

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 de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'
Ingénieur d'état en électrotechnique

Intitulé

**Diagnostic de l'état de dégradation des matériaux polymères sous
vieillesse thermique**

Présenté par
Amar RAI et Mahdi Samir HELIS

Sous la direction de **Pr. A. MEKHALDI**
Soutenu publiquement le 16 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

Nous remercions, avant tout, notre Dieu de nous avoir donné la force et le courage pour réaliser ce travail.

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

Nous adressons nos chaleureux remerciements aux membres du jury qui ont bien voulu juger notre travail et nous honorer avec leur participation.

Nous souhaitons également remercier tous les enseignants ayant assurés nos cours pendant nos années d'études.

Dédicace

*A mes très chers **Parents***

Pour tout l'amour dont vous m'avez entouré, pour tout ce que vous avez fait pour moi.

Que dieu, le tout puissant, vous préserve et vous procure santé et longue vie afin que je puisse à mon tour vous combler.

*A mes **Frères et sœurs***

Vous occupez une place particulière dans mon cœur. Je vous dédie ce travail en vous souhaitant un avenir radieux, plein de bonheur et de succès.

*A mes très cher **Amis***

*A ma future femme **Abir** inchallah*

A tous mes enseignants pour lesquels je porte beaucoup de respect et de gratitude.

*A toute **ma famille** proche et loin.*

*Tous mes **amis de Bouraoui**.*

*Une spéciale dédicace à la **promotion 2014-2016 Génie électrotechnique**.*

Je vous aime tous.

AMAR

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

ملخص

يعرض هذا العمل دراسة تأثير التسخين الحراري على خصائص، بوليفينيل كلوريد و البولييتيلان المعرق كيميائيا. تم تنفيذ التسخين الحراري في درجتى حرارة 80 و 120 درجة مئوية لمدة 2016 ساعة (84 يوما). ولهذا الغرض أجرينا سلسلة من التجارب بمختبر التوتر العالي بالمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات تضمنت تسجيل إشارة تيار التسرب و التوتر 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 المتفرد DWT ، ثالثا، طبقت تقنية مخطط التراجع.

الكلمات المفتاحية : التسخين الحراري, بوليفينيل كلوريد, البولييتيلان المعرق كيميائيا, 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), and 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, polyvinyl chloride (PVC/B), 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 polychlorure de vinyle (PVC/B), ainsi que 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 ondelettes 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, polychlorure de vinyle (PVC/B), polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), courant de fuite, transformée de Fourier rapide (FFT), transformée en ondelettes discrète, diagramme de récurrence.

Liste des figures

1.1	Représentation schématique des quatre types de polarisation	24
1.2	Influence des différents types de polarisation sur la permittivité relative ϵ' et l'indice de pertes ϵ''	25
1.3	Diagramme de Fresnel d'un condensateur présentant des pertes	25
1.4	Schématisme de la pénétration d'un solvant dans un polymère (gonflement)	30
1.5	Schématisme des différents mécanismes de perte d'adjuvants	31
1.6	Processus de coupure statistique des squelettes	32
1.7	Différents types de mécanismes chimiques conduisant à des coupures statistiques de chaîne	32
1.8	Représentation schématique des processus de réticulation dans un polymère initialement linéaire et dans un polymère initialement tridimensionnel	33
2.1	Différents types de signaux	37
2.2	Ondelette mère de Morlet	42
2.3	Représentation temporelle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la translation pour $a=1$ (à gauche $b=4$ et à droite $b=8$)	43
2.4	Représentation temporelle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la dilatation pour $b=6$ (à gauche $a=0.5$ et à droite $a=2$)	43
2.5	Schéma de décomposition et de reconstruction d'un signal	45
2.6	Schéma de décomposition multi-niveaux par DWT	46
2.7	Topologie caractéristique des diagrammes de récurrence (a) Homogène, périodique, (c) dévié et (d) interrompu	51
3.1	Dispositif expérimental	54
3.2	Un échantillon de PVC/B avant vieillissement	55
3.3	Un échantillon de XLPE avant vieillissement	56
3.4	Cellule d'essai	57
4.1	Changement de couleur du PVC au cours du vieillissement 80°C	59
4.2	Changement de couleur du PVC au cours du vieillissement pour 120°C	60
4.3	Changement de couleur du PRC au cours du vieillissement pour 80°C	60

Liste des figures

4.4	Changement de couleur du PRC au cours du vieillissement pour 120°C	61
4.5	(a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite dans l'échantillon non vieilli, (b) spectre de fréquence du courant	62
4.6	(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.	63
4.7	(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	64
4.8	(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	65
4.9	(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	66
4.10	(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.....	67
4.11	Valeurs efficaces du courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement pour une tension appliquée de 12 kVeff	68
4.12	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)	69
4.13	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	70
4.14	(a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l'échantillon non vieilli, (b) spectre de fréquence du courant	71
4.15	(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	72
4.16	(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	73
4.17	(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	74
4.18	(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	75
4.19	Valeur efficace du courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement pour une tension appliquée de 12 kVeff.....	76
4.20	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)	77

Liste des figures

4.21	Le taux de distorsion THD (%) en fonction de la durée de vieillissement (à 80°C et 120°C) pour une tension appliquée (12 kV)	77
4.22	Variation des amplitudes des onze détails (D1 jusqu'au D11) du signal du courant de fuite montré à la figure 4.5	80
4.23	Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour la température de vieillissement de 80°C.....	82
4.24	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.....	82
4.25	Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour la température de vieillissement de 120°C.....	83
4.26	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.....	84
4.27	Variation des amplitudes des onze détails (D1 jusqu'au D11) du signal du courant de fuite donné à la figure 4.14	84
4.28	Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour une température de vieillissement de 80°C.....	86
4.29	la déviation standard des détails d9, d10 et d11 pour la température de vieillissement de 80°C en fonction de la durée de vieillissement.....	86
4.30	Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour une température de vieillissement de 120°C	87
4.31	la déviation standard des détails d9, d10 et d11 pour une température de vieillissement de 120°C en fonction de la durée de vieillissement.....	87
4.32	Diagramme de récurrence appliqué au signal du courant de fuite (a) : avant vieillissement – (b) : vieillis sous 120°C pendant 504 heures	88
4.33	RP de la décomposition en ondelettes du signal du courant de fuite d'un échantillon de PVC avant vieillissement. (a) : définit le coefficient D1 – (b) : le coefficient D2 – (c) : le coefficient D3 – (d) : le coefficient D4 – (e) : le coefficient D5 – (f) : le coefficient D6 – (g) : le coefficient D7 – (h) : le coefficient D8 – (i) : coefficient D9 – (j) : le coefficient D10 – (k) : le coefficient D11	89
4.34	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	91
4.35	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	93

Liste des figures

- 4.36 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 heures93
- 4.37 RP de la décomposition en ondelettes du signal du courant de fuite d'un échantillon de PRC avant vieillissement. (a) : définit le coefficient D1– (b) : le coefficient D2– (c) : le coefficient D3– (d) : le coefficient D4 (e) : le coefficient D5 – (f) : le coefficient D6 – (g) : le coefficient D7– (h) : le coefficient D8 – (i) : coefficient D9– (j) : le coefficient D10 – (k) : le coefficient D11 96
- 4.38 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 heures96
- 4.39 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 heures97
- 4.40 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 heures98

Liste des tableaux

1.1	Structure chimique des polymères les plus utilisés dans l'électrotechnique	20
2.1	Exemple typique de diagramme de récurrence et leurs significations	52
4.1	Bandes fréquentielles des détails de la décomposition du courant de fuite par la DWT	79

Sommaire

Introduction générale	15
Chapitre 1 : 1.Présentation générale des matériaux polymères	
1.1 Introduction	19
1.2 Définition	19
1.3 Classification des polymères	20
1.4 Utilisation des polymères.....	21
1.5 Phénomène de polarisation	22
1.5.1 Échelle macroscopique	22
1.5.2 Type de polarisation	22
1.5.3 Comportement diélectrique des polymères	25
1.6 Les matériaux utilisés.....	26
1.6.1Le polychlorure de vinyle (PVC)	26
1.6.2 Polyéthylène réticulé (PRC)	27
1.7 Vieillessement des polymères	27
1.7.1 Différents mécanismes du vieillissement thermique	28
1.7.1.1 Vieillessement physique	29
1.7.1.1.1 Vieillessement sans transfert de masse	29
1.7.1.1.2Vieillessement avec transfert de masse	30
1.7.1.2 Vieillessement chimique	32
Chapitre 2 : 2. Théories sur le traitement du signal	
2.1 Généralités sur le traitement du signal	36
2.2 Classification des signaux	37
2.2.1 Signal déterministe	37
2.2.2 Signal aléatoire	37
2.3 Transformée de Fourier	38
2.3.1 Transformée de Fourier d'un signal continu	38
2.3.2 Transformée de Fourier à temps discret	38
2.3.3 Propriétés de la transformée de Fourier	38

2.3.4 Théorème d'échantillonnage	39
2.4 Transformée en ondelette	39
2.4.1 Historique	39
2.4.2 Introduction	40
2.4.2.1 Avantages de la transformée en ondelette	40
2.4.2.2 Définition d'une ondelette	41
2.4.3 Transformée en ondelette continue	41
2.4.3.1 Illustration du changement d'échelle et de la translation	42
2.4.3.2 Calcul des coefficients de la CWT	43
2.4.4 Transformée en ondelettes discrète	43
2.4.4.1 Définition	44
2.4.4.2 Expression mathématique	44
2.4.4.3 L'analyse multi-résolution	45
2.4.4.4 Niveau maximal de décomposition	46
2.4.4.5 Choix de l'ondelette mère	46
2.5 Recurrent plot (RP)	47
2.5.1 Théorie du chaos	47
2.5.2 Système dynamique	48
2.5.2.1 Modèle déterministe, modèle stochastique et modèle chaotique	48
2.5.2.2 Espace des phases	48
2.5.2.2.1 Construction de Ruelle-Takens	48
2.5.3 Le diagramme de récurrence (RP)	49
2.5.3.1 Définition	49
2.5.3.2 Structures dans la Recurrent plot	50

Sommaire

4.3.3 Polychlorure de vinyle (PVC/B)	80
4.3.4 Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC)	84
4.4 Diagnostique de l'état de dégradation du matériau par la technique RP.....	88
4.4.1 Choix des paramètres m , τ et ε	88
4.4.2 La technique RP appliquée directement au signal du courant de fuite	88
4.4.3 La technique RP appliquée aux détails du signal du courant de fuite	89
4.4.3.1 Polychlorure de vinyle (PVC)	89
4.4.3.1.1 Évolution du détail D3	92
4.4.3.1.2 Évolution du détail D10	93
4.4.3.1.3 Évolution du détail D11	94
4.4.3.2 Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC)	94
4.4.3.2.1 Évolution du détail D3	97
4.4.3.2.2 Évolution du détail D10	98
4.4.3.2.3 Évolution du détail D11	98
4.5 Conclusion	99
Conclusion générale	100
Références bibliographiques	102

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 [1, 2].

Même si les polymères présentent beaucoup d'avantages dans le domaine de l'isolation, 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 durant toute leur durée de vie, les polymères ont tendance à voir leurs propriétés électriques et mécaniques se dégrader par le phénomène du mécanisme de vieillissement. Ce mécanisme peut altérer leur fonctionnement à long terme et les rendre inutilisables, et ainsi réduire considérablement leur durée de vie [3].

L'étude du mécanisme de vieillissement des polymères et son influence sur les propriétés de ces derniers est très importante, et à déjà fait l'objet de nombreux travaux de recherche [4-6]. 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 diagnostique pour étudier la sévérité du vieillissement des matériaux à base de polymères pour connaître leur état de dégradation. Le but de ces méthodes de diagnostics est d'obtenir généralement des informations importantes au sujet de l'état des isolations en polymères. Le diagnostic sert aussi à prédire la durée de vie du matériau et dire si ce dernier doit être changé ou pas pour éviter un éventuel dysfonctionnement.

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 deux types de matériaux polymères, le polychlorure de vinyle (PVC) et le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC). L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés diélectriques de ces matériaux polymères 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 les deux types de matériaux polymères considérés 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 de manière succincte les méthodes de traitement du signal par la transformée de Fourier, la transformée en ondelettes et la méthode de recurrent plot. Nous mettons l'accent particulièrement sur l'historique de la transformée en ondelettes, sa définition et ces propriétés, la théorie de la transformée en ondelettes discrète dans laquelle nous décrivons les principales idées se rapportant à l'analyse multi-résolution. Par la suite, nous introduisons la théorie du chaos, les systèmes dynamiques et le diagramme de récurrence RP.

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

Le quatrième 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** [1].

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 [2].

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 [2]:



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

Tableau 1.1: Structure chimique des polymères les plus utilisés dans l'électrotechnique [2]

1.3 Classification des polymères

- Il y a plusieurs classifications possibles pour les polymères, l'une d'elles 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 a 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 [2]
- 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 [2], 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 [2].

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 [7-9] :

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

où ε_0 est la permittivité du vide.

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 :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1.2)$$

où \vec{P} est la polarisation.

Dans un milieu linéaire homogène et isotrope, on a :

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E} \quad (1.3)$$

En tenant compte de l'expression (1.2)

$$\vec{D} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} \quad (1.4)$$

où χ est la susceptibilité électrique

En posant $1 + \chi = \varepsilon_r$ et $\varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon$, on obtient :

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

ε_r est la permittivité relative et ε la permittivité absolue.

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

$$\vec{P} = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \vec{E} \quad (1.6)$$

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 [10].

1.5.2.1 Polarisation électronique

Cette polarisation est due au léger déplacement du nuage électronique par rapport au noyau sous l'effet d'un champ électrique \vec{E} , donnant un dipôle induit. Cette polarisation électronique peut être observée jusqu'à des fréquences optiques (10^{15} Hz) [10].

$$\vec{P}_e = N \alpha_e \vec{E}_l \quad (1.7)$$

où : \vec{P}_e : polarisation électronique

α_e : Polarisabilité électronique dépendant du rayon de l'atome, $\alpha_e = 4\pi\varepsilon_0 r^3$ (r rayon de l'atome) [11].

N : Nombre de molécules par unité de volume

\vec{E}_l : Champ électrique local

1.5.2.2 Polarisation atomique

Lorsque différents atomes sont présents dans une molécule, les électrons participant aux liaisons de covalence se déplacent préférentiellement vers l'atome le plus électronégatif, créant ainsi, sans contrainte extérieure, un moment de liaison. Si l'on superpose un champ électrique, les atomes se déplacent les uns par rapport aux autres, donnant naissance à une polarisation atomique qui met en jeu le déplacement d'atomes au sein de la molécule [6]. Leur temps d'applications est de l'ordre de 10^{-13} à 10^{-12} s [11].

On définit aussi une polarisabilité ionique α_i telle que [11]. :

$$\vec{P}_i = N \alpha_i \vec{E}_i \quad (1.8)$$

- Notons que ces deux polarisations (électronique et ionique) par déformation ne sont pratiquement pas affectées par la température. Dans le domaine des fréquences industrielles, on peut considérer qu'elles ne donnent pas lieu à des pertes diélectriques appréciables [11].

1.5.2.3 Polarisation dipolaire (ou de Debye)

Elle consiste en l'orientation sous l'effet d'un champ électrique d'une molécule ou groupement d'atome possédant un moment dipolaire permanent (asymétrie dans la distribution des charges électroniques au sein d'une molécule). Ce processus montre donc une forte dépendance avec la température.

La relaxation des dipôles s'accompagne d'une dissipation d'énergie ; ainsi, sous l'influence d'un champ alternatif, il apparaît des pertes diélectriques [11]. La polarisation d'orientation \vec{P}_d , calculée par Langevin et Debye, s'exprime par [11] :

$$\vec{P}_d = N \alpha_d \vec{E} \quad (1.9)$$

avec :

$$\alpha_d = \frac{p^2}{3 k T} \quad (1.10)$$

p étant le moment dipolaire de la molécule.

T : température thermodynamique.

k : constante de Boltzmann.

Quand un champ électrique est appliqué, la polarisation d'orientation n'atteint pas immédiatement sa valeur maximale. A la coupure du champ, cette polarisation décroît et disparaît au bout d'un temps (t) bien déterminé. Pour cette raison, on la classe sous les polarisations liées à une relaxation. Elle s'exprime généralement par une équation de la forme [7]:

$$\vec{P} = P_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{1.11}$$

avec τ : temps de relaxation

P_0 : Polarisation induite par le champ électrique.

Ce type de polarisation nécessite deux conditions, la première exige une dissymétrie structurale de la molécule, la seconde condition est que la molécule ou le groupement d'atome puisse s'orienter dans le sens champ électrique.

1.5.2.4 Polarisation interfaciale ou de charge d'espace : effet Maxwell-Wagner-Sillars

Ce type de polarisation apparait dans les matériaux hétérogènes, composés de différentes natures (charges, impuretés), lorsque les différents éléments ont des conductivités et des constantes diélectriques différentes. C'est, par exemple, le cas d'un polymère tel que le polyéthylène. L'application du champ électrique fait apparaître aux interfaces polymère-charge des charges électriques. Ce type de polarisation se manifeste aux basses fréquences (10^{-1} à 10^2 Hz) suivant la conductivité de la charge. Ce type de polarisation est donné par l'expression suivante [7,10] :

$$\vec{P}_c = N \alpha_c \vec{E} \tag{1.12}$$

avec α_c : polarisabilité par charges d'espace.

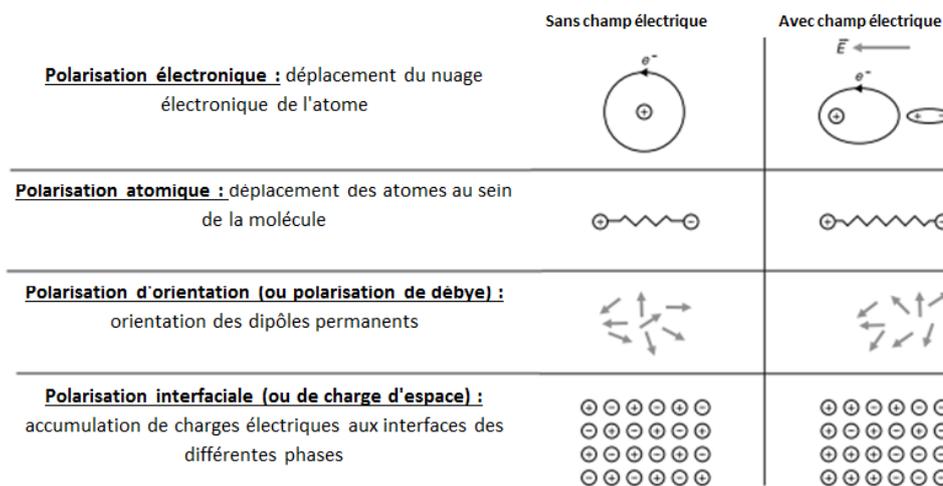


Figure 1.1: Représentation schématique des quatre types de polarisation [11]

Les différentes polarisations en fonction de la fréquence du champ électrique appliqué, sont représentées sur la figure 1.2 :

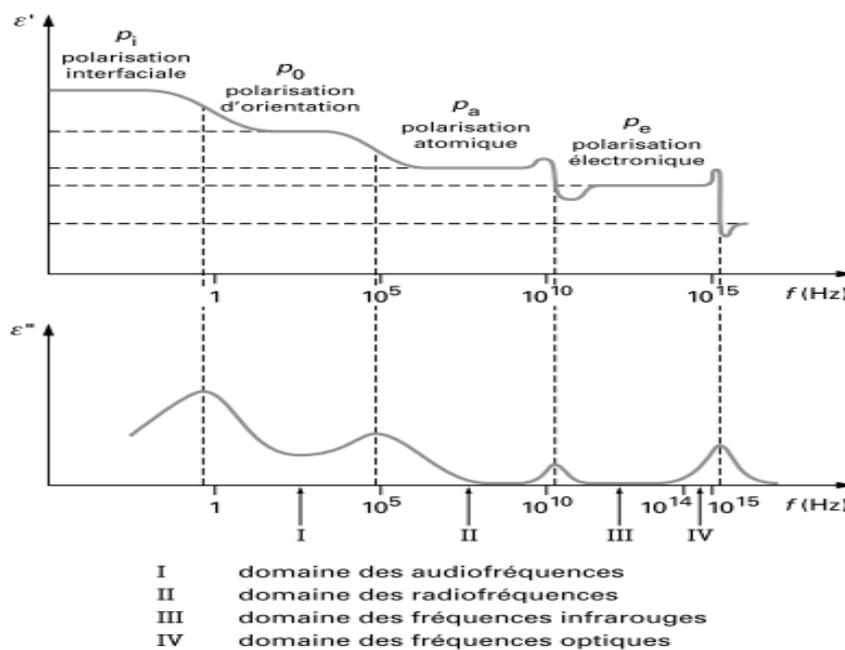


Figure 1.2 : Influence des différents types de polarisation sur la permittivité relative ϵ' et l'indice de pertes ϵ''

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 [10]. Elle dépend de la structure et des propriétés moléculaires du matériau diélectrique [12].

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 1.3), 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 :

$$\bar{I} = \bar{I}_c + \bar{I}_p \tag{1.13}$$

avec :

\bar{I}_c : courant de charge

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

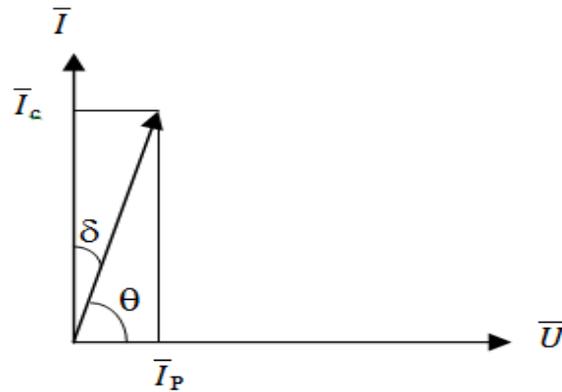


Figure 1.3 : Diagramme de Fresnel d'un condensateur présentant des pertes

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 :

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

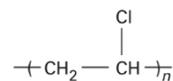
Est également appelé **facteur de dissipation diélectrique** [10].

1.6 Matériaux utilisés

1.6.1 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 [13], il se classe en 2^{ème} position après le polyéthylène sur le plan utilisation dans le domaine industriel [14]. 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.

1.6.1.1 Propriétés du PVC

1.6.1.1.1 Propriétés physico-chimiques

- La masse volumique des objets à base de PVC varie, en moyenne, entre $1,0$ et $2,0 \text{ g/cm}^3$ à température ambiante [15].
- 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 [16,17].
- 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 .

1.6.1.1.2 Propriétés électriques

- La résistivité transversale est de l'ordre de $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ [15].

- 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.

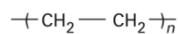
1.6.1.1.3 Propriétés mécaniques

- 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.

1.6.2 Polyéthylène réticulé (PRC)

1.6.2.1 Polyéthylène PE

Le PE est très largement utilisé comme matériau d'isolation à cause de ses propriétés diélectriques combinées à son faible coût, sa facilité de mise en œuvre et sa bonne résistance aux agressions chimiques. Sa structure chimique est :



Partiellement cristallin, le polyéthylène contient deux phases [18,19]:

- 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.

1.6.2.2 Réticulation

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.

Il existe 3 méthodes de réticulation pour le polyéthylène :

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

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 [3]. 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 [7,20]. 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,...) [7,20,21].

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 [7,22]. Ces phénomènes peuvent affecter la structure chimique du polymère, ou dans certains cas, concerner seulement les additifs (problèmes d'incompatibilité d'adjuvants) [16].

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 [2]. 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 [7].

1.7.1.1.1 Vieillissement sans transfert de masse

1.7.1.1.1.a Vieillissement par relaxation de volume et d'enthalpie

Les variations de volume et d'enthalpie sont en fait deux aspects différents (mais parallèles) d'un même phénomène d'évolution de la configuration du réseau macromoléculaire à l'état vitreux [23]. Lorsque la température d'un polymère est inférieure à la température de transition vitreuse son volume, son enthalpie et son entropie sont généralement supérieures aux valeurs initiales. Dans les polymères semi-cristallins (PE, PP,...), certains segments stéréoréguliers (donc capables de se cristalliser) qui se trouvaient piégés dans la phase amorphe, vont progressivement diffuser et s'incorporer à des zones cristallines. Le vieillissement se traduit par une augmentation du taux de cristallinité [24].

1.7.1.1.1.b Vieillessement par chocs thermiques

Les matériaux polymères soumis à une variation rapide de température, peuvent entraîner des ruptures mécaniques induites par une dilatation différentielle [23]. Deux mécanismes peuvent intervenir :

- **Gradient de température dans l'épaisseur** : Quand la température du milieu varie rapidement, un gradient de température s'instaure dans l'épaisseur du matériau d'où la dilatation différentielle zone superficielle - zone interne [7].
- **Matériaux hétérogènes** : Dans les matériaux composites, les dilatations différentielles entraînent des contraintes internes susceptibles d'endommager le matériau [7,24].

1.7.1.1.1.c Fissuration sous contrainte en milieu tensioactif

En milieu tensioactif, les polymères sont le siège de fissurations dans les zones les plus contraintes et ceci après un temps pouvant varier entre quelques minutes et quelques jours, selon les conditions et la qualité des polymères. Il s'agirait d'un phénomène purement superficiel, lié aux tensions interfaciales polymère-liquide. Il dépend de la contrainte mécanique, la température et la tensioactivité du liquide dont la viscosité détermine la vitesse de pénétration dans les fissures, ainsi que de la structure du polymère, la distribution des masses moléculaires et la morphologie du polymère [7,24].

1.7.1.1.2 Vieillessement avec transfert de masse

Nous distinguons deux types de phénomène selon qu'il y est gain de masse (absorption de solvant) ou pertes de masse (migration d'adjuvant).

1.7.1.1.2.a Vieillessement par absorption de solvants

Si une espèce de faible masse moléculaire (gaz ou liquide) se rencontre dans l'environnement et présente une solubilité non nulle, on constate qu'elle va pénétrer dans le polymère [25]. En étudiant la variation de masse due à l'interaction du polymère avec son milieu, il convient de distinguer les réactions influençant sa variation de masse. On a des réactions réellement chimiques (qu'il y est augmentation ou diminution de masse) et des interactions purement physiques, de loin plus important sur le plan pratique [23]. Le solvant le plus courant dans l'environnement est évidemment l'eau, qui peut poser des problèmes.

La pénétration du solvant dans un polymère est influencée par les facteurs suivants [7]:

- **La structure chimique du motif structural élémentaire** : C'est elle qui détermine essentiellement l'affinité du polymère pour le solvant considéré.
- **La morphologie** : Les zones cristallines peuvent être considérées comme imperméables, la stabilité globale décroît donc avec le taux de cristallinité.
- **Le taux de réticulation** : La pénétration du solvant est d'autant plus aisée que le taux de réticulation est faible.

Les conséquences physiques de ce type de vieillissement sont la plastification et le gonflement du polymère.

- **Le gonflement** : Lorsqu'un solvant pénètre dans un polymère, son volume tend à s'ajouter à celui de ce dernier (figure 1.4), il y a donc gonflement. Dans la pratique, un gonflement, même limité, peut poser des problèmes, en particulier d'instabilité dimensionnelle et de développement de contraintes internes[20], qui se développent à l'interface et peuvent conduire à des ruptures mécano-chimiques de chaînes [7,26].

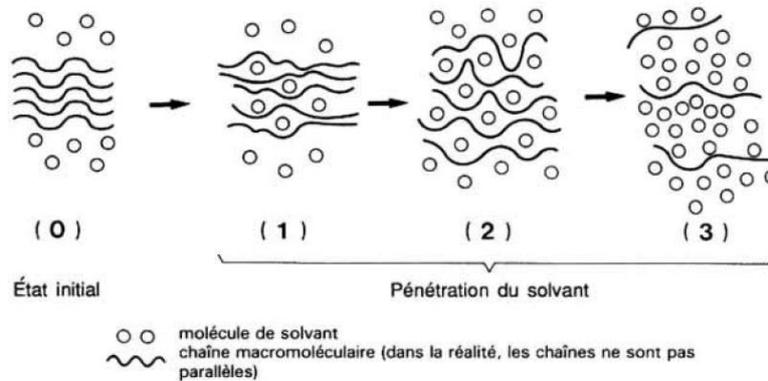


Figure 1.4 : Schématisation de la pénétration d'un solvant dans un polymère (gonflement) [23]

- **Plastification** : c'est quand le solvant absorbé par le matériau, entraînant des modifications de la structure ou de la composition d'un polymère se traduisant par une modification du comportement mécanique : diminution de la température de transition vitreuse et du seuil de plasticité ou d'endommagement.

1.7.1.1.2.b Vieillessement par migration d'adjuvants

Les adjuvants incorporés dans le matériau polymère ont tendance à se déplacer du polymère à l'environnement extérieur au cours de sa mise en service. Dans tous les cas, le départ de l'adjuvant se traduit par la perte des propriétés qu'il était censé apporter au polymère [23]. Le transfert de ces petites particules s'effectue en trois mécanismes principaux (figure 1.5) :

- **Par évaporation** C'est le cas le plus fréquemment rencontré dans les applications électriques (isolants de câble) et, de façon générale, pour le vieillissement naturel des plastiques [23]. Les molécules de plastifiant à la surface peuvent donc passer dans l'atmosphère, d'où la naissance d'un gradient de concentration dans l'épaisseur du matériau. L'apparition de ce gradient entraîne la diffusion du plastifiant du cœur vers la surface conduisant à sa disparition progressive [24].
- **Par exsudation** L'exsudation indique un excès initial d'adjuvants. Ce n'est que l'évolution du matériau vers l'équilibre. Dans certains cas, le mélange (polymère + adjuvants) peut être déstabilisé par un corps tiers provenant de l'environnement [23].
- **Par extraction** Les phénomènes d'extraction sont à prendre en compte dans tous les cas de contact entre un polymère et un milieu liquide (y compris la pluie dans

le cas du vieillissement naturel). Ici, c'est la solubilité de l'adjuvant dans le liquide qui est susceptible de jouer le rôle le plus important et qui sera en tout cas le premier paramètre à prendre en compte lors du choix du matériau [23].

