

REPUBLIQUE 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 : Electromécanique.

Spécialité : Electromécanique.

Par

➤ **BELHADJ FATEH EDDINE.**

➤ **ACHACHA RABAH.**

Intitulé

Analyse des courants associés aux streamers dans les huiles végétales

Soutenu le :

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M.</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.</i>	<i>...</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.</i>	<i>....</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes chers parents.

A toute ma famille.

A tous mes collègues et mes amis.

BELHADJ FATEH EDDINE.

Je dédie ce travail :

A mes chers parents.

A ma femme et mes enfants, DOUAA, AKRAM et NADJME EDDINE.

A mon frère et mes sœurs.

A tous mes collègues et mes amis.

ACHACHA RABAH.

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.

Mes remerciements s'adressent aux Monsieur EL YAZID qui aidé pour compléter ce mémoire.

J'exprime spécialement ma gratitude à mes parents et toute ma famille, qui m'ont toujours supporté et je leur offre le succès et tout honneur j'obtiens de cette thèse.

BELHADJ FATEH EDDINE.

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.

Mes remerciements s'adressent aux Monsieur EL YAZID qui aidé pour compléter ce mémoire.

Je tiens à remercier profondément ma mère et ma femme. Je remercie mes amis MOHAMED.L et ELYACHI.DJ, qui ont toujours été à mes côtés. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

ACHACHA RABAH.

Résumé

Ce travail porte sur l'analyse et l'étude des signaux de courants qui accompagnent la propagation des streamers dans une huile végétale 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 obtenues en polarité positive et négative. Pour la caractérisation de ses signaux, on a utilisé deux méthodes de traitement de signal à savoir le transformé de Fourier rapide (FFT) et transformée de l'ondelette discrète (DWT). Ces deux techniques ont montré leurs efficacités pour la caractérisation des courants de streamers.

Mots clés : huile végétale, streamers, claquage, préclaquage, transformé Fourier rapide (FFT), transformé de l'ondelette discrète (DWT).

Abstract

This work focuses on the analysis and study of the current signals that accompany the propagation of streamers in vegetable oil under lightning impulse voltage by uniting 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, two signal processing methods were used, namely the fast Fourier transform (FFT) and the discrete wavelet transform (DWT). These two techniques have shown their effectiveness for the characterization of streamer currents.

Keywords: vegetable oil, streamers, breakdown, prebreak down, fast Fourier transform (FFT), wavelet transform discrete (DWT).

ملخص

يركز هذا العمل على تحليل ودراسة الإشارات الكهربائية التي تصاحب الانتشار الزاحف للشرارات الكهربائية في الزيت النباتي تحت جهد النبضات الصاعقة من خلال توحيد نظام قطب كهربائي ذو مستوى نقطي. لقد وجد أن هناك تشابهاً في شكل التيارات التي تم الحصول عليها في القطبين الموجب والسالب. لتوصيف إشاراتها، تم استخدام طريقتين لمعالجة الإشارات، وهما تحويل فورييه السريع والتحويل الموجي المنفصل. أظهرت هاتان التقنيتان فعالتهما في توصيف التيارات المتدفقة.

كلمات مفتاحية: الزيت النباتي، ظاهرة الانتشار الزاحف للشرارات الكهربائية، ظواهر انهيار وقبل انهيار الجهد، تحول فورييه السريع، التحول الموجي.

SOMMAIRE:

Introduction Générale	1
Chapitre01 : Généralité sur les huiles.....	3
1.1 Introduction :.....	3
1.2 Transformateur de puissance :.....	3
1.3 Les huiles isolantes :	4
1.4 Rôles des huiles isolantes :	5
1.4.1 Fonction isolation :	5
1.4.2 Fonction de transfert de chaleur :	5
1.4.3 Autres fonctions :	6
1.5 Présentation des huiles isolantes :	6
1.5.1 Les huiles minérales :.....	6
1.5.2 Les huiles des synthèse:.....	6
1.5.3 Les huiles végétales :	7
1.6.1 Les avantages des huiles végétales :	10
1.6.1 Biodégradabilité ultime :	10
1.6.2 Point d'éclair élevé:	10
1.6.2 Humidité absolue de saturation :	11
1.6.3 La permittivité relative des esters naturels proche des celles des cartons :	11
1.6.4 Pas de boues lors de l'oxydation des huiles végétales :.....	12
1.7 Inconvénients des huiles végétales :	12
1.7.1 Viscosité :	12
1.7.2 Le cout :.....	12
1.8 Conclusion :	13
Chapitre02 : Généralité sur les streamers	14
2.1 Introduction :.....	14
2.2 Caractéristique des streamers :.....	14
2.2.1 Phase de génération :	16
2.2.2 Phase de propagation :.....	18
2.2.3 Influence des propriétés des liquides :	20
2.3 Conclusion :.....	25
Chapitre03 : Résultats et interprétation	26
3.1 Introduction :.....	26

3.2	Analyse des courants :	26
3.2.1	Taux de distorsion harmonique :	26
3.2.2	Transformée de Fourier rapide (FFT) :	26
3.2.3	Transformée en ondelette discrète:	27
3.3	Procédure expérimentale :	27
3.4	Les courants et charges obtenues associés aux streamers :	30
3.5	Discussion:	39
3.6	Conclusion :	40
	Conclusion générale :	41

Listes des figures :

Figure 1.1 : Structure de l'ester synthétique, R : chaîne saturé.....	7
Figure 1.2 : Structure chimique d'une huile végétale, aussi appelé triester (triglycérides) ; R, R' et R'' sont les chaînes acides gras du même ou des différents types.....	8
Figure 1.3 : biodégradabilité des différents liquides.....	10
Figure 1.4 : Le point d'éclair et le point de feu des liquides utilisés dans les transformateurs.....	11
Figure 2.1 : Streamer positif "buisson" dans le cyclohexane en géométrie pointe-plan sous créneau de tension. Photographie obtenue par ombroscopie (temps d'exposition =5 ns, distance $D=0,18$ cm, tension appliquée $U=12$ kV).....	15
Figure 2.2 : Streamers positifs sous tension impulsionnelle en géométrie pointe-plan. A : très ramifié dans l'huile de transformateur (distance 3 mm, tension appliquée 22 kV), B : peu ramifié dans l'huile silicone ($D=3$ mm, $U=22,5$ kV, viscosité 1000 cSt).....	16
Figure 2.3 : Visualisation de la dynamique de la bulle (expansion/implosion et rebondissements) en fonction du temps de retard à l'instant initial d'apparition de l'impulsion de courant (Cyclohexane).....	17
Figure 2.4 : propagation des streamers positifs dans une huile paraffinique.....	19
Figure 2.5 : streamer négatif dans le cyclohexane sous l'influence de la pression.....	22
Figure 2.6 : Effet d'additifs à bas potentiel d'ionisation (DMA) et d'additifs capteurs d'électrons (TCE) sur la propagation des streamers positifs dans une huile paraffinique.....	23
Figure 2.7 : Effet d'additifs à bas potentiel d'ionisation (DMA) et d'additifs capteurs d'électrons (TCE) sur la propagation des streamers négatifs dans une huile paraffinique.....	23
Figure 2.8 : les formes des streamers positifs dans une huile paraffinique avec différents niveaux de tension.....	24
Figure 3.1 : Schéma de dispositif expérimental.....	28
Figure 3.2 : Vue schématique de la cellule d'essai.....	29

Figure 3.3: Courant de streamers mesuré en polarité négative. A=116 kV, B= 118kV, C= 120 kV.....	30
Figure 3.4 : Courants de streamers mesurés en polarité positive. A= 52 kV, B= 56 kV, C= 60 kV.....	31
Figure 3.5 : résultat FFT de courant associé aux streamers mesuré en polarité négative. A=116 kV, B= 118kV, C= 120 kV.....	32
Figure 3.6 : résultat FFT de courant associée aux streamers mesuré en polarité positive. A= 52 kV, B= 56 kV, C= 60 kV.....	33
Figure 3.7 : Taux de distorsion harmonique en polarité négative. A=116 kV, B= 118kV, C= 120 kV.....	34
Figure 3.8 : Taux de distorsion harmonique en polarité positive. A= 52 kV, B= 56 kV, C= 60 kV.....	35
Figure 3.9 : DWT résulte en polarité négative. A= 116 kV, B= 118 kV.....	36
Figure 3.10 : DWT résulte en polarité positive. A= 52 kV, B= 56 kV.....	37

Listes des tableaux

Tableau 1.1 : Propriétés des fluides isolant pour transformateur..... 9

Tableau 3.1 : Bandes des fréquences associés aux détails..... 38

Introduction Générale

Les huiles isolantes 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.

Pendant longtemps, les seules huiles utilisées ont été les huiles minérales d'origine pétrolière. Elles sont de plus en plus remplacées par des huiles de synthèse. Actuellement, l'huile minérale n'est plus utilisée dans la fabrication des condensateurs. Cependant, vu les quantités énormes que l'on doit utiliser et son prix très abordable, l'huile minérale est encore largement utilisée dans les transformateurs de puissance. Ses propriétés diélectriques (résistivité et permittivité diélectrique), très proches de celles des matériaux solides à base de cellulose, lui permettent de travailler en association avec ceux-ci et d'assurer le bon fonctionnement des structures isolantes (huile/papier) des transformateurs.

Cependant, les recommandations internationales et européennes tendent à restreindre très fortement, voire interdire, l'utilisation de certains matériaux isolants dans la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique, pour préserver l'environnement et se prémunir contre les disponibilités et pénuries de certaines matières premières. Parmi ces matériaux, les huiles minérales. Ainsi, il est devenu nécessaire de chercher d'autres liquides de remplacement dont les propriétés isolantes seraient proches voire meilleures que celles des huiles minérales. Les recherches s'orientent actuellement vers les huiles végétales. Même si leur utilisation est pour le moment restreinte aux transformateurs de distribution, de nombreux projets sont en cours pour étendre leur application aux transformateurs de puissance. Des travaux récents ont montré que si les huiles végétales présentaient un caractère de biodégradabilité et de résistance au feu attractif, elles restent cependant moins intéressantes du point de vue stabilité à l'oxydation et de leur viscosité plus élevée que celle des huiles minérales ou synthétiques [1].

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

gamme 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 [2].

Le premier chapitre présente d'une manière générale les différents types d'huiles isolantes utilisées dans l'appareillage électrique et plus particulièrement dans les transformateurs de puissance. Nous nous intéressons principalement aux huiles végétales. Nous présentons les avantages et les inconvénients de ces huiles

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des mécanismes de préclaquage et de claquage dans les huiles végétales, ainsi qu'au phénomène des streamers.

Dans le troisième chapitre nous présentons les résultats obtenus en utilisant les méthodes de traitement des signaux. Notre choix est porté sur deux méthodes : transformée de Fourier rapide (FFT) et l'ondelette discrète (DWT).

Chapitre01 : Généralité sur les huiles.

1.1 Introduction :

Les huiles isolantes sont utilisées depuis longtemps dans l'industrie électrique : transformateur, disjoncteur, câble. Elles sont utilisées comme imprégnant d'isolation cellulosique et/ou on produit des remplissages des matériels. Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation (la rigidité diélectrique des liquides étant nettement supérieure à celle des gaz). Le transformateur de puissance est le composant le plus important d'un système de transmission d'électricité. Dans les transformateurs l'huile joue deux rôles essentiels : celui d'évacuer la chaleur des enroulements naturel et du noyau magnétique, par convection naturel ou par écoulement forcé grâce à des pompes [2].

Jusqu'à la fin des années 1960, les liquides isolants ne posaient pas de problème d'environnement ou de toxicité. La découverte d'une pollution mondiale par les polychlorobiphényles (PCB) a montré du doigt la famille des liquides isolants dans son ensemble, et elle est devenue la cible des médias. Il en résulte une suspicion de plus en plus grande à leur égard, leur emploi est de plus en plus restreint et soumis à des réglementations par les autorités nationales. C'est cette phobie qui a entraîné des recherches pour essayer de trouver des substituts « verts », notamment à base d'huiles végétales [3]. Dans ce chapitre, nous essayons de montrer les caractéristiques des huiles végétales.

1.2 Transformateur de puissance :

Le transformateur de puissance est le composant le plus important d'un système de transmission d'électricité. Leur indisponibilité affecte non seulement la disponibilité de l'énergie électrique, mais entraîne également des pénalités techniques et économiques, et des conséquences très graves (techniques, financières, commerciales, environnementales) ; d'où la nécessité d'une détection et d'une identification précoces des défauts sous-jacents pour une éventuelle action préventive.

Durant une défaillance ou un défaut, les intégrités mécanique, diélectrique et thermique du transformateur sont souvent affectées, et diminuent à des valeurs inférieures, par rapport celles de leurs tenues normales. Les défauts latents peuvent évoluer dans le temps et provoquer une perforation d'isolement par de différentes causes telles que les courants de défaut (courant de court, circuit, courant d'enclenchement, etc) et les surtensions électriques (transitoire,

manœuvre, ou de foudre). L'évaluation de l'état du transformateur est souvent réalisée à travers les diagnostics effectués. Le vecteur principal de l'évaluation de la condition du transformateur est généralement apporté par l'analyse de son huile où la majorité des informations recueillies sont données et exploitées pour des actions de maintenance. La décomposition de l'huile selon les différents défauts et leurs intensités conduit à la formation des gaz qui peuvent être exploités pour le diagnostic [4].

1.3 Les huiles isolantes :

Les huiles isolantes sont utilisées dans divers équipements électrotechniques : transformateurs (de puissance, de distribution, de traction, etc.), condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, etc. Les propriétés souhaitées d'une huile dépendant du type d'application, différentes familles de huiles ont ainsi été élaborées ou synthétisées. Une comparaison complète des caractéristiques des liquides est donc nécessaire pour leur choix visant à une application donnée. En général, il n'existe pas d'huile pouvant présenter l'ensemble des propriétés requises par l'application. Il faut toujours trouver un compromis entre les performances souhaitées et les propriétés réelles de l'huile. Les principales propriétés demandées aux liquides utilisés en électrotechnique concernent :

- Tout d'abord, leurs propriétés électriques et diélectriques (permittivité, résistivité, tenue au claquage, aux décharges partielles, à l'arc, etc.).
- Leur comportement au vieillissement (stabilité thermique, à l'oxydation et à l'hydrolyse).
- Leurs propriétés physico-chimiques et thermodynamiques (viscosité, capacité thermique, point d'écoulement, etc.).
- Le comportement du produit vis-à-vis du feu peut s'avérer un paramètre important dans quelques cas particuliers.
- Leurs comportements toxicologiques et écologiques : biodégradabilité, toxicité, etc [5].

