

N° d'ordre : 27/2018-C/ELC

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène
Faculté d'Electronique et d'Informatique



THESE

Présentée pour l'obtention du **diplôme de DOCTORAT 3^{ème} Cycle (LMD)**

En : **ELECTROTECHNIQUE**

Spécialité : **Electrotechnique**

Par : **REFFAS Abderrahim**

Sujet

***Etude des Décharges Electriques dans les Huiles
Isolantes Végétales***

Soutenue publiquement le 31 /05/2018, devant le jury composé de :

M. Yazid Krim	Professeur à l'USTHB	Président
M. Moulai Hocine	Professeur à l'USTHB	Directeur de thèse
M. Beroual Abderrahmane	Professeur à l'EC Lyon	Co-directeur de thèse
M. Boubakeur Ahmed	Professeur à l'ENP	Examineur
M. Mekhaldi Abdelouahab	Professeur à l'ENP	Examineur
Mme Saidi Nadia	Professeur à l'USTHB	Examinatrice
Mme Khelfane Ilham	Invitée	CREDEG

A mes parents qui m'ont toujours soutenu

A mon frère et mes soeurs

A tous ceux qui me sont chers

Remerciements

J'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, Monsieur Hocine MOULAI, Professeur à l'université des sciences et de la technologie HOUARI BOUMEDIENE, pour avoir cru en mes capacités pour mener à bien ce travail qu'il a toujours dirigé avec une très grande rigueur scientifique. Je voudrais aussi le remercier pour ses encouragements tout au long de ces années, et d'avoir cru en mes capacités. Qu'il trouve ici mon respect et ma gratitude pour ses conseils, ses encouragements, sa disponibilité et surtout ses qualités humaines.

Mes plus sincères remerciements vont aussi à mon co-directeur de recherche, Monsieur Abderrahmane BEROUAL, Professeur à l'école centrale de Lyon, qui m'a fait confiance en m'accueillant au sein de son équipe, de m'avoir fait bénéficier de son savoir, ainsi que pour le soutien permanent qu'il m'a apporté tout au long de ce travail. Qu'il soit assuré de ma profonde reconnaissance.

Mes remerciements vont bien entendu à Monsieur Yazid Krim, Professeur à l'USTHB, pour avoir accepté de me faire l'honneur de présider le jury de ma soutenance. Mes remerciements vont également à Monsieur Boubakeur Ahmed Professeur à l'ENP, Madame Saidi Nadia Professeur à l'USTHB et Monsieur Mekhaldi Abdelouahab Professeur l'ENP, pour avoir examiné ma thèse et accepté de faire partie du jury.

J'adresse également mes remerciements à tous les personnels techniques et administratifs d'AMPERE qui de loin ou de près ont contribué à la réalisation de ce travail et plus particulièrement Monsieur Naoufel Haddour, et mon cher ami Housseem Eddine NECHMI qui grâce à lui j'ai été apte à utiliser la plupart des moyens d'essais mis à ma disposition.

Je voudrais aussi exprimer mes remerciements à tous mes amis et collègues de notre équipe 'Métrologie et Technique de Haute Tension' à l'USTHB.

Je remercie profondément mes parents qui n'ont cessé de me soutenir et de m'encourager durant mes études. A qui je dois tout ce que je suis aujourd'hui. Une pensée particulière à mon frère et mes sœurs qui ont toujours su me soutenir le moral pendant ces années de thèse.

Je ne saurais terminer sans adresser mes plus vifs remerciements à toutes les personnes, qui par leur soutien (moral, physique ou autres) de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Résumé

Ce travail porte sur l'analyse et l'étude du comportement de l'huile d'olive et sa capacité à remplacer l'huile minérale dans les transformateurs de puissance. Dans un premier temps, nous montrons l'influence des contraintes électrique et thermique sur la variation des propriétés physico-chimiques et électriques d'une huile d'olive. Les propriétés étudiées sont : l'indice de couleur, la tension de claquage, la teneur en eau, la permittivité, le facteur de dissipation, la résistivité, l'indice d'acidité, la viscosité, le point d'éclair. Pour analyser l'effet du vieillissement thermique, l'huile d'olive a été chauffée dans des bouteilles scellées en verre à 110 ° C pendant des durées allant jusqu'à 716 h. En ce qui concerne les contraintes électriques, des séries de 200 à 1600 décharges de faible niveau d'énergie sont appliquées sous tension alternative, en géométrie pointe – plan.

Par la suite, nous présentons des résultats expérimentaux d'une étude comparative des phénomènes de pré-claquage et de claquage dans les huiles et les décharges glissantes dans les interfaces huiles/ solides. Pour la comparaison nous utilisons des huiles commerciales neuves d'origine différentes (minérale, synthétique, végétale). La comparaison porte plus particulièrement sur l'analyse de la morphologie et de la longueur finale (ou d'arrêt) des streamers ainsi que le courant et la charge électrique associés, dans un intervalle d'électrodes pointe – plan sous des impulsions de type foudre (1,2/50µs), ainsi que des tensions de claquage sous tensions alternative et impulsionnelle. Pour étudier les caractéristiques des décharges glissantes, deux dispositifs expérimentaux ont été utilisés : (1) un système d'électrodes pointe-plan dans lequel le carton est inséré entre les électrodes de sorte que l'extrémité de la pointe est perpendiculaire au carton pour permettre une propagation radiale des décharges, et (2) un système d'électrodes pointe- barre où le carton était placé parallèlement à l'axe des électrodes pour permettre une propagation des décharges dans une direction. Les caractéristiques de la propagation des décharges glissantes : la forme, la longueur d'arrêt ainsi que le courant et la charge électrique associés par rapport à l'épaisseur du carton et le type d'huile seront présentées et analysées.

Il ressort de ce travail que l'huile d'olive constitue un substitut potentiel à l'huile minérale pour l'isolation électrique et surtout dans les transformateurs de puissance.

Mots-clés - huile d'olive, huiles végétales, propriétés physico-chimiques et électriques, claquage, streamers, décharges glissantes.

Abstract

This work deals with the analysis and the study of the behavior of olive oil and its capacity to be an alternative option to replace mineral oil in power transformers. Firstly, we present the influence of electrical discharges and thermal stress on the variation of the properties of uninhibited olive oil. The investigated properties are: dielectric loss factor and permittivity, resistivity, acid number, cinematic viscosity, water content, breakdown voltage, flash point and colour index. To analyse the effect of thermal stress, the uninhibited olive oil was aged in sealed bottles at 110°C for durations up to 716 h. As concerns the electrical stress, series of 200 up to 1600 low energy discharges are applied under 50 Hz alternating divergent electric field.

Afterwards, we present experimental results of a comparative study of the characteristics of streamers propagating, breakdown voltage and the characterization of creeping discharges propagating over pressboard immersed in olive oil, under AC and standard lightning impulse voltages. For comparison purposes, synthetic ester, naturel ester and mineral oil were also investigated. The comparison focuses more particularly on the pattern, stopping length, associated current and electrical charge of streamers propagating in a point-plane electrodes geometry under standard lightning impulse voltage (1.2/50 μ s). To study the characteristics of creeping discharges, two experimental arrangements were used: (1) a point-to-plane electrodes system where the pressboard is inserted between the electrodes such as the point is perpendicular to pressboard allowing a radial propagation of discharges; and a point-to-bar electrodes system allowing a propagation of discharges in one direction, tangentially to pressboard. The characteristics of discharges propagation, their shape, stopping length (the maximum extension of creeping discharge) as well as the associated current and electrical charge versus the thickness of pressboard and the type of oil are analyzed.

It appears from this work that olive oil could constitute a potential substitute for mineral oil for electrical insulation and especially in power transformers.

Keywords: Power transformers, Transformer oils, olive oil, streamers, breakdowns, creeping discharges, physical-chemical properties

ملخص

يتناول هذا العمل تحليل ودراسة سلوك زيت الزيتون وقدرته على أن يكون بديلا للزيوت العازلة المعدنية المستخدمة في المحولات الكهربائية. أولا، سوف نقدم تأثير الشرارات الكهربائية والإجهاد الحراري على مختلف خصائص زيت الزيتون. الخصائص المدروسة هي: معامل التشتت (أو معامل القدرة)، السماحية، المقاومة النوعية، رقم التعادل، اللزوجة الحركية (درجة السيولة)، محتوى الرطوبة، اختبار انهيار العزل، نقطة الوميض (نقطة الاشتعال)، درجة اللون. لتحليل تأثير الإجهاد الحراري، قمنا بتسخين الزيت في زجاجات مغلقة عند 110 درجة مئوية لمدة تصل إلى 716 ساعة. وفيما يتعلق بالإجهاد الكهربائي، يتم تطبيق سلسلة من 200 حتى 1600 شرارة كهربائية بواسطة تسليط جهد بين قطبين كهربيين (إبرة-مستوي) باستعمال توتر متناوب.

بعد ذلك، نقدم نتائج تجريبية لدراسة ظواهر انهيار وقبل انهيار الجهد بالإضافة لظاهرة الانتشار الزاحف للشرارات الكهربائية فوق العوازل الصلبة المستخدمة في المحولات الكهربائية تحت توتر متناوب وتحت ظروف النبضة. لغرض المقارنة، تم استعمال زيوت تجارية أخرى مختلفة (زيت معدني، زيت أستر طبيعي، زيت أستر صناعي). تركز المقارنة تحديدا على الشكل، مسافة التوقف، بالإضافة للتيار والشحنة الكهربائية المرتبطة بانتشار ظواهر قبل انهيار الجهد تحت ظروف النبضة بين قطبين كهربيين (إبرة-مستوي). لدراسة خصائص ظاهرة الانتشار الزاحف للشرارات الكهربائية تم استخدام ترتيبين تجريبيين: (1) نظام إبرة-مستوي حيث تكون الإبرة في وضع عمودي مع العازل الصلب، (2) نظام إبرة-عمود حيث تكون الإبرة في وضع يسمح بانتشار الشرارات الكهربائية في اتجاه واحد. يتم تحليل خصائص الشرارات الكهربائية، وشكلها، وطول التوقف وكذلك التيار والشحنة الكهربائية المرتبطة بها، مقارنة بسمك العازل الصلب ونوع الزيت.

ويبدو من هذا العمل أن زيت الزيتون يمكن أن يشكل بديلا محتملا للزيوت المعدنية العازلة وخاصة في المحولات الكهربائية.

كلمات مفتاحية: محول الكهرباء، الزيوت العازلة، زيت الزيتون، ظواهر انهيار وقبل انهيار الجهد، ظاهرة الانتشار الزاحف للشرارات الكهربائية فوق العوازل الصلبة.

TABLE DES MATIERES

Liste des symboles et abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PARTIE I	8
CHAPITRE 1	10
HUILES ISOLANTES POUR TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE	10
1.1 Introduction.....	12
1.2 Rôle des huiles isolantes	13
1.3 Les huiles isolantes	13
1.3.1 Huile minérale	13
1.3.1.1 Huile paraffinique	14
1.3.1.2 Huiles naphthéniques	14
1.3.1.3 Huiles aromatiques	15
1.3.2 Les huiles de synthèse	15
1.3.2.1 Les hydrocarbures halogénés (Liquides ininflammables).....	16
1.3.2.2 Les huiles esters	16
1.3.2.3 Huiles silicones	17
1.3.3 Les huiles végétales.....	18
1.4 Les avantages des huiles végétales	23
1.4.1 Biodégradabilité ultime	23
1.4.2 Point d'éclair	24
1.4.3 Humidité absolue de saturation	25
1.4.3.1 Effet sur le papier isolant	26

1.4.3.2	Effet sur la rigidité diélectrique.....	31
1.4.4	Permittivité diélectrique des esters naturels et du carton	32
1.4.5	Oxydation des huiles végétales et boues	32
1.5	Inconvénients des huiles végétales	36
1.5.1	Viscosité.....	36
1.5.2	Le coût.....	38
1.6	Conclusion.....	39
CHAPITRE 2		42
<i>PHENOMENES DE PRECLAQUAGE ET DE CLAQUAGE DANS LES HUILES ISOLANTES ET DE DÉCHARGES AUX INTERFACES LIQUIDE/SOLIDE</i>		42
2.1	Introduction.....	44
2.2	Les Streamers.....	44
2.2.1	Phase de génération.....	45
2.2.2	Phase de propagation.....	47
2.2.3	Influence des propriétés du liquide	49
2.2.3.1	Influence de la viscosité et de la masse volumique du liquide....	49
2.2.3.2	Influence de la structure moléculaire	50
2.2.3.3	Influence de la pression.....	51
2.2.3.4	Influence de la température	51
2.2.3.5	Influence des additifs	52
2.2.3.6	Influence du niveau de tension appliqué.....	54
2.2.3.7	Influence de la géométrie des électrodes.....	55
2.2.3.8	Influence du rayon de courbure de la pointe	55
2.2.4	Analyses spectrale et chromatographique.....	56
2.2.5	Courants et émissions lumineuses accompagnant les streamers.....	57

2.3	Claquage	58
2.3.1	Étude statistique de la tension de claquage	59
2.3.1.1	Test d'hypothèse	60
2.3.1.2	Loi normale	61
2.3.1.3	Distribution de Weibull.....	62
2.3.2	Paramètres influençant la tension de claquage.....	63
2.3.2.1	Effet de l'humidité	63
2.3.2.2	Effet de la température et de la pression	64
2.3.2.3	Effet du vieillissement.....	65
2.3.2.4	Influence de la géométrie des électrodes et de la polarité de la tension.....	66
2.4	Phénomène de décharges aux interfaces liquide/solide.....	67
2.4.1	Distribution des charges à l'interface liquide/solide	68
2.4.2	Observation optique des décharges glissantes	70
2.5	Conclusion.....	74
PARTIE II		76
CHAPITRE 3		78
INFLUENCE DES CONTRAINTES THERMIQUE ET ELECTRIQUE SUR LA VARIATION DES PROPRIETES D'UNE HUILE D'OLIVE		78
3.1	Introduction.....	80
3.2	Techniques expérimentales.....	81
3.3	Résultats expérimentaux	83
3.3.1	Vieillessement thermique.....	83
3.3.1.1	Variation de l'indice de couleur	84
3.3.1.2	Variation de la teneur en eau.....	85
3.3.1.3	Variation de la tension de claquage.....	86
3.3.1.4	Variation de l'indice d'acidité.....	87

3.3.1.5	Variation de la viscosité	89
3.3.1.6	Variation de la permittivité	90
3.3.1.7	Variation du facteur de dissipation et de la résistivité	91
3.3.1.8	Variation du point d'éclair	92
3.3.2	L'influence des décharges électriques.....	93
3.3.2.1	Variation de l'indice de couleur	93
3.3.2.2	Variation de la teneur en eau.....	94
3.3.2.3	Variation de l'indice d'acidité et de la viscosité	95
3.3.2.4	Variation de la permittivité relative	97
3.3.2.5	Variation du facteur de dissipation et de la résistivité	97
3.3.2.6	Variation du point d'éclair	99
3.3.3	Les mesures de spectroscopie dans le domaine fréquentiel (FDS)	99
3.3.3.1	Variation de la partie réelle de la permittivité :.....	101
3.3.3.2	Variation du facteur de dissipation.....	103
3.4	Conclusions	105
CHAPITRE 4		107
ÉTUDE DE LA PROPAGATION DES STREAMERS		107
4.1	Introduction.....	109
4.2	Techniques expérimentales.....	109
4.2.1	Liquides utilisés.....	113
4.3	Résultats expérimentaux	114
4.3.1	Forme des streamers.....	114
4.3.2	Longueurs finales des streamers	117
4.3.3	Courants et charges électriques associés aux streamers.....	121
4.3.4	Vitesse des streamers	125

4.4	Conclusion	127
CHAPITRE 5		130
ÉTUDE STATISTIQUE DE LA TENSION DE CLAQUAGE		130
5.1	Introduction.....	132
5.2	Techniques expérimentales	133
5.3	Histogramme de la tension de claquage.....	136
5.3.1	Test d'hypothèse	142
5.4	Analyse statistique de la tension de claquage par la distribution Normale	144
5.5	Tension de claquage sous la tension de foudre	149
5.6	Conclusion	151
CHAPITRE 6		153
ÉTUDE DES DECHARGES GLISSANTES		153
6.1	Introduction.....	155
6.2	Techniques expérimentales.....	157
6.3	Morphologie des décharges glissantes.....	161
6.4	Longueur finale des décharges.....	168
6.5	Mesures électriques.....	174
6.6	Conclusion	177
CONCLUSION GÉNÉRALE		179
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		184

Listes des symboles & abréviations

BDV : Breakdown voltage (tension de claquage)

BIOTEMP : Fluide issu d'huiles riches en acide oléique, breveté aux. États-Unis par la société ABB

CCl₄ : Tétrachlorométhane

CH₃ : radical alkyle hydrophobe dérivé du méthane

C₆H₅ : radical 'appelle phényle

CH₄ : Méthane

C₂H₂ : Acétylène

C₂H₄ : Éthylène

C₂H₆ : Éthane

cSt : centistokes

DMA : N, N-dimethylaniline

E₀ : Champ électrique d'initiation des streamers

E_l : Champ longitudinal moyen

FR3 : Envirotemp TM FR3 TM de Cargill Industrial Specialties, une huile de transformateur à base d'huile végétale renouvelable.

FDS : Spectroscopie dans le domaine fréquentiel

FTIR : les spectres de la spectroscopie infrarouge

HT : Haute tension

H₂ : Hydrogène

JMEO : Huile de méthylester de jatropha curcas (JMEO) : Huile issue de l'estérification de l'huile de jatropha curcas brute.

L_f : La longueur finale

MO : Huile minérale

MDBT : Mono- dibenzyle-toluène

MY : Méthyl oléate

NE : Ester naturel

OO : Huile d'olive

PCB : Polychlorobiphényles,

PDMS : Polydiméthylsiloxane

PXE : Phenylxylyléthane

ROOH : Hydroperoxydes

RO : Huile de colza

r_p : rayon de la pointe

r_c : rayon de courbure critique

SE : Ester synthétique

TMPD : tetraméthyle paradiphénylamine

TCE : Trichloroéthylène

U_c : Valeur de la tension (crête)

Z_s : L'impédance série

α : est le paramètre d'échelle

β : est le paramètre de forme.

ϵ'_r : La partie réelle de la permittivité

Liste des figures

Figure 1. 1 : Structures moléculaires d'hydrocarbures paraffiniques (a) : chaîne simple (b) : chaîne ramifiée	14
Figure 1. 2 : Structure moléculaire d'hydrocarbure naphténiqne	14
Figure 1. 3 : Structure moléculaire d'hydrocarbure aromatique	15
Figure 1. 4 : Structure moléculaire de polychlorobiphényle (PCB)	16
Figure 1. 5 : Structure d'une molécule d'ester synthétique	17
Figure 1. 6 : Structure moléculaire de polydiméthylsiloxane (PDMS)	17
Figure 1. 7 : Synthèse des triglycérides par estérification	19
Figure 1. 8 : Composition chimique des esters naturels (huile de colza)	19
Figure 1. 9 : biodégradabilité de différents liquides	23
Figure 1. 10 : Le point d'éclair et le point de feu des liquides utilisés dans les transformateurs	24
Figure 1. 11 : Solubilité de l'eau en fonction de la température	26
Figure 1. 12 : Hydrolyse de l'ester naturel en glycérol et acides gras	27
Figure 1. 13 : Trans-estérification de la cellulose par les acides gras	29
Figure 1. 14 : l'état d'un papier Kraft après 4000 heures de vieillissement thermique.....	30
Figure 1. 15 : L'avantage de température de 20° C donné par les esters naturels par rapport aux huiles minérales avec l'utilisation de l'équation d'Arrhenius pour déterminer la durée de vie	31
Figure 1. 16 : rupture de la chaîne des acides gras par oxydation	33
Figure 1. 17 : Les résultats du test de stabilité à l'oxydation (IEC 61125) à 120°C ..	35
Figure 2. 1 : 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)	47
Figure 2. 2 : Propagation des streamers positifs dans une huile paraffinique ..	48

Figure 2. 3 : Streamer négatif dans le cyclohexane sous l'influence de la pression ..	51
Figure 2. 4 : 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	53
Figure 2. 5 : 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	53
Figure 2. 6 : les formes des streamers positifs dans une huile paraffinique avec différents niveaux de tension [63].....	54
Figure 2. 7 : Courants de streamers mesurés en polarité positive, U=60 kV, d=20 mm.....	58
Figure 2. 8 : Effet de l'humidité sur la tension de claquage de trois huiles différentes.....	64
Figure 2. 9 : Effet de la température sur la tension de claquage d'une huile minérale (MO) et autre végétale (NE)	65
Figure 2. 10 : Variation de la tension de claquage de l'huile transformateur en fonction de l'intervalle inter électrode pour un système pointe – pointe et un système sphère – sphère	67
Figure 2. 11 : Schéma de la double couche selon le modèle de Stern	69
Figure 2. 12 : Figures originales de Lichtenberg 1777	70
Figure 2. 13 : Schéma de la méthode de quadrillage : (a) image original, (b) image binaire correspondante, (c) images binaires couvertes par des carrée de coté l=10 pixels et (d) images binaires couvertes par des carrée de coté l=25 pixels	72
Figure 2. 14 : Décharges négatives obtenus sur une interface Colza/carton (e=2mm) et les courants associés pour différentes valeurs de tension	73
Figure 3. 1 : Schéma du dispositif expérimental pour les mesures de la spectroscopie dans le domaine fréquentiel (FDS).	83
Figure 3. 2 : variation de l'indice de couleur en fonction du temps de vieillissement.....	85

Figure 3. 3 : variation de la teneur en eau en fonction de temps de vieillissement	86
Figure 3.4 : variation de la tension de claquage en fonction de temps de vieillissement.	88
Figure 3. 5 : Variation de l'indice d'acidité en fonction du temps de vieillissement.	89
Figure 3. 6 : Variation de la viscosité en fonction du temps de vieillissement.	90
Figure 3. 7 : variation de la permittivité en fonction du temps de vieillissement.....	91
Figure 3. 8 : variation du facteur de perte en fonction du temps de vieillissement	91
Figure 3. 9 : variation de la résistivité en fonction du temps de vieillissement.....	92
Figure 3. 10 : Variation du point d'éclair en fonction du temps de vieillissement.....	93
Figure 3. 11 : Variation de l'indice de couleur en fonction du nombre de décharges.....	94
Figure 3. 12 : Variation de la teneur en eau en fonction du nombre de décharges.....	95
Figure 3. 13 : Variation de l'indice d'acidité en fonction du nombre de décharges...	96
Figure 3. 14 : Variation de la viscosité en fonction du nombre de décharges.	96
Figure 3. 15 : Variation de la permittivité en fonction du nombre de décharges.	98
Figure 3. 16 : variation du facteur de dissipation en fonction du nombre de décharges.....	98
Figure 3. 17 : variation de la résistivité en fonction du nombre de décharges.	98
Figure 3. 18 : Variation du point d'éclair en fonction du nombre de décharges.	99
Figure 3. 19 : Partie réelle de la permittivité en fonction du temps de vieillissement dans une gamme de fréquence entre 20Hz-1MHz.....	102
Figure 3. 20 : Partie réelle de la permittivité en fonction du nombre de décharges dans une gamme de fréquence entre 20Hz-1MHz.....	102
Figure 3. 21 : Facteur de dissipation en fonction du temps de vieillissement dans une gamme de fréquence entre 20Hz-1MHz.	104
Figure 3. 22 : Facteur de dissipation en fonction du nombre de décharges dans une gamme de fréquence entre 20Hz-1MHz.	104

Figure 4. 1 : Schéma du dispositif expérimental.	110
Figure 4. 2 : Érosion de l'extrémité de la pointe observée sous un microscope.....	111
Figure 4. 3 : Vue schématique de la cellule d'essai.....	112
Figure 4. 4 : Exemples de forme des streamers négatifs observés en polarité positive dans les différentes huiles à $U = -110$ kV, $d = 25$ mm.	115
Figure 4. 5 : Exemples de forme des streamers positifs observés en polarité positive dans les différentes huiles à $U = +70$ kV, $d = 25$ mm.....	116
Figure 4. 6 : Photographies des streamers positifs dans l'huile d'olive OO, (a) $U = 76$ kV, (b) $U = 80$ kV et $d = 25$ mm.....	117
Figure 4. 7 : Longueur finale des streamers en polarité négative (a) $d = 20$ mm (b), $d = 25$ mm, (c) $d = 30$ mm.	118
Figure 4. 8 : Longueur finale des streamers en polarité positive (a) $d = 20$ mm (b), $d = 25$ mm, (c) $d = 30$ mm.	119
Figure 4. 9 : Représentation sous forme de courbe de l'évolution de la longueur finale des streamers en fonction de la distance inter électrodes.	120
Figure 4. 10 : Courants de streamers mesurés en polarité négative, $U = -108$ kV, $d = 25$ mm a) OO, b) MO.....	122
Figure 4. 11 : Courants de streamers mesurés en polarité positive, $U = +74$ kV, $d = 25$ mm a) OO, b) MO.....	123
Figure 4. 12 : Charge associée de streamers mesurés en polarité négative, $U = -108$ kV, $d = 25$ mm a) OO, b) MO.	124
Figure 4. 13 : Charge associée de streamers mesurés en polarité positive, $U = +74$ kV, $d = 25$ mm a) OO, b) MO.	125
Figure 4. 14 : Vitesse moyenne des streamers en polarité (a) négative et (b) positive.....	126
Figure 5. 1 : cellule de test de 400 ml de type Baur Dieltest.	134
Figure 5. 2 : Méthode de montée et descente (up and down).	136
Figure 5. 3 : Distribution des tensions de claquage des huiles testées.....	137
Figure 5. 4 : Diagramme en boîte.	139

Figure 5. 5 : Diagramme en boîte des tensions de claquage des huiles testées.	139
Figure 5. 6 : Histogramme des tensions de claquage des huiles étudiées.....	140
Figure 5. 7 : Probabilité de la distribution Normale de la tension de claquage des huiles.	146
Figure 5. 8 : Probabilité de la distribution de Weibull de la tension de claquage des huiles.	147
Figure 5. 9 : Coefficients d'asymétrie et d'aplatissement de la distribution Normale de la tension de claquage des huiles.	148
Figure 5. 10 : Probabilité de la tension de claquage des huiles étudiées.	149
Figure 5. 11 : Tension de claquage dans les huiles testées sous impulsion de foudre.....	150
Figure 6. 1 : Schéma du dispositif expérimental.	157
Figure 6. 2 : Première cellule (propagation radiale).	158
Figure 6. 3 : Deuxième cellule (propagation des décharges dans une direction).	160
Figure 6. 4 : Schéma de l'arrangement des électrodes, du carton et de la caméra ; (a) l'électrode pointe perpendiculaire au carton, (b) et (c) l'électrode pointe parallèle au carton avec différentes positions de la caméra.	161
Figure 6. 5 : Images de décharges surfaciques (électrode pointe perpendiculaire au carton) se propageant sur la surface du carton dans différentes huiles sous tension de foudre, $e = 4\text{mm}$	162
Figure 6. 6 : Évolution de la longueur des décharges en fonction de la tension de foudre obtenue en polarité positive, sur une interface OO/carton avec $e=4\text{ mm}$	163
Figure 6. 7 : Évolution de la longueur des décharges en fonction de la tension de foudre obtenue en polarité négative, sur une interface OO/carton avec $e=4\text{ mm}$	164
Figure 6. 8 : Images de décharges surfaciques (électrode pointe perpendiculaire au carton) sur différentes interfaces sous tension alternative : $U_c = 32\text{ kV}$ et $e=3\text{mm}$. .	165
Figure 6. 9 : Images de la dégradation du carton (électrode pointe perpendiculaire au carton) et de son impact sur l'orientation des branches de décharge sous tension alternative pour différentes interfaces : $U_c = 45\text{ kV}$ et $e = 3\text{ mm}$	166

Figure 6. 10 : Images de décharges surfaciques (électrode pointe parallèle au carton avec différentes positions de la caméra) sur l'interface carton/OO sous tension de foudre et $e = 4\text{mm}$.	167
Figure 6. 11 : Images montrant l'influence de l'épaisseur du carton sur les décharges surfaciques (électrode pointe perpendiculaire au carton) sur l'interface carton / OO sous tension de foudre à $U_c = + 80 \text{ kV}$.	168
Figure 6. 12 : Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes en fonction de l'épaisseur du carton pour les différentes huiles étudiées sous tension de foudre en polarité négative. (Pointe perpendiculaire au carton)	170
Figure 6. 13 : Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes en fonction de l'épaisseur du carton pour les différentes huiles étudiées sous tension de foudre en polarité positive (Pointe perpendiculaire au carton).	170
Figure 6. 14 : Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes pour les différentes huiles étudiées sous tension alternative, $e=3\text{mm}$ et l'électrode pointe perpendiculaire au carton.	171
Figure 6. 15 : Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes pour les différentes huiles étudiées sous tension de foudre en polarité négative, $e=4\text{mm}$ et l'électrode pointe parallèle au carton.	173
Figure 6. 16 : Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes pour les différentes huiles étudiées sous tension alternative, $e=3\text{mm}$ et l'électrode pointe parallèle au carton.	173
Figure 6. 17 : Courant et la charge associée aux décharges glissantes sur une interface OO/carton sous tension de foudre en polarité négative, $e=4\text{mm}$ et $U=-60 \text{ kV}$. (Électrode pointe est perpendiculaire au carton). La décharge négative principale est suivie d'une décharge positive secondaire.	174
Figure 6. 18 : Courant et la charge associée aux décharges glissantes sur une interface OO/carton sous tension de foudre en polarité positive, $e=4\text{mm}$ et $U=+44 \text{ kV}$. (Électrode pointe est perpendiculaire au carton).	175
Figure 6. 19 : Courant et la charge associée aux décharges glissantes sur une interface OO/carton sous tension alternative, $e=3\text{mm}$ (Électrode pointe est perpendiculaire au carton).	176

Liste des tableaux

Tableau 1. 1 : Composition typique en acides gras de certaines huiles végétales	20
Tableau 1. 2 : Propriétés des fluides isolants pour transformateurs	22
Tableau 3. 1 : Paramètres étudiés, normes correspondantes et valeurs recommandées / limites.....	82
Tableau 3. 2 : Propriétés initiales de l'huile soumise à un vieillissement thermique.....	84
Tableau 3. 3 : Propriétés initiales de l'huile soumise à un vieillissement électrique .	94
Tableau 4. 1 : Propriétés des huiles testées	113
Tableau 5. 1 : Les résultats de l'analyse statistique.	142
Tableau 5. 2 : Test d'hypothèse de conformité à la distribution Normale.	143
Tableau 5. 3 : Test d'hypothèse de conformité à la distribution de Weibull.....	143

INTRODUCTION
GÉNÉRALE

Les diélectriques liquides sont largement utilisés dans divers composants haute tension des réseaux électriques tels que : transformateurs de puissance, traversées, condensateurs de puissance, disjoncteurs, changeurs de prise... Ils sont utilisés comme imprégnant d'isolation cellulosique et/ou comme produit de remplissage des matériels électriques. Ils permettent d'éliminer les microcavités gazeuses ou interstices d'air en les remplaçant par de l'huile, matériau de rigidité diélectrique plus élevée et de meilleur comportement vis à vis des décharges partielles que les gaz occlus dans les transformateurs. Ils jouent un rôle important : celui de l'isolation électrique et celui d'évacuer la chaleur résultante des pertes dans les parties actives (bobinages) de celui-ci. Les volumes d'huiles employés varient de quelques litres pour les condensateurs, à plusieurs dizaines de milliers de litres pour les transformateurs de puissance.

Les huiles minérales sont les plus utilisées dans les transformateurs de puissance en raison de leurs bonnes performances, en particulier leur tenue diélectrique et leur bonne fonction de transfert thermique [1]. Cependant, leur impact sur l'environnement et en particulier sur les sols et sur les ressources aquatiques (biodégradabilité de l'huile minérale inférieure à 30%) constitue un problème sérieux qui doit être pris en compte lors de la conception de nouvelles unités (transformateurs). Ainsi, en raison des réglementations strictes en matière de protection de l'environnement et pour se prémunir des pénuries de certaines matières premières comme le pétrole, les huiles végétales sont considérées aujourd'hui comme des substituts potentiels aux huiles minérales. Ce sont des produits biodégradables et renouvelables. En plus de leur compatibilité environnementale, ils offrent une résistance au feu attractive car leurs points d'éclair et leurs points de feu sont supérieurs à ceux des huiles minérales conventionnelles (point d'éclair supérieur à 300 °C), ce qui est très important notamment pour les transformateurs implantés à proximité des zones urbaines [2, 3].

Depuis une trentaine d'années, le remplissage des transformateurs de distribution se fait de plus en plus avec des esters naturels tels que BIOTEMP® [2,4] ou FR3 [5]. Et l'utilisation de ce type d'esters dans les appareils remplis d'huile augmente significativement, ce qui explique l'intérêt des constructeurs et des chercheurs académiques pour poursuivre activement les investigations pour le développement de nouveaux liquides respectueux de l'environnement [6-9]. Ces dernières années, d'autres esters naturels ont été introduits avec succès dans des transformateurs de

puissance. La plupart des huiles végétales commercialisées sont issues de graines de colza, de tournesol, de pépins, de raisin, de soja ou de palme. Récemment, une nouvelle huile végétale intéressante qu'est JMEO - Jatropha Methyl Est Oil (un produit dérivé des plantes de *Jatropha curcas*) a été développée et brevetée par Setiabudy, Beroual, Bismo et Sitorus [10, 11].

Plusieurs propriétés (physicochimiques, électriques, toxicité, impact sur l'environnement ...) doivent être considérées lors du choix d'une huile, lequel choix dépend du type d'appareil et des conditions de son exploitation. Les paramètres électriques et notamment les caractéristiques des décharges dans les huiles et aux interfaces huile/solide ainsi que les tensions de claquage font partie des paramètres à considérer, en particulier lorsqu'on doit comparer plusieurs produits. Certains auteurs ont trouvé que les caractéristiques des décharges dans certains esters naturels sont très proches de celles observées dans des huiles minérales [6, 7, 10, 11]. Cependant, pour introduire un nouveau liquide (ester naturel) dans un transformateur en toute sécurité, il faut s'assurer que son comportement, sous les différentes contraintes auxquelles il serait exposé, est comparable voire meilleur que celui de l'huile minérale.

C'est dans cette quête de produits naturels et ce challenge que s'inscrit notre projet de recherche. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'huile d'olive, produit national, pour vérifier son applicabilité comme isolant et par conséquent comme substitut à l'huile minérale dans les équipements électriques et plus particulièrement les transformateurs haute tension.

Ce travail porte sur une étude comparative entre l'huile d'olive et des huiles commerciales d'origine différentes (minérale, synthétique et végétale) à travers l'analyse de la morphologie et la longueur finale (ou d'arrêt) des streamers ainsi que le courant et la charge électrique associés, dans un intervalle d'électrodes pointe – plan sous tension de foudre (1,2/50 μ s). Les tensions de claquage des différentes huiles et les caractéristiques des décharges glissantes se propageant sur des surfaces de carton immergés dans des huiles différentes sont également analysées.

Ce manuscrit comporte deux parties. La première partie est constituée de deux chapitres dans lesquelles nous nous intéressons aux huiles végétales et à l'état des connaissances sur les phénomènes pré-disruptifs et disruptifs dans les liquides ainsi

que les décharges se propageant aux interfaces solide/liquide. La deuxième partie comporte quatre chapitres présentant les résultats expérimentaux relatifs à la propagation des streamers, les tensions de claquage dans différentes huiles ainsi que les décharges se propageant sur un isolant solide (le carton) en présence de ces huiles.

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. Une attention particulière est portée aux huiles végétales. Nous présentons les avantages et les inconvénients de ces huiles en les comparant aux huiles minérales.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des mécanismes de pré-claquage et de claquage dans les isolants liquides, ainsi qu'au phénomène de décharges surfaciques et les paramètres qui les caractérisent. Les données expérimentales concernant les tensions de claquage seront également traitées par des lois statistiques.

Le troisième chapitre porte sur l'influence des décharges électriques et des contraintes thermiques (vieillessement thermique) sur la variation des propriétés physico-chimiques et électriques d'une huile d'olive.

Le quatrième chapitre présente les différents éléments du dispositif expérimental utilisé pour l'étude de la propagation des streamers ainsi que les résultats expérimentaux d'une étude comparative des huiles d'olive, minérale, ester synthétique et autres huiles végétales à travers l'analyse de la morphologie et de la longueur finale des streamers ainsi que le courant et la charge électrique associés, dans un intervalle d'électrodes pointe – plan sous tension de foudre (1,2/50 μ s).

Dans le cinquième chapitre, nous présentons d'abord les dispositifs expérimentaux utilisés pour la mesure de la tension de claquage des huiles considérées. Nous nous intéressons ensuite à l'étude statistique de la tension de claquage en tension alternative et impulsionnelle. Nous avons analysé la distribution des tensions de claquage et nous avons vérifié l'applicabilité des distributions statistiques de Weibull et Normale pour estimer les tensions de claquage et discuter de la similarité des distributions dans les huiles utilisées.

Le sixième et dernier chapitre porte sur la caractérisation expérimentale des décharges surfaciques sous tension alternative et impulsionnelle de foudre 1.2/50 μ s, en géométries pointe– plan et pointe-barre. Nous présentons d’abord les différents éléments et dispositifs expérimentaux utilisés dans nos essais ainsi que les caractéristiques de l’échantillon solide (carton) et des liquides isolants (huile d’olive, minérale, esters naturels et synthétiques) considérés. Nous décrivons par la suite le phénomène de la décharge surfacique à la lumière des observations et enregistrements optiques et électriques effectuées au cours de notre étude. Nous présentons les différentes figures de décharges qui peuvent être observées ainsi que les paramètres qui peuvent influencer leurs formes et leurs longueurs finales et plus particulièrement la polarité et l’amplitude de la tension appliquée, l’épaisseur du carton et la nature des huiles. Le courant et la charge associés aux décharges surfaciques sont également analysés en fonction de l’amplitude et de la polarité de la tension appliquée.

PARTIE I

CHAPITRE 1

HUILES ISOLANTES POUR TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

1.1 Introduction

L'huile à base de pétrole, appelée huile minérale, est l'huile la plus utilisée comme isolant dans les systèmes électriques industriels comme les transformateurs, les condensateurs, les câbles et les disjoncteurs etc..., depuis les années 1900 en raison de son bon comportement au vieillissement, de sa faible viscosité, de sa disponibilité et de son faible coût [1]. En raison de la nécessité de faire fonctionner des transformateurs de distribution dans des endroits où l'on se doit de respecter les normes de sécurité (incendie en particulier), des liquides isolants à base de polychlorobiphényle (PCB) ont été introduits au début des années 1930. Jusqu'aux années 1960, ils ne soulevaient pas de préoccupations environnementales. Cependant, au début des années 1970, plusieurs voix se sont élevées contre l'utilisation des PCB ; ce qui a conduit à leur interdiction et au développement de nouveaux produits comme les huiles silicones et les esters synthétiques. Ces dernières trouvent leurs applications dans certains appareils spécifiques, en raison de leur bon comportement à haute température, l'huile minérale restant la plus utilisée dans les transformateurs de puissance.

Malgré leurs bonnes performances (bonne tenue diélectrique, transfert thermique, stabilité à l'oxydation), les huiles minérales sont peu biodégradables et ont un impact négatif sur le milieu aquatique. Ainsi, depuis une trentaine d'années, de nombreuses études sont menées pour trouver des produits de substitution respectueux de l'environnement. Et c'est vers les huiles végétales que se focalisent depuis les recherches.

Dans ce chapitre, nous présentons d'une manière générale les différents types d'huiles isolantes utilisées dans l'appareillage électrique et principalement dans les transformateurs de puissance. Nous nous intéressons plus particulièrement aux huiles végétales. Nous présentons les avantages et les inconvénients de ces huiles par rapport aux huiles minérales.

1.2 Rôle des huiles isolantes

En électrotechnique, les huiles isolantes sont utilisées pour l'imprégnation des isolations solides et/ou pour le remplissage de divers matériels électriques [12, 14], comme les transformateurs et les condensateurs de puissance, les disjoncteurs, les câbles ... Elles servent principalement à :

- Evacuer les pertes d'énergie : les différentes pertes d'énergie se traduisant par une élévation nuisible de la température ; les huiles étant de bons caloporteurs (bon conducteurs de chaleur), facilitent l'évacuation de cette énergie vers l'extérieur (naturelle ou forcée via des radiateurs) [15, 16] ;
- Ralentir l'oxydation naturelle des constituants du système ;
- Isoler électriquement les différentes parties actives sous tension.

En plus de ces trois fonctions fondamentales, il y a lieu de citer leur pouvoir d'extinction d'arc et leur rôle de lubrifiant pour les pièces en mouvement [15].

1.3 Les huiles isolantes

1.3.1 Huile minérale

Les huiles minérales sont des huiles d'origine pétrolière. Elles sont constituées d'un mélange complexe d'une centaine de molécules organiques de structures différentes, composés principalement de carbone et d'hydrogène. Elles sont obtenues par raffinage de pétrole brut. Les propriétés physicochimiques d'une huile peuvent varier considérablement d'un lot à un autre, même chez le même fournisseur. La complexité de la structure moléculaire et le nombre d'espèces chimiques rend difficile leur classification. De ce fait, leur classification se fait selon la tendance de la structure dominante.

Il existe trois tendances ou types d'huiles minérales. Chaque groupe ou tendance varie selon la composition du pétrole dont l'huile est extraite. Les huiles sont classées généralement par la teneur en carbone paraffinique (C_p), en carbone naphtéinique (C_N) et en carbone aromatique (C_A).

1.3.1.1 Huile paraffinique

Ce sont des hydrocarbures saturés en chaînes droites, qui peuvent être linéaires (paraffines normales) ou ramifiées (iso-paraffines). Elles ne présentent pas de structures cycliques. Elles sont caractérisées par une faible densité, faible volatilité, faible pouvoir solvant et une viscosité relativement élevée. Elles ont une stabilité thermique plus faible que les huiles naphthéniques et aromatique. Les iso-paraffines sont préférées aux paraffines normales en raison de leurs faibles points d'écoulement.



Figure 1.1 : Structures moléculaires d'hydrocarbures paraffiniques (a) : chaîne simple (b) : chaîne ramifiée [17].

1.3.1.2 Huiles naphthéniques

Ces huiles sont aussi appelées cyclo-alcanes ; ce sont des hydrocarbures cycliques saturés caractérisés par une viscosité et une densité élevées, et un fort pouvoir solvant. Elles sont généralement utilisées comme lubrifiants.

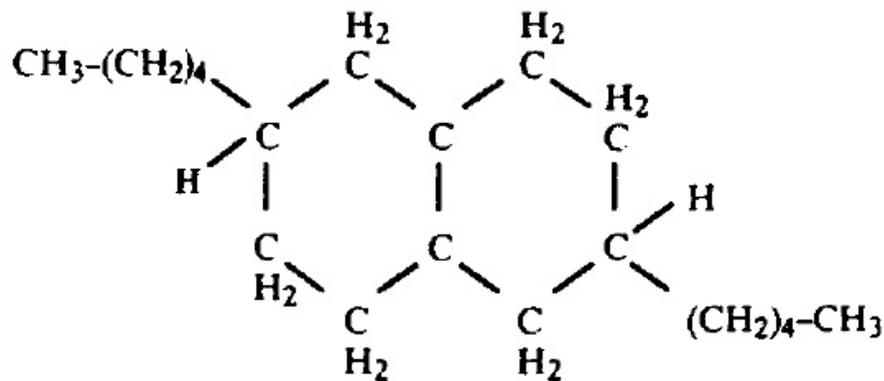


Figure 1. 2 : Structure moléculaire d'hydrocarbure naphthénique [17].

1.3.1.3 Huiles aromatiques

Ce sont des hydrocarbures cycliques insaturés où les liaisons doubles alternent avec les liaisons simples (système pi). Elles sont totalement différentes des hydrocarbures paraffiniques et naphthéniques. On les trouve sous deux formes : les mono-aromatiques et les poly-aromatiques. Ces composés aromatiques permettent à l'huile d'avoir une bonne résistance à l'oxydation (production de phénols qui détruisent les radicaux), de bonnes propriétés de *gassing* (pouvoir absorbant de gaz) et une bonne rigidité diélectrique en impulsion.

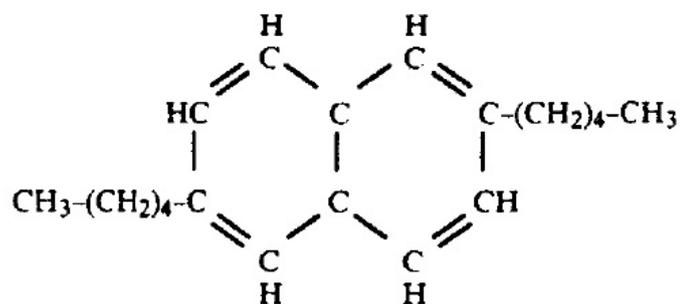


Figure 1. 3 : Structure moléculaire d'hydrocarbure aromatique [17].

1.3.2 Les huiles de 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 des populations (transformateurs de distribution et de traction), améliorer la résistance aux décharges partielles, avoir une tendance négative au gazage (absorption de gaz). Ces liquides de synthèse sont tous obtenus à partir des différents procédés chimiques. Il en existe trois types principaux destinés aux transformateurs :

- Les hydrocarbures chlorés (halogénés), tel que les PCB ;
- Les huiles silicones ;
- Les huiles esters de pentaérythritol encore appelées esters synthétiques ou esters organiques.

1.3.2.1 Les hydrocarbures halogénés (Liquides ininflammables)

Les hydrocarbures halogénés les plus utilisés en électrotechnique sont les PCB (polychlorobiphényles). Les premières fabrications industrielles remontent à 1929. Désignés sous le nom générique d'Askarels ; ils sont obtenus à partir de benzène et de chlore [4].

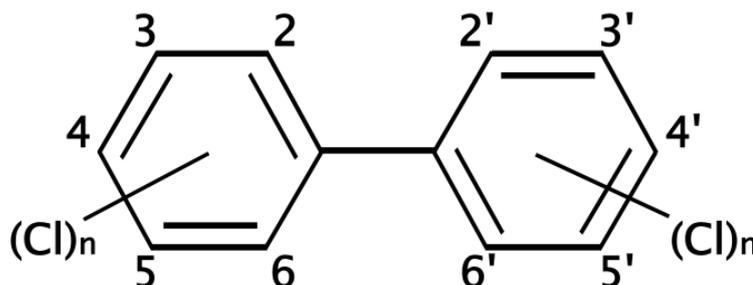


Figure 1. 4 : Structure moléculaire de polychlorobiphényle (PCB) [12].

Les PCB étaient utilisés comme isolants en raison de leurs excellentes propriétés [12], leurs stabilités et leurs résistance au feu. Le gaz résultant des décharges partielles ou de passage de l'arc est le HCl. Il permet de réduire les risques d'incendie et d'explosion [15]. Cependant, les PCB sont hautement toxiques, cancérigènes, non biodégradables et ont une persistance très élevée dans les tissus des êtres vivants [18-20]. Ce qui a conduit à l'arrêt de leur fabrication en 1985. Malgré leur interdiction, on trouve encore des appareils remplis de PCB.

D'après la réglementation, les appareils contenant plus de 500ppm sont éliminés, entre 50 et 500ppm sont déclarés légèrement pollués, et inférieurs à 50ppm déclarés comme non pollués [12].

1.3.2.2 Les huiles esters

Les esters pour transformateurs sont connus sous le nom d'esters de pentaerythritol ou esters organiques (par opposition aux esters naturels ou huiles végétales) [15]. Ils ont été développés comme liquides de remplacement des PCB à cause de leur résistance au feu, pour les transformateurs de distribution et les appareillages proches de la population, dans les immeubles, les tunnels, etc. Leur

point de feu élevé (> 300°C) par rapport aux huiles minérales constitue l'une des caractéristiques principales de ces produits [21, 22]. Ils sont obtenus à partir d'un tétra-alcool (pentaerythritol) et d'un mélange d'acide mono carboxylique contenant de 7 à 8 carbones [23, 24]. Ils ont une bonne biodégradabilité comparée à l'huile minérale ou à l'huile silicone. L'un de leurs points faibles c'est leur viscosité un peu élevée et qui devient très importante aux basses températures. L'autre point faible concerne leur stabilité au *gassing*.

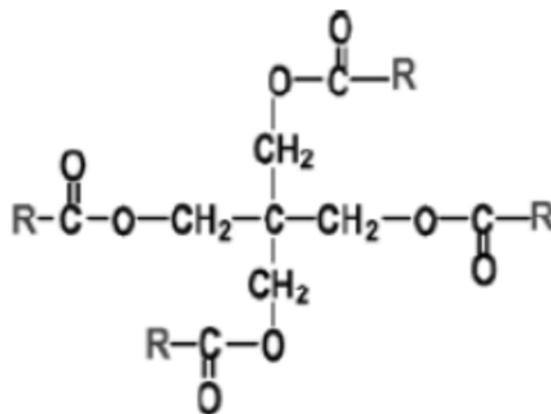


Figure 1. 5 : Structure d'une molécule d'ester synthétique [24].

1.3.2.3 Huiles silicones

Les huiles silicones ont été proposées comme liquides de remplacement des PCB [1]. Ce sont des composés comportant des groupements Si—O (siloxane) et des radicaux organiques, généralement CH_3 et C_6H_5 [25]. Le plus communément utilisé en électrotechnique est le polydimethylsiloxane (PDMS) dont la structure est représentée sur la figure suivante :

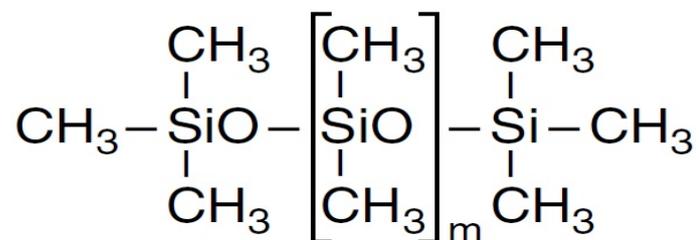


Figure 1. 6 : Structure moléculaire de polydimethylsiloxane (PDMS) [25].

En dessous de 150°C, et en présence d'air, les silicones présentent une bonne résistance à l'oxydation [26], et une faible dépendance de la viscosité vis-à-vis de la température [15].

A côté de leurs bonnes propriétés physiques, électriques, et thermiques ces huiles possèdent aussi des inconvénients :

- La résistance à l'oxydation les rend faiblement biodégradables [28].
- Leur viscosité acceptable aux basses températures, reste au-dessus de celle des huiles minérales à température ambiante [25, 29].
- Le coût élevé (4 fois celui des huiles minérales) [1].

Ces inconvénients limitent leurs utilisations. En particulier, elles ne sont pas indiquées pour des applications dans les régions ou installations à haut risque d'incendie, ou encore dans les régions très froides.

1.3.3 Les huiles végétales

Les huiles végétales, aussi appelées esters naturels (par opposition aux esters synthétiques ou organiques). Elles sont constituées essentiellement de triglycérides, qui sont synthétisés naturellement par l'estérification du glycérol (trialcool simple) avec trois acides gras [1, 30]. La figure 1.8 illustre la composition chimique de l'huile de colza, produit largement développé. Toutes les molécules d'esters naturels sont similaires en composition [31, 32]. La figure 1.7 montre le procédé d'estérification et la réaction en sens inverse appelée hydrolyse. R1, R2, et R3 sont des chaînes d'acides gras identiques ou différents.

Le nom "acides gras" est un terme collectif pour les acides mono-carboxyliques, composés d'une chaîne hydrocarbonée (de longueur variable) et ayant pour liaison un groupe carboxyle (-COOH). Les acides gras peuvent être classés en fonction du nombre de doubles liaisons carbone-carbone. On trouve les acides gras saturés (ne possédant pas de liaison double) comprenant un nombre pair d'atomes de carbone entre 8 à 22, les acides gras mono-insaturés avec une seule double liaison appelés "acides oléiques", avec des atomes de carbone allant de 10 à 22, et les acides gras polyinsaturés possédant au moins une liaison double et qui contiennent

principalement 18 atomes de carbone ; ces acides polyinsaturés sont appelés acides linoléique et acide linolénique [33, 31]. La composition en acides gras de certaines huiles végétales est représentée dans le tableau 1.1 [2].

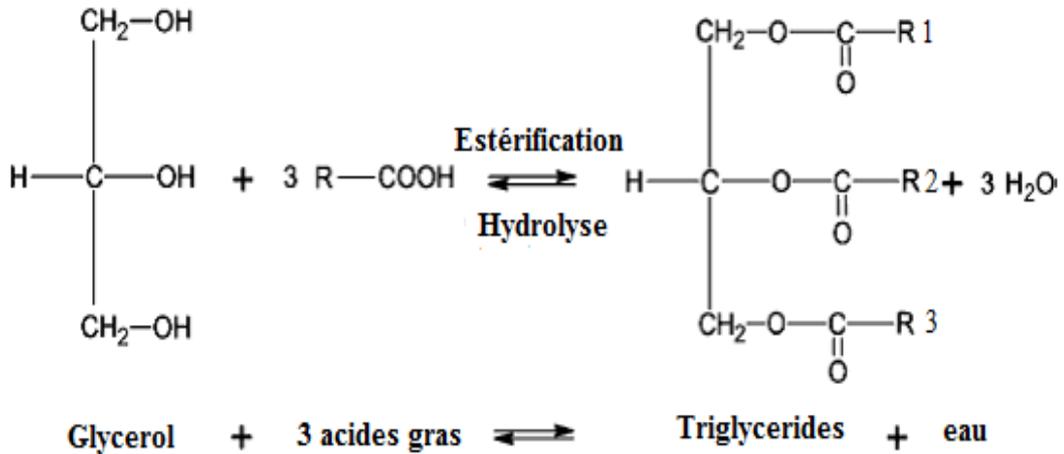


Figure 1. 7 : Synthèse des triglycérides par estérification [31].

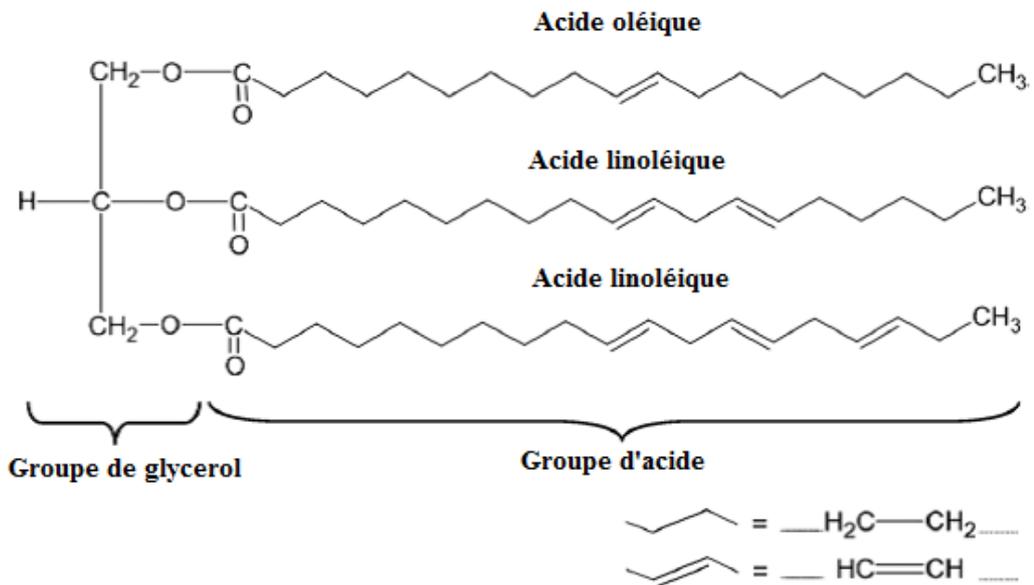


Figure 1. 8 : Composition chimique des esters naturels (huile de colza) [31].

