



HAL
open science

Propriétés diélectriques de liquides isolants d'origine végétale pour applications en haute tension

Chau Tran-Duy

► **To cite this version:**

Chau Tran-Duy. Propriétés diélectriques de liquides isolants d'origine végétale pour applications en haute tension. Energie électrique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. Français. NNT : . tel-00827638

HAL Id: tel-00827638

<https://theses.hal.science/tel-00827638>

Submitted on 29 May 2013

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.

UNIVERSITE JOSEPH FOURIER-GRENOBLE 1

Ecole doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du Signal (EEATS)

THESE

En vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER

Spécialité Génie Electrique

Propriétés diélectriques de liquides isolants d'origine végétale pour applications en haute tension

par

Chau TRAN DUY

Directeur de thèse : M. André Denat

Co-directeur de thèse : M. Olivier Lesaint

Mme Nelly Bonifaci

Soutenue le 8 janvier 2009 devant la commission composée de:

Rapporteurs : M. Jean Paillol

M. Hubert Romat

Examineurs : M. Jean Numa Foulc

M. Mehrdad Hassanzadeh

M. Yves Bertrand

Encadrants : M. André Denat

M. Olivier Lesaint

Mme Nelly Bonifaci

REMERCIEMENT

Ce travail a été accompli sous la direction scientifique de Monsieur André DENAT, Directeur de recherche CNRS à l'équipe Matériaux Diélectrique et Electrostatique, au Laboratoire G2E lab. Qu'il me soit permis de lui exprimer mes plus vifs remerciements pour l'encadrement qu'il m'a apporté dans ce travail et de ma sincère reconnaissance pour les encouragements et les nombreux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer, toujours avec une grande amabilité et une constante disponibilité.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Olivier LESAIN, Directeur de recherche CNRS, pour avoir assuré également l'encadrement de mon travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour ses supports et pour de nombreuses discussions fructueuses au sujet de recherche.

J'exprime également ma gratitude à Madame Nelly BONIFACI, Chargé de recherche CNRS, pour ses aides ainsi que pour l'intérêt qu'elle a porté à ce travail.

Que Monsieur Jean Numa FOULC, Professeur de l'Université Joseph Fourier, soit remercié de l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le Jury, de même que Monsieur Jean PAILLOL, Professeur de l'Université de PAU et Monsieur Hubert ROMA, Professeur de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, qui ont accepté d'être rapporteurs de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent aux Messieurs Yves BERTRAND, Ingénieur EDF et Mehrdad Hassanzadeh, Ingénieur AREVA pour avoir participé au jury.

Je remercie vivement mes collègues à l'équipe MDE pour de nombreux services qu'ils m'ont rendus, notamment Monsieur Jean FILIPPINI et Monsieur Alain SYLVESTRE, avec lesquels j'ai eu de nombreuses discussions intéressantes.

Je tien à remercier profondément mes amis TRAN THI Thu Nhi, VU ANH Tho, TRAN VAN Hoan, NGUYEN NGOC Minh, HOANG Trang, NGUYEN QUANG Tuan pour ses aides précieux et pour les moments de bonheur qu'ils partagent avec moi pendant des années de travail au laboratoire.

J'exprime spécialement ma gratitude à mes parents, TRAN DUY Phien et CHU THI Thieu, qui m'ont toujours supporté et je leur offre le succès et tout honneur que j'obtiens de cette thèse.

Table de matière

| | |
|--|-----------|
| TABLE DE MATIERE | I |
| TABLE DES FIGURES | V |
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 PROPRIETES DIELECTRIQUES : INFLUENCE DE L'EAU, DES PARTICULES ET DE LA TEMPERATURE | 5 |
| 1.1 Etude bibliographique..... | 6 |
| 1.1.1 Solubilité de l'eau dans les isolants liquides | 6 |
| 1.1.2 Rigidité diélectrique : influence de la teneur en eau et des particules..... | 8 |
| 1.1.3 Propriétés diélectriques : influence de la température et de l'humidité..... | 10 |
| 1.1.3.1 Propriétés diélectriques des isolants liquides et leur dépendance en fréquence..... | 10 |
| 1.1.3.2 Influence de la température..... | 11 |
| 1.1.3.3 Influence de la teneur en eau | 13 |
| 1.2 Techniques expérimentales..... | 13 |
| 1.2.1 Conditionnement de l'huile..... | 13 |
| 1.2.2 Mesure de la tension de claquage en tension alternative..... | 14 |
| 1.2.3 Mesure des propriétés diélectriques | 14 |
| 1.2.3.1 Principe de mesure..... | 14 |
| 1.2.3.2 Circuits équivalents | 15 |
| 1.2.3.3 Dispositifs de mesure de conductivité et de pertes diélectriques | 16 |
| 1.3 Propriétés diélectriques de l'huile RS50..... | 18 |
| 1.3.1 Solubilité de l'eau | 18 |
| 1.3.2 Tension de claquage..... | 21 |
| 1.3.2.1 Influence de la teneur en eau dans l'huile filtrée | 21 |
| 1.3.2.2 Influence de la teneur en eau en présence de particules de cellulose..... | 22 |
| 1.3.3 Propriétés diélectriques | 23 |
| 1.3.3.1 Spectre diélectrique typique..... | 23 |
| 1.3.3.2 Influence de la température..... | 26 |
| 1.3.3.3 Influence de l'humidité | 29 |
| 1.4 Conclusions sur les propriétés diélectriques générales..... | 30 |
| CHAPITRE 2 VIEILLISSEMENT..... | 33 |
| 2.1 Etude bibliographique..... | 34 |

| | |
|--|-----------|
| 2.1.1 Oxydation..... | 34 |
| 2.1.1.1 Oxydation de l'huile minérale | 34 |
| 2.1.1.2 Oxydation des esters naturels | 35 |
| 2.1.2 Hydrolyse..... | 35 |
| 2.1.3 Influence du vieillissement sur les propriétés des isolants liquides | 36 |
| 2.2 Techniques expérimentales..... | 37 |
| 2.3 Vieillissement des huiles..... | 37 |
| 2.3.1 Acidité et couleur des huiles en fonction du temps de vieillissement | 37 |
| 2.3.2 Influence du vieillissement sur les propriétés diélectriques | 39 |
| 2.3.3 Influence du vieillissement sur la tension de claquage alternative..... | 42 |
| 2.3.4 Comparaison des résultats sur le vieillissement des huiles | 43 |
| 2.4 Conclusions sur le vieillissement | 45 |
| | |
| CHAPITRE 3 GENERATION ET PROPAGATION DES STREAMERS | 47 |
| | |
| 3.1 Etude bibliographique de la génération et de la propagation des streamers | 49 |
| 3.1.1 Caractères généraux | 49 |
| 3.1.2 Génération du streamer | 51 |
| 3.1.3 Propagation du streamer..... | 54 |
| 3.1.3.1 Terminologie et notions de modes de propagation | 54 |
| 3.1.3.2 Premier mode de propagation (vitesse de 0,1 à 0,5 km/s)..... | 54 |
| 3.1.3.3 Deuxième mode de propagation (vitesse de 1 à ≈4 km/s)..... | 55 |
| 3.1.3.4 Streamers de vitesse élevée (3 ^{ème} mode)..... | 62 |
| 3.2 Techniques expérimentales..... | 64 |
| 3.2.1 Cellule d'essai | 64 |
| 3.2.2 Configuration d'électrodes..... | 64 |
| 3.2.3 Générateur de tension impulsionnelle..... | 65 |
| 3.2.4 Systèmes de visualisation..... | 65 |
| 3.2.5 Système de traitement d'images..... | 66 |
| 3.2.6 Mesures électriques..... | 66 |
| 3.2.7 Schéma général | 68 |
| 3.3 Etude de la génération des streamers dans l'huile RS50..... | 68 |
| 3.3.1 Probabilité de génération..... | 68 |
| 3.3.2 Retard à la génération..... | 70 |
| 3.3.3 Effet « d'échelle » | 73 |
| 3.3.4 Conclusions..... | 74 |
| 3.4 Etude de la propagation des streamers dans l'huile RS50..... | 75 |
| 3.4.1 Propriétés générales de la propagation du streamer | 75 |
| 3.4.1.1 Forme globale des streamers..... | 75 |
| 3.4.1.2 Longueur d'arrêt et vitesse des streamers | 76 |
| 3.4.1.3 Charge des streamers | 81 |

| | |
|---|------------|
| 3.4.2 Différents « modes » de propagation des streamers positifs | 82 |
| 3.4.2.1 Streamers lents (~2km/s) observés pour $U < U_a$ | 82 |
| 3.4.2.2 Streamers à vitesse intermédiaire ($2 < v < 5$ km/s)..... | 87 |
| 3.4.2.3 Streamers rapides observés pour $U \geq U_a$ | 89 |
| 3.4.2.4 Phénomènes de streamers positifs et comparaison avec l'huile minérale..... | 92 |
| 3.4.3 Différents « modes » de propagation des streamers négatifs | 94 |
| 3.4.3.1 Streamers lents (1km/s $< v < 2$ km/s) observés pour $U < U_a$ | 94 |
| 3.4.3.2 Streamers rapides ($v > 5$ km/s) observés pour $U \geq U_a$ | 96 |
| 3.4.4 Influence d'une barrière isolante solide sur la propagation des streamers. | 99 |
| 3.4.4.1 Tension de claquage | 99 |
| 3.4.4.2 Vitesse moyenne de propagation | 101 |
| 3.4.5 Discussion, comparaison avec l'huile minérale | 103 |
| 3.5 Conclusions sur les streamers..... | 106 |
| | |
| CONCLUSIONS GENERALES..... | 109 |
| | |
| PERSPECTIVES | 113 |
| | |
| ANNEXE..... | 115 |
| | |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 119 |

Table des figures

| | |
|--|----|
| Fig. 1.1 Teneur en eau dans l'huile minérale en fonction de l'humidité relative de l'air à différentes températures [17]..... | 7 |
| Fig. 1.2 Rigidité diélectrique de l'huile minérale en fonction de la teneur en eau. 1) sans cellulose et 2) avec cellulose [17]..... | 9 |
| Fig. 1.3 Formation d'un « pont » de particules connectant les deux électrodes en fonction du temps [17]..... | 10 |
| Fig. 1.4 Spectre fréquentiel du facteur de dissipation et de la permittivité d'une huile minérale du type paraffinique [20]..... | 12 |
| Fig. 1.5 Influence de la température sur les pertes dans l'huile minérale. [20] | 12 |
| Fig. 1.6 Principe de mesure de la spectroscopie diélectrique..... | 14 |
| Fig. 1.7 Schémas électriques équivalents du comportement diélectrique d'un isolant | 16 |
| Fig. 1.8 Dispositifs de mesure des propriétés diélectriques et de conditionnement de l'huile | 17 |
| Fig. 1.9 Précision de la mesure du Novocontrol BDS 20 en fonction de la capacité et de la fréquence. | 18 |
| Fig. 1.10 Evolution de la teneur en eau de l'huile RS50 placée dans une atmosphère à 80% HR..... | 19 |
| Fig. 1.11 Tension de claquage en fonction de la teneur relative en eau..... | 21 |
| Fig. 1.12 Tensions de claquage des huiles RS50 et Univolt 54 en fonction de la teneur relative en eau en présence ou non de particules de cellulose..... | 22 |
| Fig. 1.13 Dépendance en fréquence des permittivités réelle et imaginaire dans l'huile RS50, $T = 20^{\circ}\text{C}$, teneur en eau = 46ppm. | 24 |
| Fig. 1.14 Dépendance en fréquence de $tg\delta$ dans l'huile RS50, $T = 20^{\circ}\text{C}$, teneur en eau = 46ppm..... | 24 |
| Fig. 1.15 Les pertes de l'huile minérale à 20°C et à 120°C | 25 |
| Fig. 1.16 Conductivité de la RS50 à 20°C calculée avec l'Eq. 1.13 | 26 |
| Fig. 1.17 Courbes $tg\delta(f)$ pour l'huile RS50 à différentes températures | 27 |
| Fig. 1.18 Variations de σ , σ_0 et de l'inverse de la viscosité en fonction de la température..... | 27 |
| Fig. 1.19 Variations de $tg\delta$ avec la température pour les fréquences de 0,2 et 0,5 MHz et comparaison avec la variation de η/T avec T | 28 |
| Fig. 1.20 Influence de la teneur en eau sur les pertes à 20°C | 29 |

| | |
|--|----|
| Fig. 1.21 Conductivité de l'huile RS50 en fonction de la teneur relative en eau pour différentes températures. | 30 |
| Fig. 1.22 Influence de la tension appliquée sur la conductivité mesurée à 1Hz..... | 30 |
| Fig. 2.1 Différentes phases de vieillissement d'une huile minérale et variation de l'acidité et de la quantité de dépôt [20]..... | 35 |
| Fig. 2.2 Acidité des huiles en fonction du temps de vieillissement, test sans catalyseur [39]. | 36 |
| Fig. 2.3 Comparaison de la couleur des deux huiles après 15 jours à 120°C (leurs couleurs initiales sont similaires) a: Huile minérale, b: Huile RS50..... | 38 |
| Fig. 2.4 Acidité soluble en fonction du temps de vieillissement à 120°C..... | 38 |
| Fig. 2.5 Variation de $tg\delta$ avec la fréquence dans l'huile RS50 pour différents temps de vieillissement. Toutes les mesures ont été effectuées à 120°C. Teneur en eau initiale 300ppm, teneur en eau finale 706ppm..... | 39 |
| Fig. 2.6 Variation de $tg\delta$ avec la fréquence dans l'huile minérale pour différents temps de vieillissement. Toutes les mesures ont été effectuées à 120°C. Teneur en eau initiale 30ppm, teneur en eau finale 52ppm. | 40 |
| Fig. 2.7 Conductivité des huiles en fonction du temps de vieillissement à 120°C..... | 41 |
| Fig. 2.8 Permittivité des huiles en fonction du temps de vieillissement à 120°C. | 41 |
| Fig. 2.9 Influence du vieillissement sur la tension de claquage de l'huile RS50 filtrée en fonction de la teneur relative en eau..... | 42 |
| Fig. 3.1 Streamer positif "buisson" dans le cyclohexane en géométrie pointe-plan sous créneau de tension. Photographie obtenue par ombroscopie (temps d'exposition =5 ns, distance $D=0,18$ cm, tension appliquée $U=12$ kV) [49]. | 50 |
| Fig. 3.2 Streamers positifs sous tension impulsionnelle en géométrie pointe-plan. A: très ramifié dans l'huile de transformateur (distance 3 mm, tension appliquée 22 kV), B: peu ramifié dans l'huile silicone ($D=3$ mm, $U=22,5$ kV, viscosité 1000 cSt) [54]. | 50 |
| Fig. 3.3 Temps de retard au claquage en géométrie tige-plan, polarité négative [60]. | 51 |
| Fig. 3.4 Temps de retard à la génération des streamers positifs sous tension impulsionnelle, distance inter-électrodes $D=20$ mm. [61] | 52 |
| Fig. 3.5 Champ de génération des streamers négatifs en fonction du rayon de courbure de l'électrode en géométrie tige-plan dans l'huile blanche d'après Rząd et al. [60] et en positif en géométrie pointe-plan dans les hydrocarbures par Gournay [62]. | 52 |
| Fig. 3.6 Champ de génération des streamers en fonction du rayon de courbure de l'électrode [21]. | 53 |

| | |
|--|----|
| Fig. 3.7 Streamer négatif dans l'huile minérale suivi par caméra à balayage de fente (a), par caméra à intensificateur (b) et, oscillogramme de la charge et de la lumière émises par le streamer (c). $U=418\text{kV}$, $D=35\text{cm}$ [69]. | 55 |
| Fig. 3.8 Vitesse moyenne des streamers des deux polarités dans l'huile minérale et les seuils de tension de claquage U_c et la tension d'accélération U_a . $D=10\text{cm}$. [69]. | 57 |
| Fig. 3.9 Longueurs d'arrêt l_s des streamers positifs en fonction de la tension appliquée dans le cyclohexane et le pentane sous créneaux de tension en géométrie pointe-plan ($D=0,25\text{cm}$, $r_0=3\text{ }\mu\text{m}$ dans le cyclohexane et $r_0=2,4\text{ }\mu\text{m}$ dans le pentane [49]. | 58 |
| Fig. 3.10 Représentation schématique du streamer positif qui s'arrête sous l'effet de la chute de tension ΔU . | 58 |
| Fig. 3.11 Longueur d'arrêt l_s des streamers en fonction de la tension appliquée U dans l'huile minérale sous tension impulsionnelle ($0,4/1400\text{ }\mu\text{s}$) en géométrie pointe-plan ($D=10\text{ cm}$, $r_p=100\text{ }\mu\text{m}$)[69] | 59 |
| Fig. 3.12 Photographie typique en balayage de fente des streamers du 2eme mode ($x:10,5\text{ }\mu\text{s/cm}$, $y:6,2\text{ cm/cm}$), et signaux du courant transitoire, de l'intensité lumineuse et de la tension appliquée ($10\text{ }\mu\text{s/div}$, $D=20\text{ cm}$, $U=0,79xU_c=256\text{ kV}$) [61] | 60 |
| Fig. 3.13 Photographie en balayage de fente ($x:1,5\text{ }\mu\text{s/div.}$, $y:2,5\text{ cm/cm}$) typique des streamers positifs de 3 ^{ème} mode se propageant pour des tensions $U \geq U_a$ et signaux électriques associés ($1\text{ }\mu\text{s/div.}$, $D=10\text{ cm}$, $U=2,49xU_c=424\text{ kV}$)[61]. | 63 |
| Fig. 3.14 Charge du streamer en fonction de la tension appliquée U [69]. | 63 |
| Fig. 3.15 Cellule d'essais et le système d'électrodes pointe-plan. | 64 |
| Fig. 3.16 Disposition des impédances de mesure de courant ou de charge | 67 |
| Fig. 3.17 Vue d'ensemble du banc d'essais | 68 |
| Fig. 3.18 Probabilité de la génération des streamers négatifs pour différents rayons de courbure de la tige ($D=2\text{cm}$). | 69 |
| Fig. 3.19 Tension de génération pour une probabilité à 50% en fonction du rayon de courbure de l'électrode tige. | 69 |
| Fig. 3.20 Exemple de temps de retard en négatif, $r_p = 0,5\text{ mm}$, $U=98\text{ kV}$. | 70 |
| Fig. 3.21 Exemple de temps de retard en positif, $r_p = 2\text{ mm}$, $U=232\text{ kV}$. | 70 |
| Fig. 3.22 . Evolution du temps de retard t_r en polarité positive. | 71 |
| Fig. 3.23 Evolution du temps de retard t_r en polarité négative. | 71 |
| Fig. 3.24 Relation entre le temps de retard t_r et la probabilité d'apparition en polarité négative. | 72 |
| Fig. 3.25 Relation entre le rayon de courbure et le champ maximum sur la tige pour un retard t_r fixe de $1\text{ }\mu\text{s}$. | 72 |

| | |
|---|----|
| Fig. 3.26 Champ de génération du streamer en fonction du rayon de courbure de l'électrode (probabilité d'apparition de 50%). | 74 |
| Fig. 3.27 Un streamer positif arrêté typique en géométrie pointe/plan, $r_p \cong 100 \mu\text{m}$, $D = 10 \text{ cm}$, $U = 120 \text{ kV}$: (a) : photographie par caméra intensifiée, (b) photographie par caméra à balayage de fente, (c) : enregistrement de la charge, (d) : enregistrement du courant. | 75 |
| Fig. 3.28 Photographie d'un streamer produisant le claquage (caméra fermée à 100 ns avant le claquage). $D = 10 \text{ cm}$, $U = 241 \text{ kV}$. | 76 |
| Fig. 3.29 Longueur d'arrêt l_s , vitesse de propagation v et charge totale Q des streamers positifs. (a): $D = 2 \text{ cm}$, (b): $D = 10 \text{ cm}$. | 78 |
| Fig. 3.30 Longueur d'arrêt l_s , vitesse moyenne de propagation v et charge totale Q des streamers négatifs. (a): $D=2 \text{ cm}$, (b): $D= 10 \text{ cm}$. | 79 |
| Fig. 3.31 Vitesse moyenne du streamer mesurée à différentes distances en polarité positive. | 80 |
| Fig. 3.32 Vitesse moyenne du streamer mesurée à différentes distances en polarité négative. | 80 |
| Fig. 3.33 Vitesse moyenne des streamers positifs avec différents rayons de courbure de la pointe ou de la tige ($D = 2\text{cm}$). | 81 |
| Fig. 3.34 Vitesse moyenne des streamer négatifs avec différents rayons de courbure de la pointe ou de la tige ($D = 2\text{cm}$). | 81 |
| Fig. 3.35 Courant transitoire d'un streamer arrêté du "2 ^e mode" enregistré au-dessous de la tension de claquage ($D = 10\text{cm}$, $U = 120\text{kV}$) et la photographie correspondante. | 83 |
| Fig. 3.36 Oscillogramme de la charge et photographie correspondant à la propagation totale d'un streamer de « 2 ^{ème} mode » pour $U < U_a$. $D=20\text{cm}$, $U=168\text{kV}$, $l_s= 51\text{mm}$ et $v= 1,7\text{km/s}$. | 84 |
| Fig. 3.37 Photographie intégrale d'un streamer touchant le plan sans produire de claquage et signaux électriques associés à sa propagation. $D= 2\text{cm}$, $U= 44\text{kV}$, $U_c= 46\text{kV}$. | 86 |
| Fig. 3.38 Photographie intégrale d'un streamer touchant le plan $6\mu\text{s}$ avant le claquage. $D= 5\text{cm}$, $U= 94\text{kV}=U_c$. | 87 |
| Fig. 3.39 Courant transitoire d'un streamer arrêté du "3 ^{ème} mode" et photographie correspondante ($D = 10 \text{ cm}$, $U = 120\text{kV}$). | 88 |
| Fig. 3.40 Enregistrement de charge correspondant à un streamer arrêté du "3 ^{ème} mode" ($D = 20 \text{ cm}$, $U = 158 \text{ kV}$). | 88 |
| Fig. 3.41 Longueur d'arrêt totale l_s et longueur d'arrêt l_3 du streamer de "3 ^e mode" à $D = 10 \text{ cm}$. | 89 |
| Fig. 3.42 Courant transitoire et photographie à balayage de fente des streamers du « 3ème mode ». $D = 10 \text{ cm}$, $U = 142 \text{ kV}$. | 90 |
| Fig. 3.43 Enregistrement typique de la charge d'un streamer constitué de « sauts » rapides qui se propage jusqu'au claquage ($D = 20 \text{ cm}$, $U = 212 \text{ kV}$). | 91 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 3.44 Courant transitoire et photographie d'un streamer du "4 ^{ème} mode" constitué d'un saut unique se propageant jusqu'au claquage ($D= 10$ cm, $U = 152$ kV)..... | 91 |
| Fig. 3.45 Rapport Q/U en fonction de la longueur d'arrêt l_s des streamer positifs au dessous de la tension de claquage. | 94 |
| Fig. 3.46 Courant transitoire et photographie correspondante d'un streamer négatif se propageant jusqu'au claquage ($D = 10$ cm, $U = 185$ kV)..... | 95 |
| Fig. 3.47 Charge d'un streamer négatif se propageant jusqu'au claquage ($D = 10$ cm, $U = 196$ kV) .. | 96 |
| Fig. 3.48 Courant transitoire et photographie d'un streamer négatif se propageant jusqu'au claquage ($D = 10$ cm, $U = 228$ kV) | 97 |
| Fig. 3.49 Charge d'un streamer négatif se propageant jusqu'au claquage ($D = 10$ cm, $U = 228$ kV) ... | 97 |
| Fig. 3.50 Courant transitoire et photographie d'un streamer négatif se propageant jusqu'au claquage ($D = 10$ cm, $U = 380$ kV)..... | 98 |
| Fig. 3.51 Rapport Q/U en fonction de la longueur d'arrêt l_s à différentes distances D en polarité négative. | 99 |
| Fig. 3.52 Tensions de claquage en fonction de la distance x pointe-barrière. U_c^+ et U_c^- sont les tensions de claquage en l'absence de barrière. $D=10$ cm. | 100 |
| Fig. 3.53 Photographie du streamer positif contournant la barrière. $D=10$ cm, $x=1,2$ cm, $U= 230$ kV. | 101 |
| Fig. 3.54 Vitesse moyenne des streamers positifs en fonction de la tension appliquée en l'absence et en présence d'une barrière située à deux distances x différentes de la pointe. $D = 10$ cm. | 102 |
| Fig. 3.55 Vitesse moyenne des streamers négatifs en fonction de la tension appliquée en l'absence et en présence d'une barrière située à deux distances x différentes de la pointe. $D= 10$ cm..... | 102 |
| Fig. 3.56 Probabilité de claquage en fonction de la tension à différentes distances en polarité positive (lignes pointillées : huile minérale)[100] | 103 |
| Fig. 3.57 Probabilité de claquage en fonction de la tension à différentes distances en polarité négative (ligne pointillées: huile minérale)[69]..... | 103 |
| Fig. 3.58 Tension de claquage et tension d'accélération en fonction de la distance en polarité positive. Résultats dans l'huile minérale obtenus dans [100] | 104 |
| Fig. 3.59 Tension de claquage et tension d'accélération en fonction de la distance en polarité négative. Résultats dans l'huile minérale obtenus dans [69] | 104 |
| Fig. 3.60 Rapport des tensions de claquage dans les deux huiles | 106 |

Introduction

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

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

Suivant la classification proposée par N. Berger [1], on distingue les familles suivantes de liquides :

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

Les liquides de synthèse ont, au contraire, une composition simple et bien définie. Leurs propriétés sont donc constantes. Ils ont été développés pour des applications spécifiques, par exemple le Jarylec pour les condensateurs de puissance.

Les huiles végétales qui sont également des produits « naturels ». Ce sont des mélanges d'esters naturels dont la composition est plus simple (quelques dizaines de molécules), mais qui peut varier dans de larges proportions suivant l'origine des plantes ou graines utilisées. Les principales caractéristiques des liquides de cette famille sont la résistance au feu, la solubilité élevée de l'eau, une toxicité faible et une biodégradabilité élevée (due notamment à une faible résistance à l'oxydation et à l'hydrolyse). Il a été montré que les huiles végétales comme l'huile de colza, l'huile de palme, l'huile de coco, etc. peuvent satisfaire les spécifications exigées pour certaines applications électriques [2-11]. Ainsi, l'huile de ricin est employée depuis longtemps pour l'imprégnation des condensateurs de stockage d'énergie et l'huile de colza pour l'imprégnation des condensateurs pour courant continu.

Pour des raisons autant écologiques qu'économiques ou techniques, des tentatives ont été faites pour utiliser des huiles végétales à la place de l'huile minérale dans les transformateurs basse et moyenne tensions. De nombreux prototypes de transformateurs de distribution ont été réalisés avec succès. Leur utilisation dans les transformateurs de puissance suscite actuellement de nombreuses études. La viscosité élevée et le point d'écoulement restent cependant un obstacle pour leur utilisation dans des applications « type transformateur », qui représente le plus vaste marché des isolants liquides. Pour pallier à ce problème, une huile végétale modifiée (RS50) a été développée par EDF à partir d'une huile de colza [12]. Il s'agit d'un mélange d'esters organiques gras et de monoesters dérivés de ces esters suivant un processus de transestérification. L'huile RS50 possède ainsi une viscosité et une température d'écoulement comparables à celles de l'huile minérale tout en conservant une partie des avantages des esters naturels (propriétés écotoxicologiques), à l'exception de la résistance au feu (point d'éclair abaissé). Ses principales propriétés sont rassemblées dans le tableau suivant en comparaison avec celles de l'huile de colza et d'une huile minérale de référence ainsi qu'avec les propriétés d'une autre huile végétale commercialisée sous le nom Envirotemp FR3.

On remarque que l'huile modifiée RS50 présente par rapport à l'huile minérale une résistivité et une stabilité à l'oxydation faibles. Cependant, toutes ces mesures correspondent à celles de tests normalisés établis pour l'utilisation d'huiles minérales. Elles servent essentiellement à comparer des huiles minérales en vue d'une application donnée. De plus, certains tests, comme la stabilité à l'oxydation, ne sont pas adaptés au cas des huiles végétales. Une étude spécifique des propriétés des huiles végétales en vue de leur utilisation en isolation moyenne et haute tension de transformateurs doit donc être développée.

| <i>Caractéristiques</i> | <i>Huile de colza [13]</i> | <i>RS50 [13]</i> | <i>Envirotemp FR3 [6]</i> | <i>Huile minérale [13]</i> |
|---|----------------------------|------------------|---------------------------|----------------------------|
| Tension de claquage, kV (norme CEI 60156) | 98,2±4,2% | 93,8±4,8% | 51 | 60±15% |
| FDD (tanδ) à 90°C/50 Hz | 0,0052 | 0,0152 | 0,0185 | 0,001 |
| Permittivité relative (ϵ_r) à 90°C | 2,83 | 2,82 | | 2,2 |
| Résistivité à 90°C, $\Omega.m$ | $2,3.10^{10}$ | $1,2.10^{10}$ | | 10^{13} |
| Masse volumique à 20°C, kg/m^3 | 911 | 887 | 923 | 866 |
| Point d'écoulement, °C | -22 | -28 | -21 | -58 |
| Point d'éclair, °C | 260 | 171 | 326 | 148 |
| Viscosité cinématique à 100°C, $mm^2.s^{-1}$ | 8,32 | 4,66 | | 2,37 |
| Viscosité cinématique à 40°C, $mm^2.s^{-1}$ | 37,6 | 17,1 | 33,8 | 9,67 |
| Viscosité cinématique à 0°C, $mm^2.s^{-1}$ | 263 | 84,0 | | 61,7 |
| Indice d'acide, mg KOH/g | 0,059 | 0,068 | | 0,012 |
| Oxydabilité (après 6h à 150°C) | | | | |
| Viscosité à 40°C | 73,5 | 29,1 | | 9,89 |
| Indice d'acide | 1,86 | 2,27 | | 0,066 |
| Stabilité à l'oxydation (norme CEI 61125-C) | | | | |
| Acidité totale, mg KOH/g | 1,39 | 2,33 | | 0,71 |
| FDD (tanδ) à 90°C/50 Hz | 0,347 | 0,684 | | 0,073 |
| Dépôts, % | 0,19 | 0,06 | | 0,12 |

De nombreux paramètres vont intervenir pour l'optimisation d'une isolation donnée. Nous avons choisi de nous concentrer sur les trois points suivants, qui feront chacun l'objet d'un chapitre de ce mémoire.

Le **Chapitre 1** présente l'étude de l'influence des facteurs humidité, température et teneur en particules sur les propriétés diélectriques telles que : permittivité, conductivité, pertes et rigidité électrique sous tension alternative. Cette étude permettra de prédire le comportement du liquide dans les conditions normales de fonctionnement des dispositifs électrotechniques.

L'étude du vieillissement thermique des huiles à haute température (vieillissement accéléré) sera présentée dans le **Chapitre 2**. Cette étude va répondre à la question primordiale qui est de savoir si un liquide biodégradable peut maintenir ses propriétés (diélectriques, physiques, etc.) sur une longue période de fonctionnement (30 à 40 ans).

