

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Electromécanique.

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Par

- Djendel Souhaib
- Djendel Haroune Errachid

Intitulé

*Analyse des courants associés aux streamers dans les huiles
synthétique*

Soutenu le :

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. ZAOUI Fares</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.REFFAS Abderrahim</i>	<i>MCA...</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. BENNIA Abderrazek</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. MERABET Elkheir</i>	<i>PR</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Dédicaces

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que nous dédions ce modeste travail de fin d'étude à tous ceux qui ont contribué à notre réussite et nous ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux.

Sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation, depuis le Primaire à ce jour, en particulier : Dr REFFAS Abderrahim, Nous espérons qu'un jour, nous pourrons leurs rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour nous, que dieu leur prête bonheur et longue vie. Nous dédions aussi ce travail à nos frères et sœurs, nos familles, nos amis, tous nos professeurs qui nous ont enseigné et à tous ceux qui nous sont chers A tous nos amis et nos collègues surtout et à tous ceux qui m'ont aidé pour réaliser ce mémoire.

A l'ensemble des étudiant de ma promotion, particulièrement ceux d'électromécanique

Remerciement

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de ma formation et qui m'ont aidé à rédiger ce mémoire. Tout d'abord, je tiens à remercier monsieur Abderrahim Reffas. Je tiens également à remercier toute l'équipe pédagogique de l'université de BBA. Je tiens à exprimer ma gratitude aux personnes suivantes pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire. Je tiens à remercier mon père, ma mère, ma femme, et mes frères pour leurs soutiens moral.

Je remercie mes amis Souhaib Athmani, Azzedin Djendel, Djendel Moussa, Abbed Nabil, et Azzedin Labachi qui ont toujours été à mes côtés. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide. Enfin, je remercie Dieu, le Tout Miséricordieux, de m'avoir aidé à réaliser tous mes objectifs jusqu'à présent et je lui demande de me donner patience, direction et piété.

Djendel Souhaib

Remerciement

Avant tous, je remercie Dieu de m'avoir donné la force réaliser ce présent travail.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur REFFAS ABDRAHIM, pour avoir assuré également l'encadrement de mon travail. Je tiens à remercier mon père, ma mère, et mes frères pour leurs efforts qui ont toujours été mes côtés.

Je remercie mes amis souhaib Athmani, Azzedin Djendel, Djendel moussa, et Abbed Nabil, qui ont toujours été à mes côtés. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Enfin, je remercie Dieu, le Tout Miséricordieux, le Tout Miséricordieux de m'avoir aidé à réaliser tout cela objectifs jusqu'à présent et je lui demande de me donner patience, direction, piété et suffisant.

Djendel Haroune errachid

Résumé

Ce travail porte sur l'analyse et l'étude des signaux de courants qui accompagnent la propagation des streamers dans une huile synthétique sous tension impulsionnelle de foudre en utilisant un système d'électrode pointe-plan. On a constaté qu'il y a une similitude dans la forme des courants obtenus en polarité positive et négative. Pour la caractérisation des ses signaux, on a utilisé une de traitement de signal à savoir le transforme de Fourier rapide (FFT).

Mots clés : huiles isolantes, huile ester synthétique, FFT, Streamers.

ABSTRACT

This work focuses on the analysis and study of the current signals that accompany the propagation of streamers in a synthetic oil under lightning impulse voltage using a point-plane electrode system. It has been found that there is a similarity in the shape of the currents obtained in positive and negative polarity. For the characterization of its signals, we used a signal processing method, namely the fast Fourier transform (FFT).

Keywords: insulating oils, synthetic oil, FFT, Streamers.

ملخص

يركز هذا العمل على تحليل ودراسة التيارات الكهربائية التي تصاحب انتشار ا لشرارات الكهربائية في الزيت الاصطناعي تحت جهد النبضات الصاعقة من خلال توحيد نظام قطب كهربائي ذو مستوى نقطي. لقد وجد أن هناك تشابهًا في شكل التيارات التي تم الحصول عليها في القطبين الموجب والسالب. لتوصيف إشاراتهما، تم استخدام فورييه السريع لمعالجة الإشارات،

كلمات مفتاحية: الزيت الاصطناعي، ظواهر انهيار وقبل انهيار الجهد، تحول فورييه السريع،

LISTE DES FIGURES

Chapitre 01

Figure 1.1 : Principaux constituants de l'huile minérale issue du pétrole brut	6
Figure 1.2 : Processus de raffinage pour les huiles brutes.	6
Figure 1.3 : Structure chimique d'un ester synthétique.....	10
Figure 1.4 : Structure chimique générale des huiles silicones.....	10
Figure 1.5 : Structure chimique d'une huile végétale, aussi appelé triester (triglycérides);R, R'et R'' sont les chaînes acides gras du même ou de la différent types.....	11

Chapitre02

Fig. 2.1. Exemples de streamers dans VO-AT (a) et MO (b) sous tension de choc de foudre positive	20
Figure 2.2 : Exemples de streamers dans VO-AT (a) and MO (b) sous tension de choc de foudre négative.....	21

Chapitre 3

Figure 3.1: Courants de streamers mesurés en polarité négative. A=122kV.....	32
Figure 3.2 : résultats de la FFT en polarité négative A=122 kV.....	32
Figure 3.3: Courants de streamers mesurés en polarité positive . A=124kV.....	33
Figure 3.4 : résultats de la FFT en polarité positive A=124 kV.....	33
Figure 3.5: Courants de streamers mesurés en polarité positive . A=108kV.....	34
Figure 3.6 : résultats de la FFT en polarité positive A=108 kV.....	34
Figure 3.7: Courants de streamers mesurés en polarité positive . A=98kV.....	35
Figure 3.8 : résultats de la FFT en polarité positive A=98kV.....	35
Figure 3.9: Courants de streamers mesurés en polarité positive . A=114kV.....	36

Figure 3.10 : résultats de la FFT en polarité positive A=114 kV.....	36
Figure 3.11 : Courants de streamers mesurés en polarité positive . A=94kV.....	37
Figure 3.12 : résultats de la FFT en polarité positive A=94 kV.....	37

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre 01 : Les Huiles Des Transformateurs.	
1.Introduction.....	4
1.2. Rôles des huiles isolantes dans un transformateur.....	4
1.3 .Composition D'une Huile isolante	5
1.3.1. Les huiles minérales.....	5
1.3.2. Les huiles de semi synthèse	7
1.3.3. Les huiles de synthèse ou synthétiques.....	7
1.3.4 Huiles silicones.....	10
1.3.5 Les huiles végétales ou esters naturels.....	11
1.4 Conclusion.....	12
Chapitre 02 : Les phénomènes de claquage et pré claquage (streamers).	
2.1 Introduction.....	14
2.1 Phénomène de décharges aux interfaces liquide/solide.....	14
2.2.1 Distribution des charges à l'interface liquide/solide.....	15
2.3 les streamers	16
2.3.1 Phase de génération.....	17
2.3.2 Phase de propagation	18
2.3.3 Longueur finale des décharges.....	19
2.3.4 .La forme des Streamers.....	20
2.4.Conclusion.....	21
Chapitre 03: Résultats et Discussions.	
3.1 Introduction	30.
3.2.Transformation de Fourier rapide FFT	30
3.3 Méthodes d'analyse du signal.....	31

3.4. Analyse ampérométrique et spectrale	31
3.5 Discussion:	38
3.5. Conclusion	38
3.6 Conclusion générale	39
Références bibliographiques.....	40

Introduction générale

Introduction générale

Les huiles synthétique sont utilisées depuis longtemps dans l'industrie électrique : transformateurs de puissance, réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prise... Elles sont utilisées comme imprégnant d'isolations cellulosiques et/ou comme produit de remplissage des matériels. Leur première qualité est d'être capable de résister à des champs électriques élevés. Par ailleurs, elles sont généralement très fluides, de manière à assurer, en plus de l'isolation électrique, le refroidissement par convection naturelle ou forcée. C'est le cas en particulier dans les transformateurs de puissance où la chaleur doit être efficacement évacuée. Or les huiles s'épaississent lorsque la température baisse (leur viscosité augmente) et au-dessous d'une certaine température, appelée point d'écoulement, elle ne coule plus du tout.

La rigidité diélectrique des isolants liquides a été depuis longtemps étudiée principalement par des méthodes empiriques : mesure du claquage et des décharges partielles dans de larges gammes de conditions. Malgré tous ces efforts, il reste toujours très difficile de prédire les propriétés de claquage et d'extrapoler des données lorsque les conditions expérimentales ou la nature du liquide changent. Aucun modèle physique de prédiction du claquage des liquides n'est disponible actuellement. La caractérisation expérimentale des phénomènes de préclaquage (appelées « streamers ») dans les liquides constitue une approche plus scientifique du problème du claquage, en comparaison de la seule mesure de tensions de claquage généralement réalisée dans les essais normalisés

Les streamers sont caractérisés par leur forme et leur vitesse. Ils sont accompagnés de courants, d'émission lumineuse et d'ondes de chocs. Ces caractéristiques dépendent de la composition chimique et des propriétés physiques du liquide (pur ou contenant de faibles concentrations d'additifs spécifiques), de la pression et de la température, de la géométrie des électrodes, de l'amplitude, de la polarité, et de la forme de la tension, des contaminants de l'air, de l'humidité, des particules et autres traces d'impuretés présentes. Il existe une corrélation étroite entre ces différentes caractéristiques [1, 2].

Le premier chapitre présente les différents types d'huiles isolantes (minérales, esters synthétiques et végétales) et leurs rôles dans les matériels électriques. Il présente en particulier les connaissances concernant les huiles synthétiques utilisées dans les transformateurs.

Introduction générale

Le deuxième chapitre explique la phase de génération et la phase de propagation des streamers et les différents paramètres qui influencent sur ces deux phases.

A la fin, nous présentons l'analyse des courants associés à la propagation des streamers sous tensions impulsionnelles sous une polarité négative.

Chapitre 01

*Les huiles pour
transformateurs de puissance*

1.1 Introduction

Les huiles isolantes sont utilisées dans les transformateurs pour l'isolation électrique et le refroidissement. Les huiles synthétiques proviennent comme l'huile minérale, du pétrole brut. Toutefois, la principale différence se situe au moment du raffinage qui demande davantage de travail dans le cas d'une huile de synthèse. En effet, une huile synthétique est une huile obtenue par synthèse chimique de molécules spécifiquement sélectionnées dans les laboratoires, pour garantir un lubrifiant plus pur et donc plus performant. Elle peut aussi être conçue par hydrocraquage d'une huile minérale. Dans ce chapitre nous allons essayer de voir la différence entre les différents types d'huiles qui existent dans le marché.

1.2 Rôles des huiles isolantes dans un transformateur

Les huiles isolantes sont utilisées en électrotechnique comme imprégnant d'isolation solide. Dans la partie active d'un transformateur, l'isolation entre les éléments portés à des potentiels électriques différents est assurée soit :

- Par le diélectrique liquide seul, lorsqu'il s'agit d'une isolation entre deux pièces métalliques nues (plots de commutateur par exemple).
- Par une couche solide (papier ou carton) imprégnée de diélectrique liquide, c'est le cas par exemple de l'isolation entre deux conducteurs voisins d'un même enroulement.
- Par une isolation mixte: combinaison de films de diélectrique liquide et de barrières d'isolants solides, c'est le cas d'une isolation entre deux enroulements concentriques de tensions différentes.

Les principales propriétés qui permettent de juger de l'aptitude d'une huile à remplir sa fonction isolante sont la rigidité diélectrique, le facteur de dissipation ou facteur de perte ($\tan\delta$), la permittivité diélectrique et la résistivité. Ces caractéristiques sont essentielles pour le dimensionnement d'un transformateur [5]. Le rôle de fluide caloporteur transportant l'énergie thermique dégagée par les enroulements et circuit magnétique vers le système de refroidissement (cuve, radiateurs, tubes à ailettes ventilés, etc.).

