



HAL
open science

Etude des phénomènes de préclaquage et de claquage des huiles végétales, minérales et synthétiques : caractérisation des décharges aux interfaces

Viet Hung Dang

► **To cite this version:**

Viet Hung Dang. Etude des phénomènes de préclaquage et de claquage des huiles végétales, minérales et synthétiques : caractérisation des décharges aux interfaces. Autre. Ecole Centrale de Lyon, 2011. Français. NNT : 2011ECDL0005 . tel-00627875

HAL Id: tel-00627875

<https://theses.hal.science/tel-00627875>

Submitted on 29 Sep 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

présentée devant

L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON

pour obtenir le grade de

DOCTEUR

(Arrêté du 30/3/1992)

Spécialité : Génie Electrique

préparée au sein de

**L'ÉCOLE DOCTORALE
ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE
DE LYON**

par

Viet Hung DANG

ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES DE PRÉCLAQUAGE ET DE CLAQUAGE DES HUILES VÉGÉTALES, MINÉRALES ET SYNTHÉTIQUES – CARACTÉRISATION DES DÉCHARGES AUX INTERFACES

Soutenu le 10 mars 2011 devant la commission d'examen

J U R Y

S. AGNEL	Professeur – Université de Montpellier II	<i>Président</i>
C. BROSSEAU	Professeur – Université de Bretagne Occidentale - Brest	<i>Rapporteur</i>
I. FOFANA	Professeur – Université du Québec (UQAC) - Canada	<i>Rapporteur</i>
A. BEROUAL	Professeur – École Centrale de Lyon	<i>Directeur</i>
C. JOUBERT	Professeur – Université Claude Bernard – Lyon 1	<i>Examineur</i>
C. PERRIER	Docteur – ALSTOM GRID Power Transformers (TICC)	<i>Examineur</i>

Liste des personnes Habilitées à Diriger des Recherches en poste à l'Ecole Centrale de Lyon

Nom-Prénom	Corps grade	Laboratoire ou à défaut département ECL	Etablissement
AURIOL Philippe	professeur	AMPERE	ECL
BEROUAL Abderrahmane	professeur	AMPERE	ECL
BURET François	professeur	AMPERE	ECL
JAFFREZIC-RENAULT Nicole	directeur de recherche	AMPERE	CNRS/ECL
KRÄHENBÜHL Laurent	directeur de recherche	AMPERE	CNRS/ECL
MARTELET Claude	professeur	AMPERE	ECL
NICOLAS Alain	professeur	AMPERE	ECL
NICOLAS Laurent	directeur de recherche	AMPERE	CNRS/ECL
SCORLETTI Gérard	professeur	AMPERE	ECL
SIMONET Pascal	chargé de recherche	AMPERE	CNRS/ECL
THOMAS Gérard	professeur	AMPERE	ECL
VOLLAIRE Christian	professeur	AMPERE	ECL

Nbre Ampère 12

HELLOUIN Yves	maître de conférences	DER EEA	ECL
LE HELLEY Michel	professeur	DER EEA	ECL

Nbre DER EEA 2

GUIRALDENQ Pierre	professeur émérite	DER STMS	ECL
VINCENT Léo	professeur	DER STMS	ECL

Nbre DER STMS 2

LOHEAC Jean-Pierre	maître de conférences	ICJ	ECL
MAITRE Jean-François	professeur émérite	ICJ	ECL
MARION Martine	professeur	ICJ	ECL
MIRONESCU Elisabeth	professeur	ICJ	ECL
MOUSSAOUI Mohand	professeur	ICJ	ECL
MUSY François	maître de conférences	ICJ	ECL
ZINE Abdel-Malek	maître de conférences	ICJ	ECL

Nbre ICJ 7

DAVID Bertrand	professeur	ICTT	ECL
----------------	------------	------	-----

Nbre ICTT 1

CALLARD Anne-Ségolène	maître de conférences	INL	ECL
CLOAREC Jean-Pierre	maître de conférences	INL	ECL
GAFFIOT Frédéric	professeur	INL	ECL
GAGNAIRE Alain	maître de conférences	INL	ECL

GARRIGUES Michel	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL
GENDRY Michel	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL
GRENET Geneviève	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL
HOLLINGER Guy	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL
JOSEPH Jacques	professeur	INL	ECL
KRAWCZYK Stanislas	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL
LETARTRE Xavier	chargé de recherche	INL	CNRS/ECL
MARTIN Jean-René	professeur émérite	INL	ECL
O'CONNOR Ian	professeur	INL	ECL
PHANER-GOUTORBE Magali	professeur	INL	ECL
ROBACH Yves	professeur	INL	ECL
SAINT-GIRONS Guillaume	chargé de recherche	INL	CNRS/ECL
SEASSAL Christian	chargé de recherche	INL	CNRS/ECL
SOUTEYRAND Eliane	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL
TARDY Jacques	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL
VIKTOROVITCH Pierre	directeur de recherche	INL	CNRS/ECL

Nbre INL 20

CHEN Liming	professeur	LIRIS	ECL
-------------	------------	-------	-----

Nbre LIRIS 1

BAILLY Christophe	professeur	LMFA	ECL
BERTOGLIO Jean-Pierre	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
BLANC-BENON Philippe	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
BOGEY Christophe	chargé de recherche	LMFA	CNRS/ECL
CAMBON Claude	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
CARRIERE Philippe	chargé de recherche	LMFA	CNRS/ECL
CHAMPOUSSIN J-Claude	professeur émérite	LMFA	ECL
COMTE-BELLOT geneviève	professeur émérite	LMFA	ECL
FERRAND Pascal	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
GALLAND Marie-Annick	professeur	LMFA	ECL
GODEFERD Fabien	chargé de recherche	LMFA	CNRS/ECL
GOROKHOVSKI Mikhail	professeur	LMFA	ECL
HENRY Daniel	directeur de recherche	LMFA	CNRS/ECL
JEANDEL Denis	professeur	LMFA	ECL
JUVE Daniel	professeur	LMFA	ECL
LE RIBAUT Catherine	chargée de recherche	LMFA	CNRS/ECL
LEBOEUF Francis	professeur	LMFA	ECL
PERKINS Richard	professeur	LMFA	ECL
ROGER Michel	professeur	LMFA	ECL
SCOTT Julian	professeur	LMFA	ECL
SHAO Liang	chargé de recherche	LMFA	CNRS/ECL
SIMOENS Serge	chargé de recherche	LMFA	CNRS/ECL
TREBINJAC Isabelle	maître de conférences	LMFA	ECL

Nbre LMFA 23

BENAYOUN Stéphane	professeur	LTDS	ECL
CAMBOU Bernard	professeur	LTDS	ECL
COQUILLET Bernard	maître de conférences	LTDS	ECL
DANESCU Alexandre	maître de conférences	LTDS	ECL

<i>FOUVRY Siegrid</i>	<i>chargé de recherche</i>	LTDS	CNRS/ECL
<i>GEORGES Jean-Marie</i>	<i>professeur émérite</i>	LTDS	ECL
<i>GUERRET Chrystelle</i>	<i>chargé de recherche</i>	LTDS	CNRS/ECL
<i>HERTZ Dominique</i>	<i>past</i>	LTDS	ECL
<i>ICHCHOU Mohamed</i>	<i>professeur</i>	LTDS	ECL
<i>JEZEQUEL Louis</i>	<i>professeur</i>	LTDS	ECL
<i>JUVE Denyse</i>	<i>ingénieur de recherche</i>	LTDS	ECL
<i>KAPSA Philippe</i>	<i>directeur de recherche</i>	LTDS	CNRS/ECL
<i>LE BOT Alain</i>	<i>chargé de recherche</i>	LTDS	CNRS/ECL
<i>LOUBET Jean-Luc</i>	<i>directeur de recherche</i>	LTDS	CNRS/ECL
<i>MARTIN Jean-Michel</i>	<i>professeur</i>	LTDS	ECL
<i>MATHIA Thomas</i>	<i>directeur de recherche</i>	LTDS	CNRS/ECL
<i>MAZUYER Denis</i>	<i>professeur</i>	LTDS	ECL
<i>PERRET-LIAUDET Joël</i>	<i>maître de conférences</i>	LTDS	ECL
<i>SALVIA Michelle</i>	<i>maître de conférences</i>	LTDS	ECL
<i>SIDOROFF François</i>	<i>professeur</i>	LTDS	ECL
<i>SINOUE Jean-Jacques</i>	<i>maître de conférences</i>	LTDS	ECL
<i>STREMSDOERFER Guy</i>	<i>professeur</i>	LTDS	ECL
<i>THOUVEREZ Fabrice</i>	<i>professeur</i>	LTDS	ECL
<i>TREHEUX Daniel</i>	<i>professeur</i>	LTDS	ECL
<i>VANNES André-Bernard</i>	<i>professeur émérite</i>	LTDS	ECL
<i>VINCENS Eric</i>	<i>maître de conférences</i>	LTDS	ECL

Nbre LTDS 26

Total HdR ECL

91

À la mémoire de mon frère et de ma sœur

À mes parents

Remerciements

Mes plus sincères remerciements vont à l'endroit du Professeur Abderrahmane BÉROUAL, directeur scientifique de ce travail. Qu'il trouve ici mon respect et ma gratitude pour ses conseils, ses encouragements, sa disponibilité, ses qualités humaines et surtout la confiance qu'il m'a témoigné pour réaliser cette thèse.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur Laurent NICOLAS, Directeur du laboratoire Ampère qui a bien voulu me recevoir en son sein, ainsi que Monsieur le Professeurs François BURET, Directeur du département Electronique, Electrotechnique et Automatique de l'École Centrale de Lyon et Monsieur le Professeur Alain NICOLAS, ancien responsable de la formation doctorale.

Je remerciement vivement Monsieur Issouf FOFANA, Professeur à l'Université de Québec à Chicoutimi, Canada et Monsieur Christian BROUSSEAU, Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale, pour avoir accepté de rapporter sur cette thèse.

Mes remerciements vont également à Monsieur Serge AGNEL, Professeur à l'Université Montpellier; Monsieur Charles JOUBERT, Professeur à l'Université Claude Bernard et Monsieur Christophe PERRIER, Docteur Ingénieur à ALSTOM GRID Power Transformer (TICC) pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'accepter de participer à ce jury.

Je tiens à exprimer mes remerciements à toutes les personnes du laboratoire Ampère notamment Josiane CHABERT, Marie-Christine HAVGOUDOUKIAN, Richard BARTHOLLET et Jacques GONIN.

Je remercie également tous mes amis au laboratoire Ampère: Sanaa "la patronne", Janvier-Synvestre, Sam, Slama, Osman, Oghi "le gros", Amine, Jean, Naraindranath, Yoanne... et mes amis vietnamiens Thanh, Duc, Son, Tuyen...qui ont partagé avec moi des moments agréables et très bonnes ambiances.

Table de matières

Résumé	11
Liste des figures	13
Liste des tableaux	19
INTRODUCTION GÉNÉRALE	11
PARTIE I	27
CHAPITRE 1	29
MATÉRIAUX ISOLANTS POUR TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE	29
1.1 Introduction	31
1.2 Isolants liquides	31
1.2.1 Rôle des isolants liquides	31
1.2.2 Principaux types des isolants liquides	33
1.3 Isolants solides	40
1.3.1 Rôle et principaux types des isolants solides	40
1.3.2 Cartons	41
1.4 Conclusion	43
CHAPITRE 2	45
PHÉNOMÈNE DE PRÉCLAQUAGE ET DE CLAQUAGE DANS LES ISOLANTS LIQUIDES	45
2.1 Introduction	47
2.2 Phase de génération : génération d'un bulle de gaz	47
2.2.1 Dynamique des bulles	48
2.2.2 Paramètres influençant la tension de génération de streamers	50
2.3 Transition bulle - streamer	51
2.4 Propagation des streamers	52
2.4.1 Mécanisme de formation des streamers et leurs caractéristiques	52
2.4.2 Courant et émission lumineuse accompagnant les streamers	53
2.4.3 Influence des propriétés du liquide	54
2.4.4 Influence de la pression	56
2.4.5 Influence de la température	56
2.4.6 Influence de la polarité	57
2.4.7 Influence de géométrie des électrodes	58
2.4.8 Influence des additives	59
2.4.9 Analyses spectrale et chromatographique	61
2.5 Étude statistique de la tension de claquage	61
2.5.1 Paramètres influençant la tension de claquage	62
2.5.2 Application de la loi statistique pour l'étude de la tension de claquage	66

2.6 Conclusion.....	73
CHAPITRE 3.....	75
PHÉNOMÈNES DE DÉCHARGES AUX INTERFACES LIQUIDE/SOLIDE.....	75
3.1 Introduction	77
3.2 Structure et propriétés de l'interface liquide/solide	78
3.2.1 Distribution des charges à l'interface liquide/solide	78
3.2.2 Propriété du complexe huile/matériau cellulosique (carton).....	81
3.3 Décharge à l'interface liquide/solide diélectrique.....	83
3.4 Analyse fractale des décharges glissantes	86
3.5 Conclusion.....	88
PARTIE II.....	89
CHAPITRE 4.....	91
ÉTUDE DE LA GÉNÉRATION DES STREAMERS DANS LES HUILES	
VÉGÉTALES, MINÉRALES ET SYNTHÉTIQUES	91
4.1 Introduction	93
4.2 Techniques expérimentales	94
4.2.1 Cellule d'essai	94
4.2.2 Générateur de tension.....	95
4.2.3 Mesure du courant	96
4.2.4 Détection des bulles	96
4.2.5 Liquides utilisés.....	98
4.3 Résultats expérimentaux	99
4.4 Conclusion.....	108
CHAPITRE 5.....	109
ÉTUDE DE LA PROPAGATION DES STREAMERS DANS LES HUILES	
VÉGÉTALES, MINÉRALES ET SYNTHÉTIQUES	109
5.1 Introduction	111
5.2 Techniques expérimentales	111
5.2.1 Cellule d'essai	112
5.2.2 Système électrode.....	113
5.2.4 Mesures électriques	114
5.2.5 Système optique pour la visualisation des streamers	114
5.2.6 Liquides utilisés.....	114
5.3 Résultats expérimentaux	115
5.3.1 Forme des streamers.....	115
5.3.2 Longueurs finales des streamers.....	116
5.3.3 Courants et charges électriques associés aux streamers.....	123
5.3.4 Vitesse des streamers	127
5.4 Conclusion.....	132

CHAPITRE 6	133
ÉTUDE STATISTIQUE DE LA TENSION DE CLAQUAGE	133
6.1 Introduction	135
6.2 Techniques expérimentales	135
6.3 Résultats expérimentaux	137
6.3.1 Histogramme de la tension de claquage	137
6.3.2 Test d'hypothèse	140
6.3.3 Analyse statistique de la tension de claquage par la distribution Normale	142
6.3.4 Comparaison entre la distribution Normale et la distribution de Weibull	146
6.3.5 Étude statistique de la tension de claquage avec la méthode ACP	147
6.3.6 Tension de claquage sous la tension de foudre	149
6.4 Conclusion.....	150
CHAPITRE 7	153
ÉTUDE DES DÉCHARGES GLISSANTES SOUS TENSION IMPULSIONNELLE – RELATION ENTRE PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX ET DIMENSION FRACTALE	153
7.1 Introduction	155
7.2 Techniques expérimentales	155
7.2.1 Dispositifs expérimentaux	155
7.2.2 Liquides et solides utilisés.....	158
7.3 Résultats expérimentaux	159
7.3.1 Morphologie des décharges glissantes	159
7.3.2 Mesures électriques	172
7.4 Analyse fractale des décharges glissantes	177
7.4.1 Procédure expérimentale	177
7.4.2 Analyse fractale par la méthode de quadrillage (<i>Box method</i>).....	180
7.5 Conclusion.....	183
CONCLUSION GÉNÉRALE	185
Références	191

Résumé

Ce travail porte sur une étude comparative des huiles végétales (esters naturels) issues de différentes graines, esters synthétiques, et minérales sur la base des caractéristiques de génération et de propagation des streamers qui s'y développent, des tensions de claquage ainsi que des décharges se propageant sur un isolant solide en présence de ces huiles. Il ressort des résultats obtenus qu'en géométrie pointe – plan, sous tension continu, la tension de génération en polarité positive est toujours supérieure à celle mesurée en polarité négative et elle est plus élevée dans les huiles esters que dans les huiles minérales quelle que soit la polarité de l'électrode pointe. En ce qui concerne la propagation de streamers sous tension impulsionnelle de foudre, les longueurs finales (ou longueurs d'arrêt) L_f des streamers positifs sont environ 10 fois supérieures à celles des streamers négatifs. Pour atteindre la même L_f , il faut beaucoup plus de tension en polarité négative qu'en polarité positive. Par conséquent, les tenues diélectriques sont plus élevées en polarité négative qu'en polarité positive. D'autre part, L_f est plus élevée dans les huiles végétales que dans certaines huiles minérales. La tension de claquage des huiles isolantes, déterminée selon la norme CEI 60156, suit généralement une distribution Normale. Les probabilités de claquage peuvent alors être déterminées suivant la distribution Normale en prenant un échantillonnage suffisamment grand ($n > 30$). Il est également montré que les huiles végétales et l'ester synthétique présentent des tensions de claquage ($U_{1\%}$, $U_{10\%}$ et $U_{50\%}$) plus élevées que les huiles minérales sous tension alternative. La tension de claquage moyenne est aussi plus élevée dans les esters que dans les huiles minérales sous tension impulsionnelle de foudre. La morphologie, la longueur d'arrêt et le courant des décharges se propageant sur un isolant solide (carton) immergé dans les liquides étudiés, dépendent de l'amplitude et de la polarité de la tension, de l'épaisseur du solide et de la nature des huiles. L_f augmente quasi-linéairement avec la tension appliquée et diminue lorsque l'épaisseur du solide augmente. Pour une tension et une épaisseur données, les décharges qui se développent sur l'interface carton/huile végétale sont plus longues que celles sur l'interface carton/huile minérale. Par ailleurs, L_f est plus élevé en polarité positive qu'en polarité négative, ce qui indique que la polarité la plus contraignante est la polarité positive. Il a été également mis en évidence l'existence d'une décharge secondaire de signe opposé à celui de la tension appliquée, résultat de l'accumulation de charges d'espace à la surface de l'isolant solide. Enfin, la dimension fractale D des décharges diminue lorsque l'épaisseur du solide augmente. Plus l'épaisseur du solide est grande, plus le degré de ramification des décharges est moins important. Pour une tension et une épaisseur données, D est généralement plus élevée dans l'huile minérale que dans l'huile végétale.

Mots clés : *Huiles végétales, streamers, longueur finale, préclaquage, claquage, décharges surfaciques, dimension fractale.*

Abstract

This work is aimed at the comparative study of vegetable oils (natural esters) issued from different seeds, synthetic ester oil and mineral oils, based on the characteristics of generation and propagation of streamers, breakdown voltages and creeping discharges propagating over solid insulator (pressboard) immersed in these oils. It has been shown that, in a point – plane electrode geometry, the DC threshold voltage U_s is higher when the point is positive than when it's negative; U_s is higher in vegetable oils than in mineral oils for both polarities of voltage. Under lightning impulse voltage, the streamers are filamentary in all different tested oils whatever the polarity of voltage. The final (or stopping) length L_f of streamers are about ten times higher when the point is positive than when it's negative. The voltage required to reach the same L_f is higher with a negative point than with a positive point. Thus the positive polarity is unfavourable for the industrial applications. In addition, L_f is longer in vegetable oils than in some mineral oils. The breakdown voltage of insulating oils, measured according to IEC 60156 standard specifications generally follows a normal distribution. The probability of breakdown can hence be determined according to the normal distribution with a large amount of samples ($n > 30$). So, vegetable oils and synthetic ester have breakdown voltages ($U_{1\%}$, $U_{10\%}$ and $U_{50\%}$) higher than mineral oils under AC; and the mean breakdown voltage is also higher in esters oils than in minerals oils under lightning impulse voltage. The morphology, final length L_f and current of discharges propagating over a solid insulator (pressboard) immersed in the liquid tested, depend on the amplitude and polarity of the voltage, the thickness of insulator as well as the nature of insulating oils. It has been shown that L_f increases quasi-linearly with the applied voltage and decreases when the thickness of insulator increases. For a given applied voltage and thickness of insulator, L_f is higher with a pressboard/vegetable oil interface than with a pressboard/mineral oil interface. In addition, L_f is also longer when the point is positive than when it's negative. The recorded currents revealed the existence of a secondary discharge of opposite sign to that of the applied voltage. This phenomenon is due to the accumulation of charges at the surface of insulator. Finally, the fractal dimension D of creeping discharges decreases when the thickness of insulator increases. For a given applied voltage and thickness of solid, D is generally higher in mineral oils than in vegetable oils.

Keywords: *vegetable oil, streamers, final length, prebreakdown, breakdown, creeping discharge, fractal dimension.*

Liste des figures

Figure 1.1:	Structure des hydrocarbures de base dans une huile minérale.	36
Figure 1.2:	Influence des composés aromatiques sur les propriétés physiques et chimiques des huiles.	36
Figure 1.3:	Évaluation de la viscosité cinématique des huiles en fonction de la température.	37
Figure 1.4:	Structure de l'ester synthétique, R : chaîne saturée.	38
Figure 1.5:	Comparaison des pourcentages de biodégradabilité des huiles.	38
Figure 1.6:	Structure chimique d'une huile végétale, aussi appelé triester (triglycérides); R, R' et R'' sont les chaînes acides gras du même ou de la différent types.	39
Figure 1.7:	Formule de la cellulose.	42
Figure 1.8:	Extrémité de la chaîne de cellulose, la liaison (1-4) β -glycosidique est également encadrée.	42
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, W = 5 nJ, P $_{\infty}$ =1.3 10 ⁵ bar.	49
Figure 2.2 :	Photographie d'un chapelet de bulles produit par un train d'impulsions de courant (cyclohexane, U = -5 kV; P = 1 bar).	50
Figure 2.3:	Tension de génération des streamers dans le cyclohexane en créneau de tension en fonction du rayon de courbure de la pointe en deux polarités : (+) pointe positive, (-) pointe négative.	51
Figure 2.4 :	Enregistrement simultané de l'évolution d'un streamer négatif dans l'hexane avec le courant et la charge correspondante. U=15.5 kV; d=3.2 mm; r _p =1 μ m. L'intervalle entre images et le temps d'exposition sont respectivement de 512 et 102 ns.	54
Figure 2.5:	Streamer négatif dans le cyclohexane sous l'influence de la pression.	56
Figure 2.6:	Types de streamers usuellement observés dans le cyclohexane.	58
Figure 2.7:	Influence des additifs sur la forme des streamers négatifs dans le cyclohexane: U=50 kV; L=2 mm; r _p =3 mm.	60
Figure 2.8 :	Effet des additifs (a) capteurs d'électron (CCl ₄) sur la vitesse des streamers négatifs et (b) à bas potentiel d'ionisation (DMA) sur la vitesse des streamers positifs.	60

Figure 2.9:	Tensions de claquage des huiles en fonction de la teneur en eau relative en présence ou non de particules de cellulose.	62
Figure 2.10:	Variation de la tension de claquage de l'huile de transformateur en fonction du temps d'application de tension.	63
Figure 2.11:	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.	64
Figure 2.12:	Influence du recouvrement des électrodes sur la tension de claquage de l'huile dans une géométrie : (a) sphère – sphère et (b) tige – sphère.	65
Figure 2.13:	Évolution de la tension de claquage des huiles après vieillissement.	65
Figure 2.14:	Test de conformité de comparaison d'une moyenne observée et d'une moyenne de la loi Normale.	67
Figure 2.15:	(a) Histogrammes et (b) courbe cumulative, observées pour un échantillon idéal suivant une distribution normal.	69
Figure 3.1:	Schéma de la double couche selon le modèle (a) de Helmholtz et (b) de Gouy – Chapman.	80
Figure 3.2:	Schéma (a) de la double couche et (b) de la double couche surchargée selon le modèle de Stern.	80
Figure 3.3:	Distribution du potentiel dans la double couche : 1 et 2 – pour différentes densités d'ions positifs adsorbés, 3 – dans la couche surchargée, A – couche de Helmholtz, B – couche de Gouy – Chapman.	81
Figure 3.4:	Structure moléculaire à l'interface huile/carton.	82
Figure 3.5:	Distribution de champ électrique dans une interface huile/solide.	82
Figure 3.6:	a) Décharge électrique aux interfaces huile/solide des cales de transformateur, b) Schéma de la décharge et des cales.	84
Figure 3.7:	Figures originales de Lichtenberg 1777.	84
Figure 3.8:	Évolution temporelle des décharges glissantes obtenue par ombroscopie en (a) polarité positive et (b) négative.	85
Figure 3.9:	Application de la méthode de quadrillage (box counting method): (a) image de la décharge originale, (b) image binaire extraite, (c) image binaire couverte par des carrés de côté $l = 40$ pixels et (d) image binaire couverte par des carrés de côté $l = 10$ pixels.	88
Figure 4.1:	Vue schématique de la cellule d'essai.	95
Figure 4.2:	Schéma de la génératrice haute tension.	95
Figure 4.3:	Schéma électrique destiné à la mesure du courant.	96

Figure 4.4:	Schéma d'une bulle immergée dans l'huile en champ électrique divergent (géométrie pointe – plane).	97
Figure 4.5:	Schéma de principe du dispositif de détection des bulles.	97
Figure 4.6:	Principe de détection de la génération de bulle.	98
Figure 4.7:	Vue générale du dispositif expérimental avec la cellule et le générateur en arrière plan.	98
Figure 4.8:	Corrélation des oscillogrammes du courant de génération et de l'atténuation laser en polarité positive (+13 kV) dans l'huile végétale VO1.	100
Figure 4.9:	Corrélation des oscillogrammes du courant de génération et de l'atténuation laser en polarité négative (-13 kV) dans l'huile ester végétale VO1.	100
Figure 4.10:	Système d'électrodes pointe – plan.	102
Figure 4.11:	Oscillogramme du courant de génération et de l'atténuation laser en polarité positive (12 kV) dans l'huile ester végétale VO2	107
Figure 4.12:	Oscillogramme du courant de génération et de l'atténuation laser en polarité négative (-12 kV) dans l'huile ester végétale VO3.	107
Figure 5.1:	Schéma du dispositif expérimental.	112
Figure 5.2:	Vue schématique et photo de la cellule d'essai.	112
Figure 5.3:	Photographie des streamers dans MO3, polarité positive, (a) $U = 60$ kV, (b) $U = 80$ kV, $d = 20$ mm.	116
Figure 5.4:	Exemples de forme des streamers positifs observés en polarité positive dans les différentes huiles à $U = +78$ kV, $d = 30$ mm.	118
Figure 5.5:	Exemples de forme des streamers négatifs observés en polarité négative dans les différentes huiles à $U = -128$ kV, $d = 30$ mm.	119
Figure 5.6:	Longueur finale des streamers en polarité positive (a) et négative (b), $d = 20$ mm.	120
Figure 5.7a:	Représentation sous forme de diagramme de l'évolution de la longueur finale des streamers en fonction de la distance interélectrodes, $U = -95$ kV.	122
Figure 5.7b:	Représentation sous forme de courbe de l'évolution de la longueur finale des streamers en fonction de la distance inter électrodes, $U = -95$ kV.	123
Figure 5.8 :	Courants de streamers mesurés en polarité positive, $U = 60$ kV, $d = 20$ mm (a) MO1/A, (b) VO2/F, (c) SE1/D.	124
Figure 5.9:	Courants de streamers mesurés en polarité négative, $U = 80$ kV, $d = 20$ mm (a) MO3/C, (b) VO4/H, (c) SE1/D.	125

Figure 5.10: Charge associée de streamers mesurés en polarité négative $U = -80$ kV, $d = 20$ mm, (a) MO4'/B, (b) VO4/H.	126
Figure 5.11: Charge totale de streamers mesurés en deux polarité $d = 20$ mm, (a) positive et (b) négative.	127
Figure 5.12: Vitesse moyenne des streamers en polarité (a) positive et (b) et négative.	128
Figure 5.13: Charge associée de streamers mesurés en polarité positive dans l'huile végétale VO3/E, $U = 55$ kV, $d = 20$ mm.	131
Figure 6.1 : Distribution de tension de claquage des huiles testées.	137
Figure 6.2 : Histogramme de tension de claquage des huiles étudiées.	139
Figure 6.3: Valeur moyenne et écart-type de la tension de claquage des huiles testées.	140
Figure 6.4: Probabilité de la distribution Normale de la tension de claquage des huiles.	143
Figure 6.5: Coefficients d'asymétrie et d'aplatissement de la distribution Normale de la tension de claquage des huiles.	144
Figure 6.6: Histogramme et densité de probabilité de la distribution Normale de la tension de claquage des huiles.	145
Figure 6.7: Probabilité de la tension de claquage des huiles étudiées.	146
Figure 6.8: Probabilité de la tension de claquage par la distribution Normale et la distribution de Weibull.	147
Figure 6.9: Résultats de test d'homogénéité des variances en utilisant le test de Bartlett.	148
Figure 6.10: Analyse en composantes principales de la tension de claquage des huiles étudiées	149
Figure 6.11: Tension de claquage dans les huiles testées sous impulsion de foudre.	150
Figure 7.1: Schéma du dispositif expérimental.	156
Figure 7.2: Schéma et photographie de la cellule d'essai.	157
Figure 7.3: Carton testé (a) avant et (b) après de imprégner.	158
Figure 7.4: Photographie de décharges glissantes obtenues en polarité négative, (a) MO1/carton (-55 kV), (b) Colza/carton (-44 kV), $e = 2$ mm.	160
Figure 7.5: Photographie de décharges glissantes obtenues en polarité positive, (a) MO1/carton (+45 kV), (b) Colza/carton (+36 kV), $e = 2$ mm.	160
Figure 7.6: Évolution de la longueur des décharges en fonction de tension obtenue en polarité positive, sur une interface MO1/carton, $e = 2$ mm.	161
Figure 7.7: Évolution des décharges en fonction de l'épaisseur du carton en polarité positive, sur une interface RA/carton, $U = 70$ kV.	162

- Figure 7.8: Distribution du champ électrique au voisinage de la pointe, obtenue par simulation, pour une interface huile minérale/carton imprégné (a) et ester/carton imprégné (b), la tension appliquée est $U = 15 \text{ kV}$, $e = 2 \text{ mm}$ d'épaisseur. 163
- Figure 7.9: Évolution du champ harmonique à la surface, obtenue par simulation, pour une interface huile minérale/carton imprégné (a) et ester/carton imprégné (b), la tension appliquée est $U = 15 \text{ kV}$, $e = 2 \text{ mm}$ d'épaisseur. 163
- Figure 7.10: Décharges glissants en polarité négative, obtenue sur une interface MO1/carton ($e=2 \text{ mm}$) après plusieurs essais consécutifs. Les décharges empruntent les mêmes trajectoires, d'où une similitude des trois figures. 165
- Figure 7.11: Claquage d'une interface TO/carton. 166
- Figure 7.12: Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes en fonction de l'épaisseur du carton pour les différentes huiles étudiées en polarité positive. 168
- Figure 7.13: Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes en fonction de l'épaisseur du carton pour les différentes huiles étudiées en polarité négative. 169
- Figure 7.14: Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes pour les différentes huiles étudiées en chacune des épaisseurs étudiées ($e = 2, 6$ et 9 mm), en polarité positive. 170
- Figure 7.15: Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes pour les différentes huiles étudiées en chacune des épaisseurs étudiées ($e = 2, 6$ et 9 mm), en polarité négative. 171
- Figure 7.16: Décharges positives obtenues sur une interface Colza/carton ($e=2 \text{ mm}$) et les courants associés pour différentes valeurs de tension. 173
- Figure 7.17: Décharges négatives obtenues sur une interface Colza/carton ($e=2 \text{ mm}$) et les courants associés pour différentes valeurs de tension. 173
- Figure 7.18: Enregistrement du courant électrique d'une décharge négative sur une interface MO1/carton, $e=2 \text{ mm}$, $U = 50 \text{ kV}$. Cet enregistrement révèle l'existence d'une décharge secondaire de signe opposé à celui de la décharge principale. 174
- Figure 7.19: Courant et la charge associée des décharges glissantes sur une interface MO/carton ($e=2\text{mm}$) en deux polarités et $U=58 \text{ kV}$. 175
- Figure 7.20: Évaluation de la charge totale, déduite des mesures de courant, en fonction de la tension appliquée pour des épaisseurs de carton de 2 et 6 mm immergés dans les huiles MO1 et CO. 176
- Figure 7.21: Évaluation de la charge totale à partir du courant mesuré, en fonction de la tension appliquée pour une épaisseur de carton $e = 2 \text{ mm}$ en présence des huiles MO1, CO et RA. 176

- Figure 7.22: Image de décharges glissantes sur une interface MO1/carton pour différentes épaisseurs (e) : (a) image originale (b) image en binaire correspondante. 178
- Figure 7.23: Image de décharges glissantes sur une interface CO/carton pour différentes épaisseurs (e) : (a) image originale (b) image en binaire correspondante. 179
- Figure 7.24: 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 (d) images binaires couvertes par des carrée de coté $l=25$ pixels. 181
- Figure 7.25: Nombre total de boîtes N en fonction de la taille des boîtes l obtenues à partir de l'analyse des exemples de décharges sur une interface MO1/carton, illustrées par la figure 7.22b en utilisant la méthode de quadrillage : $D \approx 1.77, 1.63$ et 1.58 respectivement pour $e = 2$ mm, 6 mm, 9 mm. 182
- Figure 7.26: Nombre totale de boîtes N en fonction de la taille des boîtes l obtenues à partir de l'analyse des exemples de décharges sur une interface CO/carton, illustrées par la figure 7.23b en utilisant la méthode de quadrillage : $D \approx 1.72, 1.62$ et 1.59 respectivement pour $e = 2$ mm, 6 mm, 9 mm. 183
- Figure 7.27: Nombre totale de boîtes N en fonction de la taille des boites l obtenues à partir de l'analyse des exemples de décharges illustrées par les figures 7.22b et 7.23b, en utilisant la méthode de quadrillage. Ces résultats correspondent à l'huile minérale MO1 et l'huile végétale CO pour le cas $e = 2$ mm : $D \approx 1.77, 1.72$ respectivement pour l'huile MO1 et l'huile CO. 184

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Différentes catégories d'isolants liquides.	34
Tableau 2.1: Les différentes situations dans le cadre de test d'hypothèse.	67
Tableau 4.1: Tension de génération U_s et champ correspondant calculé par l'approximation hyperboloïdale E_{SH} .	101
Tableau 4.2: Rayons de la bulle calculé en polarité négative.	106
Tableau 5.1: Facteur d'utilisation et de non uniformité du champ en système d'électrode pointe – plan.	1113
Tableau 5.2: Propriétés des huiles testées.	1115
Tableau 6.1: Propriétés des huiles testées	136
Tableau 6.2: Test d'hypothèse de conformité à la distribution Normale.	141
Tableau 6.3: Test d'hypothèse de conformité à la distribution de Weibull.	142
Tableau 7.1: Tension moyenne requise pour obtenir une décharge glissante de longueur finale $S=35$ mm dans les huiles MO1, CO et pour différentes épaisseurs.	180
Tableau 7.2: Dimension fractale pour les deux types d'interface en fonction de l'épaisseur du carton, estimée par la méthode de quadrillage.	183

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les huiles isolantes sont utilisées depuis longtemps dans l'industrie électrique : transformateurs (de puissance, de distribution, de traction, de four, de mesure...), réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prise... Elles sont utilisées comme imprégnants d'isolations cellulosiques et/ou comme produit de remplissage des matériels. Les volumes d'huiles employés varient de quelques litres pour les condensateurs, à plusieurs dizaines de milliers de litres pour les transformateurs de puissance.

Dans les transformateurs, les huiles jouent deux rôles essentiels : celui d'assurer l'isolation électrique et celui d'évacuer la chaleur des enroulements et du noyau magnétique, par convection naturelle ou par écoulement forcé grâce à des pompes. Dans les câbles et les condensateurs, les huiles isolantes sont utilisées pour l'imprégnation des matériaux solides (papier, polymères), elles 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. Les huiles peuvent être aussi utilisées pour leur pouvoir extincteur d'arc électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises, pompes immergées). Ce rôle est de plus en plus dédié à d'autres matériaux plus performants, que sont les gaz électronégatifs comme l'hexafluorure de soufre (SF_6) ou le vide, l'utilisation de l'huile dans les disjoncteurs est de plus en plus rare de nos jours. Elles sont également utilisées dans certains cas (zone urbaine en particulier) pour améliorer la résistance au feu, comme c'est le cas dans les transformateurs de distribution proche de la population. Enfin, elles servent à ralentir l'oxydation directe de l'isolation cellulosique. C'est d'ailleurs pour cette fonction d'anti-oxydant ainsi que pour réduire les dimensions des transformateurs isolés à l'air (dit "secs") qui devenaient de plus en plus énormes et encombrants avec la multiplication des réseaux de distribution d'énergie électrique et l'accroissement des puissances installées, que les huiles ont été introduites au début du vingtième siècle.

Pendant longtemps, les seules huiles utilisées ont été les huiles minérales d'origine pétrolière. Elles sont de plus en plus remplacées par des huiles de synthèse. Actuellement, l'huile minérale n'est plus utilisée dans la fabrication des condensateurs. Cependant, vu les quantités énormes que l'on doit utiliser et son prix très abordable, l'huile minérale est encore largement utilisée dans les transformateurs de puissance. Ses propriétés diélectriques (résistivité et permittivité diélectrique), très proches de celles des matériaux solides à base de

cellulose, lui permettent de travailler en association avec ceux-ci et d'assurer le bon fonctionnement des structures isolantes (huile/papier) des transformateurs.

Cependant, les recommandations internationales et européennes tendent à restreindre très fortement, voire interdire, l'utilisation de certains matériaux isolants dans la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique, pour préserver l'environnement et/ou se prémunir contre les disponibilités et pénuries de certaines matières premières. Parmi ces matériaux, les huiles minérales. Ainsi, il est devenu nécessaire de chercher d'autres liquides de remplacement dont les propriétés isolantes seraient proches voire meilleures que celles des huiles minérales. Les recherches s'orientent actuellement vers les huiles végétales dites biodégradables, c'est-à-dire les esters naturels à base de soja, colza, tournesol... [1, 2]. Même si leur utilisation est pour le moment restreinte aux transformateurs de distribution, de nombreux projets sont en cours pour étendre leur application aux transformateurs de puissance. Des travaux récents ont montré que si les huiles végétales présentaient un caractère de biodégradabilité et de résistance au feu attractif, elles restent cependant moins intéressantes du point de vue stabilité à l'oxydation et de leur viscosité plus élevée que celle des huiles minérales ou synthétiques [1].

Ce travail porte sur une étude comparative des huiles minérales, des huiles esters synthétiques et des huiles végétales issues de différentes origines, à travers l'analyse des tensions de génération des streamers, la morphologie et la longueur finale (ou d'arrêt) L_f de ces derniers 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). Nous présentons et discutons les résultats de mesure des tensions de claquage des différentes huiles ainsi que leur traitement statistique par trois méthodes statistiques : distribution Normale, distribution de Weibull et méthode ACP (Analyse en Composante Principale). Les caractéristiques des décharges glissantes se propageant sur des surfaces de carton (papier cellulose utilisé dans les transformateurs de puissance) immergés dans deux types d'huiles, l'une minérale et l'autre végétale, ainsi qu'une analyse fractale portant sur ces décharges sont également présentées.

Ce travail comporte deux parties. La première partie est constituée de trois chapitres dédiés exclusivement à l'état des connaissances sur les phénomènes prédisruptifs 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 génération et la propagation des streamers, les tensions de claquage dans différentes huiles

minérales, esters naturels et synthétique ainsi que les décharges se propageant sur un isolant solide (le carton) en présence de ces huiles.

Le premier chapitre présente les différents types d'huiles isolantes (minérales, esters synthétiques et naturels) et leurs rôles dans les matériels électriques ainsi que les isolants solides auxquels elles sont associées pour assurer le bon fonctionnement des appareillages, en particulier celui des transformateurs de puissance.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des mécanismes de préclaquage et de claquage dans les isolants liquides. Les lois statistiques utilisées pour l'étude de la tension de claquage y sont également présentées.

Dans le troisième chapitre, nous présentons une brève revue sur le phénomène de décharges aux interfaces solide/liquide. Nous décrivons de manière succincte les processus de distribution de charges aux interfaces, le mécanisme de décharges surfaciques ainsi que les paramètres qui les caractérisent.

Le quatrième chapitre présente les différents éléments du dispositif expérimental utilisé pour l'étude de la génération des streamers ainsi que les résultats expérimentaux relatifs à la mesure de la tension de génération dans les différents types d'huiles : minérales, esters naturels et synthétiques.

Le cinquième chapitre est dédié à l'étude des phénomènes de propagation des streamers. Nous y décrivons la technique expérimentale utilisée ainsi que les caractéristiques des huiles étudiées. Nous présentons plus particulièrement les résultats d'une étude comparative des huiles minérales, des huiles esters synthétiques et des huiles végétales, basée sur l'analyse de la morphologie et de la longueur finale (ou d'arrêt) des streamers qui s'y propagent en géométrie pointe – plan ainsi que des courants associés.

Dans le sixième chapitre, nous présentons d'abord les dispositifs expérimentaux utilisés pour la mesure de la tension de claquage des huiles considérées. Nous décrivons par la suite les résultats d'analyses statistiques de la tension de claquage en alternatif, les résultats de mesure de la tension de claquage en impulsion de foudre sont également présentés.

Le septième et dernier chapitre porte sur l'analyse des caractéristiques des décharges surfaciques (ou glissantes) sous tension impulsionnelle de foudre, en géométrie pointe-plan. Les différents éléments et dispositifs expérimentaux utilisés dans nos essais ainsi que les

caractéristiques de l'échantillon solide (carton) et des liquides isolants (huiles minérales et esters) considérés y sont décrits. Nous présentons par la suite les différentes figures de décharges surfaciques 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. Enfin, nous présentons l'analyse fractale des décharges surfaciques obtenues expérimentalement ainsi que l'influence des propriétés des huiles et des épaisseurs du solide sur la dimension fractale.

PARTIE I

CHAPITRE 1

MATÉRIAUX ISOLANTS

POUR TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE

1.1 Introduction

Les équipements haute et moyenne tensions comportent le plus souvent des structures mixtes, combinant au moins deux phases : solide/liquide ou solide/gaz. Ce type d'isolation est présent dans des appareillages comme les transformateurs et condensateurs de puissance, les disjoncteurs et les câbles ainsi que dans les lignes aériennes (isolateurs de support et de traversée). Dans certaines applications comme les disjoncteurs par exemple, les isolants solides sont utilisées à la fois comme enveloppes et comme isolant, dans le cas des transformateurs de puissance, en plus de l'isolation des bobinages et des traversées, les solides servent comme panneaux (rôle mécanique) et comme barrière isolante en particulier dans les transformateurs cuirassés. Quant aux fluides, ils jouent également deux rôles: isolant et caloporteur.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons principalement à l'isolation mixte papier / huile utilisée dans les transformateurs de puissance. Nous présentons les différents types d'huiles isolantes et leurs rôles dans les matériels électriques ainsi que les isolants solides auxquels elles sont associées pour assurer le bon fonctionnement des appareillages en particulier celui des transformateurs de puissance.

1.2 Isolants liquides

1.2.1 Rôle des isolants liquides

Les huiles isolantes sont utilisées en électrotechnique comme imprégnant d'isolations cellulosiques ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers. Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation, la rigidité diélectrique des liquides étant nettement supérieure à celle des gaz. Cependant, dans beaucoup d'applications, elles servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur d'un assemblage [3].

Les transformateurs remplis d'huile ont été développés depuis plus d'un siècle. Cette technologie est toujours très utilisée dans les transformateurs de puissance contrairement aux transformateurs de distribution, qui eux peuvent être "secs". Aussi, différentes raisons expliquent cette préférence:

- Par rapport aux solides, les liquides refroidissent et isolent le transformateur. Ainsi, les transformateurs immergés sont plus compacts que les transformateurs secs de même puissance.
- Les solides permettent d'obtenir des performances diélectriques équivalentes aux liquides, mais à des coûts beaucoup plus élevés.
- Les isolants solides utilisés seuls présentent des risques énormes aux décharges partielles (inclusions gazeuses) pour les niveaux de tension des transformateurs de puissance.
- Les analyses d'huile (teneur en eau, analyse de gaz ...) permettent de diagnostiquer l'état du transformateur à moindre coût.
- Les transformateurs immergés sont moins bruyants que les secs et provoquent ainsi moins de nuisance sonore.

Dans un transformateur, les huiles isolantes assurent plusieurs fonctions [4]:

1.2.1.1 Fonction isolation

Dans la partie active d'un transformateur, l'isolation entre les éléments portés à des potentiels électriques différents est assurée soit:

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

Les principales propriétés qui permettent de juger de l'aptitude d'une huile à remplir sa fonction isolante sont la rigidité diélectrique, le facteur de dissipation ou facteur de perte ($\tan\delta$), la permittivité diélectrique et la résistivité. Ces caractéristiques sont essentielles pour le dimensionnement d'un transformateur [4].

1.2.1.2 Fonction transfert de chaleur

Bien que son rendement soit exceptionnellement élevé (99 à 99.9%), un transformateur ne peut échapper à la perte d'énergie qui accompagne toute conversion. L'énergie perdue se

dissipe sous forme de chaleur nécessitant ainsi le refroidissement de l'appareil. En raison des pertes, les températures de chacun des éléments s'élèvent jusqu'à établissement d'un équilibre entre les vitesses de production et d'évacuation de la chaleur.

La chaleur à évacuer est véhiculée par circulation naturelle ou forcée de l'huile, vers les radiateurs extérieurs. Un dispositif de refroidissement bien dimensionné permet d'éviter la formation de points chauds grâce à une circulation importante et bien régulée.

Le refroidissement se fait par convection et par conduction thermique, et les principales caractéristiques qui permettent de juger de l'aptitude d'une huile à évacuer la chaleur sont la viscosité, la conductivité thermique et la chaleur spécifique.

1.2.1.3 Autres fonctions

Les huiles peuvent être aussi utilisées pour leur pouvoir extincteur d'arcs électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises, pompes immergées) et dans certains cas pour améliorer la résistance au feu, comme c'est le cas dans les transformateurs de distribution proche de la population. Enfin, elles servent à ralentir l'oxydation directe de l'isolation cellulosique [4].

1.2.2 Principaux types des isolants liquides

De façon générale, il n'existe pas de liquides isolants pouvant remplir l'ensemble des propriétés requises pour une application donnée. Les caractéristiques électrique, chimique et physique d'un liquide diffèrent donc d'une application à une autre. Les huiles isolantes sont classées selon leurs origines. On distingue trois types : les huiles végétales (produit naturels), les huiles minérales (à base de produits pétroliers raffinés) et les liquides de synthèse (Tableau 1.1). Cette classification est liée à leur ordre d'apparition chronologique dans les applications électrotechniques. En effet, les huiles végétales furent les premières utilisées, ensuite les huiles minérales ont été développées, puis les liquides de synthèse ont été fabriqués par la suite pour pallier aux lacunes de l'huile minérale dans certaines applications. Dans ce qui suit, nous présentons les trois types d'isolants liquides utilisés dans les transformateurs.

Tableau 1.1 : Différentes catégories d'isolants liquides [5].

	Catégorie	Type	
(i)	Huiles végétales	Huile de ricin	
		Naphténiques	
(ii)	Huiles minérales	Paraffiniques	
		A masse moléculaire élevée	
		Hydrocarbures de synthèse linéaires insaturés	Polybutènes
			Alkylbenzènes
		Hydrocarbures aromatiques de synthèse	Alkylnaphtalènes
			Alkylbiphéniles
		Hydrocarbures linéaires chlorés	Perchloréthylène
			Trichlorobenzènes
		Hydrocarbures aromatiques chlorés	Polychlorobiphényles (PCB)
			Polychlorophénylalcane
(iii)	Huiles minérales	Hydrocarbures linéaires chlorofluorés	
		Trichlorotrifluoroéthane	
		Hydrocarbures aromatiques éthyléniques	Alkyldiaryléthylène
			Néocaprato de benzyle
			Diotylphtalate
		Esters organiques	Esters phosphates
			Esters du pentaérythrol
			Diolyléther
			Polydiméthylsiloxanes (PDMS)
		Silicones liquides	Polyméthylphénylsiloxanes

1.2.2.1 Huiles minérales

Les huiles minérales sont obtenues par raffinage de bruts de pétrole ; elles sont les plus utilisées dans les matériels électriques. Elles possèdent de bonnes propriétés diélectriques et de transfert de chaleur, et une bonne compatibilité avec les isolants celluloses. Malgré les tensions sur le marché international, les huiles minérales sont encore disponibles et à des prix assez bas. C'est principalement pour ces raisons technico-économiques, que les huiles minérales sont les plus communément utilisées dans les transformateurs de puissance. Aussi, avec le développement de nouvelles techniques de traitement (séchage, purification ...), les propriétés des huiles minérales n'ont cessé de s'améliorer depuis leur première utilisation au début du siècle dernier.

La composition chimique des huiles minérales est complexes (plusieurs milliers de molécules différentes) et est généralement définie par la teneur en carbone paraffinique (C_p), en carbone naphtéinique (C_N) et en carbone aromatique (C_A) (Figure 1.1).

✓ **Structure paraffinique (C_p):** les molécules de ce groupe sont aussi connues sous le nom d'hydrocarbures saturés en chaînes droites ou alcanes, qui peuvent être linéaires (n-alcanes) ou ramifiées (iso-alcanes) et dont la formule générale est C_nH_{2n+2} . Les molécules paraffiniques ont une stabilité thermique plus faible que les molécules naphtéiniques et aromatiques.

✓ **Structure naphtéinique (C_N):** les molécules de ce groupe sont également connues sous le nom d'hydrocarbures saturés cycliques ou cycloalcanes. Elles correspondent à des chaînes carbonées fermées de formule générale C_nH_{2n} . Les structures paraffinique et naphtéinique ont une influence prépondérante sur la densité, la viscosité et le comportement à basse température (point d'écoulement, point de trouble).

✓ **Structure aromatique (C_A):** ces molécules sont des composés cycliques, aussi appelées hydrocarbures insaturés, de formule générale C_nH_n . Elles sont totalement différentes des molécules paraffiniques et naphtéiniques, mais jouent un rôle très important dans les propriétés d'une huile minérale. On les trouve sous deux formes : les monoaromatiques et les polyaromatiques dont certaines sont considérées comme cancérogènes. 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* et une bonne rigidité en impulsion (Figure 1.2) [6].

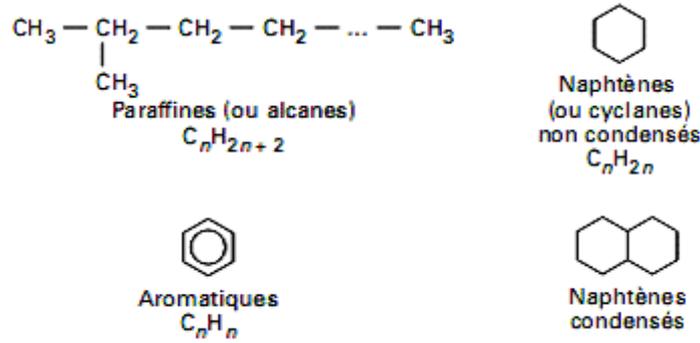


Figure 1.1: Structure des hydrocarbures de base dans une huile minérale [3].

Les huiles minérales contiennent également un faible pourcentage de molécules d'hydrocarbures, qui comprennent dans leur structure d'autres éléments comme l'azote, le soufre et l'oxygène.

Un des avantages des huiles minérales et plus particulièrement des huiles minérales naphténiques, réside dans le fait qu'elles ont une faible viscosité comparée aux autres huiles isolantes pour transformateurs (Figure 1.3). Ceci permet une bonne évacuation de la chaleur et un démarrage à froid correct, mais aussi une bonne imprégnation des isolants celluloseux. La viscosité des hydrocarbures est corrélée à leur masse moléculaire: plus un produit est léger, plus sa viscosité est faible. Cependant, plus un produit a une masse moléculaire faible, plus il est volatil, et plus il est inflammable [3].

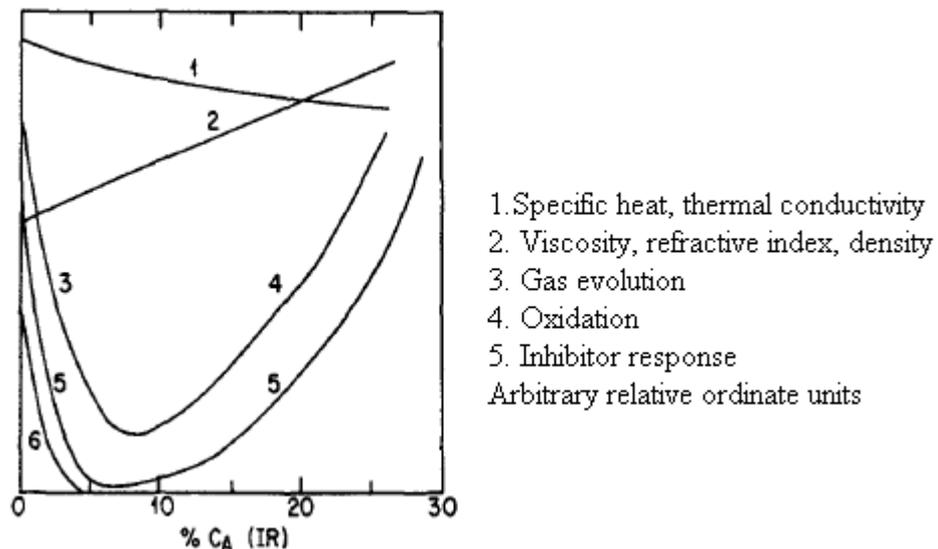


Figure 1.2: Influence des composés aromatiques sur les propriétés physiques et chimiques des huiles [6].

L'un des inconvénients des huiles minérales est leur inflammabilité. En effet, ces huiles possèdent un point éclair relativement bas. Ceci pose un problème pour les appareils installés en zone urbaine, près de la population, tels que les transformateurs de traction ou de distribution. Ce problème est moins important pour les gros transformateurs de puissance qui sont en général installés loin de la population. Cependant, il reste toujours grave du fait que ces derniers peuvent provoquer d'importants dégâts aux installations qu'ils alimentent (centrale nucléaire et industries).