Dans le **Chapitre 3**, nous analysons en détail les phénomènes de préclaquage et de claquage dans la configuration la plus contraignante d'une isolation haute tension, c'est-à-dire en géométrie pointe/plan sous tension impulsionnelle. La génération et la propagation des décharges (appelées *streamers*) dans le liquide vont permettre d'anticiper son comportement sous haute tension en présence de renforcement de champs locaux (aspérités, particules).

Toutes ces études sont réalisées dans les deux huiles végétales : huile de colza de base et huile de colza modifiée RS50. A cause de la similarité des résultats obtenus dans les 2 huiles, seules les résultats obtenus dans la RS50 sont présentés dans le texte principal. Certains résultats obtenus dans l'huile de colza de base peuvent être trouvés dans les annexes. Parallèlement, quelques mesures de référence seront effectuées dans une huile minérale pour une comparaison.

Une telle caractérisation complète nous permettra de conclure sur le domaine d'application de ce nouvel isolant liquide et fournira des données d'intérêt général sur les huiles de type esters naturels.

Chapitre 1 Propriétés diélectriques : influence de l'eau, des particules et de la température

L'utilisation d'un nouvel isolant liquide nécessite la connaissance de ses propriétés diélectriques, physiques, chimiques, etc. et leurs évolutions en fonction des conditions d'utilisation. Un isolant liquide contient en général des impuretés (eau, particules, etc.) et il est soumis à divers processus de dégradation (hydrolyse, oxydation, vieillissement thermique, etc.) qui vont altérer ses propriétés initiales. Les propriétés diélectriques sont intrinsèquement associées à sa structure moléculaire et diverses informations peuvent être dérivées à partir des mesures de spectroscopie fréquentielle sur une large gamme de fréquences, ce qui jusqu'à présent jamais été réalisé pour ce type de liquide.

Nous allons tout d'abord présenter un rappel bibliographique de l'influence de l'eau, des particules et de la température sur les propriétés diélectriques d'un liquide. Puis, nous décrirons les différentes techniques expérimentales, notamment la technique de mesure spectroscopique fréquentielle, utilisées pour mesurer ces propriétés. Enfin, nous présenterons les résultats obtenus pour l'huile végétale modifiée RS50 et pour l'huile minérale de référence.

La solubilité élevée de l'eau dans les huiles végétales étant un paramètre favorable lors de l'utilisation de papiers imprégnés, nous allons également mesurer la teneur en eau à saturation de l'huile RS50 en fonction de la température.

1.1 Etude bibliographique

1.1.1 Solubilité de l'eau dans les isolants liquides

La solubilité de l'eau dans un liquide dépend de sa structure moléculaire et de la température. La relation entre le logarithme de la solubilité et l'inverse de la température suit la loi suivante [14]:

$$\log n_w = \log n_{w0} + K \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \quad \text{Eq. .1}$$

où :

n_w : solubilité maximale à la température T

n_{w0} : solubilité maximale à la température T_0

T : température absolue

K : constante

L'eau peut provenir de réactions d'oxydation de l'huile, mais, la plupart du temps elle provient de l'environnement humide. En effet, quand l'huile sèche est en contact avec une atmosphère contenant de la vapeur d'eau, elle va l'absorber. La quantité d'eau absorbée est déterminée par la température et la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Dans l'huile minérale, Kaufman et al. [14] ont trouvé que, à une température donnée, le rapport entre la quantité d'eau absorbée par l'huile et sa solubilité maximale (teneur à saturation) est exactement égale à l'humidité relative (HR) dans l'air. Une conclusion importante de ces études est que toutes les corrélations significatives entre la teneur en eau et les différentes propriétés diélectriques d'une huile doivent se baser sur la teneur relative en eau (c_R) à une température donnée ($c_R(T) = c(T)/c_0(T)$, $c(T)$ est la teneur en eau à T et $c_0(T)$ la valeur à saturation à T) et non à sa teneur absolue en eau. La Fig. 1.1 montre la relation entre la teneur en eau d'une huile minérale et l'humidité relative de l'air pour différentes températures. La relation linéaire obtenue indique que la solubilité de l'eau dans l'huile suit la loi classique de Henry [15]. Cependant, Fallou et Thibault [16] ont montré que la quantité d'eau dissoute dans l'huile augmente avec le niveau d'oxydation de celle-ci, ceci pour une humidité relative de l'air donnée. Les produits formés par oxydation dans l'huile sont hydrophiles.

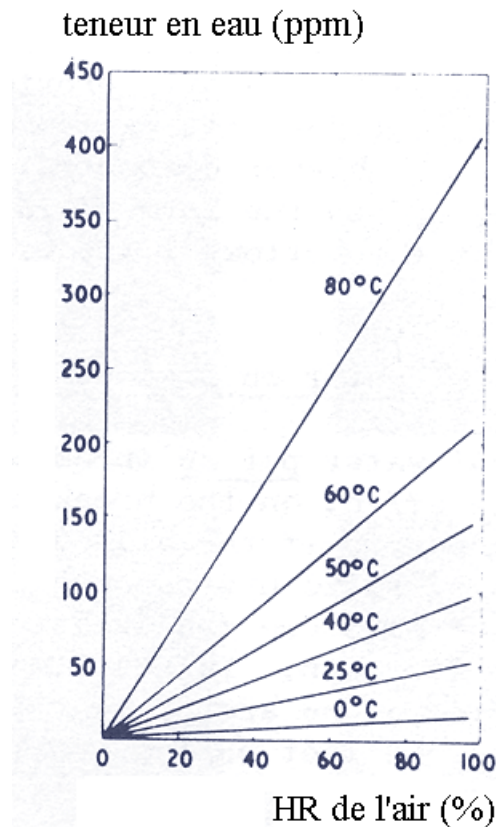


Fig. .1 Teneur en eau dans l'huile minérale en fonction de l'humidité relative de l'air à différentes températures [17]

Suivant les conditions (huile non saturée en eau ou sursaturée), l'eau sera présente dans l'huile sous des formes différentes :

- dissoute (solution homogène non saturée en eau) ;
- émulsion fine (en sursaturation, l'eau se disperse sous forme de fines gouttelettes) ;
- et, enfin, émulsion grossière (l'eau en forte concentration se concentre sous forme de grosses gouttelettes).

Au-dessous de la limite de saturation, l'eau dissoute est soit libre, i.e. sans interaction avec les molécules d'huile, soit liée, i.e. une liaison se forme (liaison hydrogène par exemple) entre la molécule d'eau et des molécules polaires de l'huile et/ou d'impuretés. L'eau libre est plus facilement éliminée par chauffage sous vide que celle liée.

Quand la teneur en eau dans l'huile dépasse la limite de saturation, la quantité excédentaire d'eau produit une émulsion de fines gouttelettes dispersées dans l'huile. La taille des gouttelettes augmente avec la quantité d'eau excédentaire, par exemple, elle varie de 0,1 à 10 μ m dans l'huile minérale. L'énergie interfaciale maintient ces gouttelettes en suspension dans l'huile tant que leur masse ne dépasse pas un certain seuil. Pour des concentrations plus

élevées d'eau dans l'huile, la taille des gouttelettes devient suffisamment importante pour qu'elles tombent par gravité au fond du réservoir (décantation).

Solubilité de l'eau dans des huiles végétales

Des études antérieures ont montré que la solubilité de l'eau dans les huiles végétales est très élevée. Ce fait peut être considéré comme une propriété favorable si on considère que l'apparition de la sursaturation et donc de gouttelettes d'eau dans l'huile sera nettement plus difficile, en comparaison des huiles minérales. En effet, la formation de gouttelettes d'eau dans un liquide isolant soumis à un champ électrique élevé dégrade fortement ses propriétés diélectriques. Le Tab. 1.1 montre la teneur en eau à saturation dans différents liquides isolants utilisés dans les appareillages électriques.

| <i>Huile</i> | <i>20°C</i> | <i>90°C</i> | <i>100°C</i> |
|----------------------------------|-------------|-------------|--------------|
| Huile minérale [4] | 45 | | 650 |
| Huile silicone [4] | 200 | | 1100 |
| Huile de colza [2] | 752 | 2360 | |
| Ester de synthèse Midel 7131 [4] | 2700 | | 7200 |

Tab. .1 Teneur en eau à saturation en ppm dans des liquides de différentes natures

1.1.2 Rigidité diélectrique : influence de la teneur en eau et des particules

Dans la pratique industrielle, des normes ont été élaborées afin de mesurer la rigidité diélectrique des isolants liquides soit en tension alternative soit sous tension de type choc de foudre. La norme CEI 60156, pour la mesure sous tension alternative, stipule que le liquide doit être soumis à un champ électrique quasi-uniforme avec une vitesse d'augmentation de la tension et une distance entre les électrodes fixées. Dans de telles conditions, l'influence de la teneur en eau et des particules sur la rigidité diélectrique d'un liquide est très importante [17-19].

Dans l'huile minérale, sèche et bien filtrée, la tension de claquage garde une valeur relativement constante tant que sa teneur relative en eau est inférieure à 70% (Fig. 1.2), puis elle s'abaisse rapidement pour des valeurs plus élevées de c_R . Pour $c_R > 1$, cet abaissement important de la tension de claquage est expliqué par l'action du champ électrique sur les gouttelettes d'eau qui vont s'allonger dans la direction du champ et ainsi former une « électrode » en forme de pointe qui renforce le champ. En présence d'une quantité d'eau importante, un « pont » d'eau connectant les deux électrodes peut même se former. Par

contre, pour $0,7 < c_R < 1$, aucune explication simple ne peut expliquer l'abaissement observé de la tension de claquage.

La présence de particules hygroscopiques comme la cellulose conduit à une dégradation encore plus importante de la tension de claquage en présence d'eau (Fig. 1.2). Dans ce cas, comme les particules de cellulose absorbent l'eau de l'huile, leur conductivité devient importante et elles se comportent comme des particules conductrices (de type métallique) qui abaissent fortement la tension de claquage.

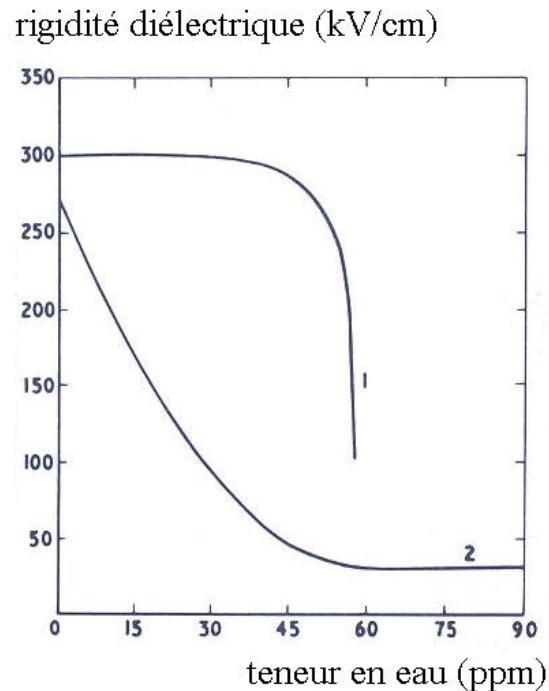


Fig. .2 Rigidité diélectrique de l'huile minérale en fonction de la teneur en eau. 1) sans cellulose et 2) avec cellulose [17]

Les particules de cellulose dans de l'huile minérale ne conduisent pas à la formation d'un « pont » entre les électrodes si la cellulose et l'huile ont été séchées. Par contre, en présence d'eau, la création d'un pont est souvent observée (Fig. 1.3) ce qui favorise le claquage à des tensions plus faibles (Fig. 1.2).

Récemment, ces études ont été élargies à de nouveaux liquides comme les huiles végétales et des résultats similaires ont été obtenus [2-4]. Cependant, dans ces travaux l'influence des particules n'a pas été rigoureusement contrôlée, conduisant à une dispersion des résultats et à des comparaisons erronées entre les liquides. Ce point sera donc réétudié dans ce travail.

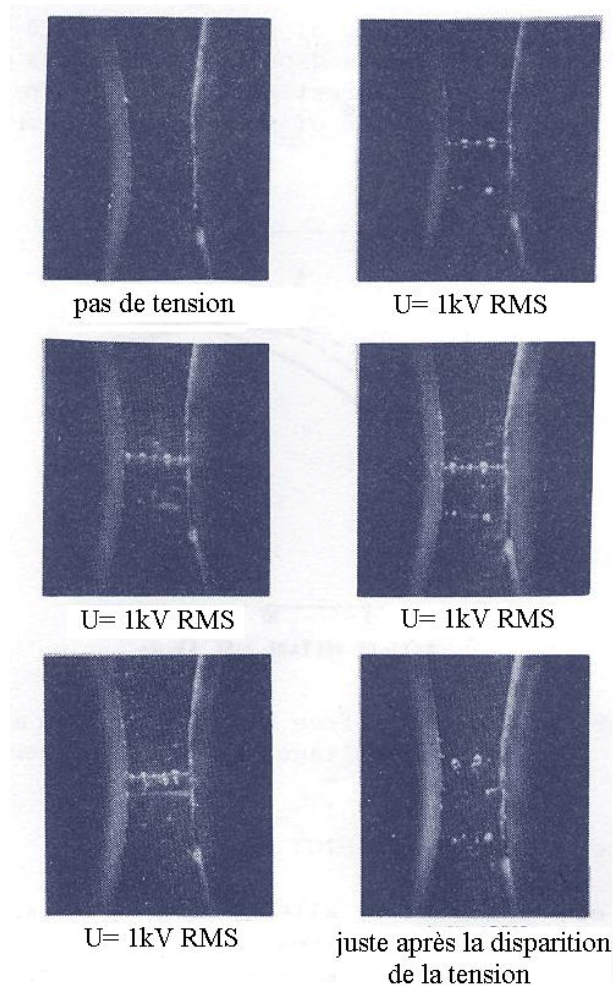


Fig. .3 Formation d'un « pont » de particules connectant les deux électrodes en fonction du temps [17]

1.1.3 Propriétés diélectriques : influence de la température et de l'humidité

1.1.3.1 Propriétés diélectriques des isolants liquides et leur dépendance en fréquence.

Tous les liquides peuvent dissoudre et dissocier des substances étrangères, mais à des degrés extrêmement divers, la dissolution et la dissociation étant considérablement plus fortes lorsque la permittivité est élevée. En effet, les interactions de nature électrostatique (ion-dipôle, ion-ion, etc.) qui dépendent de la **permittivité relative ϵ_r du liquide**, interviennent de façon primordiale sur les phénomènes de dissolution et de dissociation d'une substance étrangère. La permittivité est une caractéristique intrinsèque d'un produit et dépend essentiellement de la structure chimique et caractérise la polarité de la molécule. La permittivité de l'huile minérale est environ 2,2 et celle des huiles végétales d'environ 2,8, la

dissolution et la dissociation d'impuretés seront plus importantes dans les huiles végétales que dans les huiles minérales.

Un liquide est considéré comme isolant dans la pratique industrielle si il peut soutenir la tension appliquée sans échauffement excessif pendant une durée suffisante. Ceci implique l'utilisation de liquides de faible conductivité. La **conductivité** σ d'un liquide est due à la présence de charges *libres* positives et négatives (en général des ions) en quantités égales. Sous l'effet d'un champ électrique, ces ions se déplacent provoquant ainsi un courant de conduction ($j=\sigma E$, j est la densité de courant et E le champ électrique). La conductivité n'est pas une propriété intrinsèque d'un liquide isolant. Elle est liée à la présence d'infimes quantités (de l'ordre des ppm) d'impuretés ionisables. Il est possible d'améliorer la conductivité d'un produit en éliminant une partie des impuretés qu'il contient. A l'échelle industrielle, cette élimination, appelée "traitement diélectrique", est réalisée par passage du produit à travers un lit de terre adsorbante (attapulgite, bentonite, ...).

Sous tension alternative sinusoïdale de fréquence f et de pulsation $\omega=2\pi f$, les pertes sont caractérisées par la **tangente de l'angle de pertes** δ , ou **facteur de dissipation** (le déphasage entre courant et tension étant : $\pi/2-\delta$). Ces pertes comprennent deux parties : pertes par conduction et pertes par relaxation [20]. La réponse en fréquence d'un liquide permet d'établir la nature du mécanisme des pertes dominant pour une condition donnée et connaissant la structure chimique et les propriétés physiques du liquide, des informations importantes peuvent en être déduites. La Fig. 1.4 présente un spectre fréquentiel typique mesuré dans l'huile minérale à différentes températures.

1.1.3.2 Influence de la température

La dissociation d'un composé dans un liquide peut s'écrire formellement sous la forme d'un simple équilibre $AB \rightleftharpoons A^+ + B^-$. La conductivité du liquide est alors exprimée par la relation : $\sigma=e(\mu^+N^++\mu^-N^-)$ où μ^\pm est la mobilité des ions et N^\pm leur concentration, et e est la charge de l'électron. L'équilibre précédent dépend de la température et du champ électrique, ainsi que de la permittivité du liquide. En effet, N^\pm et μ^\pm augmentent avec la température mais également plus la température est élevée, plus la teneur en composés dissous (N^{AB}) peut augmenter. La conductivité et donc les pertes par conduction sont augmentées avec la température (Fig. 1.5).

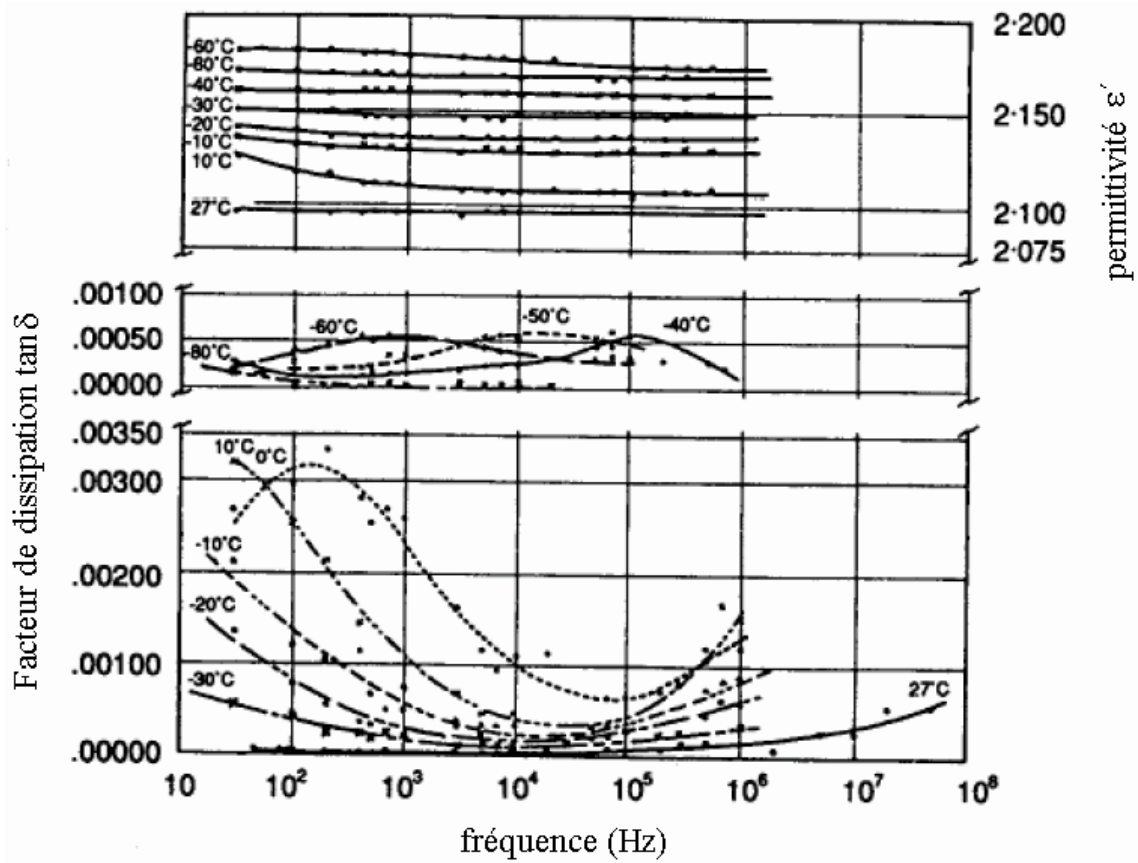


Fig. .4 Spectre fréquentiel du facteur de dissipation et de la permittivité d'une huile minérale du type paraffinique [20]

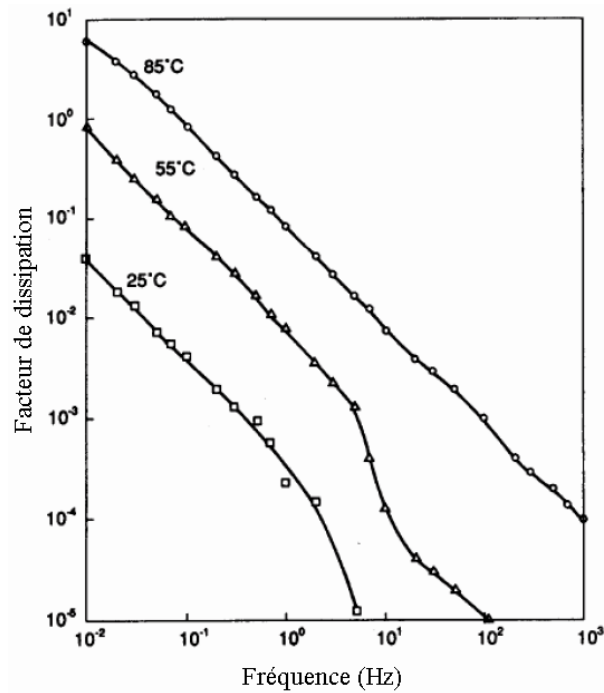


Fig. .5 Influence de la température sur les pertes dans l'huile minérale. [20]

Comme la conductivité d'un liquide augmente avec la température, la plupart des spécifications des produits indiquent une valeur de résistivité ou de $\tan\delta$ à 90 °C. D'autre part, la conductivité évolue en fonction du temps de service dans un appareillage. En effet, la conductivité d'un produit neuf est en général beaucoup plus faible que celle d'un produit en service, puisque celui-ci récupère des impuretés au contact des matériaux solides contenus dans l'équipement. De même, le vieillissement du produit, qu'il soit thermique, dû à une oxydation, à une hydrolyse, ou à tout autre processus, conduit systématiquement à la formation de sous-produits qui contribuent également à l'augmentation de la conductivité. Ainsi, si une huile minérale neuve a fréquemment une valeur de $\tan\delta(90^\circ\text{C}) < 10^{-4}$, une huile dans un transformateur peut atteindre une valeur de $\tan\delta(90^\circ\text{C}) > 1$.

1.1.3.3 Influence de la teneur en eau

La présence d'eau n'affecte pas le $\tan\delta$ d'un liquide si sa concentration est inférieure au seuil de saturation. Par contre, en présence d'une phase aqueuse non soluble, la conductivité d'un liquide augmente fortement par suite du mouvement des gouttes d'eau sous l'effet du champ électrique.

1.2 Techniques expérimentales

1.2.1 Conditionnement de l'huile

Premièrement, l'huile est séchée sous vide à 50°C pendant 24h afin d'obtenir un état initial à faible teneur en eau. Pour les deux huiles testées, un état initial dit sec ($c_R \approx 10\%$) peut être atteint.

Pour contrôler la teneur en eau dans l'huile, nous avons utilisé une enceinte climatique *Votsch VC7034*. Elle peut fonctionner de -70°C à 180°C avec une humidité relative de 10% à 98%. Les essais ont été effectués à une humidité relative maximum de 80% afin d'éviter le problème de condensation d'eau sur les parois de l'enceinte et de la cellule d'essai.

L'huile est contenue dans un cristalliseur en verre afin d'avoir une surface d'échange avec l'air humide importante. La teneur en eau dans l'huile est mesurée en fonction du temps à l'aide d'un coulomètre de Karl-Fischer. La teneur en eau dans l'huile peut ainsi varier dans une très large gamme jusqu'à 80% de la saturation à une température donnée. Des solutions avec $c_R > 80\%$ sont produites en refroidissant des échantillons conditionnés à une température élevée.

Pour simuler les conditions réelles régnant dans un transformateur, des essais ont été effectués en présence de fibres de cellulose (diamètre $\approx 10\mu\text{m}$, longueurs variables). Leur

concentration a été fixée à 17mg/l afin d'obtenir une comparaison avec les résultats obtenus précédemment dans l'huile minérale [21].

1.2.2 Mesure de la tension de claquage en tension alternative

La tension de claquage est mesurée dans des conditions similaires à celles de la norme CEI 60156 [22]. Les électrodes sont constituées de deux sphères de diamètre 1cm, séparées par une distance de 1mm. Les électrodes sont immergées dans une cellule de test contenant 80cm³ d'huile. Une rampe (2kV/s) de tension alternative 50Hz est appliquée jusqu'au claquage. La tension de claquage (la valeur crête maximale) est mémorisée par un voltmètre. Le résultat final de la tension de claquage, exprimée en valeur efficace, est la moyenne de 6 claquages pour un remplissage donné.

Pour séparer l'influence de la teneur en eau et celle des particules sur la tension de claquage, la cellule de test est connectée à un circuit de filtration en boucle fermée. Avant le test et entre deux mesures consécutives, le liquide est filtré 15 minutes par passage à travers une membrane dont le diamètre des pores est de 10µm. Les particules préexistantes et celles produites lors de chaque claquage sont donc éliminées. Après la filtration, un temps de repos de 15 minutes est observé afin d'éliminer les bulles ayant pu se former lors de l'étape de filtration de l'huile.

1.2.3 Mesure des propriétés diélectriques

1.2.3.1 Principe de mesure

Le principe de la spectroscopie d'impédance [23] se pose sur l'application d'une tension sinusoïdale et sur l'analyse de l'amplitude et du déphasage de la réponse en courant du matériau.

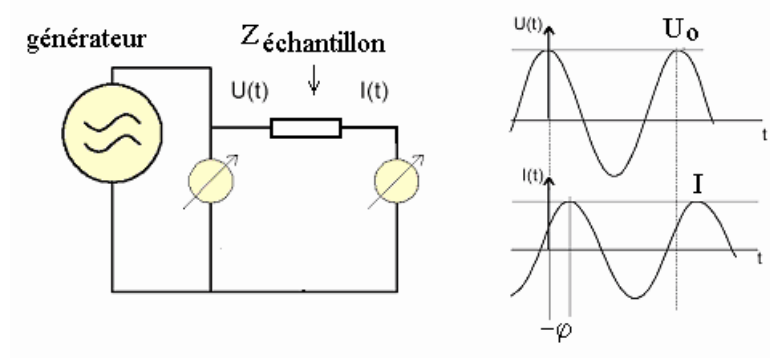


Fig. .6 Principe de mesure de la spectroscopie diélectrique

Le rapport des amplitudes tension/courant définit le module de l'impédance série $|Z_S|$; le déphasage entre la tension et le courant complète l'information pour donner accès aux parties réelle et imaginaire de l'impédance complexe Z_S .

On a alors l'expression suivante :

$$Z_S^*(\omega) = \frac{U^*(\omega)}{I^*(\omega)} = \frac{U(\omega)}{I(\omega)} [\cos(\varphi(\omega)) + i \sin(\varphi(\omega))] = Z_S'(\omega) + iZ_S''(\omega) \quad \text{Eq. .2}$$

L'échantillon peut également être considérée comme une capacité complexe C_p^* [24] par la relation suivante :

$$Z_p^*(\omega) = -\frac{i}{\omega C_p^*} \quad \text{Eq. .3}$$

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

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) = -\frac{j}{\omega Z_S^*(\omega) C_0} = -\frac{jY_p^*(\omega)}{\omega C_0} = \frac{C_p^*}{C_0} \quad \text{Eq. .4}$$

$$\tan(\delta(\omega)) = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = -\frac{Z'(\omega)}{Z''(\omega)} \quad \text{Eq. .5}$$

Où C_0 est la capacité à vide de la cellule de mesure.

La conductivité σ^* est liée avec la permittivité par :

$$\sigma^* = \sigma' - \sigma'' = i2\pi f \varepsilon_0 (\varepsilon^* - 1) \quad \text{Eq. .6}$$

1.2.3.2 Circuits équivalents

Le comportement diélectrique d'un isolant peut se représenter à partir d'un schéma électrique équivalent plus ou moins détaillé constitué des composants passifs R, L et C (Fig. 1.7). Par exemple, le schéma le plus simple correspondant à la relaxation simple de Debye [20] est constitué d'une capacité et d'une résistance en série ou en parallèle (Fig. 1.7 a et b). L'expression de l'admittance complexe $Y^*(\omega)$ représentant ce schéma équivalent s'écrit alors :

$$Y^*(\omega) = -\frac{i}{\omega C_p^*(\omega)} = \frac{1}{R_p(\omega)} + i\omega C_p(\omega) = \frac{1}{R_s(\omega) + 1/i\omega C_s(\omega)} \quad \text{Eq. .7}$$

avec :

C_S et R_S : capacité et résistance série,

C_P et R_P : capacité et résistance parallèle.

Le schéma peut être complété (Fig. 1.7 c) en rajoutant une capacité C_∞ , représentative de n'importe quel processus physique indépendant de la fréquence.

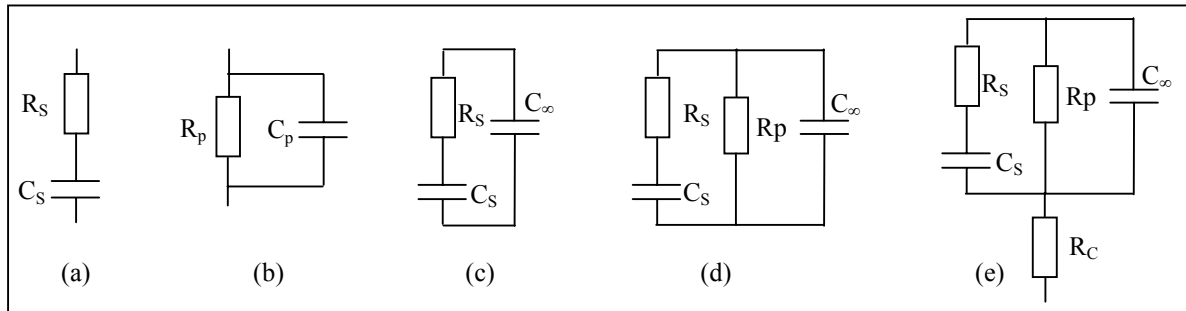


Fig. .7 Schémas électriques équivalents du comportement diélectrique d'un isolant

On obtient alors l'expression suivante pour l'admittance:

$$Y^*(\omega) = j\omega C_\infty + \frac{1}{R_S(\omega) - i/\omega C_S} = i\omega C_o \left(\varepsilon_{hf} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{hf}}{1 + i\omega\tau_{RC}} \right) \quad \text{Eq. .8}$$

où : $\varepsilon_{hf} = C_\infty/C_o$, $\varepsilon_s - \varepsilon_{hf} = C_S/C_o$ et $\tau_{RC} = R_S C_S$.

