

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 polyéthylène réticulé chimiquement
PRC sous vieillissement thermique. Utilisation de méthode de
diagnostique

Présenté par
Mahdi Samir HELIS

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

Membres du Jury

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

Dédicace

A mon très cher père, dont le sacrifice, la patience, le soutien, l'encouragement et les prières sont l'essence de ma réussite.

A la mémoire de ma très chère mère

A mes chers frères et sœurs : Maria, Bilel, Sara, Sami.

A toute ma famille

A tous mes amis

Une spéciale dédicace à la promo Electrotechnique 2016

A tous ceux qui ont su croire en moi

A tous ceux qui me sont chers

Je vous dédie ce modeste travail

Mahdi

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 A. Boubakeur pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Je tiens à remercier Monsieur M. Tegar, 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 البولي إيثيلين المعرق كيميائياً. تم تنفيذ التسخين الحراري في درجتين حراريتين 80 و 120 درجة مئوية لمدة 2016 ساعة (84 يوماً). ولهذا الغرض أجرينا سلسلة من التجارب بمختبر التوتر العالي بالمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات تضمنت تسجيل إشارة تيار التسرب و التوتر المطبق وذلك من أجل إجراء عملية معالجة الإشارة لغرض تحديد خصائص عن حالة العازل. تم تحليل تيار التسرب باستخدام ثلاثة طرق، أولاً باستخدام التقنية، ثانياً باستخدام تقنية تحليل المويجات استعمال، ثالثاً، طبقت تقنية مخطط التراجع DWT.

الكلمات المفتاحية: التسخين الحراري البولي إيثيلين المعرق كيميائياً، تيار التسرب، التحليل FFT، تقنيات المويجات DWT مخطط التراجع.

Abstract

This work is devoted to the study of thermal aging effects on the properties of Cross-Linked Polyethylene (XLPE). 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 status 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 are interested in the technique of RP on the details of the leakage current signal.

Key words: Thermal aging, Cross-Linked Polyethylene (XLPE), leakage current, Fast Fourier Transform (FFT), Discrete Wavelet Transform (DWT), recurrent plot.

Résumé

Ce travail est consacré à l'étude de l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC). 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 ondelette discrète DWT. Enfin, nous nous sommes intéressés à la fin à appliquer la technique de RP sur les détails du signal du courant de fuite.

Mots clés: Vieillissement thermique, polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), courant de fuite, FFT, transformée en ondelettes discrète, diagramme de récurrence.

Liste des figures

1.1	Représentation schématique des quatre types de polarisation	15
1.2	Diagramme de Fresnel d'un condensateur présentant des pertes	15
2.1	Dispositif expérimental	21
2.2	Un échantillon de PRC avant vieillissement	22
2.3	Cellule d'essai	24
3.1	Changement de couleur du PRC au cours du vieillissement 80°C	26
3.2	Changement de couleur du PRC au cours du vieillissement pour 120°C	27
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	28
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.	29
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	30
3.6	(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	31
3.7	(a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l'échantillon vieilli pendant 2016 heures sous 120°C, (b) spectre de fréquence du courant	32
3.8	Valeurs efficaces du courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement pour une tension appliquée de 12 kVeff	33
3.9	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
3.10	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	34
3.11	Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour la température de vieillissement de 80°C	37
3.12	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	37

3.13	Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour la température de vieillissement de 120°C.....	38
3.14	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.....	38
3.15	Diagramme de récurrence appliqué au signal du courant de fuite (a) : avant vieillissement – (b) : vieillis sous 120°C pendant 2016 heures	39
3.16	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 1008 heures – (e) vieilli à 120°C 2016 heures	40
3.17	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 1008 heures – (e) vieilli à 120°C 2016 heures	41
3.18	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 1008 heures – (e) vieilli à 120°C 2016 heures	41

Sommaire

Introduction générale	9
Chapitre 1 : 1.Présentation générale des matériaux polymères	
1.1 Introduction	13
1.2 Définition	13
1.3 Classification des polymères	13
1.4 Utilisation des polymères.....	14
1.5 Phénomène de polarisation	15
1.5.1 Type de polarisation	15
1.5.3 Comportement diélectrique des polymères	15
1.6 Polyéthylène réticulé chimiquement PRC.....	16
1.6.1 Polyéthylène PE	16
1.6.2 Polyéthylène réticulé chimiquement PRC.....	17
1.6.3 Propriété du PRC	17
1.7 Vieillessement des polymères	18
1.7.1 Différents mécanismes du vieillissement thermique	18
1.7.1.1 Vieillessement physique	17
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	22
2.4 Cellule d'essai	23
Chapitre 3 : 3.Résultats et discussions	
3.1 Introduction	24
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 ladurée de vieillissement	32

3.3.2 Déphasage entre le fondamental du courant de fuite et de la tension appliquée	33
3.3.3 Taux de distorsion (THD).....	33
3.4 Diagnostique de l'état de dégradation du matériau par l'approche (DWT-STD-MRA)....	34
3.4.1 Ondelette Mère	34
3.4.2 Niveau de décomposition	34
3.4.3 Application de l'approche (DWT-STD-MRA).....	35
3.5 Diagnostique de l'état de dégradation du matériau par la technique RP.....	38
3.5.1 Choix des paramètres m , τ et ε	38
3.5.2 La technique RP appliquée directement au signal du courant de fuite	38
3.5.3 La technique RP appliquée aux détails du signal du courant de fuite	39
3.5.3.1 Évolution du détail D3	39
3.5.3.2 Évolution du détail D10	40
3.5.3.3 Évolution du détail D11	41
3.6 Conclusion	42
Conclusion générale	43
Références bibliographiques	45

Introduction générale

Parmi les problèmes les plus récurrents dans le domaine du génie électrique, le problème d'isolation. En effet, l'isolation est un enjeu majeur pour assurer une fiabilité et une sécurité d'utilisation, et en particulier dans l'isolation des câbles MT souterrains. Comme dans d'autres domaines (le bâtiment, l'automobile, l'isolation thermique ...etc), on s'est orienté vers l'utilisation de matières organiques tels que les polymères à cause entre autres des avantages qu'ils offrent sur le plan technique et économique. Parmi les polymères utilisés dans l'industrie du câble de transport de l'énergie électrique, le Polyéthylène et le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), qui sont aujourd'hui intensivement utilisés comme isolant des câbles souterrains, grâce notamment à leur bonne propriété diélectrique.

Même si le PRC présente beaucoup d'avantages dans le domaine de l'isolation, cependant il présente un inconvénient majeur au cours de son utilisation. En effet, à cause des différentes contraintes (mécanique, électrique et thermique) auxquelles il est soumis durant toute sa durée de vie, ce dernier a tendance à voir ces propriétés électriques et mécaniques se dégrader par le phénomène du mécanisme de vieillissement. L'étude du mécanisme de vieillissement du polyéthylène réticulé chimiquement PRC et son influence sur les propriétés de ces derniers est très importante, et a déjà fait l'objet de nombreux travaux de recherche comme [1, 2, 3]. Ces travaux nous permettent de déterminer l'effet de la dégradation des propriétés électriques et mécaniques sur le comportement à long terme du matériau. 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 de PRC 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. L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés diélectriques du PRC 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 décrirons le comportement diélectrique de ces polymères. La dernière partie quant à elle, sera consacrée au phénomène de vieillissement des polymères.

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 Reccurrent 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 [4].

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 [5].

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 [5]:



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

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 structure ramifiée 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 [5]
- 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 deréticulation 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 [5], 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 [5].

1.5 Phénomènes de polarisation dans les matériaux polymères

1.5.1 Type de polarisation

Il existe quatre types de polarisation : 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 [6].

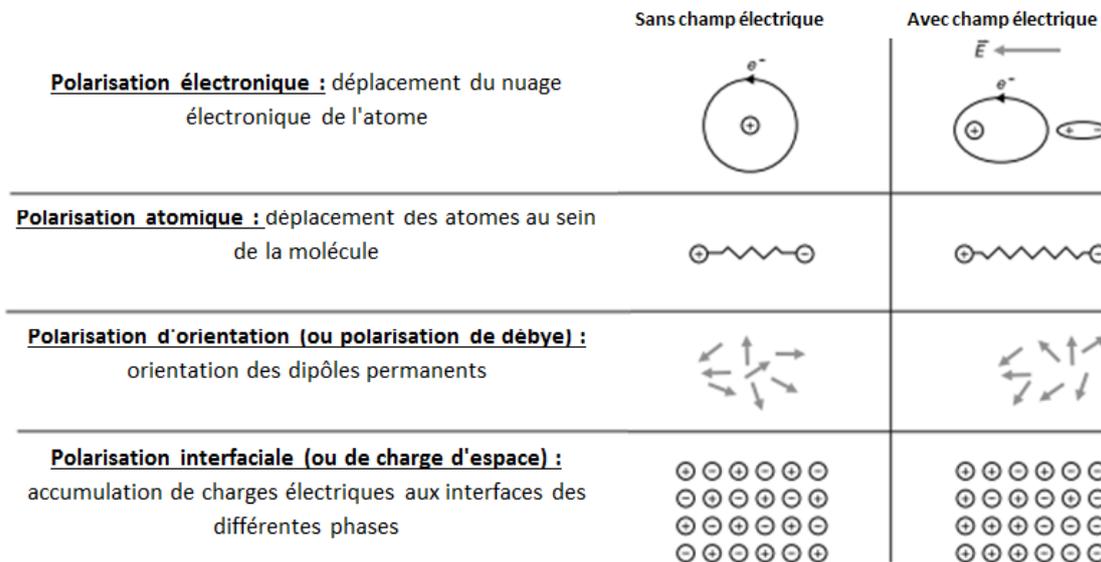


Figure 1.1: Représentation schématique des quatre types de polarisation [7].

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 [6]. Elle dépend de la structure et des propriétés moléculaires du matériau diélectrique [8].

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 :

$$\bar{I} = \bar{I}_C + \bar{I}_P \quad (1.13)$$

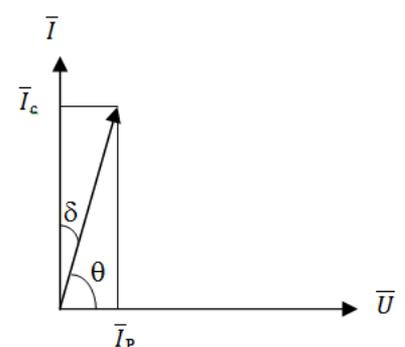


Figure 1.2 : Diagramme de Fresnel d'un condensateur présentant des pertes

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** [6].

1.6 Polyéthylène réticulé chimiquement PRC

1.6.1 Polyéthylène PE

Le PE est très largement utilisé comme matériau d'isolation à cause de ses propriétés diélectriques combinées à son faible cout, sa facilité de mise en œuvre et sa bonne

résistance aux agressions chimiques. Le PE est une polyoléfine (un polymère saturé issu de la polymérisation d'un alcène) linéaire issue de la polymérisation radicalaire de l'éthylène. Sa structure chimique est :



Partiellement cristallin, le polyéthylène contient deux phases [9,10]:

- Une zone amorphe dans laquelle les chaînes sont disposées de manière désordonnée.
- Une zone cristalline dans laquelle les chaînes sont disposées de manière ordonnée formant ainsi des cristallites.

