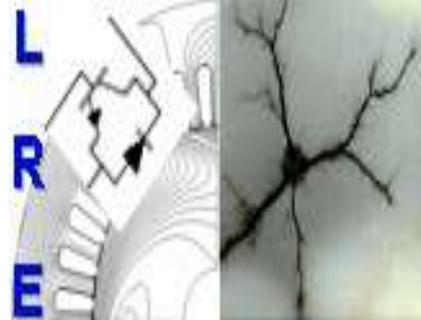


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'ELECTROTECHNIQUE
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire
pour l'obtention du diplôme de
Master en Electrotechnique

Intitulé

Étude du comportement du polychlorure de vinyle PVC/B sous
vieillessement thermique
Utilisation des méthodes de diagnostique

Présenté par
Amar RAI

Sous la direction de Pr. A. Mekhaldi
soutenu publiquement le 20 juin 2016

Membres du Jury

Président :	M. Tegar, Professeur à l'ENP
Rapporteur :	A. Mekhaldi, Professeur à l'ENP
Examineur :	A. Boubakeur, Professeur à l'ENP

ENP 2016

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

Remerciement

Je remercie, avant tout, Dieu de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce travail.

*Je remercie notre promoteur : Mr **A.Mekhaldi**, pour ses précieux conseils durant ce travail et pour ses qualités humaines : modestie, bienveillance et moralité qui resteront pour moi un exemple à suivre dans moi vie professionnelle. Puisse ce travail vous satisfaire et témoigner ma grande reconnaissance et notre profonde estime.*

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur M. Tegar pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Je tiens à remercier Monsieur A. Boubakeur, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner ce travail.

Je souhaite également remercier tous les enseignants ayant assurés nos cours pendant nos années d'études.

ملخص

يعرض هذا العمل دراسة تأثير التسخين الحراري على خصائص بوليڤينيل كلوريد. تم تنفيذ التسخين الحراري في درجتي حرارة 80 و 120 درجة مئوية لمدة 2016 ساعة (84 يوما). ولهذا الغرض أجرينا سلسلة من التجارب بمختبر التوتري العالي بالمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات تضمنت تسجيل إشارة تيار التسرب و التوتري المطبق وذلك من اجل إجراء عملية معالجة الإشارة لغرض تحديد خصائص عن حالة المادة. تم تحليل تيار التسرب باستخدام ثلاثة طرق، أولا باستعمال تقنية تحويل فورييه السريع (FFT)، ثانيا يتم استخدام تقنية تحليل بالموجات المتفرقة (DWT)، ثالثا، طبقت تقنية مخطط التراجع.

الكلمات المفتاحية : التسخين الحراري, بوليڤينيل كلوريد, تيار التسرب, التحليل ب FFT, تقنيات الموجات DWT, مخطط التراجع.

Abstract

This work is devoted to the study of thermal aging effects on the properties of polyvinyl chloride (PVC/B). The thermal aging was carried out at two temperatures, 80°C and 120°C during 2016 hours (84 days). For this, we conducted a series of tests in the High Voltage Laboratory of the ENP, the current and voltage data were recorded, in order to perform signal processing, to get information on the degradation level of the material. Firstly, the obtained leakage current was analyzed using the Fast Fourier Transform (FFT) method. Secondly, the analysis technique using wavelets was applied on the leakage current signal using discrete wavelet transform (DWT). Finally, we were interested in the technique of recurrent plot (RP) on the details of the leakage current signal.

Key words: Thermal aging, polyvinyl chloride (PVC/B), leakage current, Fast Fourier Transform (FFT), Discrete Wavelet Transform (DWT), recurrent plot (RP).

Résumé

Ce travail est consacré à l'étude de l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés du polychlorure de vinyle (PVC/B). Le vieillissement thermique a été effectué à deux températures, 80°C et 120°C pendant 2016 heures (84 jours). Pour cela, nous avons effectué des essais au niveau du Laboratoire de Haute Tension de l'ENP. Les signaux des courants et des tensions sont enregistrés. Un traitement de signal sur tous les signaux obtenus expérimentalement est effectué pour en tirer les informations concernant l'état du matériau. En premier lieu, le courant de fuite obtenu a été analysé en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT). En deuxième lieu, la technique d'analyse par les ondelettes est employée sur le courant de fuite en utilisant la transformée en ondelettes discrète (DWT). Enfin, nous nous sommes intéressés à la fin à appliquer la technique de recurrent plot (RP) sur les détails du signal du courant de fuite.

Mots clés: Vieillissement thermique, polychlorure de vinyle (PVC/B), courant de fuite, FFT, transformée en ondelettes discrète (DWT), diagramme de récurrence (RP).

Liste des figures

1.1	Représentation schématique des quatre types de polarisation	14
1.2	Diagramme de Fresnel d'un condensateur présentant des pertes	15
2.1	Dispositif expérimental	20
2.2	Un échantillon de PVC/B avant vieillissement	21
2.3	Cellule d'essai	23
3.1	Changement de couleur du PVC au cours du vieillissement 80°C	25
3.2	Changement de couleur du PVC au cours du vieillissement pour 120°C	26
3.3	(a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite dans l'échantillon non vieilli, (b) spectre de fréquence du courant	27
3.4	(a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l'échantillon vieilli pendant 1008 heures sous 80°C, (b) spectre de fréquence du courant.	28
3.5	(a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l'échantillon vieilli pendant 2016 heures sous 80°C, (b) spectre de fréquence du courant	29
3.6	(a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l'échantillon vieilli pendant 264 heures sous 120°C, (b) spectre de fréquence du courant	30
3.7	(a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l'échantillon vieilli pendant 504 heures sous 120°C, (b) spectre de fréquence du courant	31
3.8	(a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l'échantillon vieilli pendant 1008 heures sous 120°C, (b) spectre de fréquence du courant.....	32
3.9	Valeurs efficaces du courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement pour une tension appliquée de 12 kVeff	33
3.10	Le déphasage entre le fondamental de la tension appliquée (12 kV) et du courant en fonction de la durée de vieillissement (à 80°C et 120°C)	34
3.11	Le taux de distorsion THD (%) en fonction de la durée de vieillissement (à 80°C et 120°C) pour une tension appliquée de 12 kVeff	35
3.12	Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour la température de vieillissement de 80°C.....	37

Liste des figures

3.13	Évolution de la STD des détails d9, d10 et d11 en fonction de la durée de vieillissement pour la température de vieillissement de 80°C.....	38
3.14	Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour la température de vieillissement de 120°C.....	38
3.15	Évolution de la STD des détails d9, d10 et d11 en fonction de la durée de vieillissement pour la température de vieillissement de 120°C.....	39
3.16	Diagramme de récurrence appliqué au signal du courant de fuite (a) : <i>avant vieillissement</i> – (b) : <i>vieillis sous 120°C pendant 504 heures</i>	39
3.17	RP appliquée au détail D3 du courant de fuite du PVC : (a) <i>avant vieillissement</i> – (b) <i>vieilli à 80°C 1008 heures</i> – (c) <i>vieilli à 80°C 2016 heures</i> – (d) <i>vieilli à 120°C 504 heures</i> – (e) <i>vieilli à 120°C 1008 heures</i>	40
3.18	RP appliquée au détail D10 du courant de fuite du PVC : (a) <i>avant vieillissement</i> – (b) <i>vieilli à 80°C 1008 heures</i> – (c) <i>vieilli à 80°C 2016 heures</i> – (d) <i>vieilli à 120°C 504 heures</i> – (e) <i>vieilli à 120°C 1008 heures</i>	41
3.19	RP appliquée au détail D11 du courant de fuite du PVC : (a) <i>avant vieillissement</i> – (b) <i>vieilli à 80°C 1008 heures</i> – (c) <i>vieilli à 80°C 2016 heures</i> – (d) <i>vieilli à 120°C 504 heures</i> – (e) <i>vieilli à 120°C 1008 heures</i>	42

Sommaire

Introduction générale	8
Chapitre 1 : 1.Présentation générale des matériaux polymères	
1.1 Introduction	11
1.2 Définition	11
1.3 Classification des polymères	12
1.4 Utilisation des polymères.....	13
1.5 Phénomène de polarisation	13
1.5.1 Échelle macroscopique	13
1.5.2 Type de polarisation	14
1.5.3 Comportement diélectrique des polymères	15
1.6 Le polychlorure de vinyle (PVC)	16
1.6.1 Propriétés physico-chimiques.....	16
1.6.2 Propriétés électriques.....	17
1.6.3 Propriétés mécaniques.....	17
1.7 Vieillessement des polymères	17
1.7.1 Différents mécanismes du vieillissement thermique	18
1.7.1.1 Vieillessement physique	18
1.7.1.2 Vieillessement chimique	18
Chapitre 2 : 2.Techniques expérimentales	
2.1 Dispositif expérimental	20
2.2 Préparation des échantillons	21
2.3 Protocole des essais	21
2.4 Cellule d'essai	22
Chapitre 3 : 3.Résultats et discussions	
3.1 Introduction	25
3.2 Changement de couleur.....	25
3.3 Étude de l'état de dégradation du matériau par la Transformée de Fourier (FFT)	26

3.3.1 Courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement	33
3.3.2 Déphasage entre le fondamental du courant de fuite et de la tension appliquée	34
3.3.3 Taux de distorsion (THD).....	34
3.4 Diagnostique de l'état de dégradation du matériau par l'approche (DWT-STD-MRA)..	35
3.4.1 Ondelette Mère	35
3.4.2 Niveau de décomposition	36
3.4.3 Application de l'approche (DWT-STD-MRA).....	37
3.5 Diagnostique de l'état de dégradation du matériau par la technique RP.....	39
3.5.1 Choix des paramètres m , τ et ε	39
3.5.2 Technique RP appliquée directement au signal du courant de fuite	39
3.5.3 Technique RP appliquée aux détails du signal du courant de fuite	40
3.5.3.1 Évolution du détail D3	40
3.5.3.2 Évolution du détail D10	41
3.5.3.3 Évolution du détail D11	42
3.6 Conclusion	43
Conclusion générale	44
Références bibliographiques	46

Introduction générale

Dans les dernières décennies, les évolutions technologiques et industrielles en génie électrique nécessitent des matériaux améliorés pour l'isolation électrique, parmi eux, les matériaux polymères. En effet, les matériaux polymères sont largement utilisés dans le génie électrique: lignes de transport et distribution d'énergie électrique, câbles, condensateurs, moteurs électriques et d'appareils électroniques. Les polymères présentent beaucoup d'avantages dans le domaine de l'isolation, cependant ils présentent un inconvénient majeur au cours de leurs utilisations. En effet, à cause des différentes contraintes (mécanique, électrique et thermique) auxquelles ils sont soumis [1,2].

Le stress thermique est l'un des plus sévères contraintes service pouvant mener à la réduction de la durée de vie des polymères d'isolation. Il a été observé pour les matériaux organiques isolants en général ; une augmentation de la température de 8° C à 10° C réduit la durée de vie de moitié [3].

En outre, le vieillissement thermique peut entraîner une modification de la composition chimique, la morphologie ainsi des propriétés diélectriques du matériau (une augmentation de la conductivité et les pertes diélectriques) et une diminution de la rigidité diélectrique [4].

L'étude du mécanisme de vieillissement des polymères et son influence sur les propriétés de ces derniers est très importante. Ainsi, il devient important de développer des méthodes de diagnostic pour étudier la sévérité du vieillissement des matériaux à base de polymères pour connaître leur état de dégradation.

Dans notre travail, nous nous sommes basés sur des essais expérimentaux que nous avons réalisés au niveau du Laboratoire de Haute Tension de l'ENP. Les essais ont consisté à appliquer une tension à des échantillons non vieillis et d'autres vieillis à deux températures de vieillissement 80°C et 120°C et relever le signal du courant de fuite correspondant pour différentes durées de vieillissement. Nous avons considéré comme un matériau polymère, le polychlorure de vinyle (PVC). L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés diélectriques de ce matériau polymère par

l'exploitation des signaux du courant de fuite et de la tension. Nous utiliserons différentes méthodes de traitement de signal pour montrer entre autres, l'évolution des harmoniques avec le vieillissement.

Dans le premier chapitre, nous présentons le matériau polymère considéré dans notre travail. Dans une première étape de cette présentation nous évoquons la classification des polymères et leurs domaines d'utilisation en électrotechnique. Ensuite nous décrivons le phénomène de polarisation et les différents types de polarisation ainsi que le comportement diélectrique de ces polymères. La dernière partie quant à elle, sera consacrée au phénomène de vieillissement des polymères, ainsi que les différents mécanismes qui interviennent lors de ce processus.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les équipements ainsi que les techniques expérimentales adoptées au laboratoire de haute tension pour mener à bien les essais expérimentaux.

Le troisième chapitre a pour but de présenter les résultats obtenus lors de nos essais expérimentaux au laboratoire de haute tension et leurs interprétations. Dans une première partie nous avons observé l'effet du vieillissement thermique sur la couleur du matériau. Ensuite, nous avons exploité les signaux de courant de fuite obtenus pour les différentes durées de vieillissement, en utilisant les différentes méthodes de traitement de signal. La première méthode se base sur l'analyse spectrale en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT). La seconde méthode se base sur la technique de la transformée en ondelettes discrète. Enfin, comme dernière méthode, nous utilisons la technique de la Recurrent Plot.

Chapitre 1 : Présentation générale des matériaux polymères

1.1 Introduction

Les différentes applications industrielles nécessitent une fonction d'isolation électrique pour protéger aussi bien les biens que les personnes.

La diversité des matériaux utilisés dans l'isolation (liquide, gaz, air, verre, polymèreetc). L'environnement dans lequel ils vont être utilisés ainsi que les contraintes (mécanique, thermique, électrique...etc) auxquels ils sont soumis, rend le choix du type de matériau isolant à utiliser difficile et délicat. L'étude de la conception du matériel isolant se fait en tenant compte de l'environnement dans lequel va évoluer le système. La conception doit satisfaire à deux conditions :

- 1- le cahier de charge fonctionnel
- 2- le cahier de charge environnemental

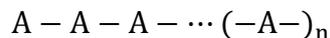
L'ensemble de ces deux composantes doit à son tour satisfaire à une troisième qui est la recherche de **l'optimum technico-économique** [5].

Comme dans d'autres domaines (automobile, bâtiments ...etc.) on a tendance à s'orienter de plus en plus vers l'utilisation des polymères dans l'isolation électrique. Grâce à leur diversité et à leurs nombreuses propriétés mécaniques, thermiques, optiques, électriques et chimiques, les polymères sont présents dans tous les domaines de l'électrotechnique.

Au cours du temps, la conception des systèmes d'isolation a évolué en prenant en compte les possibilités offertes par la souplesse de mise en forme de ces matériaux [6].

1.2 Définition

Un polymère est un matériau organique composé d'une longue chaîne moléculaire appelée macromolécules. Une macromolécule est une molécule résultant de l'enchaînement covalent de motifs —A— appelés monomères [6]:



Le passage du monomère A aux polymères $[-A-]_n$ se fait grâce à une réaction chimique appelée polymérisation. n représente le degré de polymérisation.