Ce schéma peut encore être complété (Fig. 1.7 d) afin de prendre en compte la contribution de la conductivité du matériau. On obtient :

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_{hf} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{hf}}{1 + i\omega\tau_{RC}} - \frac{i}{\omega C_o R_P} \quad \text{Eq. .9}$$

1.2.3.3 Dispositifs de mesure de conductivité et de pertes diélectriques

Dans ces travaux, les propriétés diélectriques (permittivité, facteur de dissipation) des huiles ont été étudiées sur une large gamme de fréquences (10^{-2} - 10^6 Hz) en fonction de la température (-20°C à 120°C) et la teneur en eau (au-dessous et au-dessus de la saturation). Parallèlement, des mesures directes de la conductivité ont également été effectuées selon la norme CEI 61620 à une tension de 10V de forme d'onde carrée. Cette mesure complémentaire

caractérise uniquement la conduction ohmique σ_0 du liquide qui peut être utilisée pour analyser les spectres fréquentiels.



Fig. .8 Dispositifs de mesure des propriétés diélectriques et de conditionnement de l'huile

Le dispositif utilisé pour la spectroscopie diélectrique est un impédancemètre Novocontrol BDS20 et le banc de mesure est présenté sur la Fig. 1.8. La gamme de fréquences disponible du dispositif s'étale de $3\mu\text{Hz}$ à 10MHz avec une tension appliquée maximale de 1V . La limite de mesure en $\tan\delta$ est d'environ 3×10^{-5} pour les mesures dans la gamme entre 10Hz – 100kHz et pour une capacité comprise entre 50pF – 2nF . Ce dispositif est largement utilisé pour les caractérisations physicochimiques dans les matériaux solides, liquides, poudres et couches minces.

L'erreur de mesure du dispositif n'est pas constante, et dépend de la capacité de l'échantillon et de la fréquence. La Fig. 1.9 montre la spécification du constructeur sur la précision de la mesure en fonction de la fréquence et de la capacité. Par exemple, l'erreur pour un échantillon de 1pF est de l'ordre de $0,1\%$ dans la gamme 10Hz - 10MHz , puis d'environ 1% dans la gamme $0,1\text{Hz}$ - 10Hz et atteint 10% pour les fréquences inférieures à 10mHz .

La mesure directe de la conductivité est effectuée à l'aide d'un résistivimètre IRLAB, basé sur la mesure de la valeur initiale du courant circulant dans le liquide soumis à une faible tension de forme d'onde carrée (norme IEC 61620) [25]. Les valeurs de la conductance et de la capacité mesurables sont de 10^{-10} - 10^{-15} S (erreur de 2%) et de 10 - 1000pF (erreur de 1%) respectivement.

La cellule de mesure de la conductivité, de la permittivité et des pertes est composée de deux cylindres coaxiaux en acier inoxydable. L'écart entre les cylindres coaxiaux est de 3,5 mm et la capacité à vide est de 22 pF. Le volume de liquide nécessaire pour la mesure est d'environ 200 cm³. La température du liquide est mesurée à l'aide d'une sonde.

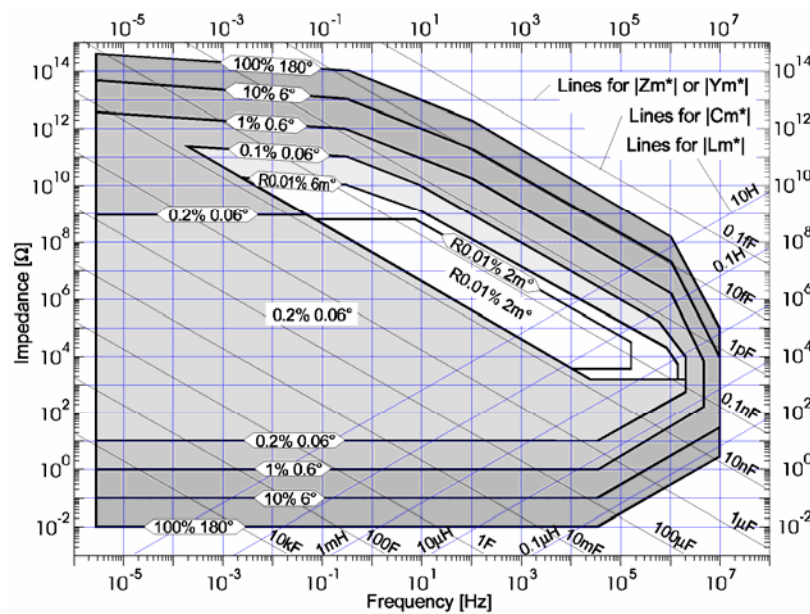


Fig. .9 Précision de la mesure du Novocontrol BDS 20 en fonction de la capacité et de la fréquence.

1.3 Propriétés diélectriques de l'huile RS50

1.3.1 Solubilité de l'eau

L'huile sèche une fois déposée dans l'enceinte climatique (HR=80%), dissout de la vapeur d'eau à travers la surface de contact liquide/air humide. Ce processus dépend du temps et de la température (Fig. 1.10) : la vitesse d'absorption et la quantité d'eau absorbée augmentent avec la température. La teneur en eau tend vers une valeur à saturation ($n_{eq(80\%)}$) au bout de 100 heures environ (4 jours), valeur qui correspond à 80% de la limite de saturation à la température considérée.

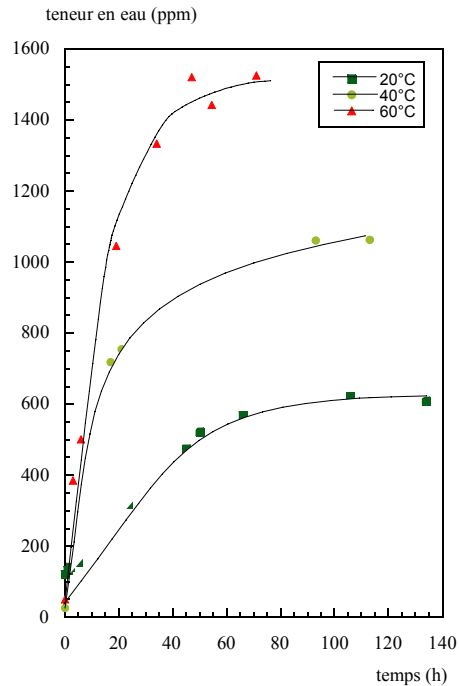


Fig. .10 Evolution de la teneur en eau de l'huile RS50 placée dans une atmosphère à 80% HR

Dans un premier temps, ce processus suit une loi de diffusion en \sqrt{t} ce qui est bien formulé dans la littérature [26, 27]:

$$M(t) = \sqrt{\frac{D}{\pi}} \frac{4M_m}{h} \sqrt{t} \quad \text{Eq. .10}$$

où :

$M(t)$: quantité d'eau absorbée,

M_m : quantité maximale d'eau pouvant être absorbée à une HR donnée de l'air humide,

D : diffusivité,

h : épaisseur du volume du liquide,

t : temps.

La valeur à saturation n_w correspondant à 100% de HR est alors déduite de l'équation (loi de Henry) [15]) :

$$n_w = \frac{n_{eq(80\%)}}{0,8} \quad \text{Eq. .11}$$

Le Tab. 1.2 montre les teneurs maximales (à saturation) de l'eau dans les huiles RS50 et l'huile minérale, valeurs qui sont en bon accord avec les valeurs déjà publiées pour des huiles de composition comparables [2]. Comme on pouvait s'y attendre, la variation de n_w avec la température suit la loi donnée par l'Eq. 1.1. Dans le cas de l'huile RS50, on obtient la formule suivante :

$$\log(n_w) = 6,221 - \frac{976}{T} \quad \text{Eq. .12}$$

Avec n_w exprimée en ppm et T en K.

Cette formule permet de calculer la limite de saturation aux autres températures.

| <i>Température (°C)</i> | <i>Limite de saturation (ppm)</i> | |
|-------------------------|-----------------------------------|------|
| | Huile minérale | RS50 |
| 20 | 43 | 760 |
| 40 | 107 | 1326 |
| 60 | 216 | 1904 |

Tab. .2 Teneur maximale en eau (à saturation) dans la RS50 et l'huile minérale à différentes températures.

Comme attendu, la limite de saturation de l'eau dans l'huile RS50 est très supérieure à celle obtenue dans l'huile minérale (de 9 à 17 fois plus suivant la température), ce qui montre une capacité intéressante de cette huile végétale à absorber l'eau. Si elle est associée à des solides isolants imprégnés de type papier ou carton de transformateur, il en résultera un équilibre sensiblement différent pour la répartition de l'eau entre le solide et le liquide. Dans le cas où la teneur en eau dans l'huile est très faible (huile bien séchée), elle peut extraire de l'eau du papier/carton sans risquer d'atteindre la région où la rigidité diélectrique est abaissée (i.e. pour $c_R > 50\%$). D'autre part, cette limite de saturation élevée est également un avantage dans le cas où de l'eau pénètre accidentellement dans l'huile. Dans le cas de l'huile minérale, les effets précédents conduiront rapidement à une saturation en eau (car la valeur à saturation est faible) qui modifieront fortement la rigidité diélectrique de l'huile.

1.3.2 Tension de claquage

1.3.2.1 Influence de la teneur en eau dans l'huile filtrée

La Fig. 1.11 montre la variation de la tension de claquage U_c de l'huile RS50 ainsi que de l'huile minérale, sous tension alternative, en fonction de la teneur relative en eau (c_R) dans des conditions identiques pour comparaison. Les deux huiles montrent une tendance générale à la diminution de U_c avec l'augmentation de la teneur relative en eau. Les variations $U_c(c_R)$ sont comparables pour les deux liquides. La tension de claquage U_c de l'huile RS50 est pratiquement indépendante de c_R jusqu'à une valeur d'environ 60% et sa valeur moyenne est de $41,5 \pm 3$ kV RMS. Cette valeur est un peu inférieure à celle de l'huile minérale de référence, qui est de $46,3 \pm 5$ kV mais elle satisfait largement les normes établies pour une utilisation dans des applications électrotechniques. Pour l'ensemble des normes, une tension de claquage minimale de 50kV RMS sur une épaisseur de 2,5mm du liquide est exigée (soit 20 kV RMS sur 1 mm).

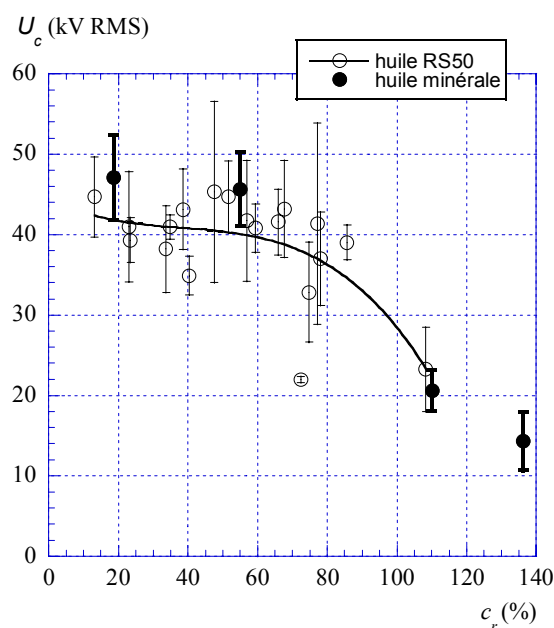


Fig. .11 Tension de claquage en fonction de la teneur relative en eau.

Il est important de remarquer qu'au cours des mesures, une plus grande dispersion de la tension de claquage est observée dans l'huile RS50 par rapport à l'huile minérale. Pour l'huile RS50, l'écart-type peut varier de 3 à 7kV alors que celui de l'huile minérale varie seulement de 2 à 5kV, voir la Fig. 1.11. De plus des valeurs anormalement basses de U_c sont parfois mesurées surtout lorsque la teneur en eau augmente ($c_R > 70\%$).

A des valeurs de $c_R > 70\%$, la tension de claquage décroît rapidement pour atteindre environ 20kV RMS pour $c_R = 110\%$, ceci aussi bien pour l'huile minérale que pour l'huile RS50. Il faut cependant rappeler que la saturation en eau à 20°C dans l'huile se produit pour

une concentration de 43ppm alors qu'elle est de 760ppm pour la RS50. Il sera donc beaucoup plus facile d'atteindre la saturation en eau et donc l'abaissement de la tension de claquage dans l'huile minérale que dans l'huile végétale.

1.3.2.2 Influence de la teneur en eau en présence de particules de cellulose

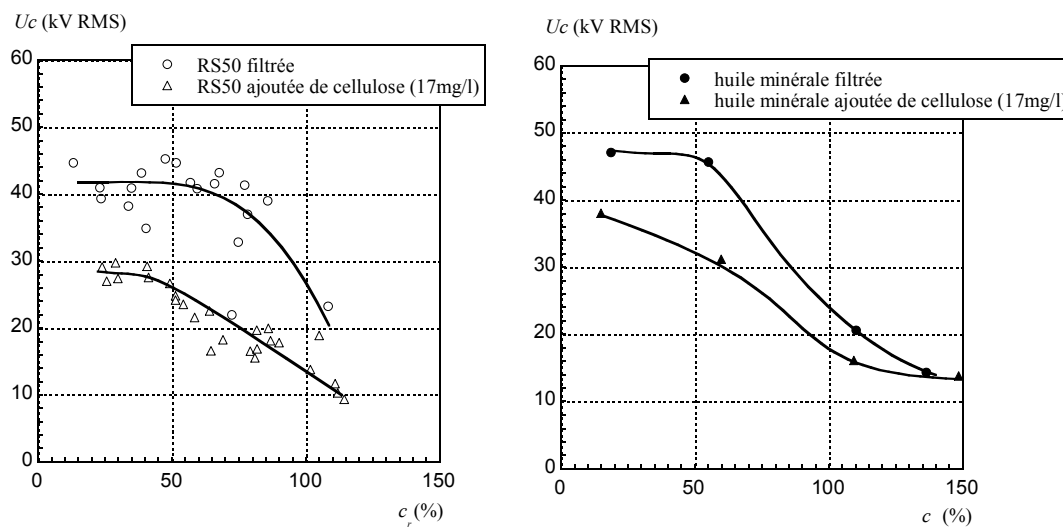


Fig. .12 Tensions de claquage des huiles RS50 et Univolt 54 en fonction de la teneur relative en eau en présence ou non de particules de cellulose.

Dans les transformateurs, l'huile qui est en contact avec du papier et des cartons, peut entraîner des particules de cellulose dont la présence peut modifier la rigidité diélectrique de l'huile. Pour mieux caractériser l'influence de l'eau sur la rigidité diélectrique de l'huile RS50 dans des applications éventuelles, une certaine quantité de particules de cellulose (17mg/l) est ajoutée dans l'huile préalablement filtrée. La teneur relative en eau de ces échantillons est ensuite variée de 10% à 150% et la tension de claquage est mesurée. La présence de particules de cellulose dégrade fortement la tension de claquage des deux huiles quelle que soit la teneur en eau, l'abaissement de U_c augmente cependant avec la teneur en eau (Fig. 1.12).

En présence de cellulose, pour des teneurs relatives en eau d'environ 20%, l'huile RS50 montre une dégradation de 30% de sa tension de claquage, elle n'est que de 20% dans l'huile minérale. Cette différence peut provenir d'une teneur réelle en eau dix fois plus élevée dans l'huile RS50 que dans l'huile minérale. Les particules de cellulose vont ainsi absorber beaucoup plus d'eau et devenir plus conductrices, ce qui conduit à un renforcement du champ plus important dans le cas de l'huile RS50. Vers la saturation en eau, la tension de claquage des deux huiles n'est plus que d'environ 10 kV RMS. Dans la région d'environ 80% à 150% de teneur relative en eau, l'influence des particules de cellulose devient plus faible. Ceci peut

s'expliquer si les particules deviennent elles-mêmes saturées en eau et dans ce cas l'augmentation de la teneur en eau dans l'huile n'affecte plus la composition des particules et donc leurs propriétés sous champ électrique.

Du point de vue des applications, l'huile RS50 possède l'avantage de dissoudre de grandes quantités d'eau par rapport à l'huile minérale. La rigidité diélectrique de l'huile RS50 se maintiendra dans une grande gamme de teneur en eau (jusqu'à environ 400ppm à 20°C). La sensibilité de l'huile aux conditions de fonctionnement (pollutions accidentelles, présence de papier, etc.) sera ainsi fortement minimisée. Dans l'huile bien filtrée, la teneur relative en eau a une influence similaire pour les deux huiles. En revanche, pour une teneur relative en eau identique, l'huile RS50 est plus sensible aux particules hygroscopiques que l'huile minérale. Cet inconvénient est une conséquence de la grande solubilité de l'eau dans l'huile RS50.

1.3.3 Propriétés diélectriques

1.3.3.1 Spectre diélectrique typique

La Fig. 1.13 ci-dessous montrent un spectre typique de la permittivité réelle ϵ' et imaginaire ϵ'' de l'huile RS50. Dans le domaine de fréquence f étudié, la permittivité réelle reste constante, par contre, la partie imaginaire présente deux branches bien distinctes. Si on trace les variations du rapport $\epsilon''/\epsilon' = tg\delta$ en fonction de la fréquence en coordonnées logarithmiques (Fig. 1.14), on obtient deux branches linéaires de pente -1 (pour $f < 1$ kHz) et +1 ($f > 10$ kHz). L'intersection de ces deux branches forme un minimum à des fréquences de l'ordre de 10^4 Hz. Dans cette zone, les mesures montrent une certaine instabilité, car les données enregistrées sont proches des limites intrinsèques de la sensibilité du système de mesure (c'est-à-dire $tg\delta \cong 3 \cdot 10^{-5}$) (Fig. 1.15).

A basse fréquence, la relation en $1/f$ est spécifique de pertes par conduction selon la relation:

$$tg\delta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_s} = \frac{\sigma}{2\pi f\epsilon_s} \quad \text{Eq. 13}$$

où :

σ : conductivité,

ϵ_s : permittivité statique (à très faible fréquence),

ω et f : pulsation et fréquence.

Ceci conduit bien à une valeur de conductivité constante, indépendante de la fréquence tant que $f < 1$ kHz (Fig. 1.14).

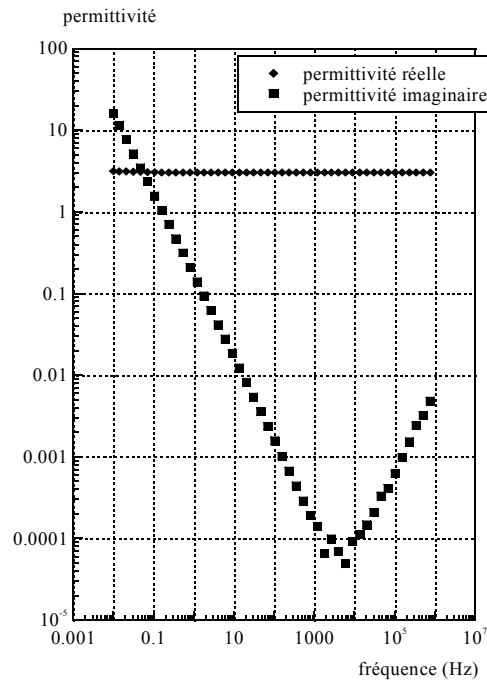


Fig. .13 Dépendance en fréquence des permittivités réelle et imaginaire dans l'huile RS50, $T = 20^\circ\text{C}$, teneur en eau = 46ppm.

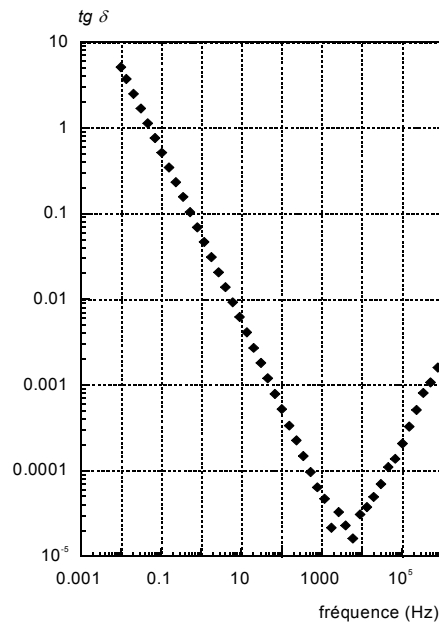


Fig. .14 Dépendance en fréquence de $\text{tg } \delta$ dans l'huile RS50, $T = 20^\circ\text{C}$, teneur en eau = 46ppm.

Dans le domaine des hautes fréquences, les pertes, qui augmentent avec la fréquence, sont certainement représentatives de pertes par relaxation dipolaire [28, 29] données par la relation :

$$\operatorname{tg} \delta = b \omega \cong \left(1 - \frac{\varepsilon_{\infty}}{\varepsilon_s} \right) \tau \omega \quad \text{Eq. .14}$$

Ici, ε_{∞} est la permittivité optique et τ le temps de relaxation des dipôles (τ dépend de la viscosité du liquide, et donc varie avec la température). Par conséquent, pour une fréquence donnée, une augmentation de la température doit induire une diminution des pertes, contrairement au cas des pertes par conduction. L'influence de la température sur les spectres diélectriques de l'huile RS50 qui sera présentée dans une prochaine section, permettra de confirmer ou non cette première analyse.

Des mesures effectuées dans l'huile minérale montre également une allure similaire du spectre fréquentiel des pertes (Fig. 1.15). Dans le domaine de faibles fréquences, les pertes par conduction, et par conséquent la conductivité, dans l'huile minérale sont de l'ordre 10 fois plus faibles que celles dans l'huile RS50. Aux fréquences plus élevées, à cause de la sensibilité insuffisante de l'appareil de mesure, il est difficile de préciser les valeurs des pertes par relaxation dipolaire, même à de température élevée.

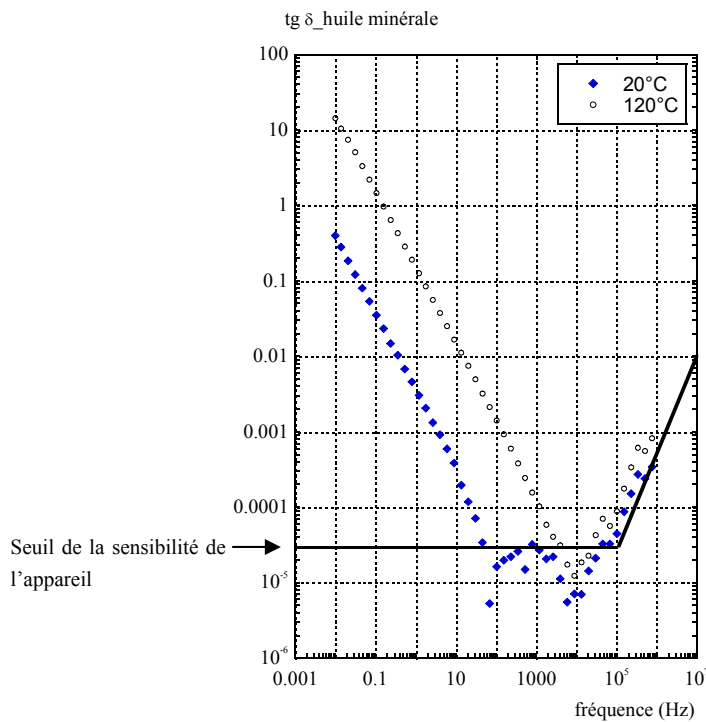


Fig. .15 Les pertes de l'huile minérale à 20°C et à 120°C.

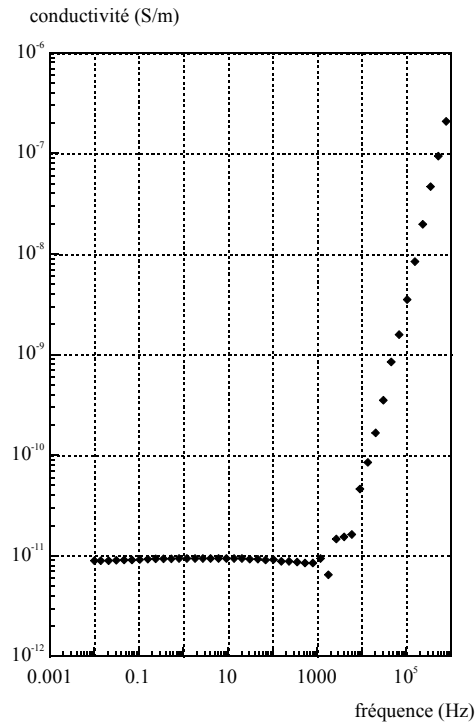


Fig. 1.16 Conductivité de la RS50 à 20°C calculée avec l'Eq. 1.13

Fig. 1.16 montre le spectre en fréquence de la conductivité (σ) calculée par le spectromètre suivant l'Eq. 1.13. Aux faibles fréquences ($f < 1\text{kHz}$), elles restent stables et sont toujours en très bon accord avec les valeurs de conductivité σ_0 mesurée à l'aide du résistivimètre IRLAB, quelle que soit la température de -20 à 120 ° C (Fig. 1.18). Aux fréquences plus élevées, suite à l'intervention de la polarisation, cette équation n'est plus utilisable, ce qui est confirmé par l'augmentation aberrante de la courbe de conductivité (Fig. 1.16). On constate que la conductivité du liquide peut être mesurée avec fiabilité par le spectromètre aux faibles fréquences.

1.3.3.2 Influence de la température

Les courbes $tg\delta(f)$ pour différentes températures (-20 à 120 °C) sont présentées sur la Fig. 1.17. La gamme de fréquences où $tg\delta$ est proportionnel à $1/f$ dépend de la température. En effet, comme la conductivité d'un liquide ne peut qu'augmenter avec la température, plus la température est élevée, plus cette gamme de fréquences est élevée.

Les courbes à -10 °C et -20 °C montrent une variation plus complexe due au fait que la viscosité η du liquide devient très élevée (le liquide étant proche de son point d'écoulement de -28 °C), et que les pertes par conduction deviennent très faibles. Comme dans les solides diélectriques, des pertes par polarisation peuvent alors exister à basse fréquences et avoir une amplitude non négligeable par rapport à celles dues à la conduction.

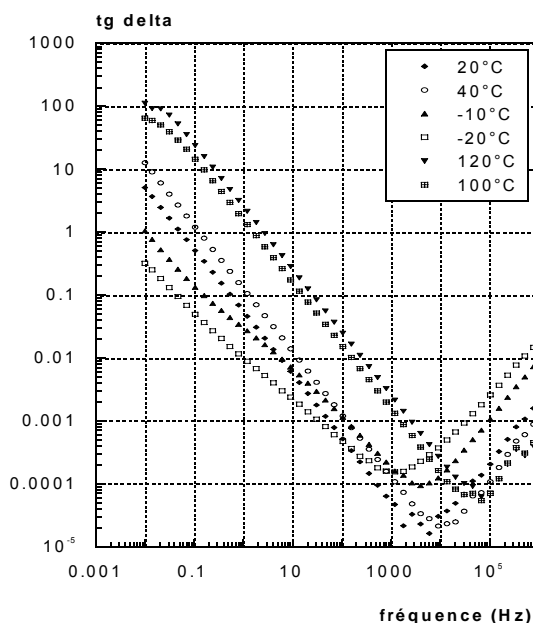


Fig. .17 Courbes $tg\delta(f)$ pour l'huile RS50 à différentes températures

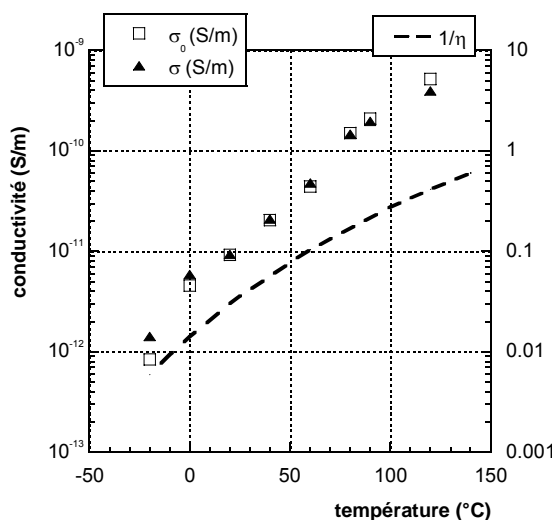


Fig. .18 Variations de σ , σ_0 et de l'inverse de la viscosité en fonction de la température

Le changement de conductivité avec la température est très important (Fig. 1.18). Il peut s'expliquer par la variation de viscosité du liquide avec T . En effet, la conductivité σ est proportionnelle au nombre d'ions présents n et à leur mobilité μ , soit au produit $\mu \cdot n_{\pm}$. D'autre part, le produit $\mu \eta$ est constant pour un liquide et des ions donnés (loi de Walden). Nous avons tracé sur la Fig. 1.18 les variations en fonction de T , de σ et de $1/\eta$. On remarque que la variation de $\sigma(T)$ est plus importante que celle de $(1/\eta)(T)$. Par exemple, entre 20°C et 120°C, σ est multiplié par 50 alors que la viscosité du liquide diminue seulement d'un facteur 20. L'augmentation de la mobilité en fonction de la température est donc insuffisante pour expliquer à elle seule le changement de conductivité.

La conductivité dépend également de la densité volumique n_{\pm} des porteurs de charge. La concentration des espèces ionisables dissoutes peut augmenter avec la température. De plus, comme les porteurs de charge sont généralement le résultat d'un équilibre de dissociation/recombinaison, leur densité augmentera avec la température. En effet, la constante de dissociation K_d associée à cet équilibre augmente avec la température selon un comportement de type « Arrhenius ». La densité n_{\pm} des porteurs de charge augmente donc avec T selon une relation de type $\exp(-\Delta E/T)$ où ΔE est une énergie de dissociation. L'accroissement d'un facteur d'environ 2,5 du nombre de porteurs entre 20 et 120°C observé expérimentalement, conduit à une valeur de ΔE d'environ 0,1eV, ce qui constitue une valeur plausible pour l'énergie de dissociation d'un électrolyte.

Dans le domaine des fréquences élevées où $tg\delta$ est proportionnel à f , les pertes peuvent être dues à la relaxation dipolaire. Ceci est confirmé par le fait que l'augmentation de température entraîne une diminution des pertes (Fig. 1.17 et Fig. 1.19). Pour un phénomène de relaxation dipolaire (Eq. 1.14), $tg\delta$ est proportionnel à $\tau\omega$ (τ étant le temps de relaxation des dipôles du liquide). τ dépend de la viscosité et est proportionnel au rapport η/T [29]. Ainsi, à une fréquence donnée, une augmentation de T conduit à des variations de $tg\delta$ et de η/T similaires comme nous l'observons expérimentalement (Fig. 1.19). Cependant, pour $T > 80^\circ\text{C}$, $tg\delta$ devient quasiment indépendant de T . Ceci s'explique par le fait que, à ces températures, la gamme de fréquence dans laquelle $tg\delta$ est proportionnel à f devient très limitée (Fig. 1.18) en raison de la conductivité très élevée du liquide, et que la précision sur la mesure de $tg\delta$ diminue fortement en s'approchant des limites intrinsèques du système.