1.6.2 Polyéthylène réticulé chimiquement PRC :

Afin d'améliorer les propriétés thermiques et mécaniques du polyéthylène, on procède à une opération dite de réticulation. Elle consiste à lier les chaînes de molécule par des liaisons radiales et à les transformer en un réseau tridimensionnel qui permet d'éviter le glissement de toutes les chaînes moléculaires les unes par rapport aux autres [11,12] Le Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC) est obtenu par la réticulation du Polyéthylène basse densité (PEbd), qui résulte à son tour, de la polymérisation du gaz éthylène C_2H_4 suivant un procédé à haute pression [2].

Il existe 3 méthodes de réticulation pour le polyéthylène :

- a- Réticulation par irradiation
- b- Réticulation au Silane
- c- Réticulation avec le peroxyde

1.6.3 Propriété du PRC

Les propriétés électriques du PRC ne sont pas très différentes de celle du PEBD. Il semblerait même qu'un PRC résiste mieux à la propagation des arborescences électriques qu'un PE, ces arborescences étant des chemins de PE calciné qui se forment au sein de l'isolant sous l'effet d'un champ électrique. Elles sont, en général, initiées par une impureté, une fissure, une bulle, ou une aspérité à l'intérieur de l'isolant [11].

1.6.3.1 Propriétés physico-chimiques

- Masse volumique: 0.915 à 0.935g/cm³.
- Taux de cristallinité : 55 à 70 %.
- Température de transition vitreuse : Environ -110 °C.
- Température de fusion : 120 à 135 °C.
- Température maximale de service : 90 °C.

1.6.3.2 Propriétés électriques

- Permittivité ϵ_r (50-60Hz/1kHz/1MHz) : 2.4 à 2.6.

- Tangente de l'angle de pertes $\tan\delta$: 10^{-3} à $5 \cdot 10^{-3}$.
- Résistivité : $> 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$.
- Rigidité diélectrique : 20 à 30 kV/mm

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 [13]. 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 [11,14]. 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,...) [15,16,17].

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 [15,18]. Ces phénomènes peuvent affecter la structure chimique du polymère, ou dans certains cas, concerner seulement les additifs (problèmes d'incompatibilité d'adjuvants) [9].

1.7.1.1 Vieillessement 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 [5]. 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 [11].

1.7.1.2 Vieillessement chimique

Nous désignons par vieillissement chimique tout processus impliquant une modification de la structure chimique du polymère ou de ses adjuvants [19]. En pratique, le vieillissement chimique se superpose souvent à un vieillissement physique et les deux phénomènes interfèrent [20]. 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 dans la figure 2.1 :

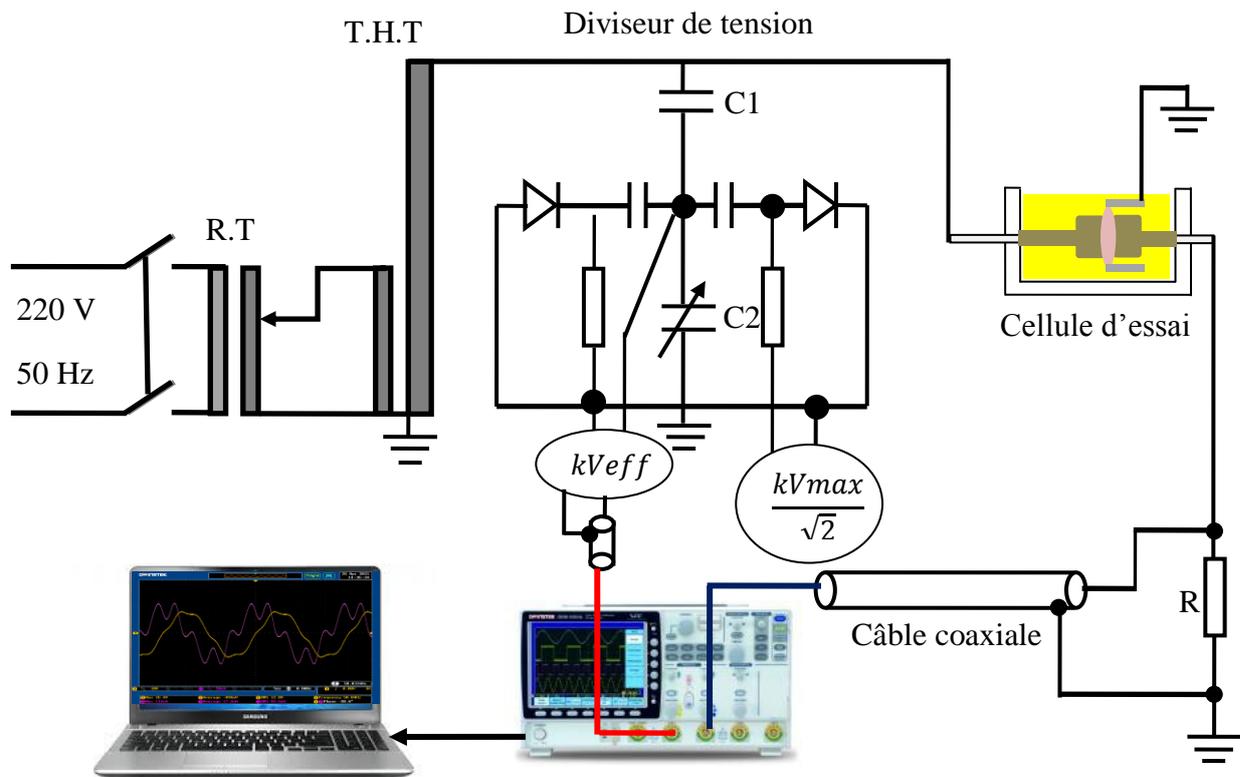


Figure 2.1 : Dispositif expérimental.

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

Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) est utilisé par la firme algérienne : Entreprise Nationale des Industries des Câbles de Biskra (ENICAB) comme isolant dans la fabrication des câbles de transport d'énergie électrique en moyenne tension. Des plaques carrées de (PRC) sont fournis par l'ENICAB. Les plaques obtenues sont ensuite découpées en des échantillons de forme circulaire d'une épaisseur nominale de 2 mm et leur diamètre est de 46 mm. Un exemple d'échantillon est montré sur la Figure 2.2 :



Figure 2.2 : Un échantillon de PRC avant vieillissement.

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 [21,22]. 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 [23] pour enlever l'humidité.

Les échantillons ont été montés dans une cellule d'essai 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 (en fonction du profil classique de Rogowski) pour éviter des décharges associées aux effets de bord. Un anneau de garde faite d'aluminium a été utilisé pour empêcher qu'une partie du courant contourne l'échantillon de polymère en circulant à travers l'huile, et fournit des mesures seulement sur le courant transversal. Par conséquent, toutes les lignes de champ électrique écoulent uniquement à travers le volume d'échantillon.

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

La cellule d'essai est représentée sur la Figure 2.3 :

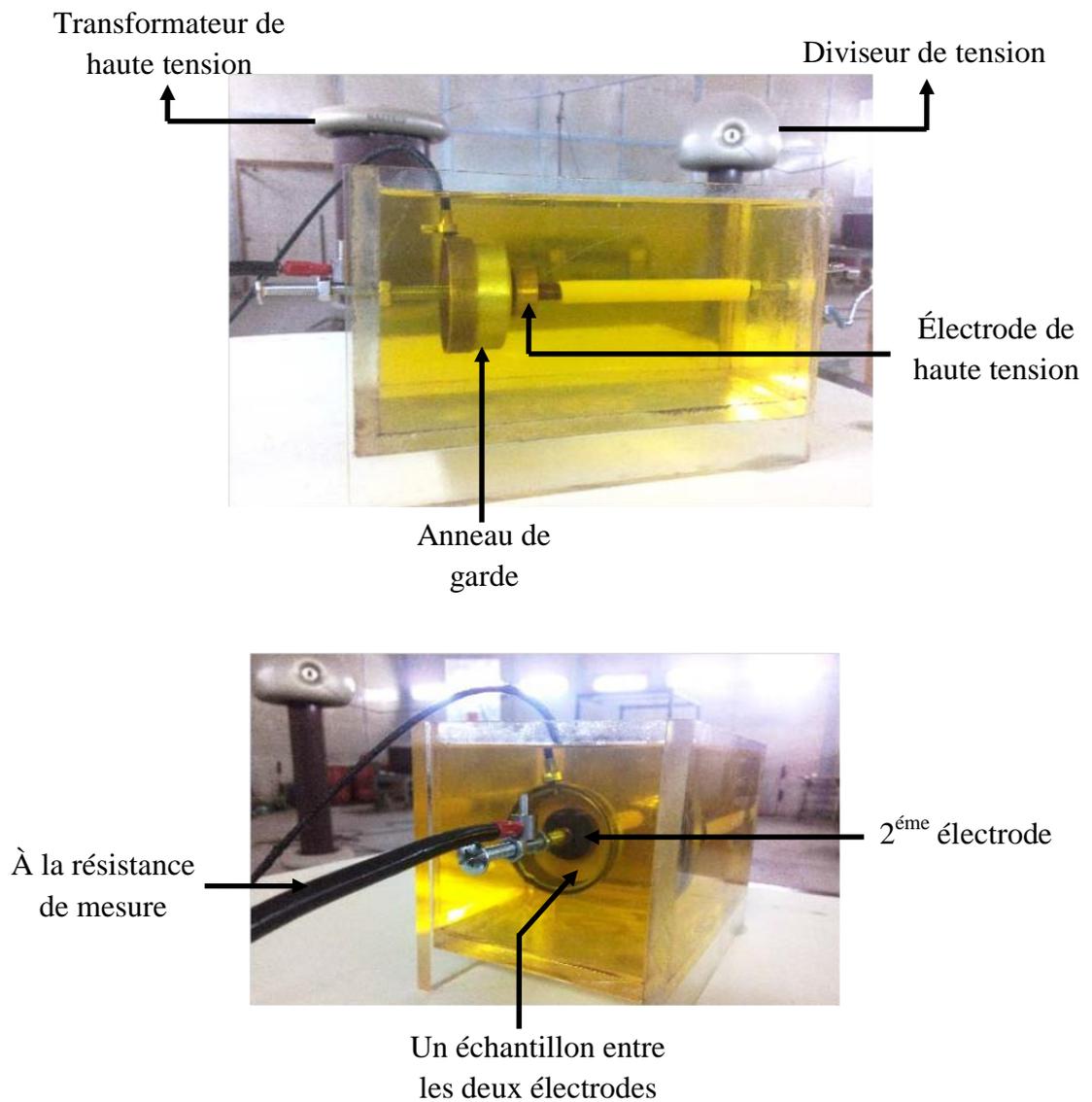


Figure 2.3: Cellule d'essai.

Chapitre 4 : résultats et discussions

Introduction

Le présent chapitre sera consacré à l'analyse des résultats expérimentaux portant sur l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés des matériaux polymères, notamment le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) 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.

3.1 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.

Nous avons représenté aux figures 3.1 et 3.2 des photographies montrant le changement de couleur apparu au cours du vieillissement pour les différentes températures. Pour la température 80°C, nous n'avons remarqué presque aucun changement de couleur. En revanche pour la température 120°C, un changement significatif est observé.