Le caractère isolant de l'huile dépend fortement de sa qualité. Or au fil du temps, elle se dégrade progressivement. L'humidité, la température et l'oxygène constituent les principaux facteurs du vieillissement de l'huile, [9]. Cette dégradation peut induire à l'amorçage entre spires ou entre les enroulements endommageant le transformateur. Dans ce cas, un traitement s'avère nécessaire pour qu'une huile usée puisse être réutilisable, [10.] On peut se passer du traitement d'huile usée en utilisant de l'huile diélectrique neuve.

1.3 Composition d'une huile isolante :

Une huile ayant les propriétés demandées pour une utilisation donnée est constituée : d'une huile de base (minérale, synthétique ...) et d'un certain nombre d'additifs, ajoutant chacun une propriété particulière.

1.3.1. Les huiles minérales :

L'huile minérale provient de la distillation du pétrole brut. Elle ne coûte pas cher et affiche des performances "moyennes".

Le processus d'obtention de cette huile n'est pas parfait : les molécules obtenues diffèrent en taille. Autrement, cela affecte l'uniformité de l'huile et limite ses possibilités d'application. Des produits indésirables (paraffines, solvants légers...) peuvent également rester dans cette huile de base. L'huile minérale et particulièrement les huiles minérales naphthéniques ont une faible viscosité comparée aux autres huiles isolantes pour transformateurs ceci permet une bonne évacuation de la chaleur et un démarrage à froid correct .mais aussi une bonne imprégnation des isolants cellulose.

Les huiles minérales sont utilisées comme isolants dans les équipements électriques depuis plus d'un siècle. Mis à part les transformateurs de distribution, lesquels sont soumis à des contraintes de fonctionnement particulières, les transformateurs immergés sont généralement remplis d'huile minérale. Les caractéristiques principales requises pour l'huile minérale sont [11] :

- Une faible viscosité et un bon point d'écoulement pour assurer sa circulation ;
- Un point éclair élevé ;

- Une bonne stabilité chimique vis-à-vis des phénomènes d'oxydation et de décomposition ;

Une rigidité diélectrique élevée, du processus de raffinage, on peut identifier différents types d'huiles (figure 1.2). Elles sont divisées en trois groupes comme le montre la figure 1.2. Les alcanes (ou paraffines), les cyclanes (ou naphnes) et les composés aromatiques. D'autres constituants peuvent être présents dans l'huile, à savoir de petites quantités de sulfure (0.1 à 7 % en masse), d'azote (0.001 à 2 %) et des traces d'oxygène (400 à 600 ppm en masse). La structure générale de l'huile minérale neuve est $C_{20}H_{41}.6O_{0.3}$ avec une masse moléculaire moyenne située entre 250 et 300 [5].

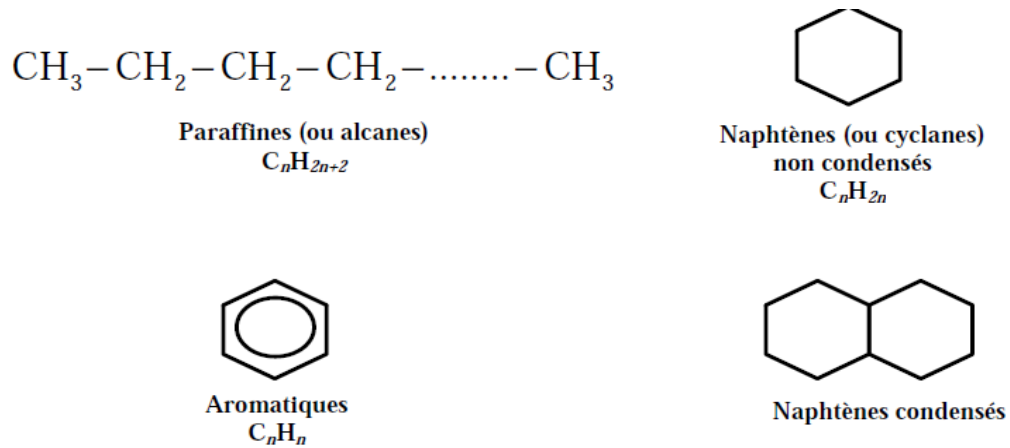


Figure 1.1 : Principaux constituants de l'huile minérale issue du pétrole brut [5].

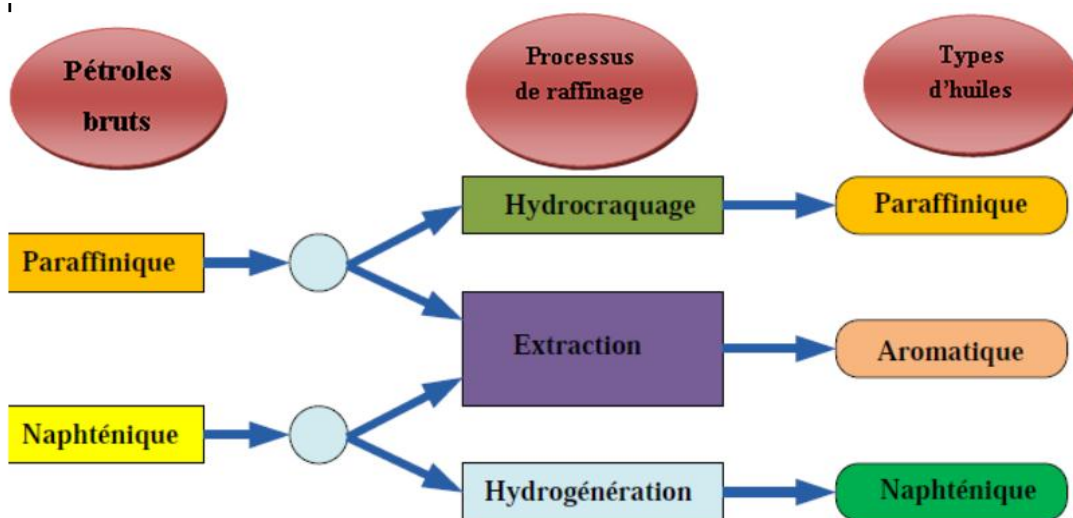


Figure 1.2 : Processus de raffinage pour les huiles brutes [8].

1.3.2. Les huiles de semi synthèse :

Les huiles semi-synthétiques sont obtenues à partir d'un mélange d'huile minérale et de pétrole. Synthétique (généralement 70 à 80 % d'huile minérale et 20 à 30 % d'huile synthétique).

1.3.3. Les huiles de synthèse ou synthétiques :

Dans le cas de l'huile synthétique, on fabrique la molécule dont on a précisément besoin, si bien que l'on obtient une huile de base dont le comportement est voisin de celui d'un corps pur. En créant un produit dont les propriétés physiques et chimiques sont prédéterminées, on fait mieux que la nature. On rajoute ensuite les additifs nécessaires pour répondre à un service voulu. Ces huiles ont des performances élevées, en particulier pour des objectifs et des conditions de service difficiles. Les huiles synthétiques sont utilisées lorsque les caractéristiques requises ne sont pas remplies par les huiles minérales. C'est le cas en particulier lorsqu'il est question d'améliorer la résistance au feu (transformateurs) ou lorsque l'on cherche une meilleure stabilité thermique et de grandes performances diélectriques (câbles et condensateurs).

Ces huiles elles offrent des performances supérieures :

- Indice de viscosité plus élevé.
- Meilleure tenue thermique.
- Meilleure résistance à l'oxydation.

Les huiles synthétiques sont aussi appelées liquides ininflammables (liquides qui ont un point d'éclair minimum au-dessus de 300 °C). En raison de ce degré élevé de résistance à l'inflammation, ils sont utilisés dans les transformateurs situés dans les zones urbaines (c'est à-dire là où la sécurité des personnes et des biens pourrait être compromise par le feu). Une fois les impuretés enlevées, ces huiles deviennent des mélanges très complexes ; elles peuvent comporter plus de 3000 hydrocarbures différents. Ces molécules ne comportent que du carbone et de l'hydrogène.

Exemples de familles d'huiles de synthèse	
Poly glycols	- Bonnes propriétés lubrifiantes, haut indice de viscosité : 150 à 200 m ² /s, faible volatilité (vaporisation), bonne stabilité thermique, incompatible avec les huiles minérales. Exemples d'utilisations : - Polyglycol soluble à l'eau : fluide difficilement inflammable, fluide d'usinage ... - Polyglycol insoluble : fluide de frein, lubrifiant moteur, lubrifiant engrenage. [5]
Ester	- Faible volatilité, bonnes propriétés à froid, bonne tenue thermique, bonne propriété solvante et bonne résistance au cisaillement. Exemples d'utilisation : graisse, turbine à gaz, aviation, utilisé comme additif (pouvoir lubrifiant élevé). [5]
Hydrocarbures synthétiques	Comportement à froid performant, indice de viscosité élevé. Selon la longueur de la chaîne, bonne propriété thermique. Exemples d'utilisations : (polyalphaoléfines) : lubrifiant d'engrenages, compresseur...
Silicone	Inerte chimiquement, grande résistance à la chaleur et à l'oxydation, hydrophobe (qui n'absorbe pas de l'eau), indice de viscosité élevée, bonne propriété à froid, incompatibilité chimique avec de nombreux additifs. Exemples d'utilisations : graisse, fluide hydraulique ...

Tableau des familles d'huiles de synthèse 1.1

Il existe quatre principaux

- Les hydrocarbures aromatiques ;
- Les hydrocarbures aliphatiques tels que les polyoléfines ;
- Les esters synthétiques ou esters organiques (esters de pentaérythritol, les phtalates);
- Les silicones.

Tableau I.2 : Données techniques pour différents types d'esters [13]

	Midel 7131	s-Ester	s-Ester	n-Ester 2
Tan δ (%) à 20 °C	0,001	0,0006	0.001	0.003
Tan δ (%) à 90 °C	<0.03	<0.03	0.009	0.005
ϵ_r à 20 °C	3.3	3	3.0	3.0
Tension de claquage (kV)	<75	99	<75	56
Point de feu (°C)	322	303	365	360
Point d'écoulement (°C)	-60	-50	-31	-21
Viscosité cinématique (mm ² /s) à 40 °C	28	25	37	33

La principale différence entre l'huile synthétique et l'huile minérale réside dans la façon dont elles sont fabriquées. L'huile minérale est essentiellement un dérivé de produits pétroliers qui est ensuite raffiné sous sa forme utilisable. D'autre part, l'huile synthétique est en fait créée à partir de zéro à l'aide de certains produits chimiques. En raison de la façon dont elles sont fabriquées, il y a aussi une grande différence de prix. Les huiles synthétiques coûtent environ deux fois plus cher que les huiles minérales selon la marque. En matière de performance, l'huile synthétique bat l'huile minérale. L'huile synthétique peut également résister à de plus grandes quantités de chaleur avant de se décomposer.

Les esters sont obtenus par synthèse d'un acide et d'un alcool. Les polyesters et les esters complexes sont utilisés dans des conditions extrêmes (contraintes élevées) comme dans le cas des transformateurs de puissance. Ces groupes d'esters sont les plus utilisés à cause de l'absence de groupes hydroxyles secondaires et un carbone quaternaire dans leur structure chimique en position β . Les alcools typiques utilisés pour la synthèse sont des peo-penty glycol, triméthylolpropane, pentaérythritol ou dipentaérythritol.