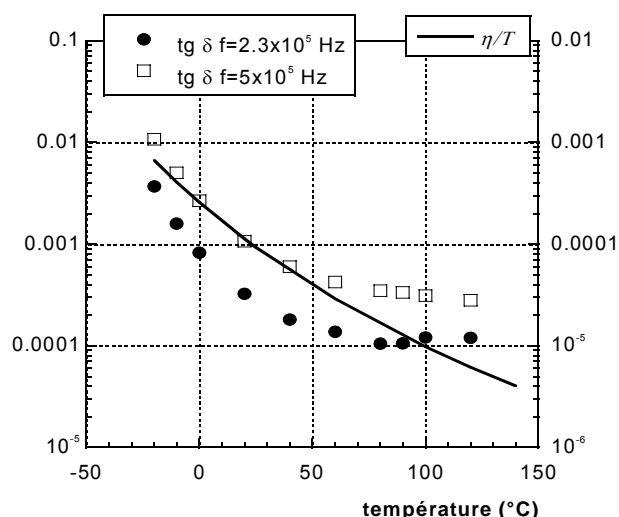


Fig. .19 Variations de $tg\delta$ avec la température pour les fréquences de 0,2 et 0,5 MHz et comparaison avec la variation de η/T avec T .

1.3.3.3 Influence de l'humidité

Jusqu'à environ 200% d'humidité relative, aucune influence significative de l'humidité sur les propriétés diélectriques (permittivité, pertes) n'est observée sur la plage de fréquence étudiée (Fig. 1.20). Quand des gouttes d'eau apparaissent dans le liquide à très haute teneur en eau (277%), les pertes par conduction augmentent sensiblement. La conductivité est pratiquement indépendante de la teneur en eau, de 1% à 200% de teneur en eau relative (Fig. 1.21).

La forte augmentation de la conductivité, observée par certains auteurs [2] au-dessus de la limite de saturation, n'est pas obtenue dans nos conditions. Cela pourrait être une conséquence des différentes méthodes utilisées pour la mesure des pertes. En effet, $tg\delta$ a été mesuré sous un champ beaucoup plus intense ($U \sim 2kV_{RMS}$) dans [2] par rapport à nos conditions ($U = 1 V_{RMS}$). Nous avons vérifié que nos résultats ne sont pratiquement pas modifiés en changeant la tension appliquée de 1V à 100V_{RMS} (i.e. $E_{max} \sim 0,4 kV/cm$), avec la teneur relative en eau augmentée jusqu'à plus de 200% (Fig. 1.22). Toutefois, sous une tension appliquée de 100V et à la teneur en eau de 277%, la conductivité mesurée croît sensiblement, ce qui suggère qu'une influence non négligeable du champ électrique pourrait effectivement exister. Nous n'avons pas pu vérifier cette hypothèse en raison de la limitation à 100V du spectromètre.

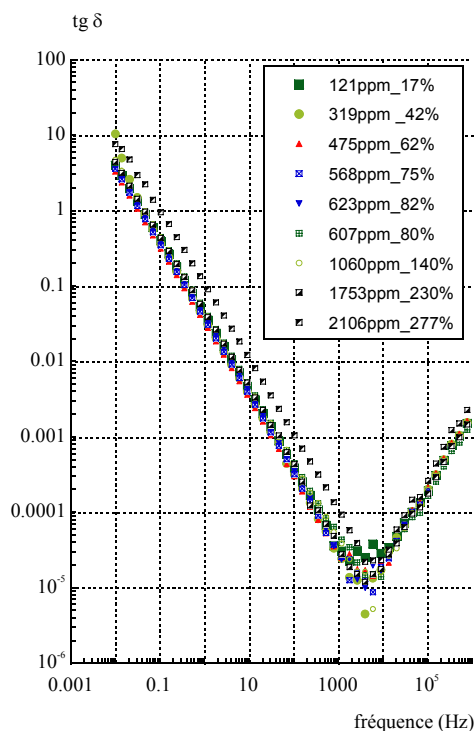


Fig. .20 Influence de la teneur en eau sur les pertes à 20°C.

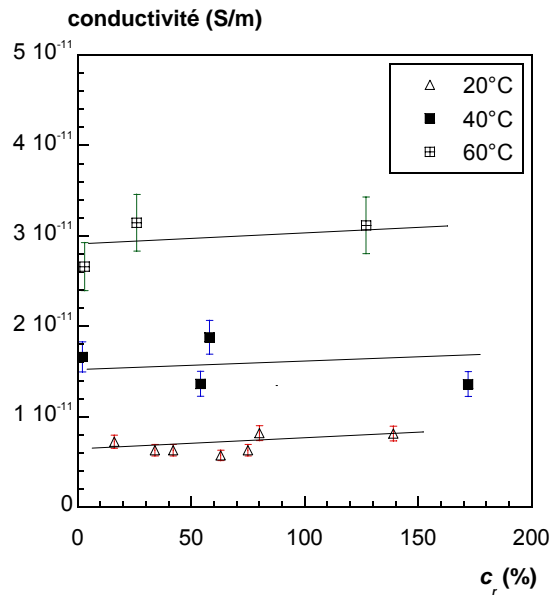


Fig. .21 Conductivité de l'huile RS50 en fonction de la teneur relative en eau pour différentes températures.

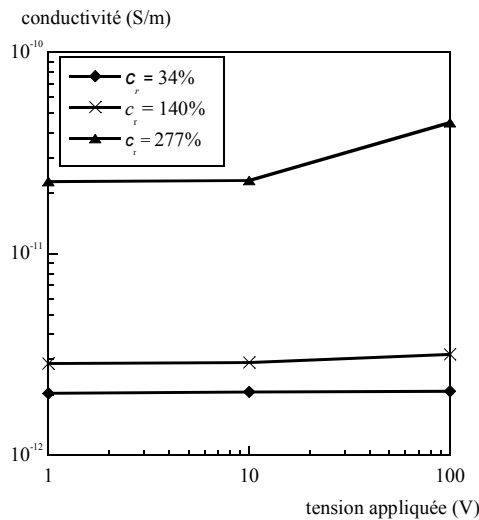


Fig. .22 Influence de la tension appliquée sur la conductivité mesurée à 1Hz.

1.4 Conclusions sur les propriétés diélectriques générales

Les propriétés diélectriques de l'huile RS50 (tension de claquage, conductivité, permittivité, pertes) ont été caractérisées en fonction des paramètres : teneurs en eau et/ou

particules de cellulose, et température. Ce sont des paramètres de base indispensables en vue d'utilisations dans les appareillages électriques.

Les mesures de claquage réalisées en maîtrisant la teneur relative en eau et la présence de particules (huile très bien filtrée en circuit fermé ou avec addition d'une quantité connue de particules) permettent de mettre en évidence que l'huile RS50 possède une rigidité diélectrique comparable à celle de l'huile minérale suivant la norme CEI 60156, avec une influence identique de la teneur relative en eau. En présence de particules de cellulose, la dégradation est sensiblement plus marquée dans l'huile végétale, en raison de la plus grande quantité d'eau disponible dans ce liquide pour hydrater les particules. Les résultats de la Fig. 1.12 confirment que le test CEI 60156 est très sensible à la présence de particules. Dans les études réalisées antérieurement [4, 30] la teneur en eau a été généralement maîtrisée, mais pas la teneur en particules. Ceci explique très certainement la grande disparité des résultats obtenus, qui donnent dans certains cas des champs de claquage plus élevés dans l'huile végétale que dans l'huile minérale [3, 8], ou l'inverse [4, 30]. Ceci montre que le test normalisé CEI 60156 permet de comparer des liquides uniquement si leurs teneurs en eau et en particules sont strictement contrôlées, ce qui reste très difficile à réaliser en pratique. De plus, ce test caractérise le liquide avec un champ uniforme de valeur très élevée (jusqu'à plus de 40 kV/mm), qui est très éloigné des conditions réelles d'utilisation dans un transformateur de puissance (champ souvent un peu divergent, de valeur maximum inférieure à 5 kV/mm).

D'après les résultats obtenus avec le test CEI 60156, les deux types d'huiles auraient donc des propriétés sensiblement équivalentes. Cependant, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, l'étude détaillée des phénomènes prédisruptifs (non réalisée jusqu'à présent) permet de mettre en évidence de grandes différences de comportement quand les conditions expérimentales sont plus proches des conditions réelles (grandes distances d'isolement, très haute tension).

Dans cette étude, nous avons réalisé des mesures de pertes diélectriques sur une large gamme de fréquences (spectrométrie diélectrique), alors que les mesures antérieures ont toutes été réalisées à la fréquence fixe de 50 (ou 60) Hz. Ceci permet de mettre en évidence les gammes de fréquences caractéristiques dans lesquelles des pertes par conduction ou par polarisation sont prédominantes. Les variations de la conductivité et des pertes par relaxation dipolaire en fonction de la température peuvent être expliquées par des théories classiques. Aucune influence notable de la teneur en eau (de 1 à 200% d'humidité relative) sur la conductivité n'a été observée dans nos conditions de mesure. En comparaison avec l'huile minérale de transformateur, l'huile végétale présente une conductivité (et par conséquent des pertes à 50 Hz) nettement plus élevée (environ 10 fois plus grande). Ceci constituerait un obstacle majeur pour certaines applications (imprégnation de câbles ou condensateurs par exemple), mais pas dans le cas d'un transformateur où les pertes diélectriques sont négligeables en comparaison des pertes magnétiques (pertes fer) ou par effet Joule (pertes

cuivre). De plus, comme nous le verrons dans le chapitre 2, la différence de conductivité entre les deux liquides tend à diminuer dans le cas d'huiles ayant subi un vieillissement hydrothermique.

Chapitre 2 Vieillessement

Dans les transformateurs de puissance, l'huile utilisée doit posséder des propriétés isolantes et thermiques. Le but de cette partie est d'évaluer l'évolution des propriétés de l'huile RS50 soumise à un test de vieillissement accéléré. Etant donné la grande complexité et la variété des processus et des conditions de vieillissement dans une application réelle, le problème est très complexe et nécessiterait de nombreuses investigations pour être totalement maîtrisé. Dans un but pratique, nous avons choisi un test simple pour réaliser cette étude.

Les mesures sont faites en comparaison avec l'huile minérale. Les deux huiles sont soumises à des conditions de vieillissement accéléré à 120°C en contact avec l'air sur une durée pouvant atteindre 50 jours. Au cours de l'essai, les propriétés diélectriques -facteur de dissipation, conductivité et permittivité- ont été mesurées ainsi que l'acidité et la teneur en eau. De plus, un suivi de la tension de claquage sous tension alternative selon la norme CEI 60156 a été effectué afin de vérifier l'impact du vieillissement sur la rigidité diélectrique des huiles. Une telle caractérisation doit nous permettre de déterminer quelques grandes tendances concernant le vieillissement de l'huile végétale.

2.1 Etude bibliographique

Les isolants liquides, dans les conditions de leur utilisation, sont soumis à différentes contraintes (thermique, électrique, chimique) qui vont modifier leurs propriétés en fonction du temps. Les mécanismes de vieillissement ainsi mis en jeu sont non seulement complexes mais, de plus, souvent difficile à prédire par le manque d'informations sur la composition chimique précise des liquides utilisés.

Dans l'huile minérale, il a été montré que le vieillissement constaté dans les appareils est essentiellement produit par un mécanisme d'oxydation accéléré par la présence de métaux (cuivre, fer).

Dans le cas des huiles végétales, du fait de leur structure chimique, un mécanisme supplémentaire de vieillissement doit être pris en compte, il s'agit du phénomène d'hydrolyse. Le vieillissement fera ainsi intervenir des processus d'oxydation et d'hydrolyse dont les influences respectives dépendront des conditions de fonctionnement (teneur en eau, température, etc.).

2.1.1 Oxydation

2.1.1.1 Oxydation de l'huile minérale

Une huile minérale étant composée de milliers de molécules différentes, les mécanismes d'oxydation sont décrits de façon globale sans entrer dans le détail des réactions possibles. De nombreuses études ont été publiées sur l'oxydation des huiles minérales en fonction de leur origine (paraffinique, naphénique, aromatique, etc....) [20, 31, 32].

L'oxydation des huiles minérales est un processus chimique progressif pendant lequel des molécules d'hydrocarbures sont attaquées par l'oxygène pour former divers produits oxygénés comme des hydroperoxydes, des alcools et des acides organiques [33, 34]. L'oxydation est initiée par la formation d'hydroperoxydes et de peroxydes qui réagissent ensuite pour produire des alcools, des cétones, des aldéhydes puis des acides. La vitesse de réaction de ces processus oxydatifs est augmentée en présence de catalyseurs métalliques tels que le cuivre et le fer. Le processus d'oxydation peut être divisé en trois phases : induction, accélération et saturation comme le montre la Fig. 2.1.

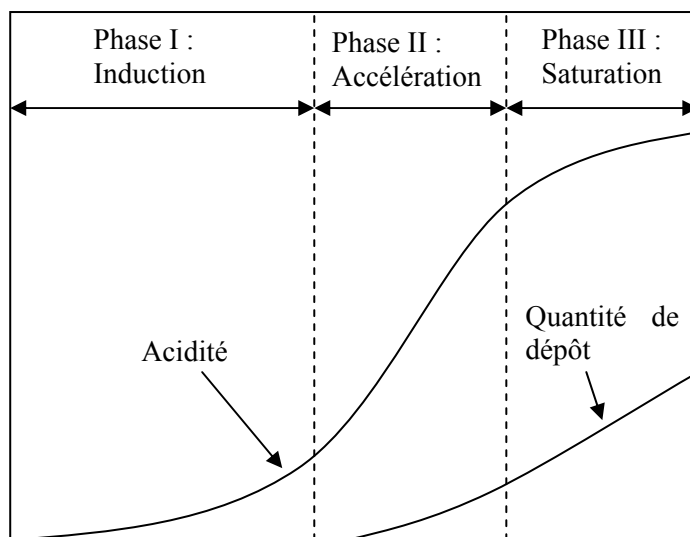


Fig. .1 Différentes phases de vieillissement d'une huile minérale et variation de l'acidité et de la quantité de dépôt [20].

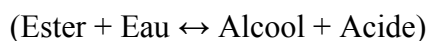
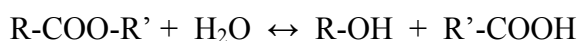
Les produits d'oxydation sont polaires, ils accroissent ainsi la solubilité de l'eau ainsi que la conductivité et le facteur de dissipation diélectrique de l'huile. Au cours de l'oxydation, les molécules aromatiques présentes dans l'huile minérale (en proportion variable suivant leur origine) conduisent, par polymérisation radicalaire, à la formation de dépôts ou de boues (asphaltènes).

2.1.1.2 Oxydation des esters naturels

Les esters naturels s'oxydent de la même façon en formant la succession de produits : alcools, cétones, aldéhydes et enfin acides carboxyliques. En règle générale, les sous-produits de l'oxydation des esters naturels ne forment pas de dépôts ou de boues comme dans l'huile minérale [35]. Notons que l'influence de l'oxydation sur les propriétés diélectriques des huiles végétales a été peu étudiée.

2.1.2 Hydrolyse

La fonction ester (-COOC-) est formée par la réaction de condensation d'un alcool et d'un acide dont la réaction inverse est l'hydrolyse. Ainsi, l'hydrolyse reforme l'alcool et l'acide de départ suivant la réaction chimique :



Rappelons que les esters naturels (i.e. des huiles végétales) sont des esters neutres du glycérol et d'acides gras supérieurs saturés et non saturés comportant de 16 à 22 atomes de

carbone. L'huile RS50 est un mélange 50/50 de triglycérides de Colza oléique et d'oléate de 2-éthyl-1-hexanol (mono ester obtenu par une réaction de transestérification) comprenant 85% d'acide gras mono éthylénique en C18 (acide oléique). La présence de liaisons éthyléniques rend plus facilement oxydable les huiles végétales.

Salomon [36] a montré que l'acidité d'un acide carboxylique est tributaire de sa structure moléculaire. L'acide carboxylique avec une longue chaîne a tendance à être moins agressif qu'un acide à courte chaîne carboxylique [37, 38].

2.1.3 Influence du vieillissement sur les propriétés des isolants liquides

La plupart des études sur le vieillissement des huiles isolantes à base d'esters ont été effectuées sur des produits commerciaux contenant une grande quantité d'anti-oxydants.

Martin [39] a réalisé une étude comparative de l'influence du vieillissement sur les propriétés chimiques et diélectriques d'isolants liquides commerciaux basés soit sur des huiles végétales (huile FR3 de Cooper) soit sur des esters de synthèse à base de pentaérythrytol (Midel 7131). Ces liquides ont été vieillis à 150°C en contact avec l'air et en présence ou non de catalyseurs métalliques. Bien que l'acidité initiale de l'huile minérale soit bien plus faible, après 14 jours de test, l'huile minérale et l'huile FR3 présentent de même niveau d'acidité (Fig. 2.2).

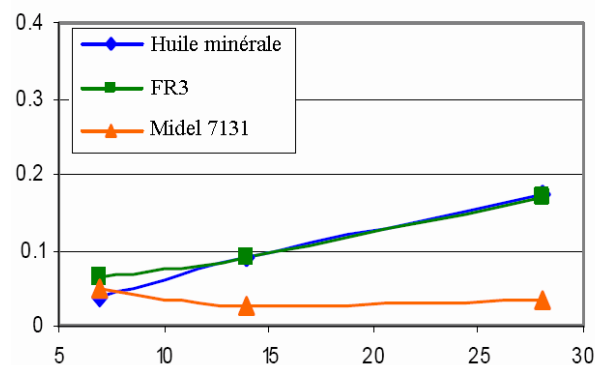


Fig. .2 Acidité des huiles en fonction du temps de vieillissement, test sans catalyseur [39].

Dans des conditions de vieillissement similaires, Borsi et al. ont montré qu'il n'y avait pas de réduction significative de la rigidité diélectrique de l'huile végétale, alors que le facteur de dissipation diélectrique avait augmenté d'un facteur d'environ 100 [4]. Notons que dans ces mesures de la tension de claquage, la teneur en particules n'était pas contrôlée.

Des divers tests de vieillissement des esters naturels ou synthétiques publiés, il ressort que les acides gras à longues chaînes créés par hydrolyse sont «doux et non-corrosif par

rapport aux acides à courte chaîne trouvés dans de l'huile minérale» [40]. Ce fait peut être intéressant pour leur application dans des dispositifs électrotechniques.

Rappelons que l'isolation des transformateurs s'effectue avec des isolants solides (papiers et cartons) imprégnés d'huile isolante. Des études récentes ont montré que le couple papier (ou carton) / huile de colza subit un vieillissement thermique très lent par rapport à celui observé pour le couple papier / huile minérale [41-43]. Ceci est dû à la solubilité élevée de l'eau dans les huiles végétales (~ 1000ppm) par rapport à celle observée dans l'huile minérale (~ 50ppm). Ainsi en présence d'huile végétale, la teneur en eau du papier reste relativement constante au cours du fonctionnement ce qui limite sa dégradation.

2.2 Techniques expérimentales

Toutes les expériences de vieillissement ont été effectuées en comparaison avec l'huile minérale suivant un processus de vieillissement accéléré. Le protocole de vieillissement est adapté de la norme CEI 61125 méthode C [44]. Nous avons choisi d'effectuer le test sur une durée pouvant atteindre 50 jours et en l'absence d'un catalyseur métallique. Les propriétés diélectriques et chimiques des huiles testées sont suivies en fonction du temps de vieillissement.

Un récipient de verre de forme cylindrique est rempli avec 0,8l de liquide. De cette manière, l'échantillon liquide a une surface d'échange avec l'air de 150 cm². L'échantillon est ensuite placé dans un four à température fixe de 120°C ±0,5.

La stabilité chimique des huiles est ensuite estimée à partir de la surveillance en continu des propriétés diélectriques, de l'acidité soluble, de la teneur en eau, de la couleur et de la quantité de dépôt produit. La rigidité électrique sous tension alternative est également mesurée et comparée à celle de l'huile neuve pour une même teneur en eau. Ceci afin d'évaluer l'influence du vieillissement sur les propriétés diélectriques des esters.

2.3 Vieillessement des huiles

2.3.1 Acidité et couleur des huiles en fonction du temps de vieillissement

Après 15 jours de vieillissement à 120°C, l'huile RS50 devient jaune foncé, sans formation de dépôt, tandis que l'huile minérale devient noire avec la formation de dépôts (Fig. 2.3). Au fur et à mesure du temps de test, les deux huiles changent de couleur de deux manières différentes. L'huile RS50 change de couleur continûment et aucune formation de

dépôt n'est observée. Par contre, bien que sa couleur initiale soit plus claire, l'huile minérale est devenue noire après seulement quelques jours à cause de la formation de particules. Ces particules sont observables à l'œil nu et elles décantent au fond du bécher après un temps court.



Fig. .3 Comparaison de la couleur des deux huiles après 15 jours à 120°C (leurs couleurs initiales sont similaires) a: Huile minérale, b: Huile RS50

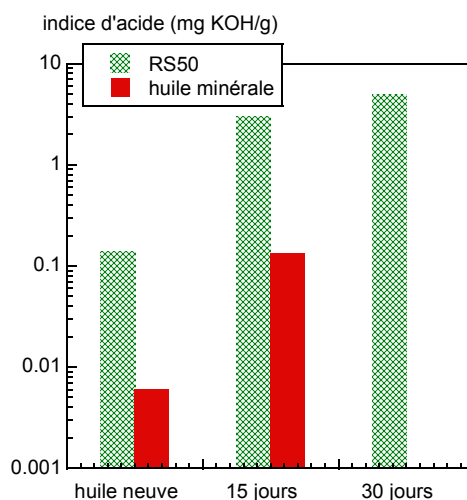


Fig. .4 Acidité soluble en fonction du temps de vieillissement à 120°C.

La stabilité chimique a été évaluée à partir de la mesure de l'acidité soluble formée au cours de l'essai. Cette mesure a été réalisée par le Laboratoire de la société AREVA. Comme prévu, les niveaux d'acidité au début et à la fin sont toujours plus élevés dans l'huile RS50 que dans l'huile minérale (Fig. 2.4). La même augmentation relative (d'une décennie) est observée dans les deux huiles après 15 jours de test.

Dans l'huile minérale, c'est uniquement le processus d'oxydation qui forme des acides alors que dans un ester naturel comme le RS50, l'oxydation et l'hydrolyse conduisent à la formation d'acides. Dans ces essais, il n'est cependant pas possible d'évaluer la part respective de l'oxydation et de l'hydrolyse sur l'augmentation de l'acidité du liquide.

2.3.2 Influence du vieillissement sur les propriétés diélectriques

Les essais ont commencé avec des huiles sèches ($\sim 100\text{ppm}$ à 120°C) et la teneur en eau a été mesurée périodiquement en fonction du temps de vieillissement. Dans l'huile RS50, on observe une augmentation continue de la teneur en eau en fonction du temps, d'une valeur initiale de 100ppm à un certain niveau d'équilibre d'environ 700ppm , loin de sa limite de saturation à 120°C . Cette limite de saturation est estimée à partir de l'Eq. 1.12 et elle vaut 5400ppm . D'autre part, dans l'huile minérale, la teneur en eau augmente d'une valeur initiale de 30ppm jusqu'à une valeur finale de 52ppm , qui est également loin de sa limite de 1300ppm à 120°C . Nous avons précédemment montré que de telles teneurs en eau n'ont aucune influence sur les propriétés diélectriques des huiles neuves, c'est-à-dire les pertes, la conductivité et la permittivité. (voir § 1.3.3.3). Par conséquent, toute modification des propriétés diélectriques doit être attribuée aux processus thermiques et processus d'oxydation qui se produisent au cours de l'essai et non à l'influence de la teneur en eau.

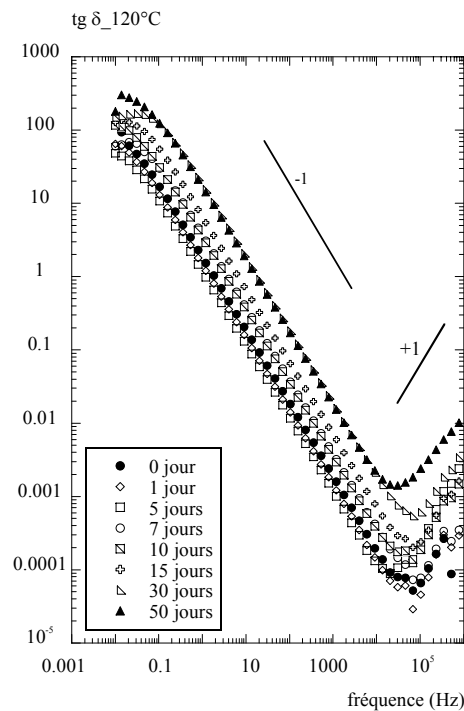


Fig. .5 Variation de $tg\delta$ avec la fréquence dans l'huile RS50 pour différents temps de vieillissement. Toutes les mesures ont été effectuées à 120°C . Teneur en eau initiale 300ppm , teneur en eau finale 706ppm .

Sur les Fig. 2.5 et Fig. 2.6, les deux types de pertes : pertes par conduction et pertes par polarisation peuvent être bien distinguées comme on l'a présenté au chapitre § 1.3.3.1 . Aux faibles fréquences ($f < 10\text{kHz}$), les pertes sont dues à la conduction et une variation

proportionnelle à $1/f$ est observée (Eq. 1.13). Aux fréquences plus élevées ($f > 10\text{kHz}$), les pertes sont dues à la polarisation et elles sont proportionnelles à la fréquence (Eq. 1.14).

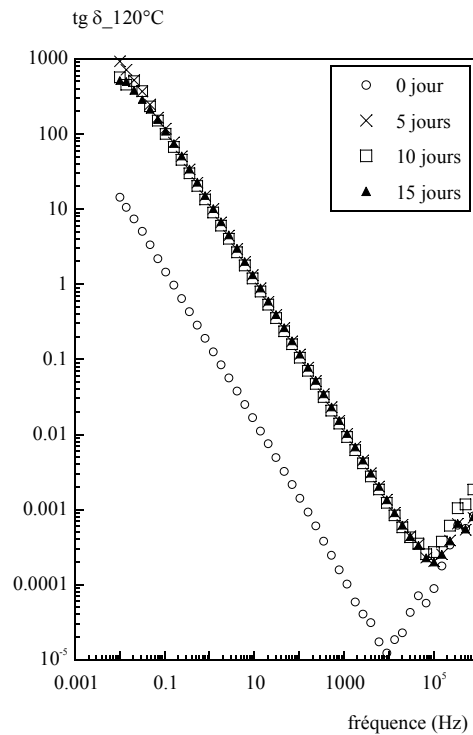


Fig. .6 Variation de $\text{tg } \delta$ avec la fréquence dans l'huile minérale pour différents temps de vieillissement. Toutes les mesures ont été effectuées à 120°C . Teneur en eau initiale 30ppm, teneur en eau finale 52ppm.

Dans les deux huiles, les *pertes par conduction* augmentent fortement avec le temps de vieillissement (Fig. 2.5 et Fig. 2.6). Notons que les pertes par conduction de l'huile RS50 de départ sont environ 10 fois plus élevées que celles de l'huile minérale de départ. Toutefois, l'augmentation des pertes et donc de la conductivité en fonction du temps est beaucoup plus rapide dans l'huile minérale que dans l'huile RS50 (Fig. 2.7). Dans l'huile minérale, la conductivité augmente d'environ 2 décades (de $\sim 10^{-11}\text{S/m}$ à $\sim 10^{-9}\text{S/m}$) après seulement 5 jours de test puis elle reste sensiblement constante jusqu'à la fin de l'essai (limitée à 15 jours pour l'huile minérale). Par contre, la conductivité de l'huile RS50 augmente plus lentement en fonction du temps de test, de $\sim 10^{-10}\text{S/m}$ à $\sim 10^{-9}\text{S/m}$ sur les 15 premiers jours, pour atteindre une valeur stable de $3 \cdot 10^{-9}\text{S/m}$ après 30 jours. On peut remarquer qu'après 15 jours de test, les deux huiles atteignent une conductivité pratiquement identique (Fig. 2.7).

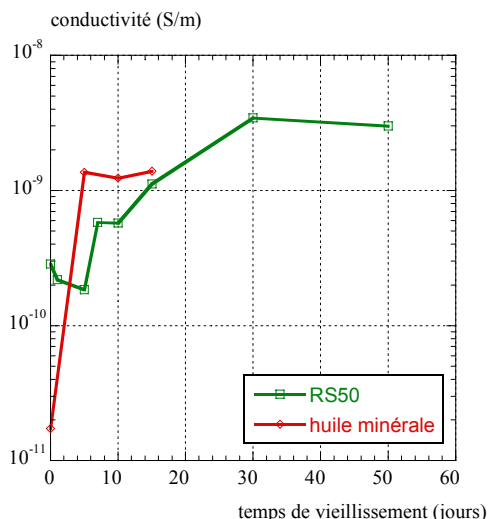


Fig. .7 Conductivité des huiles en fonction du temps de vieillissement à 120°C.

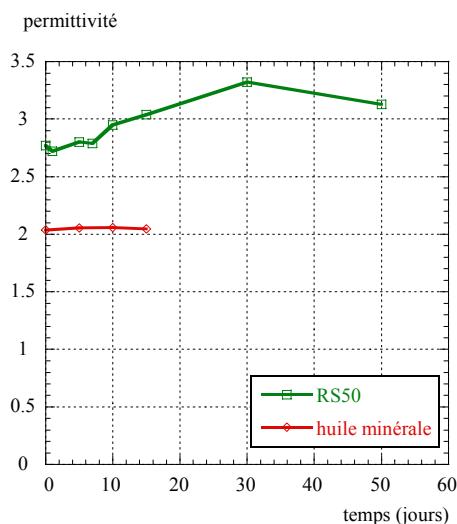


Fig. .8 Permittivité des huiles en fonction du temps de vieillissement à 120°C.

Dans l'huile minérale, la permittivité restent stables (Fig. 2.8) pendant tout le processus de vieillissement. Notons qu'à cause de la limite du dispositif de mesure à fréquences élevées, l'influence du vieillissement sur *les pertes par polarisation* est donc impossible de justifier (Fig. 2.6). L'influence du vieillissement sur *les pertes par polarisation* et sur la permittivité est par contre très nette sur l'huile RS50 (Fig. 2.5 et Fig. 2.8). Ces pertes augmentent de façon continue en fonction du temps de vieillissement comme nous l'avons observé pour les pertes de conduction, ceci pour les trente premiers jours de vieillissement. Au-delà de 30 jours, lorsque les pertes par conduction atteignent leur saturation, une croissance continue des pertes par polarisation est encore observée. Dans des solutions de composants polaires dans un solvant non polaire, les pertes par polarisation sont liées à la concentration des dipôles et à leur moment dipolaire [31]. Nos résultats pourraient ainsi s'expliquer par une augmentation plus importante de la teneur en molécules polaires, en

fonction de la durée du test, dans l'huile RS50 que dans l'huile minérale. Une discussion plus détaillée sur ce point, en prenant en compte la composition chimique des deux huiles, sera présentée dans les paragraphes suivants.

2.3.3 Influence du vieillissement sur la tension de claquage alternative

La tension de claquage d'un liquide isolant à fréquence industrielle selon la norme CEI 60156 est principalement affectée par la présence de particules solides, et par la teneur relative en eau. Étant donné que dans nos mesures la teneur en particules est considérablement réduite par la filtration du liquide en boucle fermée, la teneur relative c_r en eau constitue le paramètre principal.