Parmi les polymères les plus utilisés en électrotechnique nous citons :

- **le polyéthylène (PE)** est largement utilisé comme isolant dans les câbles car il présente peu de pertes diélectriques, une faible permittivité, une résistivité élevée, et un coût matière modéré.
- **le polytétrafluoroéthylène (Téflon®)** est également un bon isolant et a surtout une bonne tenue en température.
- **le polypropylène**, qui est une polyoléfine comme le PE, est utilisé principalement dans les condensateurs.

Présentation générale des matériaux polymères

- les **polyesters type PET et PEN**, utilisés dans les condensateurs, ont aussi une bonne tenue en température.
- les **polyamides (Nylon®)**, dont on a plusieurs types en fonction de la longueur des espaceurs.
- le **polycarbonate** qui est un des meilleurs isolants transparents, et qui a aussi une excellente tenue en température.

La structure chimique de ces polymères est présentée dans le Tableau 1.1.

Polymère	Structure	Polymère	Structure
Polyéthylène (PE)	$\text{-(CH}_2\text{)-CH}_2\text{-}$	Polypropylène (PP)	$\text{-(CH}_2\text{)-CH(CH}_3\text{)-}$
polytétrafluoroéthylène (Téflon®) (PTFE)	$\text{-(CF}_2\text{)-CF}_2\text{-}$	Polyéthylène téréphtalate (PET)	$\text{-(CH}_2\text{)-O-C(=O)-C}_6\text{H}_4\text{-C(=O)-O-CH}_2\text{-}$
Polychlorure de vinyle (PVC)	$\text{-(CH}_2\text{)-CH(Cl)-}$	Polyéthylène naphthalate (PEN)	$\text{-(CH}_2\text{)-O-C(=O)-C}_{10}\text{H}_6\text{-C(=O)-O-CH}_2\text{-}$
Polyamides (PA) PA 6 p = 5 : PA 6 p = 6, q = 4 : PA 6.6	$\text{-(CH}_2\text{)}_p\text{-C(=O)-NH-}$ $\text{-(CH}_2\text{)}_p\text{-NH-C(=O)-CH}_2\text{-}$ $\text{-(CH}_2\text{)}_q\text{-NH-C(=O)-CH}_2\text{-}$	Polycarbonate (PC)	$\text{-(C}_6\text{H}_4\text{)-C(CH}_3\text{)}_2\text{-C}_6\text{H}_4\text{-O-C(=O)-O-}$

Tableau 1.1: Structure chimique des polymères les plus utilisés dans l'électrotechnique [6]

1.3 Classification des polymères

- Il y a plusieurs classifications possibles pour les polymères, l'une d'elle est de classer les polymères selon le type d'enchaînement de ses monomères :
 - **Polymères linéaires** : Leur enchaînement des motifs monomères se fait de façon linéaire
 - **Polymère à structure ramifiée** : Où par certaines méthodes de synthèse, on obtient des polymères présentant au moins un point de ramification entre ses deux groupes terminaux (un point de ramification étant un point d'une chaîne sur lequel est fixée une chaîne latérale également appelée branche ou chaîne pendante) des structures ramifiées comme dans le cas du PE ou du PVC, qui vont impacter directement la rhéologie et l'aptitude à cristalliser.
 - **Polymère réticulé** : Un autre type d'architecture de chaînes est la **réticulation** soit la formation de liaisons inter chaînes [6]
- On peut aussi classer les polymères selon leurs propriétés thermomécaniques :

- **les thermoplastiques TP** : qui sont des polymères linéaires ou ramifiés. Ils peuvent être fondus et mis en forme par élévation de la température à un certain seuil, en dessous de ce dernier redeviennent dur.
- **les élastomères** : qui sont des polymères faiblement réticulés. Un élastomère est un polymère présentant des propriétés « élastiques », obtenues après réticulation. Il supporte de très grandes déformations avant rupture. C'est typiquement le cas du caoutchouc naturel.
- **les thermodurcissables TD** : dont l'appellation provient du fait que dans la plupart des cas, il est nécessaire de monter en température pour initier la réticulation. Le taux de réticulation est d'un facteur 100 à 1000 fois celui des élastomères. Ils sont insolubles, infusibles et non cristallisables.

1.4 Utilisation des polymères

Avec leur grande diversité et leurs bonnes propriétés mécaniques et électriques. Les polymères sont largement utilisés en électrotechnique, que ce soit dans l'isolation le stockage d'énergie ou la protection mécanique d'élément. Plus récemment ils ont été utilisés dans le domaine de la microélectronique comme pour les écrans semi-conducteurs ou les matériaux piézoélectriques.

En effet, les polymères sont largement utilisés pour les fonctions d'isolation dans l'électrotechnique. Dans les câbles de transport d'énergie par exemple on utilise du polyéthylène le plus souvent réticulé et pourvus d'additifs [6], ou dans l'isolation extérieure des transformateurs, ou encore dans le vernis qui recouvre les files de cuivre utilisé dans les inductances, transformateurs, ou toute machine nécessitant un bobinage.

En plus de l'isolation électrique, ils sont aussi utilisés dans le stockage d'énergie et dans les fonctions électriques, comme dans les condensateurs. Les polymères utilisés dans les condensateurs sont généralement sous forme de films. Ils peuvent être imprégnés d'un liquide diélectrique et/ou métallisé. Les condensateurs assurent différentes fonctions comme le stockage d'énergie (batterie de condensateurs, supercondensateur) ou sont utilisés pour réaliser des fonctions électroniques (accord, liaison, filtrage ou stockage d'information).

Les polymères et composites peuvent être utilisés comme support, ou pour la construction de carcasses et boîtiers. Ils doivent avant tout assurer une fonction de tenue mécanique et de stabilité dimensionnelle, mais aussi, dans la plupart des cas, d'isolation [6].

1.5 Phénomènes de polarisation dans les matériaux polymères

1.5.1 Échelle macroscopique

Dans un vide contenant des charges libres, le champ électrique \vec{E} et l'induction \vec{D} sont liés par la relation :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (1.1)$$

où ϵ_0 est la permittivité du vide.

Présentation générale des matériaux polymères

Si on introduit un diélectrique dans un volume d'espace, il faut tenir compte des charges dues au phénomène de polarisation. L'induction dans le diélectrique satisfait à la relation :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1.2)$$

où \vec{P} est la polarisation.

Dans un milieu linéaire homogène et isotrope, on a :

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (1.3)$$

En tenant compte de l'équation 1.2

$$\vec{D} = \epsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} \quad (1.4)$$

où χ est la susceptibilité électrique

En posant $1 + \chi = \epsilon_r$ et $\epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon$, on obtient :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.5)$$

ϵ_r est la permittivité relative et ϵ la permittivité absolue.

La polarisation \vec{P} s'écrit aussi :

$$\vec{P} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \vec{E} \quad (1.6)$$

1.5.2 Type de polarisation

Il existe quatre types de polarisation (Figure 1.1) : électronique, atomique, d'orientation (ou de Debye) et des charges d'espaces (ou interfaciale). Chacune de ces polarisations contribue à la valeur de la permittivité relative et donne une relaxation qui se traduit par un pic pour l'indice de pertes [7].

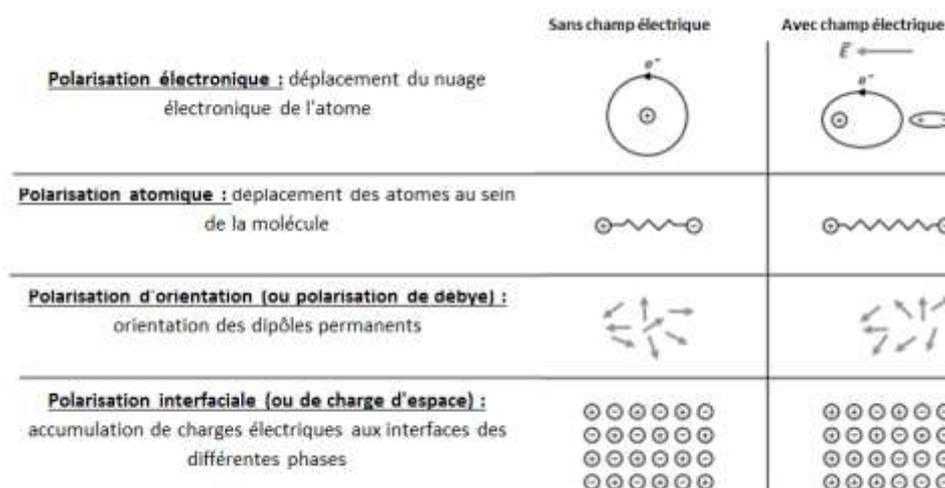


Figure 1.1: Représentation schématique des quatre types de polarisation [8]

1.5.3 Comportement diélectrique des polymères

Comme tout diélectrique, les polymères possèdent plusieurs modes de polarisation. Cette polarisation est due à des mécanismes de déformation de la répartition des charges électriques sous l'influence du champ électrique [7]. Elle dépend de la structure et des propriétés moléculaires du matériau diélectrique [9].

Dans un champ électrique alternatif, cette polarisation ne suit pas le champ d'une façon instantanée. Cette relaxation diélectrique induit une perte d'énergie. Un tel condensateur est équivalent à un circuit comportant une résistance en parallèle avec une capacité.

Dans le diagramme de Fresnel (figure 1.2), le courant alternatif complexe \bar{I} résultant de l'application de la tension alternative \bar{U} aux bornes d'un condensateur plan contenant un diélectrique, possède deux composantes :

$$\bar{I} = \bar{I}_c + \bar{I}_p \quad (1.13)$$

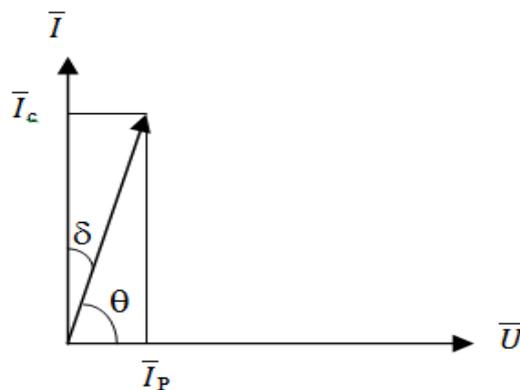


Figure 1.2 : Diagramme de Fresnel d'un condensateur présentant des pertes

avec :

\bar{I}_c : courant de charge

\bar{I}_p : courant de perte d'énergie dans le diélectrique (due à la polarisation)

Les courants \bar{I}_c et \bar{I}_p sont donnés par les relations suivantes :

$$\bar{I}_c = jC_s\omega\bar{U} \quad (1.14)$$

$$\bar{I}_p = \frac{\bar{U}}{R} \quad (1.15)$$

avec :

ω : Pulsation du courant alternatif.

C_s : Capacité du condensateur parfait.

R : résistance du diélectrique réel

L'angle $\delta = \frac{\pi}{2} - \theta$ est appelé l'**angle de pertes diélectriques**.

En pratique le courant \bar{I} est proportionnel à $C_0 U$:

$$\bar{I} = j \omega (\varepsilon' - j\varepsilon'')C_0U \quad (1.16)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j \varepsilon'' \quad (1.17)$$

avec : ε^* : **permittivité complexe relative**

ε' : **Permittivité relative**

ε'' : **Indice de pertes**

C_0 : **capacité du condensateur sous vide**

U : **tension aux bornes de ce condensateur**

La tangente de l'angle de pertes :

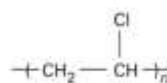
$$\tan \delta = \frac{|I_p|}{|I_c|} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (1.18)$$

Est également appelé **facteur de dissipation diélectrique** [7].

1.6 Polychlorure de vinyle (PVC)

Le polychlorure de vinyle ou PVC est un polymère thermoplastique de synthèse largement utilisé en industrie, notamment en isolation. La première découverte du PVC est obtenue par E.Baumann en date de 1872 [10], il se classe en 2ème position après le polyéthylène sur le plan utilisation dans le domaine industriel [11]. Sa grande utilisation dans l'isolation des câbles moyenne tension revient d'une part à son faible cout et d'autre part à ses bonnes qualités d'isolation électrique. Par contre, ce matériau a une mauvaise stabilité thermique, ce qui freine son utilisation dans l'isolation haute et très haute tension.

Le polychlorure de vinyle a la formule chimique suivante:



Le PVC est un polymère synthétique obtenu par la polymérisation du chlorure de vinyle monomère de formule $\text{CH}_2=\text{CHCl}$. n son degré de polymérisation est de rang variant de 500 à 3500. A l'état pur, le PVC est cassant, d'où la nécessité de lui ajouter des produits auxiliaires appelés adjuvants. Ces produits peuvent être des stabilisants, plastifiants, lubrifiants ou charges. Les produits ajoutés et leurs différentes concentrations sont le secret des producteurs de l'isolation des câbles. En effet chaque produit a un rôle bien précis.

1.6.1 Propriétés du PVC

1.6.1.1 Propriétés physico-chimiques

- La masse volumique des objets à base de PVC varie, en moyenne, entre 1,0 et 2,0 g/cm^3 à température ambiante [12].

- Le PVC transmet mal la flamme, mais sa combustion entraîne le dégagement de gaz corrosifs et de fumées.
- Thermiquement, il vieillit bien. Plusieurs chercheurs ont apporté leurs contributions à l'étude de vieillissement thermique du PVC [13,14].
- Il résiste au fluage à température élevée mais il reste fragile aux basses températures.
- Le PVC rigide résiste bien aux agents chimiques inorganiques, et il est soluble dans les cétones, le cyclohexanone et le dichloroéthylène.
- La température de transition vitreuse du PVC est élevée, elle se situe entre 75°C et 80°C ce qui le rend impropre à de nombreuses applications (câbles par exemple) sans l'adjonction de plastifiants. Avec l'emploi de plastifiants, la température de transition vitreuse se situe entre -10°C et -5°C.

1.6.1.2 Propriétés électriques

- La résistivité transversale est de l'ordre de $10^{16}\Omega\cdot\text{cm}$ [12].
- Le facteur de pertes diélectriques à 50 Hz et 20°C est de l'ordre de $15\cdot 10^{-3}$.
- La constante diélectrique à 50 Hz et 20°C est de l'ordre de 3,4.

1.6.1.3 Propriétés mécaniques

- Le PVC a une bonne résistance à la traction qui est de l'ordre de 5,5 à 6 kg/mm².
- L'allongement à la rupture est de l'ordre de 100% pour les produits non plastifiés et 200% à 400% pour les produits plastifiés.

1.7 Vieillessement des polymères

Les isolants électriques en particulier ceux organiques, subissent un vieillissement sous l'effet de plusieurs contraintes (champs électriques, température, humidité, mécanique ...etc.). Le vieillissement est une évolution lente et irréversible (dans les conditions d'utilisation) d'une ou de plusieurs propriétés du matériau considéré [15]. La dégradation des propriétés isolantes sous l'effet du vieillissement réduit considérablement la durée de vie de l'isolation et entraîne sa défaillance se présentant sous forme de phénomène de rupture et de décharge diélectrique dans les isolants.