1.4 Rôles des huiles isolantes :

Les huiles isolantes sont utilisées en électrotechnique comme imprégnant d'isolations cellulosiques ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers. Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation (la rigidité diélectrique des liquides étant nettement supérieure à celle des gaz). Cependant, dans beaucoup d'applications, elles servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur d'un assemblage [6].

1.4.1 Fonction isolation :

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.[7]

1.4.2 Fonction de transfert de chaleur :

Bien que les transformateurs électriques présentent un excellent rendement (99 à 99.9%), ils ne peuvent pas échapper à la perte d'énergie qui accompagne toute conversion. L'énergie perdue se dissipe sous forme de chaleur. L'évacuation de la chaleur vers l'extérieur nécessite une connaissance de l'élévation maximale des températures des différents éléments du transformateur afin d'assurer un équilibre entre la vitesse de production et d'évacuation de la chaleur. La chaleur à évacuer est véhiculée par circulation naturelle ou forcée de l'huile [8]. Un refroidissement se fait par convection et par conduction thermique. Les principales caractéristiques qui permettent de juger l'aptitude d'une huile à évacuer la chaleur sont la viscosité, la conductivité thermique et la chaleur spécifique [9].

1.4.3 Autres fonctions :

Les huiles peuvent être aussi utilisées pour leur pouvoir extincteur d'arcs électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises, pompes immergées) et dans certains cas pour améliorer la résistance au feu, comme c'est le cas dans les transformateurs de distribution proche de la population. Enfin, elles servent à ralentir l'oxydation directe de l'isolation cellulosique [10].

1.5 Présentation des huiles isolantes :

1.5.1 Les huiles minérales :

Les huiles minérales sont obtenues par raffinage de bruts de pétrole ; elles sont les plus utilisées dans les matériels électriques. Leur composition chimique est extrêmement compliquée (plusieurs milliers de molécules différentes) et est généralement définie par la teneur en carbone paraffinique (C_p), en carbone naphhténique (C_N) et en carbone aromatique (C_A). C_p et C_n ont une influence prépondérante sur la densité, la viscosité et le comportement à basse température (point d'écoulement, point de trouble). La présence d'aromatiques améliore la résistance à l'oxydation (plus faible formation de boues), les propriétés de « gassing » et la rigidité en impulsion. Des normes internationales régissent l'utilisation des huiles minérales suivant le type de dispositif : transformateurs, câbles de transport d'énergie, etc [11].

1.5.2 Les huiles des synthèse:

Les huiles de synthèse sont utilisées chaque fois que des propriétés particulières sont recherchées. C'est notamment le cas lorsqu'il s'agit d'améliorer la résistance au feu des transformateurs se trouvant à proximité de la population (transformateurs de distribution et de traction). Ces liquides de synthèse sont tous obtenus à partir des différents procédés chimiques. Il en existe trois types principaux destinés aux transformateurs:

- Les huiles silicones.
- Les hydrocarbures chlorés (halogénés), tel que les PCB.

- Les huiles esters de pentaérythritol encore appelées esters synthétiques ou esters organiques (par opposition aux esters naturels ou huiles végétales).[12]

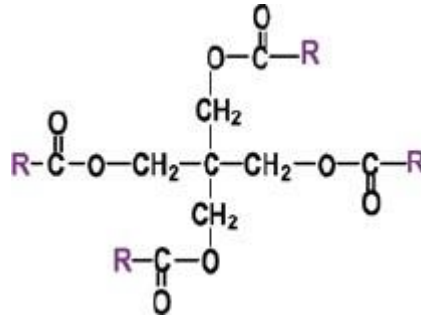


Figure 1.1 : Structure de l'ester synthétique, R : chaîne saturée.

1.5.3 Les huiles végétales :

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 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 1.2) :

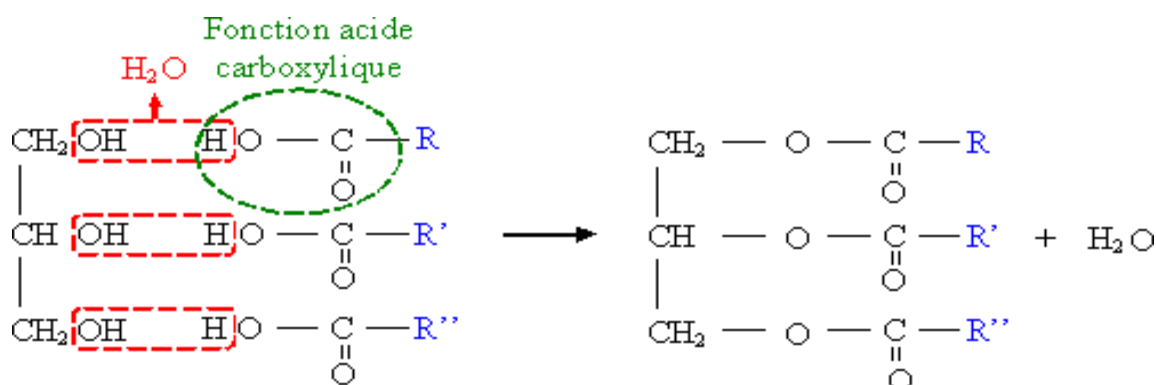


Figure 1.2 : Structure chimique d'une huile végétale, aussi appelé triester (triglycérides) ; R, R' et R'' sont les chaînes acides gras du même ou des différents types [13].

Un des grands atouts de ces huiles est leur excellente biodégradabilité qui malheureusement en contrepartie leur confère une grande sensibilité à l'oxydation [12]. 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 "non verts"). 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 [13].

Tableau 1.1 : Propriétés des fluides isolant pour transformateur [14].

Propriétés des fluides isolants pour transformateurs : Valeurs typiques/limites			
	Huile végétale	Huile minérale	Huile silicone
Apparence	Jaune clair ^a	Jaune clair	sans couleur
gravité spécifique à 25 °C	0.91 - 0.92	0.89	0.96
Viscosité cinématique, cSt			
0 °C	170 – 250	2200	95
25 °C	55 – 75	300	50
40 °C	33 – 45	125	38
100 °C	8 – 10	13	16
Point d'écoulement, °C	-15 to -25	-20 max.	-50 max.
tension interfaciale, dyne/cm	25	40 – 45	25
Point d'éclair °C	310 – 325	275 min.	300 min.
Point de feu °C	354 – 360	160 – 180	340
(Teneur en eau, ppm huile sèche (Solubilité de l'eau à 25 °C)	50 – 100 1200	10 – 25 ^b 60	50 200
Propriétés thermiques			
capacité calorifique, cal/g. °C	0.50 – 0.57	0.488	0.363
Conductivité thermique, W/m.K	0.17 ^a	0.13	0.15
Coefficient de dilatation thermique, /°C	0.0007	0.00073	0.00104
Propriétés chimiques			
Type	Ester	Hydrocarbure	Organo-silicone
Acidité mg KOH/g	0.06 ^a	0.01	0.01
Stabilité à l'oxydation- ASTM D 2440	Passe ^a	Passe	Passe
Propriétés électriques			
Constante diélectrique à 25 °C	3.1	2.2	2.71
résistivité volumique à 25 °C, Ohm.cm	10 ¹⁴	10 ¹⁴ – 10 ¹⁵	10 ¹⁴
Tension de claquage kV			
ASTM D 1816, 2 mm	74 ^a	60	–
sous tension impulsionnelle (pointe négative), kV	116 ^a	145	136
% Facteur de dissipation			
25 °C	0.25 ^a	0.05 max.	-0.01
100 °C	1.00 ^a	0.3 max.	–
Tendance au gazage – ASTM D 2300	-50 ^a	-10 to +20	N/A
Biodégradabilité			
CEC-L-33 21 jours	97 – 99	30	Très bas
, Remarque : a: Huile BIOTEMP b: Varie selon le classement du transformateur			

1.6.1 Les avantages des huiles végétales :

1.6.1 Biodégradabilité ultime :

Les esters naturels sont presque entièrement biodégradables selon la norme OCDE 301 (95 % ou plus d'huile végétale se dégrade dans les 28 jours). Cette biodégradabilité des huiles végétales est donc ultime, c'est-à-dire que l'huile est totalement dégradée en cas de déversement dans l'environnement, et donc contribue au respect de l'environnement en préservant la qualité de l'eau et du sol [14].

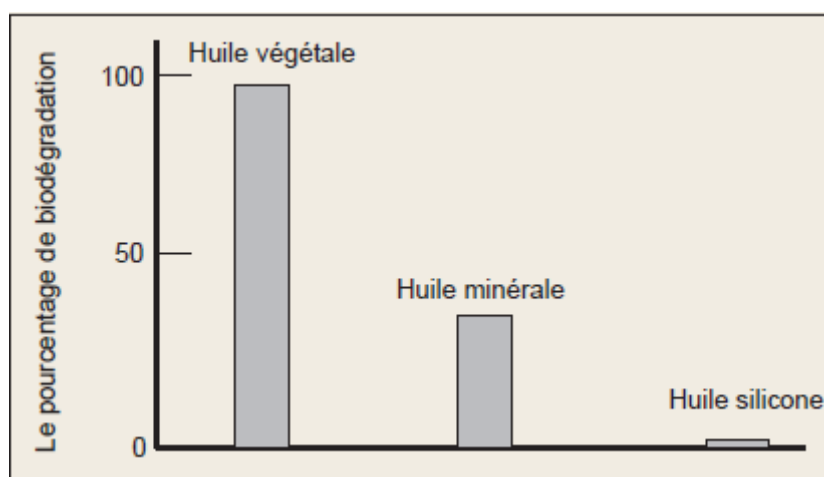


Figure 1.3 : biodégradabilité des différents liquides [14].

1.6.2 Point d'éclair élevé:

Le test du point d'éclair est utilisé pour déterminer la température la plus basse à laquelle l'huile peut former un mélange inflammable dans l'air près de la surface de l'huile. Plus la valeur du point d'éclair est élevée, plus l'huile est sûre. Par conséquent, les normes ASTM D92 et ISO 2917 ont des valeurs spécifiées pour le test du point d'éclair de 145 ° C et 135 ° C respectivement [14]. Souvent les incendies dans les transformateurs sont difficiles à éteindre et très coûteux, ils peuvent également se propager à proximité de l'équipement et des bâtiments, créant beaucoup de problèmes et de risques.

De tels incendies peuvent être évités en utilisant les esters naturels, leur point de feu supérieur à 300 ° C classe les fluides à base d'esters naturels en tant que fluides diélectriques « moins inflammables ». Les esters naturels offrent un record de sécurité avec 45000 installations sans faille pendant 10 ans [14].

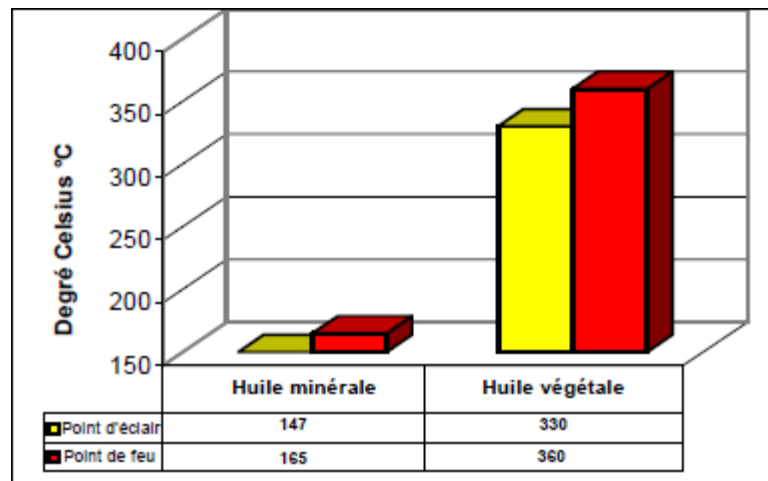


Figure 1.4 : Le point d'éclair et le point de feu des liquides utilisés dans les transformateurs [14].

1.6.2 Humidité absolue de saturation :

La présence d'humidité (considérée comme l'ennemi principal de l'isolation solide et liquide du transformateur) est connue pour son rôle essentiel dans la durée de vie d'un transformateur. L'eau n'est pas seulement l'un des facteurs les plus importants qui peuvent accélérer le vieillissement d'un papier isolant dans un transformateur, mais également il est l'un des produits de dégradation du papier isolant lui-même. La teneur en eau de l'huile peut changer rapidement dans un transformateur opérationnel. L'eau à l'intérieur du transformateur est formée par deux causes principales :

Les transformateurs sont directement exposés à la pluie et au soleil, avec la variation de la chaleur due à la fluctuation de la charge. Par conséquent, une différence de pression importante se produit entre l'intérieur et l'extérieur du transformateur qui, même en petite quantité, provoque un écoulement d'air entre l'intérieur et l'extérieur.

Et l'autre est à cause de la décomposition de la cellulose, qui est la composante principale du papier isolant [14].

1.6.3 La permittivité relative des esters naturels proche des celles des cartons :

Un des avantages à utiliser des huiles esters, réside dans le fait que les permittivités du carton et des huiles esters sont très proches ; le champ électrique dans la structure mixte (huile/carton).

Le faible rapport entre la permittivité du carton imprégné dans l'huile et la permittivité de l'huile est bon pour améliorer la rigidité diélectrique du système d'isolation (ester naturel / papier cellulosique) [14].

1.6.4 Pas de boues lors de l'oxydation des huiles végétales :

La stabilité à l'oxydation des huiles végétales dépend fortement de la quantité des acides gras mono-insaturés, qui devrait être supérieure à 80% pour une utilisation à long terme dans les transformateurs. Le pourcentage des acides gras tri-insaturés doit être négligeable dans ces huiles. En fait, lorsque le taux d'insaturation des acides gras est élevé, le nombre des doubles liaisons carbone-carbone est grand, et donc la stabilité à l'oxydation de l'ester naturel diminue [14].

1.7 Inconvénients des huiles végétales :

1.7.1 Viscosité :

La viscosité est le paramètre le plus influant dans le transfert de chaleur et le refroidissement des transformateurs, elle est supérieure dans les esters naturels par rapport aux huiles minérales. A cause de cette viscosité et aussi la faible stabilité à l'oxydation dans les esters naturels, leurs extensions aux transformateurs de puissance sont limitées, leurs utilisations restent pour le moment dans les transformateurs de distribution. Notons que certaines huiles végétales peuvent avoir une viscosité plus proche de celle des huiles minérales [14].

1.7.2 Le cout :

Le plus grand inconvénient pour les transformateurs remplis avec des fluides à base d'esters naturels est le prix, l'écart de prix est d'environ dix à quinze pour cent de plus par rapport aux transformateurs remplis avec de l'huile minérale classique. Après des recherches plus approfondies, il a été constaté qu'il y avait des avantages supplémentaires lors de l'utilisation de transformateurs remplis avec des esters naturels qui aideraient à justifier et à compenser ces coûts d'achat [14].