L'huile RS50 présente une teneur en eau à saturation beaucoup plus importante que l'huile minérale, ceci quelle que soit la température (voir § 1.3.1). Au cours du test de vieillissement, les processus d'oxydation produisent des composants polaires qui peuvent augmenter la limite de saturation en eau. Toutefois, cet effet est relativement faible : nous avons vérifié que la limite de saturation à température ambiante augmente légèrement de 760ppm dans l'huile RS50 neuve à 840ppm dans l'huile ayant subi 7 jours de vieillissement à 120°C.

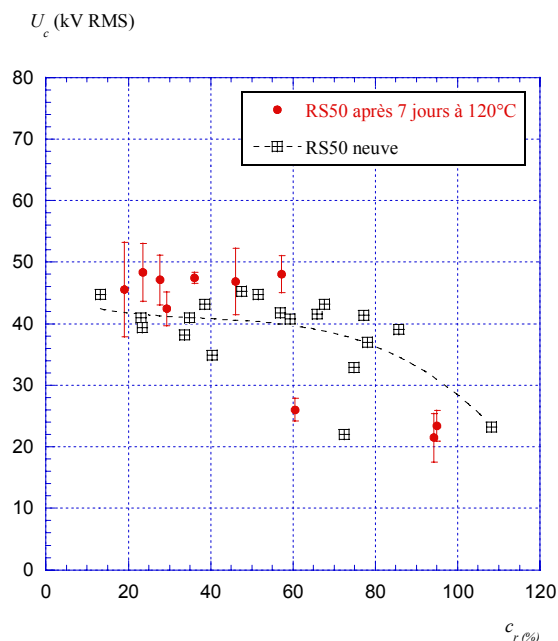


Fig. .9 Influence du vieillissement sur la tension de claquage de l'huile RS50 filtrée en fonction de la teneur relative en eau.

La Fig. 2.9 montre l'influence du vieillissement (7 jours à 120°C) sur la tension de claquage de l'huile RS50. La tension de claquage U_c de l'huile neuve est pratiquement indépendante de c_r jusqu'à une valeur d'environ 60% et sa valeur moyenne est de $41,5 \pm 3$ kV

RMS. Dans l'huile vieillie, l'influence de la teneur en eau c_r est similaire à celle observée dans l'huile neuve et la tension de claquage n'est pas abaissée après un vieillissement de 7 jours à 120°C comme nous l'attendions. On observe même une tendance inverse car la valeur moyenne de la tension de claquage pour $c_r < 60\%$ est sensiblement plus élevée dans l'huile vieillie ($U_c = 46,5 \pm 2$ kV RMS) que dans l'huile neuve.

Nous n'avons pas mesuré l'influence du vieillissement sur la tension de claquage de l'huile minérale. Toutefois, des études précédentes ont montré que la rigidité diélectrique de l'huile minérale est maintenue après vieillissement [3].

2.3.4 Comparaison des résultats sur le vieillissement des huiles

L'interprétation chimique des résultats du test de vieillissement tel que nous l'avons pratiqué est difficile faute de pouvoir déterminer les produits formés par les différents processus de vieillissement. En effet, les liquides testés sont des mélanges complexes de dizaines (huile végétale) ou de milliers (huile minérale) de molécules, et suivre l'évolution de leur composition en fonction du vieillissement nécessiterait des moyens d'analyses extrêmement sophistiqués.

Nous avons montré que le vieillissement à 120°C modifie les propriétés diélectriques (pertes, permittivité), l'indice d'acide et la couleur des huiles testées. Ces résultats peuvent être interprétés qualitativement de la façon suivante. Les résultats d'études antérieures ont montré que le mécanisme de vieillissement prédominant dans l'huile minérale est l'oxydation. Par contre, dans l'huile RS50 qui est un ester, l'hydrolyse peut également intervenir.

L'oxydation de l'huile minérale induit, dans un premier temps, une augmentation importante de la conductivité avant d'atteindre une valeur pratiquement indépendante du temps d'essai. Par contre, aucune influence sensible de la durée du test sur sa permittivité n'est observée. Dans le même temps, une augmentation importante de l'acidité soluble, de la quantité de dépôt et de la coloration (noircissement) est observée. L'évolution de la conductivité de l'huile minérale peut s'expliquer en fonction des différentes phases du processus d'oxydation :

- les phases d'induction et d'accélération correspondent aux 5 premiers jours d'essai ;
- la phase de saturation apparaît après 5 jours et se maintient jusqu'à la fin de l'essai soit 15 jours.

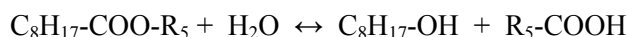
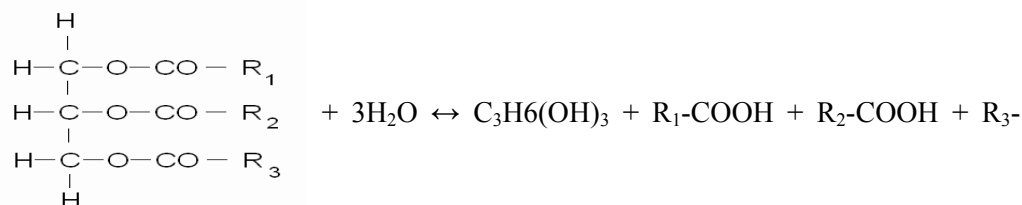
L'huile minérale peut être considérée principalement comme un mélange d'hydrocarbures aliphatiques, naphéniques et aromatiques. Leur réactivité chimique

augmente suivant l'ordre : aliphatique, naphthénique et aromatique. Cependant, la réactivité chimique totale n'est pas simplement la moyenne des réactivités des différents groupes et, de plus, la phase d'induction de chaque groupe est différente. L'oxydation des composants aliphatiques et naphthéniques produit plus d'acides solubles, moins de changement de couleur et ne crée pas de dépôt. Au contraire, l'oxydation des aromatiques conduit à la formation de dépôts ce qui augmente la viscosité de l'huile. Les produits principaux de l'oxydation des aromatiques sont des composés hydroxyles. Ces hydroxyles peuvent à leur tour agir comme des anti-oxydants naturels qui vont réagir avec les produits formés par l'oxydation des aliphatiques et des naphthéniques et ainsi bloquer la chaîne des réactions radicalaires d'oxydation. On peut supposer que l'oxydation de l'huile minérale commence par l'oxydation des composés aliphatiques et naphthéniques et qu'elle se termine par l'oxydation des composés aromatiques, ce qui inhibe la chaîne d'oxydation totale et cause l'état de saturation observé.

Il est important de rappeler que, malgré l'augmentation de deux décades de la conductivité, la permittivité de l'huile minérale ne changent pratiquement pas au cours du test. D'autre part, il a été montré par Hakim, dans une expérience similaire, que l'énergie d'activation des porteurs de charge ne change pas avec le vieillissement de l'huile minérale [31]. Nous pouvons en conclure que l'oxydation conduit essentiellement à une augmentation du nombre d'ions (et donc de la conductivité du liquide) sans une création sensible de composés très polaires. Les ions formés devraient principalement provenir de la dissociation des acides solubles.

Dans l'huile RS50, le scénario est probablement différent. Il s'agit d'un mélange 50/50 de triglycérides de Colza oléique et d'oléate de 2-éthyl-1-hexanol comprenant 85% d'acide gras mono éthylénique en C18 (acide oléique). Le vieillissement de l'huile consiste en deux processus parallèles :

- L'hydrolyse conduit à la formation de glycérol, de 2-éthyl-1-hexanol et d'acides gras suivant les réactions.



(Ester + Eau ↔ Alcool + Acide)

(R_i sont des hydrocarbures oléiques principalement en C18)

- L'oxydation se produira en premier lieu à partir des doubles liaisons éthyléniques présentes dans les chaînes hydrocarbonées des acides oléiques. Ceci conduira à des

composés comportant des fonctions alcool, aldéhyde, cétone et/ou acide sur la chaîne hydrocarbonée, puis éventuellement à une rupture de la chaîne et/ou à une polymérisation des acides gras (libres ou estérifiés), entraînant éventuellement une augmentation de la viscosité [35].

Dans les premiers 30 jours de vieillissement, l'augmentation continue de l'acidité et de la conductivité de l'huile RS50 peut s'expliquer, comme pour l'huile minérale, par l'augmentation de la teneur en acide soluble par oxydation. Cependant, si on suppose que l'oxydation de l'huile RS50 produit des composés similaires à ceux créés dans l'huile minérale, l'augmentation de la permittivité et des pertes dipolaires ne peut pas s'expliquer par le seul processus d'oxydation. Si l'hydrolyse des esters se produit nous pouvons comprendre l'augmentation des pertes dipolaires et de la permittivité. En effet, les alcools formés par l'hydrolyse présentent une permittivité relative élevée, par exemple 42 pour le glycérol, et une fraction molaire de 0,01 de glycérol suffit pour augmenter la permittivité de l'huile RS50 de 2,8 à 3,2 comme observé expérimentalement (Fig. 2.8). On peut envisager de suivre la dégradation de l'huile par hydrolyse par la mesure de sa permittivité en fonction du temps de vieillissement. L'accroissement de la conductivité, des pertes dipolaires et de la permittivité doit donc faire intervenir les processus d'oxydation et d'hydrolyse en augmentant en même temps la quantité de charges (essentiellement des acides) et de composés très polaires (glycérol par exemple). Il est pour l'instant impossible de quantifier la contribution respective de chacun des processus au vieillissement total.

Au de-là de 30 jours, la conductivité et la permittivité restent stables. Cependant, les pertes par polarisation continuent à croître. On peut supposer qu'une création de molécules polymères de grandes tailles par la polymérisation des acides gras est la raison de cette augmentation des pertes de polarisation.

2.4 Conclusions sur le vieillissement

L'huile RS50 peut maintenir sa tension de claquage après une longue période de vieillissement à 120°C. Ce vieillissement est plus progressif et continu par rapport à l'huile minérale. Le vieillissement de l'huile RS50 s'explique par une combinaison des processus d'oxydation et d'hydrolyse. Ce point reste à confirmer par une analyse détaillée des produits formés lors du test. Il serait également intéressant de procéder à des mesures sous différentes atmosphères (par exemple sous air sans vapeur d'eau, ou sous azote humide) pour distinguer les mécanismes d'oxydation et d'hydrolyse.

Le vieillissement augmente la quantité de composés dissociables et de composés présentant un moment dipolaire élevé, ce qui augmente parallèlement la conductivité, la permittivité et les pertes dipolaires à hautes fréquences. Cette dernière propriété pourrait être

utilisée comme paramètre pour caractériser le vieillissement. L'hydrolyse qui forme des acides gras à longue chaîne augmente également l'acidité du liquide. De plus, il a déjà été montré que les produits formés par le vieillissement thermique en présence d'air des huiles végétales sont moins agressifs pour les papiers et cartons constituant l'isolation mixte liquide/solide des appareillages de l'électrotechnique que ceux formés à partir de l'huile minérale [41-43]. Notons enfin, que le vieillissement de l'huile RS50 ne conduit pas à la formation de dépôts ou de boues, ce qui est un avantage indéniable pour l'utilisation de ce liquide dans les appareillages.

Chapitre 3 Génération et propagation des streamers

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

Les streamers dans les liquides sont mis en évidence par l'utilisation de techniques de visualisation rapide et l'enregistrement du courant transitoire ou de la lumière émise. Dans les liquides, le claquage est la conséquence de la génération et de la propagation de canaux ionisés ayant lieu quelques μs avant le claquage. Ces canaux gazeux sont considérablement plus « conducteurs » que l'isolant liquide lui-même, et dans la plupart des cas le claquage se

produit immédiatement lorsque le premier canal touche l'électrode opposée. L'étude complète du processus de claquage comprend donc deux sujets principaux :

- étude de la génération des streamers
- étude des conditions nécessaires pour la propagation totale des streamers jusqu'à l'électrode opposée.

Dans ce chapitre, nous commençons tout d'abord par le rappel des principaux résultats obtenus antérieurement dans les études des streamers. Ensuite, les techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation de la génération et de la propagation des streamers dans l'huile RS50 sous tension impulsionnelle sont présentées. La configuration des électrodes et la forme d'onde de la tension appliquée sont choisies pour favoriser l'observation de chacun des phénomènes de génération et de propagation des streamers.

- La génération des streamers est étudiée dans la configuration tige-plan, à une distance fixée à 2 cm et en variant le rayon de courbure de l'électrode tige de 0,5 mm à 8 mm.
- La propagation des streamers est étudiée dans la configuration pointe-plan avec la distance inter-électrodes variant de 2 cm à 20 cm.

Nous présentons la caractérisation de la génération et de la propagation des streamers dans l'huile RS50 dans les deux polarités. Ces propriétés sont analysées en les comparant avec des résultats déjà obtenus dans l'huile minérale.

3.1 Etude bibliographique de la génération et de la propagation des streamers

3.1.1 Caractères généraux

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

Les streamers peuvent être observés quelle que soit la forme d'onde de la tension appliquée (créneau, onde de foudre, surtension de manoeuvre, tension continue, tension alternative) quand celle-ci est suffisamment élevée. Ils sont générés le plus souvent là où le champ est renforcé, par exemple à l'extrémité de la pointe dans les systèmes d'électrodes pointe-plan ou en géométrie uniforme lorsqu'une particule est au contact d'une électrode [13, 45, 46].

Ils sont caractérisés par leur indice de réfraction inférieur à celui du liquide environnant [47, 48]. Ceci rend possible la visualisation des streamers par strioscopie ou ombroscopie et confirme l'existence d'un changement de phase durant leur propagation.

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

Durant leur propagation, les streamers se ramifient plus ou moins et acquièrent une forme soit en "buisson" constituée par quelques grosses branches aux contours très irréguliers (Fig. 3.1), soit une forme filamentaire (Fig. 3.2). Qualitativement, il existe une corrélation entre la forme des streamers et leur vitesse: plus les streamers sont fins, plus ils sont rapides [49-54]. En fonction de nombreux paramètres (nature du liquide, tension appliquée, additifs, pression) le streamer peut être très ramifié (Fig. 3.2 A) ou peu ramifié (Fig. 3.2 B) [51, 53-58].

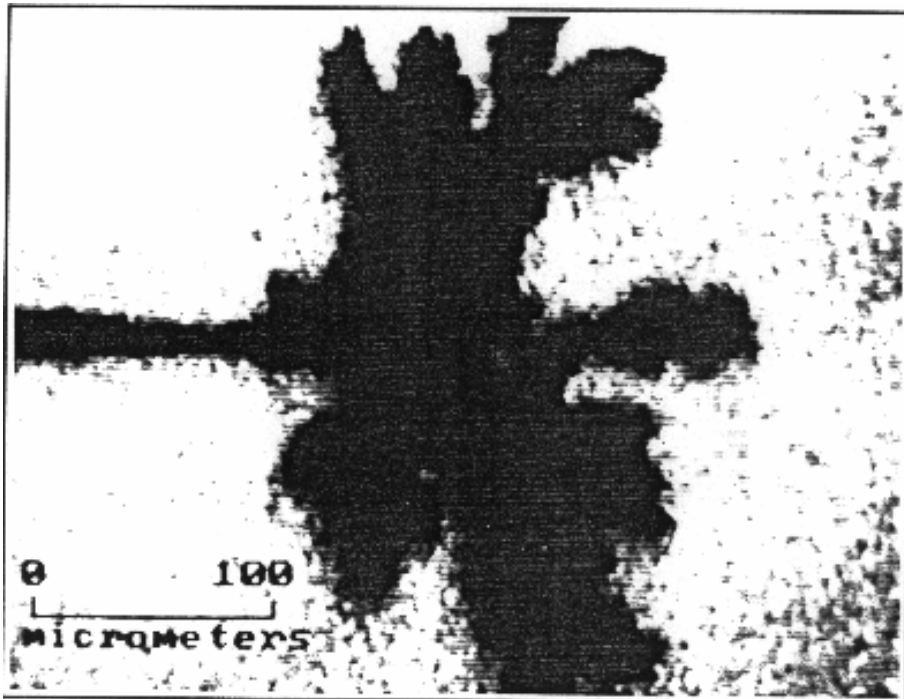
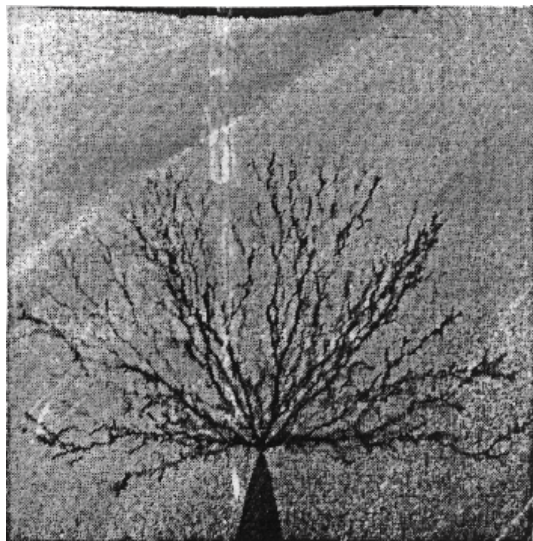
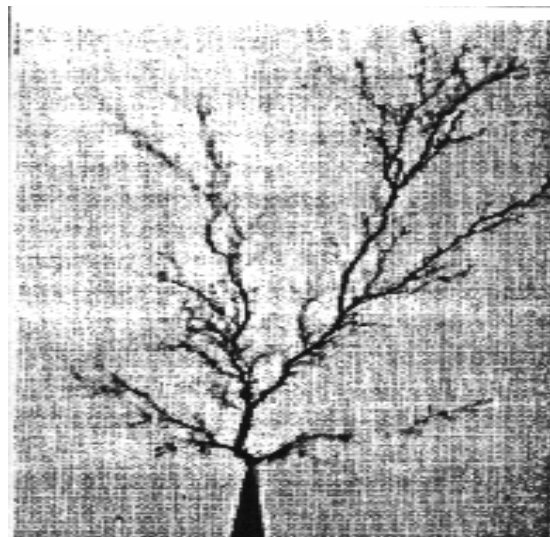


Fig. .1 Streamer positif “buisson” dans le cyclohexane en géométrie pointe-plan sous créneau de tension. Photographie obtenue par ombroscopie (temps d’exposition =5 ns, distance $D=0,18$ cm, tension appliquée $U=12$ kV) [49].



A



B

Fig. .2 Streamers positifs sous tension impulsionnelle en géométrie pointe-plan. A: très ramifié dans l’huile de transformateur (distance 3 mm, tension appliquée 22 kV), B: peu ramifié dans l’huile silicone ($D=3$ mm, $U=22,5$ kV, viscosité 1000 cSt) [54].

3.1.2 Génération du streamer

La génération du streamer dans des huiles isolantes en géométrie tige-plan a été étudiée dans les deux polarités de la tige [49, 59, 60]. Dans ces études, les tiges utilisées ont une extrémité hémisphérique de rayon r_p variant de 0,5mm à 25mm et elles sont séparées d'un plan à une distance fixe. Le coefficient de renforcement du champ varie alors de presque 1 jusqu'à un facteur 15. En mesurant le temps de retard au claquage avec cette configuration d'électrodes, il est possible de conclure si le claquage est contrôlé par la génération ou par la propagation. Le temps de retard au claquage mesuré en fonction de la tension appliquée est présenté sur la Fig. 3.3 pour la polarité négative et sur la Fig. 3.4 pour la polarité positive. Plus les tensions sont faibles et les valeurs de r_p grandes, plus le temps de retard à la génération augmente. Ceci est dû à la diminution du champ électrique autour de la tige.

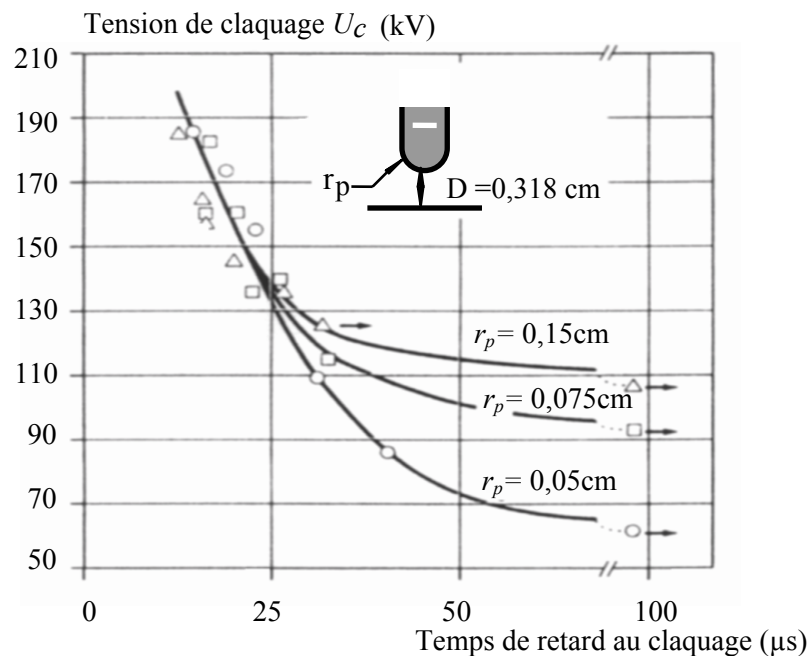


Fig. .3 Temps de retard au claquage en géométrie tige-plan, polarité négative [60].

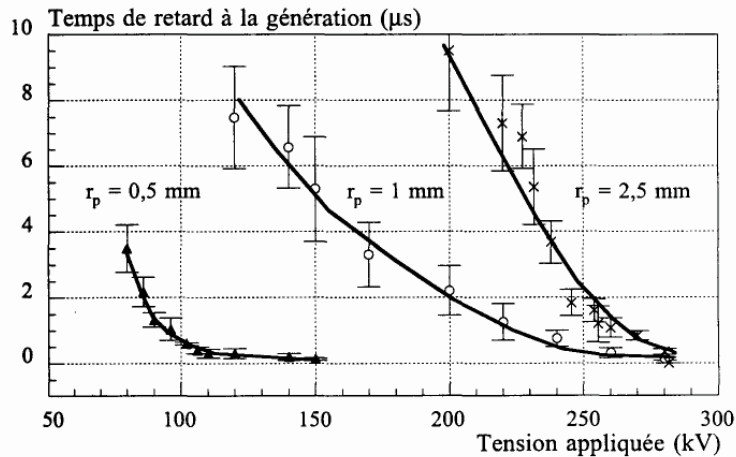


Fig. 4 Temps de retard à la génération des streamers positifs sous tension impulsionnelle, distance inter-électrodes $D=20\text{mm}$. [61]

En polarité négative, Rzad et al. [60] ont montré que *les champs de génération des streamers* dans ces conditions sont divisés par un facteur 3 quand le rayon de courbure passe de 0,5 mm à 25mm (Fig. 3.5). Sur cette figure, nous avons rapporté également les champs de génération des streamers positifs obtenus par Gournay en champ très divergent [62]. On observe que la décroissance des champs de génération obtenus par Rzad et al., en polarité négative, semble en continuité avec les valeurs de Gournay pour des pointes fines en polarité positive.

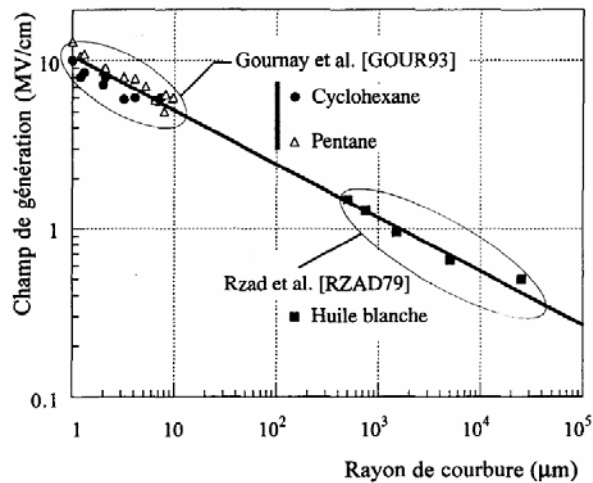


Fig. 5 Champ de génération des streamers négatifs en fonction du rayon de courbure de l'électrode en géométrie tige-plan dans l'huile blanche d'après Rzad et al. [60] et en positif en géométrie pointe-plan dans les hydrocarbures par Gournay [62].

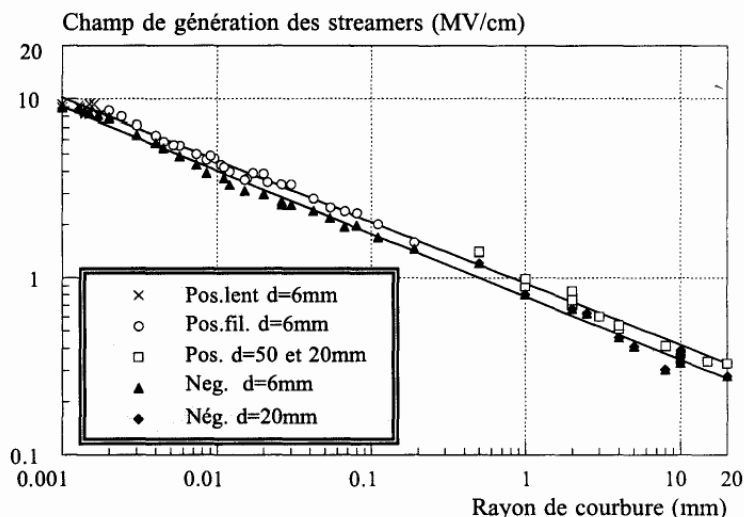


Fig. .6 Champ de génération des streamers en fonction du rayon de courbure de l'électrode [21].

En effet, cette diminution est confirmée dans l'huile minérale par Tran-Van [21] suivant une large gamme de rayons de courbure de l'électrode tige dans les deux polarités (Fig. 3.6). Ses mesures montrent une décroissance du champ de génération en $E_g \propto r_p^{-0,4}$.

La diminution du *champ de génération des streamers* lorsque le rayon de courbure de l'électrode augmente, peut être comparée à celle du champ de claquage: le champ de claquage des liquides décroît lorsque la taille d'électrodes (donc le volume de liquide soumis au champ maximum) augmente. On constate, en règle générale, que le champ de claquage d'un isolant liquide diminue sensiblement lorsque le volume du liquide soumis au champ augmente. Ce phénomène est connu sous le nom d'*effet de volume* ou d'*effet de surface* ou plus généralement : d'*effet d'échelle*. En résumant les résultats sur ce sujet, Whitehead [63] a suggéré que l'accroissement de la surface des électrodes entraîne l'augmentation de la probabilité d'existence de "défauts" (aspérité, rayures, particules) qui renforcent le champ localement sur les électrodes et peuvent déclencher le claquage. Ce phénomène présente une grande importance dans la pratique industrielle. Les phénomènes de préclaquage et de claquage aux larges distances avec de grands volumes d'huile sont sensiblement différents de ceux mesurés avec les petites distances. On ne peut donc pas appliquer directement les résultats obtenus dans des essais réalisés en laboratoire avec de petits échantillons au cas des grands systèmes réels. Pour chaque liquide, la connaissance d'une loi générique de l'effet d'échelle, dans le cas où elle existe, permet de prévoir la tension de claquage dans différentes conditions.

Dans le but de vérifier ce phénomène dans l'huile RS50, nous allons donc réaliser une étude dans la configuration tige-plan dont le rayon de courbure variera dans une gamme bien choisie. Ces résultats serviront à comparer les propriétés des huiles végétales et minérales

3.1.3 Propagation du streamer

3.1.3.1 Terminologie et notions de modes de propagation

Il existe différents types de streamers dans les liquides. Cette différenciation est essentiellement basée sur leurs formes (plus ou moins ramifiée, voir Fig. 3.1 et Fig. 3.2 et sur leurs vitesses de propagation (de 0,1 à plus de 100 km/s).

Une classification a été proposée par Hebner [64], dans laquelle les phénomènes sont arbitrairement séparés en 1^{er}, 2^{eme} et 3^{eme} modes de propagation en fonction des vitesses mesurées qui augmentent d'un facteur 10 environ de l'un à l'autre : 1^{er} mode: $\approx 0,2$ km/s; 2^{eme} mode: ≈ 2 à 4 km/s; 3^{eme} mode: > 10 km/s. D'autre part, des études récentes ont montré l'existence de streamers très rapides d'environ 100km/s, en géométrie pointe-plan sous fortes surtensions impulsionnelles, dans l'huile minérale seule [65-67] ou à l'interface huile/solide isolant [68]. Plus récemment, une caractérisation détaillée de la propagation du streamer des deux polarités dans l'huile minérale a été réalisée par Massala et al. [61, 69] sur les modes de propagation du streamer et ses caractéristiques électriques.

La propagation des streamers a été observée et caractérisée non seulement par leur forme et leur vitesse, mais également par la mesure des longueurs d'arrêt, des courants transitoires, de la lumière émise et de la charge associés à la propagation [69]. Dans la suite, nous détaillerons chacun de ces aspects en mettant en évidence les résultats obtenus concernant notre étude, c'est à dire à grande distance dans l'huile RS50. Les résultats, obtenus dans l'huile minérale par Massala et al., seront décrits en détails pour une référence de comparaison.

3.1.3.2 Premier mode de propagation (vitesse de 0,1 à 0,5 km/s)

Ce mode de propagation a été observé dans les hydrocarbures saturés par McKenny et McGrath [70], Béréal et Tobazéon [51], Gournay et Lesaint [49, 62], Fitzpatrick et al [71], ainsi que dans l'huile minérale avec des pointes très fines ($r_0 \approx 1 \mu\text{m}$) et à de très basses tensions proches du seuil de génération (10 à 20 kV) par Lesaint et Tobazéon [53, 72]. Les streamers observés ont une forme en buisson (voir Fig. 3.1) et leur vitesse varie entre 0,1 et 0,5 km/s. Ils sont constitués par des cavités gazeuses de forme irrégulière. Les courants transitoires sont constitués par des impulsions brèves (environ 100 μA en amplitude).

Ce mode n'est observé qu'aux faibles distances et ne mène pratiquement jamais au claquage, son étude ne sera pas abordée dans ce travail.

3.1.3.3 Deuxième mode de propagation (vitesse de 1 à ≈ 4 km/s)

Ce mode de propagation a été largement étudié puisqu'il conduit au claquage en géométrie pointe-plan dans la plupart des liquides déjà étudiés. En fonction de la nature du liquide, les streamers observés sont constitués de filaments plus ou moins ramifiés (voir Fig. 3.2). Une caractéristique générale à tous les liquides est que le nombre de filaments augmente avec la tension appliquée. Dans l'huile minérale, le streamer positif est plus ramifié que le négatif [69]. L'ajout d'additif à faible potentiel d'ionisation comme le pyrène modifie également fortement la ramification du streamer [73]. La Fig. 3.7 présente les caractéristiques typiques du streamer négatif dans l'huile minérale dans la configuration pointe-plan à grande distance.