Tableau 1.1 : Composition typique en acides gras de certaines huiles végétales [2].

Huile Végétale	Acides gras saturés, %	Acides gras insaturés, %		
		mono-	double-	poly-
Huile de canola (colza)	7.9	55.9	22.1	11.1
Huile de maïs	12.7	24.2	58	0.7
Huile de coton	25.8	17.8	51.8	0.2
Huile d'arachide	13.6	17.8	51.8	0.2
Huile d'olive	13.2	73.3	7.9	0.6
Huile de carthame	8.5	12.1	74.1	0.4
Huile de carthame riche en acide oléique	6.1	75.3	14.2	-
Huile de soja	14.2	22.5	51	6.8
Huile de tournesol	10.5	19.6	65.7	-
Huile de tournesol riche en acide oléique	9.2	80.8	8.4	0.2

Le coût d'exploitation (coût initial et coût d'entretien) est élevé par rapport à l'huile minérale, mais un tel inconvénient est compensé par d'autres facteurs comme la biodégradabilité et le point d'éclair. Dans ce qui suit, nous allons essayer de résumer les principaux avantages et inconvénients des huiles végétales en les comparant aux huiles minérales.

Tableau 1.2 : Propriétés des fluides isolants pour transformateurs [2].

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)	50 – 100	10 – 25 ^b	50
(Solubilité de l'eau à 25 °C)	1200	60	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			

1.4 Les avantages des huiles végétales

1.4.1 Biodégradabilité ultime

L'huile minérale comme la plupart des huiles dérivées du pétrole a une biodégradabilité faible, elle ne se dégrade pas rapidement selon la norme OCDE 301 (20% d'huile minérale se dégrade dans les 28 jours). Dans le cas d'une fuite d'huile, des pénalités financières importantes seraient imposées par les organismes environnementaux car ces fuites peuvent entraîner des dégâts sur l'environnement en général et les nappes phréatiques en particulier. A l'inverse des huiles minérales, 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 [2, 34].

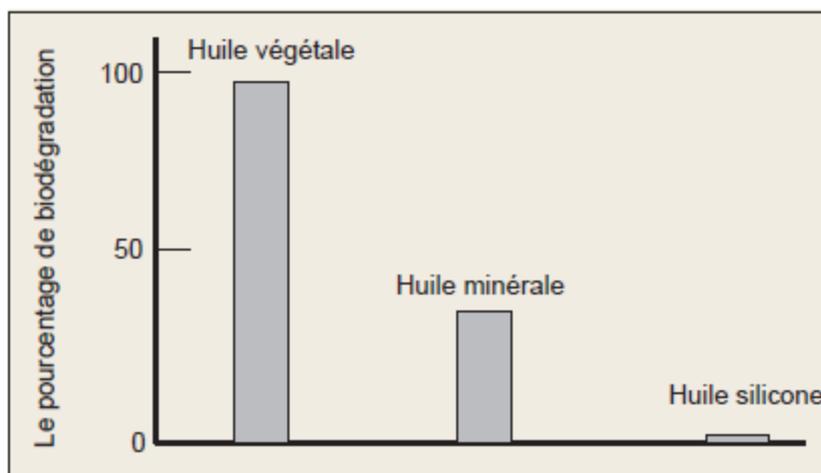


Figure 1. 9 : Biodégradabilité de différents liquides [2].

Le test homologué CEC-L33-A93 réalisé en milieu aqueux est le test le plus communément utilisé pour tester la biodégradabilité des huiles lubrifiantes. Au-delà d'un taux de 90% de dégradation, la substance présente une biodégradabilité élevée. Ce pourcentage correspond à la fraction de lubrifiant qui a disparu du milieu après 21 jours. La figure 1.9 montre un tableau comparatif de la biodégradabilité d'une huile végétale et d'autres fluides de transformateurs. On remarque le faible taux de

biodégradabilité des huiles minérales et silicones, et le taux élevé de biodégradabilité des huiles végétales [2].

1.4.2 Point d'éclair

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 [35]. 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 ainsi des risques pour l'environnement et plus spécialement pour les personnes. Non seulement il est coûteux de contrôler l'incendie, d'effectuer les procédures de sécurité et des nettoyages nécessaires, et de réparer l'équipement, le temps d'arrêt des transformateurs est peut-être le plus coûteux de tout [36].

De tels incendies peuvent être évités en utilisant les esters naturels. Avec un point de feu supérieur à 300 °C, les fluides à base d'esters naturels sont classés parmi les fluides diélectriques les «moins inflammables». Les esters naturels offrent un record de sécurité avec 45000 installations sans faille pendant 10 ans [36].

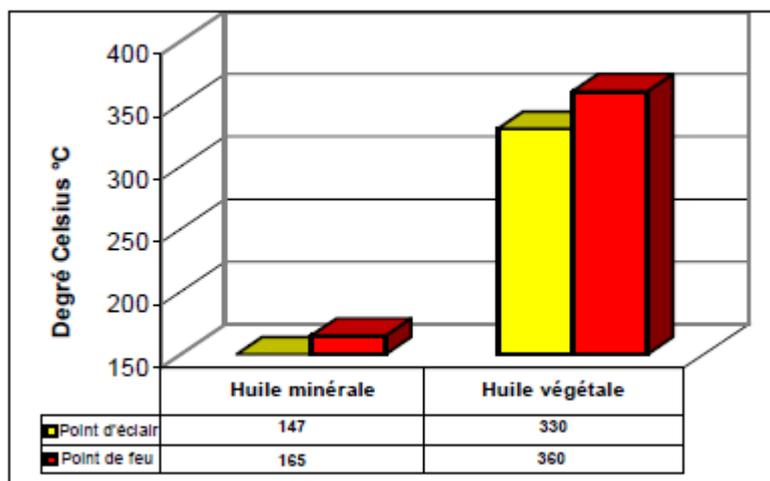


Figure 1. 10 : Le point d'éclair et le point de feu des liquides utilisés dans les transformateurs [22].

1.4.3 Humidité absolue de saturation

La présence d'humidité (considérée comme l'ennemi principal de l'isolation solide et liquide) est connue pour son rôle essentiel dans la durée de vie d'un transformateur. L'eau n'est pas seulement l'un des plus importants paramètres d'accélération du vieillissement du papier isolant dans les transformateurs, mais également c'est l'un des paramètres de dégradation du papier isolant lui-même. La teneur en eau de l'huile peut changer rapidement dans un transformateur en service. La présence de l'eau est due à deux causes principales :

La première est celle liée au fait que les transformateurs soient exposés à la pluie et au soleil, ainsi qu'aux variations de la température (chaleur) résultant de la fluctuation de la charge. Ainsi, une différence de pression importante se produit entre l'intérieur et l'extérieur du transformateur qui, même faible, provoque un écoulement d'air entre l'intérieur et l'extérieur de l'appareil [37].

Et l'autre est liée à la décomposition de la cellulose sous l'effet du champ électrique, composante principale du papier isolant, dont peut immigrer l'eau vers la surface c'est-à-dire vers l'huile.

Il est connu que de par leur structure chimique, l'hygroscopicité des esters naturels est supérieure à celle des huiles minérales. La structure de la chaîne moléculaire des esters naturels possède une plus grande capacité à participer dans les liaisons d'hydrogène [2, 6]. Les esters naturels ont une grande affinité pour les molécules d'eau [6] ; il y a même des huiles qui continuent d'absorber de l'humidité à une température atmosphérique jusqu'à la saturation, c'est le cas de l'huile de palme. Cela signifie que la saturation de l'ester naturel est de loin supérieure à celle de l'huile minérale. Rappelons que le point de saturation est la quantité maximale d'eau qu'un fluide donné est susceptible de contenir en solution. Lorsque le fluide atteint son point de saturation, toute quantité d'eau supplémentaire introduite restera sous forme d'eau en suspension (dispersion ou gouttelettes).

Pour faire une comparaison entre la teneur en eau des huiles minérales et végétales, on utilise toujours l'humidité relative et non l'humidité absolue ; la dernière ne tient pas compte des variations dans le point de saturation de l'huile. En d'autres

termes, dans un système dynamique d'huile dont le point de saturation fluctue, la mesure de l'humidité absolue ne fournirait aucune information sur la proximité du niveau d'humidité par rapport au point de saturation de l'huile.

Selon la température, la solubilité de l'eau des esters naturels est environ 20 fois supérieure à celle des huiles minérales. A température ambiante, la saturation de l'ester naturel est d'environ 1050 ppm alors que celle de l'huile minérale est d'environ 60 ppm [6]. Cette différence des niveaux de saturation a un plus grand effet sur la rigidité diélectrique et la durée de vie du papier isolant.

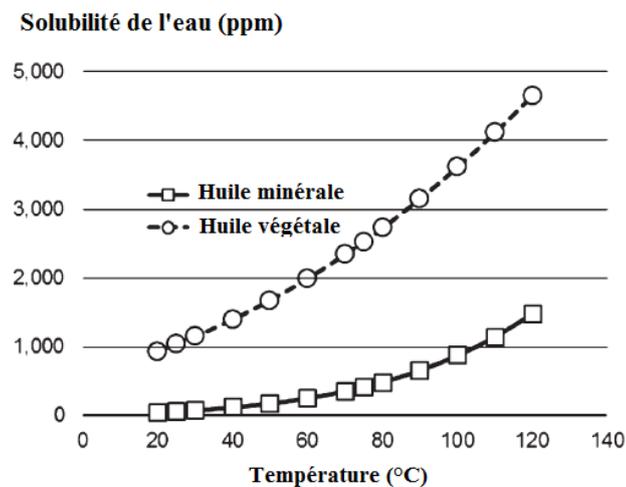


Figure 1. 11 : Solubilité de l'eau en fonction de la température [36].

1.4.3.1 Effet sur le papier isolant

Le papier (ou le carton) cellulosique utilisé pour isoler les enroulements est le principal facteur qui détermine la durée de vie d'un transformateur. Durant le fonctionnement, le papier cellulosique est soumis à des contraintes thermiques, électriques et mécaniques. En général, c'est les contraintes thermiques qui gouvernent le vieillissement du papier cellulosique.

Plusieurs recherches [6, 22, 31] ont montré que les esters naturels peuvent effectivement prolonger la durée de vie de l'isolation cellulosique. Ceci est d'un grand intérêt pour les compagnies d'électricité. Il semble y avoir trois phénomènes qui sont responsables du ralentissement de l'accélération du vieillissement du papier cellulosique dans l'ester naturel par rapport à l'huile minérale :

1. Hygroscopicité des esters naturels : Pendant le vieillissement thermique du papier dans l'huile, la teneur en eau augmente au fur et à mesure que l'huile et le papier se dégradent. Dans l'huile minérale, l'eau produite reste dans le papier, tandis que dans l'ester naturel, l'eau migre du papier vers l'huile car l'eau est plus soluble dans l'ester naturel [6]. La solubilité de l'eau dans un ester naturel est environ 20 fois plus élevée à température ambiante et environ 4 fois plus élevée à 100 °C que celle de l'huile minérale [38]. Cela permet d'extraire plus d'eau du papier en ester naturel.

2. Hydrolyse des esters : L'humidité réagit avec les esters naturels qui sont connus par leurs faibles stabilités de vieillissement par hydrolyse. La réaction consomme de l'humidité dissoute dans le liquide. La réaction chimique d'hydrolyse est présentée par l'équation suivante :

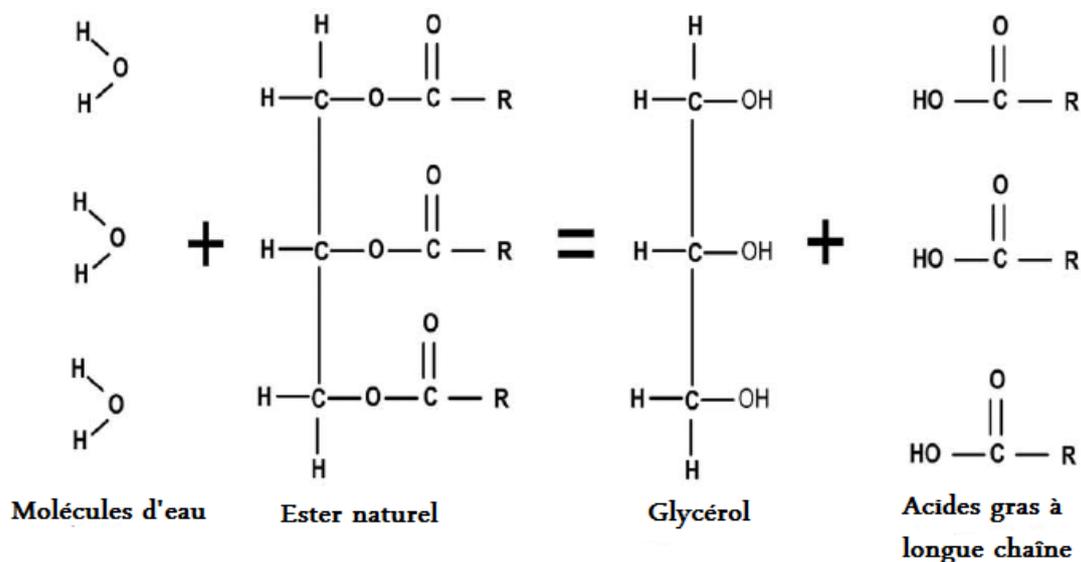


Figure 1. 12 : Hydrolyse de l'ester naturel en glycérol et acides gras [39].

A température constante, une augmentation de la teneur en eau dans l'huile doit être compensée par une augmentation de la teneur en eau dans la cellulose afin de maintenir l'équilibre. Inversement, une diminution de la teneur en eau dans l'huile entraînera une diminution de la teneur en eau de la cellulose. Comme l'ester naturel peut subir l'hydrolyse, sa teneur en eau va diminuer créant un déséquilibre entre la teneur en eau du papier cellulosique et l'huile, provoquant un passage de l'humidité dans le papier isolant vers le liquide afin de maintenir l'équilibre, réduisant ainsi la dégradation du papier par hydrolyse qui est l'un des principaux mécanismes du

vieillessement du papier isolant. Cela permet de réduire ou d'éliminer la nécessité du séchage périodique des transformateurs en service. Cependant, il n'y a pas d'hydrolyse dans l'huile minérale.

3. Transestérification du papier cellulosique : En raison des différences dans les structures chimiques des acides formés dans l'ester naturel et dans l'huile minérale, les acides formés dans l'huile minérale sont nuisibles alors que les acides produits par les esters sont bénéfiques [6, 35, 39,40]. Les acides présents dans les esters naturels comme les acides oléiques sont des acides de poids moléculaire élevé alors que les principaux acides présents dans l'huile minérale comme les acides formique, acétique et lévulinique, sont des acides de bas poids moléculaire.

Les acides de faible poids moléculaire accélèrent le vieillissement du papier, mais les acides de haut poids moléculaire n'ont pas d'influence significative sur le vieillissement du papier. Les acides de haut poids moléculaire produits par l'hydrolyse de l'ester naturel peuvent réagir avec la cellulose par une transestérification comme représenté dans la figure 1.13.

Ce phénomène implique un changement chimique de la structure cellulosique lorsqu'il interagit avec les molécules d'ester et d'eau à des températures élevées. Lors d'un vieillissement accéléré, les groupes hydroxyles (OH) de la cellulose deviennent estérifiés avec un acide gras dans l'ester naturel, ce qui retient le vieillissement du papier. Plus le poids moléculaire des acides est faible, et plus son absorption par le papier isolant est facile. Les chercheurs de l'université de Chongqing ont rapporté que les acides gras à longue chaîne attachés à la cellulose semblaient constituer une barrière à l'infiltration d'eau, entraînant une diminution de la vitesse de détérioration de l'isolant cellulosique [39].

En général, lors du processus de vieillissement des esters naturels, un phénomène de migration de l'eau à partir du papier isolant vers le liquide se met en place alors que dans l'huile minérale c'est le processus inverse : on a une migration de l'eau du liquide vers le papier isolant. Pour les transformateurs conçus pour être fonctionner avec de l'huile minérale, certains chercheurs ont proposé d'utiliser une huile végétale uniquement à des fins de séchage et de remplir par la suite le transformateur avec de

l'huile minérale [43]. Ceci est un avantage pour le séchage en fonctionnement des transformateurs de puissance par circulation continue d'huile.

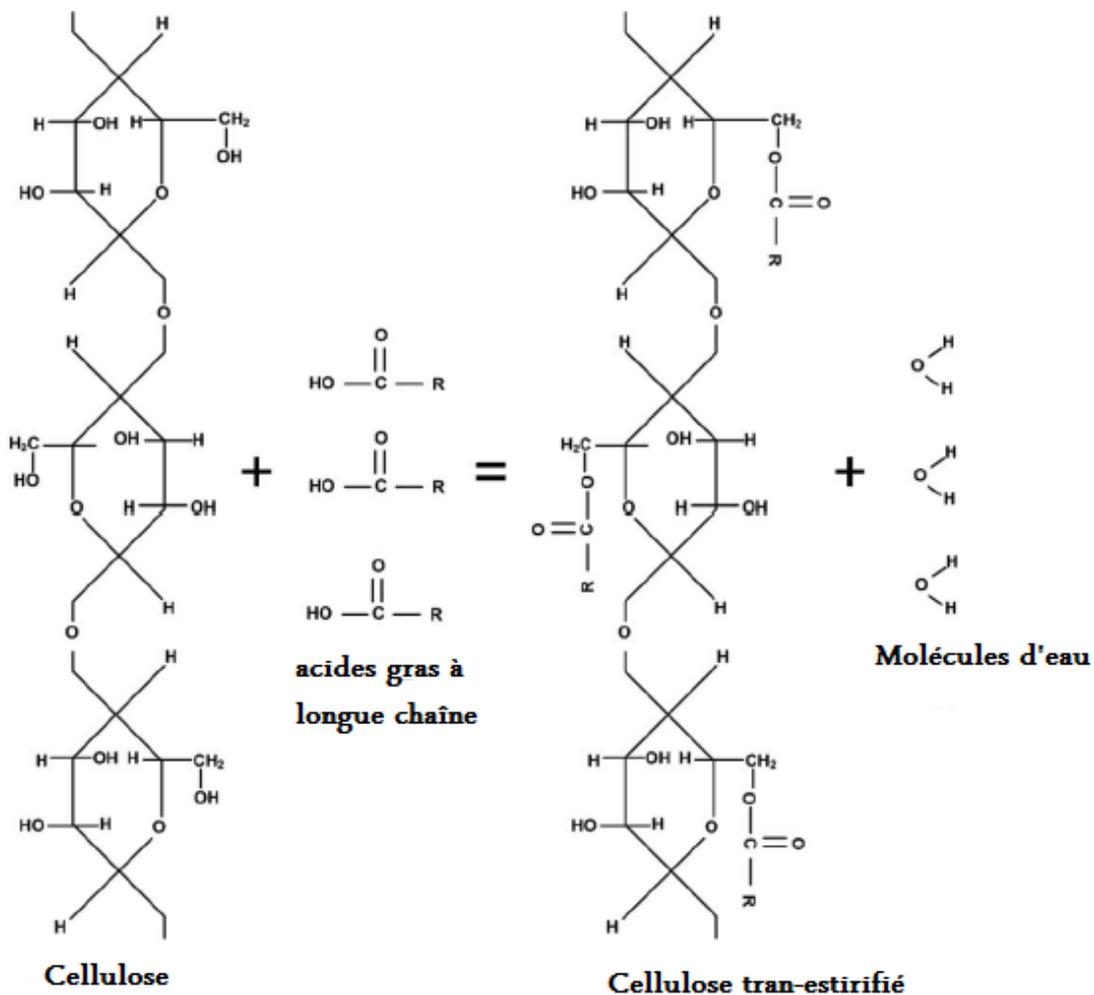


Figure 1. 13 : Trans-estérification de la cellulose par les acides gras [22].

McShane [3] a montré l'effet de différents esters naturels sur le taux de vieillissement d'un papier isolant. Il a suggéré que la dégradation du papier est entre 5 et 8 fois plus lente dans les esters naturels testés par rapport aux huiles minérales. Plusieurs travaux ont montré un avantage de température jusqu'à 20 °C lors de l'utilisation des esters naturels, c'est-à-dire que le taux de dégradation d'un papier cellulosique imprégné dans un ester naturel à 90 °C est équivalent à celui imprégné dans l'huile minérale à 110 °C. Cela signifie également qu'un papier isolant imprégné dans un ester naturel à 65 °C aura la même durée de vie à 85 °C dans une huile minérale. La figure 1.14 montre le changement de couleur et donc l'état de

vieillessement du papier dans un ester naturel et dans l'huile minérale à 150 et 170 °C [3].

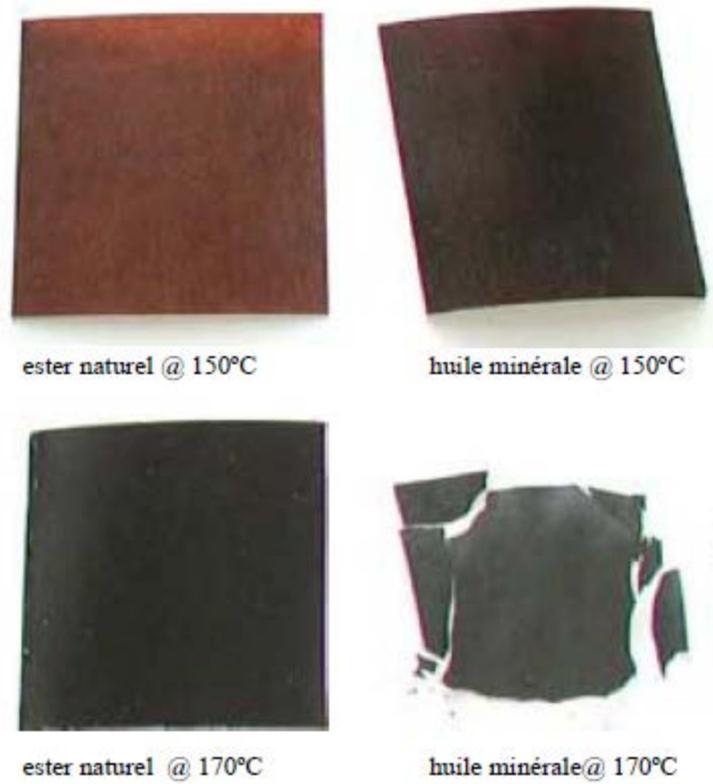


Figure 1. 14 : L'état d'un papier Kraft après 4000 heures de vieillissement thermique [3].

Extension de la durée de vie du transformateur : La norme CEI 60076-7 indique que pour chaque 6 °C d'augmentation de la température, le taux de dégradation de l'isolation solide (papier) double [41]. Avec l'avantage de température de 20 °C qu'offre les esters naturels, si un transformateur rempli avec de l'ester naturel fonctionne à des températures similaires à une unité rempli avec de l'huile minérale, nous aurons une extension de la durée de vie du transformateur. La grande capacité thermique du papier cellulosique imprégné dans les esters naturels se traduira par un taux de vieillissement beaucoup plus faible, à savoir que le remplacement d'une huile minérale par un ester naturel peut prolonger la durée de vie restante d'un ancien équipement par plus de quatre fois dans des conditions idéales [36].

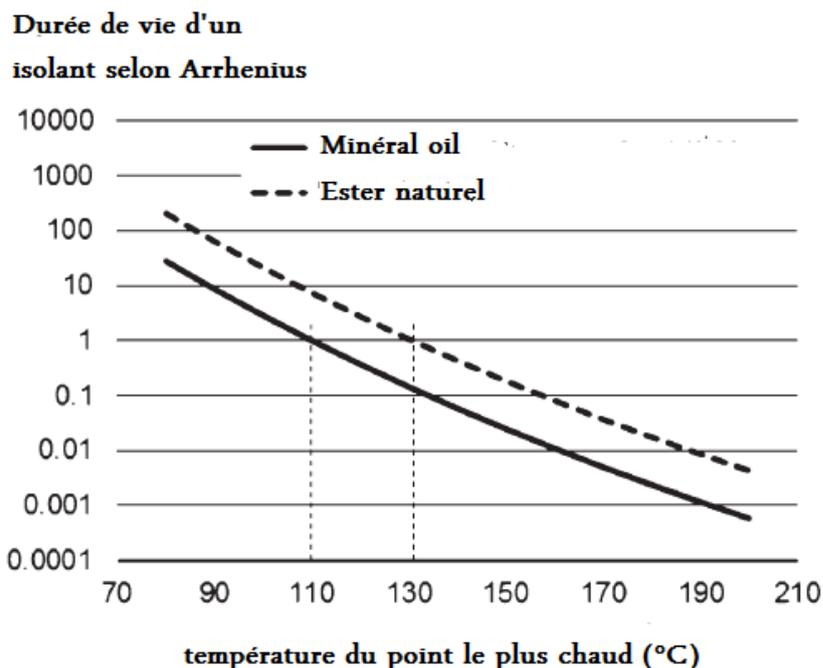


Figure 1. 15 : L'avantage de température de 20° C donné par les esters naturels par rapport aux huiles minérales avec l'utilisation de l'équation d'Arrhenius pour déterminer la durée de vie [36].

Avoir une puissance supplémentaire : On peut dépasser la puissance nominale d'un transformateur tout en gardant la même durée de vie lorsqu'on utilise les esters naturels. Une enquête [36] a montré qu'on peut dépasser les limites des températures autorisées avec des transformateurs remplis d'esters naturels, par rapport aux transformateurs similaires remplis d'huile minérale. Dans [36], les auteurs ont signalé une augmentation de la puissance de 15 à 25 MVA en utilisant le même transformateur pour la même durée de vie.

1.4.3.2 Effet sur la rigidité diélectrique

Le paramètre le plus important et souvent vérifié dans les liquides isolants est la tension de claquage. Les quatre facteurs qui déterminent la tension de claquage d'une huile sont l'humidité, les bulles d'air, les particules solides en suspension et l'acidité [43]. La présence d'humidité dans les huiles isolantes est l'une des principales causes du claquage électrique ; l'humidité augmente la conductivité ionique de l'huile et donc réduit la tension de claquage. Plusieurs recherches ont montré que la tension de claquage des huiles végétales est généralement supérieure à celle des huiles minérales.

Etant donné que les propriétés diélectriques (tension de claquage en particulier), dépendent du taux de saturation en eau plutôt que de la concentration absolue d'eau dans l'huile [6], la tension de claquage des esters naturels est habituellement plus élevée que celle des huiles minérales pour une grande teneur en eau.

La représentation de la tension de claquage en fonction de l'humidité relative (saturation en eau) présente plusieurs avantages par rapport au graphe sur l'humidité absolue (ppm) lorsqu'on compare deux huiles différentes. La répartition de l'humidité dans les systèmes d'isolation dépend des différences dans la saturation en eau. Ainsi, dans les transformateurs de puissance, la saturation en eau (humidité relative) montre la concentration de l'eau dans le liquide. Cette mesure rend la tension de claquage des huiles comparable ; cette mesure reflète la présence des molécules d'eau disponibles pour les interactions avec les matériaux [31].

Aussi, le claquage d'un liquide isolant est souvent initié par des bulles. L'augmentation de la température favorise également la formation de peroxyde qui a une forte affinité pour le gaz d'hydrogène et réduit la formation de bulles dans les esters naturels [43, 44].

1.4.4 Permittivité diélectrique des esters naturels et du carton

L'un des avantages à utiliser des huiles esters est celui de leur permittivité diélectrique très proche de celle du papier/carton. Ainsi le champ électrique dans la structure mixte (huile/carton) sera réparti de façon plus homogène entre l'huile et le carton. Une différence faible entre la permittivité du carton imprégné dans l'huile et la permittivité de l'huile est bénéfique pour le système d'isolation (papier/huile) [43]. Cela permet d'empêcher l'apparition de décharges aux interfaces solide/liquide et donc d'améliorer la rigidité diélectrique du système d'isolation (ester naturel / papier cellulosique).

1.4.5 Oxydation des huiles végétales et boues

L'oxydation de l'huile du transformateur commence dès lors qu'un transformateur est installé dans une ligne de transmission et commence à fonctionner. L'oxygène constitue l'un des facteurs les plus influents dans le vieillissement par oxydation des

huiles minérales et à base d'esters naturels. L'oxydation est accélérée lorsque l'huile est exposée à la chaleur provenant des enroulements [37].

Dans le cas de l'huile minérale, l'oxygène peut dégrader les hydrocarbures par des processus basés sur des réactions de radicaux libres qui génèrent des hydro-péroxydes (ROOH). Les hydro-péroxydes sont instables et se décomposent en radicaux libres conduisant finalement à l'apparition d'eau, de cétones et autres produits d'oxydation. Les étapes de l'oxydation de l'huile minérale sont [45]:



Le taux d'oxydation et la concentration des produits transitoires dépendent de la structure chimique de l'huile et des conditions d'oxydation, respectivement, de la température, de la pression, et le contact avec l'air [45].

D'autre part, la réaction d'oxydation dans les huiles végétales est plus intense à mesure que la quantité des acides gras insaturés (comportant une ou plusieurs doubles liaisons carbone-carbone) augmente du fait que l'oxygène attaque les doubles liaisons carbone et conduit à la rupture de la chaîne des acides gras [45]. Cela explique la biodégradabilité des huiles végétales.

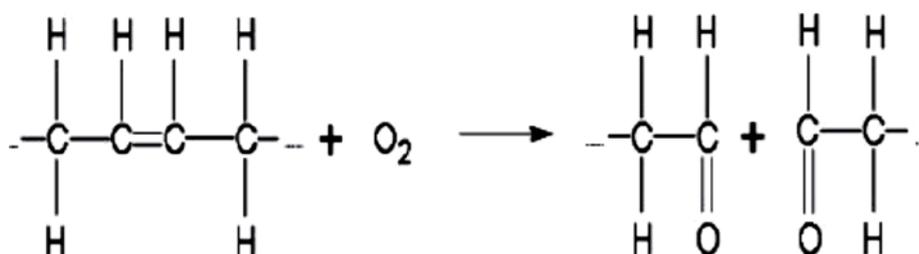


Figure 1. 16 : Rupture de la chaîne des acides gras par oxydation [45].

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'in-saturation 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 [2, 36]. Les étapes de l'oxydation dans les huiles végétales sont les suivantes :



La molécule d'oxygène existante réagit avec l'huile pour former l'hydro-péroxyde (réaction 1.5). L'hydro-péroxyde réagit de nouveau avec l'huile formant des radicaux libres hydrocarbonés par l'attraction d'hydrogène de l'huile (réaction 1.6). Selon la réaction (1.7), le radical libre de l'huile réagit facilement avec l'oxygène pour générer un radical peroxyde. Ce radical peroxyde réagit à nouveau avec l'huile produisant de l'hydro-péroxyde (réaction 1.8), qui se dissocie à son tour en un radical peroxyde, un radical alcoxy et de l'eau selon réaction 1.9 [45].

De nombreux débats sur la stabilité à l'oxydation des huiles végétales ont eu lieu au début de leurs développements. Selon certaines opinions (historiquement fondées), les esters naturels n'avaient pas une stabilité suffisante à l'oxydation, et donc ne pouvaient être considérés comme des fluides diélectriques [8]. Ces opinions étaient couramment dérivées des résultats de tests tels que ceux de l'ASTM D2112 et la D2440. Ces tests, destinés à évaluer les inhibiteurs utilisés dans l'huile minérale, ne sont pas des indicateurs de performance en service. Cependant, ils sont parfois utilisés à tort. Lorsque ces méthodes sont appliquées aux esters naturels, les esters ne donnent pas des bons résultats [3, 7].

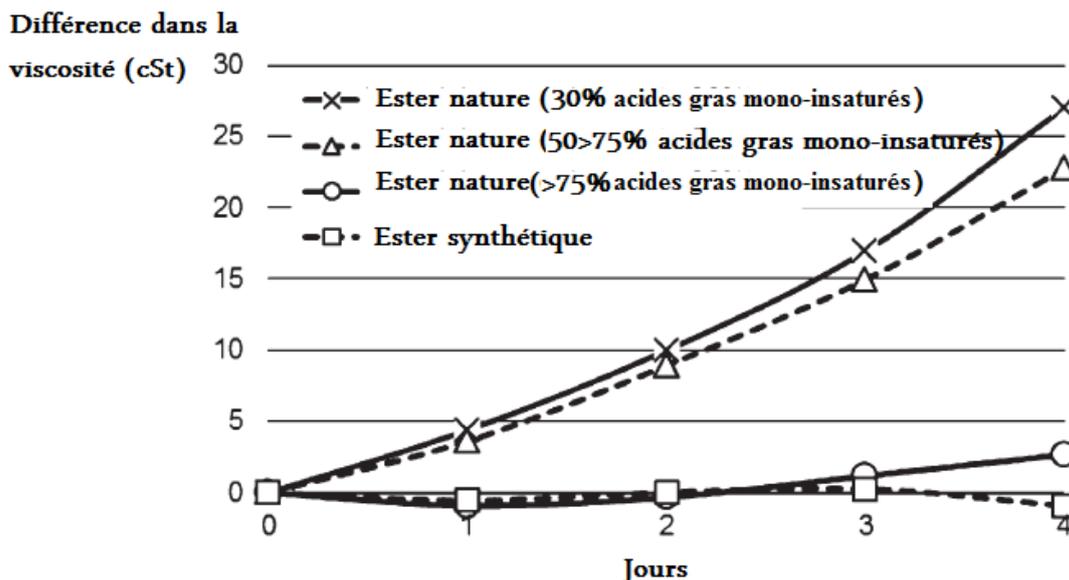


Figure 1. 17 : Les résultats du test de stabilité à l'oxydation (IEC 61125) à 120°C [34].

La raison de cette attention pour la stabilité à l'oxydation est due aux produits de dégradation de l'huile minérale précipitant sous forme de boue. Cette boue recouvre alors les surfaces intérieures du transformateur et conduit à la détérioration des performances de transfert de chaleur ; il en résulte une élévation excessive des températures dans le transformateur. Les fluides d'esters naturels s'oxydent différemment des huiles minérales : ils ne génèrent pas de boues mais tendent plutôt à se polymériser [3]. La stabilité à l'oxydation est une préoccupation dans les fluides diélectriques à base d'ester naturel, mais pour des raisons différentes que dans les huiles minérales.

Une étude de longue durée évaluant les conséquences de l'utilisation de fluides à base d'esters naturels dans les transformateurs respirants [17], dans laquelle, après 7 ans d'exploitation, l'oxydation de l'ester naturel est détectable au travers d'une augmentation modérée de la viscosité de 8,6%. Un ajout significatif d'additifs antioxydants est évident. Cependant, au cours de leur exploitation, les transformateurs sont soumis à des tests périodiques pour satisfaire les exigences de la norme IEEE C57.100. Dans une autre recherche [6], il a été trouvé que l'oxydation joue un rôle mineur dans la dégradation d'un papier isolant dans un ester naturel lorsque ce dernier est exposé à l'air, car l'hydrolyse est la principale cause de la dégradation du papier

dans les esters naturels. Malgré ces résultats, les chercheurs recommandent d'utiliser uniquement les fluides diélectriques à base d'esters naturels dans les transformateurs scellés (non respirants).

L'utilisation des antioxydants est fondamentale dans les transformateurs remplis de fluides à base d'esters naturels. En général, les antioxydants sont des composés qui retardent ou ralentissent le processus d'oxydation, en éliminant ou en maintenant la quantité de radicaux libres à une quantité minimale. Ils peuvent éviter l'oxydation de l'huile et la formation de peroxydes [42]. Les antioxydants devraient être aussi "verts" que possible, bien que les antioxydants de qualité alimentaire ne soient pas assez puissants/efficaces pour produire une huile qui passera les tests d'oxydation ASTM, tels que D-2440 et D-2112. Certains chercheurs [42] ont pu obtenir de bons résultats en utilisant des additifs de qualité alimentaire ; ils ont trouvé que ces additifs amélioreraient les performances de l'huile, ce qui ouvre sûrement la voie à l'utilisation de fluides verts dans les applications haute tension. Il faut prendre soin de ne pas trop en ajouter pour éviter l'augmentation de la conductivité qui pourrait atteindre des niveaux inacceptables. Il est souhaitable de maintenir le niveau du composant additif en dessous de 1% [2].

L'acidité est utilisée pour évaluer la stabilité à l'oxydation de l'huile minérale. L'utilisation de l'acidité comme indicateur du degré d'oxydation des huiles minérales est raisonnable car les huiles minérales sont principalement composées d'hydrocarbures et les acides sont principalement dérivés de l'oxydation d'Hydrocarbures. Toutefois, ce principe pourrait ne pas s'appliquer aux huiles végétales car l'hydrolyse des huiles végétales contribue à l'augmentation de l'acidité ; il n'y a pas d'hydrolyse dans les huiles minérales [46].

1.5 Inconvénients des huiles végétales

1.5.1 Viscosité

La viscosité est le paramètre le plus influant dans le transfert de chaleur et le refroidissement des transformateurs ; celle des esters naturels est supérieure à celle des huiles minérales. La haute viscosité et la faible stabilité à l'oxydation des esters naturels font que l'introduction de ces derniers dans les transformateurs de puissance

reste limitée ; leur utilisation se limite pour le moment aux transformateurs de distribution même si on trouve de plus en plus des grosses unités (transformateurs) fonctionnant aux huiles végétales. Notons que certaines huiles végétales peuvent avoir une viscosité plus proche de celle des huiles minérales [7].

L'oxydation est le principal mécanisme responsable de la dégradation des huiles isolantes minérales ou végétales. Le vieillissement et l'oxydation sévère de l'une de ces huiles entraînent une augmentation de la viscosité de l'huile [7]. Des recherches ont montré que la viscosité des esters naturels réagissait à l'oxydation plutôt qu'à l'hydrolyse [46]. En outre, la présence de l'air, la chaleur, la lumière et les ions métalliques peuvent également accélérer le processus d'oxydation dans de tels liquides [31]. Certains résultats rapportés dans la littérature mentionnent également que l'oxydation de certains liquides isolants à base d'ester naturels en présence d'air et également d'ions métalliques peut conduire à une augmentation drastique de la viscosité [44]. D'autres études ont montré que la viscosité des esters naturels n'a pas changé pendant les tests de vieillissement en l'absence de l'air (cas des transformateurs scellés) [6,31]. Nombreux spécialistes insistent sur le fait que ces huiles ne sont pas adaptées pour être utilisées dans des transformateurs respirants pour l'instant.

La composition chimique des esters naturels joue un rôle important dans la valeur de la viscosité. La présence d'acides gras saturés conduit à des viscosités plus élevées et à des points de congélation et d'écoulement plus élevés alors que la présence des acides gras insaturés conduit à une viscosité plus faible. Une huile isolante doit rester liquide à température ambiante pour être un liquide de refroidissement efficace. L'huile reste habituellement liquide au-dessus de 0 °C (les huiles à forte in-saturation peuvent demeurer liquides de -15 °C à -30 °C) [36]. Le point d'écoulement des esters naturels (-15 à -21 °C) est inférieur à la température minimale moyenne pour la plupart des hivers en Algérie et ne devrait donc pas poser de problème.

A cause de la valeur élevée de la viscosité dans les esters naturels, certaines considérations dans la conception d'un transformateur sont nécessaires. En même temps, les esters naturels ont une capacité et une conductivité thermique légèrement

supérieures à celles des huiles minérales. Cependant, ces bonnes performances thermiques ne compensent que légèrement l'impact de la viscosité des esters naturels.

1.5.2 Le coût

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. Après des recherches plus approfondies, il a été constaté qu'il y avait des avantages supplémentaires à utiliser des transformateurs remplis avec des esters naturels qui aideraient à justifier et à compenser les coûts [47].

Un exemple que l'on peut citer au sujet des coûts. C'est celui d'une raffinerie au Texas qui a lancé un appel d'offres pour des nouveaux transformateurs avec des spécifications précises (surtout protection anti-incendie). Lors de la spécification des transformateurs pour ce projet, le client et l'entrepreneur ont étendu les possibilités de soumission à de multiples fabricants d'équipements spécifiant l'huile minérale en tant que norme, avec le fluide d'ester naturel comme alternative. Alors que l'entrepreneur était relativement familiarisé avec les produits d'esters naturels, le client n'était pas au courant de la possibilité et des avantages inhérents à un tel fluide.

Suite à la réception des propositions pour les transformateurs remplis de liquide, le client a commencé à examiner les prix et les options. Les transformateurs remplis d'esters naturels étaient toujours plus élevés sur le prix d'achat.

Avec le record de feu impeccable dans plus de 45 000 applications sur 10 ans, le chargé d'hygiène, de la sécurité et d'environnement (HSE) a reconnu les avantages de sécurité. De ce fait, le groupe a pris la décision de ne pas exiger les systèmes déluge (protection incendie) pour les nouveaux transformateurs remplis avec de l'ester naturel.

De même, le groupe a évalué les propriétés de biodégradabilité des esters naturels. Après avoir présenté des informations montrant que le fluide est plus de 99 pour cent biodégradable après 21 jours, le chargé (HSE) a pris la décision que les moyens de confinement des fuites éventuelles n'étaient pas nécessaires pour ces transformateurs.

Si ces transformateurs sont immergés avec de l'huile minérale, ils exigent chacun un confinement et une vidange individuels.

Après l'élimination des systèmes de déluge et de confinement pour les transformateurs remplis avec des liquides à base d'esters naturels, les prix ont été réévalués. Les économies sur les coûts d'installation pour les transformateurs remplis d'esters naturels justifient aisément la faible différence sur le prix d'achat.

Dans cette étude, la raffinerie de pétrole a trouvé que le fluide d'ester naturel a non seulement répondu à tous les objectifs du futur (respect de l'environnement + sécurité), mais il a permis également de réduire le coût total d'installation des transformateurs tout en économisant de l'espace sur un projet (immobilier très cher). Finalement, la raffinerie prévoit d'acheter toutes les unités futures avec des fluides d'esters naturels.

1.6 Conclusion

Les observations faites dans ce chapitre nous ont permis de noter les différences entre les principales propriétés des différentes huiles. L'huile minérale offre non seulement le meilleur compromis prix/performances, mais également un haut niveau de compatibilité avec les autres matériaux utilisés dans les transformateurs. Ses points faibles résident dans sa faible résistance au feu et sa faible biodégradabilité. Les huiles silicones quant à elles, ont une très bonne stabilité à l'oxydation mais ne sont pas biodégradables. Les exigences croissantes d'amélioration de la sécurité vis-à-vis des incendies, de la durabilité des matériaux, du respect de l'environnement ont poussé les efforts de recherche et de développement vers les esters naturels. La majorité des caractéristiques de performance des esters naturels sont de loin supérieures à celles de l'huile minérale classique, y compris la sécurité incendie, la compatibilité des matériaux, les caractéristiques électriques et thermiques et une réduction significative du taux de vieillissement de l'isolation solide. Le plus grand inconvénient des transformateurs remplis avec les esters naturels est la différence de prix, qui est d'environ dix à quinze pour cent de plus que l'huile minérale classique. 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.

Les esters naturels qui sont facilement biodégradables ont une faible tenue à l'oxydation. De ce fait, ils sont indiqués pour être utilisés dans des transformateurs scellés.

CHAPITRE 2

***PHENOMENES DE PRECLAQUAGE ET
DE CLAQUAGE DANS LES HUILES
ISOLANTES ET DE DÉCHARGES AUX
INTERFACES LIQUIDE/SOLIDE***

2.1 Introduction

L'isolation électrique est l'une des parties les plus importantes des équipements haute tension tels que les transformateurs de puissance. Conventionnellement, pendant plus d'un siècle, des systèmes d'isolation mixtes composés d'huile isolante et de produits celluloseux imprégnés d'huile (carton comprimé, papier kraft, bois, etc.) ont été largement utilisés pour assurer l'isolation électrique à l'intérieur des transformateurs de puissance. Durant leur exploitation, les équipements électriques dont font partie ces structures isolantes (solide/liquide) sont exposés à différentes contraintes et en particulier aux phénomènes de décharges qui peuvent se développer dans l'isolant liquide et / ou à l'interface des deux constituants (solide/liquide). Ces décharges peuvent conduire à la destruction de la structure isolante (suite à un claquage de la structure isolante liquide ou à un contournement de l'isolant solide) voire à la mise hors service du système. Le claquage est précédé d'une phase de pré-claquage durant laquelle différents phénomènes peuvent prendre naissance. Cette phase de pré-claquage est elle-même constituée de deux phases : une phase de génération et une phase de propagation. Par conséquent, la connaissance des conditions d'initiation et de propagation de ces décharges ainsi que leur caractérisation est d'un grand intérêt pour la conception, le dimensionnement et l'optimisation des appareillages haute tension.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux phénomènes de pré-claquage et de claquage dans les huiles isolantes, ainsi qu'aux phénomènes de décharges surfaciques et les paramètres qui les caractérisent.

2.2 Les Streamers

Au cours des dernières décennies, de nombreux travaux de recherche ont été menés sur les phénomènes de pré-claquage et de claquage dans les huiles isolantes. Ces investigations ont permis de progresser de façon très significative dans la compréhension des mécanismes conduisant au claquage. Ainsi, il a été établi que le claquage d'un liquide est précédé d'une phase de pré-claquage elle-même constituée de deux phases : une phase de génération dans laquelle une bulle de gaz prend naissance au voisinage de l'électrode où le champ électrique est le plus intense (électrode acérée), et une phase de propagation durant laquelle différentes structures plus ou moins

ramifiées appelées « streamers » prennent naissance à l'interface de cette bulle et se développent vers l'électrode opposée [48, 49]. Selon les conditions expérimentales (ou d'exploitation), ces streamers peuvent conduire au claquage c'est-à-dire à l'établissement d'un arc électrique. Les streamers sont caractérisés par leur forme et leur vitesse de propagation. Ils sont accompagnés par des courants, des émissions lumineuses et des ondes de chocs ; leur conductivité dépend des mécanismes impliqués dans leur propagation. Ces paramètres caractéristiques dépendent des conditions expérimentales en particulier de la géométrie des électrodes (distance inter-électrodes, forme et rayons de courbure des électrodes), de la tension appliquée (forme, amplitude et polarité), de la nature du liquide, de la présence ou non d'additifs spécifiques. Dans le cas où la tension appliquée est insuffisante pour qu'ils puissent atteindre l'électrode opposée ou que la tension est coupée, les streamers se désintègrent en formant des microbulles qui se dissolvent dans le liquide ou qui restent en suspension si le liquide est saturé ou qu'il a un mauvais pouvoir absorbant de gaz (*gas absorbing*).

La plupart de ces études ont été effectuées sur des huiles minérales. Le fait que ces huiles soient peu biodégradables et qu'elles ont un impact négatif sur les milieux aquatiques a poussé les politiques à encourager les industriels et les académiques à trouver des produits écologiques de substitution respectueux de l'environnement. C'est tout naturellement que l'on s'est tourné vers les huiles végétales. Ainsi, depuis une trentaine d'années, les huiles végétales sont utilisées dans les transformateurs moyennes tensions. Cependant, leur intégration dans les transformateurs de puissance haute tension nécessite que l'on pousse d'avantages les recherches pour leur caractérisation et leur qualification pour de telles applications.

2.2.1 Phase de génération

La phase de génération est moins documentée que la phase de propagation. Il ressort des travaux menés sur cette phase sous différents types de tensions (AC, DC ou impulsionnelle) et pour différents types de liquides, 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 d'un 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. En effet, lorsque la tension

appliquée est supérieure à une certaine tension dite seuil de génération, il y a 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 à la création d'une bulle de gaz. Ainsi, si la tension est légèrement supérieure à cette tension seuil, on peut observer un train d'impulsions. Chaque impulsion de courant résulterait d'une avalanche électronique en phase liquide [50, 51].

L'expansion de la bulle est déterminée par les différentes contraintes auxquelles elle est soumise, en particulier électriques (figure 2.1). Une fois atteint son rayon maximum, cette bulle montre une série de cycles expansion/implosion avant de disparaître (Figure 2.1) [52-55]. 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 forme d'une émission d'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 [49].

Lorsque la tension appliquée augmente bien au-delà de la tension seuil, le nombre et l'amplitude des impulsions de courant augmentent [50, 56]. 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 [57] ont observé qu'après formation de la bulle de gaz, les décharges partielles qui s'y développent provoquent une augmentation de la pression conduisant ainsi au développement de la cavité [49].

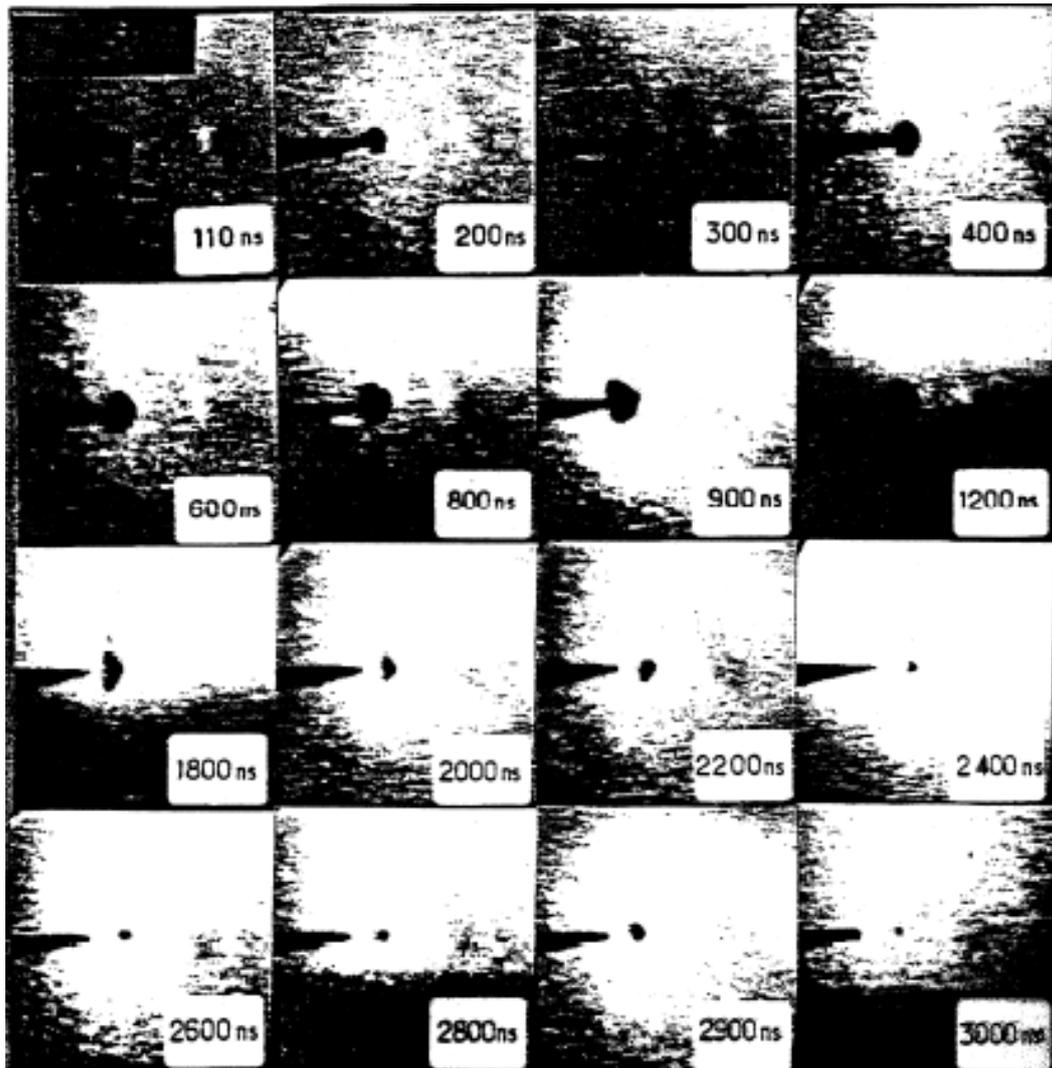


Figure 2. 1 : Visualisation de la dynamique de la bulle (expansion/implosion et rebondissements) en fonction du temps de retard à l'instant initial d'apparition de l'impulsion de courant (Cyclohexane) [58].

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 [59]. 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 [60].

Beroual [61] 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.

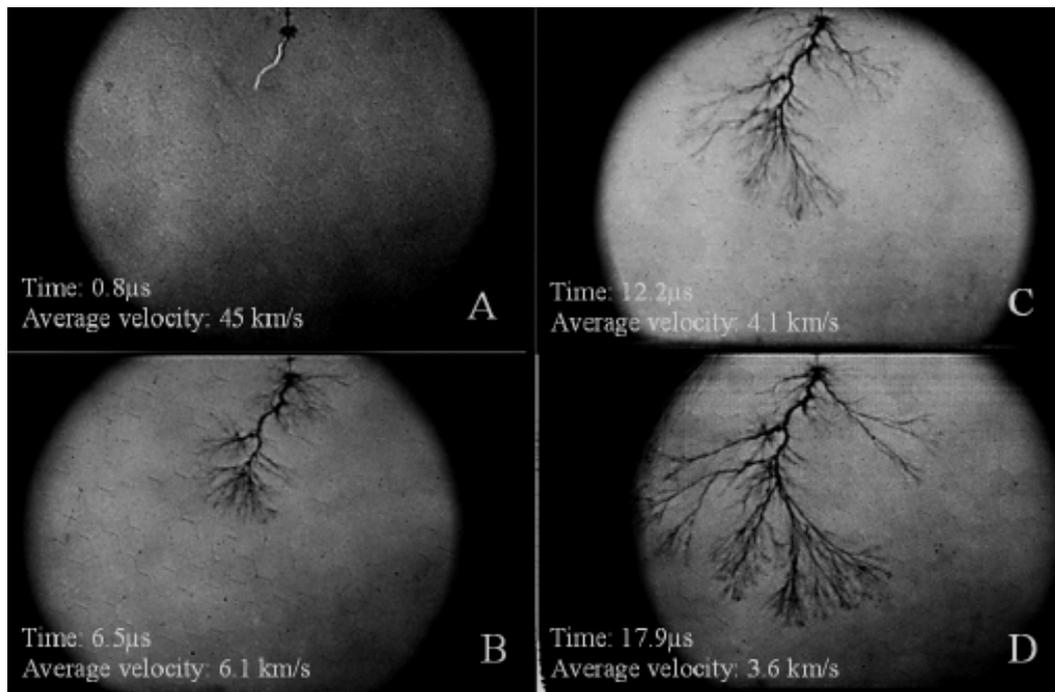


Figure 2. 2 : Propagation des streamers positifs dans une huile paraffinique [63].

La structure des streamers dépend de la polarité de la pointe, du niveau de tension appliquée, de la forme de la tension et de la géométrie des électrodes (distance et rayon

de courbure de la pointe). La forme des streamers est parfaitement corrélée à la vitesse de propagation des streamers. Les streamers lents sont buissonneux et les streamers rapides filamenteux [62, 63]. Les streamers positifs sont souvent plus rapides que les streamers négatifs (figure 2.2). Par conséquent, les streamers positifs à haute énergie constituent un risque plus important pour les isolations 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 que les streamers négatifs. Le mode de propagation dépend de la valeur du champ électrique local au niveau de l'électrode acérée et du champ électrique moyen c'est-à-dire de la valeur de la tension appliquée et de la géométrie des électrodes et. 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. 1^{er} 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 du liquide

2.2.3.1 Influence de la viscosité et de la masse volumique du liquide

Des résultats rapportés dans la littérature, il ressort que la viscosité n'a pas d'effet significatif sur la vitesse de propagation des streamers. Watson *et al* [64] ont mené une étude sur les huiles silicones dont la viscosité variait de 10 à 10⁴ cSt ; ces auteurs n'ont observé en géométrie pointe – plan qu'une très légère tendance à la décroissance de la vitesse des streamers négatifs lents lorsque la viscosité augmente. En considérant des polybutènes de viscosité variant de 90 à 4.10⁵ cSt, Beroual [65] n'a pas observé d'effet significatif de la viscosité sur la vitesse des streamers. 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 [66], alors que dans les polydiméthylsiloxanes, la

variation du temps de retard au claquage est insignifiante lorsque la viscosité est multipliée par 1000 [65]. Inversement, Badent *et al* [66], 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 passent d'une forme en parapluie à filamenteuse et les négatifs passent 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 proposée par Sakamoto et Yamada [67]. 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 [65].