1.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différences entre les principales propriétés des différentes huiles isolantes. Il apparaît que l'utilisation d'une huile isolante dans un transformateur de puissance ne peut être envisagée que si cette dernière remplit certains critères dont les principaux sont : une bonne tenue diélectrique, un faible facteur de pertes (ou de dissipation), un bon point d'écoulement (faible viscosité) pour assurer un bon transfert de chaleur, une bonne résistance au feu, une stabilité à l'oxydation et une faible tendance à la charge statique. La majorité des caractéristiques de performance des esters naturels sont de loin supérieures à celles de l'huile minérale classique. Le plus grand inconvénient des transformateurs remplis avec les esters naturels est le coût élevé. Cependant, ce fluide offre une valeur de cycle de vie significative pour les utilisateurs, avec les autres avantages et performances qui aideraient à justifier et à compenser ces coûts d'achat. Les esters naturels qui sont facilement biodégradables ont une faible tenue à l'oxydation, pour cela, ils doivent être utilisés dans des transformateurs scellés.

Chapitre02 : Généralité sur les streamers

2.1 Introduction :

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 dans les liquides sont mis en évidence par l'utilisation de techniques de visualisation rapide et l'enregistrement du courant transitoire ou de la lumière émise. Dans les liquides, le claquage est la conséquence de la génération et de la propagation de canaux ionisés ayant lieu quelques μs avant le claquage. Ces canaux gazeux sont considérablement plus « conducteurs » que l'isolant liquide lui-même, et dans la plupart des cas le claquage se produit immédiatement lorsque le premier canal touche l'électrode opposée [15]. Dans ce chapitre, nous essayons de montrer les principales caractéristiques des streamers.

2.2 Caractéristique des streamers :

Les streamers ont été observés dans plusieurs types de liquides (non polaires, polaires, cryogéniques), dans lesquels ils présentent des caractéristiques communes.

Les streamers peuvent être observés quelle que soit la forme d'onde de la tension appliquée (créneau, onde de foudre, surtension de manœuvre, tension continue, tension alternative) quand celle-ci est suffisamment élevée. Ils sont générés le plus souvent là où le champ est renforcé, par exemple à l'extrémité de la pointe dans les systèmes d'électrodes pointe-plan ou en géométrie uniforme lorsqu'une particule est au contact d'une électrode [16, 17].

Ils sont caractérisés par leur indice de réfraction inférieur à celui du liquide environnant [18, 19]. Ceci rend possible la visualisation des streamers par strioscopie ou ombroscopie et confirme l'existence d'un changement de phase durant leur propagation.

Ils émettent de la lumière, produisent des ondes de chocs et des courants transitoires constitués soit d'une composante continue, soit de pics brefs, ou encore d'un mélange constitué d'une composante continue sur laquelle se superposent des impulsions brèves.

Durant leur propagation, les streamers se ramifient plus ou moins et acquièrent une forme soit en "buisson" constituée par quelques grosses branches aux contours très irréguliers (Fig. 2.1), soit une forme filamentaire (Fig. 2.2). Qualitativement, il existe une corrélation entre la forme des streamers et leur vitesse : plus les streamers sont fins, plus ils sont rapides [20,21]. En fonction de nombreux paramètres (nature du liquide, tension appliquée, additifs, pression) le streamer peut être très ramifié (Fig. 2.2 A) ou peu ramifié (Fig. 2.2 B) [22].

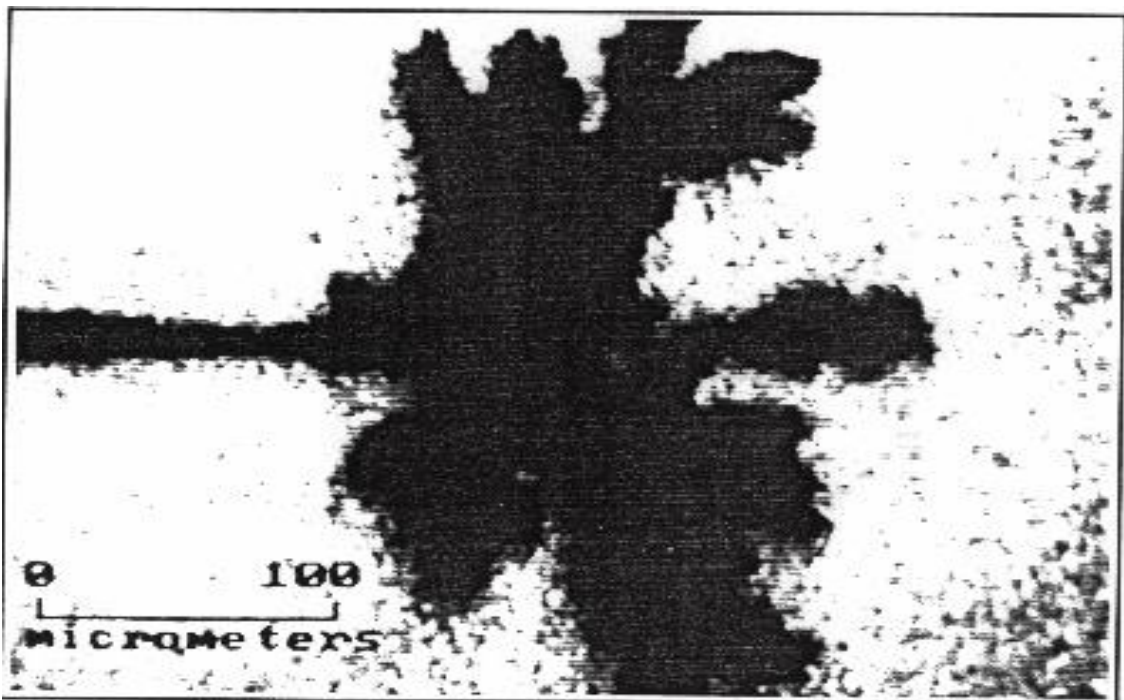


Figure 2 .1 : Streamer positif "buisson" dans le cyclohexane en géométrie pointe-plan sous crêteau de tension. Photographie obtenue par ombroscopie (temps d'exposition =5 ns, distance $D=0,18$ cm, tension appliquée $U=12$ kV) [20].

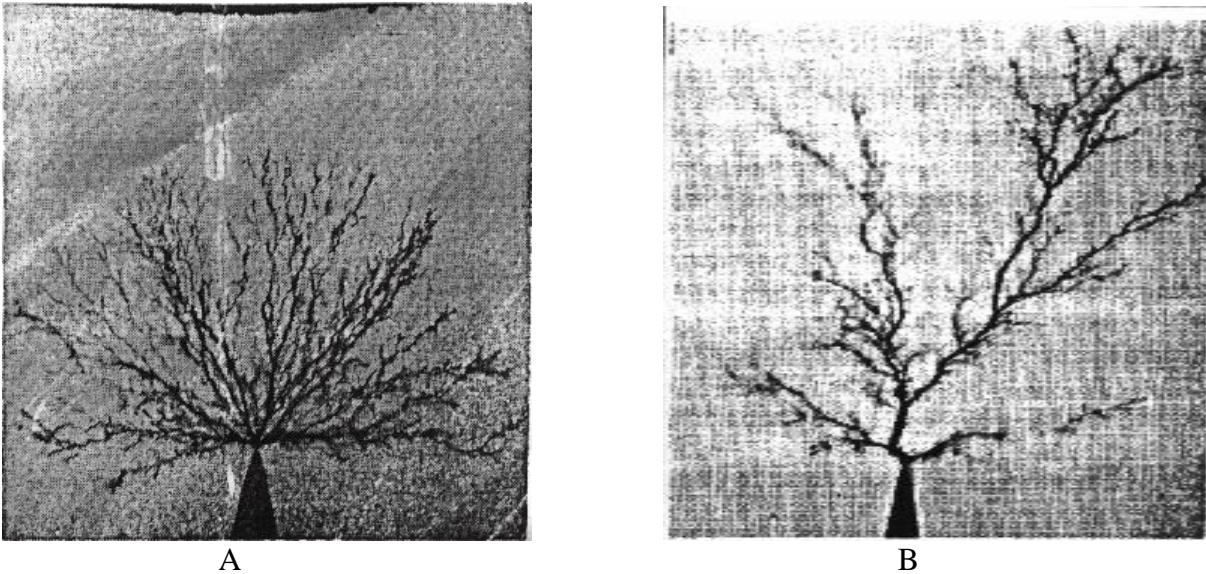


Figure 2.2 : Streamers positifs sous tension impulsionnelle en géométrie pointe-plan. A : très ramifié dans l'huile de transformateur (distance 3 mm, tension appliquée 22 kV), B : peu ramifié dans l'huile silicone (D=3 mm, U=22,5 kV, viscosité 1000 cSt) [22].

2.2.1 Phase de génération :

Il a été clairement établi et ce dans de nombreux liquides sous différents types de tensions (AC, DC ou impulsionnelle), que la perturbation observée dans la phase de génération est une bulle de gaz résultant d'un échauffement local du liquide. Sa génération suit les premières impulsions de courants enregistrés lorsque la tension est augmentée progressivement. Chaque impulsion de courant résulterait d'une avalanche électronique en phase liquide. 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.

Notons que dans certains cas, il peut y avoir apparition d'une impulsion de courant non accompagné d'atténuation du faisceau lumineux émis par le laser. L'injection de courant n'entraîne donc pas forcément la création d'une bulle. Dans ce cas, il peut s'agir de phénomènes électro hydrodynamiques (EHD) [23 ,24].

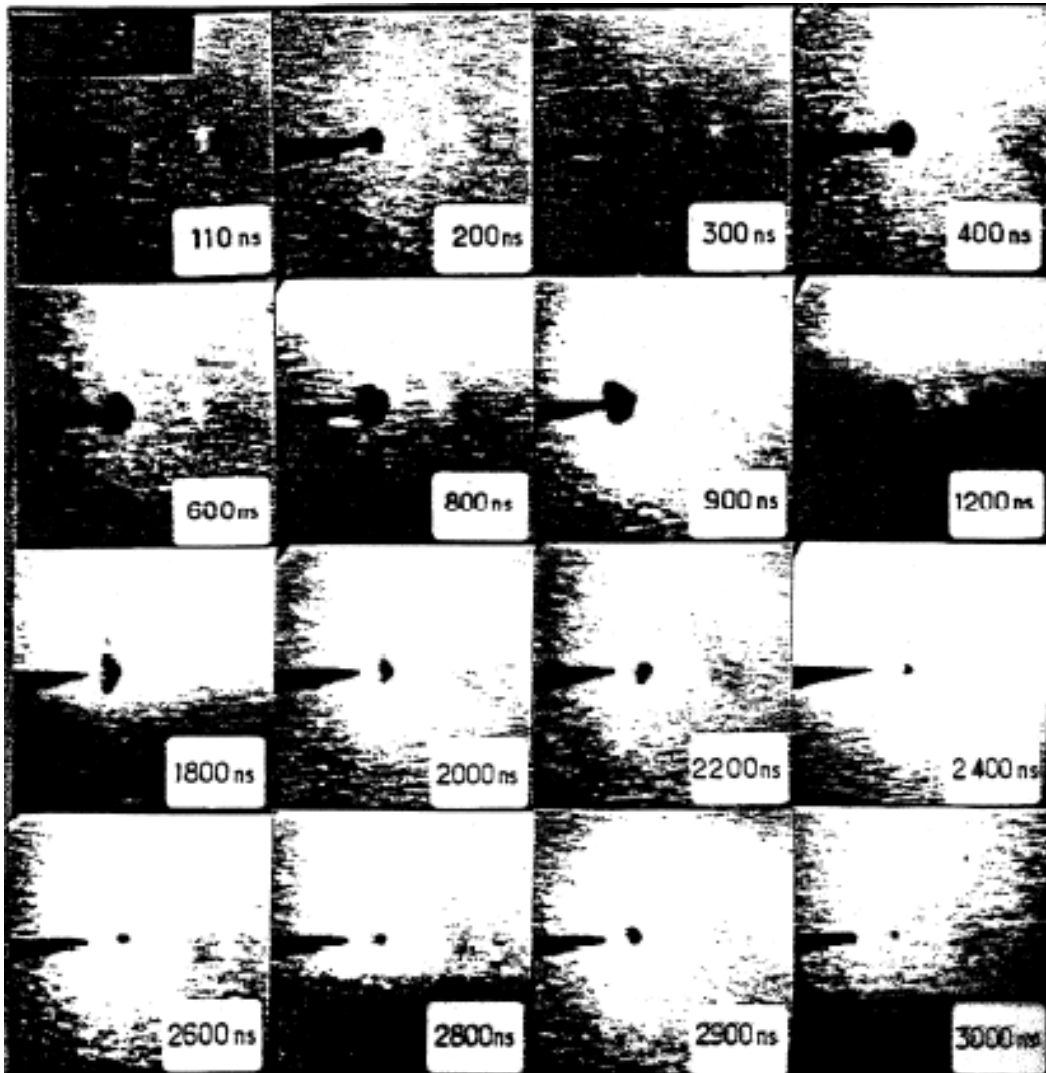


Figure 2.3 : Visualisation de la dynamique de la bulle (expansion/implosion et rebondissements) en fonction du temps de retard à l'instant initial d'apparition de l'impulsion de courant (Cyclohexane) [25].

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 (Figure 2.1) [26,27]. 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 [20].

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 [26, 28]. 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 [29] ont démontré qu'après la 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 [20].

2.2.2 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 [30]. 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 [31].

Beroual [32] 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.