Le degré de vieillissement d'un isolant dépend des propriétés physiques, de la composition chimique du matériau, de la nature et la durée de la contrainte appliquée, ainsi que du processus et des traitements au cours de sa fabrication [16,17]. Le processus de vieillissement ou de dégradation d'un isolant solide met souvent en jeu des facteurs intrinsèques (les transformations chimiques et physiques du matériaux, charges d'espace piégées,...) et des facteurs extrinsèques (cavités gazeuses, contaminations et impuretés, hétérogénéités,...) [16,18].

1.7.1 Différents mécanismes du vieillissement thermique

Le vieillissement thermique signifie tout phénomène traduisant une évolution, qui ne fait intervenir que le matériau, l'humidité et la température. Lors du processus de vieillissement thermique, les phénomènes qui interviennent peuvent être physiques (dégazage, migration de plastifiants, évolution de la morphologie), ou chimiques [16,19]. Ces phénomènes peuvent affecter la structure chimique du polymère, ou dans certains cas, concerner seulement les additifs (problèmes d'incompatibilité d'adjuvants) [10].

1.7.1.1 Vieillissement physique

le vieillissement physique au sens large, dans lequel il n'y a pas d'altération de la structure chimique du matériau, des chaînes de polymères en particulier maintenant leur intégrité. Ce type de vieillissement présente par principe un caractère réversible [6]. Le processus physique peut résulter :

- de modification de la configuration spatiale des macromolécules (cristallisation secondaire, relaxation,...).
- de phénomènes de surface (fissuration en milieu tensioactif).
- de phénomène de transport (pénétration de solvants, migration d'adjuvants).

Nous pouvons distinguer deux grandes catégories de phénomènes selon qu'ils impliquent ou non un transfert de masse [17].

1.7.1.2 Vieillissement chimique

Nous désignons par vieillissement chimique tout processus impliquant une modification de la structure chimique du polymère ou de ses adjuvants [20]. En pratique, le vieillissement chimique se superpose souvent à un vieillissement physique et les deux phénomènes interfèrent [21]. On distingue plusieurs types de réactions intervenant lors du vieillissement chimique :

- Coupure de chaînes statistiques
- Dépolymérisation
- Réticulation
- Oxydation

Chapitre 2 : Techniques expérimentales

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'équipement du laboratoire ainsi que les différentes procédures expérimentales adoptées durant nos essais. Les essais sont effectués au Laboratoire de Haute Tension de l'École Nationale Polytechnique d'Alger (ENP).

2.1 Dispositif expérimental

L'objet d'essai ainsi que le dispositif expérimental sont donnés sur la figure 2.1 :

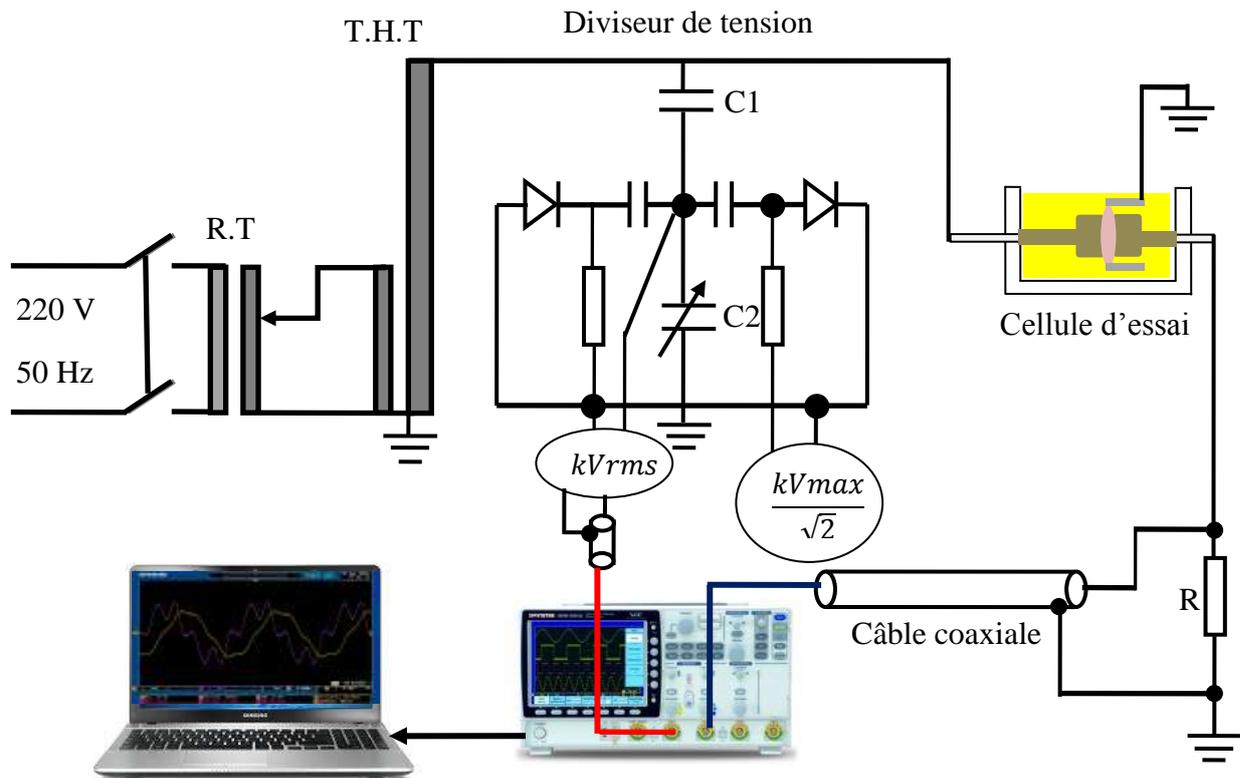


Figure 2.1 : Dispositif expérimental

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

- Un transformateur d'essai : 500V/300kV, 50kVA, 50Hz.
- Un transformateur de réglage : 220V/ 0 à 500V, 50kVA, 50Hz.
- Un diviseur de tension capacitif qui est relié au secondaire du transformateur d'essai pour réduire la tension aux bornes du voltmètre, situé près du pupitre de commande. Il est composé d'une capacité $C1=400 \mu\text{F}$ et d'une capacité $C2$ variable qui permet de régler la tension de sortie.
- Des appareils de mesures et de protection.
- Un oscilloscope numérique de bande passante 500 MHz.
- Un ordinateur pour l'acquisition des données des signaux du courant de fuite et de la tension appliquée.

2.2 Préparation des échantillons

Des plaques carrées de PVC/B (c'est à dire PVC classe B) ont été fournies par l'usine CABEL (Câblerie Électrique d'Alger sise à Gué de Constantine), spécialisée dans la fabrication des câbles électriques. Ce composé isolant est à base de polychlorure de vinyle destiné pour les câbles de tension nominale $U = 6 \text{ kV}$ conformément à la norme standard CEI 60502-2 [22]. Les plaques obtenues sont découpées en des échantillons de forme circulaire d'une épaisseur de 2 mm et leur diamètre est de 46 mm. Un exemple d'échantillon est montré sur la Figure 2.2 :



Figure 2.2 : Échantillon de PVC/B avant vieillissement

Ce matériau est provient de la firme américaine SHINTECH. Les principaux adjuvants donnés par le fabricant CABEL pour le PVC/B utilisé dans cette étude sont :

- Stabilisant : Calcium de Zinc.
- Plastifiant : Di - Iso – Décyl - Phtalate DIDP.

WHITETEX N°2 peut être utilise dans les mélanges PVC pour obtenir un calandrage et une extrusion parfaitement lisses. Le WHITETEX N°2 est un produit de mélange très blanc, susceptible de fournir une faible absorption d'eau et une bonne élasticité.

2.3 Protocole des essais

La procédure expérimentale est la suivante :

Des éprouvettes circulaires de 2 mm d'épaisseur sont exposées à la chaleur dans des étuves à air ventilé réglées à deux températures différentes : 80°C et 120°C conformément aux prescriptions des publications CEI 216 et CEI 611 [23,24]. La durée totale du vieillissement est 2016 heures.

Après chaque période de 504h, nous prélevons 3 éprouvettes pour étudier l'évolution du courant de fuite en fonction du vieillissement ainsi que les variations du courant de fuite en fonction de tension, afin d'analyser ce courant par les méthodes des traitements du signal.

Avant chaque essai, les matériaux d'essai ont été séchés dans une étuve à vide pendant 16 heures au minimum conformément à la norme standard CEI 60811.1.1 [25] pour enlever l'humidité.

L'oscilloscope 'Instek GDS-3504 500 MHz 4-CH' de stockage numérique (4 GS / s, 8 bits) a été utilisé pour enregistrer la tension appliquée et les signaux de courant obtenus à partir de la différence de potentiel à travers une résistance R de 1 k Ω dans une boîte métallique à la terre recouverte par l'aluminium formant un écran électrostatique. La résistance est insérée entre la cellule d'essai et la masse. Pour l'acquisition des données, le logiciel freewave a été utilisé dans un ordinateur portable personnel (Figure 3.1).

Les essais sont effectués sous cinq niveaux de tension alternative 3kV, 5kV, 8kV, 10kV et 12kV.

2.4 Cellule d'essai

Les échantillons ont été montés dans une cellule d'essai (Figure 2.3) et immergés dans l'huile de transformateur Borak22 pour éviter les décharges externes ou le contournement. Ces échantillons ont été placés entre deux électrodes en cuivre identiques de 25 mm de diamètre. Ces électrodes ont été arrondies (selon le profil classique de Rogowski) pour éviter des décharges associées aux effets de bord. Un anneau de garde d'aluminium a été utilisé pour empêcher qu'une partie du courant contourne l'échantillon de polymère en circulant à travers l'huile. Par conséquent, toutes les lignes de champ électrique écoulent uniquement à travers le volume d'échantillon.

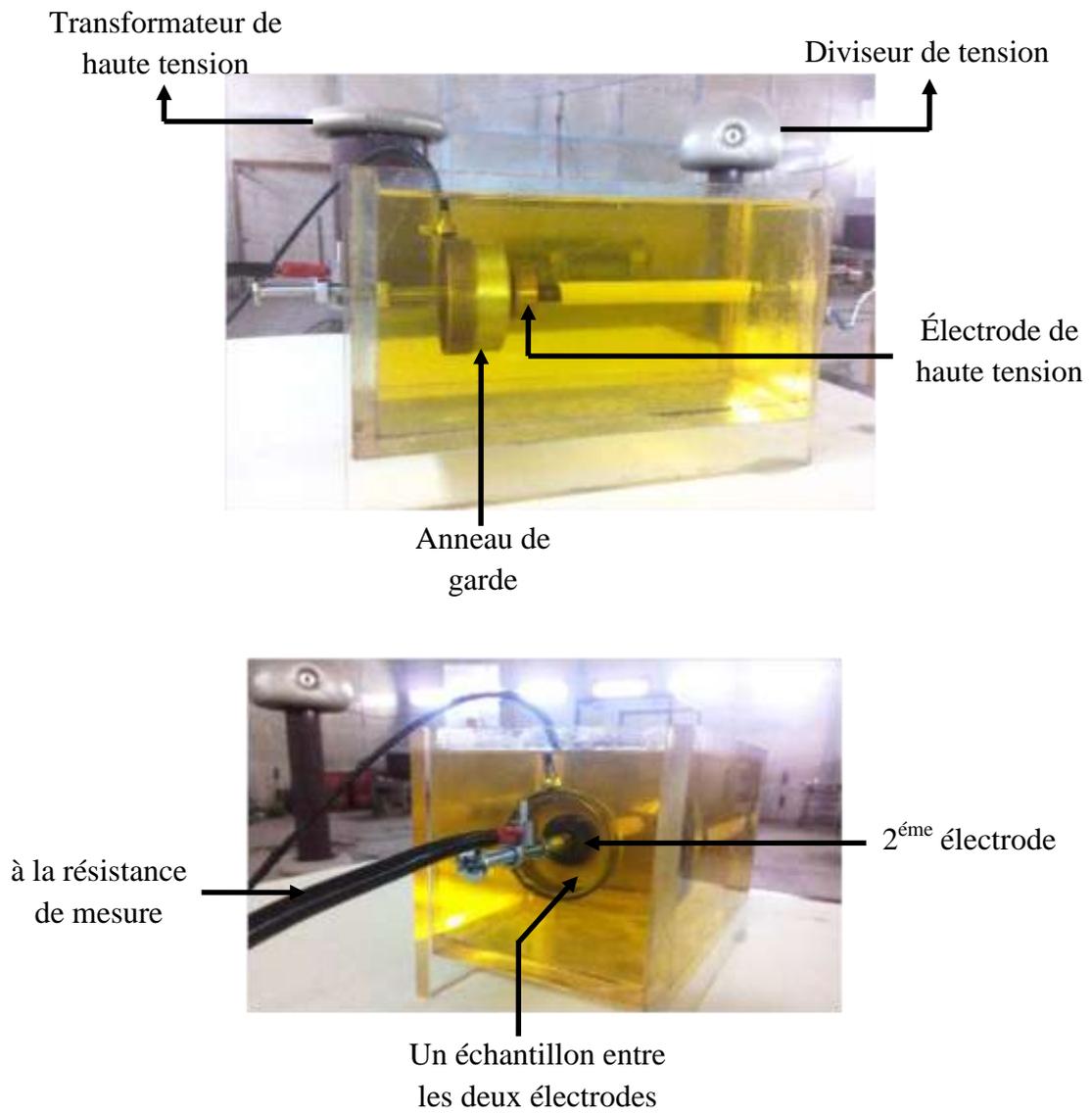


Figure 2.3: Cellule d'essai

Chapitre 3 : Résultats et discussions

3.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré à l'analyse des résultats expérimentaux portant sur l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés du polychlorure de vinyle (PVC/B) utilisé dans l'isolation des câbles de transport d'énergie électrique. Dans ce travail, nous avons utilisé une durée de vieillissement de 2016 heures. Dans une première partie, nous présentons l'effet du vieillissement thermique sur la couleur du matériau. Dans une deuxième partie, nous exploitons les signaux de courant de fuite obtenus pour les différentes durées de vieillissement considérées dans notre travail en utilisant les méthodes de traitement de signal. La première méthode se base sur l'analyse spectrale en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT). La seconde méthode se base sur la technique de la transformée en ondelettes discrètes. Enfin, la dernière méthode utilisée concerne la technique de la Recurrent Plot. Nous terminons ce chapitre par une discussion dans laquelle nous comparons les résultats obtenus par les trois méthodes.

3.2 Changement de couleur

Au cours de leur dégradation, les polymères subissent un changement de couleur, qui signifie une modification de leur structure. Afin de mettre en évidence cette propriété, nous avons suivi l'évolution au cours du vieillissement de la couleur des échantillons et pris des photographies à chaque fois qu'un changement de couleur apparaît.

Les changements de couleur des échantillons de PVC / B pendant la durée de vieillissement à 80 ° C et 120 ° C sont représentés sur les Figures 3.1 et 3.2. La couleur du matériau est légèrement affectée à 80 ° C. Cependant, les échantillons vieillis à 120 ° C semblent être endommagés après seulement 11 jours (264 h) de temps de vieillissement, et la flexibilité des échantillons est détériorée après 1008 heures.