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 [68]. 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 [62]. Dans un système d'électrodes pointe-plan, le streamer positif est plus filamenteux, donc plus rapide, dans le chlorocyclohexane que dans les autres liquides tels que le cyclohexane, le transdécahydronaphthalène et le cis-décahydronaphthalène [62].

Dans la plupart des hydrocarbures saturés, avec des pointes de rayon de courbure $r_p > 10$ μm , le streamer négatif présente une structure en buisson alors que dans les liquides aromatiques purs (hydrocarbures non saturés), on observe une structure filamenteuse [68]. Les streamers négatifs filamenteux sont également observés dans l'hélium liquide et l'azote liquide [68].

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 (figure 2.3). 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 [69-73].

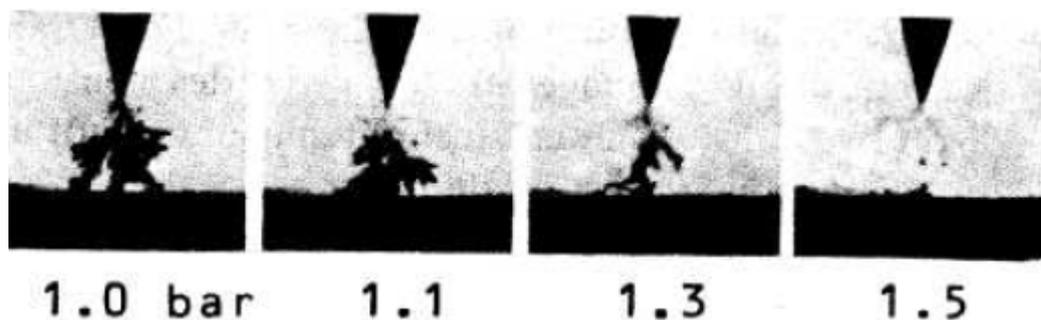


Figure 2. 3 : Streamer négatif dans le cyclohexane sous l'influence de la pression [69].

2.2.3.4 Influence de la température

Selon Hoch et Reinders [74], 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 à une température proche de son point d'ébullition, McGrath et Nelson [75] n'ont observé pratiquement aucun effet sur les phénomènes de pré-claquage. 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 [76] ; celle des streamers négatifs ne subit aucune variation.

La vitesse des streamers positifs dans le cyclohexane passe de 1.9 km/s à 3km/s lorsque la température est élevée de 18 à 76°C [76,77] alors qu'aucun changement dans la tension de génération n'a été relevé dans ce liquide [78]. Seule une légère augmentation du nombre et de l'amplitude des pics de courant et de lumière, a été observée. Par contre, lorsqu'on baisse la température à une valeur comprise entre -6 et -30 °C, la tension de génération devient beaucoup plus importante qu'aux températures supérieures à +5 °C : Elle augmente de 15 à 25 kV en polarité négative et de 17 à 26 kV en polarité positive [76].

2.2.3.5 Influence des additifs

a. Additifs capteurs d'électrons

Afin de montrer l'influence des processus électroniques sur les phénomènes de pré-claquage, Devins *et al* [78] étudièrent séparément l'influence d'additifs capteurs d'électrons et à bas potentiel d'ionisation. L'addition d'une faible quantité (0.05 mole/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-triméthyl-pentane, rend les streamers négatifs plus filamenteux 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 [78-81].

A. Beroual *et al* [68] 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 CCl₄ augmente également le nombre et l'amplitude des pics de courant des streamers négatifs dans le cyclohexane et dans le n-hexane [81]. Lorsque la concentration de CCl₄ atteint 0.08 M/l, le courant tend vers une forme ayant une composante continue [79].

b. Additifs à bas potentiel d'ionisation

L'addition d'un composé non ionique à bas potentiel d'ionisation tel que le N,N-dimethylaniline (DMA) n'a pas d'effet sur la vitesse des streamers négatifs (figure 2.5) dans une huile naphhténique (Marcol 70) et dans le 2,2,4-trimethyl-pentane [78], tandis qu'elle augmente (d'un facteur 2 ou 3) celle des streamers positifs (figure 2.4). Aucun effet remarquable de cet additif n'est cependant observé sur la vitesse des streamers positifs dans le n-hexane [82].

A. Beroual *et al.* [68] obtiennent une légère augmentation de la vitesse des streamers négatifs et une multiplication par 3 de celle des streamers positifs, en ajoutant 0.05 mole/l de tétraméthyle paradiphenylamine (TMPD) au cyclohexane. Il existe cependant une valeur de la concentration (0.4 à 0.5 mole/l) au dessus de laquelle aucune augmentation significative de la vitesse n'est observée [68,78].

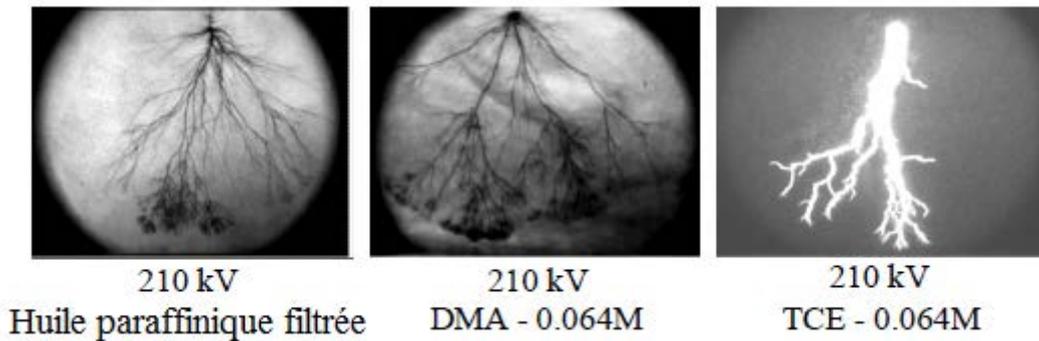


Figure 2. 4 : Effet d'additifs à bas potentiel d'ionisation (DMA) et d'additifs capteurs d'électrons (TCE) sur la propagation des streamers positifs dans une huile paraffinique [63].

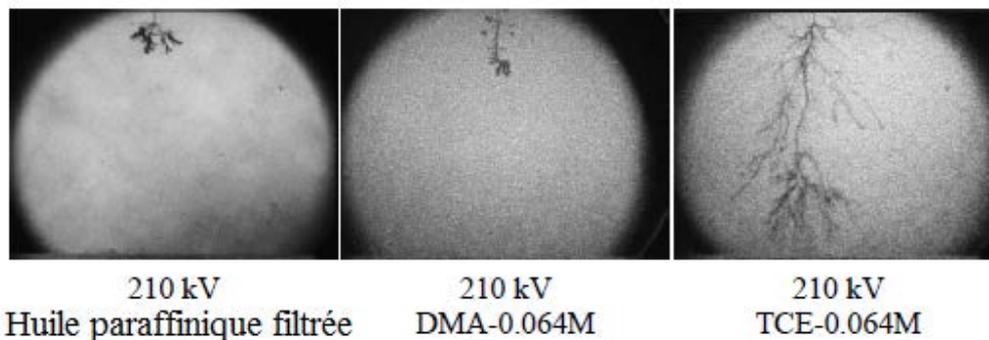


Figure 2. 5 : Effet d'additifs à bas potentiel d'ionisation (DMA) et d'additifs capteurs d'électrons (TCE) sur la propagation des streamers négatifs dans une huile paraffinique [83].

2.2.3.6 Influence du niveau de tension appliqué

Nakao *et al.* [82] ont rapporté que dans le n-hexane, les streamers positifs deviennent plus filamenteux et leur vitesse augmente lorsque la tension et/ou la concentration d'un additif comme le N,N'-diméthylaniline (D.M.A.) augmente.

Selon Yamashita *et al.* [84], 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. Cependant, d'après les résultats rapportés par ces auteurs, seul le streamer en 'buisson' est susceptible d'atteindre l'électrode opposée. Les autres se désintègrent en petites bulles après avoir parcouru une certaine distance.

Beroual [79] 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.

La vitesse des streamers négatifs est également affectée par la pente d'une rampe de tension [62]. Elle est de l'ordre de 40m/s pour une pente de $4,3 \cdot 10^{10}$ V/s et passe à 100m/s lorsque la pente est de $2,4 \cdot 10^9$ V/s. Ces résultats ont été obtenus pour une distance inter-électrodes de 2 mm et un rayon de la pointe de 3µm.

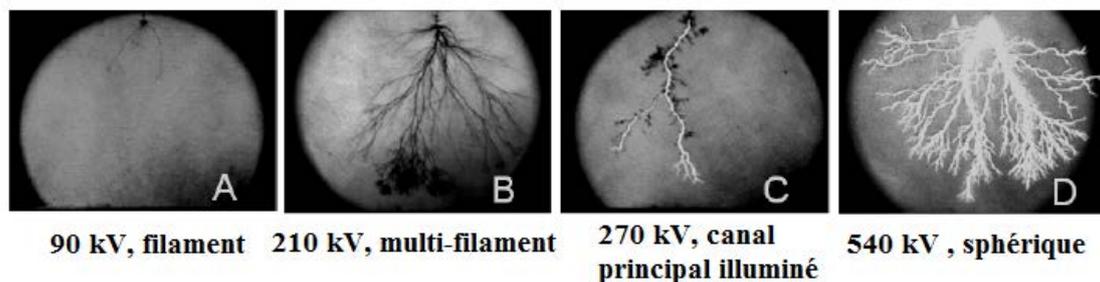


Figure 2. 6 : Les formes des streamers positifs dans une huile paraffinique avec différents niveaux de tension [63].

2.2.3.7 Influence de la géométrie des électrodes

La vitesse et le mode de propagation de streamers dépendent énormément du champ électrique, qui est fonction de la tension appliquée, de la géométrie d'électrode (rayon de courbure d'électrode pointe et distance inter électrode), de la charge d'espace provenant du volume de liquide ou des électrodes (injection). En géométrie pointe – plan, la forme de streamers peut changer avec le rayon de courbure de la pointe. Aux rayons de courbure supérieurs à la valeur critique seuls les streamers en buisson sont observés en pointe négative. Et aux rayons de courbure inférieurs à la valeur critique, les formes de streamers changent de sphérique à hémisphérique, pagode et buisson avec l'augmentation de la tension appliquée [85]. Dans les géométries d'électrode très divergentes, sous tension alternative, avec une distance inter électrode de 25 mm environ et un champ moyen $E < 10 \text{ kV/cm}$, le claquage du liquide est contrôlé par la propagation des streamers positifs, alors que dans les géométries divergentes modérés avec une distance inter électrode de l'ordre de 5 mm et un champ moyen $E < 80 \text{ kV/cm}$, le claquage du liquide est contrôlé par un streamer négatif [85].

Pour une tension donnée, le temps de retard au claquage augmente linéairement avec la distance inter électrode, alors que l'amplitude, la durée, le nombre et la longueur des streamers diminuent [85].

2.2.3.8 Influence du rayon de courbure de la pointe

Pour obtenir des valeurs de champ très élevées pour des tensions modestes (quelques kilovolts), on utilise des électrodes pointes dont les rayons de courbure r_p peuvent être inférieurs à $1\mu\text{m}$. La phase d'initiation et la forme des streamers initiés sont fortement dépendants 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 $E_0 > 1 \text{ MV/cm}$ [68]. E_0 est le champ harmonique sur la pointe assimilée à un hyperboloïde de révolution sans injection de charges.

D'après Yamashita *et al* [84], la tension de génération des streamers augmente avec le rayon de courbure de la pointe ; elle est plus élevée lorsque la pointe est positive que

lorsqu'elle est négative. Il existe un rayon de courbure critique r_c ($r_c=5$ à $6\mu\text{m}$ dans le cyclohexane [84]) à partir duquel la forme et la vitesse des streamers change. Aux rayons $r_p>r_c$, seuls les streamers en buisson sont observés en pointe négative et, aux rayons $r_p<r_c$, les formes en sphère, hémisphère et en "pagode" sont également observées. En polarité positive, lorsque la tension appliquée est faible et $r_p<r_c$, la structure des streamers est en forme de buisson, alors que pour les fortes tensions et $r_p>r_c$, elle devient filamenteuse.

2.2.4 Analyses spectrale et chromatographique

Des analyses spectroscopiques de la lumière émise par les streamers ont été menées [61, 67, 68]. Elles ont révélé dans le n-hexane, la présence d'hydrogène atomique et moléculaire et de carbone (C_2 et C_3) ainsi que des traces de métal provenant des électrodes.

Dans le cyclohexane, le mono- dibenzyle-toluène (MDBT) et le phenylxylyléthane (PXE), il a été observé la formation d'hydrogène aussi bien atomique que moléculaire et des substances carbonées [61]. La formation de ces espèces a été attribuée à la dissociation des molécules du liquide pouvant être engendrée par un mécanisme d'avalanche électronique similaire à celui observé dans les gaz.

Les analyses chromatographiques des gaz dissous, générés par les streamers, dans le PXE et le MDBT [61] ont mis en évidence l'existence de H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 et C_2H_2 . La formation de ces produits a été attribuée à la recombinaison du carbone et de l'hydrogène provenant de la dissociation et la fragmentation des molécules du liquide. Bien que les structures moléculaires des esters soient différentes de celles des huiles minérales, les résultats des tests des gaz générés par des défauts thermiques et électriques montrent que les gaz générés par les esters naturels ne sont pas différents de ceux générés par les huiles minérales. Le taux de production de gaz dissous dans les esters est inférieur à celui de l'huile minérale [34].

2.2.5 Courants et émissions lumineuses accompagnant les streamers

Le courant transitoire des streamers est généralement accompagné d'émissions lumineuses ; une bonne corrélation entre les formes de ces deux signaux

caractéristiques a été observée. L'amplitude et la forme du courant et de l'émission lumineuse correspondante dépendent de plusieurs paramètres. Pour les faibles distances inter électrodes ($d < 5\text{cm}$), les courants sont faibles et leur forme dépend essentiellement de la polarité de l'électrode pointe. En géométrie pointe-plan, le courant des streamers lents (sous forme de buisson) est constitué de pics discrets (de durée $< 10\text{ ns}$), irrégulièrement espacés, dont l'amplitude croît généralement dans le temps au fur et à mesure que le streamer se propage [68, 69]. Sous les deux polarités, l'amplitude du courant et l'intensité de l'émission lumineuse augmentent avec la vitesse de propagation du streamer. Les courants des streamers rapides sont toujours supérieurs à ceux des streamers lents.

Pour les longues distances (5 à 100cm), les courants de streamers aussi bien positifs que négatifs, sont constitués de pics irrégulièrement espacés [86-88]. L'amplitude de ces pics peut atteindre quelques ampères. La forme du courant et de l'émission lumineuse des streamers positifs et négatifs sous tension alternative est similaire à celle observée sous tensions impulsionnelle ou en créneau de tension.

De la même manière que pour le courant, la forme et l'amplitude de la charge électrique des streamers positifs et négatifs dépendent de la vitesse de ces streamers [68]. La charge globale des streamers positifs et négatifs rapides est plus importante que celle des streamers lents. Cependant, la vitesse de propagation du streamer et sa charge totale sont d'autant plus faibles que la distance inter électrodes est élevée et/ou le niveau de tension appliqué est faible [68].

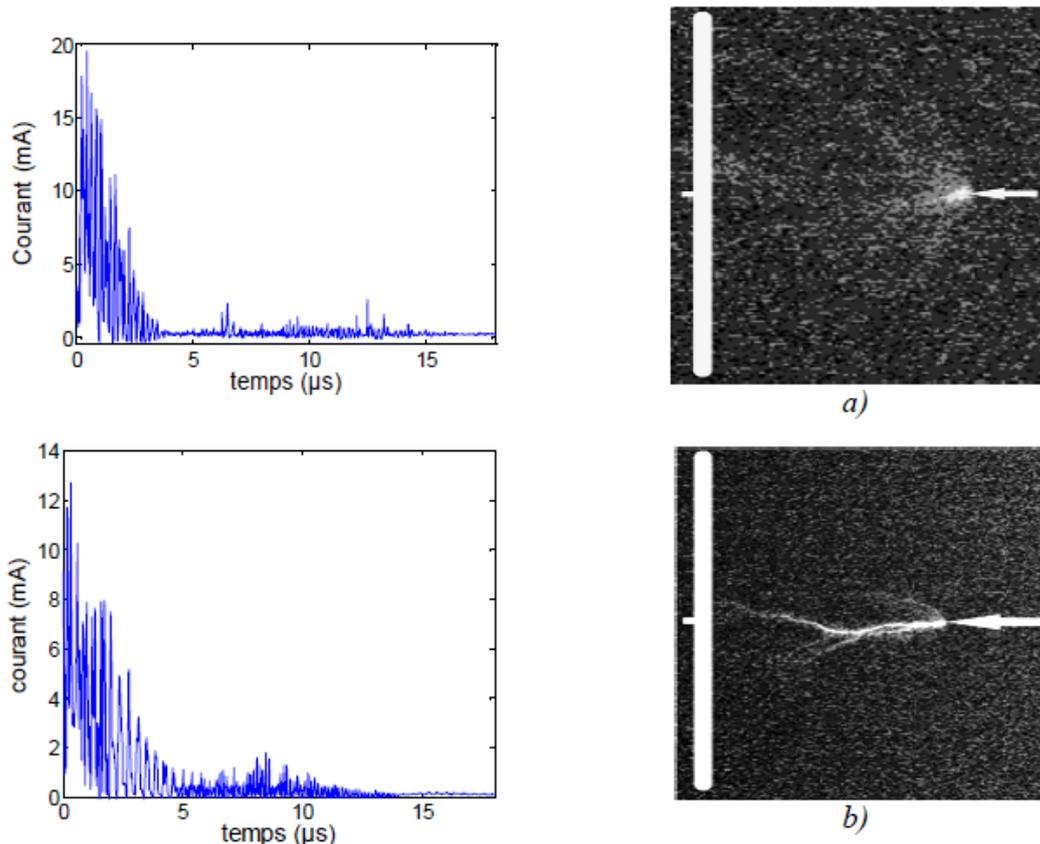


Figure 2. 7 : Courants de streamers mesurés en polarité positive, $U=60$ kV, $d=20$ mm [49].

Dang et Beroual [49] ont remarqué que les courants associés aux streamers sous impulsion de foudre et pour différents intervalles inter-électrodes ($d < 5$ cm), sont très similaires dans des huiles d'origines différentes et cela pour les deux polarités. Les courants observés sont constitués d'impulsions très courtes ; les charges correspondantes varient par paliers, ce qui est significatif d'une propagation de streamers par sauts. Les courants mesurés en polarité négative sont très similaires à ceux observés en polarité positive. Les mêmes remarques ont été observées par Sitorus et Beroual pour l'huile de Jatropha [11]. La figure 2.7 montre quelques exemples d'enregistrement de courants de streamers positifs se propageant respectivement dans une huile minérale et dans un ester.

2.3 Claquage

La connaissance de la tension de claquage pour un système d'isolation donné est l'un des paramètres essentiels pour la conception des appareils remplis d'huile et en

particulier les transformateurs de puissance. Elle a fait l'objet d'études approfondies pendant plus d'un siècle. Cependant, la plupart des études sur le mécanisme de décharge et la prédiction de la tension de claquage d'une huile de transformateur sont effectuées séparément car qu'il n'y a pas de théorie unifiée sur le claquage dans les liquides. La plupart du temps, les données expérimentales disponibles sur les décharges dans les huiles et dans d'autres liquides ne permettent pas de formuler une image globale de la décharge. Ceci est probablement dû à l'insuffisance des études sur la structure moléculaire des liquides sans parler des facteurs secondaires qui influencent le mécanisme de claquage [90]. En effet, de nombreux facteurs influencent la tension de claquage d'un diélectrique, comme l'humidité relative, la géométrie des électrodes et la polarité de la tension, la pression et la température, les particules. Kulkarni [91] a noté que "la tension de claquage d'un matériau diélectrique est une quantité statistiquement distribuée qui est fonction de ses propriétés physico-chimiques et des impuretés présentes". Dans les liquides contaminés, les mécanismes de dégradation sont moins subtils ; les particules ont tendance à s'aligner le long des lignes de champ électrique, en formant un pont entre les électrodes qui conduit au claquage. Cependant, ce mécanisme fonctionne typiquement pour des distances inter électrodes faibles et à des échelles de temps de l'ordre de la milliseconde en raison du mouvement lent des particules associés [92].

A cause de la nature statistique des tensions de claquage des diélectriques liquides, il est nécessaire d'analyser la reproductibilité des mesures sur un certain nombre de tests. Pour ce faire, on utilise diverses techniques statistiques [93-96] dont les plus utilisées sont la distribution Normale et la distribution selon Weibull.

2.3.1 Étude statistique de la tension de claquage

Les techniques statistiques paramétriques et non paramétriques ont été largement appliquées pour étudier la probabilité de claquage des diélectriques. Les tests paramétriques fonctionnent en supposant que les données que l'on a à disposition suivent un type de loi de distribution connu, alors que les tests non paramétriques ne font pas cette hypothèse. Les tests non paramétriques sont applicables dans les cas où l'adhésion des données à une distribution ne peut être supposée. Cependant, les tests non paramétriques sont moins puissants que les tests paramétriques correspondants. Par

conséquent, ils seront préférés aux tests non paramétriques. Les deux distributions paramétriques les plus utilisées sont la distribution Normale et la distribution de Weibull. Dans certains travaux, il a été constaté que les données suivent mieux la distribution normale alors que d'autres auteurs rapportent que la distribution de Weibull est plus appropriée [91]. Pour une distribution de données, un test d'hypothèse est nécessaire pour faire un choix entre deux hypothèses statistiques.

2.3.1.1 Test d'hypothèse

Un test d'hypothèse est une démarche qui a pour but d'indiquer si une affirmation concernant une population doit être acceptée ou rejetée, en fonction des preuves fournies par l'échantillon de données. Le principe des tests d'hypothèse est de poser une hypothèse de travail et de prédire les conséquences de cette hypothèse pour la population ou l'échantillon. On compare ces prédictions avec les observations et l'on conclut en acceptant ou en rejetant l'hypothèse de travail à partir de règles de décisions objectives. Un test d'hypothèse examine deux hypothèses opposées concernant une population : l'hypothèse nulle et l'hypothèse alternative.

a. Hypothèse nulle (H_0) et hypothèse alternative (H_1) :

L'hypothèse selon laquelle on fixe à priori un paramètre de la population à une valeur particulière s'appelle l'hypothèse nulle et est notée H_0 . Elle consiste à dire qu'il n'existe pas de différence entre les paramètres comparés ou que la différence observée n'est pas significative et est due aux fluctuations d'échantillonnage. N'importe quelle autre hypothèse qui diffère de l'hypothèse H_0 s'appelle l'hypothèse alternative (ou contre-hypothèse) et est notée H_1 . Cependant, cette décision est fondée sur une information partielle sur les résultats d'un échantillon. Il est donc statistiquement impossible de prendre la bonne décision à coup sûr.

Le risque consenti à l'avance et que nous notons α est la probabilité que la valeur expérimentale ou calculée de la statistique S appartienne à la région critique si H_0 est vrai. Dans ce cas, H_0 est rejetée et H_1 est considérée comme vraie.

Le risque α est celui de rejeter H_0 alors qu'elle est vraie s'appelle le seuil de signification du test et s'énonce en probabilité ainsi :

$$\alpha = P(\text{rejeter } H_0 / H_0 \text{ vraie}) \quad (2.1)$$

La valeur du risque α doit être fixée à priori par l'expérimentateur et jamais en fonction des données. C'est un compromis entre le risque de conclure à tort et la faculté de conclure. Si par exemple, on choisit $\alpha = 0.05$, cela signifie que l'on admet d'avance que la variable d'échantillonnage peut prendre, dans 5% des cas, une valeur se situant dans la zone de rejet de H_0 , bien que H_0 soit vraie et ceci uniquement d'après le hasard de l'échantillonnage. Les seuils de signification les plus utilisés sont $\alpha = 0.05$ et $\alpha = 0.01$.

2.3.1.2 Loi normale

La distribution normale ou de Gauss est la distribution la plus utilisée en statistique. La représentation graphique de sa fonction de densité a une forme en cloche. L'équation de la courbe normale de la tension de claquage est exprimée par la relation suivante :

$$P(U) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{[-\frac{1}{2}(\frac{U-U_m}{\sigma})^2]} \quad (2.2)$$

Où U : Tension de claquage mesurée,

U_m : Tension de claquage moyenne,

σ : Écart-type de la tension de claquage.

$$U_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \quad (2.3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - U_m)^2} \quad (2.4)$$

La distribution normale suppose que les données sont réparties symétriquement autour de la moyenne. La fonction de densité de cette loi est symétrique. L'étalement à gauche ou à droite de la représentation d'une série statistique ou d'une courbe représentative d'une densité de probabilité montre l'asymétrie de la répartition. Le Coefficient d'asymétrie "Skewness" nous permet de distinguer les asymétries dues aux fluctuations statistiques de celles qui sont réelles. La distribution normale est symétrique et a donc une valeur du coefficient d'asymétrie égale à zéro (Skewness=0). Un Skewness positif indique une longue queue vers la droite, et inversement, un

Skewness négatif signifie une longue queue vers la gauche. Le coefficient d'asymétrie (Skewness) peut être calculé grâce à la relation suivante :

$$s = \frac{\sqrt{n} \sum_{i=1}^n (U_i - U_m)^3}{(\sum_{i=1}^n (U_i - U_m)^2)^{3/2}} \quad (2.5)$$

Généralement, on observe le coefficient d'aplatissement (kurtosis) en même temps que celui d'asymétrie. C'est une mesure du degré de concentration des observations dans les queues. La distribution normale a une valeur du coefficient d'aplatissement de 3. Si un kurtosis < 3 , cela indique que les queues comptent moins d'observations que dans une distribution Normale. Si un kurtosis est > 3 , cela indique que les queues comptent plus d'observations que dans une distribution Normale. Le coefficient d'aplatissement (kurtosis) peut être calculé grâce à la relation suivante :

$$g = \frac{n \sum_{i=1}^n (U_i - U_m)^4}{(\sum_{i=1}^n (U_i - U_m)^2)^2} \quad (2.6)$$

2.3.1.3 Distribution de Weibull

Weibull a donné son patronyme à une loi de probabilité continue appliquée aux durées de vie. La distribution de Weibull a trouvé son origine en mécanique ; elle exprime la probabilité de rupture d'une chaîne en fonction de la probabilité. Elle est également très utilisée dans le domaine du claquage et particulièrement dans les défaillances des diélectriques quelle que soit la forme de la contrainte électrique appliquée (alternative, continue, impulsionnelle). Cette distribution est utilisée aussi bien pour l'exploitation des données du champ de claquage que celle pour le temps de claquage.

La loi de Weibull repose sur deux paramètres positifs, l'un de forme et l'autre d'échelle de temps. Leurs dénominations diffèrent selon les ouvrages et les logiciels. La loi de Weibull à trois paramètres prend en compte la "localisation", c'est-à-dire un éventuel décalage du départ de la courbe par rapport à l'origine (soit à gauche soit à droite). Le modèle de Weibull à deux paramètres est donné par la relation suivante :

$$F(x) = 1 - e^{[-(\frac{x}{a})^\beta]} \text{ avec } x \geq 0 \quad (2.7)$$

x est la variable aléatoire qui peut être soit le temps soit le champ de claquage.

α est le paramètre d'échelle ou paramètre de durée de vie.

β est le paramètre de forme.

La probabilité de claquage $F(x) = 0$ pour tout x négatif. Elle augmente continuellement avec la croissance de x . Lorsque x tend vers l'infini, la probabilité de claquage approche la certitude.

Le paramètre α est habituellement supérieur à 1 (vieillessement normal) : le taux de défaillance dans ce cas croît avec le temps. S'il est inférieur (défauts de jeunesse), c'est pendant le rodage que les risques de défaillance sont élevés.

Notons qu'il arrive que la représentation de Weibull ne soit pas une droite de pente unique. Elle peut être multimodale (avec deux ou plusieurs pentes différentes). Ce phénomène est souvent attribué à l'existence d'inhomogénéités dans le matériau qui provoquent des claquages rapides. La partie à temps long correspond cependant à un vieillissement naturel ce qui conditionne la durée de vie [49].

2.3.2 Paramètres influençant la tension de claquage

2.3.2.1 Effet de l'humidité

La présence d'humidité dans un transformateur est totalement indésirable mais sa présence ne peut être complètement éliminée à cause de l'humidité atmosphérique qui peut pénétrer à l'intérieur du transformateur ; elle peut résulter également de la décomposition de l'isolation cellulosique. L'humidité dans les huiles peut exister soit à l'état dissous, en émulsion ou sous forme de gouttelettes. La tension de claquage des huiles isolantes diminue au fur et à mesure que le taux d'humidité augmente, quelle que soit la qualité de l'huile (neuve traitée, non traitée ou usagée) et quelle que soit son origine (minérale, végétale, synthétique). La présence d'humidité dans les huiles isolantes est l'une des principales causes du claquage (figure 2.8), car elle augmente la conductivité ionique de l'huile, abaissant ainsi la tension de claquage. Dans [39], les spectres relevés par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (ou encore FTIR en anglais) ont montré des variations dans la structure des huiles lorsque les niveaux

d'humidité ont augmenté d'un niveau normal à 3000 ppm (0,3%) dans les huiles à base de palme et à 700 ppm (0,07%) dans l'huile minérale [97]. Une teneur en humidité élevée associée à des gaz dissous ayant des pressions supérieures à la pression ambiante entraîne également la formation des bulles dans l'huile. Par conséquent, la surveillance du niveau d'humidité dans l'huile est une procédure de maintenance de routine.

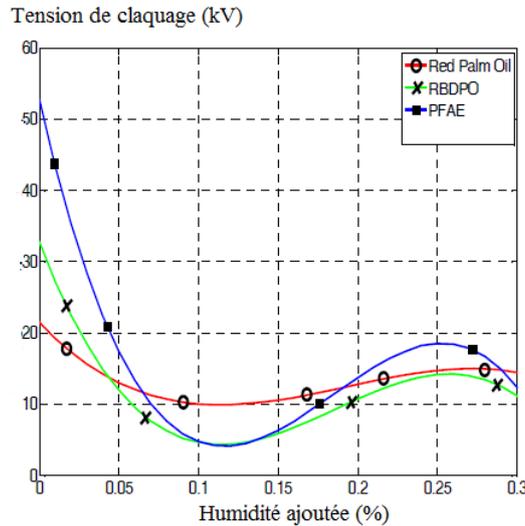


Figure 2. 8 : Effet de l'humidité sur la tension de claquage de trois huiles différentes [97].

2.3.2.2 Effet de la température et de la pression

La solubilité maximale de l'humidité dans les liquides isolants augmente d'une manière exponentielle avec la température [6] et l'augmentation de la température réduit considérablement l'humidité relative dans l'huile. La réduction de l'humidité relative conduit à une augmentation de la tension de claquage (figure 2.9). La tension de claquage en courant alternatif de l'ester naturel et de l'huile minérale augmente avec la température dans la gamme de 40-70 °C [43]. Par ailleurs, le claquage du liquide isolant est souvent initié par des bulles. L'augmentation de la température favorise également la formation de peroxyde qui présente une forte affinité pour le gaz d'hydrogène et réduit la formation de bulles dans les esters naturels [6]. C'est un autre avantage des esters naturels par rapport aux huiles minérales. Cependant, dans une autre étude [43], les auteurs ont remarqué un faible taux de changement de la tension de claquage de l'huile minérale lorsque la température augmente. Un changement de température de 20 °C à 80 °C a seulement entraîné une diminution de 7% de la tension de claquage en

courant alternatif pour l'huile minérale [3]. Généralement, la température a une influence beaucoup plus sur les esters naturels que sur les huiles minérale.

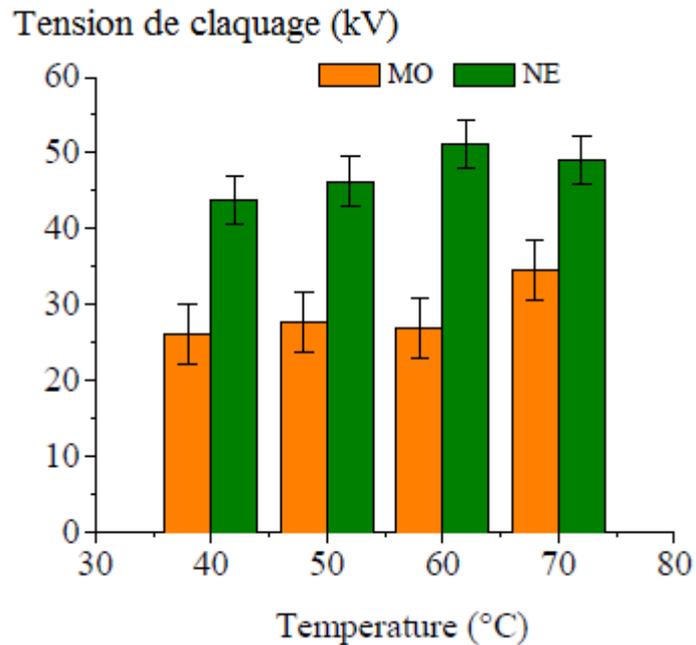


Figure 2. 9 : Effet de la température sur la tension de claquage d'une huile minérale (MO) et autre végétale (NE) [43].

La tension de claquage de l'huile augmente de façon très significative avec l'augmentation de la pression. Cette dépendance montre l'implication des phénomènes gazeux dans le mécanisme de claquage.

2.3.2.3 Effet du vieillissement

Il est bien connu que la tension de claquage d'une huile neuve, complètement purifiée (filtrée, dégazée, séchée) est plusieurs fois supérieure à celle d'une huile contaminée, vieillie. Les particules d'impuretés dans les huiles contaminées ou vieillies forment une chaîne sous l'influence d'un champ électrique et forment un pont entre les électrodes conduisant au claquage. Cependant, ce mécanisme fonctionne typiquement à des échelles de temps de l'ordre de la milliseconde en raison du mouvement lent de particules associées [98]. Le temps d'application de la tension a une influence très importante. Certains auteurs ont remarqué que les impuretés dans l'huile ne modifient pas significativement le comportement diélectrique sous tension impulsionnelle avec des durées de quelques nano ou picosecondes.

D'autres auteurs ont trouvé que les huiles vieilles ont une plus grande solubilité de l'eau en raison de la présence de composés polaires dans ces huiles, car les molécules d'eau peuvent être capturées par des liaisons hydrogène avec un groupement carboxyle (COOH) [99, 100]. Par exemple, les acides qui ont une nature polaire augmentent la concentration des ions hydrogène H^+ , ce qui augmente la capacité d'absorption d'eau de l'huile (niveau de saturation) et par conséquent provoque la diminution de l'humidité relative et donc augmente considérablement la valeur de la tension de claquage.

2.3.2.4 Influence de la géométrie des électrodes et de la polarité de la tension

La variation de la tension de claquage d'une huile donnée en fonction de l'intervalle inter-électrodes est une fonction non linéaire. La tension de claquage diminue avec l'augmentation de l'intervalle inter électrodes et le degré de non uniformité du champ. Pour un intervalle inter électrodes donné, la tension de claquage diminue avec l'augmentation de la surface des électrodes (Figure 2.10). L'influence des dimensions sur la tension de claquage de l'huile est liée à l'existence d'impuretés dans l'espace inter électrodes dont le nombre croît avec l'augmentation du volume d'huile. La tension de claquage en polarité négative est plus grande qu'en polarité positive pour un rayon de courbure d'électrode faible. Cette influence est liée à la différence dans le mécanisme d'évolution des streamers positifs et négatifs.

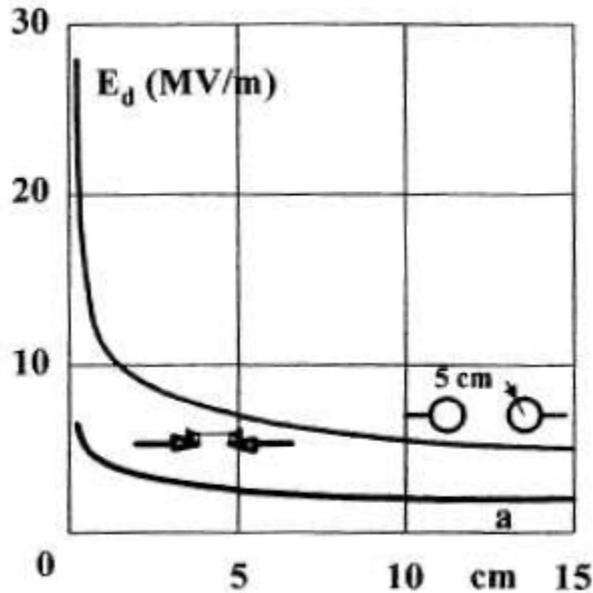


Figure 2. 10 : Variation de la tension de claquage de l'huile transformateur en fonction de l'intervalle inter électrode pour un système pointe – pointe et un système sphère – sphère [101].

2.4 Phénomène de décharges aux interfaces liquide/solide

Les décharges glissantes sont généralement observées à la surface de certains composants (traversées ou cartons) d'appareils à haute tension (HT) remplis d'huile tels que les transformateurs de puissance, condensateurs, disjoncteurs et câbles lorsqu'ils sont soumis à des champs électriques intenses. En conséquence, ceux-ci peuvent conduire à une détérioration partielle ou totale du système d'isolation nécessitant la réparation de l'appareil voire son remplacement. Ainsi, la compréhension des mécanismes physico-chimiques impliqués dans l'initiation et la propagation de telles décharges est d'un grand intérêt pour la conception et le dimensionnement des appareils à haute tension remplis d'huile ainsi que la prédiction de tels défauts. Il est donc impératif de comprendre les mécanismes et les conditions d'initiation et de développement de ces décharges pour éviter d'endommager les équipements.

2.4.1 Distribution des charges à l'interface liquide/solide

En mettant deux phases quelconques en contact, elles développent une différence de potentiel à l'interface, en particulier lorsqu'il s'agit de deux surfaces hétérogènes

(solide - fluide). Ainsi, la surface du solide acquiert une charge électrique d'un signe, celle du fluide acquiert une charge de signe opposé en vertu du principe de l'électroneutralité. D'où le nom de la double couche électrique.

Lorsque l'huile isolante est en contact avec le matériau cellulosique (carton, papier), elle se charge positivement et l'isolation solide négativement en vertu du principe suivant : le matériau dont la permittivité diélectrique est la plus faible se charge positivement et l'autre négativement [49]. Les atomes d'oxygène contenus dans les groupes hydroxyles de la cellulose ont une grande électronégativité ; la molécule de cellulose étant constituée d'une chaîne d'unités comprenant chacune trois groupes hydroxyles (-OH). Ainsi, dans la cellulose, les électrons appartenant aux atomes d'hydrogène sont attirés par les atomes d'oxygène, polarisant ainsi les atomes d'oxygène négativement et les atomes d'hydrogène positivement. La surface de la fibre de cellulose de l'isolant solide va se couvrir d'atomes d'hydrogène polarisés. Ces atomes positifs d'hydrogène ont une grande affinité pour les ions négatifs de l'huile, entraînant une absorption des ions négatifs par la surface du papier. Cette absorption conduit à la constitution d'une charge positive dans l'huile. La fibre de cellulose absorbe ainsi les composés ou impuretés de l'huile contenant des porteurs de charges en excès (ions négatifs). Il résulte de ce fait la création d'une double couche à l'interface huile/carton qui entraîne une modification de la distribution du champ électrique initial [49].

Plusieurs modèles décrivant la répartition des charges dans la double couche ont été avancés. Le premier fut celui de Helmholtz en 1853 [102-105] ; il a été amélioré par Gouy et Chapman en 1910 et plus tard par Stern [106]. Dans ces modèles, on suppose qu'une partie des ions de charges opposées présents dans le liquide est située à la surface du solide pour compenser la charge de ce dernier (Figure 2.11).

Cependant, ces modèles considèrent les ions comme des charges ponctuelles qui peuvent s'approcher indéfiniment de la surface du solide, sans prendre en compte leur diamètre ionique. Partant de ce constat, Stern considère que la différence de potentiel entre phase, qui caractérise le gradient de potentiel entre le solide et le liquide autrement dit l'interface, comporte deux parties : l'une correspondant à un saut brutal de potentiel dans les couches intimement liées au solide. Elle résulte de l'arrangement des ions et des dipôles accumulés dans une couche de liquide adsorbés sur la surface du solide.

Cette couche est appelée "sous couche ou couche compacte". Elle est caractérisée par son épaisseur. La deuxième partie correspond à la différence de potentiel entre la couche compacte et le liquide. Cette couche est appelée "couche diffuse". Notons que lorsque le liquide est au repos, la double couche se forme et se stabilise de façon à ce que l'interface reste électriquement neutre sur l'épaisseur de cette couche. Les ions positifs de la double couche sont compensés par les ions négatifs de la couche compacte. Cependant, les charges accumulées sur la surface des solides, peuvent produire des champs électriques suffisamment élevés pour donner naissance à des décharges [107].

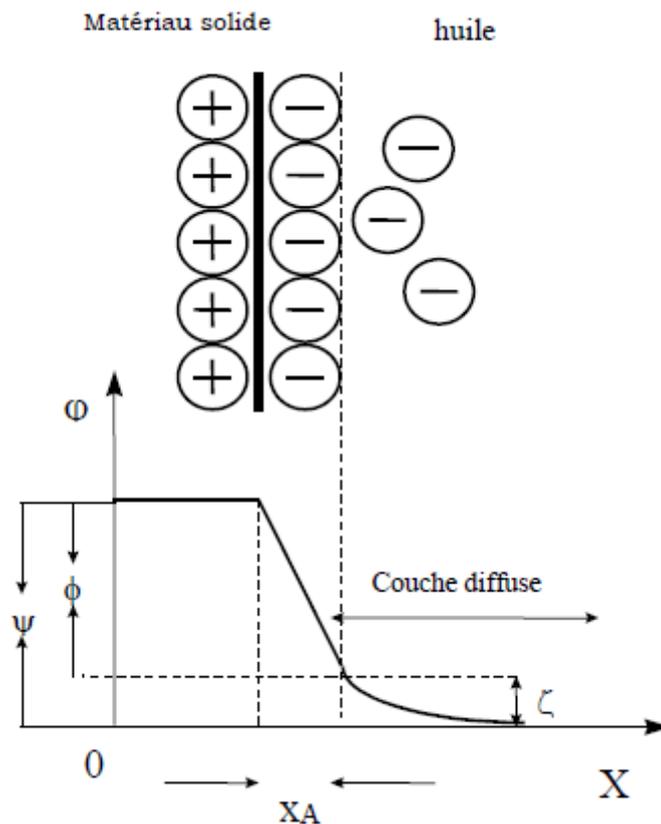


Figure 2. 11 : Schéma de la double couche selon le modèle de Stern [103].

2.4.2 Observation optique des décharges glissantes

La découverte des décharges surfaciques remonte à 1777 [102], quand Lichtenberg découvre par le fait du hasard la formation de petites figures de poudre sur une surface chargée d'électricité (figure 2.12). Ces figures qui portent son nom, appelés aussi Figures de poudre, ont suscité l'intérêt des physiciens, non seulement parce que la

variété de leurs formes offre l'un des plus beaux spectacles de la nature, mais parce qu'elles ont initié la découverte des décharges électriques et qu'elles présentent une dimension fractale.

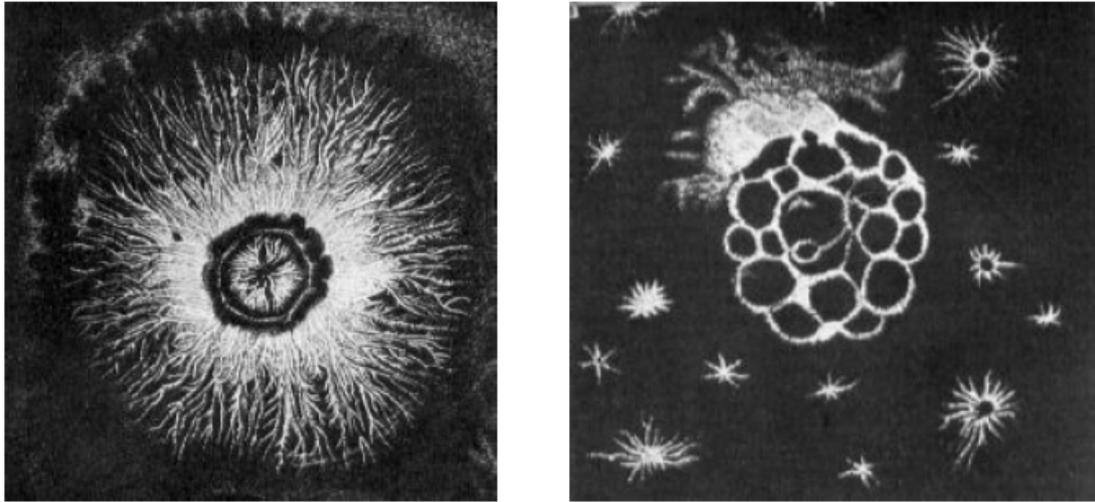


Figure 2. 12 : Figures originales de Lichtenberg 1777 [107].

La première étude des figures de Lichtenberg (figure 2.12) a été effectuée par Pederson [108] où des figures photographiques ont été utilisées pour l'étude des surtensions dans les lignes de transmission. Une interprétation du mécanisme de leur formation, basé sur les théories modernes des décharges dans les gaz a été avancée par Merrill et Von Hippel [109]. Par la suite, cette technique a été utilisée par plusieurs chercheurs pour l'étude et la caractérisation des décharges surfaciques, et de nombreuses tentatives d'explication du phénomène de décharge ont été avancées [110-115].

Plusieurs auteurs ont utilisé par la suite les techniques photographiques pour la caractérisation des décharges. L'une des techniques consiste à placer du papier photographique sur un échantillon isolant immergé dans un liquide diélectrique, et de développer le contenu en utilisant des techniques photographiques ordinaires, après une exposition à une décharge électrique. Les techniques de figures de poudre et du papier photographique sont des méthodes d'observation statiques, puisqu'elles ne permettent pas d'observer l'évolution temporelle des décharges glissantes. Néanmoins, elles restent toujours d'actualité car qu'elles sont sources d'informations très utiles à la

caractérisation des décharges ; elles ont largement contribué à la compréhension de ce phénomène.

Le moyen le plus intéressant pour suivre le développement de ces décharges et de les caractériser, consiste à conjuguer mesures optiques et mesures électriques [112]. Ainsi, en utilisant des caméras rapides, on peut observer la forme de ces décharges et mesurer leur longueur et leur vitesse ; la mesure du courant (ou de la charge électrique) associée, permet de compléter ces informations et de discuter des mécanismes responsables du développement de ces décharges.

Le suivi des décharges surfaciques peut être également effectué au travers de la détection de la lumière qu'elles émettent en utilisant un tube amplificateur de brillance couplé par fibre optique à une caméra vidéo CCD [116]. On utilise aussi des caméras à balayage de fente (streak camera) qui permettent de suivre en permanence le phénomène avec une très grande vitesse de balayage (1 cm/ns). Cette technique permet de suivre l'évolution temporelle des décharges glissantes et la dynamique des branches qui les constituent. Cependant, son utilisation est limitée car on ne peut l'appliquer qu'aux décharges se propageant sur des matériaux solides transparents.

Plus récemment, une étude de caractérisation détaillée des décharges glissantes aux interfaces liquide/solide sous différentes formes de tension a été effectuée par Kebbabi et Beroual [117, 118]. Ces auteurs ont montré que la nature et l'épaisseur du solide, la forme de la tension ainsi que la pression jouent un rôle important dans la génération, la propagation et la morphologie des décharges glissantes. La longueur des décharges surfaciques dépend de la forme de la tension appliquée, des propriétés du carton (surface, rugosité, épaisseur) et de la pression hydrostatique. Dans une autre étude sur l'analyse de la dimension fractale des décharges glissantes, Kebbabi et Beroual ont montré que la méthode de quadrillage (box counting method) (figure 2.13) est la plus adaptée pour les décharges radiales surfaciques (Figure 3.9). Cette méthode a été utilisée aussi par Dang et Beroual [49].

Dang et Beroual ont étudié les phénomènes de pré-claquage et claquage dans les huiles minérales et végétales [49]. En plus de l'analyse de la tension de claquage et des streamers, ils ont également étudié les décharges glissantes (surfiques) sur un carton immergé dans des huiles minérales et végétales. Ils ont rapporté que la morphologie, la

longueur finale et le courant des décharges surfaciques dépendent de l'amplitude et de la polarité de la tension, de l'épaisseur du solide et de la nature des huiles isolantes.

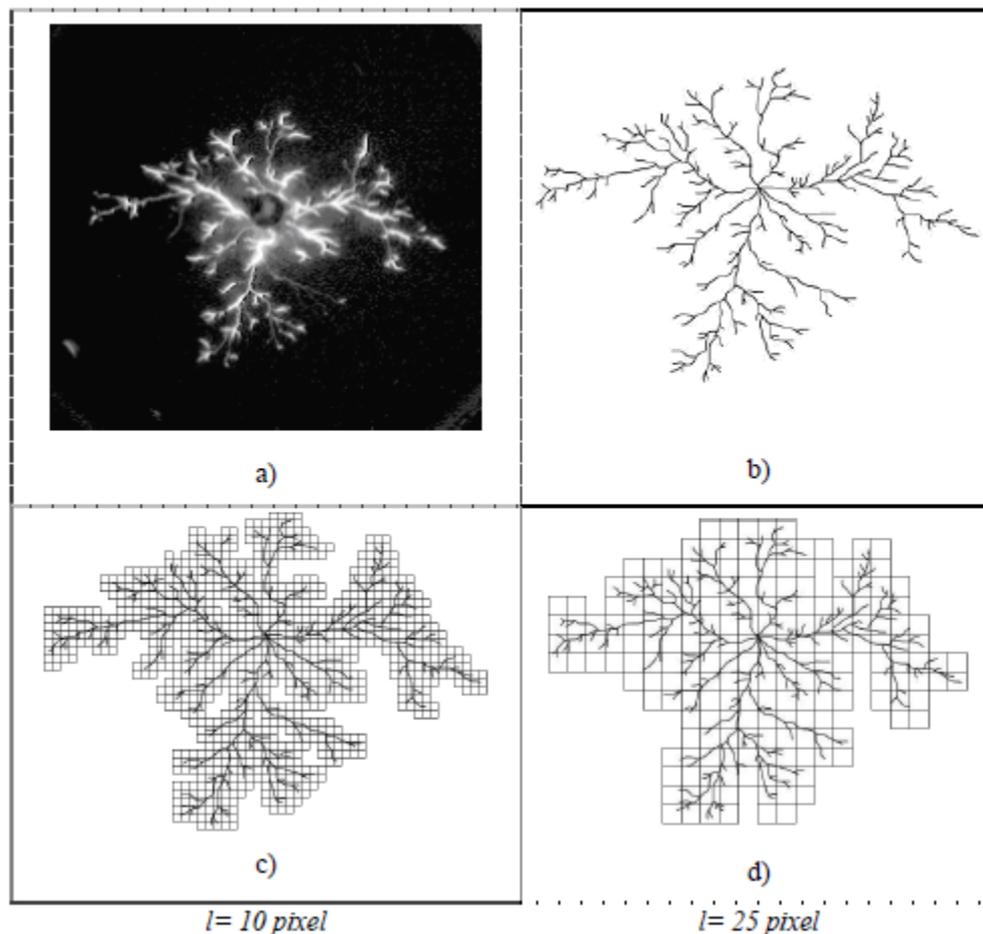


Figure 2.13 : Schéma de la méthode de quadrillage : (a) image originale, (b) image binaire correspondante, (c) images binaires couvertes par des carrés de côté $l=10$ pixels et (d) images binaires couvertes par des carrés de côté $l=25$ pixels [49].

Grâce aux oscilloscopes de numérisation en temps réel, il est possible de mesurer les courants associés aux décharges surfaciques. Kebbabi et Beroual [117], Dang [49], Sitorus [89] ont observé que les courants mesurés en polarité positive comportent une composante continue sur laquelle se superposent des impulsions très brèves. Tandis que les courants associés aux décharges surfaciques mesurés en polarité négative sont constitués d'impulsions discrètes de très haute fréquence, la composante continue apparaît lorsqu'on augmente la tension. Ils ont aussi révélé la similarité entre les courants mesurés dans les huiles végétales et minérales (figure 2.14).

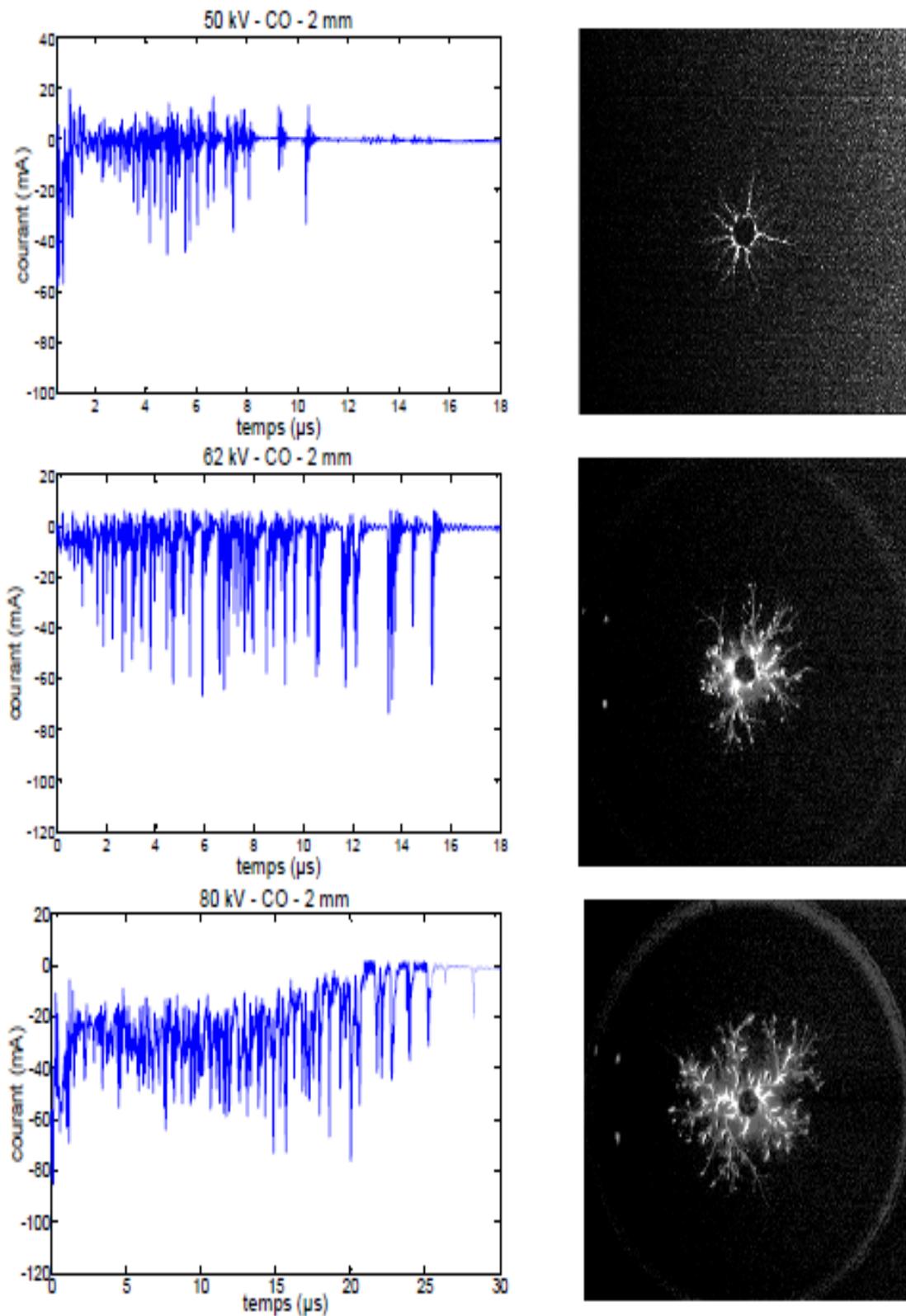


Figure 2. 14 : Décharges négatives obtenus sur une interface Colza/carton ($e=2\text{mm}$) et les courants associés pour différentes valeurs de tension [49].

