
	10	-3599,9	66794	12869
	15	-15842	172484	44123
50	5	-232,32	3833,5	-1204,5
	10	-654,45	7061	2797,2
	12,5	-289,6	4927,9	947,21
	15	-552,61	6063,4	1906,9

Tableau VI.5 Constantes du modèle du rapport tension-courant fonction du temps.  
Cas de l'isolateur réel.

## VI.4. Modèle de variation du déphasage courant tension en fonction de la tension

### VI.4.1. But

Cette étude nous permet de voir l'évolution de l'effet capacitif en fonction du temps d'application de la tension, autrement dit l'état de surface de l'isolateur en termes d'assèchement et de mouillage.

L'allure de la variation du déphasage, en fonction du temps, est de forme logarithmique,

### VI.4.2. Modélisation

Il est intéressant d'étudier la variation des paramètres de la surface isolante (impédance et déphasage) en fonction du niveau de tension appliquée. L'étude du déphasage nous permet de définir l'état d'assèchement de la surface ; ce qui constitue une grande source d'information pour la caractérisation de l'état de la surface. Le calcul d'erreurs est en annexe 8.

Le modèle caractérisant la variation du déphasage en fonction du temps est le suivant :

$$\varphi(t) = A \cdot \ln(t) + B \quad (\text{VI.5})$$

Les résultats expérimentaux nous donnent les valeurs suivantes des constantes  $A$  et  $B$  :

- **Cas de l'isolateur réel**

Conductivité (mS/cm)	U (kV)	A	B
0.0095	5	47.922	17.20
0.0095	10	32.299	35.177
0.0095	15	39.986	26.593
0.0095	20	45.509	45.961
10	5	42.257	24.663
10	10	48.593	20.338
10	15	34.887	23.951
10	20	49.9	19.608
20	5	53.575	15.468
20	7.5	48.452	16.91
20	10	48.375	21.138
20	15	53.541	15.946
30	5	51.714	13.47
30	7.5	40.264	26.672
30	10	49.322	21.787
30	15	52.52	21.374
50	5	57.848	3.0385
50	10	48.342	23.495
50	12.5	47.897	23.971
50	15	50.909	22.873

Tableau VI.6 Constantes du modèle de déphasage en fonction du temps.  
Cas de l'isolateur réel.

- **Cas du modèle de laboratoire**

Conductivité (mS)	U (kV)	A	B
0.0095	5	40.727	14.924
0.0095	10	27.242	12.025
0.0095	15	32.919	19.968
0.0095	20	33.236	17.727
10	5	48.381	24.729
10	10	55.543	5.5551
10	15	52.891	2.0103
10	20	42.269	26.243
20	5	37.409	7.7553
20	7.5	50.545	19.978
20	10	48.381	24.729
20	12.5	44.948	25.996
30	5	47.465	22.664
30	7.5	44.031	20.811
30	10	51.126	18.821
30	15	51.126	18.821
50	5	47.992	-0.6055
50	7.5	51.146	-3.569
50	10	32.618	19.053
50	15	52.337	16.92

Tableau VI.7 Constantes du modèle déphasage en fonction du temps.  
Cas du modèle de laboratoire.

La variation du déphasage en fonction du temps est de forme logarithmique. Le déphasage commence à partir des valeurs proches de zéro, puis augmente jusqu'à atteindre un niveau proche de  $90^\circ$ . Le déphasage initial est légèrement différent de zéro. Cette différence montre l'existence de l'effet capacitif, cela même sous une pollution importante. Au régime établi, l'onde de courant n'est pas totalement en quadrature par rapport à celle de la tension ; cela nous informe que même à l'état sec, il y a un effet résistif qui participe à la circulation du courant de fuite.

## VI.5. Modélisation par un circuit équivalent

### VI.5.1. Introduction

Il est intéressant de modéliser le comportement de la surface polluée ; pour cela nous proposons l'étude de deux types de modèles. Ceci nous permet de mieux comprendre les mécanismes se produisant durant le passage du courant de fuite, en modélisant le comportement de ce dernier, et se fera en utilisant des composants de bases (résistance et capacité).

L'étude suivante nous permet d'aboutir au choix du modèle qui donnera de meilleurs résultats et par la suite, le modèle mathématique. Pour cela, nous allons étudier deux types de circuits électriques pour la modélisation de la surface polluée ; il s'agit du modèle série, et du modèle parallèle.

### VI.5.2. Modèle série

Il se compose d'une résistance et d'une capacité en série ; la résistance représente la couche de pollution conductrice et la capacité représente la zone sèche qui se comporte comme une capacité sous l'effet de la tension.

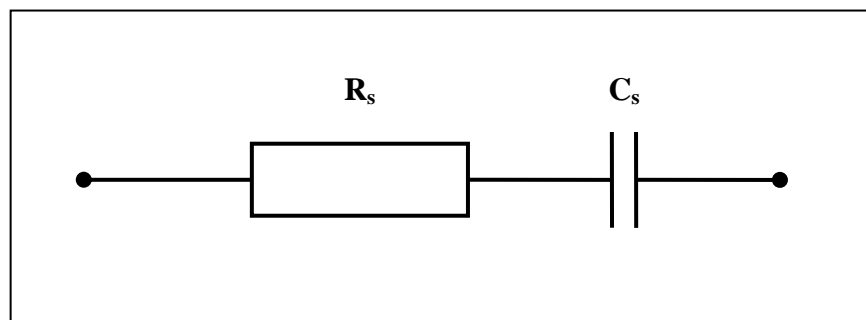


Figure VI.15. Circuit série équivalent.

Les équations (VI.6) et (VI.7), donnent les expressions de la résistance et la capacité du modèle série :

$$R_s = |Z| \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{VI.6})$$

$$C_s = \frac{1}{2\pi|Z|\sin(\varphi)} \quad (\text{VI.7})$$

### VI.5.3. Modèle parallèle

Il est constitué, comme le précédent, d'une résistance et d'une capacité en parallèle.

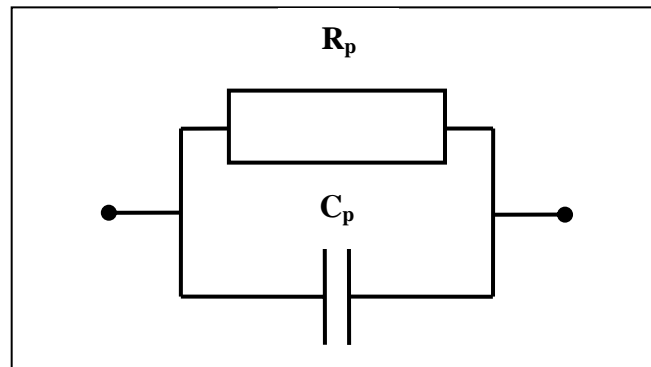


Figure VI.16. Circuit parallèle équivalent.

La résistance et la capacité du modèle parallèle sont données par les expressions (VI.8) et (VI.9) :

$$R_p = \frac{|Z|}{\cos(\varphi)} \quad (\text{VI.8})$$

$$C_p = \frac{\sin(\varphi)}{|Z| \cdot \omega} \quad (\text{VI.9})$$

## VI.6. Résultats du traitement

Après calculs, les résultats obtenus sont représentés dans toutes les figures (allant de Figure VI.17 jusqu'à Figure VI.36). Pour chaque conductivité et chaque type de modèle, les valeurs des composants seront calculées.

Les paragraphes suivants donnent les résultats obtenus en fonction du temps, après traitement :

### VI.6.1. Cas de l'isolateur réel

#### VI.6.1.1. Solution polluante de conductivité 9,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Les figures VI.17, et VI.18 représentent les variations du paramètre résistance du modèle en fonction du temps, pour les différents niveaux de tension, et ce pour le modèle série et parallèle, respectivement.

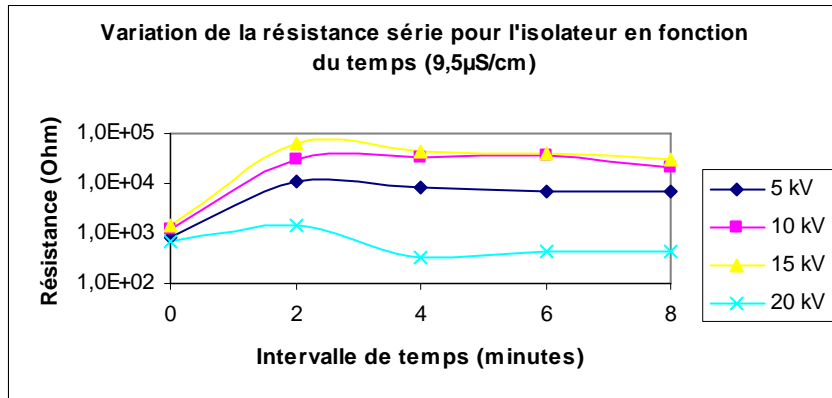


Figure VI.17. Variation de la résistance du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 9,5µS.

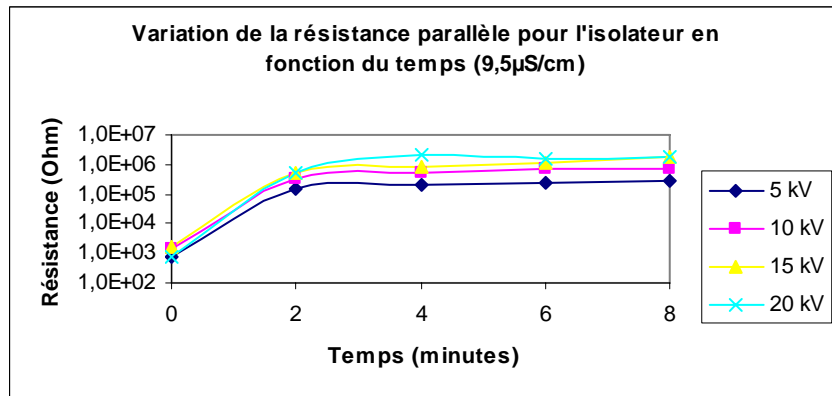


Figure VI.18. Variation de la résistance du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 9,5µS/cm.