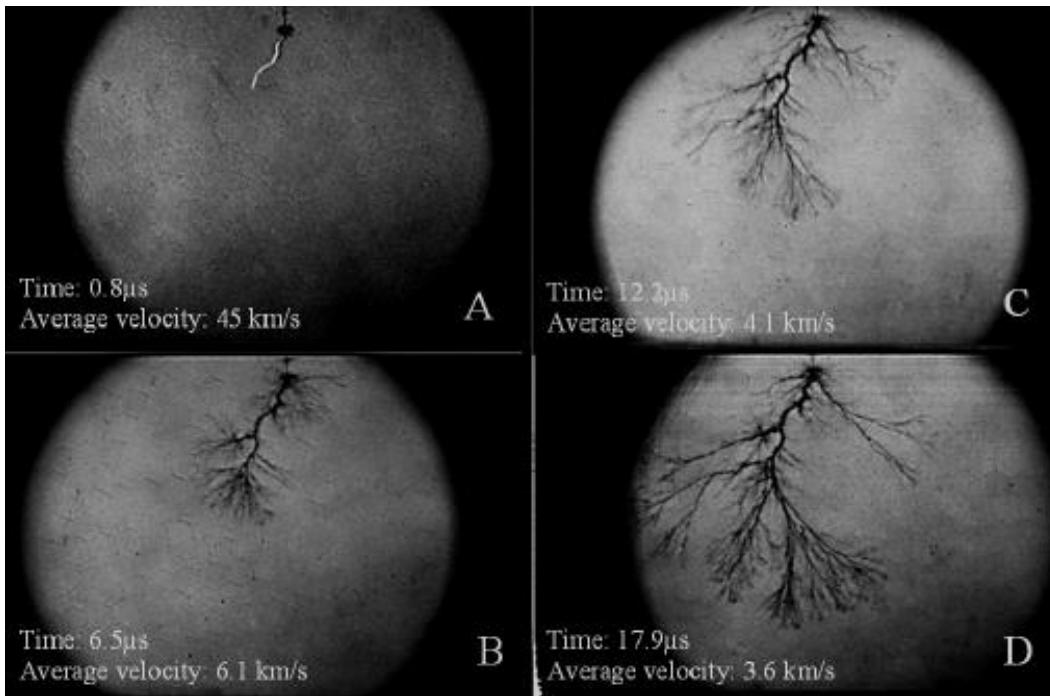


Figure 2.4 : propagation des streamers positifs dans une huile paraffinique [33].

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 [34, 35]. 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

vitesse. 1^{ère} et 2^{ème} mode correspondent aux streamers qui se développent en mode lent, 3^{ème} et 4^{ème} mode correspondent aux streamers qui se développent en mode rapide. Couramment, les streamers observés appartiennent généralement au 2^{ème} ou au 3^{ème} mode et sont nommés lent ou rapide respectivement. En effet, les streamers du 1^{er} 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 4^{ème} mode nécessitent des tensions de test très élevées.

2.2.3 Influence des propriétés des liquides :

2.2.3.1. Influence de la viscosité et de la masse volumique :

La majorité des travaux qui ont étudié l'effet de la viscosité sur la vitesse de propagation des streamers n'ont pas observé d'effet significatif de la viscosité. Watson *et al* [34] ont mené une étude sur les huiles silicones dont la viscosité variait de 10 à 10⁴ cSt, ils n'ont observé qu'une très légère tendance à la décroissance de la vitesse des streamers lents, obtenus en polarité négative avec une géométrie pointe – plan, lorsque la viscosité augmente. Des résultats comparables ont été également obtenus en polarité positive. En considérant des polybutènes de viscosité variant de 90 à 4.10⁵ cSt, Beroual [35] n'a pas observé d'effet significatif de la viscosité. Le temps de retard au claquage diminue et la tension d'initiation des streamers positifs augmente avec l'accroissement de la viscosité dans l'huile minérale [36], alors que dans les polydiméthylsiloxanes, la variation du temps de retard au claquage est insignifiante lorsque la viscosité est multipliée par 1000 [35]. Inversement, Badent *et al* [36], ont mené une étude sur une huile de transformateur soumise à des températures entre –40 et +25 °C, lui donnant ainsi des viscosités comprises entre 15 et 3114 cSt. Ils trouvent que les streamers positifs vont d'une forme en parapluie à filamenteuse et les négatifs vont d'une forme en buisson à celle en éventail, lorsque la viscosité est augmentée. Avec cette évolution des formes, les vitesses devraient augmenter avec la viscosité.

Une tentative de classification des liquides diélectriques en fonction de leur masse volumique et de la vitesse des streamers positifs s'y propageant, a été établie par Sakamoto et Yamada [37]. Cette classification trouve ses limites dans le cas des liquides halogénés où la vitesse des streamers est nettement plus élevée que dans les liquides sans halogènes comme l'a montré Beroual [35].

2.2.3.2. Influence de la structure moléculaire :

La structure et l'affinité électronique des molécules d'un liquide sont des caractéristiques intrinsèques déterminantes quant à la forme et la vitesse des streamers. Dans les liquides halogénés, les vitesses des streamers positifs et négatifs sont plus importantes que celles obtenues dans les liquides sans halogènes [38]. La présence d'un seul atome de chlore dans le chlorocyclohexane mène à une multiplication de la vitesse des streamers négatifs par un facteur 10 par rapport à celle obtenue dans le cyclohexane pur [39]. Dans un système d'électrodes pointe-plan, le streamer positif est plus filamentaire, donc plus rapide, dans le chlorocyclohexane que dans les autres liquides tels que le cyclohexane, le transdécahydronaphthalène et le cis-décahydronaphthalène [39].

Dans la plupart des hydrocarbures saturés, avec des pointes de rayon $r_p > 10 \mu\text{m}$, le streamer négatif présente une structure en buisson alors que dans les liquides aromatiques purs (hydrocarbures non saturés), on observe une structure filamentaire. Les streamers négatifs filamenteux sont également observés dans l'hélium liquide et l'azote liquide [38].

2.2.3.3. Influence de la pression :

Il est connu depuis longtemps qu'en appliquant une pression à un isolant liquide donné, on améliore de façon importante la rigidité diélectrique de celui-ci.

Le volume, le courant et la lumière émise par les streamers négatifs sont fortement affectés par l'application d'une modeste pression hydrostatique. Lorsque la pression augmente, le nombre et l'amplitude des pics de courant, la lumière émise et le volume du streamer négatif diminuent ils disparaissent pour une pression suffisamment élevée. La pression hydrostatique nécessaire à la disparition de ces impulsions est d'autant plus importante que la charge correspondant à ces pics de courant est élevée. En général, la pression nécessaire à la disparition des streamers positifs rapides est plus importante que celle nécessaire aux streamers négatifs lents. Aucun effet appréciable n'a été cependant relevé lorsque la pression est diminuée en dessous de la pression atmosphérique [40].

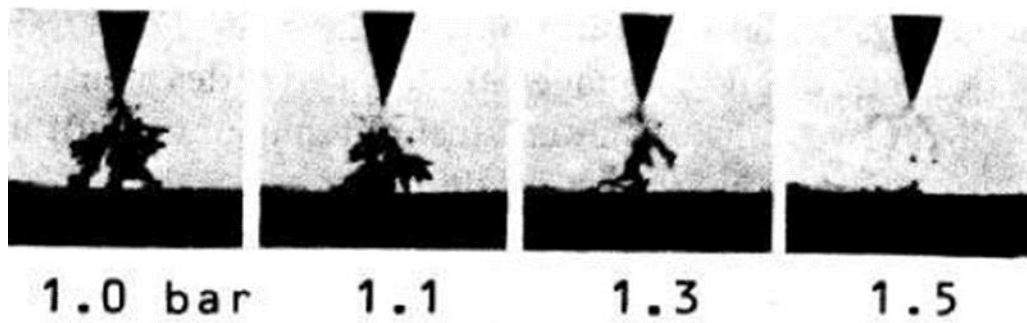


Figure 2.5 : streamer négatif dans le cyclohexane sous l'influence de la pression [41].

2.2.3.4. Influence de la température :

Selon Hoch et Reinders [42], la rigidité de l'huile minérale est meilleure entre 20 et 80°C. Elle est cependant améliorée au plus de 30% à la température de 60 °C, que ce soit dans l'huile seule ou en présence de 35% de CCl₄. En portant l'hexane jusqu'à une température proche de son point d'ébullition, McGrath et Nelson [45] n'ont observé pratiquement aucun effet sur les phénomènes de préclaquage. La vitesse des streamers positifs passe de 2.3 km/s à seulement 2.7 km/s lorsque la température varie de 5 à 42 °C [44] ; celle des streamers négatifs ne subit aucune variation.

2.2.3.5. Influence des additifs :

a. Additifs capteurs des électrons :

Afin de montrer l'influence des processus électroniques sur les phénomènes de préclaquage, Devins *et al* étudièrent séparément l'influence d'additifs capteurs d'électrons et à bas potentiel d'ionisation. L'addition d'une faible quantité (0.05 mol/l) d'additif capteur d'électrons non ionique tel que l'hexafluorure de soufre (SF₆) ou le chlorure d'éthylène (C₂H₅Cl) à l'huile naphthénique ou au 2, 2,4-trimethyl- pentane, rend les streamers négatifs plus filamentaires et augmente leur vitesse d'un facteur 5. Un effet similaire est rapporté sur l'action du CCl₄ et le CF₃(CF₂) (CF₃) sur le n-hexane. La présence de faibles concentrations de composés poly-aromatiques, réduit de façon significative la rigidité d'une huile naphthénique en géométrie pointe – sphère sous tension impulsionnelle [40].

A. Beroual *et al* obtiennent une multiplication par 10 de la vitesse des streamers négatifs en ajoutant 0.04 M/l de CCl₄ au cyclohexane. Il n'y a pas d'effet notable de ces additifs sur les streamers positifs dans les mêmes liquides.

L'action du CCl_4 augmente également le nombre et l'amplitude des pics de courant des streamers négatifs dans le cyclohexane et dans le n-hexane [40]. Lorsque la concentration de CCl_4 atteint 0.08 M/l, le courant tend vers une forme ayant une composante continue [40].

b. Additifs a bas potentiel d'ionisation :

A. Beroual *et al.* Obtiennent une légère augmentation de la vitesse des streamers négatifs et une multiplication par 3 de celle des streamers positifs, en ajoutant 0.05 mol/l de tetramethyle paradiphénylamine (TMPD) au cyclohexane. Il existe cependant une valeur de la concentration (0.4 à 0.5 mol/l) au-dessus de laquelle aucune augmentation significative de la vitesse n'est observée [40].

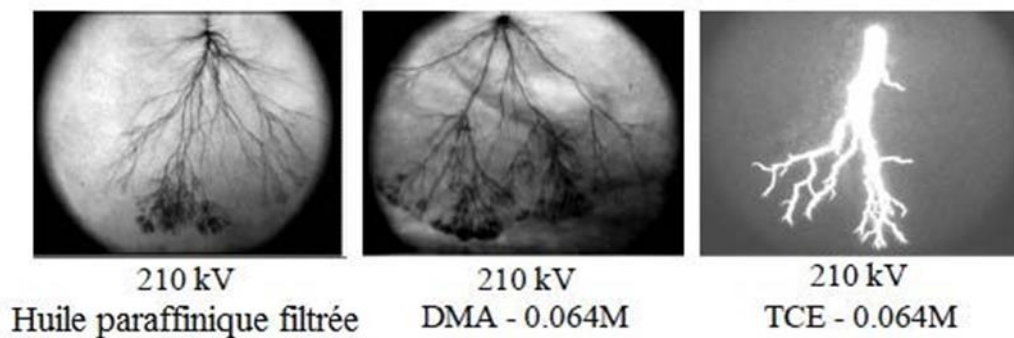


Figure 2.6 : Effet d'additifs à bas potentiel d'ionisation (DMA) et d'additifs capteurs d'électrons (TCE) sur la propagation des streamers positifs dans une huile paraffinique [44].

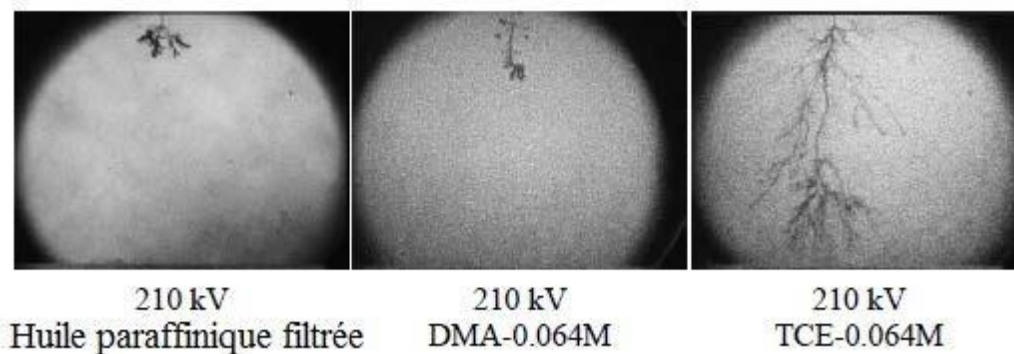


Figure 2.7 : Effet d'additifs à bas potentiel d'ionisation (DMA) et d'additifs capteurs d'électrons (TCE) sur la propagation des streamers négatifs dans une huile paraffinique [40].

2.2.3.6. Influence de niveau de la tension appliqué :

Nakao *et al.* ont rapporté que dans le n-hexane, les streamers positifs deviennent plus filamenteux et leur vitesse augmente lorsque la tension ou/et la concentration d'un additif comme le N, N'-diméthylaniline (D.M.A.) augmente [40].

Selon Yamashita *et al.* Lorsque la tension (impulsion : 200ns/540µs) augmente, la forme des streamers négatifs dans le cyclohexane change de sphère en hémisphère pour prendre une forme en buisson lorsque la tension est suffisamment élevée [40].

Beroual a observé une augmentation de la vitesse des streamers aussi bien positifs que négatifs dans le cyclohexane lorsque la tension est augmentée. Elle est de l'ordre de 30m/s à U=20kV et passe à environ 80m/s à U=40kV, lorsque la polarité de la pointe est négative. En polarité positive, elle est de l'ordre de 0.3km/s à U=25kV et passe à 0.5km/s pour une tension de 40kV [40].

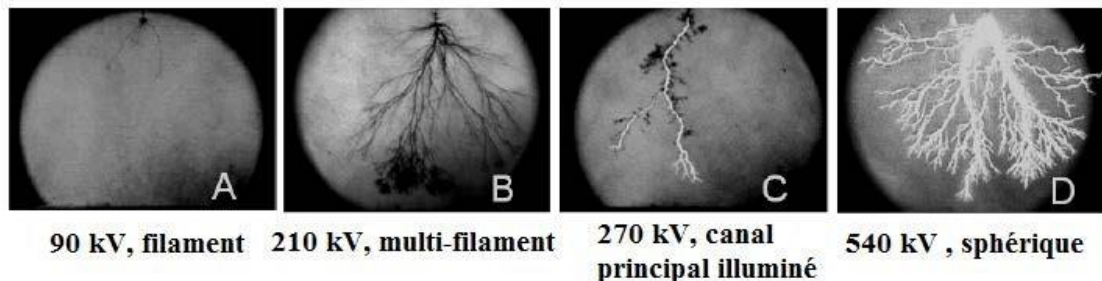


Figure 2.8 : les formes des streamers positifs dans une huile paraffinique avec différents niveaux de tension [40].