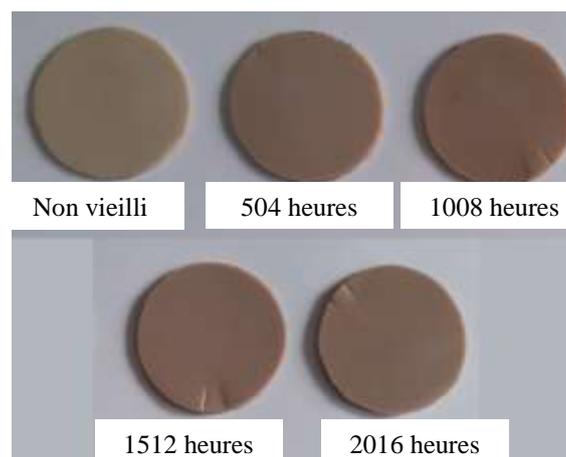


Figure 3.1: Changement de couleur du PVC au cours du vieillissement 80°C



Figure 3.2: Changement de couleur du PVC au cours du vieillissement pour 120°C

3.3 Étude de l'état de dégradation du matériau par la Transformée de Fourier (FFT)

Dans cette section, nous nous intéressons à l'étude des harmoniques du courant de fuite en utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT). Le calcul de la FFT du courant de fuite est effectué à l'aide d'un programme développé sous l'environnement MATLAB. L'objectif de cette étude est de comprendre l'évolution des harmoniques les plus significatifs après le vieillissement thermique du matériau polymère. En second lieu, nous nous intéressons à l'évolution du courant de fuite en fonction des durées de vieillissement. En troisième lieu, nous étudions le déphasage entre le fondamental du courant de fuite et celui de la tension appliquée en fonction de la durée de vieillissement. En dernier lieu, nous étudions l'évolution du taux de distorsion (THD) du courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement.

Les figures (3.3-3.8) représentent les formes d'onde de la tension appliquée et du courant de fuite transversal, ainsi que le spectre du courant de fuite pour les différents échantillons de polymère avant et après vieillissement à 80°C (1008 h et 2016 h), et à 120°C (264 h, 504 h et 1008 h). La tension appliquée est 12 kV_{eff}.

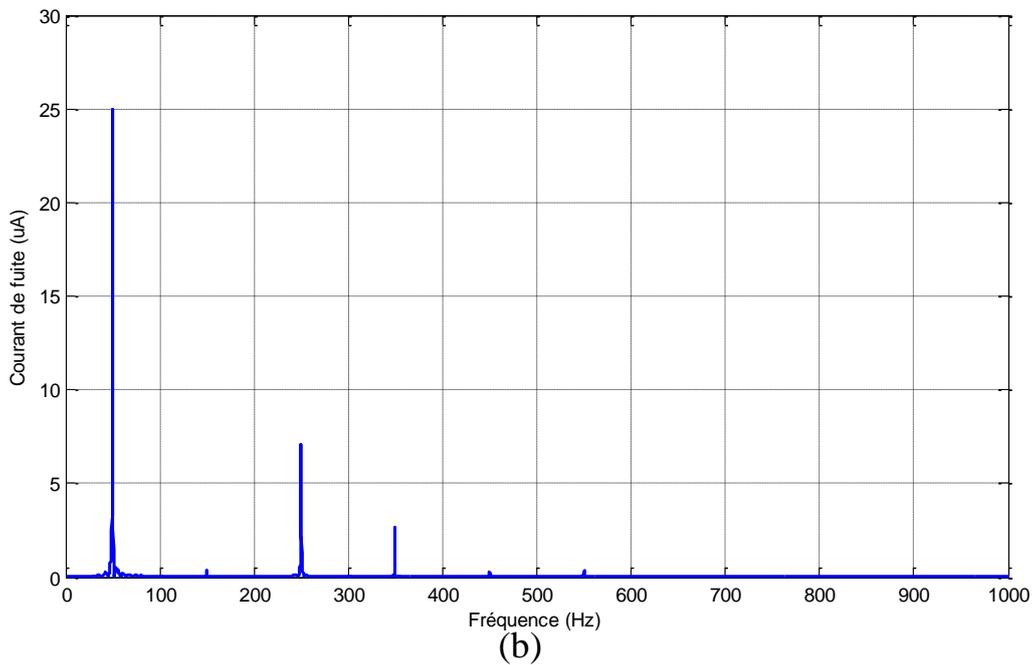
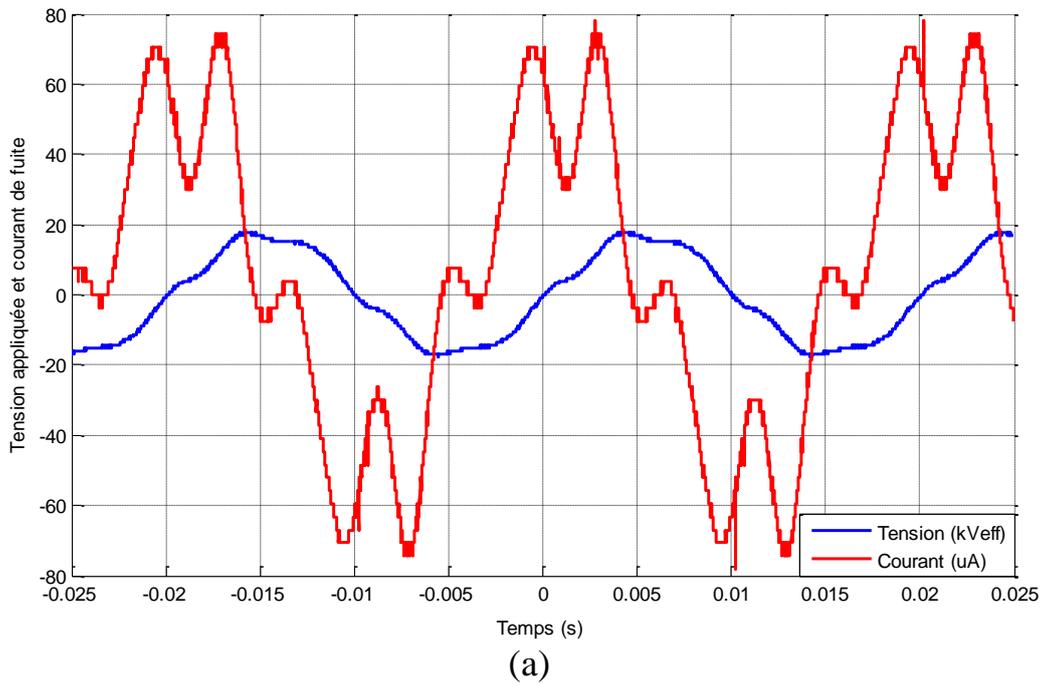


Figure 3.3 : (a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l'échantillon non vieilli, (b) spectre de fréquence du courant

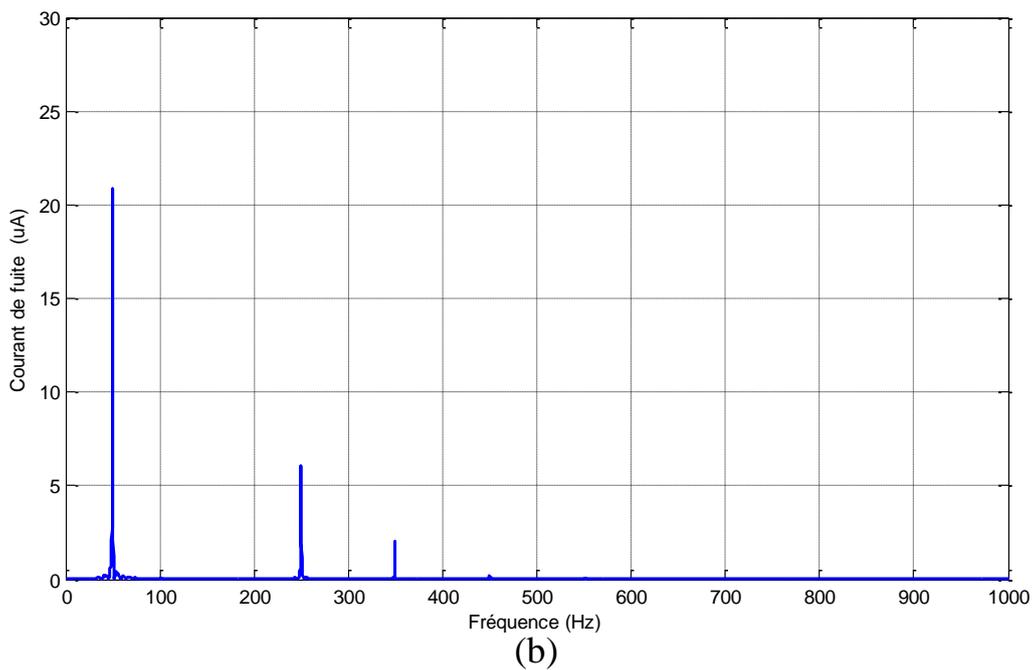
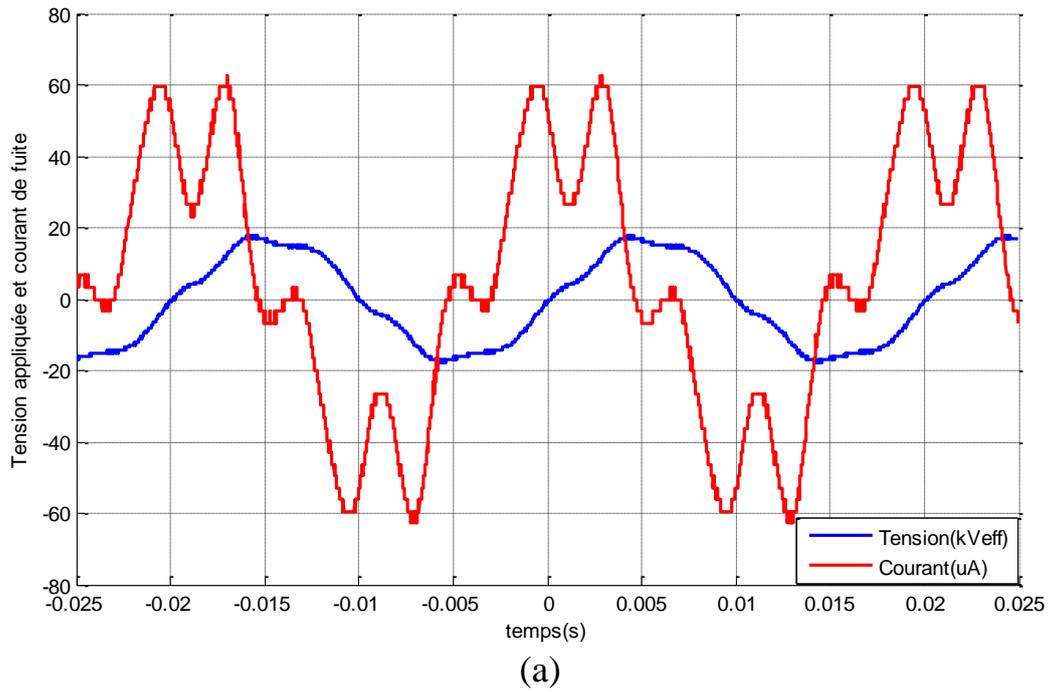


Figure 3.4 : (a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l'échantillon vieilli pendant 1008 heures sous 80°C, (b) spectre de fréquence du courant

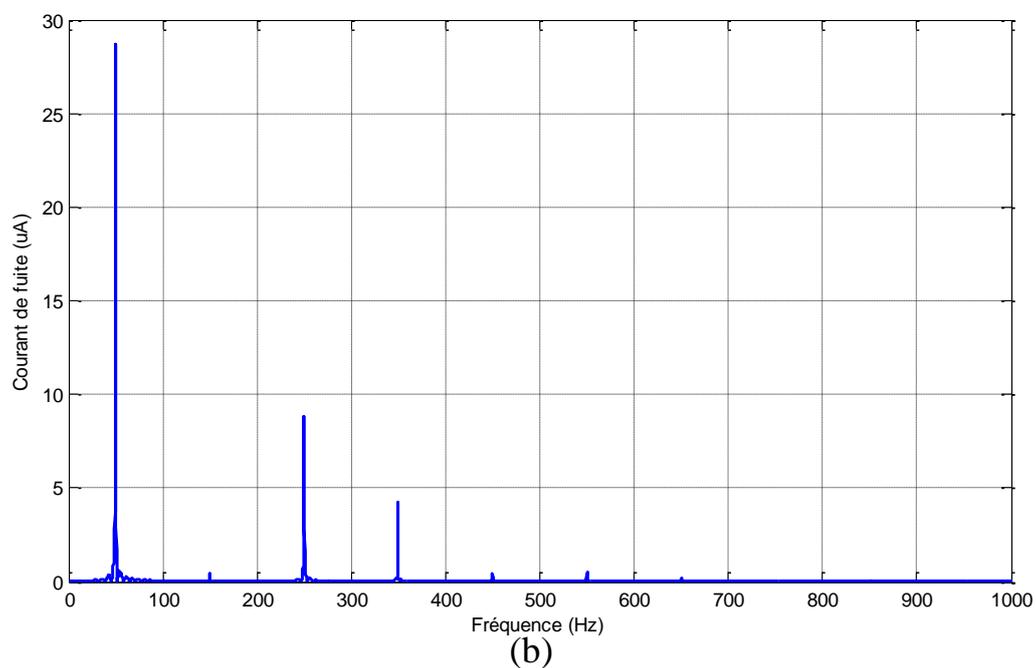
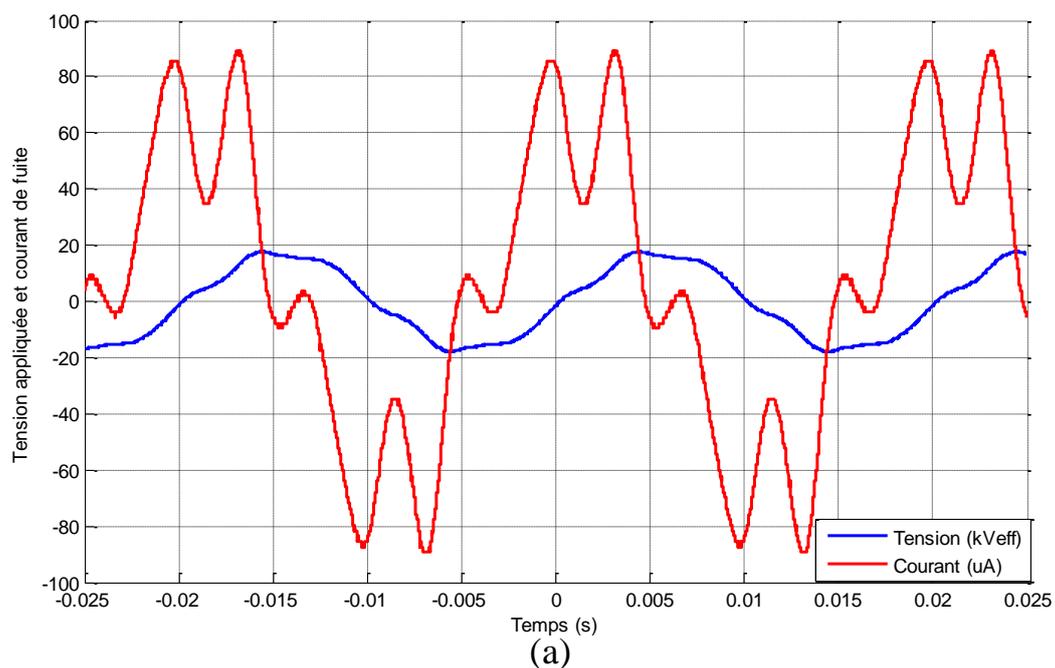