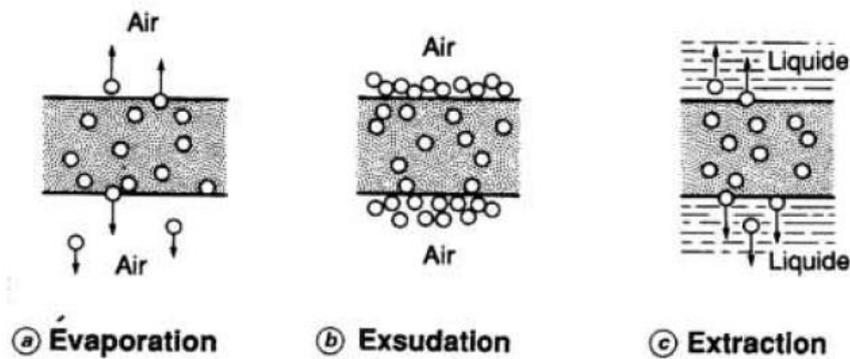


Figure 1.5 : Schématisation des différents mécanismes de perte d'adjuvants

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 [26]. En pratique, le vieillissement chimique se superpose souvent à un vieillissement physique et les deux phénomènes interfèrent [24]. On distingue plusieurs types de réactions intervenant lors du vieillissement chimique :

1.7.1.2.a Coupure de chaînes statistiques

Il existe une grande variété de mécanismes chimiques (figure 1.7) qui peuvent conduire à des coupures « statistiques » (figure 1.6), entre autres (thermolyse, thermolyse β , hydrolyse, radiolyse). Les coupures statiques sont réparties de façon aléatoire sur les chaînes macromoléculaires. C'est probablement le processus de vieillissement chimique le plus important, du moins pour les mécaniciens [26].

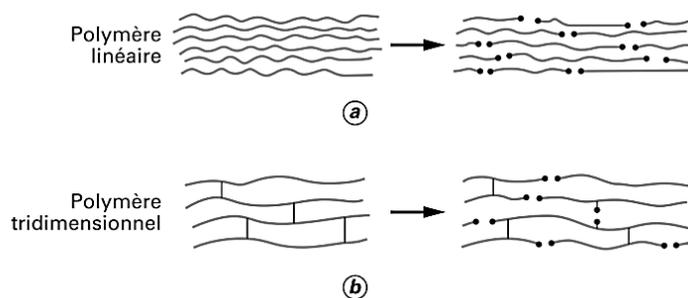


Figure 1.6: Processus de coupure statistique des squelettes

Les propriétés physiques, élastiques et thermiques sont très peu affectées par les coupures de chaînes statistiques. Cependant, les coupures de chaînes affectent considérablement les propriétés mécaniques car elles sont responsables de la fragilisation du matériau [24].

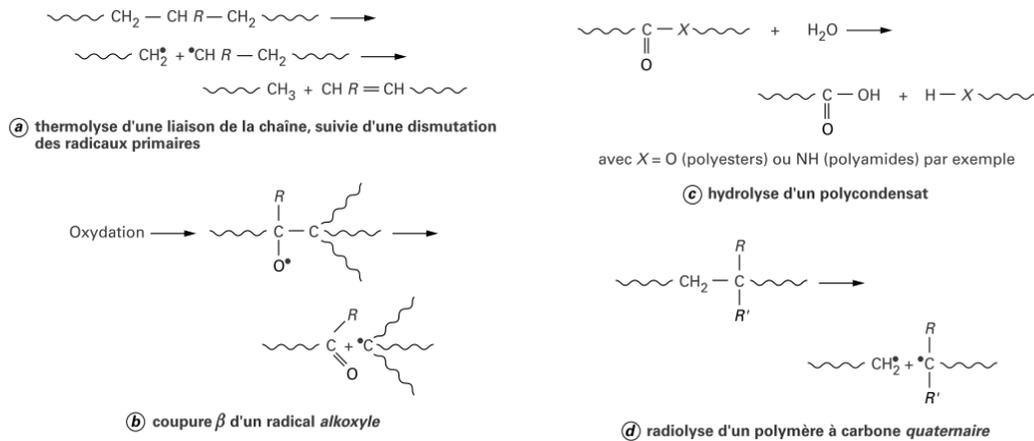


Figure 1.7: Différents types de mécanismes chimiques conduisant à des coupures statistiques de chaîne

1.7.1.2.b Dépolymérisation

Comme son nom l'indique les réactions de dépolymérisation sont l'inverse des réactions de polymérisation. Ces réactions font intervenir une élimination séquentielle de molécules de monomère, à partir d'un site particulièrement instable préexistant, soit à l'extrémité de chaîne ou alors résultante d'une coupure statistique [26]. Une coupure de chaîne crée un site actif qui déstabilise la liaison monomère voisine et entraîne l'élimination séquentielle de molécules de monomère. Elle est d'autant plus facile que l'énergie de liaison monomère-monomère est faible [7].

Lorsque l'on s'intéresse au comportement à long terme des plastiques, les processus de dépolymérisation sont purement anecdotiques, car ils n'interviennent pratiquement qu'à température élevée loin des conditions usuelles d'utilisation [26].

1.7.1.2.c Réticulation

Rappelons que les réactions de réticulation est la réaction conduisant à la formation de ponts covalents entre les segments de chaînes voisines. Elle se traduit par une diminution de la mobilité moléculaire (figure 1.8).

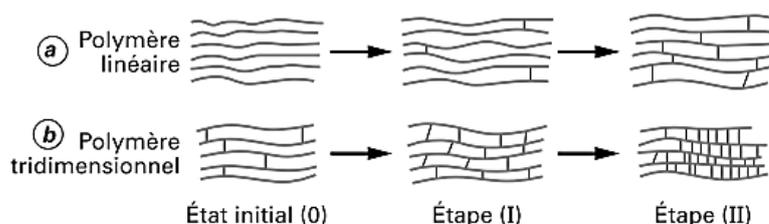


Figure 1.8: Représentation schématique des processus de réticulation dans un polymère initialement linéaire et dans un polymère initialement tridimensionnel

Dans le cas des polymères linéaires de taux de réticulation modérés, la réticulation se traduit par l'apparition de chaînes plus ramifiées et de masse moléculaire plus élevée que ce qui existe dans les chaînes initiales. Dans le cas des polymères tridimensionnels, la réticulation se traduit par une augmentation de la concentration en nœuds de réseau. Elle peut être suivie par une diminution du taux de gonflement, et par une augmentation de la température de transition vitreuse T_v et du module d'élasticité [27].

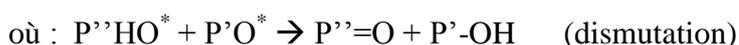
Les propriétés physiques des matériaux sont peu affectées à l'exception de la solubilité qui diminue. Au plan des propriétés mécaniques, la réticulation conduit à une augmentation du module d'élasticité, de la contrainte à la rupture et de la température de ramollissement [7].

1.7.1.2.d Oxydation

Le vieillissement thermique entraîne le phénomène d'oxydation, qui se manifeste au cours du vieillissement sous la forme d'une accumulation des groupes carbonylés (acides, cétone, aldéhydes,...) [28]. Cette réaction entraîne ainsi une dégradation des propriétés électriques [29,30]. Le « schéma standard » des mécanismes d'oxydation est généralement décrit comme suit [26] :

- Amorçage : polymère ou impureté $\rightarrow P^*$ (radicaux) (I)
- Propagation : $P^* + O_2 \rightarrow PO_2^*$ (II)
- $PO_2^* + PH \rightarrow PO_2H + P^*$ (III)
- Transmission : $PO_2^* + PO_2^* \rightarrow$ produit inactifs (IV)

Divers mécanismes de terminaison sont possibles :



Il faut donc s'attendre à ce que des hydroperoxydes (ROOH), des peroxydes (ROOR), des cétones ou des aldéhydes ($R' = O$) et des alcools (ROH) soient formés dans le processus standard. L'amorçage peut être réalisé par plusieurs voies (thermique, photochimique, radiochimique, chimique).

Plusieurs facteurs affectent le phénomène d'oxydation des polymères, on peut citer : la non saturation du polymère, la présence des ions métalliques (processus de fabrication), la présence des groupes chimiques tels que les groupes carbonylés, les hydroperoxydes, les catalyseurs et les antioxydants, avec ainsi la structure et la morphologie du matériau (densité, ramifications, cristallinité,...) [31].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit des généralités sur les polymères utilisés dans l'isolation électrique. Nous avons commencé par donner la définition des polymères, ensuite on a cité les différentes classifications des polymères. Dans une seconde partie, nous avons décrit le phénomène de polarisation et les différents types de polarisation ainsi que le comportement diélectrique des polymères. Une autre partie a été consacrée à une présentation brève des matériaux étudiés (PVC et PRC). Finalement, nous avons décrit le phénomène de vieillissement thermique et les différents mécanismes qui interviennent lors du vieillissement.

*Chapitre 2 : Théories sur le traitement
du signal*

2.1 Généralités sur le traitement du signal

Le traitement du signal est la discipline qui développe et étudie les techniques de traitement, d'analyse et d'interprétation des signaux. Parmi les types d'opérations possibles sur ces signaux, on peut citer le contrôle, le filtrage, la compression et la transmission de données, la réduction du bruit, la prédiction, l'identification, la classification, etc.

Bien que cette discipline trouve son origine dans les sciences de l'ingénieur, elle fait aujourd'hui largement appel à de nombreux domaines des mathématiques, comme la théorie du signal, les processus stochastiques, les espaces vectoriels et l'algèbre linéaire et des mathématiques appliquées, notamment la théorie de l'information, l'optimisation ou encore l'analyse numérique.

Les signaux à traiter peuvent provenir de sources très diverses, mais la plupart sont des signaux électriques ou devenus électriques à l'aide de capteurs et transducteurs (microphones, rétines, senseurs thermiques, optiques, de pression, de position, de vitesse, d'accélération et en général de toutes les grandeurs physiques et chimiques).

La notion de signal est très extensive. Elle ressort de l'observation d'un phénomène, certaines quantités qui dépendent du temps, de l'espace, d'une fréquence ou autre. Ces quantités mesurables sont appelées signaux. On choisit de représenter le signal par la notion de fonction en mathématiques. On modélisera le signal de façon déterministe, mais on pourrait également le modéliser de façon aléatoire.

Le signal est analogique ($x = x(t)$) si la variable est continue. Le signal est discret ($x = x(n) \ n \in \mathbb{N}$) si la variable est discrète. Un signal discret est le plus souvent le résultat d'une discrétisation ou d'un échantillonnage d'un signal analogique. Les valeurs du signal sont considérées comme des valeurs exactes réelles ou complexes.

On appelle quantification l'approximation des valeurs exactes par un nombre fini de données (à stocker sur ordinateur). Un signal discret et quantifié est appelé signal numérique.

Il existe plusieurs branches particulières du traitement du signal, en fonction de la nature des signaux considérés. En particulier :

- Traitement de la parole (ou plus généralement du son) - pour l'analyse, la compression, la synthèse et la reconnaissance de la parole
- Traitement d'images - pour l'analyse, la restauration et la compression d'images fixes
- Traitement de la vidéo - pour l'analyse et la compression de séquences vidéo

On peut dire que la théorie du signal est l'art de détecter dans les signaux peu compréhensibles, peu lisibles, confus, les informations qui intéressent. Bien souvent il faut éliminer des parasites qui corrompent la lecture, bien souvent les informations recherchées ne sont pas visibles. C'est le cas par exemple quand elles correspondent à un phénomène vibratoire de haute fréquence. Un tracé en fonction de t est rarement informatif [38,39].

2.2 Classification des signaux

Les premières applications du traitement du signal étaient dédiées à l'extraction d'un signal dans un milieu bruité. Pour ce faire, il était nécessaire d'avoir des connaissances a priori sur le signal à mesurer et sur la nature du bruit.

On définit deux classes principales de signaux (Figure 2.1) [40] :

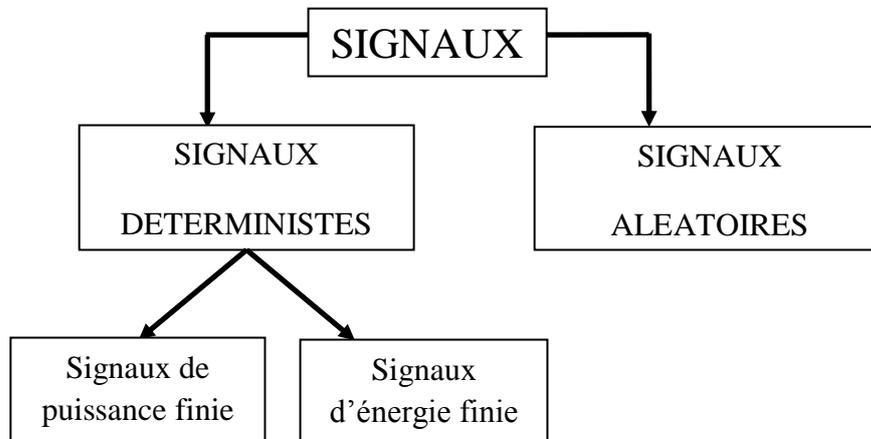


Figure 2.1 : Différents types de signaux

2.2.1 Signal déterministe

Il s'agit d'un signal dont on peut représenter l'évolution grâce à une fonction mathématique. On peut citer le signal sinusoïdal, rampe, échelon, impulsion ou dirac, un signal déterministe peut être périodique ou non périodique. Il peut être classé en deux groupes selon qu'il soit d'énergie finie ou de puissance finie.

Dans le cas d'un signal d'énergie finie, la condition suivante est satisfaite :

$$\text{Signal continu :} \quad E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (2.1)$$

$$\text{Signal discret :} \quad E = \sum |x(k)|^2 < \infty \quad (2.2)$$

Pour un signal de puissance finie, la condition à satisfaire est :

$$\text{Signal continu :} \quad P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (2.3)$$

$$\text{Signal discret :} \quad P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N |x(k)|^2 < \infty \quad (2.4)$$

2.2.2 Signal aléatoire

Un signal aléatoire est un signal dont on ne peut deviner l'évolution. Néanmoins, tout signal aléatoire peut être caractérisé mathématiquement, mais aucune fonction mathématique

ne permet de prédire l'évolution du signal à l'instant donné. Un signal aléatoire peut être stationnaire ou non stationnaire.

2.3 Transformée de Fourier

La transformée de Fourier est très bien adaptée pour l'analyse de nombreux signaux. La transformée de Fourier d'une fonction dépendant d'une variable (par exemple du temps) est devenue si naturelle que sa représentation graphique est généralement aussi utile, voire plus, que celle de la fonction elle-même.

2.3.1 Transformée de Fourier d'un signal continu(TFTC)

La transformée de Fourier d'un signal continu $x(t)$ s'écrit sous la forme :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (2.5)$$

On peut aussi passer du domaine fréquentiel au domaine temporel. En connaissant $X(f)$ on peut en déduire $x(t)$ par la Transformée de Fourier Inverse :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{+i2\pi ft} df \quad (2.6)$$

2.3.2 Transformée de Fourier à temps discret(TFTD)

La transformée de Fourier à temps discret effectue un produit scalaire entre un signal discret et l'exponentielle complexe pour chaque fréquence f . Le but de cette transformée est de rechercher les périodicités dans un signal de durée finie, pour mesurer leurs contributions via une représentation fréquentielle.

La TFTD a pour expression mathématique :

$$X(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)e^{-i2\pi km/N} \quad (2.7)$$

Le rapport m/N s'appelle fréquence normalisée discrète par rapport à la fréquence d'échantillonnage. Ainsi la fréquence f est calculée via l'expression :

$$f = \frac{m}{N} f_e \quad (2.8)$$

2.3.3 Propriétés de la transformée de Fourier

Les propriétés de la TFTD sont similaires à celles de la TFTC ; elles concernent beaucoup plus le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel.

Soient deux signaux $x(t)$ et $y(t)$ admettant pour transformées de Fourier, $X(f)$ et $Y(f)$, respectivement

➤ Linéarité $\alpha x(t) + \beta y(t) \leftrightarrow \alpha X(f) + \beta Y(f) \quad (2.9)$

➤ Complexe conjugué $x^*(t) \leftrightarrow X^*(-f) \quad (2.10)$

➤ Translation sur t $x(t - \theta) \leftrightarrow X(f)e^{-i2\pi f\theta} \quad (2.11)$

➤ Translation sur f $x(t)e^{i2\pi f_0 t} \leftrightarrow X(f - f_0) \quad (2.12)$

$$\text{➤ Convolution (théorèmes de Plancherel)} \quad x(t) * y(t) \leftrightarrow X(f)Y(f) \quad (2.13)$$

Lorsque le signal échantillonné est de taille $N = 2^n$, la transformée de Fourier peut être calculée à l'aide d'un algorithme nommé transformée de Fourier rapide (FFT) qui permet un gain de calcul appréciable. Ce gain a pour expression :

$$G = \frac{N}{\log_2 N} \quad (2.14)$$

2.3.4 Théorème d'échantillonnage

Les technologies actuelles utilisent des calculateurs numériques. Lorsque vous travaillez sous Matlab, le signal temporel est discrétisé, ce qui signifie que vous ne prenez pas en compte l'évolution du signal à tout instant (signal analogique), mais l'amplitude du signal à des instants bien réguliers. Il s'agit de l'échantillonnage.

Le théorème d'échantillonnage énonce qu'un signal réel à fréquence maximale F_s doit être échantillonné avec une fréquence F_e supérieure ou égale à deux fois la fréquence maximale. Cette fréquence d'échantillonnage porte le nom de fréquence de Nyquist.

Lorsque cette condition n'est pas respectée, l'opération de reconstruction parfaite n'est plus possible et on assiste à une interférence des motifs : ce phénomène est connu sous le nom de repliement de spectre.

2.4 Transformée en ondelette

2.4.1 Historique

La transformée de Fourier n'était pas toujours satisfaisante. De plus, la transformée de Fourier peut diverger dans certaines conditions. C'est la raison pour laquelle la première transformation en ondelettes (le nom n'est pas encore utilisé) est proposée par Haar en 1910 donc une base orthogonale qui ne diverge pas; il serait plus judicieux de parler alors de «paléo-ondelette» [41].

Les précurseurs conscients de cette technique ont été des mathématiciens (Calderon 1964), des physiciens (Aslaken et Klauder en 1968, Paul en 1985), et surtout des ingénieurs (ou des chercheurs en sciences pour l'ingénieur) comme Esteban et Galand (1977), Smith et Barnwell (1986), Vetterli (1986), nous pourrions parler dans leur cas de «pré-ondelette». Mais le premier à avoir utilisé la méthode et le premier à avoir proposé le nom d'ondelettes fut Jean Morlet (1983). Les résultats obtenus par Morlet et formalisés par le physicien Alex Grossmann ont rapidement éveillé l'attention de nombreux chercheurs et bientôt des bases mathématiques solides ont été mises en place faisant apparaître la notion de base orthogonale (Y.Meyer 1985), d'analyse multirésolution (S. Mallat 1989) et d'ondelettes à support compact (I. Daubechies 1988) [41,42].

2.4.2 Introduction

L'analyse de Fourier propose une approche globale du signal, la notion de localisation temporelle (ou spatiale pour les images) disparaît dans l'espace de Fourier ; il faut donc trouver un compromis, une transformation qui nous renseigne sur le contenu fréquentiel tout en préservant la localisation afin d'obtenir une représentation temps/fréquence ou espace/échelle du signal [41].

La transformée en ondelettes, tout comme la transformée de Fourier, sont des outils mathématiques de traitement de signal réalisant la décomposition d'un signal en différentes fonctions de base. Ces fonctions de base de la transformée en ondelettes permettent une résolution bidimensionnelle appelée plan temps-échelle. Le pavage du plan temps-fréquence induit par cette transformée a pour particularité de permettre une résolution temporelle fine aux hautes fréquences et une résolution fréquentielle fine aux basses fréquences. Le résultat de cette transformation représente la projection d'un signal sur la base des fonctions ondelettes. Cette propriété permet souvent une analyse intéressante du signal mais reste rigide.

L'analyse par la technique des ondelettes fournit de meilleurs résultats pour le traitement local qui a pour objectif de détecter les points de discontinuités ou les zones déformées du signal, les composantes produites par des phénomènes transitoires, variables dans le temps et non stationnaires, qui sont souvent de hautes fréquences [43,44].

Les domaines d'applications qui ne cessent de s'accroître, depuis la télécommunication à la médecine en passant par l'analyse des divers phénomènes physiques tels que : les signaux sismiques, l'océanographie, la prospection géologique, démontrent d'une manière concluante la puissance de cet outil.

Cette méthode paraît bien plus adaptée dans le cas de la localisation de défauts dans l'équipement lié au transport d'énergie électrique.

2.4.2.1 Avantages de la transformée en ondelettes

On peut distinguer deux intérêts principaux des ondelettes en tant qu'outil mathématique d'analyse et de représentation des fonctions.

Le premier est, centré autour de l'idée de construire un outil d'analyse local en temps. De plus, La transformée en ondelettes est non seulement une analyse locale mais, sa résolution temporelle est variable. Elle permet donc de décrire le comportement local des signaux à différentes échelles de temps.

Le second est celui du problème de reconstruction et de la recherche de représentations pratiques. En effet, cette transformée nous permet bien de reconstruire le signal de départ et présente des avantages majeurs d'un point de vue numérique [45].

En générale le traitement du signal par la technique d'ondelettes permet d'élargir les intervalles de temps lorsque l'on recherche plus de précision sur les composantes de basses

fréquences. Il permet également de rétrécir les zones pour l'extraction d'informations sur les hautes fréquences. Cela démontre la capacité des ondelettes à garder une bonne résolution temporelle et fréquentielle. L'analyse par la méthode des ondelettes nous permet aussi de partitionner l'énergie du signal en différentes bandes de fréquences pour séparer toutes ses composantes.

2.4.2.2 Définition d'une ondelette

Selon Yves Meyer, « c'est le signal transitoire le plus simple que l'on puisse imaginer » [46], ou tout simplement, est une petite onde (ou vague) qui a un début et une fin.

Il faut savoir qu'il existe de nombreuses ondelettes. Certaines ont des formules mathématiques explicites alors que d'autres sont construites à partir de propriétés mathématiques plus complexes.

Chaque ondelette possède des qualités bien spécifiques comme la symétrie, qui est utile pour éviter le déphasage, le nombre de moments nuls (c'est-à-dire le nombre d'oscillations) utile pour la compression, la régularité, utile pour obtenir des signaux reconstruits lisses et réguliers.

Mathématiquement, pour qu'une fonction puisse être qualifiée d'ondelette, celle-ci doit remplir les conditions d'admissibilité et de régularité [47].

- La condition d'admissibilité

$$\int \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \quad (2.15)$$

Où $\Psi(\omega)$ est la transformée de Fourier de $\psi(t)$. Cette condition signifie que l'ondelette oscille, c'est-à-dire $\psi(t)$ est une fonction de moyenne nulle :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2.16)$$

- La condition de régularité impose à la fonction ondelette d'être lisse et concentrée dans les domaines temporel et fréquentiel.

Deux grands domaines existent dans la transformée en ondelettes; la transformée en ondelettes continue ainsi que la transformée en ondelettes discrète desquelles sont nées de nombreuses autres variantes. Les principaux concepts théoriques de ces méthodes sont exposés ci-après.

2.4.3 Transformée en ondelettes continue (CWT)

La transformation en ondelettes continue (Continuous Wavelet Transform - CWT) consiste à créer, à partir d'une ondelette mère notée ψ (qui ressemble à une petite onde) ou encore appelée ondelette analysante, une famille d'ondelettes

La transformation en ondelettes continue d'un signal $f(t)$ est définie comme suit :

$$CWT_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi_{ab}^*(t) dt \quad (2.17)$$

Où

- a est le facteur d'échelle, $a > 0$
- b est le paramètre de translation
- CWT_f sont les coefficients d'ondelettes
- $\Psi_{ab}(t)$ sont les ondelettes (fonctions de base)
- * indique la conjugaison complexe

La variable 'a' joue le rôle de l'inverse de la fréquence : plus 'a' est petit moins l'ondelette (la fonction analysante) est étendue temporellement, donc plus la fréquence centrale de son spectre est élevée. On peut également interpréter cette expression comme une projection du signal sur une famille de fonctions analysantes Ψ_{ab} construite à partir d'une fonction "mère" conformément à l'équation suivante :

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.18)$$

Dans la transformée en ondelettes, on décompose le signal à étudier $f(t)$ selon une base de fonctions d'ondelettes localisées dans le temps. On obtient alors des coefficients numériques $CWT_f(a, b)$: les coefficients d'ondelettes. Le calcul de ces coefficients est analogue à celui que l'on effectue lors d'une transformée de Fourier : on multiplie le signal par la fonction analysante puis on calcule l'intégrale du produit. On notera que l'on prend le conjugué de l'ondelette afin de pouvoir opérer une reconstruction exacte lors de la transformée inverse [48].

2.4.3.1 Illustration du changement d'échelle et de la translation

Le changement d'échelle sert à compresser ou dilater l'onde mère, ce qui mène à analyser les hautes fréquences ou les basses respectivement contenues dans un signal [49].

Un exemple de l'ondelette de Morlet est présenté comme suit :

$$\psi(t) = e^{-\frac{t^2}{2}} * \cos(5 * t) \quad (2.19)$$

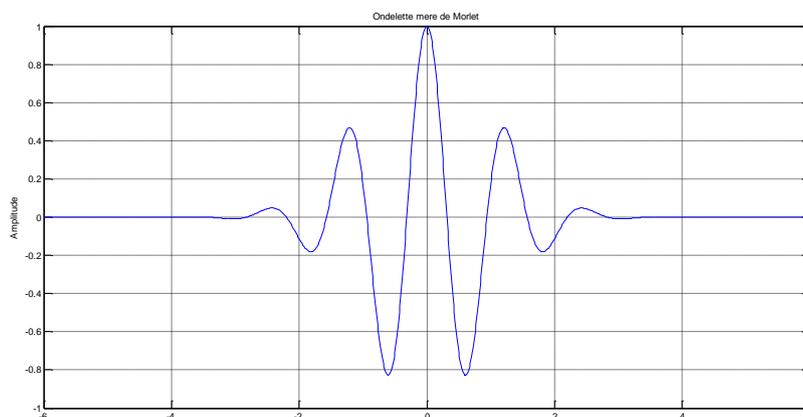


Figure 2.2 : Ondelette mère de Morlet

L'ondelette de Morlet dilatée par 'a' et translâtée par 'b', a pour expression mathématique :

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} e^{-\frac{(t-b)^2}{2a}} * \cos(5 * \frac{t-b}{a}) \tag{2.20}$$

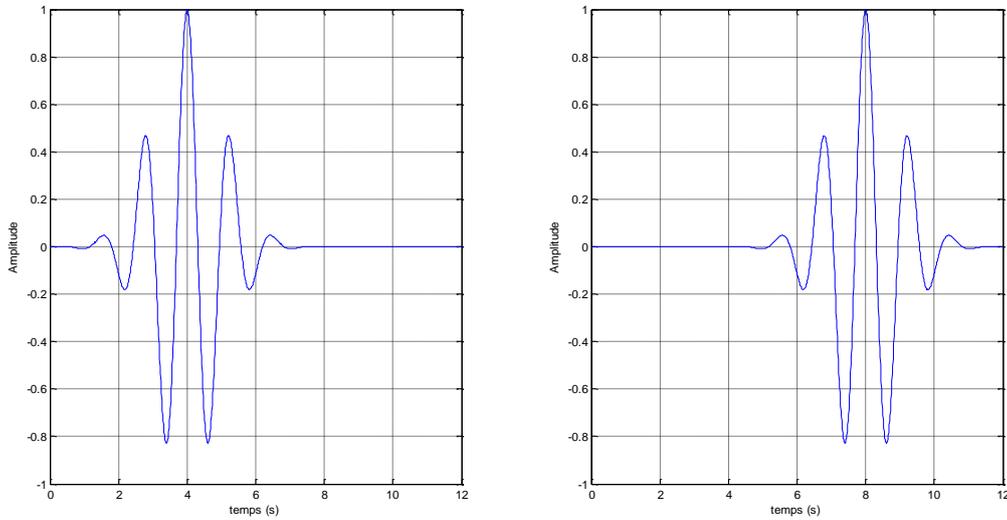


Figure 2.3 : Représentation temporelle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la translation pour a=1(à gauche b=4 et à droite b= 8)

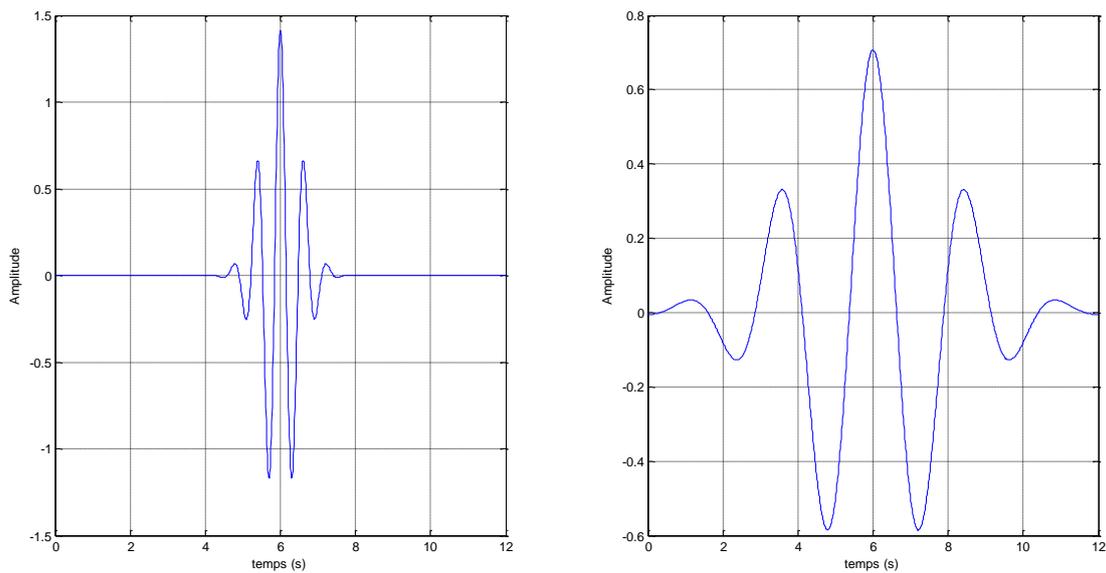


Figure 2.4 : Représentation temporelle de l'ondelette de Morlet sous l'effet de la dilatation pour b=6(à gauche a=0.5 et à droite a= 2)

Le facteur d'échelle (dilatation) est lié à la fenêtre analysante de l'ondelette. Une longue fenêtre veut dire une vue globale tandis qu'une courte veut dire une vue de détails. La translation est l'opération de glissement de l'ondelette tout au long du signal.

2.4.3.2 Calcul des coefficients de la CWT

La CWT calcule la corrélation entre le signal d'intérêt et une ondelette $\psi(t)$ modifiée. Ainsi, plus la portion de signal analysée et l'ondelette $\psi_{ab}(t)$ sont similaires et plus la valeur des coefficients sera élevée. L'obtention d'une CWT consiste en l'application successive de cinq étapes [47] :

- Choix d'une ondelette mère.
- On compare l'ondelette choisie et le premier segment du signal.
- On translate l'ondelette vers la droite sur l'axe temporel et répétition des étapes 1 et 2 jusqu'à atteindre la fin du signal.
- Mise à l'échelle (dilatation) de l'ondelette et répétition des étapes 1 à 3.
- Répétition des étapes 1 à 4 pour toutes les échelles.