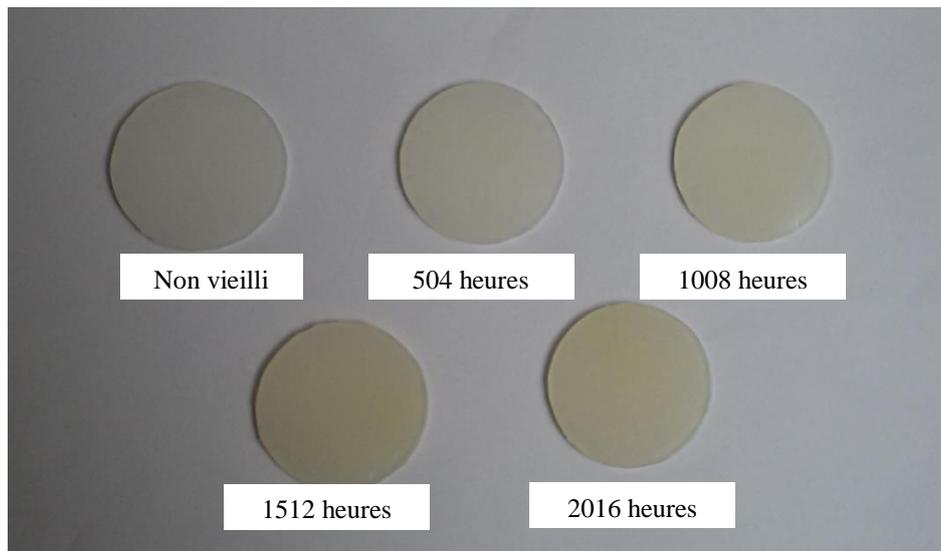


Figure 3.1: Changement de couleur du PRC au cours du vieillissement pour 80°C.

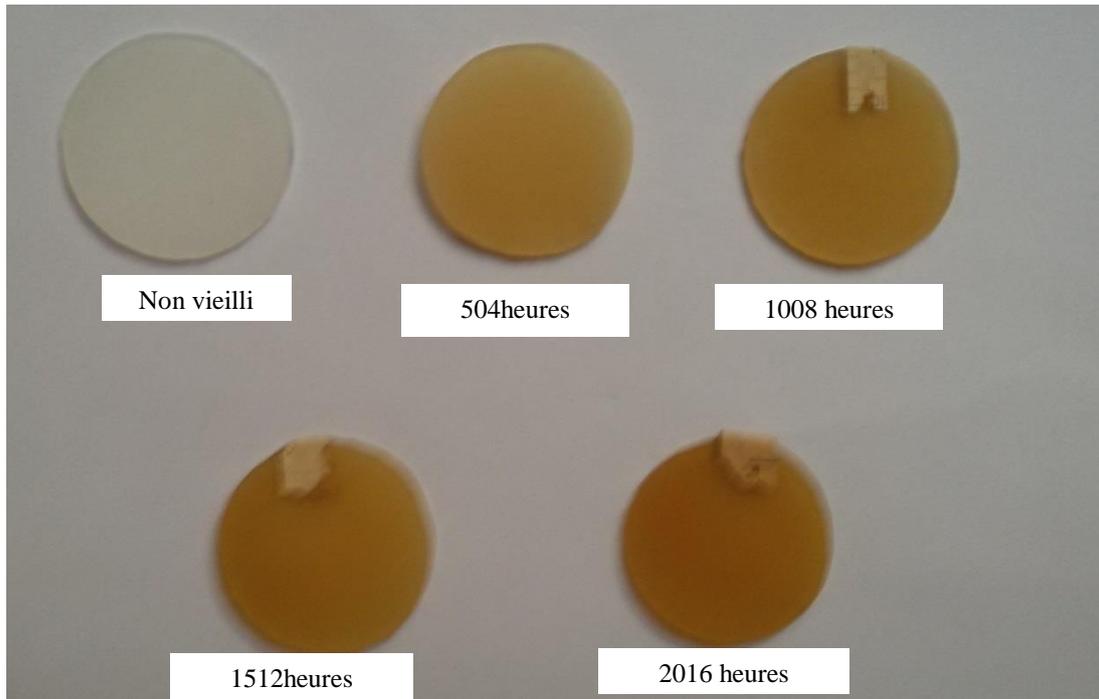


Figure 3.2: Changement de couleur du PRC au cours du vieillissement pour 120°C.

3.2 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 écrit sous 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 du polymère avant, après vieillissement à 80°C (1008h et 2016h), et à 120°C (1008h et 2016). La tension appliquée est 12 kV_{eff}.

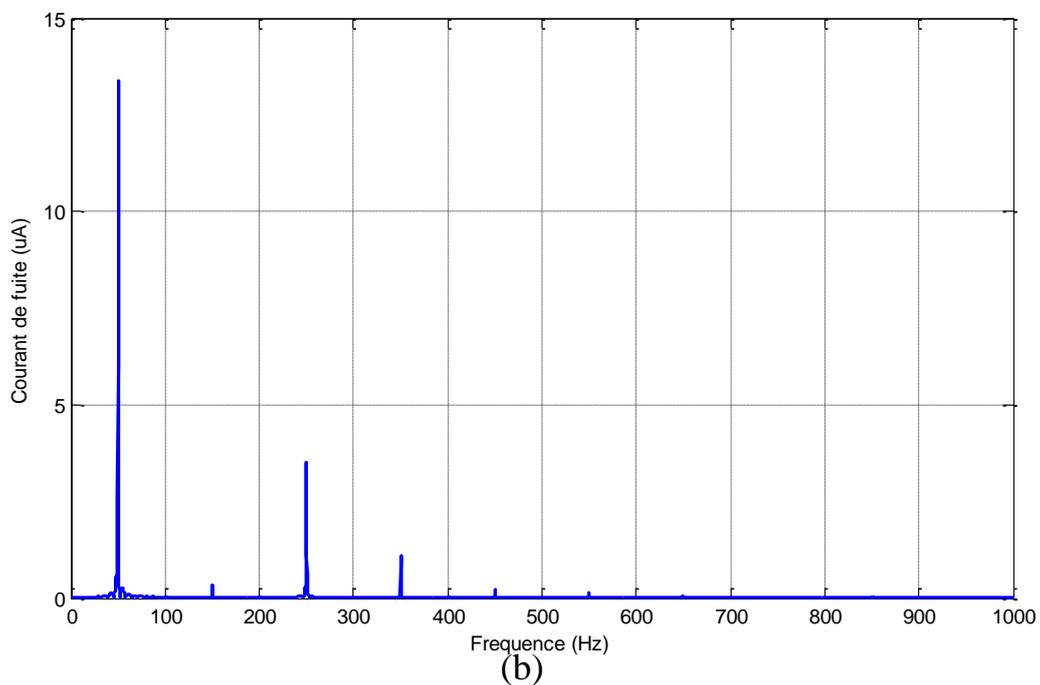
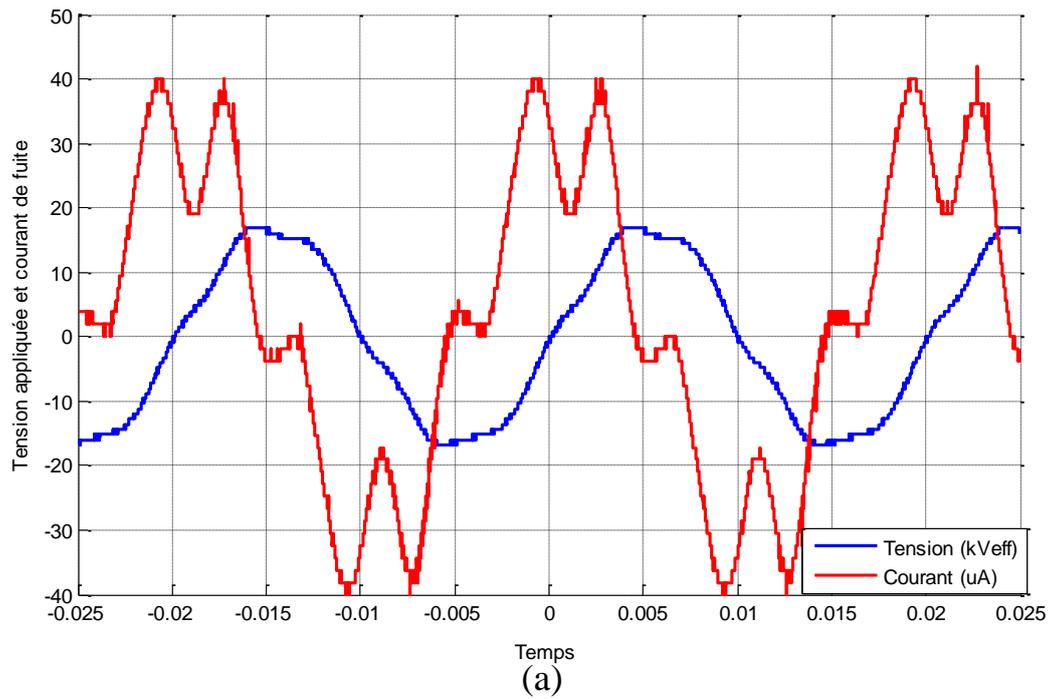


Figure 3.3: (a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite dans l'échantillon non vieilli, (b) spectre de fréquence du courant.