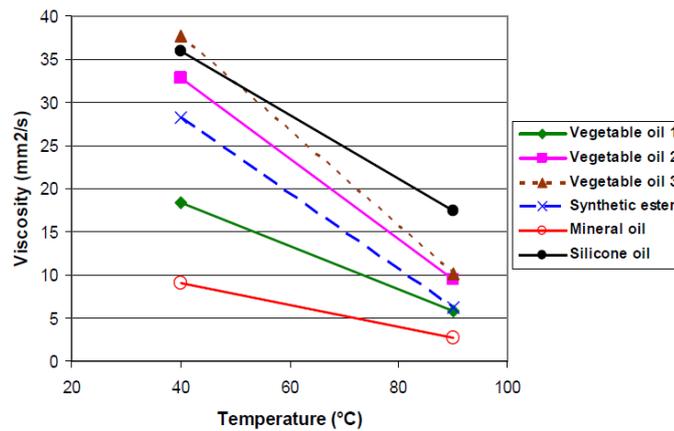


Figure 1.3: Évaluation de la viscosité cinématique des huiles en fonction de la température [1].

Les principaux problèmes en rapport avec la toxicité sont liés au fait que certaines molécules polyaromatiques contenues dans les huiles minérales sont classées comme cancérogènes. Du point de vue écotoxicité, les huiles minérales peuvent être néfastes à l'environnement lorsqu'il y a des fuites au niveau du transformateur, dans le sens où elles sont potentiellement accumulatives (bioaccumulation, contamination de la chaîne alimentaire possible).

1.2.2.2 Liquides de synthèse

Bien que les huiles minérales occupent une place très importante parmi les liquides pour les applications électrotechniques, les huiles de synthèse sont utilisées chaque fois que des propriétés particulières sont recherchées. C'est notamment le cas lorsqu'il s'agit d'améliorer la résistance au feu des transformateurs se trouvant à proximité de la population (transformateurs de distribution et de traction). Ces liquides de synthèse sont tous obtenus à

partir des différents procédés chimiques. Il en existe trois types principaux destinés aux transformateurs :

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

Les huiles esters synthétiques sont obtenues à partir d'un tétracool (pétaérythriol) ou d'un mélange d'acides monocarboxyliques contenant de 7 à 9 carbones (Figure 1.4).

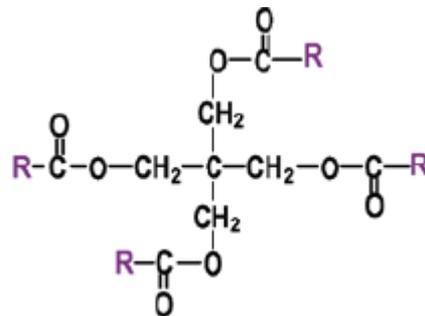


Figure 1.4: Structure de l'ester synthétique, R : chaîne saturée.

Un des principaux atouts de ce type d'huiles est la haute concentration d'eau qu'elles peuvent contenir comparées aux autres huiles isolantes [1]. L'autre avantage des huiles esters synthétiques est leur bonne biodégradabilité comparée à l'huile minérale ou à l'huile silicone (Figure 1.5) [7].

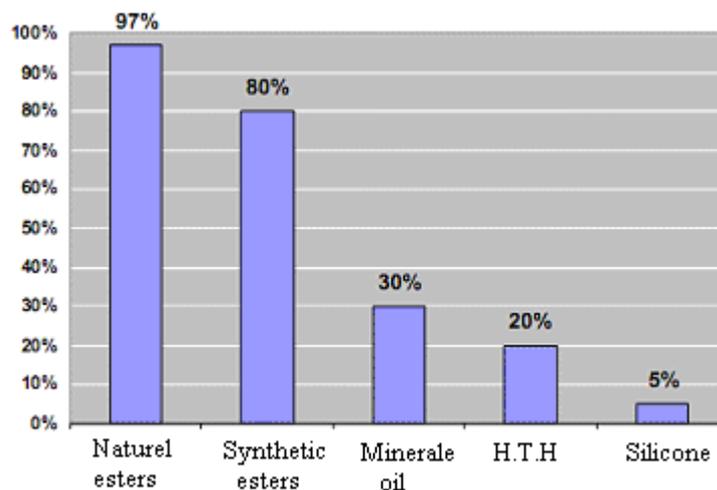


Figure 1.5: Comparaison des pourcentages de biodégradabilité des huiles, norme CEC L-33- A-93 [7].

Les huiles esters synthétiques sont utilisées dans les transformateurs de distribution pour leur résistance au feu. Leur point de feu élevé ($> 300^{\circ}\text{C}$) par rapport aux huiles minérales constitue l'une des caractéristiques principales de ces produits. C'est ainsi qu'on les retrouve dans les appareillages proches de la population, dans les immeubles, les tunnels, etc.

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*. Une étude faite par Dumke et al. [8] a mis en évidence leur mauvaise stabilité avec une forte production de gaz en comparaison avec d'autres types d'huile.

1.2.2.3 Huiles végétales ou esters naturels

Les huiles végétales ont été les premières huiles isolantes utilisées pour l'appareillage électrique ; la première des applications fût l'imprégnation des condensateurs avec l'huile de ricin. Elles sont essentiellement constituées de triglycérides, c'est à dire un triester sachant que la formule d'un ester est R-COO-R' . Les huiles végétales portent aussi le nom d'esters naturels ou d'huiles végétales (par opposition aux esters synthétiques ou organiques) car elles sont synthétisées naturellement par tout organisme vivant et peuvent provenir de différentes semences telles que le tournesol, le colza, le soya....

Les huiles esters végétales sont obtenues par estérification d'un tri-alcool simple, avec trois acides gras. Ces acides sont monocarboxyliques (de formule R-COO-H), à chaîne linéaire non branchée comprenant un nombre pair d'atomes de carbone. Ils peuvent être saturés ou insaturés et parfois hydroxylés. Les triglycérides sont obtenus par trituration (broyage et pression) des graines. La réaction d'estérification d'une huile végétale est la suivante (Figure 1.6):

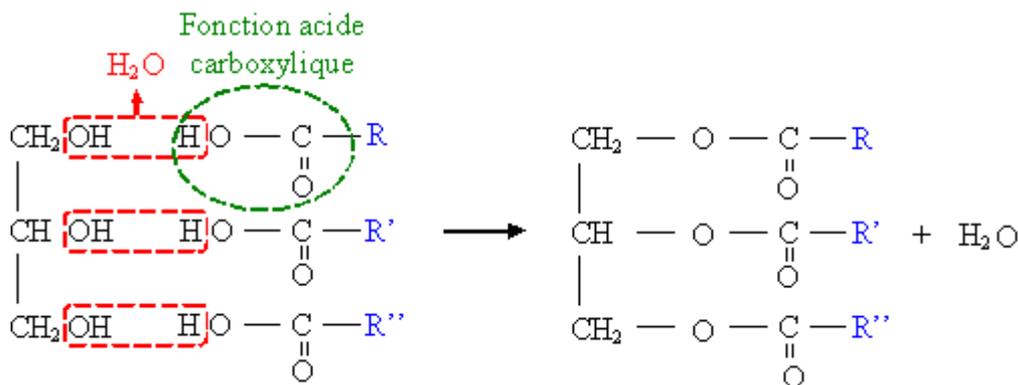


Figure 1.6: Structure chimique d'une huile végétale, aussi appelé triester (triglycérides); R, R' et R'' sont les chaînes acides gras du même ou de la différent types.

Un des grands atouts de ces huiles est leur excellente biodégradabilité qui malheureusement en contrepartie leur confère une grande sensibilité à l'oxydation [7]. De ce fait, leur usage est limité aux appareillages électriques scellés qui ne sont pas respirant, c'est à dire sans communication avec l'atmosphère, où cette sensibilité est compensée avec des antioxydants dont les propriétés environnementales sont mauvaises (produits "non verts"). Leurs autres atouts sont leur faible inflammabilité et leur grande capacité à absorber l'eau (grande solubilité de l'eau), comme les esters organiques, comparés aux huiles minérales.

Outre ces deux avantages, ce type d'huile présente une viscosité plus élevée que les huiles minérales (Figure 1.3) et notamment un point d'écoulement assez haut (aux alentours de -20°C), ce qui limite le transfert de chaleur et restreint leur usage dans les pays où le climat n'est pas trop froid. Enfin, les huiles végétales neuves ont des propriétés électriques voisines de celles des huiles minérales, bien que leur résistivité soit moins élevée [6].

1.3 Isolants solides

1.3.1 Rôle et principaux types des isolants solides

Les isolants solides trouvent leurs applications dans un grand nombre de dispositifs de production, de transport, de distribution et d'utilisation de l'énergie électrique. Dans les transformateurs et plus particulièrement dans les transformateurs de puissance, les solides isolants assurent plusieurs fonctions. Ils sont utilisés pour maintenir mécaniquement les bobinages et pour matérialiser les canaux de circulation du liquide de refroidissement.

Selon leur nature, les isolants solides sont regroupés en deux catégories : organique ou inorganique [9].

- ✓ Les principaux isolants inorganiques regroupent :
 - **Les verres** : essentiellement utilisés pour l'isolement des lignes électriques aériennes et sous forme de fibres dans les isolations composites où ils améliorent les propriétés mécaniques de pièces isolantes plastiques ;
 - **Les céramiques et oxydes** : largement répandus dans l'isolation haute ou basse tension, haute fréquence, sous vide et dans les condensateurs ;
 - **Les micas et produits micacés** : particulièrement importants dans le secteur de l'isolation à la masse des bobinages des stators de machines tournantes de tension nominale comprise entre 1 et 30 kV.

✓ Les isolants organiques : largement utilisés dans le domaine de la câblerie, des condensateurs, des alternateurs, des transformateurs et des moteurs et aussi dans les dispositifs électroniques et composants de puissance. Ils se subdivisent entre matériaux naturels (caoutchoucs, parafine et papier) et synthétiques (élastomères, polymères et composites).

Dans ce qui suit, nous présentons plus particulièrement les cartons, ce type d'isolants étant utilisé dans notre travail pour l'étude des décharges surfaciques.

1.3.2 Cartons

De par leur nature diélectrique, les cartons isolent électriquement les bobinages entre eux. De plus, leur porosité leur permet d'être imprégnés par le liquide isolant et caloporteur qui circule dans le transformateur. Les cartons pour transformateurs sont conçus à partir de pâte cellulosique chimique de type Kraft [10].

La composition chimique du bois des cartons est complexe. La plus grande partie des substances composant le bois est constituée par des polymères. Les composants peuvent être classés suivant leur proportion dans l'ordre suivant [11]:

- Les *polysaccharides* représentent environ 60 à 80% du bois. Ils comprennent deux classes de macromolécules : la cellulose et les hémicelluloses.
- Les *substances phénoliques* (20 à 30%) comprenant la lignine, les tanins, les constituants secondaires, les substances colorées.
- Les *autres constituants* (environ 5% variable suivant les végétaux) : résines, protéines, constituants minéraux, acides gras, savon...

1.3.2.1 Cellulose

La cellulose se trouve dans les proportions de 40% à 60% dans le bois. Elle est formée de longues chaînes de motifs anhydroglucose liés par des liaisons $(1-4)\beta$ -glycosidiques (Figure 1.7). Chaque unité de la chaîne anhydroglucose porte trois groupements hydroxyles (-OH) ; cette extrémité de chaîne est facilement oxydable (Figure 1.8).

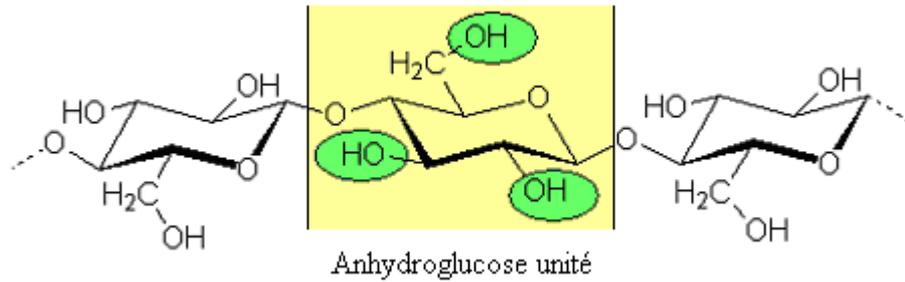


Figure 1.7: Formule de la cellulose

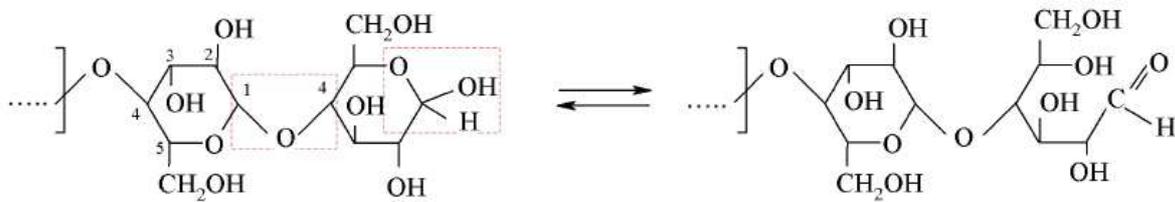


Figure 1.8: Extrémité de la chaîne de cellulose, la liaison (1-4) β -glycosidique est également encadrée [10].

✓ **Structure physique:** La présence de ces liaisons confère aux chaînes de cellulose une forme linéaire qui leur permet de former une structure compacte et ordonnée à chaîne plane. L'association de plusieurs dizaines, voire centaines de chaîne de cellulose, liées entre elles par des liaisons hydrogène constitue les microfibrilles. On distingue dans ces dernières, des régions cristallines où les molécules sont parfaitement parallèles, et des régions plus désordonnées dites amorphes. Les parties amorphes étant plus accessibles aux solvants ; elles sont facilement gonflées et déformées. En revanche, les zones cristallines sont stables et résistent mieux à la pénétration des solvants ou des réactifs. Compris entre 50% et 90%, le degré de cristallinité dépend de la source de cellulose [13].

✓ **Propriétés physico-chimiques:** La cellulose possède un caractère polaire dû à la présence de ses nombreux groupements hydroxyle. Elle n'a d'affinité qu'avec les liquides polaires. Les groupements réactifs de la cellulose sont les trois groupements alcool des unités anhydroglucoses. Les fonctions (-OH) sont plus accessibles dans les zones amorphes. Les zones cristallines sont difficilement accessibles: elles réagissent peu ou pas du tout en milieu aqueux non alcalin.

1.3.2.2 Hémicellulose

Les hémicelluloses sont des polysaccharides ayant un Degré de Polymérisation (DP) de l'ordre de 100 à 200 et une structure physique amorphe. Ces deux caractéristiques leur assurent une plus grande solubilité que la cellulose ainsi qu'une plus grande réactivité de leurs groupements hydroxyle. Les hémicelluloses sont constituées d'hexoses (glucose, galactose, mannose) et de pentoses (xylose, arabinose). De plus, elles peuvent présenter des fonctions acides (-COOH) résultant de l'oxydation de l'hydroxyle primaire d'un hexose.

1.3.2.3 Lignine

Elle représente entre 17 et 33% de la matière sèche. À l'état naturel, la lignine est toujours associée aux polysaccharides [13]. De ce fait, toutes les caractéristiques de la lignine ont été établies à partir de lignines isolées, plus ou moins modifiées par le mode d'extraction.

1.3.2.4 Nomex

Le Nomex est une marque de fibre synthétique haute performance. Il s'agit d'un méta-aramide: le poly(m-phénylèneisophthalamide). Ce matériau, comme tout aramide, peut être utilisé dans des conditions extrêmes; sa faible combustibilité (autoextinguibilité) et sa thermostabilité font qu'il est considéré comme matériau de sécurité. Par exemple, le papier calandré à base de fibres aramide présentant d'excellentes propriétés électriques et mécaniques, une bonne flexibilité et une bonne résilience.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les principales propriétés des huiles et isolants solides utilisés dans l'appareillage électrique et plus particulièrement dans les transformateurs de puissance. Il apparaît que l'utilisation d'une huile isolante dans un transformateur de puissance ne peut être envisagée que si cette dernière remplit certains critères dont les principaux sont : une bonne tenue diélectrique, un faible facteur de pertes (ou de dissipation), un bon point d'écoulement (faible viscosité) pour assurer un bon transfert de chaleur, une bonne résistance au feu, une stabilité à l'oxydation et une faible tendance à la charge statique.

Les huiles esters se démarquent avec leur forte capacité à absorber l'humidité (haute solubilité de l'eau). La différence entre les esters synthétiques et les esters naturels se situe au niveau de leur stabilité à l'oxydation et de leur point d'écoulement. Les esters naturels qui

sont facilement biodégradables ont une faible tenue à l'oxydation et se figent à des températures beaucoup plus hautes. Les huiles silicones quant à elles, ont une très bonne stabilité à l'oxydation mais ne sont pas biodégradables.

Néanmoins, de nombreux problèmes récents, liés à la corrosivité des huiles minérales remettent en question leur règne et orientent peu à peu les constructeurs de transformateurs à se diriger vers les esters qui en plus de leurs bonnes propriétés, n'ont pas ce problème et sont moins nocives pour l'environnement et les hommes.

CHAPITRE 2

PHÉNOMÈNE DE PRÉCLAQUAGE ET DE CLAQUAGE DANS LES ISOLANTS LIQUIDES

2.1 Introduction

L'emploi simultané de techniques de mesure, de visualisation et d'enregistrement des phénomènes électriques et optiques ultrarapides, a permis de progresser dans l'identification et l'interprétation des différents mécanismes prenant naissance au sein des diélectriques liquides lorsque ceux-ci sont soumis à des champs électriques intenses. En effet, grâce à ces techniques, il est devenu possible de suivre les différentes étapes conduisant au claquage et d'établir que le claquage dans les liquides, dans une géométrie divergente (pointe – plan, par exemple) est généralement précédé par des phénomènes appelés “streamers” dont l'indice de réfraction est différent de celui du liquide environnant et dont la structure (arborescente) est similaire à celle observée dans les diélectriques solides et dans les gaz. Contrairement aux décharges dans les gaz, le terme streamer dans les diélectriques liquides inclut également d'autres structures de décharges comme la forme mono-canal. Les termes “streamer” et “leader” ont été utilisés dans le passé (avant les années 60 du siècle dernier) et certains auteurs les emploient à nouveau pour décrire les décharges dans les grands intervalles d'huile.

On distingue généralement deux phases dans le préclaquage: (i) une phase d'initiation correspondant à l'apparition d'une perturbation (de quelques μm de diamètre) caractérisée par un indice de réfraction différent de celui du liquide environnant, au voisinage de l'électrode acérée (dans un système d'électrodes pointe – plan, par exemple). L'instabilité à la surface de cette perturbation conduit à la génération de structures plus ou moins ramifiées: le streamer, et (ii) une phase de propagation du streamer vers l'électrode opposée dont l'issue est généralement fatale: l'arc [14, 15].

2.2 Phase de génération : génération d'un bulle de gaz

Il a été clairement établi et ce dans de nombreux liquides sous différents types de tensions (AC, DC ou impulsionnelle), que la perturbation observée dans la phase de génération est une bulle de gaz résultant d'un échauffement local du liquide [14-19]. Sa génération suit les premières impulsions de courants enregistrés lorsque la tension est augmentée progressivement. Chaque impulsion de courant résulterait d'une avalanche électronique en phase liquide [20, 21]. Dans le cyclohexane, en géométrie pointe – plan, sous tension continue et pour des pointes de rayon de courbure supérieur à $0,5 \mu\text{m}$, il a été démontré [20, 22] que pour un champ seuil de 7 MV/cm , avec une pointe cathode, des

impulsions de courant très brèves et très rapprochées prenaient naissance. Ce régime impulsionnel présente de nombreuses similitudes avec le régime de Trichel dans les gaz électronégatifs. Des résultats similaires ont été obtenus dans le propane, le n-pentane et le n-décane [21]. Ces impulsions de courant disparaissent quand le rayon de la pointe devient inférieur à $0,3 \mu\text{m}$ environ. Dans ce cas, le champ peut atteindre 20 MV/cm au niveau de la pointe sans avoir d'avalanches électroniques perceptibles. Notons que la génération de cette bulle de gaz est toujours la conséquence d'une injection de courant. L'atténuation d'un faisceau lumineux (rayon laser d'une dizaine de μm de diamètre) éclairant le voisinage de la pointe, avec un léger retard par rapport au signal du courant, en est la preuve. Aussi, en polarité positive, les deux signaux (courant et lumière) s'estompent au même instant alors qu'en polarité négative l'atténuation lumineuse persiste au-delà du retour à zéro du courant injecté, démontrant ainsi que la dynamique de la bulle n'est pas la même selon la polarité [19]. Notons que dans certains cas, il peut y avoir apparition d'une impulsion de courant non accompagné d'atténuation du faisceau lumineux émis par le laser. L'injection de courant n'entraîne donc pas forcément la création d'une bulle. Dans ce cas, il peut s'agir de phénomènes électrohydrodynamiques (EHD).

En admettant que toute l'énergie correspondant au premier pic de courant sert à la vaporisation du liquide, le volume de gaz (vapeur de liquide) calculé pour cette énergie est du même ordre que celui observé expérimentalement [23]. La pression électrique est généralement beaucoup plus élevée que la pression locale du gaz de sorte que l'expansion de la bulle est déterminée par les forces électriques.

2.2.1 Dynamique des bulles

La génération de bulles par des impulsions de courant constitue la première étape du phénomène de streamers. Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, lorsque la tension appliquée est supérieure à une certaine tension dite seuil de génération, une bulle de gaz résultant de l'injection d'une impulsion de courant de forme triangulaire, prend naissance. Une fois atteint son rayon maximum, cette bulle montre une série de cycles expansion/implosion avant de disparaître (Figure 2.1) [23-26].

L'étude de la dynamique d'expansion de la bulle est un problème complexe du fait de la présence de l'onde de choc qui comprime et met en mouvement le liquide derrière elle, ce qui induit une modification du champ de pression à l'interface. En ce qui concerne la phase

d'implosion qui lui fait suite, sa dynamique dépend pour beaucoup des caractéristiques du liquide (viscosité en particulier) et de l'énergie injectée. De plus, la bulle perd une grande partie de son énergie sous la forme d'une émission d'une onde de pression à la fin de chaque phase d'implosion, lorsque son volume est minimal. Quelle que soit la pression appliquée, la durée des rebonds (cycle expansion/implosion) d'une bulle augmente avec la température du liquide [26].

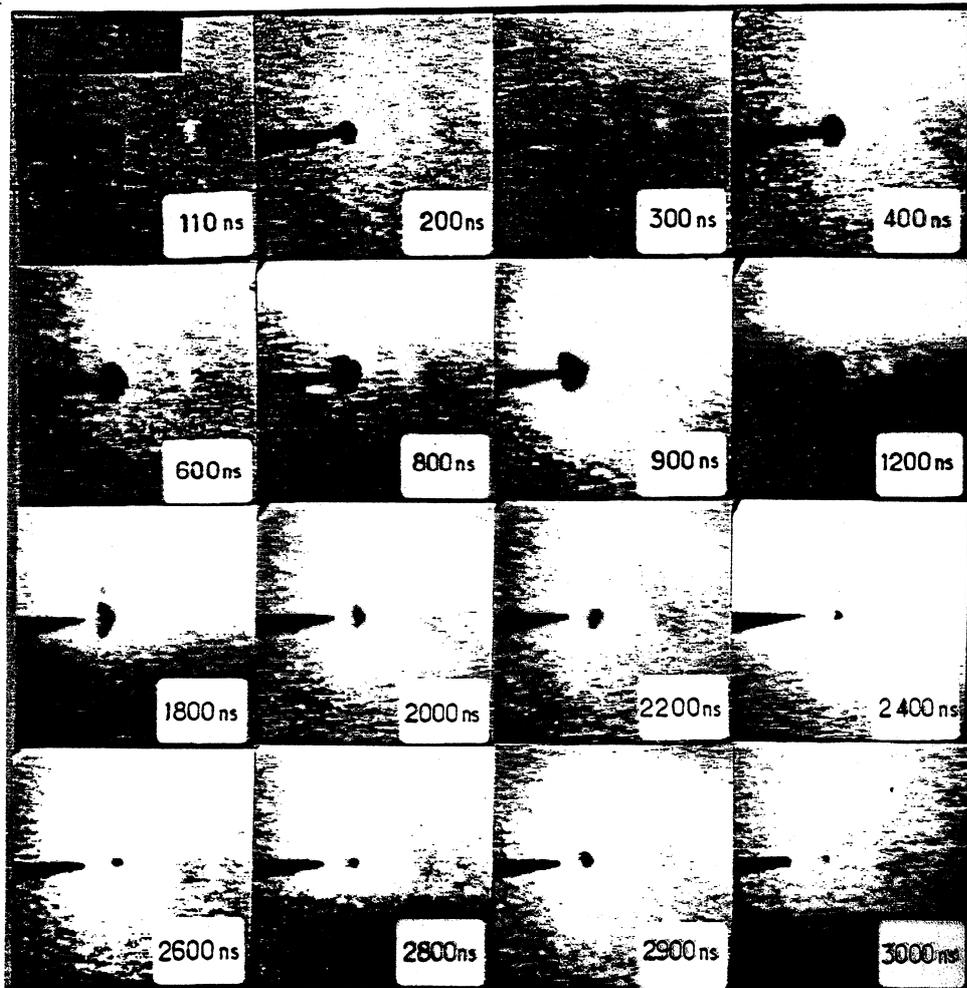


Figure 2.1: Visualisation de la dynamique de la bulle (expansion/implosion et rebondissements) en fonction du temps de retard à l'instant initial d'apparition de l'impulsion de courant. (Cyclohexane, $W = 5 \text{ nJ}$, $P_{\infty} = 1.3 \cdot 10^5 \text{ bar}$) [27].

L'un des modèles décrivant la dynamique de la bulle est celui de Rayleigh [28]. Ce modèle analyse la dynamique d'implosion d'une cavité sphérique contrôlée par l'inertie du liquide, supposé homogène, incompressible et de volume infini. Ce modèle néglige les

échanges de chaleur et de masse à l'interface. La bulle est soumise à la pression exercée par le liquide. Le rayon de la bulle est une fonction du temps. La contraction de la bulle entraîne la mise en mouvement du liquide. D'après Rayleigh, l'hypothèse de la bulle vide ne peut expliquer l'apparition des rebondissements suite à la première implosion. Il a trouvé nécessaire de tenir compte de la présence de gaz ou de vapeur qui empêcherait le rayon de la bulle de s'annuler et la vitesse de l'interface de devenir infiniment grande lorsque le rayon tend vers zéro.

La viscosité et la pression du liquide influence considérablement la dynamique de bulles. Plus la viscosité et la pression du liquide sont élevées, plus la durée des rebonds diminue [17, 29].

Le maintien de la tension à une valeur légèrement au dessus du seuil de génération peut donner naissance une série d'impulsions de courant très brèves accompagnée de l'apparition d'un chapelet de bulles (Figure 2.2).

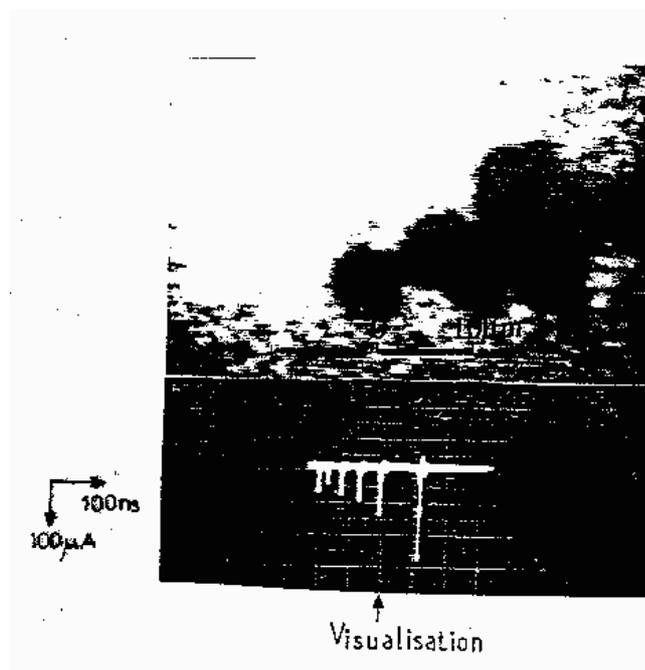


Figure 2.2 : Photographie d'un chapelet de bulles produit par un train d'impulsions de courant (cyclohexane, $U = -5$ kV; $P = 1$ bar) [25].

2.2.2 Paramètres influençant la tension de génération de streamers

Dans le cyclohexane pur, en géométrie pointe-plan, Beroual et al [30] ont observé que la tension de génération croît avec le rayon de courbure de la pointe (Figure 2.3) et qu'elle est

peu sensible à la distance inter électrode dans la gamme considérée ($0.5 \text{ mm} \leq d \leq 6 \text{ mm}$). Par ailleurs, le champ harmonique déterminé à partir de la tension de génération mesurée expérimentalement varie en r_p^{-n} ($1/2 < n \leq 2/3$).

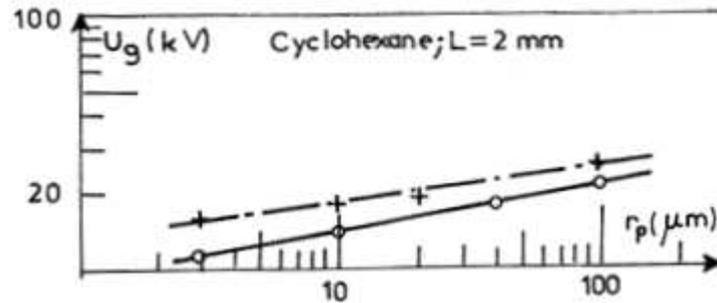


Figure 2.3: Tension de génération des streamers dans le cyclohexane en créneau de tension en fonction du rayon de courbure de la pointe en deux polarités : (+) pointe positive, (o) pointe négative [30].

Les tensions de génération en polarité positives sont généralement supérieures à celles obtenues en polarité négative. Ces tensions, peu sensibles à la variation de la distance inter-électrodes, augmentent linéairement avec la pression [19, 30-32].

L'addition de produits, à bas potentiel d'ionisation ou contenant des halogènes, aux liquides industriels augmente la tension de génération [14, 31].

Pour des pressions variables entre 1 et 15 bars, sous tension continue, les tensions de génération, pour les deux polarités, croient linéairement [14, 33].

2.3 Transition bulle - streamer

Lorsque la tension appliquée augmente bien au-delà de la tension seuil, le nombre et l'amplitude des impulsions de courant augmentent avec la tension [19, 20, 34]. 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 [35] ont démontré qu'après formation de la bulle gazeuse, les décharges partielles qui s'y développent, provoquent une augmentation de la pression conduisant ainsi au développement de la cavité. Aka et Beroual [36] ont proposé un modèle mathématique permettant de décrire de façon détaillé la transition bulle - streamers. Ils ont montré que selon les conditions expérimentales,

différents modes de déformation de l'interface de la bulle peuvent apparaître et selon ces modes, différents types de streamers (buissons, pagodes, filamenteuses ...) peuvent prendre naissance. L'apparition de ces modes dépend énormément des champs locaux aux différents sites de l'interface.

2.4 Propagation des streamers

2.4.1 Mécanisme de formation des streamers et leurs caractéristiques

Il se dégage des théories existantes, deux conceptions différentes concernant la nature et les processus de formation de streamers. La première est basée sur le phénomène d'ionisation en avalanche dans les liquides (comme dans les gaz) donnant lieu à une phase gazeuse ionisée. La deuxième est basée sur le phénomène d'ionisation en avalanche dans les bulles de gaz résultant d'une vaporisation locale du liquide.

Beroual [14, 31] 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. D'autre part, l'action d'additifs spécifiques (capteurs d'électrons et à bas potentiel d'ionisation), l'effet de la présence d'halogène dans la molécule du liquide sur les streamers, et l'analyse spectroscopique de la lumière émise par les streamers, indiquent que les processus électronique sont aussi présents.

Les streamers sont caractérisés par leur forme et leur vitesse. Ils sont accompagnés de courants, d'émission lumineuse et d'ondes de chocs. Ces caractéristiques dépendent de la composition chimique et des propriétés physiques du liquide (pur ou contenant de faibles concentrations d'additifs spécifiques), de la pression et de la température, de la géométrie des électrodes, de l'amplitude, de la polarité, et de la forme de la tension, des contaminants de l'air, de l'humidité, des particules et autres traces d'impuretés présentes. Il existe une corrélation étroite entre ces différentes caractéristiques [14, 37].

Notons que les mesures du champ électrique par effet Kerr montrent que les streamers sont conducteurs avec une chute de tension aux bornes du streamer <10% de la tension totale appliquée aux électrodes [38].

Les formes arborescentes des streamers sont généralement classées en lents et “buissonneux” pour les streamers émanant de l’électrode négative ou rapides et “filamentaires” avec un diamètre typique des filaments de l’ordre de 10 μm pour les streamers émanant de l’électrode positive [14]. Les streamers positifs sont souvent plus rapides que les streamers négatifs (environ 10 fois plus), à l’exception de l’huile de transformateur où les vitesses des streamers positifs et négatifs sont du même ordre. Cette classification selon la polarité a été remise en cause par Beroual [30, 31]. Il a montré en effet que dans les liquides contenant un halogène dans leur molécule, les streamers négatifs peuvent être également filamentaires et très rapides. Notons que certains auteurs classent les streamers positifs en plusieurs modes selon leurs vitesses de propagation ; ils distinguent généralement trois modes consécutifs: 1^{er}, 2^{ème} et 3^{ème} modes de propagation [38, 39].

Dans ce qui suit, nous allons décrire de façon synthétique, l’influence de divers paramètres sur certaines caractéristiques des streamers.

2.4.2 Courant et émission lumineuse accompagnant les streamers

L’amplitude et la forme des courants et des signaux lumineux associés aux streamers dépendent de plusieurs paramètres. En géométrie pointe – plan et pour de faibles intervalles (<5 cm), les courants et émissions lumineuses (signaux) des streamers lents du type “buisson” comportent des impulsions rapides, irrégulièrement espacées et dont le nombre et l’amplitude augmentent avec le temps de propagation des streamers et/ou la tension appliquée et/ou lorsque l’intervalle inter électrodes diminue, quelle que soit la polarité (Figure 2.4) [14]. Les courants et la lumière émise par les streamers filamentaires rapides présentent une composante continue sur laquelle se superposent d’autres impulsions, de fréquences plus régulières que celles relatives aux streamers lents [16, 40]. Quels soient la polarité et le liquide testé, le courant des streamers rapides est plus élevé que celui de streamers lents [14]. De façon générale, l’amplitude des courants et l’intensité de la lumière émise augmentent avec la vitesse de propagation des streamers et ce dans les deux polarités.

Pour les grandes distances inter électrodes (5 à 100 cm), les courants de streamers aussi bien positifs que négatifs, comportent des impulsions irrégulièrement espacées [40]. L’amplitude de ces impulsions peut atteindre quelques ampères. La forme du courant de streamers et du signal lumineux associée, sous la tension alternative, sont similaires à ceux observés sous tension impulsionnelle ou en créneau de tension [14].

Comme le courant, la charge électrique dépend de la forme et de la vitesse des streamers [14]. La charge totale des streamers rapides est plus élevée que celle des streamers lents. Plus l'énergie de streamer est élevée, plus sa vitesse est élevée.

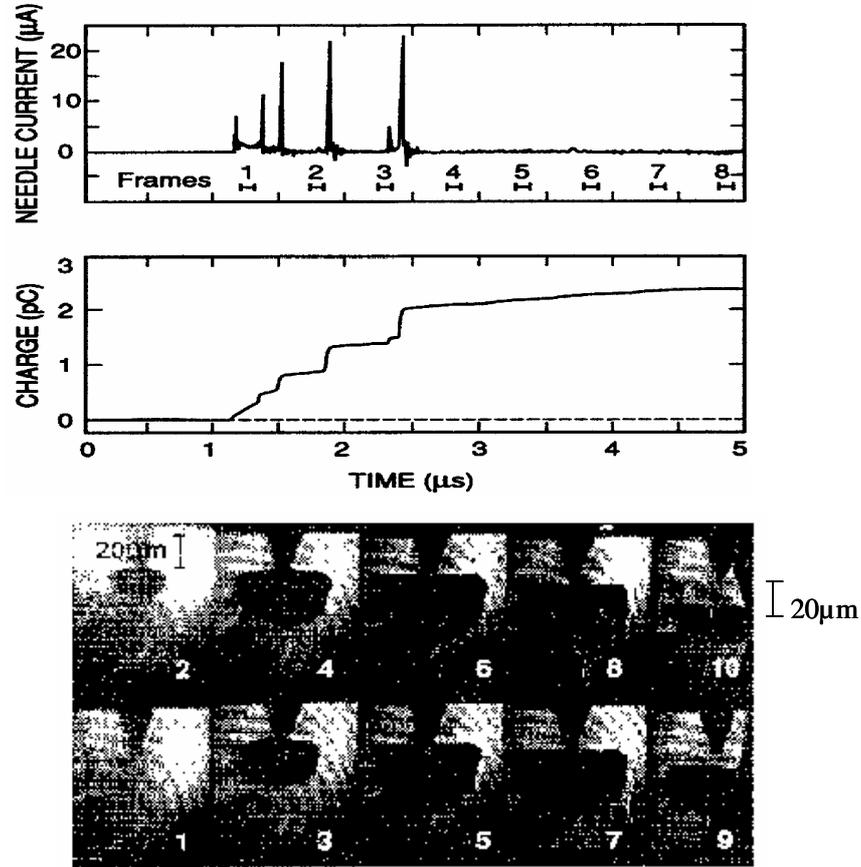


Figure 2.4 : Enregistrement simultané de l'évolution d'un streamer négatif dans l'hexane avec le courant et la charge correspondante. $U=15.5$ kV ; $d=3.2$ mm ; $r_p=1$ µm. L'intervalle entre images et le temps d'exposition sont respectivement de 512 et 102 ns [41].

2.4.3 Influence des propriétés du liquide

2.4.3.1 Influence de la viscosité et de la masse volumique

La viscosité des liquides n'a qu'une influence très limitée sur la vitesse de propagation des streamers [14, 42]. En effet, l'étude de quatre huiles silicones à savoir des polybutènes fluides – Napvis de viscosité variant de 90 à $4 \cdot 10^5$ cSt à -20°C , n'a montré qu'une très légère tendance à la décroissance de la vitesse des streamers lents, obtenus en polarité négative avec

une géométrie pointe – plan, lorsque la viscosité augmente. Des résultats comparables ont été également obtenus en polarité positive. Des résultats similaires ont été obtenus avec d'autres huiles silicones - des polydiméthylsiloxanes – dont la viscosité variait de 10 à 10⁴ cSt [43].

En ce qui concerne l'influence de la masse volumique, Sakamoto et Yamada [39] ont classé les liquides diélectriques en fonction de leur masse volumique et de la vitesse des streamers positifs. Beroual [31] avait démontré que cette classification n'est pas justifiée car dans les liquides halogénés, la vitesse des streamers positif et négatif est plus importante que celle obtenus dans liquides sans halogènes indépendamment de leurs masses moléculaires.

2.4.3.2 Influence de la structure moléculaire

La structure moléculaire a un effet significatif sur la propagation des streamers. Le principal paramètre affectant la propagation des streamers est l'affinité électronique des molécules du liquide [14]. 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 (où les streamers sont lents et en forme de buisson) [43]. Le streamer est plus filamenteux, donc plus rapide dans le chlorocyclohexane que dans les autres liquides exempt d'halogènes tels que le cyclohexane, le transdécahydronaphthalène et le cis-décahydronaphthalène [34].

Dans la plupart des hydrocarbures saturés (avec un rayon de courbure de l'électrode pointe >10 µm), le streamer négatif présente une structure en buisson alors que dans les liquides aromatiques purs (hydrocarbure non saturés), on observe une structure filamenteuse [14]. La longueur finale des streamers positifs dans les liquides contenant des liaisons doubles, est plus élevée que celle obtenue dans les liquides hydrocarbures linéaires et saturés [44]. L'influence de la longueur de la chaîne d'hydrocarbure du liquide a été étudiée sous un champ non uniforme dans les hydrocarbures linéaires par [45], il a été observé que la vitesse de propagation des streamers augmente avec la longueur de la chaîne d'hydrocarbure du liquide dans les deux polarités.

Pour les longs intervalles inter électrode, les streamer rapides dans les huiles esters synthétiques apparaissent à des tensions beaucoup plus faibles que pour les huiles minérales [46].

2.4.4 Influence de la pression

Il est connu depuis longtemps qu'une augmentation de la pression hydrostatique améliore de façon importante la rigidité diélectrique d'un liquide. L'influence de la pression sur la rigidité diélectrique diffère selon la polarité. Dans certains liquides, il semble qu'en polarité négative la tension de claquage augmente avec la pression, alors qu'en polarité positive la tension de claquage augmente relativement peu. Les processus gazeux dominent donc en polarité négative plus qu'en polarité positive. [33, 47-51].



Figure 2.5 : Streamer négatif dans le cyclohexane sous l'influence de la pression [51].

En effet, une pression de quelques bars peut faire disparaître le streamer (Figure 2.5). Cependant, il faut beaucoup plus de pression pour les streamers rapides filamenteux que pour les streamers lents en forme de buisson. Des effets similaires ont été également observés sur les courants associés aux streamers ; l'augmentation de la pression réduit la fréquence et l'amplitude des courants associés aux streamers. Au-dessus d'une pression seuil (ou pression de disparition) liée à l'énergie du streamer, les impulsions de courants et de lumière correspondants disparaissent. Aucun effet appréciable n'a été cependant relevé lorsque la pression est diminuée en dessous de la pression atmosphérique [14].

2.4.5 Influence de la température

Dans certains liquides, tels que le n-hexane et le cyclohexane, l'augmentation de la température a pour effet d'augmenter la vitesse de propagation des streamers rapides ou encore la probabilité d'apparition des streamers lents [52]. La vitesse des streamers positifs dans le cyclohexane passe de 1.9 à 3 km/s lorsque la température est élevée de 18 à 76°C alors qu'aucun changement dans la tension de génération n'a été relevé dans ce liquide. 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 [53].

En portant l'hexane jusqu'à une température proche de son point d'ébullition, McGrath et Nelson [54] n'ont observé pratiquement aucun effet sur les phénomènes de préclaquage. La vitesse des streamers positifs passe de 2.3 km/s à seulement 2.7 km/s lorsque la température varie de 5 à 42 °C, celle des streamers négatifs ne subit aucune variation.

2.4.6 Influence de la polarité

En géométrie pointe – plan, l'influence de la polarité se manifeste sur la génération, la forme et la vitesse de propagation des streamers (Figure 2.6).

✓ **Streamer positif** : lorsque la valeur du champ appliqué est modérée ($2 \text{ MV/cm} < E < 12 \text{ MV/cm}$), les streamers positifs primaires apparaissent en branches sous forme de "parapluie" [14]. Ils se propagent à une vitesse constante de l'ordre de 2 à 3 km/s. Aux champs très élevés, un streamer très filamentaire donc très rapide (plus 100 km/s), dit streamer positif de 3^{ème} mode peut être observé.

✓ **Streamer négatif** : les streamers prennent naissance à partir d'un champ à la pointe $E > 2.5 \text{ MV/cm}$ sous forme de buisson dont les branches (de diamètre de l'ordre de 30 à 70 μm) se propagent simultanément dans les directions axiale et latérale jusqu'à atteindre l'électrode opposée [14]. Aux valeurs de champ plus élevées, le streamer apparaît sous forme de buisson assez compact et se propage à une vitesse légèrement supérieure à celle des précédents. Lorsque le champ est très élevé, une seule branche (streamer monocanal) atteint l'électrode opposée à une vitesse pouvant dépasser les 100 km/s [14]. Par conséquent, on peut également avoir des streamers très rapides en polarité négative.

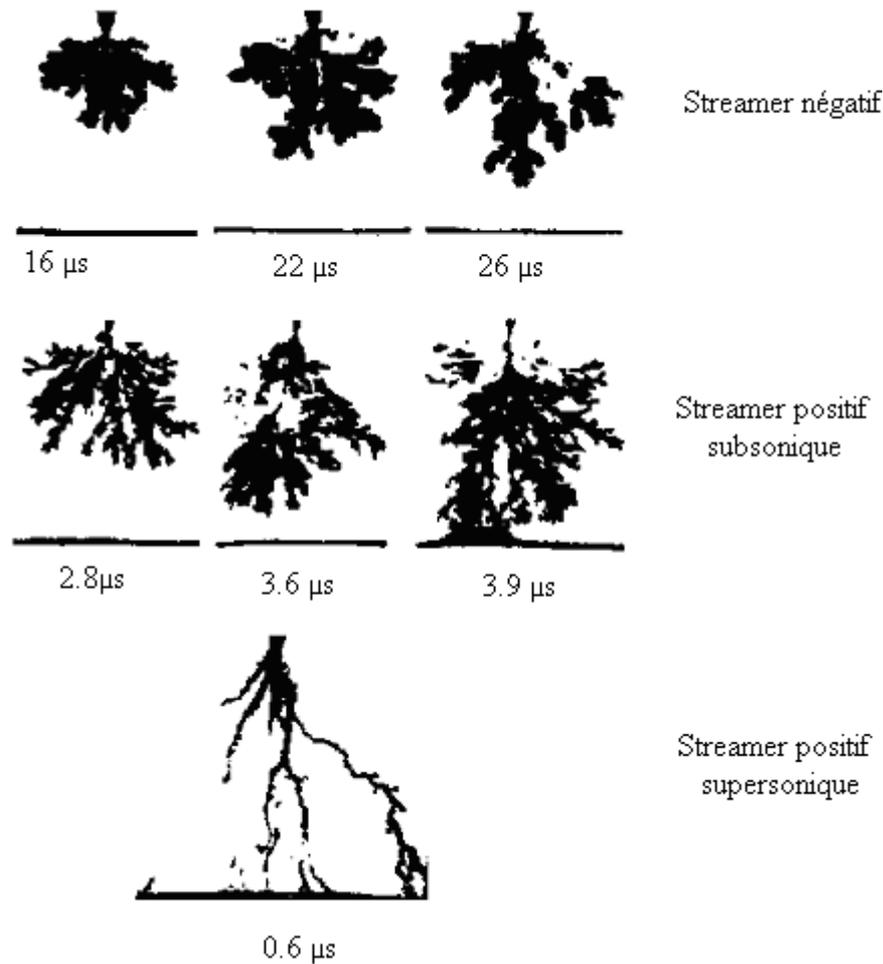


Figure 2.6 : Types de streamers usuellement observés dans le cyclohexane [34].

2.4.7 Influence de 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 – plane, 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 [14].

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 $E < 80$ kV/cm, le claquage du liquide est contrôlé par un streamer négatif [14].

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 [14, 34].

2.4.8 Influence des additives

La question de l'effet des additifs, en particulier les composés capteurs d'électrons et à bas potentiel d'ionisation, sur la propagation de streamers et sur la tenue diélectrique est capitale. Y a-t-il un lien entre la vitesse des streamers et la tension de claquage ?

✓ Additifs capteurs d'électrons

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 [3, 15, 18, 55]. Cette réduction peut être due à la diminution de la tension de génération des streamers ou à l'augmentation de leur vitesse. Ces composés ayant à la fois un bas potentiel d'ionisation et une grande affinité électronique, il est difficile de savoir la quelle des deux phases (génération ou propagation) est affectée par leur présence. Et c'est dans un travail de pionniers que Devins et al. [15] ont mis en lumière l'effet de chaque type d'additifs. Ils ont observé que l'addition de composés capteurs d'électrons tels que l'hexafluorure de soufre (SF_6) ou de chlorure d'éthylène à une huile naphthénique ou au 2, 2, 4 – triméthylpentane, rendait les streamers négatifs plus filamenteux et plus rapides. Aucun effet remarquable n'a été observé sur les streamers positifs.

En ajoutant 0.04 mol/l de tétrachlorure de carbone, CCl_4 , (composé capteur d'électron) au cyclohexane, Beroual [43] ont observé que les streamers négatifs devenaient plus filamenteux et plus rapides avec des vitesses pouvant être multipliées par un facteur 10, les pics de courant et de la lumière associés plus nombreux et intenses (Figure 2.7 et 2.8a). Il n'y a pas d'effet notable de ces additifs sur les streamers positifs dans les mêmes liquides.

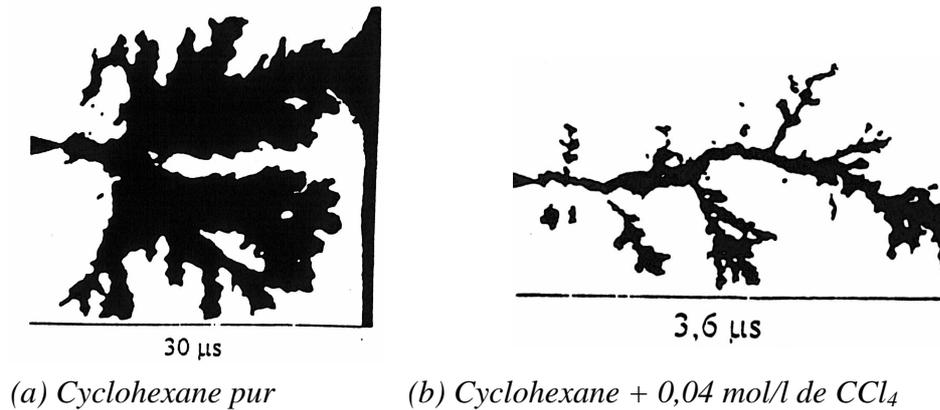


Figure 2.7. Influence des additifs sur la forme des streamers négatifs dans le cyclohexane, $U=50 \text{ kV}$; $L=2 \text{ mm}$; $r_p=3 \text{ mm}$ [43].

✓ **Additifs à bas potentiel d'ionisation**

L'ajout de faibles concentrations de composés à bas potentiel d'ionisation telle que la N, N'-diméthylaniline (DMA) accélère les streamers positifs dans l'huile naphénique (Marcol 70), la vitesse est multipliée par un facteur 2 à 3. Aucun effet n'est observé sur la vitesse des streamers négatifs [56]. Beroual [43] ont observé une légère augmentation de la vitesse de streamers négatifs et une multiplication par un facteur 3 de celle de streamers positifs, en ajoutant 0.05 mole/l de tetraméthyle paradiphénylamine (TMDP) au cyclohexane. Cependant, au dessus d'une concentration de 0.4 à 0.5 mole/l, aucune augmentation significative de la vitesse n'est observée. Un effet similaire est observé avec DMA (Figure 2.8b) [55].

L'effet des additifs capteurs d'électrons ou à bas potentiel d'ionisation montre bien l'implication des processus électroniques dans le mécanisme de propagation des streamers.

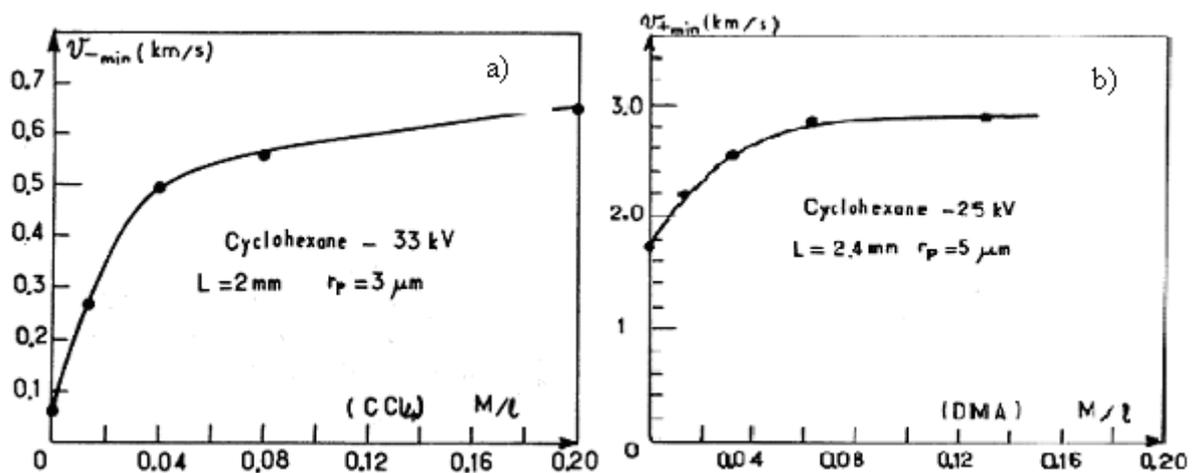


Figure 2.8 : Effet des additifs (a) capteurs d'électron (CCl_4) sur la vitesse des streamers négatifs et (b) à bas potentiel d'ionisation (DMA) sur la vitesse des streamers positifs [43].

2.4.9 Analyses spectrale et chromatographique

Les analyses spectroscopiques de la lumière émise par les streamers 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 [58-60].

Dans le cyclohexane, le mono- dibenzyle-toluène (M/DBT) et le phenylxyléthane (PXE), il a été observé une 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 M/DBT 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 [61].

2.5 Étude statistique de la tension de claquage

Pour envisager l'utilisation d'une huile végétale comme huile de substitution à une huile minérale ou synthétique, dans les matériels électriques (transformateurs de puissance en particulier), il est nécessaire de comparer ses caractéristiques à celle de l'huile minérale. Parmi celles-ci, la tension de claquage (ou tenue diélectrique) constitue un paramètre de première importance. Celle-ci est en générale mesurée selon des normes dans des géométries d'électrodes bien définies [62, 63].

La tension de claquage est une fonction des propriétés physicochimiques de l'huile et des impuretés qui peuvent y être présentes. Comme le claquage est un phénomène aléatoire [64, 65], il est nécessaire d'analyser la reproductibilité des mesures expérimentales sur un certain nombre de tests. Pour ce faire, on utilise diverses techniques statistiques [66-69]: distribution Normale, distribution selon Weibull ...

Par exemple, pour estimer la probabilité de 0,1% de la tension de claquage dans les huiles et les mélanges, C. Perrier et al. [70, 71] ont appliqué la distribution Normale. La distribution de Weibull a été également utilisée pour estimer la probabilité de 1% et 50% de la tension de claquage dans les huiles minérales, ester naturels et synthétiques [72-74].