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré la complexité des phénomènes de pré-claquage et claquage dans les huiles isolantes et aux interfaces solides/liquides et leur dépendance de plusieurs paramètres. Les nombreux travaux réalisés dans ce domaine ont permis d'éclaircir certaines questions qui concernent ces phénomènes. Il a été clairement établi 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. En ce qui concerne la propagation, plusieurs mécanismes ont été proposés : (1) la propagation des streamers est basée sur le phénomène d'ionisation en avalanche dans les liquides (comme dans les gaz) donnant lieu à une phase gazeuse ionisée ; (2) la propagation est basée sur le phénomène d'ionisation en avalanche dans les bulles de gaz résultant d'une vaporisation locale du liquide ; et (3) les deux mécanismes électroniques et gazeux ne peuvent agir singulièrement. Plusieurs paramètres influent sur la propagation des streamers : la géométrie des électrodes, la tension appliquée, la structure du liquide, la 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. Quant aux décharges surfaciques, la tension, l'épaisseur du solide et les propriétés des matériaux constituant l'interface solide/liquide, jouent un rôle essentiel dans leur développement.

PARTIE II

CHAPITRE 3

***INFLUENCE DES CONTRAINTES
THERMIQUE ET ELECTRIQUE SUR LA
VARIATION DES PROPRIETES D'UNE
HUILE D'OLIVE***

3.1 Introduction

Les huiles isolantes jouent un rôle fondamental dans les transformateurs de puissance, assurant à la fois la fonction d'isolant et la fonction de caloporteur, c'est-à-dire le refroidissement des points chauds (bobinages) vers l'extérieur en passant par les radiateurs.

Au cours du siècle dernier, les transformateurs de puissance ont été principalement remplis d'huile minérale non seulement pour ses propriétés isolantes et de caloporteur mais aussi pour sa bonne compatibilité avec l'isolant cellulosique. Son choix est dû principalement à sa disponibilité, son faible coût et sa longue histoire.

Cependant, le succès de l'huile minérale commence à diminuer en raison de deux causes principales. Premièrement, le besoin croissant de produits respectueux de l'environnement, l'huile minérale a une faible biodégradabilité et pourrait contaminer le sol et les eaux souterraines dans le cas d'un sérieux déversement. Dans le cas d'un accident, l'environnement sera affecté pendant une longue période avec une menace sérieuse pour les humains et les écosystèmes [2]. Deuxièmement, les produits pétroliers finiront par s'épuiser à l'avenir. La pénurie de pétrole est de plus en plus considérée comme une menace car certaines prédictions conduisent à de graves pénuries, même au milieu du vingt-et-unième siècle. Ainsi, pour atténuer ces risques, les industriels et les chercheurs académiques ont centré leurs investigations ces dernières années sur de nouvelles huiles isolantes qui respectent l'environnement, basées sur des «sources renouvelables» et ayant les mêmes performances que l'huile minérale.

Dans de tels scénarios, les esters naturels peuvent remplacer avec succès les huiles minérales. Ils ont de bonnes performances environnementales (car hautement biodégradables) et des points d'éclair et de feu plus élevés que les huiles minérales [36]. De plus, ils sont considérés comme des liquides isolants prometteurs qui pourraient prolonger la durée de vie des transformateurs en raison de leurs bonnes propriétés hydrophiles leurs permettant de réduire le vieillissement du papier cellulosique.

Il est donc fondamental de connaître le comportement de ces huiles lorsqu'elles sont soumises à des contraintes thermiques et électriques. Ce qui permettra d'envisager ou non leur introduction dans les transformateurs de puissance et de se prémunir d'outils de diagnostic sur des composants haute tension remplis d'huiles végétales.

Ce chapitre présente l'influence des décharges électriques et des contraintes thermiques sur la variation des propriétés physico-chimiques et électriques d'une huile d'olive. Cette dernière pourrait constituer un substitut sérieux, respectueux de l'environnement et renouvelable pour les huiles minérales. Nous étudierons en particulier l'indice de couleur, la tension de claquage, teneur en eau, la permittivité diélectrique, le facteur de dissipation, la résistivité, l'indice d'acidité, la viscosité, le point d'éclair. Nous présentons d'abord les différentes techniques d'essais et de mesures utilisées permettant d'étudier les variations des paramètres physico-chimiques de l'huile d'olive en fonction du temps de vieillissement et le nombre de décharges qu'elles ont subies au laboratoire. Nous exploiterons ensuite les résultats en discutant les différents mécanismes pouvant être impliqués dans la variation des paramètres afin de mettre en évidence l'influence de différents types de vieillissement sur l'huile d'olive. La spectroscopie dans le domaine fréquentiel (FDS) sera également réalisée pour évaluer son comportement dans une large gamme de fréquences (20 Hz à 1 MHz).

3.2 Techniques expérimentales

Pour le vieillissement thermique, neuf échantillons d'huile d'olive sont conservés dans des bouteilles scellées en verre de 1 litre. Ils sont tous soumis à une température constante de 110 °C avec des durées comprises entre 0 et 716 heures. Avant utilisation, les bouteilles sont d'abord lavées avec de l'acide sulfurique suivi d'un autre lavage avec de l'eau chaude et du savon. Après cela, ils sont séchés dans une étuve à 100 °C pendant 48 heures.

Ensuite, on a essayé à faire subir à l'huile une série de décharges, allant de 100 à 1600 décharges en utilisant un transformateur délivrant au secondaire une tension maximale de 15 kV. Les décharges sont réalisées sur les échantillons d'huile dans une

cellule d'essai de 500 ml contenant un système d'électrodes pointe-plan en acier. L'intervalle inter-électrode a été réglé à 1 mm et le rayon de courbure de l'électrode pointe est de 10 μm . Après chaque série de décharges (d'environ 50 à 200 nC / décharge), les propriétés électriques et physico-chimiques sont mesurées. Les paramètres de l'huile d'olive ont été mesurés au cours de l'étude de vieillissement (thermique, électrique) selon les normes internationales. Les détails sont fournis dans le tableau 3.1. Tous les essais ont été effectués dans le centre de recherche et du développement de l'électricité et du gaz (CREDEG).

Tableau 3. 1 : Paramètres étudiés, normes correspondantes et valeurs recommandées / limites.

Tests	Normes	Valeurs recommandées / limites pour les huiles végétales (norme IEEE C57.147)	Valeurs recommandées / limites pour les huiles minérales (IEC 60296)
Couleur	ASTM D1500	1.0	1.0
Acidité (mg KOH/g)	ASTM D974	Max. 0.06	Max. 0.01
Viscosité (cSt) à 40 °C	ASTM D 445	50 mm ² /s	12 mm ² /s
Point d'éclair (°C)	ASTM D92	Min. 275 °C	Min. 135 °C
Teneur en eau (ppm)	IEC 814	200 ppm à 20 °C	40 ppm
Tension de claquage (kV)	IEC 60156	Min. 35 kV (2 mm gap)	Min. 30 kV
Permittivité relative	IEC 60247	3.1	1.5 $\epsilon_r > 2.5$
Tan δ	IEC 60247	Max. 4.0 à 100 °C	Max. 0.5 à 90 °C
Résistivité ($\times 10^9 \Omega\text{m}$)	IEC 60247	Min. 60 à 90 °C	Min. 60 à 90 °C

Les mesures de la spectroscopie dans le domaine fréquentiel (FDS) sont effectuées sur des échantillons d'huile dans une cellule d'essai de 500 ml, à température ambiante ($29 \pm 0,1$ ° C), à l'aide d'un appareil RLC mètre de haute

précision (GW Instek : LCR-8110G) capable de mesurer des valeurs de la permittivité sur une gamme de fréquences allant de 20 Hz à 10 MHz. La cellule d'essai contient un système d'électrodes plan-plan en acier ; les électrodes sont de type Rogowski, la distance entre les électrodes est de 0,1 mm. Le diamètre de l'électrode d'essai est de 32,8 mm. La cellule de test utilisée est représentée sur la figure 2. Pour éviter l'influence du comportement non-linéaire, la valeur efficace de la tension appliquée est égale à 1 V. Avant l'insertion de l'échantillon d'huile, la cellule et les électrodes ont été nettoyées avec de l'acétone, lavées avec de l'eau dé-ionisée et placées dans une étuve à 100 ° C pendant 2 h.

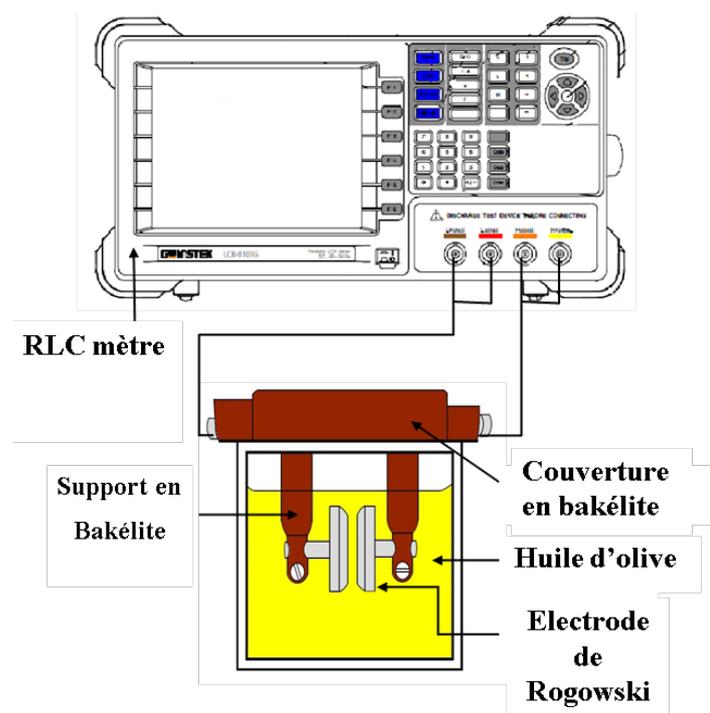


Figure 3. 1 : Schéma du dispositif expérimental pour les mesures de la spectroscopie dans le domaine fréquentiel (FDS).

3.3 Résultats expérimentaux

3.3.1 Vieillessement thermique

Pour l'étude du vieillissement thermique, nous utilisons une huile d'olive extra vierge. Ses propriétés initiales sont données dans le tableau 3.2. L'huile d'olive et les esters naturels en général sont très hygroscopiques [6, 34]. Les esters naturels peuvent absorber de l'eau jusqu'à 1200 ppm ou plus à saturation et à température ambiante

[2] ; ceci explique la valeur élevée de la teneur en eau dans l'huile considérée. Pour une meilleure interprétation, les résultats seront regroupés en fonction de leur inter-corrélation apparente.

Tableau 3. 2 : Propriétés initiales de l'huile soumise à un vieillissement thermique

Propriétés	valeurs
Couleur	1.3
Acidité (mg KOH/g)	0.415
Viscosité (cSt) à 40 °C	36.27
Point d'éclair (°C)	226.5
Teneur en eau (ppm)	513
Tension de claquage (kV)	27
Permittivité relative	3.28
Tan δ	0.046
Résistivité ($\times 10^9 \Omega m$)	3.2

3.3.1.1 Variation de l'indice de couleur

L'indice de couleur donne des informations sur la modification de l'aspect visuel de l'huile. Il est très utile pour le contrôle de la qualité et pour l'évaluation de l'état d'une huile en fournissant des indications sur le degré de dégradation ou de contamination possible au cours du processus de vieillissement. La figure 3.2 donne les variations de l'indice de couleur en fonction du temps de vieillissement. On constate que pour l'huile d'olive étudiée, il n'y a pas de changement significatif dans la couleur et dans la transparence pendant le processus de vieillissement thermique accéléré. L'indice de couleur varie entre 1,3 et 1,5, ce qui correspond à une couleur jaune conformément à la norme IEEE C57.152-2003. Cela peut être dû à une contamination limitée ou à la nature des sous-produits chimiques résultants qui ont un effet non significatif sur le changement de la couleur.

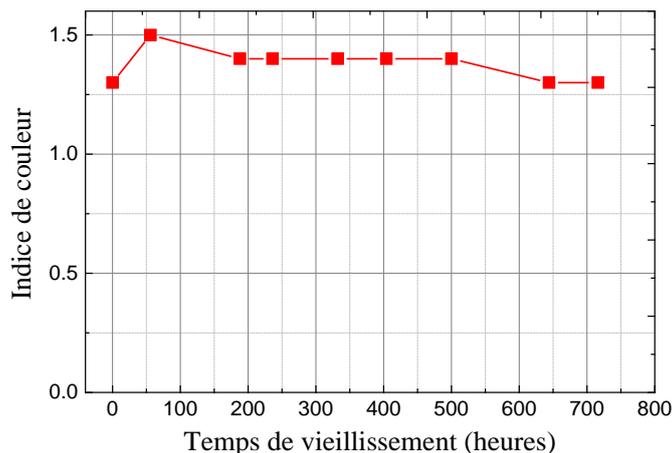


Figure 3. 2 : Variation de l'indice de couleur en fonction du temps de vieillissement

3.3.1.2 Variation de la teneur en eau

Avec le temps, les quantités d'eau élevées peuvent jouer un rôle essentiel dans la durée de vie du transformateur, car elles affectent les propriétés diélectriques de l'huile et entraînent la défaillance du transformateur. L'humidité est considérée comme «l'ennemi principal» de l'isolation des transformateurs [119] ; elle peut changer rapidement dans un transformateur en fonctionnement.

Avec le vieillissement thermique, la teneur en eau augmente au premier stade du vieillissement (après 90 h). Après cela, la teneur en eau diminue comme indiqué dans la figure 3.3. Plus la période de vieillissement est longue, plus la diminution de la teneur en eau est importante pour atteindre une valeur plus faible qu'avant le vieillissement (110 ppm après 700 h). Il convient de noter qu'au début des expériences, les bouteilles sont remplies sans précaution particulière en ce qui concerne la température et l'humidité à l'intérieur de la salle d'expérimentation. De plus, des quantités importantes d'oxygène peuvent s'infiltrer dans les bouteilles avec le remplissage ; cela pourrait justifier l'augmentation de la teneur en eau au début du processus de vieillissement.

D'autre part, pour des périodes de chauffage plus longues, l'humidité réagit avec l'ester naturel (qui est connu pour sa plus faible stabilité au vieillissement [43]) par hydrolyse [43, 44]. La réaction consomme de l'humidité dissoute dans le liquide [33,

43]. En plus de l'évaporation due à l'influence de la température, cet effet justifie la diminution de la teneur en eau pendant le reste du vieillissement. Un comportement très similaire a été rapporté dans l'huile Biotemp (huile de tournesol à haute teneur en acide oléique) [39] sous un vieillissement thermique de 130 °C ; la teneur en eau dans cette huile augmente de 380 à 500 ppm pour ensuite diminuer et se stabiliser à 90 ppm après 2000 h. Une variation plus fluctuante a été rapportée dans l'huile minérale où elle passe de 17 à 37 ppm aux premiers instants pour diminuer et ré-augmenter entre 12 et 47 ppm.

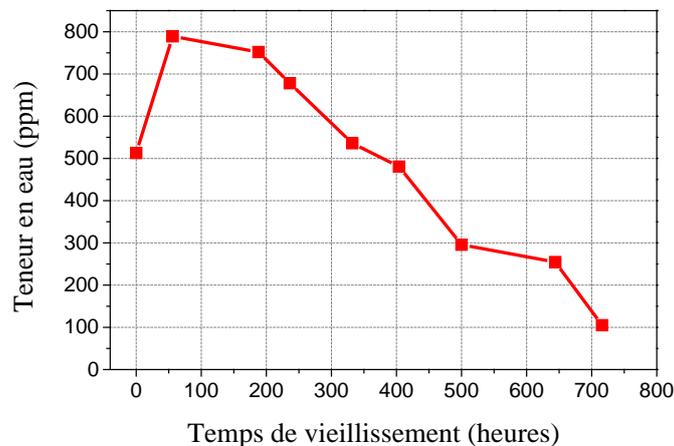


Figure 3. 3 : Variation de la teneur en eau en fonction du temps de vieillissement.

3.3.1.3 Variation de la tension de claquage

La tension de claquage (BDV) est le paramètre le plus important et le plus souvent vérifié dans un liquide isolant. Elle est très sensible à la qualité de l'huile. Les paramètres qui déterminent la BDV de l'huile sont l'humidité, les bulles de gaz (air en particulier), les particules conductrices et non conductrices et l'acidité du liquide [7].

Dans les esters naturels, l'effet de l'eau sur la tension de claquage est inversement proportionnel à l'humidité relative et non à l'humidité absolue de l'eau dans l'huile [120]. Cependant, les limites de saturation sont beaucoup plus élevées dans les esters naturels, et donc l'humidité relative sera généralement beaucoup plus faible. Ainsi, pour une teneur en eau élevée, il a été constaté que la tension de claquage d'une huile végétale est supérieure à celle de l'huile minérale pour la même teneur en eau absolue

[31]. Ceci est un avantage des huiles végétales par rapport aux huiles minérales. La figure 3.4 représente les résultats de la tension de claquage de l'huile d'olive pendant la période de vieillissement.

Il y a une augmentation significative de la tension de claquage qui passe de 27 kV avant le vieillissement à 79 kV après le vieillissement. Il est bien connu que la tension de claquage de l'huile peut être influencée par de nombreux paramètres, en particulier l'eau et l'acidité comme mentionné ci-dessus. Lorsque ces paramètres sont tous présents, il devient difficile d'identifier l'effet individuel de chacun d'entre eux séparément. Dans notre étude, les résultats sont corrélés avec la réduction de la teneur en eau. L'humidité a eu un effet dominant sur la tension de claquage. La présence d'humidité dans les huiles isolantes est l'une des principales causes de claquage à cause de l'augmentation de la conductivité ionique de l'huile et de la diminution de la tension de claquage. Les résultats au début du vieillissement sont quelque peu inattendus lorsque la tension de claquage a tendance à diminuer avec la température. Quel que soit l'origine d'un tel comportement, une bonne corrélation est trouvée entre la tension de claquage et la teneur en eau dans l'huile. La valeur impressionnante de la tension de claquage à la fin du vieillissement (79 kV) est supérieure à celle des huiles minérales courantes. Cependant, lorsque la valeur initiale de la teneur en eau est relativement faible, la tension de claquage diminue au cours du vieillissement thermique. Elle est réduite de 6,25% (de 80 à 75 kV) [37] après 756 h de vieillissement à 120 °C.

3.3.1.4 Variation de l'indice d'acidité

L'acidité est la présence de dérivés acides formés au cours du vieillissement en particulier lors du mécanisme d'oxydation [33, 40]. Elle est évaluée par l'indice d'acidité mesuré en mg de KOH nécessaire pour neutraliser 1g d'huile [121]. La présence d'acides affecte non seulement l'huile [122], mais attaque aussi l'isolation solide et les parois métalliques internes des transformateurs [33], ce qui laisse apparaître d'importantes concentrations de porteurs de charges libres conduisant ainsi à diminuer la rigidité diélectrique et à augmenter le facteur de perte [38, 123].

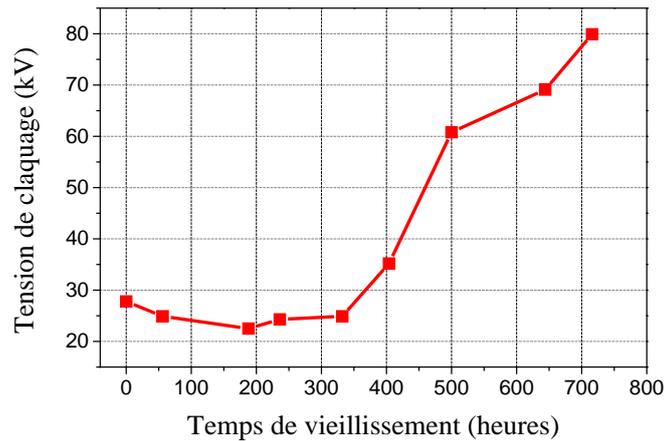


Figure 3. 4 : Variation de la tension de claquage en fonction du temps de vieillissement.

Traditionnellement, l'indice d'acidité était utilisé pour évaluer les performances de la stabilité à l'oxydation de l'huile minérale [44], mais il ne convient pas de l'utiliser pour évaluer la stabilité à l'oxydation dans les huiles végétales, puisque les acides sont non seulement générés par oxydation, mais aussi par hydrolyse ; il n'y a pas d'hydrolyse dans l'huile minérale.

Il n'est pas surprenant de voir l'augmentation de l'acidité en fonction du temps de vieillissement (figure 3.5). Ceci est en relation avec la biodégradabilité de l'ester naturel et aussi la réaction d'hydrolyse [33, 44]. En effet, l'indice d'acidité initial est assez élevé par rapport aux exigences IEEE Std C57.147 pour les huiles naturelles. Il représente le point le plus faible des huiles végétales. Stabiliser ce paramètre représente le principal défi pour les chercheurs.

Comme les tests de vieillissement ont été effectués dans des bouteilles fermées, on s'attend à ce que l'hydrolyse domine la formation d'acides [33]. Cela correspond bien à la diminution de l'humidité (figure 3.3). Cependant, avec la possibilité d'une infiltration d'oxygène dans les bouteilles, l'effet d'oxydation ne doit pas être exclu; l'oxydation peut changer les huiles en formant des groupes polaires et des acides [31, 46]. En raison de la valeur élevée de la teneur en eau dans l'huile d'olive et des limites élevées de la solubilité des molécules d'acide dans les esters naturels [44], l'indice d'acidité dans l'huile d'olive continue d'augmenter avec le temps de vieillissement. L'augmentation lente de l'indice d'acidité au début pourrait être causée par la

résistance des antioxydants naturels présents dans l'huile d'olive comme indiqué dans [124].

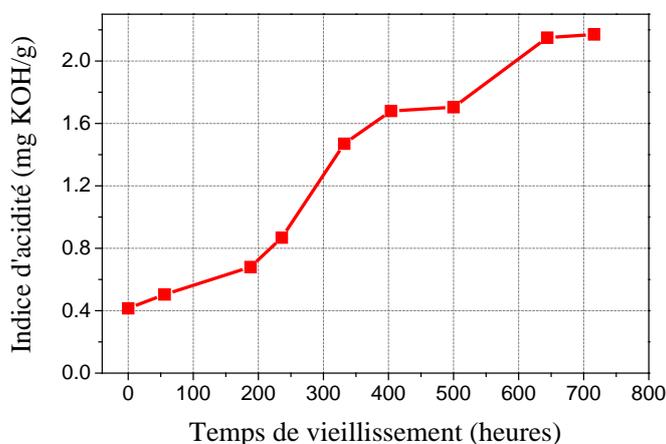


Figure 3. 5 : Variation de l'indice d'acidité en fonction du temps de vieillissement.

3.3.1.5 Variation de la viscosité

Pour les transformateurs de puissance, la viscosité du liquide isolant est un paramètre d'une importance particulière car l'efficacité de refroidissement du transformateur dépend de la viscosité de l'huile [44]. Le vieillissement des esters naturels en présence d'air conduit à l'oxydation, et donc à une forte augmentation de la viscosité [32]. D'autre part, dans des conditions d'étanchéité (absence d'air), la viscosité des esters naturels montre un comportement stable [31]. Plusieurs chercheurs ont indiqué que la viscosité réagissait à l'oxydation plutôt qu'à l'hydrolyse [32]. Les esters naturels avec leur faible stabilité à l'oxydation sont recommandés pour une utilisation dans des transformateurs scellés pour supprimer l'oxydation [3].

La figure 3.6 montre les variations de la viscosité en fonction du temps de vieillissement. On observe une augmentation de 36 à 39cSt. Comme discuté ci-dessus, la viscosité de l'ester naturel peut augmenter significativement dans le cas d'une sévère oxydation ; l'influence de la contrainte thermique sur la viscosité des esters naturels est négligeable [44]. Cela confirme qu'il y avait une infiltration d'oxygène à l'intérieur des bouteilles au début pendant le remplissage comme mentionné précédemment. L'oxygène attaque les doubles liaisons carbone-carbone (C=C) et

conduit à la rupture des chaînes d'acides gras. Ainsi, les molécules d'ester sont fragmentées en éléments plus petits, et la polymérisation des molécules restantes provoque une augmentation progressive de la viscosité [31, 32].

Il convient de noter que les esters naturels s'oxydent d'une manière différente par rapport aux huiles minérales ; cela est dû à la différence des compositions chimiques des huiles. L'oxydation des esters naturels ne génère pas de la boue, mais a tendance à polymériser. Par conséquent, la polymérisation peut être considérée comme une augmentation de la viscosité [42].

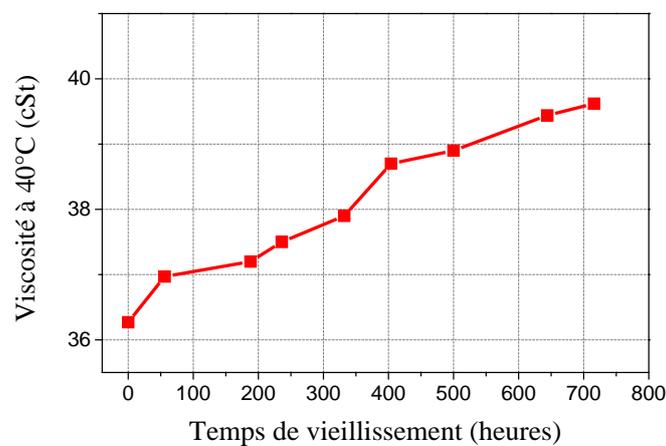


Figure 3. 6 : Variation de la viscosité en fonction du temps de vieillissement.

3.3.1.6 Variation de la permittivité

La permittivité relative caractérise la polarité des molécules. La permittivité du liquide peut changer au cours du processus de vieillissement. Cette variation n'est pas souhaitée par les fabricants des transformateurs car cela perturberait la distribution du champ électrique [44].

Pour l'huile étudiée, la permittivité relative diminue avec le temps de vieillissement de 3,28 à 2,8 (figure 3.7). Cela peut être corrélé avec la baisse constatée de la teneur en eau. Comme l'eau est un liquide fortement polaire, son élimination se traduit aussi par une baisse de la permittivité diélectrique.

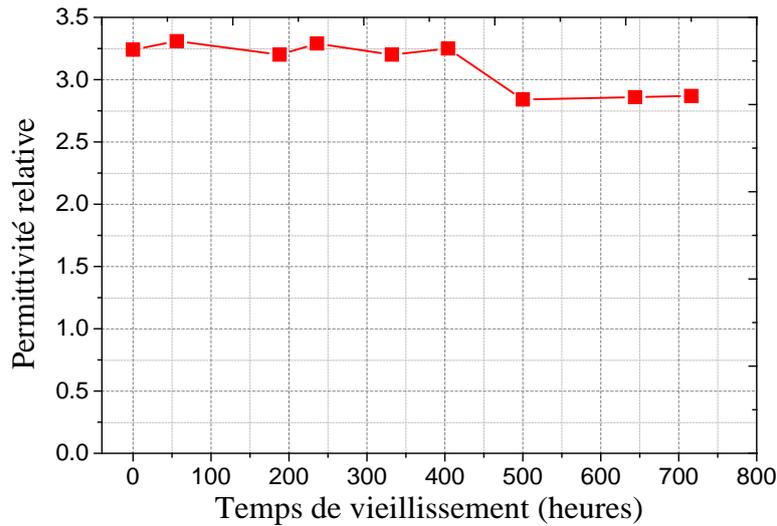


Figure 3. 7 : Variation de la permittivité en fonction du temps de vieillissement.

3.3.1.7 Variation du facteur de dissipation et de la résistivité

Le facteur de dissipation ($\tan \delta$) est un paramètre important pour évaluer la qualité de l'huile isolante. Il est directement lié à la résistivité. Avec le vieillissement thermique, les valeurs de $\tan \delta$ et de la résistivité sont bien corrélées avec la teneur en eau. La diminution de la teneur en eau conduit à une diminution de $\tan \delta$ et à une augmentation de la résistivité (figures 3.8 et 3.9). Des résultats similaires ont été rapportés pour d'autres huiles [37, 125].

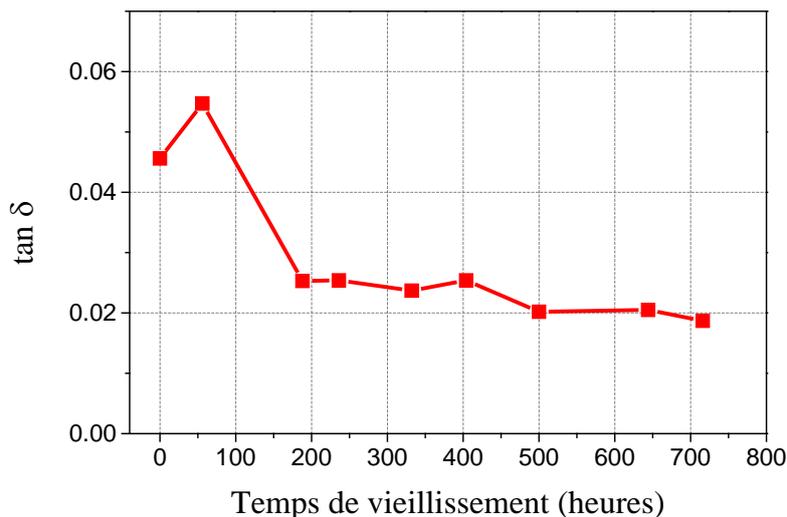


Figure 3. 8 : Variation du facteur de perte en fonction du temps de vieillissement

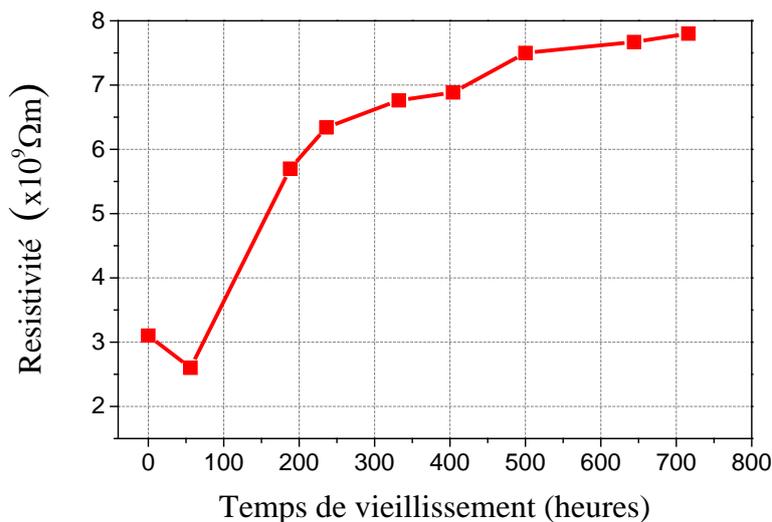


Figure 3. 9 : Variation de la résistivité en fonction du temps de vieillissement.

3.3.1.8 Variation du point d'éclair

En comparaison avec les huiles végétales courantes, l'huile étudiée présente un point d'éclair relativement bas, mais toujours supérieur à celui des huiles minérales. Ce point d'éclair bas peut être dû aux conditions de conservation et de stockage. De plus, l'exposition à la lumière peut provoquer une photo-oxydation ; la plupart des huiles contiennent des photo-sensibilisateurs naturels qui sont activés lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Les processus de photo-oxydation et d'auto-oxydation photo-lytique forment des produits d'oxydation primaire (hydro-péroxydes), et la décomposition des hydro-péroxydes produit des oxydants volatiles secondaires qui diminuent le point d'éclair [124]. Notons que d'autres auteurs ont trouvé un point d'éclair élevé dans l'huile d'olive (au-dessus de 300 °C) [35].

La figure 3.10 montre l'évolution du point d'éclair en fonction du temps de vieillissement. On remarque que le point d'éclair diminue avec le temps de vieillissement. Cela peut être dû en partie au processus d'oxydation causé par l'infiltration d'oxygène comme mentionné précédemment. Ensuite, la température joue un rôle d'un catalyseur en accélérant l'oxydation de l'huile avec la production d'hydro-péroxydes qui sont susceptibles de subir une oxydation ou une décomposition plus poussée. Ces réactions produisent une gamme de produits volatiles et non volatiles, tels que les aldéhydes, les cétones, les acides et les alcools [124]. Les produits volatiles diminuent le point d'éclair de l'huile d'olive.

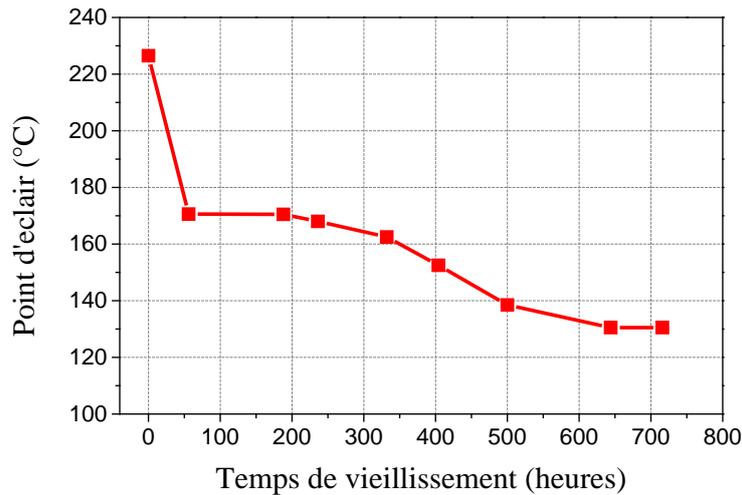


Figure 3. 10 : Variation du point d'éclair en fonction du temps de vieillissement.

3.3.2 Influence des décharges électriques

Pour l'influence des décharges électriques, une huile d'olive lampante a été utilisée. L'huile d'olive lampante est définie comme une huile d'olive vierge ayant une acidité libre, exprimée en acide oléique, de plus de 2 g pour 100 g. Ses propriétés initiales sont résumées dans le tableau 3.3. Dix échantillons sont préparés pour l'étude. Après chaque série de mesure, la couleur, la teneur en eau, l'indice d'acidité, la viscosité, la permittivité relative, le facteur de dissipation, la résistivité et le point d'éclair sont mesurés. La variation des tensions de claquages mesurés fluctue d'un écart-type d'environ $\pm 20\%$. Pour le premier échantillon, la tension de claquage moyenne est de 35 kV.

3.3.2.1 Variation de l'indice de couleur

La figure 3.11 montre l'évolution de l'indice de couleur en fonction du nombre de décharges. On remarque que l'indice de couleur a augmenté de 0.9 à 1 après 400 décharges. Cette modeste variation peut être le résultat d'une carbonisation de l'huile suite aux claquages. La faible détérioration de l'aspect visuel représente une bonne caractéristique due à la capacité de l'huile à dissoudre les produits de dégradation. A noter qu'on n'a pas constaté de dépôt solide dans l'huile.

Tableau 3. 3 : Propriétés initiales de l'huile soumise à un vieillissement électrique

Propriétés	valeurs
Couleur	0.9
Acidité (mg KOH/g)	4.34
Viscosité (cSt) à 40 °C	38.36
Point d'éclair (°C)	178.5
Teneur en eau (ppm)	655
Tension de claquage (kV)	35
Permittivité relative	2.89
Tan δ	0.097
Résistivité ($\times 10^9 \Omega m$)	1.6

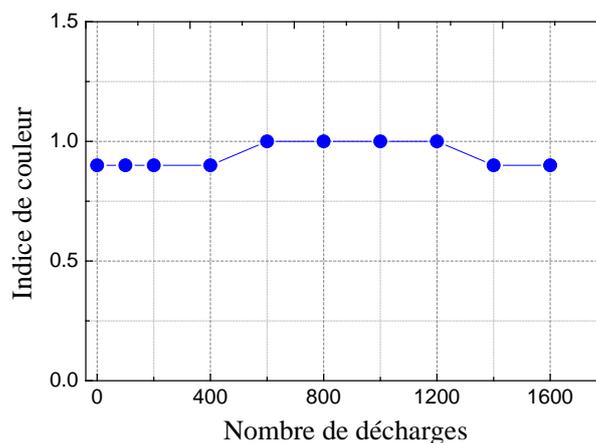


Figure 3. 111 : Variation de l'indice de couleur en fonction du nombre de décharges.

3.3.2.2 Variation de la teneur en eau

La figure 3.12 montre la variation de la teneur en eau en fonction du nombre de décharges. La teneur en eau présente une variation fluctuante. Cela peut être dû à la contamination de l'huile d'olive par l'air lors des mesures même avec les précautions que nous avons prises. Un problème similaire a été signalé dans [35], où des échantillons d'huile d'olive absorbaient l'humidité lorsqu'ils étaient laissés à l'air libre, provoquant une fluctuation des résultats obtenus. Dans ce type d'huile, il faut veiller à éviter tout contact avec l'air. De plus, la technique de mesure (méthode de titrage Karl

Fischer selon les normes IEC 60814 et ASTM D1533 qui consiste à prendre la moyenne de trois prélèvements à partir de différents endroits de l'échantillon) peut être source d'erreur.

Cependant, il y a une nette tendance à la baisse avec l'application de décharges électriques. La réduction de la teneur en eau avec l'application des décharges est principalement due à l'évaporation des traces d'eau qui sont présentes dans la zone de décharge. Un résultat similaire a été rapporté dans une huile minérale soumise à des décharges de même niveau énergétique [126].

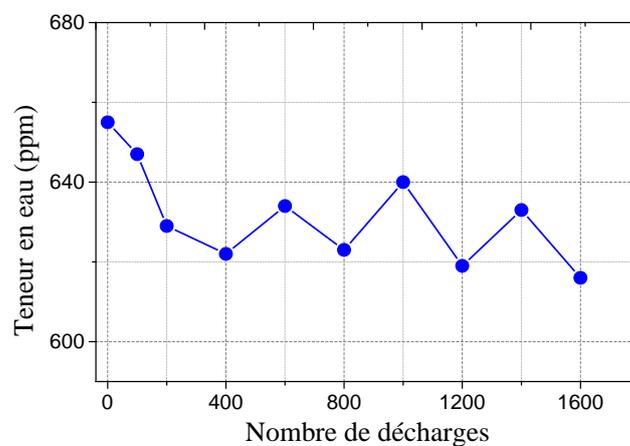


Figure 3. 12 : Variation de la teneur en eau en fonction du nombre de décharges.

3.3.2.3 Variation de l'indice d'acidité et de la viscosité

Un résultat inattendu a été trouvé dans cette expérience où l'indice d'acidité de l'huile diminue avec le nombre de décharges (figure 3.13). Cela peut être attribué aux changements de la structure des molécules dans l'huile. Lorsqu'un claquage se produit, il modifie localement l'huile. L'énergie dissipée provoque la perturbation de la structure moléculaire de l'huile [34].

Plusieurs chercheurs ont indiqué que l'indice d'acidité de l'huile d'olive ou d'autres huiles végétales est élevé par rapport à l'huile minérale. Cela est dû aux différences de la structure chimique [44]. La limite maximale de l'indice d'acidité des nouvelles huiles à base d'esters naturels est de 0,06 (mg de KOH / g) [127] alors qu'elle est de 0,3 pour les vieilles huiles en service [121]. Par conséquent, la valeur de l'indice

d'acidité de l'huile d'olive sous les deux contraintes (thermique et électrique) n'est pas conforme à la norme.

La figure 3.14 montre la variation de la viscosité en fonction du nombre de décharges. Celle-ci diminue avec le nombre de décharges. Cela est en corrélation avec les résultats d'indice d'acidité. Comme expliqué ci-dessus, le changement de la structure moléculaire de l'huile peut-être la raison de cette diminution.

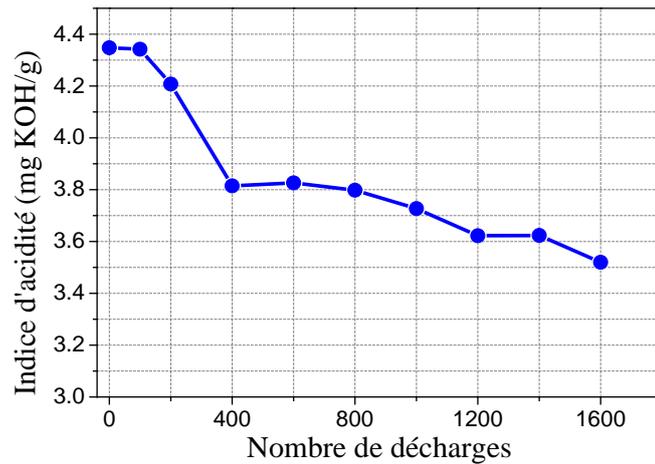


Figure 3.13 : Variation de l'indice d'acidité en fonction du nombre de décharges

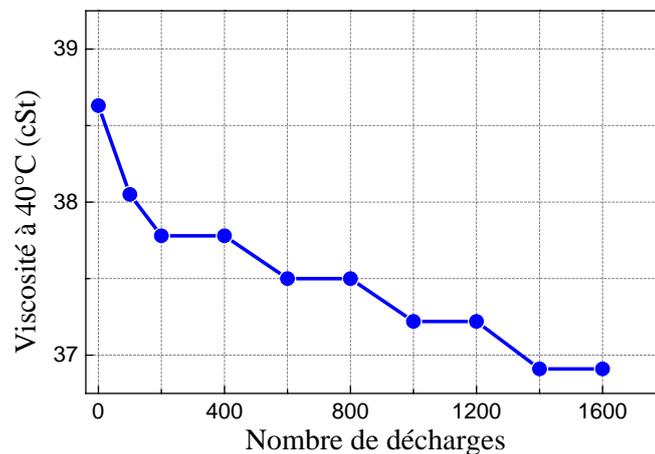


Figure 3.14 : Variation de la viscosité en fonction du nombre de décharges.

3.3.2.4 Variation de la permittivité relative

La figure 3.15 montre la variation de la permittivité en fonction du nombre de décharges. La courbe ne présente pas de variation significative de la permittivité diélectrique comme l'a rapporté Suwano [128].

Les variations se situent entre 2.89 et 2.87, ce qui nous laisse dire que les décharges électriques dans l'huile végétale ne produisent pas de molécules à caractère polaire ou bien ils ne sont pas en quantité suffisante pour affecter la valeur de la permittivité.

3.3.2.5 Variation du facteur de dissipation et de la résistivité

Contrairement à ce qui a été rapporté par différents auteurs [128, 129], à savoir que le facteur de dissipation et la conductivité augmentent avec le nombre de claquages, nous avons observé l'inverse lors de nos essais comme le montrent les figures 3.16 et 3.17. Les décharges électriques améliorent le facteur de dissipation et la résistivité. Comme $\tan \delta$ est associé au nombre de groupes polaires dans l'huile [130], la diminution de l'indice d'acidité avec le nombre de décharges pourrait être la raison de cette amélioration.

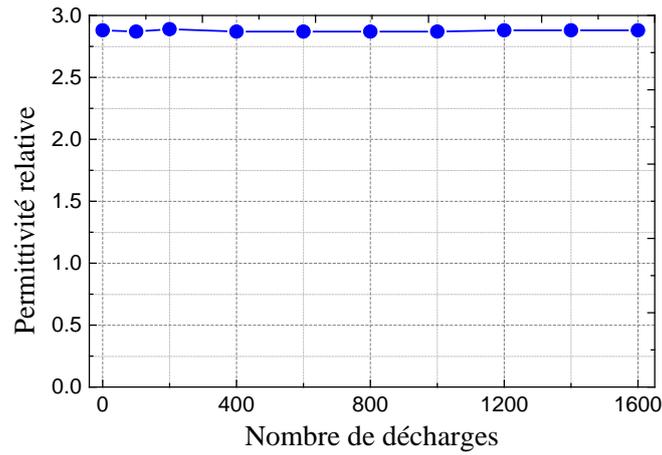


Figure 3. 125 : Variation de la permittivité en fonction du nombre de décharges.

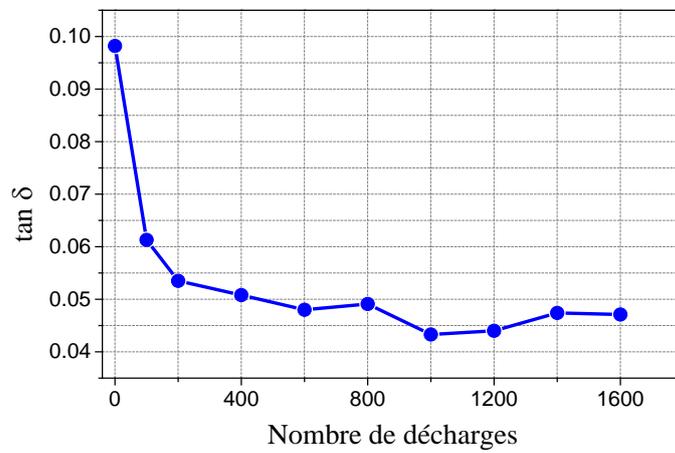


Figure 3. 16 : Variation du facteur de dissipation en fonction du nombre de décharges.

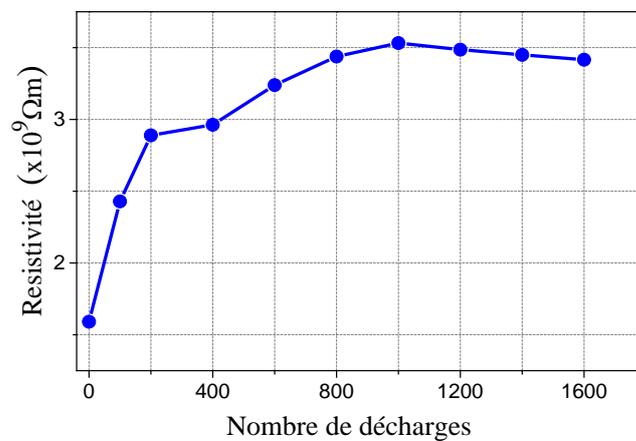


Figure 3.17 : Variation de la résistivité en fonction du nombre de décharges.

3.3.2.6 Variation du point d'éclair

La figure 3.18 présente l'évolution du point d'éclair en fonction du nombre de décharges. La courbe montre une décroissance de 19 degrés après les cents premières décharges puis une lente variation qui tend cependant à se stabiliser autour de 160 °C. En effet, les décharges électriques dans l'huile végétale génèrent des gaz combustibles en particulier l'acétylène (C_2H_2), ou des molécules de faibles poids moléculaires [131] ainsi que d'autres hydrocarbures inflammables. Ce qui peut affecter fortement le point d'éclair de l'huile.

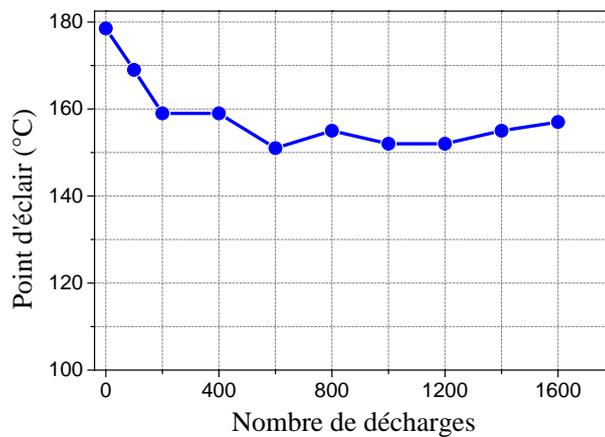


Figure 3. 18 : Variation du point d'éclair en fonction du nombre de décharges.

3.3.3 Les mesures de spectroscopie dans le domaine fréquentiel (FDS)

La spectroscopie dans le domaine fréquentiel : en anglais "Frequency domain dielectric spectroscopy (FDS)" ou " Dielectric Frequency Response (DFR)" où cette dernière abréviation est plus utilisée dans l'Amérique du Nord, a été développée dans les années 1990. Cette technique non destructive est devenue un outil de diagnostic puissant pour les appareils de haute tension. Cette méthode peut déterminer l'état des isolants de haute tension comme dans les transformateurs de puissance, les traversées, les câbles et les générateurs avec analyse de la réponse diélectrique.

Avec la FDS, nous pouvons analyser la teneur en eau et la conductivité de l'huile dans différents types d'isolation en cellulose. Les fréquences très basses contiennent des informations sur l'humidité de l'isolation solide tandis que la position de la pente

dans la zone des fréquences intermédiaires indique la conductivité de l'isolation liquide.

Le principe de la FDS se pose sur l'application d'une tension sinusoïdale et sur l'analyse de l'amplitude et du déphasage de la réponse en courant du matériau. Le rapport des amplitudes tension/courant définit le module de l'impédance série Z_S ; le déphasage entre la tension et le courant complète l'information pour donner accès aux parties réelle et imaginaire de l'impédance complexe Z_S .

On a alors l'expression suivante :

$$Z_S^*(\omega) = \frac{U^*(\omega)}{I^*(\omega)} = \frac{U(\omega)}{I(\omega)} [\cos(\varphi(\omega)) + j \sin(\varphi(\omega))] = Z_S'(\omega) + j Z_S''(\omega) \quad (3.1)$$

L'échantillon peut également être considéré comme une capacité complexe C_p^* par la relation suivante :

$$Z_p^*(\omega) = -\frac{1}{\omega C_p^*} \quad (3.2)$$

$\varepsilon^*(\omega)$ et $\tan\delta$ sont déterminées par :

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \varepsilon''(\omega) = -\frac{j}{\omega Z_S^*(\omega) C_0} = -\frac{j Y_p^*(\omega)}{\omega C_0} = -\frac{C_p^*}{C_0} \quad (3.3)$$

$$\tan(\delta(\omega)) = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = -\frac{Z''(\omega)}{Z'(\omega)} \quad (3.4)$$

En pratique, la méthode de mesure est une méthode de substitution : on effectue une première mesure de capacité et de $\tan \delta$, la cellule étant vide de liquide. Dans ces conditions, on doit mesurer une capacité de l'ordre de C_v et un facteur de dissipation considéré comme nul.

On effectue ensuite les mêmes déterminations, la cellule étant remplie de liquide. On déduit la permittivité du rapport des deux capacités mesurées C_p/C_v , C_p étant le résultat relevé sur la cellule pleine. Etant donnée la faible valeur du facteur de dissipation de la cellule vide, on considère que la valeur de $\tan \delta$ relevée en présence du liquide caractérise ce dernier. Si on cherche à déterminer la permittivité de façon

précise, il est recommandé de ne pas démonter la cellule, ce qui peut compliquer les opérations de remplissage.

La partie réelle de la permittivité ε_r' et le $\tan \delta$ dépendent de la fréquence. Comme les effets du vieillissement vont modifier ces paramètres dans des gammes de fréquences très différentes et spécifiques, la mesure de ces grandeurs sur une large gamme de fréquences permet de déterminer les processus de vieillissement et les différentes propriétés de l'huile isolante. Pour comprendre comment l'état de liquide isolant se reflète sur les mesures FDS, une comparaison entre les propriétés physico-chimiques du liquide isolant et les paramètres diélectriques a été faite.

3.3.3.1 Variation de la partie réelle de la permittivité :

Pour les deux contraintes (thermique et électrique), la valeur de ε_r' décroît avec l'augmentation de la fréquence jusqu'à atteindre une valeur relativement stable comme le montrent les figures 3.19 et 3.20. Evidemment, lors de l'application d'un champ électrique de basse fréquence, plus de processus de polarisation peuvent être complétés, tandis que sous une fréquence plus élevée, certains processus de polarisation lents ne peuvent pas se produire avec un changement plus rapide du champ électrique, les dipôles ne peuvent pas suivre instantanément ce champ variable rapide ; donc ε_r' diminue et devient plus petite avec la croissance de la fréquence jusqu'à atteindre une valeur relativement stable [122, 123].

La partie réelle de la permittivité ε_r' tend à augmenter avec le vieillissement thermique et avec l'application des décharges électriques. Dans le vieillissement thermique, on a trouvé que l'humidité diminue avec le vieillissement. En général ε_r' d'une huile augmente avec la croissance de l'humidité; par conséquent la croissance de ε_r' est principalement due à l'évolution des produits de dégradation résultant de différents mécanismes de dégradation dans l'huile pendant le vieillissement. Ceci est en corrélation avec l'augmentation de l'acidité avec le vieillissement. Contrairement au vieillissement thermique, l'acidité diminue avec l'application des décharges électriques, et l'humidité montre une tendance aléatoire. Les gaz dissous générés par les décharges électriques pourraient être la raison de la croissance de ε_r' .

Cependant, il semble difficile d'identifier les paramètres qui influencent ϵ_r' comme les mesures spectroscopiques (FDS) prennent en considération tous les mécanismes possibles de la dégradation dans l'huile isolante. Par conséquent, tout changement dans les paramètres précédents (acidité, teneur en eau....) peut être mal interprété avec d'autres. Ainsi, leurs effets sur FDS sont difficiles à déterminer. Des études systématiques sur l'évolution des paramètres qui influencent les mesures spectroscopiques (FDS) d'une huile isolante sont nécessaires.

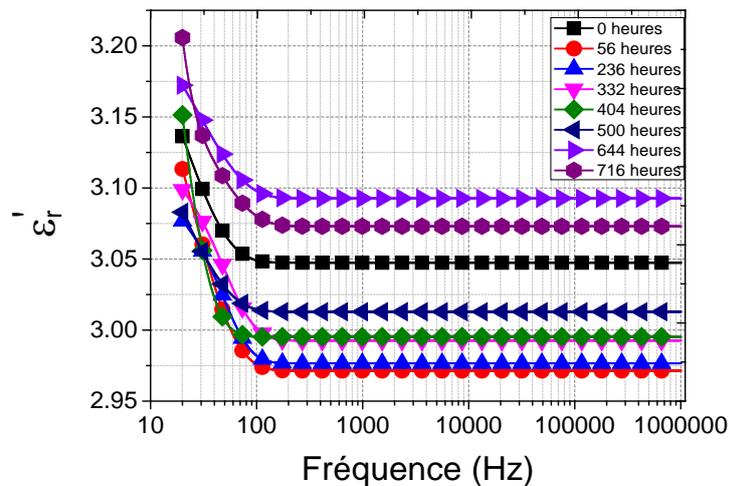


Figure 3.19 : Partie réelle de la permittivité en fonction du temps de vieillissement dans une gamme de fréquence entre 20Hz-1MHz.