2.4.4 Transformée en ondelettes discrète(DWT)

Il est facile de constater que la transformée en ondelettes continue est infiniment redondante car le facteur d'échelle 'a' et le pas de translation 'b' sont des réels, de plus cette transformée résulte du déplacement continu d'une fenêtre, dont les dimensions sont également continûment modifiées, le long du signal d'intérêt. Les fonctions de base dans le domaine continu ne possèdent pas la propriété d'orthogonalité ce qui entraîne une importante redondance dans les coefficients obtenus. Il s'agit donc d'élaborer des méthodes pour extraire rapidement l'information essentielle de ces transformées redondantes, Il est donc évident qu'une discrétisation de la transformée doit être envisagée si on souhaite obtenir une transformation non redondante [49-51].

2.4.4.1 Définition

La transformée en ondelette discrète est basée sur la décomposition d'un signal en sous bandes de fréquences ; elle permet un gain de calcul et une facilité d'implémentation grâce à l'analyse multi-résolution

2.4.4.2 Expression mathématique

Afin d'appliquer la transformée en ondelette aux signaux discrets, il convient de discrétiser la fonction ψ en utilisant des valeurs prises sur une grille discrète.

On impose donc une grille de valeurs discrètes prises par la fonction ψ . On pose $a = a_0^m$ et $b = nb_0a_0^m$ avec $a_0 > 1$, m et n sont des entiers naturels.

La transformée en ondelette discrète à pour expression mathématique [49]:

$$DWT_f(m, n) = CWT_f(a = a_0^m, b = nb_0a_0^m) = a_0^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi^*(a_0^{-m}t - nb_0) dt \quad (2.21)$$

ψ est l'ondelette mère dilatée par le paramètre a_0^m et translatée par $nb_0a_0^m$.

Si on choisit $a_0 = 2$ et $b_0 = 0$, on a alors :

$$DWT_f(m, n) = 2^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*(2^{-m}t) dt \quad (2.22)$$

Certaines ondelettes peuvent être générées par analyse multi-résolution (AMR). Nous allons voir dans le paragraphe suivant comment les coefficients de la transformée en ondelettes discrète d'un signal peuvent être obtenus par l'AMR.

2.4.4.3 Analyse multi-résolution

L'analyse multi-résolution permet de décomposer le spectre du signal en différentes bandes de fréquences grâce aux ondelettes et à la fonction d'échelle, ce qui donne une vue de la plus fine à la plus grossière c'est-à-dire une représentation d'une à plusieurs niveaux de détails.

L'idée est de diviser le spectre du signal par l'application de deux filtres ; un passe haut et un passe-bas de même largeur de bande.

Algorithme pyramidal

La structure pyramidale constitue une propriété intéressante à exploiter pour la transformée en ondelette discrète qui est plus connue sous le nom de chaîne de filtre logarithmique ; celle-ci est composée d'une paire de filtres, l'un étant passe-bas et l'autre passe-haut. Lorsqu'un signal est décomposé avec la DWT, il passe obligatoirement par ces deux filtres LF et HF en subissant un algorithme de sous échantillonnage ; ceci induit une séparation des composantes de basses fréquences appelées approximations et des composantes de hautes fréquences appelées détails. L'approximation est à son tour décomposée lors de son passage par la paire de filtres LF et HF. La reconstruction du signal s'effectue grâce à l'algorithme de sur-échantillonnage nommé transformée en ondelette inverse (IDWT) (Figure 2.5).

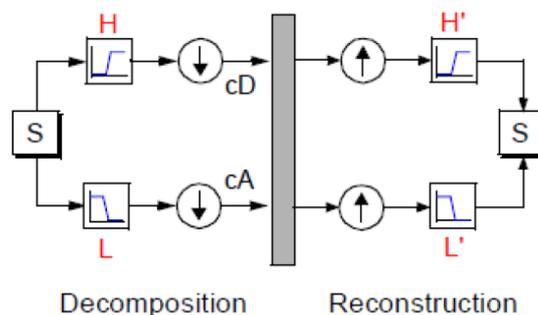


Figure 2.5 : Schéma de décomposition et de reconstruction d'un signal

La figure (2.6) illustre le principe de cet algorithme dans laquelle S est le signal de départ ainsi que C_{a_i} et C_{d_i} sont les coefficients d'approximation et de détail du niveau i [52]. Le signal original ayant subi ici une décomposition de niveau N est récupérée en sommant les coefficients d'approximation du $N^{\text{ème}}$ niveau à tous les coefficients de détail obtenus depuis le 1^{er} jusqu'au $N^{\text{ème}}$ niveau.

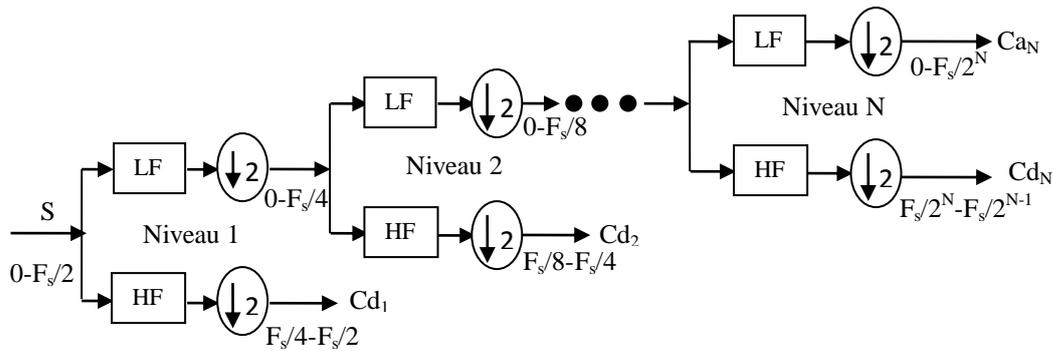


Figure 2.6 : Schéma de décomposition multi-niveaux par DWT

La procédure de décomposition impose un découpage systématique du signal original à chaque passage par la paire de filtres, laissant ainsi le signal sortant avec des fréquences $F_s/2$, $F_s/4$, $F_s/8$, ..., $F_s/2^N$, correspondantes aux niveaux 1, 2, 3, ..., N.

F_s représente la fréquence d'échantillonnage du signal original.

2.4.4.4 Niveau maximal de décomposition

En général, le niveau de décomposition d'un signal par DWT est limité à

$$J = \text{fix}(\log_2 N) \tag{2.23}$$

N est la longueur du signal échantillonné et la fonction fix donne le nombre entier le plus proche de la valeur obtenue après calcul du logarithme à base 2 de N .

Néanmoins, comme nous utiliserons le logiciel MATLAB, le nombre de niveaux maximal possible est alors restreint par la longueur du filtre implémenté par une ondelette à

$$J_{max} = \text{fix}(\log_2(\frac{N}{N_w} - 1)) \tag{2.24}$$

N_w Correspond à la longueur du filtre de décomposition associé à l'ondelette mère choisie [50].

La décomposition d'un signal au-delà de J_{max} est sans intérêt et constitue une perte de temps.

Le niveau de décomposition est très souvent sélectionné soit par essais ou soit selon les bandes de fréquences déterminées par la fréquence d'échantillonnage.

2.4.4.5 Choix de l'ondelette mère

La sélection de l'ondelette mère utilisée pour analyser un signal joue un rôle primordial pour la compréhension des phénomènes transitoires comme les impulsions de décharges électriques observées sur le courant de fuite. Un simple critère permettant la détermination de l'ondelette optimale consiste à calculer le coefficient de corrélation entre le signal et les différentes ondelettes existantes. Plus la corrélation sera élevée, meilleure sera la

similarité entre les formes d'ondelette et du signal. Il est cependant connu que les ondelettes db4 et db6 sont plus appropriées pour la détection des perturbations de courtes durées alors que les ondelettes db8 et db10 sont adéquates pour l'étude des perturbations de relatives longues durées [53].

2.5 Recurrent plot (RP)

Les processus naturels peuvent avoir un comportement récurrent distinct, par exemple des périodicités, mais aussi cyclicités irrégulières. En effet, la récurrence est une propriété fondamentale des systèmes dynamiques. Un outil puissant pour leur visualisation et l'analyse appelé recurrent plot (ou diagramme de récurrence en français) a été introduite à la fin des années 1980. Cette méthode représente l'aspect qualitatif de la théorie du chaos. En se basant sur l'étude de la récurrence d'états d'un système dynamique, cette méthode permet une reconstruction sans pertes des données, et donne un aperçu immédiat de l'état du processus étudié. Par ailleurs, l'analyse quantitative de récurrence (RQA), permet de quantifier le comportement d'un système dynamique dans un espace de phase bien défini, en décrivant ces récurrences à l'aide de différentes mesures plus ou moins complexes.

Avant de passer à la description de cette méthode, nous allons donner un bref aperçu sur la théorie du chaos, ainsi que quelques définitions et généralité concernant les systèmes dynamiques, pour décrire les différentes structures du RP.

2.5.1 Théorie du chaos

La théorie du chaos est l'étude des systèmes, souvent très simples à définir, mais dont la dynamique nous apparait comme très désordonnée ou chaotique. Un système dynamique est dit chaotique si une portion « significative » de son espace des phases présente simultanément les deux caractéristiques : le phénomène de sensibilité aux conditions initiales, et une forte récurrence. Bien que, les phénomènes de sensibilité aux conditions initiales ont été découverts et étudiés à la fin du 19ème siècle par H. Poincaré. La théorie c'est véritablement développé qu'à partir des années soixante, lorsque Edward Lorenz, professeur de mathématique au MIT (Massachusetts Institut of Technology) et père de la théorie du chaos [54], montra le caractère chaotique de l'atmosphère terrestre, en montrant qu'une modification infime des données initiales pouvait changer radicalement l'évolution météorologique. Ainsi, en 1961, Lorenz venait de mettre en évidence l'une des principales caractéristiques du chaos : l'extrême sensibilité aux conditions initiales [55].

On peut définir la théorie du chaos comme l'étude du comportement des systèmes dynamiques qui sont très sensibles aux conditions initiales, et qui, modulant une propriété supplémentaire de récurrence, les rend non prédictibles en pratique à « long » terme [48]. Le phénomène d'extrême sensibilité aux conditions initiales est généralement illustré par l'effet papillon avec la célèbre citation de Lorenz : « le battement d'aile d'un papillon aujourd'hui à Pékin engendre dans l'air suffisamment de remous pour influencer sur l'ordre des choses et provoquer une tempête le mois suivant à New York » [56].

2.5.2 Système dynamique

Un système dynamique est un système physique qui évolue. Il peut évoluer dans le temps ou par rapport à une autre variable suivant l'espace de phases considéré (on reviendra sur le terme 'espace de phases' dans ce chapitre). La trajectoire d'un objet en mouvement dans le temps est donc un système dynamique, ainsi que le nombre d'individu d'une population quelconque dans le temps, ou encore les valeurs d'une fonction (par exemple : $y = 2x$) par rapport à la valeur de x [57, 56].

2.5.2.1 Modèle déterministe, modèle stochastique et modèle chaotique

Les systèmes dynamiques sont de 3 natures différentes : système déterministe, système aléatoire (ou stochastiques) et système chaotique.

- **système déterministe** : c'est les systèmes régi par des phénomènes physique bien connu et facilement modélisable, ce qui rend prévisible leur évolution dans le temps avec une très fine marge d'erreur.
- **Système aléatoire** : ces systèmes au contraire des systèmes précédents évolue au hasard dans tout l'espace, de façon qu'on ne peut pas établir d'équation régissons leur comportement. Ce qui rend impossible toute prévision de leurs évolutions dans le temps.
- **Système chaotique** : Les systèmes chaotiques, quant à eux, ont un comportement infiniment complexe. La trajectoire qu'ils décrivent se rapproche d'une figure géométrique de structure également infiniment complexe sur laquelle ils semblent errer au hasard, mais sans jamais la quitter, ni repasser deux fois par le même point. Les attracteurs qui caractérisent ces systèmes semblent inclure à la fois des lois déterministes et des lois aléatoires, ce qui rend impossible toute prévision à long terme.

2.5.2.2 Espace des phases

Pour suivre l'évolution de l'état d'un système dynamique, préalablement décrit avec des lois physiques, on définira à un instant donné un point dans un repère. Ce point caractérise l'état du système dans l'espace à cet instant. Cet espace est appelé « l'espace des phases » de dimension. Lorsque la variable d'évolution change de valeur (quand le temps s'écoule, par exemple), le point figurant à l'état du système décrit en général une courbe dans cet espace.

2.5.2.2.1 Construction de Ruelle-Takens

Pour un vecteur \vec{x} décrit dans un espace de phases à N dimension, il est pratiquement impossible de mesurer toutes ces composantes. Ainsi, en 1981, Ruelle et Takens [58] prouvent qu'il est possible de reconstruire l'attracteur d'une série temporelle. Avec un espace de phases reconstruit en un espace d'immersion de dimension m inférieur et avec un vecteur d'immersion [59] définit comme suit :

$$\vec{x}(t_i) = [(x(t_i), x(t_i - \tau), \dots, x(t_i - (m - 1) \cdot \tau)]$$

Avec m : la dimension d'immersion

τ : Le retard ou pas

$x(t_i)$ La valeur de la série temporelle a l'instant t_i

Dès lors, avec cette reconstruction nous pouvons avoir une idée sur le comportement d'un système non-linéaire, en étudiant sa reconstruction dans un espace d'immersion reproduit par une série temporelle, pourvu que l'on connaisse les deux paramètres ' m ' et ' τ ' [60].

Il existe différentes méthodes [61-66] qui sont utilisé pour l'estimation de ces deux paramètres. Pour la dimension d'immersion ' m ', nous pouvons citer :

- False Nearest Neighbours
- Bad Prediction Method
- Fractal and Correlation Dimensions.

Et pour le calcul du paramètre retard ' τ ', les méthodes utilisées sont :

- Autocorrelation and Power Spectrum Functions
- Average Mutual Information (AMI) Function
- Degree of Separation Function
- les exposants de Lyapunov.

Toutes les méthodes évoquées sont des méthodes analytiques, il existe en plus de celle-ci des méthodes numérique qui sont largement utilisé nous citons parmi eux : « les réseaux de neurones » et les algorithmes génétiques. Et parmi les méthodes numérique une méthode réputé pour son efficacité la « C-C méthodes » [67], elle offre aussi l'avantage de la détermination simultanée des deux paramètres ' m ' et τ .

2.5.3 Diagramme de récurrence (RP)

2.5.3.1 Définition

Comme cité plus haut, H. Pointcarré, en 1890, fut le premier a traité du phénomène fondamental d'instabilité appelé « sensibilité aux conditions initial », qui en plus a introduit le concept de point récurrent [68], ce qui rendait impossible toute prédiction à long terme de l'évolution des systèmes dynamique. Mais il faudra attendre plus de 70 ans, et le développement des ordinateurs et des machines de calcul pour pouvoir exploiter pleinement cette théorie.

En 1987, Eckmann et al [69] ont introduit la méthode des RP pour visualiser les récurrences des systèmes dynamiques. Supposons qu'on ait une trajectoire $\{\vec{x}_i\}_{i=1}^N$ d'un système dans son espace de phase [70]. Ainsi, la RP est construit comme suit : chaque point de l'espace de phase x_i est testé s'il est proche ou non d'un autre point x_j . Ainsi, si la distance entre ces deux points est inférieurs à un seuil ε prédéfini, les points sont dits

récurrents et sont associés à un point noir. Dans le cas contraire, ils sont non récurrents et sont associés à un point blanc. Cela se traduit par une matrice $N \times N$, telle que :

$$R_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } \vec{x}_i \approx \vec{x}_j, \\ 0 & \text{si } \vec{x}_i \neq \vec{x}_j, \end{cases} \quad i, j = 1, \dots, N.$$

Où N représente le nombre d'état considérés, $\vec{x}_i \approx \vec{x}_j$ indique l'égalité avec une certaine erreur ε .

Ainsi, on peut réécrire l'équation précédente sous forme matricielle

$$R_{i,j}(\varepsilon) = \Theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \quad i, j = 1, \dots, N.$$

Où N est le nombre de point \vec{x}_i mesurés, ε le seuil, $\Theta(\cdot)$ est la fonction de Heaviside ou échelon ($\Theta(x) = 0$ si $x < 0$ et $\Theta(x) = 1$ sinon) et $\|\cdot\|$ représente la norme.

Pour un ε fixé, on introduit la notion suivante :

$$\vec{x}_i \approx \vec{x}_j \Leftrightarrow R_{i,j} = 1$$

Puisque $R_{i,i} = 1$, par définition, le diagramme de récurrence se caractérise par une ligne noire diagonale, appelé « la ligne d'identité » (Line Of Identity, (LOI)), avec un angle de $\pi/4$.

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 [71].

2.5.3.2 Structures dans la Recurrent plot

L'objectif principal de RP (reccurent plot) est de fournir une forme visuelle au phénomène de récurrence. Ainsi selon le comportement du système dynamique, on peut avoir 4 types de RP, et cela dépendamment de leurs structures :

- Diagramme homogènes (figure 2.7.A)
- Diagramme périodique et quasi-périodiques (figure 2.7.B)
- diagramme dévié (figure 2.7.C) : une déviation est causée par des systèmes à faible variations des paramètres (systèmes non stationnaires)
- diagramme interrompu (figure 2.7.D): les changements abrupts causent des surfaces blanches sur le diagramme [72-74].

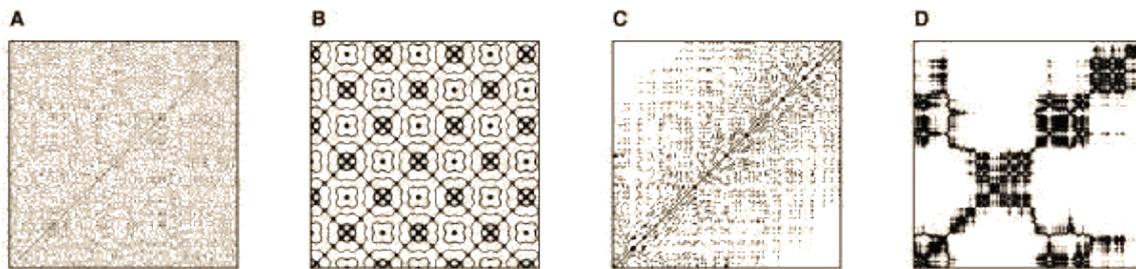


Figure 2.7 : Topologie caractéristique des diagrammes de récurrence
(a) Homogène, (b) périodique, (c) dévié et (d) interrompu.

Une analyse approfondie de l'RP révèle de petites structures à grande échelle (la texture) qui sont des points simples, des lignes diagonales ainsi que verticales et des lignes horizontales. Un « point récurrent » signifie que la distance entre deux vecteurs voisins dans l'espace de phase est inférieure ou égale à la valeur du seuil. La diagonale principale existe dans toutes les structures, ce qui correspond au fait que la distance entre le vecteur et la diagonale elle-même est nulle. Le point à la plus haute densité indique que la distance entre les vecteurs reconstruits dans l'espace de phase change légèrement. Il indique que les vecteurs incrustés sont très similaires aux vecteurs voisins dans m -dimensions d'espace de phase.

Résumant les derniers points mentionnés, nous pouvons établir la liste suivante des observations et de donner l'interprétation qualitative correspondante sur le Tableau 2.1 :

Exemples	Signification
(1) Homogénéité	Le processus est stationnaire.
(2) Éclaircissement des coins haut gauche et bas droit	Données non stationnaires ; le processus contient un mouvement ou un décalage.
(3) Disruptions (bandes blanches)	Données non stationnaires ; certains états sont rares ; présence de transitions.
(4) Modèle périodique/ quasi-Périodique	Processus cyclique ; la période correspond à la distance entre les lignes ; différentes distances entre les lignes diagonales révèlent un processus quasi-périodique.
(5) Points isolés	Forte fluctuation du processus ; si seuls les points isolés sont présents, le processus étudié est faiblement ou non corrélé.
(6) Points denses	La densité des points indique l'intensité du processus étudié. Si les points gagnent en densité, l'activité du processus étudié s'intensifie.
(7) Lignes diagonales (parallèles à la LOI)	L'évolution est similaire à d'autres périodes ; le processus peut être déterministe. Si ces lignes diagonales sont présentes à côté des points isolés, le

	processus peut être chaotique.
(8) Lignes diagonales (orthogonale à la LOI)	L'évolution est similaire à d'autres périodes mais en temps inverse ; parfois, cela indique une dimension d'immersion insuffisante.
(9) Lignes verticales et horizontales	Certains états présentent des changements peu nombreux ou lents ; indiquent des états laminaires.
(10) Lignes longues arquées	L'évolution est similaire à d'autres périodes mais à une vitesse différente ; la dynamique du système peut être variable.

Tableau 2.1 : Exemple typique de diagramme de récurrence et leurs significations

*Chapitre 3 : 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).

3.1 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.

L'objet d'essai ainsi que le dispositif expérimental sont donnés sur la figure 3.1 :

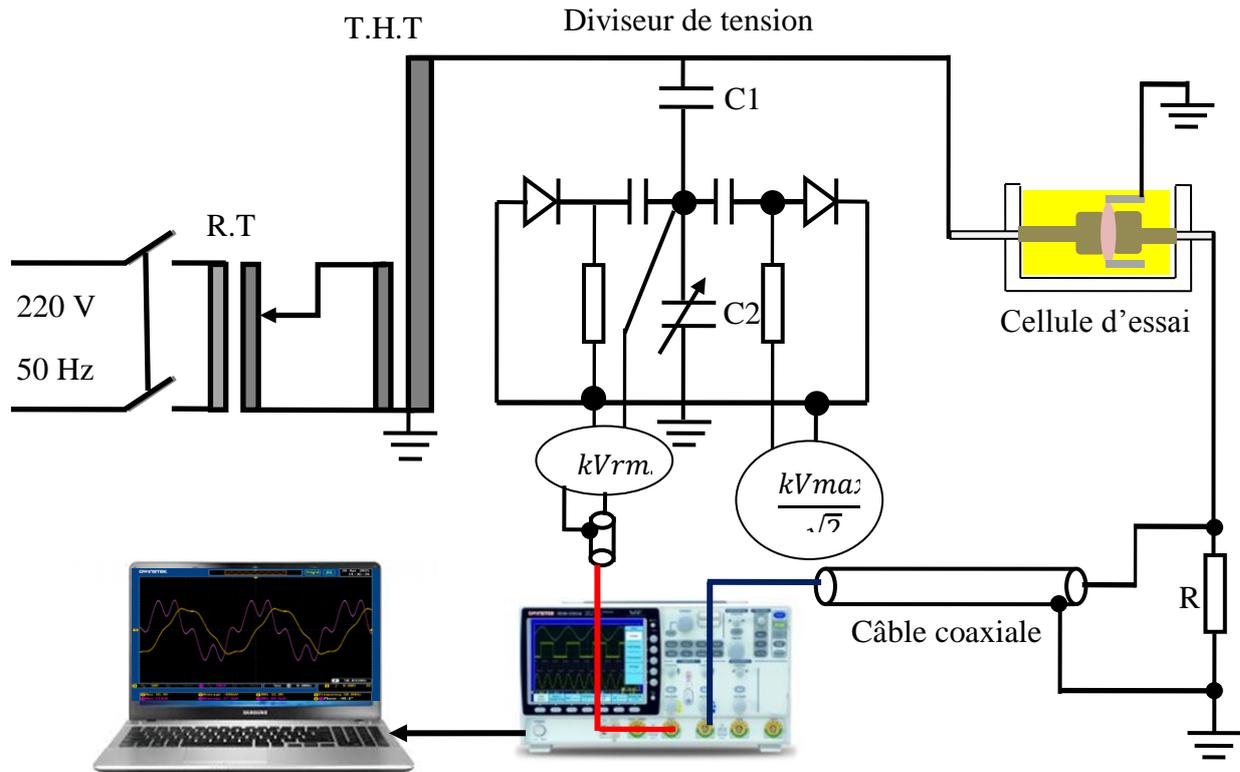


Figure 3.1 : Dispositif expérimental

3.2 Préparation des échantillons

3.2.1 Polychlorure de vinyle PVC

Des plaques carrées de PVC/B (c'est à dire PVC classe B) ont été fournies par l'usine CABEL (Câblerie Électrique d'Alger sis 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 [80]. 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 3.2 :



Figure 3.2 : 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 – Décy - 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.

3.2.2 Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC)

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. Même chose que le PVC/B 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 3.3 :



Figure 3.3 : Échantillon de PRC avant vieillissement

3.3 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 [77,78]. La durée totale du vieillissement est 2016 heures.

Après chaque période de 504 heures, 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 [79] 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.

3.4 Cellule d'essai

Les échantillons ont été montés dans une cellule d'essai (Figure 3.4) 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.

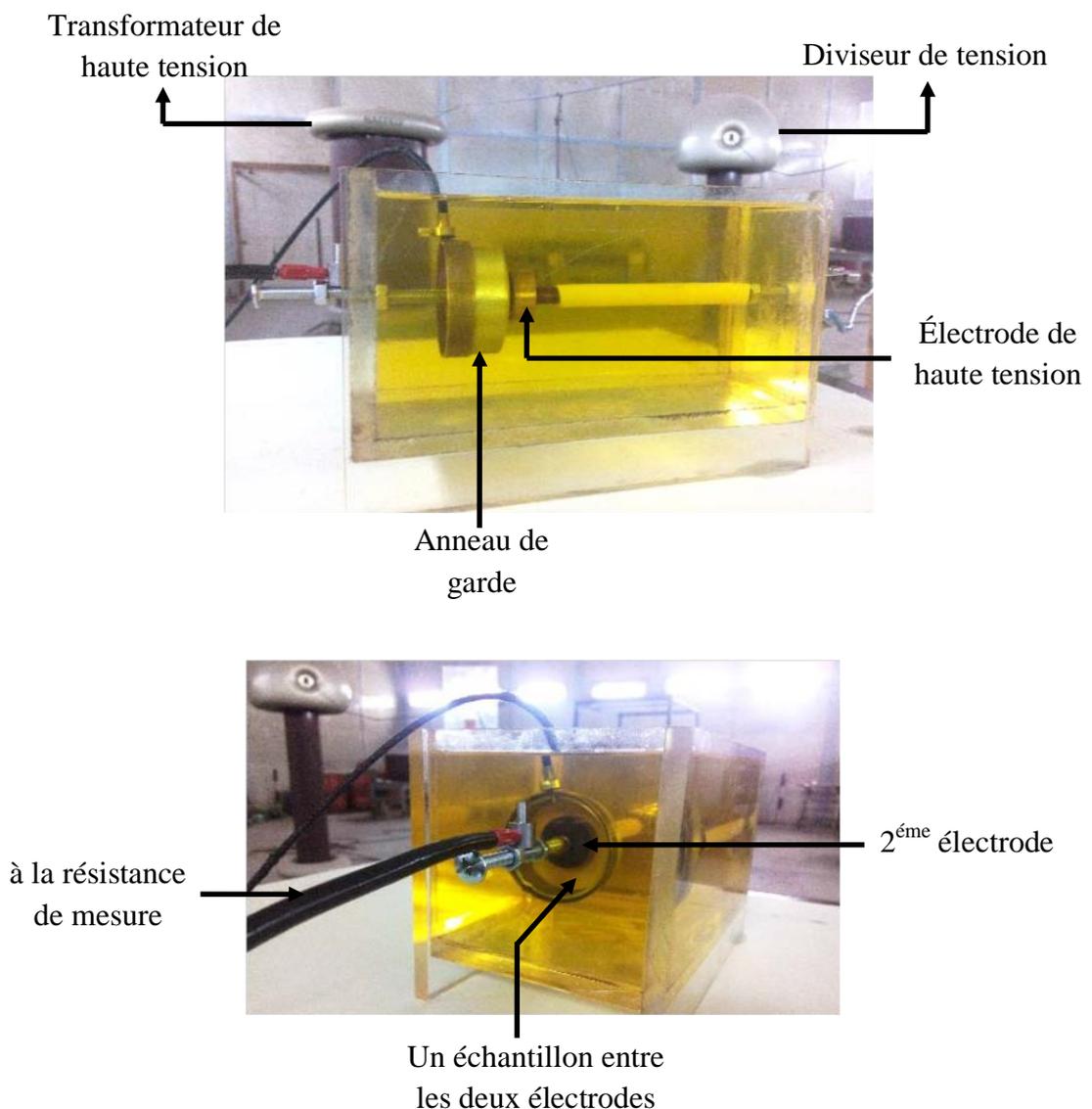


Figure 3.4: Cellule d'essai

Chapitre 4 : Résultats et discussions

Introduction

Le présent chapitre est consacré à l'analyse des résultats expérimentaux portant sur l'influence du vieillissement thermique sur les propriétés des matériaux polymères, tels que le polychlorure de vinyle (PVC/B) et le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) utilisés 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 Reccurrent Plot. Nous terminons ce chapitre par une discussion dans laquelle nous comparons les résultats obtenus par les trois méthodes.

4.1 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.

4.1.1 Polychlorure de vinyle (PVC/B)

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 4.1 et 4.2. 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.