L'ester synthétique le plus utilisé dans les transformateurs de distribution est le Midel 7131 à cause de son aspect respectueux de l'environnement et aussi de sa bonne résistance au vieillissement [6]. L'utilisation des esters dans les transformateurs de puissance est principalement limitée à cause de leur prix trop élevé et de leur viscosité élevée. La figure 1.3 présente la structure chimique d'un ester synthétique.

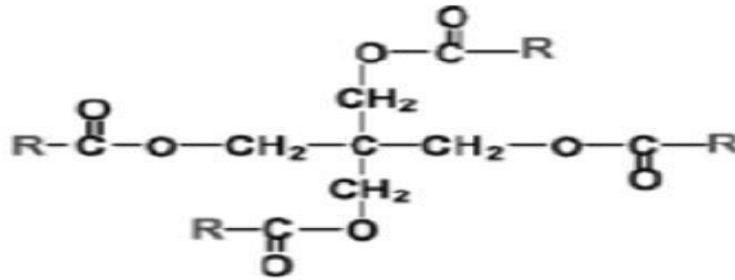


Figure 1.3 : Structure chimique d'un ester synthétique [6].

1.3.4. Huiles silicones

Les silicones, ou encore polysiloxanes, sont des composés inorganiques formés d'une chaîne silicium-oxygène (...-Si-O-Si-O-Si-O-...) sur laquelle des groupes se fixent, sur les atomes de silicium. La formule générale des huiles silicones est $(\text{CH}_3)_3\text{Si}-(\text{C}_2\text{H}_6\text{OSi})_n-\text{Si}(\text{CH}_3)_3$. Les huiles silicones utilisées dans les transformateurs de puissance correspondent à des enchaînements avec n égal à 40 à 50, afin d'obtenir une viscosité acceptable avec un point de feu supérieur à 330 °C. Elles possèdent de bonnes propriétés contre le vieillissement et l'oxydation. Leur stabilité est liée à l'énergie de la chaîne Si-O (374 au lieu de 245 kJ/mol pour la chaîne C-C). L'huile silicone est incolore ; elle est caractérisée par un point d'écoulement très bas comparé à celui des huiles minérales, même si sa viscosité à 20 °C est plus élevée. Les huiles silicones sont également utilisées pour l'imprégnation de condensateurs au film de polypropylène métallisé. La figure 1.4, présente la structure chimique générale des huiles silicones.

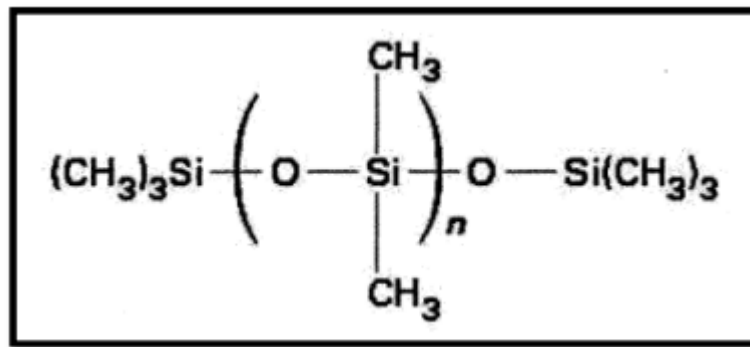


Figure 1.4 : Structure chimique générale des huiles silicones [6]

1.3.5 Huiles végétales ou esters naturels

Les huiles végétales ont été les premières huiles isolantes utilisées pour l'appareillage électrique ; la première des applications fût l'imprégnation des condensateurs avec l'huile de ricin. Elles sont essentiellement constituées de triglycérides, c'est à dire un triester sachant que la formule d'un ester est $\text{R-COO-R}'$. Les huiles végétales portent aussi le nom d'esters

naturels ou d'huiles végétales (par opposition aux esters synthétiques ou organiques) car elles sont synthétisées naturellement par tout organisme vivant et peuvent provenir de différentes semences telles que le tournesol, le colza, le soya....

Les huiles esters végétales sont obtenues par estérification d'un tri-alcool simple, avec trois acides gras. Ces acides sont monocarboxyliques (de formule R-COO-H), à chaîne linéaire non branchée comprenant un nombre pair d'atomes de carbone. Ils peuvent être saturés ou insaturés et parfois hydroxylés. Les triglycérides sont obtenus par trituration (broyage et pression) des graines. La réaction d'estérification d'une huile végétale est la suivante (Figure 1.5)

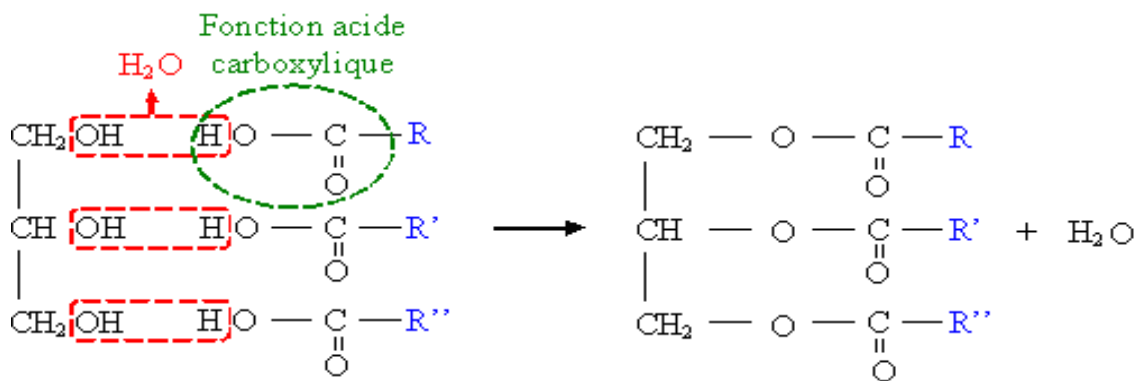


Figure 1.5: Structure chimique d'une huile végétale, aussi appelé triester (triglycérides);R, R' et R'' sont les chaînes acides gras du même ou de la différent types

Un des grands atouts de ces huiles est leur excellente biodégradabilité qui malheureusement en contrepartie leur confère une grande sensibilité à l'oxydation. De ce fait, leur usage est limité aux appareillages électriques scellés qui ne sont pas respirant, c'est à dire sans communication avec l'atmosphère, où cette sensibilité est compensée avec des antioxydants dont les propriétés environnementales sont mauvaises (produits "noverts").

Leurs autres atouts sont leur faible inflammabilité et leur grande capacité à absorber l'eau (grande solubilité de l'eau), comme les esters organiques, comparés aux huiles minérales. Outre ces deux avantages, ce type d'huile présente une viscosité plus élevée que les huiles minérales et notamment un point d'écoulement assez haut (aux alentours de -20°C), ce qui limite le transfert de chaleur et restreint leur usage dans les pays où le climat n'est pas trop froid. Enfin, les huiles végétales neuves ont des propriétés électriques voisines de celles des huiles minérales, bien que leur résistivité soit moins élevée.

1.4. Conclusion

Ce chapitre est consacré à distinguer les principales caractéristiques des différentes huiles. Les huiles synthétiques offrent le meilleur rapport prix/performance et une compatibilité élevée avec les autres matériaux utilisés dans les transformateurs. Ses inconvénients sont une faible résistance au feu et une faible biodégradabilité. La plupart des caractéristiques de performance des esters naturels sont bien supérieures aux huiles synthétiques conventionnelles, y compris la sécurité incendie, la compatibilité des matériaux, les propriétés électriques et thermiques et les taux de vieillissement des isolants solides considérablement réduits.

Chapitre 02

*Les phénomènes de claquage
et pré claquage (streamers)*

2.1 Introduction

Le claquage du matériau (ou claquage des isolants liquides) est précédé d'une phase de pré-claquage au cours de laquelle divers phénomènes peuvent se produire. Cette phase de pré-claquage est elle-même constituée de deux phases : la phase de génération et la phase de propagation. Dans un gaz, si le champ électrique dépasse un seuil critique, la phase de génération est le niveau où la décharge corona provient d'une électrode pointue et évolue en un streamer ou un streamer à de courtes distances < 1 cm - conduisant à de longues distances (propagation)). Ces décharges arborescentes peuvent provoquer un claquage de l'entretoise d'isolation si la tension atteint une valeur critique appelée tension de claquage. Dans les liquides, des canaux plus ou moins conducteurs se créent et se propagent sous forme d'arbres avant le claquage électrique. Dans le cas des liquides, la phase de génération est la phase d'émergence de bulles au niveau des électrodes pointues lorsque la tension dépasse le seuil, suivie d'un échauffement localisé dû à l'injection d'énergie de plusieurs η J, induite par des impulsions de courant en fonction de l'interface gaz/bulle instabilité. Différentes formes dendritiques peuvent apparaître, appelées streamers (zones ionisées avec un indice de réfraction différent de celui du liquide environnant). Les streamers sont des filaments de gaz plus ou moins conducteurs et de petit diamètre (dizaines de microns) appliqués selon la forme et la durée de l'onde de tension, la flûte peut s'arrêter ou avancer jusqu'à la contre-électrode ; généralement, lorsqu'elle atteint cette électrode (ou s'en approche très près), un arc se crée. La forme et la vitesse de la flûte dépendent de la tension appliquée (forme, amplitude et polarité), de la géométrie des électrodes et des propriétés physico-chimiques. Dans ce chapitre nous essayons de montrer les différents phénomènes dans les diélectriques liquides.

2.2 Phénomène de décharges aux interfaces liquide

Des décharges glissantes sont souvent observées sur les surfaces de certains composants (jeux de barres ou cartons) des équipements haute tension (HT) remplis d'huile tels que les transformateurs de puissance, les condensateurs, les disjoncteurs et les câbles lorsqu'ils sont soumis à de forts champs électriques. De ce fait, ceux-ci peuvent entraîner une détérioration partielle ou totale du système d'isolation, nécessitant la réparation voire le remplacement des

équipements. Par conséquent, la compréhension des mécanismes physico-chimiques impliqués dans l'initiation et la propagation de tels rejets est importante pour concevoir et

Dimensionnement des équipements hauts pression remplis d'huile et prédiction de ces défaillances. Par conséquent, il est essentiel de comprendre les mécanismes et les conditions dans lesquelles ces décharges sont initiées et développées pour éviter d'endommager l'équipement.

2.2.1 Distribution des charges à l'interface liquide

En mettant en contact deux phases quelconques, elles créent une différence de potentiel à l'interface, notamment lorsqu'il s'agit de deux surfaces hétérogènes. Par conséquent, selon le principe de neutralité électronique. Lorsque l'huile isolante est en contact avec une matière cellulosique, elle se charge positivement, tandis que l'isolant liquide sous l'huile isolante se charge négativement.

Le principe suivant : le matériau ayant la constante diélectrique la plus faible est chargé positivement, et les autres sont chargés négativement [14]. Les atomes d'oxygène contenus dans les groupes hydroxyle de la cellulose sont hautement électronégatifs ; la molécule de cellulose est constituée d'une série d'unités, chacune contenant trois groupes hydroxyle (-OH). Ainsi, dans la cellulose, les atomes d'hydrogène sont attirés par les atomes d'oxygène, ce qui rend les atomes d'oxygène polarisés négativement et les atomes d'hydrogène positifs. La surface d'une fibre de cellulose isolante solide est recouverte d'atomes d'hydrogène polarisés. Ces atomes d'hydrogène positifs ont une grande affinité pour les ions négatifs de l'huile, de sorte que les ions négatifs sont absorbés par la surface du papier. Cette absorption entraîne l'accumulation de charges positives dans l'huile. Ainsi, les fibres de cellulose absorbent les composés ou les impuretés des huiles qui contiennent des porteurs de charge en excès (ions négatifs). Il en résulte la formation d'une bicouche à l'interface huile/carton, qui modifie la répartition du champ électrique initial [14].]. Plusieurs modèles ont été proposés pour décrire la distribution de charge dans la bicouche. Le premier fut Helmholtz en 1853 [15] ; il fut amélioré par Gouy et Chapman en 1910, puis par Stern [16]. Dans ces modèles, on suppose qu'une fraction d'ions de charges opposées présents dans le liquide est située à la surface du solide pour compenser la charge de ce dernier, mais ces modèles traitent les ions comme des charges ponctuelles.