Nous remarquons dans les deux cas, que la résistance augmente entre le premier instant et le second et cela de manière très importante ; ceci est dû à l'évaporation de la couche de pollution. Généralement, la résistance augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale puis elle diminue légèrement et cela à cause de l'agitation thermique engendrée par la tension appliquée à l'isolateur. La valeur de la résistance, au dernier instant, est dans le cas général supérieure à celle du premier instant, sauf dans le cas du modèle série, et cela pour une tension de 20 kV.

Les figures VI.19 et VI.20 représentent la variation des paramètres capacitifs des deux modèles série et parallèle en fonction du temps et cela pour différents niveaux de tension.



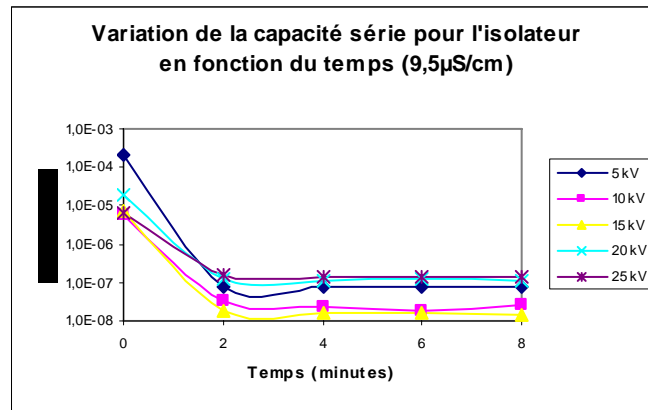


Figure VI.19. Variation de la capacité du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de  $9,5\mu\text{S/cm}$ .

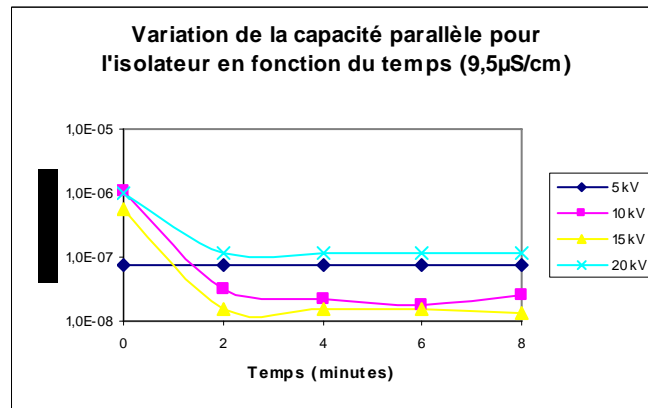


Figure VI.20. Variation de la capacité du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de  $9,5\mu\text{S/cm}$ .

Nous remarquons que la capacité diminue avec le temps (ce qui indique qu'il y a augmentation de l'impédance vue aux bornes des électrodes). Cette capacité résulte de la zone sèche se trouvant entre deux couches polluantes en contact avec les électrodes (capot et tige).

#### VI.6.1.2. Solution polluante de conductivité $10\text{ mS/cm}$

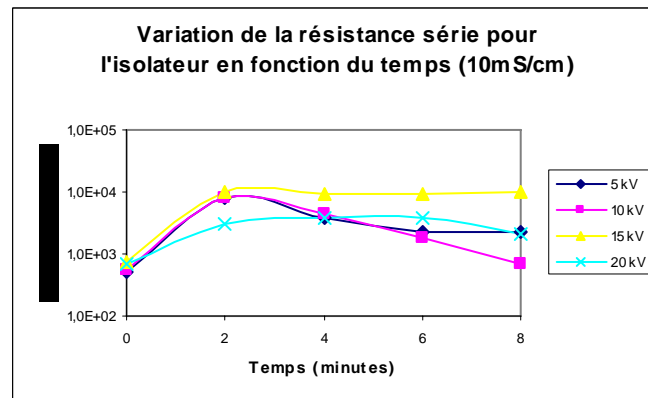


Figure VI.21. Variation de la résistance du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de  $10\text{ mS/cm}$ .

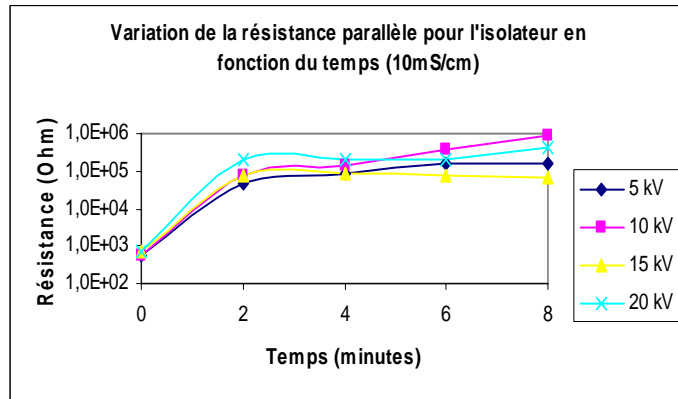


Figure VI.22. Variation de la résistance du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 10 mS/cm.

De la même façon que pour la conductivité précédente, nous remarquons que la résistance augmente avec le temps et cela dans les deux cas. Nous remarquons, toute fois, que les valeurs initiales de la résistance (Figures VI.21 et VI.22.) sont inférieures à celles observées pour la conductivité précédente (Figure VI.19 et VI.18).

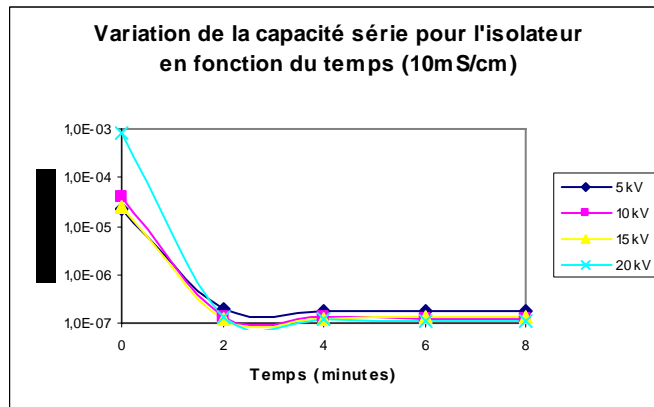


Figure VI.23. Variation de la capacité du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 10 mS/cm.

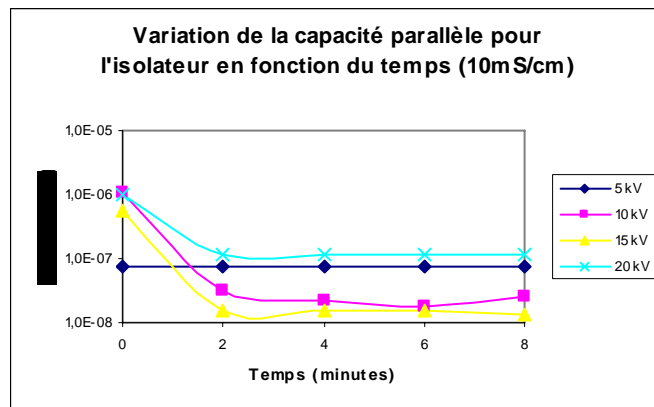


Figure VI.24. Variation de la capacité du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 10 mS/cm.

Nous remarquons que la capacité présente le même sens de variation, aussi bien pour le modèle série que pour le modèle parallèle, elle diminue avec le temps d'application de la tension et augmente avec l'augmentation de celle-ci. Cependant, nous remarquons qu'il n'y a quasiment aucune variation en fonction du temps, de la capacité pour le modèle parallèle, pour le niveau de tension de 5 kV.

### VI.6.1.3. Solution polluante de conductivité 20mS/cm

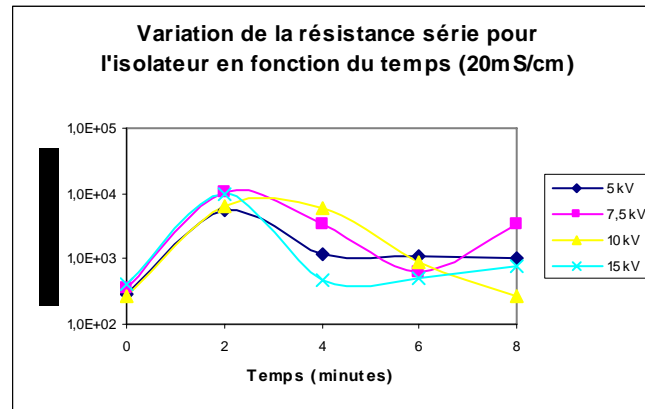


Figure VI.25. Variation de la résistance du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 20 mS/cm.

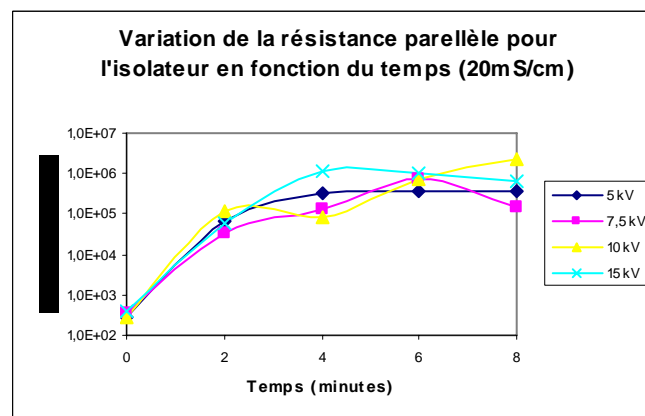


Figure VI.26. Variation de la résistance du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 20 mS/cm.

Dans le cas du modèle série, durant les premiers instants, la résistance augmente puis elle a tendance à diminuer pour les instants suivants. Dans le cas du modèle parallèle, elle se stabilise autour d'une valeur limite.