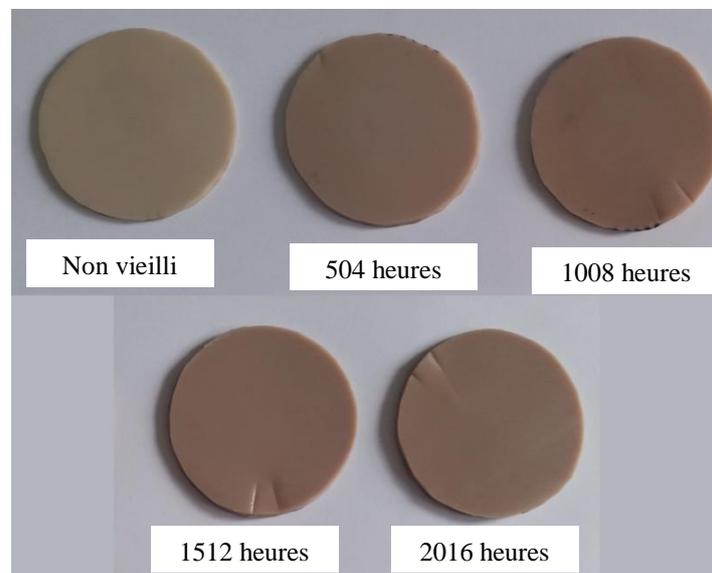


Figure 4.1: Changement de couleur du PVC au cours du vieillissement 80°C

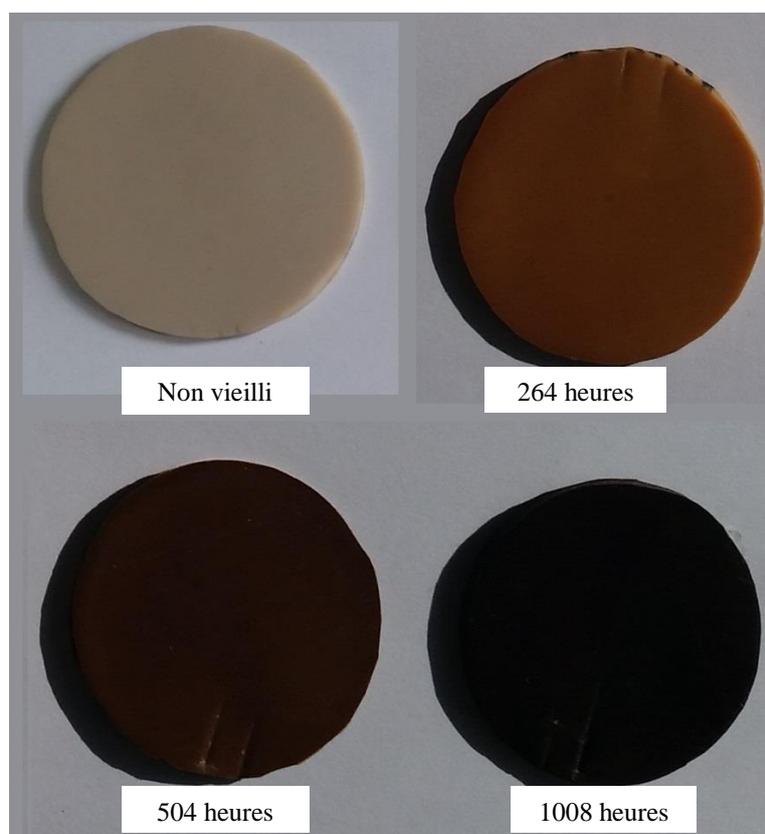


Figure 4.2: Changement de couleur du PVC au cours du vieillissement pour 120°C

4.1.2 Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC)

Nous avons représenté sur les figures 4.3 et 4.4 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 pratiquement aucun changement de couleur. En revanche pour la température 120°C, un changement significatif est observé.

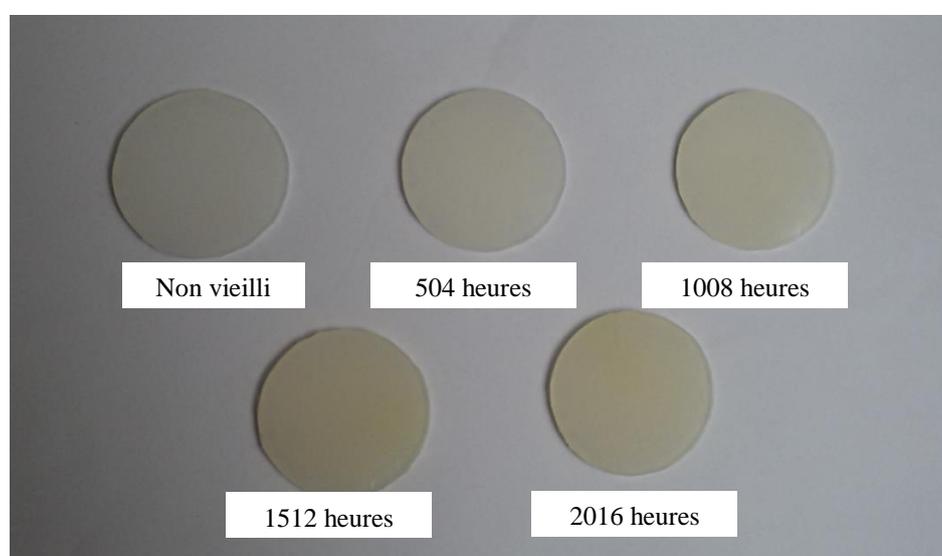


Figure 4.3: Changement de couleur du PRC au cours du vieillissement pour 80°C

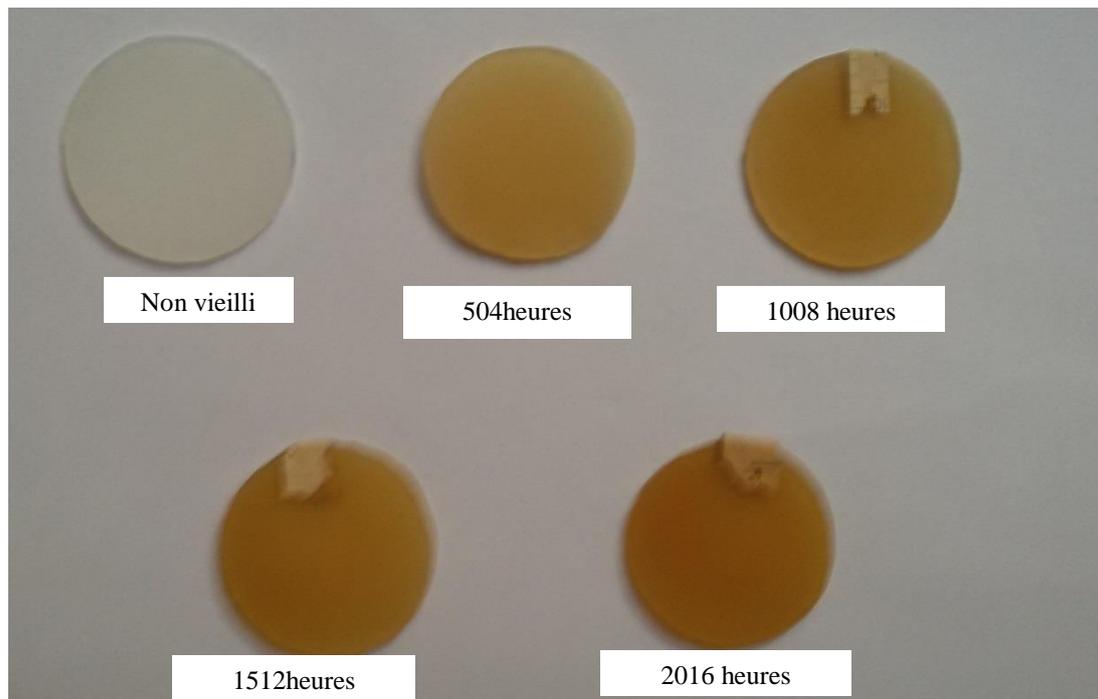


Figure 4.4: Changement de couleur du PRC au cours du vieillissement pour 120°C

4.2 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 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. Cette étude concerne aussi bien le PVC que le PRC.

4.2.1 Polychlorure de vinyle (PVC/B)

Les figures (4.5-4.10) 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}.

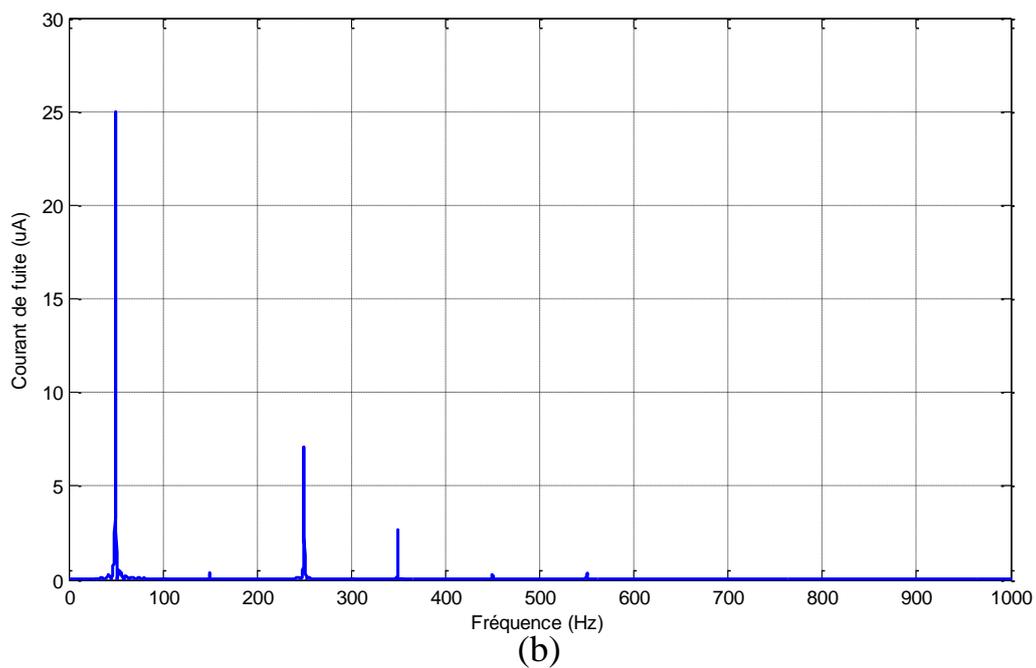
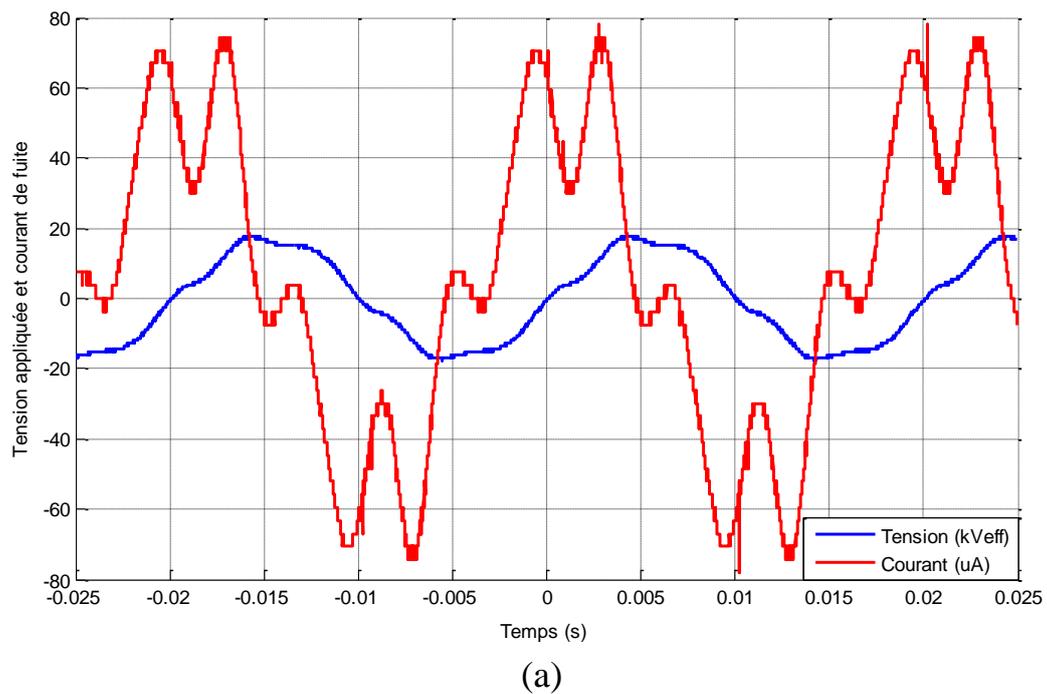


Figure 4.5 : (a) formes d’ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l’échantillon non vieilli, (b) spectre de fréquence du courant

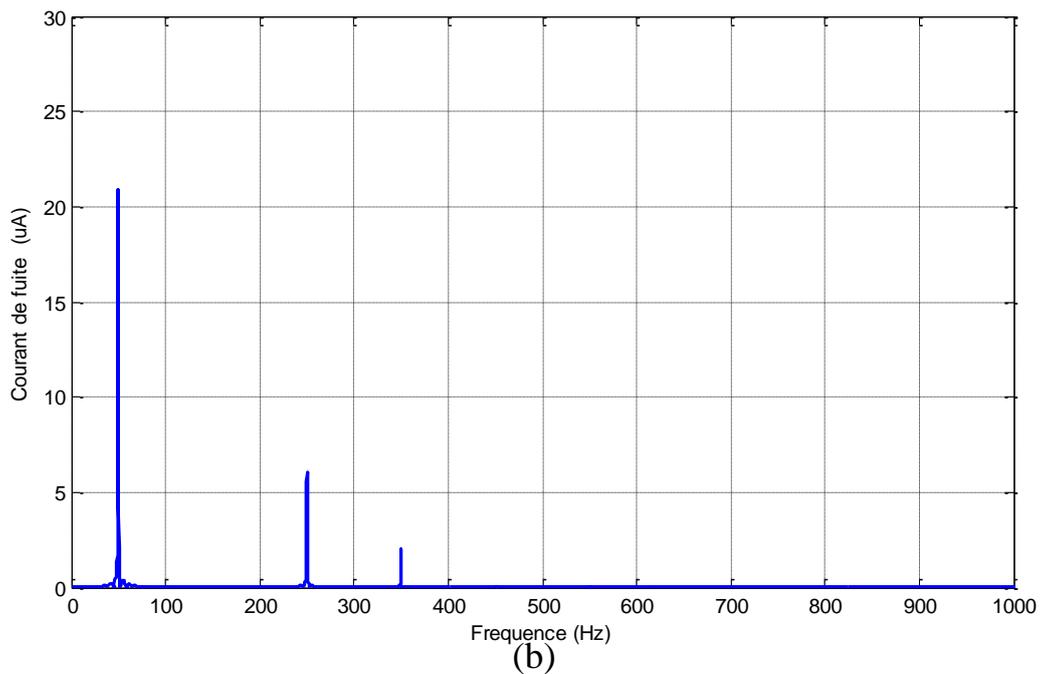
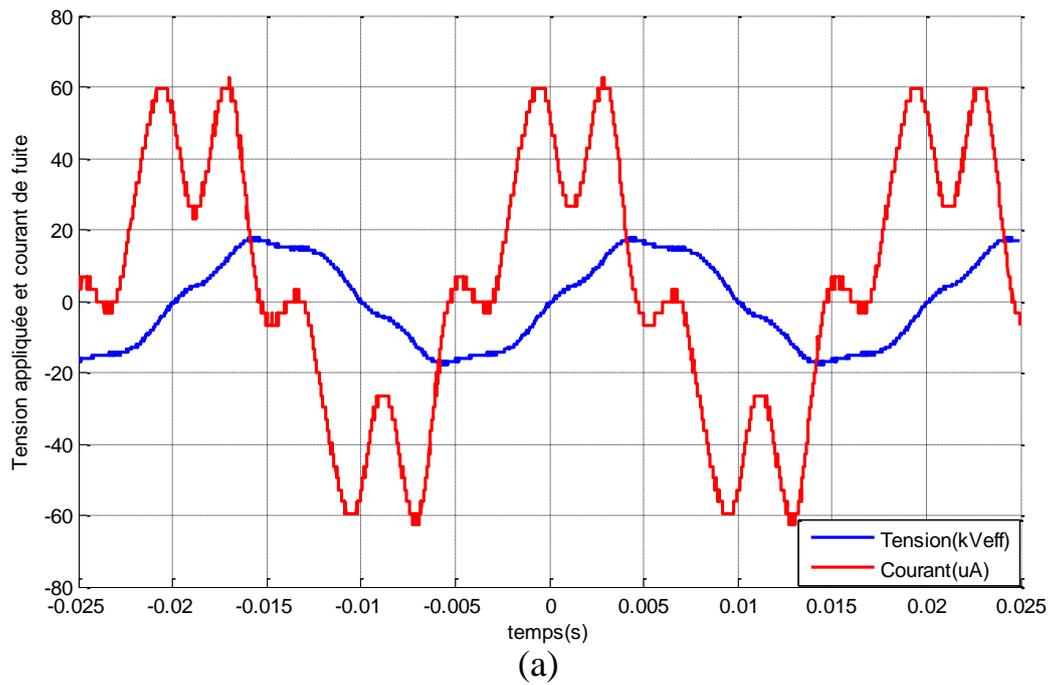


Figure 4.6 : (a) formes d’ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l’échantillon vieilli pendant 1008 heures sous 80°C, (b) spectre de fréquence du courant

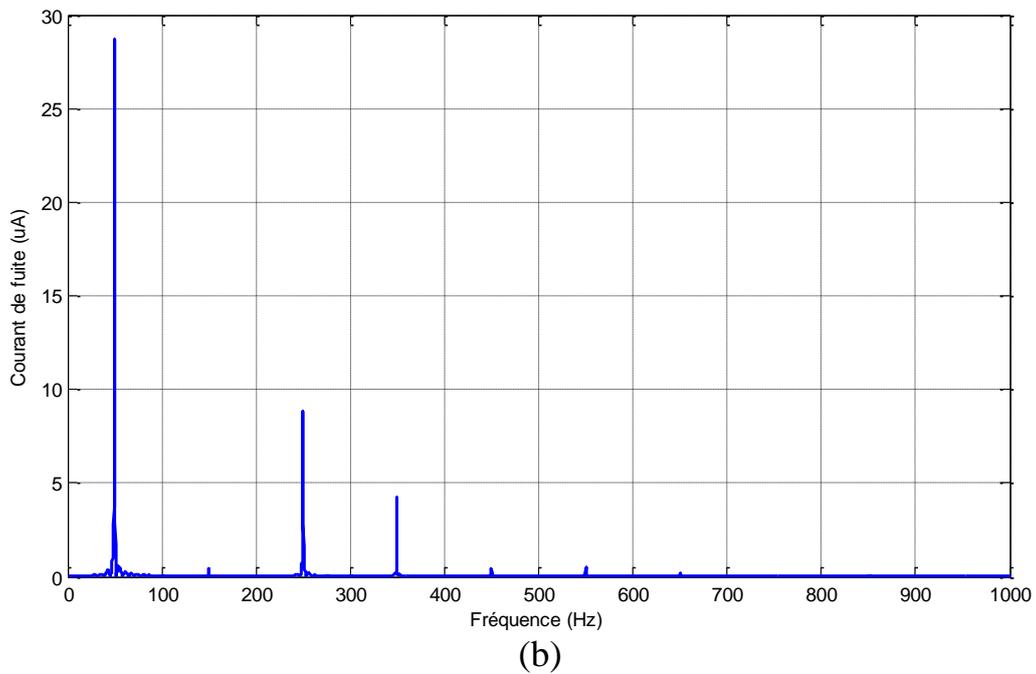
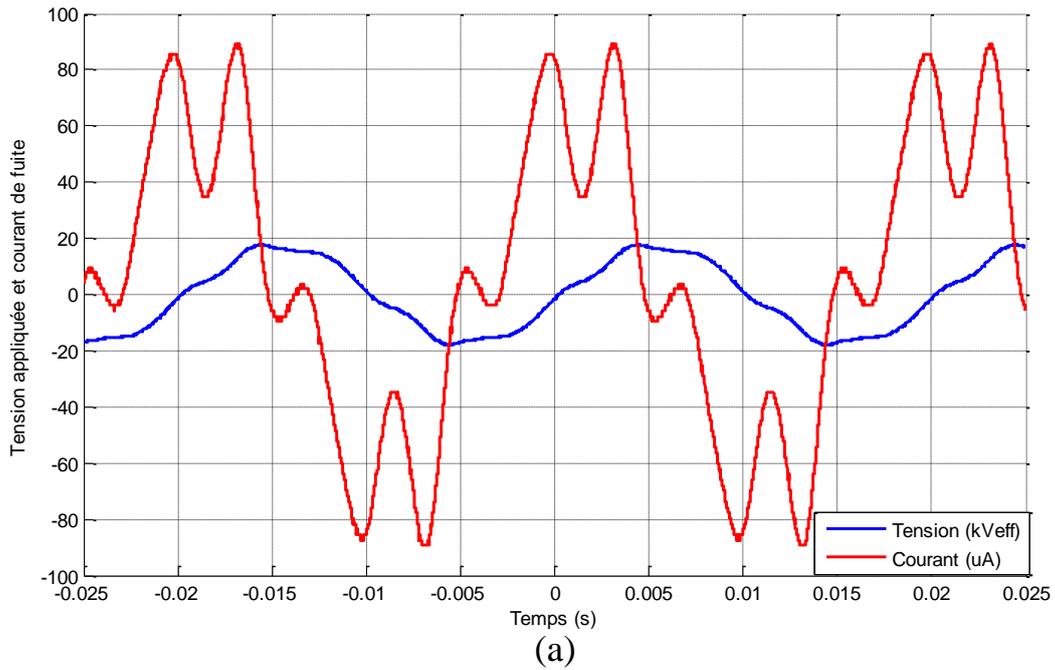


Figure 4.7 : (a) formes d’ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l’échantillon vieilli pendant 2016 heures sous 80°C, (b) spectre de fréquence du courant

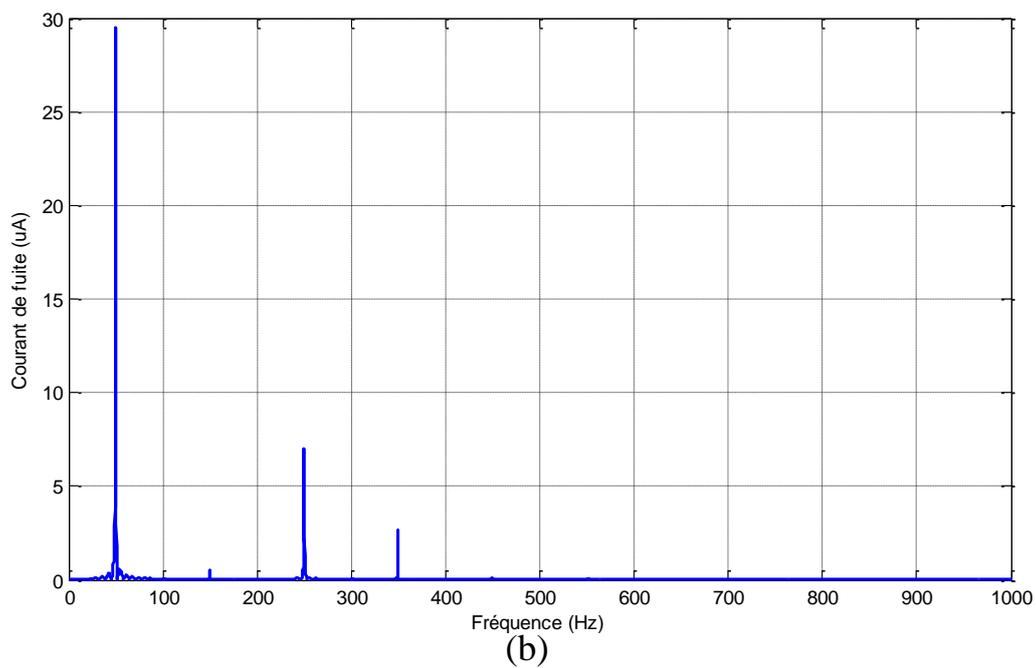
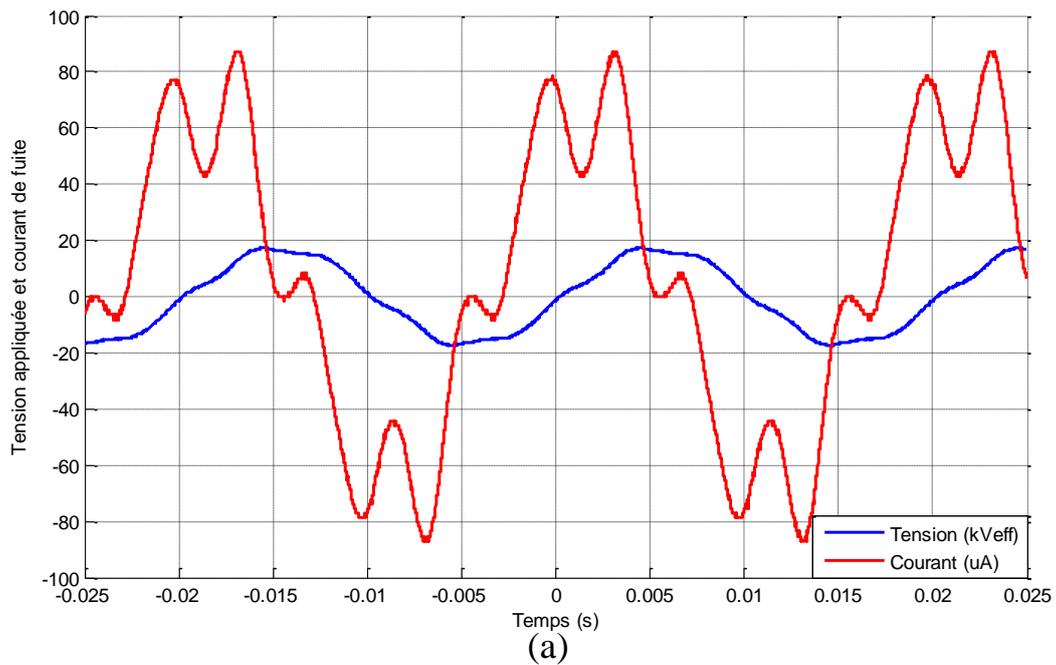


Figure 3.6 : (a) formes d’ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l’échantillon vieilli pendant 264 heures sous 120°C, (b) spectre de fréquence du courant

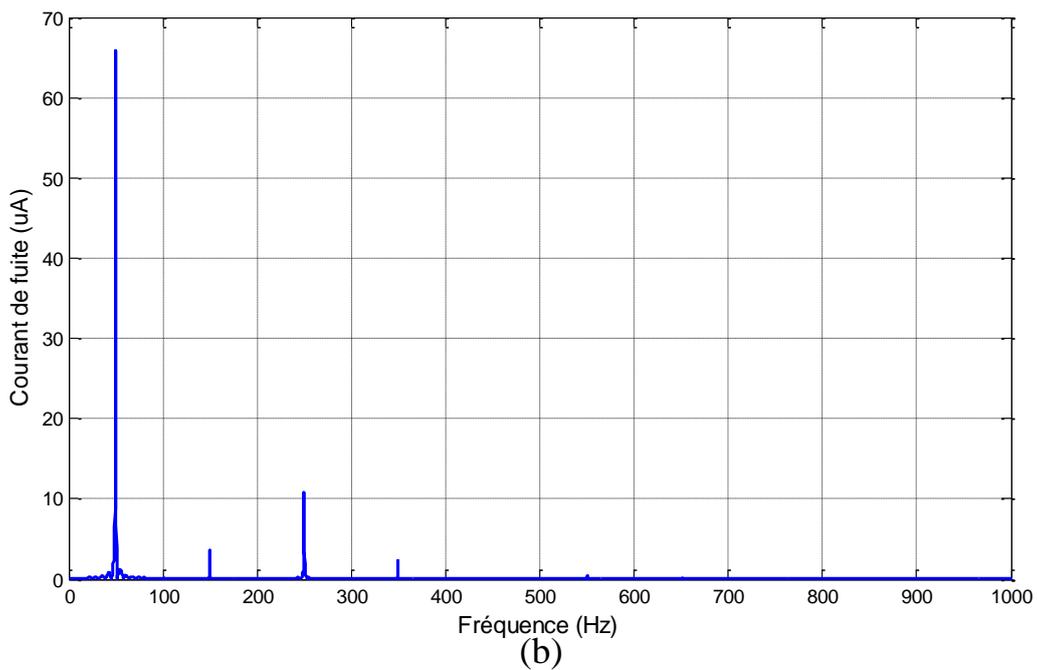
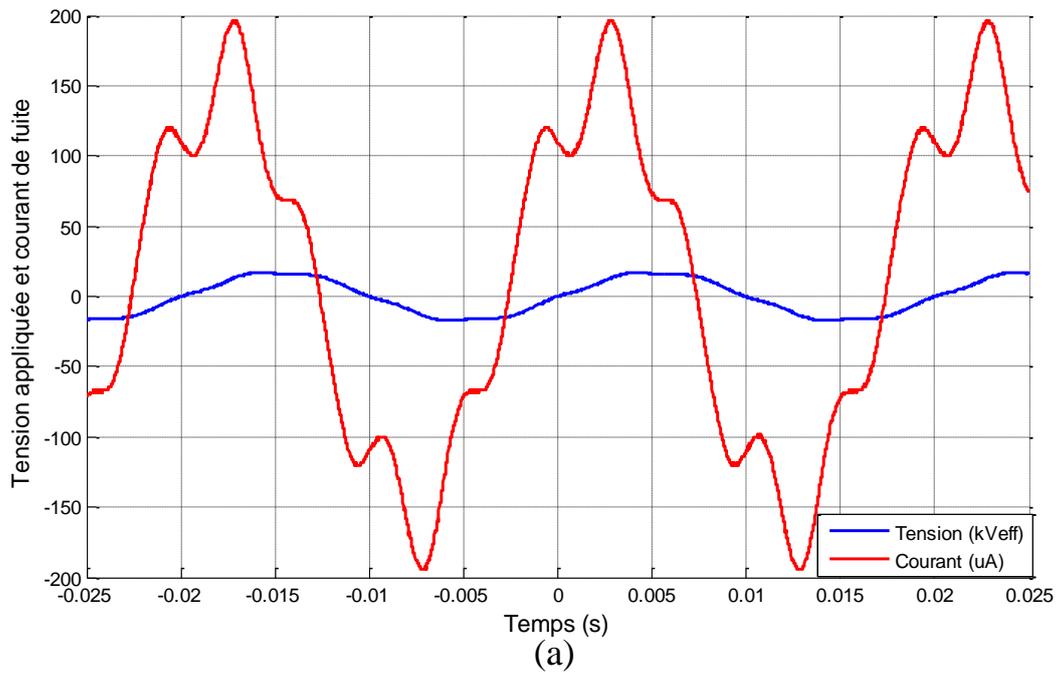


Figure 3.7 : (a) formes d’ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l’échantillon vieilli pendant 504 heures sous 120°C, (b) spectre de fréquence du courant

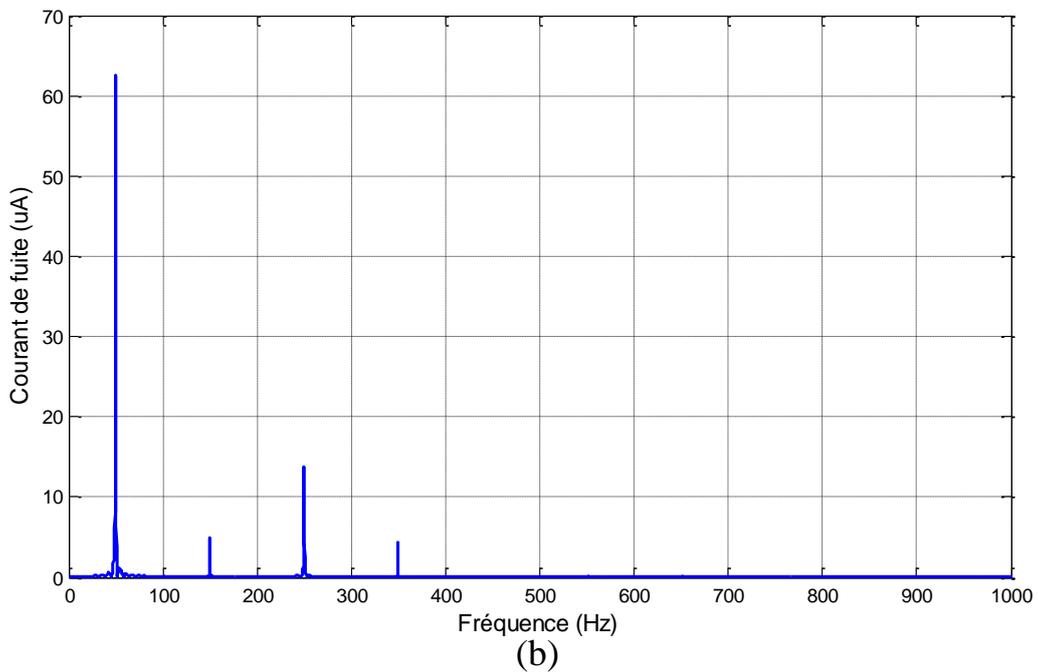
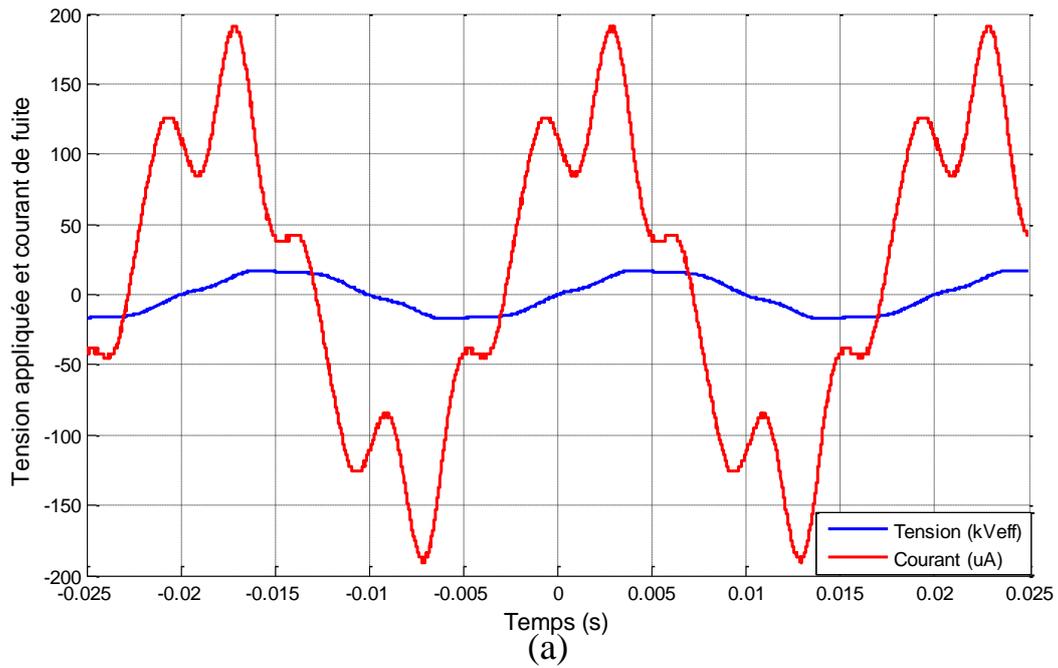


Figure 3.8 : (a) formes d’ondes de la tension appliquée et du courant de fuite pour l’échantillon vieilli pendant 1008 heures sous 120°C, (b) spectre de fréquence du courant

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 vieillissement 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.