Les surfaces solides peuvent être approchées à l'infini quel que soit leur diamètre ionique. Sur la base de cette observation, Stern pensait que la différence de potentiel Phase à phase, caractérise le gradient de potentiel entre le solide et le liquide, autrement dit, l'interface comporte deux parties : l'une correspond à un saut brutal de potentiel dans la couche étroitement liée au solide. Elle est causée par l'accumulation d'ions et de dipôles dans une couche de liquide adsorbé sur la surface solide. Solides pour compenser cette dernière charge, cependant, ces modèles traitent les ions comme des charges ponctuelles.

Les surfaces solides peuvent être approchées à l'infini quel que soit leur diamètre ionique. Phase à phase, caractérise le gradient de potentiel entre le solide et le liquide, autrement dit, l'interface comporte deux parties : l'une correspond à un saut brutal de potentiel dans la couche étroitement liée au solide. Elle est causée par l'accumulation d'ions et de dipôles dans une couche de liquide adsorbé sur la surface solide. Cette couche est appelée « sous-couche ou couche dense ». Sa particularité est son épaisseur. La deuxième partie correspond à la différence de potentiel entre la couche dense et le liquide. Cette couche est appelée "couche diffusante".

2.3 Les Streamers :

Au cours des dernières décennies, de nombreuses investigations ont été menées sur les phénomènes de pré-claquage et claquage dans les huiles isolantes. Ces investigations ont fourni des informations cruciales concernant les phénomènes physiques qui se produisent à l'intérieur des diélectriques liquides avant le claquage et en particulier avant la propagation des streamers (Les phénomènes de pré-claquage sont généralement appelés streamers). Ce terme (streamers) est attribué à toutes sortes de figures lumineuses et ramifiées, qui prennent naissance en général au voisinage d'une électrode et qui conduisent le plus souvent à l'établissement d'un arc électrique (claquage) [17]. Généralement, on utilise des mesures électriques et optiques pour étudier les streamers. Une variété de distances d'écart entre les électrodes a été utilisée, allant de 1 mm jusqu'à des dizaines de centimètres. De nombreux travaux ont étudié la phase de propagation des streamers sous tension impulsionnelle avec l'utilisation d'une configuration d'électrode pointe-plan (champ divergent) [5]. Les résultats de ces investigations ont montré qu'il y a deux phases dans le pré claquage : (1) une phase de génération correspondant à l'apparition d'une perturbation au voisinage d'une électrode.

L'instabilité à la surface de cette perturbation conduit à la génération de structures plus ou moins ramifiées : le streamer, et (2) une phase de propagation du streamer vers l'électrode opposée, lorsqu'il atteint cette électrode (ou en est très proche) l'arc se produit [16, 17]. Ces streamers sont caractérisés par des structures différentes selon les conditions expérimentales. Ils sont accompagnés par des courants et des émissions lumineuses. Ils sont accompagnés aussi par des ondes de choc et leur conductivité dépend des mécanismes impliqués dans leur propagation. Les streamers s'arrêtent lorsque le champ électrique devient trop petit, produisant une série de microbulles qui se dissolvent dans le liquide. Ces études étaient principalement effectuées sur des huiles minérales. Le nombre d'études dans ce domaine est limité pour les huiles végétales. L'étude des phénomènes de pré claquage dans les huiles végétales peut aider les chercheurs à améliorer leurs performances [5].

2.3.1 Phase de génération :

La phase de génération est moins documentée par rapport à la phase de propagation. Les travaux qui ont étudié cette phase sous différents types de tensions (AC, DC ou impulsionnelle) et pour différents types de liquides, ont clairement montré que la perturbation observée dans la phase de génération est une bulle de gaz résultant d'un échauffement local du liquide suite à l'injection de courant. L'atténuation d'un faisceau lumineux (rayon laser d'une dizaine de μm de diamètre) éclairant le voisinage de la pointe, avec un léger retard par rapport au signal du courant, en est la preuve. Lorsque la tension appliquée est supérieure à une certaine tension dite seuil de génération, il y aura une injection d'une impulsion de courant de forme triangulaire. L'énergie correspondant au premier pic de courant sert à la vaporisation du liquide, et donc de la création d'une bulle de gaz. Chaque impulsion de courant résulterait d'une avalanche électronique en phase liquide [17].

L'expansion de la bulle est déterminée par les forces électriques. Une fois atteint son rayon maximum, cette bulle montre une série de cycles expansion/implosion avant de disparaître [17]. L'étude de la dynamique d'expansion de la bulle est un problème complexe du fait de la présence de l'onde de choc qui comprime et met en mouvement le liquide derrière elle, ce qui induit une modification du champ de pression à l'interface. En ce qui concerne la phase d'implosion qui lui fait suite, sa dynamique dépend pour beaucoup des caractéristiques du liquide (viscosité en particulier) et de l'énergie injectée. De plus, la bulle perd une grande

partie de son énergie sous la forme d'une émission d'une onde de pression à la fin de chaque phase d'implosion, lorsque son volume est minimal. Quelle que soit la pression appliquée, la durée des rebonds (cycle expansion/implosion) d'une bulle augmente avec la température du liquide [17]. Lorsque la tension appliquée augmente bien au-delà de la tension seuil, le nombre et l'amplitude des impulsions de courant augmentent avec la tension [16]. Chaque impulsion de courant correspond à une décharge dans la bulle initiale et entraîne la création d'une quantité supplémentaire de gaz, le contour de la bulle se déforme et son volume augmente, c'est la phase de propagation. A. Larson et M. Bengtsson [17] ont démontré qu'après formation de la bulle gazeuse, les décharges partielles qui s'y développent provoquent une augmentation de la pression conduisant ainsi au développement de la cavité [17] [5].

2.3.2 Phase de propagation :

Il se dégage trois courants principaux concernant la nature et les processus de formation des streamers. Le premier est basé sur le phénomène d'ionisation en avalanche dans les liquides (comme dans les gaz) donnant lieu à une phase gazeuse ionisée. Le streamer est assimilé à une colonne de plasma dont les porteurs de charge sont produits selon un mécanisme similaire à celui proposé par Zener pour les solides (effet Zener). Les électrons passent par effet tunnel de la bande de valence à la bande de conduction sous l'effet du champ [17]. Le deuxième est basé sur le phénomène d'ionisation en avalanche dans les bulles de gaz résultant d'une vaporisation locale du liquide. Le streamer est considéré comme le développement d'une microbulle créée suite à une injection rapide d'énergie conduisant à l'évaporation du liquide et engendrant la force de poussée. L'expansion de la bulle sera limitée par l'inertie du milieu liquide environnant et par le travail dépensé pour vaincre la pression ambiante [17]. Beroual [15] a montré que les mécanismes gazeux (où la bulle sert de détonateur) et électronique ne peuvent agir singulièrement. L'influence remarquable de la pression hydrostatique sur l'initiation et la propagation des streamers, et l'analyse chromatographique des liquides testés, montrent que la nature physique des streamers est gazeuse. Par ailleurs, l'influence d'additifs capteurs d'électrons sur les streamers négatifs et à bas potentiel d'ionisation sur les streamers positifs, l'effet de la présence d'halogènes dans la structure moléculaire du liquide sur les

streamers négatifs, et l'analyse spectroscopique de la lumière émise par les streamers, indiquent que les processus électroniques sont aussi présents.

La structure des streamers dépend de la polarité de la pointe, du niveau de tension appliqué, de la forme de la tension et de la géométrie des électrodes (distance et rayon de courbure de la pointe). Des recherches ont montré que la forme des streamers joue un rôle important dans le contrôle de la vitesse de propagation des streamers. Avec la variation de la vitesse de propagation, la forme des streamers varie également. Des observations ont montré que les streamers lents ont plus de ramification. Inversement, les streamers rapides sont généralement filamenteux. Cela signifie que la relation entre la vitesse et la ramification est mutuelle [5]. Généralement, les formes arborescentes sont classées comme lents et les formes filamenteuses sont classées comme des streamers rapides. Les streamers positifs sont souvent plus rapides que les streamers négatifs. Par conséquent, les streamers positifs à haute énergie constituent un risque plus important pour des isolateurs haute tension que les négatives. Ils sont à l'origine du claquage dans la majorité des isolations. Pour cela, ils ont été plus systématiquement étudiés par rapport aux streamers négatifs. Le mode de propagation dépend de la valeur de la tension et plus précisément de la valeur du champ électrique. Lorsque la valeur du champ appliqué est modérée (de 1 à 10 MV / cm), la propagation des streamers sera lente, alors que pour des valeurs plus élevées (de quelques dizaines jusqu'à 100 MV / cm) la propagation sera rapide. Certains auteurs classent les streamers en plusieurs modes selon leurs vitesses. 1ère et 2ème mode correspondent aux streamers qui se développent en mode lent, 3ème et 4ème mode correspondent aux streamers qui se développent en mode rapide. Couramment, les streamers observés appartiennent généralement au 2ème ou au 3ème mode et sont nommés lent ou rapide respectivement. En effet, les streamers du 1er mode sont souvent ignorés car ils ont une faible probabilité de provoquer un claquage et même, ils sont très difficiles à repérer, et les streamers du 4ème mode nécessitent des tensions de test très élevées [5].

2.3.3 Longueur finale des décharges

La mesure de la longueur d'arrêt de décharge glissante L_f est très importante car la valeur critique de L_f reflète la tension d'amorçage du carton ; plus la longueur d'arrêt est courte, plus la tension d'amorçage est élevée. La décharge prend naissance près de la pointe, se propage à

la surface du carton et s'arrête à une distance de la pointe appelée "longueur finale" ou "longueur d'arrêt". La valeur de la longueur d'arrêt correspond aux décharges les plus étendues (la valeur radiale maximale). L'arrêt des décharges est une conséquence de la chute de tension entre l'électrode pointe et la tête de la décharge. Pour une tension donnée, il y a une dispersion dans les longueurs finales des décharges mesurées L_f . Les valeurs obtenues sont réparties entre deux limites correspondant aux valeurs minimales et maximales. Les valeurs présentées dans les courbes représentent les valeurs maximales. Sous tension impulsionnelle de foudre, la longueur d'arrêt augmente quasi linéairement avec la tension. D'un autre côté, pour une tension donnée, L_f est plus longue avec une polarité positive qu'avec une polarité négative, ce qui signifie que le niveau de la tension de contournement sous une polarité positive est inférieure par rapport au niveau sous une polarité négative. Des résultats similaires ont été trouvés dans des liquides seuls [17]. Cet effet de polarité suggère que les mécanismes physiques impliqués dans la propagation des décharges glissantes dans l'interface carton/liquide diffèrent selon la polarité et que la charge d'espace joue un rôle important dans la propagation des décharges.

2.3.4 La forme des Streamers

Les figures 2.1 et 2.2 montrent des exemples de streamers positifs et négatifs se propageant dans les huiles VO-AT et MO à différentes valeurs de la tension.