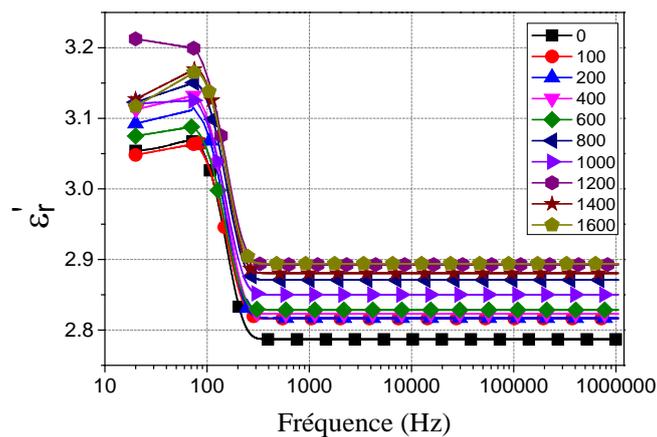


Figure 3.20 : Partie réelle de la permittivité en fonction du nombre de décharges dans une gamme de fréquence entre 20Hz-1MHz.

3.3.3.2 Variation du facteur de dissipation

Le facteur de dissipation ($\tan\delta$) diminue avec la fréquence. Il montre une variation aléatoire avec le vieillissement dans les deux contraintes (thermique et électrique), donc l'état du liquide isolant ne peut pas être déterminé sur la base des courbes de $\tan\delta$ obtenues comme le montre la figure 3.21.

Généralement, les mesures du facteur de dissipation sont appropriées à des températures plus élevées, pour une fréquence de (50/60 Hz), les essais doivent être effectués à 90 °C. À température ambiante, le facteur de dissipation montre une faible sensibilité aux changements de l'humidité. Les mesures de $\tan\delta$ aux températures plus élevées ont montré une haute sensibilité à l'état du liquide isolant [124]. L'augmentation de la température augmentera l'effet de polarisation (à une fréquence donnée) et déplacera la réponse diélectrique vers les hautes fréquences, donc plus d'informations sur l'état de l'huile isolante peuvent être déterminées. La réponse diélectrique en fonction de la fréquence et de la température est connue sous le nom de " *temperature dependent dielectric spectroscopy* ".

Quoi qu'il en soit, l'influence de l'humidité, de la température, des conditions de vieillissement et des sous-produits de dégradations sur les mesures FDS rend plus difficile l'interprétation des résultats des tests. Dans notre étude, on a trouvé que la partie réelle de la permittivité ε_r' reflète le vieillissement dans les deux contraintes (thermique et électrique); ε_r' tend à augmenter avec le vieillissement. Cette augmentation peut être utilisée comme paramètre de diagnostic pour un liquide isolant. Cependant, plus d'investigations seront nécessaires pour confirmer les résultats obtenus.

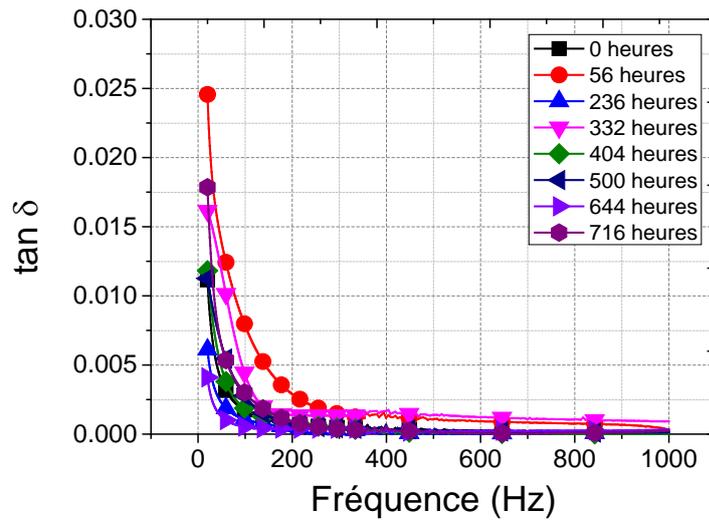


Figure 3. 131 : Facteur de dissipation en fonction du temps de vieillissement dans une gamme de fréquence entre 20Hz-1MHz.

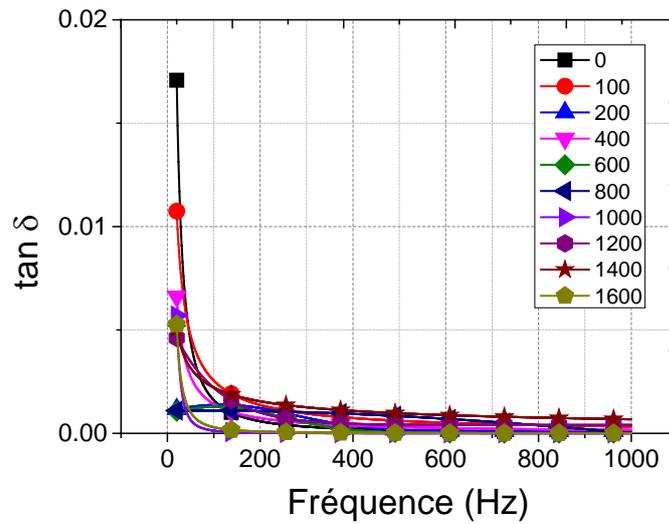


Figure 3. 22 : Facteur de dissipation en fonction du nombre de décharges dans une gamme de fréquence entre 20Hz-1MHz.

3.4 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons essayé de suivre le comportement de l'huile d'olive sous deux contraintes (thermique et électrique), ainsi que la caractérisation des principales propriétés requises pour un fonctionnement normal afin d'identifier ses points faibles qui peuvent limiter l'utilisation de cette huile dans une application en électrotechnique. Les valeurs obtenues de la tension de claquage sous contrainte thermique semblent encourageantes pour l'utilisation de cette huile comme liquide isolant dans les transformateurs. Cependant, l'addition d'antioxydants appropriés reste nécessaire pour améliorer les propriétés critiques de cette huile.

Le vieillissement thermique augmente l'indice d'acidité et la viscosité de l'huile d'olive, tandis qu'il diminue son point d'éclair. Ceci est également suivi d'une diminution du facteur de dissipation et d'une augmentation de la résistivité. Malgré la dégradation de ces paramètres, la tension de claquage de l'huile d'olive augmente de manière significative en particulier après 300 h ce qui correspond à des teneurs en eau inférieures à 500 ppm. Cette amélioration s'accompagne d'une diminution de la teneur en eau dans l'huile. La plupart des paramètres étudiés sont bien corrélés avec la teneur en eau.

Des résultats inattendus sont trouvés dans ce travail où les décharges électriques améliorent certaines propriétés clés, en particulier l'indice d'acidité et la viscosité de l'huile. Le facteur de dissipation et la résistivité sont également améliorés mais restent pratiquement stables après 400 h de vieillissement. Seul le point d'éclair présente une tendance à se dégrader avec une stabilisation autour d'une valeur acceptable de 155 ° C.

Les mesures FDS indiquent les changements globaux de l'isolation. Ils fournissent une indication sur le statut général du vieillissement. Pour les contraintes thermiques et électriques, la partie réelle de la permittivité de l'huile a tendance à augmenter avec le vieillissement ; elle permet d'établir des corrélations acceptables avec les paramètres physico-chimiques, en particulier la teneur en eau.

CHAPITRE 4

ÉTUDE DE LA PROPAGATION DES STREAMERS

4.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, de nombreuses investigations ont été menées sur les phénomènes de streamers, zone ou canaux ionisés précédant le claquage (phase de pré-claquage), et sur le claquage proprement dit dans les liquides diélectriques. Selon la tension (forme d'onde, durée d'application, polarité, amplitude ...), les streamers peuvent s'arrêter ou se développer jusqu'à l'électrode opposée court-circuitant ainsi l'intervalle inter-électrodes : c'est le claquage. Comme pour toute isolation, le claquage peut conduire à la défaillance de l'isolation voire à la mise hors service du composant ou du système dont elle fait partie. Pour pallier à cela et éviter le claquage dont les conséquences peuvent être graves, aussi bien sur la qualité de distribution de l'énergie électrique que sur l'aspect financier, il est nécessaire de comprendre les phénomènes conduisant au claquage, c'est-à-dire les processus impliqués dans la phase de pré-claquage.

La phase de pré-claquage comporte elle-même deux phases : une phase de génération (ou initiation) durant laquelle une bulle prend naissance au voisinage de l'électrode acérée, c'est-à-dire où le champ est renforcé, et une propagation durant laquelle des structures ramifiées appelés streamers, prennent naissance à l'interface bulle/liquide et se propagent vers l'électrode opposée.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats d'une étude comparative entre l'huile d'olive, l'huile minérale, l'huile ester synthétique et des huiles végétales à travers l'analyse de la morphologie et de la longueur finale (ou d'arrêt) L_f des streamers ainsi que le courant et la charge électrique associés, dans un intervalle d'électrodes pointe – plan sous tension de foudre (1,2/50 μ s).

4.2 Techniques expérimentales

Les essais ont été effectués dans le laboratoire ampère 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.

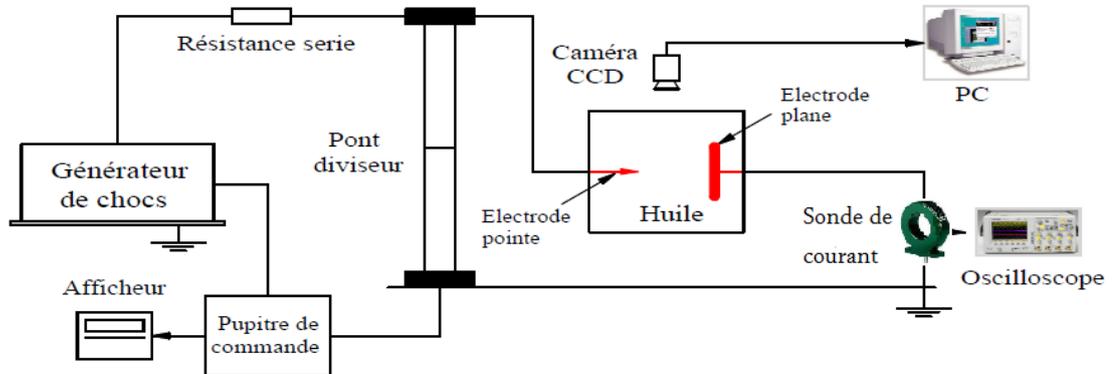


Figure 4.1 : Schéma du dispositif expérimental.

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 4.2). 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.

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 30 mm. 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.

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 standard (1,2/50 μ s). Une résistance de protection 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.

L'observation optique des streamers est basée sur l'intégration du signal lumineux qu'ils émettent. Une caméra CCD placée au-dessus du couvercle supérieur de la cellule et connectée à une carte d'acquisition vidéo haute performance (Météore-II/multichannel) permet de visualiser et d'enregistrer les images ainsi constituées. La caméra CCD est de type SVGA "SONY XC-HR58" de haute résolution (767x580 pixels). La capture d'images est contrôlée par ordinateur à une vitesse de 50 images/seconde. Les caractéristiques du streamer (longueur, diamètre, forme globale) sont déterminées à partir des images visualisées sur l'écran d'un moniteur.

Les courants de streamers sont mesurés à travers une sonde (Pearson Current Monitor 6585) connectée en série, du côté basse tension, avec la cellule d'essais, et un oscilloscope à haute résolution temporelle (Agilent) MSO 6014A (1 GHz, 4 Gsa / s). La charge électrique est obtenue par intégration du courant obtenue automatiquement par l'oscilloscope.

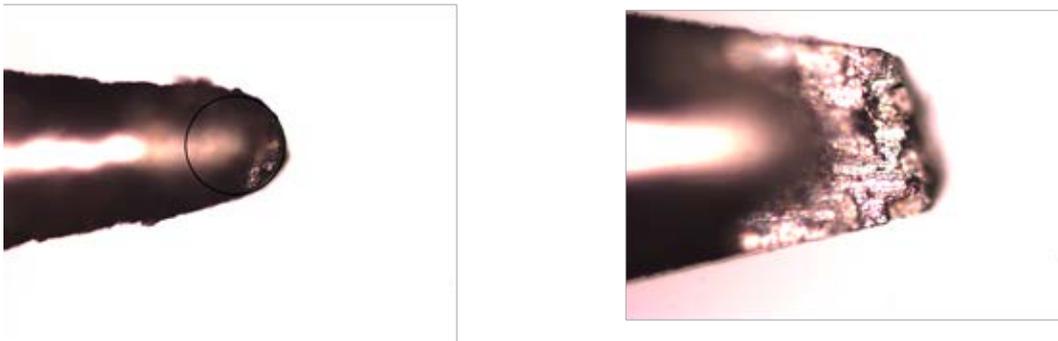


Figure 4. 2 : Érosion de l'extrémité de la pointe observée sous un microscope.

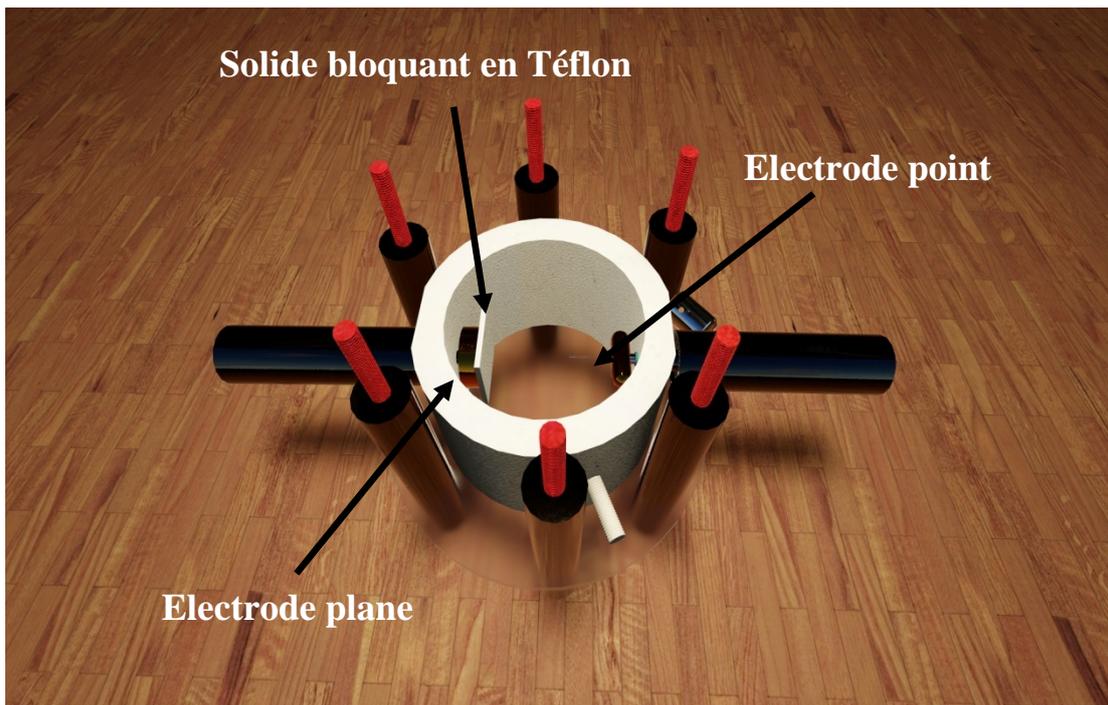
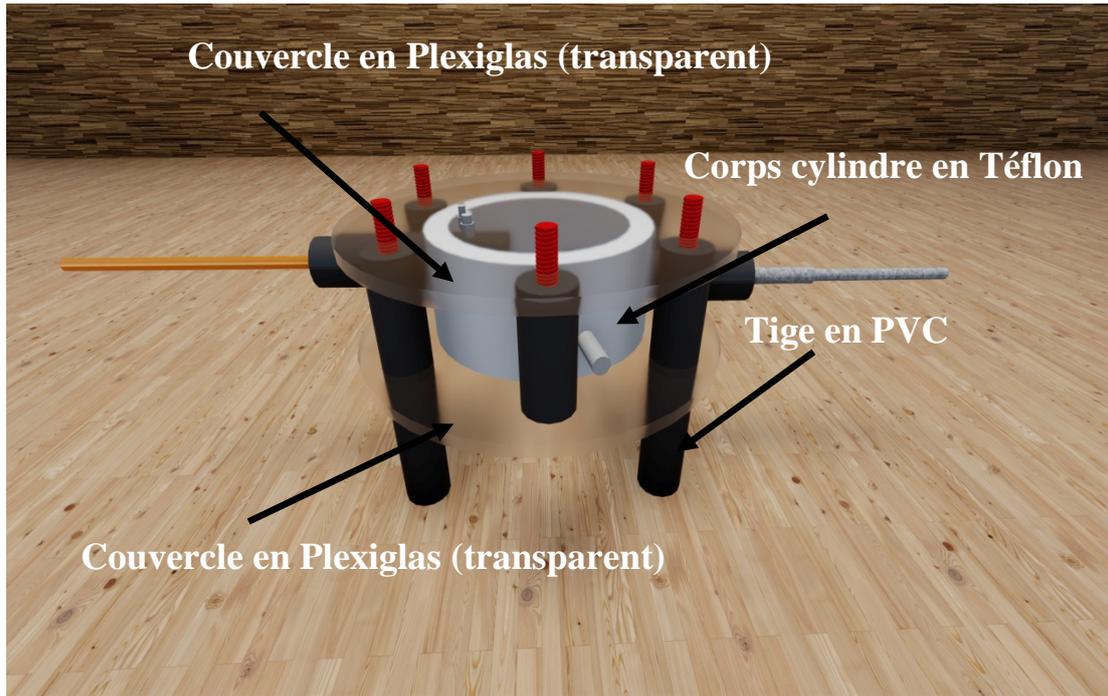


Figure 4. 3 : Vue schématique de la cellule d'essai.

4.2.1 Liquides utilisés

L'huile d'olive étudiée (OO) est une huile d'olive extra-vierge (acidité <1,6 mg KOH / g) dépourvue de tout additif. Elle est composée de 98 à 99% de triglycérides et contient un taux élevé d'acides gras mono-insaturés (supérieur à 70%) et une faible teneur en acides gras polyinsaturés avec la présence d'antioxydants naturels importants comme les substances phénoliques. Ces constituants donnent une bonne stabilité à l'oxydation par rapport aux autres esters naturels. Elle a été fournie par des fermes situées dans la vallée de Soummam (au nord-est de l'Algérie) ; elle est produite et conditionnée dans des Huileries Numidia-Ouzellaguen, appartenant à la société alimentaire IFRI. A titre de comparaison, quatre autres liquides ont été testés : un ester synthétique (SE) qui est le tétraester, un ester naturel à base d'huile de colza (RO), le méthyl oléate (MY) (obtenu par trans-estérification de l'huile d'olive) et l'huile minérale (MO). Notons que la viscosité de MY à 40 °C est de 5 (mm² / s), beaucoup plus faible que celle d'OO. Les échantillons OO ont été traités en ajoutant un tamis moléculaire 3A (selon la norme IEEE 637) pour réduire la teneur en eau. Cette dernière était très élevée. La teneur en eau de toutes les huiles a été mesurée par titrage Karl Fisher (IEC 60814) avant et après chaque essai. Le tableau 1 donne les principales caractéristiques des huiles testées (l'oléate de méthyle n'a pas été caractérisé).

Tableau 4. 1 : Propriétés des huiles testées

Propriétés	OO	MO	RO	SE
Densité (g/ml)	0.92	0.87	0.92	0.97
Viscosité à 40°C (mm ² /s)	36.3	9	34	28
Point d'éclair (°C)	227	140	330	260
Pointe d'écoulement (°C)	-10	-51	-23	-57
Teneur en eau (ppm)	25	12	60	50

4.3 Résultats expérimentaux

4.3.1 Forme des streamers

Les figures 4.4 et 4.5 donnent la morphologie des streamers dans les quatre liquides étudiés pour les deux polarités (positive ou négative). Nous avons observé qu'ils ont une forme plus ou moins filamentaire quelle que soit la polarité de la tension et cela pour les différentes huiles étudiées. Si la tension est inférieure à la tension de claquage, le streamer se propage principalement le long de l'axe inter électrodes et s'arrête sans atteindre l'électrode plane. Mais dans certains cas, il suit une direction à 90 ° de l'axe inter électrodes. Le streamer se désintègre en bulles qui se dissolvent dans le liquide. Pour une tension plus élevée, le streamer se propage jusqu'à atteindre l'électrode plane. En l'absence du plan bloquant, il y aurait alors claquage. La figure 5.6 donne des exemples de streamers se propageant dans l'huile d'olive OO pour deux tensions différentes.

On observe aussi que les streamers négatifs sont généralement plus lumineux que les streamers positifs. Ces derniers sont plus fins que les streamers négatifs. Aussi, les streamers négatifs dans l'huile minérale (MO) sont plus lumineux que ceux observés dans les esters naturels et synthétiques. Nous observons également une différence dans la position de branchement ; dans l'huile minérale, la position de branchement est au milieu ou à la fin des streamers, tandis que dans les esters naturels et synthétiques, elle est au début des streamers négatives.

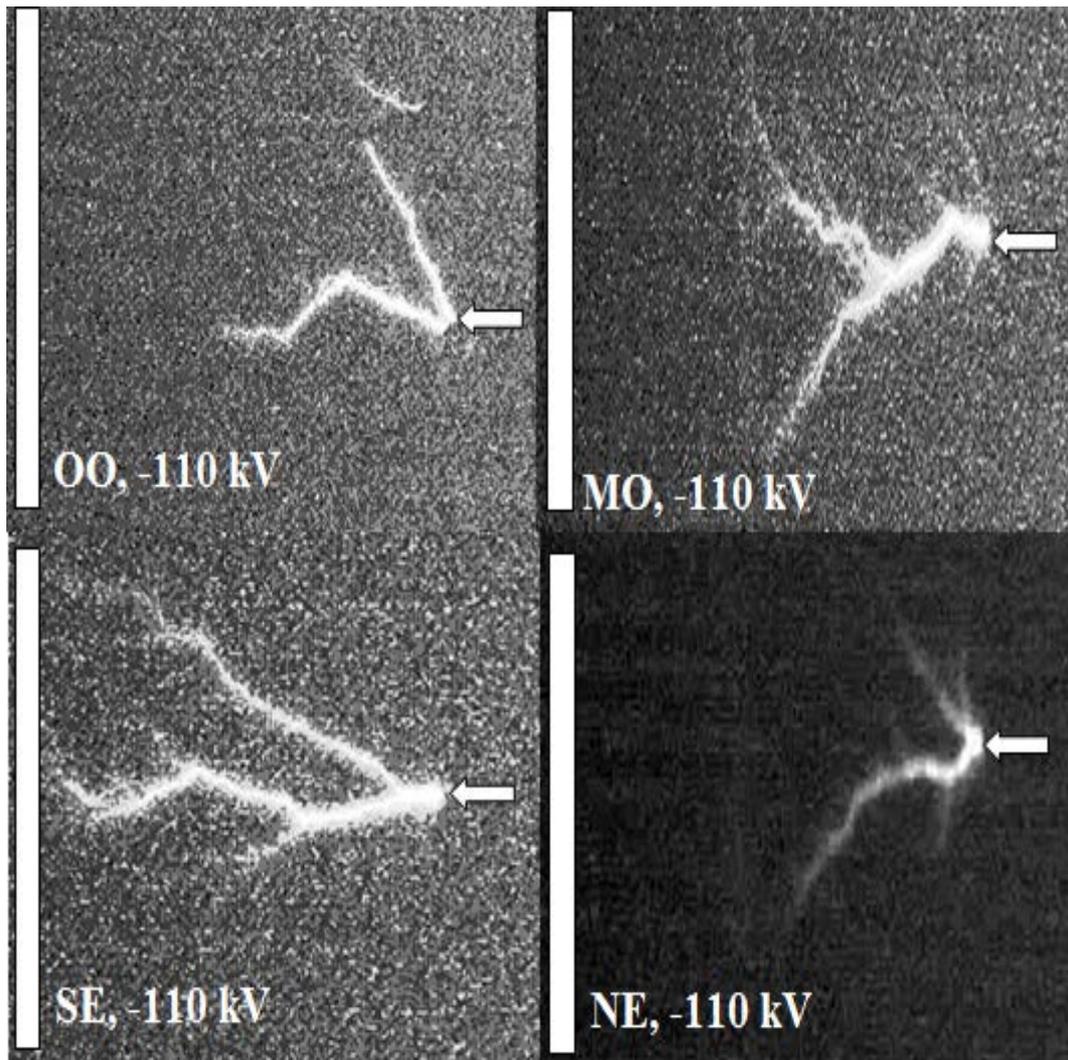


Figure 4. 2 : Exemples de forme des streamers observés en polarité négative dans les différentes huiles à $U = -110$ kV, $d = 25$ mm.

En général, les streamers positifs ont une faible luminosité, mais ils ont de nombreuses branches. La plupart du temps, la position de branchement est au début des streamers. Le canal du streamer positif est un type sombre avant de toucher l'électrode plane. Les extrémités des streamers positifs sont considérablement plus lumineuses que les canaux, indiquant que la multiplication des électrons peut avoir lieu aux extrémités (intense activité d'ionisation). Lorsque les streamers touchent l'électrode plane, les canaux des streamers deviendront partiellement ou entièrement illuminés.

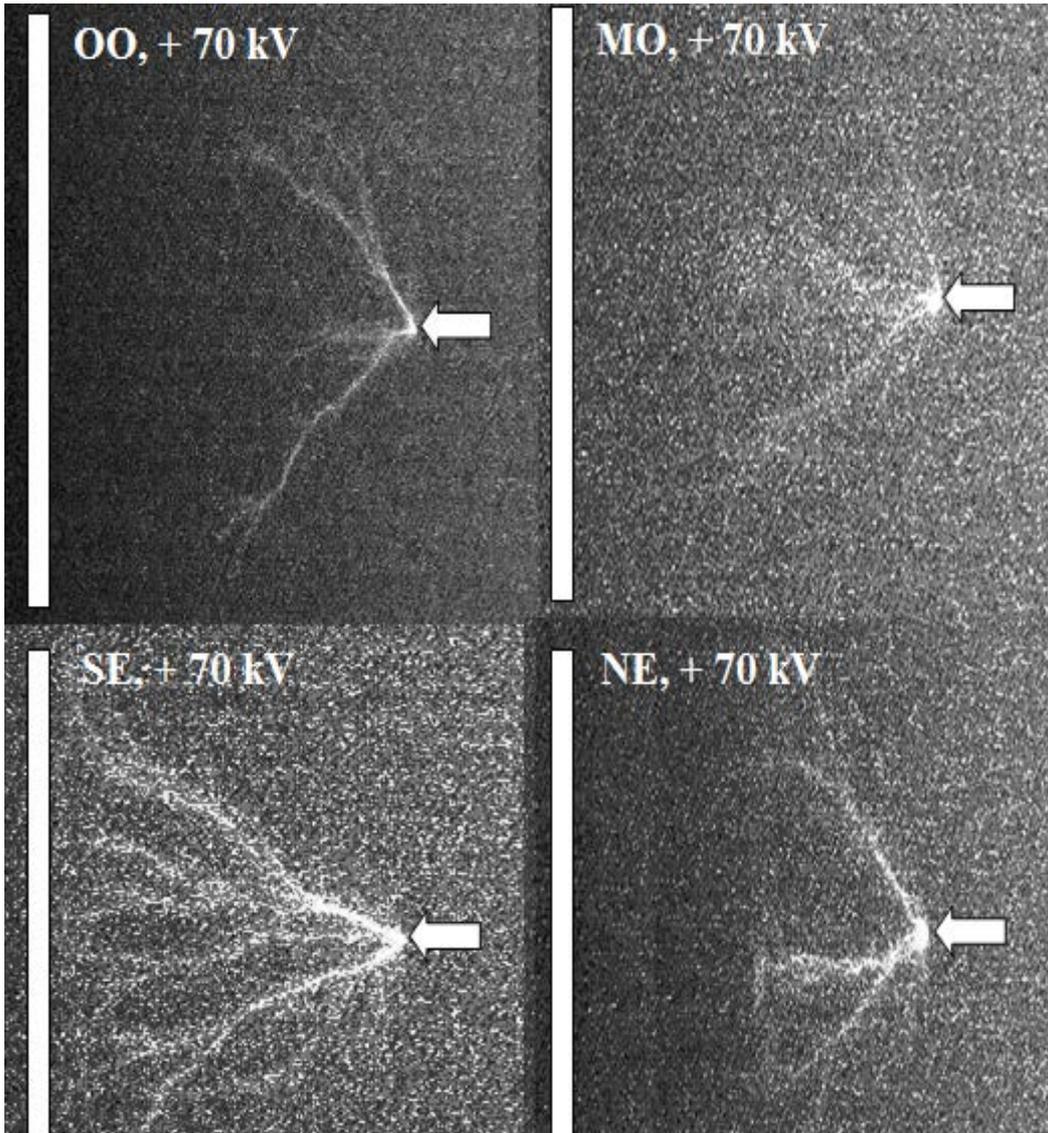


Figure 4. 3 : Exemples de forme des streamers positifs observés en polarité positive dans les différentes huiles à $U= +70$ kV, $d=25$ mm.

Massala et al. [132] ont suggéré que la forme du streamer, déterminée par sa tendance à se subdiviser et à former des branches, est un facteur très important pour établir le champ macroscopique autour des extrémités des streamers. Cela signifie qu'une augmentation de la ramification va réduire le champ et vice versa, ou on peut dire que la ramification gouverne le champ macroscopique. Cette hypothèse a été aussi mentionnée par Lundgaard et al [63].

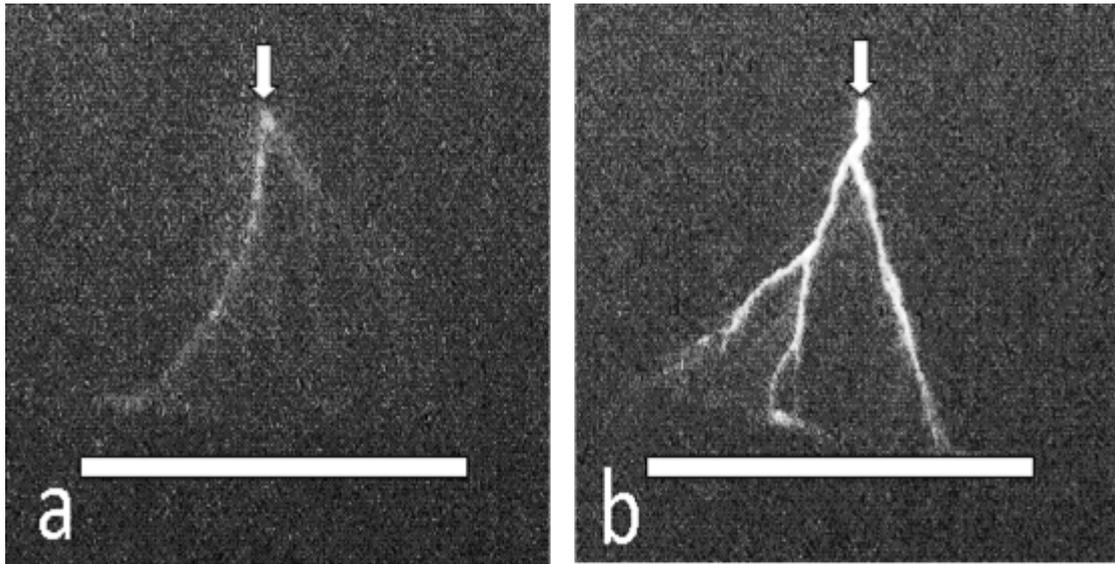


Figure 4.4 : Photographies des streamers positifs dans l'huile d'olive OO, (a) $U = 76 \text{ kV}$, (b) $U = 80 \text{ kV}$ et $d = 25 \text{ mm}$.

À faible tension, les streamers s'arrêtent à une distance L_f (longueurs finales ou d'arrêt) inférieure à la distance 'd' entre les électrodes et ne conduisent pas au claquage. L_f est l'information la plus importante déduite de la visualisation des streamers, elle représente l'extension maximale des streamers : c'est-à-dire la longueur de la plus longue branche dans la direction de l'électrode opposée. Elle est très utile particulièrement pour la conception / dimensionnement de la structure isolante.

Les figures 4.7 et 4.8 montrent l'évolution de L_f dans les liquides étudiés par rapport à la tension pour les deux polarités. Pour une tension donnée, il y a une dispersion sur les valeurs mesurées de L_f . Les valeurs obtenues sont réparties entre deux limites correspondant aux valeurs minimales et maximales. Chaque point représente la moyenne d'environ six mesures, l'incertitude de chaque point est de $\pm 1 \text{ mm}$. La longueur d'arrêt L_f augmente avec la tension appliquée, et le claquage se produit lorsque les streamers atteignent le plan ($L_f = d$). En général, les résultats de l'huile d'olive sont similaires avec ceux de l'huile minérale. Notons aussi que pour une tension donnée, L_f diminue lorsque la distance entre les électrodes augmente (Figure 4.9).

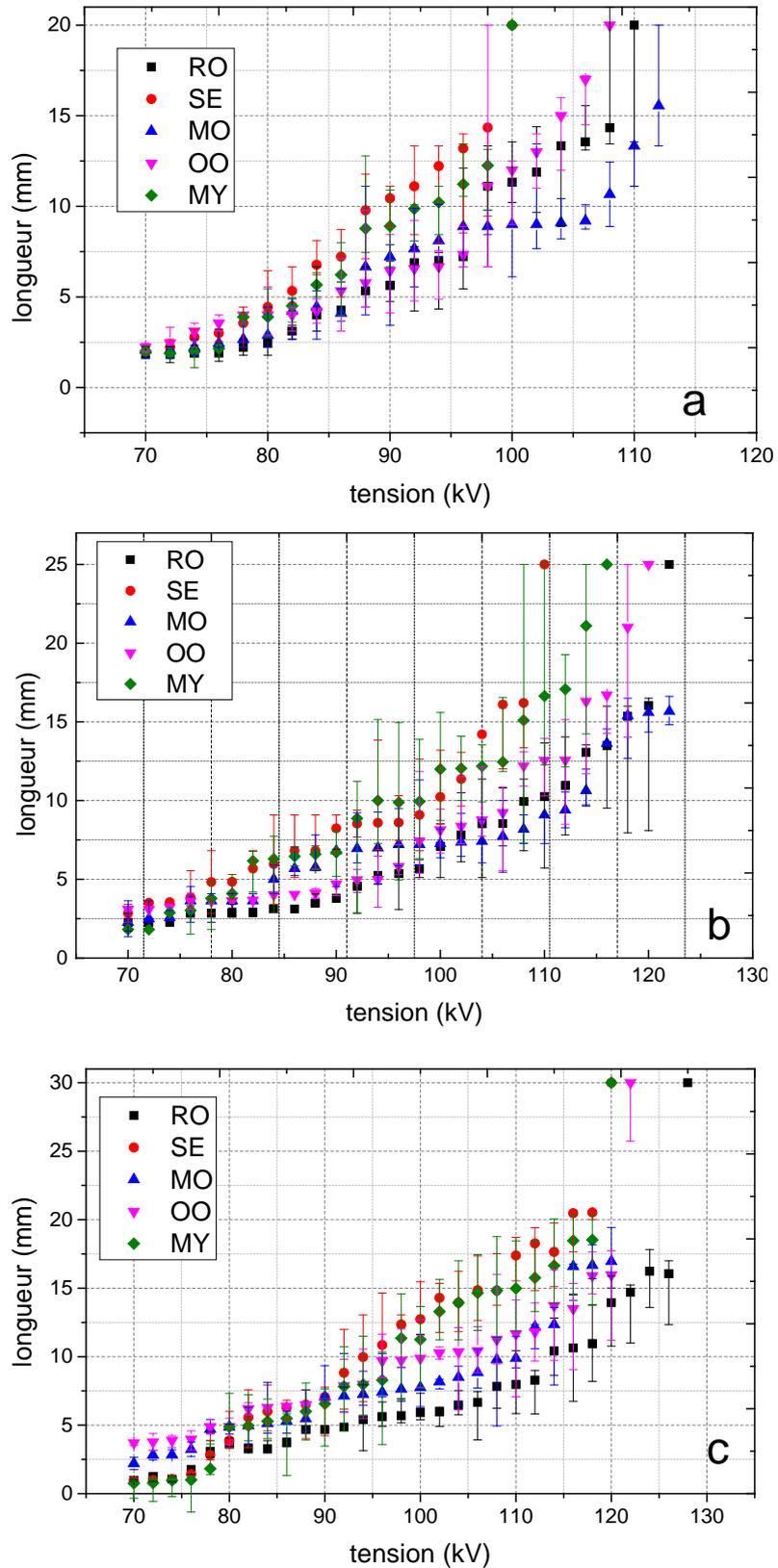


Figure 4. 5 : Longueur finale des streamers en polarité négative (a) $d= 20$ mm
(b), $d= 25$ mm, (c) $d= 30$ mm.

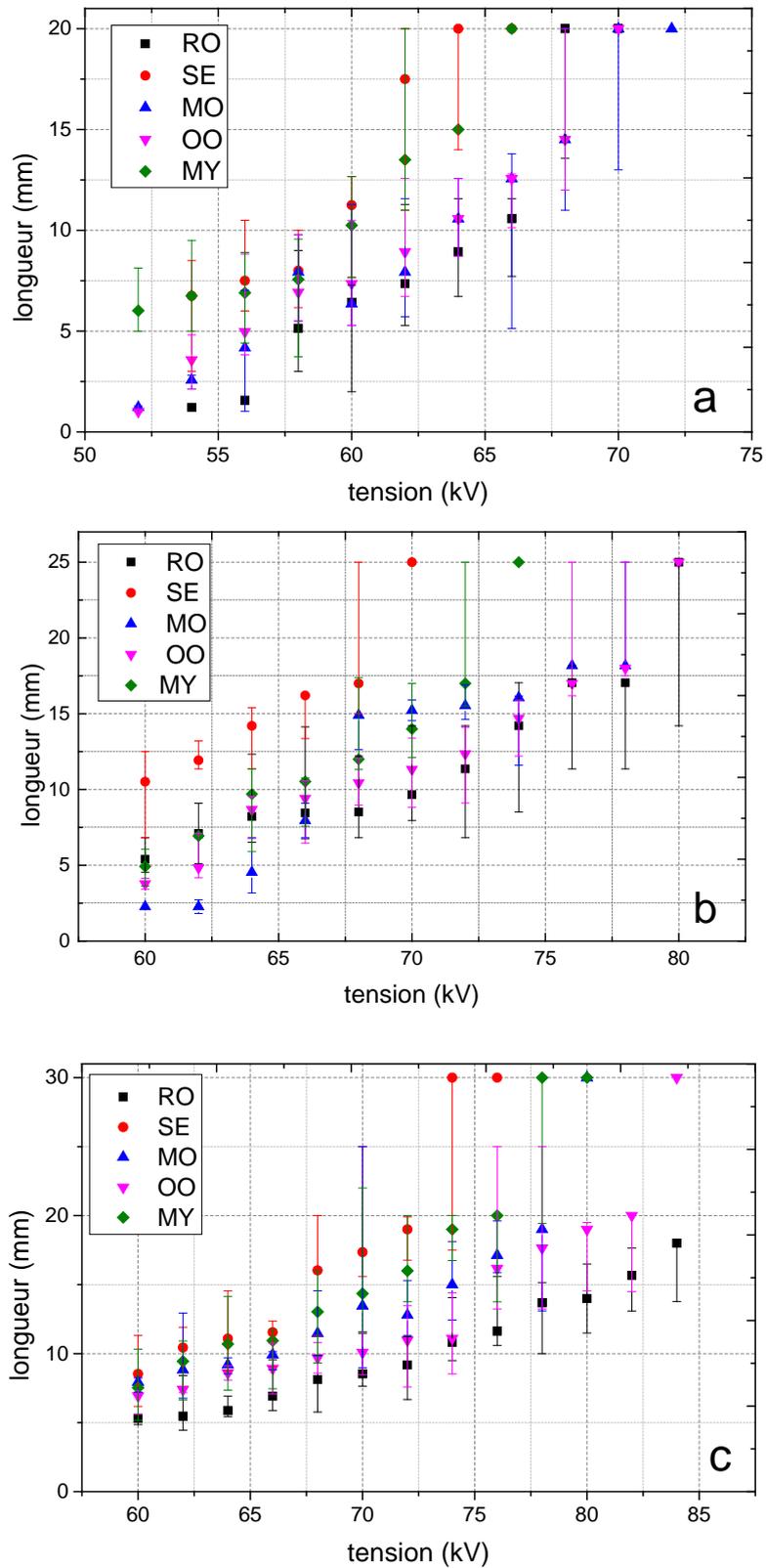


Figure 4. 6 : Longueur finale des streamers en polarité positive (a) $d= 20$ mm
(b), $d= 25$ mm, (c) $d= 30$ mm.

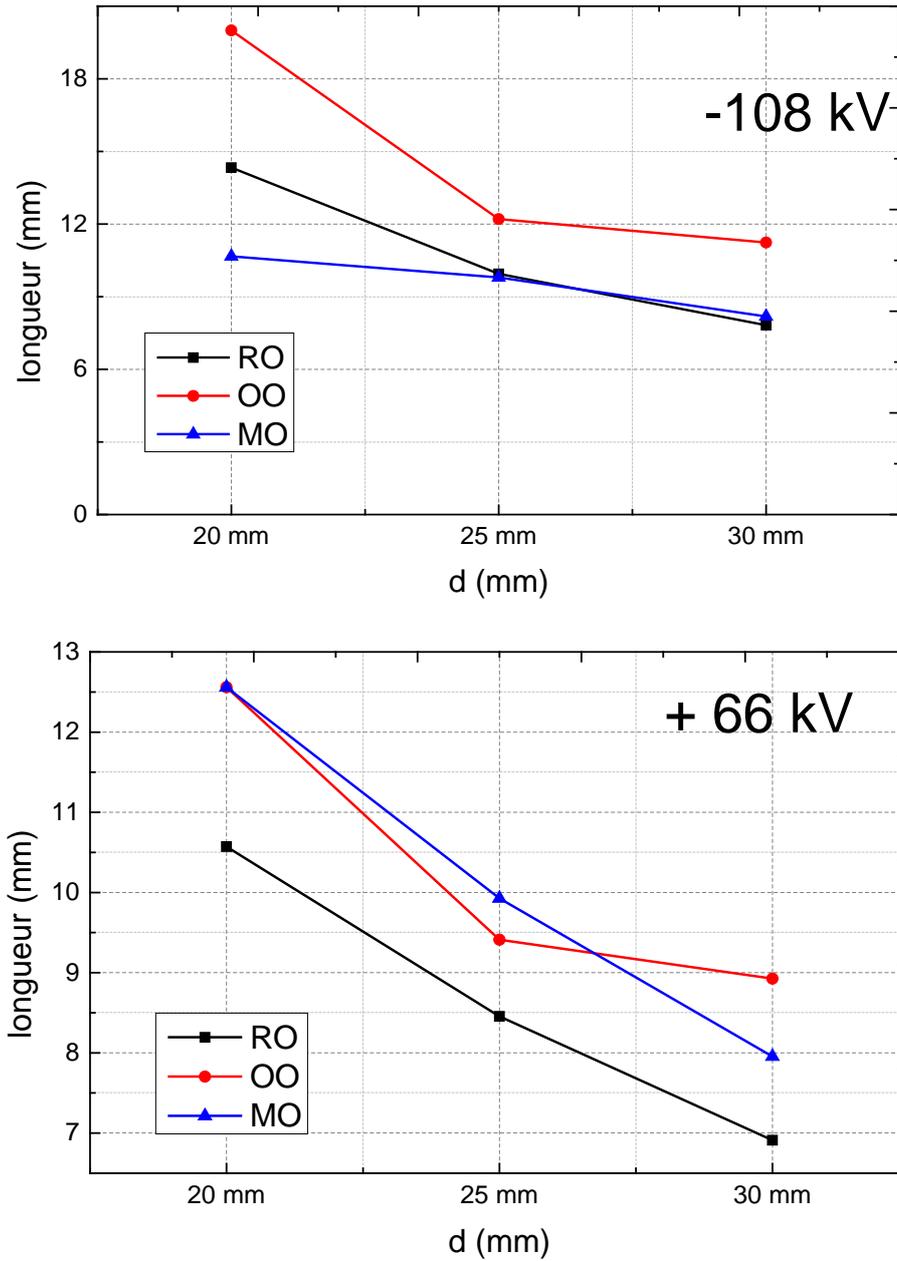


Figure 4. 7 : Représentation sous forme de courbe de l'évolution de la longueur finale des streamers en fonction de la distance inter électrodes.

D'autre part, on observe un effet significatif de polarité : L_f est plus importante en polarité positive qu'en polarité négative. Les tensions requises pour obtenir les mêmes longueurs sont plus élevées lorsque la polarité est négative que lorsqu'elle est positive dans toutes les huiles. Cela conduira à une tension de claquage plus basse pour une polarité positive. Par conséquent, les streamers positifs constituent un grand risque par

rapport aux streamers négatives, pour l'isolation des liquides diélectriques utilisés dans les équipements électriques à haute tension.

L'effet de polarité a été expliqué dans [92] par une réduction de la distance inter-électrodes sous polarité positive, les électrons étant générés dans le liquide et attirés vers l'électrode positive, le canal conducteur formé à la suite de l'ionisation du liquide entre l'anode et le nuage d'électrons agit comme une extension de l'anode (la pointe). Sous polarité négative, une charge d'espace négative est formée devant la pointe, réduisant le gradient de champ et empêchant l'injection d'autres électrons, ce qui signifie que des tensions appliquées plus élevées sont nécessaires pour provoquer un claquage.

Comme cela a été fait par Dang *et al* [133], on peut estimer le champ longitudinal moyen dans le canal du streamer à partir des caractéristiques de $L_f(U)$ par la relation suivante : $E_l = \Delta U / \Delta L_f$ (ΔU étant la chute de tension à un segment donné ΔL_f du canal du streamer). Le champ longitudinal moyen dans le canal de décharge est un paramètre intéressant qui a été utilisé par d'autres pour apprécier la conductivité des décharges dans l'air. Plus E_l est petit, plus les canaux de décharge sont conducteurs et plus la décharge est rapide. Donc, en utilisant ces résultats, on peut conclure de la pente de $L_f(U)$ que les streamers positifs sont plus conducteurs que les négatifs. Ainsi, les streamers positifs seront plus rapides que les streamers négatifs confirmant le résultat bien connu rapporté par d'autres [61, 62].

4.3.3 Courants et charges électriques associés aux streamers

Les formes d'onde des courants associés aux streamers sont très similaires dans toutes les huiles testées, quelle que soit la polarité. Le nombre et l'amplitude des impulsions de courants augmentent avec la tension. Les figures 4.10 et 4.11 montrent quelques exemples d'enregistrement de courants de streamers positifs et négatifs se propageant respectivement dans l'huile d'olive et l'huile minérale.

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.

Par rapport à la polarité positive, les impulsions des courant négatifs semblent plus fréquentes mais avec une amplitude plus importante. Nous notons que les amplitudes des impulsions de courants ainsi que les charges élémentaires correspondantes dans les huiles végétales sont plus élevées que dans l'huile minérale.

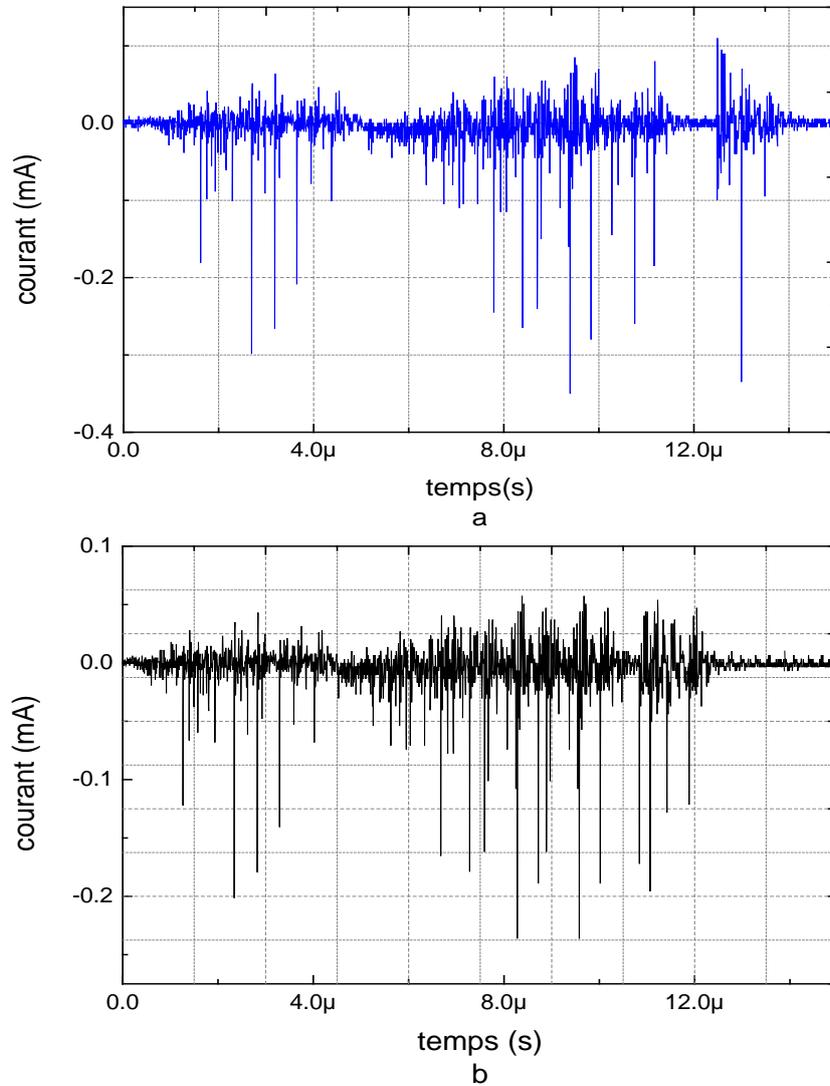


Figure 4. 8 : Courants de streamers mesurés en polarité négative, $U=-108$ kV, $d=25$ mm a) OO, b) MO.

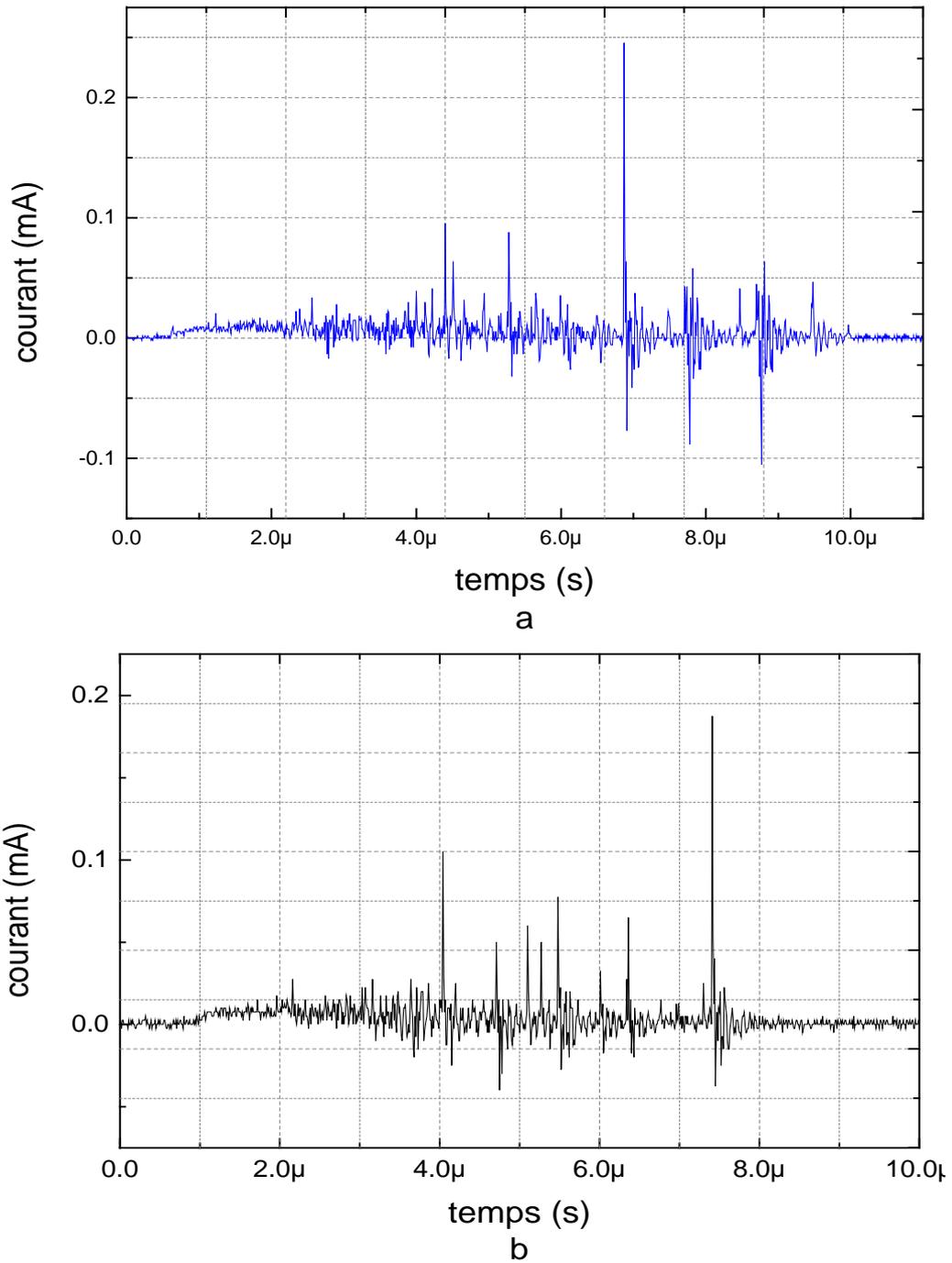


Figure 4. 9 : Courants de streamers mesurés en polarité positive, $U=+74$ kV, $d=25$ mm a) OO, b) MO.