2.2.3.7. Influence de la géométrie des électrodes :

Dans les géométries d'électrode très divergentes, sous tension alternative, avec une distance inter électrode de 25 mm environ et un champ moyen $E < 10$ kV/cm, le claquage du liquide est contrôlé par la propagation des streamers positifs, alors que dans les géométries divergentes modérées avec une distance inter électrode de l'ordre de 5 mm et un champ moyen $E < 80$ kV/cm, le claquage du liquide est contrôlé par un streamer négatif [40].

2.2.3.8. Influence de rayon de courbure de la pointe :

Pour obtenir des valeurs de champ très élevées pour des tensions modestes, on utilise des électrodes pointues dont les rayons de courbure r_p peuvent être inférieurs à 1µm. La phase

d'initiation et la forme des streamers initiés sont fortement dépendantes de l'intensité du champ électrique local alors que la propagation est également entretenue par le champ électrique moyen. En tension alternative et impulsionnelle, Les streamers sont générés à $E_0 > 10 \text{ MV/cm}$ lorsque r_p est inférieur à $3 \mu\text{m}$, alors que pour $r_p > 100 \mu\text{m}$, ils sont générés à $E_0 > 1 \text{ MV/cm}$ []. E_0 est le champ harmonique sur la pointe assimilée à une hyperboloïde de révolution sans injection de charges [40].

2.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons montré que 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 faut ajouter les paramètres extérieurs comme l'humidité et la présence d'impuretés (particules déformables (bulles de gaz, eau en suspension) ou non déformables (solides), conductrices ou non conductrices. Concernant les paramètres qui influent sur la génération, le champ électrique, l'épaisseur du solide et les propriétés des matériaux constituant l'interface solide/liquide, jouent un rôle essentiel dans leur développement. En tout cas, le nombre d'études sur les huiles végétales est limité par rapport aux huiles minérales.

Chapitre03 : Résultats et interprétation

3.1 Introduction :

La période de préclaquage consiste en deux phases : la génération et la propagation des streamers. L'étude de la phase de propagation permet de progresser dans la compréhension des processus fondamentaux conduisant au claquage. Les mécanismes responsables de la phase de propagation des streamers sont complexes vu la multitude de paramètres qui sont impliqués. A cause de leurs rôles important dans les processus conduisant au claquage, l'étude des streamers est utile et importante : la tension de claquage d'un liquide est régie par le comportement des streamers [46].

Généralement, les travaux se font dans un intervalle d'électrodes pointe – plan sous tension impulsionnelle de foudre. La longueur d'arrêt (longueur finale), les courants et les charges électriques associés ainsi que la forme des streamers sont généralement utilisés pour décrire les caractéristiques de la propagation des streamers. Dans les huiles végétales, seules quelques données sont disponibles sur ce sujet [47]. Dans ce chapitre, on a fait l'analyse des signaux des courants des streamers associés aux streamers sous tension impulsionnel de foudre en utilisant deux techniques de traitement de signal (FFT et DWT).

3.2 Analyse des courants :

3.2.1 Taux de distorsion harmonique :

Le taux de distorsion harmonique représente la variation d'un signal comparé à une référence [48]. Il se mesure normalement harmonique par harmonique dans les phases des conceptions et d'essais des matériels. L'indication de la répartition des harmoniques permet, en effet, de diagnostiquer l'origines des non-linéarités. Certaines formes de distorsion peuvent être plus indésirables que d'autres [49].

3.2.2 Transformée de Fourier rapide (FFT) :

FFT est une technique fréquemment utilisée en traitement du signal, ~~qui calcule la transformée~~ FFT peut être utilisée dans différents types de traitement du signal. Elle peut être utile pour lire des choses comme les ondes sonores ou pour toute technologie de traitement d'image. Une transformée de Fourier rapide peut être utilisée pour résoudre les différents types d'équations, ou montrer différents types d'activité fréquentielle de manière utile [50].

3.2.3 Transformée en ondelette discrète:

La transformée en ondelette discrète (TOD) "Wavelet Transform discrete" sous l'abréviation anglaise (DWT) est une implémentation utilisant un ensemble discret d'échelles et de translations d'ondelettes obéissant à certaines règles. En d'autres termes, cette transformée décompose le signal en un ensemble d'ondelettes mutuellement orthogonales, ce qui constitue la différence principale avec la transformée en ondelettes continue, ou son implémentation en séries discrètes dans le temps parfois appelée transformée en ondelettes continue discrète dans le temps (DT-CWT, discrete-time continuous wavelet transform). Il existe plusieurs familles d'ondelette discrète, nous avons choisis la famille de DAUBCHIES (Db) est la famille la plus connue des ondelettes orthonormales. Ses ondelettes sont généralement dénommées par le nombre de coefficients a_k non nuls, on parlera donc d'ondelettes DAUBCHIES 4, DAUBCHIES 5, etc. Pour faire simple, les fonctions deviennent plus douces avec un nombre croissant de coefficients d'ondelettes. Elle peut être utilisée pour débruiter facilement et rapidement un signal [51].

3.3 Procédure expérimentale :

Les tests ont été effectués dans l'école centrale de Lyon. Le dispositif expérimental est constitué d'une cellule d'essais contenant le liquide étudié, de la source de tension et du diviseur associé, des systèmes de visualisation des streamers et de mesures de signaux électriques (courant et charge) et optiques (forme et longueur finale (ou d'arrêt) des streamers) qui les accompagnent. Le dispositif expérimental est placé à l'intérieur d'une cage de Faraday de 6m x 4,5m x 3m de dimensions. La figure 4.1 montre le schéma de l'ensemble du dispositif expérimental utilisé dans cette étude [52].

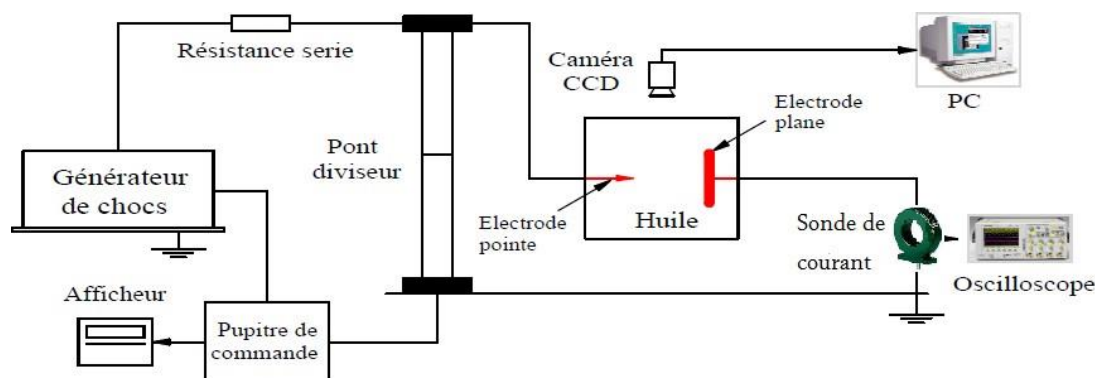


Figure 3.1 : Schéma de dispositif expérimental [52].

La cellule d'essai pour l'étude de la propagation des streamers contenant le liquide et le système d'électrodes pointe–plan est constituée d'un corps cylindrique en Téflon de 80 mm de hauteur et 112 mm de diamètre interne (Figure 3.2). Elle est munie de deux couvercles transparents en Plexiglas servant à la visualisation des streamers et à l'enregistrement de la lumière qu'ils émettent. La cellule, en pièces détachées, est soigneusement nettoyée et rincée sous une hotte à l'abri des poussières. Tous ces éléments sont ensuite étuvés à 50°C pendant plusieurs heures afin d'éliminer toute trace d'humidité [52].

L'électrode pointe est en tungstène thorié à 2% ; son rayon de courbure est de $10,0 \pm 0,5 \mu\text{m}$. L'électrode plane est une plaque circulaire en laiton de 10mm d'épaisseur et de 40mm de diamètre ; elle est couverte d'un solide isolant en Téflon (électrode bloquée) possédant une rigidité diélectrique suffisante pour éviter les claquages et protéger ainsi l'entrée de l'oscilloscope. L'intervalle inter électrodes varie de 2 à 30mm. La pointe est remplacée dès que son profil devient différent de celui de départ. Le contrôle et la mesure du rayon de courbure de la pointe sont effectués sous un microscope de type Nikon eclipse LV150 [52].

Toutes les mesures ont été réalisées sous tension de foudre. La tension est fournie par un générateur d'impulsion type multiplicateur de Marx (200 kV – 2 kJ) permettant de générer des ondes de foudre. En négligeant les pertes, le générateur peut délivrer une tension maximale de 200 kV dans les deux polarités. Une résistance de limitation du courant est montée en série avec la cellule, pour limiter les surintensités provoquées par d'éventuels claquages. La mesure de la tension s'effectue au moyen d'un diviseur capacitif [52].

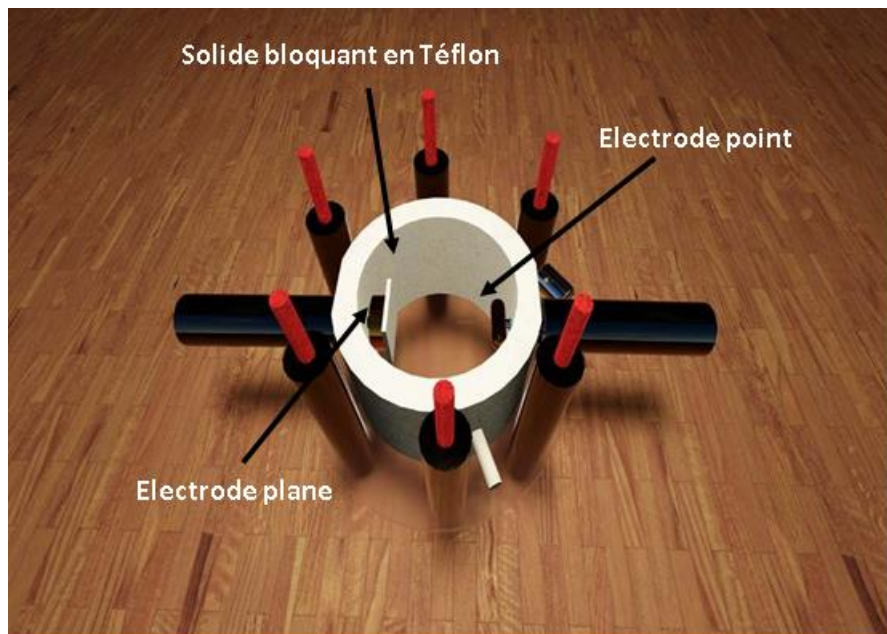


Figure 3.2 : Vue schématique de la cellule d'essai [52].

Les courants de streamers sont mesurés à travers une sonde (Pearson Current Monitor 6585) connectée en série avec la cellule d'essais. La charge électrique est obtenue par intégration du courant obtenue automatiquement par l'oscilloscope.

3.4 Les courants et charges obtenues associés aux streamers :

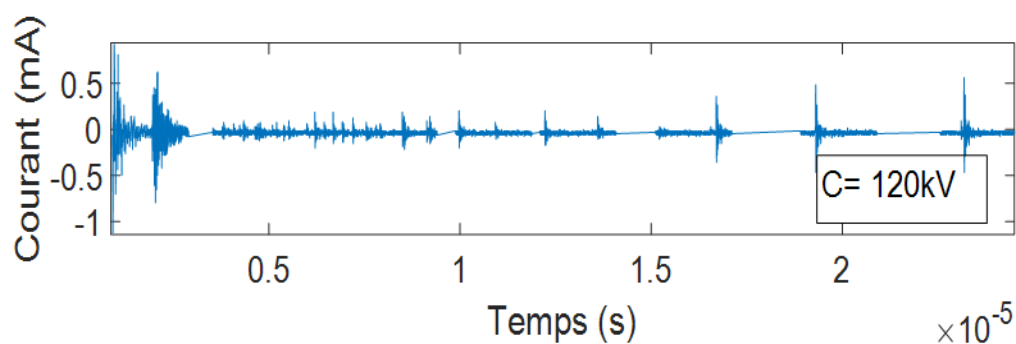
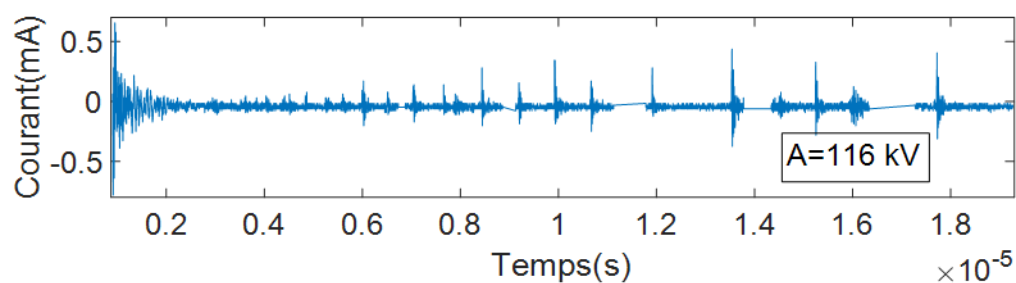
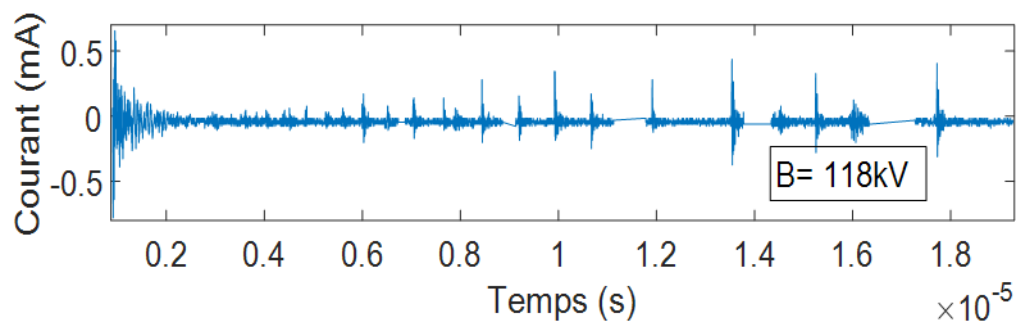


Figure 3.3: Courants de streamers mesurés en polarité négative.

A=116 kV, B= 118kV, C= 120 kV.