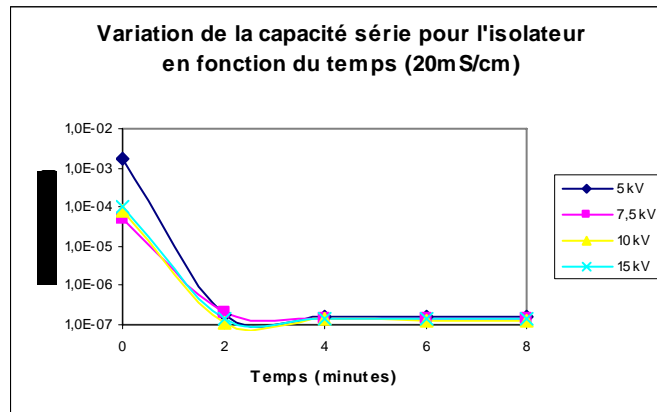


Figure VI.27. Variation de la capacité du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 20 mS/cm.

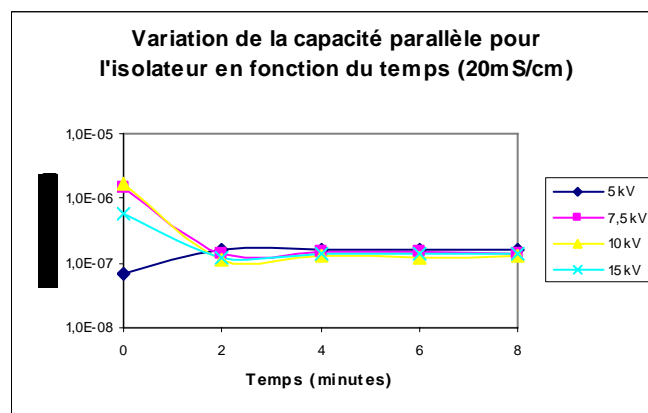


Figure VI.28. Variation de la capacité du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 20 mS/cm.

Nous remarquons la diminution de la capacité dans les deux cas de figure, sauf pour le niveau de tension 5 kV dans le cas du modèle parallèle où la capacité augmente en fonction du temps, contrairement à ce qui se passe pour les autres niveaux de tension.

#### VI.6.1.4. Solution polluante de conductivité 29 mS/cm

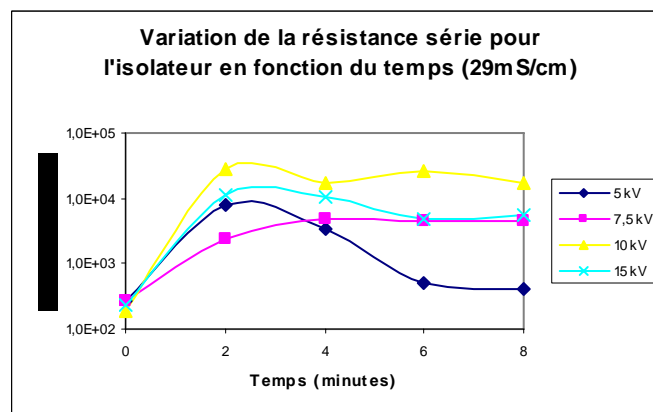


Figure VI.29. Variation de la résistance du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 29mS/cm.

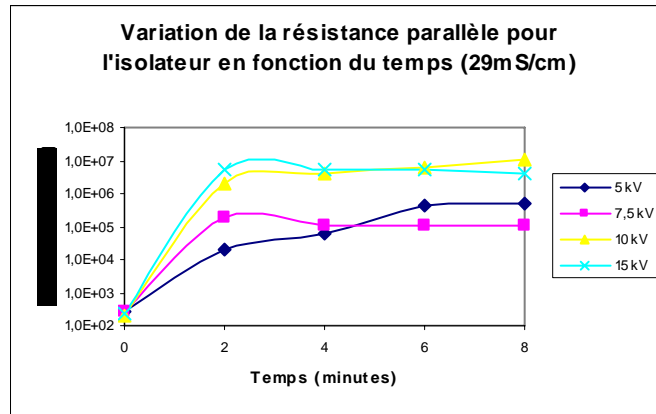


Figure VI.30. Variation de la résistance du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 29 mS/cm.

Là aussi, pour les premiers instants, la résistance augmente puis elle a tendance à diminuer pour certains niveaux de tension à partir du deuxième instant. A partir du troisième instant, et pour la majorité des cas, la valeur de la résistance se stabilise autour d'une certaine (état quasi sec de la surface de l'isolateur), cette dernière valeur augmente avec l'augmentation du niveau de tension.

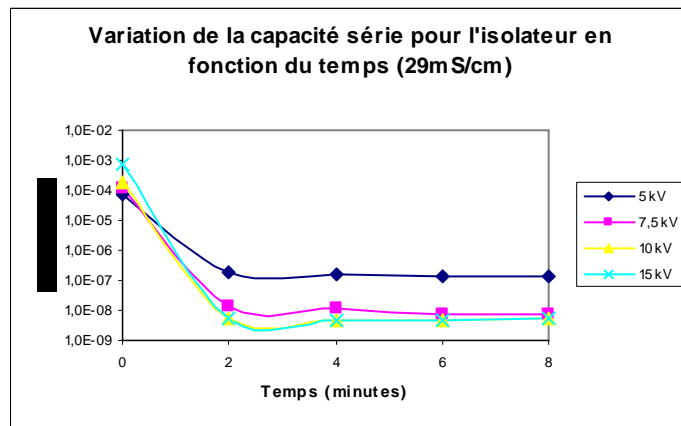


Figure VI.31. Variation de la capacité du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 29mS/cm.

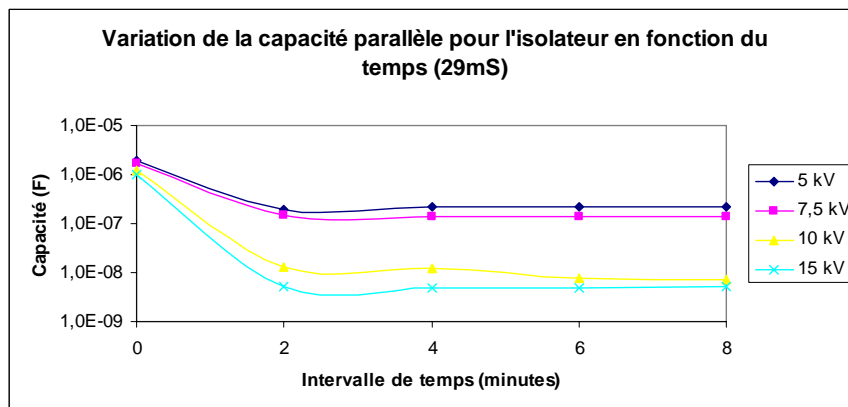


Figure VI.32. Variation de la capacité du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 29mS/cm.

Nous remarquons que la variation de la capacité est de forme exponentielle décroissante pour les deux cas de figures. Pour le cas du modèle série, nous remarquons, dans le cas du modèle série, pour le premier instant, que la capacité la plus élevée est attribuée au niveau de tension le plus élevé ; pour les instants qui suivent, la capacité la plus élevée est attribuée au niveau de tension le plus bas. Tandis que pour le deuxième type de modèle (modèle parallèle), la capacité la plus élevée est attribuée au niveau de tension le plus faible, pour toute la séquence d'enregistrement.

#### VI.6.1.5. Solution polluante de conductivité 50 mS/cm

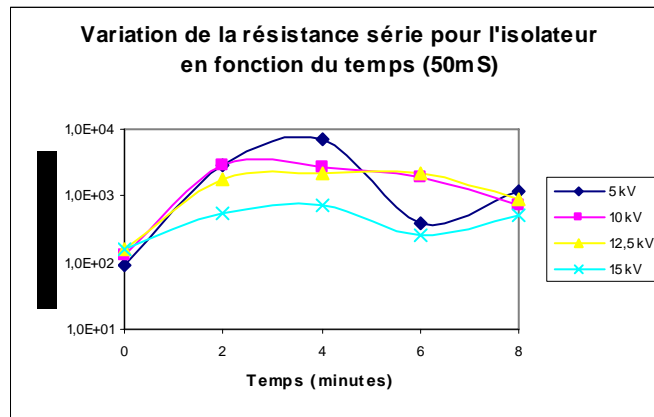


Figure VI.33. Variation de la résistance du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 50 mS/cm.

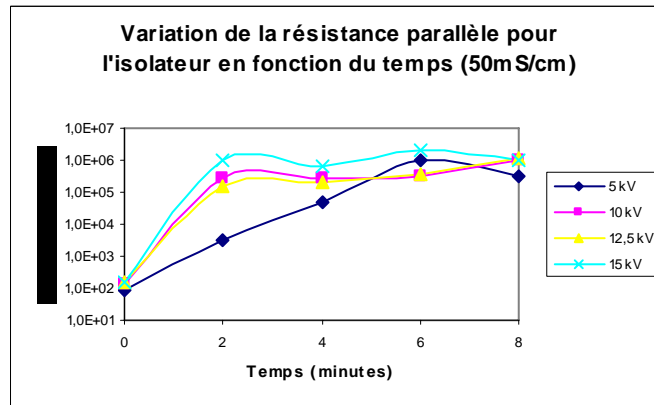


Figure VI.34. Variation de la résistance du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 50 mS/cm.

La résistance augmente en fonction du temps ; cette augmentation est due à l'évaporation de la couche polluante. L'augmentation en fonction du niveau de tension est remarquable pour le premier instant.