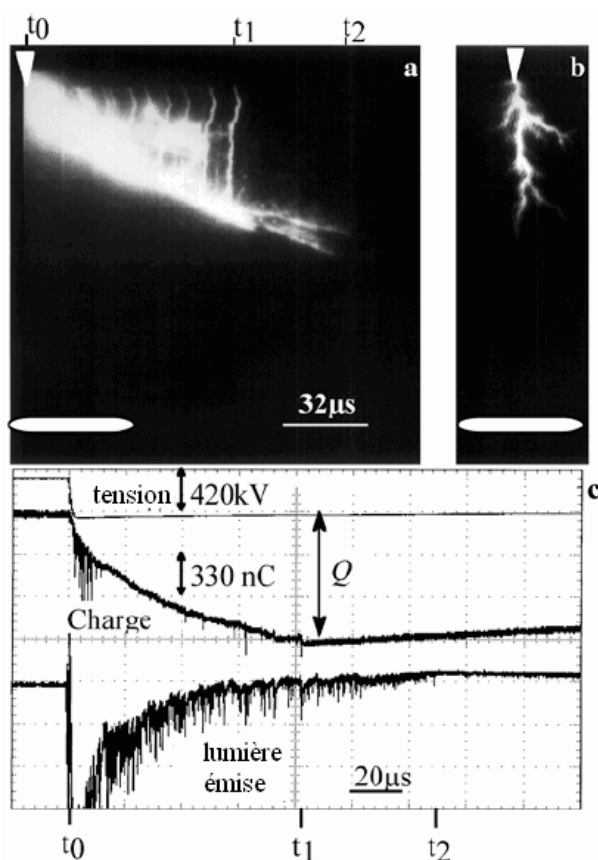


Fig. .7 Streamer négatif dans l'huile minérale suivi par caméra à balayage de fente (a), par caméra à intensificateur (b) et, oscillogramme de la charge et de la lumière émises par le streamer (c). $U= 418\text{kV}$, $D=35\text{cm}$ [69].

1. Vitesse de propagation des streamers

a) Cas général

La vitesse de propagation des streamers a fait l'objet de nombreuses études dans divers liquides (hydrocarbures saturés, aromatiques, huiles silicones, huiles de transformateur) avec différentes formes de tension: impulsionnelle [58, 70, 74-76], créneaux de tension [49,

51, 55, 77], et alternative [53]. De même, dans l'huile minérale, à l'interface liquide/solide isolant, des streamers du deuxième mode ont été observés [78-80].

Dans certains hydrocarbures, ainsi que dans l'huile silicone, il a été parfois rapporté que la vitesse passe par un minimum plus ou moins marqué au cours de la propagation du streamer situé approximativement au 2/3 de la distance inter-électrodes [51, 55]. Ces résultats ont été contredits par d'autres travaux qui rapportent que dans des hydrocarbures tels que le Marcol 70, l'hexadecane, le 2.2.4-triméthylpentane [58], le cyclohexane et le pentane [49], la vitesse reste constante durant la propagation du streamer et croît sensiblement avec la tension. Dans l'huile minérale, la vitesse reste pratiquement constante (≈ 2 km/s) durant la propagation des streamers [53, 55, 74-76, 81].

L'influence de la distance inter-électrodes D est mal définie. En effet, Devins et al [58] et Bérroual [82], obtiennent respectivement des relations empiriques $v \sim D^{-1/2}$ ($0,64 \leq D \leq 2,54$ cm) et $v \sim D^{-1}$ ($0,2 \leq D < 0,6$ cm).

Dans l'huile minérale, à l'interface liquide/solide, les vitesses de propagation des streamers rampants sont aussi constantes et sont indépendantes de la tension appliquée et de l'épaisseur du solide isolant. Les vitesses des streamers de 1,2 km/s et supérieures ou égales à 2 km/s ont été respectivement rapportées dans [78] et [79, 80].

b) Cas de l'huile minérale à grande distance

A grandes distances inter-électrodes (≥ 3 cm), la propagation des streamers dans l'huile minérale a été étudiée jusqu'à la tension de claquage sous différents types de tension appliquée. Il a été observé jusqu'à une très grande distance (82 cm) que la vitesse des streamers positifs reste quasiment constante (≈ 2 km/s) durant leur propagation et varie peu avec la tension appliquée (2-3 km/s). Ceci est une caractéristique remarquable et unique de l'huile minérale. Ces études ont été réalisées essentiellement en géométrie divergente: pointe-plan ($3 \leq D \leq 35$ cm) [69, 83-85] et tige-plan ($3 \leq D \leq 82$ cm) [86].

Dans la configuration pointe-plan, le streamer de 2^e mode est observé jusqu'à une tension 2 fois supérieure à la tension de claquage U_c (Fig. 3.8). Sa vitesse est quasi constante de la pointe au plan et elle augmente légèrement avec la tension de 0,5 km/s à 1,5 km/s en négatif et de 2 km/s à 3 km/s en positif.

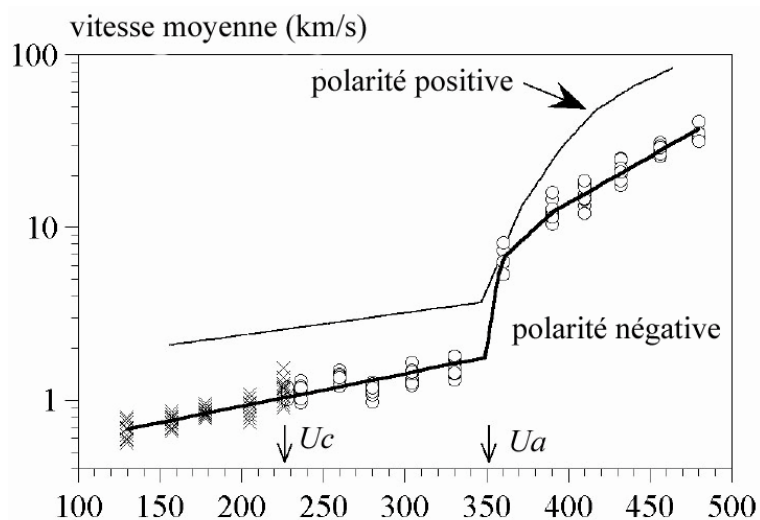


Fig. .8 Vitesse moyenne des streamers des deux polarités dans l'huile minérale et les seuils de tension de claquage U_c et la tension d'accélération U_a . $D=10\text{cm}$. [69].

2. Longueur d'arrêt des streamers

a) Cas général

Au dessous de la tension de claquage, le streamer est généré, se propage et s'arrête sans produire le claquage. L'arrêt d'un streamer est suivi de sa fragmentation en bulles puis de leur disparition dans le liquide [51, 53, 55]. La longueur parcourue par le streamer jusqu'à son arrêt correspond à sa longueur d'arrêt l_s et a été mesurée en fonction de la tension appliquée. A l'interface huile/isolant solide, la longueur d'arrêt des streamers a été aussi mesurée [78].

Dans les hydrocarbures et à faibles distances, il a été observé que l_s croît quasi linéairement avec la tension appliquée en présentant une large dispersion (Fig. 3.9).

Dans un intervalle de 0 à 2 cm dans l'huile minérale, Lesaint [72] a rapporté que la longueur moyenne varie presque linéairement avec la tension appliquée U . L'arrêt de la propagation a été attribué à l'existence d'une chute de tension ΔU dans le streamer qui provoque une diminution du champ E_s à son extrémité au cours de la propagation [53, 58, 72].

Lorsque le champ E_s passe en dessous d'une valeur limite, la propagation cesse. Le streamer généré à une tension donnée U_g , se propage jusqu'à une certaine longueur l_s et s'arrête lorsque le potentiel à son extrémité vaut $U_s=U-\Delta U$ (Fig. 3.10). La chute de tension par unité de longueur vaut alors:

$$E_l = \frac{U - U_s}{l_s} = \frac{\Delta U}{l_s} \quad \text{Eq. .1}$$

Etant donné que le champ E_S varie peu avec $(D-l_S)$ et est essentiellement déterminé par U_S lorsque $l_S \ll D$, les pentes des courbes $l_S(U)$ sont déterminées principalement par la chute de tension dans les streamers. Les valeurs E_l de 62 à 100 kV/cm dans le cyclohexane et le pentane ($D=0,25$ cm, Fig. 3.9) et de 35 kV/cm dans l'huile minérale ($1,3 \leq D \leq 2,5$ cm) [72] ont été obtenues. De même, à l'interface huile/solides isolants, des valeurs E_l de 6 à 17 kV/cm ont été rapportées [78, 87, 88].

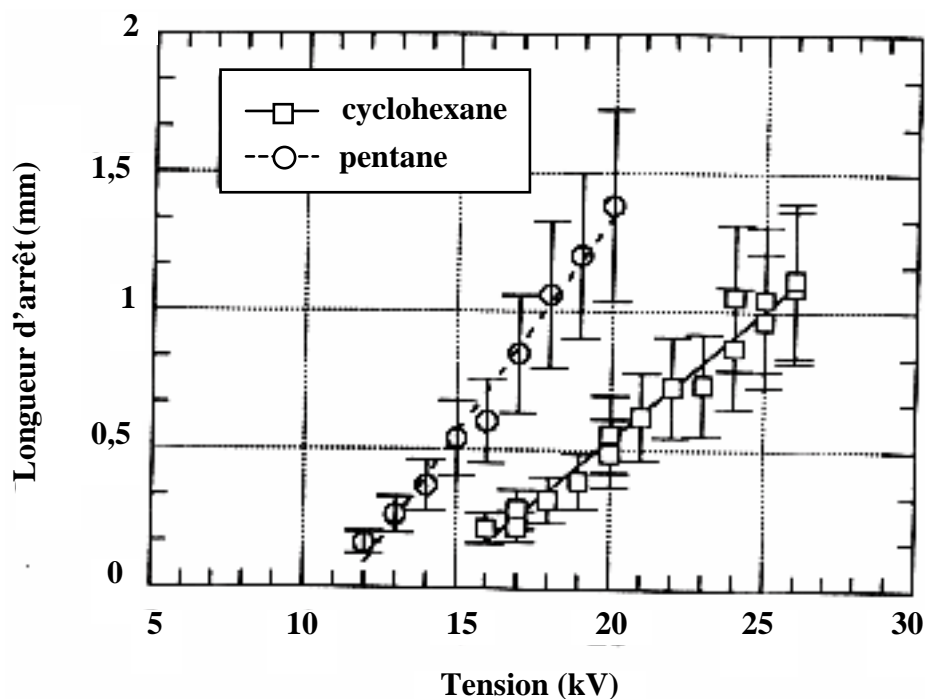


Fig. .9 Longueurs d'arrêt l_s des streamers positifs en fonction de la tension appliquée dans le cyclohexane et le pentane sous créneaux de tension en géométrie pointe-plan ($D=0,25$ cm, $r_0=3 \mu\text{m}$ dans le cyclohexane et $r_0=2,4 \mu\text{m}$ dans le pentane [49])

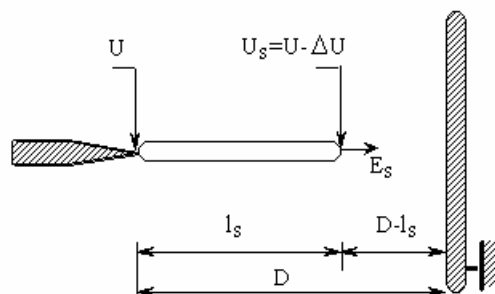


Fig. .10 Représentation schématique du streamer positif qui s'arrête sous l'effet de la chute de tension ΔU .

b) Cas de l'huile minérale à grande distance

Au dessous de la tension de claquage, les streamers positifs ne traversent pas systématiquement tout l'espace inter-électrodes, mais s'arrêtent à une certaine longueur d'arrêt l_S (voir Fig. 3.7). l_S augmente linéairement avec la tension jusqu'à une certaine longueur (environ égale à $2/3$ de la distance D) et plus rapidement lorsque le streamer s'approche du plan [69, 83-85, 89] en présentant une large dispersion d'au moins 50% par rapport à la valeur moyenne, comme le montre la Fig. 3.11. A une tension donnée, le streamer positif se propage plus loin que le streamer négatif.

Comme aux faibles distances, l'arrêt des streamers a été attribué à l'existence d'une chute de tension le long des filaments et il a été émis l'hypothèse que la « zone d'arrêt interdit » est due à l'effet du couplage électrostatique streamer/plan. En effet, à mesure que le streamer s'approche du plan la distance $(D-l_S)$ diminue (Fig. 3.10), par conséquent le champ entre l'extrémité du streamer et le plan croît ce qui contrebalance l'effet de la chute de tension et provoque l'augmentation de la longueur l_S jusqu'au claquage.

Des valeurs moyennes de la chute de tension E_l comprises entre 12 et 34 kV/cm ont été déduites des courbes $l_S(U)$ jusqu'à des distances de 82 cm. Ces valeurs sont comparables au champ minimum de propagation des streamers positifs (33 kV/cm) estimé par Rząd et al [90] pour des distances $0 < D \leq 4$ cm. E_l diminue lorsque la distance inter-électrodes D (et donc la tension appliquée) croît.

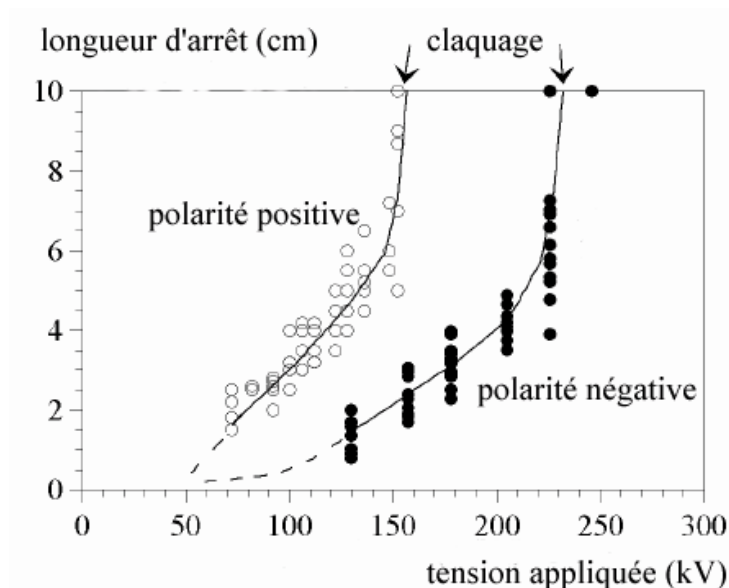


Fig. .11 Longueur d'arrêt l_S des streamers en fonction de la tension appliquée U dans l'huile minérale sous tension impulsionnelle (0,4/1400 μ s) en géométrie pointe-plan ($D=10$ cm, $r_p=100$ μ m)[69]

3. Courant transitoire et intensité lumineuse

a) Cas général

Dans les hydrocarbures saturés ainsi que dans l'huile minérale à faible distance, les courants transitoires produits par les streamers sont composés d'impulsions brèves ou d'une

composante continue dont la forme est étroitement corrélée à celle de la lumière émise par les streamers [49, 51, 53].

Dans le n-heptane et le benzène, Sakamoto et al [91] rapportent que l'amplitude des courants augmente quasi-linéairement avec la vitesse de propagation lorsque la tension croît (dans le n-heptane lorsque la vitesse croît de 1 à 4 km/s, le courant I croît de 1,5 à 5,5 mA).

A l'interface liquide/solide isolant, les courants ainsi que l'intensité lumineuse associés à la propagation des streamers rampants sont comparables à ceux des streamers en volume [78].

Dans le cas des streamers monofilamentaires, Lesaint et Gournay [92] ont proposé un modèle permettant de calculer l'amplitude des courants transitoires associés à leur propagation dans différents hydrocarbures saturés ainsi que dans l'huile minérale, et un accord raisonnable entre les mesures et les calculs a été obtenu.

b) Cas de l'huile minérale à grande distance

Comme aux faibles distances, jusqu'à la tension de claquage il a été observé que la forme des courants transitoires et celle de l'intensité lumineuse sont étroitement corrélées (Fig. 3.12) [61, 84, 89].

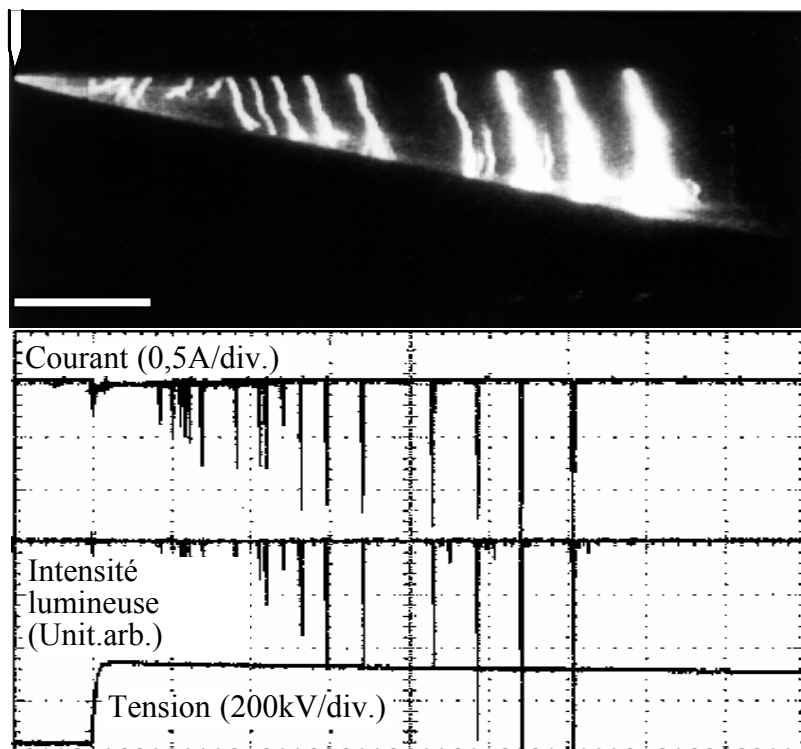


Fig. .12 Photographie typique en balayage de fente des streamers du 2eme mode (x:10,5 μ s/cm, y:6,2 cm/cm), et signaux du courant transitoire, de l'intensité lumineuse et de la tension appliquée (10 μ s/div, $D=20$ cm, $U=0,79 \times U_c = 256$ kV) [61]

Les courants transitoires comportent essentiellement une composante continue (quelques 10^{-2} A) sur laquelle sont superposées des impulsions rapides (durée < 20 ns) dont

l'amplitude (quelques A) augmente durant la propagation du streamer et s'annule lorsque le streamer stoppe.

Ces impulsions correspondent à des réilluminations régulières du streamer, lesquelles sont superposées à un phénomène faiblement lumineux se propageant à l'extrémité du streamer. Les réilluminations observées ont été attribuées à des décharges qui se produisent périodiquement dans les canaux gazeux [84, 89].

Rain et al [13, 93], observent que l'allure du courant et de l'intensité lumineuse dépend de la forme du streamer:

- pour le streamer composé d'un filament unique, le courant est pratiquement constant;
- pour le streamer constitué de nombreux filaments, le courant croît dans le temps quasi linéairement au cours de la propagation.

4. Charge des streamers

a) Cas général

Dans les hydrocarbures saturés ainsi que dans l'huile minérale et l'huile silicone, à petite distance, la charge associée à la propagation des streamers a été mesurée [55, 72, 77, 94]. Il a été observé que la charge croît rapidement au début de la propagation et ensuite plus lentement jusqu'à l'arrêt du streamer. De même, la charge et le nombre de branches du streamer augmentent simultanément avec la tension appliquée.

A l'interface huile/solide isolant, la charge de streamers rampants a été aussi mesurée et il a été observé qu'elle est proportionnelle à leur longueur d'arrêt [78, 95]. Par ailleurs, Atten et Saker [78] ont proposé un modèle pour évaluer la charge finale associée à la propagation des streamers rampants et ont obtenu un accord satisfaisant entre les charges calculées et mesurées.

b) Cas de l'huile minérale à grande distance

La charge électrique associée à la propagation de streamers filamenteux du 2^{ème} mode a été mesurée jusqu'à la tension de claquage pour des distances allant de 5 à 35 cm [69, 83, 84]. Deux parties différentes ont été observées sur l'oscillogramme de charge $Q(t)$: la charge croît d'abord de manière continue, puis par "sauts" d'amplitudes croissantes à mesure que le streamer s'approche du plan. Les sauts observés sur $Q(t)$ coïncident dans le temps aux impulsions de lumière (Fig. 3.7) et donc aux réilluminations du streamer. Deux sauts successifs sont séparés par un palier, qui indique que entre deux impulsions le courant est négligeable. Quand le streamer s'arrête, $Q(t)$ devient constant (Fig. 3.7), (le courant s'annule à cet instant).

Rain et al [84], rapportent que, pour une tension donnée, la charge finale est proportionnelle à la longueur d'arrêt et que, pour une longueur fixée, la charge croît avec la tension appliquée. De plus, une large dispersion de la charge mesurée a été observée. Ceci a été expliqué par le fait que la forme du streamer est très aléatoire : pour une tension et une longueur fixées, la charge semble augmenter avec le nombre de branches [69, 84].

D'autre part, Saker et al [83], constatent également que la charge finale augmente linéairement avec la longueur d'arrêt, et ce quelle que soit la distance (10, 20 et 30 cm), mais n'observent pas d'influence de la tension appliquée. Il a été suggéré que l'existence d'une quantité de charge par unité de longueur est requise pour assurer la propagation du streamer à grande distance. Celle-ci ne dépend ni de la distance inter-électrodes ni de la tension appliquée et sa valeur est estimée à $10 \mu\text{C/m}$.

3.1.3.4 Streamers de vitesse élevée (3^{ème} mode)

a) Cas général

Etant donné la vitesse élevée des streamers (10 à 40 km/s), ce mode a été observé de manière ponctuelle dans les hydrocarbures saturés ainsi que dans l'huile minérale et à faible distance lorsque des tensions nettement supérieures à la tension minimum de claquage sont appliquées en géométrie pointe-plan [55, 58, 96-98]. Dans certains liquides chlorés tels que le tétrachlorure de carbone ou le chlorobenzène, des vitesses élevées ont été également observées à des tensions relativement basses (à la tension de claquage) [91]. En géométrie uniforme (plan-plan) ou quasi-uniforme (sphère-sphère), le claquage est dû à des phénomènes encore plus rapides qui sont très difficilement observables.

b) Cas de l'huile minérale à grande distance

Durant ces dernières années, quelques études concernant la propagation des streamers dans l'huile minérale ont été réalisées sous fortes surtensions impulsionnelles (jusqu'à environ 4 fois la tension de claquage) et différents types de streamers se propageant à des vitesses allant de 4 à plus de 100 km/s, ont été observés en géométrie pointe-plan dans l'huile seule [65-67, 69] ou à l'interface huile/solide isolant (pressboard) [68]. Ils ont été nommés selon les auteurs: "leader" [67], "fast event" [65, 68], "secondary et tertiary streamer" [66].

Lorsque les surtensions appliquées dépassent une certaine valeur appelée *tension d'accélération* U_a , la propagation du streamer passe du 2^è à un 3^è mode nettement plus rapide (voir Fig. 3.13). En polarité positive, le streamer rapide présente une forme moins ramifiée que le streamer en 2^è mode et, en conséquence, sa charge associée devient plus faible. Ce changement est mis en évidence par une chute sur la courbe de la charge en fonction de la tension appliquée près de U_a . En revanche, comme le streamer négatif de 2^è mode est lui-même moins ramifié, cette chute au niveau de la charge n'est pas observée. (Fig. 3.14)

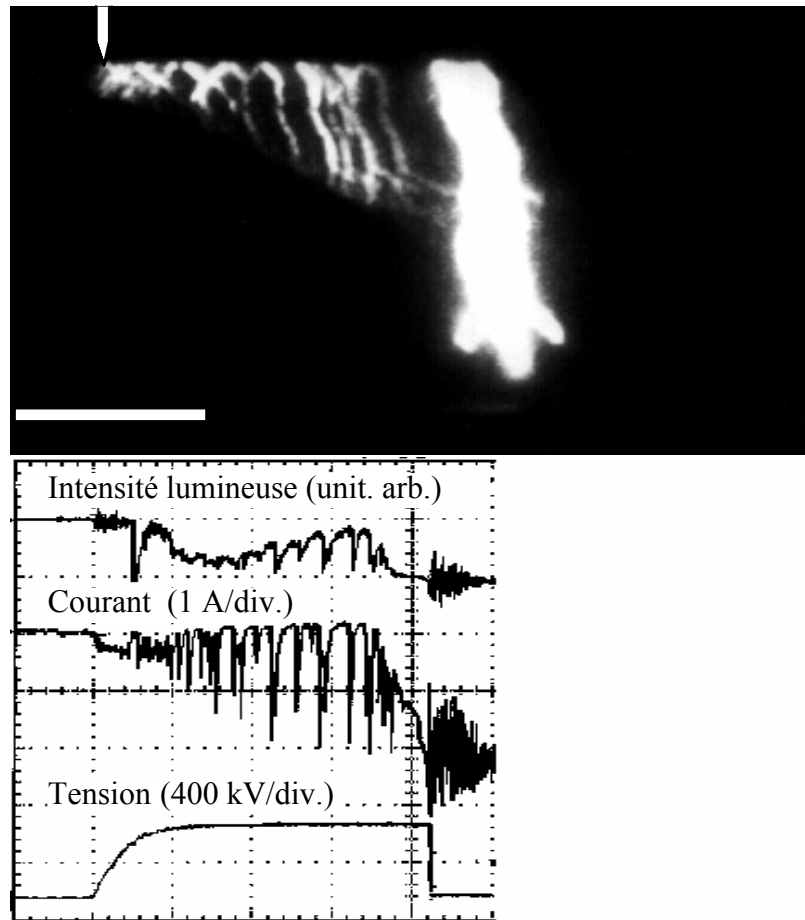


Fig. .13 Photographie en balayage de fente (x:1,5 µs/div., y: 2,5 cm/cm) typique des streamers positifs de 3^{ème} mode se propageant pour des tensions $U \geq U_a$ et signaux électriques associés (1 µs/div., $D=10$ cm, $U=2,49 \times U_c=424$ kV)[61]

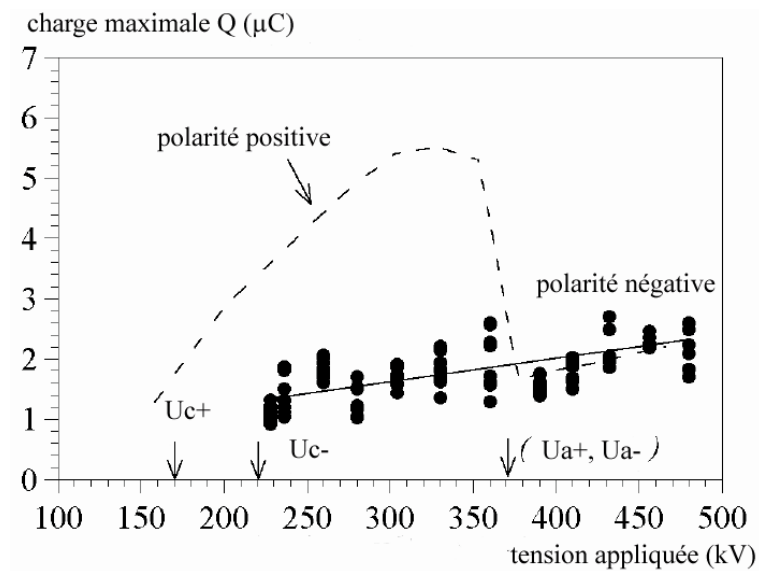


Fig. .14 Charge du streamer en fonction de la tension appliquée U [69].

3.2 Techniques expérimentales

La génération et la propagation des streamers apparaissant dans les huiles végétales ont été étudiées dans des conditions similaires avec celles déjà utilisées pour caractériser les streamers dans l'huile minérale [21, 61]. Il s'agit de la configuration d'électrode pointe-plan et tige-plan à grande distance et sous tension impulsionnelle. Cette étude nous permettra de comparer les huiles végétales et minérales dans des conditions identiques.

3.2.1 Cellule d'essai

La cellule d'essai présente une forme parallélépipédique de dimensions internes 220 x 220 x 300 mm de contenance d'environ 13 litres de liquide. Le corps de la cellule est en PVC, un matériau choisi pour sa compatibilité avec les liquides, notamment les liquides aromatiques. Deux côtés sont transparents (en PVC de 5 mm d'épaisseur) pour permettre la visualisation des streamers dans l'espace inter-électrodes. Sur la partie inférieure est aménagée une sortie pour la vidange de la cellule.

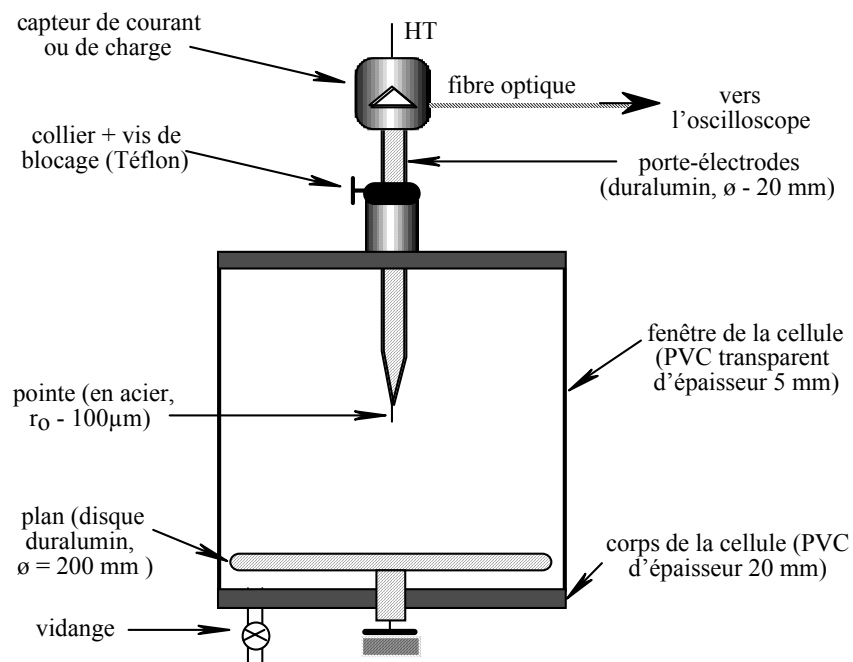


Fig. .15 Cellule d'essais et le système d'électrodes pointe-plan.

3.2.2 Configuration d'électrodes

Deux géométries d'électrodes différentes ont été utilisées: la géométrie pointe-plan et la géométrie tige-plan.

La propagation du streamer a été étudiée dans la géométrie pointe-plan. Avec ce type d'électrode, il est aisé d'étudier séparément les phases de propagation des streamers et le claquage final. Des pointes en acier de diamètre $\varnothing = 1$ mm ont été utilisées, avec une extrémité conique et de rayon de courbure $r_0 \approx 100$ μm . Le plan en Duralumin de diamètre $\varnothing = 200$ mm et d'épaisseur 20 mm possède des bords arrondis afin d'atténuer les renforcements de champ. Par l'intermédiaire d'un collier de blocage, la distance inter-électrodes D peut être fixée à la valeur désirée et varie de 2cm jusqu'à 20 cm.

Pour étudier la génération du streamer, un système d'électrodes tige-plan avec un rayon de courbure R de la tige pouvant varier de 0,5 à 8 mm et une distance fixe entre les électrodes de 2cm. Les configurations étudiées ont été choisies pour créer un champ peu divergent entre les électrodes.