Figure 3.5 : (a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l'échantillon vieilli pendant 2016 heures sous 80°C, (b) spectre de fréquence du courant

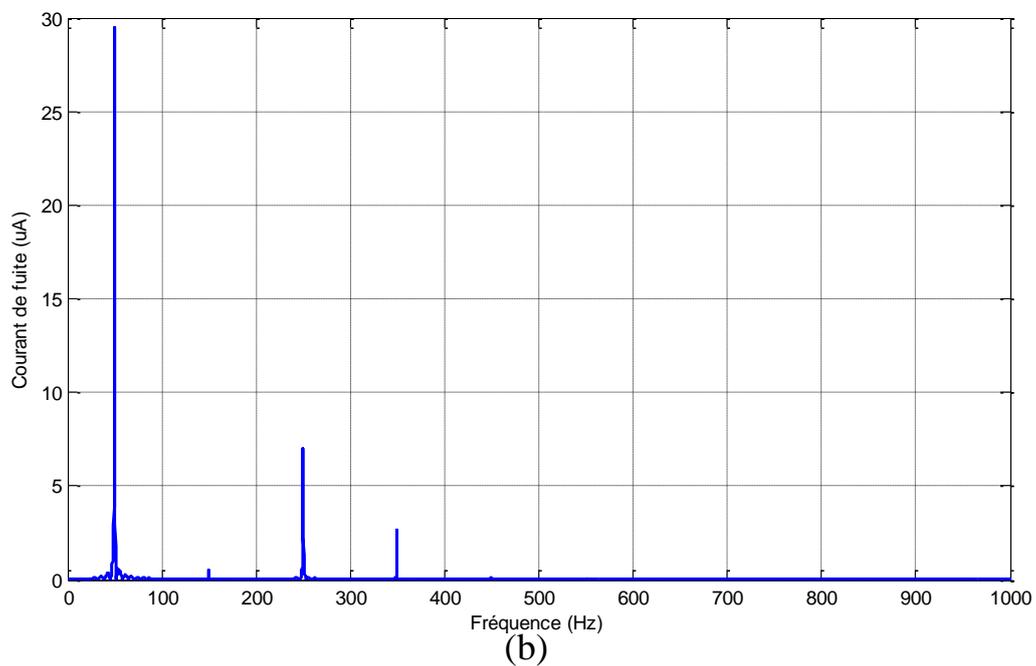
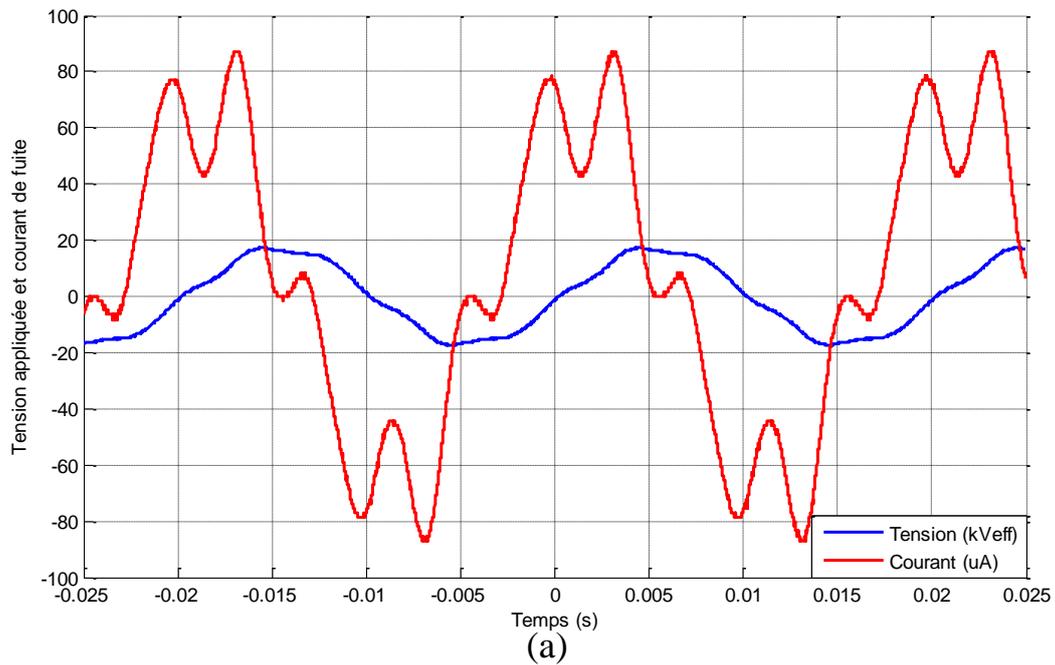


Figure 3.6 : (a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l'échantillon vieilli pendant 264 heures sous 120°C, (b) spectre de fréquence du courant

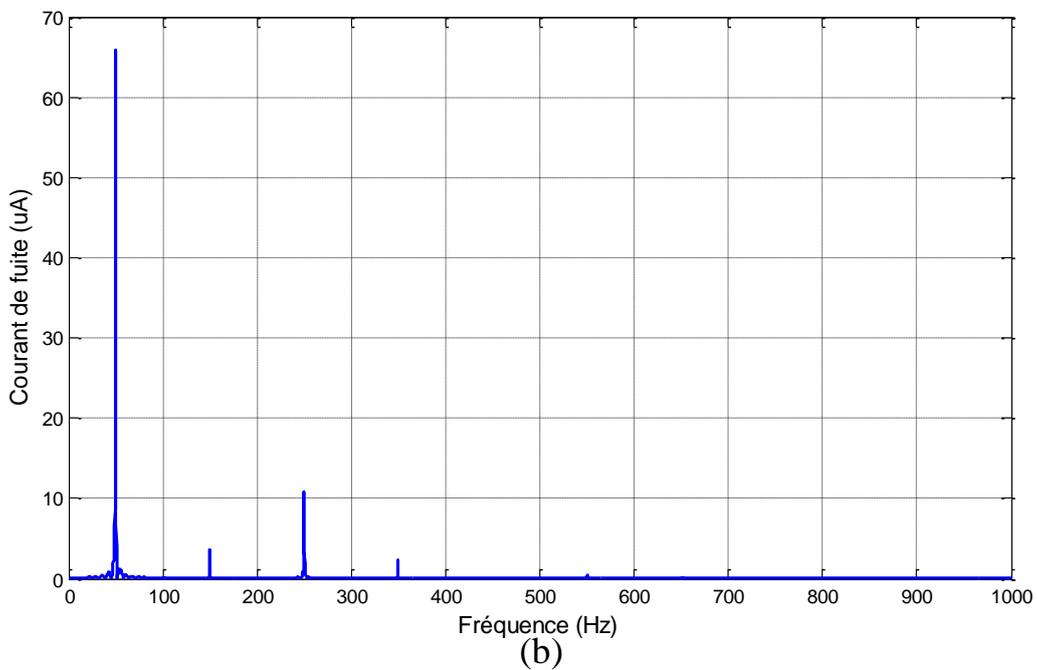
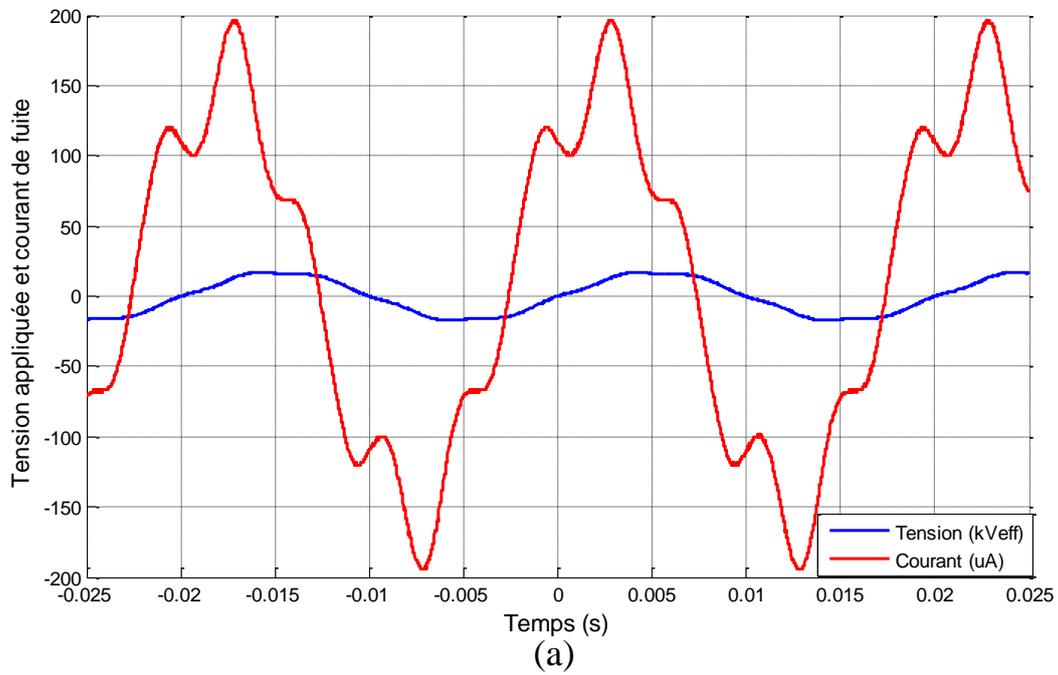


Figure 3.7 : (a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l'échantillon vieilli pendant 504 heures sous 120°C, (b) spectre de fréquence du courant

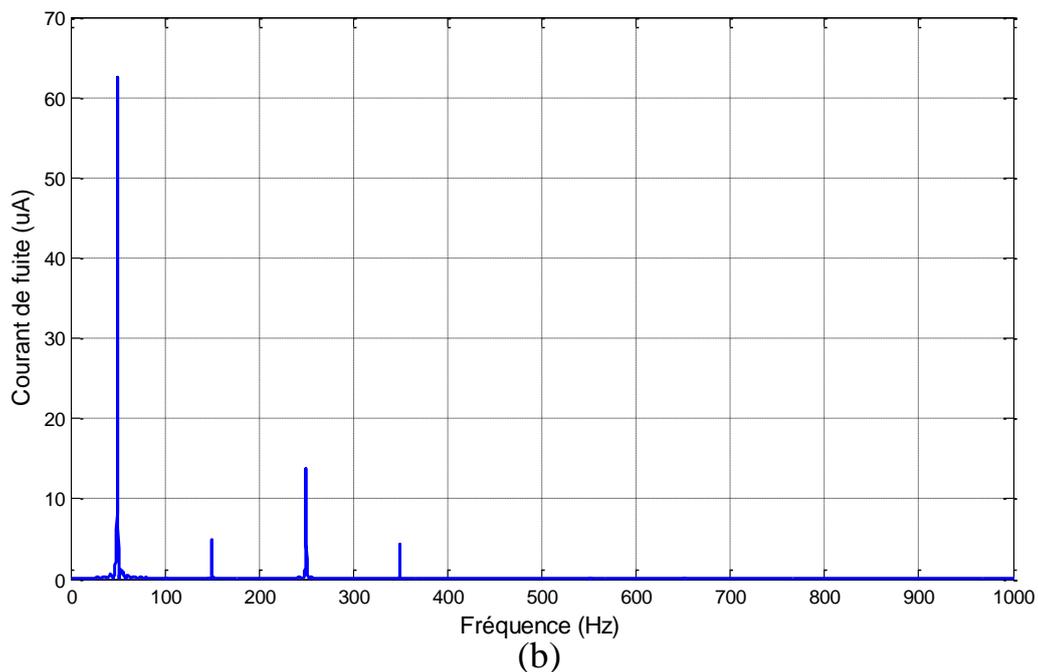
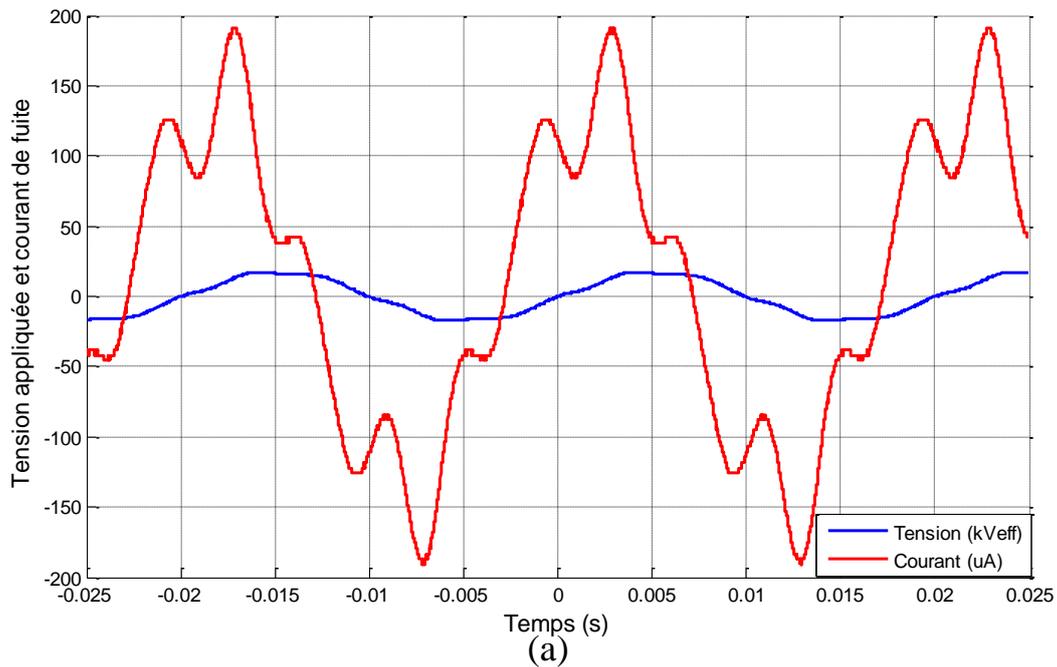


Figure 3.8 : (a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l'échantillon vieilli pendant 1008 heures sous 120°C , (b) spectre de fréquence du courant

Les figures montrent que les formes d'onde de courant sont symétriques entre les demi-cycles positifs et négatifs, dans tous les cas. Avant vieillissement, le signal du courant de fuite de l'échantillon présente des pics qui pourraient être des décharges partielles. Nous pouvons expliquer ces perturbations par la présence de l'humidité dans le matériau. Après un

vieillessement de 1008h à 80°C, les pics disparaissent, ce qui peut être expliquée par la perte de l'humidité. Pour le vieillissement de 120°C, un changement significatif dans la forme du signal du courant de fuite est observé après un temps de vieillissement de 504 heures accompagné par une augmentation de la valeur maximale de l'amplitude du courant.