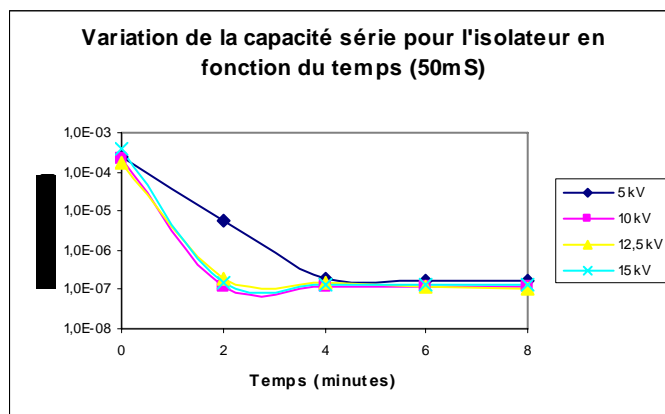


Figure VI.35. Variation de la capacité du modèle série pour l'isolateur pollué avec une solution de 50 mS/cm.

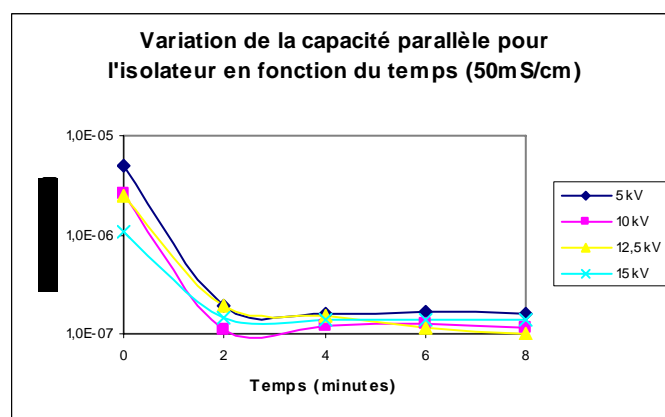


Figure VI.36. Variation de la capacité du modèle parallèle pour l'isolateur pollué avec une solution de 50mS/cm.

Comme pour les différentes conductivités précédentes, la capacité diminue en fonction du temps et du niveau de tension appliquée. Ceci est remarquable particulièrement pour le premier instant.

#### VI.6.1.6. Conclusion

Dans les deux cas de figures, modèle série et modèle parallèle, la résistance augmente en fonction du temps d'application de la tension, à cause de l'évaporation de la couche de pollution et diminue en fonction de l'augmentation de la conductivité de la couche polluante. La capacité diminue aussi bien en fonction du temps qu'en fonction du niveau de tension appliquée.

### VI.6.2. Cas du modèle de laboratoire

#### VI.6.2.1. Solution de conductivité de 9,5 $\mu$ S/cm

La figure (VI.37) montre la variation de la résistance parallèle dans le cas du modèle plan en fonction du temps, pour différents niveaux de tension.

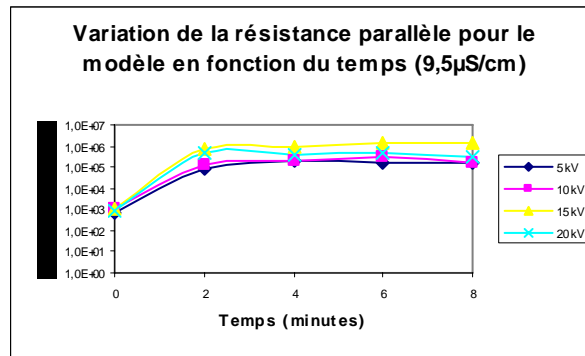


Figure VI.37. Variation de la résistance parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 9,5 μS/cm.

Nous voyons que la résistance parallèle varie en fonction du temps de manière logarithmique ; elle est de faible valeur pour le premier instant, ce qui traduit la présence d'une couche de pollution, puis elle augmente de manière très importante, à cause de l'assèchement de la couche polluante.

La figure (VI.38) montre la variation de la résistance du modèle série en fonction du temps, pour les différents niveaux de tension.

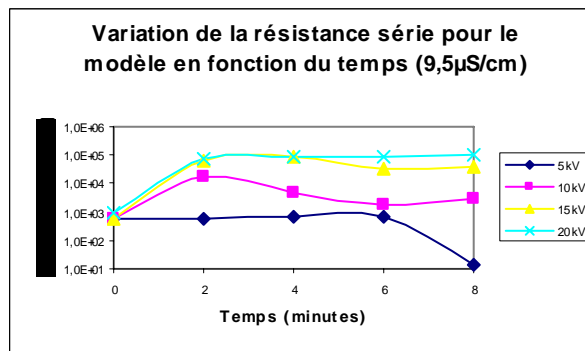


Figure VI.38. Variation de la résistance série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 9,5 μS/cm.

Il y a augmentation de la résistance en fonction du temps, et cela pour les deux premiers instants. Nous remarquons aussi, qu'il y a augmentation de cette résistance en fonction du niveau de tension ; nous remarquons ainsi que la résistance série diminue à partir du troisième instant, pour les deux premiers niveaux de tension, à cause des arcs locaux qui prennent naissance le long des bandes sèches.



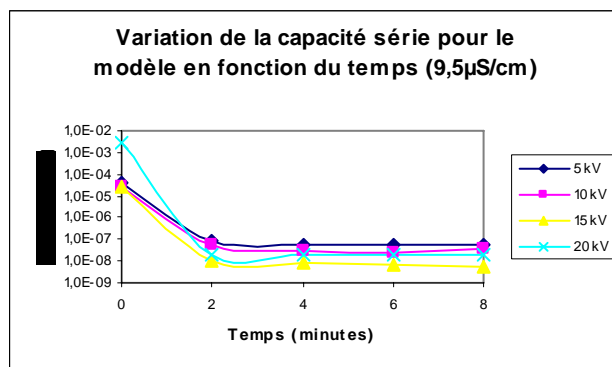


Figure VI.39. Variation de la capacité série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 9,5µS/cm.

Nous remarquons que la capacité diminue en fonction du temps, d'une manière exponentielle décroissante.

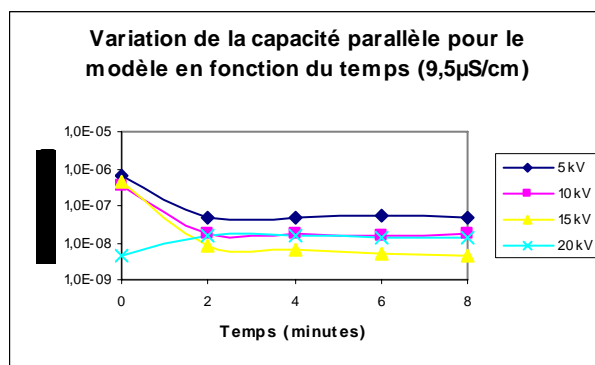


Figure VI.40. Variation de la capacité parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 9,5µS/cm.

La capacité du modèle parallèle en fonction du temps d'application de la tension, diminue pour les trois premiers niveaux de tension (5 kV, 10 kV et 15 kV) sous forme exponentielle comme précédemment. Par contre, pour le niveau de tension de 20 kV, nous remarquons une augmentation en fonction du temps. Cela peut être due à l'apparition des arcs qui court-circuitent les bandes sèches donc ils diminuent la longueur équivalente du diélectrique et par suite provoquent l'augmentation de la capacité.

Nous remarquons, pour les deux types de modèle (série et parallèle) considérés, que la résistance augmente en fonction du temps à cause de l'assèchement de la couche polluante. La capacité diminue également en fonction du temps.

## VI.6.2.2. Solution de conductivité de 10 mS/cm

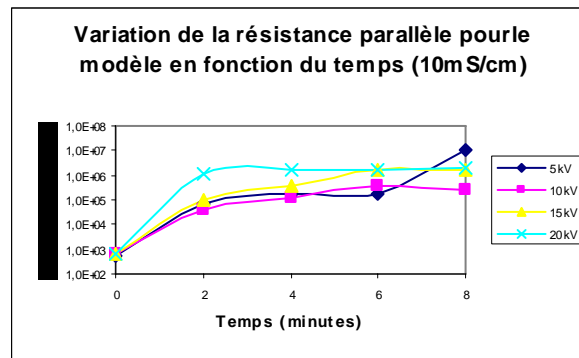


Figure VI.41. Variation de la résistance parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 10 mS/cm.

Nous remarquons que la résistance augmente en fonction du temps. En fonction du niveau de tension, nous voyons qu'il y a inversion des tendances pour certains instants (la résistance n'augmente pas en fonction du niveau de tension de manière uniforme).

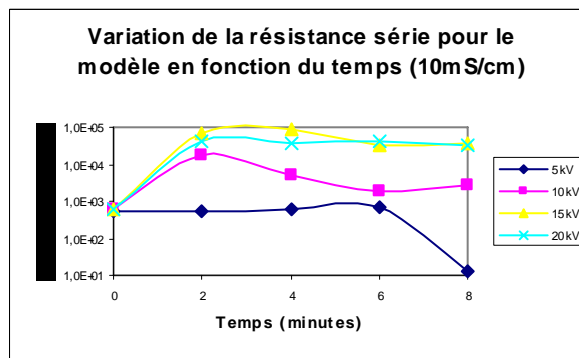


Figure VI.42. Variation de la résistance série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 10 mS/cm.

La résistance série, caractérisant le modèle, augmente en fonction du temps et cela pour les niveaux de tension élevés (10, 15, et 20 kV) à cause de l'assèchement de la couche polluante. Pour le niveau de tension de 5 kV, la résistance marque une légère augmentation puis diminue. La diminution de la résistance au cinquième instant, peut être due aux arcs locaux qui court-circuitent les bandes sèches.

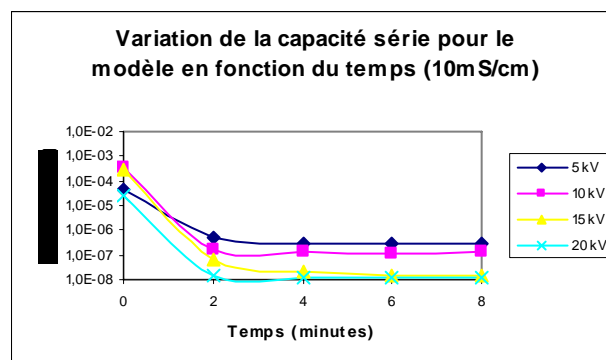


Figure VI.43. Variation de la capacité série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 10 mS/cm.