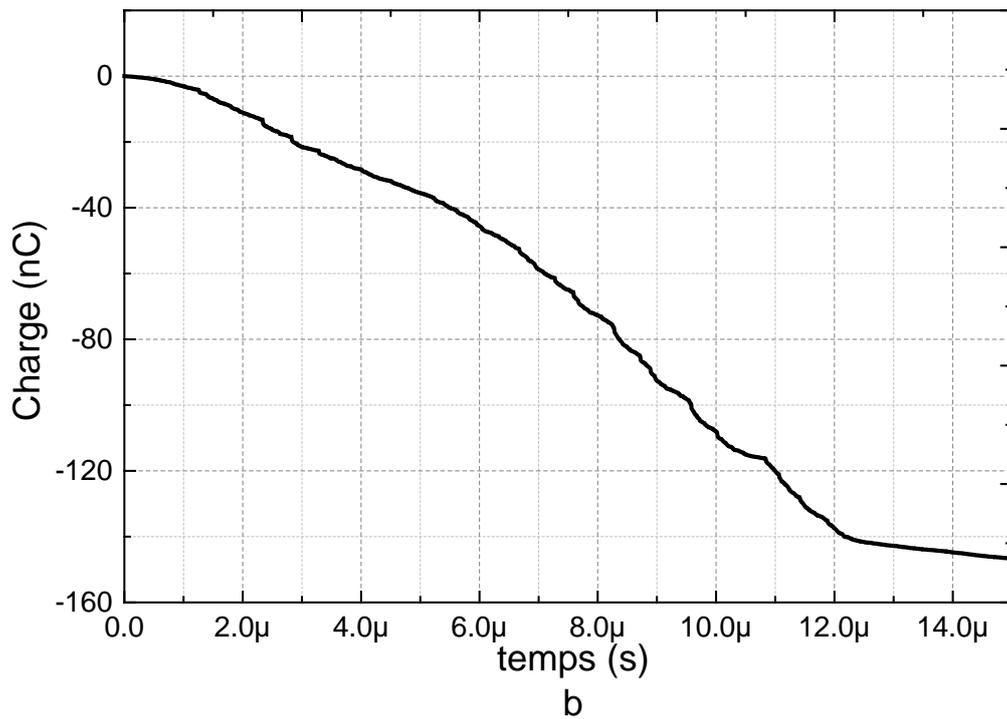
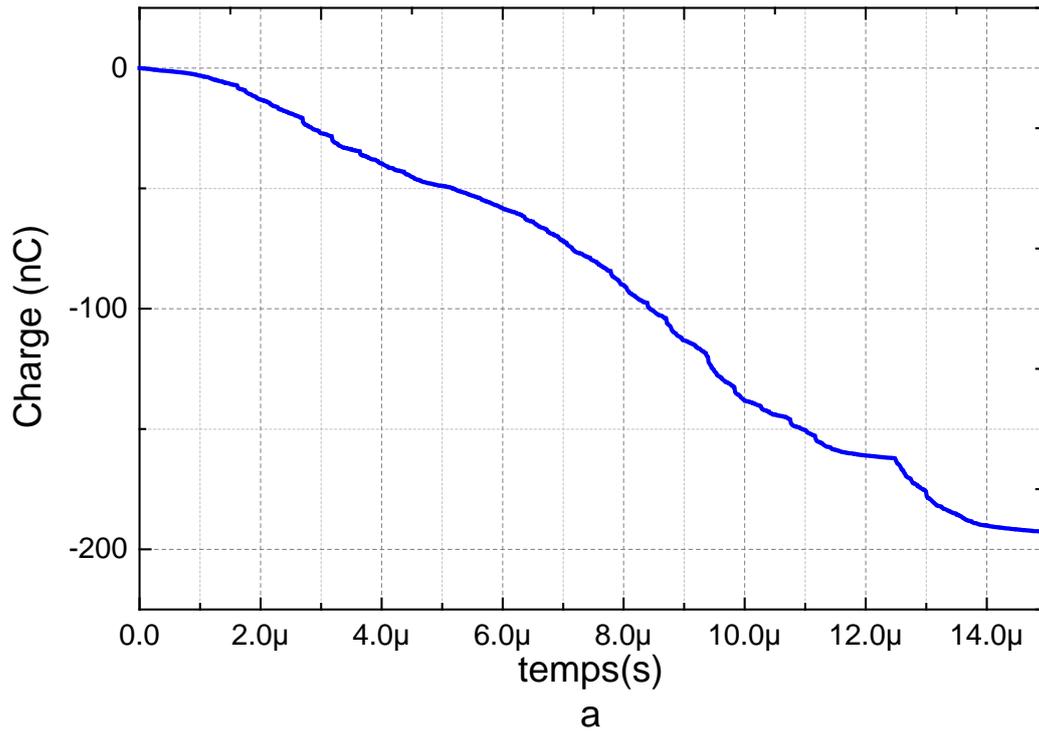


Figure 4. 10 : Charge associée de streamers mesurés en polarité négative, $U=-108$ kV, $d=25$ mm a) OO, b) MO.

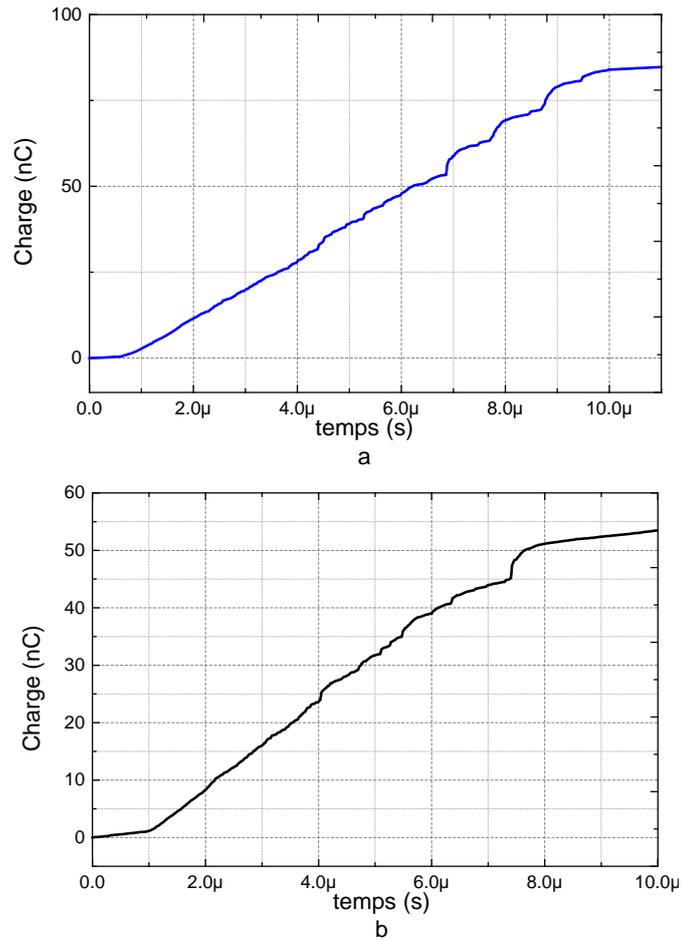


Figure 4.11 : Charge associée de streamers mesurés en polarité positive, $U=+74$ kV, $d=25$ mm a) OO, b) MO.

4.3.4 Vitesse des streamers

L'enregistrement des courants (ou de la charges) nous permet d'estimer le temps de propagation des streamers (t_f). À partir de t_f et L_f , nous pouvons déduire la vitesse moyenne de propagation des décharges ($v_m = L_f/t_f$) (Figure 4.14).

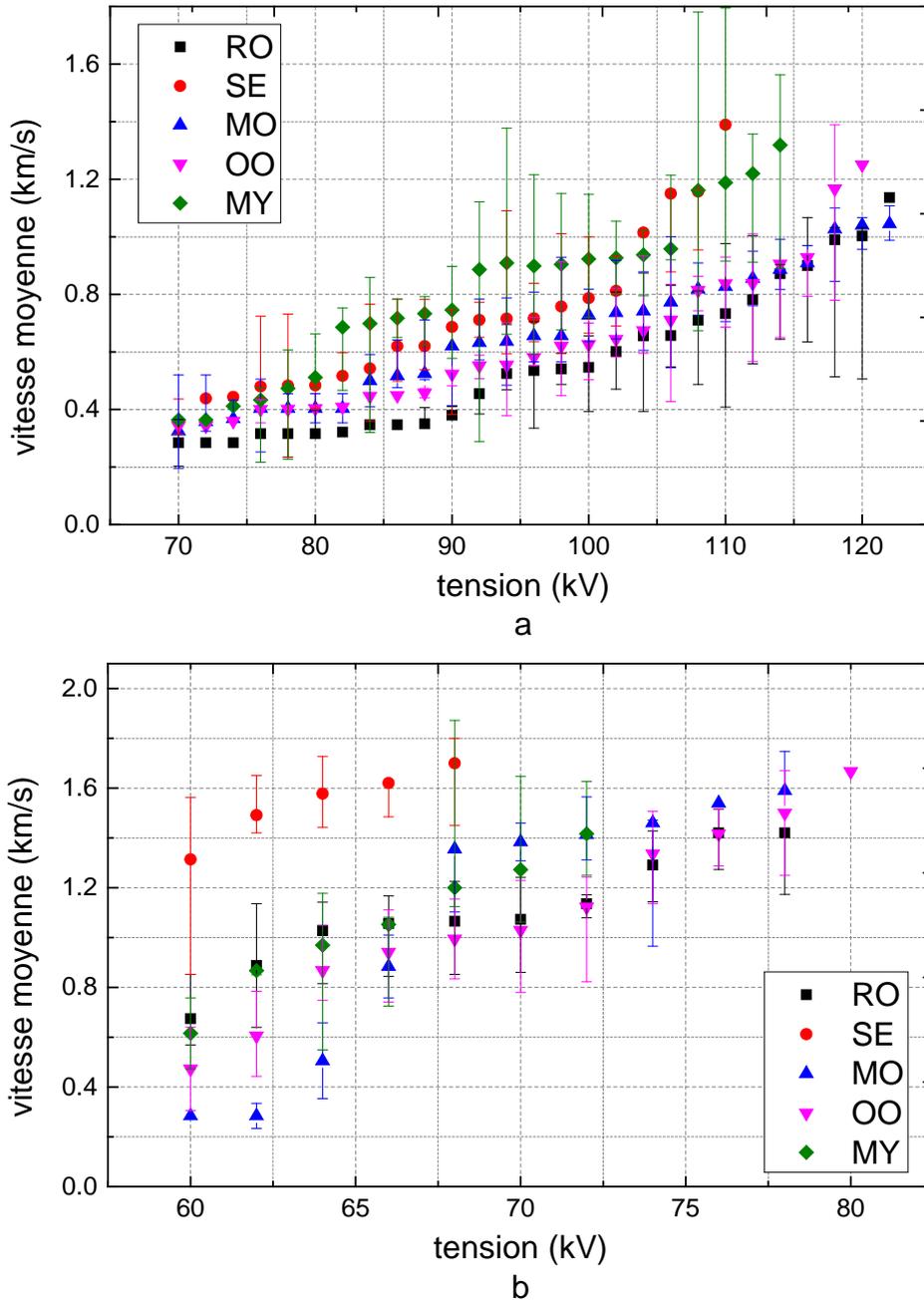


Figure 4. 12 : Vitesse moyenne des streamers en polarité (a) négative et (b) positive.

Pour des valeurs de tension modérées, les streamers se propagent à une vitesse limitée et s'éteignent pendant la durée de la tension d'impulsion de foudre. Lorsque les valeurs de la tension augmentent, les vitesses augmentent suffisamment pour provoquer un claquage. La figure 4.14 donne la variation de la vitesse moyenne des streamers par rapport à la tension appliquée pour les deux polarités. Nous observons

que les streamers positifs se propagent plus vite que les streamers négatifs. Selon Dang et al [133], cette différence est liée à la différence de la conduction des streamers, où les streamers positifs sont plus conducteurs que les négatifs, et il est bien connu que plus les streamers sont conducteurs, plus ils sont rapides. Dans une autre étude [62, 63], une relation mutuelle entre les vitesses et les ramifications a été trouvée ; les streamers à faible vitesse ont plus de ramification.

Cependant, nous avons observé qu'il existe une similitude dans les vitesses de propagation des streamers entre les huiles MO et OO. Nous observons également différents modes de propagation des streamers. Il est bien connu que la vitesse de propagation des streamers ne sera pas constante sur toute la longueur de l'intervalle inter-électrodes. La transition entre ces modes de propagation dépend de la structure moléculaire de l'huile et des conditions expérimentales [11, 62, 133]. Biller [134] a proposé que la propagation des streamers en mode lent est liée à l'ionisation des molécules "facilement ionisables" dans le liquide, qui ont généralement des potentiels d'ionisation et des densités ioniques plus faibles, tandis que la propagation en mode rapide résulte de l'ionisation des principales molécules "ordinaires".

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons observé que les streamers négatifs sont généralement plus lumineux que les streamers positifs. Il existe une différence dans la position de branchement. Dans l'huile minérale, la position de branchement est au milieu ou à la fin des streamers négatifs, tandis que dans les esters naturels et synthétiques, elle est au début. La longueur d'arrêt L_f augmente avec la tension appliquée. Les tensions requises pour obtenir les mêmes longueurs sont plus élevées lorsque la polarité est négative que lorsqu'elle est positive dans toutes les huiles. 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 que dans l'huile minérale. En général, les résultats expérimentaux obtenus montrent que les caractéristiques des streamers (forme des streamers, longueur d'arrêt, courants et charges associés) de l'huile d'olive sont comparables à celles de l'huile minérale.

Ainsi, l'huile d'olive peut constituer un substitut potentiel de l'huile minérale dans les transformateurs de puissance. Cependant, pour concevoir un système isolant donné pour une grande unité (transformateur de puissance), il est nécessaire de connaître le comportement des streamers dans les huiles dans des grandes distances inter-électrodes.

CHAPITRE 5

ÉTUDE STATISTIQUE DE LA TENSION DE CLAQUAGE

5.1 Introduction

La tension de claquage est un paramètre clé dans le choix des liquides isolants utilisés dans les transformateurs de puissance; elle a un caractère statistique qui dépend de nombreux facteurs tels que les propriétés physico-chimiques de l'huile, les impuretés et l'humidité qui peuvent y être présentes ainsi que du système d'électrodes. Elle est généralement mesurée selon des normes spécifiques (standards) en utilisant des géométries d'électrodes bien définies. La tension de claquage est un phénomène aléatoire, donc il est nécessaire d'analyser la reproductibilité des mesures expérimentales sur un nombre suffisant de tests. Ainsi, en utilisant des techniques statistiques, on peut déterminer la valeur moyenne ou la tension minimale à partir de la dispersion des données de la tension de claquage. Lors de l'évaluation de la compatibilité des huiles à base d'esters naturels avec les conceptions des transformateurs existantes, il est essentiel non seulement de comparer les tensions de claquage moyennes des huiles, mais aussi de tenir compte de la dispersion des résultats de mesure ; il est souhaitable d'utiliser un liquide ayant une dispersion minimale dans sa tension de claquage. La nature statistique des tensions de claquage diélectrique présente un défi pour les concepteurs de transformateurs qui doit concevoir l'isolation sur la base de la tension moyenne de claquage en introduisant un facteur de sécurité supplémentaire. De plus, la tension de claquage de l'isolation n'est pas considérée comme une valeur fixe mais comme une variable statistique correspondant à une probabilité de claquage faible. Généralement, la tension moyenne et l'estimation de la probabilité de 1% et 50% de la tension de claquage sont utilisées dans la conception d'isolation des équipements haute tension.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude statistique de la tension de claquage en tension alternative et impulsionnelle. Nous analysons la distribution des tensions de claquage et discutons l'applicabilité des distributions de Weibull et Normale pour estimer les tensions de claquage ainsi que la similarité des distributions dans les huiles utilisées. Toutes les techniques statistiques utilisées se trouvent dans des logiciels couramment disponibles. Pour ce travail, nous utilisons le logiciel OriginPro 9.0 pour le calcul statistique.

Dans ce qui suit, nous présentons d'abord les différents éléments et dispositifs expérimentaux utilisés dans nos essais ainsi que les caractéristiques des échantillons de liquides considérés. Puis, nous décrivons les résultats d'analyse statistique de la tension de claquage en tension alternative en utilisant les lois de distribution Normale et de Weibull. Nous présentons également les résultats de tension de claquage obtenus en impulsion de foudre (1.2/50 μ s).

5.2 Techniques expérimentales

Les tensions de claquage des liquides étudiés ont été mesurées dans une cellule de test de 400 ml de type Baur Dieltest selon la norme CEI 60156. Les électrodes sont constituées de deux sphères en laiton ayant un diamètre de 12,5 mm, séparées par une distance de 2.50 ± 0.05 mm. Avant chaque série de tests, la cellule et les électrodes sont nettoyées avec de l'alcool, puis lavées avec de l'eau chaude à une température entre 70 et 80 °C. La cellule d'essai et les électrodes sont ensuite séchées dans un four à 50 °C pendant 3 h afin d'éliminer l'eau. Les échantillons d'huile sont versés lentement dans la cellule d'essai et laissés reposer à température ambiante afin de permettre aux bulles de gaz et autres produits de décomposition de se dissoudre dans le volume du liquide. Le temps de repos entre chaque série de mesures est de 15 minutes pour l'huile minérale et de 30 minutes pour les esters naturels et synthétiques. La différence dans le temps de repos est due à la différence de la viscosité qui est plus élevée dans les esters (synthétique et naturel) par rapport à l'huile minérale.

En raison de la nature statistique de la tension de claquage et de reproductibilité des mesures, il est nécessaire d'obtenir suffisamment de mesures pour l'analyse statistique. Toutes les mesures ont été effectuées à température ambiante.

La tension alternative est fournie par un transformateur de type Hipotronics 200 kV – 50 Hz – 60 kVA avec le diviseur de mesure associé (type BER 1423/1212-A314, 0,01 μ F/100 pF - 200 kV). Une rampe de tension alternative 2 ± 0.2 kV/s est appliquée sans interruption, de zéro jusqu'au claquage. Afin d'obtenir suffisamment de points pour l'étude statistique, nous effectuons des séries de 50 mesures ; la tension de claquage est exprimée en valeur maximale (crête). Le temps d'attente entre deux

claquages est de 5 minutes pour l'huile minérale et de 10 minutes pour les esters (synthétiques et naturels).

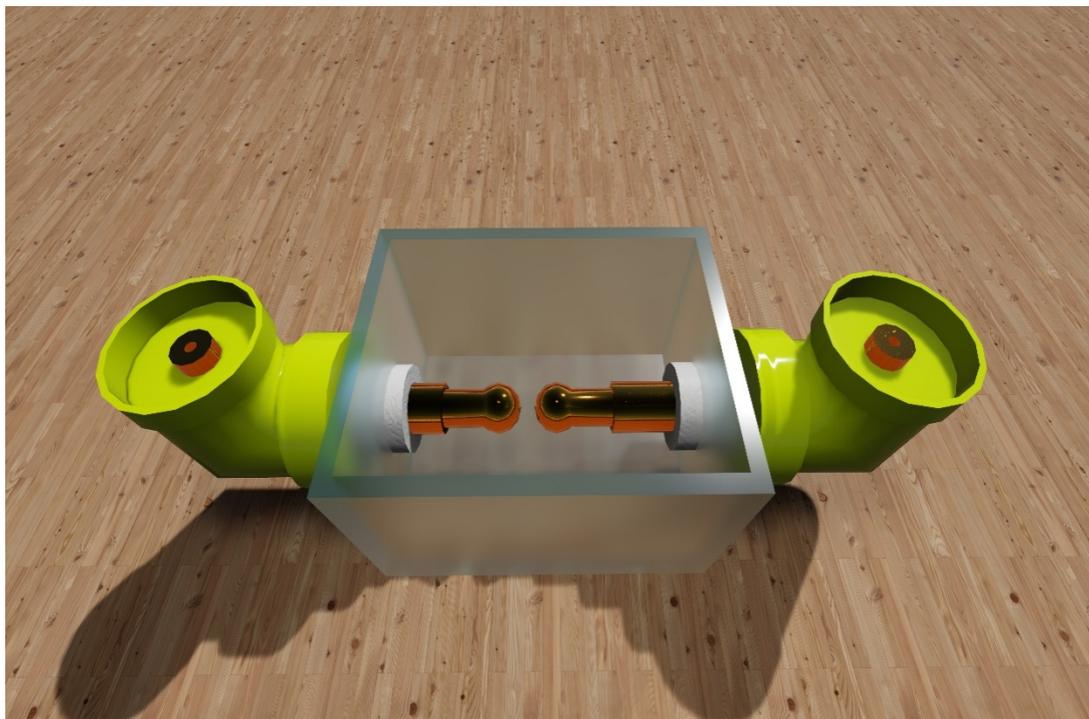


Figure 5. 1 : Cellule de test de 400 ml de type Baur Dieltest.

Les impulsions de tension de foudre ($1.2/50\mu\text{s}$) sont fournies par un générateur de choc de foudre (type Marx) à deux étages (200 kV — 2 kJ). Le temps entre deux claquages successifs est de 90 secondes. Pour calculer la tension de claquage en tension impulsionnelle ($1.2/50 \mu\text{s}$), nous utilisons la méthode de montée et descente (up and down). La Figure 5.2 explique la procédure générale de cette méthode. Une tension U_k est choisie, laquelle est considérée comme approximativement égale au niveau de décharge disruptive à 50% et être sûr qu'elle ne provoque pas un claquage de l'huile. Un intervalle de tension ΔU approximativement égal à 3% de U_k , est également choisi. On applique un choc d'amplitude U_k , et s'il ne produit pas de décharge disruptive, le choc suivant aura pour une amplitude $U_k + \Delta U$. S'il y a claquage à U_k , l'amplitude du choc suivant sera $U_k - \Delta U$.

Cette procédure est répétée, l'amplitude de chaque choc étant déterminée par le résultat du choc précédent jusqu'à ce qu'un nombre suffisant d'observations ait été

enregistré. Le premier niveau U_1 pris en compte étant l'un de ceux pour lesquels deux chocs ou plus ont été enregistrés. Ceci évite toute erreur significative si U_k est choisie trop grande ou trop faible. La tension à 50% de décharge disruptive est calculée par la relation :

$$U_{50} = \frac{1}{M} \sum_{v=1}^n (n_v U_v) \quad (5.1)$$

Avec:

v : le niveau de tensions appliquées;

n_v : le nombre de chocs appliqués à un niveau de tension U_v ;

U_v : l'amplitude de la tension de niveau v ;

M représente le nombre de chocs utiles qui regroupe l'ensemble des essais enregistrés après le premier niveau de tension ; ce nombre doit être supérieur à 20 pour avoir une valeur de la tension U_{50} correcte. Dans notre cas, nous avons choisi $M = 100$ chocs.

Les liquides testés sont pratiquement les mêmes que ceux utilisés dans les chapitres précédents (Tableau 6.1). La teneur en eau des huiles est mesurée avant chaque essai par la méthode de Karl Fisher et au moyen d'un Coulomètre type METLER TOLEDO KF DL39.

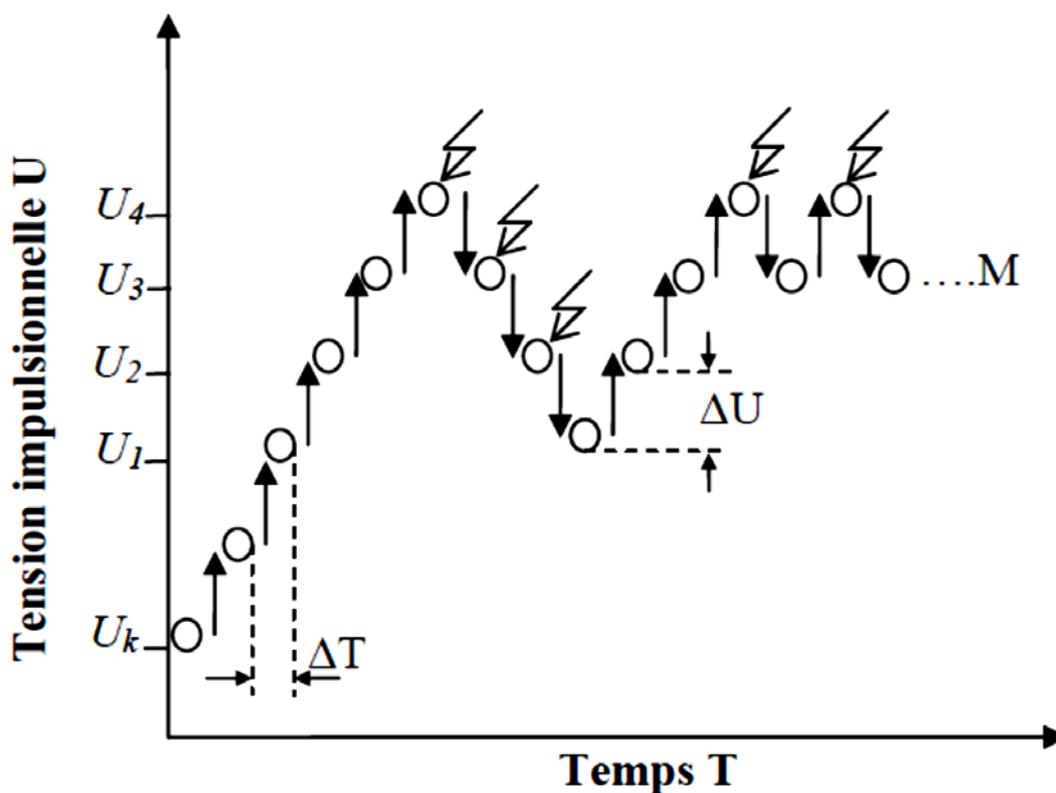


Figure 5. 2 : Méthode de montée et descente (up and down).

5.3 Histogramme de la tension de claquage

Les résultats de la tension de claquage mesurés sont montrés sur la Figure 5.3. Nous avons observé que les valeurs de la tension de claquage augmentent légèrement avec le nombre de claquages au début des tests, puis sont dispersées autour d'une valeur moyenne. Cette augmentation peut être expliquée par l'élimination des liaisons faibles telles que les impuretés et les bulles de gaz dans l'huile, et le conditionnement de la surface de l'électrode avec l'élimination des micro-aspérités tranchantes par les étincelles des décharges.

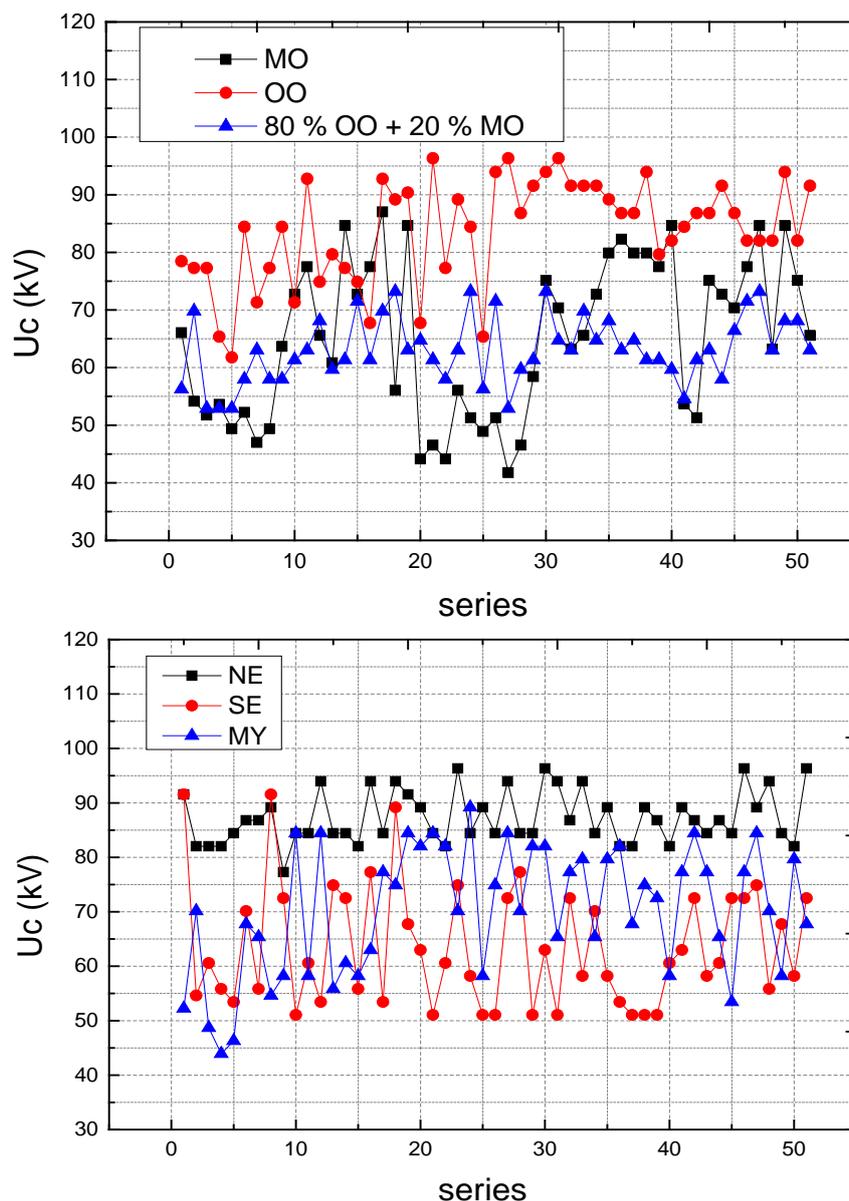


Figure 5.3 : Distribution des tensions de claquage des huiles testées.

Le diagramme en boîte de la tension de claquage des huiles utilisées est présenté sur la Figure 5.5. Aussi appelé boîte à moustaches, boîte de Tukey ou boîte à pattes, ce diagramme permet de comparer un même caractère dans deux populations de tailles différentes. Il utilise le 1er et le 3ème quartile, les valeurs extrêmes, le 1er et le 9ème décile et éventuellement la médiane d'une série. Une boîte avec des pattes courtes indique que la série est assez concentrée autour de sa médiane. Au contraire des pattes longues indiquent que la série est assez dispersée. Les résultats obtenus montrent que la tension moyenne de claquage des esters naturels est beaucoup plus

élevée que celle de l'huile minérale. Nous observons également une dispersion considérable des résultats pour toutes les huiles testées.

Lors de l'évaluation de la compatibilité d'une nouvelle huile avec les conceptions d'isolation existantes pour transformateurs, il est essentiel non seulement de comparer les tensions de claquage moyennes des huiles, mais aussi de tenir compte du rôle de la dispersion. Les concepteurs d'isolation estiment parfois la tension de claquage de l'huile minérale à partir de la dispersion des données, en supposant que les tensions de claquage de l'huile suivent une distribution paramétrique. Si la dispersion des tensions de claquage est différente, la marge de sécurité requise dans la conception de l'isolation du transformateur peut être différente. Par conséquent, il est important de tester si les tensions de claquage des esters se comportent d'une manière qui est statistiquement similaire à l'huile minérale.

Les histogrammes de la tension de claquage sont présentés sur la Figure 5.6. Ils permettent de représenter la répartition de la tension de claquage avec un nombre différent de classes et ainsi de détecter certaines anomalies. De l'analyse des histogrammes, il ressort qu'il y a au moins un intervalle de tensions où il n'y a pas de claquage, ceci est dû vraisemblablement au nombre limité de séries de mesures. Nous constatons aussi que les plus faibles tensions de claquage dans les esters naturels (60 kV dans OO et 76 kV dans RO) sont plus élevées que celles de l'huile minérale (40 kV). Cela est dû à la dépendance de la tension de claquage à l'humidité relative (le pourcentage de saturation). Sachant que l'humidité relative compare la quantité d'eau présente dans l'huile (humidité absolue) à la quantité qu'il faudrait pour le saturer (degré de saturation).

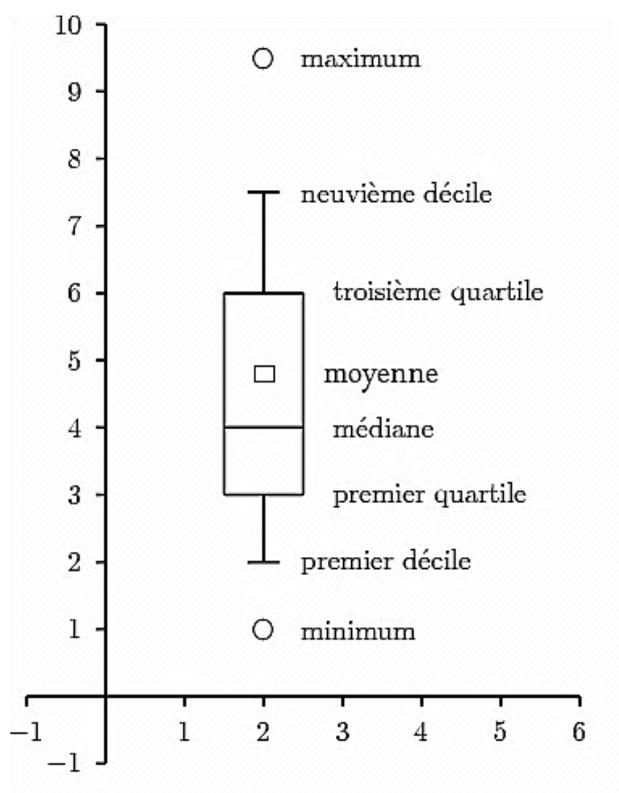


Figure 5. 4 : Diagramme en boîte.

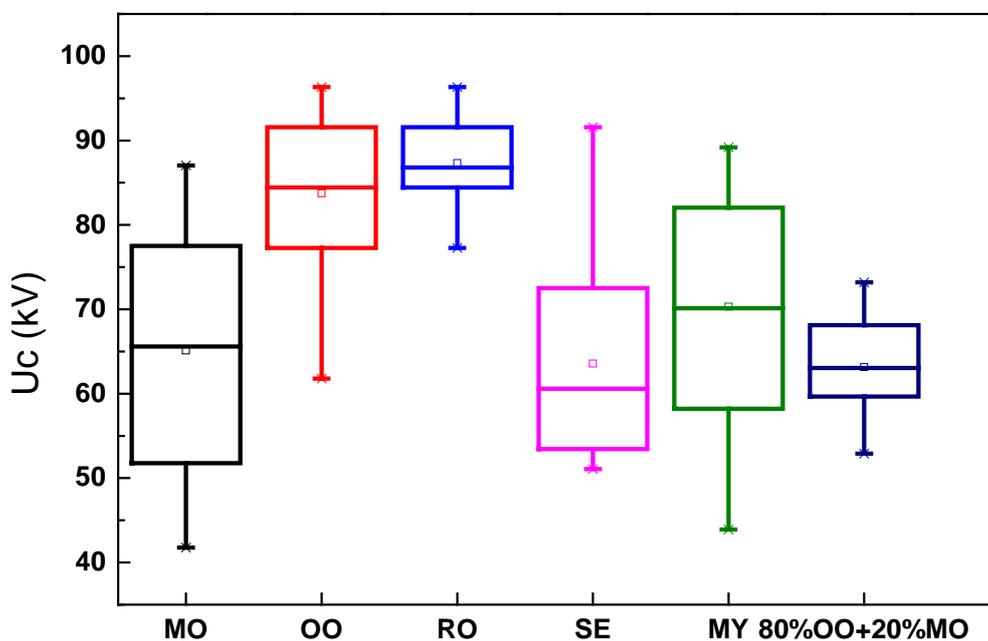


Figure 5. 5 : Diagramme en boîte des tensions de claquage des huiles testées.

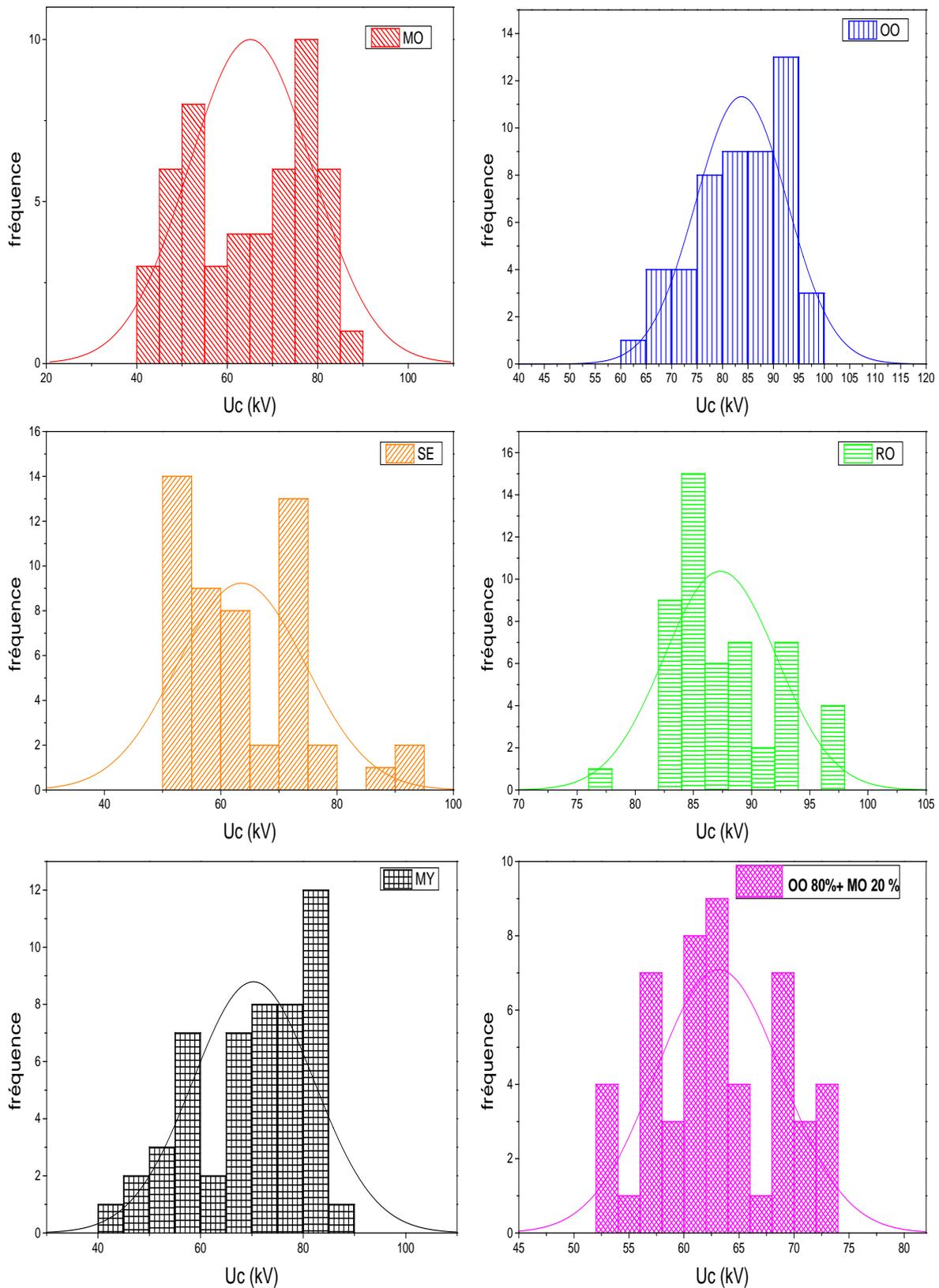


Figure 5. 6 : Histogramme des tensions de claquage des huiles étudiées.

Dans les esters naturels le degré de saturation en humidité est plus élevé généralement que celui des huiles minérales. A température ambiante, le degré de saturation en eau pour un ester naturel est d'environ 1050 ppm ; celui de l'huile minérale est d'environ 60 ppm. Ainsi, pour la même humidité absolue, les esters naturels auront une humidité relative beaucoup plus faible en comparaison avec l'huile minérale. Une humidité relative faible dans les esters naturels aide à maintenir leurs tensions de claquage supérieur à celle des huiles minérales

Cependant, dans toutes les huiles, les plus faibles tensions de claquage sont conformes à la norme IEEE 62-1995 pour les tests de diagnostic sur terrain des appareils électriques, qui recommande que la tension minimale de claquage doit être d'une valeur de 26 kV dans les équipements ayant une tension nominale de 69 kV ou supérieure.

Les résultats de l'analyse statistique (écart type, médiane, moyenne.....) des populations des échantillons sont présentés dans le tableau 2. Les résultats de l'écart type montrent que les esters naturels présentent des valeurs d'écart-type plus faibles (11% dans OO et 5% dans RO) comparé à MO (21%), ce qui signifie que la dispersion dans les résultats des tensions de claquage est plus faible dans les esters naturels par rapport à l'huile minérale. Un écart-type fiable dans la tension de claquage est important pour la comparaison des performances diélectriques des liquides isolants ; il est souhaitable d'utiliser un liquide ayant une dispersion minimale dans sa tension de claquage. Cela fournira un degré plus élevé de prévisibilité dans les performances diélectriques, ce qui peut affecter la conception et la maintenance des systèmes haute tension.

Tableau 5. 1 : Les résultats de l'analyse statistique.

HUILE	Moyenne (kV)	Ecart type (kV et %)	Kurtosis	Skewness	Minimum	Maximum	Médiane
MO	65	14 (21%)	-1.36	-0.04	41.7	87	65
OO	84	9 (11%)	-0.34	-0.64	61.7	96	84
RO	87	5 (5.5%)	-0.77	0.45	77.2	96	87
SE	63	11 (17%)	0.06	0.80	51	91	60
MY	70	12 (17%)	-0.85	-0.42	44	89	70
80%OO+20%MO	63	5.8 (9%)	-0.66	0.08	53	73	63

5.3.1 Test d'hypothèse

A partir des histogrammes, il apparaît que les distributions de données suivent la distribution normale mais cela doit être vérifié. Pour appliquer la distribution statistique dans l'étude de probabilité de la tension de claquage, on fait d'abord les tests d'hypothèse sur les distributions choisies. Dans ce travail, ce sont des distributions Normale et de Weibull qu'on considère. Le niveau de signification du test α est de 5% ($\alpha = 0.05$).

Le test d'hypothèse de conformité à la distribution Normale est d'abord effectué par le test Kolmogorov-Smirnov. Les hypothèses nulle et alternative sont :

- H_0 - Les tensions de claquage mesurées suivent la distribution Normale.
- H_1 - Les tensions de claquage mesurées ne suivent pas la distribution Normale.

Les résultats de test d'hypothèse de conformité à la distribution Normale sont résumés dans le Tableau 6.2. Si la valeur p-value est supérieure au niveau de signification $\alpha = 0.05$, l'échantillon est jugé normalement distribué. On peut constater

que pour la plupart des huiles (sauf RO) le test est accepté, et donc les tensions de claquage suivent la distribution normale.

Tableau 5. 2 : Test d'hypothèse de conformité à la distribution Normale.

Huile	W	p- value	Conformité à la loi normale
MO	0.12398	0.38438	accepté
OO	0.12352	0.38902	accepté
RO	0.21528	0.01487	rejeté
SE	0.15515	0.15433	accepté
MY	0.13416	0.29179	accepté
80%OO+20%MO	0.13436	0.29012	accepté

Tableau 5. 3 : Test d'hypothèse de conformité à la distribution de Weibull.

Huile	A	p- value	Conformité à la loi de Weibull
MO	1.09244	0.00662	rejeté
OO	0.87454	0.02324	rejeté
RO	1.93709	5.19423E-5	rejeté
SE	1.56355	4.41767E-4	rejeté
MY	0.96621	0.0137	rejeté
80%OO+20%MO	0.64135	0.0892	accepté

Le test d'hypothèse de conformité à la distribution Weibull a été effectué par le test Anderson-Darling [135]. Les hypothèses nulle et alternative sont les suivantes :

- H_0 - Les tensions de claquage mesurées suivent la distribution de Weibull.
- H_1 - Les tensions de claquage mesurées ne suivent pas la distribution de Weibull.

Les résultats de test d'hypothèse de conformité à la distribution de Weibull sont résumés dans le tableau 6.3. Il apparaît que toutes les huiles (sauf le mélange OO / MO) ne sont pas conformes à cette distribution.

Enfin, on peut dire que dans cette étude, les tensions de claquage suivent la distribution Normale. Des résultats similaires ont été également rapportés par d'autres chercheurs [136].

5.4 Analyse statistique de la tension de claquage par la distribution Normale

La probabilité de la tension de claquage des huiles étudiées par la distribution Normale est présentée sur la Figure 6.4. Nous remarquons que les données de la tension de claquage dévient aux queues de la courbe d'ajustement, précisément pour des tensions inférieures à $U_{10\%}$ (probabilités faibles) et pour des tensions supérieures à $U_{95\%}$ (probabilités élevées). Par conséquent, la précision de conformité de la distribution, diminue lorsque la probabilité est faible ou grande.

Pour distinguer les asymétries et les aplatissements dus aux fluctuations statistiques de celles qui sont réelles, les coefficients d'asymétrie (skewness) et d'aplatissement (kurtosis) de la distribution Normale sont calculés (Figure 6.5).

Dans la distribution normale, les valeurs de skewness = 0 et kurtosis = 3, tout changement dans ces valeurs indique la déviation par rapport à la normale. Le coefficient d'asymétrie calculé dans toutes les huiles n'égale pas 0, cela signifie que la distribution de la tension de claquage est plus ou moins asymétrique. Le coefficient d'asymétrie de MO, OO, MY, est négatif ; cela signifie que la distribution est asymétrique à droite de leur valeur moyenne. Par contre, le coefficient d'asymétrie de

RO, SE et du mélange est positive ; cela indique que la distribution de la tension de claquage dans celles-ci est asymétrique à gauche de la valeur moyenne.

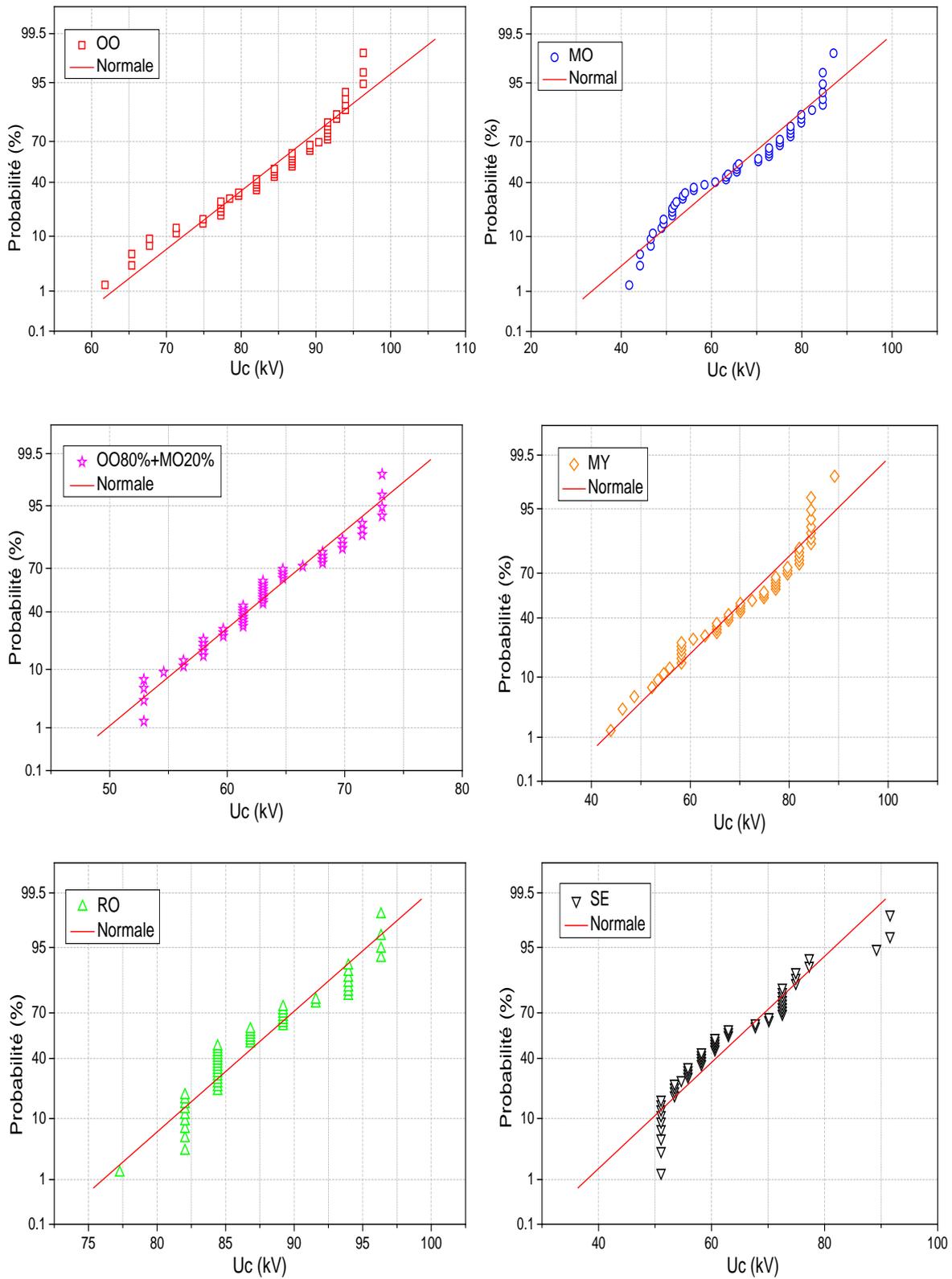


Figure 5. 7 : Probabilité de la distribution Normale de la tension de claquage des huiles.

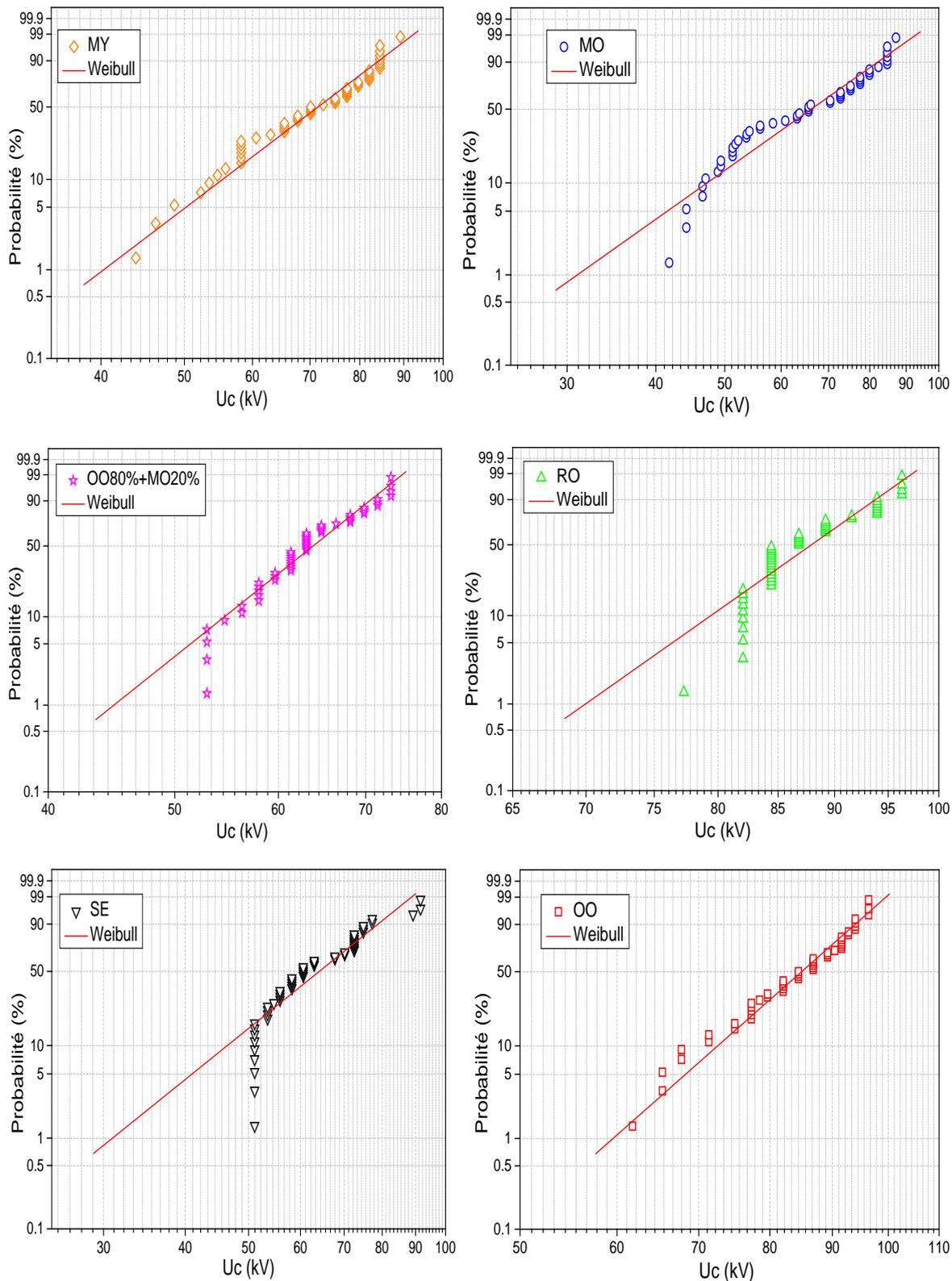


Figure 5. 8 : Probabilité de la distribution de Weibull de la tension de claquage des huiles.

Nous constatons également que le coefficient d'aplatissement (kurtosis) est négatif dans toutes les huiles étudiées à l'exception de SE, indiquant que les distributions sont platikurtiques (plates) et que les queues comptent moins de points (queues légères) que dans une distribution Normale.

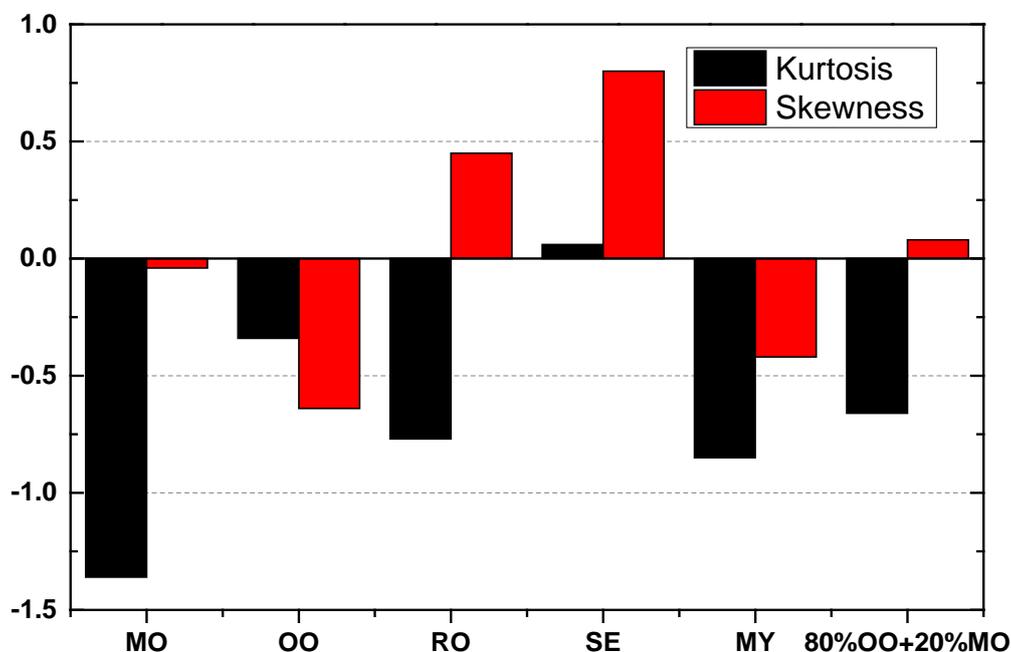


Figure 5. 9 : Coefficients d'asymétrie et d'aplatissement de la distribution Normale de la tension de claquage des huiles.

La conformité de la tension de claquage à la distribution statistique permet d'estimer la probabilité de la tension de claquage, c'est-à-dire une probabilité de $\alpha(\%)=P(U \leq U_i)$ ou bien $U_{\alpha\%}$ de ne pas claquer en dessous de la tension U_i . Les concepteurs d'isolation dans les équipements haute tension utilisent généralement des tensions de claquage avec des probabilités de 1% et 50% pour évaluer les niveaux de risque et déterminer le facteur de sécurité. La valeur de la tension de claquage avec des probabilités de 1%, 10%, 50% et 90% a été calculée en supposant que les données sont distribuées normalement. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 4. Nous pouvons voir que les pourcentages $V_{1\%}$, $V_{10\%}$, $V_{50\%}$ et $V_{90\%}$ dans les esters naturels sont supérieurs à ceux dans l'huile minérale. Par conséquent, du point de vue

statistique, on peut dire que l'huile d'olive OO testée et les esters naturels en général sont compatibles pour une utilisation dans les transformateurs de puissance.