2.5.1 Paramètres influençant la tension de claquage

2.5.1.1 Influence de l'humidité relative et des particules

L'eau constitue un danger potentiel pour les isolations. Elle peut intervenir soit à court terme (par son action directe ou indirecte), soit à long terme (en favorisant certains processus de dégradation). L'eau peut être présente dans l'huile sous forme dissoute ou en émulsion. La solubilité de l'eau dans l'huile dépend de la température, du type d'huile et de son degré de vieillissement. L'influence de l'eau sur la rigidité diélectrique de l'huile est très visible particulièrement pour des intervalles inter électrodes faibles (< 1 cm) dans un champ uniforme ou peu divergent. L'eau dissoute conduit à une diminution de la rigidité diélectrique. Lorsque l'eau est sous forme d'émulsion (humidité importante), la diminution de la rigidité est plus importante. En présence d'humidité ou d'impuretés hygroscopiques comme par exemple les fibres de cellulose (Figure 2.9), la rigidité diélectrique de l'huile diminue de manière très significative [75-77]. Dans ce cas, si l'intervalle inter électrodes est faible et le temps d'application de la tension long, le claquage de l'huile résultera de la formation d'un pont entre les électrodes.

Avec l'augmentation de l'espace inter électrodes, l'influence de l'humidité et des autres impuretés diminue. Lorsque l'intervalle inter électrodes est de quelques dizaines de centimètres, cette influence devient négligeable. L'influence de l'humidité et des autres impuretés est aussi faible si le temps d'application de la tension est court (cas des tensions impulsionnelles), même si l'intervalle est faible.

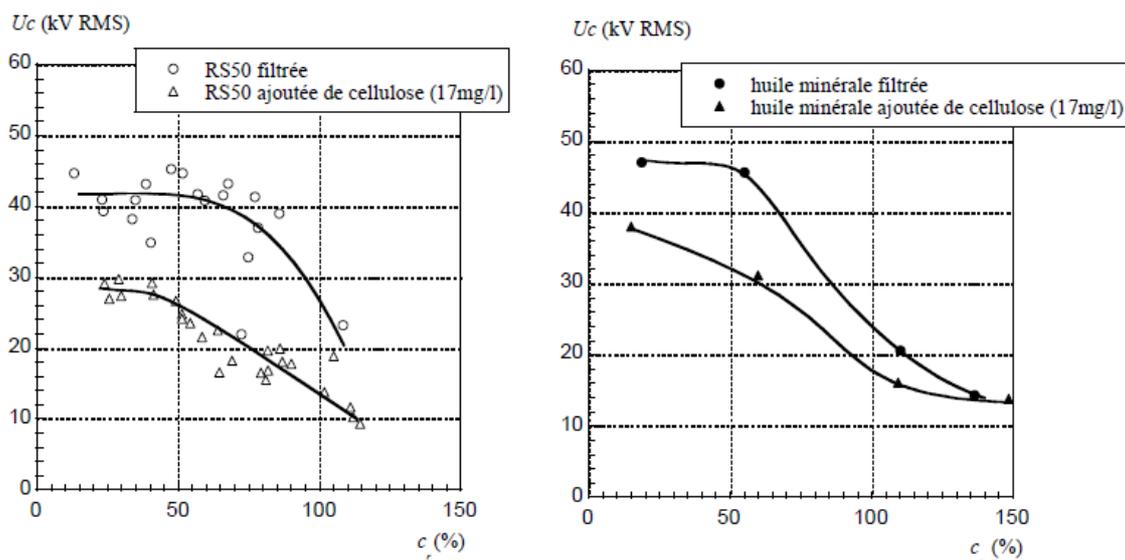


Figure 2.9: Tensions de claquage des huiles en fonction de la teneur en eau relative en présence ou non de particules de cellulose [76].

2.5.1.2 Influence du temps d'application de la tension

La tension de claquage d'huile diminue avec l'augmentation du temps d'application de la tension (Figure 2.10). Cette diminution est d'autant plus importante que la concentration des impuretés dans l'huile est grande. La diminution de la tension de claquage pour des temps >1 ms est liée à l'augmentation de l'influence des impuretés. Pour de tels temps, les particules impures se mettent en mouvement pour aller prendre place sur l'axe des électrodes qui présente le champ électrique maximum et former des ponts.

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

La tension de claquage d'une huile donnée diminue avec l'augmentation de l'intervalle inter électrode et le degré de non uniformité du champ. Pour un intervalle inter électrode donné, la tension de claquage diminue avec l'augmentation de la surface des électrodes (Figure 2.11). Les études ont montré que la tension de claquage de l'huile dépend du volume de l'huile sous contrainte [76, 78].

L'influence des dimensions sur la tension de claquage de l'huile est liée à l'existence d'impuretés dans l'espace inter électrode 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.

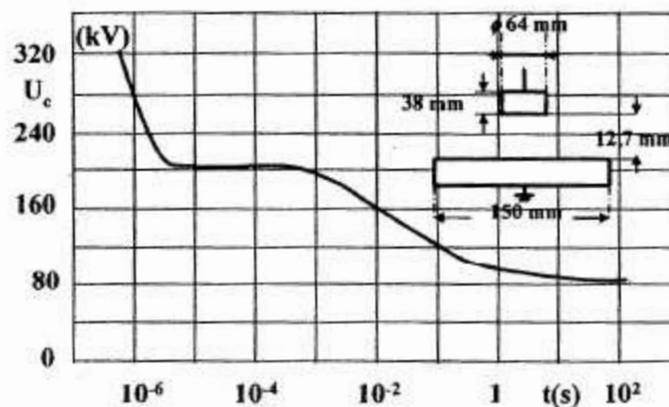


Figure 2.10: Variation de la tension de claquage de l'huile de transformateur en fonction du temps d'application de tension [4].

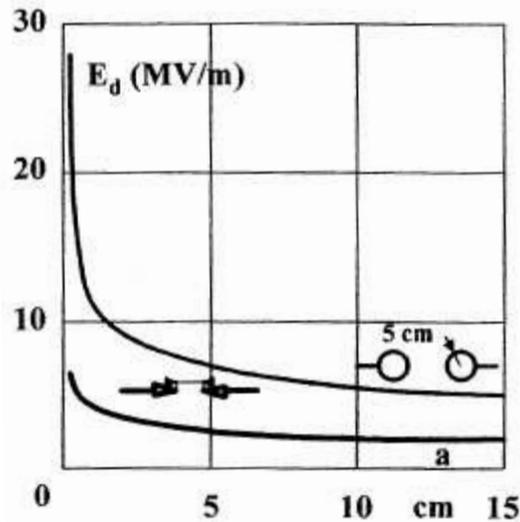


Figure 2.11: Variation de la tension de claquage de l'huile transformateur en fonction de l'intervalle inter électrode pour un système pointe – pointe et un système sphère – sphère [4].

2.5.1.4 Influence de la pression et de la température

La tension de claquage de l'huile, sèche et bien filtrée, ne dépend pas généralement de la température dans l'intervalle allant de 0°C - 80°C environ. Dans une huile pure mais humide, la dépendance de la tension de claquage dans l'intervalle 0°C - 80°C s'explique par la température permettant à l'eau, sous forme d'émulsions, de passer sous forme dissoute. Lorsque la température est $> 80^{\circ}\text{C}$, la diminution de la tension de claquage est liée à la vaporisation de l'eau et à la formation de bulles de gaz. L'augmentation de la tension de claquage à température $< 0^{\circ}\text{C}$ est liée à la viscosité de l'huile et au mouvement des particules de glace et des impuretés qui devient plus difficile en présence d'un champ électrique.

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

2.5.1.5 Influence des barrières isolantes et du revêtement d'électrodes

En champ divergent, la présence de barrières au voisinage immédiat de l'électrode acérée permet d'améliorer de façon significative la tension de claquage de la structure. De même, le recouvrement des électrodes (Figure 2.12) par une couche isolante ou un dépôt isolant permet de relever la tension de claquage [79, 80].

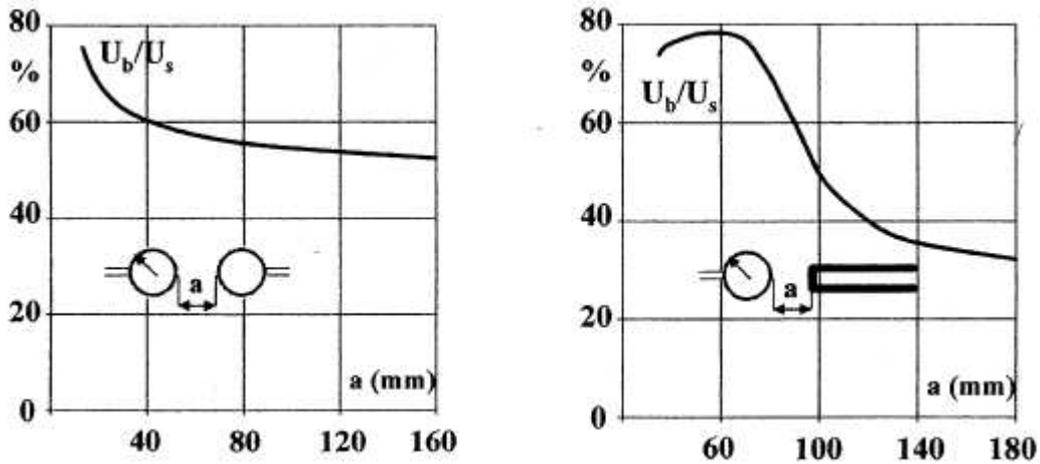


Figure 2.12: Influence du recouvrement des électrodes sur la tension de claquage de l'huile dans une géométrie : (a) sphère – sphère et (b) tige – sphère [4].

2.5.1.6 Influence du vieillissement

Après vieillissement, la tension de claquage de l'huile diminue [1, 81, 82] ; les huiles esters naturelles gardent généralement une bonne tension de claquage et deviennent pour certaines meilleures que les huiles minérales (Figure 2.13).

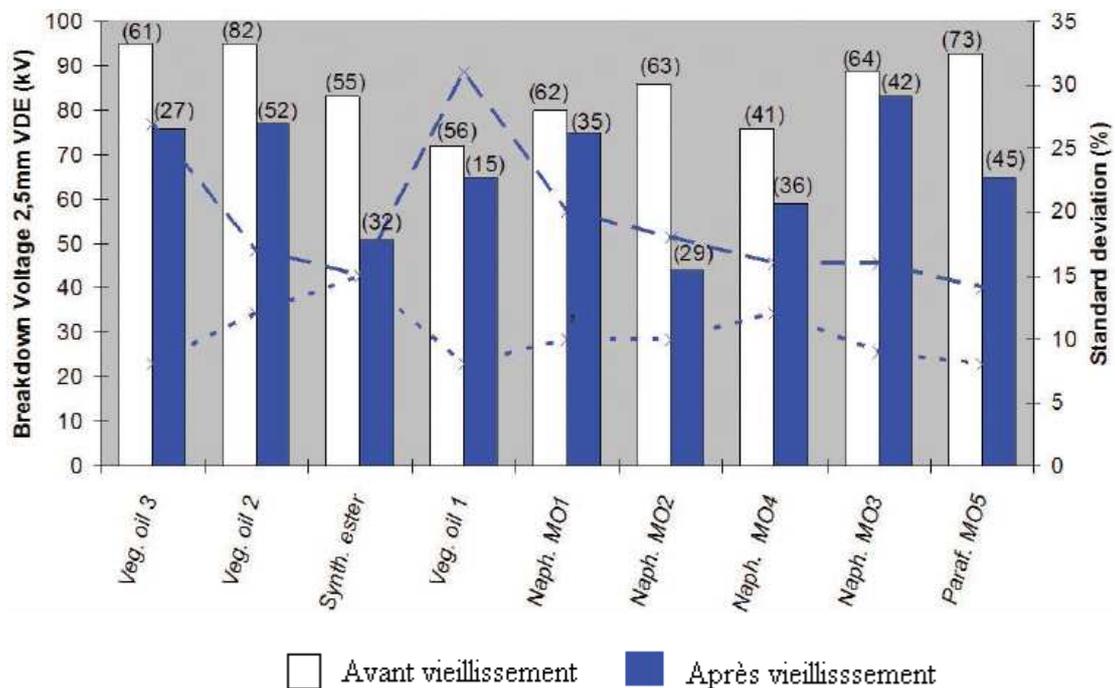


Figure 2.13: Évolution de la tension de claquage des huiles après vieillissement [1].

2.5.2 Application de la loi statistique pour l'étude de la tension de claquage

2.5.2.1 Test d'hypothèse

Un test d'hypothèse est un procédé d'inférence permettant de contrôler (accepter ou rejeter), à partir de l'étude de plusieurs échantillons aléatoires, la validité d'hypothèses relatives à une ou plusieurs populations.

Les méthodes de l'inférence statistique permettent de déterminer, avec une probabilité donnée, si les différences constatées au niveau des échantillons peuvent être imputables au hasard ou si elles sont suffisamment importantes pour signifier que les échantillons proviennent de populations vraisemblablement différentes [83].

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.

a) *Hypothèse nulle et hypothèse alternative*

L'hypothèse nulle notée H_0 est l'hypothèse que l'on désire contrôler. 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.

L'hypothèse alternative notée H_1 est la négation de H_0 ; elle est équivalente à dire " H_0 est fausse". La décision de rejeter H_0 signifie que H_1 est réalisée ou H_1 est vrai. Les différentes situations que l'on peut rencontrer dans le cadre des tests d'hypothèse sont résumées dans le tableau 2.1.

Le risque d'erreur de première espèce 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:

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

Tableau 2.1: Les différentes situations dans le cadre de test d'hypothèse

Décision \ Réalité	H_0 vraie	H_0 fausse (H_1 vraie)
<i>Non-rejet de H_0</i>	Correct $1-\alpha$	Manque de puissance Risque de seconde espèce β
<i>Rejet de H_0</i>	Rejet à tort Risque de première espèce α	Puissance de test $1-\beta$

b) Test de conformité

Les tests de conformité sont destinés à vérifier si un échantillon peut être considéré comme extrait d'une population donnée ou représentatif de cette population, vis-à-vis d'un paramètre comme la moyenne, la variance ou la fréquence observée (Figure 2.14). Ceci implique que la loi théorique du paramètre est connue au niveau de la population.

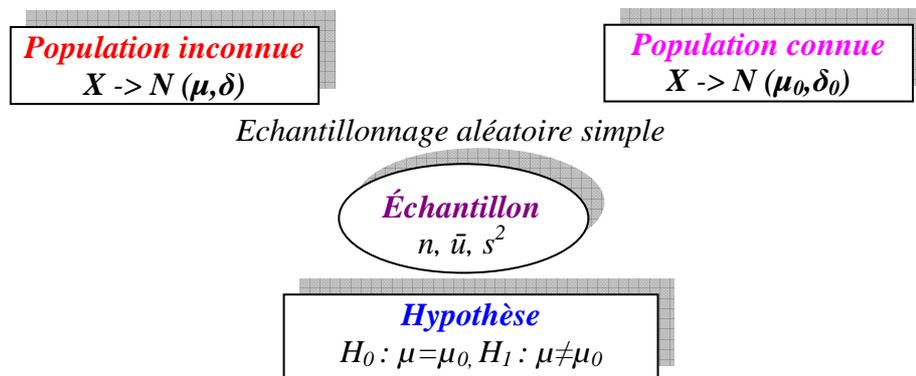


Figure 2.14: Test de conformité de comparaison d'une moyenne observée et d'une moyenne de la distribution Normale [83].

2.5.2.2 Application des distributions Normale et de Weibull dans l'étude statistique de la tension de claquage.

Les techniques statiques (test paramétrique et test non-paramétrique) ont été appliquées largement pour l'étude statistique de défaillances diélectriques [71-75, 84]. Un test paramétrique suppose que les valeurs de la tension de claquage pourraient suivre un modèle de distribution théorique et requiert un modèle à fortes contraintes (normalité des

distributions, égalité des variances). Par contre, le modèle d'un test non paramétrique ne précise pas les conditions que doivent remplir les paramètres de la population dont ont été extraits les échantillons. Pourtant, les tests paramétriques, quand leurs conditions sont remplies, sont plus puissants que les tests non paramétriques [85].

Nombreuses sont les lois de distribution paramétrique qui ont été appliquées et développées pour l'étude de la probabilité de la tension de claquage dans les matériaux diélectriques. Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi les deux distributions paramétriques Normale et de Weibull pour l'étude statistique de la tension de claquage. Elles sont les plus souvent utilisées.

a) *Histogramme et courbe cumulative*

Lorsque l'on réalise n mesures ($n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_k$) donnant chacune des tensions de claquage U ($U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_k$), on peut alors calculer la fréquence relative d'amorçage f_i :

$$f_i = \frac{n_i}{n} \text{ sachant que } \sum_{i=1}^k n_i = n \quad (2.2)$$

On peut ensuite tracer les fréquences f_i en fonction du rang i de leur classe et on obtient alors l'histogramme des tensions de claquage (Figure 2.15a)

Si l'on totalise les fréquences f_i jusqu'au rang i , on obtient la fréquence cumulée F_i (Figure 2.15b) avec :

$$F_i = \sum_{i=1}^i f_i \quad (2.3)$$

L'histogramme et la courbe cumulative des tensions de claquage sont des représentations empiriques de la densité de probabilité de claquage $p(U)$ et de sa fonction de répartition $P(U)$, avec :

$$P(U) = \int_0^U p(U) . du \quad (2.4)$$

Le tracé de ces courbes constitue la première étape pour émettre l'hypothèse que les échantillons testés suivent une loi de distribution (Figure 2.15).

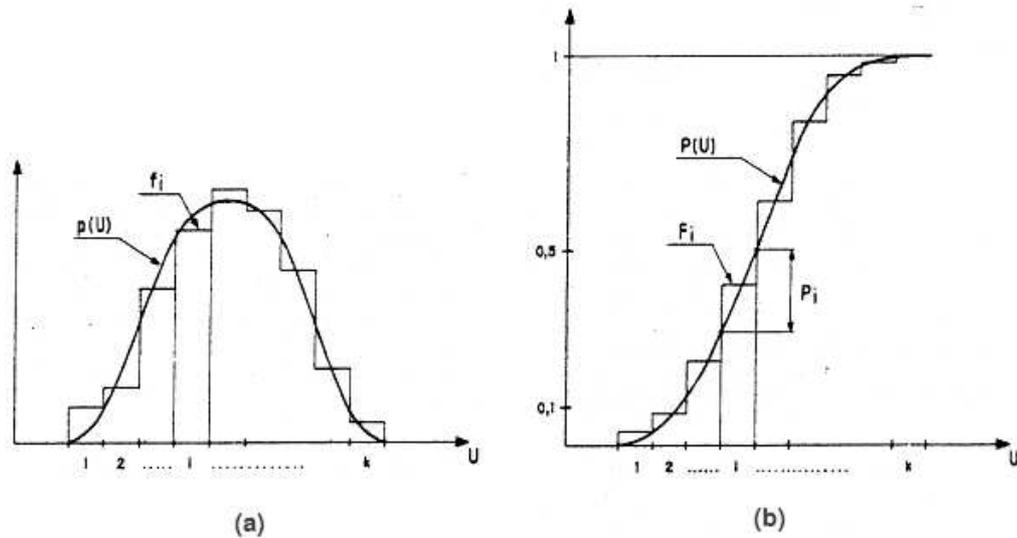


Figure 2.15: Histogrammes (a) et courbe cumulative (b), observées pour un échantillon idéal suivant une distribution normale [84].

b) Distribution Normale

La plus importante des distributions de probabilité est sans aucun doute la distribution Normale. La distribution Normale est une distribution symétrique en forme de cloche qui est modélisée mathématiquement. Une distribution Normale de la tension de claquage est exprimée par la relation suivante [84]:

$$p(U) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{U_i - U_M}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2.5)$$

et

$$P(U) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^U \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{U_i - U_M}{\sigma}\right)^2\right] .du \quad (2.6)$$

où U_i : Tension de claquage mesurée,
 U_M : Tension de claquage moyenne,
 σ : Écart-type de la tension de claquage.

- **Coefficient d'asymétrie:** On observe que les distributions des variables sont plus ou moins symétriques. Pour distinguer les asymétries dues aux fluctuations statistiques de celles

qui sont réelles, on mesure l'asymétrie de la distribution. Une des mesures les plus utilisées du coefficient d'asymétrie est le “*Skewness*”. Une distribution avec un coefficient d'asymétrie positif indique une longue queue vers la droite. Une distribution avec un coefficient d'asymétrie négatif signifie une longue queue vers la gauche. La distribution normale est symétrique et a donc une valeur du coefficient d'asymétrie égale à zéro.

- **Coefficient d'aplatissement:** Pour distinguer l'aplatissement dû aux fluctuations statistiques de celui qui est réel, on utilise un coefficient d'aplatissement de la distribution. Une des mesures les plus utilisées du coefficient d'aplatissement est le “*Kurtosis*”. 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.

c) Distribution de Weibull

La loi dite de Weibull (1951) est également très utilisée dans le domaine du claquage [66]. Grâce à sa flexibilité, la distribution de Weibull est souvent utilisée pour analyser la durée de vie. Elle a été établie au départ dans le domaine de la mécanique et est actuellement appliquée dans plusieurs domaines et particulièrement dans les défaillances des diélectriques quelle que soit la forme de la contrainte électrique appliquée (alternative, continue, impulsionnelle).

En effet, si à un instant t , une contrainte E est appliquée à un matériau donné, la probabilité de claquage F pendant l'intervalle de temps $t + \Delta t$ peut se mettre sous la forme:

$$F = \alpha \Delta t \quad (F \ll 1) \quad (2.7)$$

où α est la fréquence estimée de l'évènement.

La probabilité de non claquage sera dans le même intervalle de temps Δt :

$$P = 1 - F = 1 - \alpha \Delta t \quad (2.8)$$

Si l'on considère n intervalles de temps t_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), on aura:

$$P = \pi(1 - \alpha_i \Delta t_i) \quad (2.9)$$

où α_i étant la valeur moyenne de α dans l'intervalle Δt_i , d'où:

$$\ln P = \sum_i \ln(1 - \alpha_i \Delta t_i) = - \sum_i \alpha_i \Delta t_i \quad (2.10)$$

Si $\Delta t_i \rightarrow 0 \Rightarrow \ln P = - \int_0^t \alpha(t, E) dt \quad (2.11)$

$\Rightarrow P(t, E) = \exp \left[- \int_0^t \alpha(t, E) dt \right] \quad (2.12)$

Si on pose $\alpha = \alpha_0 t^n$ (α_0, n indépendants de t), on aura:

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \alpha_0 t^n dt \right] = \exp \left[- \frac{\alpha_0}{n+1} t^{n+1} \right] \quad (2.13)$$

qui peut s'écrire sous la forme:

$$P(t) = \exp(-At^a) \quad (2.14)$$

où $A = \frac{\alpha_0}{a}$ avec $a = n + 1$

$P = 1$ quand $t = 0$ ou $E = 0$ donc P est à la fois fonction de t et de E . Par conséquent P peut s'écrire sous la forme:

$$P(t, E) = \exp(-Ct^a E^b) \quad (2.15)$$

ou encore

$$P(t, E) = \exp \left[- \left(\frac{t}{t} \right)^a \left(\frac{E}{E} \right)^b \right] \quad (2.16)$$

où a, b et C sont des constantes

La probabilité de claquage sera alors:

$$F(t, E) = 1 - P(t, E) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{t} \right)^a \left(\frac{E}{E} \right)^b \right] \quad (2.17)$$

$F(t, E)$ est dite fonction de distribution de Weibull. La constante C est telle que

$$C = \frac{1}{E^b t^a}$$

soit

$$E^b t^a = \frac{1}{C} = \text{Conste} \quad (2.18)$$

Si l'isolant est soumis à une contrainte E , la probabilité de claquage après un temps t , sera:

$$F(t, E) = 1 - \frac{1}{e} = 0,632 = 63,2\% \quad (2.19)$$

Sur chaque courbe de Weibull, il existe donc un point caractéristique (t, E) correspondant à $F = 63,2 \%$.

Dans la pratique F est le rapport du nombre d'échantillons claqués au nombre total d'échantillons essayés ; ce qui donne la mesure de la probabilité de claquage cumulée. Sa représentation sous la forme développée est:

$$\log \left[\log \left(\frac{1}{1-P} \right) \right] = a \log t + b \log E + \log C \quad (2.20)$$

donne en coordonnées logarithmiques un tracé rectiligne. La dispersion des valeurs mesurées est alors donnée par la pente de la droite obtenue : $(a + b)$ quand la tension appliquée évolue en rampe (car $t = E/r$, ($r = \text{Conste}$)) et a quand la tension est fixée à une valeur constante (car $E = \text{Conste}$).

La dispersion des valeurs dans le cas des essais en rampe est généralement réduite (<10%). La pente de la droite ainsi obtenue est grande et b prend des valeurs élevées (> 1) qui dépendent de la nature du matériau et du mode opératoire.

Dans le cas des essais à tension constante (cas du vieillissement), la courbe "de vie" obéit, selon certains auteurs, à la relation empirique $E^n t = \text{Conste}$ avec $n = (b/a)$. La dispersion est donc généralement importante ($> 10 \%$). Le coefficient a qui caractérise cette dispersion prend des valeurs faibles. On distingue deux cas :

✓ $a > 1$, correspond à un vieillissement normal, c'est à dire à une fatigue initialement nulle et qui s'accroît avec le temps.

✓ $a < 1$, correspondrait à une "mortalité infantile" ou à des "défauts de jeunesse". La probabilité de claquage diminue dans ce cas avec le temps.

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.

Cette théorie constitue un élément utile dans l'étude du claquage. Elle a été bien vérifiée surtout dans le domaine des défaillances des câbles isolés au polyéthylène. Cependant, cette théorie, comme toute théorie probabilistique d'ailleurs, ne peut être suffisante pour expliquer les causes physiques réelles du claquage des matériaux.

2.6 Conclusion

Il ressort de cette analyse bibliographique, que les mécanismes de préclaquage et de claquage dans les diélectriques liquides sont complexes. Ils dépendent de plusieurs paramètres : la géométrie des électrodes (intervalle inter électrodes et rayon de courbure), la tension appliquée (forme, polarité, amplitude), structure du liquide (présence ou non d'halogènes dans la structure moléculaire), 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).

CHAPITRE 3

PHÉNOMÈNES DE DÉCHARGES AUX INTERFACES

LIQUIDE/SOLIDE

3.1 Introduction

Les systèmes d'isolation haute tension sont constitués le plus souvent de structures mixtes, combinant au moins deux phases : solide/liquide ou solide/gaz. C'est le cas par exemple de l'isolation à l'intérieur des transformateurs où les diélectriques solides sont associés aux huiles isolantes. Les isolants solides sont utilisés aussi bien pour l'isolation que pour la réalisation d'enveloppes d'appareillages haute et moyenne tensions auxquels cas, ils servent également de supports mécaniques (enveloppe de disjoncteur par exemple) [9].

Dans le cas des transformateurs de puissance, en plus de l'isolation des bobinages et des traversées, les solides servent comme panneaux (rôle mécanique) et comme barrière isolante en particulier dans les transformateurs cuirassés. L'isolation solide peut constituer une paroi perpendiculaire à la direction du champ électrique, se traduisant par une augmentation de la rigidité du système liquide/solide ou parallèle à la direction du champ électrique, auquel cas la rigidité du système liquide/solide peut être réduite par rapport à celle de chaque constituant liquide ou solide pris séparément. Et comme nous l'avons indiqué précédemment, les huiles jouant leurs rôles d'isolant et de caloporteur.

Durant leur exploitation, les équipements électriques dont font partie ces structures isolantes (solide/liquide) sont exposés à différentes contraintes: mécanique, thermique, électrique... Et c'est aux contraintes électriques que nous nous intéressons plus particulièrement. En présence d'un champ électrique, divers phénomènes peuvent prendre naissance dans le volume de ces matériaux ou en surface. En effet, selon les caractéristiques des deux constituants, solide et huile, des décharges volumiques ou surfaciques peuvent être générées et conduire à la destruction de la structure isolante (suite à un claquage de la structure isolante ou à un contournement de l'isolant solide) voire à la mise hors service du système. Ces décharges électriques sont initiées en des points ou des régions où le champ électrique est le plus intense : point triple, extrémités de bobinages, points de connexions ... 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.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux phénomènes apparaissant à l'interface solide/liquide. Nous décrivons de manière succincte les processus de distribution de charges aux interfaces, le phénomène de décharges surfaciques ainsi que les paramètres qui les caractérisent.

3.2 Structure et propriétés de l'interface liquide/solide

3.2.1 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 donné et celle du fluide une charge de signe opposé, en vertu du principe de l'électroneutralité. D'où le nom de la double couche électrique.

La distribution de la charge dans la double couche a été d'abord décrite par Helmholtz [86-88]. Dans ce modèle, cette distribution est identique à celle existante dans un condensateur plan dont les armatures sont soumises à une différence de potentiel (Figure 3.1 a).

La théorie de la double couche dans les liquides de faible conductivité a été améliorée par Gouy - Chapman [89]. Selon ce modèle (Figure 3.1 b), comme les ions créant la double couche de charges dans les liquides sont soumis au mouvement thermique, la distribution des charges dans le liquide a tendance à devenir homogène, en accord avec la distribution de Boltzman.

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 [90] 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 adsorbée sur la surface du solide. Cette couche est appelée "*sous couche ou couche compacte*". Elle est caractérisée par son épaisseur x_A qui, selon les auteurs, varie de 5 à 10 nm [91].

- 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, une double couche se forme et se stabilise de façon à ce que l'interface reste électriquement neutre sur l'épaisseur de cette couche. Cette couche joue un rôle fondamental

dans les phénomènes électrocinétiques susceptibles d'apparaître. Elle est définie comme le potentiel électrocinétique ou encore le potentiel zéta (ζ).

La tension entre l'électrode solide et le liquide est représentée par :

$$\Psi = \Phi + \zeta \quad (3.1)$$

où Ψ : Tension entre le solide et le liquide,
 Φ : Tension aux bornes de la sous-couche,
 ζ : Tension entre couche compacte et le liquide.

Stern a proposé l'existence d'une chute de potentiel linéaire, uniquement dans la couche compacte, caractérisée par la distance minimale x_A d'approche des ions de l'électrode. Les charges électriques se trouvant à cette distance de la surface de l'électrode sont adsorbées ; elles font partie de la couche compacte définie aussi comme la couche d'Helmholtz [86]. En dehors de cette couche, c'est-à-dire dans la couche diffuse, le potentiel décroît de manière exponentielle suivant l'équation de Poisson - Boltzman [92]:

$$\varphi(x) = \varphi_o \exp\left(-\frac{x}{L_D}\right) \quad (3.2)$$

où L_D :Longueur de Debye.

La distribution de charges et de potentiel à l'interface selon Stern est représentée dans la figure 3.2 a. Le potentiel électrocinétique ζ et le potentiel entre les deux phases Ψ dépendent de facteurs totalement différents. Sous l'action de certains paramètres, le potentiel ζ peut même changer de signe sans avoir d'influence sur le potentiel Ψ entre phases. Une telle situation est représentée par la figure 3.2b dans laquelle, suite à l'adsorption d'ions de signe opposé à celui de la surface, apparaît ce que l'on appelle "une couche surchargée".

Des travaux plus récents sur la double couche [89, 93, 94] ont montré qu'en tenant compte des forces d'images, on peut expliquer pourquoi les valeurs de potentiel ζ obtenues, sont plus petites pour les hydrocarbures non polaires de faible conductivité. Cependant, les charges accumulées sur la surface des solides, peuvent produire des champs électriques pour donner naissance à des décharges. Les charges dans la double couche sont très sensibles à l'action d'un champ électrique. Ces charges peuvent être déplacées sous l'effet d'un champ électrique et modifier la distribution du champ électrique initial.

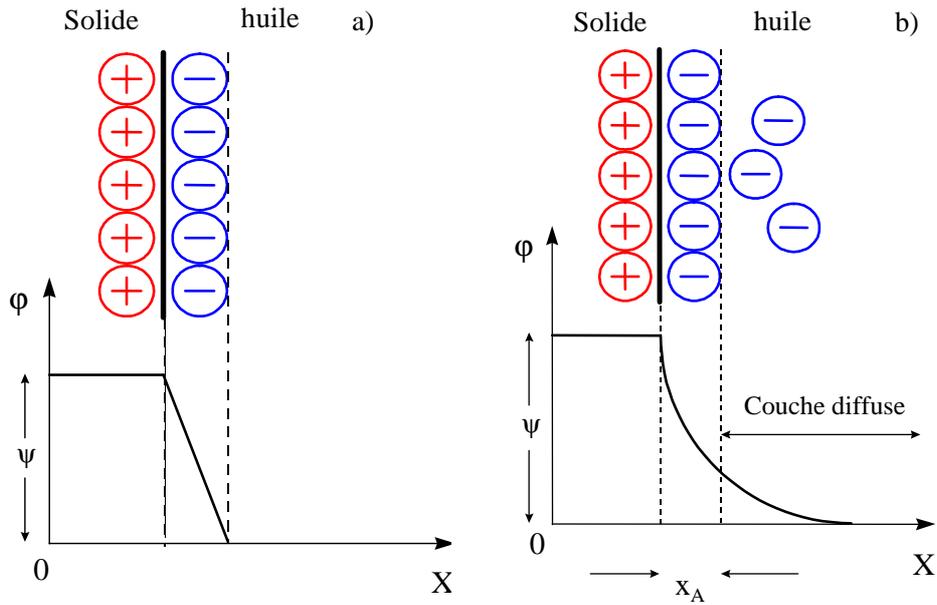


Figure 3.1: Schéma de la double couche selon le modèle de Helmholtz (a) et de Gouy - Chapman (b) [86, 89].

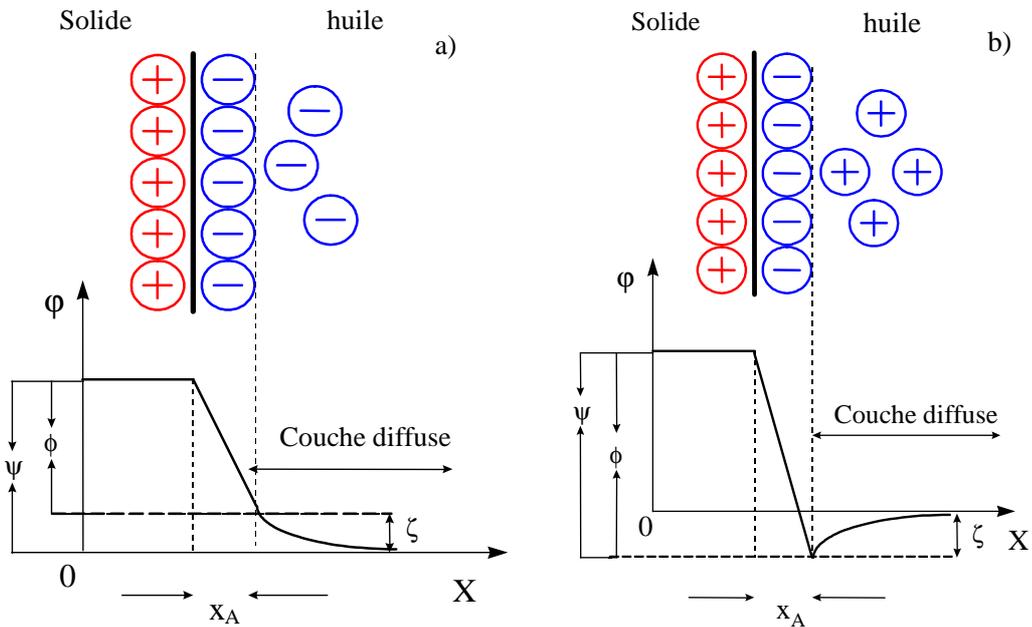


Figure 3.2: Schéma de la double couche (a) et de la double couche surchargée (b) selon le modèle de Stern [91].

La figure 3.3 donne le schéma de la distribution de potentiel dans la double couche tenant compte du potentiel électrocinétique ζ . La présence de charges à l'interface quelles que soient leurs origines peut perturber de façon très significative la distribution du champ électrique et par la même influencer les mécanismes de propagation des décharges.

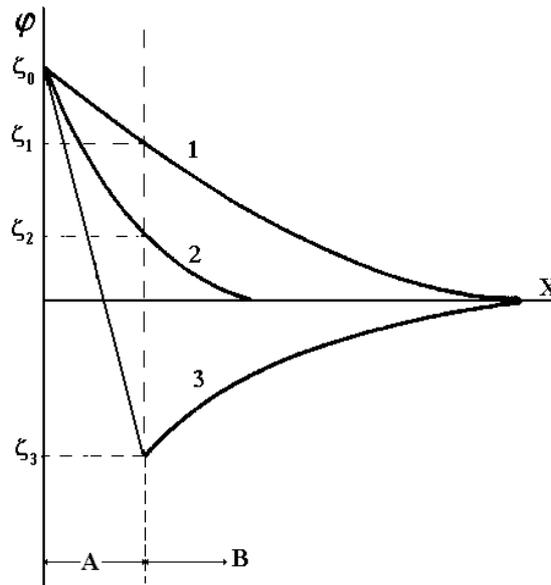


Figure 3.3 : Distribution du potentiel dans la double couche : 1 et 2 – pour différentes densités d’ions positifs adsorbés, 3 – dans la couche surchargée, A – couche de Helmholtz, B – couche de Gouy – Chapman [89].

3.2.2 Propriété du complexe l’huile /matériau cellulosique (carton)

Actuellement, une grande quantité de matériau cellulosique est utilisée sous forme de papiers ou de cartons dans les transformateurs. La structure mixte liquide/matériau cellulosique est l’élément clef de l’isolation électrique dans un transformateur. Elle permet d’isoler les fils de cuivre conducteurs entre eux. Les cartons imprégnés d’huile permettent de séparer mécaniquement les enroulements les uns des autres. Grâce à leur structure fibreuse, les cartons de transformateur sont poreux. L’un des rôles de l’huile est de remplir ces pores. Le matériau diélectrique résultant de la structure huile/matériau cellulosique, possède une constante diélectrique qui dépend de la densité du carton employé [95]. Notons que la constante diélectrique de l’huile est inférieure à celle du carton.

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 [10]. 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 (Figure 3.4). 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, ce qui entraîne une modification de la distribution du champ électrique initial.

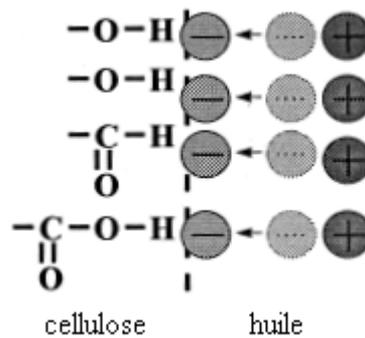


Figure 3.4 : Structure moléculaire à l'interface huile/carton.

La relation entre les champs électriques dans l'huile (E_{huile}) et le solide isolant (E_{solide}) et les constantes diélectriques de l'huile ϵ_{huile} et de l'isolant solide ϵ_{solide} est donnée par la relation (Figure 3.5) :

$$\frac{E_{huile}}{E_{solide}} = \frac{\epsilon_{solide}}{\epsilon_{huile}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (3.3)$$

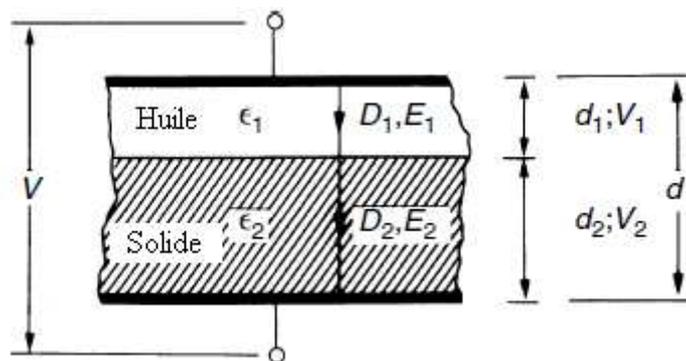


Figure 3.5 : Distribution de champ électrique dans une interface huile/solide [96].

La constante diélectrique du matériau cellulosique imprégné d'huile ε , peut être calculée par la relation [97] :

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{fibre}} \left[1 - K^2 \left(1 - \frac{1}{1 + K \left(\frac{\varepsilon_{\text{fibre}}}{\varepsilon_{\text{huile}}} - 1 \right)} \right) \right] \quad (3.4)$$

où

$$K = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{huile}}}{V_{\text{solide}}}},$$

$\varepsilon_{\text{fibre}}$: Permittivité de la fibre de cellulose.

Avec l'augmentation de l'utilisation des huiles esters dans les transformateurs, les recherches sur la combinaison entre les huiles esters et solide ont fait l'objectif de nombreux travaux [97-106].

Un des avantages à utiliser des huiles esters, réside dans le fait que les permittivités du carton et des huiles esters sont très proches ; le champ électrique dans la structure mixte sera réparti de façon plus homogène entre l'huile et le carton. Un autre avantage des huiles esters c'est celui de réduire la dégradation du matériau cellulosique du point de vue électrique. En étudiant la variation du facteur de dissipation relatif, qui est en fait le rapport entre $\tan\delta$ du papier non vieilli et $\tan\delta$ du papier vieilli, Fofana et al. [106] ont montré que l'isolation électrique du papier s'altérerait moins en présence d'esters. Ceci est lié au fait que les huiles de grande solubilité, telles que les esters, absorbent l'humidité du solide isolant, réduisant ainsi le vieillissement du matériau cellulosique dû à l'humidité.

3.3 Décharge à l'interface liquide/solide diélectrique

L'étude des décharges se propageant aux interfaces liquide/solide a fait l'objet de nombreux travaux [99, 107-113]. Celle-ci est d'une grande importance pour la conception et le dimensionnement des structures isolantes utilisées dans l'appareillage haute tension. En effet, la propagation de ces décharges peut conduire au contournement du système isolant et donc à la défaillance voire la mise hors circuit du composant ou du système dont il fait partie (Figure 3.6).

En se propageant, ces décharges peuvent creuser la surface du solide et laisser des traces telles des canaux ramifiés de faible diamètre rappelant les "figures de Lichtenberg" [114].

Ces canaux (ou sillons) apparaissent toujours du côté de l'électrode acérée, et sont plus marqués lorsque le champ électrique est perpendiculaire à la surface (Figure 3.7). Ces structures ou figures ont suscitées l'intérêt des physiciens, non seulement parce que la variété de leurs structures 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. La première étude de ce type de structures a été effectuée par Pederson [115] où des figures photographiques ont été utilisées pour l'étude des surtensions dans les lignes de transmission.

D'autres chercheurs ont par la suite utilisé cette approche fractale pour l'étude et la caractérisation des décharges surfaciques, et de nombreuses tentatives d'explication du phénomène de décharge on été avancés [107, 118]. Nous reviendrons plus loin sur la dimension fractale de ces décharges surfaciques. Notons que les décharges surfaciques ne laissent pas forcément des traces sur la surface du solide isolant, tout dépend de la nature du matériau et de la stabilité de sa surface.

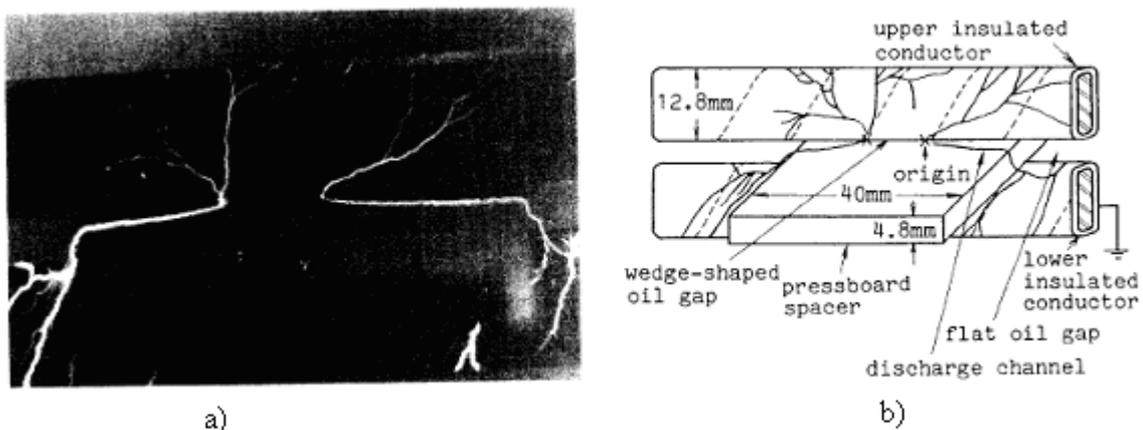


Figure 3.6 : a) Décharge électrique aux interfaces huile/solide des cales de transformateur, c) Schéma de la décharge et des cales [116].

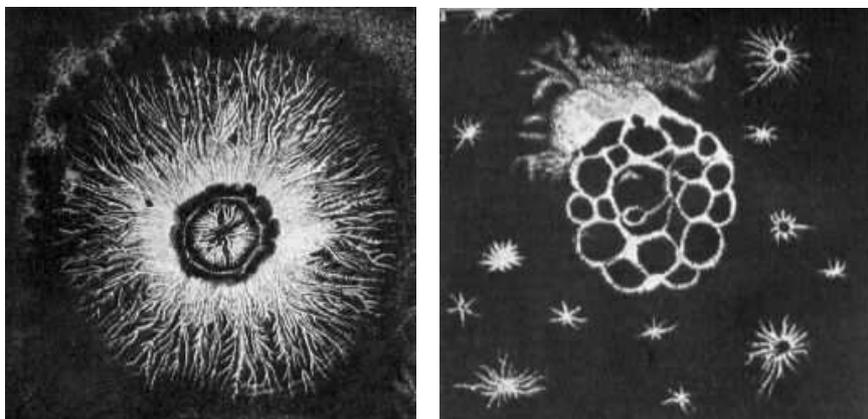


Figure 3.7 : Figures originales de Lichtenberg 1777 [114].

Le moyen le plus intéressant pour suivre le développement de ces décharges et de les caractériser, consiste à conjuguer mesures optiques et mesures électriques [34, 117-120]. Ainsi, en utilisant des caméras rapides, on peut observer la forme de ces décharges et mesurer leur vitesse (Figure 3.8); 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 [121]. On utilise aussi des caméras à balayage de fente (streak cameras) 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 [107, 108]. 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.

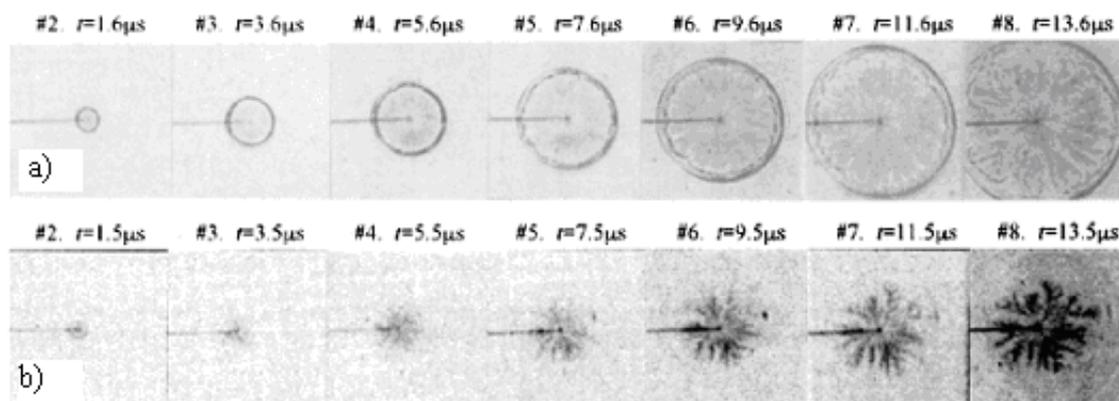


Figure 3.8 : Évolution temporelle des décharges glissantes obtenue par ombroscopie en (a) polarité positive et (b) négative [122].

3.4 Analyse fractale des décharges glissantes

La formation des branches constituant les différents types de décharges peut être gouverné par une loi universelle faiblement sensible aux détails physiques du phénomène [123]. Ce type d'universalité permet de simplifier la classification et la description du phénomène de la décharge. C'est dans les années 70 que Mandelbrot [124] a inventé la géométrie fractale pour désigner la forme des figures aléatoires et la forme des figures auto similaires. Et depuis, cette méthode est considérée comme étant l'une des meilleures descriptions des figures de décharges. En effet, les branches et les ramifications, apparemment désordonnées, peuvent être caractérisées et classées quantitativement par la géométrie fractale.

Dans un travail de pionniers, Sawada et al. [125] ont adopté le modèle stochastique pour décrire les structures ramifiées des décharges. Ils ont simulé le claquage diélectrique en attribuant de manière arbitraire un facteur de priorité à la tête des multiples canaux se propageant sur une surface. Ce facteur de priorité est défini comme le rapport entre la probabilité de propagation d'une tête de canal et la probabilité de génération d'une branche latérale. Ce facteur de priorité joue un rôle important dans la formation de ces structures ramifiées. L'un des handicaps de ce modèle est qu'il néglige l'effet du champ électrique local. Aussi, les structures obtenues ne ressemblent pas aux décharges électriques obtenues expérimentalement et le sens physique du modèle n'est pas clair.

Un autre modèle de rupture diélectrique, DBM (*Dielectric Breakdown Model*) a été proposé par Niemeyer, Pietronegro and Wiesmann (NPW) [126]. Ce modèle appelé aussi "modèle NPW", consiste à adopter une probabilité de progression des streamers en surface en introduisant la relation :

$$P(i, k \rightarrow i', k') = \frac{(\phi_{i',k'})^\eta}{\sum (\phi_{i',k'})^\eta} \quad (3.5)$$

(i, k) sont les indices des points appartenant à la décharge électrique (c'est-à-dire au potentiel $\Phi = 1$) et (i', k') sont les indices des points susceptibles d'être amorcés pour une branche de la décharge électrique. Le dénominateur représente tous les processus de progression possibles à partir d'un point donné de la décharge électrique. L'exposant η tient compte de la non homogénéité du système (liquide, solide ou polymère). Ils considèrent que la relation entre la probabilité de progression et le champ électrique local est mieux décrite par

une fonction non linéaire [126]. Dans la simulation des décharges à deux dimensions, quand $\eta = 0$, la probabilité P ne dépend pas du champ électrique local ; la progression de la décharge est homogène et remplit tout l'espace dans lequel elle évolue et sa dimension fractale est $D=2$.

Partant du modèle NPW, Vicente et al. [127] ont développé un modèle où le processus de progression de la décharge électrique évolue à partir de la tête de chaque branche. Dans un modèle à maillage carré avec des branchements en diagonal, la tête de chaque branche peut amorcer les points environnants ainsi que les points se situant en diagonale. La même probabilité de progression que dans le modèle NPW a été associée.

Aussi, partant du modèle NPW, Wiesmann et Zeller [128] ont généralisé ce modèle en le développant dans deux directions : (1) en introduisant le champ électrique critique de progression E_c ; et (2) en tenant compte d'un champ E_s interne dans la structure de la décharge électrique. Les points susceptibles d'être connectés lors de la progression de la décharge électrique sont tels que définis par le modèle NPW, en plus des points situés en diagonale.

La plupart des travaux publiés sur le caractère fractal des décharges surfaciques, reposent sur la morphologie des décharges obtenues par simulations numériques (calcul purement informatique) et non sur l'analyse directe d'arborescences de décharges observées expérimentalement. C'est à Kebbabi et Beroual [129] que revient le mérite de montrer pour la première fois, en partant de décharges glissantes observées expérimentalement, que celles-ci présentaient une dimension fractale. Ils ont démontré que cette dimension fractale D était intimement liée aux propriétés physiques et géométriques des constituants de l'interface : D augmente lorsque l'épaisseur du solide diminue et/ou sa permittivité diélectrique augmente et/ou que la pression hydrostatique diminue.

Aussi, Kebbabi et Beroual [129] ont montré que la méthode de quadrillage (box counting method) est la plus adaptée pour les décharges radiales surfaciques (Figure 3.9). Dans le chapitre 7, nous analyserons la dimension fractale des décharges glissantes observées aux interfaces carton/huile en considérant différents types d'huiles, en utilisant la méthode de quadrillage.

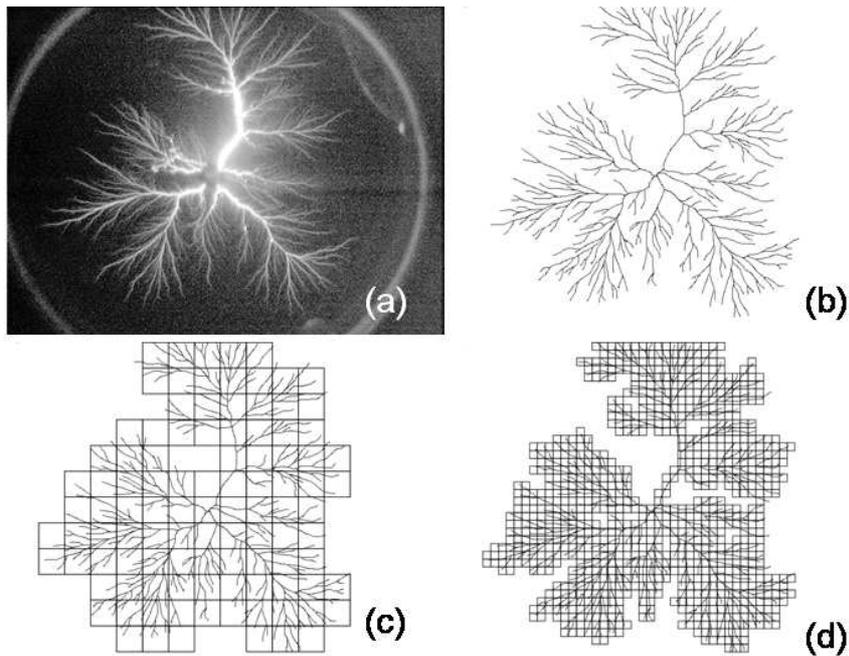


Figure 3.9 : Application de la méthode de quadrillage (box counting method) : (a) image de la décharge originale, (b) image binaire extraite, (c) image binaire couverte par des carrés de coté $l = 40$ pixels et (d) image binaire couverte par des carrés de coté $l = 10$ pixels [129].

3.5 Conclusion

Il ressort de cette analyse bibliographique, quoique très synthétique, que la génération des décharges glissantes est très complexe et que leur structure dépend de plusieurs paramètres. Le champ électrique et les propriétés des matériaux constituant l'interface solide/liquide, jouent un rôle essentiel dans leur développement. L'analyse directe de la structure des décharges surfaciques montre qu'elles peuvent être décrites par une approche fractale dont la dimension dépend des propriétés des constituants de l'interface et des conditions expérimentales.