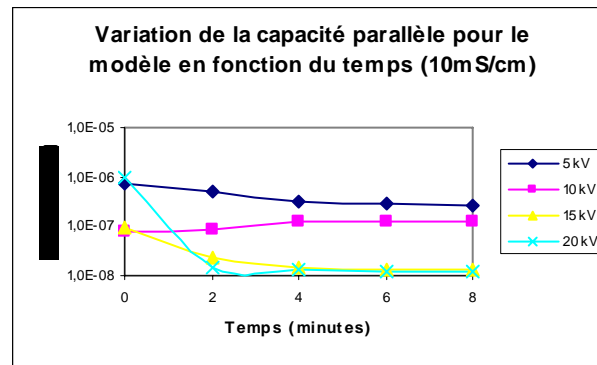


Figure VI.44. Variation de la capacité parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 10mS/cm.

Nous remarquons dans le cas général et pour les deux types de modèle, que la capacité diminue en fonction du temps, alors que la variation en fonction du niveau de tension appliquée n'est pas très claire. Pour le niveau de tension de 10 kV, dans le cas du modèle parallèle, la capacité augmente en fonction du temps (apparition des arcs locaux qui diminuent la longueur équivalente entre les électrodes).

### VI.6.2.3. Solution de conductivité de 20 mS/cm

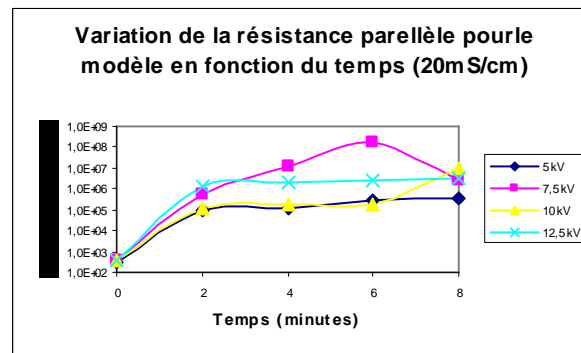


Figure VI.45. Variation de la résistance parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 20 mS/cm.

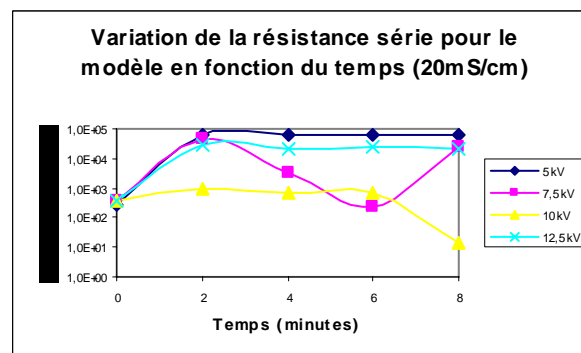


Figure VI.46. Variation de la résistance série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 20 mS/cm.

Dans les deux cas de figures, nous remarquons une augmentation de la résistance en fonction du temps. Cette augmentation, durant les deux premiers instants, s'explique par

l'assèchement de la couche de pollution. Dans le cas général, nous remarquons une faible diminution, sauf pour le cas 10 kV où elle diminue d'une manière relativement importante.

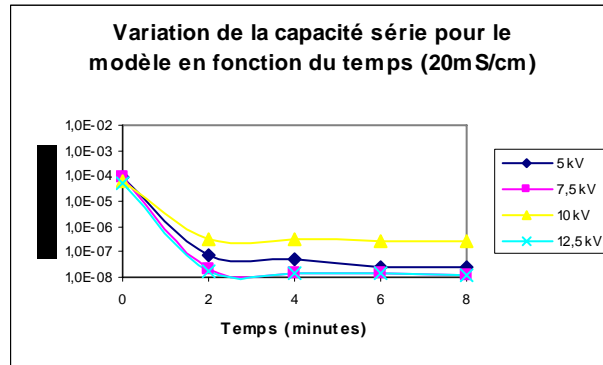


Figure VI.47. Variation de la capacité série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 20 mS/cm.

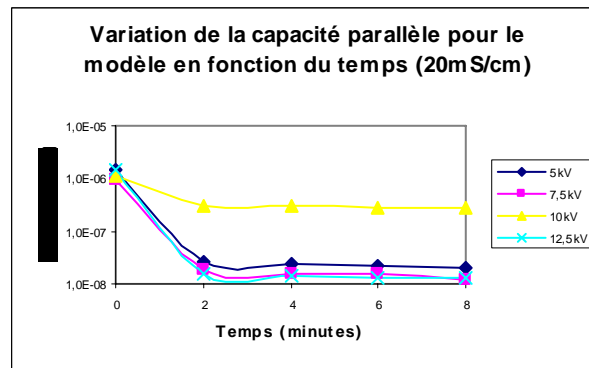


Figure VI.48. Variation de la capacité parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 20 mS/cm.

Il est clair que la capacité diminue en fonction du temps. Ceci est le cas pour les conductivités précédentes. Cette diminution est de forme exponentielle décroissante. La capacité diminue avec l'augmentation du niveau de tension appliquée, cette diminution en fonction du niveau de tension est visible pour les niveaux 5, 7,5, et 12,5 kV, mais pas pour le niveau 10 kV.

#### VI.6.2.4. Solution de conductivité de 29 mS/cm

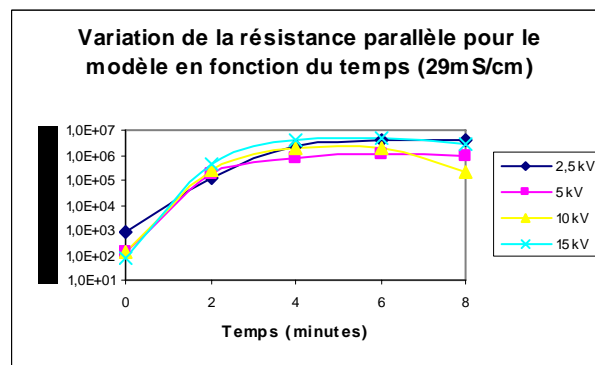


Figure VI.49. Variation de la résistance parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 29 mS/cm.

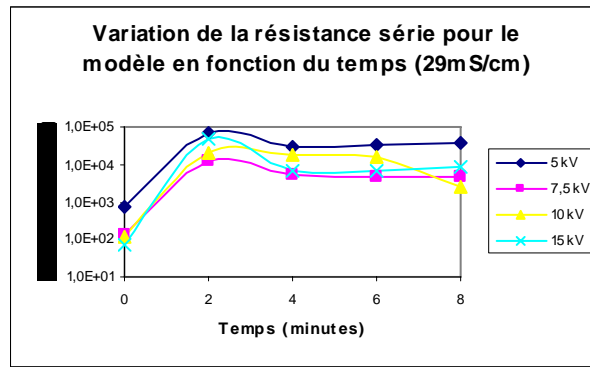


Figure VI.50. Variation de la résistance série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 29 mS/cm.

Comme pour les cas précédents, nous remarquons une augmentation dans les deux cas, puis au troisième instant, il y a une légère baisse de la résistance série. Pour le niveau 10 kV, la diminution est plus importante que pour les autres niveaux de tension.

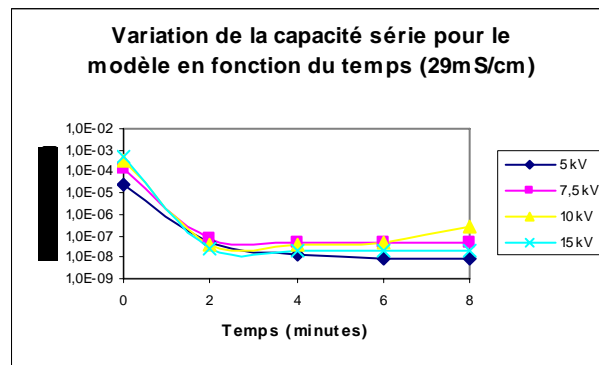


Figure VI.51. Variation de la capacité série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 29 mS/cm.

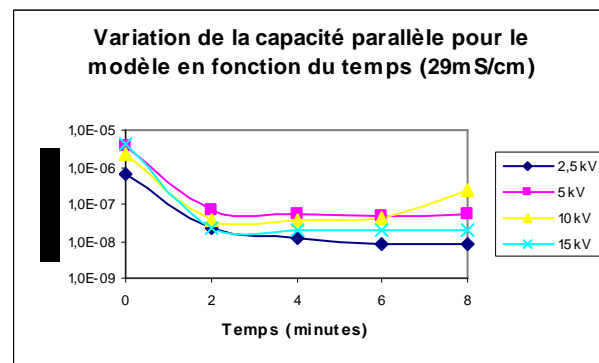


Figure VI.52. Variation de la capacité parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 29 mS/cm.

Nous remarquons une diminution de la capacité d'une manière exponentielle jusqu'à atteindre un niveau très faible pour le niveau 2,5 kV. A partir du niveau 5 kV, nous constatons que pour les trois derniers niveaux de tension, leurs allures marquent un minimum autour du troisième instant, mais pas à la même vitesse que pour le niveau précédent.

### VI.6.2.5. Solution de conductivité de 50 mS/cm

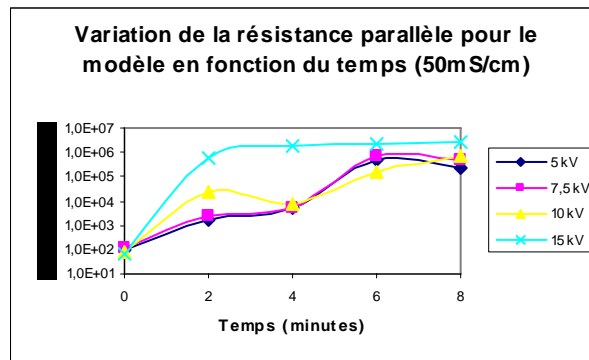


Figure VI.53. Variation de la résistance parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 50 mS/cm.