3.2.3 Générateur de tension impulsionnelle

Toutes les mesures ont été réalisées sous tension impulsionnelle. La tension a été produite par un générateur de choc de Marx comportant cinq étages. Chaque étage peut être chargé jusqu'à une tension de 100 kV. Ainsi, en négligeant les pertes, le générateur peut délivrer une tension maximale de 500 kV dans les deux polarités. Une forme d'onde de 0,4/1400 μs a été choisie. Cette onde de tension a un temps de montée bref (0,4 μs) qui est nécessaire pour faciliter l'étude des streamers rapides. D'autre part, le temps de descente long (1400 μs) permet d'étudier les phénomènes sous une tension pratiquement constante (à l'échelle de la durée des streamers dans les liquides). En effet, la durée de propagation des streamers (quelques dizaines de μs à grandes distances inter-électrodes) est très inférieure au temps de descente (l'amplitude de la tension décroît environ de 5 à 10% en 100 μs).

Une résistance de limitation du courant $R_c=300\Omega$ est montée en série avec la cellule, pour limiter les surintensités provoquées par d'éventuels claquages.

Le générateur est alimenté en tension continue par l'intermédiaire d'un transformateur (monophasé 110-220/80000 V, 50 Hz) connecté à un redresseur (140 kV, 20 mA).

3.2.4 Systèmes de visualisation

L'utilisation d'un tube intensificateur d'image obturable (Hamamatsu V3063U, intervalle de sensibilité spectrale: 450-850 nm), couplé à une caméra vidéo (CCD ou Philips vidéo 40), a rendu possible la visualisation des streamers. L'ouverture de l'intensificateur est commandée par une impulsion de 200 V, et permet de photographier les streamers avec des temps d'exposition variant de 5 ns à plusieurs dizaines de μs . L'ouverture du tube intensificateur est synchronisée avec l'application de la tension, et elle est déclenchée par

l'oscilloscope. A partir de ces photographies intégrales sont déterminées les dimensions (longueur, diamètre) et la forme globale du streamer.

Une caméra à balayage de fente (sensibilité spectrale du tube à balayage: 150-800 nm), construite au G2E lab, a été également utilisée. Celle-ci permet d'étudier l'évolution spatio-temporelle de la lumière émise par les streamers. Les photographies obtenues nous ont permis de caractériser les différents modes de propagation des streamers.

3.2.5 Système de traitement d'images

Les images des streamers recueillies soit par la caméra à intensificateur, soit par la caméra à balayage de fente sont numérisées et traitées à l'aide d'une carte d'acquisition d'image DT3120 (64 bits, résolution 768x576 pixels) avec stockage sur l'ordinateur. Les caractéristiques géométriques (longueur, diamètre) du streamer sont mesurées sur l'écran d'un moniteur connecté au système de traitement d'images.

3.2.6 Mesures électriques

Tous les signaux électriques sont enregistrés sur un oscilloscope numérique Tektronix TDS 602A de bande passante 500 MHz, de vitesse d'échantillonnage 2 Giga-échantillons/s.

Le courant transitoire -ou la charge- associé à la propagation des streamers est mesuré sur l'électrode pointe connectée à la haute tension, grâce à un dispositif de couplage par fibre optique réalisé au G2E lab, comme le montre la Fig. 3.15. Celui-ci possède une bande passante de l'ordre de 35 MHz. Notons que, du fait de la monopolarité du système de transmission opto-électrique, les résultats du courant et de la charge sont toujours obtenus en négatif quelle que soit la polarité réelle du streamer. Les impédances de mesure sont placées à l'extrémité du tube support d'électrodes et directement connectées à la pointe en vue de minimiser l'inductance du circuit (Fig. 3.16).

Les courants transitoires sont mesurés aux bornes d'une résistance non inductive de 5 Ω . La sensibilité maximale est de quelques mA.

La charge du streamer est intégrée à l'aide de 10 capacités de 22 nF, disposées en étoile. La mesure de la tension U aux bornes de ces capacités montées en série avec la pointe permet d'en déduire la charge par la relation $Q = CxU$.

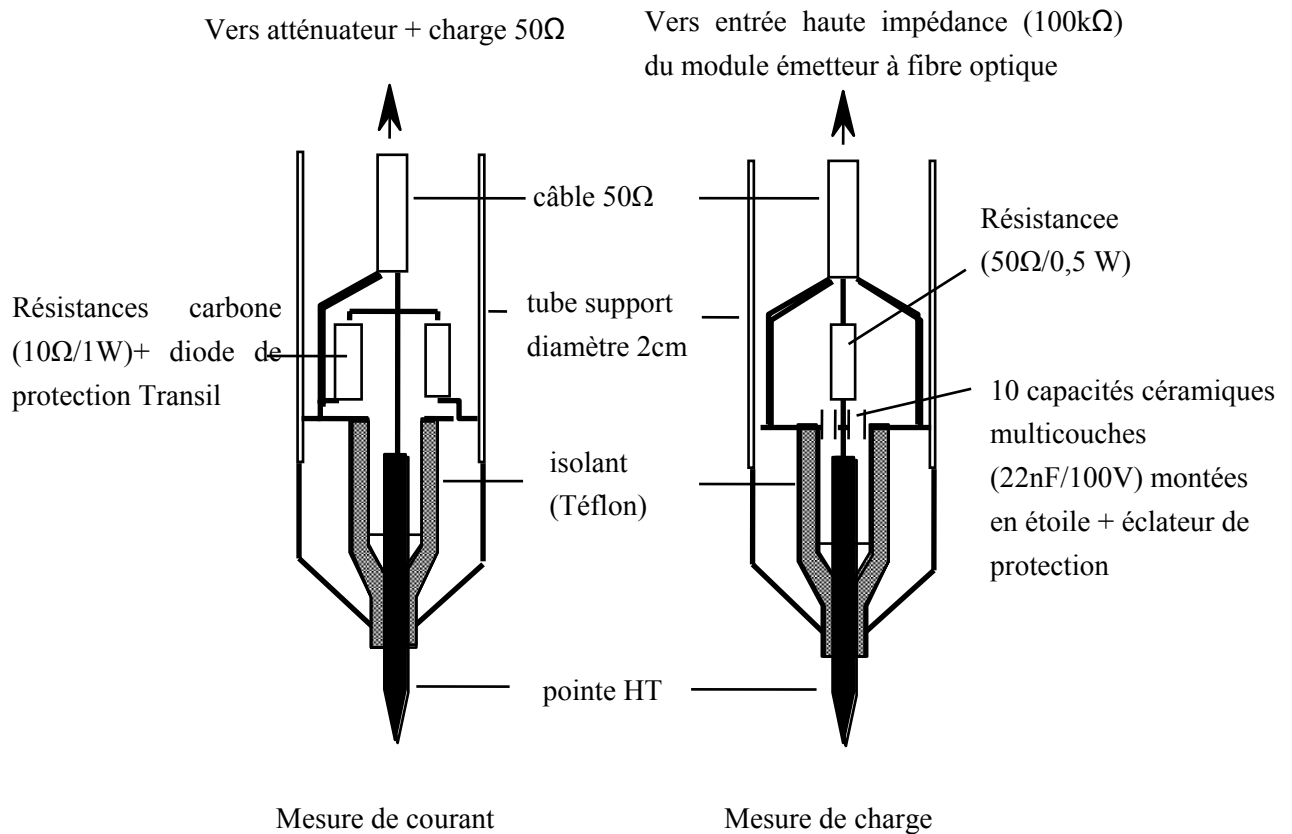


Fig. .16 Disposition des impédances de mesure de courant ou de charge

Ces deux circuits de mesure sont protégés contre les surintensités dues aux claquages à l'aide de soit de diodes Transil montées en séries soit d'un éclateur placé en parallèle à leurs bornes.

Toutes les mesures de courant et de charge ont été effectuées sur la pointe connectée à la haute tension. En effet, la mesure du côté de la haute tension offre de nombreux avantages par rapport à celle réalisée du côté de la masse:

- on ne mesure que le courant de charge de la pointe durant le temps de montée de la tension (quelques centaines de mA au lieu de plusieurs dizaines d'ampère sur le plan);
- on peut avoir un meilleur blindage permettant d'atténuer les perturbations électromagnétiques provenant de la source haute tension;
- avec la pointe connectée à la haute tension, la distribution du champ est plus proche de celle créée par un système idéal d'électrodes pointe-plan avec un plan infini que si la pointe est mise à la masse. Dans ce dernier cas, si le diamètre du plan n'est pas assez grand, alors la distribution du champ ainsi que le comportement des streamers est sensiblement modifiée [84].

3.2.7 Schéma général

La Fig. 3.17 montre une vue d'ensemble du banc d'essai comportant le générateur de Marx, le diviseur de tension, la cellule d'essais, la caméra à intensificateur et le boîtier contenant les systèmes de mesure de charge ou de courant. Ce banc d'essais est placé à l'intérieur d'une cage de Faraday en cuivre de dimensions: 4 m x 4 m x 5 m.

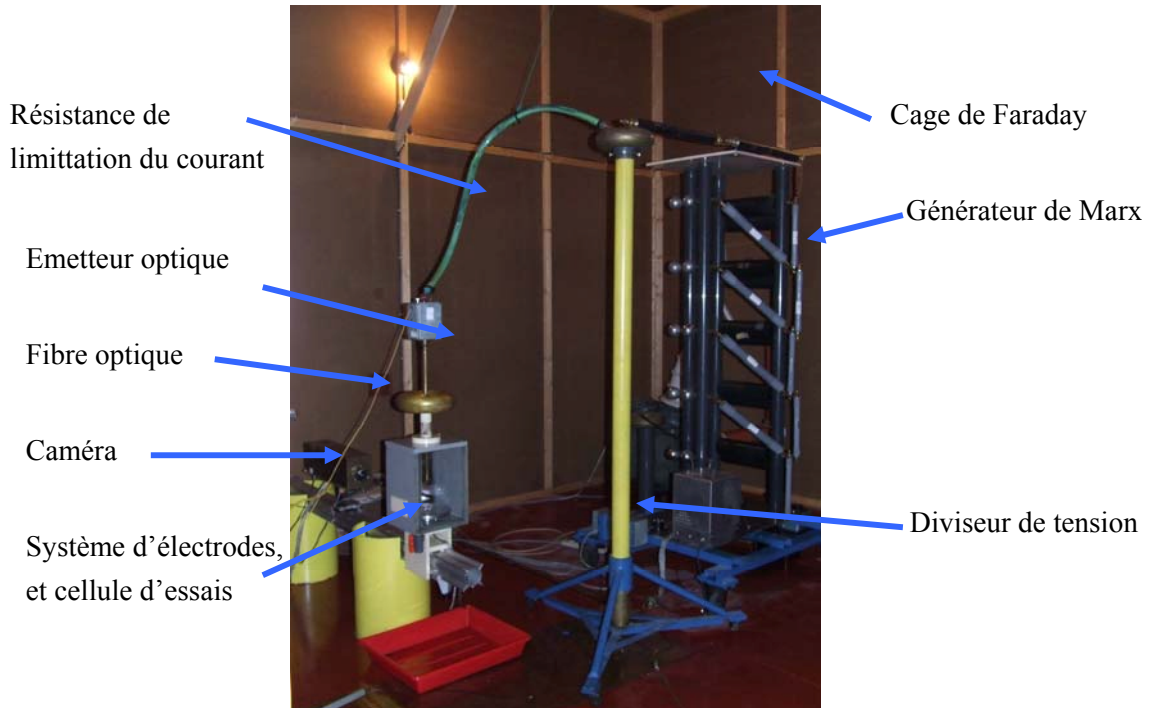


Fig. .17 Vue d'ensemble du banc d'essais

3.3 Etude de la génération des streamers dans l'huile RS50

Dans cette partie, les résultats concernant la génération des streamers dans l'huile RS50 seront présentés. Pour analyser la génération des streamers, la configuration tige-plan est choisie.

3.3.1 Probabilité de génération

La configuration tige/plan a été choisie pour créer un champ peu divergent entre les électrodes. Les calculs numériques montrent que le taux de renforcement du champ (E_{max}/E_{moyen}) varie de 3,32 à 23 quand le rayon de courbure de la tige varie de 8mm à 0,5mm. Dans de telles conditions, une fois qu'un streamer est généré, le champ moyen étant plus

élevé que le champ requis pour sa propagation, il conduit inévitablement au claquage, ce qui favorise la détection de l'apparition du streamer sur la surface de l'électrode (la tension de claquage est alors assimilée à la tension de génération). La tension appliquée sur la tige est augmentée par incréments de 10kV et à chaque niveau de tension les résultats présentés sont la moyenne d'une série de 20 mesures. La probabilité de claquage est calculée à chaque niveau de tension et son évolution en fonction de la tension est obtenue sous forme d'une courbe de probabilité comme le montre la Fig. 3.18.

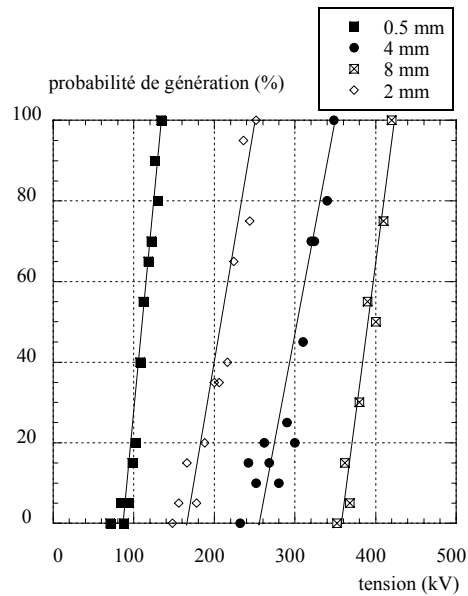


Fig. .18 Probabilité de la génération des streamers négatifs pour différents rayons de courbure de la tige ($D=2\text{cm}$).

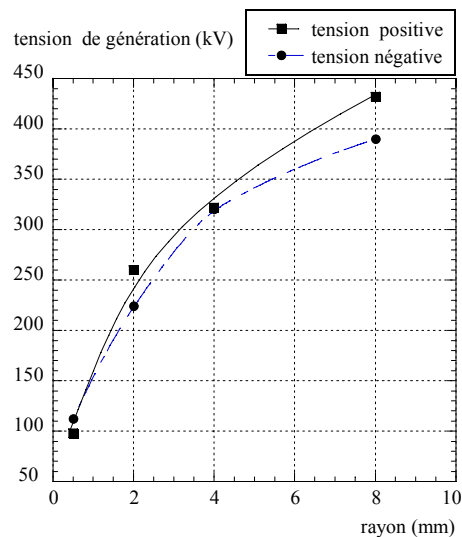


Fig. .19 Tension de génération pour une probabilité à 50% en fonction du rayon de courbure de l'électrode tige.

La tension de génération U_g est définie arbitrairement sur cette courbe pour la valeur correspondant à 50% de probabilité d'apparition du streamer. Comme dans l'huile minérale, ce seuil est sensiblement plus élevé en polarité positive qu'en polarité négative (Fig. 3.19).

3.3.2 Retard à la génération

Avec des électrodes de grand rayon de courbure, la mesure du courant dû au streamer montre que celui-ci n'est pas généré immédiatement quand la tension appliquée atteint sa valeur maximale. Il existe un temps de retard t_r , parfois de l'ordre des dizaines de microsecondes, comme dans les cas montrés sur les Fig. 3.20 et Fig. 3.21 (sur ces deux figures, le courant apparaît comme un signal négatif, en raison du système de liaison par fibre optique utilisé pour cette mesure).

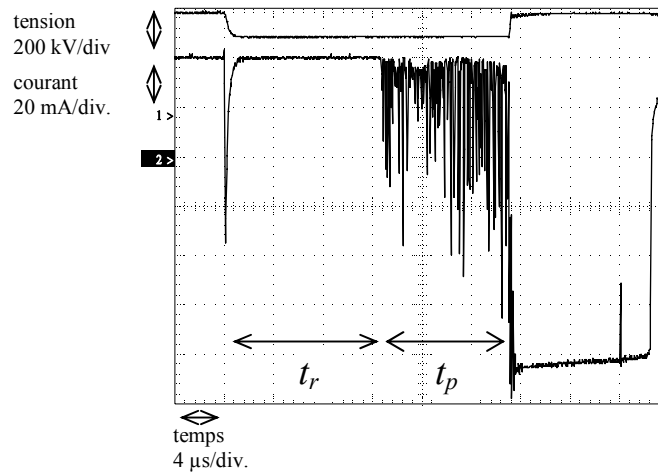


Fig. .20 Exemple de temps de retard en négatif, $r_p = 0,5$ mm, $U = 98$ kV.

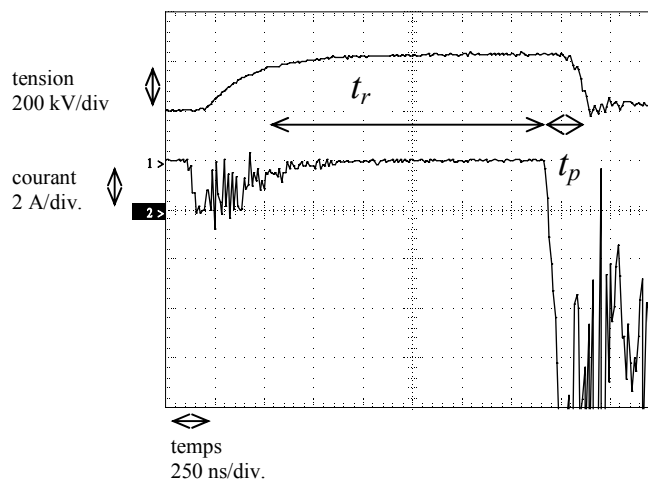


Fig. .21 Exemple de temps de retard en positif, $r_p = 2$ mm, $U = 232$ kV.

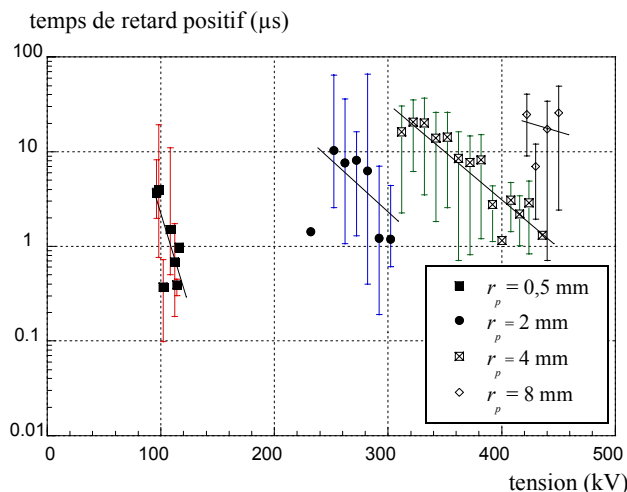


Fig. 22 . Evolution du temps de retard t_r en polarité positive.

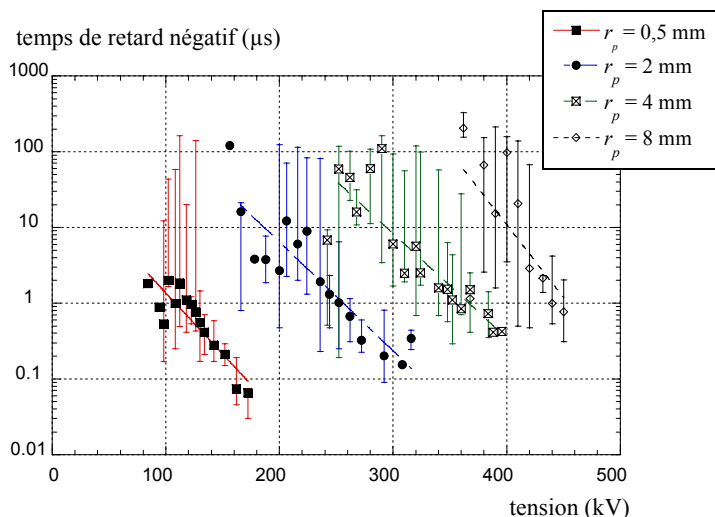


Fig. 23 Evolution du temps de retard t_r en polarité négative.

Une fois généré, le streamer se propage jusqu'au claquage pendant un temps t_p , avec une vitesse qui varie largement suivant la polarité et la tension appliquée, de 1km/s jusqu'à plus de 200km/s. De même, la forme et l'amplitude du courant varient fortement suivant le type et la vitesse du streamer, comme le montrent les Fig. 3.20 et Fig. 3.21. Le temps total de retard au claquage vaut : $t_c = t_r + t_p$. Suivant les cas, il peut être dû essentiellement au retard à la génération (quand $t_p \ll t_r$), ou au temps de propagation (quand $t_p \gg t_r$). Le temps de retard t_r a été mesuré dans les deux polarités et il diminue rapidement quand la tension est augmentée (Fig. 3.22 et Fig. 3.23).

La Fig. 3.24 montre qu'il n'y a pas de corrélation simple entre le temps de retard et la probabilité de génération des streamers : pour une probabilité de génération entre 0 et 100%, t_r varie entre 2,5 μs et 0,3 μs avec une tige de 0,5mm, et entre 750 μs et 3,5 μs avec une tige de

8mm. Pour une probabilité d'apparition identique (par exemple 50%), le retard à l'apparition est donc beaucoup plus long avec une électrode de plus grande taille. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le champ électrique est plus faible avec des rayons d'électrodes plus grands.

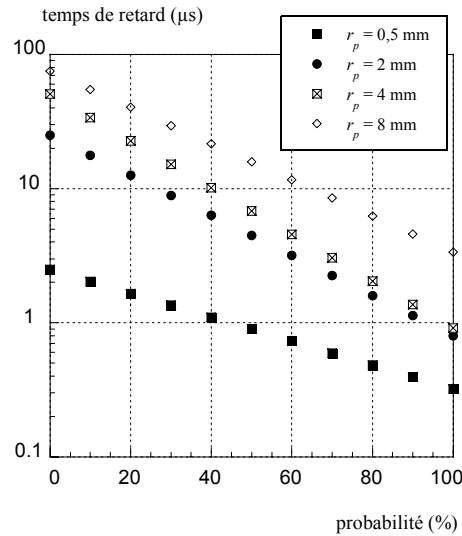


Fig. .24 Relation entre le temps de retard t_r et la probabilité d'apparition en polarité négative.

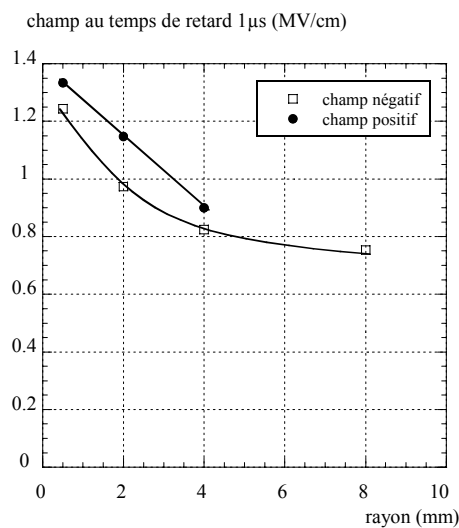


Fig. .25 Relation entre le rayon de courbure et le champ maximum sur la tige pour un retard t_r fixe de $1\mu s$.

Cependant, la Fig. 3.25 montre qu'il n'y a pas non plus de corrélation simple entre le champ électrique maximum (calculée à l'extrémité de la tige) et le retard à l'apparition. Pour un retard fixe de $1\mu s$, le champ maximum calculé à l'extrémité de la tige n'est pas constant, et diminue quand le rayon de la tige augmente. Ceci montre que la génération d'un même phénomène physique (apparition d'un streamer avec un retard identique) est facilitée lorsque la taille de l'électrode augmente.

La Fig. 3.25 montre également l'importance de la forme d'onde utilisée pour mesurer les probabilités d'apparition. Avec des rayons de tige importants (plusieurs mm), le temps de retard à l'apparition peut être de plusieurs dizaines de μs . Avec une onde impulsionnelle normalisée de type onde de foudre 1,2/50 μs , la tension pour des temps de quelques dizaines de μs a déjà fortement décru et la génération des streamers ne peut pas se produire. Dans ces conditions, ceci se traduit par une augmentation de la tension de claquage due à la forme d'onde utilisée. Ceci montre l'utilité de la forme d'onde utilisée dans cette étude, qui permet la comparaison de liquides dans des conditions mieux définies.

3.3.3 Effet « d'échelle »

L'effet « d'échelle » observé dans les mesures précédentes est comparable à celui connu depuis longtemps dans l'huile minérale [25, 59, 99]. Cet effet a été observé sur des mesures de claquage réalisées en champ uniforme avec des électrodes de tailles variables [99], et également lors de la mesure de tensions de génération de streamers en champ divergent [59]. Sous tension alternative, la présence de particules dans le volume du liquide peut fortement influencer la génération de streamers et le claquage, et un effet « de volume » est généralement considéré. Sous tension impulsionnelle, les particules ont un effet très faible, et il est généralement considéré que c'est l'augmentation de la surface des électrodes qui est responsable de la génération facilitée des streamers. Ceci peut se produire si on considère que des « défauts » à la surface des électrodes sont responsables de la génération des streamers, et que leur nombre augmente statistiquement avec la surface d'électrode. Ces « défauts » d'origine encore mal définie pourraient être responsables d'une augmentation locale du champ (protubérances, par exemple), et/ou d'une injection de charge facilitée (inclusions isolantes, par exemple).

La relation entre le champ de génération et le rayon R est du type : $E_g \sim I/R^n$. n est d'environ 0,2 ce qui est comparable à la valeur trouvée dans l'huile minérale pour des conditions semblables.

Il est clair que les valeurs de champ calculées sur la Fig. 3.26 représentent le champ harmonique « macroscopique » présent sur l'électrode, mais que les valeurs locales du champ de génération de streamers sont plus élevées (probablement supérieures à 1MV/cm).

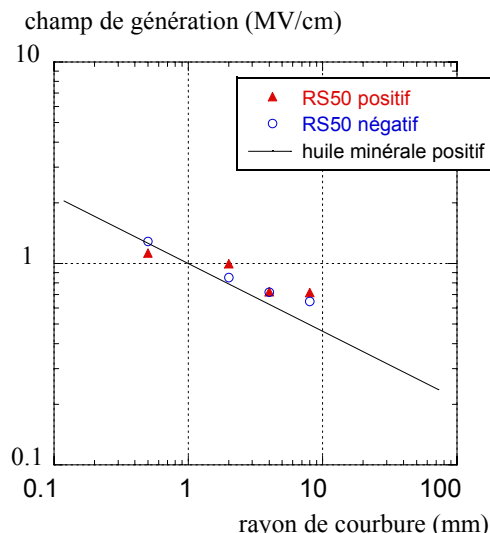


Fig. .26 Champ de génération du streamer en fonction du rayon de courbure de l'électrode (probabilité d'apparition de 50%).

Cet effet d'échelle a été observé dans l'huile minérale pour une très large gamme de rayon de courbure (de 1µm à 20mm) sous tension impulsionnelle, comme sous tension alternative pour des électrodes de grande surface (de 10⁻¹ à 10⁵ cm²). La connaissance de ce champ macroscopique de génération nous permet d'extrapoler les résultats dans d'autres configurations du type quasi-uniforme.

3.3.4 Conclusions

Une comparaison peut être faite avec les mesures déjà réalisées dans l'huile minérale dans des conditions identiques [59]. La variation des champs de génération sur la tige, correspondant à une probabilité d'apparition de 50% (figure 10), montre qu'une tendance comparable est observée dans les deux liquides, et que les valeurs de champs de génération sont proches dans les deux liquides. La mesure des tensions de génération dans l'huile RS50 met en évidence un effet «d'échelle» comparable à celui déjà observé dans l'huile minérale.

Ces résultats sont cohérents avec les mesures de tensions de claquage effectuées dans les chapitres précédents, qui donnent des résultats identiques dans les deux liquides. En effet, la tension de claquage sous tension alternative et champ uniforme représente également la tension nécessaire pour générer des streamers, étant donné que le champ moyen est très élevé (>40 kV/mm) et que tous les streamers générés conduiront au claquage.

3.4 Etude de la propagation des streamers dans l'huile RS50

3.4.1 Propriétés générales de la propagation du streamer

3.4.1.1 Forme globale des streamers

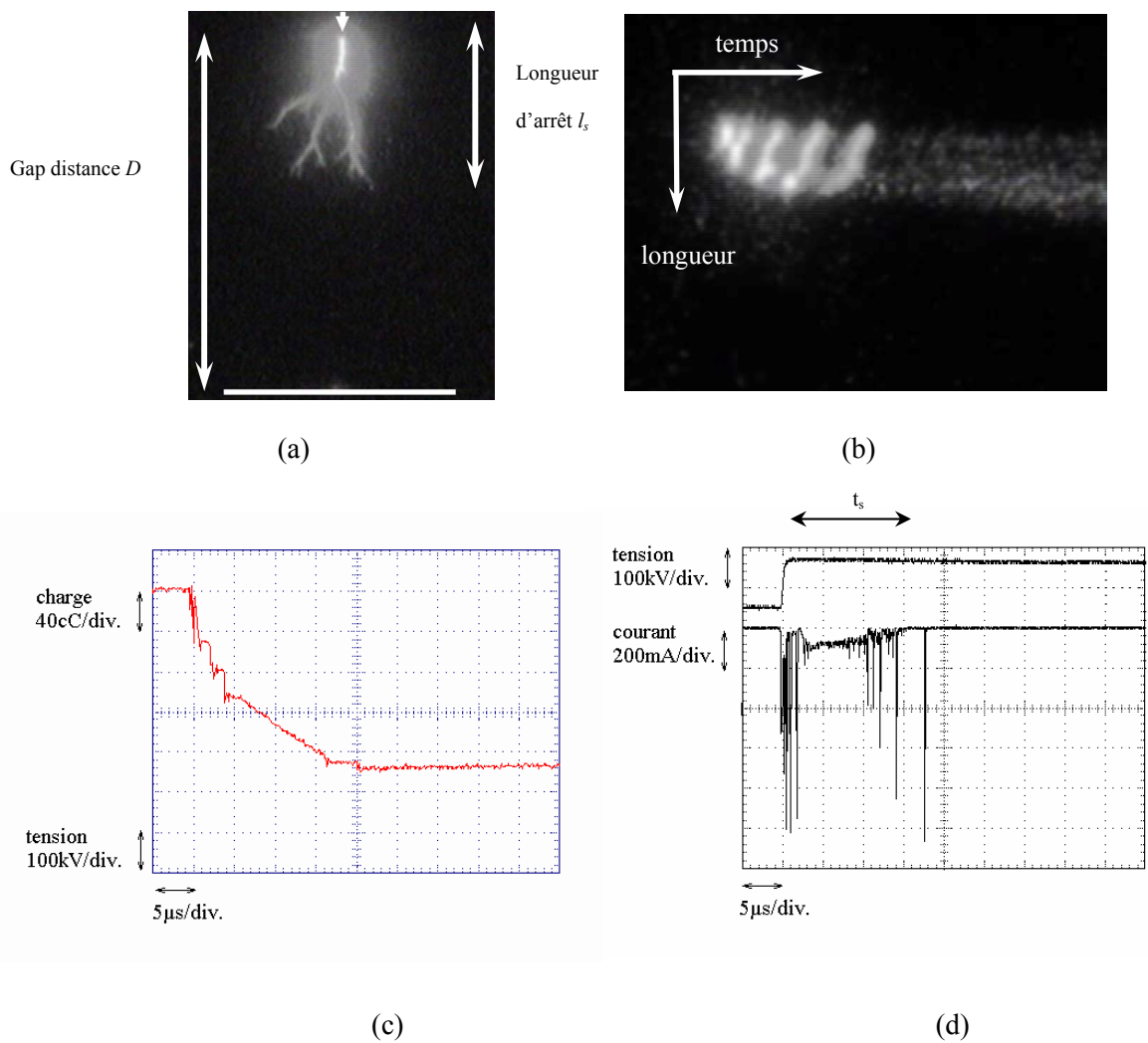


Fig. 27 Un streamer positif arrêté typique en géométrie pointe/plan, $r_p \cong 100 \mu\text{m}$, $D = 10 \text{ cm}$, $U = 120 \text{ kV}$: (a) : photographie par caméra intensifiée, (b) photographie par caméra à balayage de fente, (c) : enregistrement de la charge, (d) : enregistrement du courant.