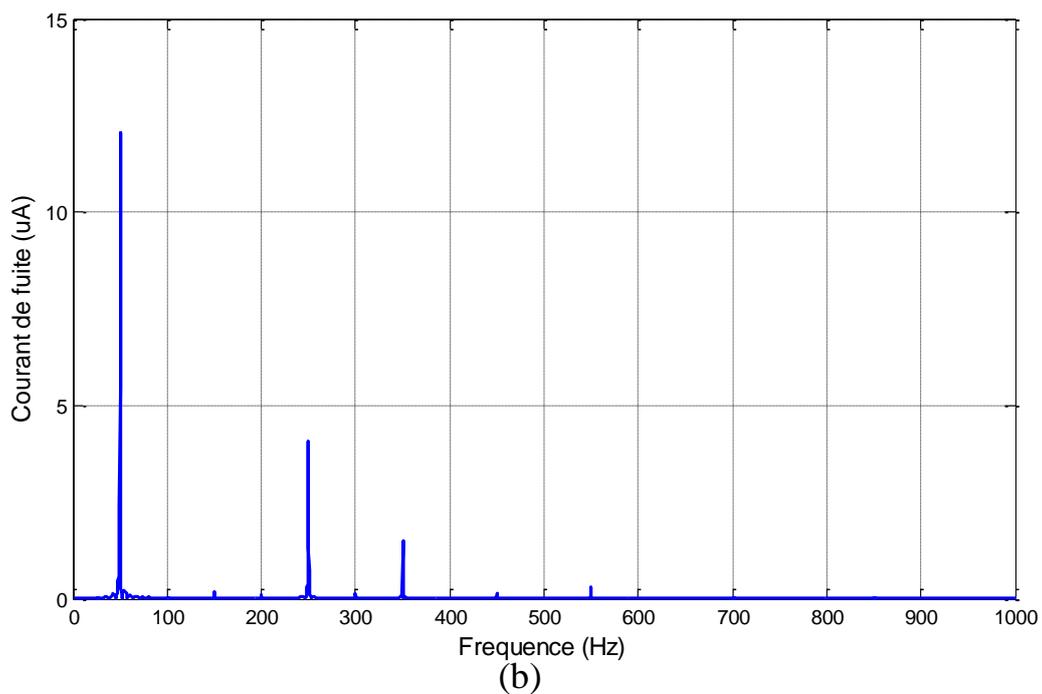
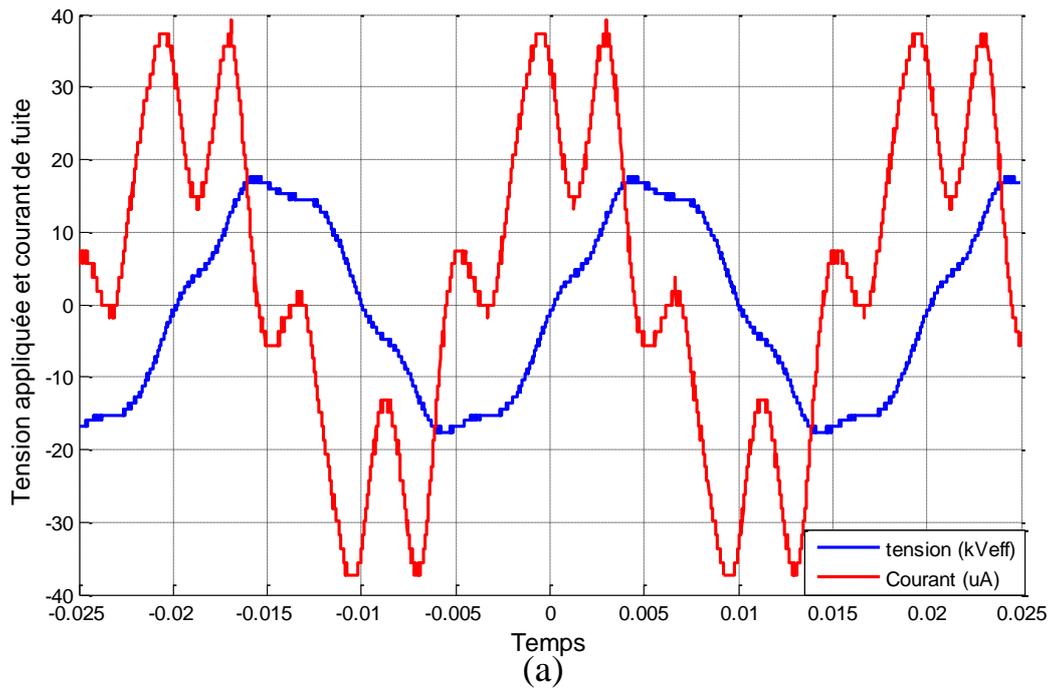


Figure 3.4 : (a) formes d’ondes de la tension appliquée et du courant de fuite dans l’échantillon vieilli pendant 1008 heures sous 80°C, (b) spectre de fréquence du courant.

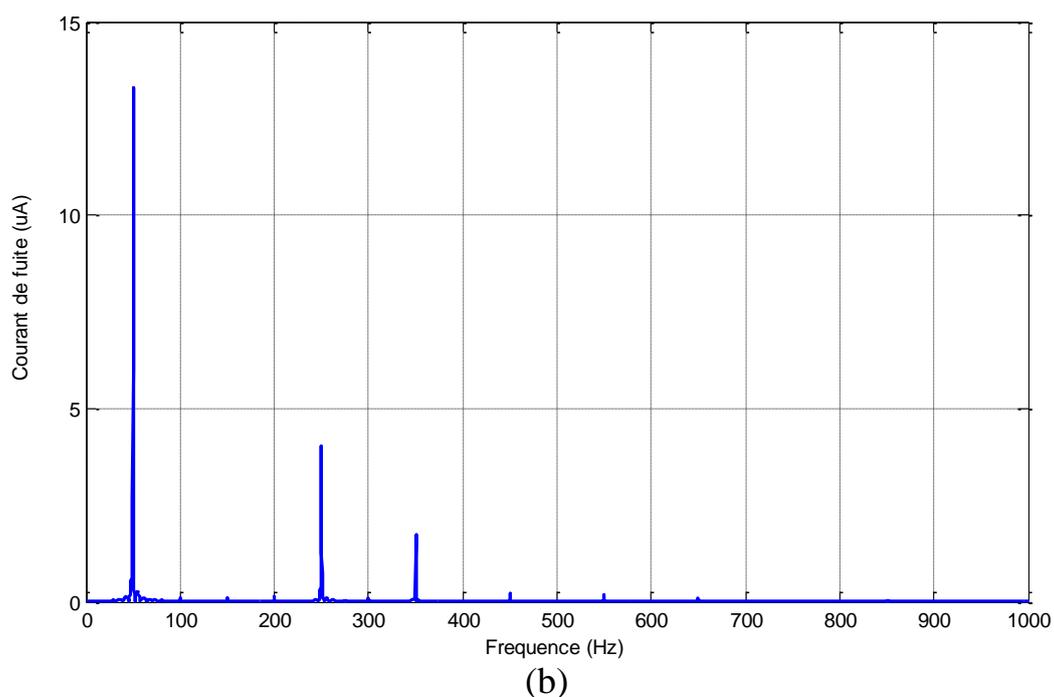
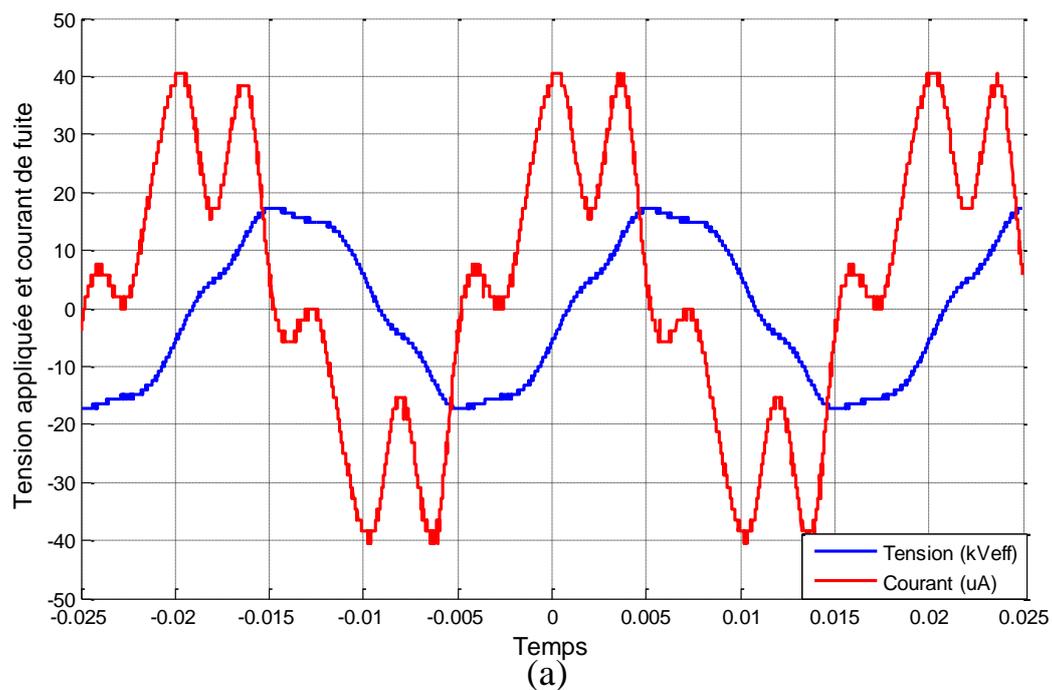


Figure 3.5 : (a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite dans l'échantillon vieilli pendant 2016 heures sous 80°C, (b) spectre de fréquence du courant.

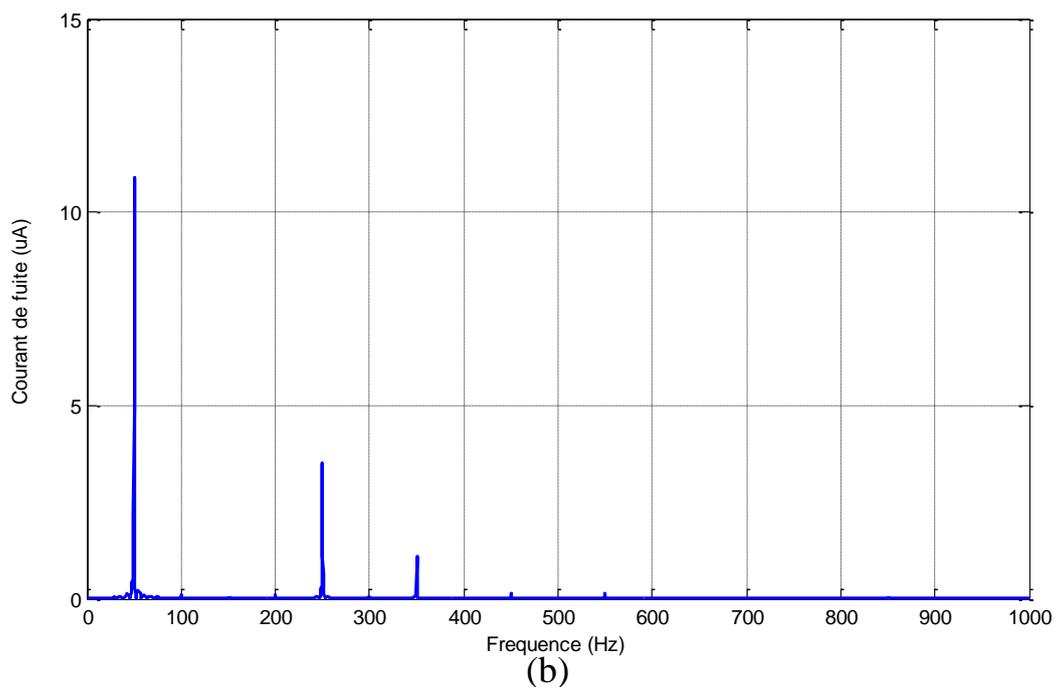
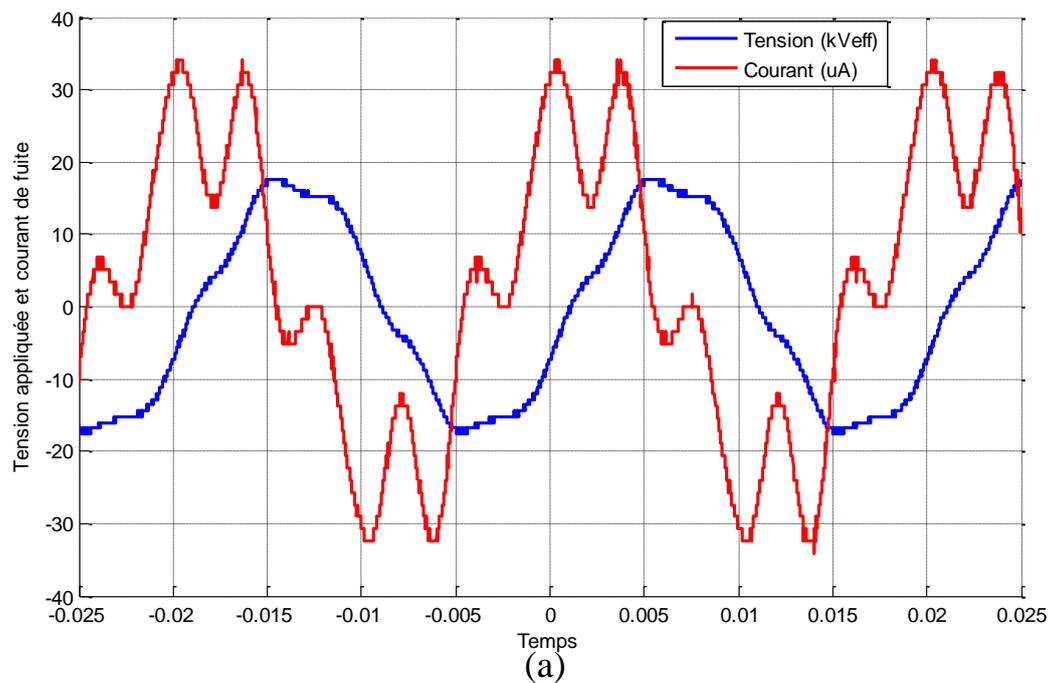


Figure 3.6: (a) formes d’ondes de la tension appliquée et du courant de fuite dans l’échantillon vieilli pendant 1008 heures sous 120°C, (b) spectre de fréquence du courant.