4.2.1.1 Courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement

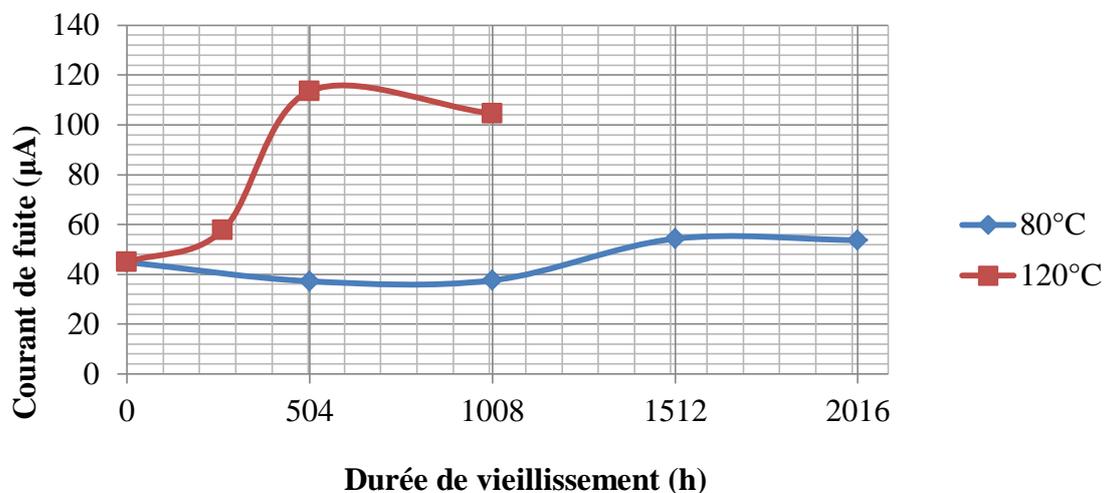


Figure 4.11 : Valeurs efficaces du courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement pour une tension appliquée de 12 kVeff

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 [83].

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

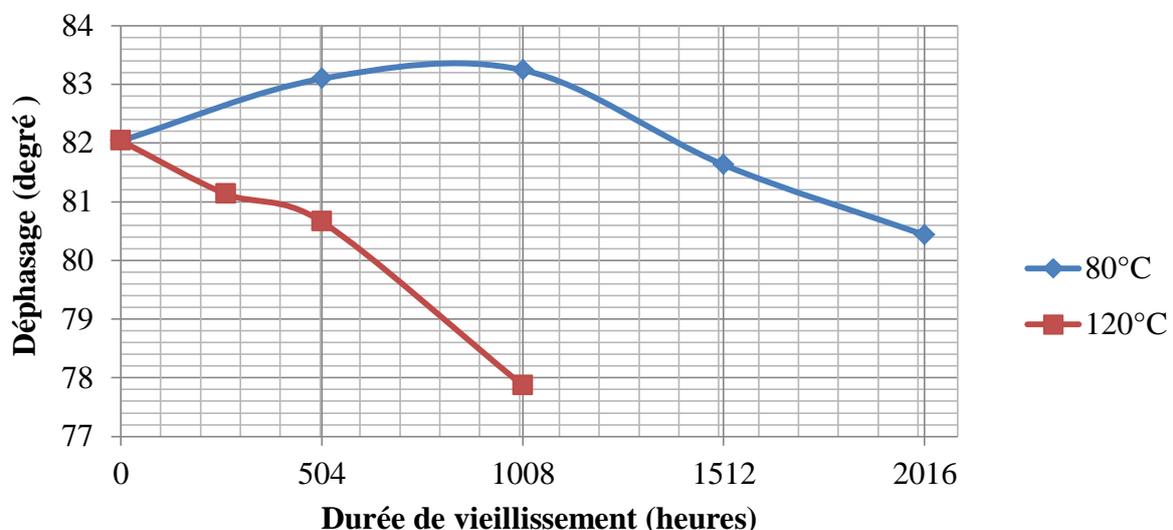


Figure 4.12: Déphasage entre le fondamental de la tension appliquée (12 kV) et du courant en fonction de la durée de vieillissement (à 80°C et 120°C)

Le déphasage entre les fondamentaux du courant de fuite et de la tension appliquée (pour 12 kV) représenté sur la figure (4.8), 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.

4.2.1.3 Taux de distorsion (THD)

L'une des solutions destinée à déceler 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 :

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H I_{h,RMS}^2}}{I_{1,RMS}} \quad (4.1)$$

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

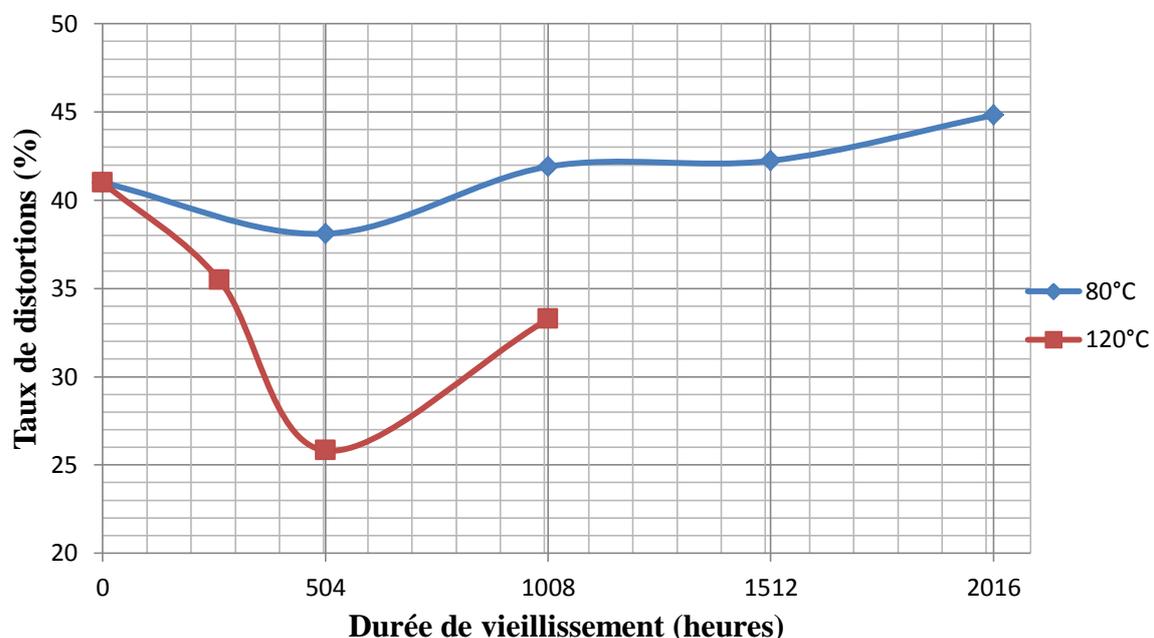


Figure 4.13: Taux de distorsion THD (%) en fonction de la durée de vieillissement (à 80°C et 120°C) pour une tension appliquée de 12 kVeff

Le taux de distorsion subit une légère diminution pour la première phase du 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.

4.2.2 Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC)

Les figures (4.14-4.18) 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}.

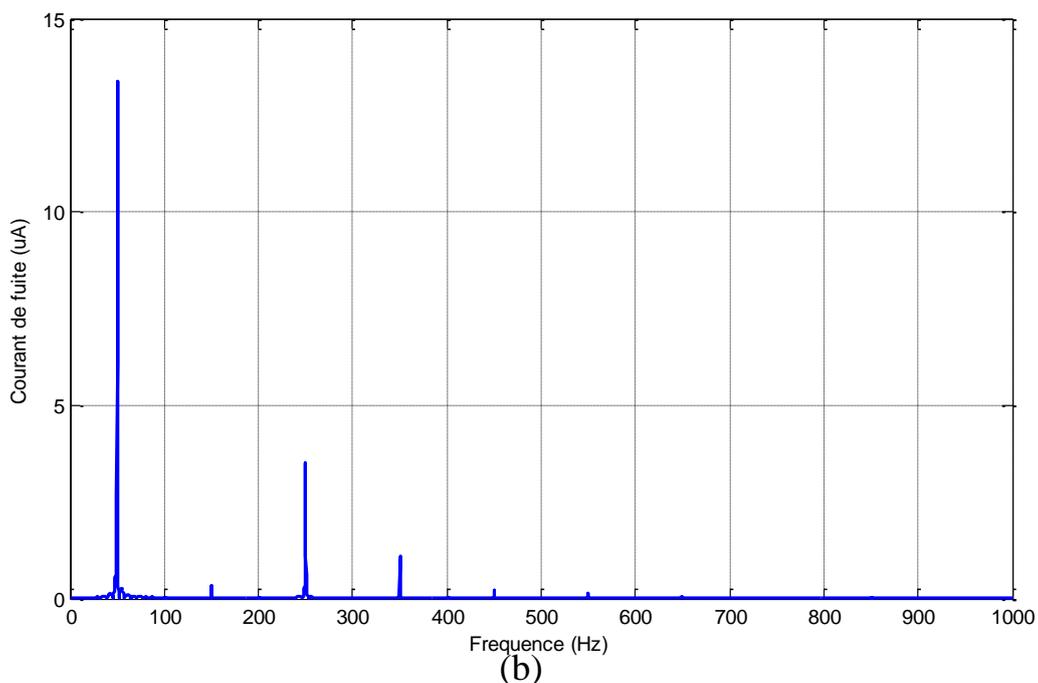
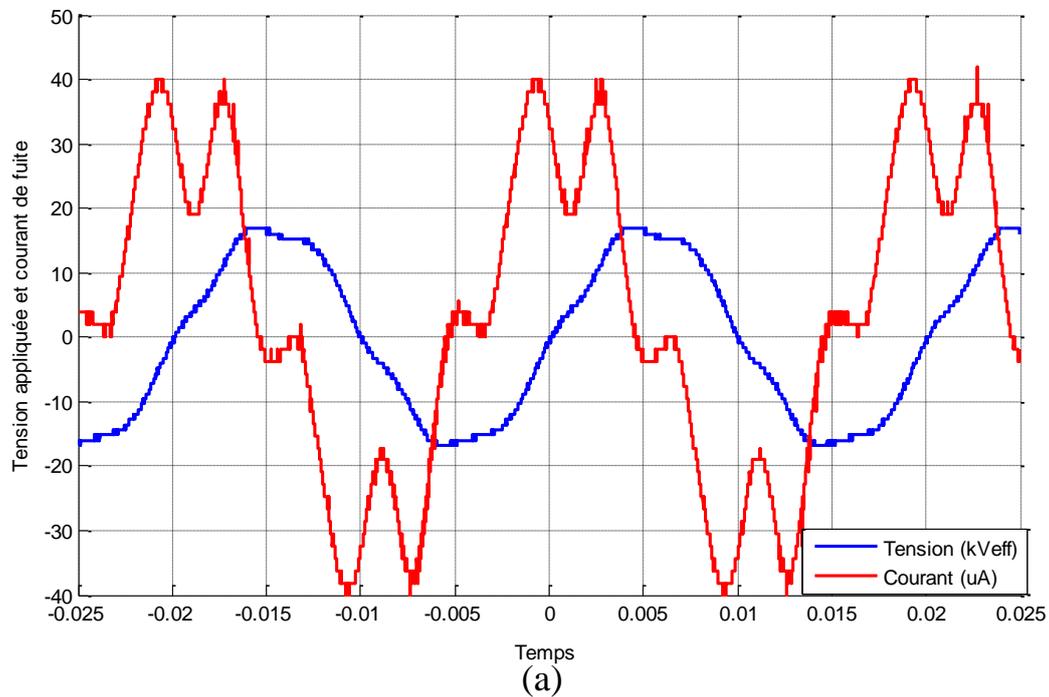


Figure 4.14 : (a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite dans l'échantillon non vieilli, (b) spectre de fréquence du courant

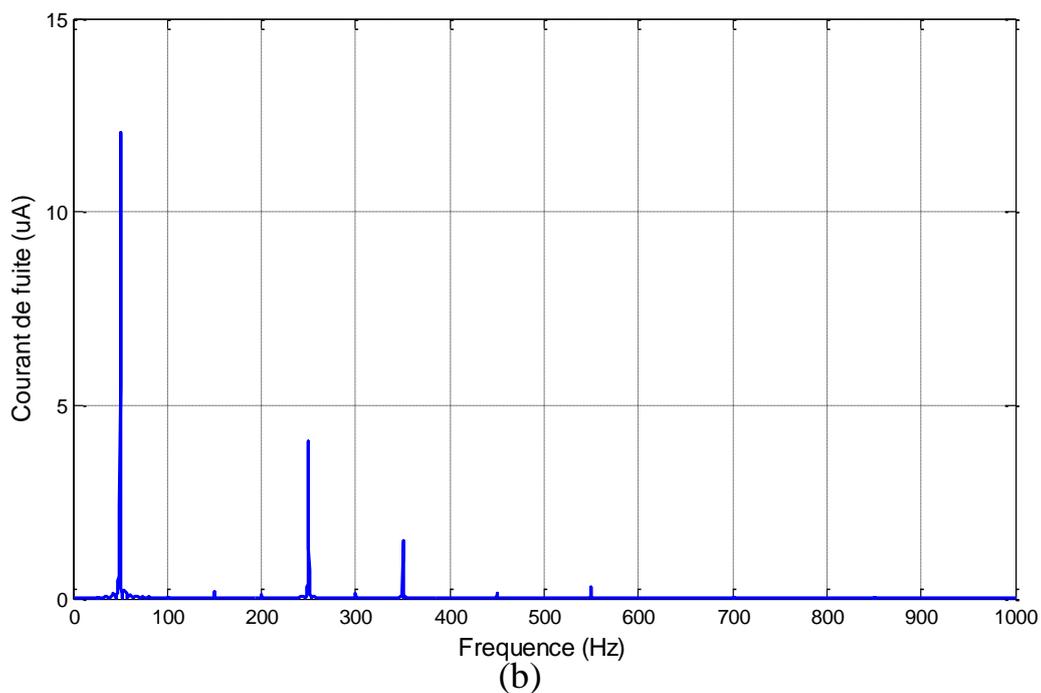
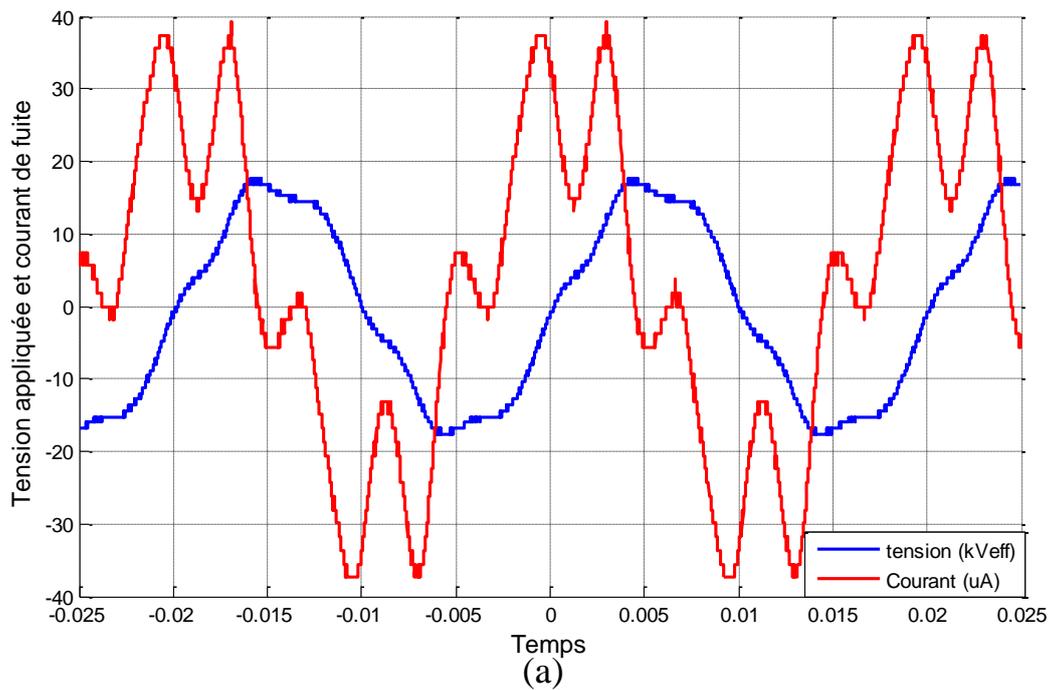


Figure 4.15 : (a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite dans l'échantillon vieilli pendant 1008 heures sous 80°C, (b) spectre de fréquence du courant

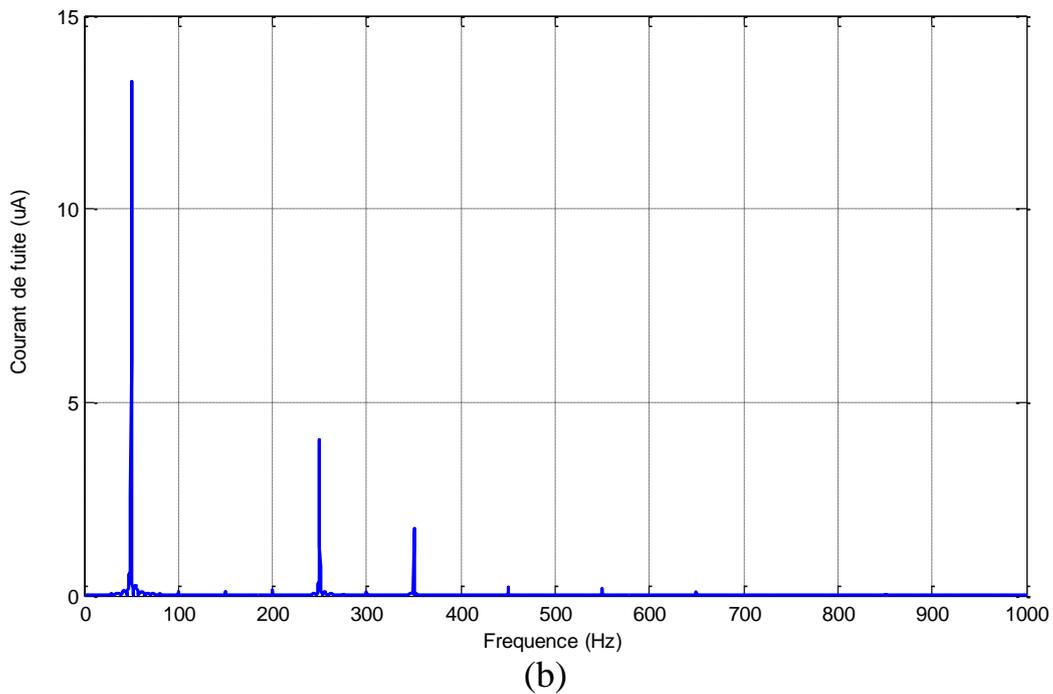
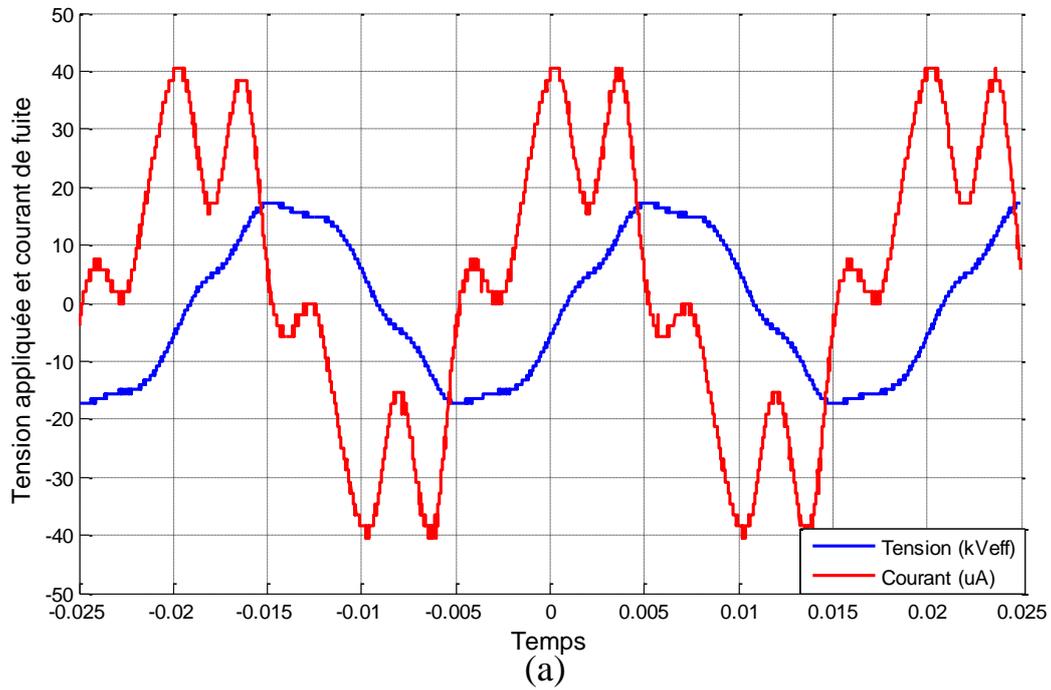


Figure 4.16 : (a) formes d’ondes de la tension appliquée et du courant de fuite dans l’échantillon vieilli pendant 2016 heures sous 80°C, (b) spectre de fréquence du courant

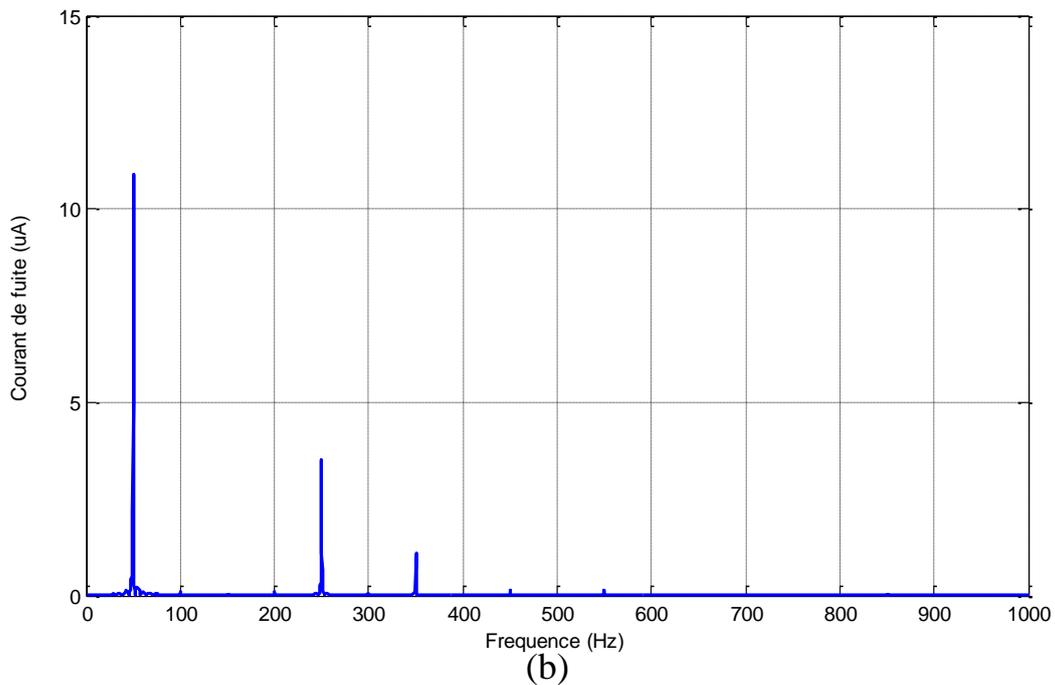
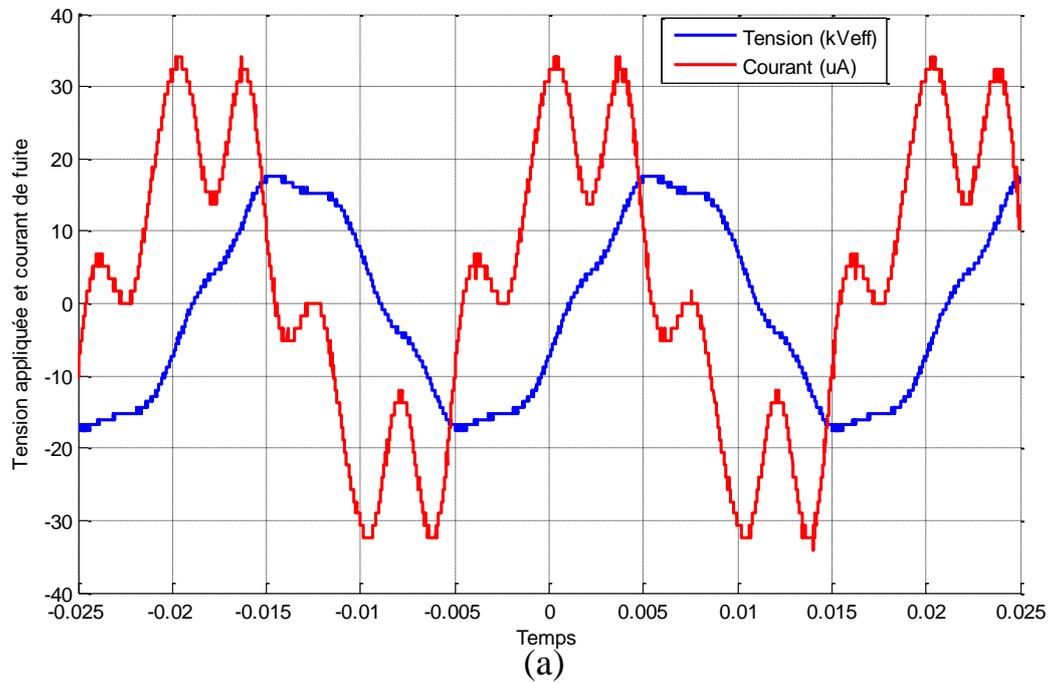


Figure 4.17: (a) formes d’ondes de la tension appliquée et du courant de fuite dans l’échantillon vieilli pendant 1008 heures sous 120°C, (b) spectre de fréquence du courant

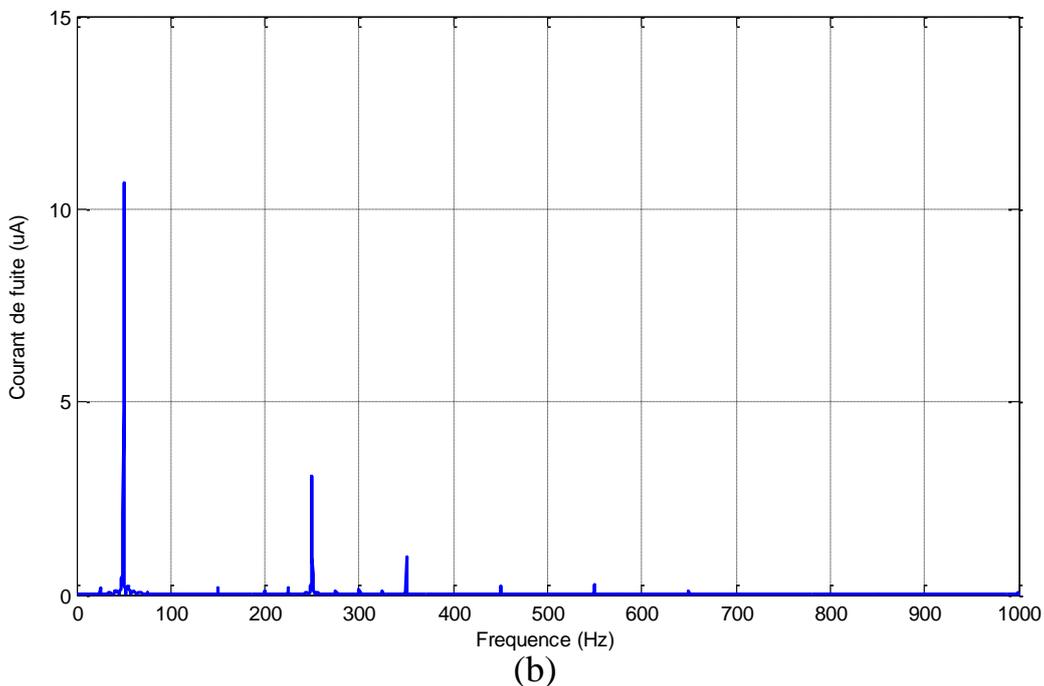
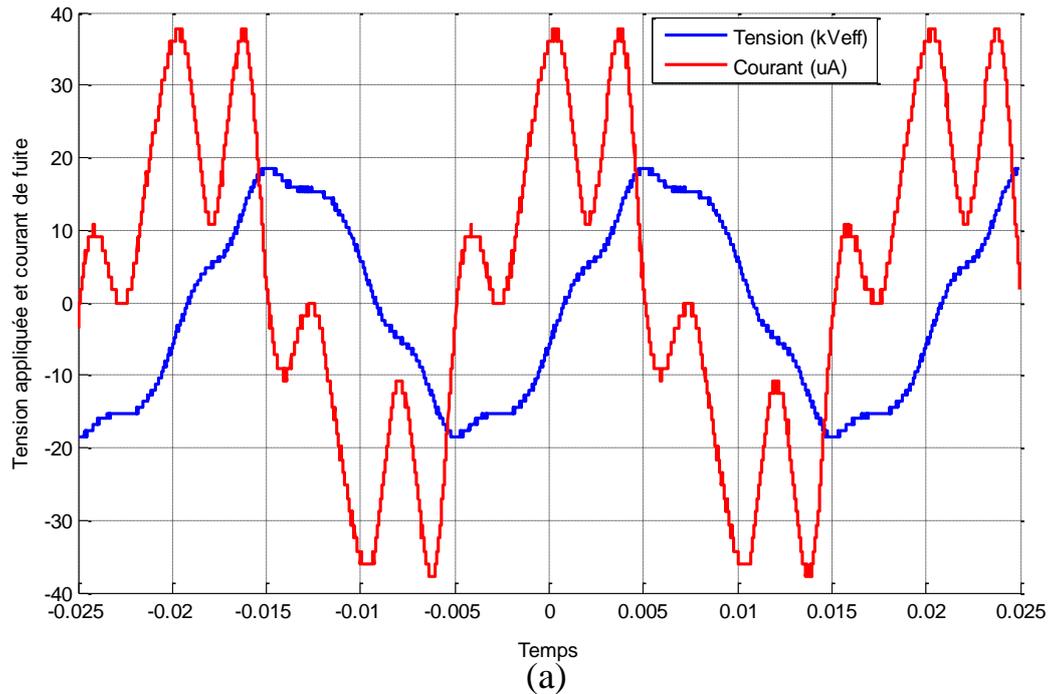


Figure 4.18 : (a) formes d'ondes de la tension appliquée et du courant de fuite dans l'échantillon vieilli pendant 2016 heures sous 120°C, (b) spectre de fréquence du courant

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. Comparés au PVC, le PRC ne présente pas un changement significatif de la forme du courant de fuite.