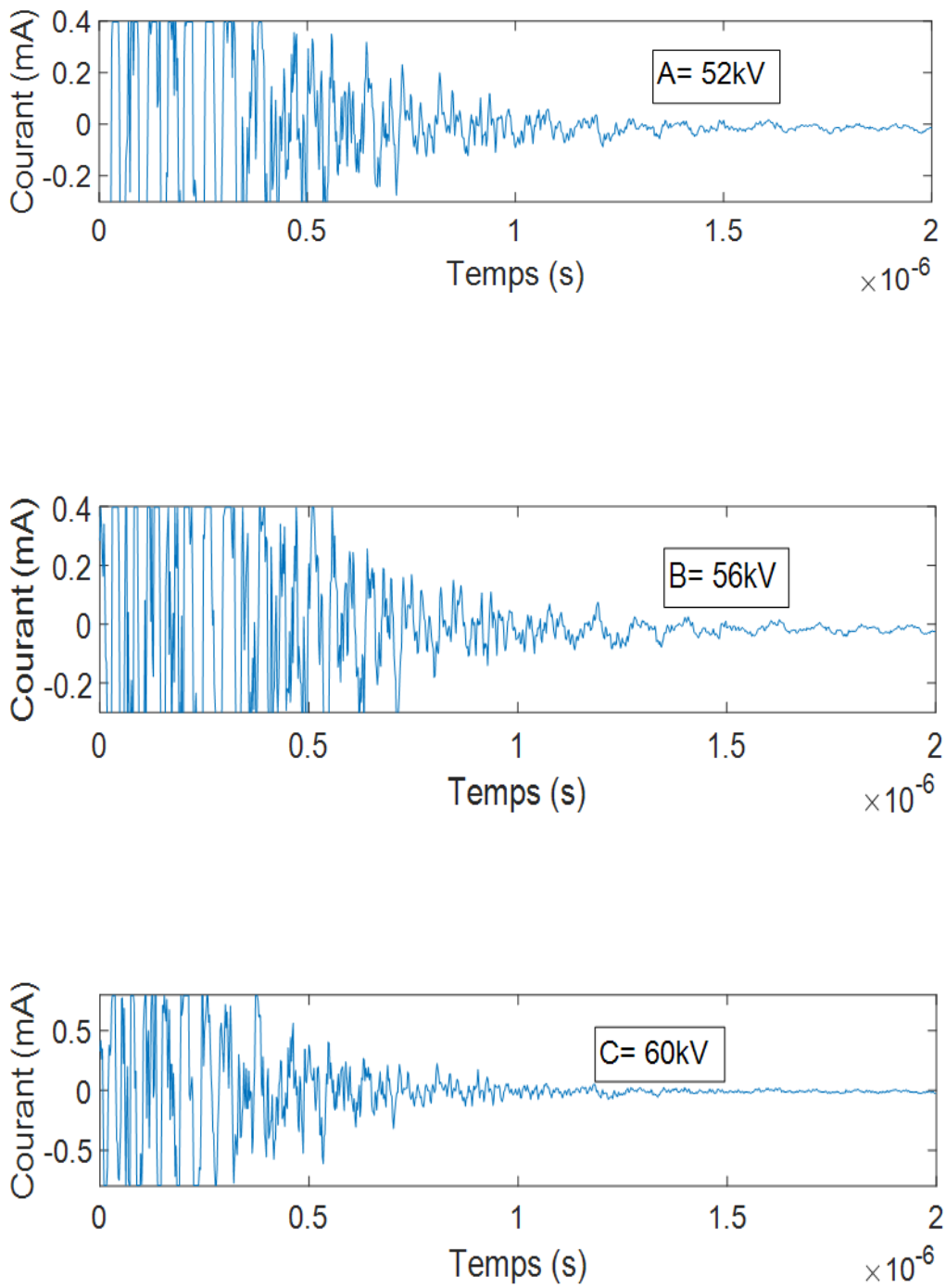


Figure 3.4 : Courants de streamers mesurés en polarité positive.

A= 52 kV, B= 56 kV, C= 60 kV.

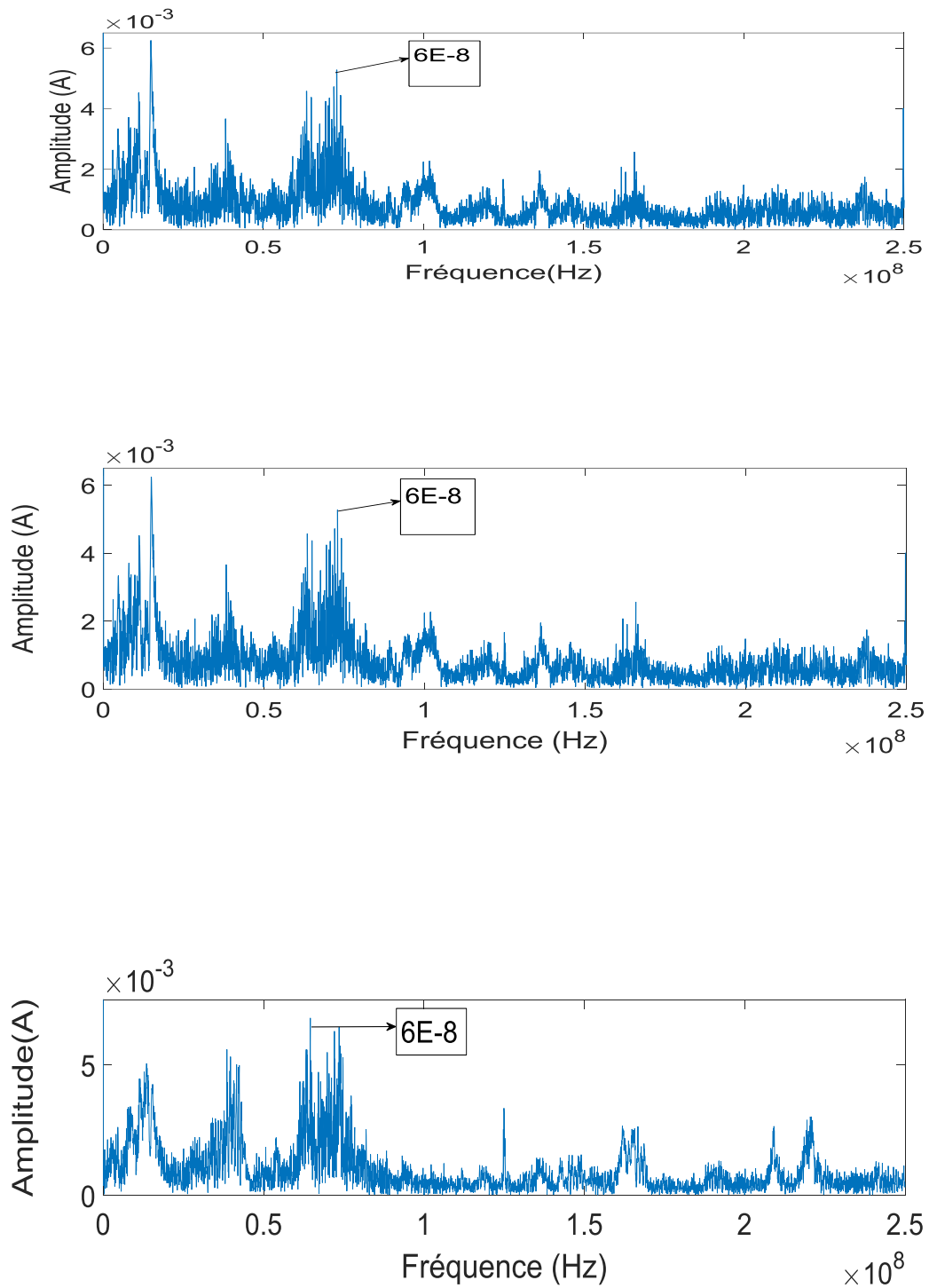


Figure 3.5 : résultats de la FFT en polarité négative.

A=116 kV, B= 118 kV, C= 120 kV.

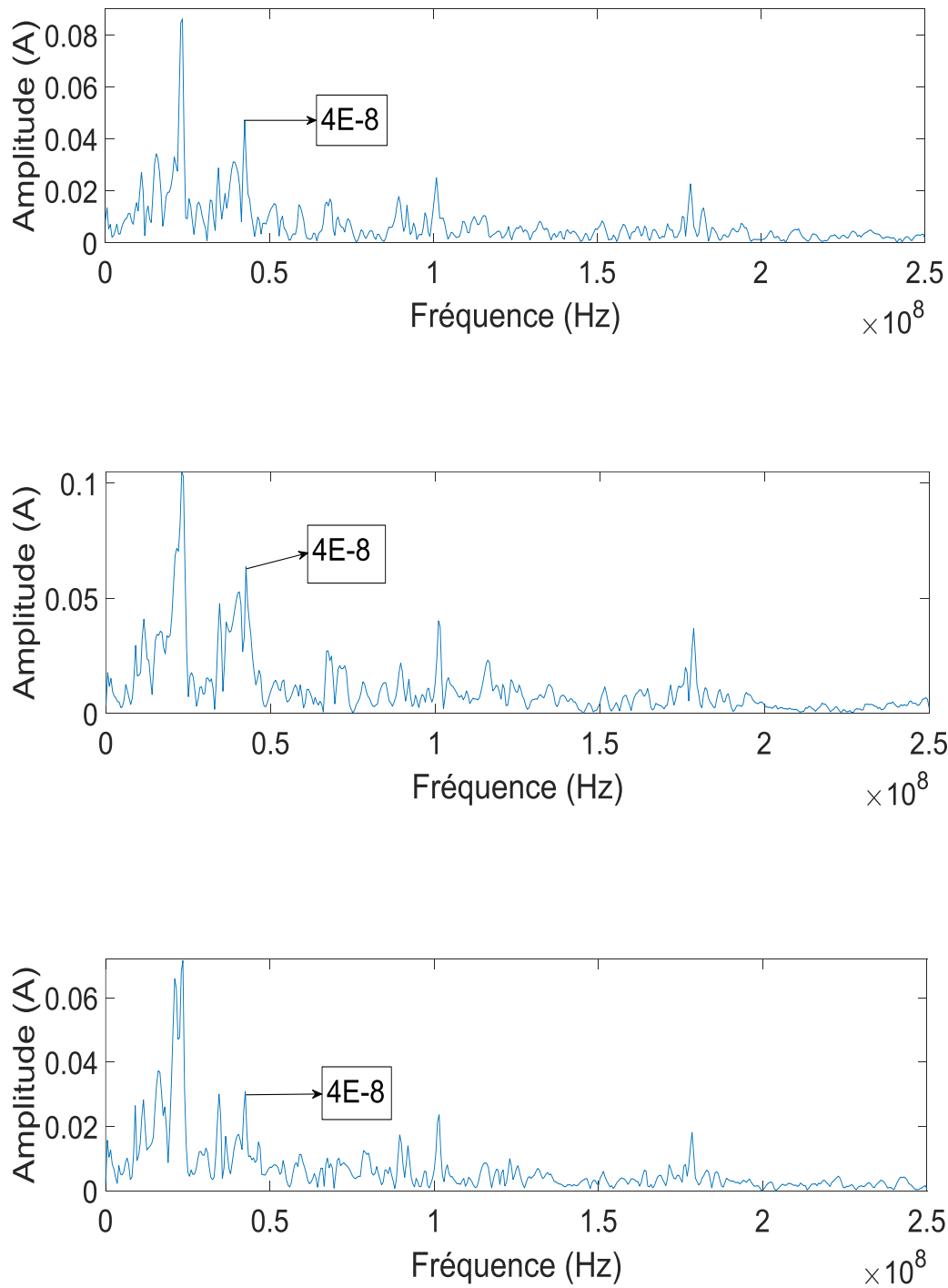


Figure 3.6 : résultats de la FFT en polarité positive.

A= 52 kV, B= 56 kV, C= 60 kV.

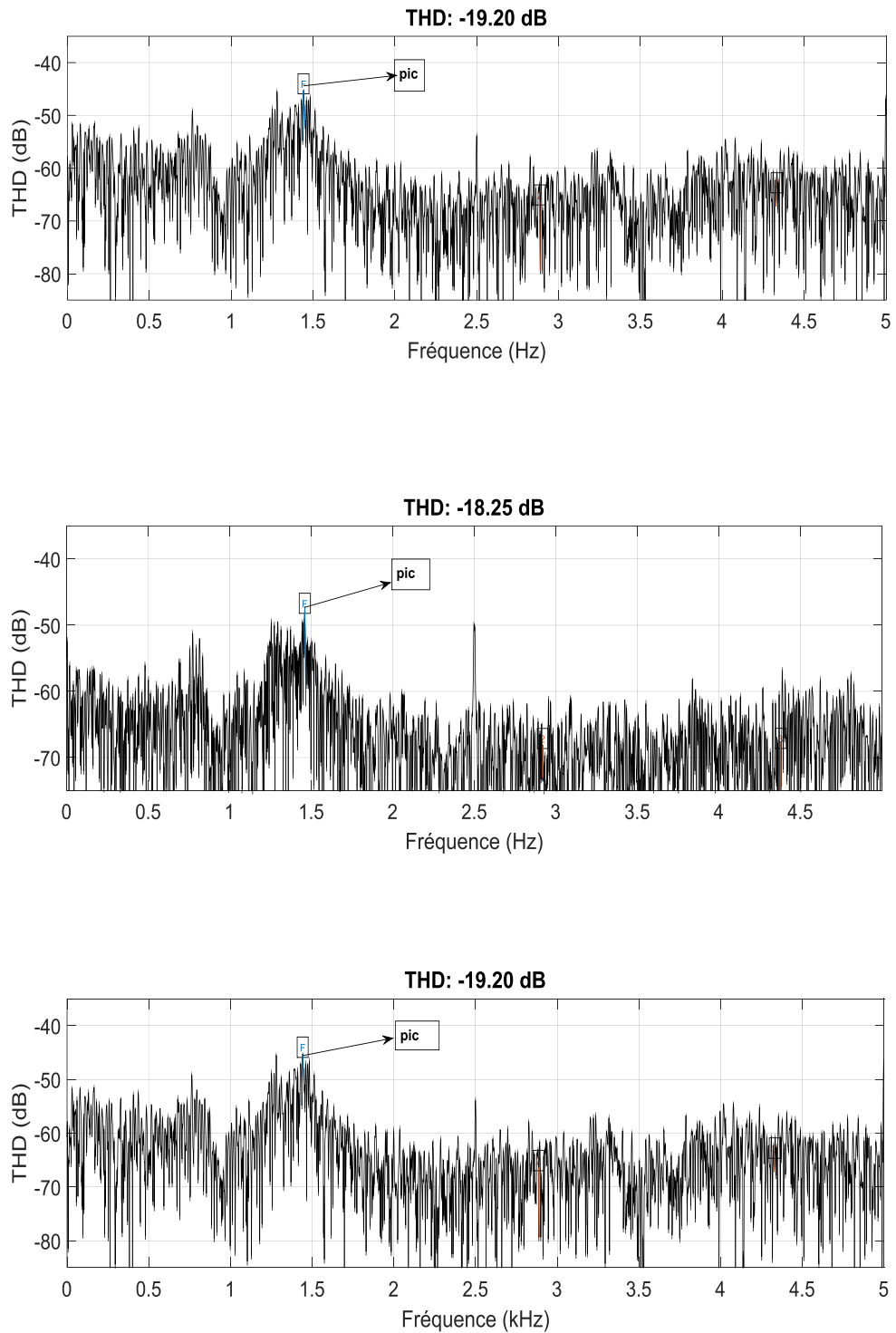


Figure 3.7 : Taux de distorsion harmonique en polarité négative.