Selon le tracé du spectre de fréquence du courant, les signaux du courant contiennent essentiellement les 5^e et 7^e harmoniques pour les deux cas (vieilli et non vieilli). Le 5^e harmonique est toujours plus important que le 7^e. L'échantillon non vieilli présente en plus du 5^e et 7^e harmoniques, le 9^e et le 11^e harmonique, mais avec une très faible amplitude.

L'échantillon vieilli d'une durée de 1008 heures à 80°C, présente une diminution de l'amplitude de tous ces harmoniques comparé à l'échantillon non vieilli, avec une disparition du 9^e et 11^e harmonique. Par contre, pour des durées de vieillissement plus importantes de 2016 heures, l'amplitude a tendance à augmenter, accompagnée par l'apparition du 3^e harmonique.

En revanche, pour un vieillissement à 120°C, les harmoniques 9 et 11 disparaissent quelque soit la durée de vieillissement. Pour l'échantillon vieilli avec un temps de 264 heures, l'amplitude du fondamental augmente, mais les 5^e et 7^e harmoniques restent constants comparés avec l'échantillon non vieilli. Cependant avec l'apparition du 3^e harmonique. Pour les échantillons vieillis à des durées plus importantes (504 et 1008 heures), les 3^e et 5^e harmoniques augmentent d'une façon très importante, alors que le 7^e quant à lui, il augmente très légèrement ; le 3^e harmonique devient plus important que le 7^e.

3.3.1 Courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement

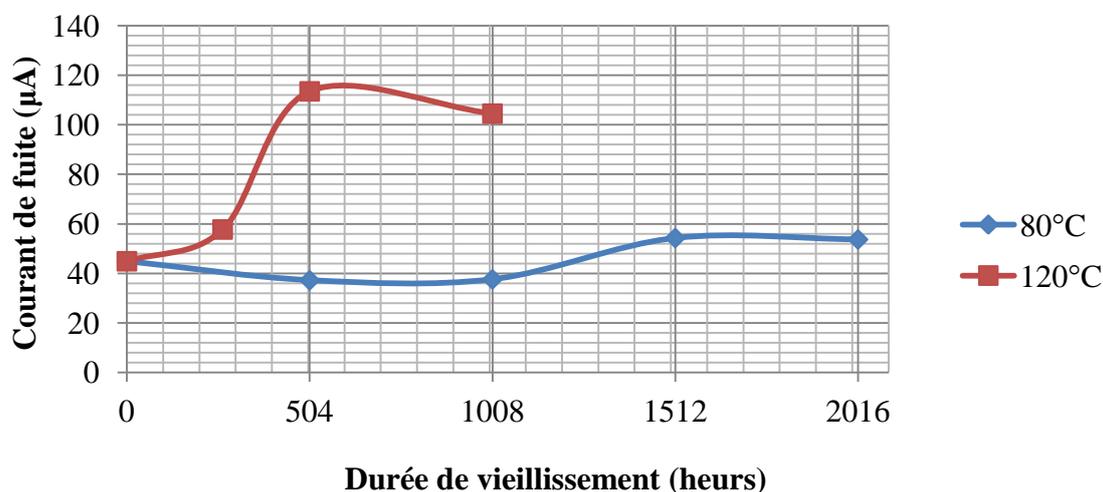


Figure 3.9 : Valeurs efficaces du courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement pour une tension appliquée de 12 kVeff

Pour le vieillissement à 80°C, l'intensité du courant de fuite diminue légèrement jusqu'à 1008h. Cette diminution pourrait être expliquée par le phénomène de perte d'humidité réduisant ainsi la composante résistive du courant de fuite. Au delà de 1008h, l'intensité du

courant de fuite tend à augmenter, donc nous assistons dans ce cas à une dégradation des propriétés diélectriques du matériau.

En revanche, pour le vieillissement à 120°C, l'intensité du courant de fuite augmente d'une façon considérable dépassant le double de celle de l'échantillon non vieilli, donc une dégradation brutale des propriétés diélectriques du matériau résultant du phénomène d'oxydation qui provoque élargissement de la phase amorphe du polymère. Pour la dernière étape de vieillissement sous 120 ° C (1008 heures), le cas observé peut être expliqué par la décomposition de la molécule de l'acide chlorhydrique (HCl), en raison de la libération du stabilisateur actif à partir du PVC conduisant à la formation de doubles liaisons. Ce phénomène facilite la conduction dans le matériau [26].

3.3.2 Déphasage entre le fondamental du courant de fuite et de la tension appliqué

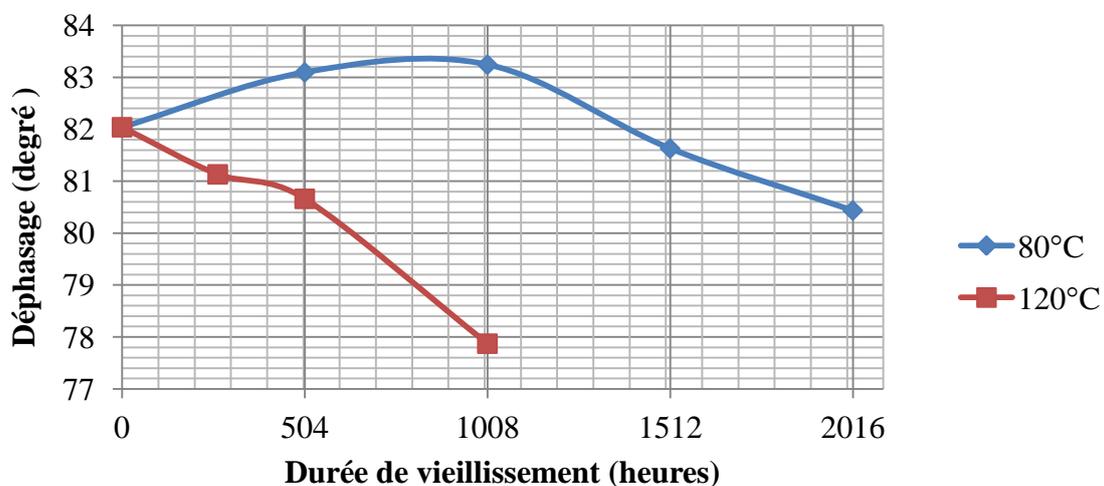


Figure 3.10: Déphasage entre le fondamental de la tension appliquée (12 kV) et du courant en fonction de la durée de vieillissement (à 80°C et 120°C)

Le déphasage entre les fondamentaux du courant de fuite et de la tension appliquée (pour 12 kV) représenté sur la figure 3.10, montre que le déphasage augmente légèrement entre 0 et 1008 heures de vieillissement pour une température de 80°C entraînant une baisse de la composante résistive du courant de fuite, donc une amélioration des propriétés isolantes du matériau, cela peut être expliqué toujours par la diminution de l'humidité dans le matériau. Pour la période suivante de 1008 à 2016 heures de vieillissement, le déphasage a tendance à diminuer entraînant une augmentation de la composante résistive du courant de fuite. Cela montre bien que les caractéristiques diélectriques sont affectées par le vieillissement thermique. Pour le vieillissement à 120°C, la diminution du déphasage est beaucoup plus importante, et cela est dû au fait que les caractéristiques diélectriques sont d'avantage affectées par les températures élevées.

3.3.3 Taux de distorsion (THD)

L'une des solutions destinée à détecter la présence d'harmoniques est le calcul du THD, taux de distorsion harmonique. Ce taux de distorsion correspond à l'énergie d'un signal présente à des fréquences harmoniques. Il peut être calculé par l'expression suivante :

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H I_{h,RMS}^2}}{I_{1,RMS}} \quad (3.1)$$

$I_{h,RMS}$ c'est la valeur efficace de l'harmonique de rang h.

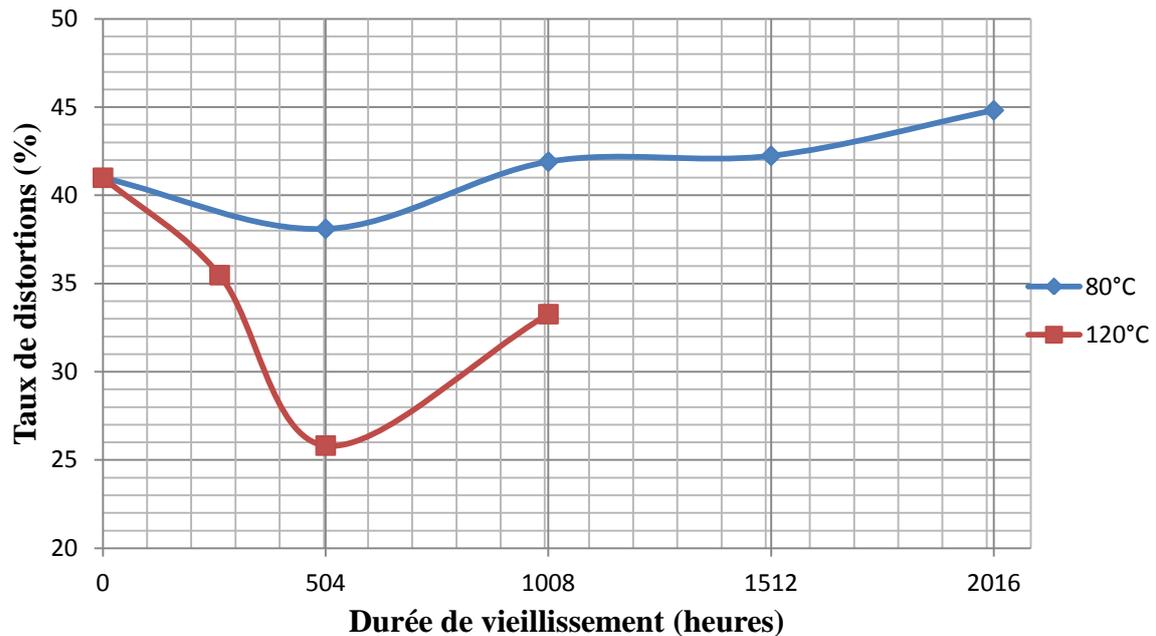


Figure 3.11: Taux de distorsion THD (%) en fonction de la durée de vieillissement (à 80°C et 120°C) pour une tension appliquée de 12 kVeff

Le taux de distorsion subit une légère diminution pour la première phase de vieillissement à 80°C, cela peut s'expliquer par la diminution des amplitudes des harmoniques par rapport au fondamental, après cette phase, le THD augmente légèrement avec le temps de vieillissement. Pour le vieillissement à 120°C, le THD diminue de façon très importante à cause de l'augmentation du fondamental par rapport aux harmoniques. L'augmentation du THD lors de la dernière phase du vieillissement à 120°C est due à l'augmentation de l'amplitude du 3^e harmonique.

3.4 Diagnostique de l'état de dégradation du matériau par l'approche (DWT-STD-MRA)

Dans cette section, nous appliquons la méthode DWT-STD-MRA (discrete wavelet transform - standard deviation - multi resolution analysis) sur le signal du courant de fuite pour étudier la corrélation qui existerait entre le comportement des composantes fréquentielles et l'influence de vieillissement thermique sur l'état du PVC.

3.4.1 Ondelette Mère

Pour l'analyse par ondelette discrète, nous optons pour le choix de l'ondelette mère complexe de Daubechies 4 (Db4). Ce choix, privilégié par de nombreux auteurs [27], est justifié par le fait que la Db4 permet de déceler les phénomènes transitoires tels que les impulsions sur le signal du courant de fuite. Ces impulsions sont causées par l'apparition de décharges électriques sur Le matériau. Pour rappel, 'dbN' correspond à l'ondelette de Daubechies d'ordre N lié au nombre de moments nuls de la fonction.

3.4.2 Niveau de décomposition

Pour un signal analysé de longueur $N = 25000$, le nombre de coefficients des filtres relatifs à l'ondelette de Daubechies 4 (Db4) est $N_w=8$, le niveau de décomposition se limite à

$$J_{max} = \text{fix} \left(\log_2 \left(\frac{N}{N_w} - 1 \right) \right) = 11$$

Dotée d'une analyse multi-résolution, la DWT opère en décomposant le signal du courant de fuite sur 11 niveaux en utilisant l'ondelette Db4. Chaque niveau, représente le signal du courant de fuite dans un intervalle de fréquence bien précis. Les bandes fréquentielles correspondantes aux différents détails du signal du courant de fuite pour une fréquence d'échantillonnage de $f_s = 500\text{KHz}$, sont présentées sur le Tableau 3.1. Rappelons que le contenu fréquentiel d'un signal échantillonné à la fréquence f_s se limite à la fréquence de Nyquist $f_N = \frac{f_s}{2} = 250\text{KHz}$.

Détails (d_i) de la décomposition par la DWT	Bandes fréquentielles (Hz)
d1	250000-125000
d2	125000-62500
d3	62500-31250
d4	31250-15625
d5	15625-7812.5
d6	7812.5-3906.25
d7	3906.25-1953.125
d8	1953.125-976.5625
d9	976.5625-488.2812
d10	488.2812-244.1406
d11	244.1406-122.0703

Tableau 3.1 : Bandes fréquentielles des détails de la décomposition du courant de fuite par la DWT.

Suivant la décomposition du signal du courant de fuite en onze détails, les déviations standards de ces derniers sont calculées. Cette méthode est communément appelée Standard Deviation- Multi Résolution Analysis (STD-MRA). Elle a pour but d'étudier le signal du courant de fuite sous différentes résolutions fréquentielles dans le but de déceler les

transitions dans les détails du courant de fuite pour voir l'influence de vieillissement thermique sur le PVC.

3.4.3 Application de l'approche (DWT-STD-MRA)

La déviation standard (STD) montre la dispersion des valeurs du détail du courant de fuite de sa valeur moyenne. Une grande valeur de la STD indique que les valeurs des détails présentent de fortes variations et dispersions, alors que de faibles valeurs de la STD montrent que les valeurs des détails du courant de fuite sont très peu dispersées et très proches de leur valeurs moyennes. On peut conclure que la déviation standard peut être considérée comme une mesure de la quantité d'énergie présente dans un signal de moyenne nulle [28].

La STD est calculée à partir de l'expression suivante :

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} (d_i(j) - \mu_i)^2} \quad (3.2)$$

STD : est la déviation standard du détail d_i .

d_i : correspond à un échantillon du détail i .

N_i : correspond à la taille du vecteur d_i .

μ_i : est la moyenne du vecteur d_i .

La figure 3.12 représente la DWT STD-MRA correspondantes aux signaux du courant de fuite obtenus pour des échantillons neufs et vieillis à 80°C pendant 1008 et 2016 heures. Cette représentation montre que les déviations standard (STD) des trois détails d9, d10 et d11 diminuent pour le vieillissement à 1008 heures, et augmentent pour celui à 2016 heures comparé au cas d'un échantillon neuf. Pour l'échantillon vieillis à 1008 heures, les STD des détails d1 jusqu'à d4 sont légèrement inférieures par rapport à l'échantillon neuf, et pour d5 jusqu'à d8 sont presque égales. En revanche, pour le vieillissement à 2016 heures, les STD des détails de d1 jusqu'à d8 sont légèrement inférieures par rapport à l'échantillon neuf.