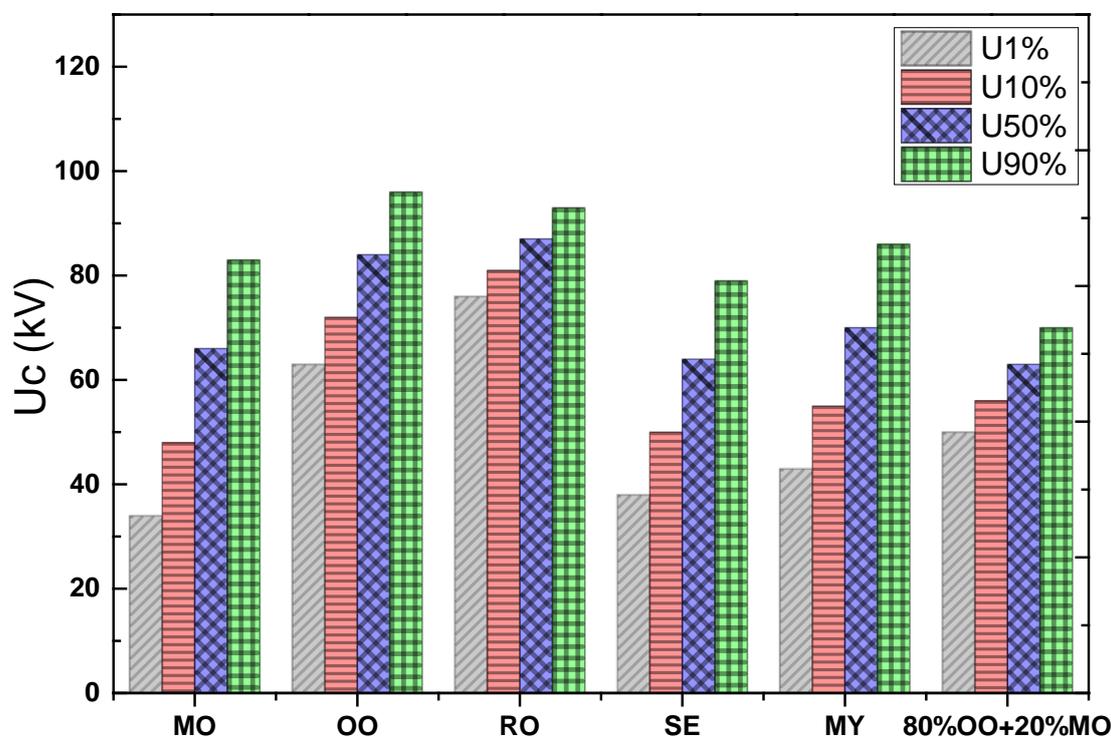


Figure 5.10 : Probabilité de la tension de claquage des huiles étudiées.

5.5 Tension de claquage sous tension de foudre

Les résultats de mesures de la tension de claquage en tension de foudre sont représentés sur la figure 5.11. Les tensions de claquage de toutes les huiles sont très proches. Il a été rapporté que les impuretés dans l'huile ne modifient pas significativement le comportement diélectrique sous tension impulsionnelle, où la durée de l'impulsion est trop courte pour que le mouvement des particules déclenche la rupture [138]. Dans cette étude, il semble que l'effet de l'humidité relative est plus dominant sous tension alternative (AC) que sous tension de foudre.

Il est à noter que la $U_{50\%}$ en tension de foudre du mélange 80% OO + 20% MO est similaire à celle de l'huile minérale, aussi l'analyse statistique des tensions de

claquages en AC (écart type, moyenne, $V_{1\%}$, $V_{10\%}$, $V_{50\%}$ et $V_{90\%}$) du mélange 80% OO + 20% MO montre un meilleur comportement que MO. Sachant également que l'huile d'olive présente une excellente miscibilité avec l'huile minérale, on peut conclure que le remplissage des transformateurs en fonctionnement avec cet ester naturel (huile d'olive) peut être envisagé. Des mesures complémentaires sont nécessaires avant de qualifier l'huile d'olive pour les transformateurs.

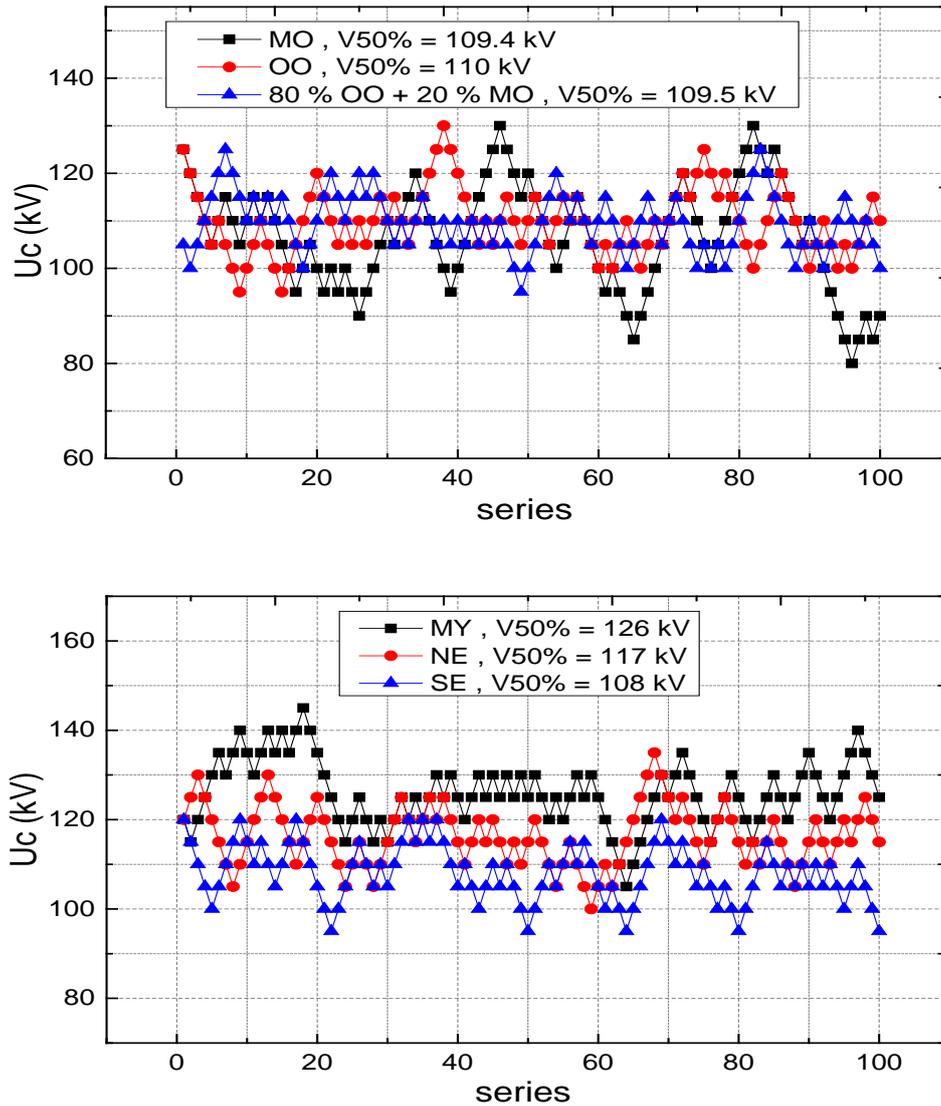


Figure 5. 11 : Tension de claquage dans les huiles testées sous impulsion de foudre.

5.6 Conclusion

Les tensions de claquage en tension alternative des huiles ont été déterminées selon la norme CEI 60156. Les histogrammes montrent que les plus faibles tensions de claquage dans les esters naturels sont plus élevées que celles de l'huile minérale.

Les analyses statistiques des tensions de claquage obtenues montrent que ces tensions suivent la distribution normale pour presque toutes les huiles. Les tensions de claquage réelles montrent un écart par rapport à la distribution normale, précisément pour des tensions inférieures à $U_{10\%}$ et pour des tensions supérieures à $U_{95\%}$. Ces résultats sont très utiles pour la conception et la gestion des systèmes haute tension.

Les tensions de claquage mesurées $U_{1\%}$, $U_{10\%}$, $U_{50\%}$ et $U_{90\%}$ en alternatif sont plus élevées dans l'huile d'olive et les huiles végétales que dans les huiles minérales pour les niveaux de risque 1%, 10%, 50% et 90%. Les esters naturels présentent des valeurs d'écart-type plus faibles en comparaison à l'huile minérale, ce qui signifie que la dispersion dans les résultats des tensions de claquage est plus faible dans les esters naturels que dans l'huile minérale.

Les tensions $U_{50\%}$ sous impulsion de type foudre sont aussi plus élevées dans les huiles végétales que dans l'huile minérale.

Par conséquent, le remplissage des transformateurs en service avec cet ester naturel (huile d'olive) peut être envisagé.

CHAPITRE 6

ÉTUDE DES DECHARGES

GLISSANTES

6.1 Introduction

Les produits celluloseux imprégnés d'huile (carton, papier kraft, etc.) sont largement utilisés dans les applications hautes tension et principalement dans les transformateurs de puissance pour assurer l'isolation électrique. La durée de vie des transformateurs dépend principalement des propriétés mécaniques de l'isolant celluloseux qui sont directement en relation avec la résistance des matériaux et donc leur longévité; au fur et à mesure que le carton vieillit, sa résistance mécanique diminue [7, 39]. Dans les transformateurs de puissance, les cartons sont généralement utilisés pour isoler les enroulements du transformateur (utilisés comme barrières entre les enroulements ou entre les enroulements et la terre). Les interfaces carton/liquide sont exposées à différentes contraintes et en particulier aux contraintes thermiques et électriques. Dans ce chapitre, nous nous intéressons principalement aux contraintes électriques et en particulier aux décharges surfaciques se propageant sur des cartons immergés dans l'huile.

De nombreuses recherches ont été consacrées à la caractérisation des décharges se propageant aux interfaces carton/huile minérale et à certaines huiles à base d'esters. Parmi les esters, les esters naturels pour lesquels un intérêt particulier a été porté au cours des dernières décennies. Cet intérêt est lié à des préoccupations de sécurité et à des règles strictes de protection de l'environnement [3, 6, 8]. Ainsi, de nouveaux liquides à base d'esters naturels ont été développés et utilisés comme substitut aux huiles minérales. Ils sont biodégradables, renouvelables, non toxiques et ont un point d'éclair plus que les huiles minérales.

De nombreuses études ont été menées sur l'effet de différents esters naturels sur la vitesse de vieillissement des cartons lors d'un vieillissement thermique, où l'on constate que le carton se dégrade moins vite dans un ester naturel que dans l'huile minérale [120, 138]. Les esters naturels ont un effet bénéfique sur le carton, car ils ont la capacité de le sécher. Sachant que pour chaque doublement du taux d'humidité de l'isolant solide (carton), sa durée de vie sera réduite de moitié. Donc cette capacité à absorber l'humidité du carton réduira son processus de vieillissement dans l'ester naturel [120]. D'autres études ont trouvé un avantage de température de plus de 20°C lorsqu'on utilise les esters naturels dans les transformateurs de distribution, où la

durée de vie du l'isolant solide (carton) dans un transformateur de distribution rempli d'huile végétale (ester naturel) dont l'élévation de température est 85°C, est la même que dans un transformateur de distribution rempli d'huile minérale dont l'élévation de température est 65 °C. Ces phénomènes peuvent conduire à prolonger la durée de vie du système d'isolation dans le cadre d'un fonctionnement dans des conditions standards, ou à autoriser d'élever les limites d'élévation de température (une augmentation de la demande d'énergie : surcharges) avec des transformateurs remplis avec des huiles à base d'ester naturels par rapport à des transformateurs similaires remplis avec de l'huile minérale.

Cependant, pour étendre l'utilisation des esters naturels dans les transformateurs, il est important de connaître l'effet des contraintes électriques, en particulier l'effet des décharges surfaciques (glissantes) lorsqu'elles se propagent sur des cartons imprégnés dans les esters naturels. Les résultats rapportés sur ce sujet sont très limités contrairement au cas où les cartons sont imprégnés d'huiles minérales. Les décharges glissantes sont considérées comme l'un des problèmes majeurs rencontrés dans les transformateurs de puissance; dans le cas d'un contournement, les décharges laissent sur la surface du carton des canaux noirs (carbonisés). Ces derniers sont des dommages permanents qui agissent comme une piste conductrice de l'électricité qui dégrade le système d'isolation. Ainsi, la compréhension des caractéristiques des décharges surfaciques et leur développement jusqu'au contournement ou le claquage par rapport aux conditions expérimentales est d'un grand intérêt pour la conception et le dimensionnement des structures isolantes solide/liquide utilisés dans les composants électriques haute-tension tels que les transformateurs de puissance.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la caractérisation expérimentale des décharges surfaciques sous tension alternative et impulsionnelle de foudre 1.2/50 μ s, en géométries pointe– plan (décharges radiales) et pointe-barre (décharges tangentiels au carton). Nous présentons d'abord les différents éléments et dispositifs expérimentaux utilisés dans nos essais ainsi que les caractéristiques de l'échantillon solide (carton) et des liquides isolants (huile d'olive, minérale, esters naturels et synthétiques) considérés. Nous décrivons par la suite le phénomène de la décharge surfacique à la lumière des observations et enregistrements optiques et électriques effectuées au cours de notre étude. Nous présentons les différentes figures de

décharges qui peuvent être observées ainsi que les paramètres qui peuvent influencer leurs formes et leurs longueurs finales et plus particulièrement la polarité et l'amplitude de la tension appliquée, l'épaisseur du carton et la nature des huiles. Le courant et la charge associés aux décharges surfaciques sont également analysés en fonction de l'amplitude et de la polarité de la tension appliquée.

6.2 Techniques expérimentales

Le dispositif expérimental est constitué de deux cellules d'essais comportant la structure isolante et le système d'électrodes entre lesquelles l'isolant solide est inséré, deux sources de tension - une alternative et l'autre impulsionnelle (les mêmes que celles utilisées dans le chapitre 5), un diviseur de tension associé, des systèmes de visualisation des décharges et de mesures des signaux électriques et optiques qui les accompagnent (courant, charge, longueur finale des décharges, ...). Pour éviter les problèmes d'accumulation des charges d'espace sur des cartons résultant de décharges multiples, le temps entre deux essais successifs est fixé à 5 min minimum.

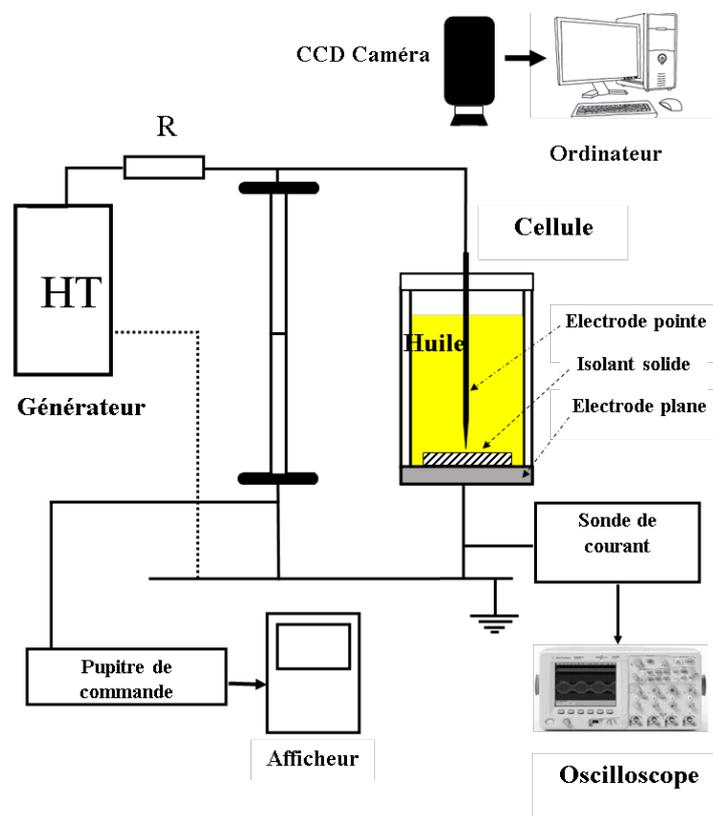


Figure 6. 1 : Schéma du dispositif expérimental.

La première cellule contient un système d'électrodes pointe-plan où le carton est inséré entre les électrodes de sorte que l'extrémité de la pointe est perpendiculaire au carton pour permettre une propagation radiale des décharges. Cette cellule est constituée d'un corps cylindre de 110 mm de hauteur et 90 mm de diamètre interne (Figure 6.2).

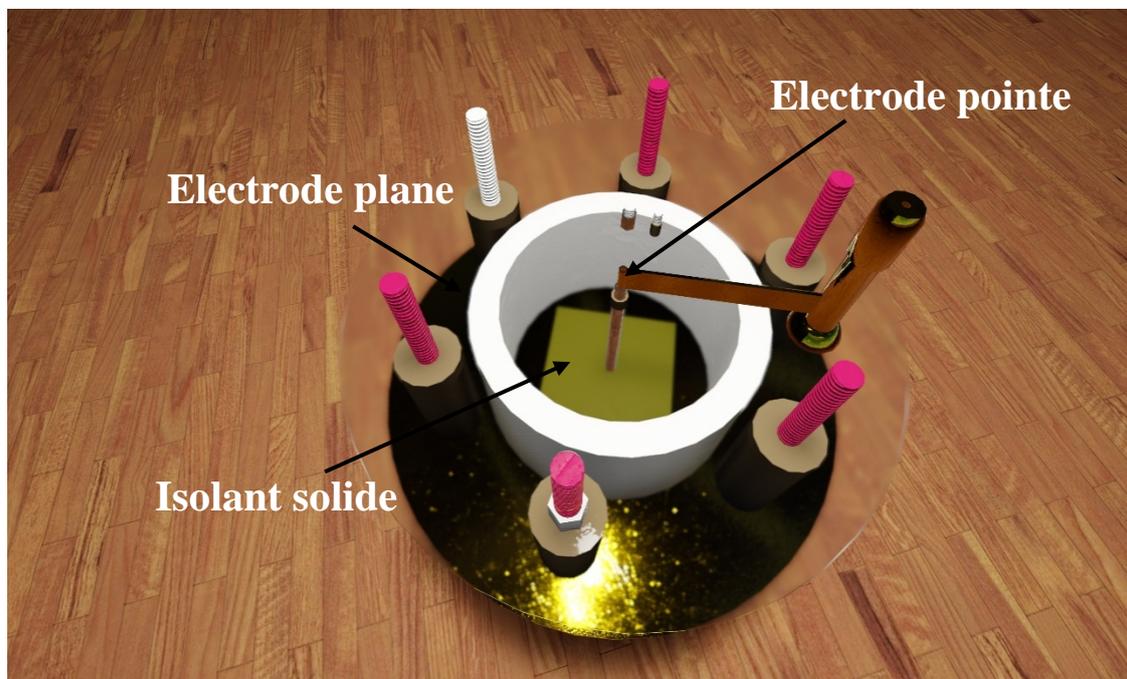
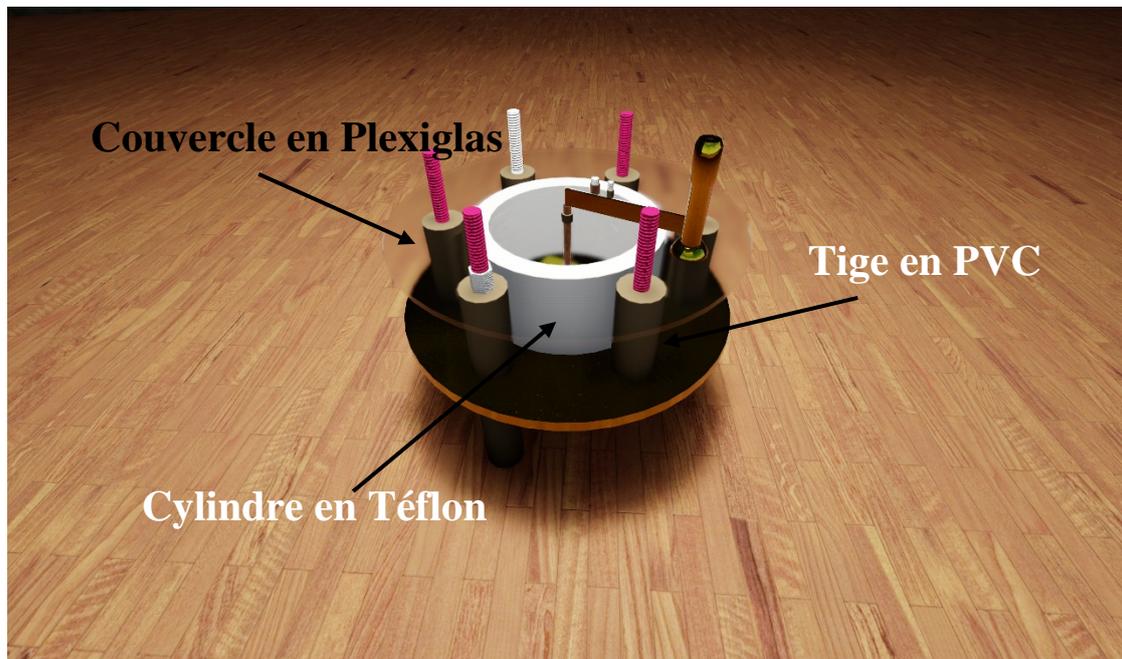


Figure 6. 2 : Première cellule (propagation radiale).

Elle est munie de deux couvercles, l'un en Plexiglas (transparent) servant à la visualisation des décharges et la fixation de l'électrode haute tension, l'autre en laiton constituant également l'électrode mise à la masse. Le corps de la cellule est lui-même constitué de deux parties : la partie supérieure de 60 mm de hauteur est en téflon et la partie inférieure est en Plexiglas de hauteur 30 mm. Cette partie transparente permet le contrôle du contact de l'électrode pointe avec l'isolation solide.

La deuxième cellule contient des électrodes pointe- barre où le carton était placé parallèlement à l'axe des électrodes pour permettre une propagation des décharges dans une direction (figure 6.4). 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 6.3). 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. Les deux cellules, en pièces détachées, sont soigneusement nettoyées et rincées 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.

Dans les deux cellules de test, l'électrode pointe est en tungstène thorié à 2% ; son rayon de courbure est de $10,0 \pm 0,5 \mu\text{m}$. 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.

L'observation optique des streamers est basée sur les images obtenues par intégration grâce à une caméra CCD "SONY XC-HR58", la même que celle utilisée dans le chapitre 4. Avec cette caméra, nous obtenons l'image de la décharge dans son extension maximale appelée "longueur d'arrêt" ou "longueur finale". Dans cette étude, nous utilisons trois positions différentes de la caméra (Figure 6.4). Dans le premier arrangement où la pointe était placée perpendiculairement au carton, la caméra est placée au-dessus de la cellule d'essai avec la même direction que la pointe (figure 6.4.a). Dans le deuxième arrangement où le carton est placé parallèlement à l'axe des électrodes, la caméra se trouve dans deux positions différentes (figures 6.4.a et 6.4.c) : (1) la caméra est perpendiculaire au carton pour observer la morphologie et la ramification des décharges sur le carton ; et (2) la caméra est parallèle au carton pour

vérifier si la décharge se propage le long de la surface tout en restant en contact avec le carton.

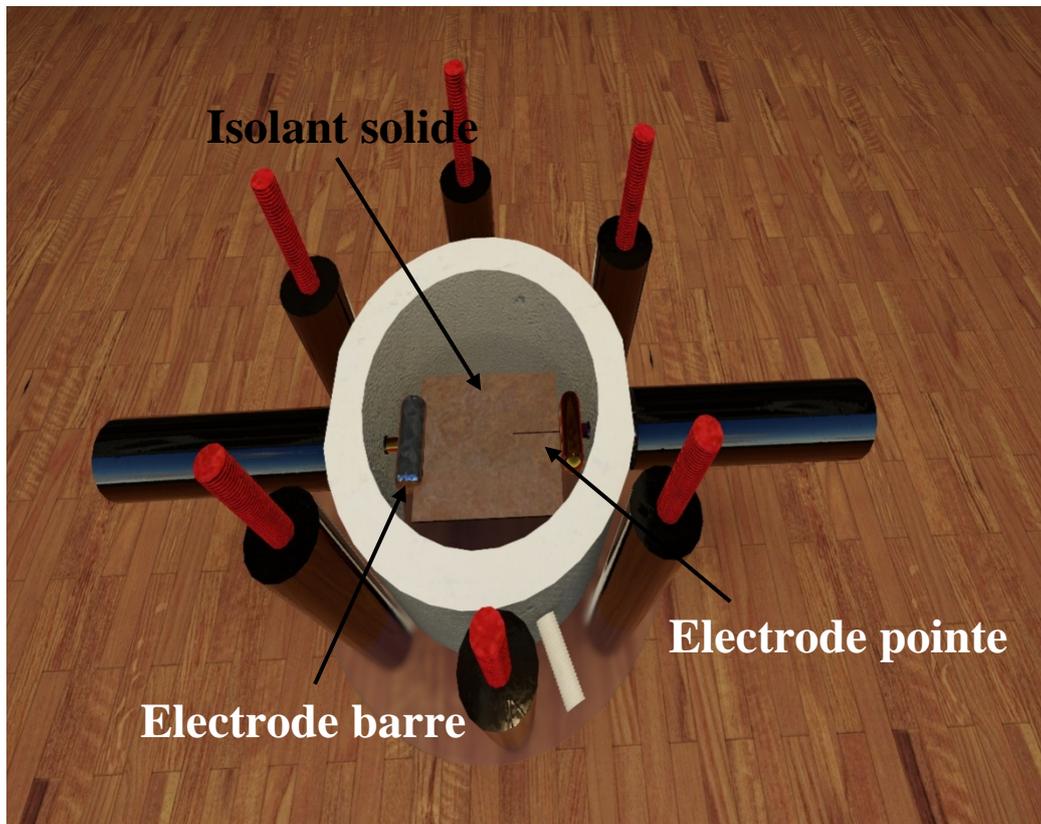


Figure 6. 3 : Deuxième cellule (propagation des décharges dans une direction).

Les courants de streamers sont mesurés à travers une sonde (Pearson Current Monitor 6585) connectée en série avec la cellule d'essais, et un oscilloscope à haute résolution temporelle (Agilent) MSO 6014A (1 GHz, 4 Gsa / s). La charge électrique est obtenue par intégration du courant obtenue automatiquement par l'oscilloscope.

Les liquides isolants testés sont les mêmes que ceux utilisés dans les chapitres 2 et 3. Les échantillons de solide isolant testés sont des carrés de carton utilisé dans les transformateurs de puissance, de 75 mm de côté, leur constante diélectrique est de $\epsilon_{PB}=4$. Avant les essais, ces échantillons sont séchés et imprégnés conformément à la norme IEC60641-2. Après ce processus, la teneur en eau du carton était d'environ 0,5%. Nous disposons de trois épaisseurs de carton (fourni par un industriel), soient 2, 3 et 4 mm. Pour réaliser des épaisseurs de 8 et 12 mm, nous procédons à la superposition de 2 ou 3 échantillons de 4 mm d'épaisseur respectivement. La surface des cartons est vérifiée au cours des essais, les cartons sont changés à chaque fois que

des traces de décharges surfaciques sont observées sur leur surface ou lorsqu'il y a un claquage.

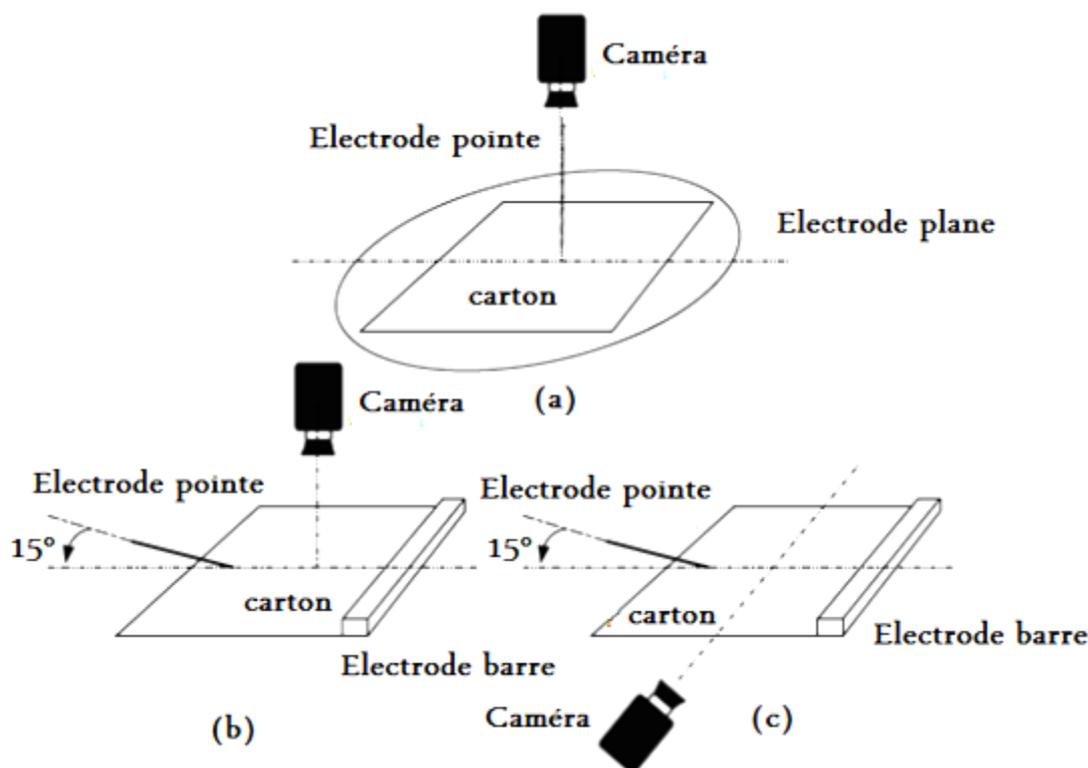
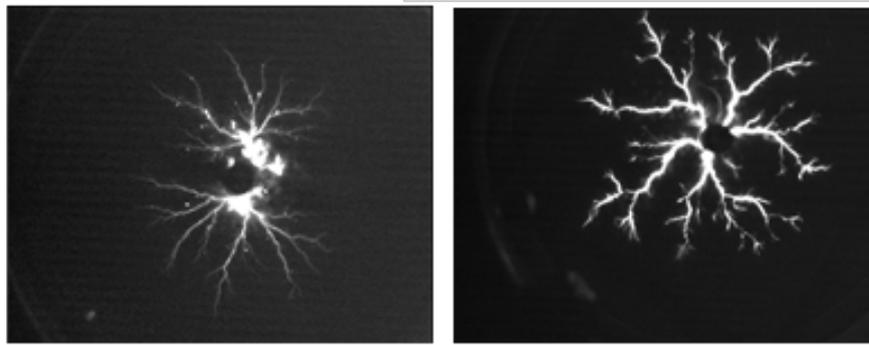


Figure 6. 4 : Schéma de l'arrangement des électrodes, du carton et de la caméra ;
(a) l'électrode pointe perpendiculaire au carton, (b) et (c) l'électrode pointe
parallèle au carton avec différentes positions de la caméra.

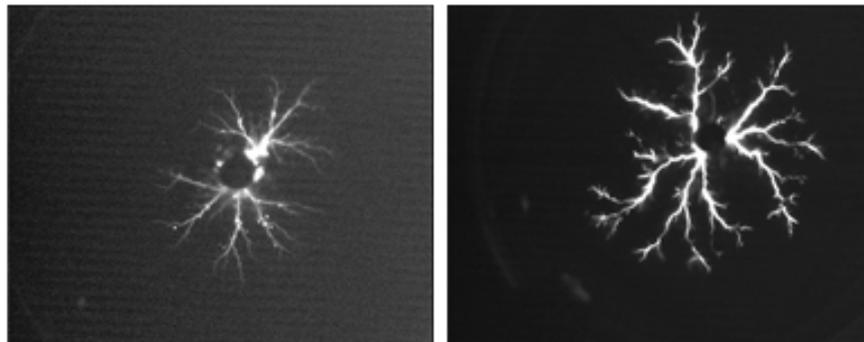
6.3 Morphologie des décharges glissantes

La morphologie des décharges glissantes dépend du type d'huile, des propriétés du carton, en particulier de son épaisseur et de sa constante diélectrique, ainsi que de la tension appliquée (forme d'onde, amplitude et polarité). Quelles que soient la polarité de la tension appliquée et la nature du liquide isolant, plus l'amplitude de la tension augmente, plus la longueur des décharges et l'intensité de lumière émise augmentent (Figure 6.5). On remarque que les décharges glissantes ont des formes similaires dans les différentes huiles étudiées et ce pour les deux polarités.

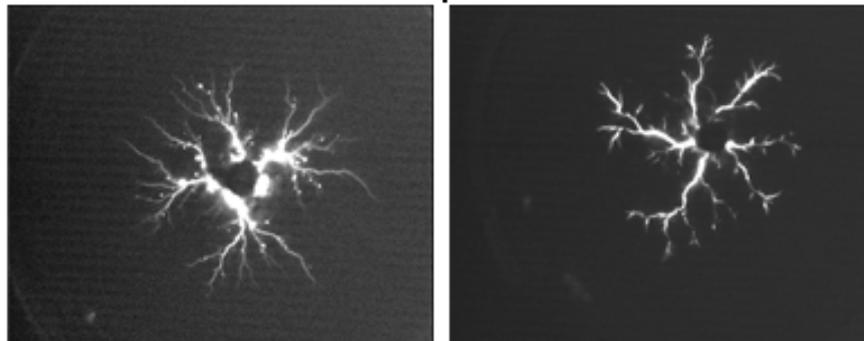
Polarité négative, $U = -80$ kV Polarité positive, $U = +60$ kV



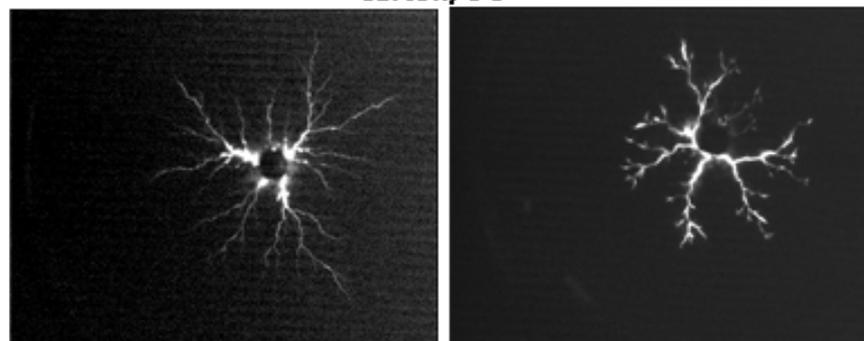
Carton/MO



Carton/SE



Carton/OO



Carton/RO

Figure 6. 5 : Images de décharges superficiques (électrode pointe perpendiculaire au carton) se propageant sur la surface du carton dans différentes huiles sous tension de foudre, $e = 4$ mm.

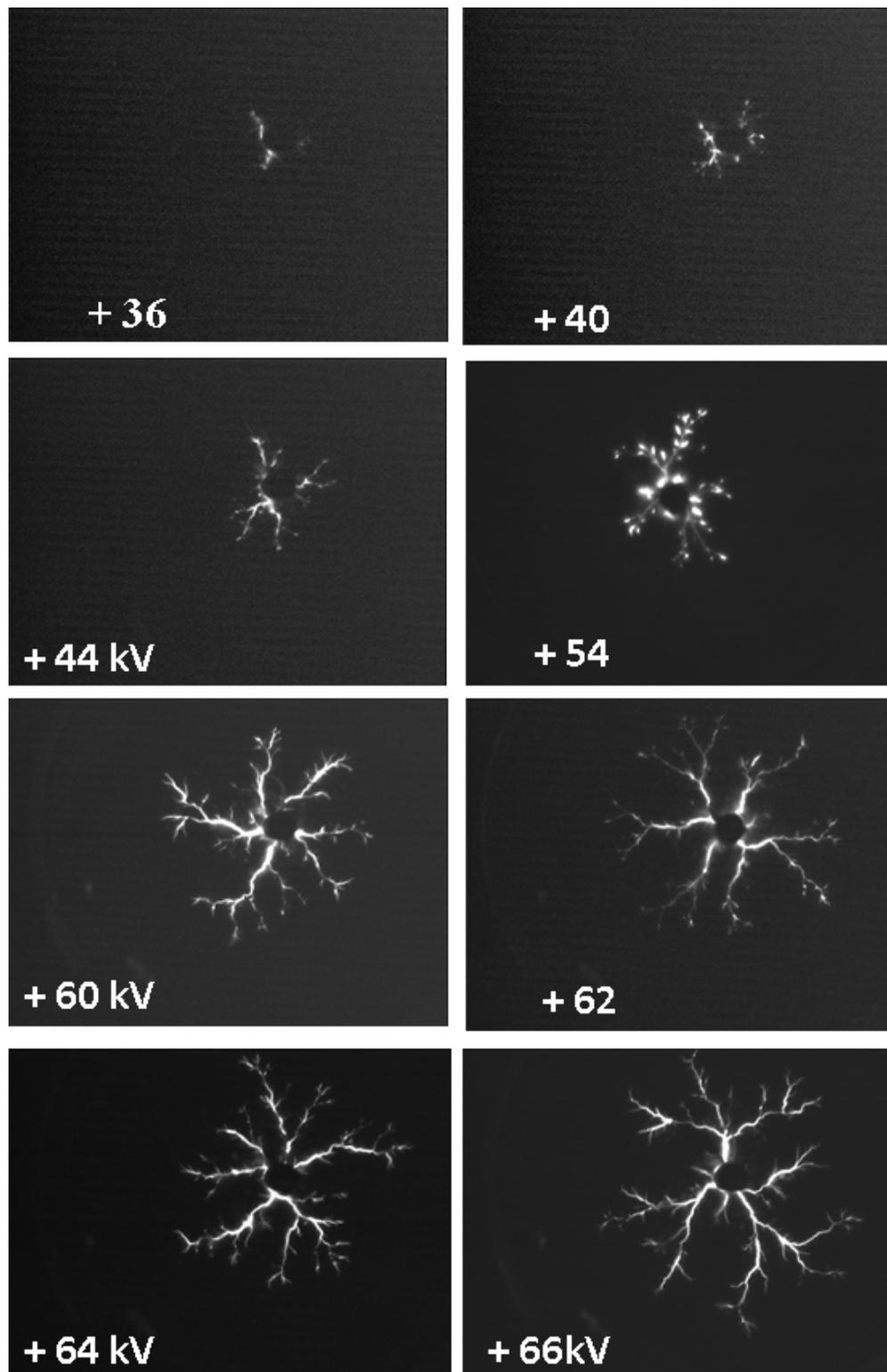


Figure 6. 6 : Évolution de la longueur des décharges en fonction de la tension de foudre obtenue en polarité positive, sur une interface OO/carton avec $e=4$ mm.

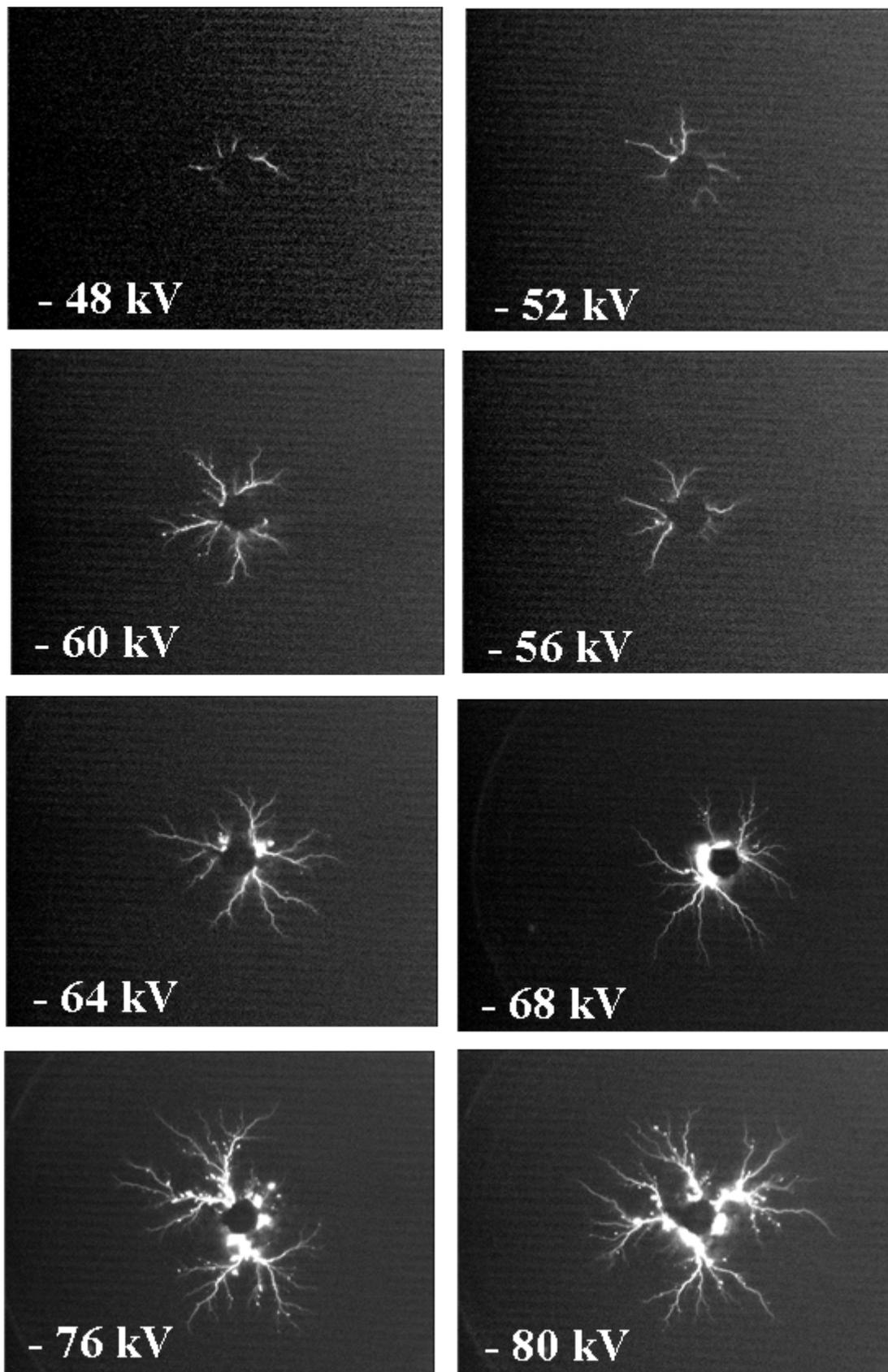


Figure 6. 7 : Évolution de la longueur des décharges en fonction de la tension de foudre obtenue en polarité négative, sur une interface OO/carton avec $e=4$ mm.

Sous tension impulsionnelle type foudre, les décharges négatives (générées à partir d'une pointe négative) sont constituées de branches droites qui présentent une structure presque radiale, tandis que les branches des décharges positives présentent pour la plupart une forme radiale avec une structure sinueuse et ramifiée. Les branches de décharges positives sont très lumineuses, indiquant une conductivité plus élevée qui rend les décharges plus rapides et plus longues par rapport aux négatives. De plus, certaines extrémités des branches des décharges positives sont très lumineuses par rapport à leurs bases, où on remarque la présence de points lumineux indiquant une intense zone d'ionisation (énergétiques) qui expliquerait les traces observées sur certains échantillons.

Sous tension alternative, les décharges glissantes observées ne se propagent pas radialement (figures 6.8 et 6.9). Les extrémités des branches des décharges et leurs ramifications ont pour la plupart des trajectoires circulaires autour de la pointe, ce qui est probablement dû à des phénomènes électro-hydro-dynamiques.

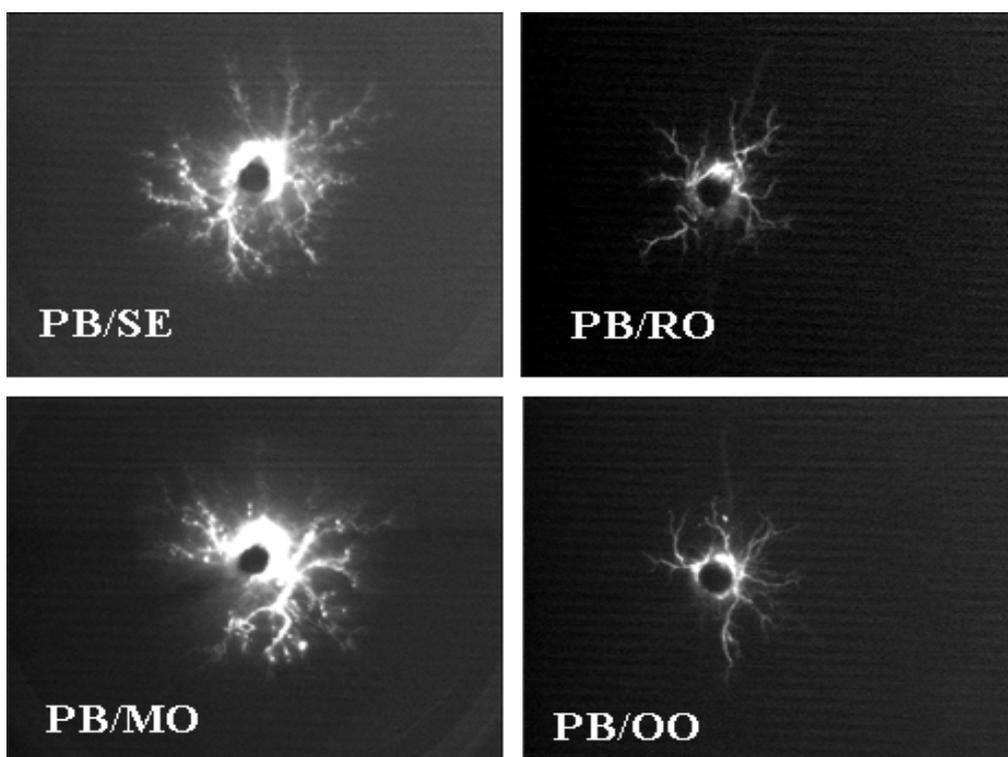


Figure 6. 8 : Images de décharges surfaciques (électrode pointe perpendiculaire au carton) sur différentes interfaces sous tension alternative : $U_c = 32 \text{ kV}$ et $e=3\text{mm}$.

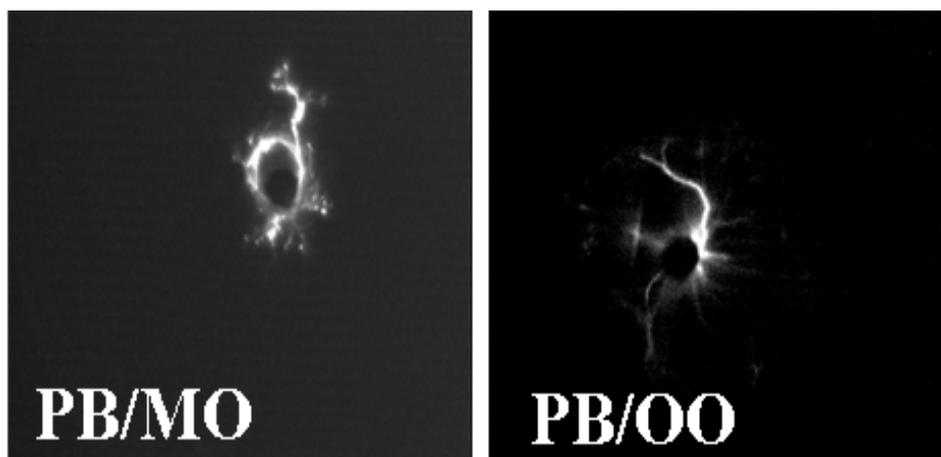


Figure 6. 9 : Images de la dégradation du carton (électrode pointe perpendiculaire au carton) et de son impact sur l'orientation des branches de décharge sous tension alternative pour différentes interfaces : $U_c = 45 \text{ kV}$ et $e = 3 \text{ mm}$.

La répétition d'essais engendre la dégradation de la surface du carton et la perte partielle de ses propriétés diélectriques. Après plusieurs tests consécutifs, une marque blanche qui ressemble à la forme de la décharge est occasionnellement observée sur la surface du carton. Cette marque blanche n'est pas un dommage durable et disparaît après peu de temps. La création de cette marque blanche est attribuée à l'évaporation et à la décomposition de l'huile ou de l'humidité à l'intérieur du carton ; l'énergie de la décharge glissante produit une température élevée à proximité de la surface du carton provoquant l'expansion des gaz créés à partir de la structure fibreuse de la cellulose. Lorsque l'énergie de la décharge glissante est élevée (arc de contournement), elle fait brûler rapidement et carboniser les fibres de cellulose, et des traces carbonisées (dommages irréversibles) seront formées sur la surface du carton. Avec une mince épaisseur du carton, les décharges peuvent trouer le carton et conduire au claquage. Généralement, la piste principale (branches) de l'arc de contournement tend à créer des marques sombres (carbonisées) lorsque les autres sous-branches ont tendance à créer des marques blanches. Les chemins carbonisés (marques sombres) sur la surface du carton sont électriquement conducteurs, de sorte qu'ils influenceront l'orientation des branches des décharges suivantes. Ainsi, pour une tension donnée, les décharges observées sur un échantillon soumis à des contraintes répétitives, sont plus longues comparées à celle générées sur des échantillons neufs. Nous remarquons qu'en se développant, les branches de la décharge suivent les mêmes trajectoires, et la multiplication des décharges sur le même échantillon conduit inmanquablement au

contournement de ce dernier à des amplitudes de tension relativement basses. Pour cette raison, les échantillons d'huile et de carton sont changés chaque fois que des marques sombres sont observées.

Pour les décharges tangentielles (système d'électrodes pointe-barre), quelle que soit la forme d'onde de la tension, les décharges se propagent le long de la surface du carton (Figure 6.10). Dans certains cas, on peut observer que certaines branches vont dans le volume d'huile environnant.

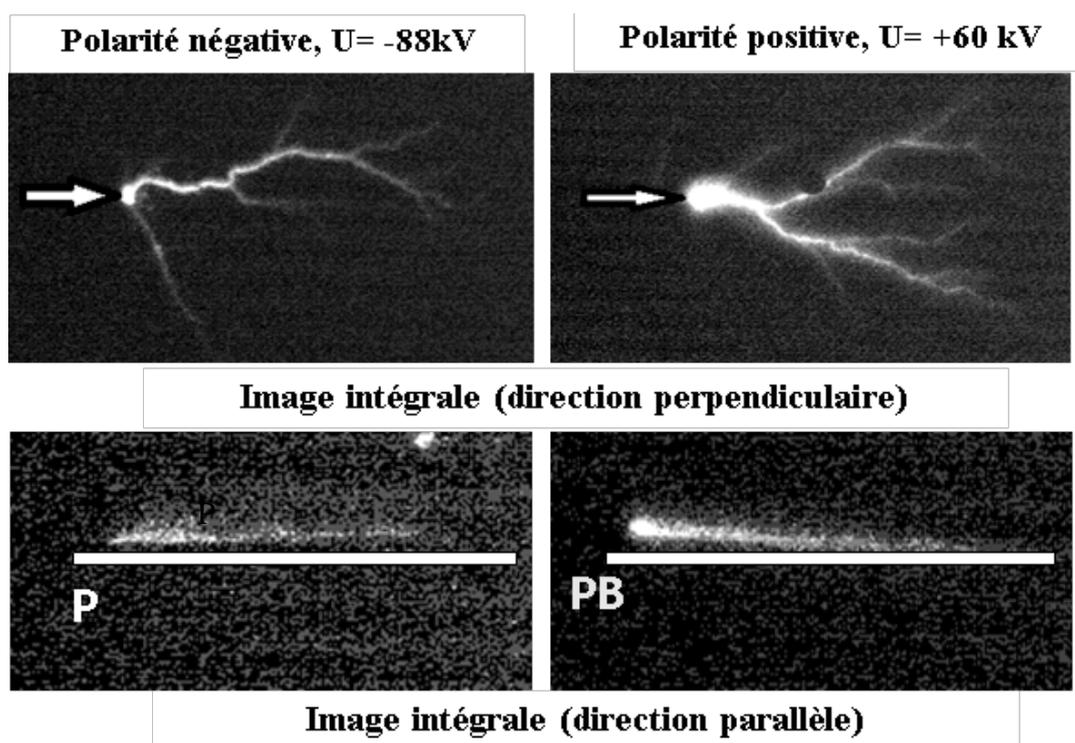


Figure 6. 10 : Images de décharges surfaciques (électrode pointe parallèle au carton avec différentes positions de la caméra) sur l'interface carton/OO sous tension de foudre et $e = 4\text{mm}$.

En ce qui concerne l'influence de l'épaisseur (e) du carton, on observe que quelle que soit la forme d'onde de la tension, la densité totale des branches décroît lorsque l'épaisseur du carton augmente, montrant ainsi le rôle important des effets capacitifs sur le mécanisme de propagation des décharges.

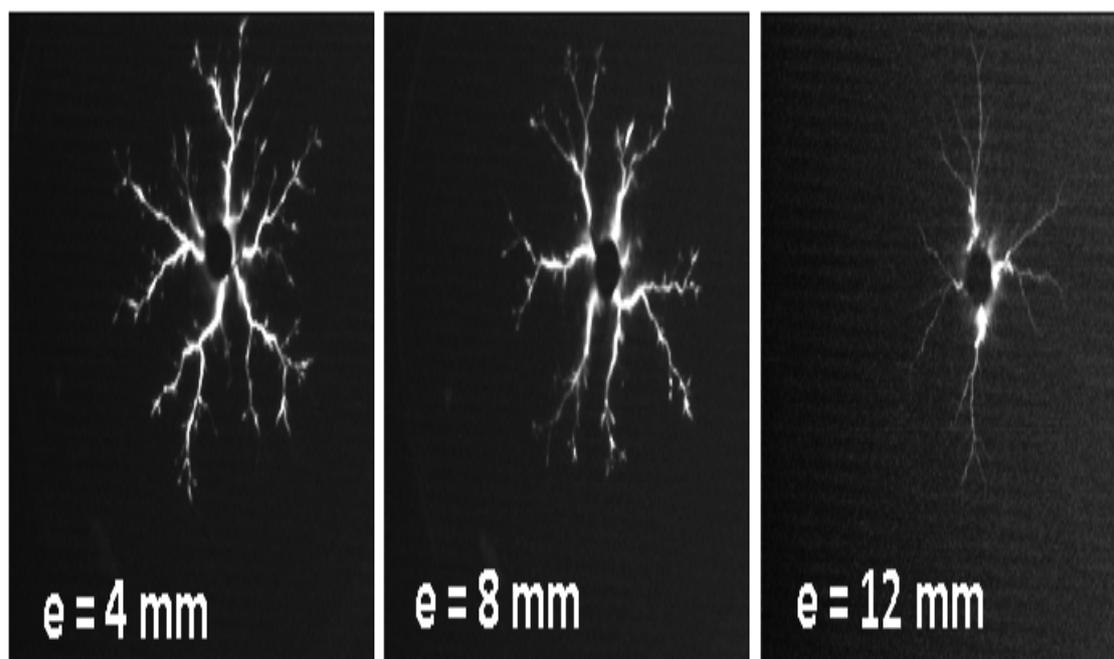


Figure 6. 11 : Images montrant l'influence de l'épaisseur du carton sur les décharges surfaciques (électrode pointe perpendiculaire au carton) sur l'interface carton / OO sous tension de foudre à $U_c = + 80$ kV.