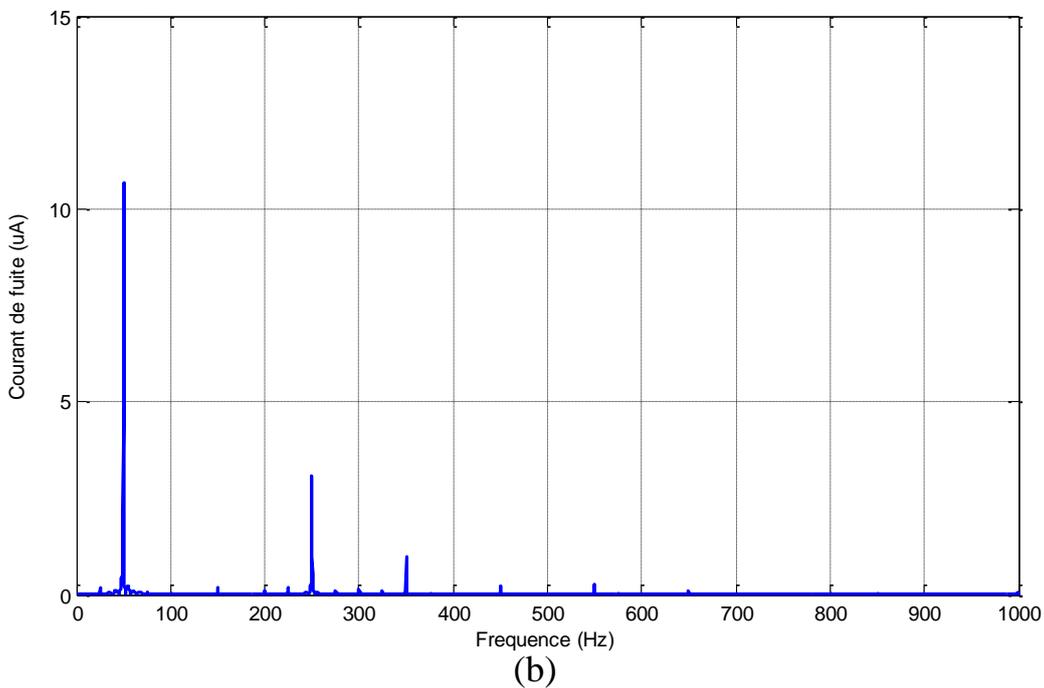
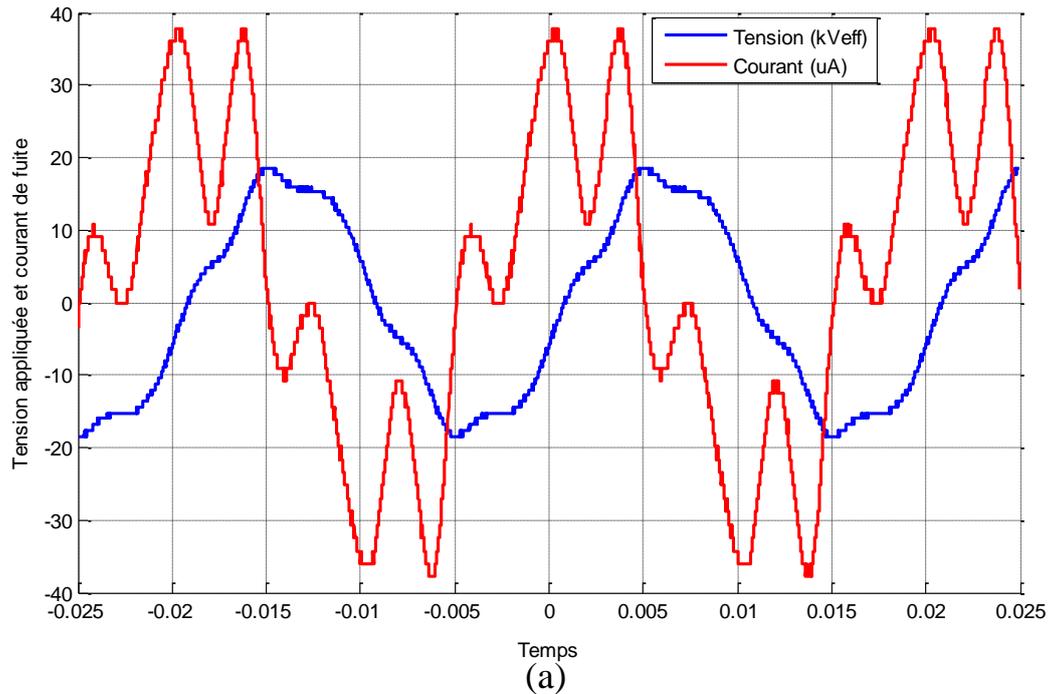


Figure 3.7 : (a) formes d’ondes de la tension appliquée et du courant de fuite dans l’échantillon vieilli pendant 2016 heures sous 120°C, (b) spectre de fréquence du courant.

Les figures montrent que les formes d'onde de courant sont symétriques entre les demi-cycles positifs et négatifs dans tous les cas présentés. Nous constatons dans le signal du courant de fuite dans l'échantillon non vieilli des pics qui pourraient être des décharges partielles. Ces pics diminuent avec le vieillissement et disparaissent totalement après une

durée de 2016 heures et ceci peut être interprété par la perte d'humidité. LePRC ne présente pas un changement significatif de la forme du courant de fuite quel que soit la durée de vieillissement.

Selon le tracé du spectre de fréquence du courant, les signaux de courant de PRC contiennent essentiellement les 5^e et 7^e harmoniques pour les deux cas d'échantillons vieillis et non vieillis. Par contre, les 3^e, 9^e et 11^e harmoniques sont présentes mais avec une très faible amplitude.

Pour le vieillissement à 80°C, on remarque que le fondamental du courant diminue légèrement par rapport à l'échantillon non vieilli, cependant l'amplitude des harmoniques augmentent légèrement. Pour le vieillissement à 120°C, le même changement est observé mais de façon plus importante.

3.2.1 Courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement

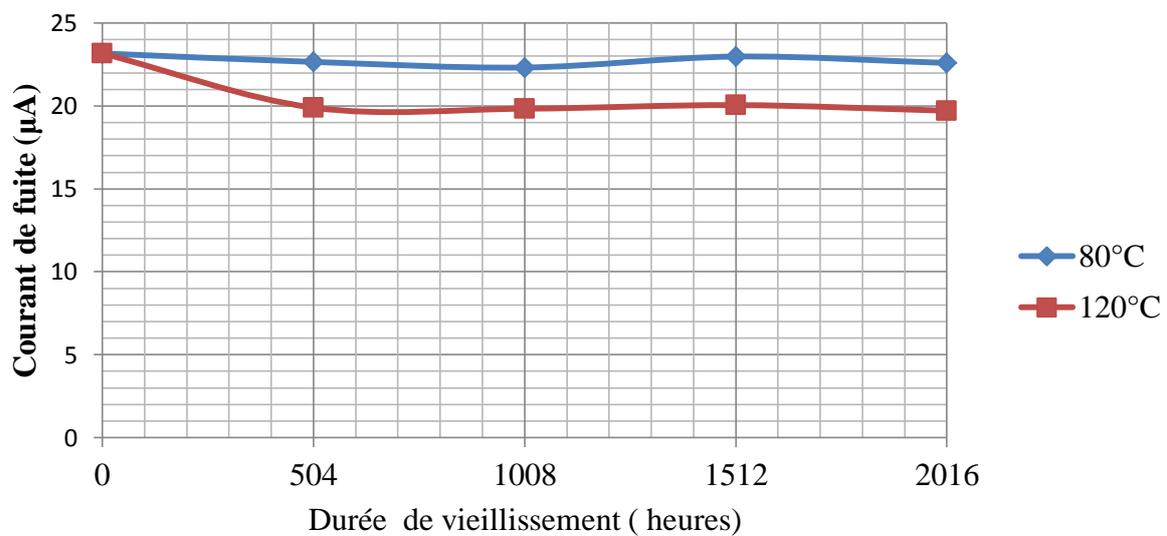


Figure 3.8: Valeur efficace du courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement pour une tension appliquée de 12 kVeff.

La figure ci-dessus montre l'évolution du courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement pour les échantillons de PRC. Le vieillissement à 80°C, n'affecte que très peu l'amplitude du courant de fuite de sorte qu'on remarque qu'une très légère diminution durant les premières phases de vieillissement puis une augmentation toute aussi légère. Donc le courant de fuite dans le matériau en PRC n'est presque pas affecté par le vieillissement à 80°C.

Par contre, pour le vieillissement à 120°C, nous constatons que le courant de fuite présente des valeurs inférieures d'environ 15% par rapport à celles obtenues avant vieillissement. Cette diminution de l'amplitude du courant de fuite apparaît dès les premières phases de vieillissement, mais sans évoluer par la suite. Cette amélioration des propriétés diélectriques du PRC serait due au phénomène de réticulation qui se traduit par une augmentation du taux de cristallinité favorisant la conduction dans ce dernier.