Selon le tracé du spectre de fréquence du courant, comme pour le PVC, 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 9^e et 11^e harmoniques sont plus visibles que dans le PVC.

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 augmente légèrement. Pour le vieillissement à 120°C, le même changement est observé mais de façon plus importante.

4.2.2.1 Courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement

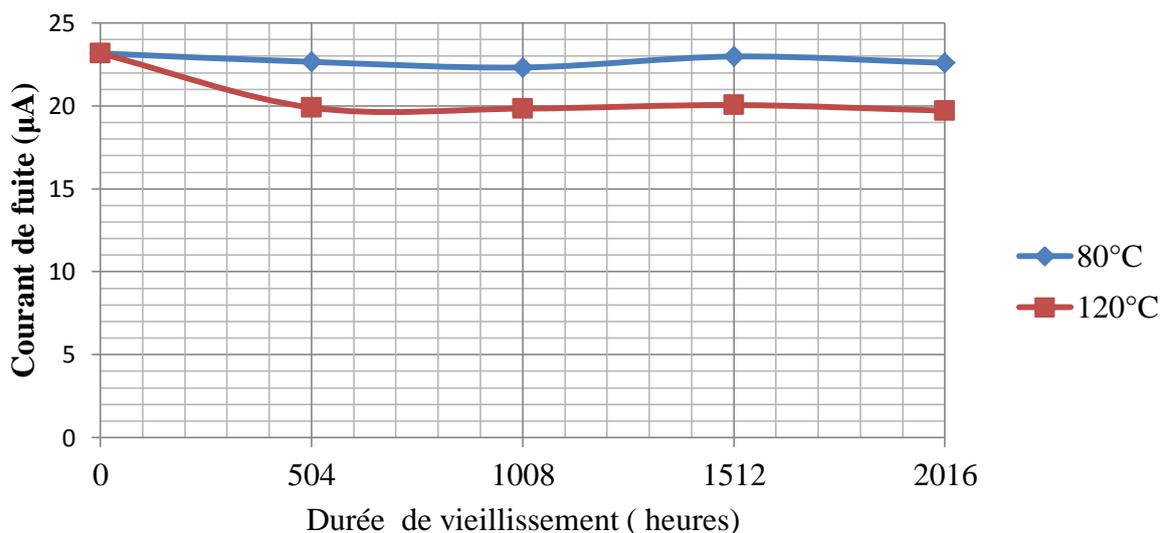


Figure 4.19 : Valeur efficace du courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement pour une tension appliquée de 12 kVeff

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.

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

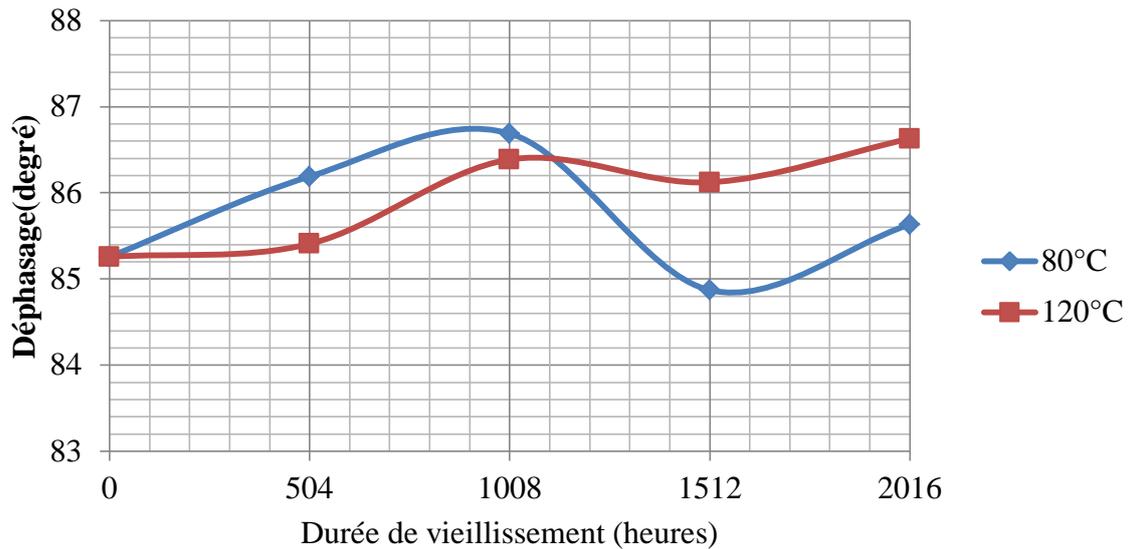


Figure 4.20: Déphasage entre le fondamental de la tension appliquée (12 kV) et du courant en fonction de la durée de vieillissement (à 80°C et 120°C)

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. 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.

4.2.2.3 Taux de distorsion en fonction de la durée de vieillissement

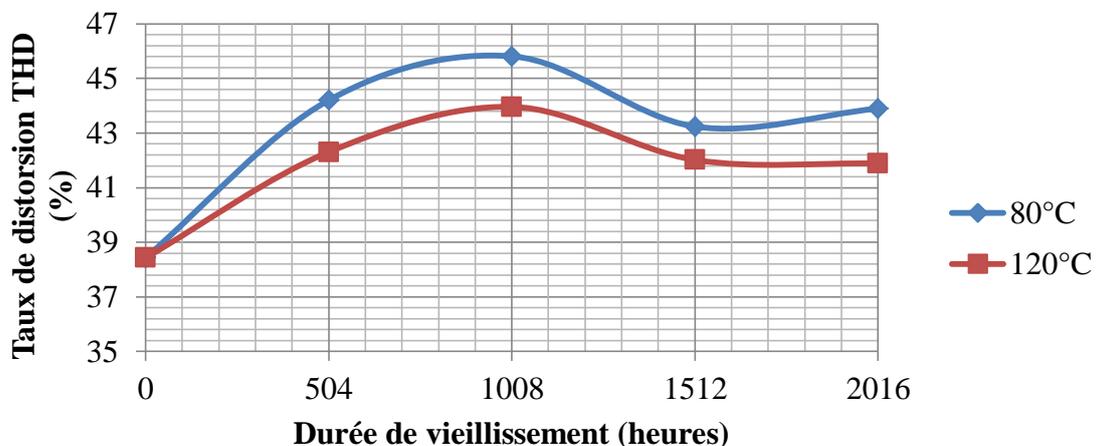


Figure 4.21: Taux de distorsion THD (%) en fonction de la durée de vieillissement (à 80°C et 120°C) pour une tension appliquée de 12 kV

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.

4.3. 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 des isolants utilisés.

4.3.1 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 [53], 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.

4.3.2 Niveau de décomposition

Selon l'équation (2.24), vue à la section 2.4.4.4 et reprise ci-dessous, 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 4.1. 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 4.1 : 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 les isolants utilisés.

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 [81].

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

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} (d_i(j) - \mu_i)^2} \quad (4.1)$$

STD : est la déviation standard du détail d_i .

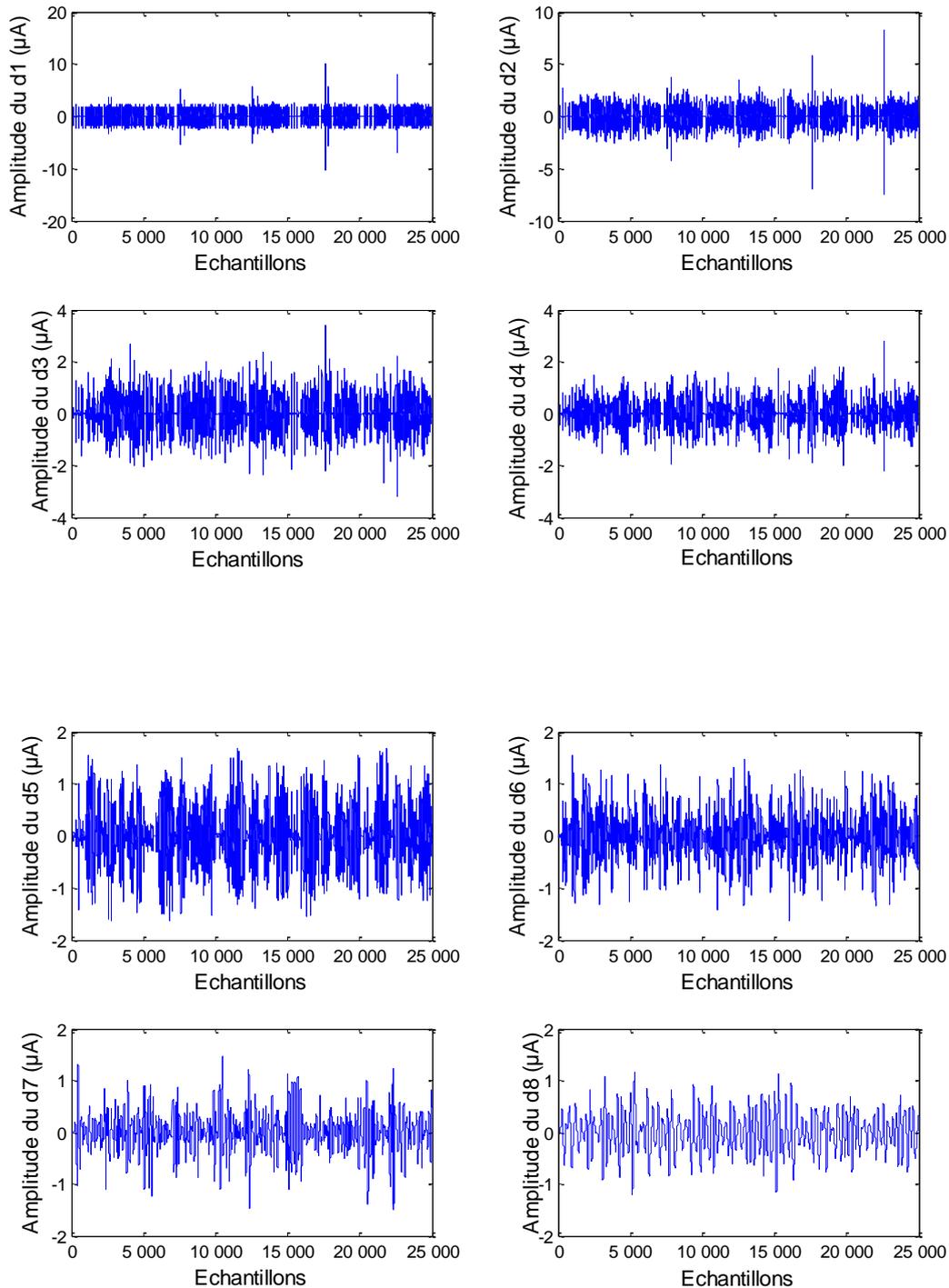
d_i : correspond à un échantillon du détail i .

N_i : correspond à la taille du vecteur d_i .

μ_i : est la moyenne du vecteur d_i .

4.3.3 Polychlorure de vinyle (PVC/B)

La figure 4.22 montre l'évolution des (détails D1 jusqu'à D11) résultant de la décomposition du signal du courant de fuite d'un échantillon avant vieillissement (figure 4.5) par la technique DWT-MRA. Des décompositions similaires sont effectuées pour tous les signaux correspondants aux deux températures de vieillissement 80°C et 120°C.



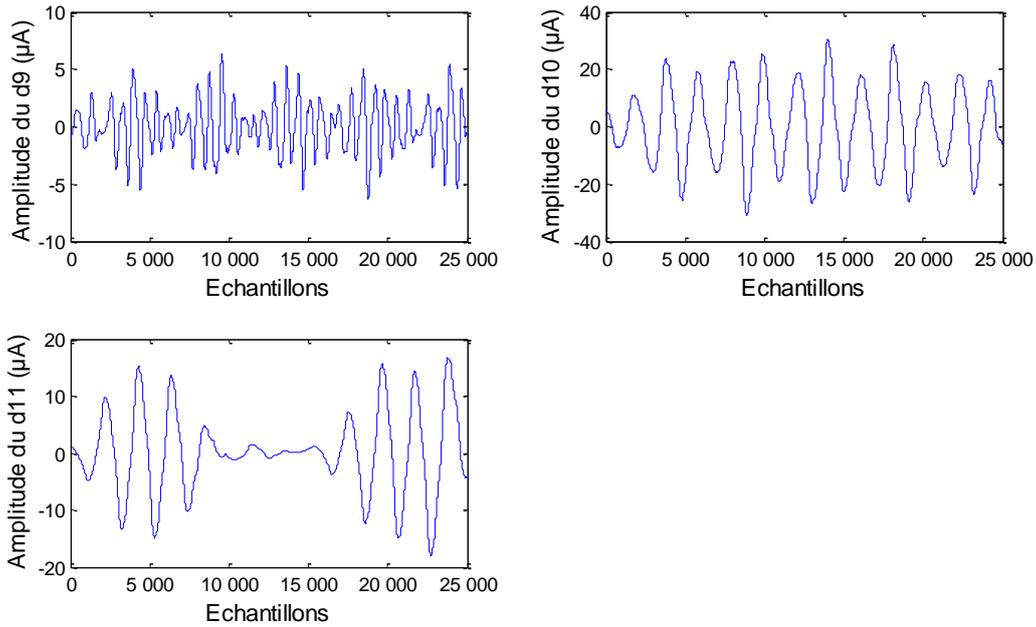


Figure 4.22: Variation des amplitudes des onze détails (D1 jusqu’au D11) du signal du courant de fuite montré à la figure 4.5

La figure 4.23 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.

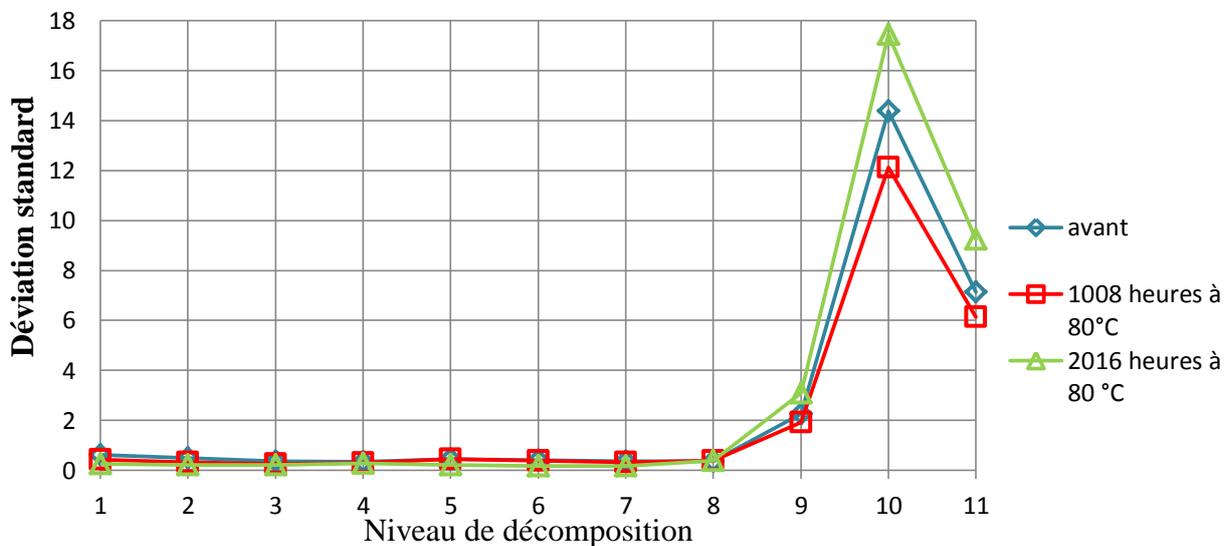


Figure 4.23: Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour la température de vieillissement de 80°C

Nous donnons sur la figure 4.24 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 :

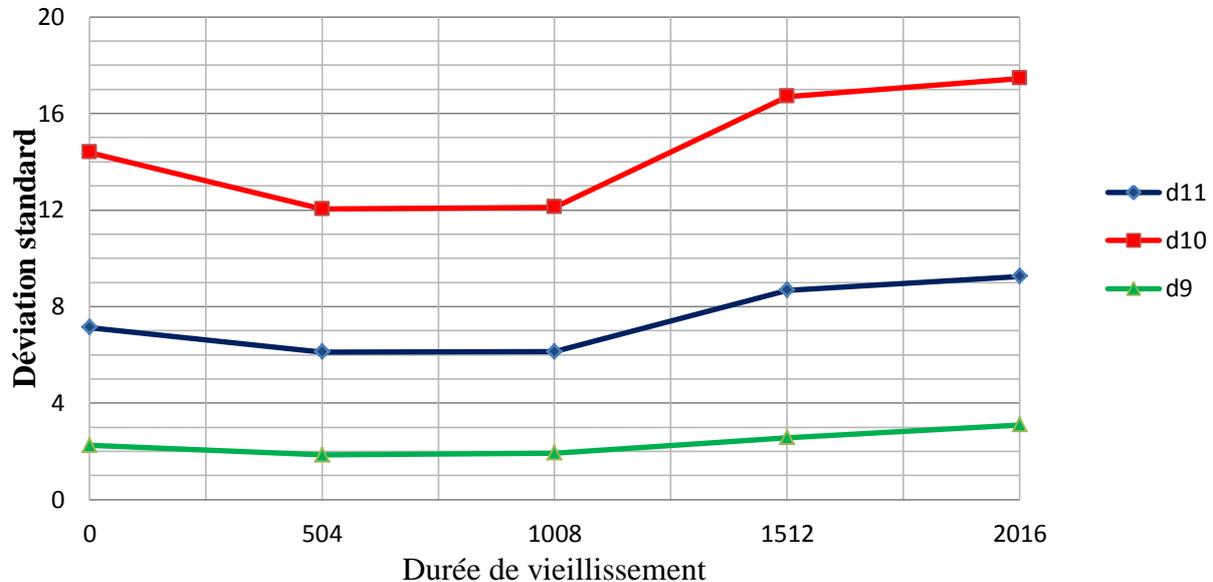


Figure 4.24: Évolution de la STD des détails d9, d10 et d11 en fonction de la durée de vieillissement pour la température de vieillissement de 80°C

La figure 4.25 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 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).

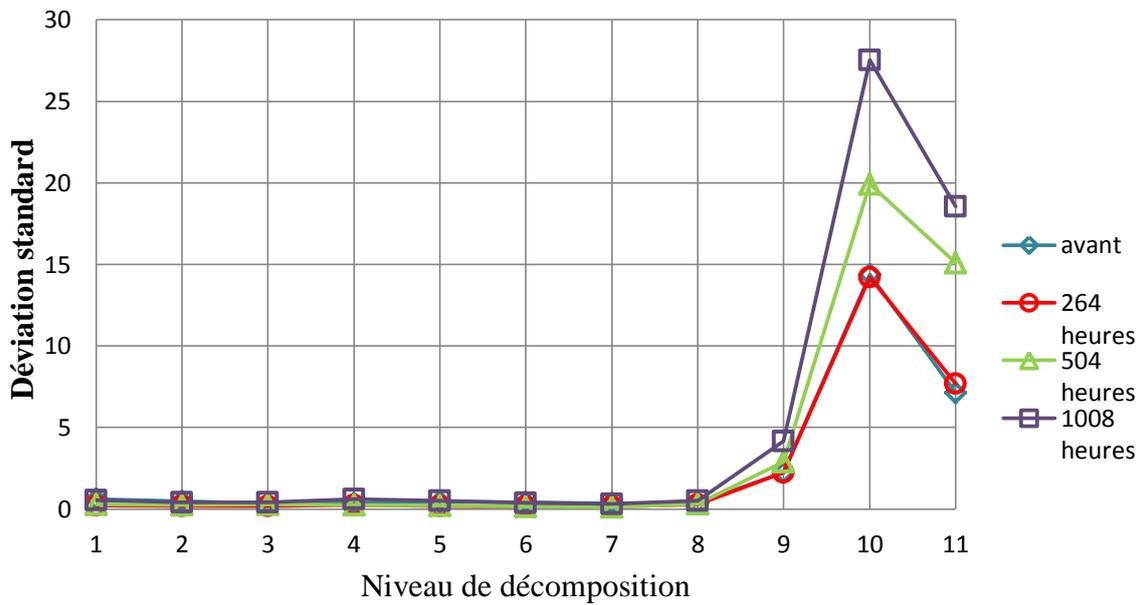


Figure 4.25: Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour la température de vieillissement de 120°C

La figure 4.26 montre l'évolution de la déviation standard des détails significatifs d9, d10 et d11 en fonction de la durée de vieillissement pour la température de vieillissement de 120°C :

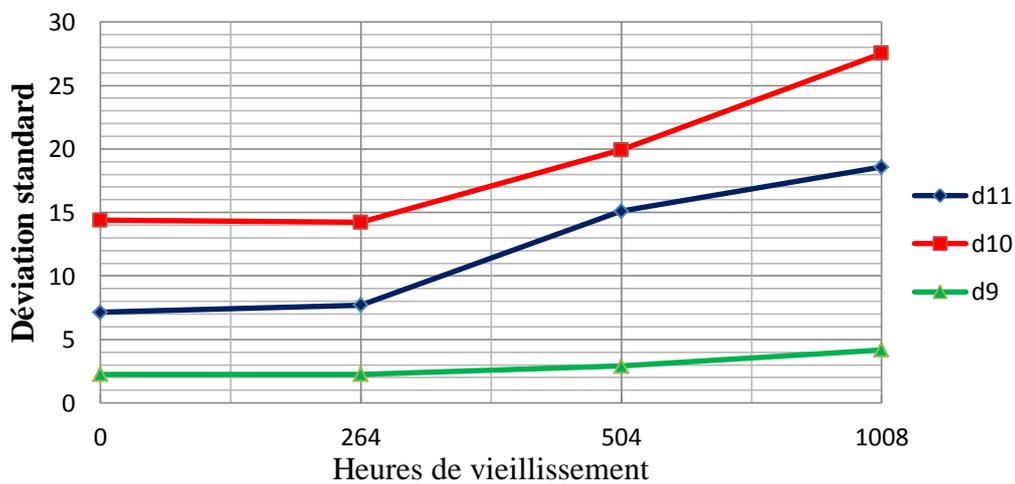
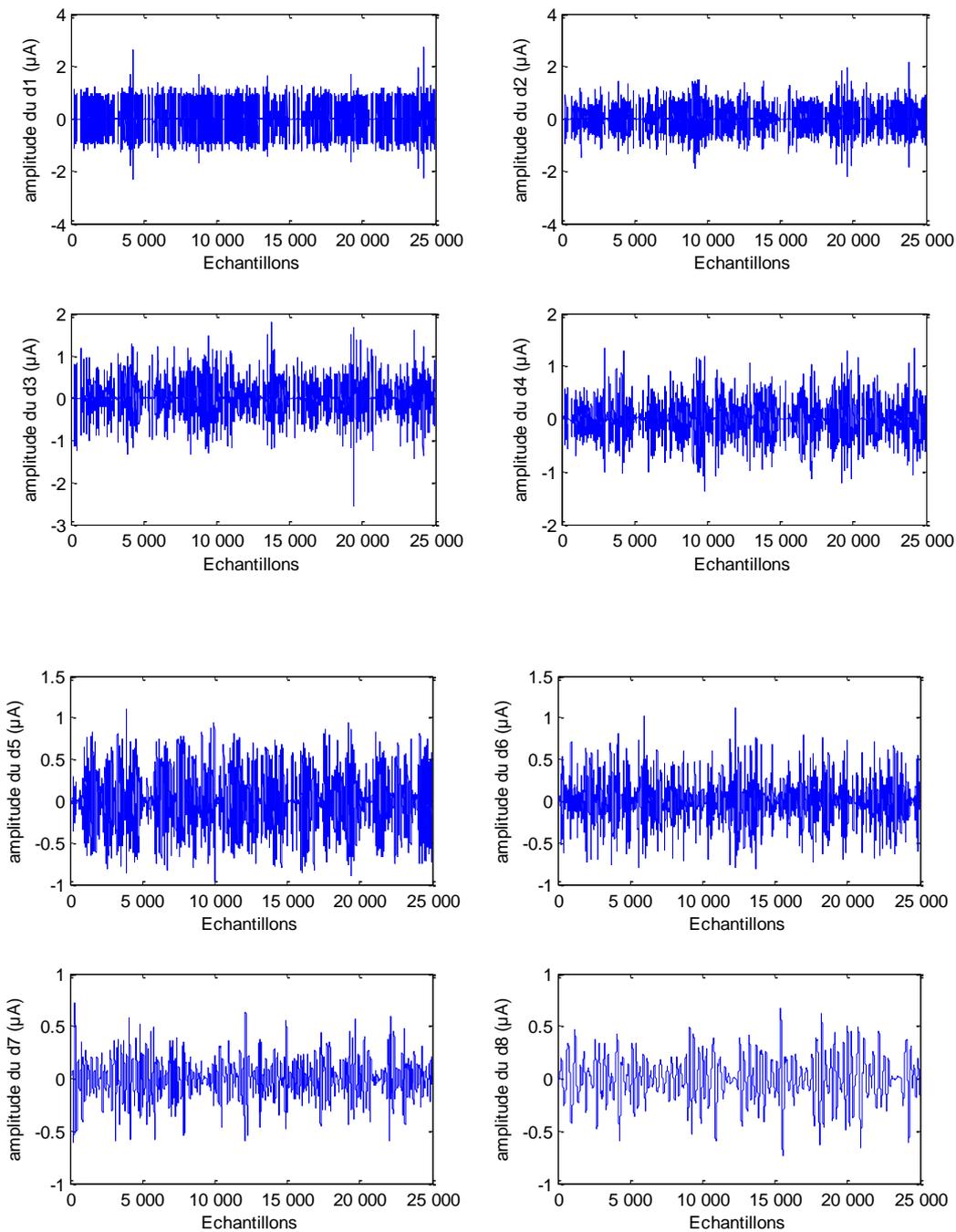


Figure 4.26: Évolution de la STD des détails d9, d10 et d11 en fonction de la durée de vieillissement pour la température de vieillissement de 120°C

4.3.4 Polyéthylène Réticulé Chimiquement(PRC)

La figure 4.27 montre l'évolution des composantes fréquentielles (détails D1 jusqu'à D11) résultant de la décomposition du signal du courant de fuite d'un échantillon avant

vieillessement (figure 4.14) par la technique DWT-MRA. Des décompositions similaires sont effectuées pour tous les signaux correspondants aux deux températures 80°C et 120°C.