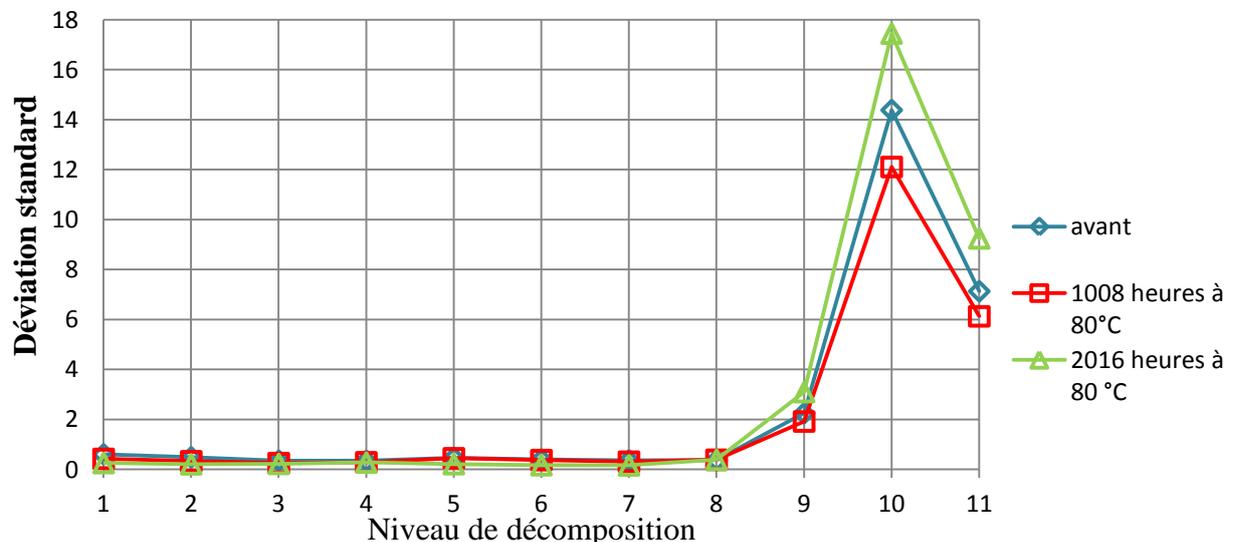


Figure 3.12: Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour la température de vieillissement de 80°C

Nous donnons sur la figure 3.13 l'évolution de la déviation standard des détails significatifs d9, d10 et d11 en fonction de la durée de vieillissement pour la température 80°C :

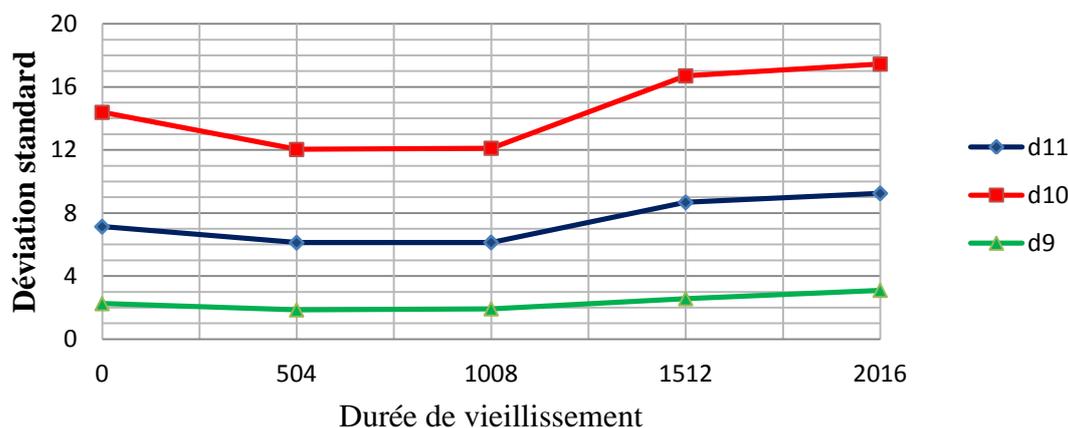


Figure 3.13 : Évolution de la STD des détails d9, d10 et d11 en fonction de la durée de vieillissement pour la température de vieillissement de 80°C

La figure 3.14 représente la DWT STD-MRA correspondante aux signaux du courant de fuite obtenus pour des échantillons neufs et vieillis à 120°C pendant 264, 504 et 1008 heures. D'après cette figure, nous remarquons que la composante d10 a une énergie qui augmente avec l'augmentation de la durée de vieillissement. En réalité, le détail d10 contient essentiellement les harmoniques 5 et 7 (Tableau 3.1) qui ont une très grande énergie par rapport aux autres harmoniques. La STD du détail d11 qui contient le 3^e harmonique, augmente légèrement pour le vieillissement de 264 heures et de façon plus importante pour une durée plus longue (504 et 1008 heures).

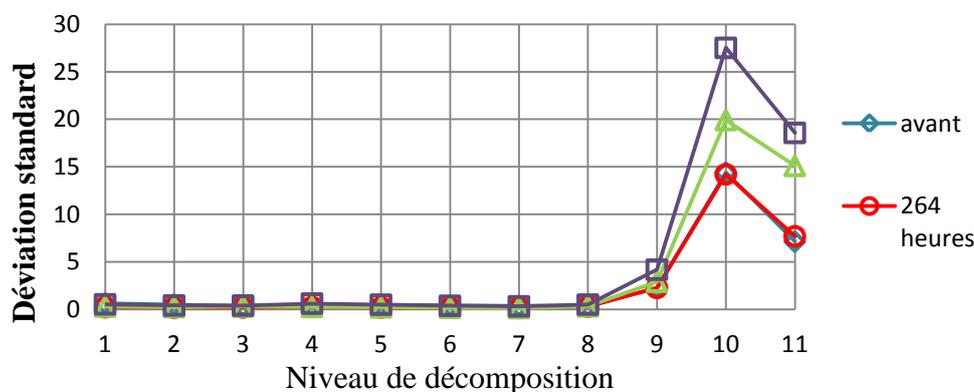


Figure 3.14: Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour la température de vieillissement de 120°C

La figure 3.15 montre l'évolution de la déviation standard des détails significatifs d9, d10 et d11 en fonction de la durée de vieillissement pour la température vieillissement de 120°C :

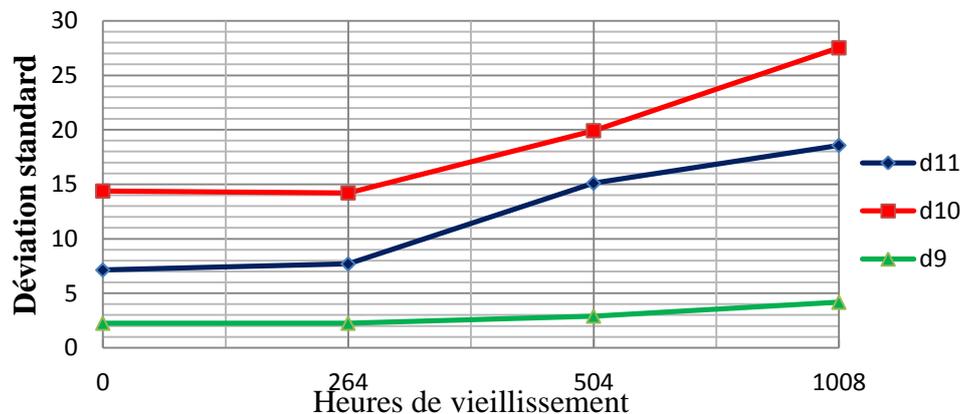


Figure 3.15: Évolution de la STD des détails d9, d10 et d11 en fonction de la durée de vieillissement pour la température de vieillissement de 120°C

3.5 Diagnostic de l'état de dégradation du matériau par la technique Recurrent Plot (RP)

Pour l'utilisation de cette technique, deux choix s'offrent à nous quand il s'agit d'utiliser les RP pour l'étude de ce phénomène. On applique la technique des RP soit directement aux signaux du courant de fuite, soit à leurs décompositions fréquentielles.

3.5.1 Choix des paramètres m , τ et ε

D'après les études menées, les valeurs de la dimension de plongement m et du retard τ n'ont pratiquement pas d'effet sur la structure topologique du RP [29]. Néanmoins, elles sont choisies, via la «C-C method», égales à 5 et 20 respectivement.

La valeur du paramètre ε est choisie égale à $0,25\sigma$, où σ est la standard déviation du signal étudié.

3.5.2 Technique RP appliquée directement au signal du courant de fuite

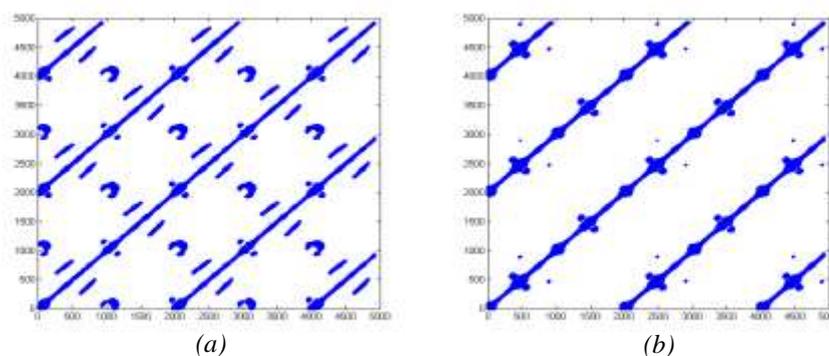


Figure 3.16 : diagramme de récurrence appliqué au signal du courant de fuite
(a) : avant vieillissement –(b) : vieillis sous 120°C pendant 504 heures

La structure de la RP appliquée directement au courant de fuite nous montre des lignes parallèles à la LOI avec des points isolés plus importants dans le signal de l'échantillon non vieilli. Les lignes parallèles indiquent que l'évolution est similaire à d'autres périodes. La répétition des motifs indique la périodicité du signal. Cependant, de telles structures ne nous permettent pas de diagnostiquer l'état de vieillissement des matériaux. C'est pourquoi, durant notre étude, nous appliquerons le diagramme de récurrence aux composantes fréquentielles du signal du courant de fuite.

3.5.3 Technique RP appliquée aux détails du signal du courant de fuite

D'après ce qui a été montré précédemment, la décomposition fréquentielle du signal de courant de fuite s'avère être nécessaire avant d'utiliser la techniques RP. Différents détails correspondant aux différents niveaux de décomposition sont donc extraits.

Dans le présent paragraphe, nous décomposons le signal du courant de fuite par la DWT à l'aide de l'ondelette Daubechies 4 en 11 niveaux. Nous extrait alors les différents détails correspondant aux différentes bandes de fréquence pour des échantillons vieillis et non vieillis. Enfin, nous appliquons la technique RP aux différents niveaux de décomposition.

3.5.3.1 Évolution du détail D3

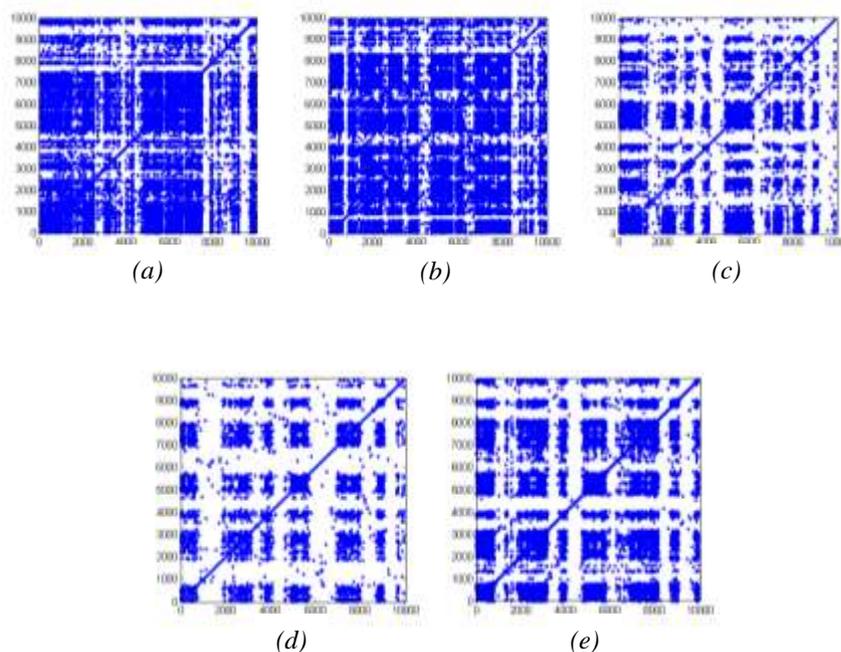


Figure 3.17 : RP appliquée au détail D3 du courant de fuite du PVC :
(a) avant vieillissement – (b) vieilli à 80°C 1008 heures – (c) vieilli à 80°C 2016 heures –
(d) vieilli à 120°C 504 heures – (e) vieilli à 120°C 1008 heures.

La figure 3.17 montre les différents RP des composantes hautes fréquences du détail D3 (31,25 à 62,5 kHz) en fonction de la durée de vieillissement pour les deux températures, avec une tension appliquée de 12 kV_{eff}.

D'après la figure 3.17 (a), pour l'échantillon non vieilli le diagramme est composé de points denses concentrés, avec des bandes blanches. Les bandes blanches indiquent la présence de transition. Pour un vieillissement sous 80°C pendant 1008 heures, la figure 3.17 (b), nous indique l'intensification des points, avec une diminution des bandes blanches. Par contre, pour une durée de 2016 heures, les bandes blanches deviennent plus importantes que pour les précédentes structures. En revanche, le vieillissement sous 120°C, les figures 3.17 (d) et (e) montrent une augmentation des bandes blanches et une diminution significative des points.

D'après l'analyse de la structure de la RP (figure 3.17) et de la courbe qui montre l'évolution du courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement (figure 3.9), on remarque qu'il y'a une corrélation entre l'intensité du courant de fuite et des bandes blanches. Plus le courant de fuite est important plus les bandes blanches deviennent importantes. Donc la RP du détail D3 peut nous indiquer sur l'état de dégradation du matériau.