PARTIE II

CHAPITRE 4

ÉTUDE DE LA GÉNÉRATION DES STREAMERS DANS LES HUILES VÉGÉTALES, MINÉRALES ET SYNTHÉTIQUES

4.1 Introduction

Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre 2, l'étude de la phase de génération permet de progresser dans la compréhension des processus fondamentaux conduisant au claquage, puisque c'est de cette phase que vont dépendre les événements ultérieurs. Les mécanismes responsables de la phase de génération des streamers sont complexes vu la multitude de paramètres qui y sont impliqués. La génération dépend en effet des propriétés du liquide (conductivité, permittivité diélectrique, structure moléculaire, viscosité ...) et des conditions expérimentales (pression, température, géométrie, polarité du champ, forme, amplitude et polarité de la tension appliquée...) [14, 20, 29-31].

L'étude de la génération des streamers se fait le plus souvent, comme pour les arborescences dans les isolants solides, avec des géométries d'électrodes divergentes. De telles géométries, permettent de suivre l'apparition et le développement de tout phénomène au voisinage de l'électrode acérée, c'est-à-dire celle où le champ électrique est le plus intense. C'est pourquoi, la géométrie pointe – plan est la plus communément utilisée [18, 32], elle permet également d'étudier l'influence de la polarité de la tension. Dans le cas d'un champ uniforme (le champ est partout le même dans l'intervalle inter électrodes et égal au champ moyen), le streamer, une fois généré, conduit immédiatement au claquage. Il est donc difficile de distinguer la phase de génération de la phase de propagation, d'autant plus que ces phénomènes sont ultrarapides.

De nombreuses méthodes et techniques sont utilisées pour détecter et caractériser la génération des streamers [23, 130-133]. Le plus souvent, on conjugue des techniques optiques à des mesures électriques pour déterminer la tension de génération. Les techniques optiques sont basées sur la variation de l'indice de réfraction du milieu liquide. Ainsi, en éclairant la zone proche de l'électrode pointe (là où le champ électrique est le plus intense) d'un intervalle de diélectrique liquide en géométrie pointe – plan, l'apparition d'une perturbation (bulle de gaz) se traduit par un changement d'indice de réfraction. Ce changement peut être observé soit sur l'atténuation d'un faisceau laser très fin (une dizaine de micromètres de diamètre) focalisé sur le voisinage de l'électrode pointe auquel cas le changement d'indice de réfraction est détecté par une photodiode placée de l'autre côté de l'intervalle inter électrode par rapport au laser, soit par ombroscopie en plaçant une caméra vidéo (à la place de la photodiode), la source de lumière pouvant être un laser ou un éclair de durée très brève (flash) [132, 133]. Une sonde de courant, placée en série avec l'électrode mise à la masse (une résistance pure,

par exemple) ou du côté haute tension (sonde optique utilisant des LED – diode émettrice de lumière) mesure simultanément les courants associés. Ainsi, on peut suivre la génération et l'évolution de la bulle de gaz ainsi que sa transition vers un streamer. Une autre méthode consiste à détecter la lumière émise et à mesurer simultanément le courant. L'injection d'une impulsion de courant de quelques nJ suivie d'une impulsion de lumière (avec un très léger retard) est significative de l'apparition d'une bulle de gaz. Dans ce cas, le signal lumineux est détecté par un tube photomultiplicateur. L'apparition d'un signal lumineux non accompagné d'un signal de courant, est révélatrice de la présence d'espèces ou d'impuretés fluorescentes (anthracène, par exemple). À l'inverse, la détection d'une impulsion de courant non suivie d'une émission lumineuse correspondrait à des phénomènes électrohydrodynamiques (EHD) [19].

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord les différents éléments du dispositif expérimental utilisés dans nos essais, puis les résultats expérimentaux relatifs à la mesure de la tension de génération dans les différents types d'huiles isolantes : minérales, esters naturels et synthétiques.

4.2 Techniques expérimentales

Le dispositif expérimental utilisé est constitué d'une cellule d'essais comportant un système d'électrodes pointe-plan, un générateur de tension continu, un diviseur de tension, des systèmes de visualisation, de détection des phénomènes générés dans l'intervalle inter électrodes et de mesures de signaux électriques qui leurs sont associés.

4.2.1 Cellule d'essai

La cellule d'essai est construite dans un corps en Téflon avec une contenance d'environ 2 cm^3 . Elle est conçue de manière à tenir des pressions d'une trentaine de bars (3 MPa). La figure 4.1 donne une vue schématique de la cellule. Le système d'électrodes utilisé est le système pointe – plan. L'électrode pointe est en tungstène thorié à 2%. Le tungstène avec son point de fusion élevé (environ $3460 \text{ }^\circ\text{C}$), nous permet d'effectuer un grand nombre d'essais en érodant le moins possible la pointe et d'avoir par conséquent un champ local à la pointe le plus constant possible. Les pointes usinées sont régulières et leur rayon de courbure est de $35 \text{ }\mu\text{m}$. Il faut cependant garder à l'esprit que cette valeur est susceptible de varier légèrement

avec la succession des essais (usure de la pointe). Un contrôle régulier au microscope de type Nikon éclipse LV150 permet de vérifier le rayon de courbure de la pointe. Celle-ci est remplacée dès que son profil devient différent de celui de départ. L'électrode plane est en acier inoxydable, son diamètre est de 14 mm. Deux hublots en quartz de 5 mm d'épaisseur et de 15 mm de diamètre, disposés de chaque côté de la cellule, permettent de visualiser les phénomènes générés entre les deux électrodes. Deux orifices, situés en haut et en bas de la cellule, permettent le remplissage et la vidange de la cellule. L'intervalle inter électrodes est pris égal à 2 mm.

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 80°C pendant plusieurs heures afin d'éliminer toute trace d'humidité.

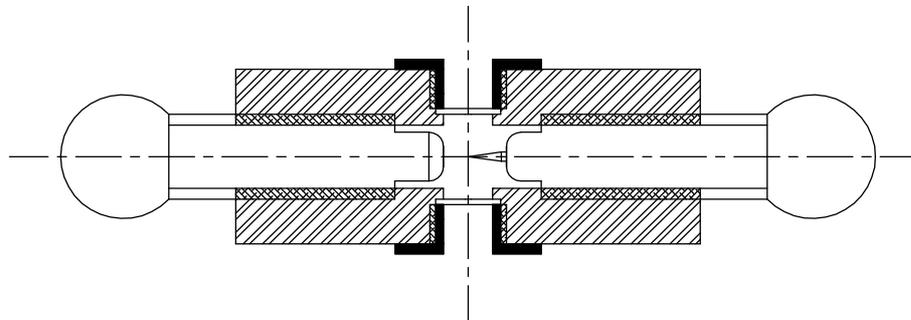


Figure 4.1 : Vue schématique de la cellule d'essai.

4.2.2 Générateur de tension

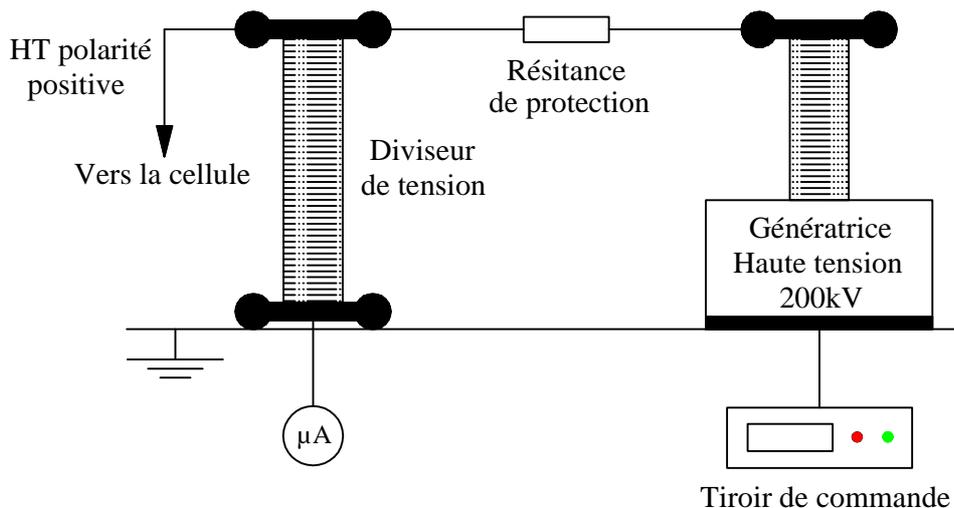


Figure 4.2 : Schéma de la génératrice haute tension.

La source de tension est une génératrice à courant continu (SPELLMAN High Voltage DC Supply, Input : 220 VAC, Output : 0 – 200 kV/ 2 mA) délivrant une tension réglable de 0 à 200 kV. La mesure de la tension s'effectue au moyen d'un diviseur. Dans la plupart de nos essais, nous nous sommes servis du diviseur comme une résistance pure (non inductive), la tension est mesurée au travers de cette résistance (2 G Ω , 100 μ A correspondent donc à 220 kV) en utilisant un microampèremètre (μ A) connecté en série (Figure 4.2).

4.2.3 Mesure du courant

La mesure des courants s'effectue à travers la mesure de la tension aux bornes d'une résistance non inductive de 50 Ω connectée en série avec la cellule et placée du côté basse tension, grâce à un oscilloscope numérique à mémoire, de haute solution temporelle de type Agilent MSO 6104A (1GHz, 4G échantillons/s). Deux diodes Zener, montées tête bêche en parallèle avec la résistance, ainsi qu'un éclateur protègent l'entrée de l'oscilloscope contre les surtensions ou les surintensités (Figure 4.3).

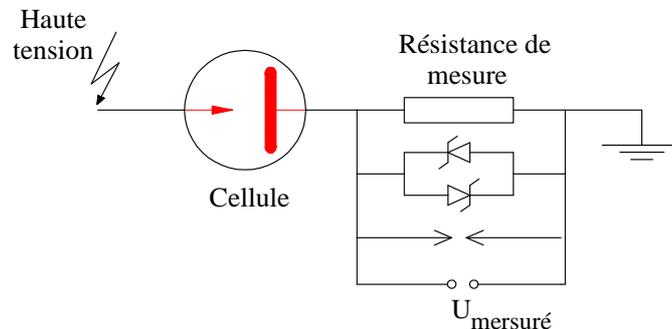


Figure 4.3 : Schéma électrique destiné à la mesure du courant.

4.2.4 Détection des bulles

Le principe de la détection des bulles générées (région de faible densité par rapport à celle du diélectrique liquide environnant) dans le voisinage de la pointe (Figure 4.4) est basé sur la variation de l'indice de réfraction du milieu, accompagnant toute perturbation.

Un signal lumineux émis par un faisceau (environ 20 μ m de diamètre) laser (He – Ne, 3mW Max output, 670 nm, Class 3A LASER Product) éclaire la pointe et son voisinage. Toute variation d'indice de réfraction du milieu se traduit par une atténuation du signal

lumineux que détecte une photodiode (Photodiode PIN BPX65 CENTRONIC) alimentée par une source indépendante (batterie de ± 12 V).

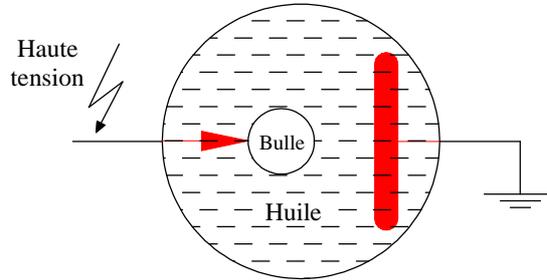


Figure 4.4 : Schéma d'une bulle immergée dans l'huile en champ électrique divergent (géométrie pointe – plan).

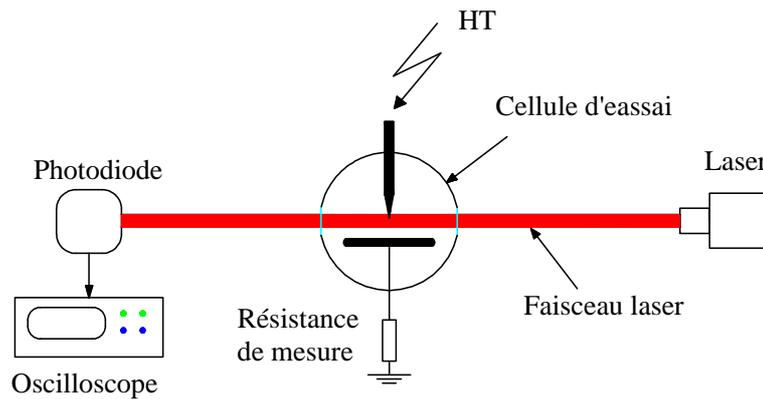


Figure 4.5 : Schéma de principe du dispositif de détection des bulles.

L'ensemble du dispositif est installé sur un banc optique (Figure 4.5). La détection s'effectue selon le schéma de la figure 4.6. En l'absence de tout signal lumineux, la photodiode voit le noir total. Lorsqu'elle est illuminée, la photodiode capte le maximum du signal émis par le laser, tant qu'aucune perturbation n'est générée dans la zone éclairée. À chaque fois qu'une perturbation (bulle) est générée, le faisceau laser est atténué. Le signal de la photodiode ΔI est proportionnel à la section de la bulle : $\Delta I = \alpha R^2$ (R : rayon de la bulle, α : coefficient déterminé à partir de la visualisation) [27]. Le signal laser est simultanément mesuré avec celui du courant. La Figure 4.7 donne une vue générale du dispositif expérimental.

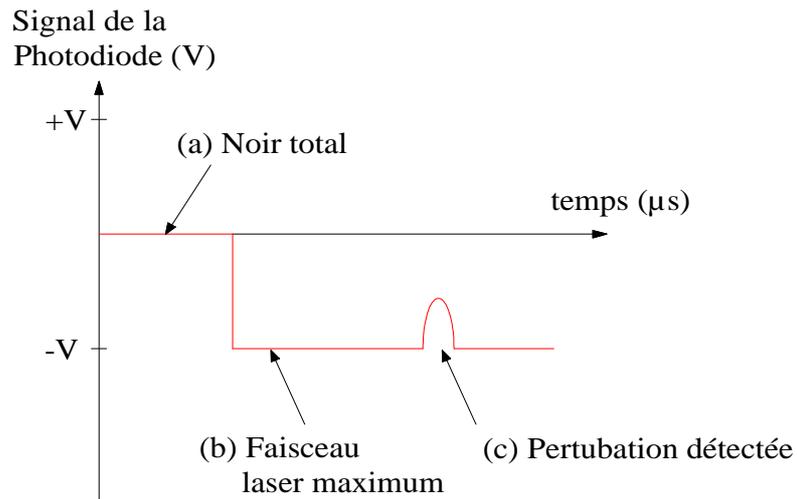


Figure 4.6 : Principe de détection de la génération de bulle.



Figure 4.7 : Vue générale du dispositif expérimental avec la cellule et le générateur en arrière plan.

4.2.5 Liquides utilisés

Les liquides testés sont des huiles minérales, synthétiques et végétales, fournis par un industriel, ceux-ci sont en cours de développement. Ils sont référenciés par des numéros de code :

- Huiles minérales (type naphénique) : MO1, MO2, MO2', MO3, MO4 et MO4'.

- Huiles végétales (ou esters naturels) : VO1, VO2 et VO3.
- Esters synthétiques : SE1, SE2.

Tous les liquides considérés sont des huiles neuves ; elles sont traitées (passage sous vide avec filtration) et leurs teneurs en eau mesurées avant chaque essai par la méthode de Karl Fisher au moyen d'un Coulomètre type METLER TOLEDO KF DL32. Avant de tester, les teneurs en eau relative à 20°C étaient de ~ 9% dans les huiles minérales et de ~ 5% dans huiles esters.

4.3 Résultats expérimentaux

La tension appliquée sur l'électrode pointe est augmentée au cours des essais. Chaque valeur de la tension de génération U_s est la moyenne d'une série de 6 mesures.

Il ressort des différentes observations expérimentales, qu'en dessous d'une certaine tension seuil, caractéristiques pour chaque liquide, aucun signal électrique (courant) ou optique n'est détectable. Dès que la tension atteint cette valeur, il apparaît une impulsion de courant accompagné d'une atténuation du faisceau lumineux (laser) éclairant la pointe, indiquant ainsi un changement d'indice de réfraction du milieu, caractéristique d'une bulle. Des observations similaires ont été rapportées par d'autres chercheurs [19, 25, 26, 132]. L'atténuation du signal lumineux intervient toujours avec un certain retard par rapport au signal du courant. Ce qui signifie que la bulle résulte de l'injection de courant. Ceci est observé pour les deux polarités de la pointe ; la durée de l'impulsion de courant injecté est de l'ordre de moins 20 ns. Cependant, en polarité positive, la durée de la perturbation du signal lumineux est de 200 ns (Figure 4.8) alors qu'en polarité négative, elle persiste au-delà du retour à zéro du courant injecté pour disparaître à plusieurs microsecondes plus tard (Figure 4.9).

Le fait que les séquences correspondant à la dynamique de la bulle durent plus longtemps lorsque la pointe est négative que lorsqu'elle est positive, peut expliquer les différences qui pourront être observées dans la structure et le mode de propagation des streamers générés par la suite à des tensions supérieures à U_s .

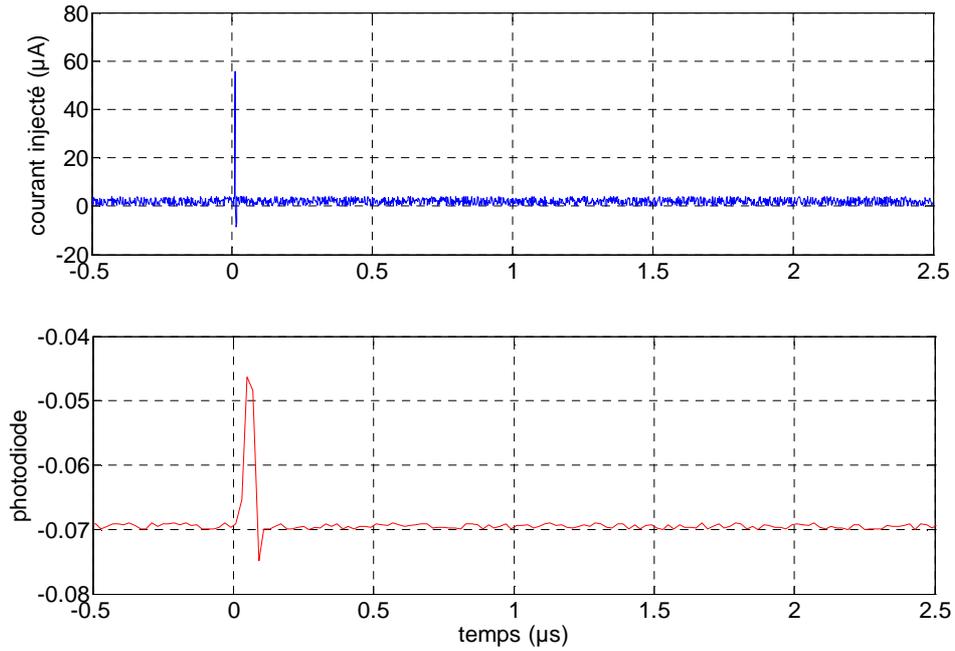


Figure 4.8 : Corrélation des oscillogrammes du courant de génération et de l'atténuation laser en polarité positive (+13 kV) dans l'huile végétale VO1.

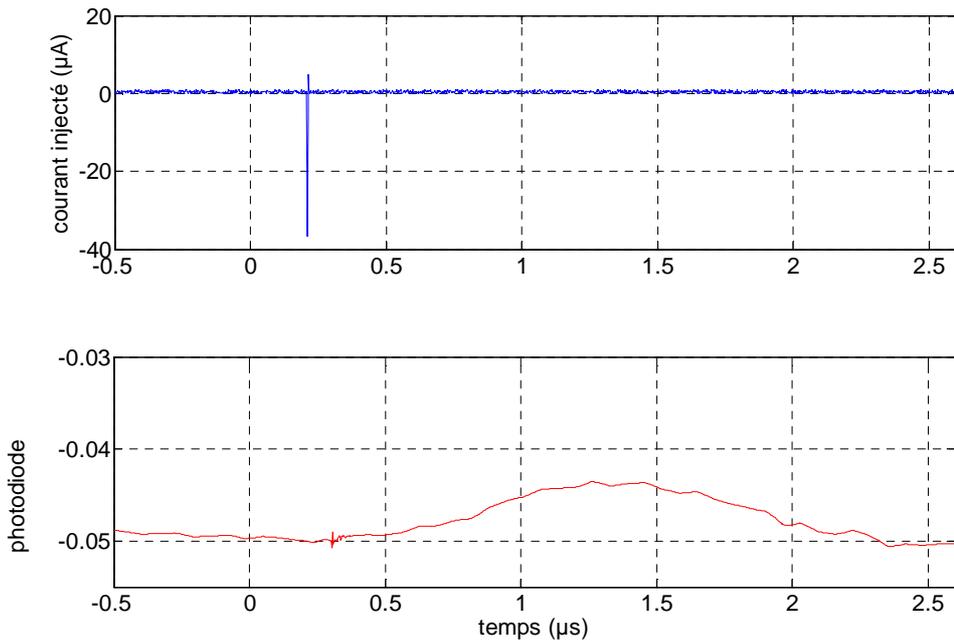


Figure 4.9 : Corrélation des oscillogrammes du courant de génération et de l'atténuation laser en polarité négative (-13kV) dans l'huile ester végétale VO1

Les tensions de génération mesurées diffèrent selon le liquide. Le tableau 4.1 résume les valeurs de U_s relevées pour les divers liquides en fonction de la polarité de l'électrode pointe. Il ressort de ces mesures que les tensions de génération sont toujours plus élevées en polarité positive qu'en polarité négative quel que soit le liquide considéré. Ce résultat est tout à fait

conforme avec ceux rapportés dans la littérature pour de nombreux liquides [19, 30]. D'autre part, pour les huiles synthétiques (SE1 et SE2) et végétales (VO1, VO2 et VO3), les valeurs de U_s sont plus élevées que celles des huiles minérales quelle que soit la polarité de l'électrode pointe. Les tensions de génération dans les huiles SE1, VO1 et VO2 sont très proches dans les deux polarités.

Tableau 4.1 : Tension de génération U_s et champ correspondant calculé par l'approximation hyperboloïdale E_{SH} .

Huiles	Pointe négative		Pointe positive	
	$U_{s-} \pm 1$ (kV)	$E_{SH-} \pm 0.1$ (MV/cm)	$U_{s+} \pm 1$ (kV)	$E_{SH+} \pm 0.1$ (MV/cm)
MO1	6,7	0,71	9,3	0,98
MO2	5,3	0,56	8,0	0,84
MO2'	5,7	0,60	6,8	0,72
MO3	8,2	0,86	9,2	0,97
MO4	7,2	0,76	10,0	1,05
MO4'	8,0	0,84	11,0	1,16
SE1	10,5	1,10	13,0	1,37
SE2	9,0	0,95	13,8	1,45
VO1	10,2	1,07	13,3	1,40
VO2	10,2	1,07	13,2	1,39
VO3	11,0	1,16	12,0	1,26

Les mécanismes impliqués dans la génération peuvent être discutés sur la base des valeurs du champ électrique à la pointe E_s . Ce champ E_s peut être calculé en utilisant par exemple l'approximation hyperboloïdale, l'électrode pointe étant assimilée à un hyperboloïde de révolution (Figure 4.10).

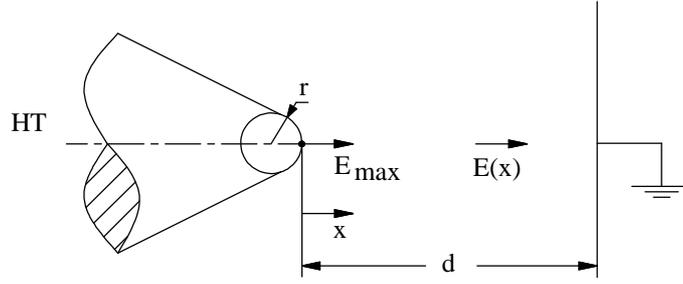


Figure 4.10 : Système d'électrodes pointe – plan.

En l'absence de charges d'espace, l'expression donnant le champ électrique harmonique sur l'axe du système pointe – plan, à l'extrémité de la pointe, est donnée par [134] :

$$E(x) = \frac{2dU}{(2dx - x^2 + dr_p - xr_p) \ln\left(\frac{4d}{r_p}\right)} \quad (4.1)$$

Avec :

U : Tension appliquée aux électrodes,

d : Distance inter électrodes,

r_p : Rayon de courbure de la pointe.

Au sommet de la pointe (à $x=0$), la valeur du champ E_p est égale à :

$$E_p = \frac{2U}{r_p \ln\left(\frac{4d}{r_p}\right)} \quad (4.2)$$

Ici $r_p \ll d$, le rapport $\frac{E(x)}{E_p}$ sera uniquement fonction du rapport $\frac{x}{r_p}$.

Plus r_p est faible, plus E_p est élevé et sa distribution inhomogène. Cette inhomogénéité est caractérisée par le facteur de non uniformité β ou son inverse appelé "facteur d'utilisation du champ" et noté η ; ce dernier est défini comme étant le rapport entre le champ moyen E_{moy} dans l'espace inter électrodes et le champ maximal E_p . Le facteur d'utilisation du champ est égale à :

$$\eta = \frac{E_{moy}}{E_p} = \frac{U/d}{E_p} = \frac{U}{E_p d}, \text{ et } \beta = \frac{1}{\eta} \quad (4.3)$$

Plus η est proche de 1, plus le champ sera uniforme (η est compris entre 0 et 1). C'est ce vers quoi essaye de tendre l'industriel. En pratique, on est toujours très loin de la valeur maximal de η . À titre d'exemple, dans le cas d'un poste blindé usuel à 420 kV, le facteur d'utilisation du champ est de l'ordre de 0,5. Notons que η est aussi appelé “*facteur de forme de Schwaiger*”. Le facteur d'utilisation du champ dans le cas d'un système pointe – plan, en approximation hyperboloïde, est calculé à partir de la relation suivante :

$$\eta = \frac{\ln(\sqrt{p} + \sqrt{p-1})}{\sqrt{p(p-1)}}, \text{ avec } p = \frac{d+r}{r} \quad (4.4)$$

Avec $d= 2 \text{ mm}$ et $r_p= 35 \text{ }\mu\text{m}$ utilisés dans ce travail, on aura $\eta = 0.047$ et $\beta = 21$.

La charge injectée correspondant au premier pic de courant induit un échauffement local et une vaporisation du liquide au voisinage de la pointe donnant naissance à des bulles. La dynamique de la bulle est contrôlée par sa taille initiale et la viscosité des liquides. Dans un liquide de faible viscosité, la bulle rebondit plusieurs fois avant de disparaître ; sa dynamique est contrôlée par la force d'inertie [23, 25]. Le signal représentant la caractéristique totale de la durée de vie de la bulle comporte un seul cycle expansion/implosion. Dans ce cas, la viscosité contrôle la dynamique de la bulle et le temps d'implosion de la bulle est plus important. À la fin de chaque phase d'implosion, la bulle perd une grande partie de son énergie sous la forme d'une émission d'une onde de pression, lorsque son volume est minimal [26, 29, 135].

En identifiant l'énergie électrique W correspondant à ce pic de courant à celle nécessaire pour la vaporisation du liquide, on peut en déduire les dimensions moyennes de la bulle générée en supposant que cette dernière est de forme sphérique. Le rayon maximum de la bulle R_m , assimilée à une sphère en fonction de l'énergie injectée W et de la pression P_∞ est donné par l'expression suivante [136]:

$$R_m = K \left(\frac{W}{P_\infty} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

où K est un coefficient qui dépend de P_∞ et des propriétés thermodynamiques du liquide selon l'expression :

$$K = \left(\frac{3RT_{eb}}{4\pi \int_{T_{amb}}^{T_{eb}} C_p(T) dt + L_v} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.6)$$

Avec :

T_{amb} : Température ambiante,

T_{eb} : Température d'ébullition à la pression hydrostatique appliquée,

P_{∞} : Pression du liquide à l'infini,

R : Constante des gaz parfaits,

$C_p(T)$: Capacité thermique massique à pression constante,

L_v : Chaleur latente de vaporisation à volume constant.

L'énergie déposée à chaque impulsion est entièrement utilisée pour l'échauffement et la vaporisation du liquide, sous forme d'un gaz que l'on suppose parfait. La relation (4.5) permet de calculer les valeurs de R_m en fonction de l'énergie injectée W et de la pression appliquée P_{∞} .

En négligeant les échanges de chaleur et de masse à l'interface et en supposant que la bulle est de forme sphérique, on peut étudier la dynamique de la bulle en utilisant le modèle de Rayleigh [137]. Ce modèle décrit la dynamique d'implosion d'une cavité sphérique (de rayon initial R_0) contrôlée par l'inertie du liquide, supposé homogène, incompressible et de volume infini. La bulle étant soumise à la pression exercée par le liquide, son rayon R est une fonction du temps. La contraction de la bulle entraîne la mise en mouvement du liquide.

L'équation différentielle qui détermine l'évolution d'une bulle sphérique est donnée par la relation [137]. Ce modèle décrit la dynamique d'implosion d'une cavité sphérique (de rayon initial R_0) contrôlée par l'inertie du liquide, supposé homogène, incompressible et de volume infini. La bulle étant soumise à la pression exercée par le liquide, son rayon R est une fonction du temps. La contraction de la bulle entraîne la mise en mouvement du liquide.

L'équation différentielle qui détermine l'évolution d'une bulle sphérique est donnée par la relation :

$$\frac{P(R,t) - P_{\infty}(t)}{\rho} = R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \quad (4.7)$$

Avec :

$\frac{dR}{dt}$: Vitesse de croissance du rayon de l'interface,

$\frac{d^2R}{dt^2}$: Accélération,

$P(R, t) = \left(P_v(t) + P_g - \frac{2\sigma}{R} \right)$: Pression de la bulle à l'interface,

P_v : Pression de vapeur saturante,

P_g : Pression partielle du gaz contenu dans la bulle,

$\frac{2\sigma}{R}$: Pression due à la tension superficielle,

ρ : Masse volumique du liquide.

Dans le cas d'une bulle sphérique avec la pression P_∞ constante, la pression dans la bulle étant nulle, en négligeant l'effet de la tension superficielle, l'équation différentielle devient :

$$R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} P_\infty = 0 \quad (4.8)$$

La vitesse à l'interface en fonction du rayon, durant la phase d'implosion, est donnée par :

$$\left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{2P_\infty}{3\rho} \left(\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right) \quad (4.9)$$

Avec les conditions initiales suivantes : $R=R_0=R_m$ et $\frac{dR}{dt} = 0$ à $t=0$.

L'équation précédente permet d'obtenir la relation donnant la durée d'implosion Δt_i de la bulle ; le rayon de la bulle passe de la valeur maximum à la valeur zéro.

$$\Delta t_i = 0.915 R_m \left(\frac{\rho}{P_\infty} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.10)$$

Rayleigh a avancé l'idée que la bulle vide ne peut pas expliquer l'apparition des rebondissements suite à la première implosion. Il a trouvé nécessaire de tenir compte de la présence de gaz ou de vapeur qui empêcherait le rayon de la bulle de s'annuler et la vitesse de l'interface de devenir infiniment grande lorsque le rayon tend vers zéro.

La durée d'un cycle expansion/compression de la bulle Δt , peut être déterminée à partir de l'équation établie par Rayleigh :

$$\Delta t = 2\Delta t_i = 2(0.915) R_m \left(\frac{\rho}{P_\infty} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

Le rayon maximum ($R_{m,max}$) peut être calculé à partir de la mesure du temps donnant la durée Δt_i . Il est donné par la relation :

$$R_{m,max} = \frac{\Delta t_i}{0.915} \left(\frac{P_\infty}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.12)$$

R_m peut être également calculé de façon beaucoup plus simple en utilisant la loi de Trouton. D'après cette loi, l'énergie de vaporisation est de l'ordre de 1.2 J/cm^3 . L'énergie correspondant à la génération est donnée par :

$$W = Q \cdot U = \left(i \frac{\Delta t}{2} \right) U \quad (4.13)$$

En supposant que la bulle est de forme sphérique, son volume est égale à :

$$V = \frac{4}{3} \pi R_m^3 \quad (4.14)$$

À partir des équations (4.13) et (4.14) et la loi de Trouton, on a :

$$V = \frac{W}{1.2} = \frac{4}{3} \pi R_m^3 \quad (4.15)$$

Donc :

$$R_m = \left(\frac{3}{4} \frac{1}{\pi} \frac{W}{1.2} \right)^{1/3} \quad (4.16)$$

Les rayons de la bulle ainsi calculés sont de l'ordre de la dizaine de μm pour les valeurs de W estimées dans nos mesures (quelques nJ à une dizaine de nJ). Le tableau 4.2 donne quelques exemples des rayons de la bulle calculé en utilisant l'équation 4.16. Ces valeurs sont du même ordre que celles estimés pour des liquides de structure chimique simple comme le cyclohexane ou le n-hexane [21, 27].

Tableau 4.2 : Rayons maximum de la bulle calculés en polarité négative.

Huiles	i(μA)	U(kV)	t(μs)	Q(pC)	W(nJ)	$R_m(\mu\text{m})$
MO1	40	9.3	0.02	0.8	7.4	11.48
SE1	53	13	0.02	1	10	12.58
VO1	55	13.3	0.02	1.1	9.9	12.53

Aussi, la tension de génération est légèrement plus élevée dans les huiles esters naturels et synthétiques que dans les huiles minérales. Elle est sensiblement plus élevée en polarité positive qu'en polarité négative pour les différentes huiles étudiées.

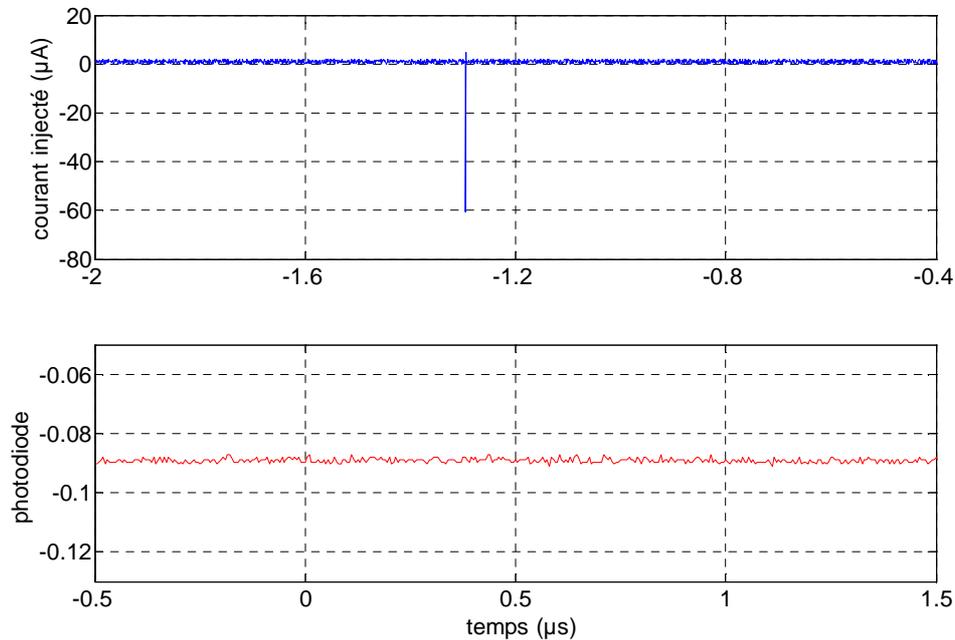


Figure 4.11 : Oscillogramme du courant de génération et de l'atténuation laser en polarité positive (+12kV) dans l'huile ester végétale VO2.

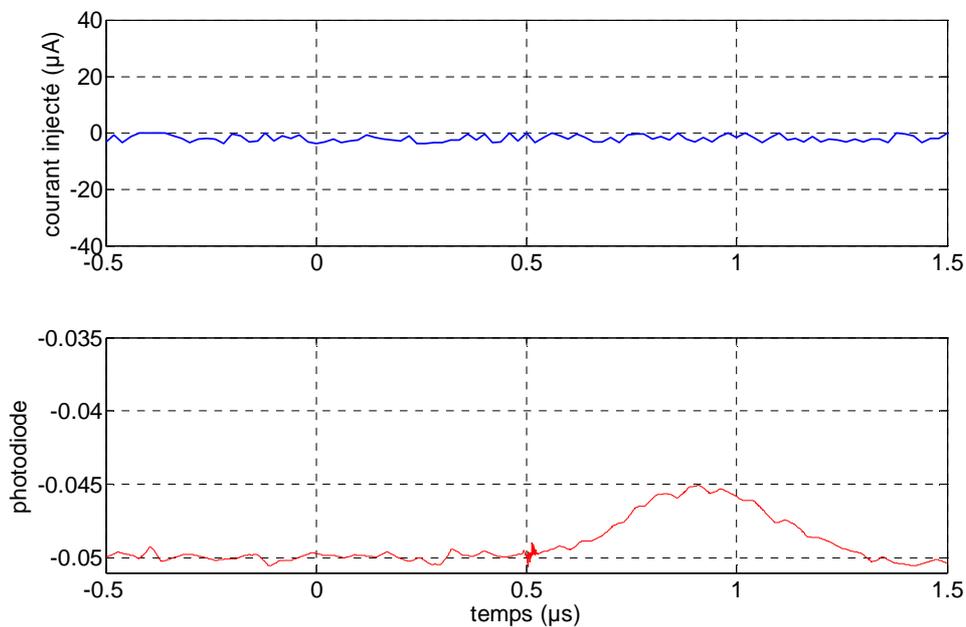


Figure 4.12 : Oscillogramme du courant de génération et de l'atténuation laser en polarité négative (-12 kV) dans l'huile ester végétale VO3.

Par ailleurs, nous avons observé que pour les deux polarités, il peut y avoir apparition d'un pic de courant sans qu'il soit accompagné d'une atténuation du signal lumineux. Par

conséquent, l'injection de courant dans certains cas n'entraîne pas forcément la vaporisation locale du liquide (Figure 4.11). L'inverse est aussi possible ; lorsque la pointe est négative, nous avons également observé qu'il peut y avoir une atténuation du signal lumineux sans qu'il y ait injection de pic de courant (Figure 4.12). Ces observations seraient vraisemblablement liées à des phénomènes électrohydrodynamiques.

4.4 Conclusion

Cette étude montre que : (1) la tension de génération en pointe positive est toujours supérieure à celle mesurée en polarité négative ; et (2) les tensions de génération des streamers (bulle) sont plus élevées dans les huiles synthétiques et végétales que dans les huiles minérales quelle que soit la polarité de l'électrode pointe. Les tensions de génération en polarité négative dans les huiles MO1, MO2 et MO2' et MO4 étant relativement plus basses que dans les autres liquides, on devrait s'attendre à ce que les streamers qui s'y développeront, soient plus lents et plus buissonneux que dans les autres liquides, dans les mêmes conditions expérimentales (tension et géométrie des électrodes). Quant à la tenue diélectrique, on pourrait s'attendre, au vu des tensions de génération, à ce qu'en DC les tensions de claquage dans les huiles synthétiques et végétales soient plus élevées que dans les huiles minérales.

La connaissance de la tension de génération des streamers est d'un grand intérêt puisqu'elle représente la tension en dessous de laquelle aucune décharge (décharge partielle) n'a lieu.

CHAPITRE 5

ÉTUDE DE LA PROPAGATION DES STREAMERS DANS LES HUILES VÉGÉTALES, MINÉRALES ET SYNTHÉTIQUES

5.1 Introduction

Les huiles les plus utilisées ces dernières décennies dans les matériels électriques sont les huiles minérales issues du raffinage du pétrole. Cependant, avec les préoccupations liées à l'environnement, les recherches s'orientent actuellement vers les huiles végétales, c'est-à-dire les esters naturels (à base de soja, colza, tournesol ...). Même si leur utilisation est pour le moment restreinte aux transformateurs de distribution, de nombreux projets sont en cours pour étendre leur application aux transformateurs de puissance.

Le choix d'une huile passe par l'analyse et la connaissance de ces principales propriétés dont l'aptitude de l'huile à remplir la fonction d'isolant à travers la mesure de la rigidité diélectrique, le facteur de dissipation (ou facteur de perte – $\tan\delta$), la permittivité, la résistivité, la tendance à l'électrisation statique, la viscosité (pour la fonction transfert de chaleur) et la stabilité à l'oxydation. Des travaux récents ont montré que si les huiles végétales présentaient un caractère de biodégradabilité attractif, elles restent cependant moins intéressantes du point de vue de leur stabilité à l'oxydation et leur viscosité élevées par rapport aux huiles minérales ou synthétiques [1].

Ce chapitre s'inscrit dans la continuité du précédent sur la génération des streamers. Nous nous intéressons plus particulièrement à la comparaison des huiles minérales, des huiles esters synthétiques et des huiles végétales à travers l'analyse de la morphologie et de la longueur finale (ou d'arrêt) des streamers qui s'y propagent en géométrie pointe – plan ainsi qu'aux courants associés.

5.2 Techniques expérimentales

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 5.1 montre le schéma de l'ensemble du dispositif expérimental utilisé dans cette étude.

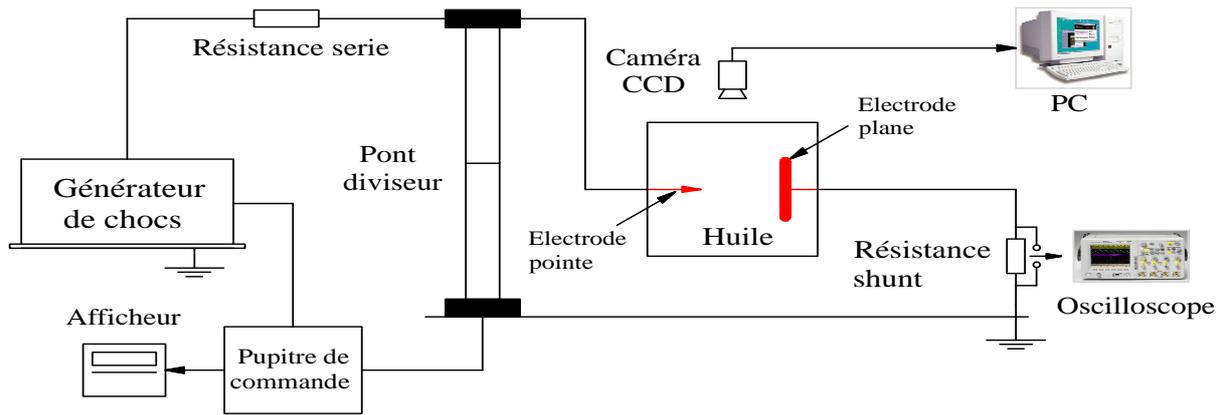
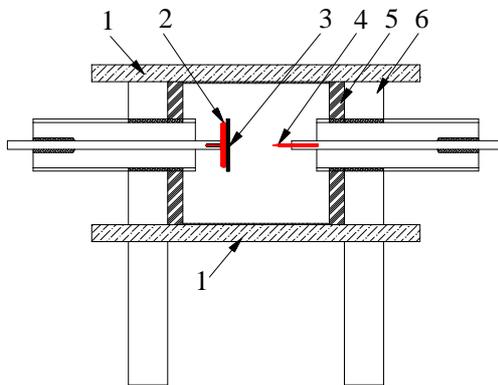


Figure 5.1 : Schéma du dispositif expérimental.

5.2.1 Cellule d'essai

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 5.2). 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.



- | | | |
|---|-----------------------------|------------------------------|
| 1- Couvercle en Plexiglas (transparent) | 2- Electrode plane | 3- Solide bloquant en Téflon |
| 4- Electrode point | 5- Corps cylindre en Téflon | 6- Tige en PVC |

Figure 5.2 : Vue schématique et photo de la cellule d'essai.

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 80°C pendant plusieurs heures afin d'éliminer toute trace d'humidité.

5.2.2 Système électrode

Le système d'électrode utilisé est un système pointe – plan. L'état de surface et le rayon de courbure des électrodes sont contrôlés régulièrement. Les facteurs d'utilisation et de non uniformité du champ calculé (Équation 4.3-4.4) sont présentés sur le tableau 5.1. Les distances inter électrodes étudiées sont 20 et 30 mm.

Tableau 5.1 : Facteur d'utilisation et de non uniformité du champ pour le système d'électrodes pointe – plan utilisé

d (mm)	p	η	β
20	2001	0.0022	454.5454
30	3001	0.0016	625

L'électrode acérée est une pointe de $10,0 \pm 0,5 \mu\text{m}$ de rayon de courbure. Elle est réalisée dans du tungstène thorié à 2%. 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.

Quant à l'électrode plane, elle est constituée d'une mince plaque de laiton de 12 mm d'épaisseur et de 40 mm de diamètre avec un pourtour de rayon de courbure 3 mm (selon Rogowski). Elle est recouverte d'un isolant solide en Téflon (électrode bloquée), de 2 mm d'épaisseur, possédant une rigidité diélectrique suffisante pour éviter les claquages et protéger ainsi l'entrée de l'oscilloscope ; cela nous permet également d'effectuer plusieurs essais et mesures sur le même échantillon d'huile. L'emploi d'une barrière (électrode bloquée) ne modifie pratiquement pas les phénomènes de préclaquage [64].

5.2.3 Source de tension

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

5.2.4 Mesures électriques

La mesure des courants associés aux streamers s'effectue à travers la mesure de la tension aux bornes d'une résistance (non inductive) de 50Ω connectée en série avec la cellule et placée du côté basse tension. Cette tension est mesurée au moyen d'un oscilloscope numérique à mémoire, de haute résolution temporelle de type Agilent MSO 6104A (Mixed Signal Oscilloscopes). Deux diodes Zener, montées tête bêche en parallèle avec la résistance, ainsi qu'un éclateur protègent l'entrée de l'oscilloscope contre les surtensions ou les surintensités (Figure 4.3). La charge électrique est obtenue par intégration du courant obtenue automatiquement par l'oscilloscope.

5.2.5 Système optique pour la visualisation des streamers

L'observation optique des streamers est basée sur les images obtenues par intégration grâce à 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). La caméra CCD est de type SVGA "SONY XC-HR58" de haute résolution (767x580 pixels). La capture d'images qui est contrôlée par ordinateur a 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.

5.2.6 Liquides utilisés

Les liquides testés sont des huiles minérales, synthétiques et végétales, fournis par un industriel (ALSTOM GRID); ceux-ci sont en cours de développement. Ils sont référenciés par des numéros de code :

- Huiles minérales (type naphténique, non inhibée) : MO1/A, MO3/C et MO4'/B.
- Huiles végétales (ou esters naturels) :
 - + VO1/G: mélange de mono & tri-ester.
 - + VO2/F, VO3/E et VO4/H : tri-ester.
- Ester synthétique (type tetra-ester): SE1/D.

Tous les liquides testés ci-dessus sont des huiles neuves. Elles sont traitées (passage sous vide avec filtration) et leurs teneurs en eau mesurée avant chaque essai par la méthode de Karl Fisher et au moyen d'un Coulomètre type METLER TOLEDO KF DL32 (Tableau 5.2).

Tableau 5.2 : Propriétés des huiles testées

Propriétés	Huiles minérales	Huiles végétales
Viscosité à 40°C (mm ² /s)	≤ 12	≤ 50
Pointe d'écoulement (°C)	≤ -40	≤ -10
Teneur en eau relative à 20 ⁰ C (%)	~ 9	~ 5
Densité (g/ml)	≤ 0.895	≤ 1
Facteur de dissipation à 90°C	≤ 0,005	≤ 0,05
Point d'éclair (°C)	≥ 135	≥ 250

Des huiles végétales brutes pour la cuisine (nutrition) issues de Colza (CO), Tournesol (TO) et Raisin (RA) sont également testées afin de comparer les caractéristiques des streamers qui s'y propagent avec les huiles indiquées ci-dessus.

5.3 Résultats expérimentaux

5.3.1 Forme des streamers

Tous les streamers observées dans les deux polarités (positive ou négative) ont une forme plus ou moins filamenteuses et cela pour les différentes huiles étudiées. La figure 5.3 donne des exemples de streamers se propageant dans l'huile minérale MO3 pour deux tensions différentes. 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, il 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.

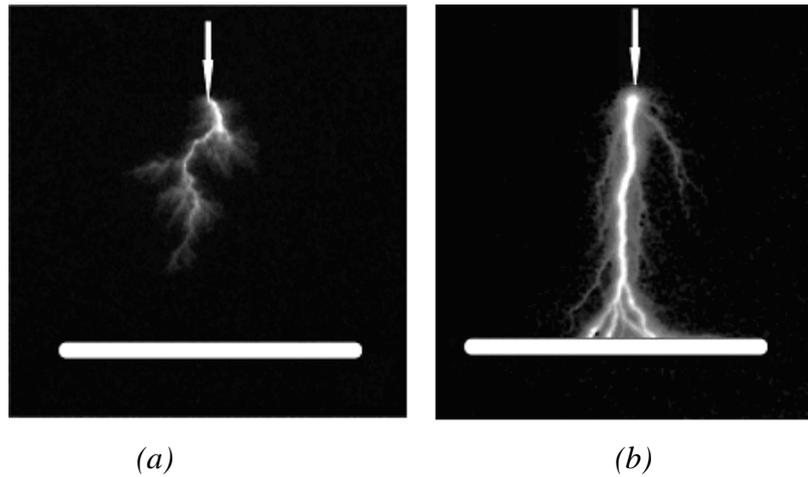


Figure 5.3 : Photographies des streamers positifs dans l'huile minérale MO3,

(a) $U = 60 \text{ kV}$, (b) $U = 80 \text{ kV}$ et $d = 20 \text{ mm}$.

En polarité positive, les streamers sont filamenteux dans les différentes huiles étudiées. Les streamers qui se propagent dans les huiles minérales sont plus ramifiés mais beaucoup moins lumineux que ceux observés dans les huiles esters végétales et synthétiques. Ils sont très lumineux à la tête de la pointe, ce qui témoigne d'une intense activité d'ionisation. Les images de la figure 5.4 donnent quelques exemples de formes de streamers positifs se propageant dans les différentes huiles étudiées pour un intervalle inter électrodes de 30 mm.

En polarité négative, les streamers qui se propagent dans les huiles esters végétales et synthétiques sont similaires à ceux observés en polarité positive ; ils sont filamenteux et beaucoup plus lumineux. Dans les huiles minérales, les streamers ont une forme moins ramifiée et plus lumineuse qu'en polarité positive. Notons qu'à basse tension, des streamers négatifs en forme de *buisson* sont également observés dans les huiles minérales. La figure 5.5 donne quelques exemples de formes de streamers négatifs se propageant dans les différentes huiles étudiées pour un intervalle inter électrodes de 30 mm.

5.3.2 Longueurs finales des streamers

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. 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. La figure 5.6 donne les variations de L_f dans les différentes huiles étudiées et ce pour les deux polarités.

Chaque point (valeur) correspond à une moyenne de 6 mesures. La valeur moyenne de L_f augmente avec la tension.

Nous remarquons que pour une tension donnée, L_f est généralement plus élevée dans les huiles végétales que dans les huiles minérales. L_f est plus importante en polarité positive qu'en polarité négative. En polarité négative, L_f peut être 10 fois plus important dans les huiles végétales que dans certaines huiles minérales. La longueur finale dans les huiles végétales brutes pour la nutrition est comparable à celles mesurée dans les huiles végétales traitées (Figure 5.6) ; cela montre que l'humidité (pour les teneurs considérées) et les particules ont peu d'influence sur la propagation des streamers dans les huiles isolantes en impulsion de foudre. D'autre part, la comparaison de L_f ne montre pas de différence significative entre les huiles végétales issues de différentes origines (Colza, Tournesol ou bien pépins de Raisin).

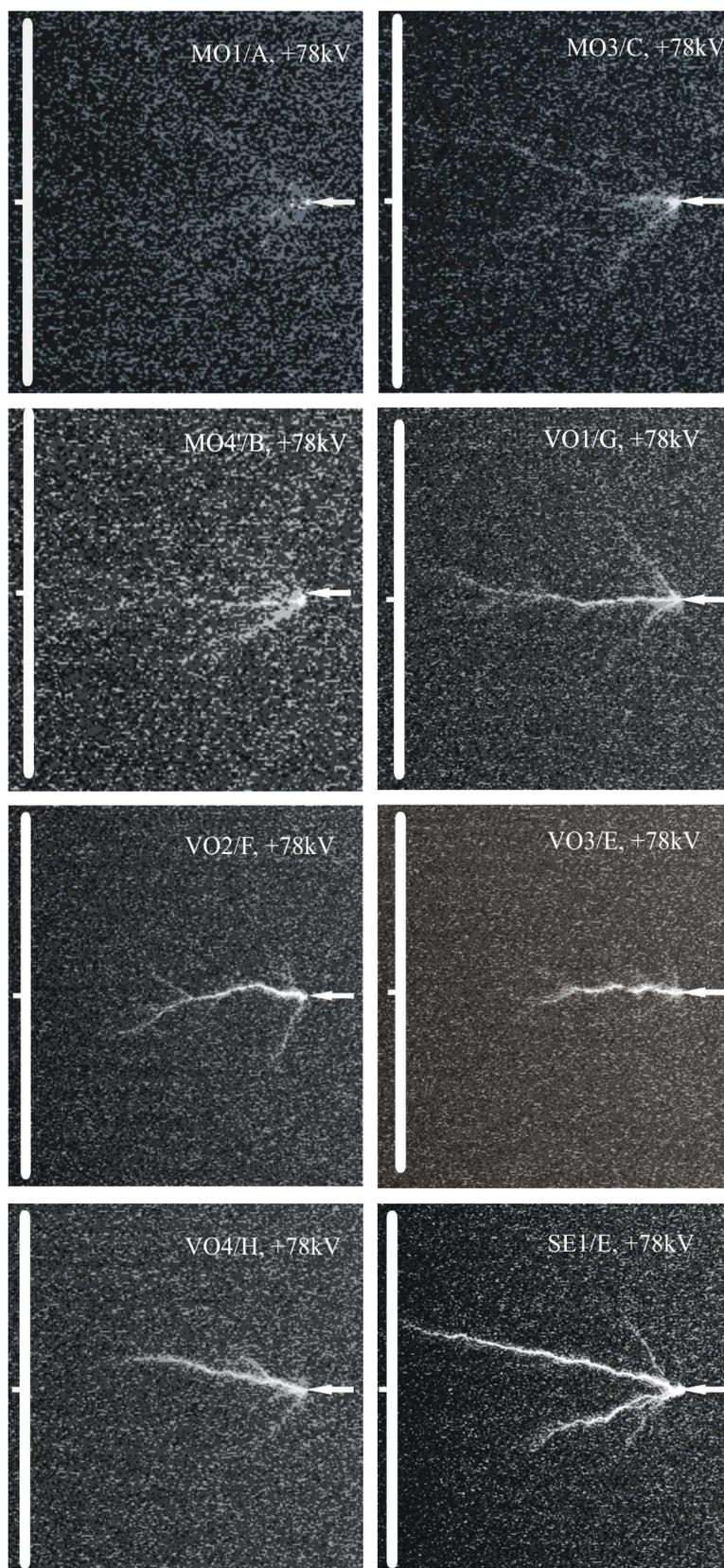


Figure 5.4 : Exemples de forme des streamers positifs observés en polarité positive dans les différentes huiles à $U = +78$ kV, $d = 30$ mm.