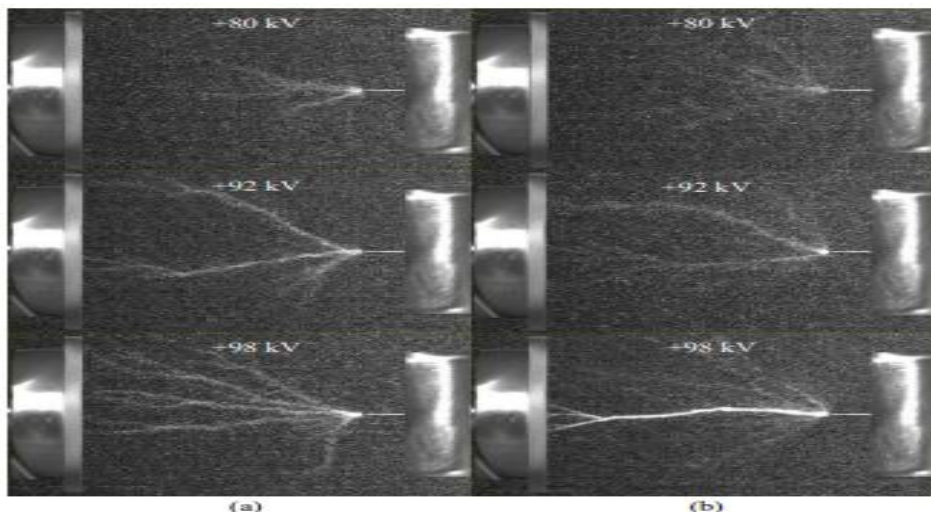


Fig. 2.1. Exemples de streamers dans VO-AT (a) et MO (b) sous tension de choc de foudre positive [25].

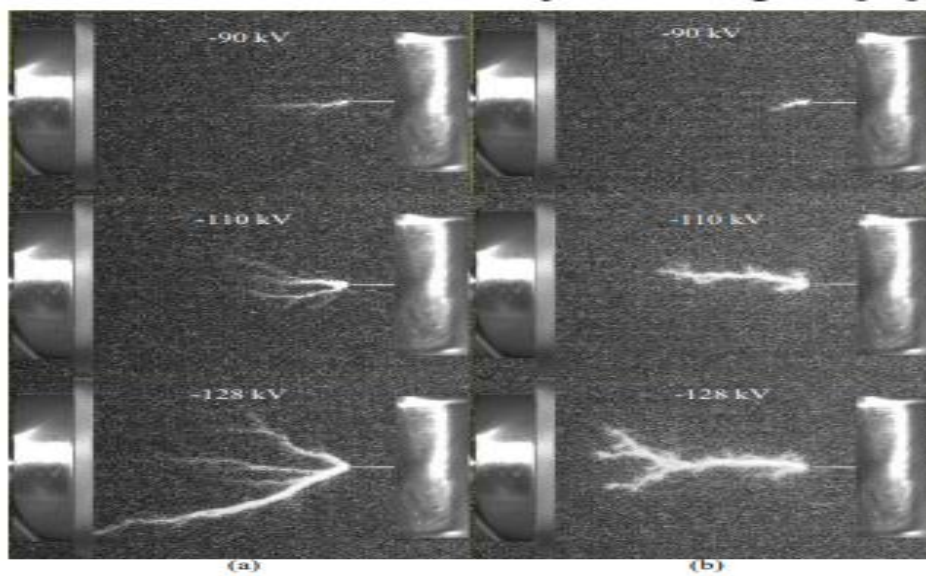


Fig. 2.2. Exemples de streamers dans VO-AT (a) and MO (b) sous tension de choc de foudre négative. [25]

Les streamers négatifs sont généralement plus lumineux que les streamers positifs. Le début des ramifications des branches de streamers est également différent. Pour une polarité négative, la ramification des branches secondaires dans l'huile végétale apparaît juste au début de la propagation alors que dans l'huile minérale, les ramifications apparaissent au niveau de la tête du streamer. Il n'y a aucune différence évidente entre les formes des streamers positifs dans les deux huiles. Néanmoins les branches dans l'huile minérale sont moins lumineuses que celles dans l'huile végétale.

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons remarqué la complexité des phénomènes de pré-claquage et du claquage dans les huiles isolantes. Plusieurs paramètres influent sur la propagation des streamers comme : la géométrie des électrodes, la tension appliquée, structure du liquide, présence ou non d'additifs spécifiques, la pression et la température. À ces paramètres, Il est nécessaire d'ajouter des paramètres externes tels que l'humidité et la présence d'impuretés (particules déformables (bulles, eau en suspension)

Chapitre 03

Résultats et Discussions

3.1 Introduction :

Les transformateurs de puissance sont des équipements importants dans les systèmes de transmission de puissance. Les défaillances des transformateurs peuvent entraîner des pertes importantes pour les gestionnaires de réseau et même mettre en danger l'ensemble du réseau de distribution. Les décharges électriques dans les huiles synthétiques sont particulièrement dangereuses car elles peuvent endommager irrémédiablement l'isolation du transformateur même dans des conditions normales de fonctionnement. À ce jour Plusieurs études ont systématiquement étudié les phénomènes de streamers dans les huiles, tels que les caractéristiques fondamentales, les modes de progression des streamers, les effets et les facteurs d'influence, tels que le vieillissement et l'effet de l'huile utilisée. Dans ce chapitre, nous essayons de présenter les signaux de courant associés aux streamers et de visualiser leur analyse spectrale sous Matlab. (Transformée de Fourier rapide FFT).

3.2. Transformation de Fourier rapide FFT

De manière générale, la transformée de Fourier rapide ou FFT (Fast Fourier Transform) est une technique puissante qui permet d'analyser les signaux dans le domaine fréquentiel. Plus précisément, FFT est un algorithme qui calcule la transformée de Fourier discrète (DFT). Cet algorithme est généralement utilisé pour transformer des données discrètes du domaine temporel au domaine fréquentiel Mathématiquement, l'expression de la transformée de Fourier $X(f)$ d'une fonction réelle continue $x(t)$ est définie pour $0 \leq t \leq \infty$ par :

$$X(f) = \int_0^{\infty} x(t) \exp(-j2\pi ft) dt \dots \dots \dots (3.1)$$

Une représentation discrète d'un signal continu $x(t)$ nécessite des échantillons régulièrement espacés à la fréquence d'échantillonnage F_e , à condition que le signal échantillonné représente correctement le signal continu, s'il peut être reconstitué sans ambiguïté. Alors la question se pose : "Combien d'échantillons sont nécessaires pour représenter avec précision un signal ?". La réponse mathématique à cette question se situe au niveau du théorème d'échantillonnage, souvent appelé théorème de Shannon, qui stipule qu'un signal doit être échantillonné à une fréquence au moins deux fois supérieure à la fréquence la plus élevée : $F_e > 2 f_{\max}$ (Narquis la fréquence).

En prenant une fréquence d'échantillonnage f_e et un temps d'observation T , on aura alors un échantillon (t_n) de taille N . Cela revient à observer $x(t)$ à des temps discrets espacés d'un

pas $\Delta t = 1/f_e$; on observe donc un signal aux instants $t_n = n \cdot \Delta t$ avec $0 \leq n \leq N - 1$. La transformation de Fourier discrète TFD d'un signal s'exprime sous la forme suivante :

$$X(f_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp\left(-\frac{j2\pi kn}{N}\right) \dots \dots \dots (3.1)$$

Avec $k=0,1,2,3 \dots \dots \dots N/2$, et $x(0) \dots \dots x(N-1)$: sont la série temporelle. Cette opération est utile dans de nombreux domaines mais son calcul directement à partir de la définition est souvent trop lent pour être pratique. La transformation rapide de Fourier (FFT) est un moyen de calculer la DFT plus rapidement car elle réduit le coût de calcul.

3.3 Méthodes d'analyse du signal

L'approche de base de l'analyse du signal consiste à obtenir des informations appropriées à partir du signal en appliquant la méthode la mieux adaptée. Les conditions de réversibilité de l'application et représentant le signal d'origine par le formulaire converti doit être satisfait un par un. Les méthodes utilisées dans cette étude sont les transformées de Fourier et d'ondelettes. L'analyse spectrale d'un signal implique la décomposition du signal en sa fréquence. En d'autres termes, le signal d'origine peut être séparé dans ses composantes sous-spectrales en utilisant des méthodes d'analyse spectrale. Parmi les techniques d'analyse spectrale, la transformée de Fourier est considérée comme la meilleure transformation entre les domaines temporel et fréquentiel parce qu'il s'agit d'un décalage invariant. Les paires de transformées de Fourier sont exprimées sous la forme

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) w^{kn} \dots \dots \dots (3.2).$$

3.4. Analyse ampérométrique et spectrale :

Allure des Matlab est un environnement de calcul numérique développé par MathWorks. Il permet des opérations matricielles, le suivi des fonctions et des données, la mise en œuvre d'algorithmes et l'analyse spectrale des signaux, ce qui nous permet d'effectuer la caractérisation fréquentielle des courants de décharge de trois huiles étudiées au moyen de Transformées de Fourier Rapides (FFT) : Analyse Courante et Spectrale :