A=116 kV, B= 118kV, C= 120 kV.

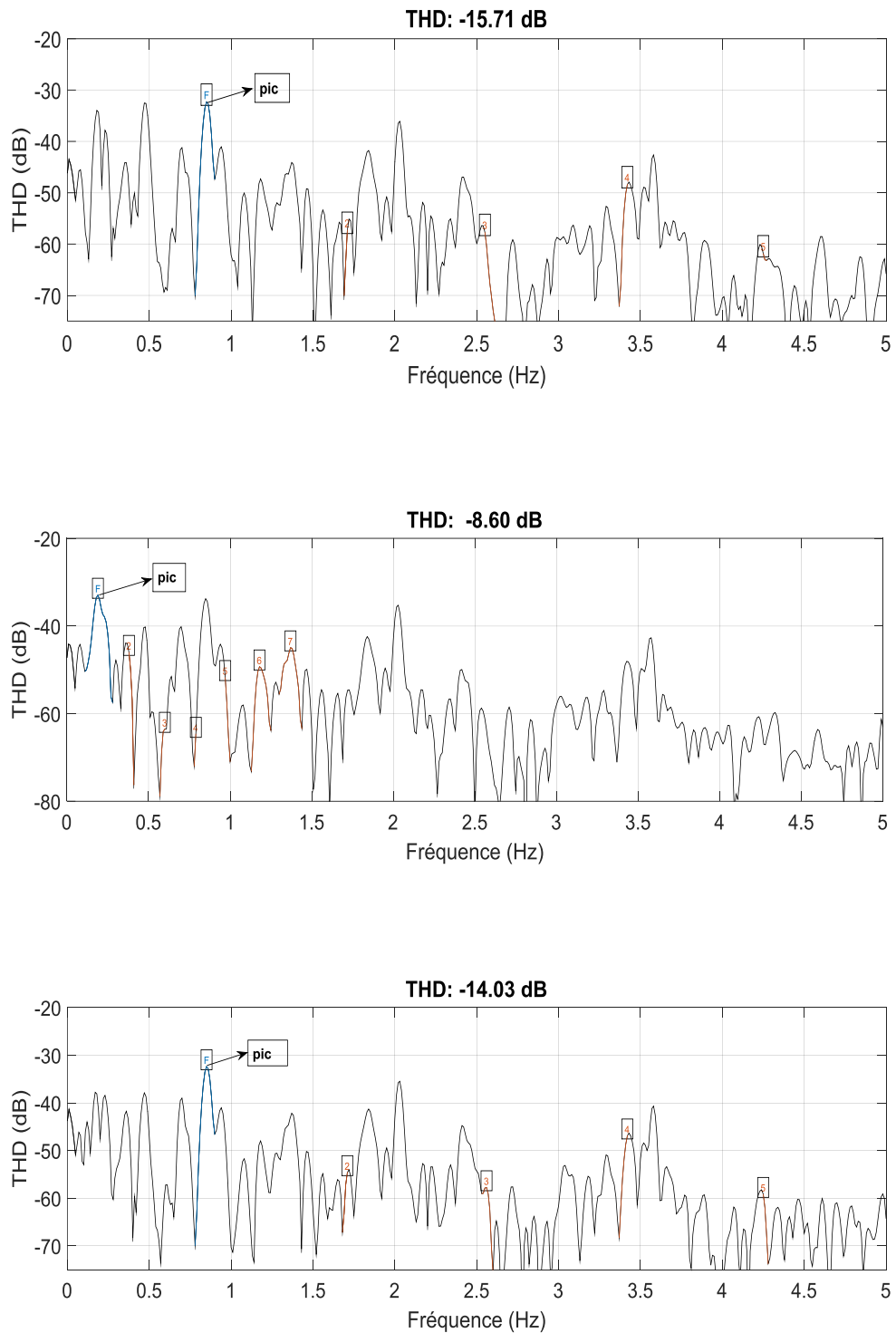


Figure 3.8 : Taux de distorsion harmonique en polarité positive.

A= 52 KV, B= 56 KV, C= 60 KV.

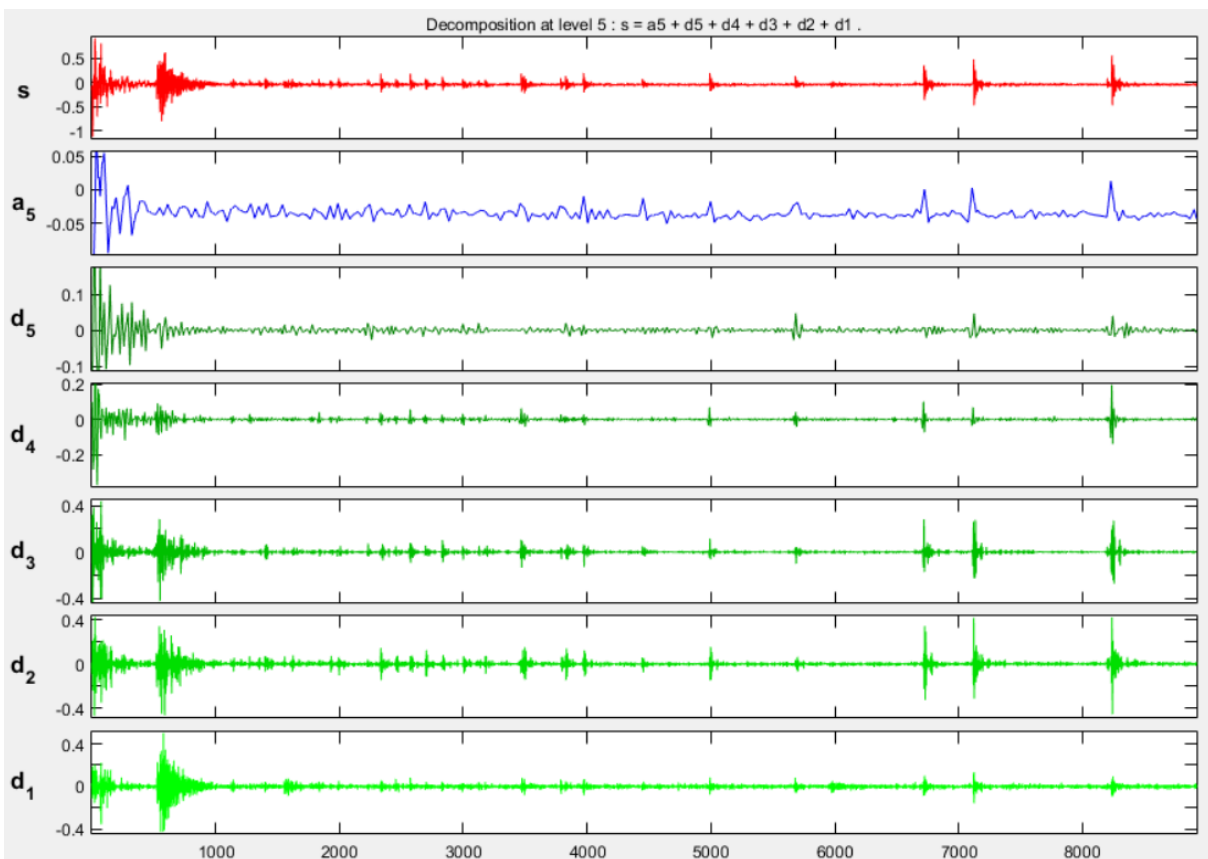
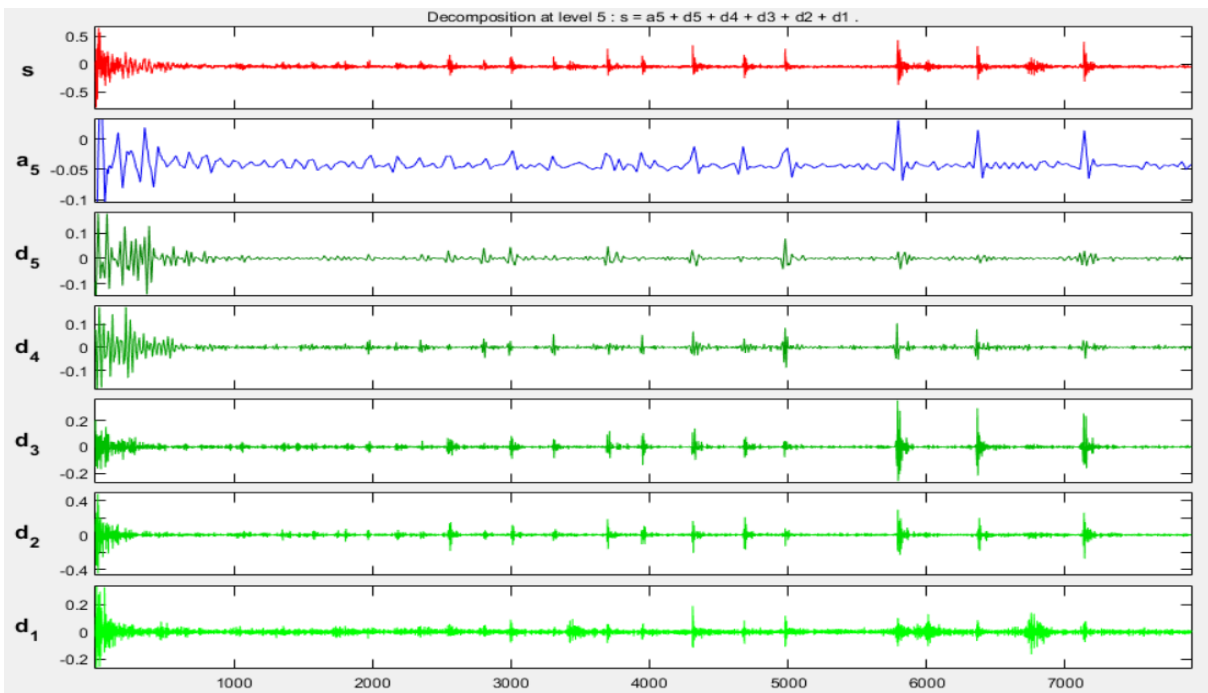


Figure 3.9 : résultats de la DWT en polarité négative.

A= 116 kV, B= 118 kV.

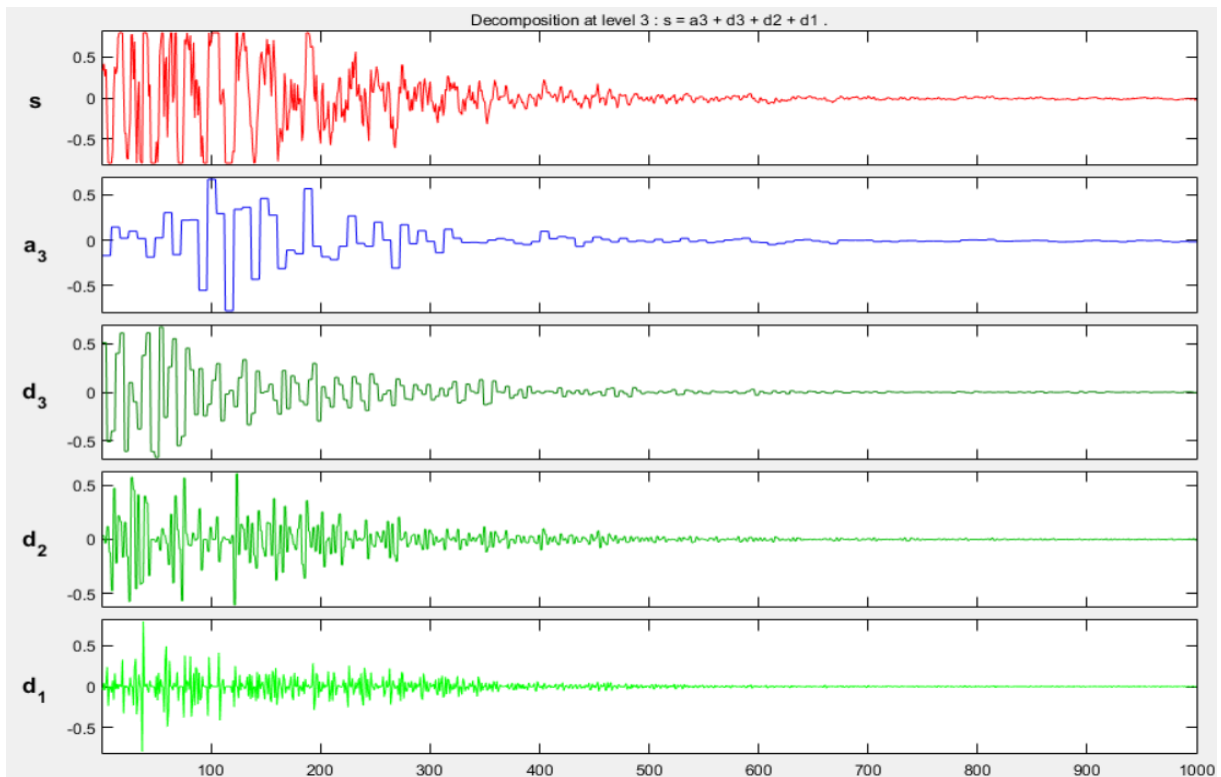
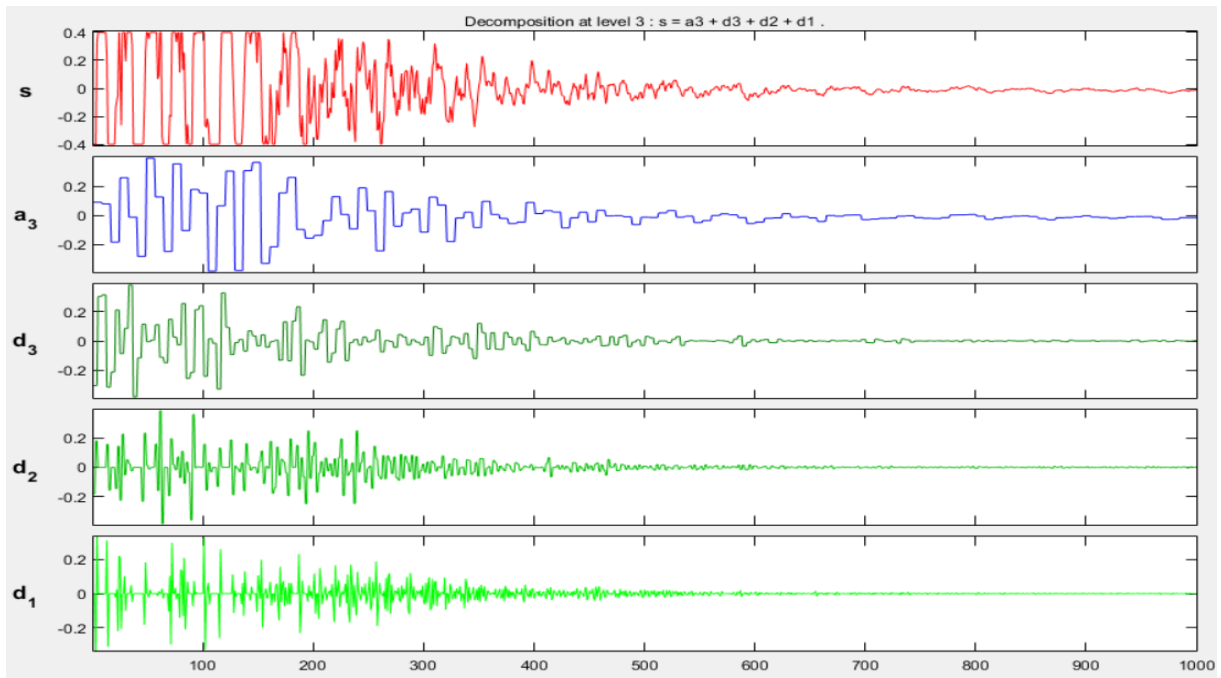


Figure 3.10 : résultats de la DWT en polarité positive.