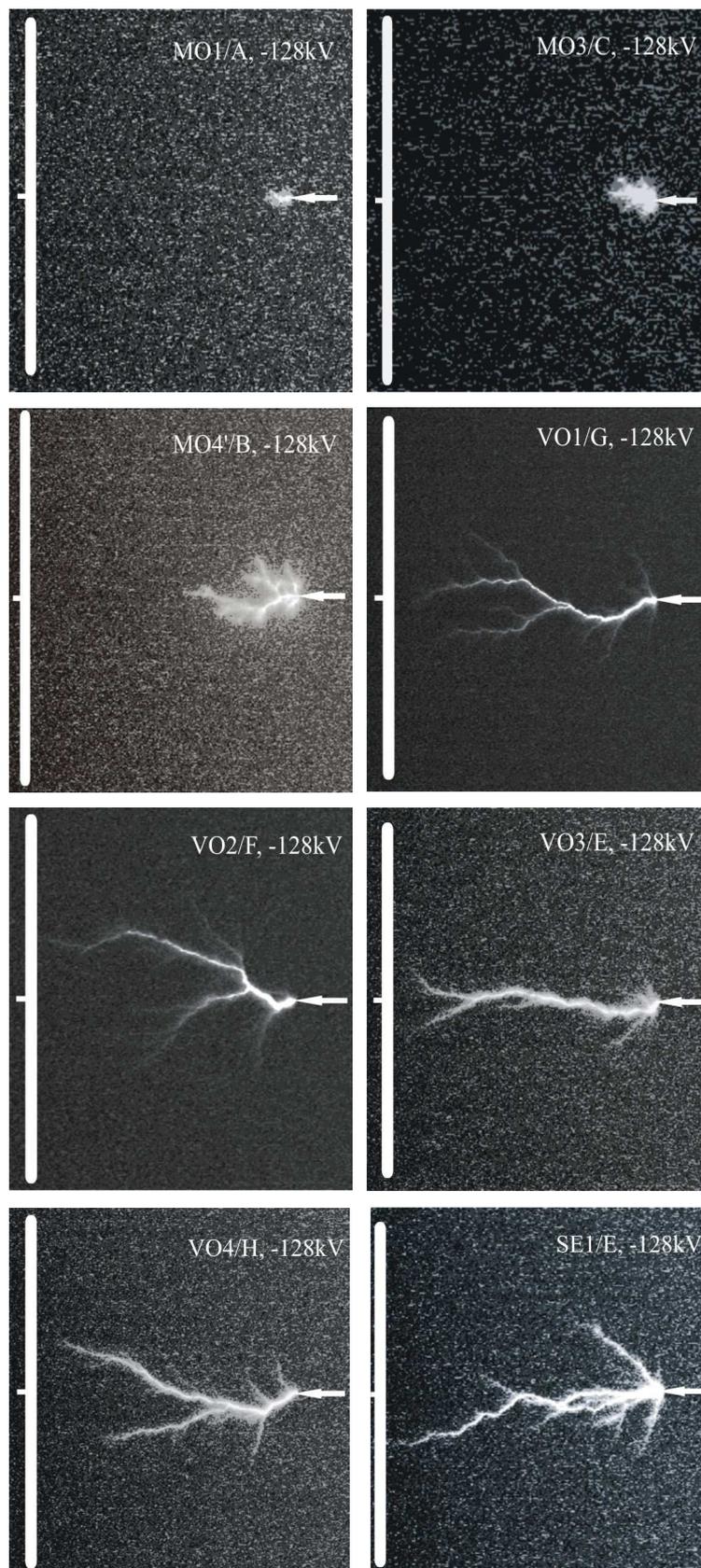


Figure 5.5 : Exemples de forme des streamers négatifs observés en polarité négative dans les différentes huiles à $U = -128$ kV, $d = 30$ mm.

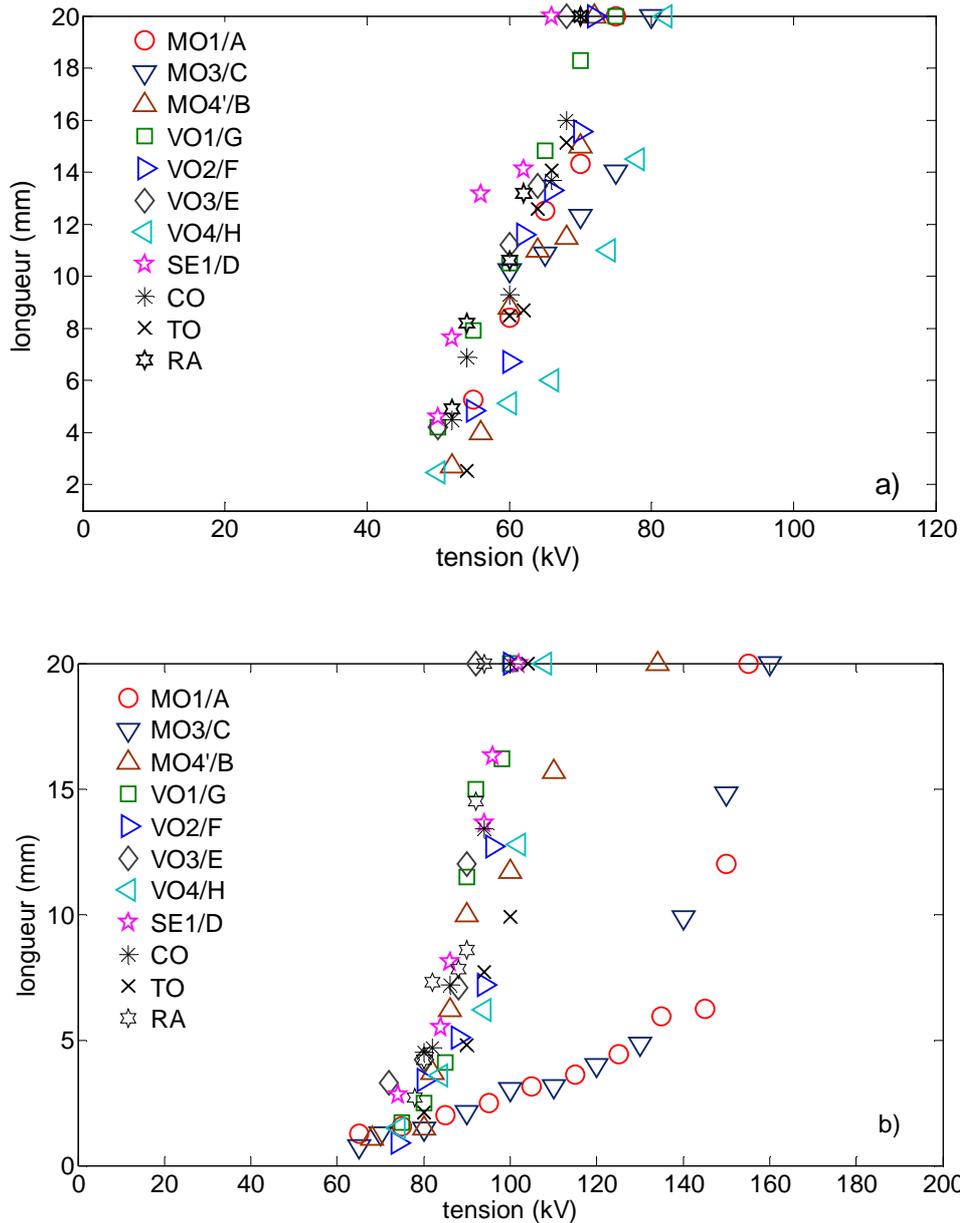


Figure 5.6 : Longueur finale des streamers en polarité positive (a) et négative (b), $d=20$ mm.

En polarité positive, L_f croît quasi linéairement avec la tension appliquée pour les différences huiles étudiées (Figure 5.6 a). Une transition beaucoup plus marquée en polarité négative qu'en polarité positive est observée. Cette transition pour les huiles MO1/A et MO3/C en polarité négative apparaît à environ 140 kV alors que pour les autres huiles, elle est entre 80 et 90 kV. Cette transition s'effectue à environ $0.3d$ de l'intervalle inter électrodes. Au-delà de cette longueur, L_f augmente brutalement de façon linéaire avec la tension appliquée (Figure 5.6 b). D'autres chercheurs ont rapporté que pour des grandes distances inter électrodes (des distances beaucoup plus importantes que celles que nous avons étudiées),

la transition avait lieu à une distance de la pointe de l'ordre de $2/3$ de d [76]. Cette transition à $2/3$ de d correspondrait au passage du champ électrique par un minimum comme cela a été souligné par Beroual et Tobazeon [34], Chadband et Wright [138].

La différence de L_f mesuré dans les deux polarités indiquerait que les mécanismes de propagation des streamers ne sont pas les mêmes selon la polarité, et que les phénomènes d'injection, extraction et accumulation de charges d'espace jouent un rôle important dans la propagation des streamers. En polarité positive, le champ électrique dans l'intervalle inter électrodes est renforcé par la charge d'espace par rapport au champ harmonique à l'inverse du champ en polarité négative. Les streamers se propagent donc plus facilement en polarité positive qu'en polarité négative. C'est pourquoi les tensions nécessaires pour obtenir les mêmes longueurs finales sont plus importantes en polarité négative qu'en polarité positive quelques soient le liquide ou la distance inter électrodes. Par rapport aux streamers positifs, il existe beaucoup moins d'informations dans la littérature concernant les streamers négatifs.

La différence de L_f entre les huiles esters et minérales peut être liée à la différence dans les structures moléculaires et les additifs. Pour une tension donnée, L_f est généralement plus élevée dans les huiles esters que dans les huiles minérales. Cela peut s'expliquer par la présence de nombreuses liaisons doubles dans les huiles végétales. En effet, l'énergie mise en jeu dans les liaisons " π " est plus faible que celle des liaisons " σ " (2.8 eV/atome pour π contre 3.8 eV/atome pour σ). La liaison π libère donc plus facilement des électrons sous champ électrique facilitant ainsi la propagation des streamers.

En polarité négative, L_f dans l'huile minérale MO4'/B est plus élevé que dans les autres huiles minérales testées. Cela pourrait être due à la présence de composés aromatiques ayant une conductivité plus élevée que celle des hydrocarbures gras [6].

L'arrêt du streamer est une conséquence de la chute de tension ΔU entre l'électrode pointe et la tête du streamer, ΔU augmente avec la longueur de propagation. Cette chute de tension le long du streamer varie selon les conditions d'essais : géométrie des électrodes (intervalle inter électrodes et rayon de courbure de la pointe) et tension appliquée. Elle dépend donc du champ local et du champ moyen. Pour permettre la propagation du streamer, la tension appliquée doit être augmentée pour compenser la chute de tension, et le champ à la tête du streamer doit être maintenu au-dessus de la valeur critique nécessaire pour sa propagation. La chute de tension par unité de longueur peut être déduite à partir des caractéristiques $L_f(U)$. On peut ainsi calculer le champ longitudinal moyen E_l dans le canal du streamer par la relation suivante :

$$E_l = \frac{\Delta U}{\Delta L_f} \quad (5.1)$$

La valeur de E_l ainsi déterminée est de l'ordre de 15 kV/cm pour les huiles végétales et l'ester synthétique en polarité positive et de 20 kV/cm en polarité négative. Pour les huiles minérales, E_l est de 20 kV/cm en polarité positive alors qu'en polarité négative, pour une longueur finale de l'ordre de 0.3d, E_l peut atteindre 100 kV/cm ; au-delà, E_l est de l'ordre de 20 kV/cm et L_f augmente plus rapidement, ce qui explique la propagation plus courte du streamer en polarité négative dans celles-ci que dans les huiles végétales ou l'ester synthétique sous la même tension.

L'évaluation de la longueur finale des décharges (L_f) est effectuée par la mesure de la distance (axiale) entre la pointe et l'extrémité de la branche la plus longue de la décharge. Toutefois, nous avons remarqué qu'il existe une différence de longueur ΔL_f entre la première décharge et les décharges suivantes, et cela pour le même niveau de tension. Nous remarquons que la première décharge est plus longue que les décharges suivantes. L_f diminue progressivement à chaque application de la tension et se stabilise au bout de 4 ou 5 décharges successives. Cette tendance à la diminution de la longueur finale est observée quels que soient le niveau de tension et le type d'huile. Il est important de noter que la charge associée à chacune des décharges (Q_n) présente la même tendance à la baisse.

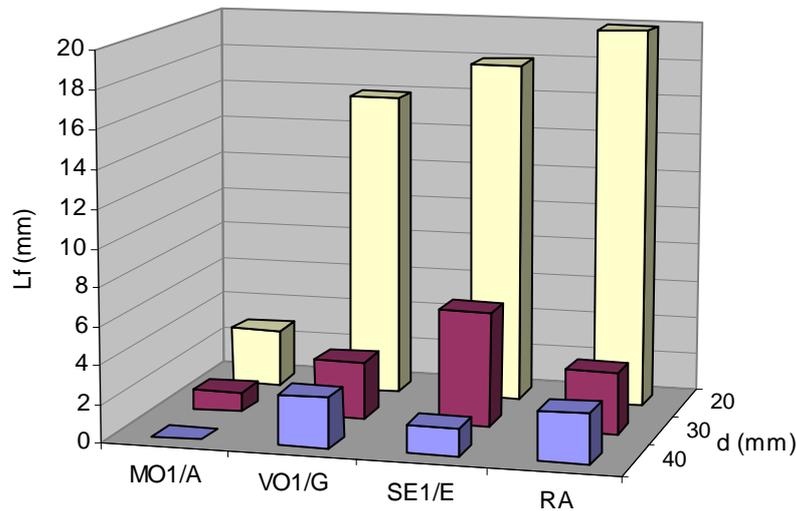


Figure 5.7 a : Représentation sous forme de diagramme de l'évolution de la longueur finale des streamers en fonction de la distance inter électrodes ; $U = -95$ kV.

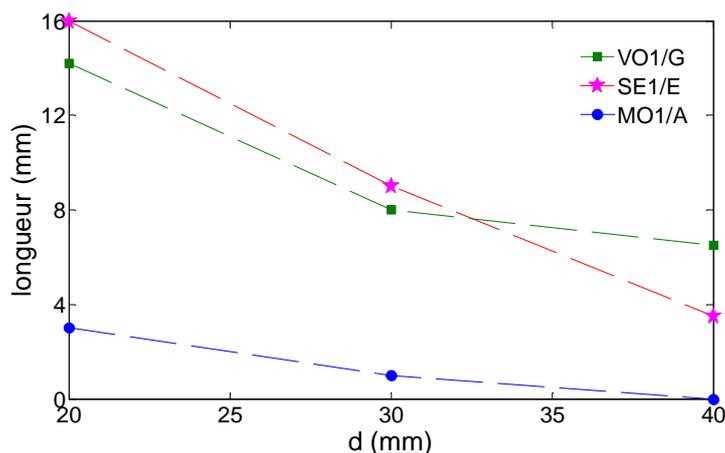


Figure 5.7 b : Représentation sous forme de courbe de l'évolution de la longueur finale des streamers en fonction de la distance inter électrodes, $U = -95$ kV.

Enfin, la longueur finale des décharges L_f diminue lorsque l'intervalle inter électrodes augmente (Figure 5.7). Ceci indiquerait que le champ local et le champ moyen influent sur la propagation des streamers.

5.3.3 Courants et charges électriques associés aux streamers

5.3.3.1 Courant associé aux streamers

Les courants associés aux streamers sont très similaires dans toutes les huiles étudiées et ce pour les deux polarités. Les figures 5.8 et 5.9 montrent quelques exemples d'enregistrement de courants de streamers positifs et négatifs se propageant respectivement dans les huiles minérales et esters.

Nous remarquons que les courants sont constitués d'impulsions très courtes ; les charges correspondantes varieraient 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. Notons que le premier pic de courant enregistré correspond au courant capacitif de la décharge du générateur.

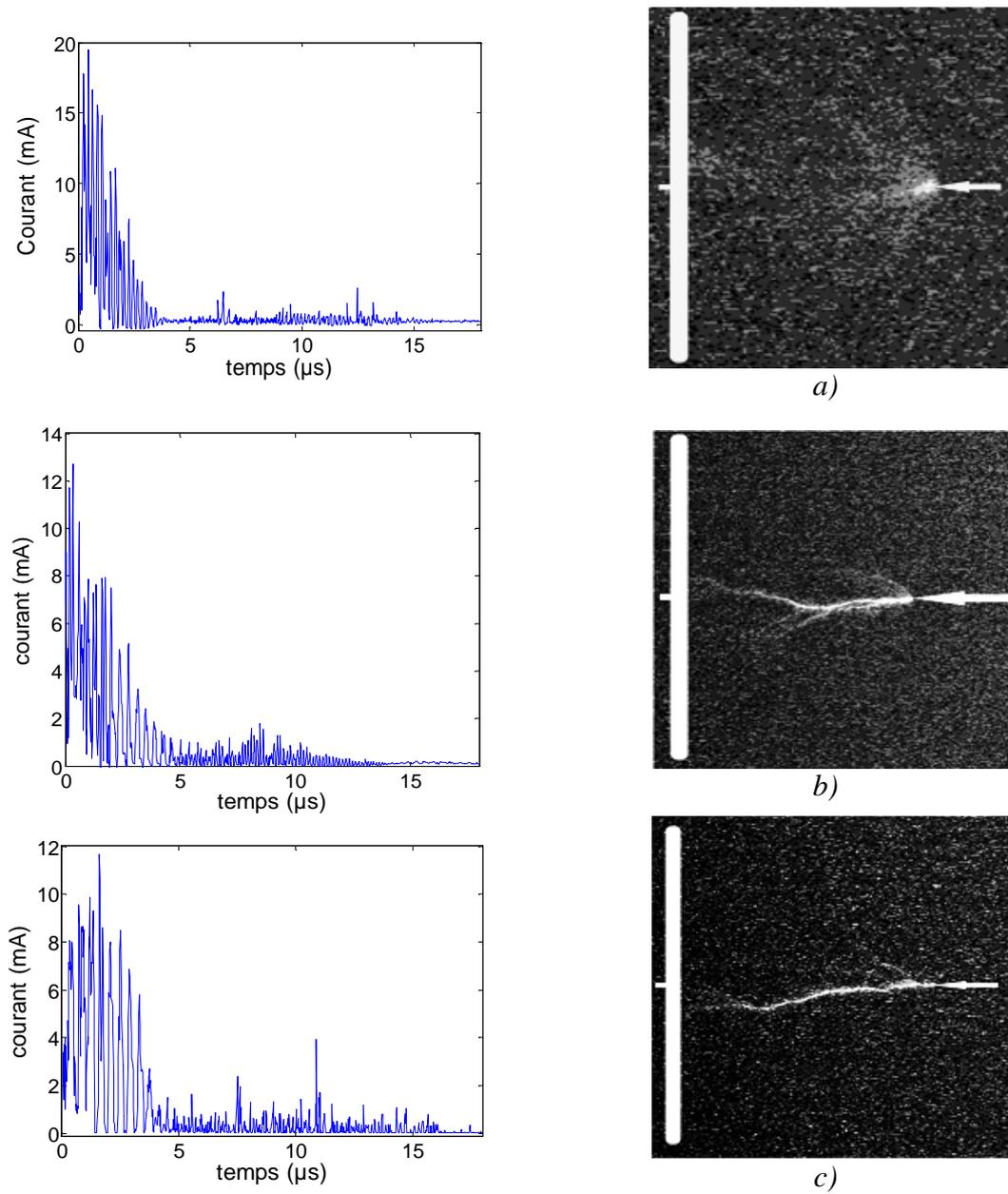


Figure 5.8 : Courants de streamers mesurés en polarité positive, $U=60 \text{ kV}$, $d=20 \text{ mm}$
a) MO1/A, b) VO2/F, c) SE1/D

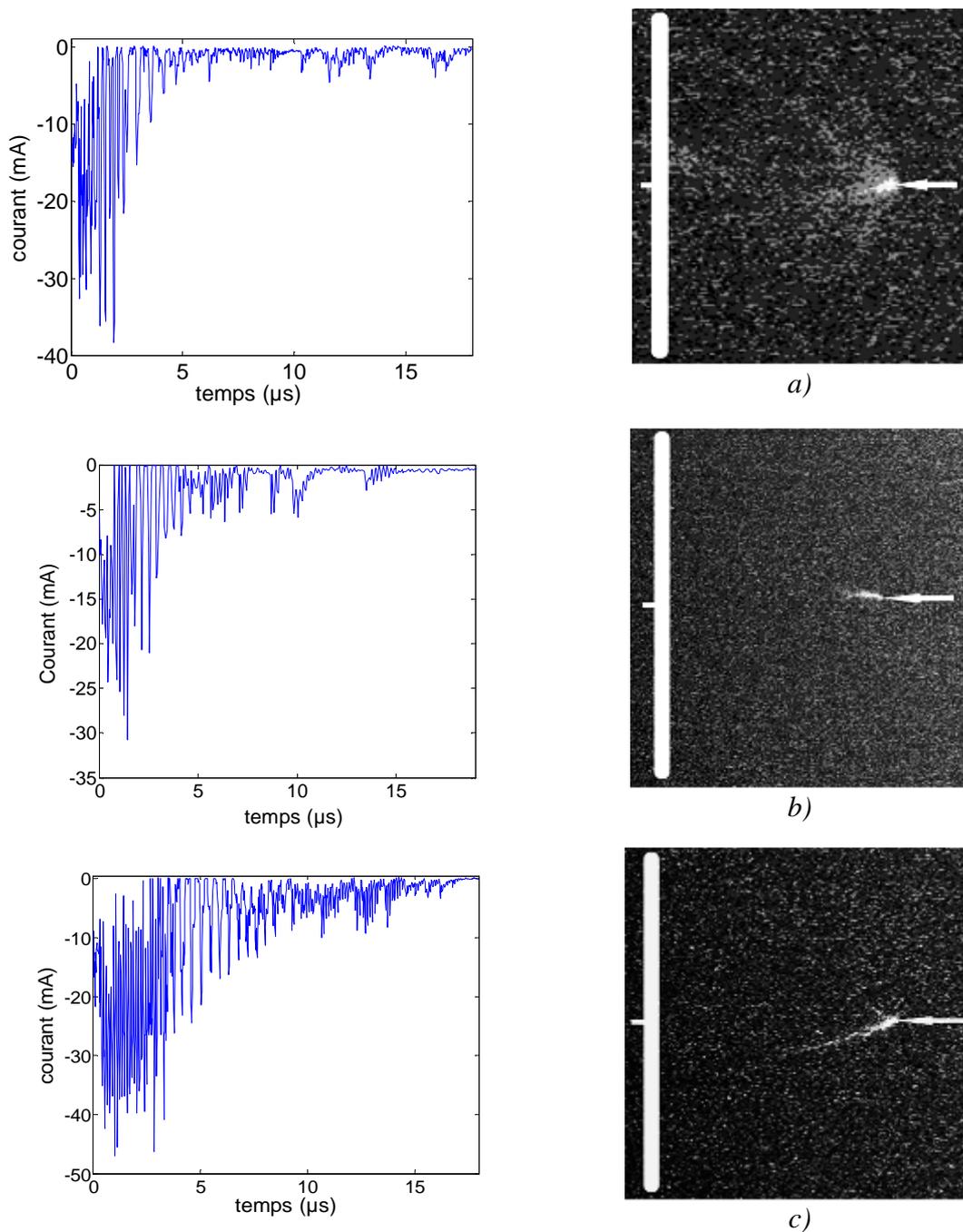


Figure 5.9 : Courants de streamers mesurés en polarité négative, $U = 80 \text{ kV}$, $d=20 \text{ mm}$
 (a) MO3/C, (b) VO4/H, (c) SE1/D.

5.3.3.2 Charge électrique associée aux streamers

L'augmentation de la tension appliquée a pour effet d'augmenter l'amplitude des courants de streamer. Par conséquent, la charge totale Q_T obtenue par l'intégration du courant

augmente au cours de la propagation du streamer jusqu'à atteindre une valeur maximale Q_{Tmax} une fois que la propagation s'arrête (Figure 5.10).

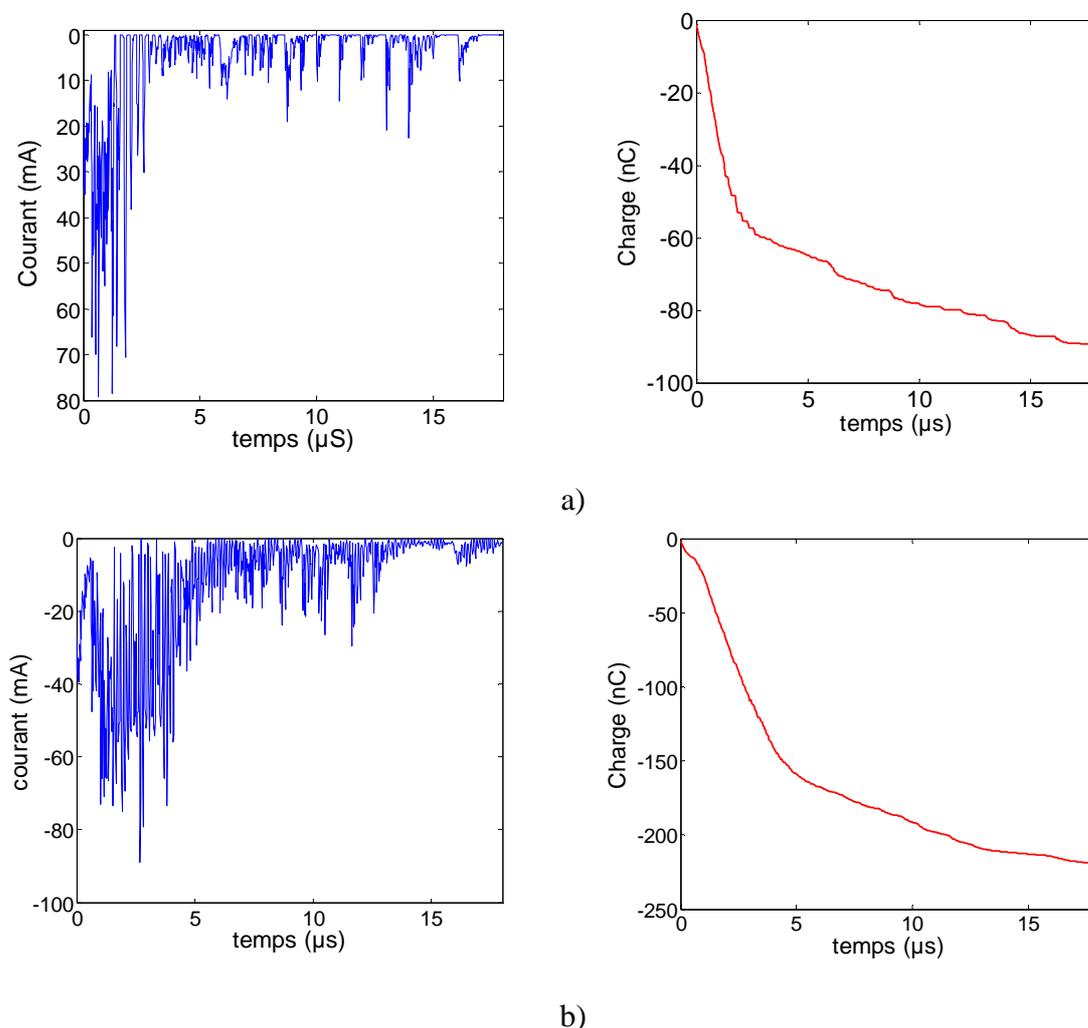


Figure 5.10 : Charge associée de streamers mesurés en polarité négative
 $U = -80 \text{ kV}$, $d = 20 \text{ mm}$, (a) MO4/B, (b) VO4/H

Nous remarquons que pour une tension donnée, les charges totales sont plus importantes en polarité positive qu'en polarité négative. En polarité négative, elles sont plus importantes dans les huiles végétales que dans l'huile minérales (Figure 5.11).

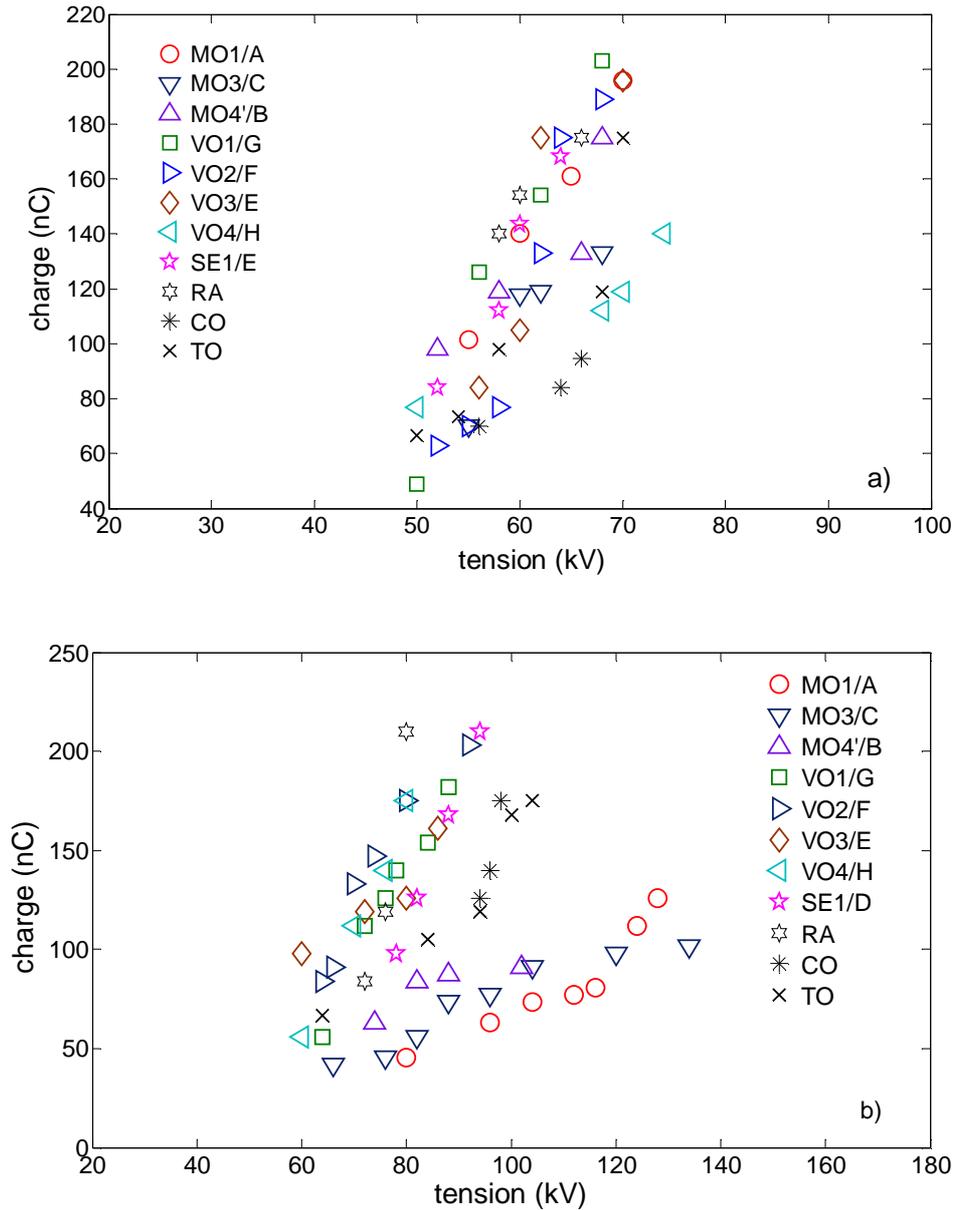


Figure 5.11 : Charge totale de streamers mesurés en deux polarités, $d=20\text{mm}$,
(a) positive et (b) négative.

5.3.4 Vitesse des streamers

L'enregistrement des courants (ou de la charge) 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 5.12). Nous remarquons que la vitesse moyenne augmente avec la tension appliquée et ce pour les deux polarités. Elle varie entre 0.4 et 1.2 km/s, selon la tension appliquée.

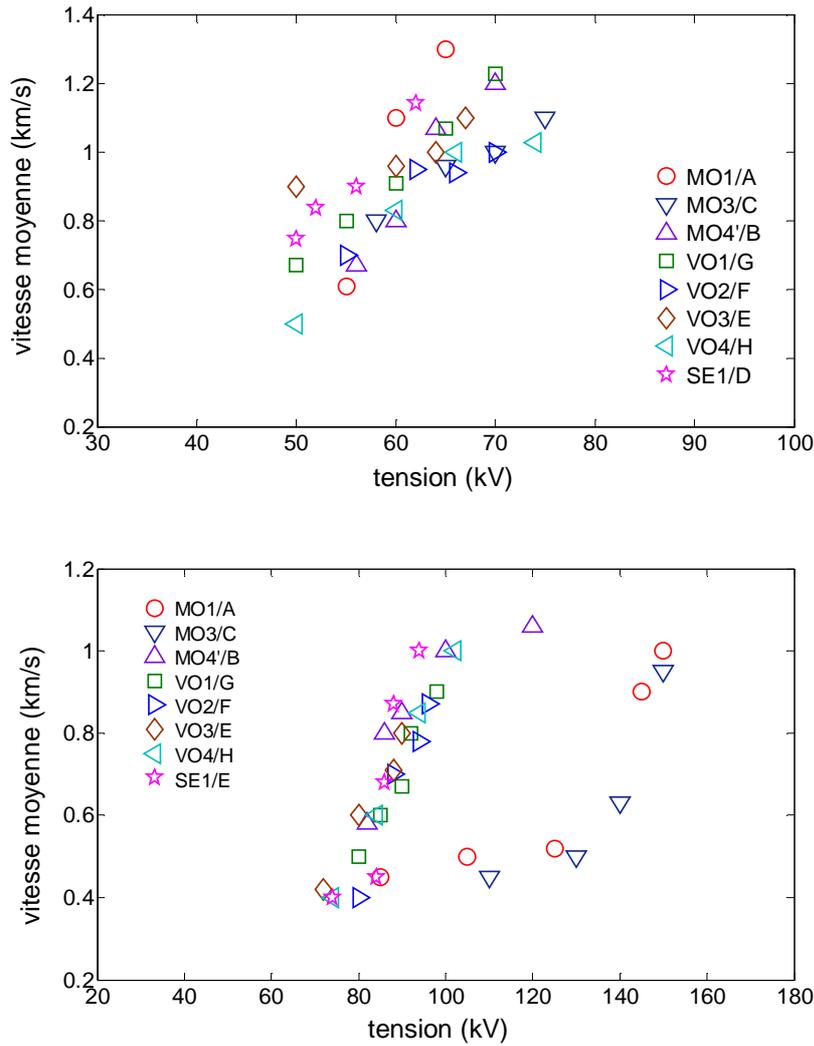


Figure 5.12 : Vitesse moyenne des streamers en polarité (a) positive et (b) et négative.

Les vitesses de propagation moyenne et instantanée peuvent être calculées en utilisant le modèle électro-énergétique proposé par Beroual [31]. Ce modèle tient compte de toutes les formes d'énergie pouvant être dépensées dans le développement des streamers : vaporisation, décomposition, énergie capillaire due à l'interface liquide – gaz, déplacement et ionisation. Ce modèle établit une relation entre le courant, la charge, la vitesse et le mode de propagation des streamers. Ainsi, la vitesse d'un déplacement partiel du streamer (ou vitesse instantanée) est donnée par la relation.

$$v_j = K_j q_j \quad (5.2)$$

Avec

$$K_j = \left(\frac{\beta}{\varepsilon \cdot \rho} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{\pi \cdot r_j^2} \right) \quad \text{et} \quad q_j = \int i_j dt \quad (5.3)$$

Où r_j , v_j , et q_j sont respectivement le rayon de la branche 'j', sa vitesse et sa charge ; ρ est la masse volumique de la phase gazeuse et β est la fraction de l'énergie totale dédiée au déplacement du streamer, sa valeur est généralement comprise entre 10 et 20%.

Pour estimer la vitesse moyenne du streamer dans le cas général, le modèle tient compte du mode de propagation. Ceci dépend de la durée des impulsions de courant et du temps entre deux impulsions successives.

Soit

$$t_j = t_{pj} + t_{0j} \quad (5.4)$$

où t_{pj} est le temps de propagation de la branche j et t_{0j} le temps de pause entre deux impulsions.

La longueur partielle de propagation du streamer l_j durant t_j sera :

$$l_j = v_{pj} t_{pj} + v_{0j} t_{0j} \quad (5.5)$$

Avec v_{pj} et v_{0j} : les vitesses durant t_{pj} et t_{0j} .

Par ailleurs

$$l_j = v_{mj} t_j \quad (5.6)$$

où v_{mj} est la vitesse moyenne de l_j .

d'où

$$v_{mj} = \left(\frac{t_{pj}}{t_j} \right) v_{pj} + \left(\frac{t_{0j}}{t_j} \right) v_{0j} \quad (5.7)$$

Il apparaît que la vitesse est d'autant plus élevée que t_{0j} est faible.

Si $\left(\frac{t_{0j}}{t_j} \right) \rightarrow 0$, alors $v_{mj} \rightarrow v_{pj}$

et la longueur totale du streamer l_s (en supposant qu'elle est pratiquement égale à la somme des déplacements partiels) est égale à :

$$l_s = \sum_{j=1}^n l_j = v_{ms} \sum_{j=1}^n t_j \quad (5.8)$$

où v_{ms} est la vitesse moyenne et l_s la longueur du streamer..

d'où

$$v_{ms} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n t_j} \sum_{j=1}^n (v_{pj} t_{pj} + v_{0j} t_{0j}) \quad (5.9)$$

avec

$$v_{pj} = K_j q_{pj} \quad ; \quad q_{pj} = \int i_{pj} dt \quad ; \quad v_{0j} = K_j q_{0j} \quad ; \quad q_{0j} = \int i_{0j} dt \quad ;$$

i_{0j} est le courant de conduction entre deux impulsions successives (i.e. courant de conduction) et i_{pj} le courant de l'impulsion j .

En pratique $v_{0j} \approx 0$

et

$$v_{ms} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n t_j} \sum_{j=1}^n v_{pj} t_{pj} \quad (5.10)$$

Ainsi,

$$v_{ms} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n t_j} \sum_{j=1}^n K_j q_{pj} t_{pj} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n t_{pj}} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\beta}{\varepsilon \rho} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{\pi r_j} \right) q_{pj} t_{pj} \quad (5.11)$$

En supposant que t_p est le même pour chaque branche, on obtient :

$$v_{ms} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{\beta}{\varepsilon \rho} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1}{\pi r_j^2} \right) \sum_1^n q_{pj} \quad (5.12)$$

Par conséquent, 3 cas sont possibles :

a) n et t_{0j} diminuent : la vitesse moyenne augmente avec q_j ; le streamer est plus filamenteux et sa vitesse moyenne tend vers sa valeur maximum. La fréquence d'impulsions et la vitesse moyenne du streamer sont d'autant plus élevées que le temps de pause entre impulsions est court. La propagation tend à devenir continue. Pour un streamer constitué d'une seule branche ($n=1$) dont le courant correspondant comporte une seule impulsion, la vitesse moyenne sera égale à la vitesse maximum :

$$v_{ms} = v_1 = v_{max}.$$

La vitesse sera d'autant plus élevée que la charge q_j sera élevée.

b) (t_{of}/t_{pi}) augmente. Le temps entre deux déplacements partiels consécutifs augmente, la fréquence des impulsions de courant diminue, et la propagation du streamer sera discontinue. Sa forme sera celle d'un buisson. Sa vitesse moyenne à travers l'intervalle inter électrode décroît et sa valeur dépendra de q_j .

c) (t_{of}/t_{pi}) décroît. La fréquence des impulsions de courant augmente et le courant tend à avoir une composante continue. La propagation du streamer tend à devenir continu et le streamer rapide. C'est le cas où la tension appliquée augmente et/ou un additif capteur d'électrons est ajouté au liquide. Il en résulte une augmentation de la vitesse moyenne du streamer.

Ainsi, en appliquant la relation 5.11, on obtient des valeurs de vitesses allant de quelques dizaines de mètres par seconde si le nombre de branches est important et des vitesses pouvant dépasser le km /s pour un nombre de branches plus faible.

La Figure 5.13 donne quelques valeurs de vitesses instantanées v_{ins} calculées à partir d'un exemple de charge associée à un streamer positifs se propageant dans l'huile VO3/E. La valeur moyenne de la vitesse sur les sauts indiqués est $v_m = 1.1 \text{ km/s}$.

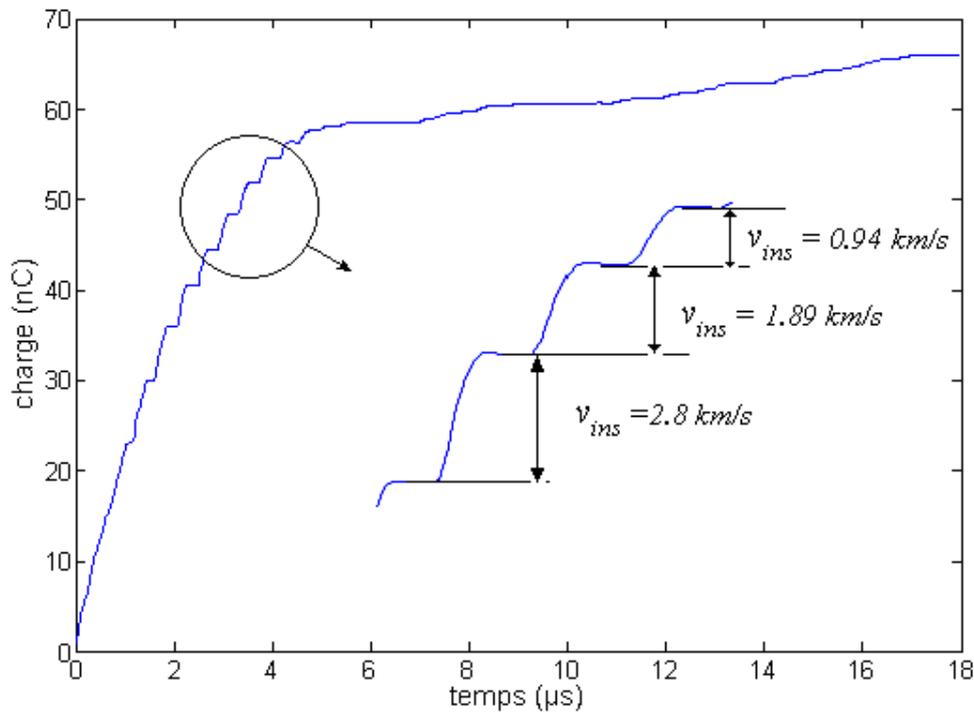


Figure 5.13 : Charge associée de streamers mesurés en polarité positive dans l'huile végétale VO3/E, $U = 55 \text{ kV}$, $d = 20 \text{ mm}$.

Notons que la vitesse moyenne peut être également estimée à partir de la composante continue du courant selon Harrold [139]. Dans ce cas, la vitesse est égale au rapport de la distance inter électrodes par le temps correspondant au maximum de la composante continue du courant.

5.4 Conclusion

Les longueurs finales (ou longueurs d'arrêt) des streamers positifs sont environ 10 fois supérieures à celles des streamers négatifs. Pour atteindre la même longueur finale, il faut beaucoup plus de tension en polarité négative qu'en polarité positive. Par conséquent, les tenues diélectriques sont plus élevées en polarité négative qu'en polarité positive.

Les vitesses moyennes varient de quelques centaines de m/s à quelques km/s. Ces vitesses dépendent également de la tension appliquée et de la géométrie des électrodes (rayon de courbure de la pointe et intervalle inter électrodes). Ces vitesses peuvent être déduites à partir des oscillogrammes de courant ou des charges (intégration du courant).

Si une valeur élevée de la charge du streamer correspond à une conductivité importante du canal de décharge, c'est la longueur finale qui est la plus importante pour indiquer si le streamer aura une issue fatale (claquage) ou non. Dans les mêmes conditions expérimentales, c'est l'huile où la longueur des streamers est la plus courte qui aura la meilleure tenue diélectrique.

Sur la base des longueurs finales (d'arrêt) des streamers mesurées, les huiles minérales restent plus intéressantes du point de vue de la tenue diélectrique que les huiles végétales à l'exception de l'huile VO4/H qui présente une longueur finale plus courte en polarité positive que toutes les autres huiles dans les mêmes conditions expérimentales.

CHAPITRE 6

ÉTUDE STATISTIQUE DE LA TENSION DE CLAQUAGE

6.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude statistique de la tension de claquage en tension alternative et impulsionnelle. On suppose qu'à chaque niveau de tension d'essai U est attaché une probabilité spécifique p qu'un claquage se produise pour toute application particulière. Plusieurs essais sont nécessaires pour déterminer la fonction de distribution de p . Celle-ci est en général fonction de la valeur moyenne U_m et de l'écart type σ de la tension de claquage mesurée. Ces paramètres ainsi que l'expression de la fonction $p(U)$ sont déterminés à partir d'essais comprenant un grand nombre d'applications successives de tensions, à condition que ceux-ci ne changent pas significativement les caractéristiques de l'objet testé ou que l'on utilise un objet neuf à chaque application.

Dans ce qui suit, nous présentons d'abord les différents éléments et les dispositifs expérimentaux utilisés dans nos essais ainsi que les caractéristiques des échantillons isolants 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 ainsi que la méthode ACP (Analyse en Composante Principale). Nous présentons également les résultats de tension de claquage obtenus en impulsion de foudre (1.2/50 μ s).

6.2 Techniques expérimentales

La tension de claquage est mesurée dans des conditions similaires à celles de la norme CEI 60156 [62]. Les électrodes sont constituées de deux sphères de diamètre 12,5 mm, séparées par une distance 2.50 ± 0.05 mm. Les électrodes sont immergées dans une cellule de test de type Baur Dieltest contenant 0,4 litre d'huile. La tension est fournie par un transformateur de type Hipotronics 200 kV – 50 Hz – 60 kVA. 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 32 mesures, la tension de claquage est exprimée en valeur maximale (crête).

La viscosité des huiles esters (synthétiques et naturels) étant plus élevée que celle des huiles minérales [1], les temps de repos entre deux tests successifs sont plus long pour les huiles esters que pour les huiles minérales, ceci 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 deux claquages successifs est de 10 minutes pour les huiles esters et de 5 minutes pour les

huiles minérales. La tension est appliquée 15 minutes après remplissage de la cellule d'essais pour les huiles minérales et 30 minutes pour les huiles esters.

L'étude de la tension de claquage en impulsion de foudre est aussi effectuée sur la même cellule qu'en alternatif. La tension de claquage est mesurée avec la méthode de montée et descente (*up and down*) [140]. L'intervalle de tension entre deux chocs successifs est de 3 kV et le temps de repos est de 90 s. Les essais pour la détermination de la tension de claquage sont effectués également sur des séries de 32 mesures. Le même échantillon d'huile a été utilisé pour une série de mesures donnée.

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 DL32.

Tableau 6.1 : Propriétés des huiles testées

Huile	Type	Teneur en eau @ 20° C (ppm)	Teneur en eau relative @ 20°C (%)
MO3'	Minérale naphthénique, qualité standard, inhibée	5	~ 9
MO4'	Minérale naphthénique, qualité standard	5	~ 9
MO5	Minérale naphthénique, qualité standard (inhibée)	5	~ 9
SE1	Tétraester	52	~ 2
VO2	Triester	24	~ 2
VO3	Triester	51	~ 5
VO4	Triester	20	~ 2

Des huiles végétales brutes pour la nutrition (cuisine) issues de Colza (CO), de Tournesol (TO) et de pépins de Raisin (RA) sont également testées. Ces huiles non traitées (brutes), sont soumises à des séries de 20 tests.

6.3 Résultats expérimentaux

6.3.1 Histogramme de la tension de claquage

Les résultats de la tension de claquage mesurée sont montrés sur la Figure 6.1. On observe que les valeurs mesurées sont dispersées autour d'une valeur moyenne. Les valeurs les plus élevées apparaissent généralement au début des séries.

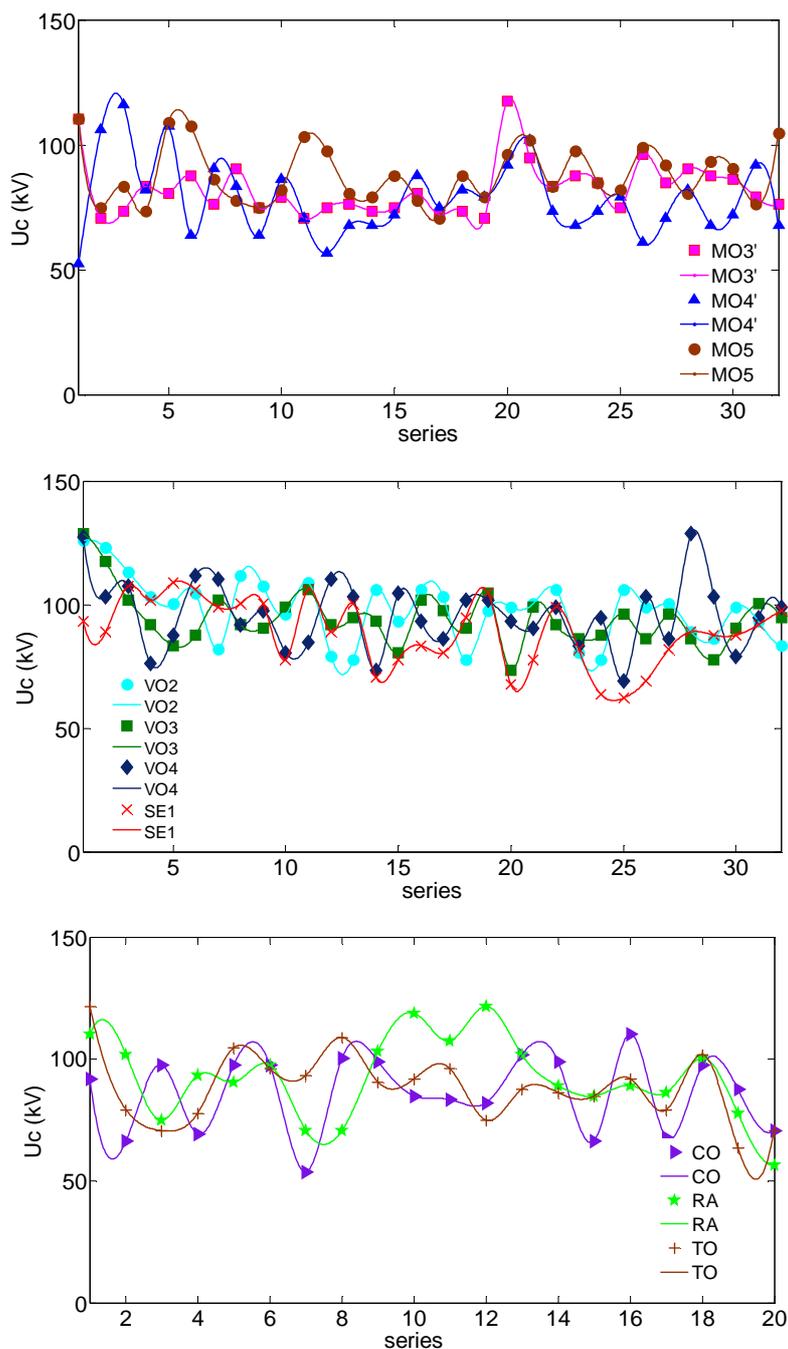
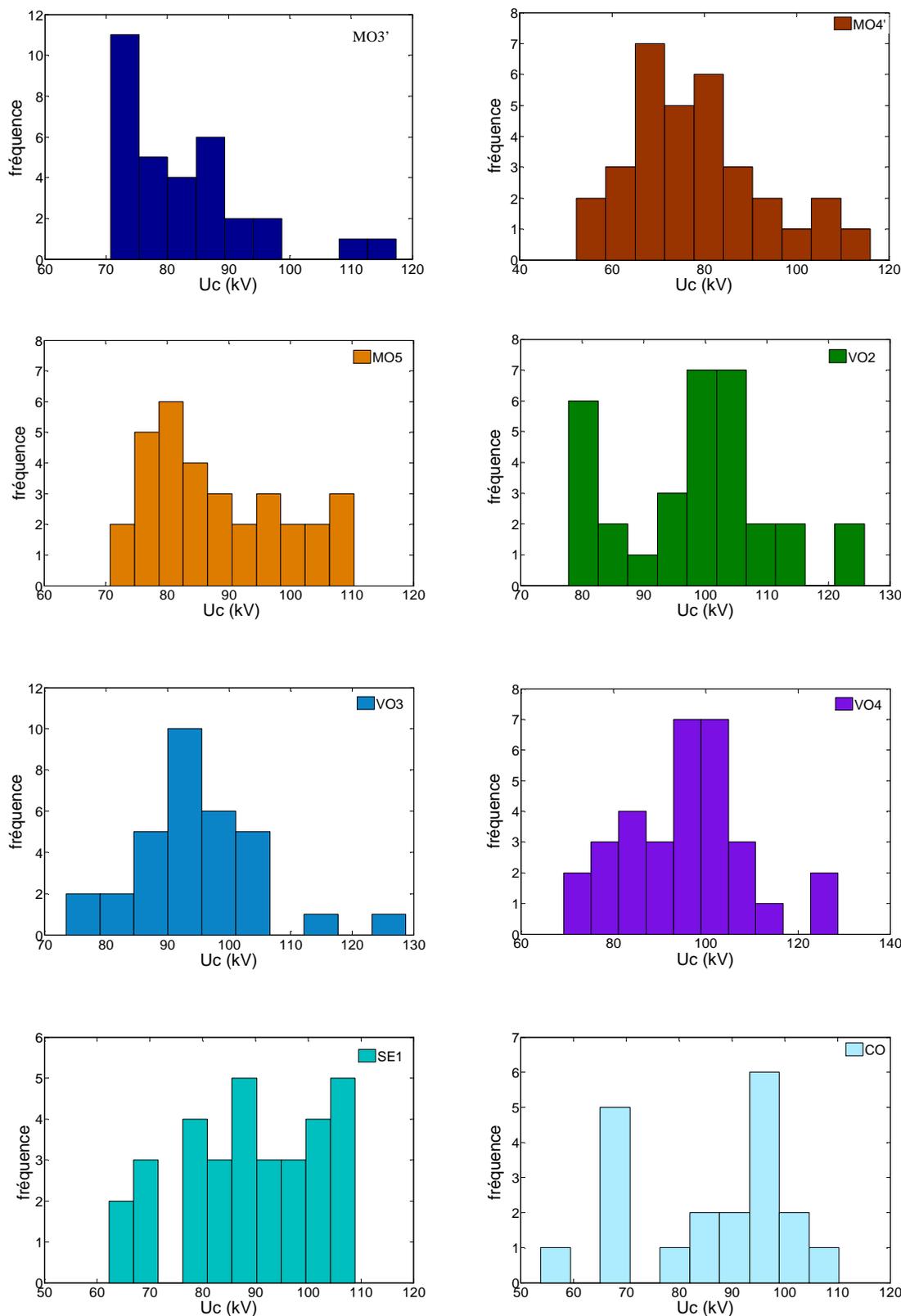


Figure 6.1: Distribution des tensions de claquage des huiles testées.