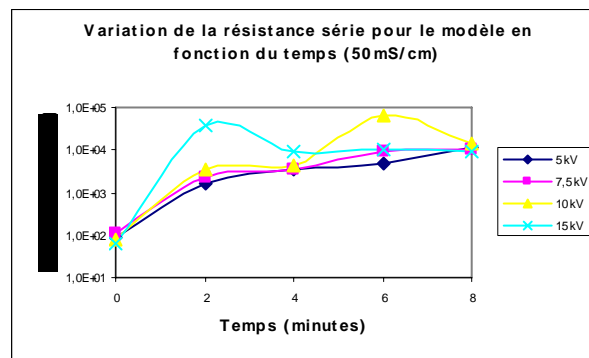


Figure VI.54. Variation de la résistance série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 50 mS/cm.

De la même façon que pour les cas précédents nous remarquons l'augmentation de la résistance en fonction du temps pour les différents niveaux de tension appliquées, et dans les deux configurations du modèle (modèle série et modèle parallèle) ; nous remarquons aussi que pour les trois premiers instants, l'augmentation de la résistance en fonction du niveau de tension est présente de manière claire ; ce qui traduit l'assèchement de la couche polluante de manière plus rapide pour des seuils de tension plus élevés.

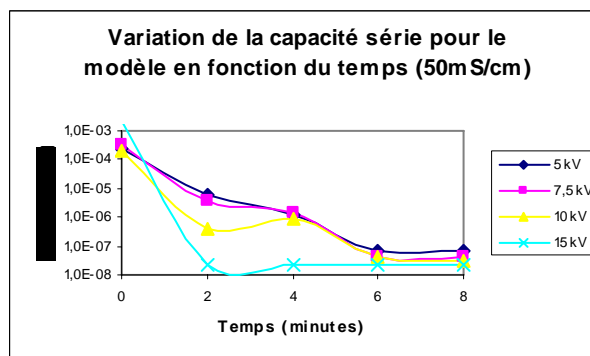


Figure VI.55. Variation de la capacité série pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 50 mS/cm.

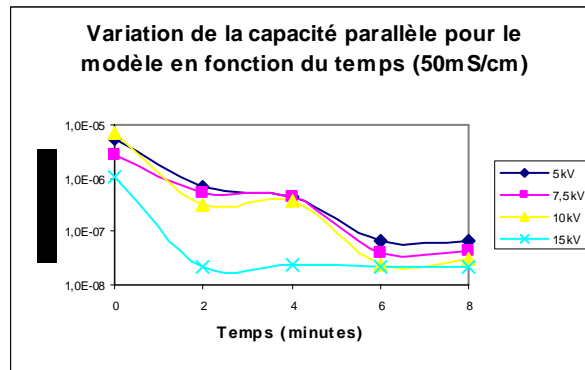


Figure VI.56. Variation de la capacité parallèle pour le modèle en fonction du temps pour une solution de 50 mS/cm.

Nous remarquons une diminution de la capacité en fonction du temps, et cela dans les deux cas. Néanmoins, la forme de la diminution est différente pour les niveaux de tension 5, 7,5, 10 kV de celle observée pour les conductivités précédentes. Nous remarquons aussi, qu'en général, la capacité diminue en fonction du niveau de tension, mais pour certaines valeurs de tension, cette diminution n'est pas très visible.

#### VI.6.2.6. Conclusion

De la même façon que pour l'isolateur, nous constatons que pour les trois premiers instants, la valeur de la résistance augmente en fonction du temps à cause de l'assèchement de la couche de pollution, puis elle diminue faiblement à cause de l'agitation thermique. Il y a aussi une augmentation de la résistance en fonction du niveau de tension (dans les deux cas, série et parallèle).

Pour la capacité, il est clair que sa valeur diminue en fonction du temps et du niveau de tension et cela, pour les deux types de modèles (série, parallèle).

**VI.6.3. Conclusion générale sur la modélisation par un circuit équivalent**

Cette étude nous permet de conclure que la résistance augmente en fonction du temps et du niveau de tension. L'augmentation de la résistance de la couche polluante est due au temps d'application et à l'assèchement de la couche polluante. Nous constatons aussi que le modèle a le même comportement que l'isolateur et cela de part les résultats obtenus (résistance et capacité) ; l'ordre de grandeur des paramètres calculés est le même.

En ce qui concerne la capacité, nous constatons qu'elle diminue en fonction du temps et du niveau de tension (cela dans le cas général). Notons que la variation de ces deux paramètres est la même pour les cas du circuit série et du circuit parallèle.

D'après les résultats obtenus, le circuit qui s'approche le plus de l'isolateur réel serait une combinaison série, parallèle.



---

---

*Conclusion générale*

---

---

## Conclusion générale

Dans le but de caractériser l'état de surface d'un isolateur à partir du signal de courant de fuite, nous avons effectué des travaux expérimentaux sur un isolateur réel, type « 1512 L », et sur un modèle plan inspiré de la forme géométrique du même isolateur.

Le courant de fuite traversant la couche polluante est une source importante d'information, permettant de :

- Décrire les événements se produisant sur la surface de l'isolateur ;
- Estimer la sévérité de la pollution déposée sur la surface de l'isolateur ;
- Prévenir le risque de contournement.

Dans notre étude et dans un premier temps, le signal courant de fuite a été séparé en demi-ondes, chaque demi-onde étant assignée à l'une des trois composantes (arc local, sinusoïdale et transitoire) ; l'assignation à une composante d'arc local est faite par calcul du temps de retard à la montée que fait la demi-onde. Si ce temps dépasse une certaine limite, la demi-onde est assignée à la composante d'arc local, sinon, un calcul du degré de distorsion s'impose pour assigner la demi-onde à l'une des deux autres composantes (sinusoïdale ou transitoire). Si le degré de distorsion dépasse un certain seuil, alors l'onde est assignée à la composante transitoire sinon, elle est assignée à la composante sinusoïdale.

Chaque composante donne l'information sur un événement précis se produisant sur la surface de l'isolateur :

La composante sinusoïdale implique le passage d'un courant purement sinusoïdale sur la surface de l'isolateur (même forme que celle de la tension appliquée). Ceci peut avoir une corrélation avec l'état de surface de l'isolateur dans le cas d'un matériau hydrophile et traduit la présence d'une couche continue d'électrolyte, et dans le cas d'un matériau hydrophobe, cela signifie que le champ électrique inter-gouttelettes a dépassé un niveau critique pour rompre l'isolation électrique maintenue entre les gouttelettes. Cette composante a lieu au moment de l'application de la tension à partir d'un niveau de 10 kV pour les faibles conductivités. Pour les conductivités modérées, cette composante apparaît pour des faibles niveaux de tension (5 kV) ; pour une conductivité de couche polluante élevée (50 mS/cm) cette composante persiste jusqu'à la deuxième minute d'application de la tension. Dans certains cas, cette composante a lieu aux instants intermédiaires d'enregistrement, et exprime que les gouttelettes présentes sur la surface de l'isolateur ont subi une déformation sous l'effet du champ électrique appliquée ; cette déformation a comme conséquence l'augmentation de l'intensité du champ électrique, au niveau de la triple jonction (eau, air, solide), d'où le passage d'un courant sinusoïdal. L'assignation d'une demi-onde d'un courant de fuite, à la composante transitoire, signifie que cette demi-onde est distordue ; cette distorsion a lieu dans certains cas, (cas des faibles conductivités et des faibles niveaux de tension (9.5  $\mu$ S/cm et 10 mS/cm pour une tension de 5 kV)), au moment de l'application de la tension (la surface de l'isolateur est complètement mouillée). Cela signifie que la tension appliquée et la conductivité de la couche de pollution ne sont pas dans une fourchette permettant de provoquer le passage d'un courant sinusoïdal sur la surface de l'isolateur ; le champ électrique de la triple jonction est inférieur à son niveau critique.

Dans la majorité des cas, cette composante apparaît à partir du deuxième instant, à cet instant la surface de l'isolateur est partiellement sèche. Pour les faibles conductivités et même dans certains cas pour des conductivités modérées, cette composante est accompagnée par d'autres composantes.

L'assignation d'une demi-onde du courant de fuite à une composante d'arc local, informe sur l'occurrence d'un arc local sur la surface de l'isolateur. L'apparition de cette composante, occurrence des arcs locaux, est en grande proportion pour les faibles conductivités et les faibles niveaux de tension ; cette composante apparaît dans pratiquement tous les cas étudiés, à partir du deuxième instant, instant d'apparition des bandes sèches de dimensions suffisantes pour favoriser l'apparition des arcs locaux. L'instant de l'apparition des arcs locaux, composante d'arc local, ainsi que leurs durées, sont fonction de la conductivité de la couche de pollution et de la tension appliquée. Pour des conductivités de  $9,5 \mu\text{S}/\text{cm}$ , cette composante est présente jusqu'à la sixième minute. Plus la conductivité de la couche de pollution augmente plus la durée de ces arcs diminue. Pour une conductivité donnée, l'instant d'apparition ainsi que la durée des arcs locaux diminuent en fonction de la tension appliquée. Pour des tensions faibles (5 kV), cette composante apparaît tard par rapport à des niveaux de tension plus élevés (10 à 15 kV). Plus la tension augmente, plus la durée des arcs locaux diminue, l'assèchement plus rapide. Cette composante est un outil très puissant pour la prévention du contournement, en collaboration avec l'amplitude du courant de fuite. Tout contournement, survenant sur un isolateur mouillé, est précédé par l'apparition d'un certain nombre d'arcs locaux, l'un de ces arcs locaux s'allonge sur la surface de l'isolateur pour provoquer le contournement de l'isolateur.

Dans un second temps, nous avons opté pour une analyse fréquentielle des signaux enregistrés pendant les travaux expérimentaux réalisés. Cette analyse nous a permis d'identifier les sources des harmoniques, pour différents niveaux de tension et différentes conductivités de la couche de pollution. Cette analyse a montré par ma mesure de la tension du réseau en amont par rapport au transformateur haute tension, qu'il y a présence de l'harmonique 5 dans la proportion de 4,28%, de l'harmonique 7 dans la proportion de 0,79% et de l'harmonique 3 dans la proportion de 0,61%.