3.2.2 Déphasage entre le fondamental du courant de fuite et de la tension appliquée

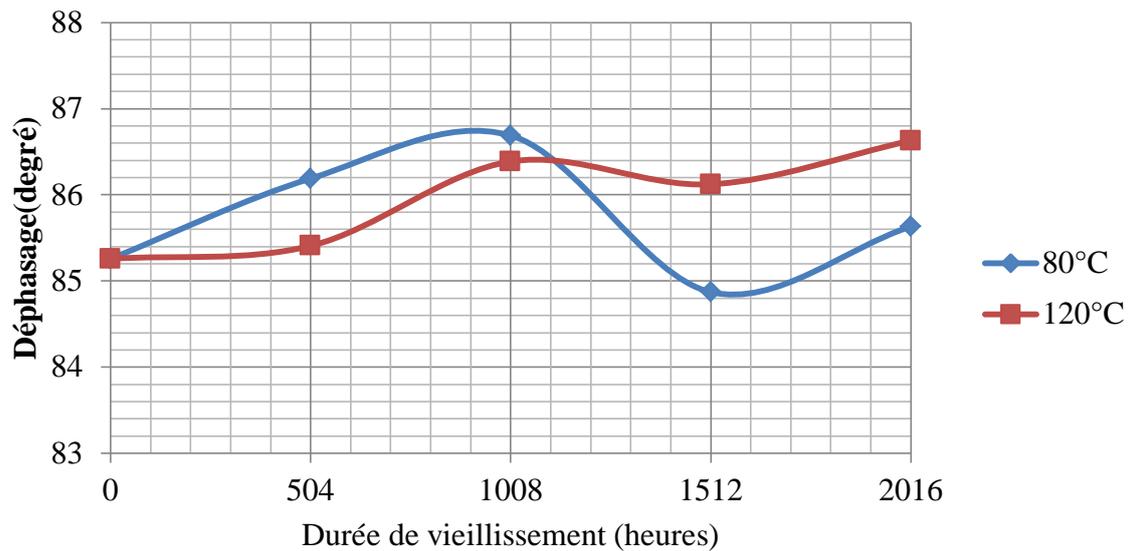


Figure 3.9: le déphasage entre le fondamental de la tension appliquée (12 kV) et du courant en fonction de la durée de vieillissement (à 80°C et 120°C).

La figure ci-dessus qui donne le déphasage entre le fondamental de la tension appliquée et du courant de fuite, montre que le déphasage ne change pas beaucoup après vieillissement. Pour le cas du vieillissement à 80°C, nous constatons une légère augmentation du déphasage, à cause certainement de la perte d'humidité, entraînant une diminution de la composante résistive du courant de fuite. Avec une légère diminution du déphasage après 1008 heures, soit le début de la dégradation du matériau. Pour le cas du vieillissement à 120°C, le déphasage augmente très légèrement avec le vieillissement. En effet, la variation du déphasage ne dépasse pas 2°, ce qui n'affecte pas les propriétés diélectriques du matériau.

3.2.3 Taux de distorsion en fonction de la durée de vieillissement

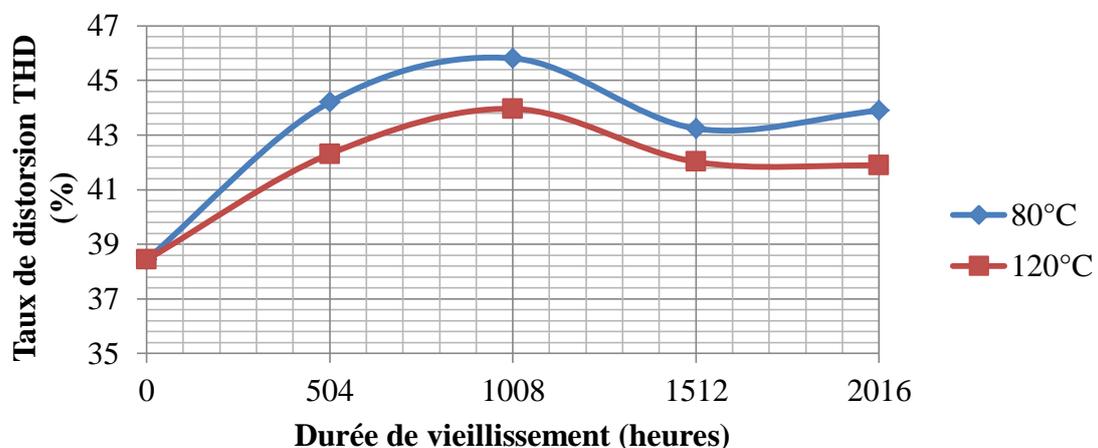


Figure 3.10: Le taux de distorsion THD (%) en fonction de la durée de vieillissement (à 80°C et 120°C) pour une tension appliquée de 12 kV.

La figure qui montre l'évolution du taux de distorsion en fonction de la durée de vieillissement montre la même évolution pour les deux températures de vieillissements (80°C et à 120°C). Nous notons une augmentation du THD dans la première moitié du vieillissement (de 0 à 1008 heures), due à l'augmentation de l'amplitude des 5^e et 7^e harmoniques et la diminution du fondamental du courant. Dans la deuxième partie du vieillissement (de 1008 à 2016 heures), le taux de distorsion diminue. Dans le cas du vieillissement à 80°C, l'évolution du taux de distorsion est plus importante que dans le cas du vieillissement à 120°C.

3.3 Diagnostic de l'état de dégradation du matériau par l'approche (DWT-STD-MRA)

Dans cette section, nous appliquons la méthode DWT-STD-MRA (discretewavelettransform-standard deviation–multi resolutionanalysis) 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 PRC.

3.3.1 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 [24], 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.

3.3.2 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 laDWT	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 PRC.

3.3.3 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 [25].

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 4.28 représente la DWT STD-MRA correspondante aux signaux du courant de fuite obtenus pour des échantillons neufs et vieillis à 80°C pendant 1008, 1512 et 2016 heures. Cette représentation montre que les déviations standard (STD) des deux détails d9 et d11 sont confondues pour les échantillons vieillis et non vieillis, donc il n'y a pas de changement significatif du 3^e harmonique contenu dans le détail d11, ainsi que le 11^e harmonique contenu dans le détail d9. Par contre, le détail d10 augmente avec le vieillissement, ce détail contient les 5^e et 7^e harmoniques qui sont les plus dominants et ces derniers augmentent avec le vieillissement.

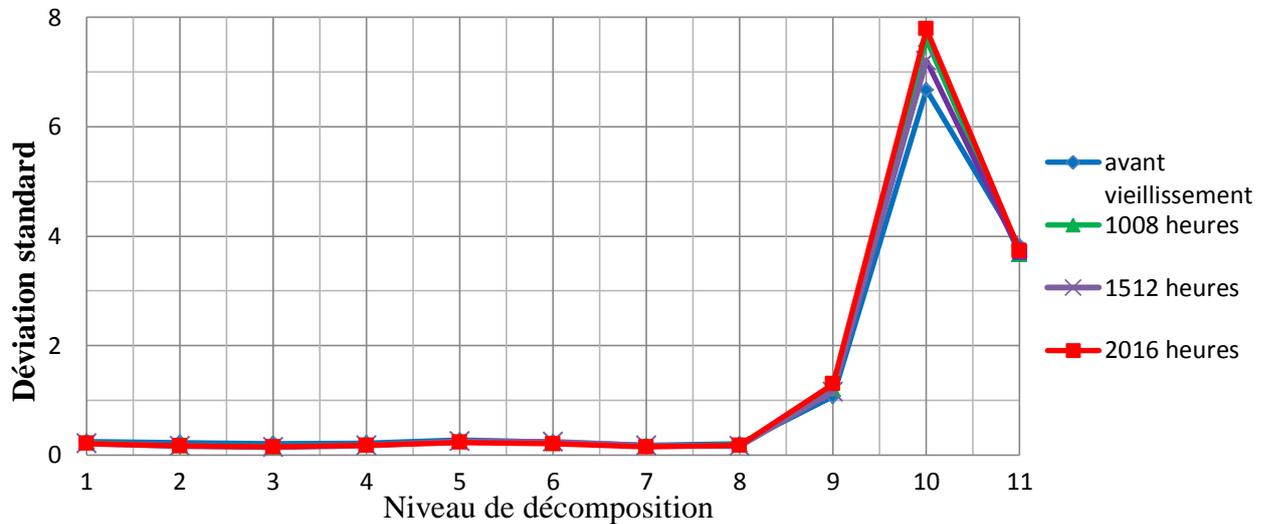


Figure 3.11 :Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour une température de vieillissement de 80°C.

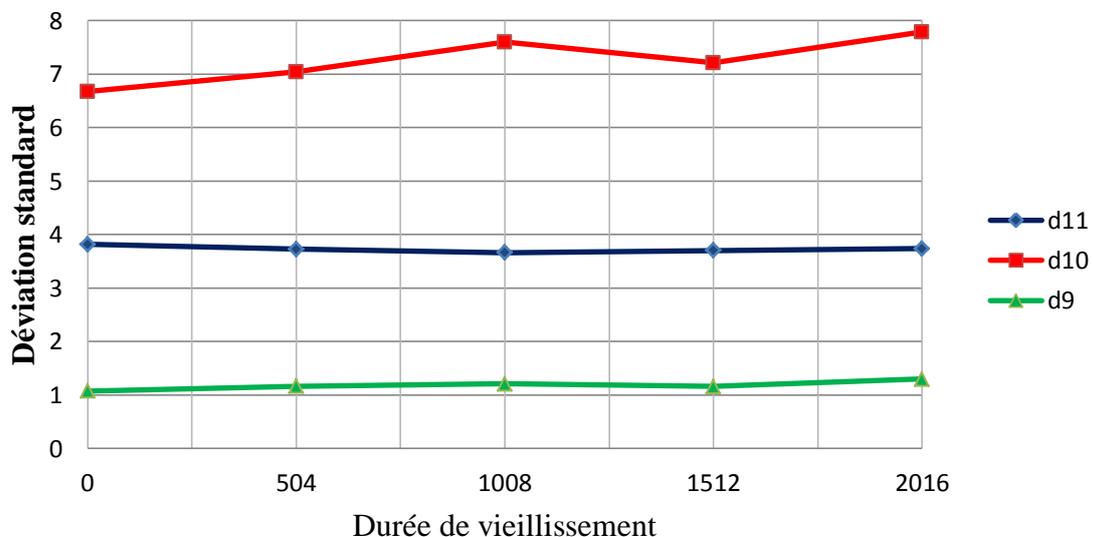


Figure 3.12 :la déviation standard des détails d9, d10 et d11 pour la température de vieillissement de 80°C en fonction de la durée de vieillissement.

La figure 3.13 représente la DWT STD-MRA correspondante aux signaux du courant de fuite obtenus pour des échantillons neufs et vieillis à 120°C pendant 504, 1512 et 2016 heures. D'après cette figure, nous remarquons que le détail d9 qui contient le 11^e harmonique ne change que très peu en fonction du vieillissement à 120°C. Par contre, le 3^e harmonique contenu dans le détail d11 diminue après un vieillissement supérieur à 1008 heure. Et le détail d10 qui contient les 5^e et 7^e harmoniques augmente dans la première moitié du vieillissement, et diminue dans la deuxième moitié.