Les histogrammes de la tension de claquage sont présentés sur la Figure 6.2. Ils permettent de représenter la répartition de la tension de claquage avec un nombre différent de classes et ainsi de détecter certaines anomalies.



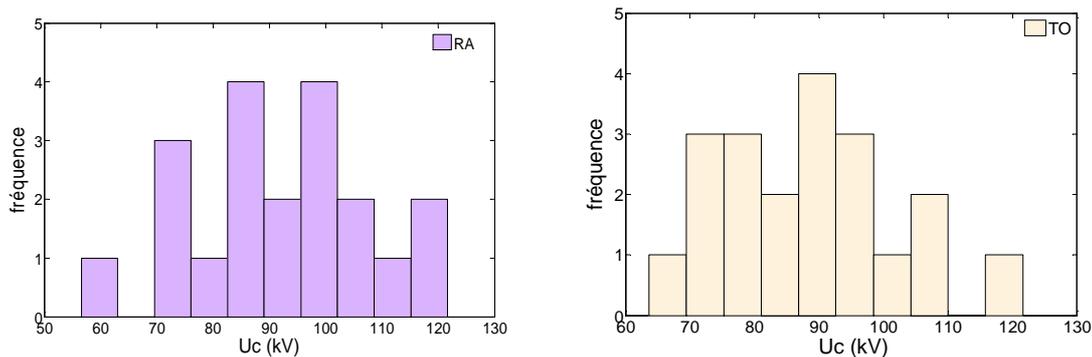


Figure 6.2 : Histogramme des tensions de claquage des huiles étudiées.

La Figure 6.2 montre que la plus faible tension de claquage observée dans les huiles végétales est plus élevée que celle des huiles minérales. La plus faible tension de claquage est trouvée dans les huiles végétales brutes, ce qui indique que le nombre de particules (impuretés) et l'humidité sont plus élevés dans celles-ci.

Dans la plupart des huiles étudiées, nous avons remarqué qu'il y avait au moins un intervalle de tensions où il n'y avait pas de claquage, ceci est dû vraisemblablement au nombre limité de séries de mesures.

La tension moyenne de claquage peut être calculée par la relation :

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n} \quad (6.1)$$

où

U_m : Tension de claquage moyenne,

U_i : Tension de claquage mesurée,

n : Nombre mesuré.

Nous avons remarqué que la tension de claquage moyenne dans les huiles végétales et l'ester synthétique est plus élevée que celle dans les huiles minérales et qu'elle est plus élevée dans les huiles végétales traitées que dans les huiles brutes pour la nutrition (Figure 6.3). La plus faible tension moyenne de claquage est observée dans les huiles minérales MO3', MO4' et MO5. Avec les huiles végétales, la teneur en eau n'a pas d'influence sur la tension de claquage tant que la teneur en eau relative est < 40% [141].

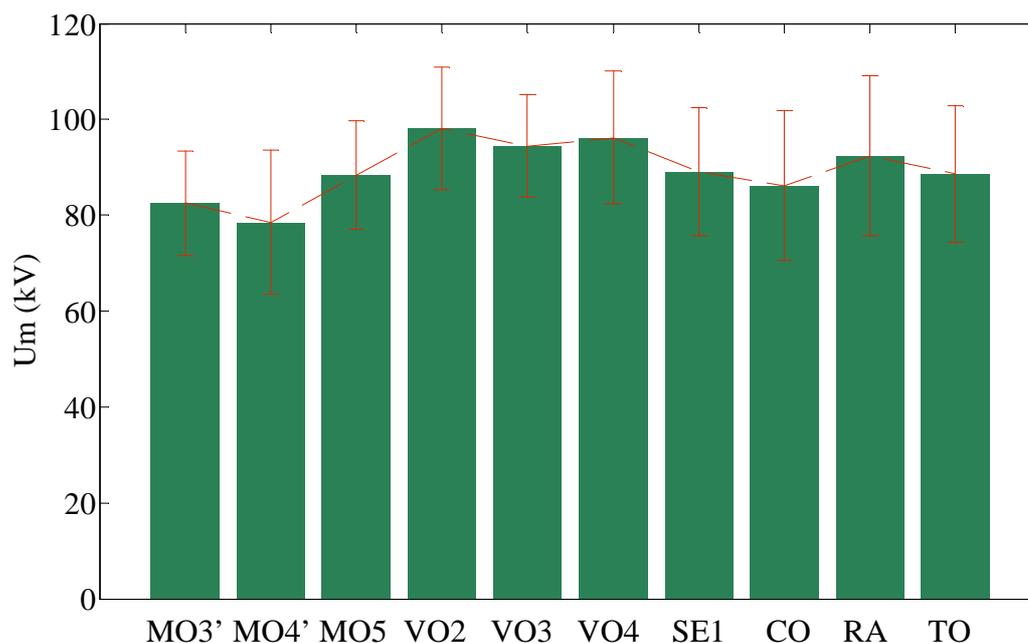


Figure 6.3 : Valeur moyenne et écart-type de la tension de claquage des huiles testées.

6.3.2 Test d'hypothèse

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 Shapiro Wilk [142]. 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.

La tension de claquage dans les huiles étudiées est généralement conforme à la distribution Normale sauf pour l'huile MO3'. Les huiles MO5, VO3 et CO, présentant une faible *p-value*, sont les moins conformes à cette distribution.

Tableau 6.2 : Test d'hypothèse de conformité à la distribution Normale.

Huile	W	p- value	Conformité à la loi Normale
MO3'	0.8534	0.0004913	<i>rejeté</i>
MO4'	0.9538	0.1846	<i>accepté</i>
MO5	0.9421	0.08566	<i>accepté</i>
VO2	0.9507	0.1505	<i>accepté</i>
VO3	0.9362	0.05862	<i>accepté</i>
VO4	0.6695	0.6695	<i>accepté</i>
SE1	0.952	0.1645	<i>accepté</i>
CO	0.9156	0.08144	<i>accepté</i>
RA	0.983	0.9665	<i>accepté</i>
TO	0.9825	0.9625	<i>accepté</i>

Le test d'hypothèse de conformité à la distribution *Weibull* a été effectué par le test Anderson-Darling [143]. 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 minérales (MO3', MO4', MO5) et quelques huiles végétales (VO3, CO) ne sont pas conformes à cette distribution.

Enfin, la tension de claquage dans cette étude correspond mieux à la distribution Normale que la distribution de *Weibull*. Des résultats similaires ont été également obtenus par d'autres chercheurs [73].

Tableau 6.3 : Test d'hypothèse de conformité à la distribution de Weibull.

Huile	A	p- value	Conformité à la loi Weibull
MO3'	0.8777	0.0207	<i>rejeté</i>
MO4'	0.8602	0.0231	<i>rejeté</i>
MO5	0.8638	0.0226	<i>rejeté</i>
VO2	0.5169	0.1791	<i>accepté</i>
VO3	1.4802	0.0007	<i>rejeté</i>
VO4	0.5254	0.1705	<i>accepté</i>
SE1	0.3665	0.4017	<i>accepté</i>
CO	0.7483	0.0432	<i>rejeté</i>
RA	0.1513	0.8428	<i>accepté</i>
TO	0.2987	0.5364	<i>accepté</i>

6.3.3 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 huiles végétales suivent généralement mieux la distribution Normale. À faible et grande probabilité, la tension de claquage est loin de la courbe d'ajustement ; elle est inférieure à la courbe d'ajustement dans le cas de faible probabilité. Par conséquent, la précision de conformité de la distribution, diminue lorsque la probabilité est faible ou grande. L'huile minérale MO5 présente un faible *p-value*, et est moins conforme à faible probabilité. Par contre, l'huile végétale VO3 présente aussi une faible *p-value* mais elle est moins conforme à grande probabilité.

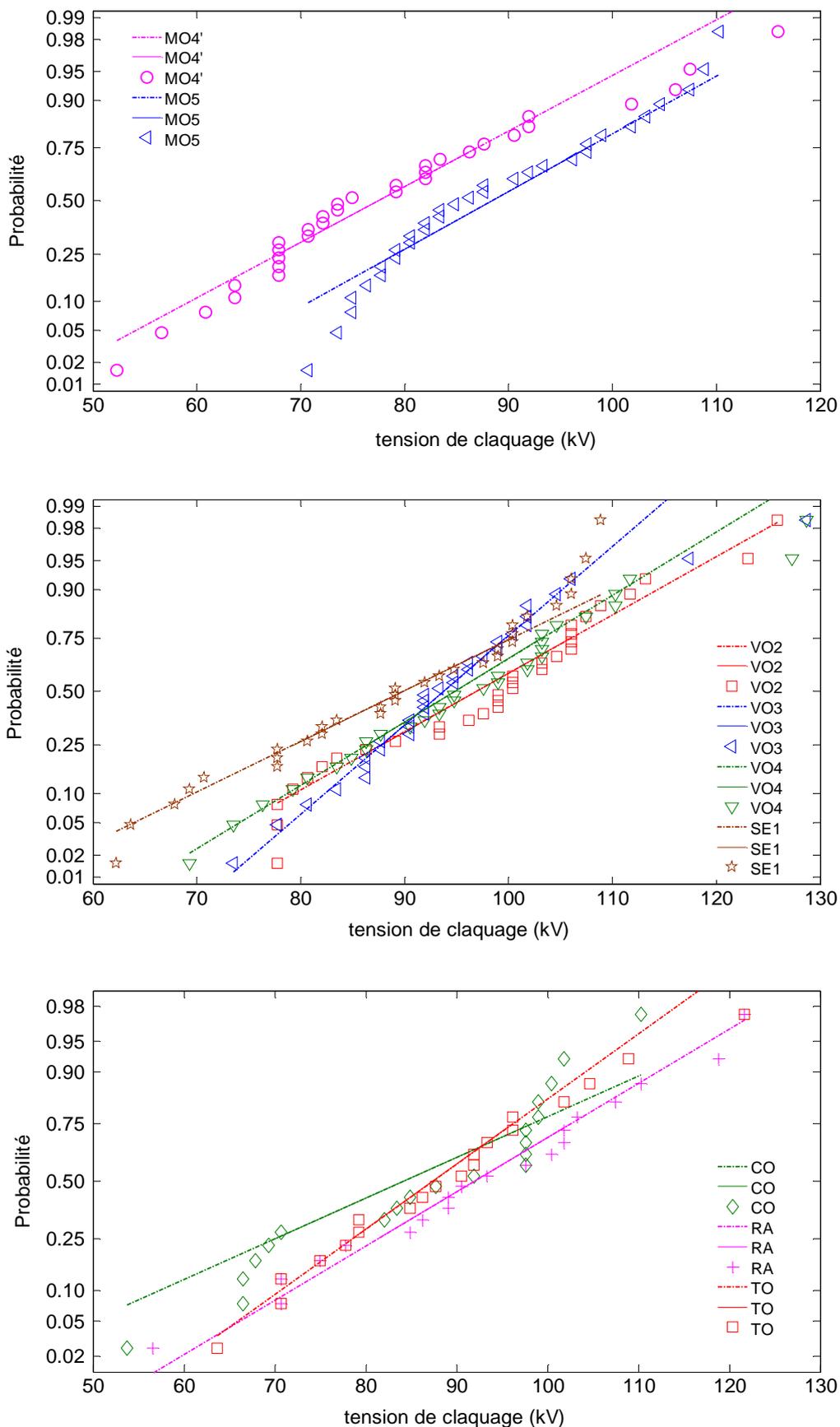


Figure 6.4 : Probabilité de la distribution Normale de la tension de claquage des huiles

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).

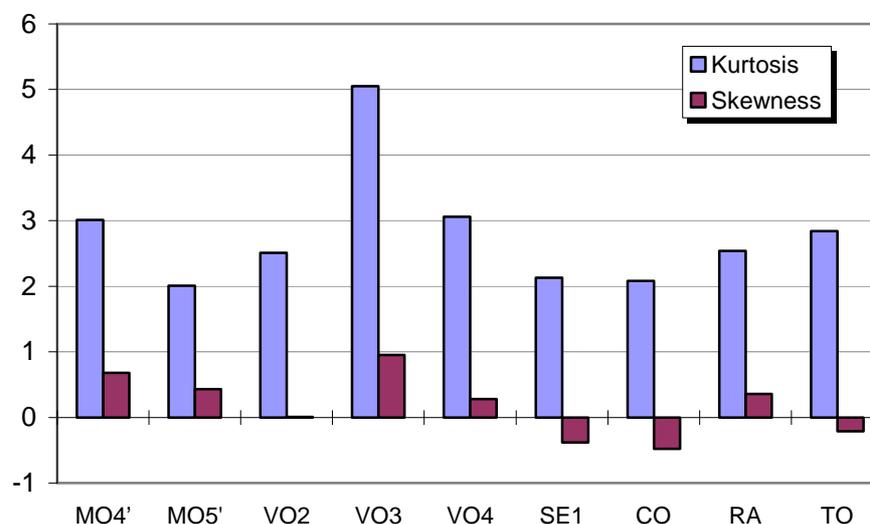


Figure 6.5 : Coefficients d'asymétrie et d'aplatissement de la distribution Normale de la tension de claquage des huiles.

Le coefficient d'asymétrie calculé, montre que la distribution de la tension de claquage est plus ou moins asymétrique. Le coefficient d'asymétrie des huiles minérales et végétales est positif ; cela indique que la distribution de la tension de claquage dans celles-ci est asymétrique à gauche de la valeur moyenne et loin de la courbe d'ajustement à grande probabilité (Figure 6.4 et 6.6). Par contre, le coefficient d'asymétrie de l'huile synthétique SE1 et des huiles végétales brutes pour la nutrition est négatif ; cela signifie que la distribution est asymétrique à droite de leur valeur moyenne et loin de la courbe d'ajustement à faible probabilité.

Le coefficient d'aplatissement des huiles étudiées est généralement inférieur à 3. Par conséquent les distributions sont platikurtiques (plates) et les queues comptent moins de points (ou *d'observations*) que dans une distribution Normale. Le coefficient d'aplatissement pour l'huile végétale VO3 est supérieur à 3 et la distribution pointue à la valeur moyenne, avec des queues de distribution épaisses et plus de points que dans une distribution Normale. Nous rappelons que les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement de la distribution Normale sont de 0 et 3.

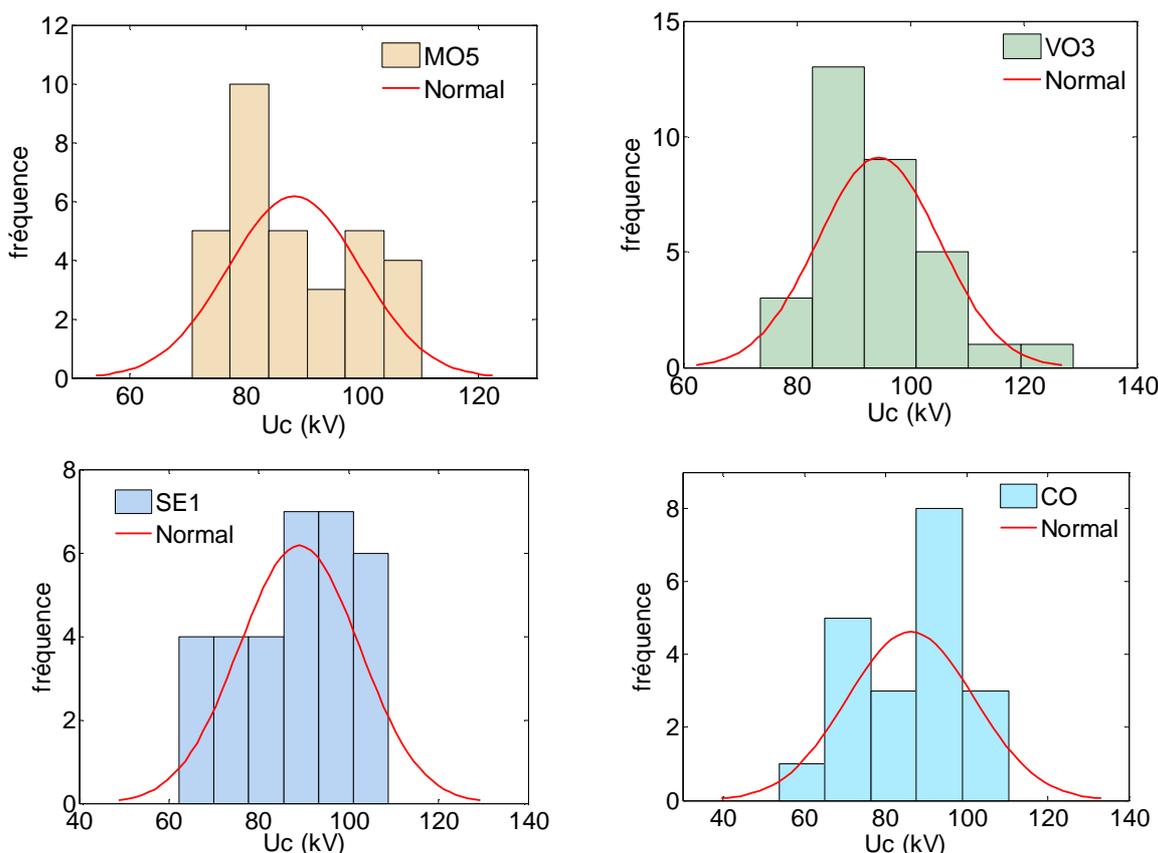


Figure 6.6 : Histogramme et densité de probabilité de la distribution Normale de la tension de claquage des huiles.

La conformité de la tension de claquage à la distribution statistique permet de déterminer 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 . La tension de claquage à faible probabilité permet aussi de déterminer le coefficient de sécurité d'un échantillon dans la conception des matériels électriques.

La dispersion de la tension de claquage mesurée par rapport à sa valeur moyenne est représentée par son écart-type (δ). Lorsque deux échantillons ont la même valeur moyenne de tension de claquage, celui pour lequel l'écart – type est le plus élevé, possède les valeurs mesurées les plus dispersées.

Le calcul des probabilités $U_{1\%}$, $U_{10\%}$ et $U_{50\%}$ de la tension de claquage et de l'écart type δ sont présentés sur la Figure 6.7. Nous avons remarqué, que pour des niveaux de risque 1%, 10% et 50% de claquage, les tensions de claquage dans les huiles végétales sont plus élevées

que dans les huiles minérales. À la probabilité 50%, la tenue diélectrique des huiles est généralement supérieure à 35 kV/cm ; en particulier dans les huiles végétales, elle est supérieure à 38 kV/mm. L'huile minérale MO4' présente la tenue diélectrique la moins intéressante par rapport aux autres huiles ; elle a la plus faible des tensions de claquage avec des risques 1%, 10% et 50% de probabilité.

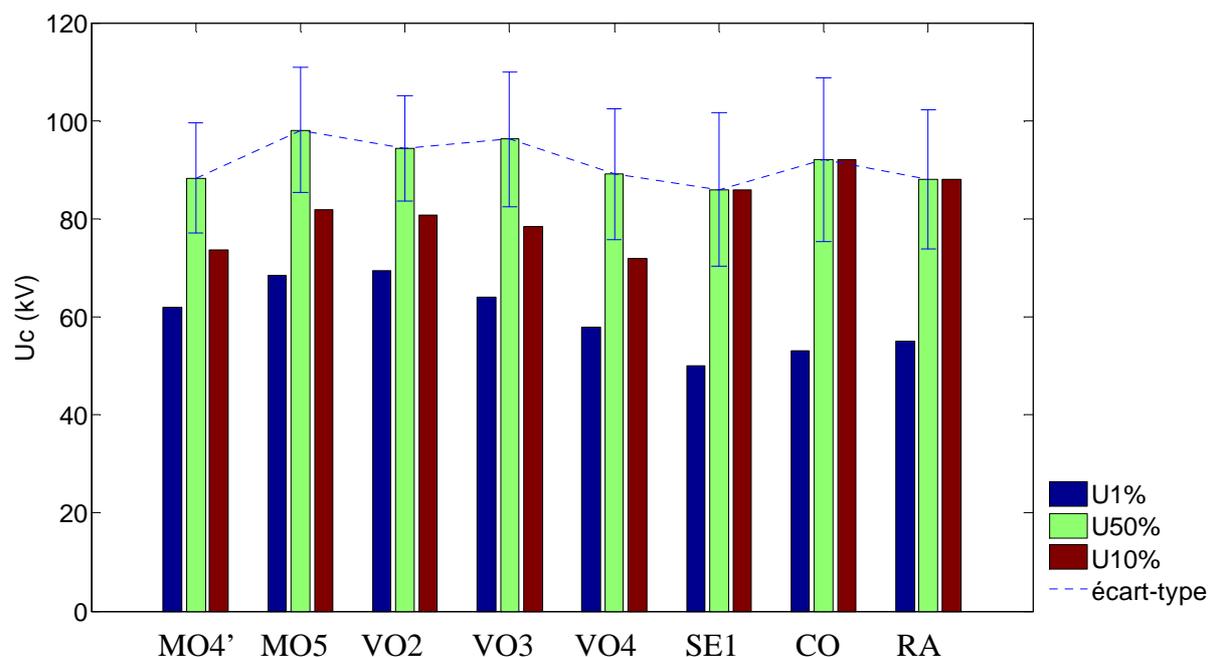


Figure 6.7 : Probabilité de la tension de claquage des huiles étudiées.

6.3.4 Comparaison entre la distribution Normale et la distribution Weibull

Dans le paragraphe 6.3.2, nous avons remarqué que la tension de claquage dans quelques huiles (VO2, VO4, RA, TO) suit les deux distributions : Normale et de *Weibull*. Dans ce paragraphe, nous comparons la probabilité statistique de la tension de claquage avec les distributions Normale et de *Weibull*.

Nous remarquons que la tension de claquage mesurée, correspond mieux à la distribution Normale qu'à la distribution de *Weibull*, en particulier dans la région à faible probabilité de la tension de claquage (Figure 6.8). Les mêmes résultats ont été également rapportés par d'autres chercheurs [73].

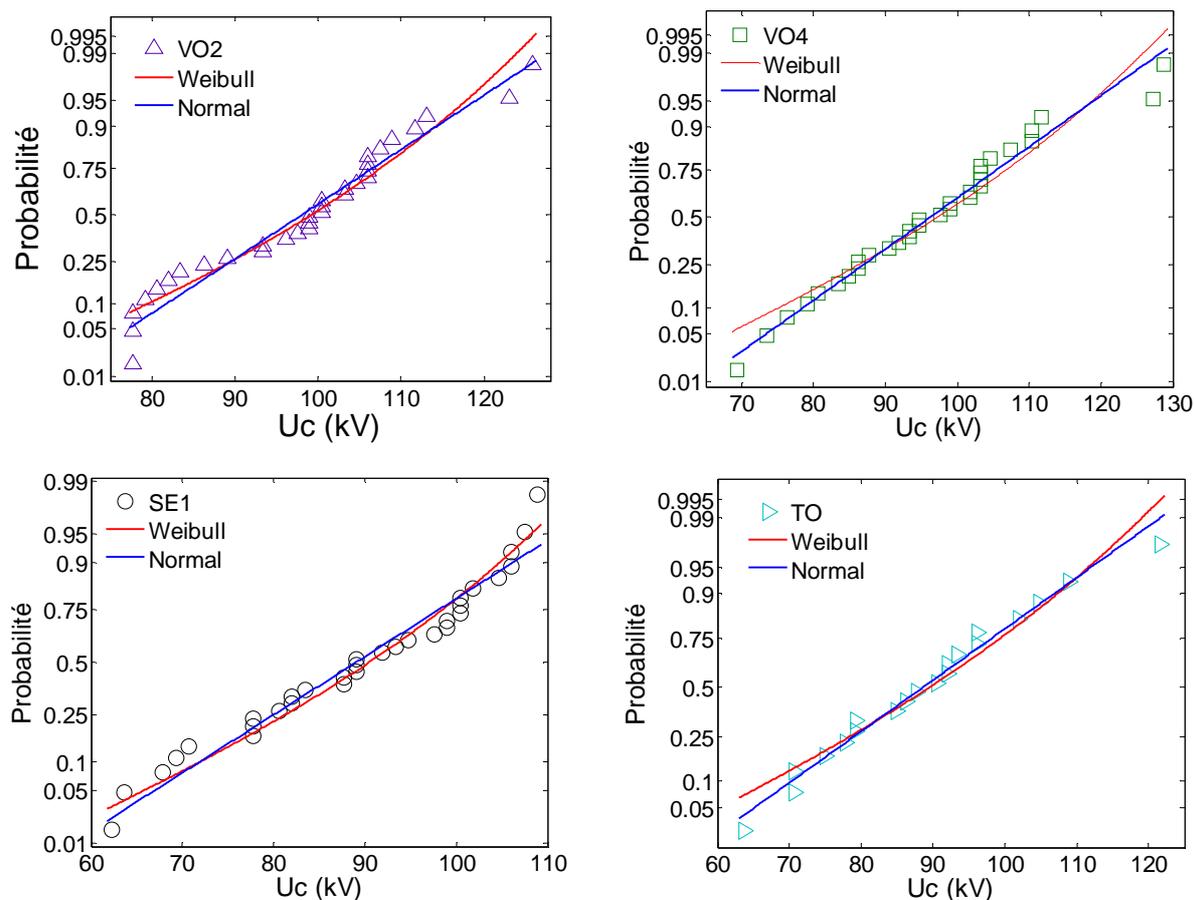


Figure 6.8 : Probabilité de la tension de claquage par les lois de distribution de Weibull et Normale.

6.3.5 Étude statistique de la tension de claquage avec la méthode ACP

La méthode ACP (Analyse en Composante Principale) est basée sur l'analyse de la variance de jeux de données. Elle consiste à calculer les distances vectorielles entre les échantillons de manière à pouvoir représenter graphiquement la distribution totale en fonction de la variance. La méthode ACP permet d'explorer les liaisons entre variables et les ressemblances entre individus, et la visualisation des individus et des variables (en fonction de leurs coopérations). L'analyse est effectuée grâce au logiciel R [144] à partir des résultats obtenus en tension de claquage sur les huiles traitées.

L'homogénéité des variances des jeux de données est d'abord vérifiée à l'aide du test de Bartlett [145] :

- Hypothèse H_0 : Homocédasticité globale des variances des tensions de claquage.
- Hypothèse H_1 : Il existe au moins deux variances différentes.

Le niveau de risque “ α ” retenue pour le test est de 5% ($\alpha = 0.05$). Les résultats du test indiquent une p-value = 0.4145 (Figure 6.9). L’hypothèse nulle est donc acceptée car le risque de rejeter à tort cette hypothèse est trop élevé (41%). Il est donc possible de conclure que la tension de claquage des huiles testées est issue de populations normales indépendantes des variances identiques.

Group Summary Table			
Group	Count	Mean	Std Dev
MO3'	32	82.4663	10.9216
MO4'	32	78.4889	15.0354
MO5	32	88.3	11.3816
VO2	32	98.0669	12.7285
VO3	32	94.4429	10.7567
VO4	32	96.2107	13.8354
SE1	32	89.0513	13.3947
Pooled	224	89.5753	12.6685
Bartlett's statistic	6.0782		
Degrees of freedom	6		
p-value	0.4145		

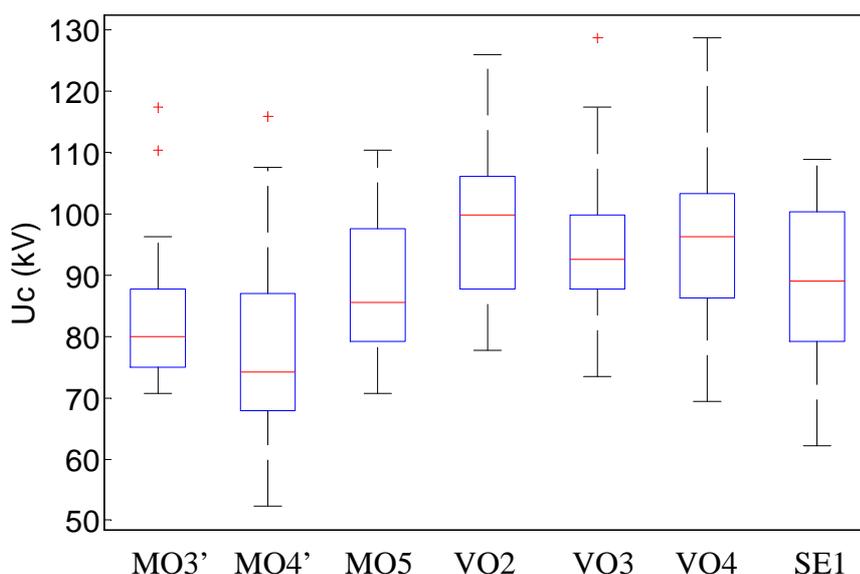


Figure 6.9 : Résultats de test d’homogénéité des variances en utilisant le test de Bartlett.

L’ACP (Figure 6.10) montre que l’axe 2 représente 23.33% et l’axe 1 représente 36,21% de la variabilité. L’axe 1 permet de distinguer 2 groupes : un groupe d’huiles minérales (MO3, MO4 et MO5) et une groupe d’huiles esters (VO2, VO3, VO4 et SE). L’axe 2 permet de faire la différence entre d’une part les groupes MO3’/MO5 et MO4 et d’autre part les groupes VO3/VO2 et VO4. Ces observations nous conduisent à émettre l’hypothèse de la présence

d'aditifs dans les huiles de la série 4 (MO4 et VO4) ou d'une différence fondamentale au niveau de leurs structures moléculaires par rapport aux autres. Quant à l'huile ester synthétique SE1, elle a un comportement au claquage intermédiaire, entre les huiles minérales et les huiles végétales.

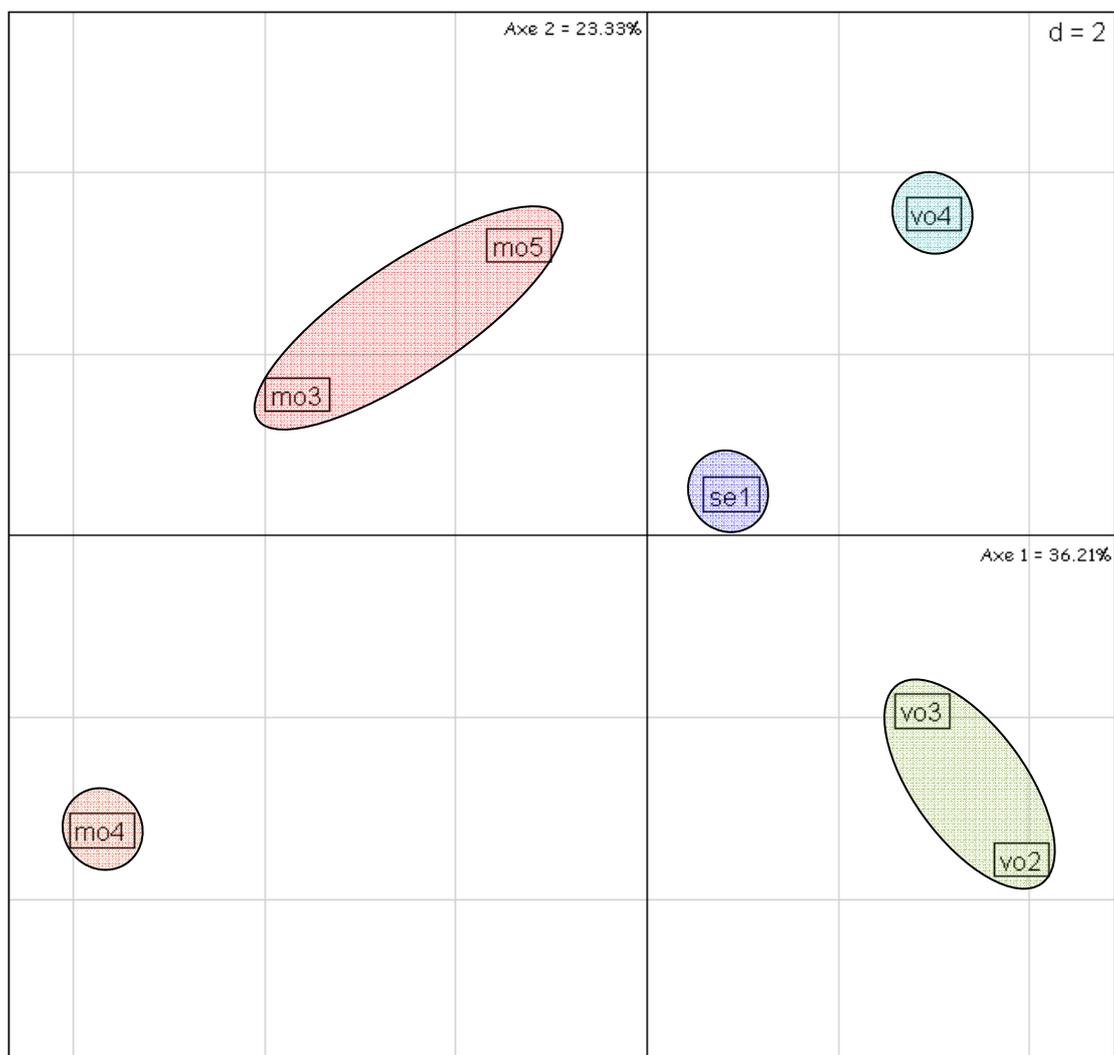


Figure 6.10 : Analyse en composantes principales de la tension de claquage des huiles testées.

6.3.6 Tension de claquage sous la tension de foudre

Les résultats de mesures de la tension de claquage en tension de foudre sont représentés sur la figure 6.11. Les tensions de claquage dans les huiles végétales sont comparables à celles dans les huiles minérales. Au vu de la tension de claquage, l'huile ester synthétique SE1 est la

meilleure du point de vue de la tenue diélectrique en impulsion que les autres huiles testées. La tension de claquage dans l'huile végétale brut TO est la plus faible ; ceci peut s'expliquer par des taux d'impuretés et de l'eau plus élevés dans celle-ci.

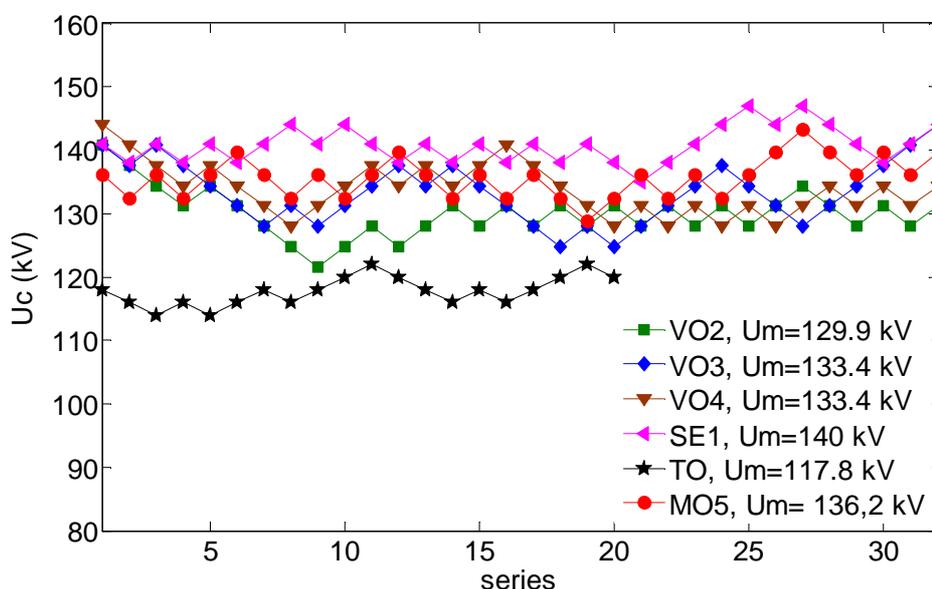


Figure 6.11 : Tension de claquage dans les huiles testées sous impulsion de foudre.

6.4 Conclusion

Les résultats expérimentaux ci-dessus nous ont permis de montrer que la tension de claquage des huiles isolantes, déterminée selon la méthode de la norme CEI 60156, suit généralement une distribution Normale. Les probabilités de claquage peuvent alors être déterminées suivant la loi de Normale en prenant un échantillonnage suffisamment grand ($n > 30$).

Les résultats obtenus ont montré également les tensions de claquage mesurées $U_{1\%}$, $U_{10\%}$ et $U_{50\%}$ sous tension alternative sont plus élevées dans les huiles végétales et ester synthétique que dans les huiles minérales pour les niveaux de risque 1%, 10% et 50%.

Il faut noter également que l'huile minérale, classée comme de haute qualité (CEI 60296), présente de meilleures tensions de claquage par rapport aux qualités standard et au même niveau que l'ester synthétique. Au vu de la tension de claquage, la rigidité diélectrique des huiles ester est généralement meilleure que celle des huiles minérales sous tension alternative pour le faible inter électrode (2,5 mm).

En comparaison avec la tension alternative, les tensions de claquage sont plus élevées sous impulsion de type foudre. La tension de claquage mesurée en alternatif présente une meilleure conformité à la distribution Normale par rapport à la distribution de type *Weibull*. Au vu de la tension de claquage, l'huile minérale MO4' est la moins intéressante.

CHAPITRE 7

ÉTUDE DES DÉCHARGES GLISSANTES SOUS TENSION IMPULSIONNELLE – RELATION ENTRE PROPRIÉTÉS DES MATERIAUX ET DIMENSION FRACTALE

7.1 Introduction

L'étude des caractéristiques des décharges aux interfaces solide/liquide est d'un grand intérêt pour les applications industrielles et en particulier dans les matériels de transport et de distribution haute tension. La connaissance de ces caractéristiques est d'une nécessité fondamentale pour la conception et le dimensionnement des structures isolantes solide/liquide. La tension de contournement de ces structures est l'une des principales caractéristiques rentrant dans le choix des constituants d'une structure donnée. À tension identique, la meilleure structure isolante serait celle où la longueur finale (ou d'arrêt) des décharges serait la plus courte.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude morphologique et structurelle des décharges surfaciques sous tension impulsionnelle de foudre 1.2/50 μs , en géométrie pointe – plan. 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 (huiles minérales et esters) 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 expérimentale. 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. Enfin, nous présentons l'analyse fractale des décharges surfaciques obtenues expérimentalement ainsi que l'influence de propriétés des huiles et des épaisseurs du solide sur la dimension fractale.

7.2 Techniques expérimentales

7.2.1 Dispositifs expérimentaux

Le dispositif expérimental est constitué d'une cellule d'essais comportant la structure isolante et le système d'électrodes entre lesquelles l'isolant solide est insérée, une source de tension impulsionnelle et le 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, ...). La tension est fournie par un générateur de chocs, type multiplicateur de Marx, le même que celui utilisé dans le chapitre 5. La figure 7.1 montre le schéma de l'ensemble du dispositif expérimental.

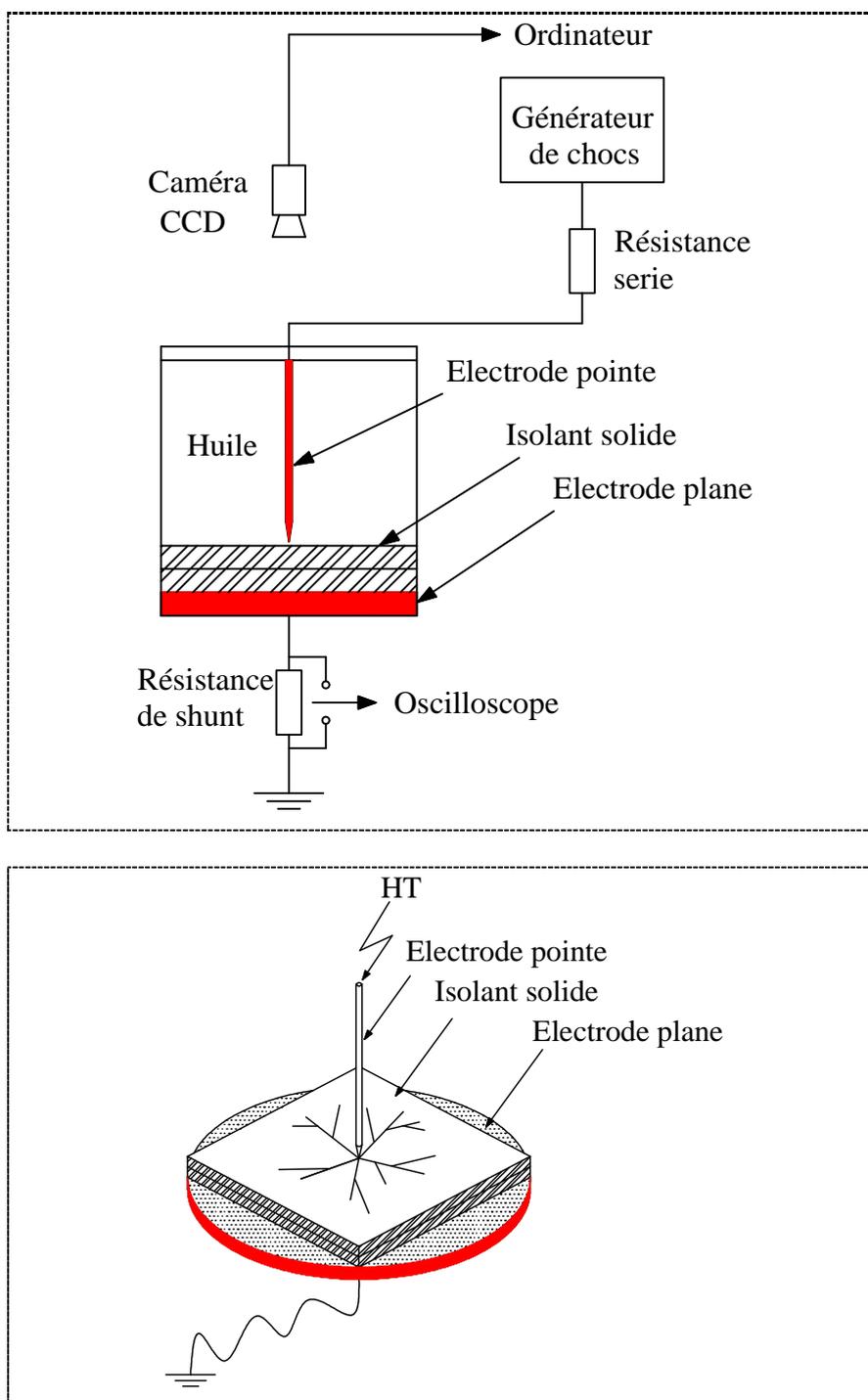
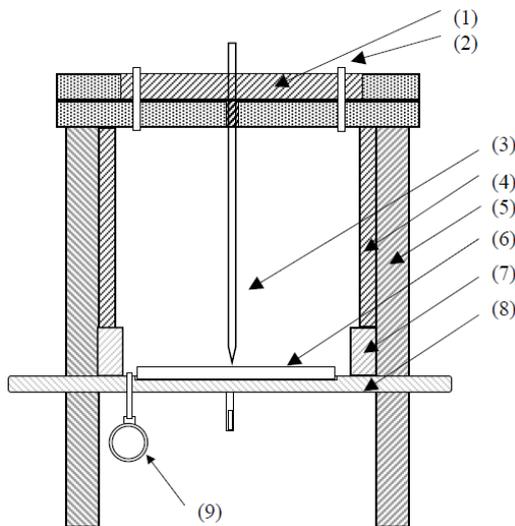


Figure 7.1 : Schéma du dispositif expérimental

La cellule d'essai est constituée d'un corps cylindre de 110 mm de hauteur et 90 mm de diamètre interne (Figure 7.2). 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.

Les essais sont effectués sous tension de foudre avec un système d'électrodes pointe – plan. L'électrode pointe est réalisée dans du tungstène thorié à 2% ; son rayon de courbure est de $10,0 \pm 0,5 \mu\text{m}$. La pointe est vérifiée au cours des essais et est remplacée dès que son profil devient différent de celui de départ. L'électrode plane est une plaque mince de laiton de 15 mm d'épaisseur et de 250 mm de diamètre. 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 80°C pendant plusieurs heures afin d'éliminer toute trace d'humidité.

La distance entre les échantillons solides et l'électrode pointe est de 1 mm.



- | | | |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------|
| 1- Couvercle en Plexiglas | 4- Cylindre en Téflon | 7- Cylindre en Plexiglas |
| 2- Amenée de gaz | 5- Tige en PVC | 8- Electrode plane |
| 3- Electrode pointe | 6- solide isolant | 9- Manomètre |

Figure 7.2 : Schéma et photographie de la cellule d'essai.

7.2.2 Liquides et solides utilisés

Les liquides isolants testés sont l'huile minérale MO1 et des huiles végétales de nutrition (brutes et non traitées) issues du Tournesol (TO), de pépins de Raisin (RA) et du Colza (CO). L'huile minérale MO1 neuve a été traitée (passage sous vide et filtration) bien que l'influence de l'humidité et des particules soit négligeable. Dans le chapitre 5, nous avons montré qu'il y avait peu de différence entre les huiles traitées et non traitées sur la propagation des streamers dans le volume des liquides.

Les échantillons de solide isolant testé sont des carrés de carton utilisé dans les transformateurs de puissance, de 75 mm de côté. Avant les essais, ces échantillons sont imprégnés dans les huiles à température ambiante pendant 48 heures (Figure 7.3). Nous disposons de deux épaisseurs de carton (fourni par un industriel), soient 2 et 3 mm. Pour réaliser des épaisseurs de 6 et 9 mm, nous procédons à la superposition de 2 ou 3 échantillons de 3 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.

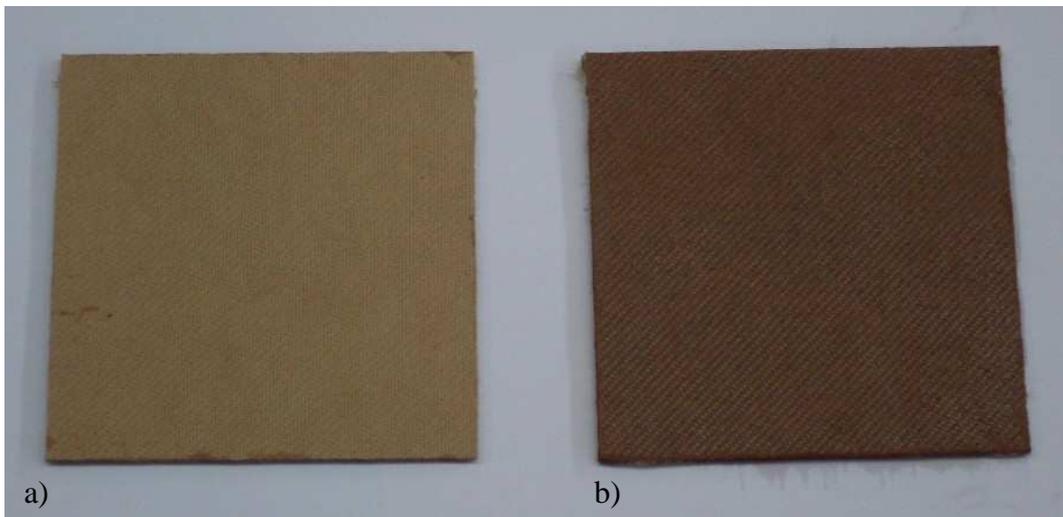


Figure 7.3 : Carton testé avant (a) et après imprégnation (b).

7.3 Résultats expérimentaux

7.3.1 Morphologie des décharges glissantes

D'une manière générale, les décharges ont un aspect plus ou moins radial. Les streamers, générées à la pointe, se propagent à la surface de l'isolant solide, du centre vers l'extrémité, décrivant un contour plus ou moins circulaire autour de la pointe. Leurs formes et leurs longueurs finales dépendent de la nature du liquide, de l'épaisseur du matériau solide, de l'amplitude et de la polarité de la tension appliquée.

7.3.1.1 Influence de la polarité de tension

Deux types de décharges sont observés selon la polarité de la tension :

- Les décharges négatives (générées à partir d'une pointe négative) sont constituées de ramifications arborescentes. Les branches de la décharge sont plus lumineuses à leurs bases qu'à leurs extrémités où on remarque la présence de points lumineux, témoins d'une intense activité d'ionisation (Figure 7.4). Cependant, la forme des décharges est assez différente de celle observée par Kebbabi et Beroual [107, 108] sur d'autres matériaux que le carton.

- Les décharges positives ont une forme différente de celles des décharges négatives ; elles ressemblent à celles observées par d'autres chercheurs sur d'autres matériaux isolants solides [107, 108]. Les branches de la décharge ont une structure sinueuse et ramifiée. Contrairement aux décharges négatives, certaines branches sont très lumineuses (Figure 7.5) témoignant d'une ionisation importante (énergétiques) qui expliquerait les traces observées sur certains échantillons.

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 augmente (Figure 7.6).

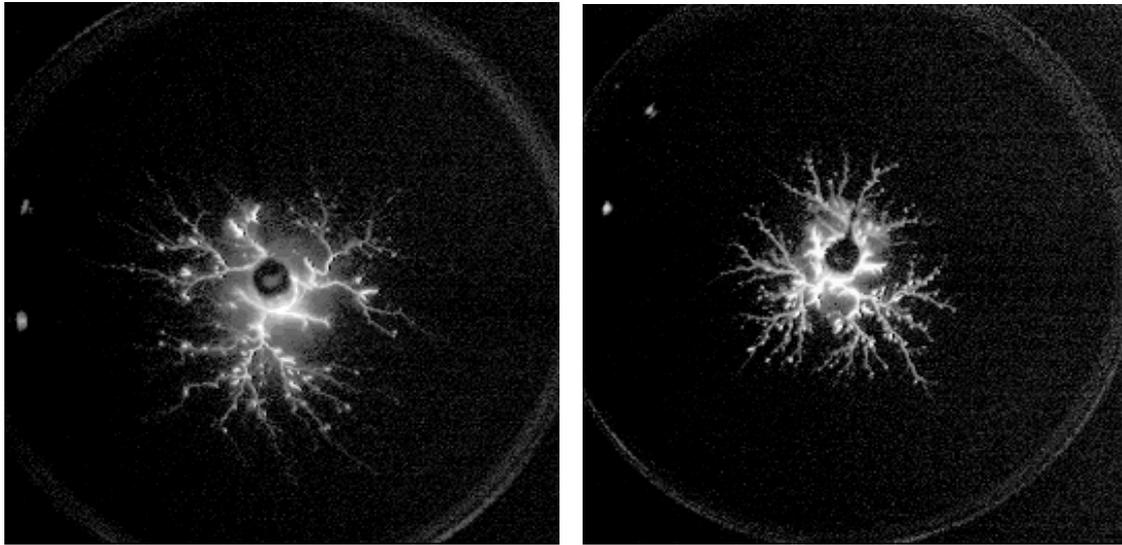


Figure 7.4 : Photographies de décharges glissantes obtenues en polarité négative, (a) MOI/carton (-55 kV), (b) Colza/carton (-44 kV) avec $e=2$ mm.

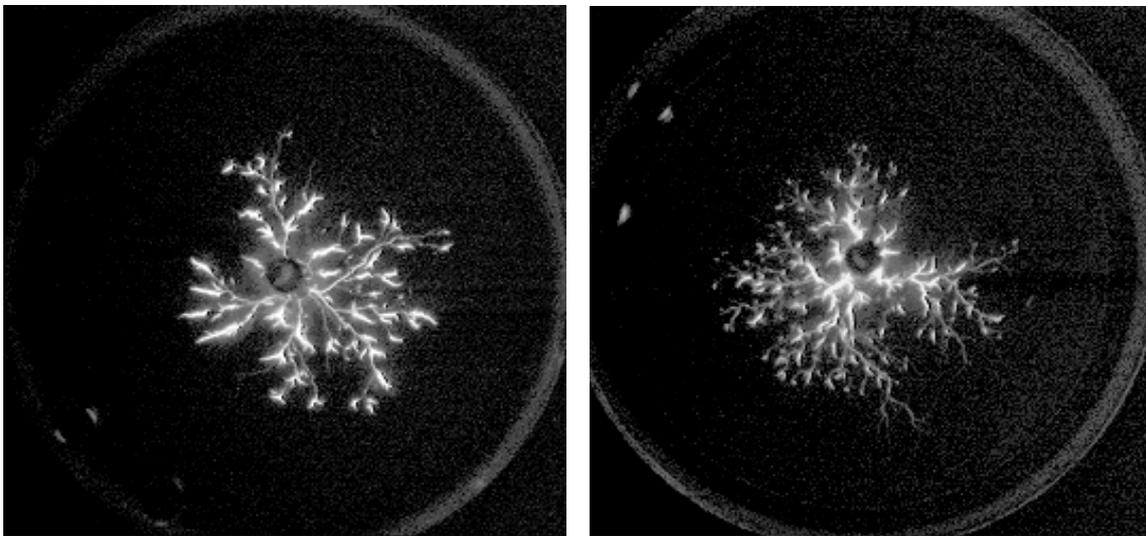


Figure 7.5 : Photographies de décharges glissantes obtenues en polarité positive, (a) MOI/carton (+45 kV), (b) Colza/carton (+36 kV) avec $e=2$ mm.