En aval du transformateur, le taux des harmoniques a été beau coup plus important et est lié fortement à l'état de surface de l'isolateur (nature de l'impédance), donc à l'instant considéré après la mise sous tension, au niveau de tension appliquée et à la conductivité de la couche de pollution, ainsi qu'à l'occurrence de certains événements sur la surface de l'isolateur telle que l'apparition des arcs locaux.

La présence des harmoniques, avec un certain taux, peut avoir deux types de sources :

- Les sources liées à la source de tension, d'une part à la saturation du circuit magnétique ce qui engendre une certaine non linéarité dans le signal de sortie (tension en aval du transformateur), et d'autre part à l'effet capacitif engendré par les capacités existantes entre les spires du bobinage du transformateur.

- Les sources liés à la charge (l'impédance de l'isolateur) ; cette impédance présente un effet capacitif qui augmente en fonction du temps d'application de la tension.

Cette étude nous a permis aussi d'analyser l'évolution des taux des harmoniques présents dans le signal courant et tension, pour différentes conductivités de la couche de pollution et différents niveaux de tension appliquées. Nous avons constaté que les harmoniques présents dans la tension apparaissent sur le signal courant de fuite avec une certaine amplification pour les conductivités faibles, tandis que pour des conductivités élevées les harmoniques du signal tension sont amortis. Nous avons constaté également que le taux des harmoniques, dans le signal courant, augmente avec le temps d'application de la tension

(augmentation de l'effet capacitif après l'assèchement de la surface de l'isolateur). Le taux des harmoniques du signal courant de fuite diminue aux moments des décharges.

A la fin, nous avons exploité les résultats obtenus des essais effectués pour modéliser le comportement de l'isolateur :

Le modèle de variation du rapport tension courant de l'isolateur en fonction de la conductivité de la couche de pollution est de forme exponentielle décroissante.

Le modèle de variation du rapport tension courant de l'isolateur en fonction du temps d'application de la tension est de forme polynomiale du second degré.

Le modèle de variation du déphasage en fonction du temps d'application de la tension est de forme logarithmique.

Nous proposons, en outre, deux circuits équivalents à l'impédance de l'isolateur, comprenant une résistance et une capacité.

Dans le cas du premier circuit, ces deux éléments sont mis en série tandis que dans le deuxième circuit, la résistance et la capacité sont mis en parallèle.

Les résultats obtenus (valeurs de la résistance et de la capacité), pour les deux circuits, varient dans le même sens : augmentation de la résistance en fonction du temps d'application de la tension et diminution de la capacité en fonction du temps d'application de la tension.

Cette étude, de caractérisation de l'état de surface de l'isolateur, d'analyse des harmoniques et de modélisation a été réalisée dans le cas de l'isolateur réel et pour le modèle plan, les mêmes constats ont été faits aussi bien pour le cas de l'isolateur réel que pour celui du modèle plan.



---

---

*Bibliographie*

---

---

- [1] George G. Karady, 'Electric Transmission Line Flashover Prediction System'. Ph.D. Thesis and Final Report. 2001.
- [2] Changiz Tavakoli Zaniani, 'Dynamic Modeling of AC Arc Development on Ice Surfaces'. Thèse présentée à l'université du QUÉBEC à CHICOUTIMI comme exigence partielle du doctorat en ingénierie. 2004.
- [3] B.Sudda, "study of leakage current behaviour on artificial polluted surface of ceramic insulator". Plasma Science & Technology, vol.5, No.4 (2003)
- [4] FF Bologna, AC Britten, N Mahatho and JP Reynders, "Light Pollution and light wetting on Ceramic (Glass) Insulators as a Cause of Unknown Flashover on Transmission Lines", South African High Voltage Engineering Centre (SAHVEC) TSI, ESKOM Enterprises, South Africa, 2001.
- [5] Commission Électrotechnique Internationale, "Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés aux réseaux à courant alternatif," Norme Internationale CEI 507, avril 1991.
- [6] Ali BOUHAFS, " Comportement des surfaces isolantes sous pollution non uniforme. Elaboration d'un algorithme de contournement" Thèse De Magister, Ecole Nationale Polytechnique.
- [7] F.Meghnefi, C Volat et M. Farzaneh, "Temporal and Frequency Analysis of the leakage Current of a Station Post Insulator during Ice Accretion", IEEE Trans. Vol. 14, No. 5; December 2007.
- [8] S.M. Fikke, J.E.Hanssen ET L.Rolfseng, "Long Range Transported Pollution and Conductivity of Atmospheric Ice on Insulators," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, pp. 1311-1321, July 1993.
- [9] E.A. Cherney et al. "The AC Clean Fog for Contaminated Insulators," IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, Vol. PAS-102, No. 3, pp. 604-613, March 1983.
- [10] M. TEGUAR, 'Modélisation d'Isolateur Soumis à Divers Paramètres Electromagnétiques' Thèse de doctorat, département d'électrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2004.
- [11] A. MEKHALDI, " Etude Des Paramètres de Conduction et de Décharge Electrique sur des Surfaces Isolateurs Polluées sous tension alternative 50Hz. 'Thèse de doctorat d'état, département d'électrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 1999.
- [12] Z.SAHLI," Etude de la Non Uniformité de la Pollution sur les Caractéristiques de Contournement des isolateurs Réels sous Tension Continue', Thèse de Magister, Département d'électrotechnique, Université Abederrahmane Mira de Bédjaia.
- [13] D.NAMANE, "Effet de la Discontinuité de la Couche Polluante sur le Comportement d'Isolateurs Haute Tension, sous la fréquence 50Hz", Thèse de magister, département d'électrotechnique de l'école nationale polytechnique d'Alger, 1998.

- [14] Bourim HAMMOUM, Ahmed KERBOUCHE, "Étude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien", 'Thèse de PFE, département d'électrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2007.
- [15] Seyyed Mohammad Hossein NABAVI, Ahmad GHOLAMI, Ahad KAZEMI, Mohammad Ali Shercat MASOUM, 'Evaluation of Leakage Current Measurement for Site Pollution Severity Assessment'. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies ISSN 1583-1078. 2007.
- [16] M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski, 'Leakage Current Patterns on Contaminated Polymeric Surfaces'. IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation *Vol.6 No.5, October 1999*;
- [17] Claude Gary, "Propriétés Diélectrique de l'Air et les Très Hautes tensions", EDITION EYROLLES, 1984.
- [18] B. Pokarier, C. Lee and D. Hawker, "Leakage Current Monitoring of Composite Long Rod Insulators", Proc. of 4th ICPADM, Brisbane, Australia, Paper No. 5119, pp. 530-533, July 1994.
- [19] E. M. Sherif, "Performance and Aging of HVAC and HVDC Overhead line insulators", PhD Thesis, Report No. 169, CTH, Gothenburg, Sweden, 1987.
- [20] T. Srqvist, "Polymeric Outdoor Insulators - A long Term Study", PhD Thesis, Report No. 313, CTH, Gothenburg, Sweden, 1997
- [21] CEI, publication 507, publication 60.1.
- [22] A. J. Phillips, D. J. Childs and H. M. Schneider, "Aging of Non Ceramic Insulators Due to Corona from Water Drops", IEEE Winter Meeting, PE-236-PWRD-0-11- 1997, 1997.
- [23] A. J. Phillips, D. J. Childs and H. M. Schneider, "Water Drop Corona Effects on Full scale 500 kV Non-Ceramic Insulators", IEEE Trans. on PD, Vol. 14, No. 1, pp, 258- 265, January 1999.
- [24] A. De La o, R. S. Gorur and J, T, Burnham, "Electrical Performance of Non- Ceramic Insulators in Artificial Contamination Tests: Role of Resting Time", IEEE Trans. On DEI, Vol. 3, No. 6, pp. 827-435, December 1996.
- [25] M. Shah, G. G. Karady and R. L. Brown, "Flashover Mechanism of Silicone Rubber Insulators Used for Outdoor insulation .It", IEEE Trans. on PD, Vol. 10, No. 4, pp. 1972 1977, October 1995.
- [26] M. A. R. M. Fernando, I. Lambrecht and S. M. Gubanski, "Modeling of Nonlinear Leakage Current on Artificially Polluted Polymeric Surfaces", Proc. of CEIDP, Atlanta, USA, pp, 52 -55, October 1998.