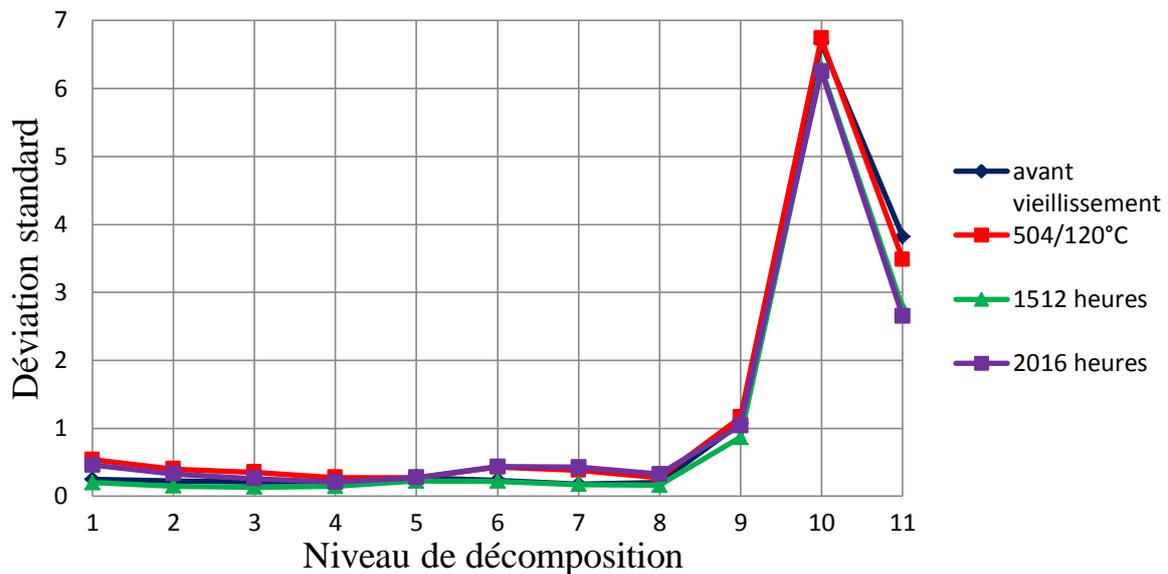


Figure 3.13 :Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour une température de vieillissement de 120°C.

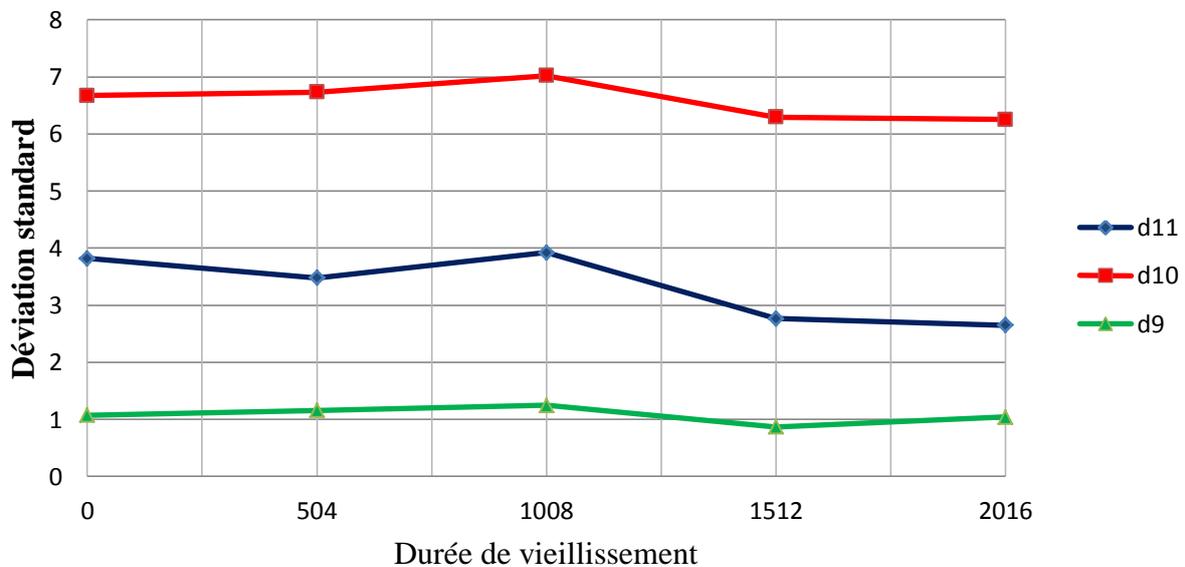


Figure 3.14: la déviation standard des détails d9, d10 et d11 pour une température de vieillissement de 120°C en fonction de la durée de vieillissement.

3.4 Diagnostic de l'état de dégradation du matériau par la technique ReccurentPlot (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.

3.4.1 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 [26]. Néanmoins, elles sont choisies, via la «C-C method», égales à 5 et 20 respectivement.

Le paramètre ε est crucial lors d'un diagramme de récurrence. Ainsi, une attention spéciale doit lui être accordée. Si la valeur de ε est trop grande, la plupart des points seront voisins d'autres points, ce qui produira un diagramme condensé, et donc des points non pertinents. D'autre part, si la valeur de ε choisie est trop petite, on peut perdre la plupart des points récurrents, et donc aucune information utile ne sera tirée. Par ailleurs, il n'existe pas de méthode standard pour choisir la valeur de ε . La plupart des chercheurs la choisissent comme étant égale à 0.25σ , σ représente la déviation standard du signal étudié [27].

3.4.2 La technique RP appliquée directement au signal du courant de fuite

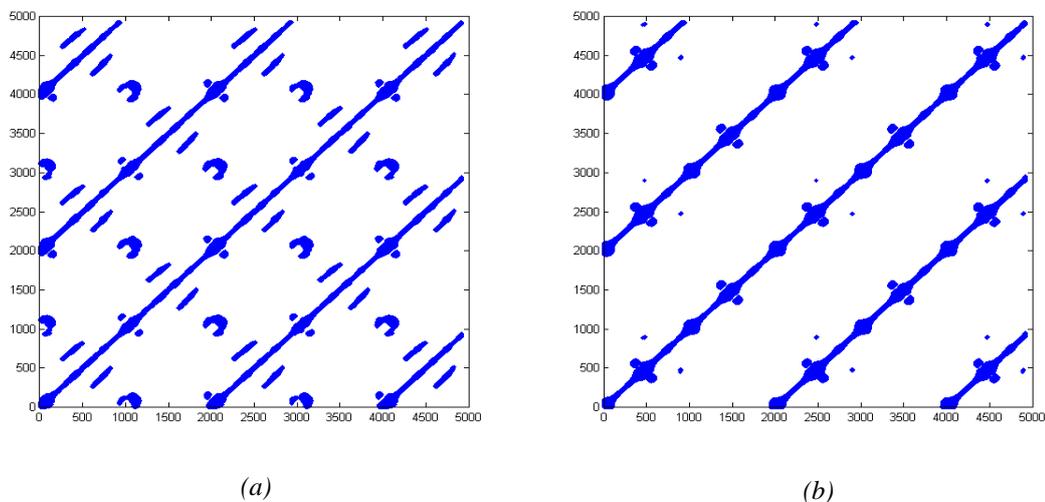


Figure 3.15 : diagramme de récurrence appliqué au signal du courant de fuite
 (a) : avant vieillissement –(b) : vieillis sous 120°C pendant 504 heures

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.

3.4.3 La 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. On extrait alors les différents détails correspondant aux différentes bandes de fréquence pour des échantillons vieillis et non vieillis. Enfin, nous appliquerons la technique RP aux différents niveaux de décomposition.

3.4.3.1 Évolution du détail D3

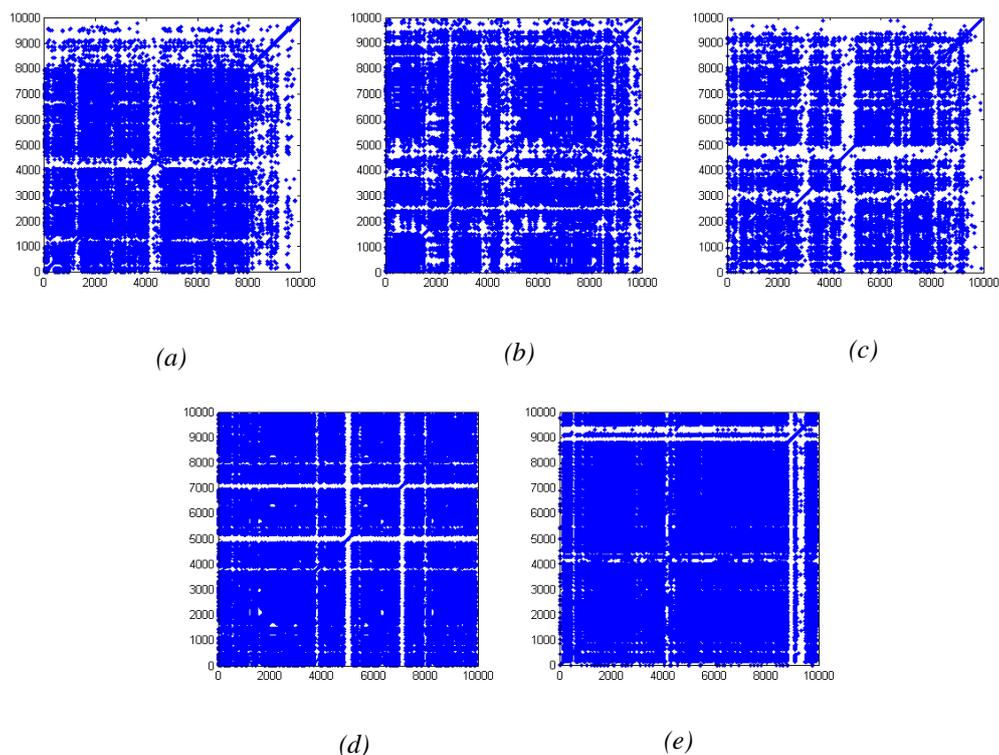


Figure 3.16: RP appliquée au détail D3 du courant de fuite du PRC :

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

La figure 3.16 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 3.16, la structure de la RP appliquée au détail D3 est constituée de points denses concentrés séparés avec des bandes blanches. Pour l’échantillon vieilli à 80°C pendant 1008 heures, on remarque une augmentation du nombre de points et la diminution des bandes blanches. En outre, pour une durée de 2016 heures, les bandes blanches augmentent à nouveau. Par contre, pour le vieillissement à 120°C on remarque une diminution notable des bandes blanches.

D’après l’analyse de la structure de la RP (figure 3.16) et de la courbe qui montre l’évolution du courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement (figure 3.8), 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.