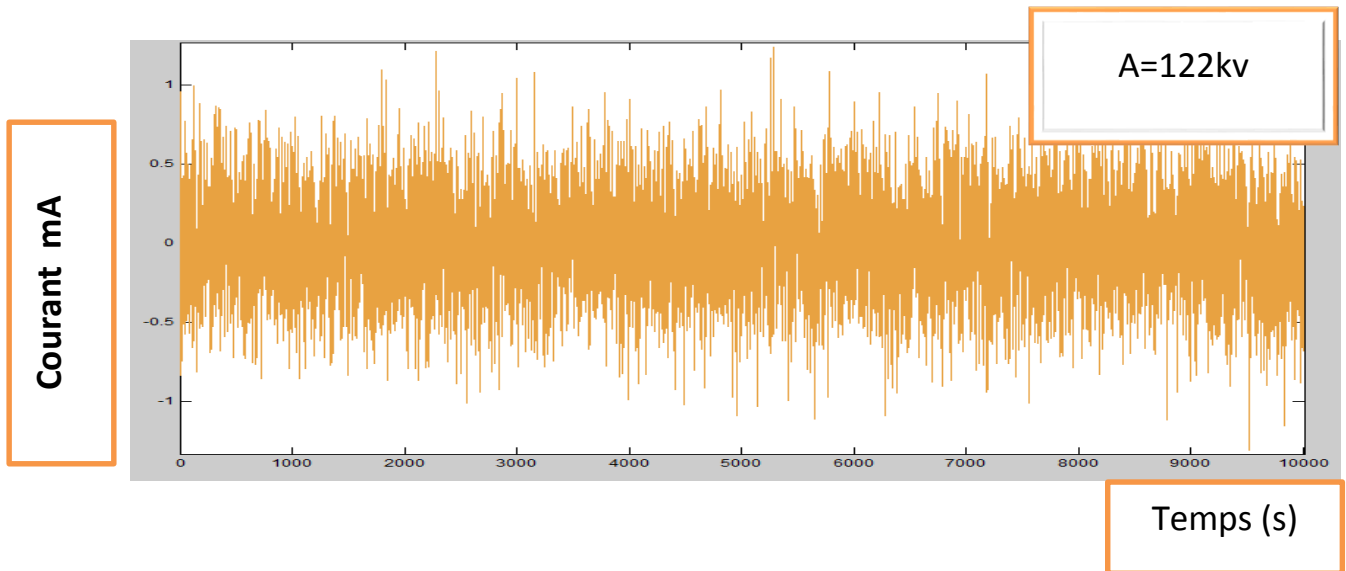


Figure 3.1: Courants de streamers mesurés en polarité négative. A=122kV

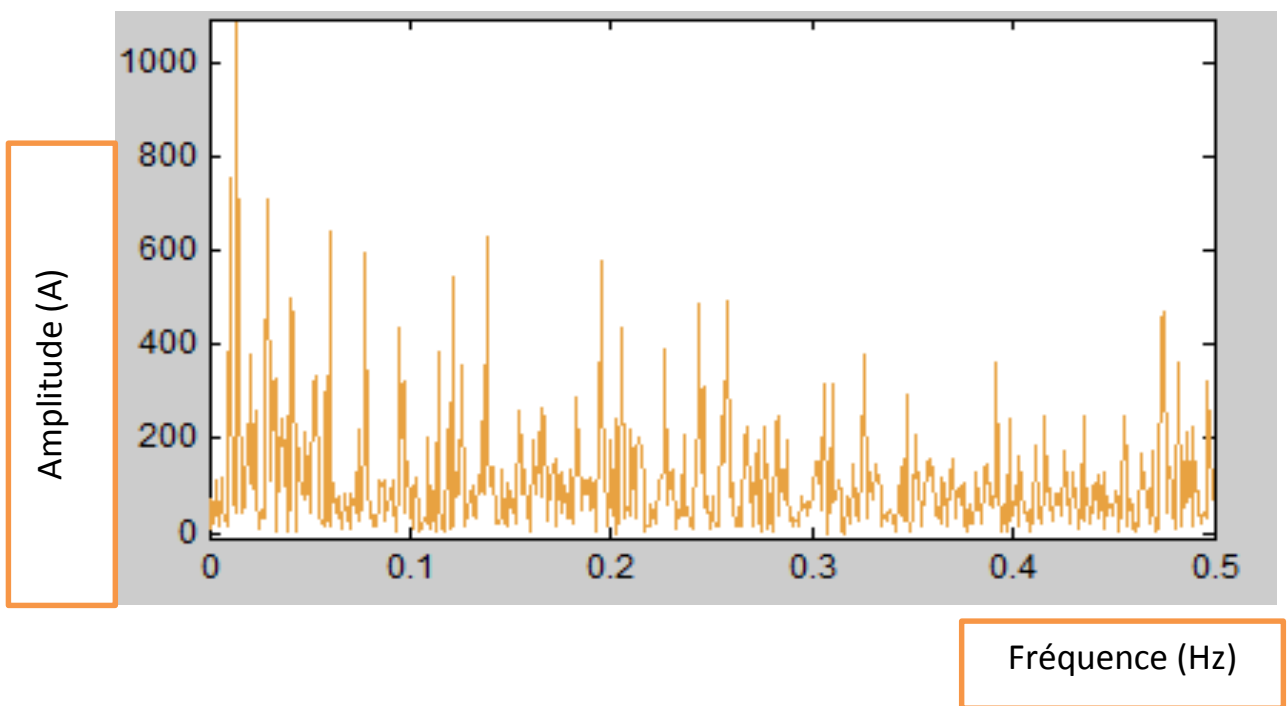


Figure 3.2 : résultats de la FFT en polarité négative

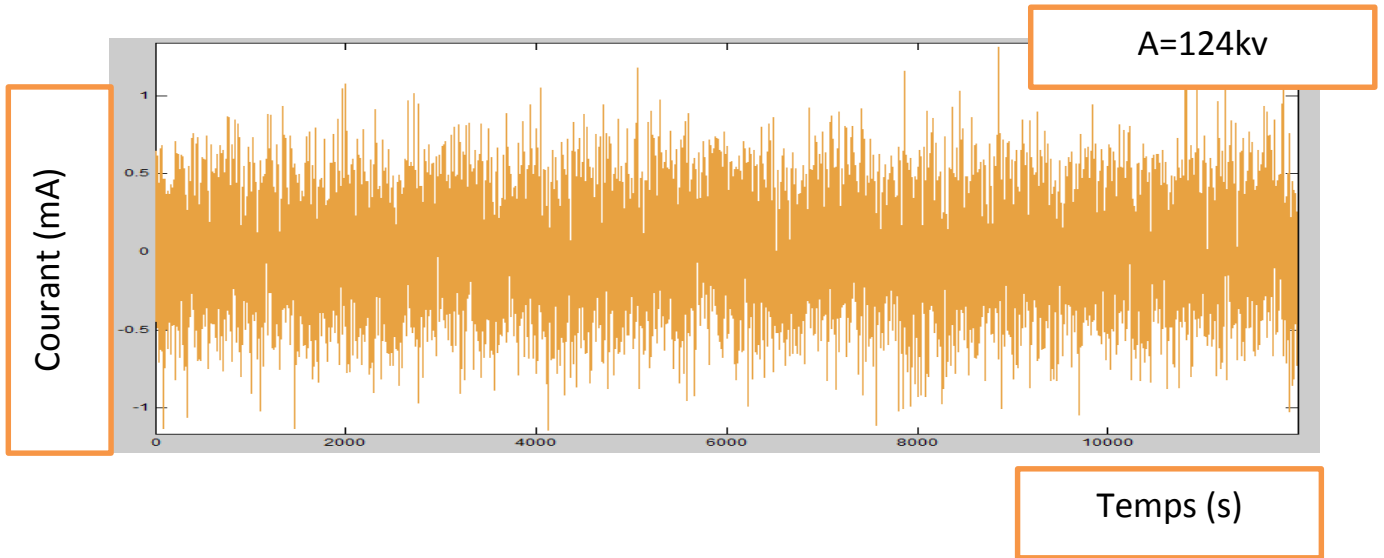


Figure 3.3: Courants de streamers mesurés en polarité positive . A=124kV

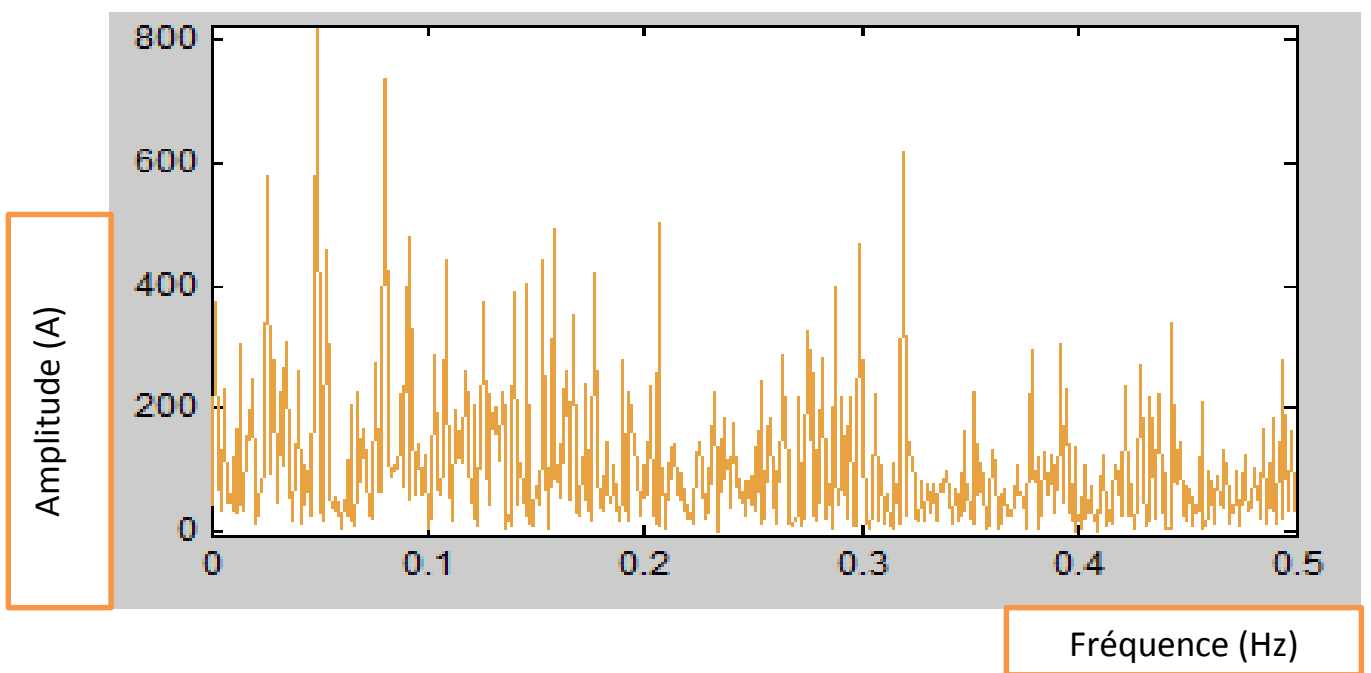


Figure 3.4 : résultats de la FFT en polarité positive A=124kV