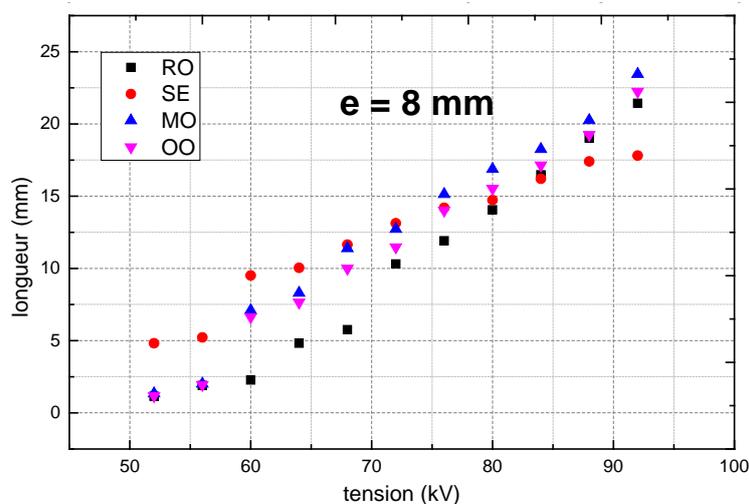
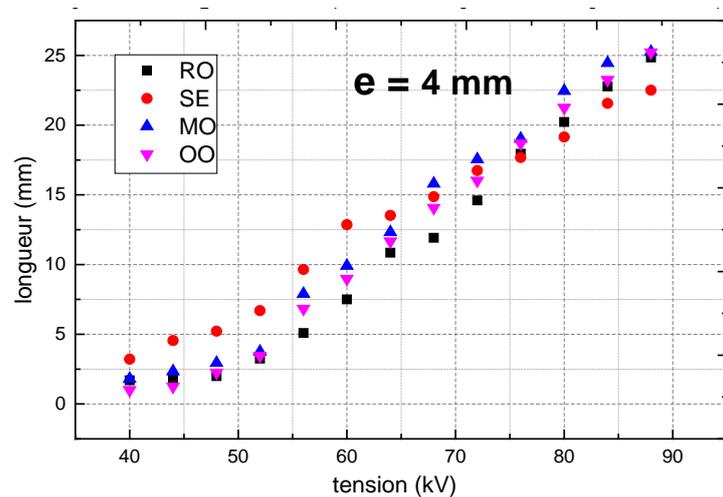
6.4 Longueur finale des décharges

La mesure de la longueur d'arrêt L_f des décharges glissantes est d'une grande importance puisque la valeur critique de L_f reflète la tension de contournement du carton ; plus la longueur d'arrêt est courte, plus la tension de contournement est élevée. Les décharges prennent naissance au voisinage de la pointe, se propagent sur la surface du carton et s'arrêtent à une certaine distance de la pointe qu'on appellera "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. Dans ce qui suit, nous étudions la progression de L_f en fonction de l'amplitude de la tension et de l'épaisseur du carton imprégné dans différentes huiles sous tension alternative et impulsionnelle.

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 (figures 6.12 et 6.13). D'autre part, 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 inférieur au niveau de tension sous une polarité négative. Des résultats similaires ont été trouvés dans des liquides seuls [133, 139]. Cet effet de polarité indique que les mécanismes physiques impliqués dans la propagation des décharges glissantes dans l'interface carton/liquide ne sont pas les mêmes selon la polarité et que la charge d'espace joue un rôle important dans la propagation de décharges.



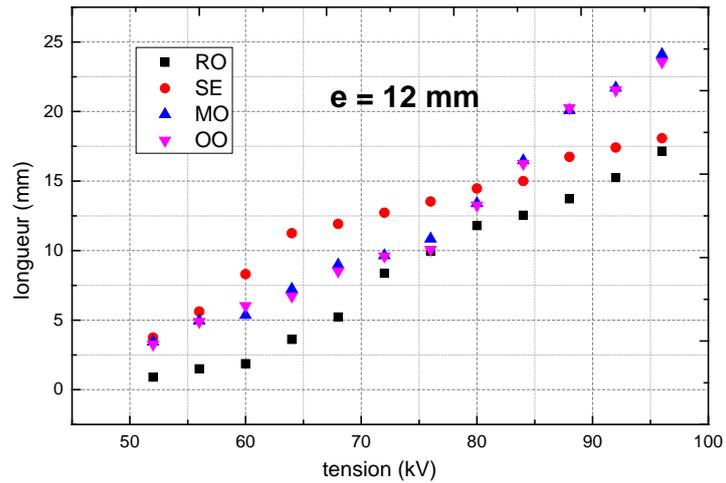
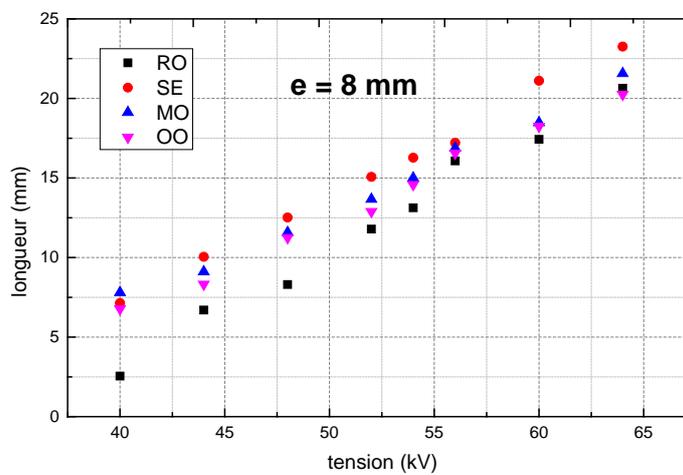
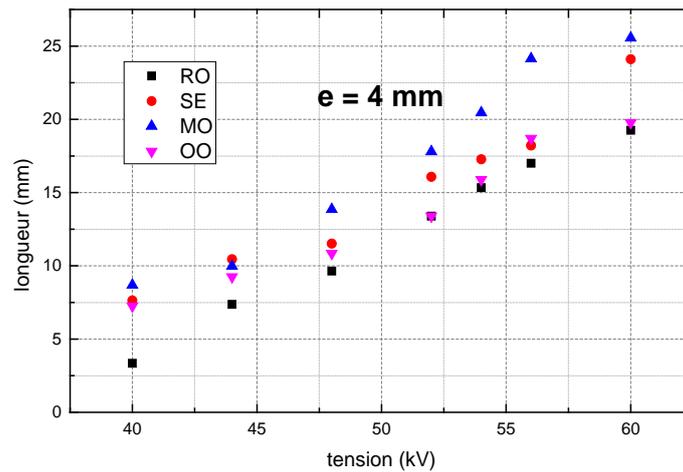


Figure 6. 12 : Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes en fonction de l'épaisseur du carton pour les différentes huiles étudiées sous tension de foudre en polarité négative. (Pointe perpendiculaire au carton)



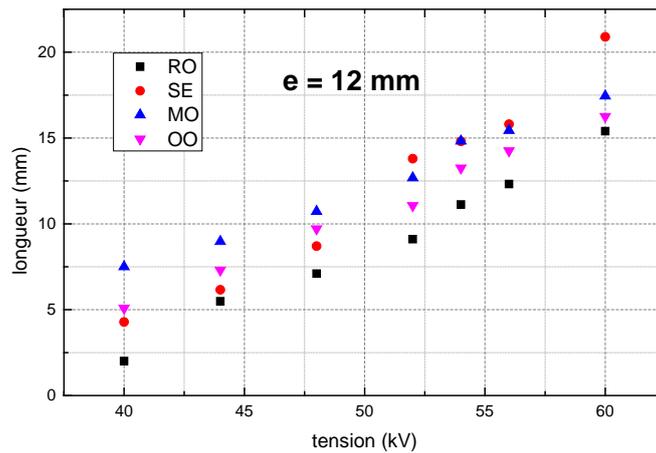


Figure 6.13 : Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes en fonction de l'épaisseur du carton pour les différentes huiles étudiées sous tension de foudre en polarité positive (Pointe perpendiculaire au carton).

Sous tension alternative, la longueur d'arrêt augmente également avec la tension (Figure 6.14). Dans certains cas, les caractéristiques $L_f(U)$ consistent en deux segments de droites indiquant un changement du mode de propagation.

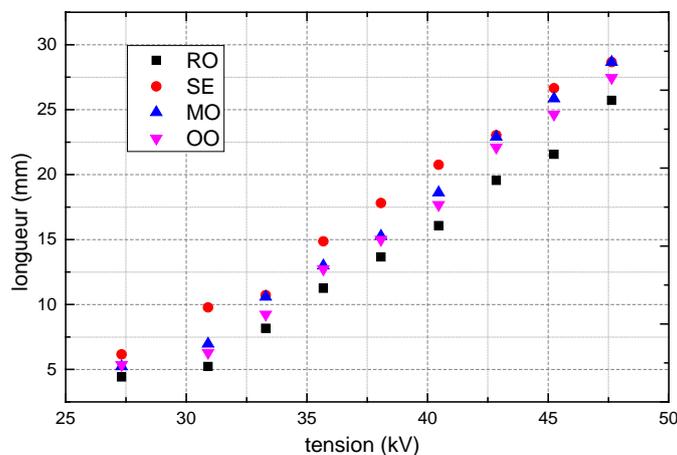


Figure 6.14 : Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes pour les différentes huiles étudiées sous tension alternative, $e=3\text{mm}$ et l'électrode pointe perpendiculaire au carton.

Comme pour la morphologie, l'épaisseur du carton influence significativement la longueur d'arrêt L_f des décharges glissantes. Cela est valable pour les deux polarités et pour toutes les huiles étudiées. L_f diminue lorsque l'épaisseur du carton augmente, mettant en évidence le rôle important du champ électrique et des effets capacitifs dans

le mécanisme de propagation ; le champ électrique au voisinage de la pointe est renforcé lorsque l'écart entre les électrodes (épaisseur) est réduit [118]. Ainsi, lorsque la décharge glissante est initiée, le champ à sa tête sera également renforcé. Par conséquent, pour une tension donnée, plus le carton est mince, plus L_f est longue.

En outre, pour une tension et une épaisseur du carton données, la tension requise pour atteindre la même longueur d'arrêt est plus élevée dans les esters naturels que dans l'huile minérale. Ceci est principalement dû à la différence de constantes diélectriques des huiles. En effet, la plupart des molécules contenues dans l'huile minérale sont faiblement polaires et non polaires, alors que les molécules présentes dans les esters naturels ont une nature polaire. Grâce à ces molécules polaires, la constante diélectrique des esters naturels (3,28 pour l'huile d'olive) est supérieure à celle de l'huile minérale (2,2). Le champ électrique au voisinage de la pointe est plus important (renforcé) lorsque la différence entre la constante diélectrique du carton ($\epsilon_{\text{carton}} = 4$) et celle de l'huile est élevée [117, 118]. Par conséquent, le champ électrique au voisinage de l'électrode pointe doit être plus élevé avec l'huile minérale qu'avec les esters naturels, ce qui entraîne des décharges plus longues dans l'huile minérale que dans les esters naturels.

Avec le carton inséré dans la direction parallèle au champ électrique, la longueur d'arrêt des décharges glissantes augmente également avec la tension ; elle a un comportement similaire à celui des streamers dans les liquides seuls (figures 6.15 et 6.16). Des résultats similaires ont été rapportés par d'autres [140]. Cependant, dans le cas d'une tension excessive, la présence d'un carton dans la direction parallèle favorise de manière significative la vitesse du streamer.

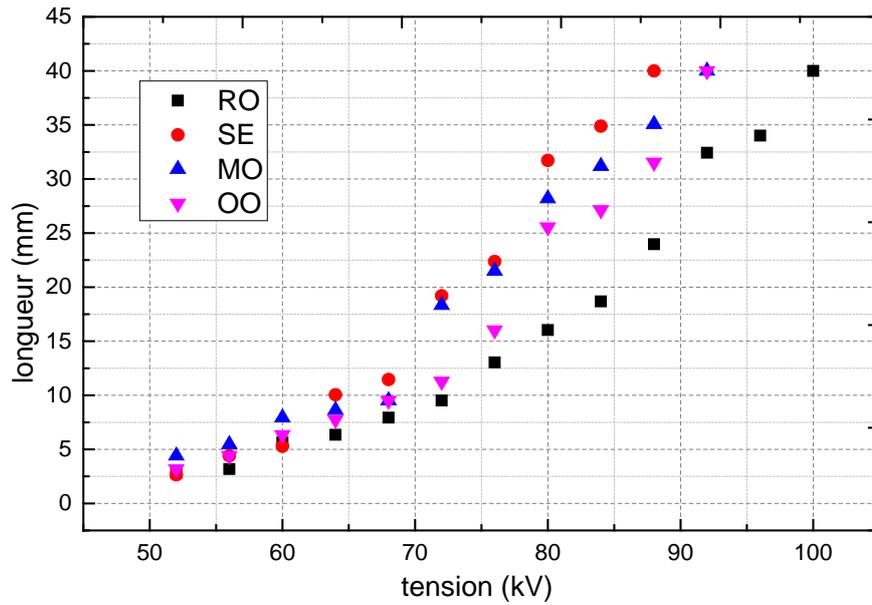


Figure 6.15 : Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes pour les différentes huiles étudiées sous tension de foudre en polarité négative, $e=4\text{mm}$ et l'électrode pointe parallèle au carton.

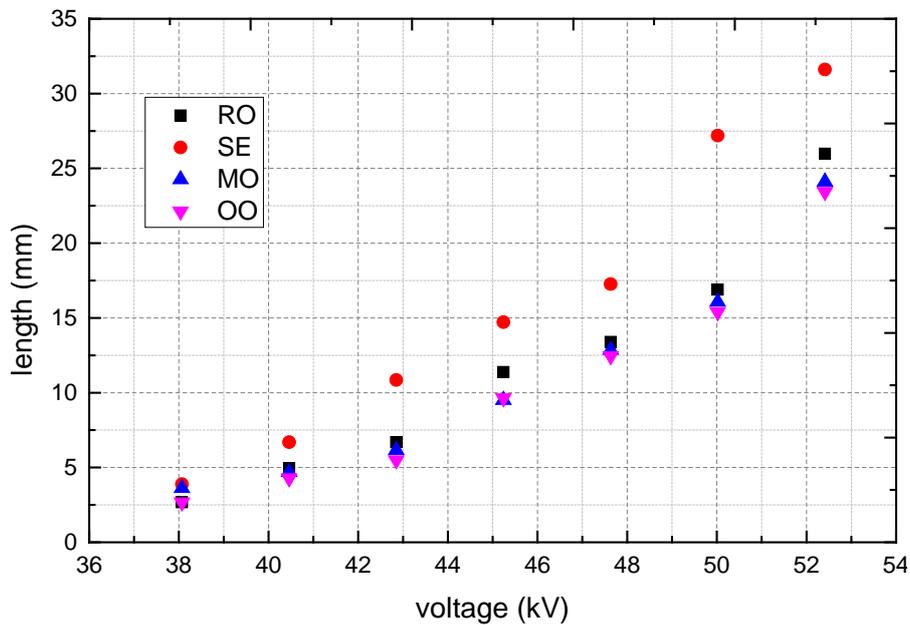


Figure 6.16 : Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes pour les différentes huiles étudiées sous tension alternative, $e=3\text{mm}$ et l'électrode pointe parallèle au carton.

6.5 Mesures électriques

Les figures 6. 17, 6. 18 et 6. 19 montrent des exemples typiques de la forme d'onde des courants accompagnants les décharges glissantes. Dans toutes les huiles testées et quelles que soit la tension (tension alternative ou impulsionnelle), les courants mesurés sont très similaires. Ils consistent en des impulsions intenses et discrètes similaires à celles observées dans les liquides seuls. Avec l'augmentation de la tension appliquée, l'amplitude et le taux de répétition de ces courants augmentent indiquant une propagation par sauts des décharges glissantes.

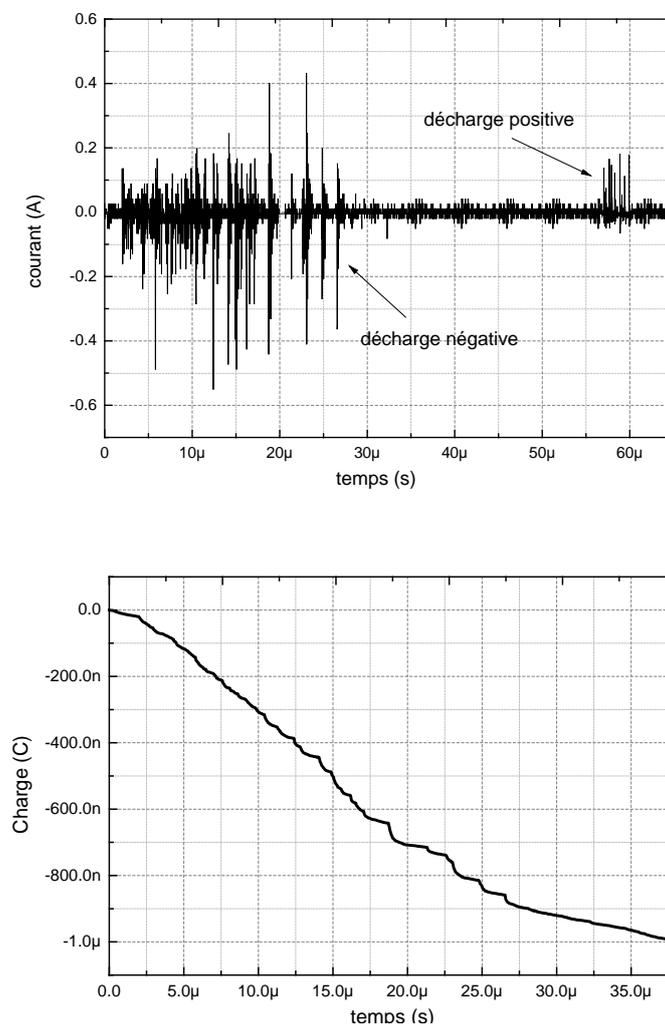


Figure 6. 17 : Courant et charge associée aux décharges glissantes sur une interface OO/carton sous tension de foudre en polarité négative, $e=4\text{mm}$ et $U=-60\text{ kV}$. (Électrode pointe est perpendiculaire au carton). La décharge négative principale est suivie d'une décharge positive secondaire.

Sous tensions de foudre, l'enregistrement du courant associé aux décharges surfaciques, sur une base d'échelle de temps relativement large, montre qu'une décharge secondaire peut se manifester approximativement autour de 35 à 50 μ s après l'extinction de la décharge principale, et ce pour les deux polarités (Figure 6. 17). Le courant correspondant à la décharge secondaire est d'amplitude moindre et de signe opposé à celui de la tension appliquée, il est négatif pour une tension positive et vice versa. Cela pourrait s'expliquer par l'accumulation de charges d'espace à la surface du carton et leurs influences sur le champ au voisinage de la pointe. Des résultats similaires ont été rapportés par ailleurs pour des interfaces gaz/solide et huile/solide [117, 141].

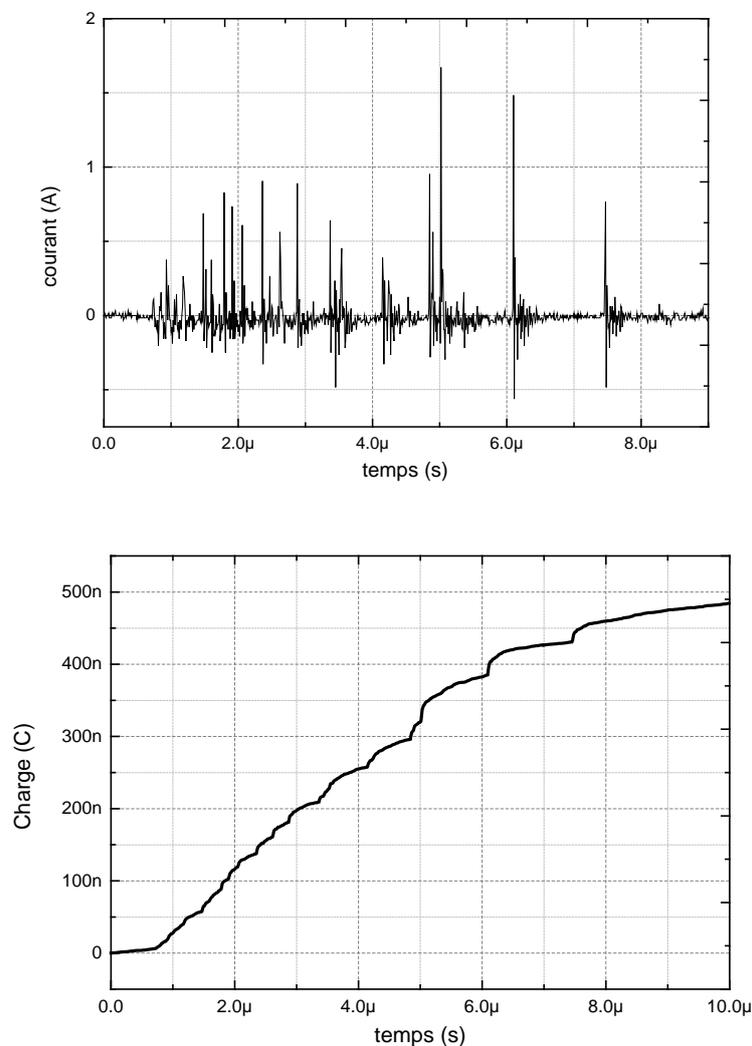


Figure 6. 18 : Courant et charge associée aux décharges glissantes sur une interface OO/carton sous tension de foudre en polarité positive, $e=4$ mm et $U=+44$ kV. (Électrode pointe est perpendiculaire au carton).

Pour tous les échantillons d'huile, la charge totale augmente avec la tension appliquée. Elle est généralement plus importante dans les huiles végétales que dans l'huile minérale. En ce qui concerne la densité des branches et la longueur finale, la charge totale augmente lorsque l'épaisseur du carton diminue. Comme il est mentionné ci-dessus, la capacité du système augmente en même temps que la charge électrique lors de la diminution de l'épaisseur, ce qui favorise le développement de décharges surfaciques. Par ailleurs, Kebbabi et Beroual [107] ont développé un modèle permettant d'évaluer la charge totale ainsi que la capacité du système solide/liquide en fonction de la longueur des décharges glissantes et de la tension. Ils ont obtenu un accord satisfaisant entre les charges calculées et mesurées.

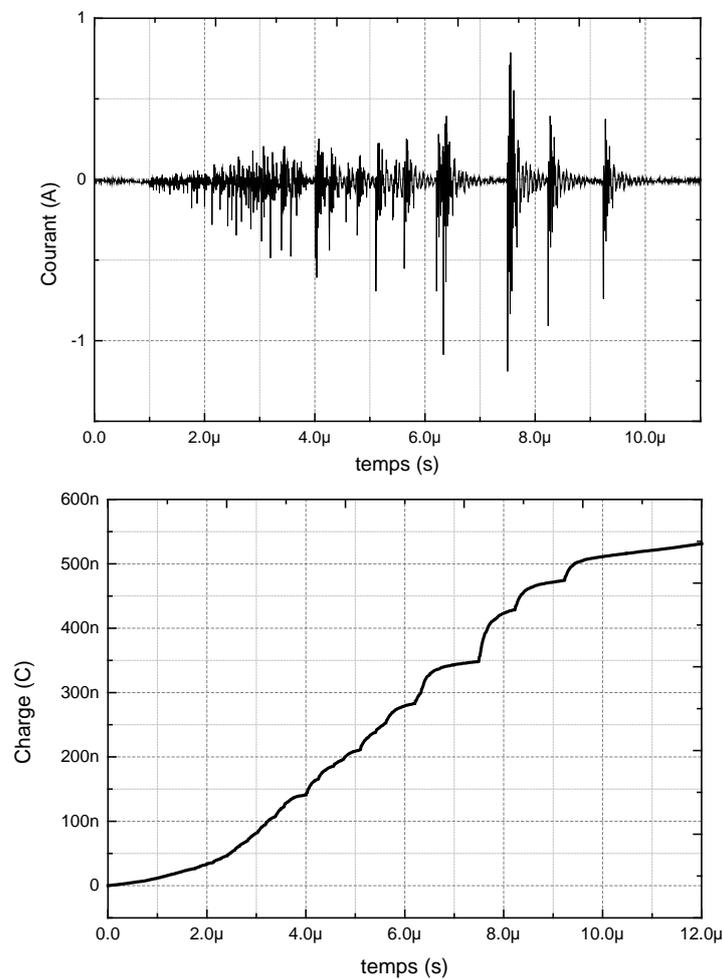


Figure 6. 19 : Courant et charge associée aux décharges glissantes sur une interface OO/carton sous tension alternative, $e=3\text{mm}$ (Électrode pointe est perpendiculaire au carton).

6.6 Conclusion

Les résultats de cette étude ont confirmé les résultats obtenus dans de nombreuses études. La morphologie et la longueur d'arrêt des décharges dépendent de l'amplitude et de la polarité de la tension, de la nature des liquides isolants, en plus de l'épaisseur du carton. On a montré que la longueur d'arrêt des décharges augmente avec la tension appliquée et qu'elle est plus longue en polarité positive qu'en polarité négative. Une influence de l'épaisseur du carton sur la densité totale des branches et la longueur d'arrêt a été observée, lorsque l'épaisseur du carton augmente, L_f et la densité totale des branches diminuent montrant le rôle important des effets capacitifs sur le mécanisme de propagation des décharges.

Par ailleurs, pour une tension et une épaisseur données, les décharges qui se développent sur l'interface carton/huile minérale sont plus longues que celles sur l'interface carton/esters naturels ; Plus la différence entre la permittivité de l'huile et du solide est élevée, plus la longueur finale est grande. C'est l'un des avantages de l'utilisation des esters naturels dans les transformateurs de puissance.

En conclusion, les caractéristiques des décharges surfaciques qui se propagent sur le carton dans l'huile d'olive et l'huile minérale sont très similaires. Ce qui est optimiste pour l'utilisation de cette huile dans les transformateurs de puissances.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le présent manuscrit, nous avons étudié le comportement des huiles Esters naturels (huiles végétales) pouvant être produits en très grande quantité dans notre pays, en vue de leur utilisation dans les transformateurs de puissance en remplacement des huiles minérales naphthéniques utilisées actuellement ; le but étant de répondre en partie aux contraintes internationales sur la protection de l'environnement en encourageant l'utilisation de matériaux biodégradables. Notre choix s'est porté sur l'huile d'olive.

L'analyse bibliographique contenue dans les chapitres I et II nous a permis de bien différencier entre les principales propriétés des différentes huiles. Une attention particulière a été réservée aux huiles végétales. La majorité des caractéristiques de performance des huiles végétales sont de loin supérieures à celles des huiles minérales classiques y compris la sécurité incendie, la biodégradabilité, la compatibilité des matériaux, les caractéristiques électriques et thermiques ainsi qu'une réduction significative du taux de vieillissement de l'isolation solide. Le plus grand inconvénient des transformateurs remplis avec les esters naturels est la différence de prix et leurs faibles tenues à l'oxydation. Pour cela, ils doivent être utilisés dans des transformateurs scellés. Nous avons ensuite constaté la complexité des phénomènes de pré-claquage et de claquage dans les huiles isolantes et aux interfaces solides/liquides qui dépendent de plusieurs paramètres.

L'étude expérimentale nous a permis d'abord de suivre le comportement de l'huile d'olive sous deux contraintes (thermique et électrique), ainsi que la caractérisation des principales propriétés requises pour un fonctionnement normal afin d'identifier ses points faibles qui peuvent limiter l'utilisation de cette huile dans une application en électrotechnique. Il en ressort globalement de ce travail que l'exposition de l'huile à une température de 110°C pour une longue durée (716 heures) affecte pratiquement toutes les propriétés physico-chimiques, en réduisant la teneur en eau, et augmentant la tension de claquage. Cela peut être une amélioration notable due à la contrainte thermique, d'autre part les autres propriétés présentent une dégradation plus ou moins importante en l'occurrence la viscosité, l'acidité et le point d'éclair. Pour sa part, le vieillissement électrique a eu une influence plutôt positive sur le facteur de dissipation, l'acidité et la viscosité.

En ce qui concerne la propagation des streamers, nous avons observé que les streamers négatifs sont généralement plus lumineux que les streamers positifs. La longueur d'arrêt augmente avec la tension appliquée. Les tensions requises pour obtenir les mêmes longueurs sont plus élevées lorsque la polarité est négative que lorsqu'elle est positive dans toutes les huiles. Par conséquent, les tenues diélectriques sont plus élevées en polarité négative qu'en polarité positive. Nous avons observé aussi que les courants sont constitués d'impulsions à très haute fréquence, et que les charges correspondantes varient par paliers très courts. En général, les résultats expérimentaux obtenus montrent que les caractéristiques des streamers (forme des streamers, longueur d'arrêt, courants et charges associés) de l'huile d'olive sont comparables à ceux de l'huile minérale.

Pour la tension de claquage sous tension alternative et une faible distance inter électrode (2,5 mm), nous avons constaté que les plus faibles tensions de claquage dans les esters naturels étaient plus élevées par rapport à l'huile minérale. Les $U_{50\%}$ sous impulsion de type foudre sont aussi plus élevées dans les huiles végétales que dans l'huile minérale. Les analyses statistiques des tensions de claquage obtenues montrent que ses tensions suivent la distribution normale pour presque toutes les huiles. Les valeurs des tensions de claquage obtenues pour le mélange (80% huile d'olive + 20% huile minérale) montrent un bon signe pour l'utilisation de cet ester naturel (huile d'olive) pour le remplissage des transformateurs en fonctionnement.

Nous avons montré que la morphologie et la longueur d'arrêt des décharges glissantes dépendent de l'amplitude et de la polarité de la tension, de la nature des liquides isolants, en plus de l'épaisseur du carton. Nous avons montré aussi que la longueur d'arrêt des décharges augmente avec la tension appliquée et qu'elle est plus longue en polarité positive qu'en polarité négative. Une influence de l'épaisseur du carton sur la densité totale des branches et la longueur d'arrêt a été observée. Par ailleurs, pour une tension et une épaisseur données, les décharges qui se développent sur l'interface carton/huile minérale sont plus longues que celles sur l'interface carton/ esters naturels. Plus la différence entre la permittivité de l'huile et du solide est élevée, plus la longueur finale est grande. C'est l'un des avantages de l'utilisation des esters naturels dans les transformateurs de puissance.

En général, les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude, montrent que les principales caractéristiques de l'huile d'olive sont comparables ou meilleurs que celles de l'huile minérale. L'huile d'olive peut être aussi efficace que l'huile minérale en agissant comme isolant dans un transformateur. Ainsi, l'huile d'olive peut constituer un substitut potentiel à l'huile minérale dans les transformateurs de puissance. Des tests complémentaires sont nécessaires en particulier ceux en relation avec la stabilité à l'oxydation. Une recherche d'inhibiteurs antioxydants naturels pour les ramener à un niveau acceptable de stabilité sans perte des propriétés diélectriques est fondamentale.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] I. Fofana, “50 Years in the Development of Insulating Liquids”, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 29, No. 5, pp. 13–25, 2013.
- [2] T.V. Oommen, “Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers”, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 18, No. 1, pp. 6–11, 2002.
- [3] C. P. McShane, J. Corkran, K. Rapp, and J. Luksich, “Natural Ester Dielectric Fluid Development”, IEEE Power Energy Soc. (PES) Transmission and Distribution Conf. and Exhibition, pp. 18–22, 2006.
- [4] C. P. McShane, “Vegetable-oil-based dielectric coolants”, IEEE Industry Applications Magazine. Vol. 8, No. 3, pp. 34–41, 2002.
- [5] C. P. McShane, “New dielectric coolant concepts for distribution and power transformers,” Pulp and Paper, Industry Technical Conf., pp. 55 –62, 1999.
- [6] M. Augusta, G. Martins, “Vegetable Oils, an Alternative to Mineral Oil for Power Transformers—Experimental Study of Paper Aging in Vegetable Oil Versus Mineral Oil”, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 26, No. 6, pp. 7–13, 2010.
- [7] C. Perrier and A. Beroual, “Experimental Investigations on Insulating Liquids for Power Transformers: Mineral, Ester and Silicone Oils”, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 25, No. 6, pp. 6–13, 2009.
- [8] C. Perrier, M. Marugan, A. Beroual, “DGA Comparison between Ester and Mineral Oils”, IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul., Vol. 19, No. 5, pp. 1609–1614, 2012.
- [9] D. Martin, W. Guo, N. Lelekakis, et al, “Using a remote system to study the thermal properties of a vegetable oil filled power transformer: how does operation differ from mineral oil”, IEEE Int. Conf. Innovation Smart Grid Technologies, Perth. Australia, pp. 1–5, 2011.
- [10] R. Setiabudy, A. Beroual, S. Bismo, H. B.H. Sitorus, “New vegetable oil – based Jatropha Curcas seeds as substitute of mineral oil in high voltage electrical equipment ; Publication number: HKI.3-HI.05.01.02.P00201405389 – Indonesia.
- [11] H. B.H. Sitorus, R. Setiabudy, S. Bismo, A. Beroual, New Vegetable Oil - based Jatropha Curcas Seeds as Substitute of Mineral oil in High Voltage Equipment, IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, Issue 4, pp. 2021-2028, August 2016.

- [12] C. Perrier, ““étude des huiles et des mélanges a base d’huile minérale pour transformateur de puissance : recherche d’un mélange optimal,” Thèse de doctorat, école centrale de Lyon, 2005.
- [13] IEEE Std C57.106, IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment, vol. 2006, no. June. 2007.
- [14] J. J. Winders, ”Transformers Principles and Applications”. Allentown, Pennsylvania, USA: MARCEL DEKKER, INC., 2002.
- [15] A. Reffas, , O. Idir, H. Moulai, et al; “Combined effect of temperature and electrical discharges on the properties of transformer mineral oils”, European journal of electrical engineering (EJEE)., Vol. 18, No. 2, pp. 61–77, 2016.
- [16] D. F. Garcı and J. C. Burgos, “Analysis of the influence of low-frequency heating on transformer drying – Part 2 : Experiences with a real transformer,” International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 38, pp. 90–96, 2012.
- [17] R. Barnikas, electrical insulating liquids, 3rd ed. montreal: ASTM, 1994.
- [18] M. Chevreuil, M. Blanchard, M. J. Teil, and A. Chesterikoff, “Polychlorobiphenyl Behaviour In The Water / Sediment System Of The Seine River , France,” water Ressources, vol. 32, no. 4, pp. 1204–1212, 1998.
- [19] W. Canada, H. P. Branch, and T. Pasture, “Polychlorobiphenyl in Children’s Blood,” Environmental Research, vol. 220, pp. 213–220, 1987.
- [20] A. Domenico, A. R. Fulgenzi, N. Iacovella, and C. La Rocca, “Differences in polychlorobiphenyl (PCB) contamination patterns in various environmental matrices,” The Science of the Total Environment, pp. 1439–1451,1993
- [21] H. Al-Amin, J. O. Brien, and M. Lashbrook, “Synthetic ester transformer fluid : A total solution to windpark transformer technology,” Renewable Energy, vol. 49, pp. 33–38, 2013.
- [22] C. P. Mcshane, “Natural and Synthetic Ester Dielectric Fluids : Their Relative Environmental, Fire Safety, and Electrical Performance,” 1976.
- [23] F. M. T. Luna, B. S. Rocha, E. M. R. Jr, M. C. G. Albuquerque, D. C. S. Azevedo, and C. L. C. Jr, “Assessment of biodegradability and oxidation stability of mineral , vegetable and synthetic oil samples,” Industrial Crops & Products, vol. 33, no. 3, pp. 579–583, 2011.

- [24] E. Yuliasuti, “Analysis of dielectric properties comparison between mineral oil and synthetic ester oil,” Memoire de Master, Delft University of technology, 2010.
- [25] L. R. Rudnick, *Synthetics, Mineral Oils, and Bio-Based Lubricants Chemistry and Technology*. New York: Taylor & Francis Groupe, 2006.
- [26] X. Qgr, D. Xnl, H. F. Hqylurqphqw, I. Ljk, Y. Vlolfrqh, and R. L. O. Ri, “Analysis of Gasses Generated by Electrical Discharges in Low Viscosity Silicone Oil,” in *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2008.
- [27] Bluestar Silicones, Rhodorsil fiche technique de l’huile 604 v 2002,
- [28] I. Fernández, A. Ortiz, F. Delgado, C. Renedo, and S. Pérez, “Comparative evaluation of alternative fluids for power transformers,” *Electric Power Systems Research*, vol. 98, pp. 58–69, 2013.
- [29] E. L. Kowalski, R. Robert, J. Tomioka, J. a. Teixeira, J. C. Tosin, R. E. Clerise, and E. Otto Filho, “Natural Rubber Electrical Conduction Mechanism under High and Low Electrical Field,” *12th International Symposium on Electrets*, pp. 333–335, 2005.
- [30] “Oxidation stability of Envirottemp FR3 fluid as measured by power factor valued oxidation,” *Dielectric Fluids Engineering Report CP0502*, Cooper Power Systems, Jan. 20, 2005
- [31] S. Tenbohlen, M. Koch, “Aging Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers”, *IEEE Trans. on Power Delivery.*, Vol. 25, No. 2, pp. 825–830, 2010.
- [32] Y. Xu, S. Qian, Q. Liu, Z. D. Wang “Oxidation Stability Assessment of a Vegetable Transformer Oil under Thermal Aging”, *IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul.*, Vol. 21, No. 2, pp. 683–692, 2014.
- [33] M-L. Coulibaly, C. Perrier, M. Marugan, A. Beroual, “Aging Behavior of Cellulosic Materials in Presence of Mineral Oil and Ester Liquids under Various Conditions”, *IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul.*, Vol. 20, No. 6, pp. 1971–1976, 2013.
- [34] Imad-U-Khan, Zhongdong Wang, Ian Cotton, Susan Northcote.: ‘Dissolved Gas Analysis of Alternative Fluids for Power Transformers’, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 2007, 23, (5), pp. 5–14.

- [35] Abderrazzaq, M.H., Hijazi, F.: ‘Impact of multi-filtration process on the properties of olive oil as a liquid dielectric’, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2012, 19, (5), pp. 1673–1680.
- [36] R. Asano, S. A. Page, “Reducing Environmental Impact and Improving Safety and Performance of Power Transformers With Natural Ester Dielectric Insulating Fluids”, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS.*, Vol. 50, No. 1, pp. 134–131, 2014.
- [37] Jung-II Jeong, Jung-Sik, Chang-Su Huh, ‘Accelerated Aging Effects of Mineral and Vegetable Transformer Oils on Medium Voltage Power Transformers’, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2012, 19, (1), pp. 156–161.
- [38] Martin, D., Guo, W., Lelekakis, N., et al.: ‘Using a remote system to study the thermal properties of a vegetable oil filled power transformer: how does operation differ from mineral oil’. *IEEE Int. Conf. Innovation Smart Grid Technologies*, Perth. Australia, November 2011, pp. 1–5.
- [39] Frimpong, G.K., Oommen, T.V., Asano, R.: ‘A survey of aging characteristics of cellulose insulation in natural ester and mineral oil’, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 2011, 27, (5), pp. 36–48
- [40] Yang, L., Liao, R., Caixin, S., et al.: ‘Influence of vegetable oil on the thermal aging of transformer paper and its mechanism’, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2011, 18, (3), pp. 692–700.
- [41] Daniel Martin, Nick Lelekakis, and Wenyu Guo, “Further Studies of a Vegetable-Oil-Filled Power Transformer”, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, Vol. 27, No. 5, pp. 6–13, 2011.
- [42] A. Raymon, P. Samuel, M. P. E. Rajamani , R. Karthik, “Enhancing the Critical Characteristics of Natural Esters with Antioxidants for Power Transformer Applications”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.*, Vol. 20, No. 3, pp. 899–912, 2013.
- [43] Liao, R., Hao, J., Chen, G., et al.: ‘A comparative study of physicochemical dielectric and thermal properties of pressboard insulation impregnated with natural ester and mineral oil’, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2011, 18, (5), pp. 1626–1637.
- [44] Santanu Singha, Roberto Asano Jr., George Frimpong, C. Clair Claiborne, Don Cherry, ‘Comparative Aging Characteristics between a High Oleic Natural Ester

- Dielectric Liquid and Mineral Oil', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2014, 21, (1), pp. 149–158.
- [45] A. Ciuriuc, M. S. Vihacencu, L. M. Dumitran, P. V. Notingher, "Comparative study on power transformers vegetable and mineral oil ageing", International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 2012.
- [46] Yang Xu, Sen Qian, Q. Liu, Z. D. Wang: 'Oxidation Stability Assessment of a Vegetable Transformer Oil under Thermal Aging', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2014, 21, (2), pp. 683–692.
- [47] David P. Stockton et al, "NATURAL ESTER TRANSFORMER FLUIDS: SAFETY, RELIABILITY & ENVIRONMENTAL PERFORMANCE", Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2007. PCIC '07. IEEE.
- [48] Robert TOBAZÉON,"Préclaquage et claquage des liquides diélectriques", techniques de l'ingénieur, Réf : D2450.
- [49] Viet Hung DANG,"Étude des phénomènes de préclaquage et de claquage des huiles végétales, minérales et synthétiques – caractérisation des décharges aux interfaces", thèse de doctorat, école centrale de Lyon, 2011.
- [50] 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.
- [51] R. Kattan, N. Bonifaci et A. Denat, "Étude 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.
- [52] 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.
- [53] F. Jomni, "Viscosity Effect on the Dynamics of Small Bubbles Generated by Electrical Current Pulse in Viscous Insulating Liquids", Conference on Electrical Insulation & Dielectrics Phenomena, CEIDP, États - Unis, 1997.
- [54] R. Kattan, A. Denat and O. Lesaint, "Generation, Growth and Collapse of Vapor Bubbles in Hydrocarbon Liquids under a High Divergent Electric Field", J. of Appl. Phys., 66, pp. 4 062-4 066, 1989.
- [55] 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.

- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] A. Beroual and R. Tobazeon, "Prebreakdown Phenomena in Liquid Dielectrics," IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 21, No. 4, pp. 613–627, 1986.
- [63] 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.
- [64] J. A. Cross, "Electrostatics: Principles, Problems and application", 1987.
- [65] A. Beroual, "Electronic processes and streamer phenomena in liquid dielectrics", Arch. Electr. Engineering, No. 4, pp. 579-592, 1995.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] 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.
- [70] M. O. Pace, D. N. Pittman, A. L. Wintenberg, I. A. Lexeff and T. V. Blalock, “Effects of pressure near one atmosphere on prebreakdown current pulses at a needle cathode in hexane”, Conf. Rec. of 1988 IEEE Int. Symp. On Electr. Insul., pp. 23-26, 1988.
- [71] G. J. FitzPatrick, P. J. McKenny and E. O. Forster, “The effect of pressure on streamer inception and propagation in liquid hydrocarbons”, IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. 25, No. 4, pp. 672-682, 1990.
- [72] O. Lesaint and P. Gournay, “On the gaseous nature of positive filamentary streamers in hydrocarbon liquids. I: Influence of the hydrostatic pressure on the propagation, II: Propagation, growth and collapse of gaseous filaments in pentane”, J. Phys. D: Appl. Phys. 27, pp. 2111-2127, 1994.
- [73] P. K. 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. Electr. Insul., Vol. 26, No. 4, pp. 543-559, August, 1991.
- [74] D.A.Hoch and J.P.Reynders, 7th International Symposium of High Voltage Engineering, Dresden, August 26-30, 1991.
- [75] 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.
- [76] 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
- [77] P. B. McGrath and J. K. Nelson, “Divergent field study of prebreakdown events in n-hexane”, J. Electrostatics, Vol. 7, pp. 327-336, 1982.
- [78] J.C. Devins, S.J. Rzad and R.J. Schwabe, J. Appl. Phys., vol. 52(7), pp. 4531-4545, 1981.

- [79] A. Beroual, “ Phénomènes de propagation et de génération des streamers dans les diélectriques liquides en géométrie pointe-plan sous créneau de tension” Thèse de doctorat d'état es-sciences physiques, Grenoble, Janvier 1987.
- [80] N. Berger, “Liquides isolants en électrotechnique : Présentation générale”, Techniques de l'ingénieur, D 2470.
- [81] O. Lesaint and R. Tobazéon, “Streamer generation and propagation in transformer oil under ac divergent field conditions”, IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. EI-23, pp. 941-954, 1988.
- [82] Y. Nakao, H. Itoh, S. Hoshino, Y. Sakai and H. Tagashira, “Effects of Additives on Prebreakdown Phenomena in n-Hexane”, IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. 1, No 3, pp. 383-390, 1994.
- [83] N. V. Dung, H. K. Høidalen, D. Linhjell, L. E. Lundgaard, M. Unge, “Influence of Impurities and Additives on Negative Streamers in Paraffinic Model Oil,” IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 20, No. 3, pp. 876–886, 2013.
- [84] H.Yamashita, K.Yamazawa, W.Machidori and Y.S.Wang,” The effect of tip curvature on the prebreakdown density change streamer in cyclo-hexane” Conf. Rec. of the ICDL '96, 12th Int. Conf. on Cond. And break. in Diel. Liq., Roma, Italy July 15-19, 1996. pp. 226-229.
- [85] H. Moulai, ” ETUDE DES COURANTS DE PRECLAQUAGE DANS LES DIELECTRIQUES LIQUIDES”, Thèse de doctorat d'état, Alger, 2001.
- [86] L. Lundgaard, D. Linhjell, G. Berg and S. Sigmond,”Positive and negative streamers in oil gaps with and without pressboard interfaces” Conf .Rec. of the ICDL'96, 12th Int. Conf. on Cond. and Breakd. In Diel. Liq., Roma, Italy, July 15-19, 1996 pp. 175-180.
- [87] D. Linhjell, L. Lundgard and G. Berg,” Streamer propagation under impulse voltage in long point-plane oil gaps” IEEE Trans. on. Diel. and Elect. Ins., Vol.1 No 3, June 1994, pp. 447-458.
- [88] Y. Kamata and Y. Kako,” Flashover Characteristics of Extremely Long Gaps in Transformer Oil under Non-Uniform Field Conditions” IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol.15, 1980, pp.18-26.
- [89] Henry Binsar Hamonangan SITORUS,” The Study of Jatropha Curcas Oil-Based Biodegradable Insulation Materials For Power Transformer”, these de doctorat, école centrale de Lyon, 2015.

- [90] Yu. V. Torshin, "Prediction of Breakdown Voltage of Transformer Oil from Predischage Phenomena" IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol.10, No 6, 2003, pp.933-941.
- [91] D. Martin, Z. D. Wang, "Statistical Analysis of the AC Breakdown Voltages of Ester Based Transformer Oils" IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol.15, No 4, 2008, pp.1044-1050.
- [92] Mark P. Wilson, Igor V. Timoshkin, Martin J. Given, Scott J. MacGregor, T. Wang, "Breakdown of Mineral Oil: Effect of Electrode Geometry and Rate of Voltage Rise" IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol.19, No 5, 2012, pp.1657-1644
- [93] W. Weibull, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", J. Appl. Mechanics, pp. 293 – 297, 1951.
- [94] Enis Tuncer, D. Randy James, Isidor Sauers, Alvin R Ellis, Marshall O Pace, "On dielectric breakdown statistics", J. Phys. D: Appl. Phys. 39, pp. 4257-4268, 2006.
- [95] R. M. Hill, L. A. Dissado, "Theoretical basis for the statistics of dielectric breakdown", J. Phys. C: Solid State Phys., 16, pp. 2145-2156, 1983.
- [96] N. G. Trinh and C. Vincent, "Statistical Significance of Test Methods for Low Probability Breakdown and Withstand Voltages", IEEE Trans., PAS-99, No.2, pp. 711-719, 1980.
- [97] A. A. Suleiman, N. A. Muhamad, N. Bashir, N. S. Murad, Y. Z. Arief, "Effect of Moisture on Breakdown Voltage and Structure of Palm Based Insulation Oils", IEEE Trans., PAS-21, No.5, pp. 2119-2126, 2014.
- [98] A. Pokryvailo and C. Carp, "Comparison of the Dielectric Strength of Transformer Oil Under DC and Repetitive Multimillisecond Pulses", IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 28, No. 3, pp. 40–49, 2012.
- [99] Cho J S, Fofana I, Beroual A, Aka-Ngnui T, Sabau J. (2011). The Gassing Tendency of Various Insulating Fluids under Electrical Discharge. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, n° 5, p. 1616-1625.
- [100] Badicu L V, Gorgan B, Dumitran L M, Notingher P V. (2012). Assessment of Transformer Mineral Oil Condition Based on dc and ac Conductivity. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 19, n° 5, p. 1544-1551.

- [101] A. Beroual, "Notes de cours de Master – Matériaux pour le génie électrique", École Centrale de Lyon, 2007.
- [102] T. J. Lewis, "Basic Electrical Processes in Dielectric Liquids," IEEE Transaction on Electrical Insulation, vol. 1, pp. 630-644, 1994.
- [103] W. Rotenberg, "Etude des phénomènes de préclaquage dans les huiles isolantes dans des systèmes d'électrodes couvertes de couches minces," Ecole Centrale de Lyon, 2000.
- [104] O. Hiroyuki and F. Kunio, Electrical Phenomena at Interfaces. Fundamentals, measurements and application: Marcel Dekker AG, 1998.
- [105] J. A. Cross, Electrostatics: Principles, Problems and application, 1987.
- [106] O. Stern, "The theory of the electrolytic double-layer " Z. Elektrochemie vol. 30, pp. 508-16 1924.
- [107] Lazhar KEBBABI, "caractérisation des décharges glissantes se propageant aux interfaces liquide/solide sous différentes formes de tension – relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale ".Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, mars 2006.
- [108] P. O. Pedersen, " Danske Vidensk Selkab," vol. Part I (1919), Part II (1922), Part III (1929).
- [109] F. H. Merrill and A. v. Hippel, "The atom-physical interpretation of Lichtenberg figures and their application to the study of gas-discharge phenomena," Journal of Applied Physics vol. 10, pp. 873, 1939.
- [110] A. T. Morris, "Heat developed" and "powder" Lichtenberg figures and the ionization of dielectric surfaces produced by electrical impulses ". British Journal of Applied Physics, vol. 2, pp. 98-109, 1951.
- [111] M. Toepler, "Über die physikalischen Grundgesetze der in der Isolatorentechnik auftretenden elektrischen Gleiterscheinungen," Archiv für Elektrotechnik, vol. 10, pp. 157-185, 1921.
- [112] Y. Toriyama, "Dust figures of surface discharges and its application," IEE. Japan., vol. 49, pp. 922, 1929.
- [113] V. S. Kom'kov and E. Z. Meilikhov, Sov. Phys-Tech. Phys, vol. 8, pp. 704, 1964.
- [114] Y. Murooka and Y. Toriyama, British Journal of Applied Physics, vol. 18, pp. 1607, 1967.

- [115] Y. Kashiwagi and H. Itoh, "Synchronization of positive surface streamers triggered by vacuum ultraviolet in atmosphere," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 39, pp. 113–118, 2006.
- [116] R. Hebner, E. F. Kelley, E. O. Forster and G. J. FitzPatrick, "Observation of prebreakdown and breakdown phenomena in liquid hydrocarbons", *IEEE Trans. On Electrical Insulation*, Vol. 20, pp. 281-92, 1985.
- [117] L. Kebbabi and A. Beroual. , "Optical and Electrical Characterization of Creeping Discharges over Solid/Liquid Interfaces under Lightning Impulse Voltage", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. 13, No. 3, June 2006.
- [118] L. Kebbabi and A. Beroual. , "Influence of the Voltage Waveform and Hydrostatic Pressure on Morphology and Final Length of Discharges Propagating over Solid liquid Interfaces", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. 16, No. 6, December 2009.
- [119] Fofana, I., Wasserberg, V., Borsi, H., et al.: 'Challenge of mixed insulating liquids for use in high voltage transformers, part 1: investigation of mixed liquids', *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 2002, 18, (3), pp. 18–31.
- [120] Augusta, M., Martins, G., Gomes, A.R.: 'Comparative study of the thermal degradation of synthetic and natural esters and mineral oil: effect of oil type in the thermal degradation of insulating kraft paper', *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 2012, 28, (2), pp. 22–28
- [121] IEEE Std C57.152: 'IEEE guide for diagnostic field testing of fluid-filled power transformers, regulators, and reactors', 2013
- [122] Liao, R., Liang, S., Yang, L., et al.: 'Comparison of ageing results for transformer oil-paper insulation subjected to thermal ageing in mineral oil and ageing in retardant oil', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2012, 19, (1), pp. 825–830
- [123] Suwarno Salim, F.: 'Effects of electric arc on the dielectric properties of liquid dielectrics'. *IEEE Int. Conf. Properties and Applications of Dielectric Materials*, Bali, Indonesia, June 2006, pp. 482–485
- [124] Harwood, J., Aparicio, R.: 'Handbook of olive oil, analysis and properties' (Springer, 2013)

- [125] Setayeshmehr, A., Fofana, I., Eichler, C., et al.: ‘Dielectric spectroscopic measurements on transformer oil-paper insulation under controlled laboratory conditions’, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2008, 15, (4), pp. 1100–1111
- [126] Toudja, T., Moulai, H., Nacer, A., et al.: ‘Moisture and electrical discharges effect on naphthenic mineral oil properties’, *IET Sci. Meas. Technol.*, 2014, 8, (6), pp. 588–594
- [127] IEEE Std C57.152: ‘IEEE guide for diagnostic field testing of fluid-filled power transformers, regulators, and reactors’, 2013
- [128] Suwarno and S. Fadli, “Effects of Electric Arc on The Dielectric Properties of Liquid Dielectrics,” pp. 482–485, 2006.
- [129] G. P. McCoermick and E. Howells, “Arcing resistance of high fire point dielectric liquids,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 3, pp. 1184–1192, 1997.
- [130] Martin, D., Wang, Z.D., Darwin, A.W., et al.: ‘A comparative study of the chemical stability of esters for use in large power transformers’. *IEEE Int. Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Kansas City, USA, October 2006, pp. 493–496
- [131] I. Khan, I. Cotton, and S. Northcote, “Fault gas generation in ester based transformer fluids and dissolved gas analysis (DGA),” in *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2008, pp. 909–913.
- [132] G. Massala, and O. Lesaint, “Positive streamer propagation in large oil gaps: Electrical properties of streamers”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 5, pp. 371-381, 1998.
- [133] V.-H. Dang, A. Beroual, and C. Perrier, “Investigations on Streamers Phenomena in Mineral, Synthetic and Natural Ester Oils under Lightning Impulse Voltage”, *IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul.*, Vol. 19, No. 5, pp. 1521–1527, 2012.
- [134] P. Biller, “A simple qualitative model for the different types of streamers in dielectric liquids”, *IEEE 12th Int’l. Conf. Conduction Breakdown Dielectr. Liquids*, Roma, Italy, pp.189-192, 1996.
- [135] T. W. Anderson and D.A. Darling, “Asymptotic theory of certain “goodness-offit” criteria based on stochastic processes”, *Annals of Mathematical Statistics* 23, pp. 193–212, 1952.

- [136] Viet-Hung Dang, A. Beroual, C. Perrier, "Comparative Study of Statistical Breakdown in Mineral, Synthetic and Natural Ester Oils under AC Voltage", IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul., Vol. 19, No. 5, pp. 1508–1513, 2012.
- [137] J. George Hwang, M. Zahn, Leif A. A. Pettersson, "Mechanisms Behind Positive Streamers and Their Distinct Propagation Modes in Transformer Oil," IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 19, No. 1, pp. 162–174, 2012.
- [138] C. P. McShane, J. Corkran, G. A. Gauger, K. Rapp, and J. Luksich, "Aging of Paper Insulation in Natural Ester Dielectric Fluid", IEEE Power Energy Soc. (PES) Transmission and Distribution Conf. and Exhibition, pp. 675–679, 2001.
- [139] Henry B.H. Sitorus, A. Beroual, R. Setiabudy, S. Bismo, "Pre-breakdown Phenomena in New Vegetable Oil – based Jatropha Curcas Seeds as Substitute of Mineral oil in High Voltage Equipment", IEEE Trans. on Dielectr. and Electr. Insul., Vol. 22, No. 5, pp. 2442–2448, 2015.
- [140] Q. Liu, Z. D. Wang, "Streamer Characteristic and Breakdown in Synthetic and Natural Ester Transformer Liquids with Pressboard Interface under Lightning Impulse Voltage", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 18, No. 6, pp.1908-1917, 2011.
- [141] M. L. Coulibaly, "Caractérisation des décharges électriques se propageant aux interfaces gaz/solide – Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale", Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, 2009.