A= 52 kV, B= 56 kV.

Tableau 3.1 : Bandes des fréquences associés aux détails.

Niveau de l'ondelette	Bande de fréquence	
Détail 1 (d1)	[2.5E -7	1.25E -7]
Détail 2 (d2)	[1.25E-7	0.625E -7]
Détail 3 (d3)	[0.625E -7	0.312E-7]
Détail 4 (d4)	[0.312E-7	0.156E-7]
Détail 5 (d5)	[0.156E-7	0.078E-7]

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, et les signales que nous avons étudié donner des résultats satisfaisants, la valeur des pics dans la polarité négative presque similaires et égale : $6E-8$ et dans la polarité positive aussi presque similaires et égale : $4E-8$. En accordants les résultats obtenues de FFT avec une autre méthode de traitement de signal qui s'appelle transforme d'ondelette discrète (DWT). Cette analyse fournit un moyen efficace d'examiner les caractéristiques d'un signal à différentes bandes de fréquence. Elle se décompose le signal à plusieurs niveaux selon notre besoin, nous avons choisi l'ondelette discrète de DAUBCHIES car il est puissant que le FFT et donne des résultats exacte et plus précise que l'autre qui nous avons utilisons précédemment.

En remarque que le taux distorsion harmonique associés aux streamers, presque aussi sont très similaires dans les huiles végétales testées, quelle soit la polarité. Les figures (3.7) et (3.8) montrent quelques exemples de THD.

3.6 Conclusion :

Dans ce travail, nous avons présenté l'analyse des courants associés aux streamers dans les huiles végétales, en utilisant des méthodes spécialement pour le traitement de signal. Il s'appuie sur les méthodes les plus utilisés dans ce domaine, comme : transformée de Fourier rapide (FFT), transformée en ondelette discrète (DWT).

Nous avons observé que les streamers négatifs sont généralement plus lumineux que les streamers positifs. Nous observons aussi que les courants sont constitués d'impulsions à très haute fréquence, et que les charges correspondantes varient par paliers très courts. Les amplitudes des impulsions de courants ainsi que les charges élémentaires correspondantes dans les huiles végétales sont plus élevées.

Conclusion générale

Ce travail nous a permis d'étudier le comportement de nouveaux isolants liquides, à savoir les huiles de type Esters naturels (huiles végétales) pouvant être produits en très grande quantité dans notre pays, en vue de leur utilisation dans les transformateurs de puissance à la place des huiles minérales naphténiques utilisées actuellement. Ceci afin de répondre en partie aux contraintes internationales sur la protection de l'environnement en encourageant l'utilisation de matériaux biodégradables.

Les méthodes de traitement des signales que nous avons utilisées donnent des résultats acceptables. En particulier, la méthode transforme de Fourier rapide (FFT) et transformée d'ondelette discrète (DWT). Chaque méthode sa façon de fonctionnement, par exemple le FFT transforme la structure du cycle d'une forme d'onde en composantes sinusoïdale, et le DWT est un puissant d'outil d'analyse d'un signal. Cette analyse fournit un moyen efficace d'examiner les caractéristiques d'un signal à différentes de fréquence. Les résultats obtenus ont montré également les tensions de claquage mesurées sont plus élevées dans les huiles végétales, la rigidité diélectrique des huiles végétales est généralement meilleure. En remarque aussi les résultats sont presque très similaires dans la polarité positive et négative.

En général, les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude, montrent que les principales caractéristiques de l'huile végétale sont meilleures.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Viet Hung DANG, « Etude de Phénomène de Préclaquage et de Claquage des Huiles Végétales, Minérales et Synthétique- Caractérisation des Décharges aux Interfaces », Thèse de Doctorat, école centrale de Lyon, pp 23-24, soutenue le 10 mars 2011.
- [2] Chau TRAN DYU, « Propriétés diélectriques de liquides isolants d'origine végétale pour applications en haute tension », Thèse de Doctorat, UNIVERSITY JOSEPH FOURIER-GRONOBELLE 1, pp 47, soutenue le 8 janvier 2009.
- [3] 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 Boumediene, pp12, Soutenue publiquement le 17/03/2018.
- [4] HAMRAOUI NASSIMA, BADACHE FAIZA, « Identification des Décharges et Diagnostic des Transformateurs de Puissance », Mémoire fin d'étude MASTER, Université MOHAMED EL BACHIR IBRAHIMI de BORDJ-BOUARIRIDJ, pp1.
- [5] Chau TRAN DYU, « Propriétés diélectriques de liquides isolants d'origine végétale pour applications en haute tension », Thèse de Doctorat, UNIVERSITY JOSEPH FOURIER-GRONOBELLE 1, pp 1, soutenue le 8 janvier 2009.
- [6] A. BEROUAL, « Notes de cours de Master – Matériaux pour le génie électrique », École Centrale de Lyon, 2007.
- [7] Mme TALHI Mama, EP. BOURI, « Contribution à l'étude du phénomène d'électrisation par écoulement dans les transformateurs de puissance », Thèse de Doctorat, Département Electrotechnique, Université d'Oran Mohamed Boudiaf, pp 11, 2017-2018.
- [8] Amel NAIT DJOUDI, « Caractérisation de l'huile pour transformateurs en service », Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE, Département Génie Electrique, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, pp 3, soutenu publiquement le 29 septembre 2014.
- [9] Mme TALHI Mama, EP. BOURI, « Contribution à l'étude du phénomène d'électrisation par écoulement dans les transformateurs de puissance », Thèse de Doctorat, Département Electrotechnique, Université d'Oran Mohamed Boudiaf, pp 11, 2017-2018.

- [10] P. J. VUARCHEX, « Caractéristiques des diélectriques liquides », Techniques de l'ingénieur, Traité K 714, Janvier 1988.
- [11] D. Cherry, « Insulating Fluids: An Overview of Dielectric Fluids Used in Transformers », Principal Consulting Scientist for Dielectric Fluids, October 29, 2009.
- [12] K. Dumke, H. Borsi and E. Gockenbach, « Experimental investigation on the behaviour of decomposition gases in insulating liquids caused by partial discharge and », 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectrics Liquids, ICDL, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [13] Viet Hung DANG, « Etude de Phénomène de Préclaquage et de Claquage des Huiles Végétales, Minérales et Synthétique- Caractérisation des Décharges aux Interfaces », Thèse de Doctorat, école centrale de Lyon, pp 40, soutenue le 10 mars 2011.
- [14] 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 Boumediene, pp 22-37, Soutenue publiquement le 17/03/2018.
- [15] Chau TRAN DYU, « Propriétés diélectriques de liquides isolants d'origine végétale pour applications en haute tension », Thèse de Doctorat, UNIVERSITY JOSEPH FOURIER-GRONOBELLE 1, pp47, soutenue le 8 janvier 2009.
- [16] P. Rain, « Etude des phénomènes pré disruptifs et disruptifs à grande distance dans l'huile minérale de transformateur sous tension alternative », thèse de doctorat. Grenoble, France: INPG, 1992.
- [17] J.F. ROACH et al., « Liquid and particle motion in transformer oil under 60Hz stress », IEEE Conf. Inter. Symp. EI, Boston, 1980.
- [18] S.S. HAKIM et J.B. HIGHAM, A phenomenon in n-hexane prior to its electric breakdown » Nature, vol. 189, pp. 996-1002, 1961.
- [19] B. FARAZMAND, « Study of electric breakdown of liquid dielectrics using Schlieren optical techniques », Brit. J. of Appl. Phys., vol. 12, pp. 251-254, 1961.
- [20] P. GOURNAY, « Génération et propagation des streamer positifs dans quelques hydrocarbures », Thèse de doctorant. Grenoble, France: INPG, 1994.

- [21] W.G. CHADBAND, « The ubiquitous positive streamer », IEEE Trans. on Elect. Insul., vol. 23, pp. 697-706, 1988.
- [22] W.G. CHADBAND, « On the variations in the propagation of positive discharges between transformer oil and silicone », fluids J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 13, pp. 1299-1307, 1980.
- [23] R. KATTAN, N. BONIFACI et A. DENAT, « Etude de la génération de bulles dans les hydrocarbures liquides générées par les impulsions de Trichel », J. Phys. III (France), Vol.1, No. 7, Juillet 1991.
- [24] R. Kattan, A. Denat and N. Bonifaci, « Formation of Vapor Bubbles in Non – Polar Liquids Initiated by Current Pulses », IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. 26, No.4, pp. 656-662, August 1991.
- [25] F. JOMNI, F. Aitken, A. Denat., « Dynamics of microscopic bubbles generated by a corona discharge in insulating liquids: influence of pressure », J. of Electrostatics. 47, pp. 49 – 59, 1999.
- [26] A. DENAT, J. P. Gosse, B. Gosse, « Conduction du cyclohexane très pur en géométrie pointe – plan, Rev ». De Phys. Appl. 22, pp. 1103-1111, 1987.
- [27] R. QOTBA, F. Aitken, A. DENAT, « Étude de la génération de cavités par un dépôt fortement localisée d'énergie dans le n-pentane liquide en fonction de la température », J. of Electrostatics. 64, pp. 506 – 512, 2006.
- [28] T. Aka-N'gnui, « Contribution à l'étude des phénomènes de préclaquage dans les diélectriques liquides – Modèles des générations et de propagation », Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, 2000.
- [29] A. Larsson and M. Bengtsson, « The sequence of events in mid-gap laser- triggered, Electrical breakdown in liquid dielectrics », IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol 9, No.3, pp. 349-352, 2002.
- [30] J. C. Devins, S. J. Rzed, R. J. Schwabe, « Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids », J. of Appl. Phys., Vol. 52, pp. 4531-4545, 1981.

- [31] P.Keith Watson, W.G. Chadband and M. Sadeghzadeh-Araghi, « The Role of Electrostatic and. Hydrodynamic Forces in the Negative-point Breakdown of Liquid Dielectrics », IEEE Trans. On Elect. Ins., Vol. 26 No.4, August 1991.
- [32] A. Beroual, « Electronic and gaseous processes in the prebreakdown phenomena of dielectric liquids », J. Appl. Phys., vol. 73, no. 9, pp. 4528–4533, May 1993.
- [33] R. E. Hebner, E. F. Kelley, G. J. FitzPatrick, and E. O. Forster, « The effect of aromatic impurities on the positive streamer growth in Marcol 70 », IEEE Inter. Symp. On Electr. Insul., Montreal (Canada), 1984.
- [34] J. A. Cross, « Electrostatics: Principles, Problems and application », 1987.7
- [35] A. Beroual, « Electronic processes and streamer phenomena in liquid dielectrics », Arch. Electr. Engineering, No. 4, pp. 579-592, 1995.
- [36] R. Badent, K. Kist and A.J. Schwab, « The effect of viscosity on streamer propagation in insulating oil under impulse conditions », 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectrics Liquids, ICDL, Roma Italy, July 15-19, pp. 181-184, 1996.
- [37] S. Sakamoto and H. Yamada, « Optical study of conduction and breakdown in dielectric liquids », IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. EI-15, pp. 171- 181,1980.
- [38] 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.
- [39] A. Beroual and R. Tobazeon, « Prebreakdown Phenomena in Liquid Dielectrics », IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 21, No. 4, pp. 613–627, 1986.
- [40] 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 Boumediene, pp 49-54, Soutenue publiquement le 17/03/2018.
- [41] A. Beroual et R. Tobazeon, « Effets de la pression hydrostatique sur les phénomènes de préclaquage dans les diélectriques liquides », C. R. Acad. Sciences, Paris, t. 303, No. 12, pp. 1081-1084, 1986.

- [42] D.A.Hoch and J.P.Reynders, « 7th International Symposium of High Voltage Engineering, Dresden », August 26-30, 1991.
- [43] H. Yamada and T. Sato, « High Speed Electro-Optical Measurement of Prebreakdown Current in Dielectric Liquids », IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. 20, No. 2, pp. 261-267, 1985.
- [44] A. Beroual and R. Tobazeon, « Streamer initiation in liquid and solid cyclohexane with point-plane electrodes subjected to voltage steps », J. of Physics D: Applied Physics, 22, nr 10, pp. 1568-1569, 1989.
- [45] P. B. McGrath and J. K. Nelson, « Divergent field study of prebreakdown events in n-hexane », J. Electrostatics, Vol. 7, pp. 327-336, 1982.
- [46] Viet Hung DANG, « Etude de Phénomène de Préclaquage et de Claquage des Huiles Végétales, Minérales et Synthétique- Caractérisation des Décharges aux Interfaces », Thèse de Doctorat, école centrale de Lyon, pp 93, soutenue le 10 mars 2011.
- [47] 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 Boumediene, pp 107-110, Soutenue publiquement le 17/03/2018.
- [48] electrosup.com/taux_de_distorsion_harmonique.php.
- [49] fr.wikipedia.org/wiki/Taux_de_distortion_harmonique.
- [50] fr.theastrologypage.com/fast-fourier-transform.
- [51] S. G. Chang, B. Yu, M. Vetterli : IEEE Trans. Image Processing, (2000) 9 p. 1532
- [52] 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 Boumediene, pp 107-110, Soutenue publiquement le 17/03/2018.