3.5.3.2 Évolution du détail D10

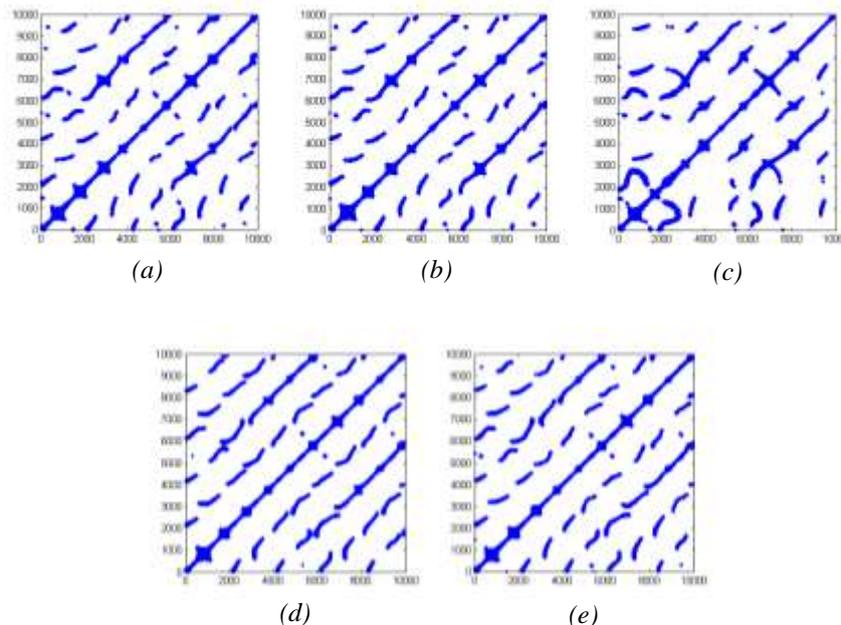


Figure 3.18 : RP appliquée au détail D10 du courant de fuite du PVC :

(a) avant vieillissement – (b) vieilli à 80°C 1008 heures – (c) vieilli à 80°C 2016 heures –
(d) vieilli à 120°C 504 heures – (e) vieilli à 120°C 1008 heures.

La figure 3.18 montre les différents RP des composantes basses fréquences du détail D10 (244 à 488 Hz) en fonction de la durée de vieillissement pour les deux températures, avec une tension appliquée de 12 kV_{eff}.

A partir des structures de la RP montrées dans la figure 3.18, on remarque la présence de points qui tendent à être des lignes parallèles à la LOI. Ces structures indiquent que le processus tend à être déterministe. Par contre la figure 3.18 (c), présente un changement significatif de la structure de la RP qui nous indique que le processus devient plus chaotique que les précédents. Le détail D10 contient essentiellement les 5^e et 7^e harmoniques, et le

signal de l'échantillon vieilli sous 80°C 2016 heures indique une forte présence de ces harmoniques. Donc la RP du détail D10 peut nous informer sur la présence des 5^e et 7^e harmoniques. L'augmentation de ces harmoniques indique l'initiation de la dégradation du matériau, même en l'absence du 3^e harmonique.

3.5.3.3 Évolution du détail D11

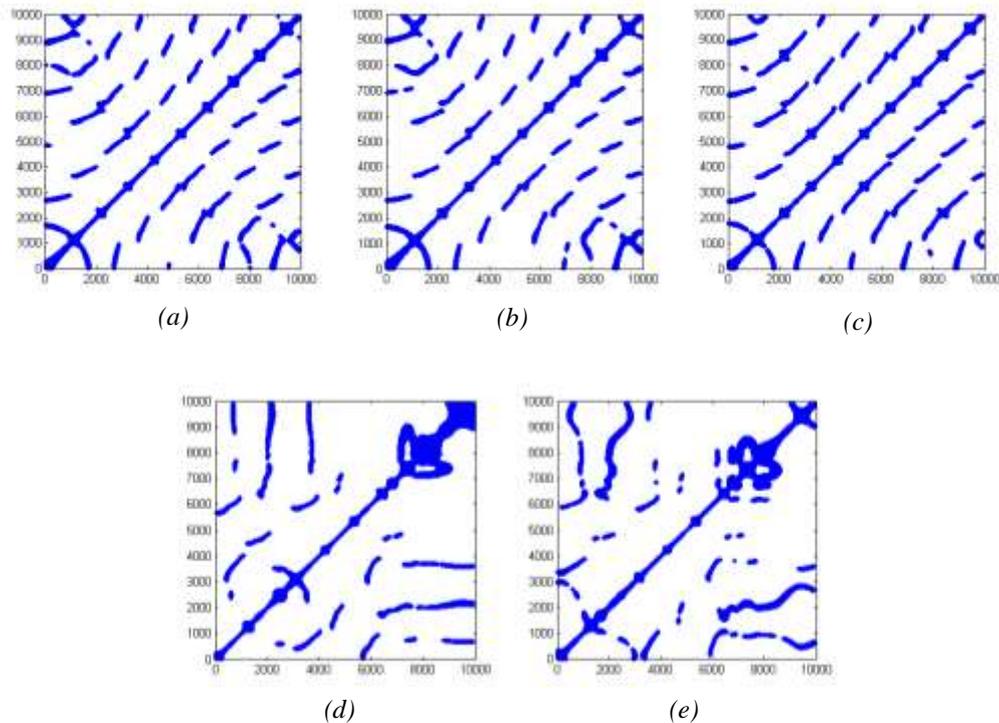


Figure 3.19 : RP appliquée au détail D11 du courant de fuite du PVC :

(a) avant vieillissement – (b) vieilli à 80°C 1008 heures – (c) vieilli à 80°C 2016 heures –
(d) vieilli à 120°C 504 heures – (e) vieilli à 120°C 1008 heures.

La figure 3.19 montre les différents RP des composantes basses fréquences du détail D11 (122 à 244 Hz) en fonction de la durée de vieillissement pour les deux températures de vieillissement, avec une tension appliquée de 12 kV_{eff}.

A partir des structures de la RP montrées dans la figure 3.19, on remarque que les échantillons vieillis à 120°C ont une structure différente des autres. Comme montré dans le paragraphe précédent, ces échantillons montrent un changement significatif de la forme du courant de fuite à cause notamment de l'augmentation de l'amplitude du 3^e harmonique qui est contenue dans le détail D11. Donc la RP du détail D11 peut nous informer sur la présence du 3^e harmonique qui devient important quand le matériau subit une forte dégradation.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les courants de fuite pour différents échantillons neufs et vieillis à différentes durées de vieillissement pour deux températures de vieillissement, pour le PVC. Cette étude nous permet de voir l'effet du vieillissement sur l'intensité du courant de fuite, le déphasage, ainsi que l'évolution des différents harmoniques.

Lors du vieillissement à 120°C, le PVC est fortement dégradé et subit une augmentation importante de l'intensité du courant de fuite. En revanche, lors du vieillissement à 80°C, le PVC subit une légère amélioration dans la première phase suivie d'une dégradation.

Dans la première partie, l'étude des harmoniques se fait à l'aide de la transformée de Fourier rapide FFT du signal du courant de fuite. Cette transformée nous donne une idée assez claire des harmoniques présents dans chaque signal, mais rend difficile la comparaison des harmoniques entre différents signaux, ainsi nous pouvons donc faire une étude de l'évolution des harmoniques en fonction de la durée de vieillissement.

Dans la deuxième partie, la méthode utilisée pour l'étude du courant de fuite est la transformée en ondelette. Cette étude nous a permis une analyse plus approfondie de l'évolution des harmoniques. L'approche DWT-STD-MRA nous permet d'étudier le signal du courant de fuite sous différentes résolutions fréquentielles, ainsi que la possibilité de faire l'étude sur la transition des détails du courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement. Ce qui nous permet de voir l'évolution de chaque plage de fréquences séparément, donc une analyse beaucoup plus détaillée que la première.

Pour la dernière partie, nous avons utilisé la méthode « recurrent plot » pour l'analyse du courant de fuite. Les structures topologiques du RP semblent être un bon outil pour nous donner des indications sur l'état de vieillissement du matériau. La structure topologique de la RP, même si elle nous donne un résultat visuel direct mais rend difficile voire impossible toutes interprétations ou comparaisons des structures, vu l'absence de mesures quantitatives à comparer, pour avoir des meilleurs résultats il faudrait utiliser l'analyse quantitative de récurrence RQA.

Conclusion générale

Le présent travail nous a permis d'étudier l'impact du vieillissement thermique sur le comportement diélectrique du matériau polymère utilisé dans l'isolation électrique. Les essais réalisés sur les différents échantillons de polymère ont été effectués au laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Un matériau polymère a été utilisé, le polychlorure de vinyle (PVC), avant et après vieillissement. Deux températures de vieillissement ont été considérées, 80°C et 120°C pour une durée totale de vieillissement de 2016 heures. Les signaux obtenus nous permettent de déterminer l'amplitude du courant de fuite, et les harmoniques contenus dans le signal à l'aide d'une analyse fréquentielle. Ceci nous permet d'observer l'influence du vieillissement thermique sur l'état de dégradation de ces matériaux polymères.

Le PVC subit une forte dégradation quand il est vieilli et voit l'amplitude de son courant de fuite augmenter de façon très importante. Pour le vieillissement à 80°C, l'effet du vieillissement est moins important, le PVC se dégrade après 2016 heures en passant par un stade intermédiaire ou il y'a une légère amélioration à 1008 heures.

Dans un second temps, l'analyse des harmoniques du courant de fuite permet de conclure que les 5^e et 7^e harmoniques sont dominants par rapport aux autres et qu'un diagnostic de la sévérité de la dégradation du matériau à cause du vieillissement est possible en se fiant aux 3^e harmonique. En effet quand le matériau est fortement endommagé par le vieillissement thermique, le 3^e harmonique apparait et son amplitude devient très proche de celles des 5^e et 7^e harmoniques.

L'utilisation de la méthode par la transformée en ondelettes, par l'approche DWT-STD-MRA, nous permet d'étudier le signal du courant de fuite sous différentes résolutions fréquentielles. Autrement dit, ceci nous permet d'étudier l'évolution du courant dans chaque plage de fréquences séparément, donc une analyse plus approfondie et plus précise de l'évolution des harmoniques en fonction de la durée de vieillissement thermique.

L'utilisation de la technique Recurrent Plot sur les détails du courant de fuite nous permet une analyse visuelle de chaque détail. L'étude des structures topologiques de la RP appliquée au détail D3 du courant de fuite, nous permet de conclure qu'il y'a une corrélation entre la structure topologique et l'amplitude du courant, plus le courant est important, plus les bandes blanches de la structure sont importantes. Les structures topologiques de la RP appliquées au détail D10 et D11 du courant de fuite, nous permettent de déduire la présence des harmoniques les plus importants dans le signal ; en effet, nous avons remarqué qu'il y'a un changement de la structures de D10, dans le cas où les 5^e et 7^e harmoniques sont importants. Quand il y a changement dans la structure de D11, c'est que le 3^e harmonique est important. Cette méthode même si elle donne des résultats intéressants, rend difficile toute

Conclusion générale

analyse objective à cause de l'absence de données quantitatives, pour avoir des meilleurs résultats il faudrait utiliser l'analyse quantitative de récurrence RQA.

Le travail effectué dans le cadre de ce projet de master, et l'utilisation des méthodes de traitement de signal pour juger de la dégradation du matériau après vieillissement thermique est une méthode novatrice, et apporte un nouveau souffle dans le domaine. Ces méthodes donnent des résultats qui nous permettent un diagnostic sur la dégradation des matériaux après le vieillissement.

Bibliographie

- [1] J.C. Dubois, « Propriétés diélectriques des polymères », techniques de l'ingénieur, ref E1850, November 1998.
- [2] E. Mbougou, « Etude des phénomènes liés à la dégradation des matériaux polymères sous champ électrique en présence d'humidité », Thèse de Doctorat, Spécialité Chimie – Physique, Université de Franche-Comté, France, July 2006.
- [3] Brugg Cables, High Voltage XLPE Cable Systems, Technical User Guide, May 2006.
- [4] Y. Mecheri, L. Boukezzi, A. Boubakeur and M. Lallouani, « Dielectric and mechanical behavior of XLPE under thermal aging », IEEE, Conf. Electr. Insul. Dielect. Phenomena, Victoria BC, 2007, vol.2, pp.560 -563.
- [5] B.Pinel, F.Duchateau, « Fonction isolation dans les matériels électriques », techniques de l'ingénieur, D2302, 1999.
- [6] G.Teysse, L.Boudou, « Polymères et composites pour l'électrotechnique », techniques de l'ingénieur, D2335, 2010.
- [7] J.C. Dubois, « Propriétés diélectriques des plastique », techniques de l'ingénieur, Am3140, 2001.
- [8] R.Coelho, R.Fournie, « Diélectriques, Bases théoriques », techniques de l'ingénieur, D2300, 2000.
- [9] P. Robert, « Matériaux de l'électrotechnique », Edition Géorgie, Traité d'électricité, EPF Lausanne, 1982.
- [10] J. W. Summers, « A review of Vinyl technology », Journal of Vinyl & Additive Technology, Vol. 3, N° 2, pp. 130-139, June 1997.
- [11] V. Babrauskas, « Mechanisms and modes for ignition of low-voltage, PVC insulated electrotechnical products », Fire and Materials, Vol.30, Issue 2, pp. 151-174, March/April 2006.
- [12] Z.Hruska, P.Guesnet, C.Salin, J.Couchoud, « Poly (chlorure de vinyle) ou PVC », AM3325, 2007.
- [13] Y. T. Soheir, N. A. Jeannette, W.S. Magdy, « Thermal and mechanical behaviour of flexible poly vinyl chloride mixed with some saturated polyesters », Polymer degradation and Stability, Vol.91, pp. 385-392, 2006.
- [14] N. Khaleche, « Rupture par arborescence électrique du PVC vieilli thermiquement », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 1993.
- [15] J.Verdu, ed. « vieillissement des plastiques ». AFNOR technique, ed. A.F.d. Normalisation. 1984, eyrolles: Paris.

Bibliographie

- [16] S.B. Dalal, R.S. Gorur, « Aging of distribution cables in service and its simulation in the laboratory », IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, N°1, pp. 139-146, February 2005.
- [17] L.Boukezzi, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, juin 2007.
- [18] R.J.Densley, R.Bartnikas, B. Bernstein, « Multi-stress ageing of extruded insulation systems for transmission cables » IEEE, Electrical Insulation Magazine, Vol. 9, N°1, pp. 15-17, January/February 1993.
- [19] D.Bouguedad, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène propylène diène monomère », Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2010.
- [20] J.Verdu, « Vieillissement chimique », Techniques de l'Ingénieur, Publication A3151, 1980.
- [21] J.Verdu, « Vieillissement des plastiques », AFNOR Technique, Edition Eyroles, Paris 1984.
- [22] IEC 502, « Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV up to 30 kV », 2nd edition, 2004.
- [23] C.E.I. 216, « Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials, Part 1 », 1990.
- [24] C.E.I 611, « Guide for the preparation of test procedures for evaluating the thermal endurance of electrical insulation systems », Edition 1978.
- [25] IEC 60811.1.1, « Common test methods for insulating and sheathing materials of electric cables and optical cables- Part1-1: Methodes for general application –Measurement of thickness and overall dimensions – Tests for determining the mechanical proprieties », 1993.
- [26] E. Arkis D. Balkose, « Thermal stabilisation of poly(vinyl chloride) by organotin compounds » , Polymer Degradation and Stability, vol. 88, Issue 1, April 2005, pp.46-51.
- [27] K.Dinesh, S.Ashwin, V.Harish, E.VarathKanth, C.Venkateshaiah, R. Sarathi, «Understanding the surface condition of Insulation Material Using Wavelets », CBIP – International Conference in Maintenance Technologies of EHV Transmission Lines, New Delhi, India, April 2002.
- [28] R. Sarathi, S. Chandrasekar, « Diagnostic study of the surface condition of the insulation structure using wavelet transform and neural networks », Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 68, pp. 137-147, 2004.
- [29] D.Broomhead, G.King, « Extracting qualitative dynamics from experimental data », Physica D, 1986, pp. 209-217.