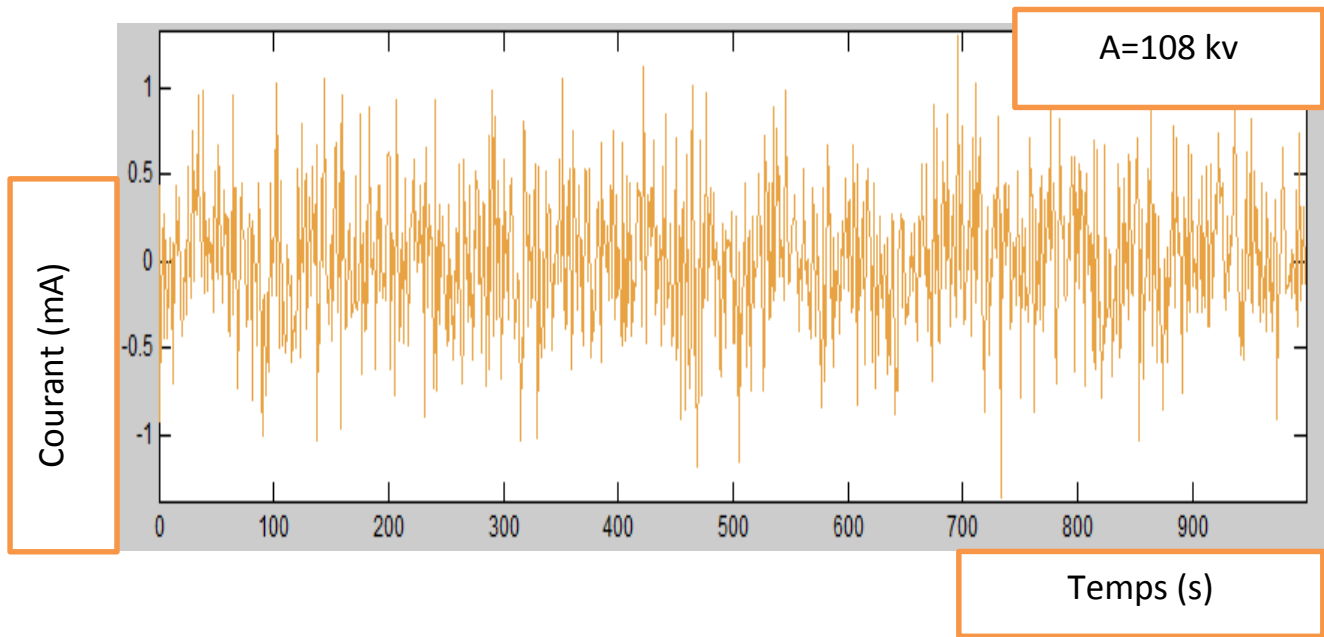


Figure 3.5: Courants de streamers mesurés en polarité positive . A=108kV

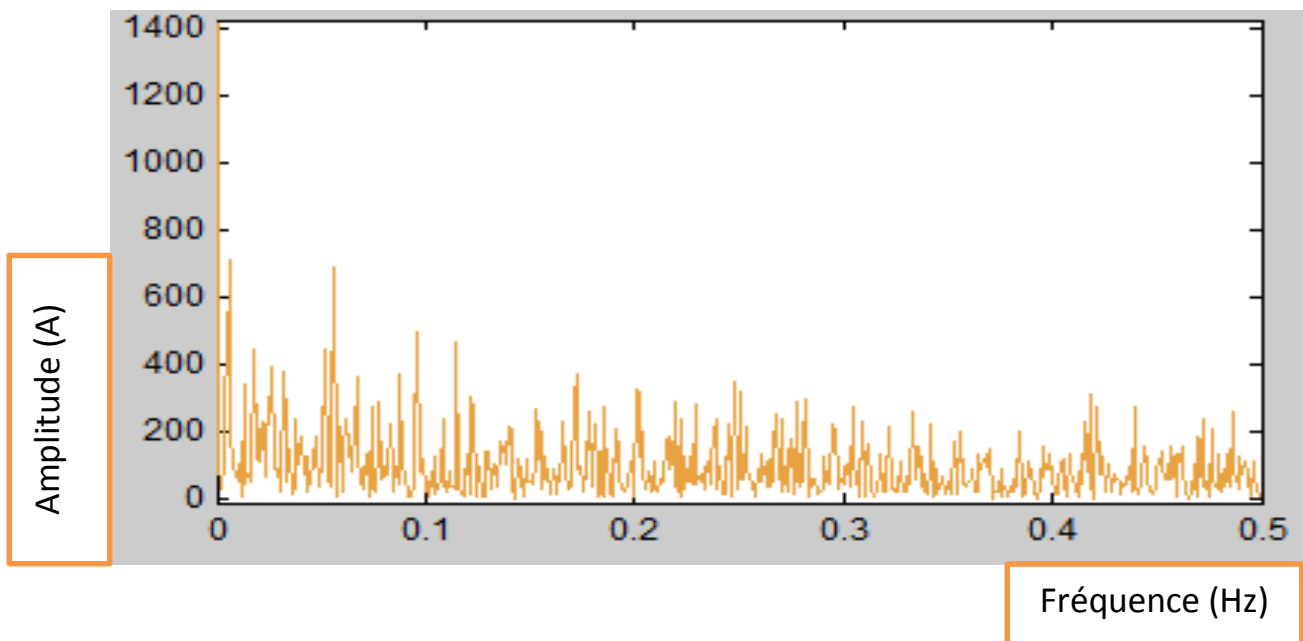


Figure 3.6 : résultats de la FFT en polarité positive A=108kV

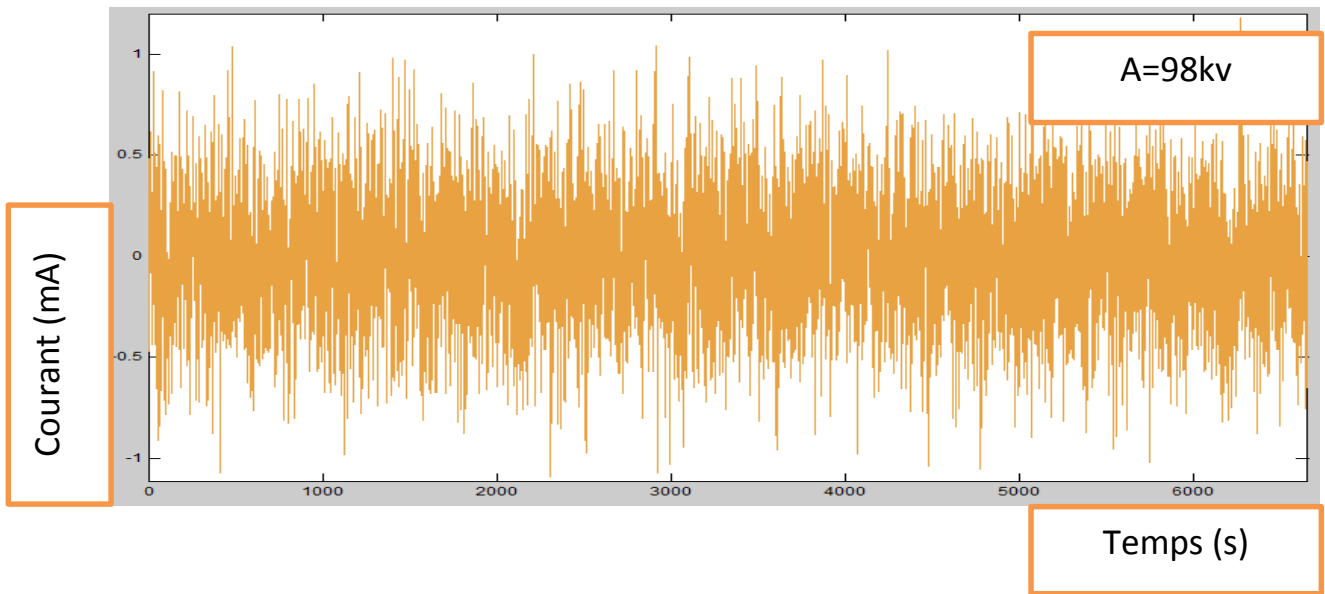


Figure 3.7: Courants de streamers mesurés en polarité positive . A=98kV

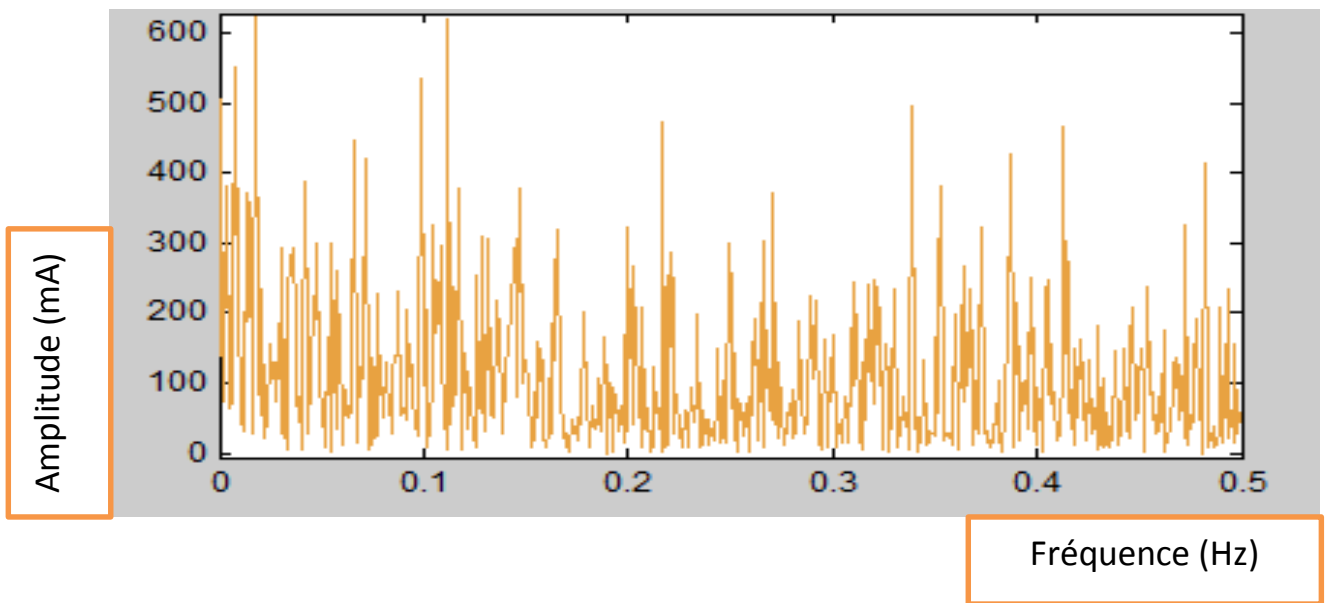
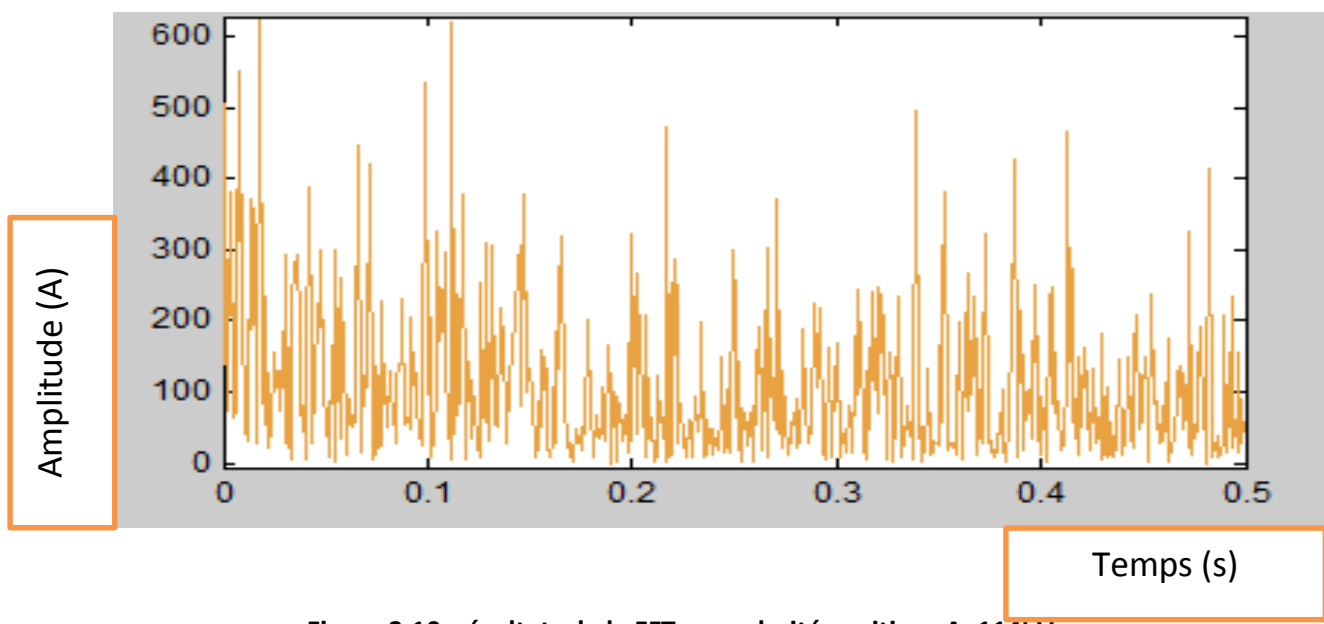
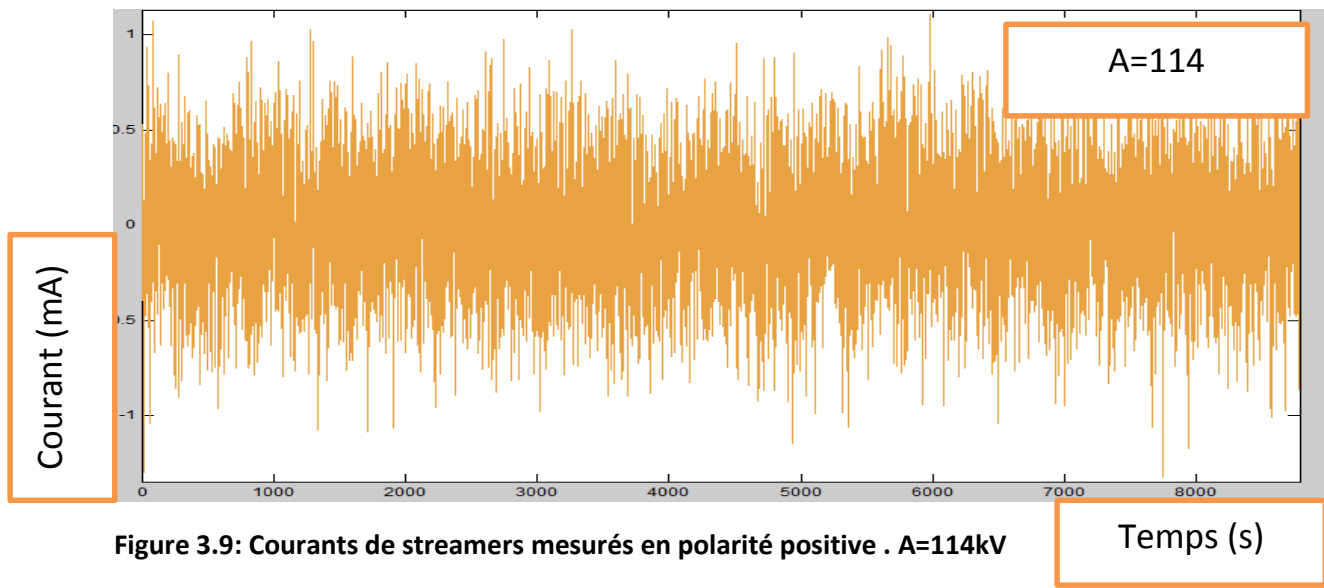