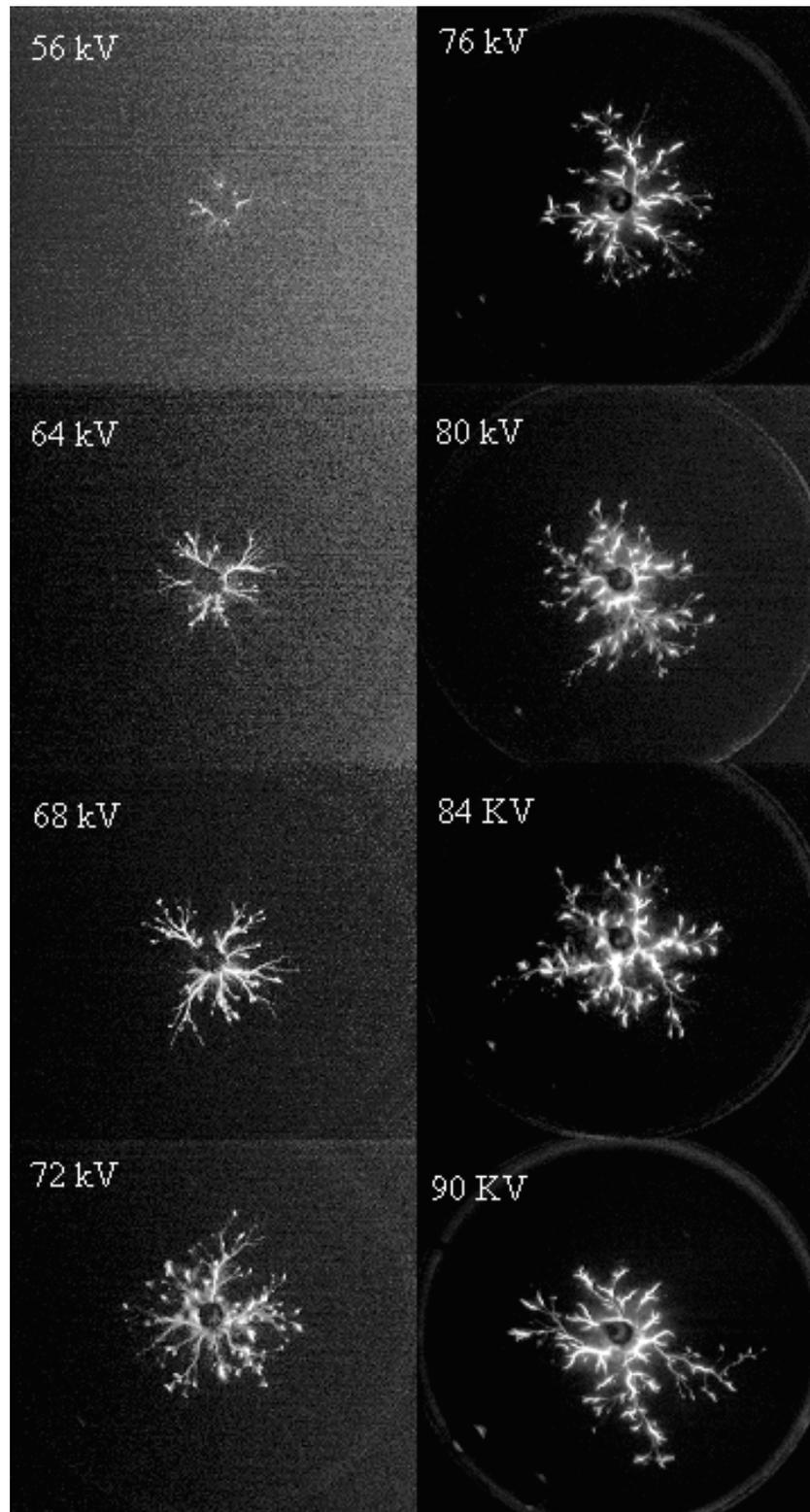


Figure 7.6 : Évolution de la longueur des décharges en fonction de tension obtenue en polarité positive, sur une interface MOI/carton avec $e=2$ mm.

7.3.1.2 Influence de la nature du liquide et de l'épaisseur du solide isolant sur la forme des décharges

Indépendamment de leur longueur finale, les décharges glissantes ont des formes similaires dans les différentes huiles étudiées et ce pour les deux polarités. La densité totale de branches dépend fortement de l'épaisseur du solide isolant, elle diminue lorsque l'épaisseur augmente. Ceci indiquerait que les phénomènes capacitifs jouent un rôle important dans la propagation. Les extrémités des branches et leurs ramifications forment un contour moins circulaire, centré sur l'électrode pointe lorsque l'épaisseur du solide augmente (Figure 7.7). Nous reviendrons sur ce point avec plus de détails dans le paragraphe 7.4, consacré à l'analyse fractale des décharges surfaciques.

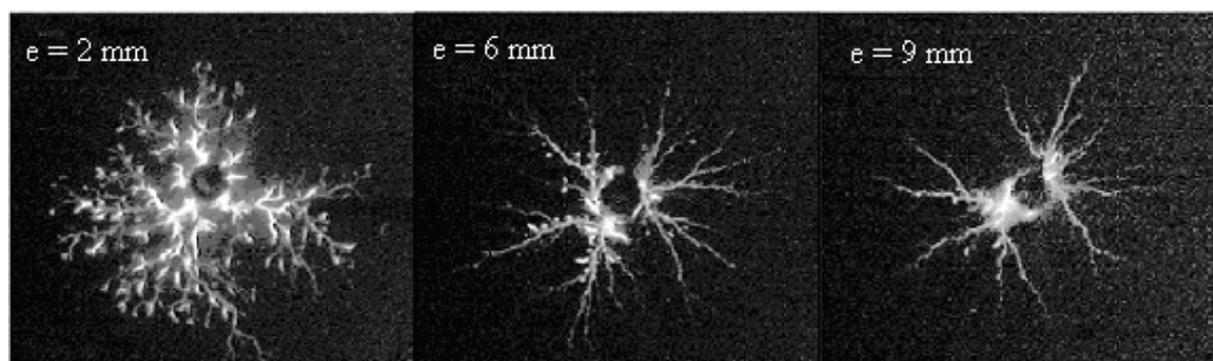


Figure 7.7 : Évolution des décharges en fonction de l'épaisseur du carton en polarité positive, sur une interface RA/carton avec $U= 70$ kV.

7.3.1.3 Influence de la permittivité diélectrique et champ électrique

La distribution du champ électrique, déterminée avec un code de calcul utilisant les éléments finis (Flux2D), montre que les permittivités diélectriques des matériaux ont une influence considérable sur la variation des composantes normale et tangentielle du champ électrique. Les résultats obtenus par simulation montrent que pour une tension de 20 kV, le champ maximum au voisinage de la pointe en présence de l'huile minérale est de 0.32 MV/cm, il est plus élevé qu'avec une huile ester où il est égal à 0.27 MV/cm (Figure 7.8). Cette différence est due au fait que le renforcement du champ au voisinage de l'électrode pointe est d'autant plus élevé que la différence entre les permittivités diélectriques du solide isolant et du liquide est élevée.

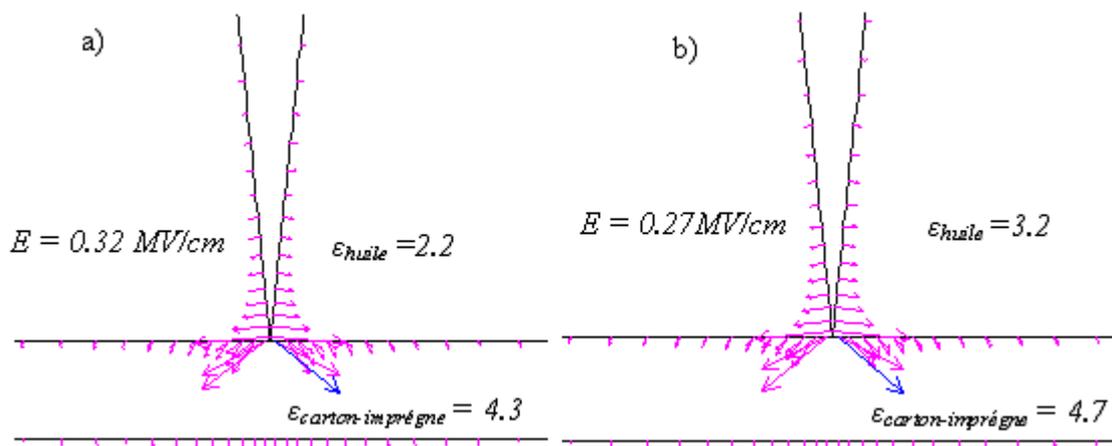


Figure 7.8 : Distribution du champ électrique au voisinage de la pointe, obtenue par simulation, pour une interface huile minérale/carton imprégné (a) et ester/carton imprégné (b) : la tension appliquée est $U = 15 \text{ kV}$ et l'épaisseur $e = 2 \text{ mm}$.

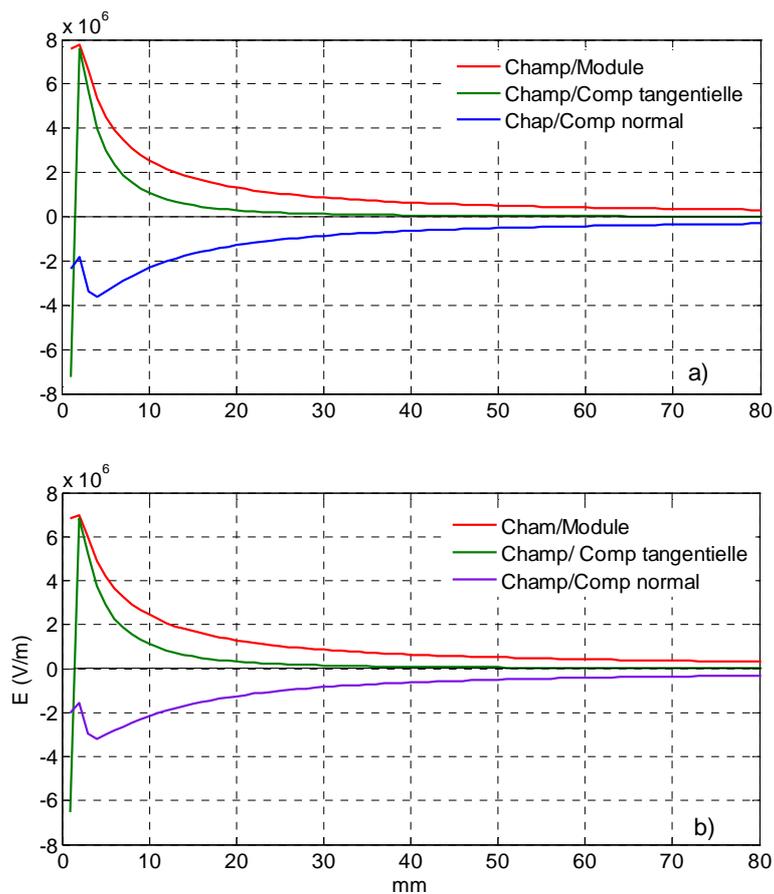


Figure 7.9 : Évolution du champ harmonique à la surface, obtenue par simulation, pour une interface huile minérale/carton imprégné (a) et ester/carton imprégné (b) : la tension appliquée est $U = 15 \text{ kV}$ et l'épaisseur $e = 2 \text{ mm}$.

On remarque également que les composantes normale et tangentielle du champ harmonique à la surface diminuent brutalement dès que l'on s'éloigne légèrement de la pointe (Figure 7.9)

7.3.1.4 Influence de la nature du liquide et de l'épaisseur du solide isolant sur la longueur finale des décharges.

Les décharges qui prennent naissance au voisinage de la pointe, se propagent radialement sur la surface du solide et s'arrêtent à une certaine distance de la pointe qu'on appellera "longueur finale L_f " ou "longueur d'arrêt L_f ". L'arrêt des décharges est une conséquence de la chute de tension entre l'électrode pointe et la tête de la décharge. La longueur finale dépend de l'amplitude de la tension appliquée, de l'épaisseur et de la nature des matériaux isolants.

- **Les facteurs entraînant des erreurs de mesures**

Le contour constitué par les extrémités des branches constituant la décharge et qui nous sert de référence pour la mesure des longueurs finales des décharges, est loin d'être un cercle parfait. En réalité, les branches constituant la même décharge peuvent être plus ou moins longues et par conséquent la forme circulaire de la décharge peut être plus ou moins régulière. À cette source d'erreurs supplémentaires, il faut ajouter également les erreurs induites par les instruments de mesures optiques.

Pour minimiser ces erreurs, nous avons pris un certain nombre de précautions lors de nos mesures, en particulier, en remplaçant systématiquement les échantillons diélectriques étudiés et l'électrode pointe, ce qui nous entraîne à réaliser un nombre d'essais plus important.

- **Dégradation de la surface du solide**

La répétition d'essais engendre la dégradation de la surface du solide isolant et la perte partielle de ses propriétés diélectriques. Ainsi, pour une tension donnée, les décharges observées sur un échantillon soumis à des contraintes répétitives, sont plus longues comparée à celle générées sur des échantillons neufs. Et la multiplication des décharges sur le même échantillon conduit inmanquablement au contournement de ce dernier à des amplitudes de

tension relativement basses. Toutefois, la dégradation de surface dépend fortement de la rigidité diélectrique du solide isolant, du nombre de décharges et de l'amplitude de la tension.

La figure 7.10 montre des exemples de décharges obtenues avec le même échantillon de carton d'épaisseur 2 mm. Nous remarquons qu'en se développant, les branches de la décharge suivent les mêmes trajectoires. Cela signifie que les décharges, en se propageant, laissent des traces (sillons ou empreintes) conductrices sur la surface du solide. Ces sillons sont empruntés par les branches des décharges qui suivent.

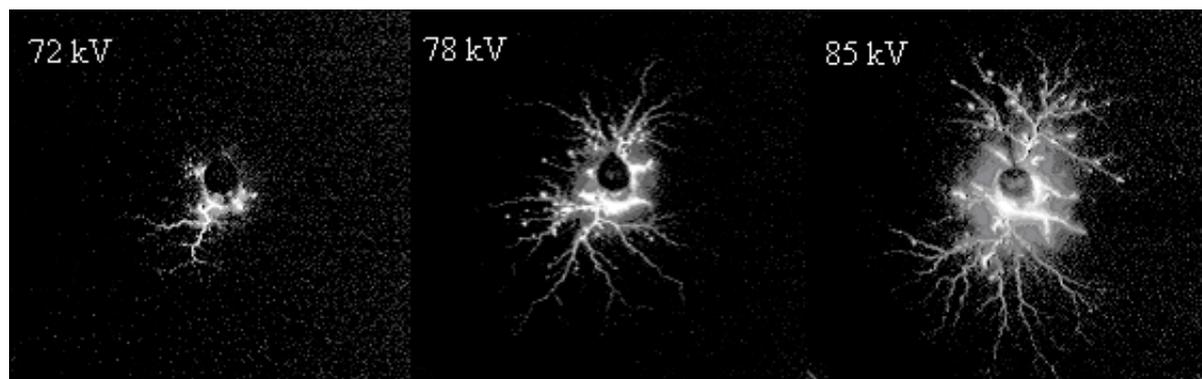


Figure 7.10 : Décharges glissantes en polarité négative, obtenues sur une interface MOI/carton ($e=2\text{mm}$) après plusieurs essais consécutifs. Les décharges empruntent les mêmes trajectoires, d'où une similitude des trois figures.

Dans le cas d'un contournement, les décharges laissent sur la surface du carton des canaux noirs (carbonisés). Ceci peut être expliqué par la propagation de streamers énergétiques (rapide) [109]. En effet, la grande densité de charge à la tête des streamers rapides, renforce l'interaction avec la surface (phénomène de polarisation de la surface) et par la même le contact entre les décharges et le carton ; l'énergie et donc la température élevée des décharges fait brûler rapidement et carboniser les fibres de cellulose. Cette dégradation est irréversible. Avec une mince épaisseur du carton, les décharges peuvent trouer le carton et conduire au claquage (Figure 7.11).

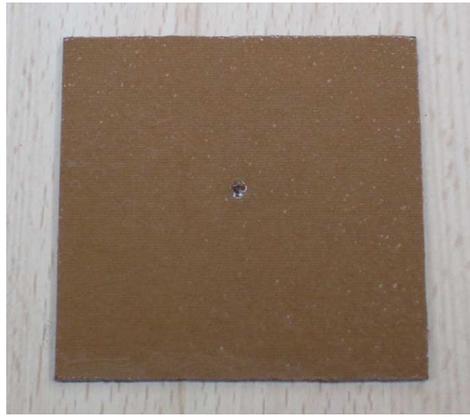


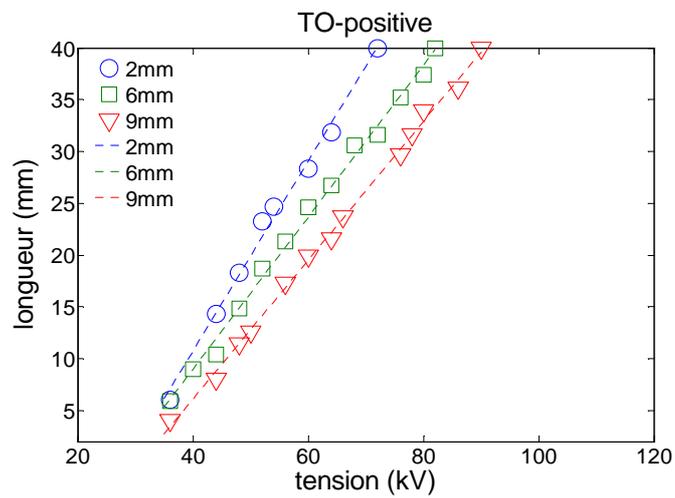
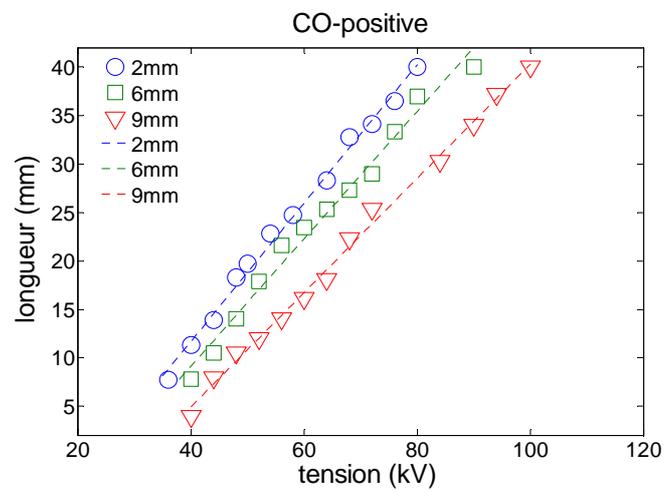
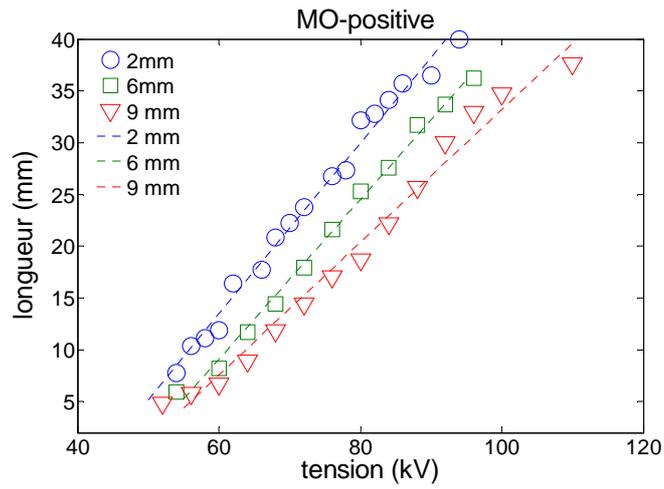
Figure 7.11 : Claquage du carton après des essais sur une interface TO/carton.

- **Longueur finale des décharges**

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 figures. 7.12 et 7.13 donnent les variations de la longueur finale des décharges en fonction des épaisseurs du carton dans les différentes huiles étudiées et ce pour les deux polarités. Nous remarquons que L_f augmente quasi-linéairement avec la tension appliquée et qu'il n'y a pas de phase de transition et ce jusqu'au contournement, contrairement au cas des streamers se propageant dans le volume des huiles.

Pour une tension donnée, L_f diminue lorsque l'épaisseur du carton augmente. Cela est valable pour les deux polarités et pour toutes les huiles étudiées. Ce résultat indiquerait l'implication d'effets capacitifs. En effet, lorsque l'épaisseur du solide augmente, la capacité du condensateur constitué par l'isolateur inséré entre les électrodes diminue [107, 108]. Ce phénomène est aussi observé sur une interface solide/gaz [146].



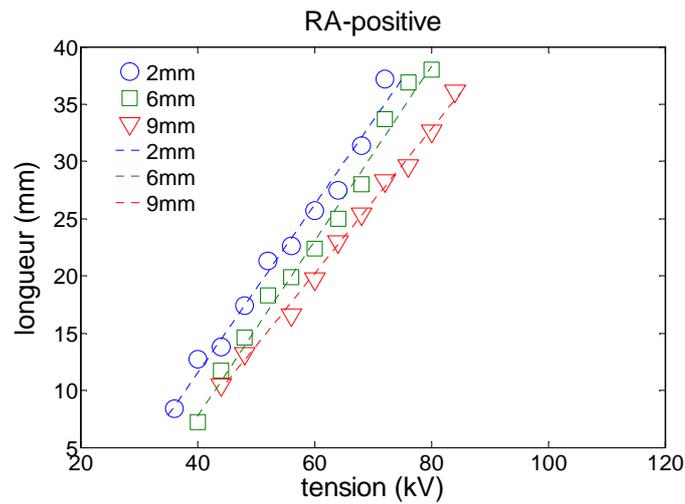
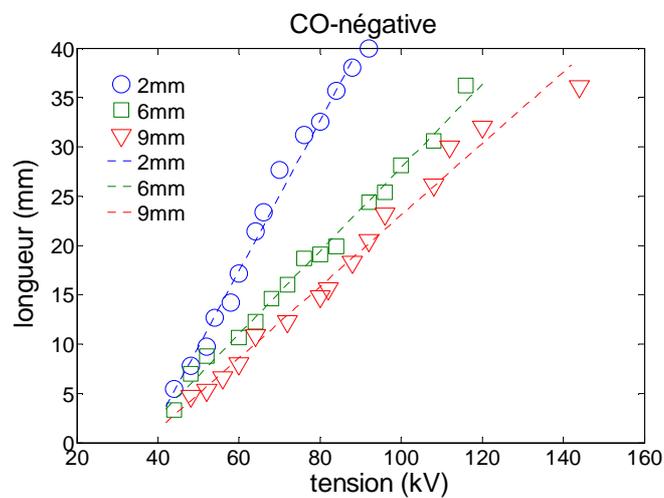
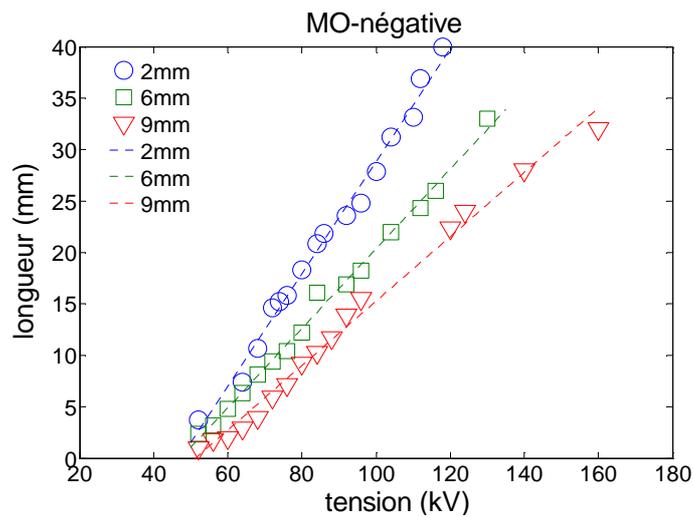


Figure 7.12 : Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes en fonction de l'épaisseur du carton pour les différentes huiles étudiées en polarité positive.



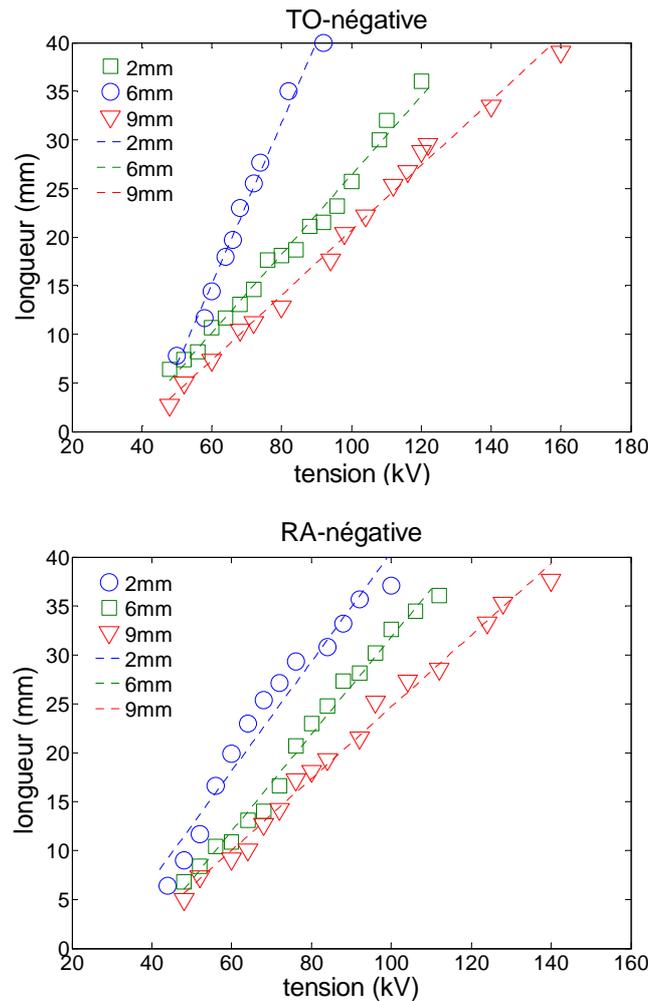


Figure 7.13 : Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes en fonction de l'épaisseur du carton pour les différentes huiles étudiées en polarité négative.

Les figures 7.14 et 7.15 montrent l'influence de l'épaisseur du carton sur L_f dans les différentes huiles. Pour une tension et une épaisseur du carton données, la longueur finale des décharges surfaciques est nettement plus élevée dans les huiles végétales que dans l'huile minérale, L_f est généralement de 60% plus important dans les huiles végétales que dans l'huile minérale en polarité positive, et de 40% en polarité négative. Il est à noter que les longueurs finales des décharges surfaciques dans les huiles végétales TO, CO et RA se confondent ; rappelons que ses permittivités sont relativement proches.

D'autre part, L_f est plus important en polarité positive qu'en polarité négative comme pour le cas de streamers dans le volume des huiles. Ce qui montre que les processus physiques impliqués dans la propagation de décharge ne sont pas les mêmes selon la polarité et que la charge d'espace joue un rôle important dans la propagation de décharges. Les résultats concordant ont été rapportés par d'autres auteurs [107, 108]. La différence de L_f

entre les huiles végétales et minérale est liée à la différence dans les structures des moléculaires.

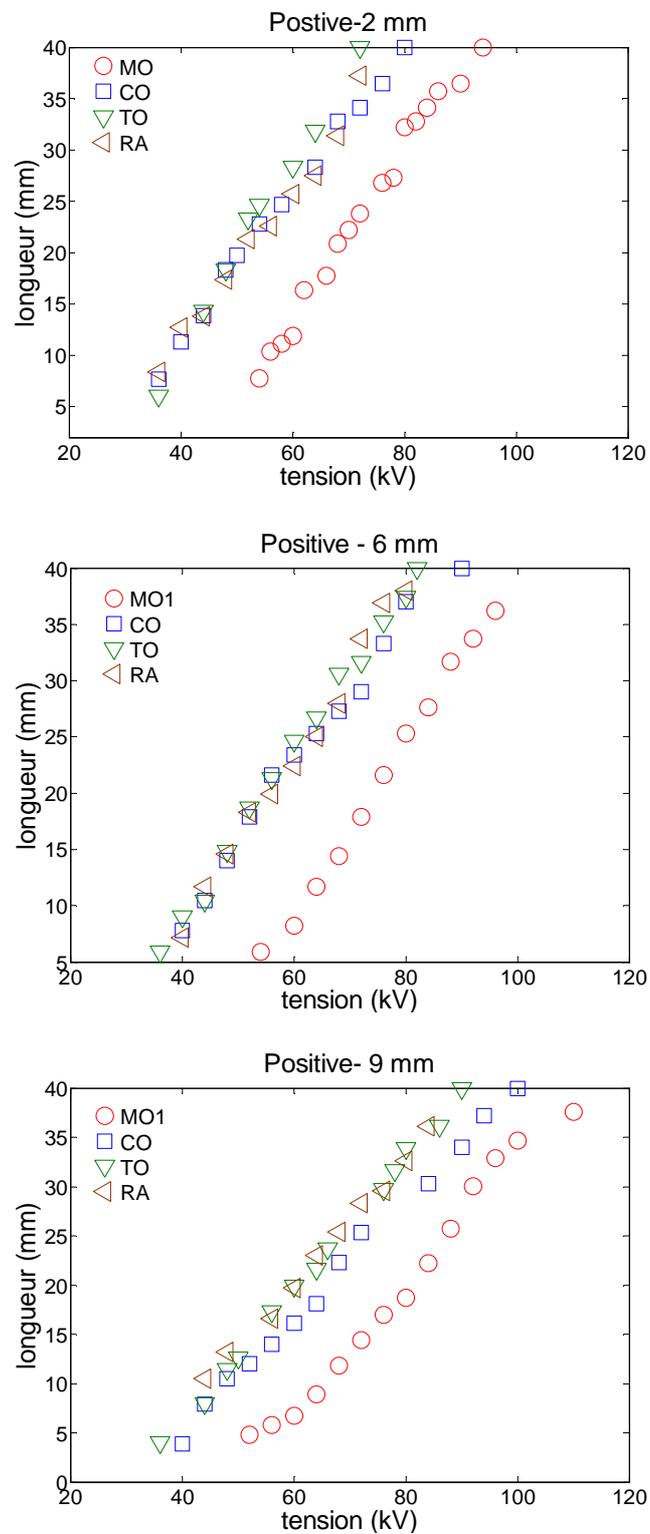


Figure 7.14: Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes pour les différentes huiles étudiées avec chacune des épaisseurs étudiées ($e = 2, 6$ et 9 mm), en polarité positive.

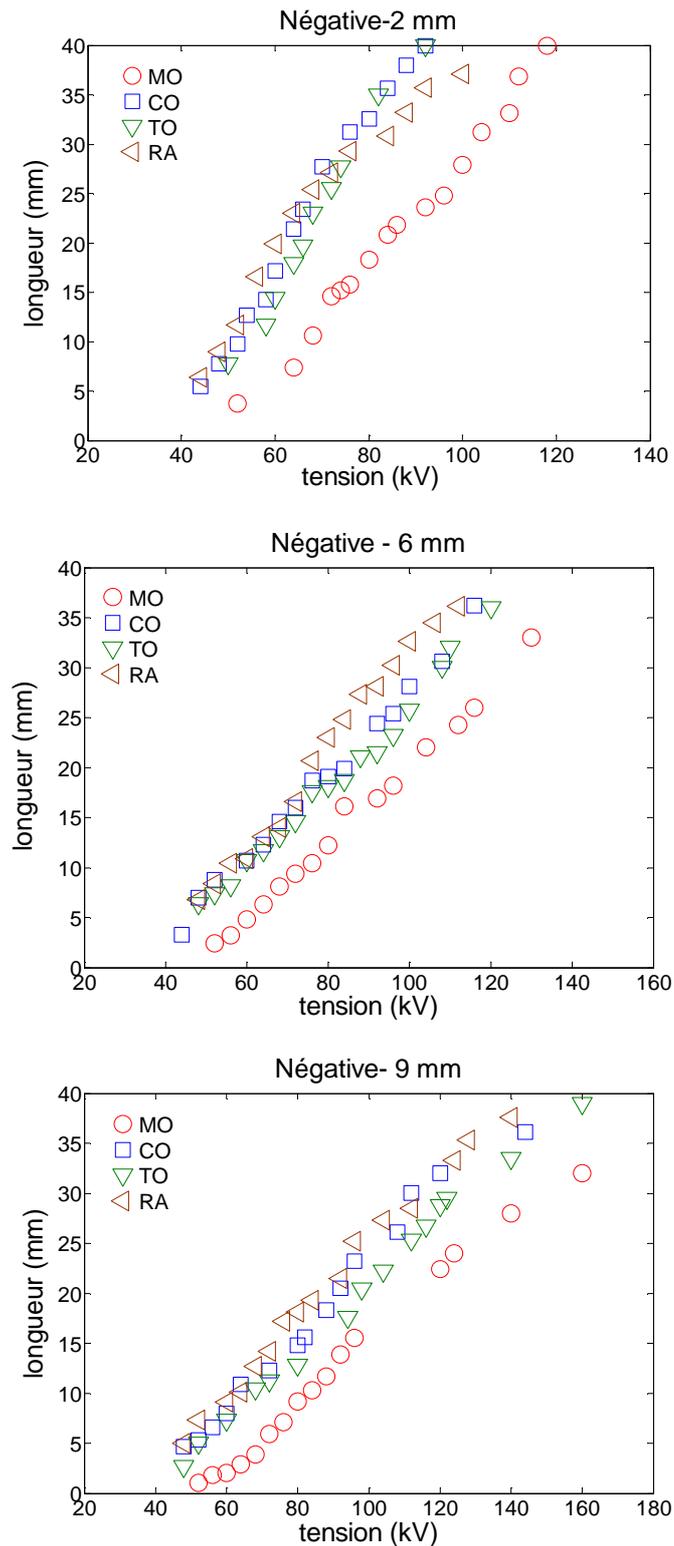


Figure 7.15: Comparaison des longueurs finales des décharges glissantes pour les différentes huiles étudiées avec chacune des épaisseurs étudiées ($e = 2, 6$ et 9 mm), en polarité négative.

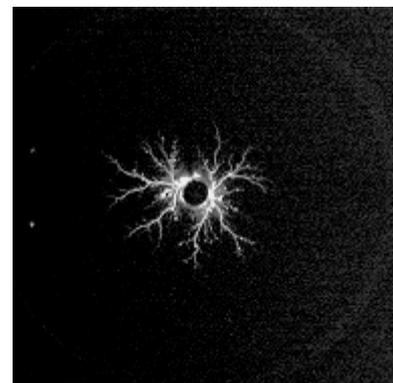
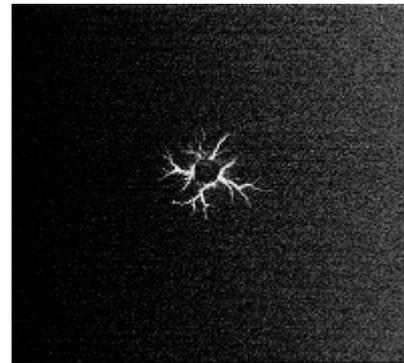
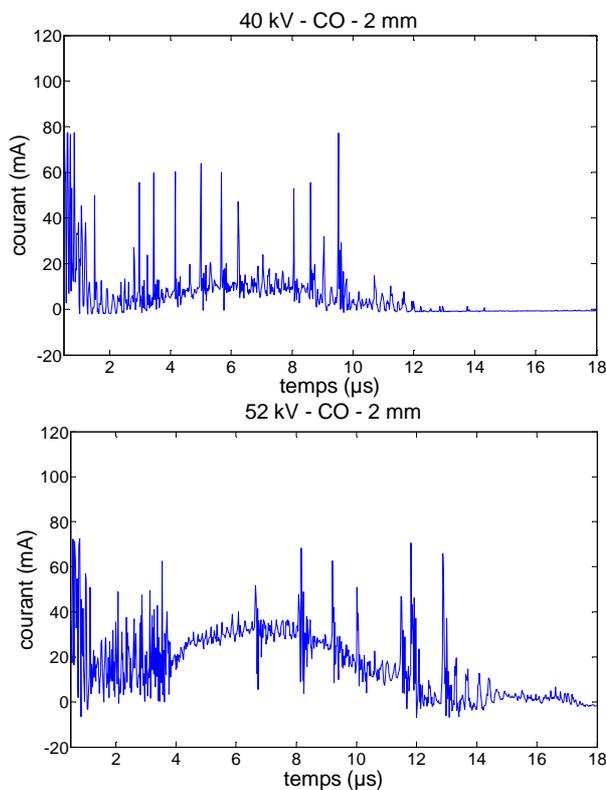
7.3.2 Mesures électriques

7.3.2.1 Courant associé aux décharges surfaciques

En polarité positive, les courants mesurés comportent une composante continue sur laquelle se superposent des impulsions très brèves. La composante continue s'annule au bout d'une dizaine de microsecondes (Figure 7.16).

La figure 7.17 montre des enregistrements de courants associés aux décharges glissantes sur une interface Colza/carton de 2 mm d'épaisseur pour différentes valeurs de tension négative. Les courants en polarité négative sont similaires à ceux observés en polarité positive.

L'amplitude des pics augmente avec la tension appliquée pour les deux polarités. L'impulsion importante observée au début de l'enregistrement correspond au courant de décharge du générateur. Les courants de décharges surfaciques mesurés dans les huiles végétales sont similaires à ceux observés dans l'huile minérale. Et les impulsions de courant observées aux interfaces sont plus fréquentes que celles des streamers dans le volume de l'huile.



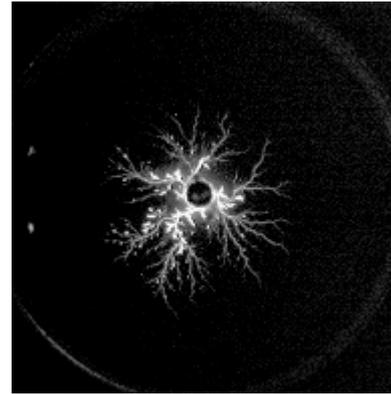
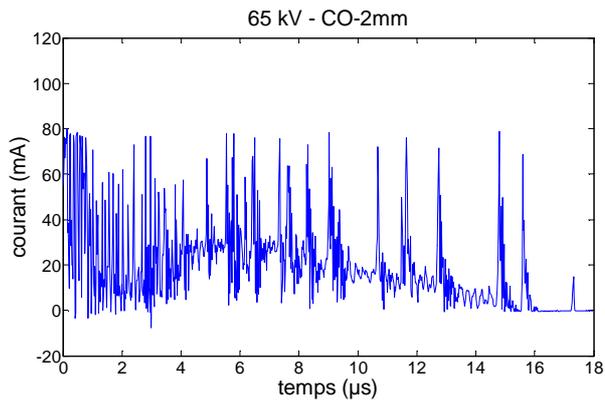


Figure 7.16 : Décharges positives obtenus sur une interface Colza/carton ($e=2\text{mm}$) et les courants associés pour différentes valeurs de tension.

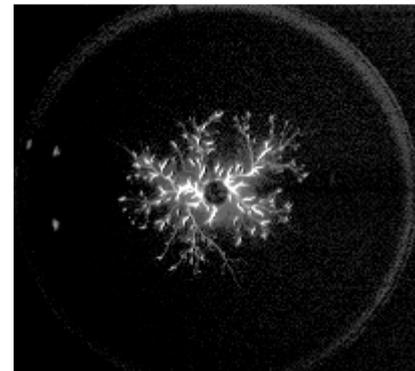
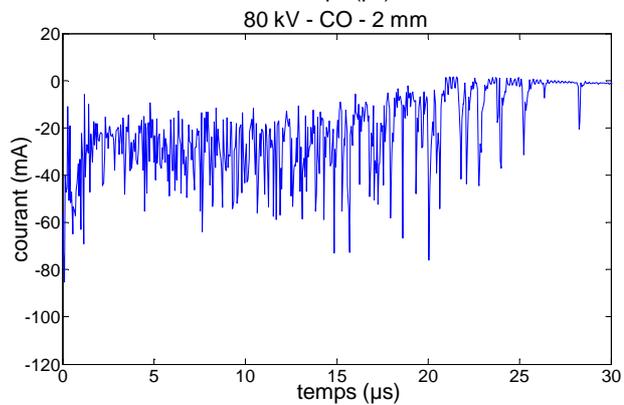
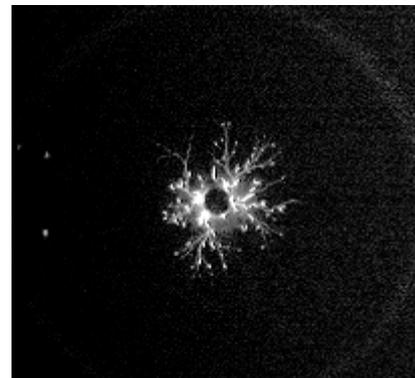
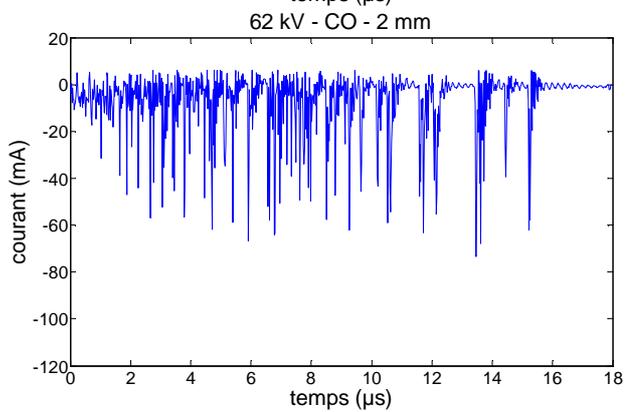
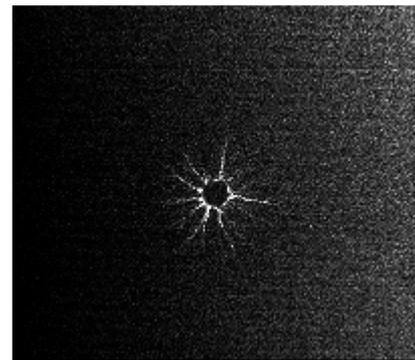
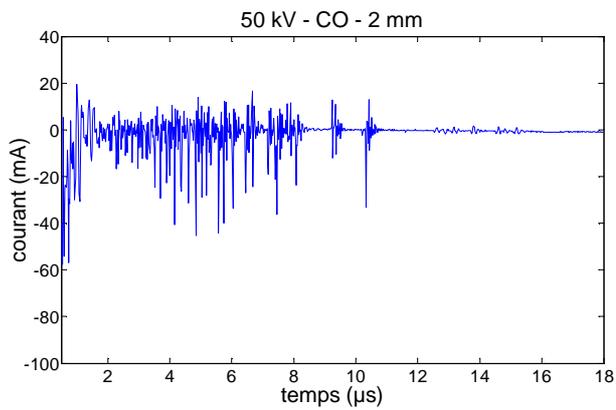


Figure 7.17 : Décharges négatives obtenus sur une interface Colza/carton ($e=2\text{mm}$) et les courants associés pour différentes valeurs de tension.

7.3.2.2 Décharge secondaire

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 40 μs après l'extinction de la décharge principale, et ce pour les deux polarités (Figure 7.18). 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 [107, 147].

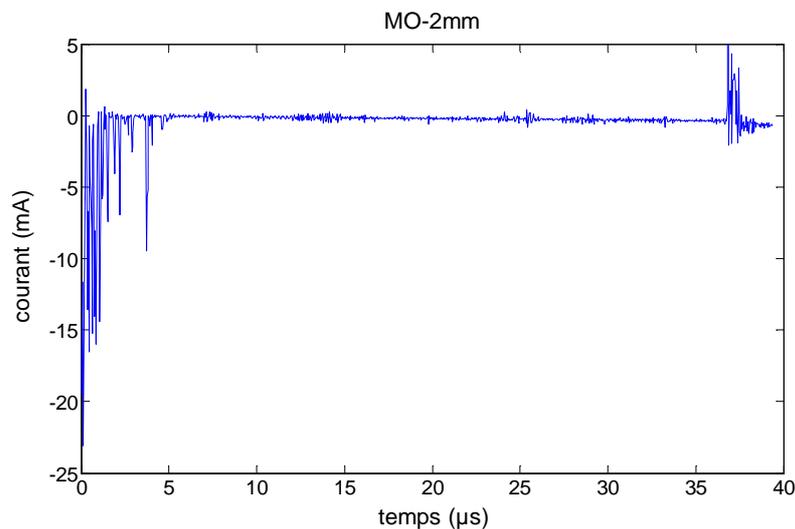


Figure 7.18 : Enregistrement du courant électrique d'une décharge négative sur une interface MO1/carton, $e=2$ mm, $U = 50$ kV. Cet enregistrement révèle l'existence d'une décharge secondaire de signe opposé à celui de la décharge principale.

7.3.2.3 Charge associée aux décharges surfaciques

La figure 7.19 montre les oscillogrammes de courants mesurés pour les deux polarités et la variation de la charge correspondante obtenue par intégration du courant avec l'huile minérale MO1. Les courants sont constitués d'impulsions très courtes et les charges varient par paliers, ce qui est significatif d'une propagation par sauts des décharges glissantes.

La charge totale Q_T associée aux décharges varie de quelques centaines à quelques milles de nano- Coulombs (nC). Cependant, pour une tension et une épaisseur e du carton données, les valeurs maximales Q_T augmentent avec la tension appliquée et elles sont plus importantes en polarité positive qu'en polarité négative. Plus e est élevé, plus faible est Q_T (Figure 7.20, 7.21).

De plus, il y a une dispersion des valeurs de la charge totale calculée ; ceci peut être dû à la forme aléatoire des décharge glissantes. Pour une tension et une longueur finale données, la charge semble augmenter avec le nombre de branches.

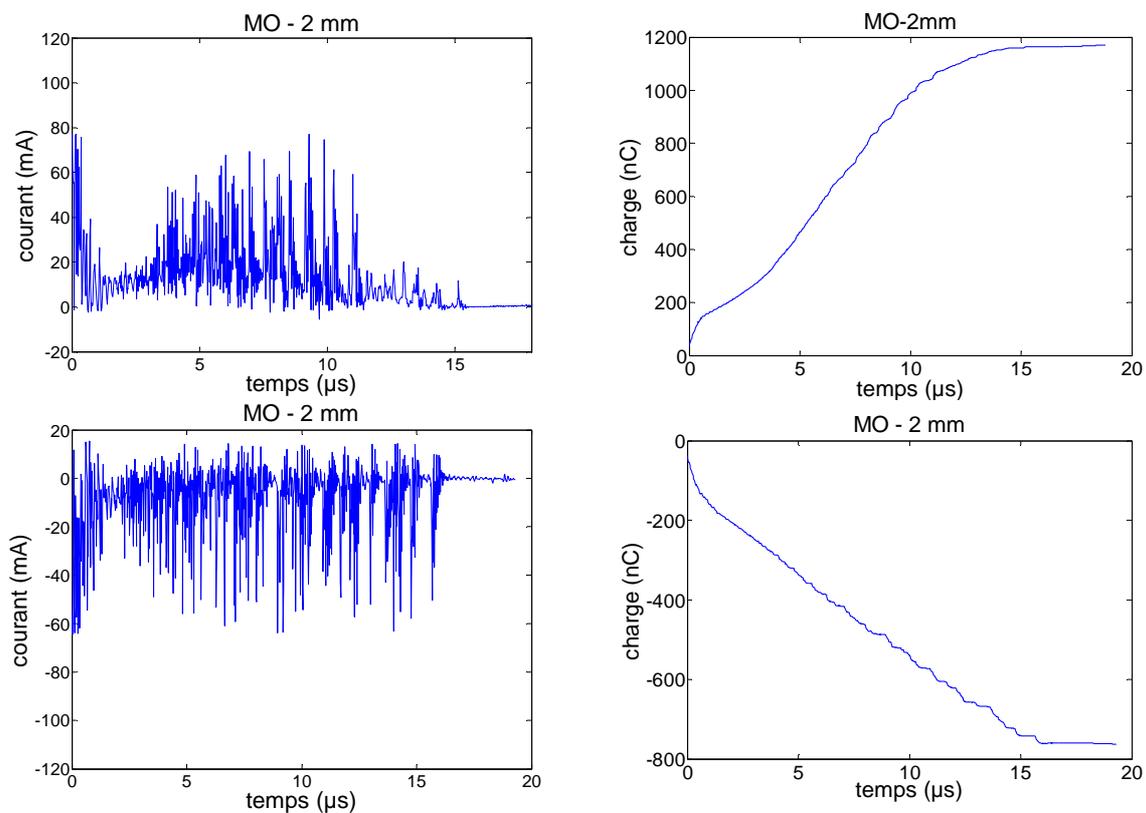


Figure. 7.19 : Courant et la charge associée des décharges glissantes sur une interface MOI/carton ($e=2mm$) dans les deux polarités avec $U=58 kV$.

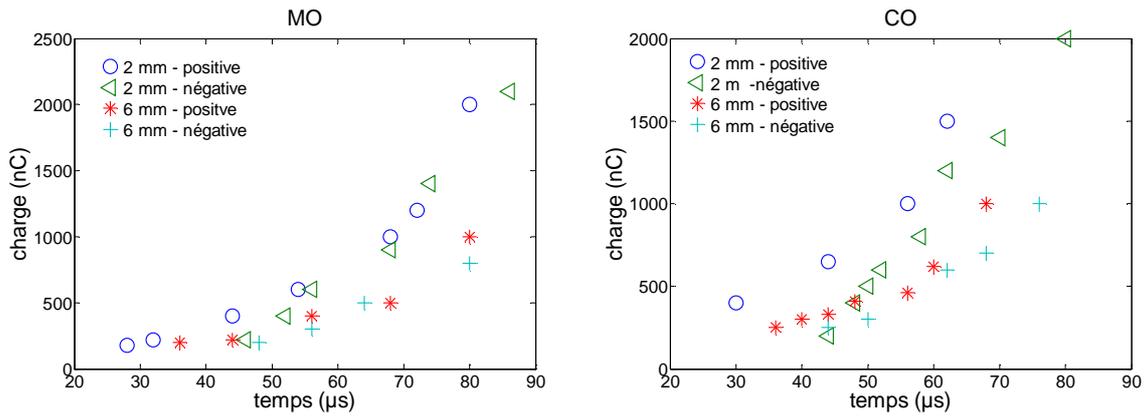


Figure 7.20 : Évaluation de la charge totale déduite des mesures de courant en fonction de la tension appliquée pour des épaisseurs de carton de 2 et 6 mm immergés dans les huiles MO1 et CO.

La comparaison de la charge totale Q_T mesurée, montre que Q_T est plus important en présence de l'huile végétale que de l'huile minérale, et ce pour les deux polarités. La capacité par unité de longueur du streamer peut être évaluée à partir du rapport Q_T/U représentant la capacité des branches de la décharge en face du plan ; elle est de l'ordre de 0.6 pF/cm. Par ailleurs, Kebbabi et Beroual [123] 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.

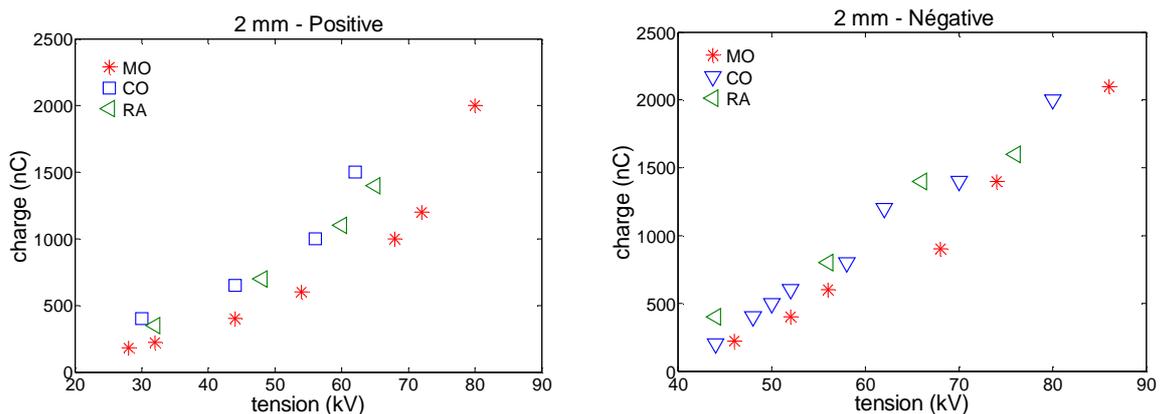


Figure 7.21 : Évaluation de la charge totale à partir du courant mesuré en fonction de la tension appliquée pour une épaisseur de carton $e = 2$ mm en présence des huiles MO, CO et RA.

7.4 Analyse fractale des décharges glissantes

7.4.1 Procédure expérimentale

Comme nous l'avons vu précédemment, la longueur finale des décharges glissantes sous tension impulsionnelle est très influencée par l'épaisseur du diélectrique solide. Plus l'échantillon solide est mince, plus les décharges qui se développent sur sa surface sont longues et ramifiées (Figure 7.22 et 7.23). Dans une perspective de comparaison de la dimension fractale D des décharges glissantes et de l'influence du type d'huiles sur D , nous considérons les huiles MO1 et CO.

Pour analyser le comportement fractal des décharges radiales, nous avons considéré des décharges de 35 mm de longueur finale, que nous avons appelée '*longueur standard S*'. La tension appliquée est augmentée progressivement, jusqu'à l'obtention d'une décharge de longueur finale $L_f=S$ pour les deux types d'interface (MO1/carton et CO/carton). Le tableau 7.1 donne la tension nécessaire pour obtenir une décharge de longueur finale S dans l'huile minérale MO1 et l'huile végétale CO et pour différentes épaisseurs. Pour atteindre la même longueur finale, il faut beaucoup plus de tension en présence d'huile minérale qu'avec l'huile végétale.