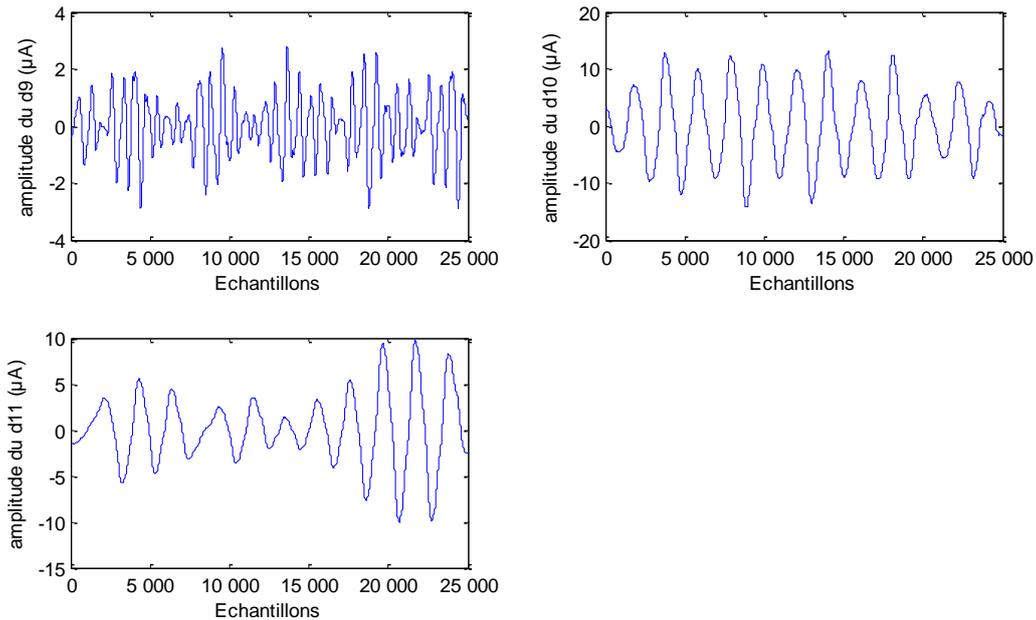


Figure 4.27: Variation des amplitudes des onze détails (D1 jusqu’au D11) du signal du courant de fuite donné à la figure 4.14

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.

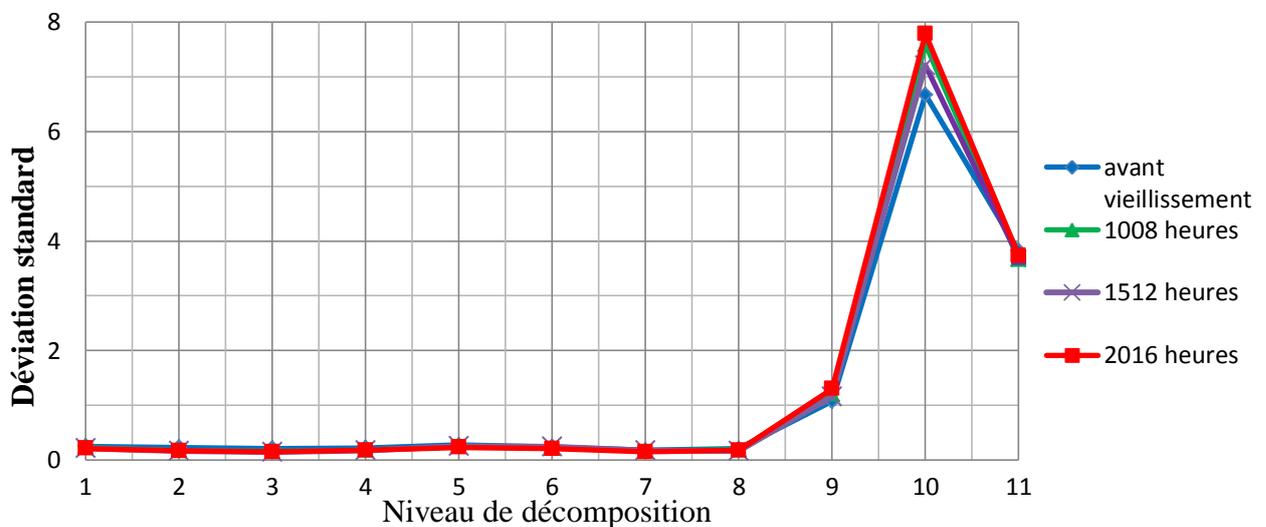


Figure 4.28 : Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour une température de vieillissement de 80°C

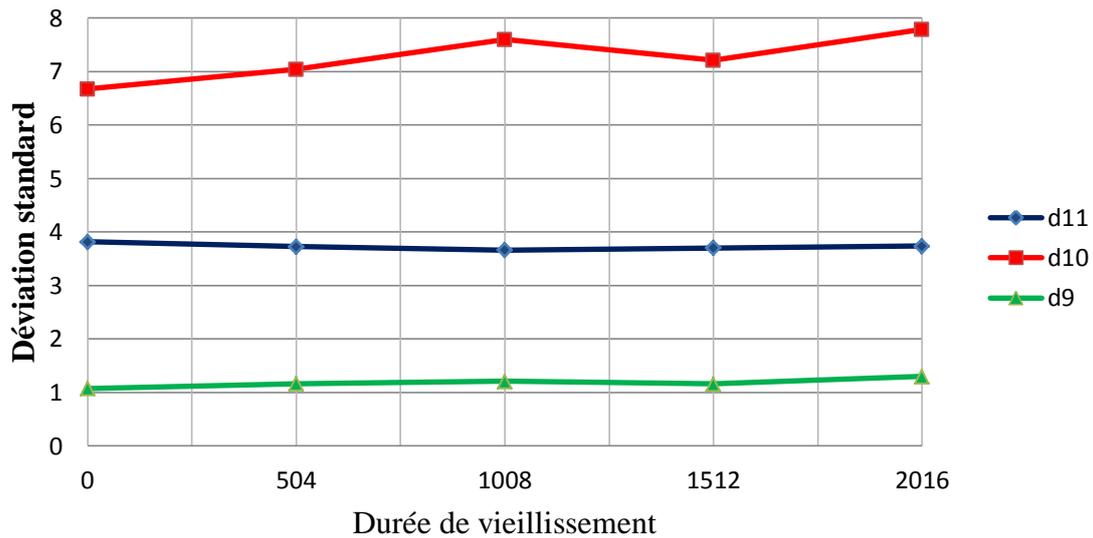


Figure4.29 : la déviation standard des détails d9, d10 et d11 pour la température de vieillissement de 80°C en fonction de la durée de vieillissement

La figure 4.30 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.

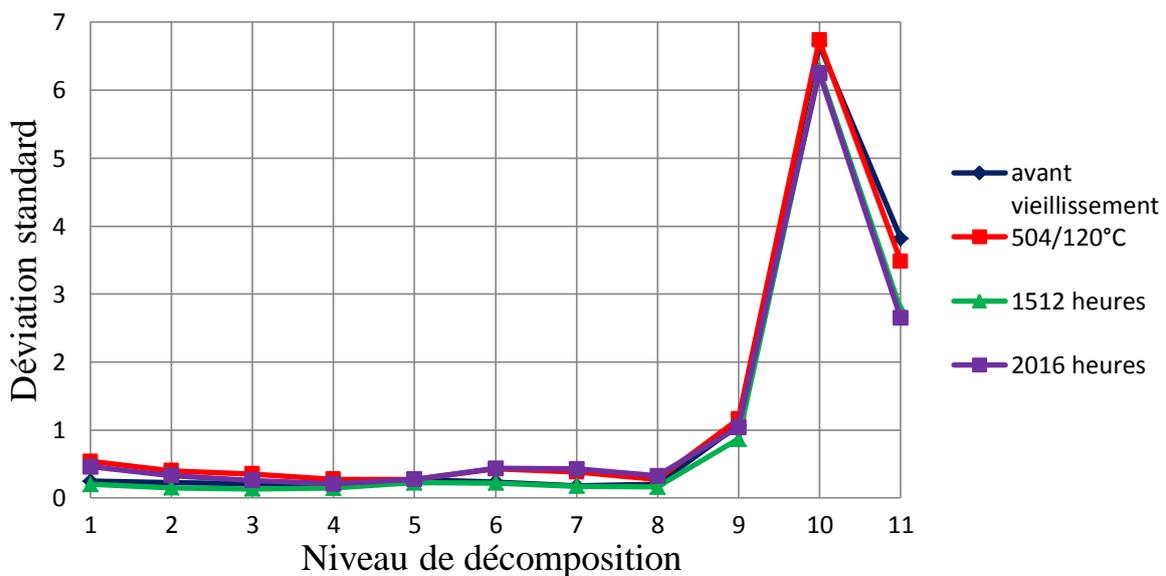


Figure4.30 : Évolution de la déviation standard (STD) en fonction du niveau de décomposition pour une température de vieillissement de 120°C

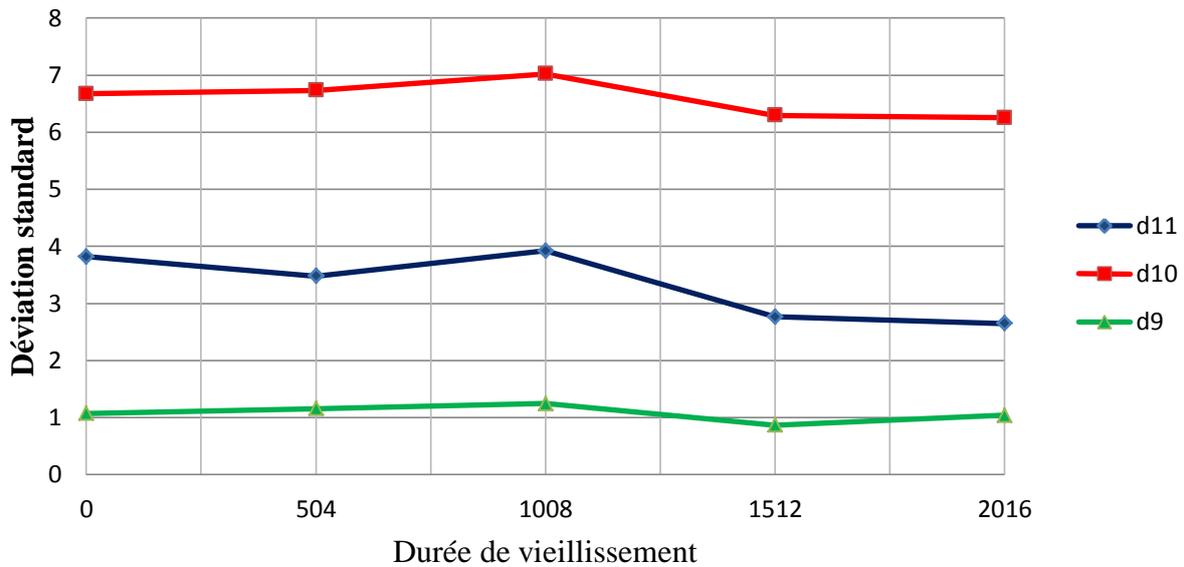


Figure 4.31: la déviation standard des détails d9, d10 et d11 pour une température de vieillissement de 120°C en fonction de la durée de vieillissement

4.4 Diagnostique 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.

4.4.1 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 [82]. Néanmoins, elles sont choisies, via la «C-C method», égales à 5 et 20 respectivement.

Comme évoqué dans le chapitre 2, la valeur du paramètre ε est choisie égale à $0,25\sigma$, où σ est la standard déviation du signal étudié.

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

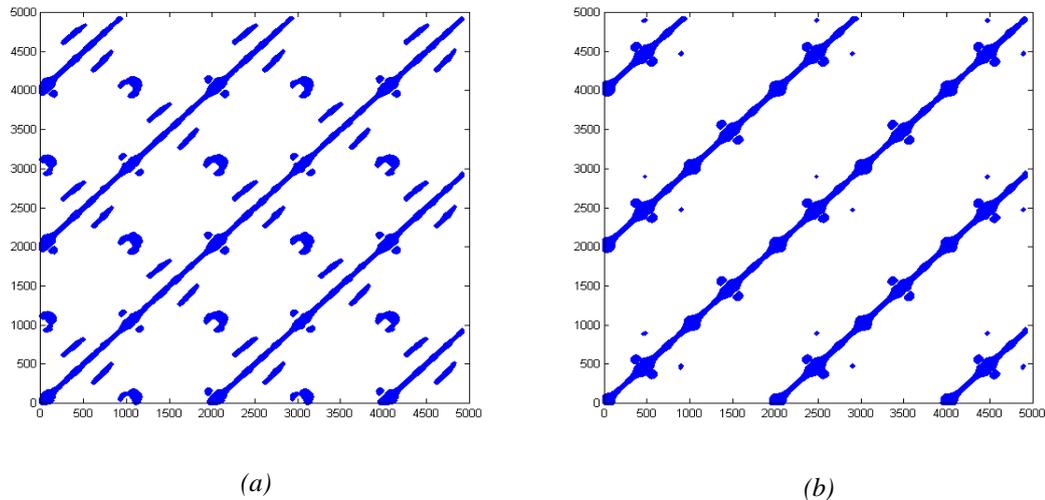


Figure 4.32 : diagramme de récurrence appliqué au signal du courant de fuite
 (a) : avant vieillissement –(b) : vieillis sous 120°C pendant 504 heures

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.

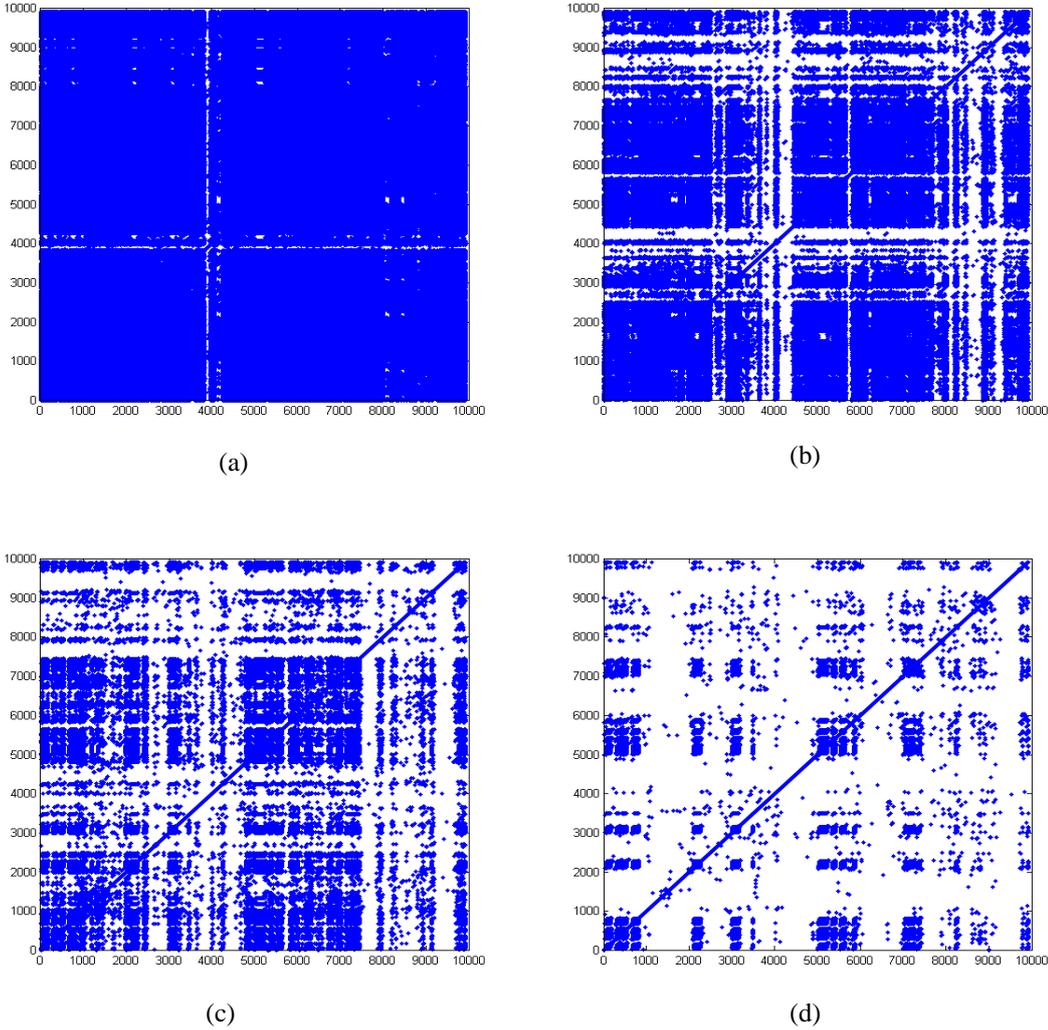
4.4.3 Technique RP appliquée aux détails du signal du courant de fuite

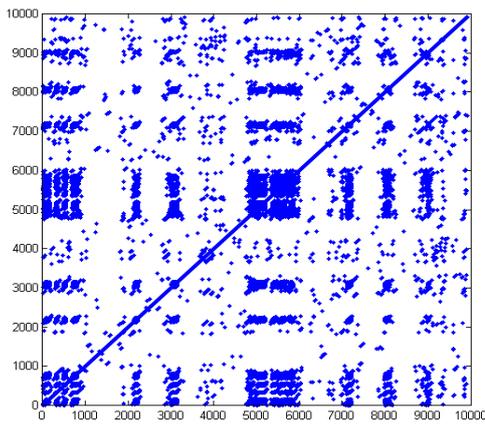
D'après ce qui a été montré précédemment, la décomposition fréquentielle du signal de courant de fuite s'avère être nécessaire avant d'utiliser la techniques RP. Différents détails correspondant aux différents niveaux de décomposition sont donc extraits.

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 extrayons 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.

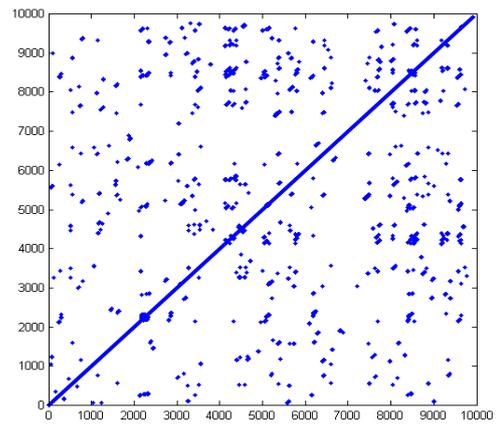
4.4.3.1 Polychlorure de vinyle (PVC)

La figure 4.33 présente la technique de Reccurent plot, appliquée aux différents niveaux de décomposition du courant de fuite pour un échantillon non vieilli (neuf).

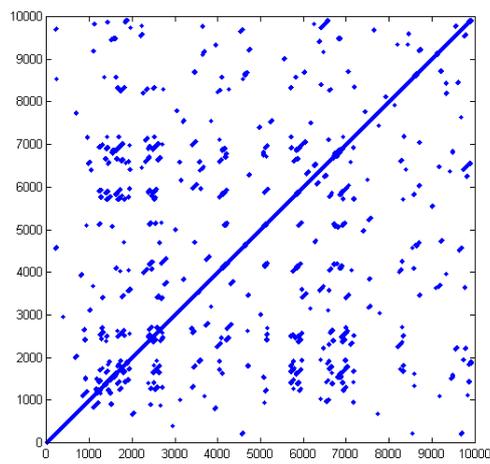




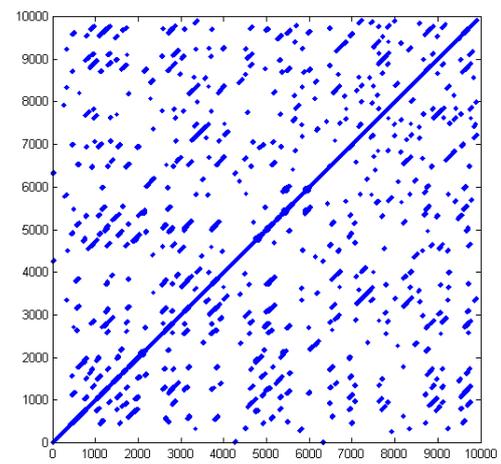
(e)



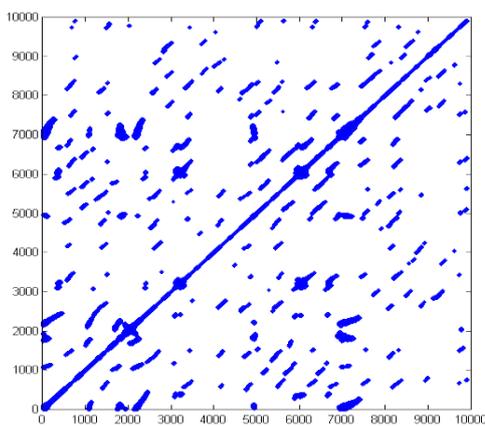
(f)



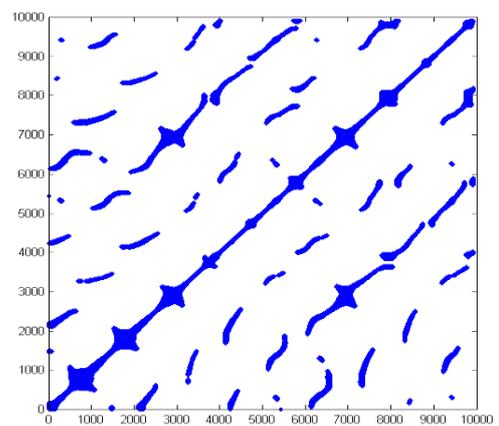
(g)



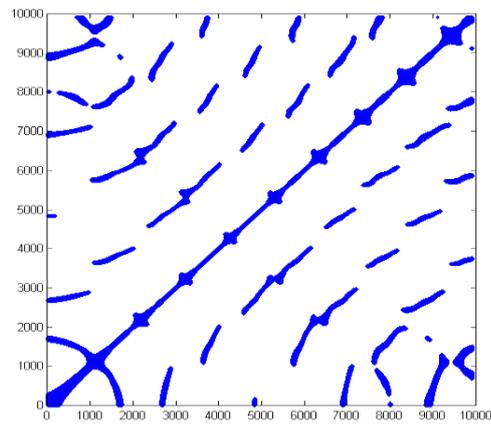
(h)



(i)



(j)



(k)

Figure 4.33 : RP de la décomposition en ondelettes du signal du courant de fuite d'un échantillon de PVC avant vieillissement. (a) : définit le coefficient D1– (b) : le coefficient D2– (c) :le coefficient D3– (d) :le coefficient D4 – (e) : le coefficient D5– (f) : le coefficient D6 – (g) :le coefficient D7– (h) :le coefficient D8 - (i) : coefficient D9– (j) : le coefficient D10 – (k) :le coefficient D11

4.4.3.1.1 Évolution du détail D3

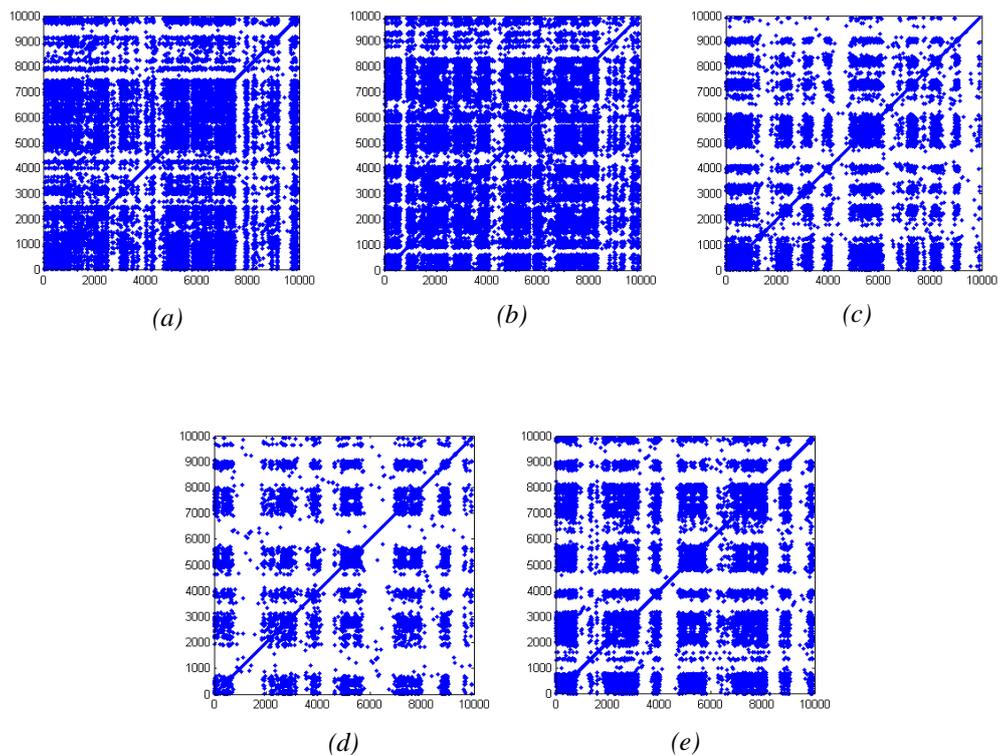


Figure 4.34 : RP appliquée au détail D3 du courant de fuite du PVC :
 (a) avant vieillissement – (b) vieilli à 80°C 1008 heures – (c) vieilli à 80°C 2016 heures –
 (d) vieilli à 120°C 504 heures – (e) vieilli à 120°C 1008 heures

La figure 4.34 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 4.34 (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 4.34 (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 4.34 (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 4.34) et de la courbe qui montre l'évolution du courant de fuite en fonction de la durée de vieillissement (figure 4.11), 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.

4.4.3.1.2 Évolution du détail D10

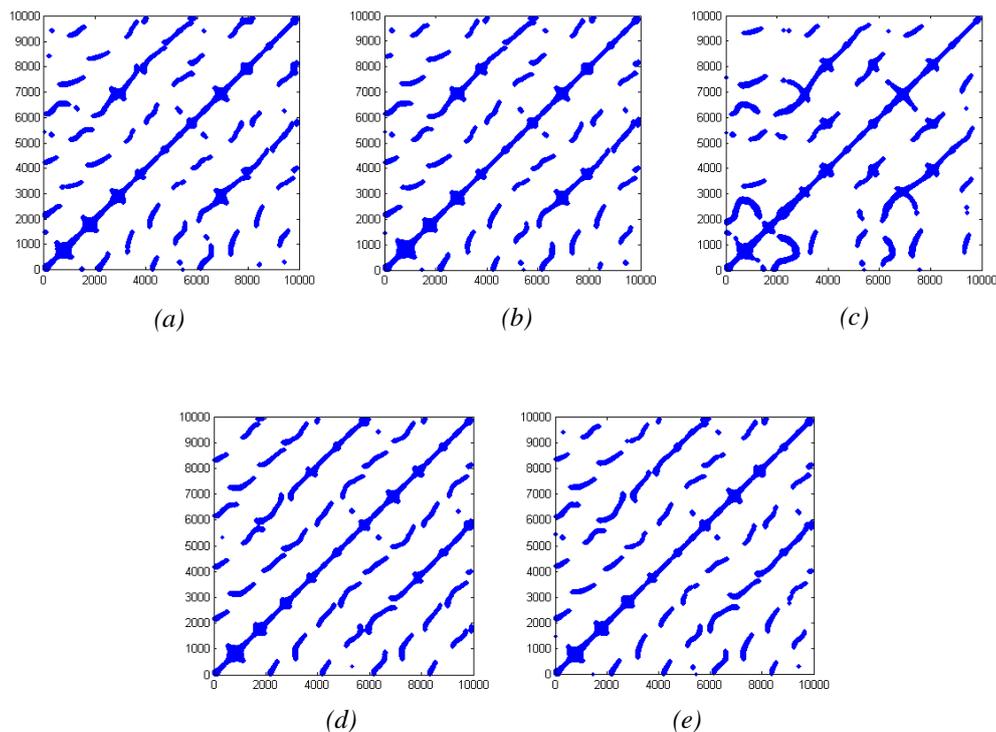


Figure 4.35 : RP appliquée au détail D10 du courant de fuite du PVC :
 (a) avant vieillissement – (b) vieilli à 80°C 1008 heures – (c) vieilli à 80°C 2016 heures –
 (d) vieilli à 120°C 504 heures – (e) vieilli à 120°C 1008 heures

La figure 4.35 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 $12 \text{ kV}_{\text{eff}}$.

A partir des structures de la RP montrées dans la figure 4.35, 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 4.35 (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.

4.4.3.1.3 Évolution du détail D11

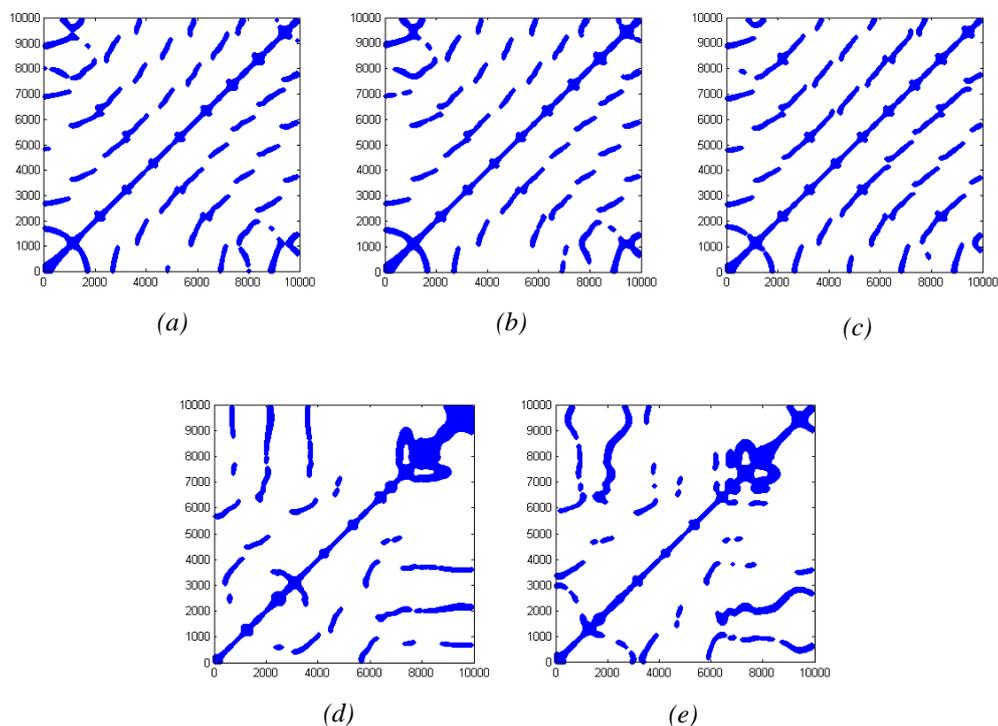


Figure 4.36 : RP appliquée au détail D11 du courant de fuite du PVC :

(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

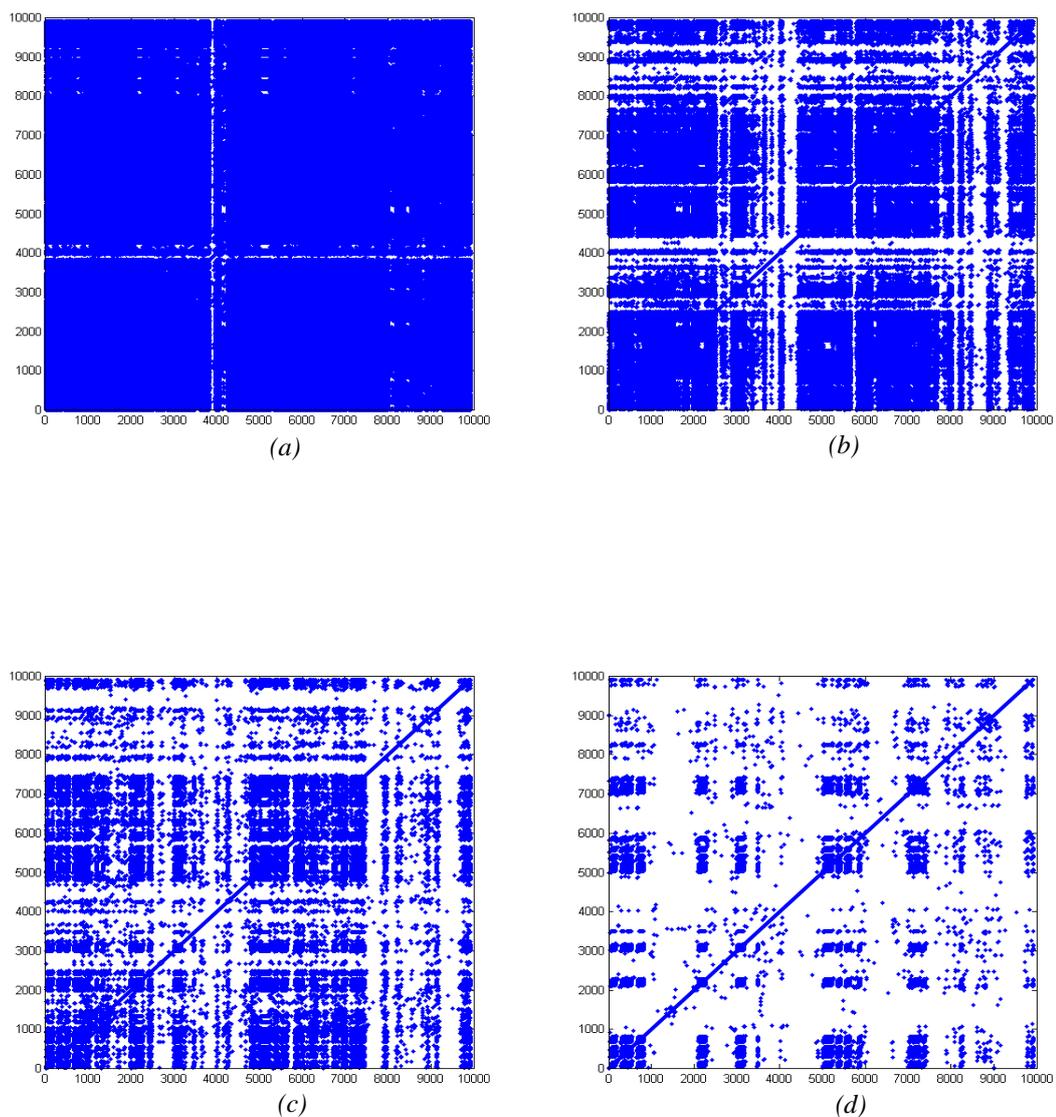
La figure 4.36 montre les différents RP des composantes basses fréquences du détail D11 (122 à 244 Hz) en fonction de la durée de vieillissement pour les deux températures de vieillissement, avec une tension appliquée de $12 \text{ kV}_{\text{eff}}$.