- [27] M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski. "Analysis of Leakage Current Wave and Forms for Field-aged and New Composite Insulators", Proc. of CEIDP, Minneapolis, USA, pp. 350-353, October 1997.
- [28] M. A. R. M. Fernando and S. M. Gubanski, "Leakage Current Patterns on Artificially Polluted Composite Insulators", Proc. of CEIDE San Francisco, USA, pp. 394-397, October 1996.
- [29] G.G.Karady, H.M.Schneider and F.A.M.Rizk, "Review of Cigre and IEEE Research Into Pollution Performance of Non ceramic Insulators: Field Aging Effects and Laboratory Test Techniques", Cigre, Paper No. 33-103, 1994,
- [30] I. Gutman. R. Hartinrs. R. Matsuoka and K. Kondo. "Experience with IEC 1109 1000 Salt Fog Aging Test for Composite Insulator" IEEE El Magazine, Vol. 13, No. 3, pp.36-39, May/jaune 1997.
- [31] P. J. Lambeth, J. S. T. Looms, G. Carrara, G. Leroy. "Méthodes d'essai d'isolateurs sous brouillard salin artificiel", Rapport CIGRE, 1968, n 25.08.
- [32] R. S. Gorur, E. A. Cherney and R. Hackam, "A Comparative Study of Polymer Insulating Materials under Salt-fog Test", IEEE Trans. on PD, Vol. 21, No. 2, pp. 175-182, April 1986.
- [33] S.H.Kim, E.A.CherneyandR.Haekam,"The Loss and Recovery of Hydrophobicity of RTV Silicone Rubber Insulator Coatings", IEEE Trans. on PD, Vol. 5, No. 5, pp. 1491-1500, July 1990,
- [34] S. M, E, KimA. Cherney and R. Hackam, "Performance of RTV Silicone Rubber Coatings", Int. Symp of El, Toronto, Canada, pp. 213-216, June 1990.
- [35] S. H. Kim, E. A. Cherney and R. Hackam. "Suppression Mechanism of Leakage Current on RTV Coated Porcelain and Silicone Rubber Insulators", IEEE Trans. on PD, Vol. 6, No. 4, pp. 1549-1556, October 1991.
- [36] H. Deng, R. Hackam and E. A. Cherney, "Factors Influencing the Electrical Performance of RTV Silicone Rubber Coatings", Proc. of CEIDP, Arlington, USA, pp. 669- 674, October 1994.
- [37] H. Deng, R. Hackam and E. A. Cherney, "Effects of Addition of Silicone Fluid on Electrical Performance of RTV Silicone Rubber Coatings", Proc. of 5th ICSD, Leiceshi, England, pp, 616-620, July 1995.
- [38] T. Zhao, J. D. Sakich and R. K. Niedermier, "Salt Fog Aging Evaluation of EPDM and EPDM/Silicone Alloy Non-ceramic Insulators", 10th ISH, Montreal, Canada, pp. 215-218, August 1997.
- [39] F.Schmuck. R. B rsch and 1. Pilline. "About an Improved Evaluation of Results by The standardised salt fog procedure for composite insulator", ETEP, Vol.6, No4, pp, 389-398, June 1996.

- [40] J. Filling and R. B. rsch, "Accelerated Aging Tests of Housing Material for Composite Insulators in a Fog Chamber", *ETEP* Vol. 1, No. 2, pp. 89-93, March April 1991.
- [41] T. Zhao and R. A. Bemstorf, "Aging Tests of Polymeric Housing Materials for Non-Ceramic Insulators", *IEEE EI Magazine*. Vol. 14, No. 2, pp. 26-33. March April 1998.
- [42] H. M. Schneider, W. W. Guidi, I. T. Bumham, R. S. Gorur and J. E. Hall, "Accelerated Aging and Flashover Tests on 138 kV Non ceramic Line Post Insulators", *IEEE Trans, on PD*, Vol. 8, No.1, pp. 325-337, January 1993.
- [43] S.M. Gubanski, A. Dernfalk, J. Andersson and H. Hillborg, "Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 14, No. 5; October 2007
- [44] J. Mackevich and M. Shah, "Polymer outdoor insulating materials. Part I: Comparison of porcelain and polymer electrical insulation", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 13 (3), pp. 5-12, 1997.
- [45] J. P. Reynders, I. R. Jandrell, and S. M. Reynders, "Surface ageing mechanisms and their relationship to service performance of silicon rubber insulation", in *Proc. 11th Int. Symp. On HV Eng.*, vol. 4, pp. 54-58, London, UK, 1999.
- [46] M. Shah, G. G. Karady, and R. L. Brown, "Flashover mechanism of silicone rubber insulators used for outdoor insulation - II", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 10 (4), pp. 1972-1978, 1995.
- [47] G. G. Karady, "Outdoor Insulations", in *Proc. 6th Int. Symp. On HV Eng.* In New Orleans, USA, Paper No. 30.01, vol. 2, 1989.
- [48] Cigré Working Group 22.03 (convener C. de Turreil), "Worldwide service experience with HV composite insulators", *Electra*, vol. 191, pp. 27-43, August, 2000.
- [49] R. S. Gorur, E. A. Cherney, and J. T. Burnham, '*Outdoor insulators*', Ravi S. Gorur Inc., 1999.
- [50] "Factor to take into account when using composite insulators: The experience at one utility", *Insulator News and Market Report*, vol.12 (1), pp. 18-25, 2004.
- [51] C. A. Spellman, H. M. Young, A. Haddad, A. R. Rowlands, and R. T. Waters, "Survey of polymeric insulator ageing factors", in *Proc. 11th Int. Symp. on HV Eng.*, vol. 4, pp. 160-163, London, UK, 1999.
- [52] Cigré Working Group 22.03 (convener C. de Turreil), "Composite insulators handling guide", *Electra*, number 195, April, pp. 50-53, 2001.
- [53] T. Kikuchi, S. Nishimura, M. Nagao, K. Izumi, Y. Kubota, and M. Sakata, "Survey on the use of non-ceramic composite insulators", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6 (5), pp. 548-556, 1999.

- [54] R.Porzel and M.Muhr, "Technical diagnostics, non-destructive state-estimation instead of damaging voltage test", in Proc. 10th Int. Conf. on HV Eng., pp. 405-408, Montreal, Canada, 1997.
- [55] Cigré Working Group 22.03 (convener C. de Turreil), "Review of in service diagnostic testing' of composite insulators", *Electra*, vol. 169, pp. 105-119, December, 1996
- [56] C. de Turreil, "Status of inspection techniques to assess the condition of non-ceramic insulators in service", in Proc. Insulator 2000 World Congress, pp. 222-230, Barcelona, Spain, 1999.
- [57] Cigré Working Group 22.03, "Worldwide service experience with HV composite insulators", *Electra*, vol. 130, pp. 67-77, 1990.
- [58] "Spanish utility embarks on program for on-line inspections of non-ceramic insulators", *Insulator News and Market Report*, vol. 5 (6), pp. 12-20, 1997.
- [59] G. H. Vaillancourt, M. Hamel, and J. Frate, "Experience with two faulty composite insulators detection methods in Hydro-Québec", in Proc. 10th Int. Symp. on HV Eng., vol. 4, pp. 109-113, Montréal, Québec, Canada, 1997.
- [60] E.A. Cherney, and R. S. Gorur, "RTV silicone rubber coatings for outdoor insulators", *IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul. Vol. 6*, pp. 605-611, Oct. 1999.
- [61] Z. X. Cheng, X. D. Liang, and Y.Y. Wang, "Investigation on composite insulators in contaminated areas," in *Annu. Rep. CEIDP*, Oct. 2002, pp. 327-330.
- [62] J. Q. Xue, and X.D. Liang, "New type of anti-pollution coating for porcelain its application in Tianjin," *Elect. Power*, vol. 35, no. 5, pp. 57-61, 2002.
- [63] Frédéric Truchetet, "Ondelettes pour le signal numérique", EDITION HERMES, Avril 1998.
- [64] S. Mallat. "A Wavelet Tour of Signal Processing", Second Edition, ACADEMIC PRESS.
- [65] A.N. Akansu, R. A. Haddad « Multiresolution Signal Decomposition Transforms, Subbands, and Wavelets », Second Edition, New Jersey Institute of Technology Newark, NJ, ACADEMIC PRESS, 2001.
- [66] Eric HITTI, "Sélection d'un banc optimal de filtres à partir d'une décomposition en paquets d'ondelettes. Application à la détection de sauts de fréquences dans des signaux multi-composantes". Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Nantes, Sep 1999.
- [67] BOUZIDA Ahcene, "Diagnostic de défauts de la machine asynchrone à cage par la technique d'ondelette", Mémoire de Magister 2008, l'Ecole Nationale Polytechnique.
- [68] S. Kumagai and N. Yoshimura, "Leakage Current Characterization for Estimating the Conditions of Ceramic and Polymeric Insulating Surfaces". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 11, No. 4; August 2004

- [69] I. J. S. Lopes, S. H. Jayaram and E. A. Cherney, "A Study of Partial Discharges from Water Droplets on a Silicone Rubber Insulating Surface", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 8, pp. 262\_268, 2001.
- [70] T. Suda, "Frequency Characteristics of Leakage Current Waveforms of an Artificially Polluted Suspension Insulator", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 8, pp. 705\_709, 2001.
- [71] A. H. EI-Hag, S. H. Jayaram and E. A. Cherney, "Fundamental and Low Frequency Harmonic Components of Leakage Current as a Diagnostic Tool to Study Aging of RTV and HTV Silicone Rubber in Salt-fog", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 10, pp. 128\_136, 2003.
- [72] I. J. S. Lopes, S. H. Jayaram and E. A. Cherney, "A Study of Partial Discharges from Water Droplets on a Silicone Rubber Insulating Surface", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 8, pp. 262\_268, 2001.
- [73] H. Kikuchi, M. Nakashizuka, H. Watanabe, S. Watanabe and N. Tomisawa, "Fast Wavelet Transform and its Application to Detecting Detonation", *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E75-A, pp. 980\_987, 1992.
- [74] S. Venkataraman and R. S. Gorur, "Prediction of Polymer Insulating Materials Degradation Using Daubechies Wavelet Transform", *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phen. (CEIDP)*, pp. 323\_326, 2002.
- [75] Woodson H. H. & McElroy A. J., "Insulators with Contaminated Surfaces Part II: Modeling of Discharge mechanisms," *IEEE Trans*, Vol. PAS-89, No. 8, pp. 1858-1867, 1970.
- [76] Nàcke H., "Stabilität der Fremdschichtentladungen und Théorie des Fremdschichtüberschlags," *ETZ-A*, No. 16, pp. 577-585, 1966.
- [77] Wilkins R., "Flashover Voltage of High Voltage Insulators with Uniform Surface Pollution Films," *Proc. of IEE*, Vol. 116, No. 3, pp. 457-465, 1969.
- [78] Zhicheng G. & Renyu Z., "Calculation of DC and AC Flashover Voltage of polluted Insulators," *IEEE Trans. On Electrical Insulation*, Vol. 25, No. 4, August 1990.
- [79] Mekhaldi A., Namane D., Bouazabia S. & Bérroual A., "Flashover of Discontinuous Pollution Layer on HV Insulators," *IEEE Trans. On Diel. Ins.*, Vol. 6, No. 6, 1999.
- [80] Michel Aguet, 'Haute tension', *Traité délectricité de l'école polytechnique fédérale de Lausanne. Presses polytechniques et universitaires.* 1990.