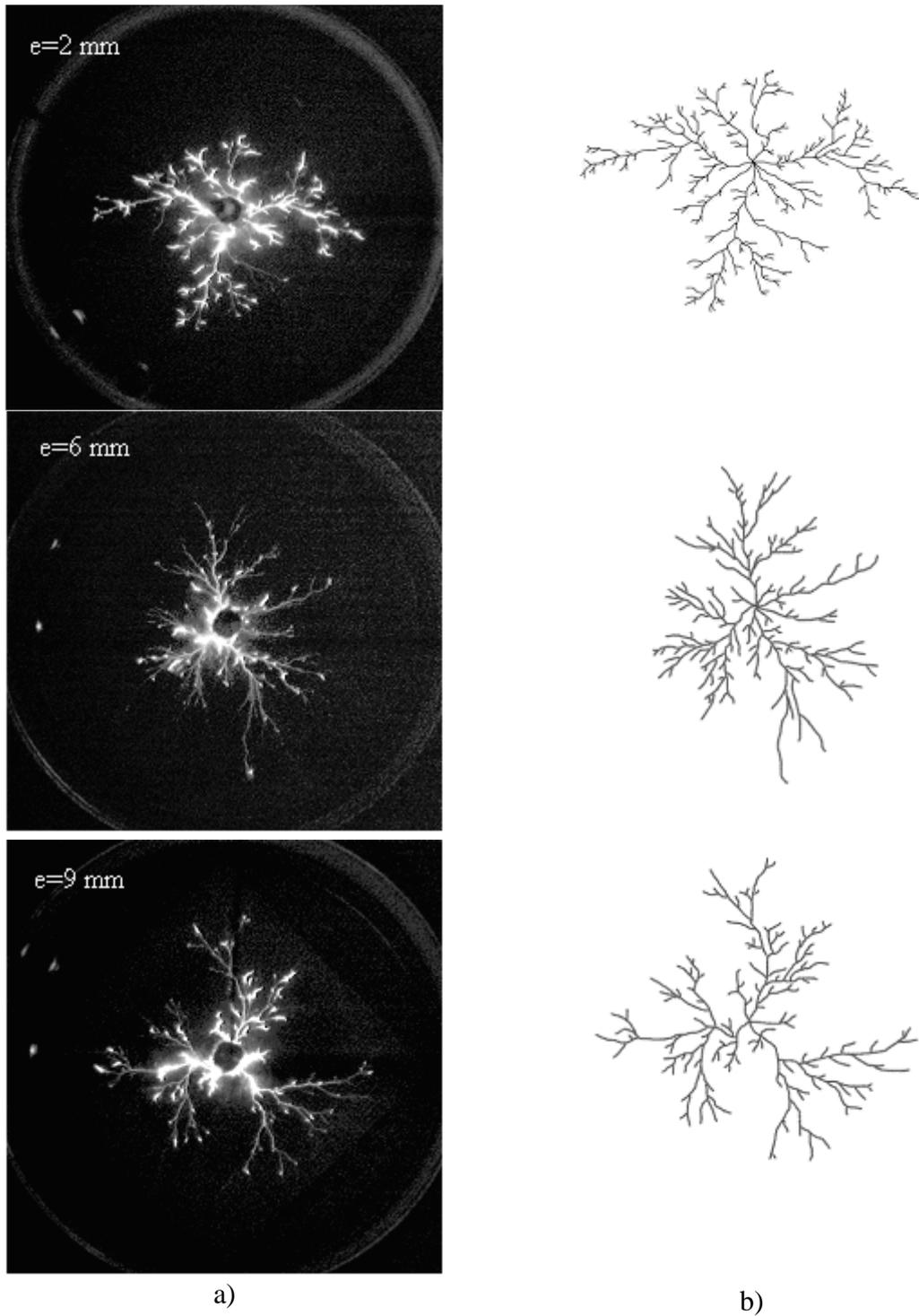


Figure 7.22 : Images de décharges glissantes sur une interface MOI/carton pour différentes épaisseurs : (a) image originale (b) image en binaire correspondante.

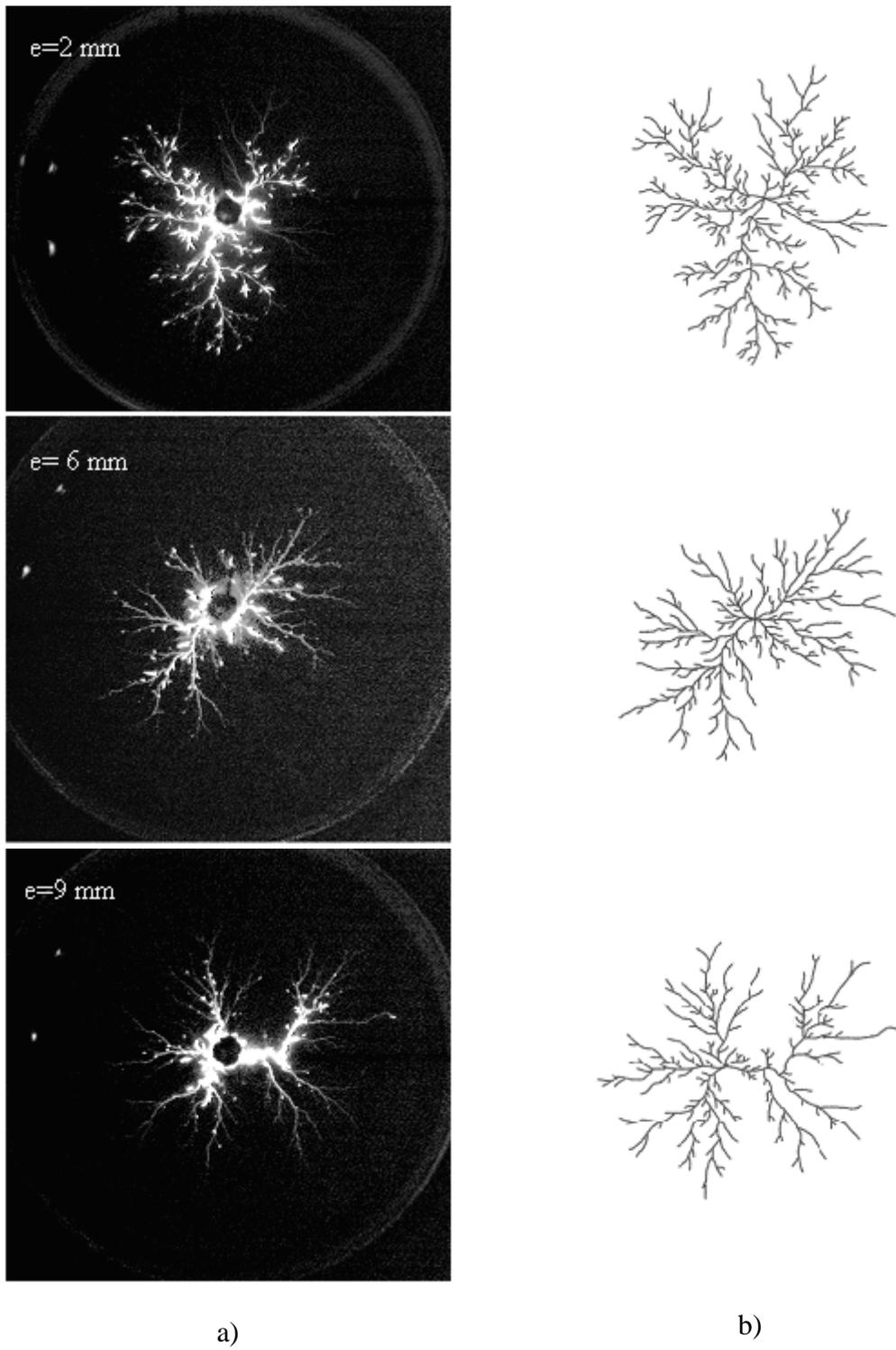


Figure 7.23 : Images de décharges glissantes sur une interface CO/carton pour différentes épaisseurs: (a) image originale (b) image en binaire correspondante.

Tableau 7.1 : Tension moyenne requise pour obtenir une décharge glissante de longueur finale $S=35$ mm dans les huiles MO1, CO et pour différentes épaisseurs.

e	2 mm	6 mm	9 mm
MO1	85 kV	96 kV	105 kV
CO	75 kV	80 kV	95 kV

7.4.2 Analyse fractale par la méthode de quadrillage (*Box method*)

• Programme de calcul

La première étape consiste à transformer les images originales en binaire (c'est-à-dire en noir et blanc) comme l'illustrent les Figures 7.22b et 7.23b. Les informations contenues dans l'image de la décharge sont transformées en matrice. Les éléments de la matrice sont des entiers dont la valeur est comprise entre 1 (représentant le noir) et 255 (représentant le blanc) représentant les données relatives à la couleur de chaque pixel de l'image. Ces images binaires sont ensuite traitées avec un programme que nous avons conçu. Il est identique à celui établi par ailleurs [129]. Le principe du programme consiste à générer un maillage carré de côté l qui couvre complètement l'image de la décharge (Figure 7.24). Le nombre de carrés contenant n'importe quelle branche de la décharge $N(l)$ est compté pour chaque valeur de l . À la fin, on trace la caractéristique $N=f(l)$ dans un système de coordonnées logarithmique. La dimension fractale D correspond à la pente de la partie linéaire obtenue.

• Résultats

Les figures 7.25, 7.26 et 7.27 représentent les résultats de l'analyse fractale des décharges illustrés par les figures 7.22b et 7.23b en utilisant la méthode de quadrillage. La dimension fractale D de chaque figure de décharges est extraite de la pente des droites $N=f(l)$. Les valeurs de D pour les huiles MO1, CO et pour différentes épaisseurs du carton sont résumées dans le Tableau 7.2. Ainsi, il existe une relation entre la caractéristique du matériau solide (épaisseur e) et le degré de ramification des décharges représentées par le nombre adimensionnel D . Nous remarquons que quelle que soit le type de liquide utilisé, plus

l'épaisseur du solide est faible, plus la décharge est ramifiée et plus D est élevé. La dimension fractale D dans l'huile minérale est plus élevée que dans l'huile végétale pour $e=2\text{ mm}$. Cela montre que, pour une longueur de la décharge et une l'épaisseur du solide données, les décharges surfaciques dans l'huile minérale sont plus ramifiées que dans l'huile végétale.

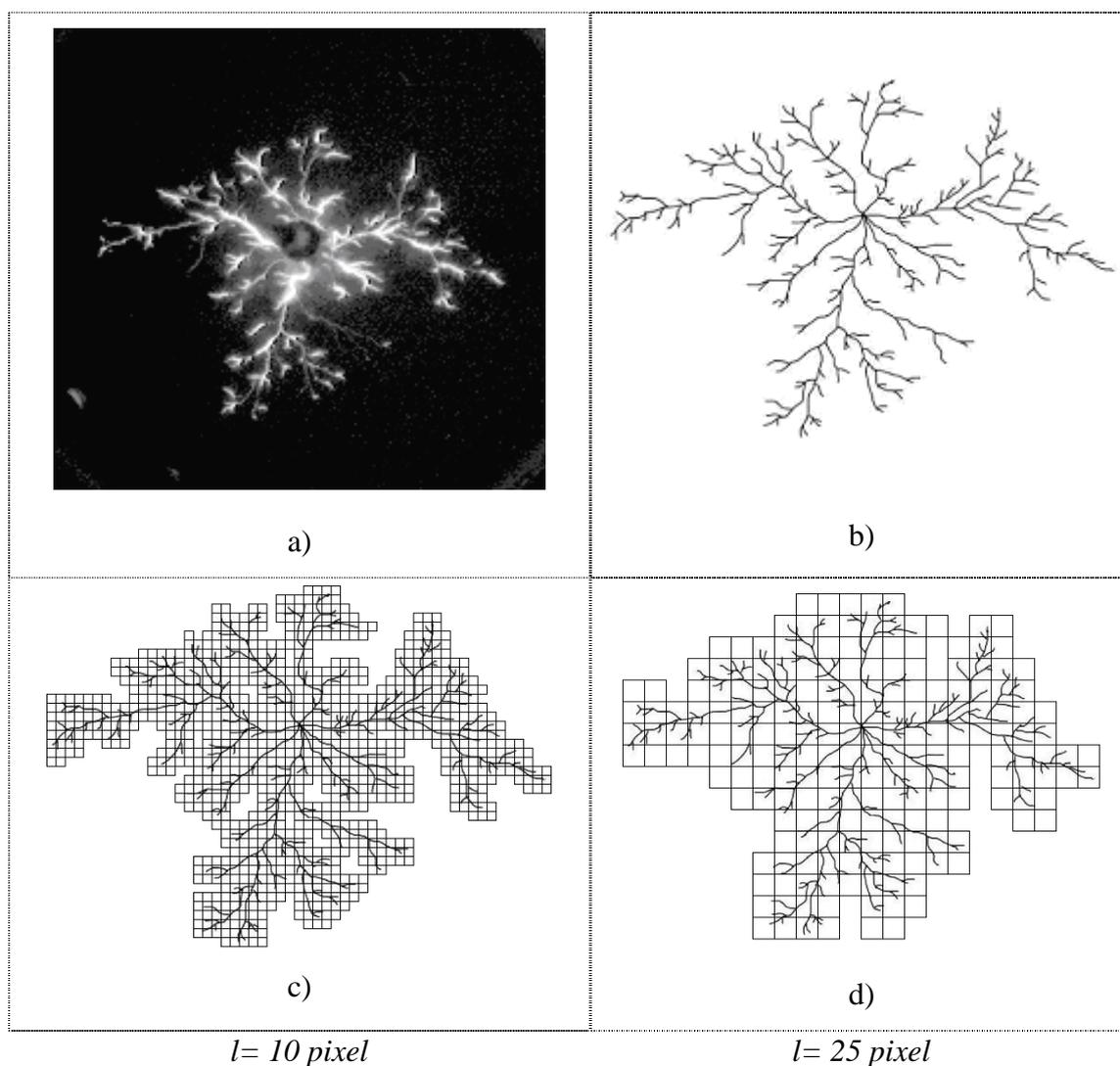


Figure 7.24 : Schéma de la méthode de quadrillage : (a) image originale, (b) image binaire correspondante, (c) images binaires couvertes par des carrée de coté $l=10$ pixels et (d) images binaires couvertes par des carrée de coté $l=25$ pixels.

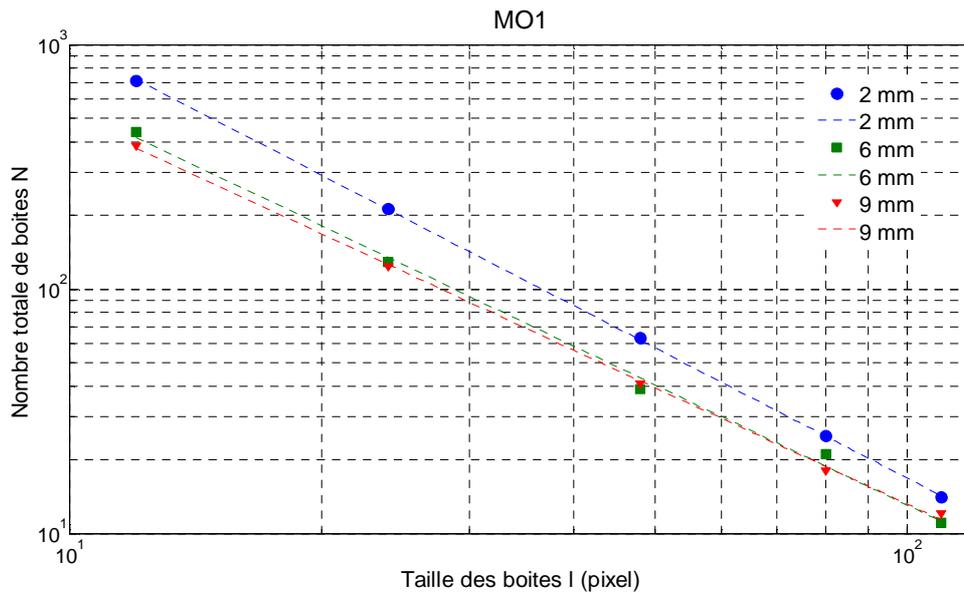


Figure 7.25 : Nombre total de boîtes N en fonction de la taille des boîtes l obtenues à partir de l'analyse des exemples de décharges sur une interface MO1/carton, illustrées par la figure 7.22b en utilisant la méthode de quadrillage : $D \approx 1.77, 1.63$ et 1.58 respectivement pour $e = 2$ mm, 6 mm, 9 mm.

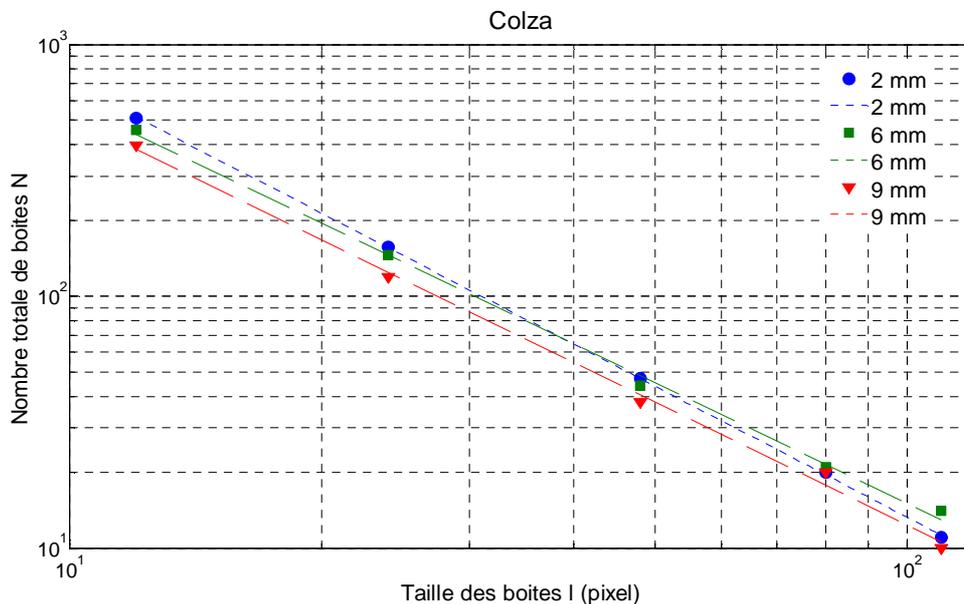


Figure 7.26 : Nombre total de boîtes N en fonction de la taille des boîtes l obtenues à partir de l'analyse des exemples de décharges sur une interface CO/carton, illustrées par la figure 7.23b en utilisant la méthode de quadrillage : $D \approx 1.72, 1.62$ et 1.59 respectivement pour $e = 2$ mm, 6 mm, 9 mm.

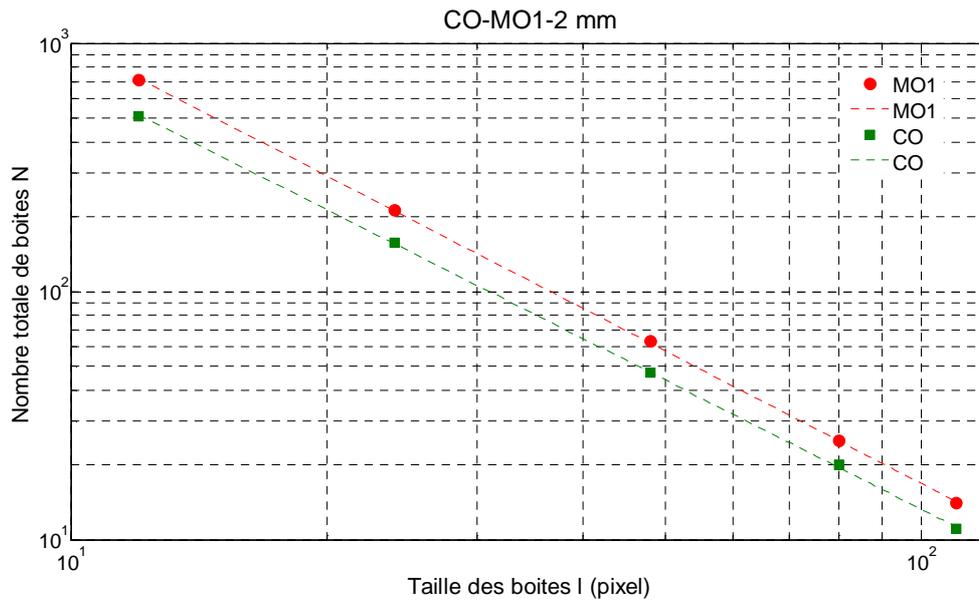


Figure 7.27 : Nombre totale de boîtes N en fonction de la taille des boîtes l obtenues à partir de l'analyse des exemples de décharges illustrées par les figures 7.22b et 7.23b, en utilisant la méthode de quadrillage. Ces résultats correspondent à l'huile minérale MO1 et l'huile végétale CO pour le cas $e = 2$ mm : $D \approx 1.77, 1.72$ respectivement pour l'huile MO1 et l'huile CO.

Tableau 7.2 : Dimension fractale pour les deux types d'interface en fonction de l'épaisseur du carton, estimée par la méthode de quadrillage

e	2 mm	6 mm	9 mm
MO	1.77±0.02	1.63±0.02	1.58±0.02
CO	1.72±0.02	1.62±0.02	1.59±0.02

7.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré 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. La longueur finale des décharges L_f augmente quasi-linéairement avec la tension appliquée et diminue lorsque l'épaisseur du solide augmente. Par ailleurs, pour une tension et une épaisseur données, les décharges qui se

développent sur l'interface carton/huile végétale sont plus longues que celles sur l'interface carton/huile minérale ; des observations similaires ont été faites pour les décharges dans le volume de ces liquides. Plus la différence entre la permittivité de l'huile et du solide est élevée, plus la longueur finale est grande. Pour une tension et une épaisseur données, L_f est plus élevé en polarité positive qu'en polarité négative, ce qui indique que la polarité la plus contraignante est la polarité positive.

L'influence de l'épaisseur des échantillons de carton et des permittivités diélectriques des constituants de l'interface montrent l'implication des effets capacitifs sur le développement des décharges glissantes.

D'autre part, les enregistrements de courants de décharges aux interfaces huile/solide ont permis de mettre en évidence l'existence d'une décharge secondaire de signe contraire à celui de la décharge principale et de la polarité de la tension appliquée, et ce pour les deux polarités.

Dans ce chapitre, nous avons aussi établi une relation entre la nature du matériau liquide (huiles minérale et végétale), l'épaisseur du solide et la dimension fractale des décharges surfaciques. Ainsi, grâce à l'utilisation des techniques de l'analyse fractale, nous avons décrit mathématiquement le degré de ramification des décharges surfaciques observées expérimentalement. En utilisant la méthode de quadrillage (ou des boîtes), nous avons montré que la dimension fractale D des décharges diminue lorsque l'épaisseur du solide augmente. Plus l'épaisseur du solide est grande, plus le degré de ramification des décharges est moins important. Pour une épaisseur de solide donnée, D est généralement plus élevée dans l'huile minérale que dans l'huile végétale.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail nous a permis de comparer des huiles esters naturels (huiles végétales) et synthétiques, et des huiles minérales sur la base des caractéristiques de génération et de propagation des streamers qui s'y développent, des tensions de claquage ainsi que des décharges se propageant sur à un isolant solide (le carton en l'occurrence) en présence de ces huiles.

Nous avons montré que : (1) la tension de génération en pointe positive est toujours supérieure à celle mesurée en polarité négative ; et (2) les tensions de génération des streamers (bulle) sont plus élevées dans les huiles synthétiques et végétales que dans les huiles minérales quelle que soit la polarité de l'électrode pointe.

En ce qui concerne la propagation, les longueurs finales (ou longueurs d'arrêt) des streamers positifs sont environ 10 fois supérieures à celles des streamers négatifs. Pour atteindre la même longueur finale, il faut beaucoup plus de tension en polarité négative qu'en polarité positive. Par conséquent, les tenues diélectriques sont plus élevées en polarité négative qu'en polarité positive.

Les vitesses moyennes varient de quelques centaines de m/s à quelques km/s. Ces vitesses dépendent également de la tension appliquée et de la géométrie des électrodes (rayon de courbure de la pointe et intervalle inter électrodes). Ces vitesses peuvent être déduites à partir des oscillogrammes de courant ou des charges (intégration du courant).

Si une valeur élevée de la charge du streamer correspond à une conductivité importante du canal de décharge, c'est la longueur finale qui est la plus importante pour indiquer si le streamer aura une issue fatale (claquage) ou non. Dans les mêmes conditions expérimentales, c'est l'huile où la longueur des streamers est la plus courte qui aura la meilleure tenue diélectrique.

Sur la base des longueurs finales des streamers mesurées, les huiles minérales restent plus intéressantes que les huiles végétales à l'exception de l'huile VO4/H qui présente une longueur finale plus courte en polarité positive que toutes les autres huiles dans les mêmes conditions. Les tensions de génération sont aussi plus élevées dans les huiles minérales que dans les huiles végétales.

Nous avons montré que la tension de claquage des huiles isolantes, déterminée selon la méthode de la norme CEI 60156, suit généralement une distribution Normale. Les

probabilités de claquage peuvent alors être déterminées suivant la distribution Normale en prenant un échantillonnage suffisamment grand ($n > 30$). La tension de claquage mesurée présente une meilleure conformité à la distribution Normale par rapport à la distribution de Weibull.

Les résultats obtenus ont montré également les tensions de claquage mesurées $U_{1\%}$, $U_{10\%}$ et $U_{50\%}$ sous tension alternative sont plus élevées dans les huiles végétales et ester synthétique que dans les huiles minérales pour les niveaux de risque 1%, 10% et 50%. L'huile minérale, classée comme de haute qualité (CEI 60296), présente de meilleures tensions de claquage par rapport aux qualités standard et au même niveau que l'ester synthétique. Au vu de la tension de claquage, la rigidité diélectrique des huiles ester est généralement meilleure que celle des huiles minérales sous tension alternative pour le faible inter électrode (2,5 mm).

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. La longueur finale des décharges L_f augmente quasi-linéairement avec la tension appliquée et diminue lorsque l'épaisseur du solide augmente. Par ailleurs, pour une tension et une épaisseur données, les décharges qui se développent sur l'interface carton/huile végétale sont plus longues que celles sur l'interface carton/huile minérale ; des observations similaires ont été faites pour les décharges dans le volume de ces liquides. Plus la différence entre la permittivité de l'huile et du solide est élevée, plus la longueur finale est grande. Pour une tension et une épaisseur données, L_f est plus élevé en polarité positive qu'en polarité négative, ce qui indique que la polarité la plus contraignante est la polarité positive.

L'influence de l'épaisseur du solide et des permittivités diélectriques des constituants de l'interface montre l'implication des effets capacitifs sur le développement des décharges glissantes.

Les enregistrements de courants de décharges aux interfaces huile/solide ont permis de mettre en évidence l'existence d'une décharge secondaire de signe contraire à celui de la décharge principale et de la polarité de la tension appliquée, et ce pour les deux polarités.

L'analyse fractale nous a permis d'établir une relation entre la nature du matériau liquide (huiles minérale et végétale), l'épaisseur du solide et la dimension fractale des décharges surfaciques. Ainsi, grâce à l'utilisation des techniques de la géométrie fractale, nous avons décrit mathématiquement le degré de ramification des décharges surfaciques

observées expérimentalement. En utilisant la méthode de quadrillage (ou des boîtes), nous avons montré que la dimension fractale D des décharges diminue lorsque l'épaisseur du solide augmente. Plus l'épaisseur du solide est grande, plus le degré de ramification des décharges est moins important. Pour une épaisseur de solide donnée, D est généralement plus élevée dans l'huile minérale que dans l'huile végétale.

Références

- [1] C. Perrier and A. Beroual, “Experimental Investigations on Insulating Liquids for Power Transformers: Mineral, Ester, and Silicone Oils”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 25, No. 6, pp. 6 – 13, November/December 2009.
- [2] T. V. Oommen, “Vegetable oils for liquid-filled transformers”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 1, No. 1, pp. 6-11, January/February 2002.
- [3] N. Berger, “Liquides isolants en électrotechnique : Présentation générale”, *Techniques de l’ingénieur*, D 2470.
- [4] A. Beroual, “Notes de cours de Master – Matériaux pour le génie électrique”, *École Centrale de Lyon*, 2007.
- [5] P. J. Vuarchex, “Caractéristiques des diélectriques liquides”, *Techniques de l’ingénieur*, *Traité K 714*, Janvier 1988.
- [6] R. Bartnikas, “Engineering dielectrics”, Vol.3, 1994.
- [7] D. Cherry, “Insulating Fluids: An Overview of Dielectric Fluids Used in Transformers”, *Principal Consulting Scientist for Dielectric Fluids*, October 29, 2009.
- [8] K. Dumke, H. Borsi and E. Gockenbach, “Experimental investigation on the behaviour of decomposition gases in insulating liquids caused by partial discharge and”, 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectrics Liquids, ICDL, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [9] C. Laurent, “Diélectriques solides et charge d’espace”, *Techniques de l’ingénieur*, D 2305.
- [10] B. Audrey, “Étude du phénomène d’électrisation par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance”, *Thèse de Doctorat, INP de Grenoble*, 2007.
- [11] P. Vallette et C. De Choudens, “Le Bois, la Pâte, le Papier”, chap. 3, pp. 90–98. *Centre Technique du Papier*, 1992.
- [12] E. Boureau, “Anatomie végétale”, *Presses Universitaires de France*, 1957.
- [13] J. Roberts, “The chemistry of paper”, *The Royal Society of Chemistry*, chap. 2, pp. 11–25, 1996.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] A. Beroual and R. Tobazéon, “Prebreakdown Phenomena in Liquid Dielectrics”, *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. 21, pp. 613-627, 1986.

- [17] A. C. T. Briggs, A. Beroual and F. Buret, "The Dynamics of dc Predisruption in Liquid Insulating Media", IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. 1, No 3, pp. 371-376, 1994.
- [18] 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.
- [19] T. Aka-N'gnui, "Contribution à l'étude des phénomènes de préclaquage dans les diélectriques liquides – Modèles des génération et de propagation", Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, 2000.
- [20] 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.
- [21] R. Kattan, N. Bonifaci et A. Denat, "Etude de la génération de bulles dans les hydrocarbures liquides générées par les impulsions de *Trichel*", J. Phys. III (France), Vol.1, No. 7, Juillet 1991.
- [22] R. Tobazeon, "Préclaquage et claquage des liquides diélectriques", Techniques de l'ingénieur, D 2450.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] L. Rayleigh, "On the Pressure Developed in a Liquid during the Collapse of a Spherical Cavity", Phil. Mag., Vol. 34, No. 200, pp. 94-98, 1917.
- [29] A. Beroual, "Initiation of streamers in dielectric liquids with point-plane electrodes under step voltages", Arch. Elektrotech., Vol. 1-4, pp. 33-44, 1993.
- [30] A. Beroual and R. Tobazeon, "Propagation et génération des streamers dans les diélectriques liquides", J. of Phys. Appl. 22, pp. 1117 – 1123, 1987.
- [31] A. Beroual, "Electronic and Gaseous Processes in Prebreakdown Phenomena of Dielectric Liquids", J. of Appl. Phys. 73 (9), pp. 4528-4533, 1993.

- [32] P. Gournay and O. Lesaint, "A study of the inception of positive streamers in cyclohexane and pentane", *J. of Phys. D: Appl. Phys.* 26, pp. 1966-1974, 1993.
- [33] A. Beroual and R. Tobazeon, "Effects of Hydrostatic Pressure on the Prebreakdown Phenomena in Dielectric Liquids", *IEEE Ann. Rep., CEIDP, Buffalo*, pp. 44-49, 1985.
- [34] A. Beroual and R. Tobazeon, "Prebreakdown Phenomena in Liquid Dielectrics", *IEEE Trans. On Electrical Insulation*, Vol. 21, No. 4, pp. 613-627, 1986.
- [35] 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.
- [36] T. Aka-N'gnui and A. Beroual, "Bubble dynamics and transition into streamers in liquid dielectrics under a high divergent electric field", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 34, pp. 1408–1412, 2001.
- [37] A. Beroual., "Relationship between Current, Charge and Propagation Velocity of Streamers in Dielectric Liquids", *Archiwum Elektrotechniki.*, 1-4, pp. 45-56, 1993.
- [38] R. E. Hebner, "Measurement of electrical breakdown in liquids", Vol. B193: Plenum Press, 1988.
- [39] 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.
- [40] Y. Kamata and Y. Kako, "Flashover Characteristics of Extremely Long Gaps in Transformateur Oil under Non-uniform Field Conditions", *IEEE Trans. On Electrical Insulation*, Vol. 15, pp. 18-26, 1980.
- [41] K. L. Stricklett, C. Fenimore, E. F. Kelley, H. Yamashita, M. O. Pace, T. V. Blalock, A. L. Wintenberg and I. Alexeff, "Observation of partial discharge in hexane under high magnification", *IEEE Trans. On Electrical Insulation*, Vol.26, No.4, pp. 692-698, 1991.
- [42] 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.
- [43] A. Beroual, "Electronic processes and streamer phenomena in liquid dielectrics", *Arch. Electr. Engineering*, No. 4, pp. 579-592, 1995.
- [44] Y. Nakao, T. Yamazaki, K. Miyagi, Y. Sakai, H. Tagashira, "The Effect of Molecular Structure on Prebreakdown Phenomena in Dielectric Liquids under a Non-uniform Field", *Electr. Engineering in Japan*, Vol.139, No.1, 2002.
- [45] H. Yamashita, "Effects of Chain Length on Prebreakdown Phenomena in Straight-Chain Saturated Hydrocarbon Liquids", *Electr. Engineering in Japan*, Vol. 122, No. 4, 1998.

- [46] N. Ngoc-Minh, “Comparaison des propriétés de claquage à haute tension d’esters naturels et synthétiques”, 5^{ème} Colloque sur les Matériaux pour le Génie électrique, MGE, Montpellier, 2010.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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
- [54] P. B. McGrath and J. K. Nelson, “Divergent field study of prebreakdown events in n-hexane”, J. Electrostatics, Vol. 7, pp. 327-336, 1982.
- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] O. Lesaint and M. Jung, “On the relationship between streamer branching and propagation in liquids: influence of pyrene in cyclohexane”, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 33, pp. 1360-1368, 2000.
- [58] E. O. Forster and P. Wong, “The dynamics of electrical breakdown in liquid hydrocarbons”, Conf. Rec. of the IEEE Int. Symp. Electr. Insul., Boston, pp. 222, 1980.
- [59] S. Sakamoto and H. Yamada, “Optical Study of Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids”, IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. 15, 3, pp. 171-181, 1980.

- [60] A. Beroual et A. Denat, “Analyse spectrale de la lumière émise par les streamers dans les diélectriques liquides”, C. R. Acad. Scien., Paris, 306, pp. 187-192, 1988.
- [61] A. Beroual, “Spectral Analysis of Light Emitted by Streamers and Gas Chromatography in Liquid Dielectrics”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 32, pp. 5615-5620, 1993.
- [62] CEI 60156, “Isolants liquides : détermination de la tension de claquage à fréquence industrielle”, AFNOR, Ed., 1995.
- [63] ASTM D_1816-84a, “Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin using VDE Electrodes”, Annual Book of ASTM Standards, Section 10, Volume 10.03, 1988.
- [64] R. Tobazeon, “Préclaquage et claquage des liquides diélectriques”, Techniques de l’ingénieur, D 2450.
- [65] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, “Transformer Engineering Design and Practice”, Marcel Dekker Inc, New York, 2004.
- [66] W. Weibull, “A Statistical Distribution Function of Wide Applicability”, J. Appl. Mechanics, pp. 293 – 297, 1951.
- [67] 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.
- [68] R. M. Hill et L. A. Dissado, “Theoretical basis for the statistics of dielectric breakdown”, J. Phys. C: Solid State Phys., 16, pp. 2145-2156, 1983.
- [69] 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
- [70] C. Perrier, A. Beroual and J. L. Bessedé, “Experimental Investigations on different Insulating Liquids and Mixtures for Power Transformers”, IEEE Electrical Insulation Symp., USA, pp. 237–240, 2004.
- [71] Perrier, A. Beroual and J. L Bessedé, “The Mixed Insulating Liquids as an Alternative for High Voltage Transformers”, Conf. 14th, ISH, China, paper H-44, 2005.
- [72] D. Martin and Z. D. Wang, “Statistical Analysis of the AC Breakdown Voltages of Ester Based Transformer Oils”, IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. 15, No. 4, August 2008.
- [73] D. Vukovic and S. Tenbolen, “Comparative evaluation of breakdown strength of natural esters and mineral oil”, 16th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH, Afrique du Sud, 2009.
- [74] K. J. Rapp, “Lighting Impulse Testing of Natural Ester Fluid Gaps and Insulation Interfaces”, Trans. On Electr. Insul., Vol. 16, No. 6, December 2009.
- [75] X. Wang and Z. D. Wang, “Particle Effect on Breakdown Voltage of Mineral and Ester Based Transformer Oils”, Conference on Electrical Insulation & Dielectrics Phenomena, CEIDP, Québec, Canada, 2008.

- [76] T. D. Chau, “Propriétés diélectriques de liquides isolants d’origine végétale pour applications en haute tension”, Thèse de Doctorat, INP de Grenoble, 2009.
- [77] H. Yilmaz and S. Guler, “The Effect of Electrode Shape, Gap and Moisture on Dielectric Breakdown of Transformer Oil”, 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectrics Liquids, ICDL, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [78] C. Vincent, C. Benoit and R. Olivier, “Comparative Evaluation of Parameters of the Dielectric Breakdown Test on Transformer Oil”, 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectrics Liquids, ICDL, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [79] W. Rottenberg, “Étude des phénomènes de préclaquage dans les huiles isolantes dans des systèmes d’électrodes couverts de couches mines”, Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, 2000.
- [80] A. Zouaghi, “Étude de l’influence des barrières isolantes sur la tenue diélectrique d’intervalles d’huile en chocs de foudre et en continu”, Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, 1997.
- [81] C. Tran Duy, A. Denat, O. Lesaint, N. Bonifaci, Y. Bertrand, W. Daound and M. Hassanzadeh, “Influence of ageing on conduction and breakdown in rape-seed and mineral oils”, International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectrics Liquids, ICDL, France, 2008.
- [82] E. Gockenbach and H. Borsi, “Natural and Synthetic Ester Liquids as alternative to mineral oil for power transformers”, Conference on Electrical Insulation & Dielectrics Phenomena, CEIDP, Québec, Canada, 2008.
- [83] D. Mouchiroud, “Mathématiques : Outils pour la Biologie”, Deug SV, UCBL, 2003.
- [84] J. Lalot, “Statistical processing of dielectric testing methods”, EDF Bulletin des études et recherches, Séries B, Réseaux électriques, matériels électriques, No. ½, pp.5-30, 1983.
- [85] A.H. Bowker, “Méthodes statistiques de l’ingénieur”, livre, Paris, 1965.
- [86] T. J. Lewis, “Basic Electrical Processes in Dielectric Liquids”, IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. 1, No.4, pp. 630-644, 1994.
- [87] O. Hiroyuki and F. Kunio, “Electrical Phenomena at Interfaces. Fundamentals, measurements and application”, Marcel Dekker AG, 1998.
- [88] J. A. Cross, “Electrostatics: Principles, Problems and application”, 1987.
- [89] T. J. Félici, J. P. Gosse and A. Siofomboahany, “Liquid Flow Electrification and Zeta-potential in Hydrocarbons”, J. Electrostatic, Vol. 12, pp. 369, 1981.
- [90] O. Stern, “The theory of the electrolytic double-layer”, Z. Elektrochemie, Vol. 30, pp. 508-516, 1924.
- [91] T. J. Félici and J. P. Gosse, “Injection d’ions par des Electrodes Métalliques dans les Hydrocarbures Liquides de Résistivité Elevée”, Rev. Phys. Appl. (France) Vol. 14, pp. 629, 1979.

- [92] C.A. Mead, “Electron Transport Mechanisms in Thin Insulating Films”, *Phys. Rev.* Vol.128, pp. 2088, 1962.
- [93] A. Denat, B. Gosse and J. P. Gosse, “Ion Injection in Hydrocarbons”, *J. Electrostatics*, Vol. 7, pp. 209-225, 1979.
- [94] A. Denat, B. Gosse and J. P. Gosse, “High field DC and AC Conductivity of Electrolyte Solutions in Hydrocarbons”, *J. Electrostatics*, Vol.11, pp.179-197, 1982.
- [95] H. Tsukioka, E. Ohe, Y. Kamata, M. Maejima, M. Nozaki and K. Hyodo, “Development of low dielectric constant pressboard”, *Proceeding of the 21th SEIM*, 1988.
- [96] E. Kuffel, W. S. Zaengl and J. Kuffel, “High Voltage Engineering”, Elsevier, 2000.
- [97] D. Martin, Z. D. Wang, “A comparative Study of the Dielectric Strength of Ester Impregnated Cellulose for Use in Large Power Transformers”, *9th International Conference on Solid Dielectrics, ICSD, Winchester, Royaume-Uni*, 2007.
- [98] H. Z. Ding, Z. D. Wang and P. Jarman, “Effect of ageing on the impulse breakdown strength of oil-impregnated pressboard used in power transformers”, *Conference on Electrical Insulation & Dielectrics Phenomena, CEIDP, Missouri, États – Unis*, 2006.
- [99] H. Yamamoto, S. Otsuka, R. Hanaoka, S. Takata, N. Osawa, Y. Kanamaru and H. Koide: “Creeping Discharge in PFAE Oil Traveling Over Pressboard Surface with Small Alien Substances”, *IEEEJ Trans. FM*, Vol. 130, No. 11, pp. 1019-1025, 2010.
- [100] J. Dai, Z. D. Wang and P. Jarman, “Moisture and Aging Effect on the Creepage Discharge Characteristics at the Oil/Transformer-board Interface under Divergent Field”, *Conference on Electrical Insulation & Dielectrics Phenomena, CEIDP, Québec, Canada*, 2008.
- [101] C. Patrick McShane, “Aging of Paper Insulation in Natural Ester Dielectric Fluid”, *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, GA*, 2001.
- [102] G. J. Pukel, R. Eberhardt, H. M. Muhr, F. Baumann and W. Lick, “Large Power transformers for alternative insulating fluids”, *16th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH, Afrique du Sud*, 2009.
- [103] J. Dai, Z. D. Wang, P. Dyer, A. W. Darwin, and I. James “Investigation of the impregnation of cellulosic insulations by ester fluids”, *Conference on Electrical Insulation & Dielectrics Phenomena, CEIDP, Vancouver*, 2007.
- [104] H. Okubo, S. Yamamoto, T. Nara, K. Kato, F. Endo, A. Yamazaki, Y. Hatta, T. Hikosaka and H. Koide, “Charge Behaviour in Palm Fatty Acid Ester Oil (PFAE)/Pressboard Insulation System under Flow Condition in Power Transformers”, *International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectrics Liquids, ICDL, France*, 2008.
- [105] R. Liu, C. Törnkvist., “Ester fluids as alternative for mineral oil: The difference in streamer velocity and LI breakdown voltage”, *Conference on Electrical Insulation & Dielectrics Phenomena, CEIDP, États – Unis*, 2009.

- [106] I. Fofana, H. Borsi, E. Gockenbach, V. Wasserberg, “Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers, Part 2: Investigation of mixed liquids impregnated paper insulation”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 18, No. 4, pp. 5-16, 2002.
- [107] 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.
- [108] 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
- [109] L. Lundgaard, D. Linhjell, G. Berg and S. Sigmond, “Positive and negative streamers in oil gaps with and without pressboard interfaces”, 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectrics Liquids, ICDL, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [110] R. Liu, A. Jakst and T. Bengtsson, “Streamer Propagation in Composite Oil/Cellulose Insulation under LI Voltages”, *International Symposium on Electrical Insulation*, CA, États – Unis, 2000.
- [111] Y. Nakao, K. Wakimoto, K. Miyagi, H. Itoh, Y. Sakai and H. Tagashira, “Propagation Characteristic of Impulse Creepage Discharge in Perfluorocarbon Liquid”, *Electr. Engineering in Japan*, Vol. 131, No. 4, 2000.
- [112] Y. Nakao, M. Naruse, T. Sakai, H. Hidenori Itoh and Y. Suzuki, “Propagation Characteristic of Impulse Creepage Discharge in a Parallel-Plane Gap with a Protruding Point in Transformer Oil”, *Electr. Engineering in Japan*, Vol. 131, No. 4, 2000.
- [113] H. Okubo, M. Ikeda, M. Honda and S. Yanabu, “Creepage discharge propagation in transformer oil with impulse voltages”, *Int. Symp. on Hig. Volt. Eng.*, Athens, Greece, 1983.
- [114] G. C. Lichtenberg, *Novi Comm. Soc. Reg. Sci. Gott.* 1777.
- [115] P. O. Pedersen, “*Danske Vidensk Selkab*”, Vol. Part I (1919), Part II (1922), Part III, 1929.
- [116] Y. Kamata, E. Ohe, K. Endoh, S. Furukawa, H. Tsukioka, M. Maejima, H. Fujita, M. Nozaki, F. Ishizuka and K. Hyohdoh, “Development of Low-permittivity Pressboard and its Evaluation for Insulation of Oil-immersed EHV Power Transformers”, *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. 26, No. 4, 2009.
- [117] P. Atten and A. Saker, “Streamer Propagation over a Liquid/Solid Interface”, *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. 28, pp. 230-242, 1993.
- [118] A. Beroual and R. Tobazeon, “Prebreakdown phenomena in liquid and solid cyclohexane with point-plane electrodes subjected to voltage steps”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 22, pp. 1568-1569, 1989.

- [119] P. K. Watson and W. G. Chadband, “The Dynamics of Pre-Breakdown Cavities in Viscous Silicone Fluids in Negative Point-Plane Gaps”, *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. 23, pp. 729-738, 1988.
- [120] S. Ohgaki and Y. Tsunoda, “A Study of The Positive Streamer Growth Under Surface Discharge Configuration in Liquid Paraffin”, *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. 19, pp.594-601, 1984.
- [121] R. Hebner, E. F. Kelley, E. O. Forster and G. J. FitzPatrick, “Observation of pre-breakdown and breakdown phenomena in liquid hydrocarbons”, *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. 20, pp. 281-92, 1985.
- [122] Y. Nakao, K. Wakimoto, K. Miyagi, H. Itoh, Y. Sakai and H. Tagashira, “Propagation Characteristics of Impulse Creepage Discharge in Perfluorocarbon Liquid”, *Electr. Engineering in Japan*, Vol. 131, 2000.
- [123] L. 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, École Centrale de Lyon, 2006.
- [124] B. B. Mandelbrot, “Fractals, Form, Chance and Dimension”, San Francisco: Freeman, 1977.
- [125] Y. Sawada, S. Ohta, M. Yamazaki and H. Honjo, “Self-similarity and a phase transition-like behaviour of a random growing structure governed by a non-equilibrium parameter”, *Phys. Rev. A*, Vol. 26 pp. 3557, 1982.
- [126] L. Niemeyer, L. Pietronero and H. J. Wiesmann, “Fractal dimension of dielectric breakdown”, *Phys. Rev. Letter*, Vol. 33, pp. 1033–1036, 1984.
- [127] J. L. Vicente, A. C. Razzitte and E. E. Mola, “Fractal characteristics of dielectric breakdown”, *Conference on Electrical Insulation & Dielectrics Phenomena, CEIDP, États – Unis*, 1994.
- [128] H. J. Wiesmann and H. R. A. Zeller, “fractal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 60, pp. 1770–3, 1986.
- [129] L. Kebbabi and A. Beroual, “Fractal analysis of creeping discharge patterns propagating at solid/liquid interfaces: Influence of the nature and geometry of solid insulators”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 39, pp. 177–183, 2006.
- [130] L. Dumitrescu, O. Lesaint, N. Bonifaci, A. Denat and P. Notingher, “Study of streamer inception in cyclohexane with a sensitive charge measurement technique under impulsion voltage”, *J. of Electrostatic* 53, pp. 135-146, 2011.
- [131] H. Okubo, N. Hayakawa, “A novel technique for partial discharge and breakdown investigation based on current pulse waveform analysis”, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electr. Insul.* 12(4), pp. 736-744, 2005.
- [132] A. Beroual and S. Bouazabia, “Mechanisms Involved in Generation of Gaseous Bubbles in Liquid Dielectric under DC Voltage”, *Arch. Electr. Eng.*, Vol. XLVIII, No. 3, pp. 295-303, 1999.
- [133] A. C. T. Briggs, A. Beroual and F. Buret, “The Dynamics of DC Predisruption in Liquid Insulating Media”, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 1, No. 3, pp. 371-376, 1994.

- [134] R. Coelho and J. Debeau, “Properties of the tip-plane configuration”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 4, pp. 1 266-1 280, 1971.
- [135] P. Ceccato, “Filamentary plasma discharge inside water: initiation and propagation of a plasma in a dense medium”, Thèse de doctorat, École Polytechnique, Palaiseau, France, 2009.
- [136] F. Jomni, F. Aitken, A. Denat, “Experimental investigation of transient pressure waves produced in dielectric liquids”, *J. Acoust. Soc. Am.* 107, pp. 1203-1211, 2000.
- [137] L. Rayleigh, “On the pressure developed in the liquid during the collapse of a spherical cavity”, *Philos. Mag.* 34, pp. 94-98, 1917.
- [138] W. G. Chadband and G. T. Wright, “A prebreakdown phenomena in the liquid dielectric hexane”, *Brit. J. Appl. Phys.*, Vol. 16, pp. 305-313, 1965.
- [139] R. T. Harrold, “A Simple Electronic Technique for Measuring Streamer Velocities in Insulating Liquids and Gases”, *Conference on Electrical Insulation & Dielectrics Phenomena*, pp. 123-135, 1974.
- [140] W. J. Dixon and A. M. Mood, “A method for obtaining and analyzing sensitive data”, *J Amer Stat Assoc* 43, pp. 109–126, 1948.
- [141] N. N. Minh, “Étude de liquides biodégradables en vue d'application en isolation moyenne tension”, *Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie électrique*, Lyon, 2008.
- [142] S. S. Shapiro and M. B. Wilk, “An analysis of variance test for normality (complete samples)”, *Biometrika*, Vol. 52, Nos. 3 and 4, pp. 591-611, 1965.
- [143] T. W. Anderson and D.A. Darling, “Asymptotic theory of certain “goodness-of-fit” criteria based on stochastic processes”, *Annals of Mathematical Statistics* 23, pp. 193–212, 1952.
- [144] www.r-project.org.
- [145] M. S. Bartlett, “Properties of sufficiency and statistical tests”, *Proceedings of the Royal Statistical Society Series A* 160, pp. 268–282, 1937.
- [146] M. L. Coulibaly, A. Beroual, O. Aitken and A. Girodet, “Experimental characterization of creeping discharges over solid/gas and solid gaseous mixture interfaces under lightning impulse voltage”, *XVI International Conference on Gas Discharges and Their applications*, September, Cardiff, Wales, Royaume-Uni, 2008.
- [147] 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.

AUTORISATION DE SOUTENANCE

Vu les dispositions de l'arrêté du 7 août 2006,

Vu la demande du Directeur de Thèse

Monsieur A. BEROUAL

et les rapports de

Monsieur C. BROSSEAU
Professeur - Laboratoire d'Electronique et Systèmes de Télécommunications
Université de Bretagne Occidentale - Faculté des Sciences et Techniques - 6, avenue Victor Le Gorgeu
29238 BREST cedex 3

Et de

Monsieur I. FOFANA
Professeur - ISOLIME - Université du Québec à Chicoutimi - 555, Bd de l'Université - Chicoutimi (Québec)
G7H 2B1 - CANADA

Monsieur DANG Viet-Hung

est autorisé à soutenir une thèse pour l'obtention du grade de **DOCTEUR**

Ecole doctorale ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE ET AUTOMATIQUE

Fait à Ecully, le 10 février 2011

P/Le Directeur de l'E.C.L.
Directeur des Etudes



Titre : Étude des phénomènes de préclaquage et de claquage des huiles végétales, minérales et synthétiques – Caractérisation des décharges aux interfaces

Mots clés: *Huiles végétales, streamers, longueur finale, préclaquage, claquage, décharges surfaciques, dimension fractale.*

Résumé:

Ce travail porte sur une étude comparative des huiles végétales (esters naturels) issues de différentes graines, esters synthétiques, et minérales sur la base des caractéristiques de génération et de propagation des streamers qui s’y développent, des tensions de claquage ainsi que des décharges se propageant sur un isolant solide en présence de ces huiles. Il ressort des résultats obtenus qu’en géométrie pointe – plan, sous tension continu, la tension de génération en polarité positive est toujours supérieure à celle mesurée en polarité négative et elle est plus élevée dans les huiles esters que dans les huiles minérales quelle que soit la polarité de l’électrode pointe. En ce qui concerne la propagation de streamers sous tension impulsionnelle de foudre, les longueurs finales (ou longueurs d’arrêt) L_f des streamers positifs sont environ 10 fois supérieures à celles des streamers négatifs. Pour atteindre la même L_f , il faut beaucoup plus de tension en polarité négative qu’en polarité positive. Par conséquent, les tenues diélectriques sont plus élevées en polarité négative qu’en polarité positive. D’autre part, L_f est plus élevée dans les huiles végétales que dans certaines huiles minérales. La tension de claquage des huiles isolantes, déterminée selon la norme CEI 60156, suit généralement une distribution Normale. Les probabilités de claquage peuvent alors être déterminées suivant la loi Normale en prenant un échantillonnage suffisamment grand ($n > 30$). Il est également montré que les huiles végétales et l’ester synthétique présentent des tensions de claquage ($U_{1\%}$, $U_{10\%}$ et $U_{50\%}$) plus élevées que les huiles minérales sous tension alternative. La tension de claquage moyenne est aussi plus élevée dans les esters que dans les huiles minérales sous tension impulsionnelle de foudre. La morphologie, la longueur d’arrêt et le courant des décharges se propageant sur un isolant solide (carton) immergé dans les liquides étudiés, dépendent de l’amplitude et de la polarité de la tension, de l’épaisseur du solide et de la nature des huiles. L_f augmente quasi-linéairement avec la tension appliquée et diminue lorsque l’épaisseur du solide augmente. Pour une tension et une épaisseur données, les décharges qui se développent sur l’interface carton/huile végétale sont plus longues que celles sur l’interface carton/huile minérale. Par ailleurs, L_f est plus élevé en polarité positive qu’en polarité négative, ce qui indique que la polarité la plus contraignante est la polarité positive. Il a été également mis en évidence l’existence d’une décharge secondaire de signe opposé à celui de la tension appliquée, résultat de l’accumulation de charges d’espace à la surface de l’isolant solide. Enfin, la dimension fractale D des décharges diminue lorsque l’épaisseur du solide augmente. Plus l’épaisseur du solide est grande, plus le degré de ramification des décharges est moins important. Pour une épaisseur de solide donnée, D est généralement plus élevée dans l’huile minérale que dans l’huile végétale.

Title: Prebreakdown and breakdown phenomena in vegetable, mineral and synthetic oils – Characterisation of creeping discharges

Keywords: *vegetable oil, streamers, final length, prebreakdown, breakdown, creeping discharge, fractal dimension.*

Direction de recherche :

Monsieur Abderrahmane BEROUAL, Professeur des Universités
Abderrahmane.Beroual@ec-lyon.fr

Laboratoire Ampère - CNRS UMR 5005, <http://www.ampere-lab.fr>

École Centrale de Lyon

36 Avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully Cedex, France.