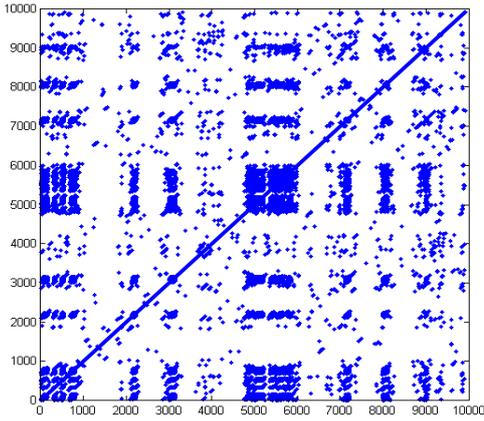
A partir des structures de la RP montrées dans la figure 4.36, on remarque que les échantillons vieillis à 120°C ont une structure différente des autres. Comme montré dans le

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.

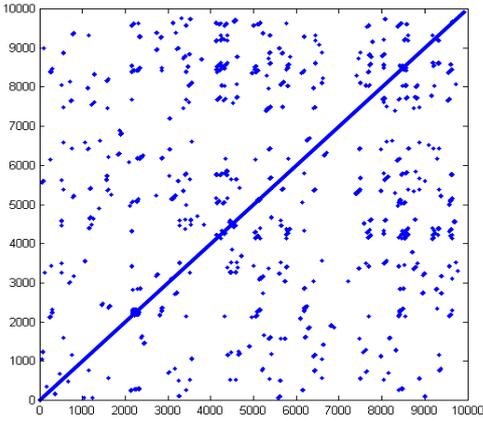
4.4.3.2 Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC)

La figure 4.37 présente la technique de Recurrent plot, appliquée aux différents niveaux de décomposition du courant de fuite pour un échantillon non vieilli de PRC.

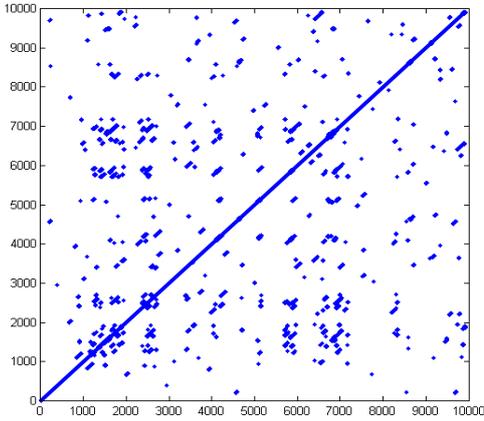




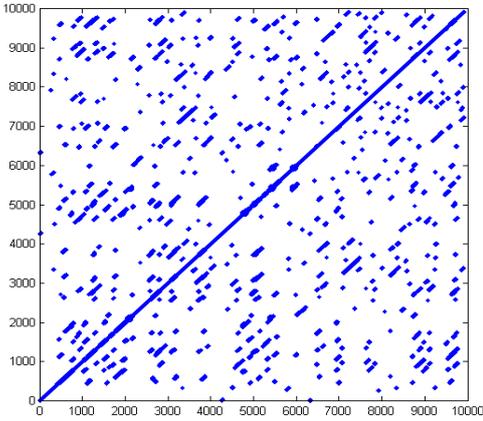
(e)



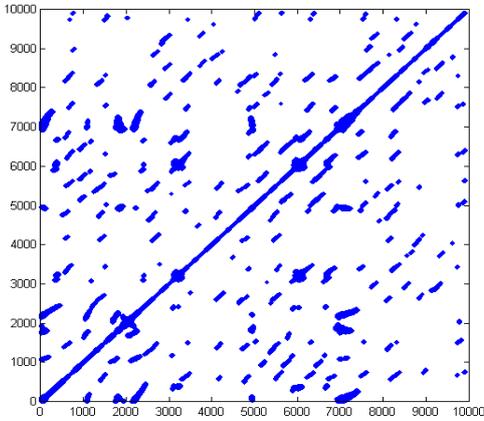
(f)



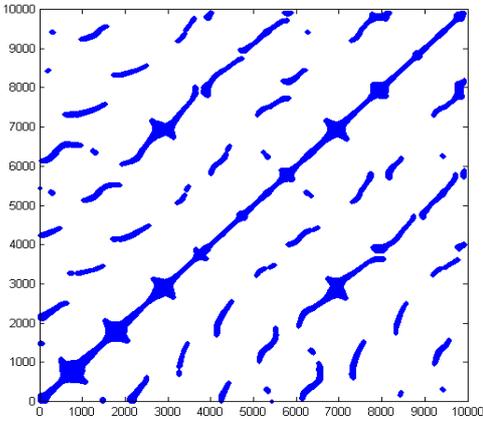
(g)



(h)



(i)



(j)

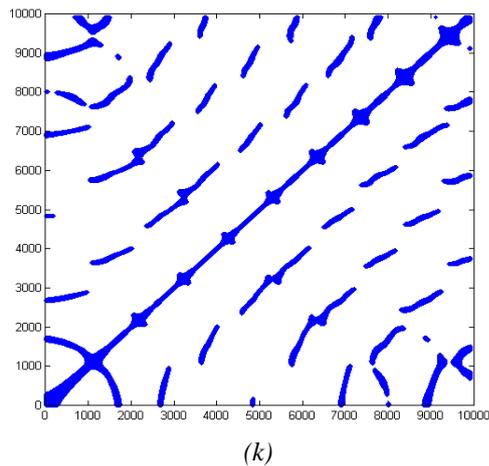


Figure 4.37 : RP de la décomposition en ondelettes du signal du courant de fuite d'un échantillon de PRC avant vieillissement. (a) : définit le coefficient D1– (b) : le coefficient D2– (c) :le coefficient D3– (d) :le coefficient D4 (e) : le coefficient D5– (f) : le coefficient D6 – (g) :le coefficient D7– (h) :le coefficient D8 - (i) : coefficient D9– (j) : le coefficient D10 – (k) :le coefficient D11

4.4.3.2.1 Évolution du détail D3

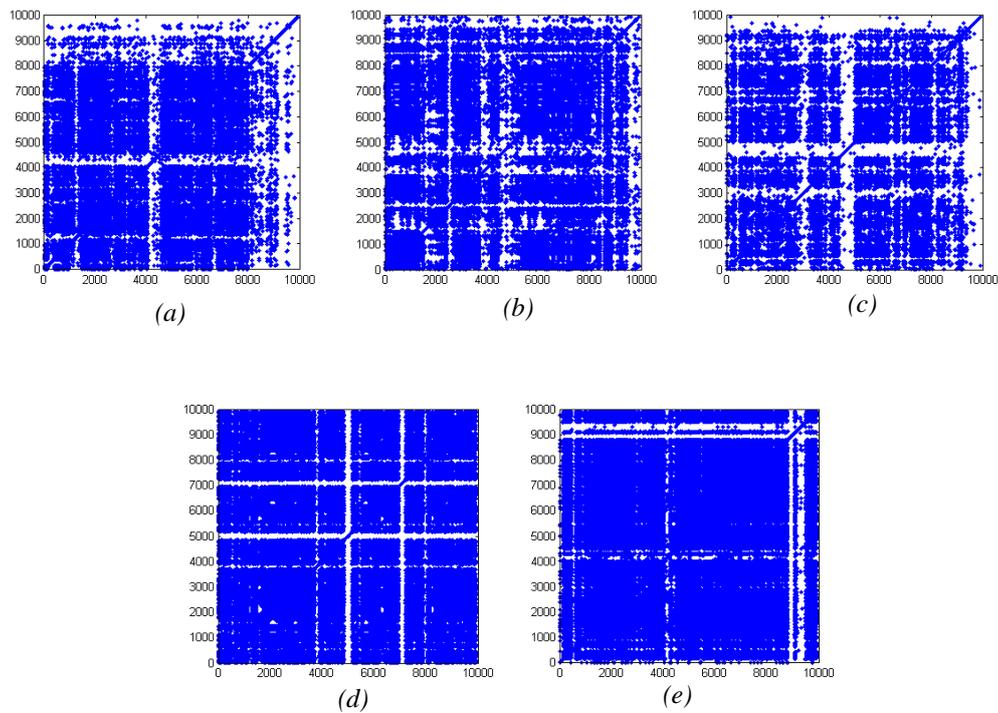


Figure 4.38 : RP appliquée au détail D3 du courant de fuite du PRC :
 (a) avant vieillissement – (b) vieilli à 80°C 1008 heures – (c) vieilli à 80°C 2016 heures –
 (d) vieilli à 120°C 1008 heures – (e) vieilli à 120°C 2016 heures

La figure 4.38 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 $12 \text{ kV}_{\text{eff}}$.

D'après la figure 4.38, 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.

Comme pour le PVC, l'intensité du courant de fuite dans le matériau du PRC (figure 4.19) est corrélée à la structure de la RP du détail D3 (figure 4.38). L'augmentation des bandes blanches indique une augmentation du courant de fuite.

4.4.3.2.2 Évolution du détail D10

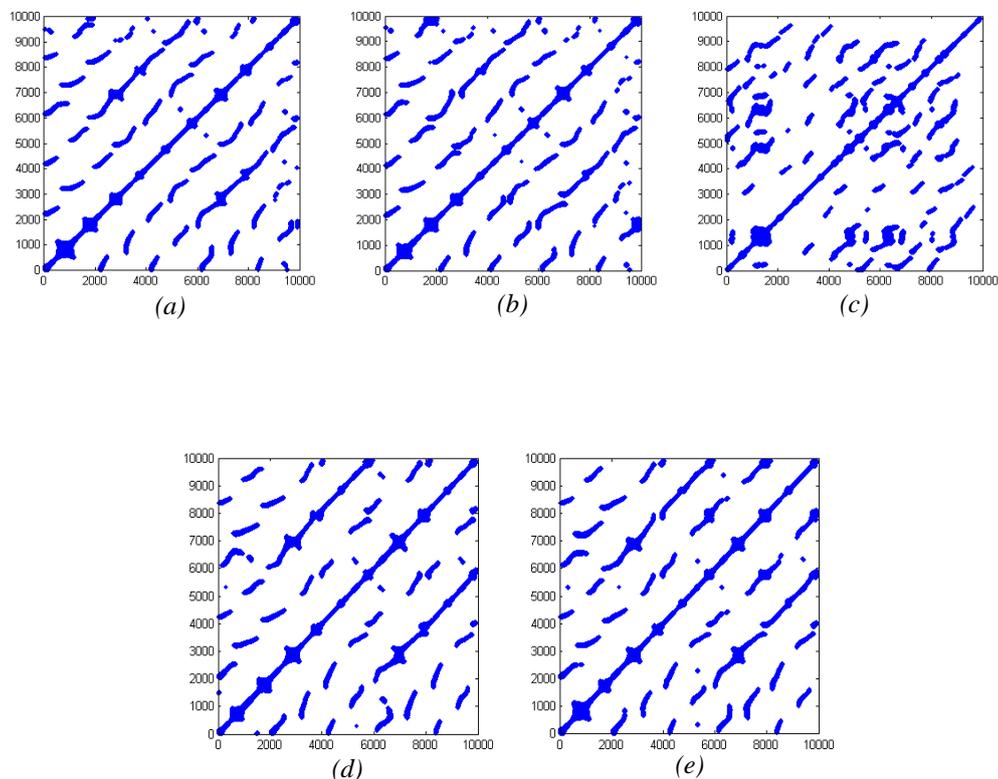


Figure 4.39 : RP appliquée au détail D10 du courant de fuite du PRC :
 (a) avant vieillissement – (b) vieilli à 80°C 1008 heures – (c) vieilli à 80°C 2016 heures –
 (d) vieilli à 120°C 1008 heures – (e) vieilli à 120°C 2016 heures

La figure 4.39 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 4.39 (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.

4.4.3.2.3 Évolution du détail D11

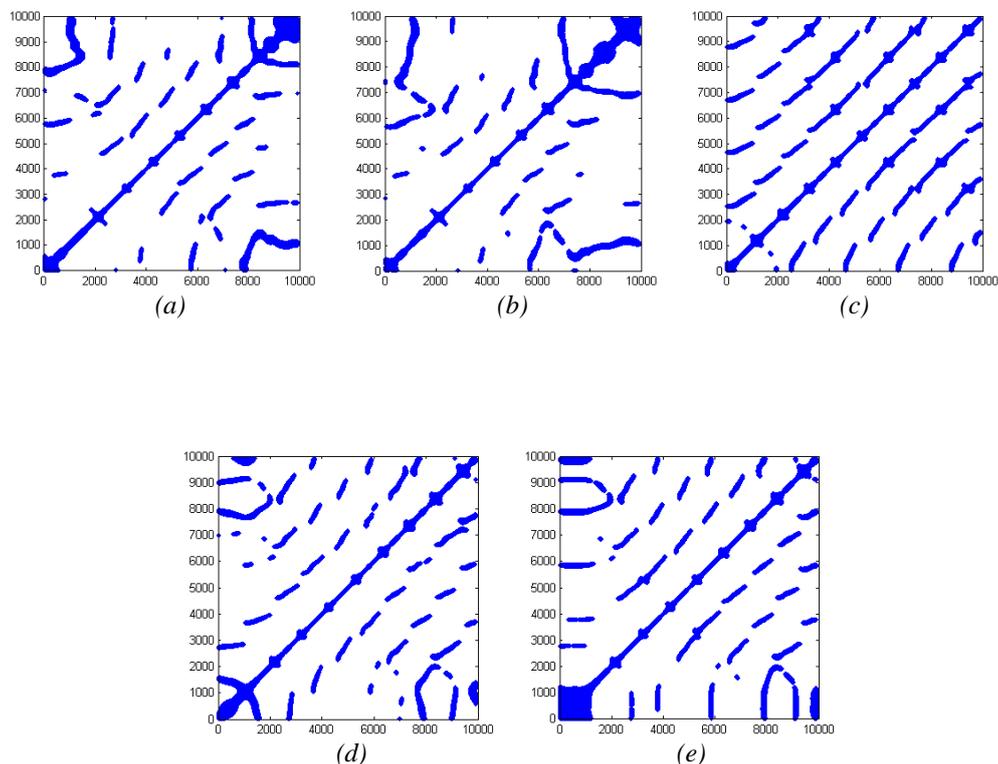


Figure 4.40 : RP appliquée au détail D11 du courant de fuite du PRC :
 (a) avant vieillissement – (b) vieilli à 80°C 1008 heures – (c) vieilli à 80°C 2016 heures –
 (d) vieilli à 120°C 1008 heures – (e) vieilli à 120°C 2016 heures

La figure 4.40 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 4.40, 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.

4.5 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, et pour deux matériaux différents le PVC et 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 les deux matériaux ne se comportent pas de la même façon quand ils ont vieilli. Lors du vieillissement à 120°C, le PVC est fortement dégradé et subit une augmentation importante de l'intensité du courant de fuite, alors que le PRC subit par contre une légère amélioration. En revanche, lors du vieillissement à 80°C, le PVC subit une légère amélioration dans la première phase suivie d'une dégradation, par contre pour le PRC, l'effet du vieillissement n'est pas très important et n'est presque pas visible.

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 des matériaux polymères utilisés dans l'isolation électrique. Les essais réalisés sur les différents échantillons de polymères ont été effectués au laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Deux types de matériaux polymères ont été utilisés, le polychlorure de vinyle (PVC) et le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), 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.

L'étude de l'amplitude du courant de fuite obtenue lors de nos essais a montré une différence entre les deux matériaux, et qu'ils ne se comportent pas de la même façon après le vieillissement à 120°C. Le PVC subit une forte dégradation quand il est vieilli et voit l'amplitude de son courant de fuite augmenter de façon très importante. Par contre, le PRC voit l'amplitude de son courant de fuite diminuer légèrement et donc une amélioration de ses propriétés diélectriques. Pour le vieillissement à 80°C, l'effet du vieillissement est moins important pour les deux polymères, le PVC se dégrade après 2016 heures en passant par un stade intermédiaire où il y'a une légère amélioration à 1008 heures. Pour le PRC, les changements sont infimes et le courant de fuite ne varie presque pas.

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 apparaît et son amplitude devient très proche de celles des 5^e et 7^e harmoniques, notamment dans le PVC.

En plus de l'analyse par les harmoniques et l'influence du vieillissement sur leur évolution, nous avons utilisé différentes autres méthodes de traitement de signal. Chaque méthode nous a permis d'étudier les harmoniques d'un regard différent. La transformée de Fourier rapide FFT du signal du courant de fuite nous permet de voir des harmoniques dominant dans le signal. Cette méthode rend l'étude de l'influence du vieillissement sur les harmoniques du courant difficile.

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.

Conclusion générale

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 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] B.PINEL, F.DUCHATEAU, « Fonction isolation dans les matériels électriques », techniques de l'ingénieur, D2302, 1999.
- [2] G.TEYSSÉDRE, L.BOUDOU, « Polymères et composites pour l'électrotechnique », techniques de l'ingénieur, D2335, 2010.
- [3] J.Verdu, ed. « vieillissement des plastiques ». AFNOR technique, ed. A.F.d. Normalisation. 1984, eyrolles: Paris.
- [4] A.Boubakeur, Y.Mecheri, L.Boukezzi and L.Lallouani, "Dielectrical and Mechanical Behaviour of XLPE under Thermal Aging", CEIDP'2000, IEEE, October 2000.
- [5] 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.
- [6] L.Boukezzi, M.Nedjar, L.Mokhnache, M.Lallouani, A.Boubakeur, "Thermal Aging of Cross-Linked Polyethylene", Annales de Chimie, Sci.Mat.2006
- [7] 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.
- [8] M. Aguet, « Traité de Haute tension », Edition Géorgie, Traité d'électricité, 1990.
- [9] G G. Raju, «dielectrics in Electrics fields », CRC , 2003.
- [10] J.C. Dubois, « Propriétés diélectriques des plastique», techniques de l'ingénieur, Am3140, 2001.
- [11] R.Coelho, R.Fournie, « Diélectriques, Bases théoriques », techniques de l'ingénieur, D 2300. 2000.
- [12] P. Robert, « Matériaux de l'électrotechnique », Edition Géorgie, Traité d'électricité, EPF Lausanne, 1982.
- [13] J. W. Summers, "A review of Vinyl technology", Journal of Vinyl & Additive Technology, Vol. 3, N° 2, pp. 130-139, June 1997.
- [14] 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.

- [15] Z.HRUSKA, P.GUESNET, C.SALIN, J.COUCHOUD, « Poly (chlorure de vinyle) ou PVC », AM3325, 2007.
- [16] 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.
- [17] N. Khaleche, « Rupture par arborescence électrique du PVC vieilli thermiquement », Thèse de Magister, ENP, 1993
- [18] A. Barlow, « The chemistry of polyethylene insulation », IEEE, Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, N° 1, pp. 8-19, 1991.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] D.Bouguedad, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène propylène diène monomère », thèse de doctorat, UMMTO, 2010.
- [23] J. Verdu, « Vieillissement physique », Techniques de l'Ingénieur, Publication A3150, 1980.
- [24] J. Verdu, « Vieillissement des plastiques », AFNOR Technique, Edition Eyroles, Paris 1984.
- [25] 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.
- [26] J. Verdu, « Vieillissement chimique », Techniques de l'Ingénieur, Publication A3151, 1980.
- [27] X. Buch, « Dégradation thermique et fluage d'un adhésive structural époxyde », Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2000.
- [28] J.P. Crine, H.St. Onge, "Evaluation of ageing in transmission and distribution extruded dielectric cables", R.G.E., N°3, Mars 1988.

- [29] A.T. Bulinski, S.S. Bamji, R.J. Densley, « Influence of the oxidation on water tree initiation and growth in XLPE cables », IEEE, Proceeding of the 3rd International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, pp. 422-426, 1989.
- [30] H.M. Banford, R.A. Fouracre, A. Faucitano, A. Buttafava, « Correlation of dielectric behaviour with chemical structure in aged polypropylene », IEEE, Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 385-390, 1994.
- [31] J.V. Gulmine, L. Akcelrud, «Correlation between structure and accelerated artificial ageing of XLPE», European Polymer Journal, Vol.42, Issue 3, pp. 553-562, March 2006.
- [32] J.Verdu, « comportement à long terme », techniques de l'ingénieur, A3150, 1980.
- [33] M. Nedjar, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du PVC utilisé dans l'isolation des câbles de H.T », Thèse de Magister, U.T.O, Tizi-Ouzou, Décembre 1991.
- [34] M. Nedjar, A. Boubakeur, A. Bérroual, M. Bournane, « Thermal aging of Polyvinyl Chloride used in electrical insulation », Annales de Chimie, Science des Matériaux, Vol. 28, pp. 97-104, 2003.
- [35] 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.
- [36] S. Luzuriaga, J. Kovarova, I. Fortelny, «Degradation of pre-aged polymers exposes to simulated recycling: Properties and thermal stability», Polymer Degradation and Stability, Vol. 91, Issue 6, pp. 1226-1232 , June 2006.
- [37] L. Deschamps, C. Caillot, M. Pars, J. Perret, «L'utilisation des matériaux synthétiques pour l'isolation des câbles haute tension et très haute tension», R.G.E., Tome 83, N°5, pp. 343-360, Mai 1983.
- [38] Guy Binet, « Traitement numérique du signal - Signaux et systèmes discrets », Ellipses, 2013.
- [39] G. Blanchet, M.Charbit, «Traitement numérique du signal », Techniques de l'ingénieur, traité électronique, E 3087.
- [40] S.V.Vaseghi, « Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction », 2ème édition, 2000.
- [41] S. Jaffard. *Developments of Mathematics : 1950-2000*. Birkhauser Verlag., Basel, 2000.
- [42] Frédéric Truchetet, « Ondelettes pour le signal numérique », EDITION HERMES, Avril 1998.
- [43] M. Misiti, Y.Misiti, G. Oppenheim, J.M.Poggi, «Wavelets Toolbox Users Guide ». Wavelet Toolbox for use with MATLAB®, 2000.

- [44] Introduction to Wavelets and Wavelets Transforms, A primer. 1998.
- [45] S. Hamnane, « De l'analyse de Fourier traditionnelle aux ondelettes : une approche par le signal musical », Université Pierre et Marie Curie, 2004.
- [46] B. B. HUBBARD, « Ondes et ondelettes : La saga d'un outil mathématique », Belin, 1995.
- [47] polyValens. A really friendly guide to wavelets, 2014.
- [48] P. ABRY, P. FLANDRIN, « Ondelettes et Turbulences », Diderot Éditeur, Arts & Sciences, 1997.
- [49] R. Benzid, « Ondelettes et Statistiques d'Ordre Supérieur Appliquées aux Signaux Uni et Bidimensionnels », Thèse de doctorat, Université de Batna, Algérie, 2005.
- [50] X. Zhou, C. Zhou, and I. J. Kemp, « An Improved Methodology for Application of wavelet transform to partial discharge measurement denoising », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol.12, pp. 586-594, 2005.
- [51] L.Qarta, « Une introduction (élémentaire) à la théorie des ondelettes », Université de Mont Henold, Institut de mathématique, cahier pédagogique N° 22, Belgique, 22 novembre 2001.
- [52] Wavelet Toolbox, for Use with MATLAB. 1997.
- [53] K.Dinesh, S.Ashwin, V.Harish, E.VarathKanth, C.Venkataseshaiah, 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.
- [54] E. Ghys, « L'attracteur de Lorenz, paradigme du chaos », CNRS - ENS Lyon, Séminaire Poincaré XIV, pp.1-52, 2010.
- [55] E.N. Lorenz, « Deterministic non periodic flow, » J. Atmosph. Sci. 20 (1963), pp.130-141, 1968.
- [56] M.Bouhaouche, A.K.Chaou « Diagnostic de l'état de surface d'un isolateur pollué de haute tension en utilisant les méthodes de traitement de signal » Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, juin 2012.
- [57] B.Moula, « Diagnostic des isolateurs haute tension sous tension alternative 50Hz » thèse de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2013.
- [58] F. Takens, « Detecting strange attractors in turbulence », In Lecture notes in mathematics, Dynamical systems and turbulence, Vol. 898, Berlin, page 366, 1981.
- [59] N.Packard, J.Crutchfield, J.Farmer, and R.Shaw, « Geometry from a time series ». Phys. Rev. Lett., pp. 45-712, 1980.

- [60] J.P.Huke, « Embedding non-linear dynamical systems : a guide to Takens theorem », Manchester Institute of Mathematical Sciences, 2006.
- [61] H. S. Kim, R. Eykholt, and J.D. Salas, « Nonlinear dynamics, delay times, and embedding windows ». *Physica D*, 1999, pp. 48–60.
- [62] H.G. Ma, X. H. Li and G.H. Wang, « Selection of embedding dimension and delay time in phase space reconstruction ». *J. Xi'an Jiao tong University*, 2004, pp. 335–338.
- [63] M. Small, C.K. Tse, « Optimal embedding parameters : a modeling paradigm ». *Physica D. Nonlinear phenomena*, 2004, pp. 283–296.
- [64] Y. Wang, W. Xu, « The methods and performance of phase space reconstruction for the time series in Lorenz system ». *J. Vibration Engrg*, 2006, pp. 277–282.
- [65] C.B. Xiu, X.D. Liu and Y.H. Zhang, « Selection of embedding dimension and delay time in the phase space reconstruction ». *Trans. Beijing Institute of Technology*, 2003, pp. 219–224.
- [66] Y.Zhang, C.L.Ren, « The methods to confirm the dimension of re-constructed phase space », *J. National University of Defense Technology*, 2005, pp. 101–105.
- [67] C.Weï-Dong, Q.Yi-Qinget and Y.Bing-Ru, « Determination of phase-space reconstruction parameters of chaotic time series », *Kybernetika*, Vol. 44, issue 4, pp. 557-570, 2008.
- [68] H. Poincaré, « Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique », *Acta Mathematica*, 1890, pp. 1–271.
- [69] J.P.Eckman, S.Oliffson Kamphorst and D.Ruelle, « Recurrence plots of dynamical systems », *Urophysics Letters*, 1987, pp. 973-977.
- [70] B.X. Du, D.S. Dong, « Recurrence plot analysis of discharge current in tracking test of Gamma-ray irradiated polymer », *IEEE Trans. Dielec. Electr. Insul.*, Vol. 15, No. 4, pp. 974–981, August 2008.
- [71] G.M. Mindlin, R.Gilmore, « Topological analysis and synthesis of chaotic time series », *Physica D*, Vol. 58, pp. 229-242, 1992.
- [72] J.M. Nichols, S.T. Trickey and M. Seaver, « Damage detection using multivariate recurrence quantification analysis », *Mech. Syst. Signal Process*, 2006, pp. 421–437.
- [73] A. Giuliani, C. Manetti, « Hidden peculiarities in the potential energy time series of a tripeptide highlighted by a recurrence plot analysis: a molecular dynamics simulation », *Phys. Rev*, 1996, pp. 6336–6340.
- [74] N. Marwan, « Encounters with neighbours: current development of concepts based on recurrence plots and their applications ». Ph.D. Thesis, University Potsdam, 2003.

- [75] J.P. Zbilut, C.L. Webber Jr., « Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots », *Phys. Lett*, 1992, pp. 199–203.
- [76] C.L. Webber Jr., J.P. Zbilut, « Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies », *J. Appl. Physiol*, 1994, pp. 965–973.
- [77] C.E.I. 216, « Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials, Part 1 », 1990.
- [78] C.E.I. 611, « Guide for the preparation of test procedures for evaluating the thermal endurance of electrical insulation systems », Edition 1978.
- [79] 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.
- [80] IEC 502, « Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV up to 30 kV », 2nd edition, 2004.
- [81] 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.
- [82] D. Broomhead, G. King, « Extracting qualitative dynamics from experimental data », *Physica D*, 1986, pp. 209-217.
- [83] 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.