3.4.3.2 Évolution du détail D10

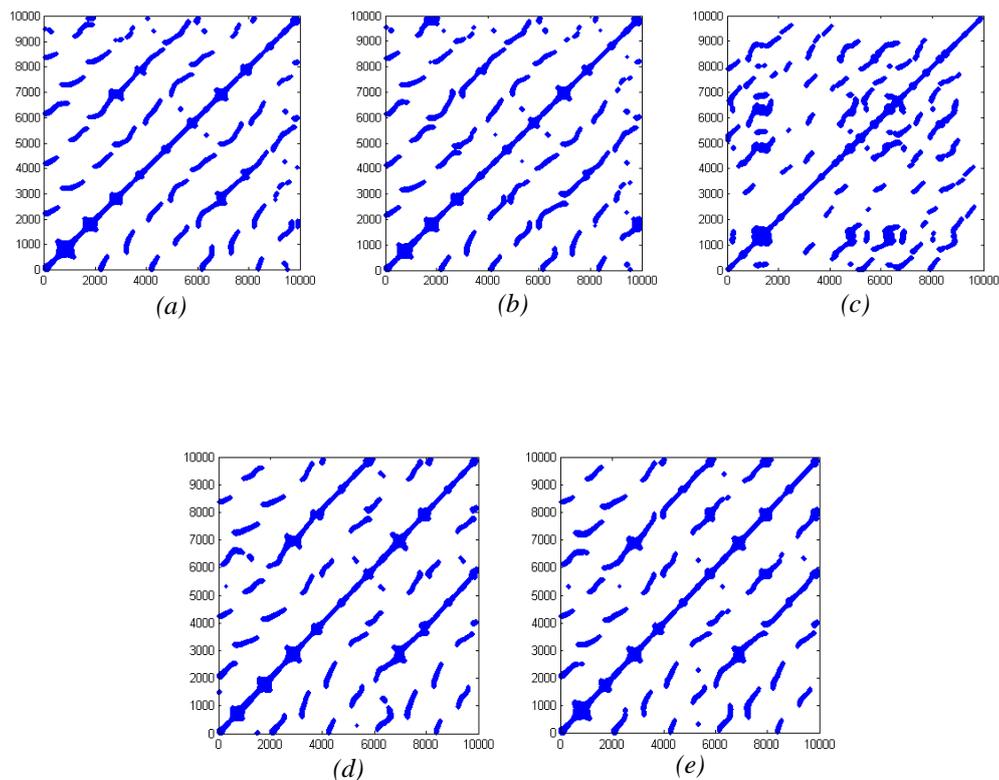


Figure 3.17 : RP appliquée au détail D10 du courant de fuite du PRC :
 (a) avant vieillissement – (b) vieilli à 80°C 1008 heures – (c) vieilli à 80°C 2016 heures –
 (d) vieilli à 120°C 1008 heures – (e) vieilli à 120°C 2016 heures

La figure 3.17 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 $12 \text{ kV}_{\text{eff}}$.

Comme le montre cette figure, 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 3.17 (c) montre une structure différente des autres, cette figure représente le signal de l'échantillon vieilli à 80°C pendant 2016 heures où on avait remarqué une augmentation du 5^e harmonique. Donc comme pour le PVC, la RP du détail D10 peut nous informer sur la présence des harmoniques 5 et 7 dans le PRC qui augmente quand le matériau commence à se dégrader.

3.4.3.3 Évolution du détail D11

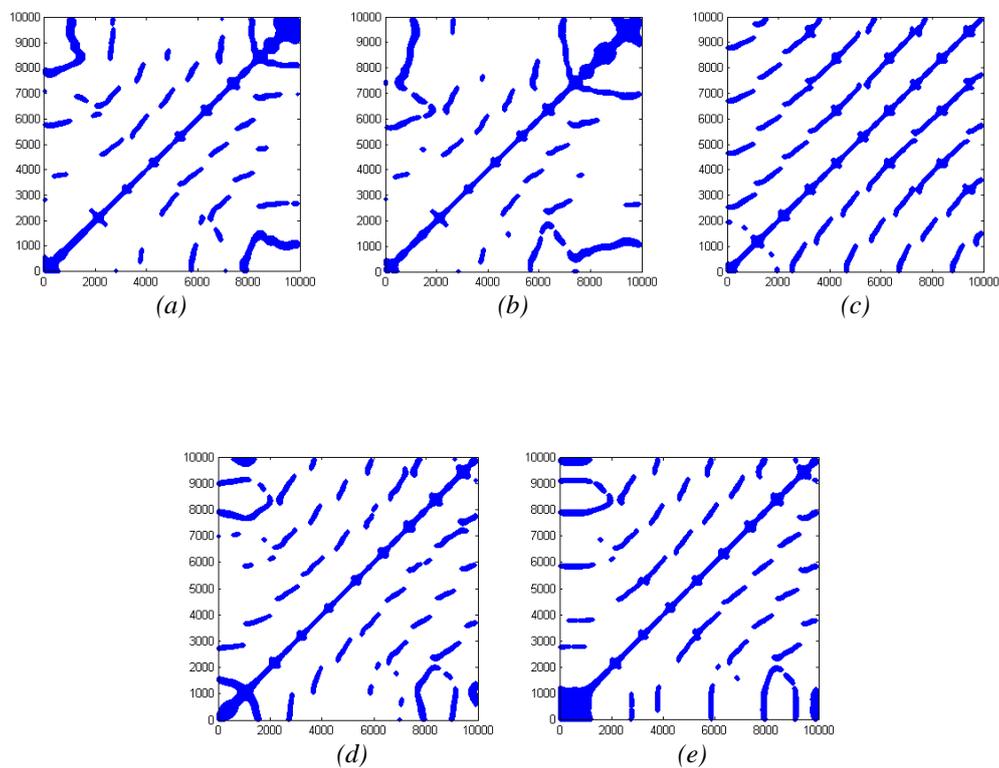


Figure 3.18 : RP appliquée au détail D11 du courant de fuite du PRC :
 (a) avant vieillissement – (b) vieilli à 80°C 1008 heures – (c) vieilli à 80°C 2016 heures –
 (d) vieilli à 120°C 1008 heures – (e) vieilli à 120°C 2016 heures

La figure 3.18 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, avec une tension appliquée de $12 \text{ kV}_{\text{eff}}$.

A partir des structures de la RP du détail D11 montrées sur la figure 3.18, on remarque des structures désordonnées dans (a) et (b) puis ordonnées dans (c), et qui tend à s'ordonner dans (d) et (e). Ceci reflète l'évolution du 3^e harmonique, plus l'harmonique 3 est important plus la structure de la RP du détail D11 tend à se désordonner.

3.5 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, dans le PRC. 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.

L'étude de l'intensité du courant de fuite, et du déphasage entre le fondamental du courant et de la tension en fonction de la durée de vieillissement nous montrent que le PRC n'est pas dégradé lors du vieillissement pour les deux températures étudiées. Pour 80°C, l'effet du vieillissement n'est pas très important et n'est presque pas visible. Et pour une température de vieillissement de 120°C, les propriétés diélectriques du PRC subissent une amélioration.

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 polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) utilisé dans l'isolation des câbles MT souterrains. Les essais réalisés sur les différents échantillons de polymère ont été effectués au laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Nous avons utilisé des échantillons de PRC, avant et après vieillissement à 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.

L'étude de l'amplitude du courant de fuite obtenue lors de nos essais a montré que le PRC n'est que très peu affecté par le vieillissement de 80°C et 120°C. En effet, il voit l'amplitude de son courant de fuite diminuer légèrement et donc une amélioration de ses propriétés diélectriques quand il est vieilli à une température de vieillissement de 120°C. Par contre, pour le vieillissement à 80°C les changements de l'amplitude du courant de fuite dans le PRC sont infimes et le courant de fuite ne varie presque pas.

Dans un second temps, l'analyse des harmoniques du courant de fuite en utilisant la transformée de Fourier rapide FFT du signal du courant de fuite nous permet de voir des harmoniques dominants dans le signal. En effet, les 5^e et 7^e harmoniques sont dominants par rapport aux autres. L'amplitude des harmoniques du courant de fuite varie très peu avec le vieillissement. Cette méthode rend l'étude de l'influence du vieillissement sur les harmoniques du courant difficile.

En plus de l'analyse par les harmoniques et pour étudier l'influence du vieillissement sur leurs évolutions, nous avons utilisé différentes autres méthodes de traitement de signal. 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 structure de D10, dans le cas où les 5^e et 7^e harmoniques sont importants. Quand il y a un 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 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 fin de d'études, 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] A. Boubakeur, Y. Mecheri, L. Boukezzi and L. Lallouani, "Dielectrical and Mechanical Behaviour of XLPE under Thermal Aging", CEIDP'2000, IEEE, October 2000.
- [2] A. Boubakeur, Y. Mecheri, M. Boumerzoug, « Comportement diélectrique et mécanique du polyéthylène réticulé chimiquement soumis à un vieillissement thermique continu », Annales de Chimie, Science des matériaux, Vol. 25, pp. 457-470, 2000.
- [3] L. Boukezzi, M. Nedjar, L. Mokhnache, M. Lallouani, A. Boubakeur, "Thermal Aging of Cross-Linked Polyethylene", Annales de Chimie, Sci. Mat. 2006
- [4] B. Pinel, F. Duchateau, « Fonction isolation dans les matériels électriques », techniques de l'ingénieur, D2302, 1999.
- [5] G. Teysse, L. Boudou, « Polymères et composites pour l'électrotechnique », techniques de l'ingénieur, D2335, 2010.
- [6] J.C. Dubois, « Propriétés diélectriques des plastiques », techniques de l'ingénieur, Am3140, 2001.
- [7] R. Coelho, R. Fournie, « Diélectriques, Bases théoriques », techniques de l'ingénieur, D2300, 2000.
- [8] P. Robert, « Matériaux de l'électrotechnique », Edition Géorgie, Traité d'électricité, EPF Lausanne, 1982.
- [9] A. Barlow, « The chemistry of polyethylene insulation », IEEE, Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, N° 1, pp. 8-19, 1991.
- [10] L. Boudou, J. Guastavino, « Influence of temperature on low-density polyethylene films through conduction measurement », Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 35, pp. 1555-1561, 2002.
- [11] 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, ENP, juin 2007.
- [12] A. MEDJDOUB, « Essais de systèmes de câble et caractérisation des matériaux utilisés dans l'isolation des câbles de haute tension », thèse de doctorat, Université A. Mira – Bejaïa, avril 2010.
- [13] J. Verdu, ed. « vieillissement des plastiques ». AFNOR technique, ed. A.F.d. Normalisation. 1984, Eyrolles: Paris.

- [14] 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.
- [15] V. Langlois, L. Audouin, J. Verdu, M. Meyer, “Vieillissement thermique du polyéthylène réticulé”, Journées d’études des polymères, JEPO18, Groupement Français d’études et d’applications des polymères (G.F.P), Septembre 1990.
- [16] 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.
- [17] D.Bouguedad, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène propylène diène monomère », thèse de doctorat, UMMTO, 2010.
- [18] J.Verdu, « Vieillissement chimique », Techniques de l'Ingénieur, Publication A3151, 1980.
- [19] J.Verdu, « Vieillissement des plastiques », AFNOR Technique, Edition Eyroles, Paris 1984.
- [20] IEC 502, « Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV up to 30 kV », 2nd edition, 2004.
- [21] C.E.I. 216, «Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials, Part 1», 1990.
- [22] C.E.I 611, «Guide for the preparation of test procedures for evaluating the thermal endurance of electrical insulation systems», Edition 1978.
- [23] 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.
- [24] K.Dinesh, S.Ashwin, V.Harish, E.VarathKanth, C.Venkatasshaiah, 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.
- [25] 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.
- [26] D.Broomhead, G.King, «Extracting qualitative dynamics from experimental data», Physica D, 20 (1986), pp. 209-217.
- [27] G.M. Mindlin, R.Gilmore, "Topological analysis and synthesis of chaotic time series", Physica D, Vol. 58, pp. 229-242, 1992.