Figure 3.8 : résultats de la FFT en polarité positive A=98kV



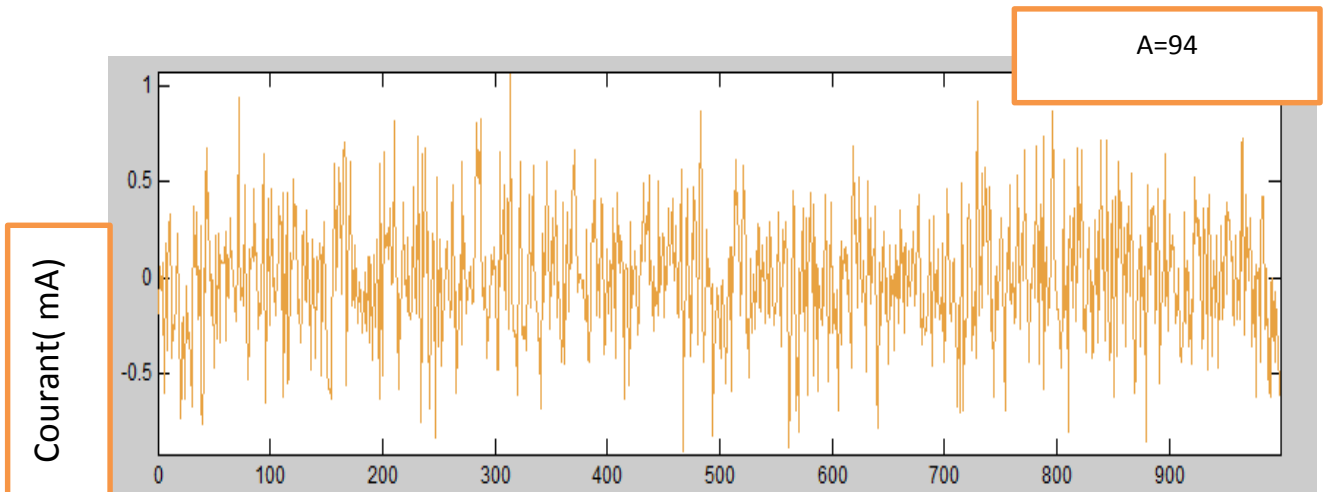


Figure 3.11: Courants de streamers mesurés en polarité positive . A=94kV

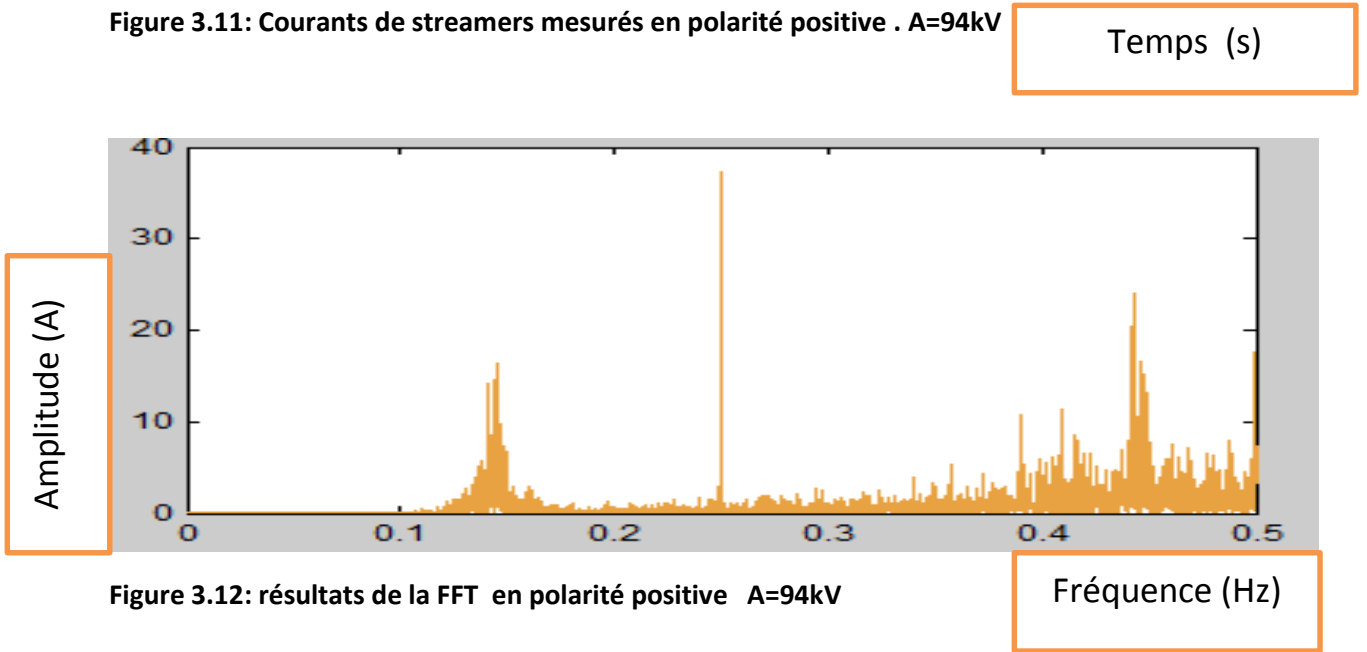


Figure 3.12: résultats de la FFT en polarité positive A=94kV

3.5 Discussion:

Les formes d'onde des courants associés aux streamers sont très similaires dans les huiles végétales testées, quelle que soit la polarité. Le nombre et l'amplitude des impulsions des courants augmentent avec l'augmentation de la tension. Les figures (3.3) et (3.4) montrent quelques exemples d'enregistrement de courants de streamers positifs et négatifs se propageant respectivement dans l'huile végétale.

Nous observons que les courants sont constitués d'impulsions à très haute fréquence, et que les charges correspondantes varient par paliers très courts ; ce qui est significatif d'une propagation de streamers par sauts. Nous avons adopté la méthode de transforme de Fourier rapide (FFT) pour la caractérisation des pics dans les streamers. La fréquence des pics dans la polarité négative sont presque similaires, la même chose pour la polarité positive.

3.6. Conclusion :

Ce travail nous a permis de voir la morphologie des courants des streamers, et de les analyser en utilisant des méthodes de traitement de signal les plus utilisés dans ce domaine: transformée de Fourier rapide (FFT).

Nous avons observé que les courants sont constitués d'impulsions à très haute fréquence, et que les charges correspondantes varient par paliers très courts. L'analyse des courants de streamers nous a permis d'obtenir une signature spectrale qui caractérise les huiles synthétiques.

Conclusion générale

3.6 Conclusion Générale

Les travaux présentés dans ce mémoire nous a permis d'abord de constater la différence entre les propriétés principales des différentes huiles, l'huile minérale offre non seulement le meilleur compromis prix / performances, mais offre également un haut niveau de compatibilité avec d'autres matériaux utilisés dans les transformateurs. Les isolations haute tension, pour la plupart, mettent nécessairement en œuvre des liquides sélectionnés pour contribuer à l'élimination des décharges partielles et pour faciliter l'évacuation de la chaleur tout en préservant leurs qualités isolantes : grande résistivité, faibles pertes diélectriques, rigidité élevée. Cette dernière dépend d'une multitude de facteurs et n'est pas une qualité intrinsèque du liquide lui-même. L'analyse des courants de streamers nous a permis d'obtenir une signature spectrale qui caractérise les huiles végétales

Bibliographie

References bibliographies

- [1] A. Beroual, M. Zahn, A. Badent, K. Kist, A. J. Schwabe, H. Yamashita, K. Yamazawa, M. Danikas, W. G. Chadhand, and Y. Torshin, “Propagation and Structure of Streamers in Liquid Dielectrics”, IEEE Electr. Insul. Magazine, Vol. 14, No. 2, pp. 6-17, 1998.
- [2] A. Beroual., “Relationship between Current, Charge and Propagation Velocity of Streamers in Dielectric Liquids”, Archiwum Elektrotechniki., 1-4, pp. 45-56, 1993. [38] R. E. Hebner, “Measurement of electrical breakdown in liquids”, Vol. B193:
- [3] EI 60296, clause 3.1, version 2003
- [4] La norme CEI précise minérale, cependant cette définition est également valable pour les autres huiles pour transformateur.
- [5]. <http://blogue.caronlubrifiants.ca/huile-minerale-ou-huile-synthetique/>(28 Mai 2019).
- [6] A. Beroual, “Notes de cours de Master – Matériaux pour le génie électrique”, École Centrale de Lyon, 2007
- [7] I. Fofana and J. Sabau, “**Application of Petroleum-based oil in Power Transformer**”, 23 pages, *In Natural Gas Research Progress*, Editors: Nathan David and Theo Michel, © 2008 Nova Science Publishers, Inc., ISBN: 978-1-60456-700-7.
- [8]C. L. 11/06/2016, « <Http://Www.Cbsa-Asfc.Gc.Ca/Sima-Lmsi/I-E/Ad1395/Ad1395->
- [9] J. S. N'CHO, "Développement de nouvelles méthodes de diagnostic et de régénération des huiles pour transformateurs de puissance," Ecole Centrale de Lyon, 2011. 70
- [10] C. Perrier, "Etude des huiles et des melanges à base d'huile minérale pour les transformateurs de puissance,," Ecole Centrale de Lyon, 2005.
- [11] Fofana, « 50 Years in the Development of Insulating Liquids », IEE Insul. Mag., Vol. 29, No. 5, pp. 13–25, 2013.
- EC 60156 Standard, « Insulating Liquids – Determination of the
- [12] SANCHEZ, Jean. 2011. Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance.Thèse Doctorale. 151 pages

Références bibliographiques

- [13] NAOUEL, Mezari. 2011. Diagnostique transformateur de puissances. Mémoire de MAGISTER en électrotechnique, option machines électriques. 125 pages
- [14] Wikipédia. 2017. Huile pour transformateur. *In* huile pour transformateur consulté le 01 Avril 2017 https://fr.wikipedia.org/wiki/Huile_pour_transformateur
- [15] T. O. Rouse, “**Mineral Insulating Oil in Transformers**”. IEEE Electrical Insulation Magazine; Volume 14, N°3, pp 6-16, 1998.
- [16] E. Gockenbach, H. Borsi, “Natural and Synthetic Ester Liquids as alternative to mineral oil for power transformers” Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena CEIDP, Quebec, Canada, 2008, paper 5B-10.
- [17] REFFAS Abderrahim, « Etude des Décharges Electriques dans les Huiles Isolantes Végétales », thèse de doctorat, département d’Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, pp13, Soutenue publiquement le 17/03/2018.
- [18] H. J.Martin , C Eng,Fieee, The J And P Transformer Book , A PartialTechnology OfPower Transformer Edition Twelfth Newnes 1998.