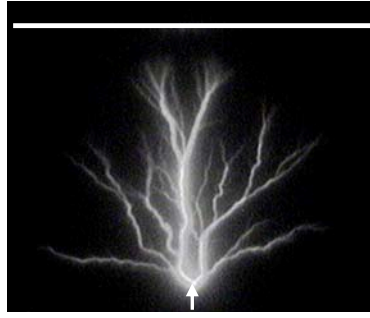


Fig. 28 Photographie d'un streamer produisant le claquage (caméra fermée à 100 ns avant le claquage).
 $D = 10 \text{ cm}$, $U = 241 \text{ kV}$.

La Fig. 3.27 présente des photos typiques et des enregistrements électriques obtenus pour la caractérisation des streamers. Les signaux du courant et de la charge sont toujours affichés en négatif à cause de la monopolarité du système de mesure quelle que soit la polarité réelle de la tension appliquée.

Tous les streamers (positifs et négatifs) observés dans cette étude ont toujours une forme plus ou moins ramifiée. Fig. 3.27(a) montre la forme globale typique d'un streamer positif qui s'arrête et ne conduit pas au claquage ($U = 120 \text{ kV}$). Jusqu'à la tension de claquage, les filaments se propagent principalement le long de l'axe inter-électrode. La propagation s'arrête à une longueur l_s ("longueur d'arrêt") inférieure à D après un certain temps t_s et le claquage ne se produit pas.

A la tension plus élevée (Fig. 3.28, $U = 241 \text{ kV}$), le claquage se produit lorsque le streamer touche l'électrode plane connectée à la masse (la caméra est fermée 100ns avant le claquage afin d'éviter que la lumière produite par l'arc ne sature l'intensificateur). Un plus grand nombre de filaments est observé avec certains d'entre eux suivant une direction à 90° de l'axe inter-électrode. Le streamer se propage jusqu'à l'électrode plane et forme un canal conducteur connectant les deux électrodes. Le claquage se produit après un temps de retard au claquage t_c .

3.4.1.2 Longueur d'arrêt et vitesse des streamers

La vitesse moyenne v est calculée comme suit :

- au dessous de U_c : $v = \frac{l_s}{t_s}$
- au dessus de U_c : $v = \frac{D}{t_c}$

Les Fig. 3.29 et Fig. 3.30 montrent l'évolution de la longueur l_s , de la vitesse moyenne de propagation v et de la charge totale Q en fonction de la tension appliquée U , pour deux distances $D = 2 \text{ cm}$ et 10 cm pour les deux polarités de la tension (positive et négative).

l_s augmente avec la tension appliquée et le claquage se produit lorsque $l_s \cong D$. Ainsi, la tension de claquage enregistrée U_c dans ces conditions représente la tension nécessaire pour la propagation totale du streamer de la pointe jusqu'au plan.

A $D = 2$ cm (Fig. 3.29a ; Fig. 3.30a), la vitesse moyenne à la tension de claquage U_c est proche de 1,5 km/s dans les deux polarités. Ces streamers correspondent au 2^{ème} mode. Lorsque la tension appliquée augmente au-dessus de U_c , une très forte accélération est observée lorsque U est supérieure à un seuil de tension U_a ("tension d'accélération"). Des vitesses de propagation de plus de 100 km/s sont alors enregistrées.

En polarité positive, à plus grande distance (≥ 10 cm) (Fig. 3.29b ; Fig. 3.30b), U_a devient identique à la tension de claquage U_c , c'est-à-dire que le claquage est dû à des streamers rapides. Sur la courbe vitesse moyenne/tension, on distingue nettement les 2 régions très différentes de vitesse de propagation. La transition correspond au passage de streamers du « 2^{ème} mode » avec une vitesse d'environ 2 km/s au « 4^{ème} mode » avec une vitesse de plus de 100 km/s. Au dessus de U_a , l'augmentation de la vitesse devient beaucoup plus lente. Ce fait est confirmé également sur la Fig. 3.31 et Fig. 3.33.

En polarité négative, la vitesse augmente de façon nettement plus lente (voir Fig. 3.32 et Fig. 3.34). L'augmentation brutale de vitesse à la tension d'accélération est nettement plus importante en polarité positive qu'en polarité négative.

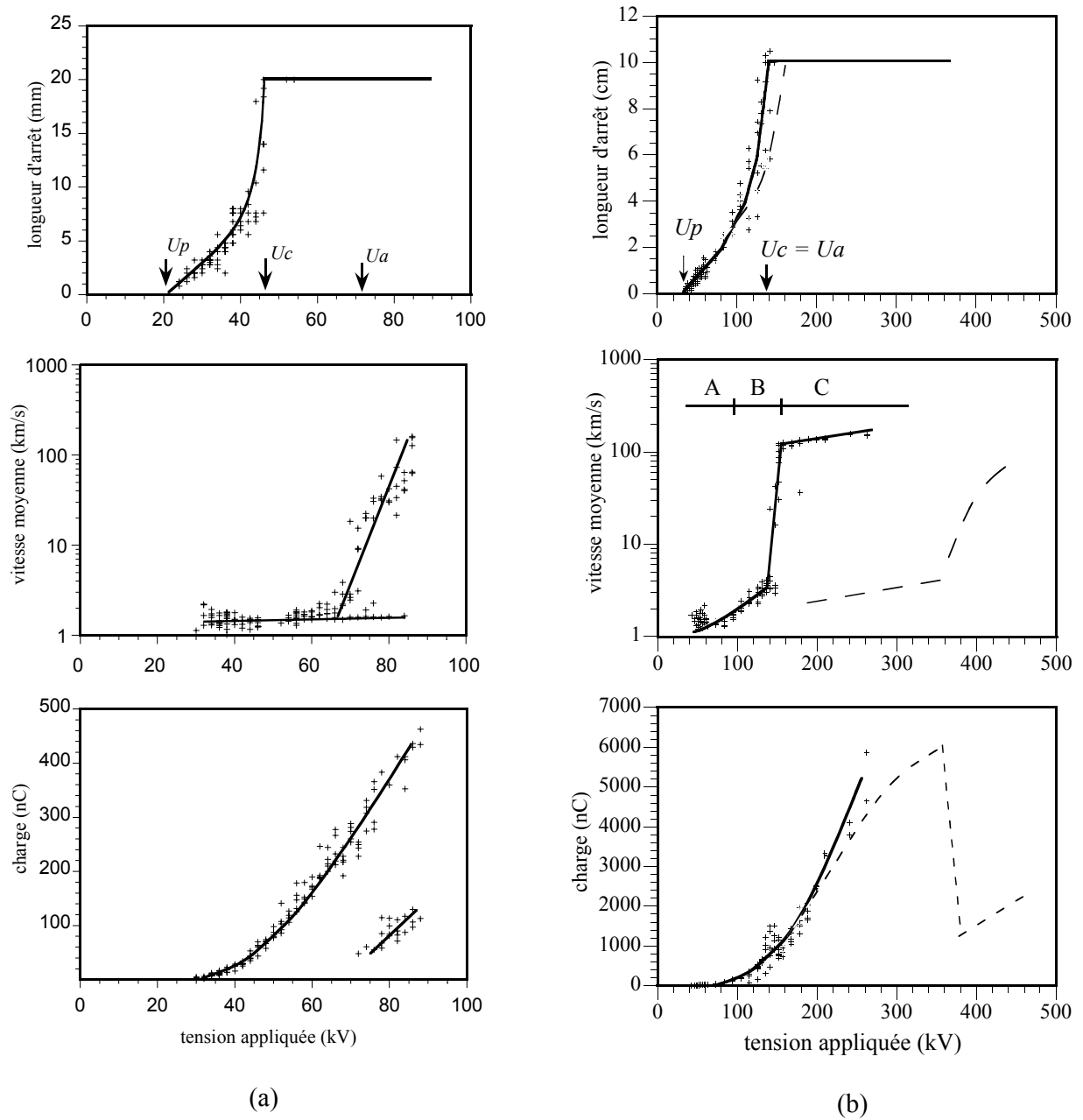


Fig. .29 Longueur d'arrêt l_s ; vitesse de propagation v et charge totale Q des streamers positifs.

(a): $D = 2$ cm, (b): $D = 10$ cm.

Les lignes pointillées sont les résultats dans l'huile minérale dans [100].

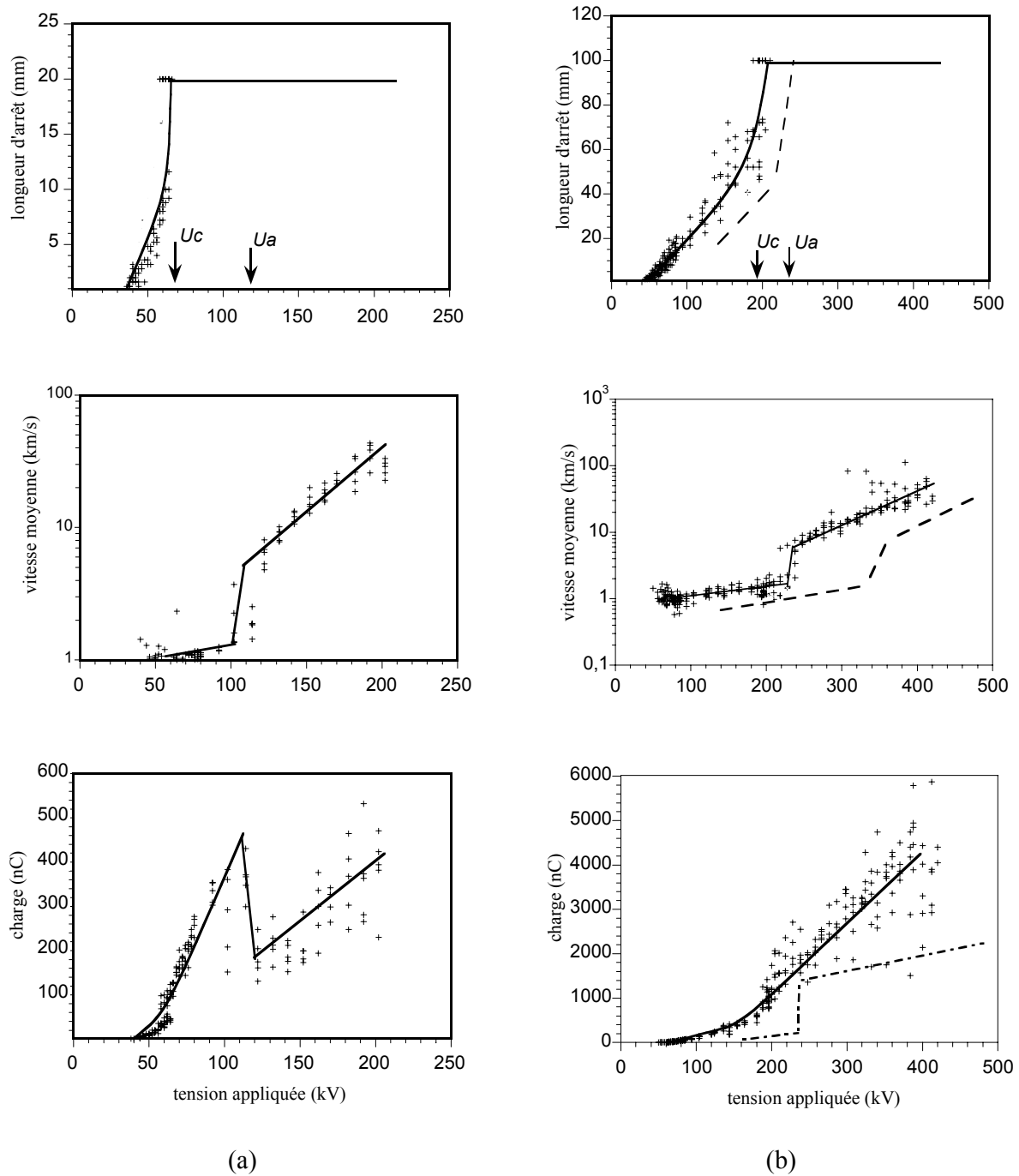


Fig. 30 Longueur d'arrêt l_s , vitesse moyenne de propagation v et charge totale Q des streamers négatifs.
(a): $D=2$ cm, (b): $D=10$ cm.

Les lignes pointillées sont les résultats dans l'huile minérale dans [69]

Les Fig. 3.31 et Fig. 3.32 montrent les mesures de vitesse moyenne en fonction de la tension effectuées en variant la distance de 2 à 20 cm. L'accélération du streamer est clairement visible à toutes les distances, ce qui permet la détermination simple de la tension d'accélération U_a .

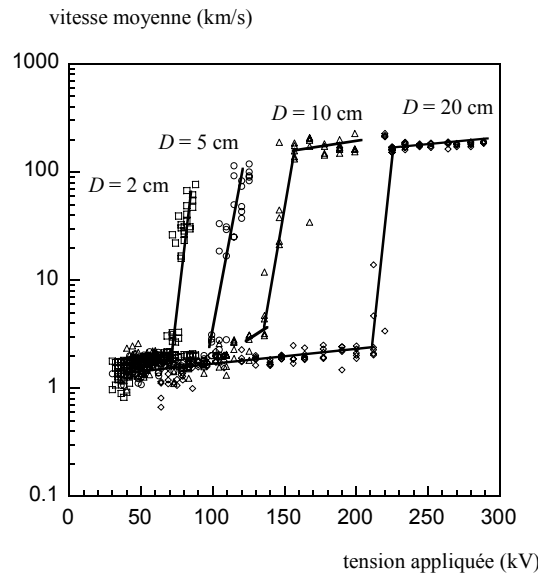


Fig. .31 Vitesse moyenne du streamer mesurée à différentes distances en polarité positive.

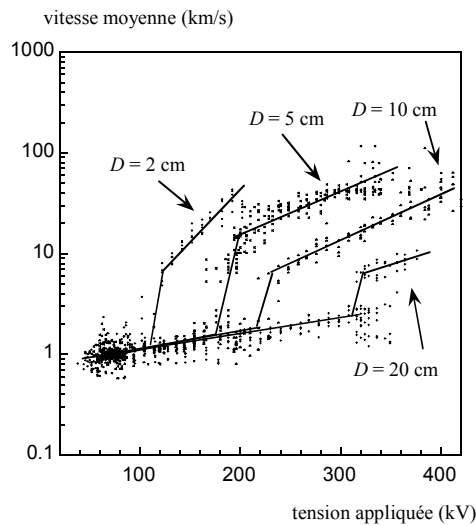


Fig. .32 Vitesse moyenne du streamer mesurée à différentes distances en polarité négative.

Sur les Fig. 3.33 et Fig. 3.34 nous avons rassemblé l'ensemble des mesures de vitesses moyennes mesurées à $D = 2$ cm sur une très large gamme de tensions appliquées, en géométrie pointe/plan ($r_p \cong 100 \mu\text{m}$), et en géométrie tige/plan lors des mesures de tensions de génération (r_p variant de 0,5 à 8mm). On remarque que la variation de la vitesse moyenne de propagation en fonction de la tension appliquée est pratiquement indépendante du rayon de courbure r_p de l'électrode haute tension. On peut donc conclure que v ne dépend pratiquement pas de la géométrie du champ, et que la propagation dépend essentiellement de la valeur du « champ moyen » $E_{moy} = U/D$ dans le liquide.

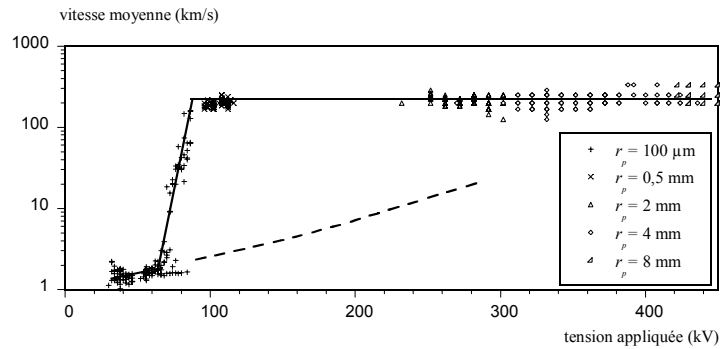


Fig. .33 Vitesse moyenne des streamers positifs avec différents rayons de courbure de la pointe ou de la tige ($D = 2\text{cm}$).

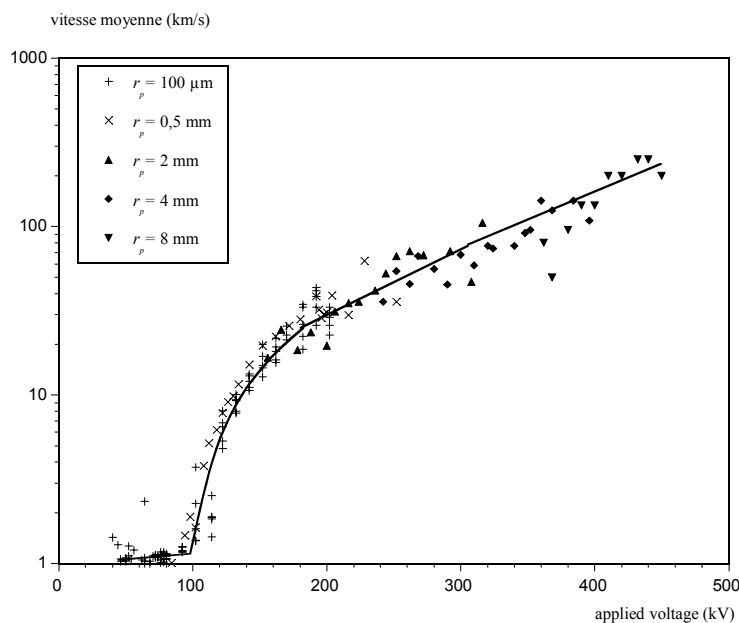


Fig. .34 Vitesse moyenne des streamer négatifs avec différents rayons de courbure de la pointe ou de la tige ($D = 2\text{cm}$).

En polarité positive, la vitesse tend très rapidement vers une valeur à saturation d'environ 200km/s. Par contre en polarité négative, les streamers sont plus lents et leur vitesse augmente plus graduellement. Elle atteint cependant 200km/s à $E_{moy} \approx 200\text{kV/cm}$.

3.4.1.3 Charge des streamers

Le courant et la charge totale pendant la propagation sont également mesurés (Fig. 3.27). On remarque que la charge augmente au cours de la propagation jusqu'à atteindre une valeur maximale Q lorsque la propagation s'arrête. Les mesures de la charge Q du streamer arrêté sont effectuées comme il est expliqué dans la Fig. 3.27c après avoir soustrait la partie Q_p correspondant à la charge de l'électrode pointe. Lorsque le claquage se produit, Q a été mesurée immédiatement avant le claquage.

La charge totale Q , comme I_s , augmente avec la tension appliquée. D'autre part, pour des tensions $U > U_c$, Q correspondant à des streamers de longueur égale à D continue à croître en fonction de la tension. La chute de Q autour de la tension U_a , reportée dans [69], est aussi observée dans l'huile végétale mais avec un niveau plus faible et uniquement à faible distance (2 et 5 cm). Elle a été expliquée par un changement de la forme du streamer au-delà de la tension d'accélération. La même explication semble probable pour l'huile RS50 où l'on observe une diminution du nombre de branches lorsque apparaissent les streamers du 3^{ème} mode. En effet, de 70 à 85 kV en polarité positive, soit les streamers lents ($v = 1,5$ à 3 km/s) ou rapide ($v = 20$ à 200 km/s) apparaissent d'une façon aléatoire. Corrélés à ce fait, les charges enregistrées sont également divisées en deux groupes, la plus faible charge correspondant aux streamers rapides. Le même comportement est aussi observé à $D = 5$ cm.

3.4.2 Différents « modes » de propagation des streamers positifs

L'enregistrement du courant transitoire, de la charge intégrée et la photographie par caméra à balayage de fente nous permettent d'obtenir une meilleure caractérisation du processus de propagation du streamer. Dans une étude réalisée précédemment dans l'huile minérale dans les mêmes conditions [9], il a été reconnu que les streamers présentant différentes caractéristiques typiques (forme de courant, photographie, vitesse) sont impliqués. Afin de faciliter la description, plusieurs « modes de propagation » ont été distingués. Ces « modes » constituent un moyen pratique de décrire les phénomènes, mais n'impliquent pas nécessairement que différents mécanismes physiques (encore mal compris à ce jour) sont impliqués dans chaque "mode". Dans la RS50, trois différents modes de propagation sont observés dans les zones (A, B, C) indiquées dans la Fig. 3.29b.

3.4.2.1 Streamers lents (~ 2 km/s) observés pour $U < U_a$.

1. Seuil d'apparition, courant et charge des streamers

Dans la première zone A, les streamers ressemblant au "2^e mode" dans l'huile minérale sont enregistrées. Les Fig. 3.35 et Fig. 3.36 montrent des mesures typiques obtenues dans cette zone. Dans toutes les figures présentées ci-dessous, l'échelle et la position de la photographie par caméra à balayage de fente ont été ajustés de telle sorte que leurs axe horizontal du temps coïncide avec celui de l'oscillogramme. Lorsque le claquage se produit, l'obturateur de la caméra a été fermé après un temps réglé, afin d'éviter la saturation de l'image par l'arc du claquage.

Les streamers positifs du 2^{ème} mode apparaissent dès que la tension dépasse un certain seuil de tension de propagation U_p . La tension U_p obtenue par l'extrapolation la courbe

$I_s(U)$ à la longueur zéro (Fig. 3.29) représente la tension seuil pour la propagation des streamers de "2e mode". En dessous de cette valeur, appelé « tension de propagation », seulement les streamers du "1ier mode" peuvent se propager, avec une vitesse très faible ($\ll 1$ km/s) et en forme de «buisson» arrondie [62, 101]. L'observation de ces petits streamers nécessite des pointes très fines, un agrandissement optique important et une mesure électrique de sensibilité élevée. Ils ne pouvaient pas donc être observés dans cette étude. U_p reflète l'existence d'une certaine valeur critique du champ électrique en tête du streamer qui est nécessaire pour le développement du streamer de "2e mode". La mesure de U_p à une distance inter-électrodes fixée peut être utilisée pour comparer des liquides [101]. Fig. 3.29 indique les valeurs de $U_p = 24$ kV à $D = 2$ cm et $U_p = 29$ kV à $D = 10$ cm. Les rares données disponibles dans de l'huile minérale dans des conditions similaires indiquent des valeurs comparables [93].

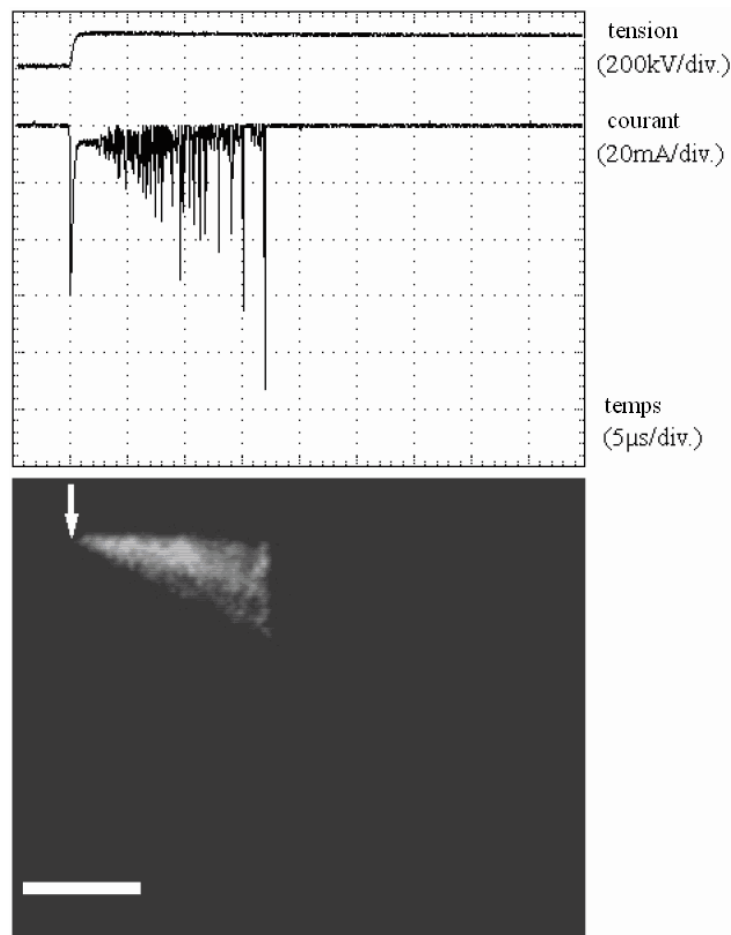


Fig. 3.35 Courant transitoire d'un streamer arrêté du "2° mode" enregistré au-dessous de la tension de claquage ($D = 10$ cm, $U = 120$ kV) et la photographie correspondante.

Sur la Fig. 3.35, la propagation s'arrête à une longueur $l_s = 28$ mm après le temps de propagation $t_s = 17$ μ s, ce qui indique une vitesse $v = 1,7$ km/s. Le courant est composé d'une composante continue de quelques mA (7 mA, d'une durée de 3 μ s dans la figure Fig. 3.35) au début de la propagation, suivi par de nombreuses impulsions d'une durée d'environ 200ns.

L'amplitude de ces pics augmente d'une dizaine de mA à 100mA pendant la propagation du streamer. L'enregistrement de charge (Fig. 3.36) montre une augmentation continue au début de la propagation, suivie par des sauts lorsque des grandes impulsions apparaissent. La résolution de la mesure de charge n'est pas assez élevée pour afficher les nombreux petits sauts (correspondant aux petites impulsions du courant) qui se produisent au début de la propagation.

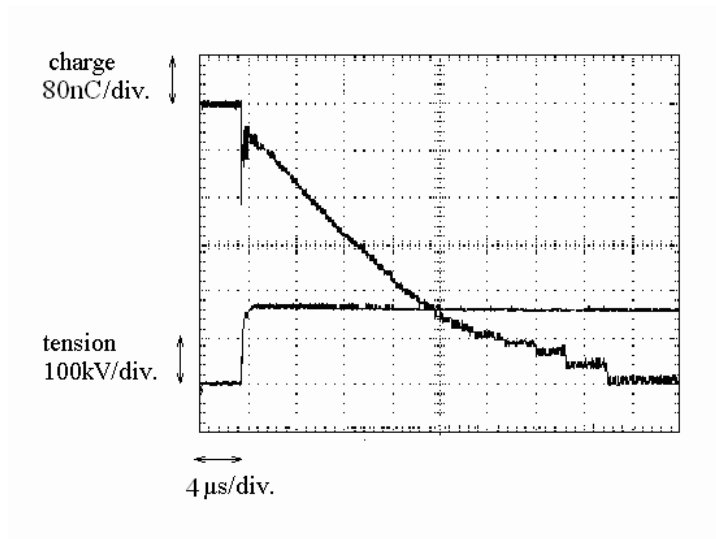


Fig. 3.36 Oscillogramme de la charge et photographie correspondant à la propagation totale d'un streamer de « 2^{ème} mode » pour $U < U_a$. $D=20\text{cm}$, $U=168\text{kV}$, $l_s=51\text{mm}$ et $v=1,7\text{km/s}$.

Des enregistrements similaires du courant et de la charge ont été obtenus avec le streamer positif du "2^e mode" dans de l'huile minérale [84, 100]. Dans la RS50, la photographie par caméra à balayage de fente montrent des filaments lumineux se propageant

continûment dans le liquide, ce qui suggère que la propagation est un processus continu comme il a été conclu pour streamers de "2^e mode" dans l'huile minérale [100, 102]. Dans l'huile minérale, les impulsions du courant sont corrélées à des réilluminations superposés au fond permanent de la lumière. Cependant, ces phénomènes peuvent difficilement être distingués dans la photographie de Fig. 3.35. Le courant transitoire mesuré dans les mêmes conditions dans plusieurs liquides de synthèse [85, 103] montre également des formes identiques lorsque des streamers avec des vitesses de 1 - 2 km/s se propagent (par exemple, dans le polybutène [103]).

2. Longueur d'arrêt et champ longitudinal dans le canal de streamer

Pour une tension fixée, la dispersion de l_s est large et les valeurs sont réparties entre deux limites correspondant aux valeurs minimales et maximales. l_s croît quasi linéairement avec la tension appliquée jusqu'à une certaine longueur de l'ordre des 2/3 de la distance D . Au-delà de cette longueur, l_s augmente plus rapidement avec la tension et sa dispersion devient plus importante (Fig. 3.29).

L'arrêt de ce streamer du 2^{ème} mode a été attribué à l'existence d'une certaine chute de tension le long du canal de streamer [69]. La « conductivité » du streamer est la conséquence de processus de décharge et de conduction dans les canaux gazeux. La lumière émise durant la propagation du streamer est produite par ces mécanismes. Ceux-ci sont caractérisés par une chute de tension entre l'électrode pointe et la tête du streamer, qui augmente avec la longueur de propagation. Le champ en tête du streamer est donc réduit, jusqu'à atteindre une valeur seuil en dessous de laquelle il ne peut plus se propager. Cette chute de tension a été déterminée à partir des mesures des longueurs d'arrêt l_s en fonction de la tension appliquée. On peut ainsi définir un champ longitudinal moyen E_l dans le canal du streamer :

$$E_l = \frac{\Delta U}{\Delta l_s}$$

Grâce à la forme pratiquement linéaire de la courbe $l_s(U)$ quand $l_s < D$; on a déterminé une valeur de E_l autour de 16kV/cm pour tous les distances inter-électrodes. En augmentant la tension jusqu'à la tension de claquage, la variation de l_s en fonction de la tension devient non linéaire et E_l décroît rapidement. Rappelons que des valeurs sensiblement égales à 20kV/cm ont été obtenues dans l'huile minérale, ce qui explique la propagation plus courte du streamer dans celle-ci que dans l'huile RS50 à une même tension.

3. Transition au claquage

Le claquage se produit généralement lorsque le streamer touche l'électrode opposée. Cependant, dans quelques rares cas, correspondant à des expériences effectuées à basse tension avec une faible probabilité de claquage, le claquage ne se produit pas bien que le streamer touche le plan, comme cela a été également rapporté dans quelques travaux antérieurs [61, 84, 104]. Quand le streamer touche le plan, des réilluminations partielles

apparaissent, elles sont caractérisées par une “tache” lumineuse à l’extrémité du streamer (Fig. 3.37), mais le claquage ne survient pas pendant la durée d’application de la tension.

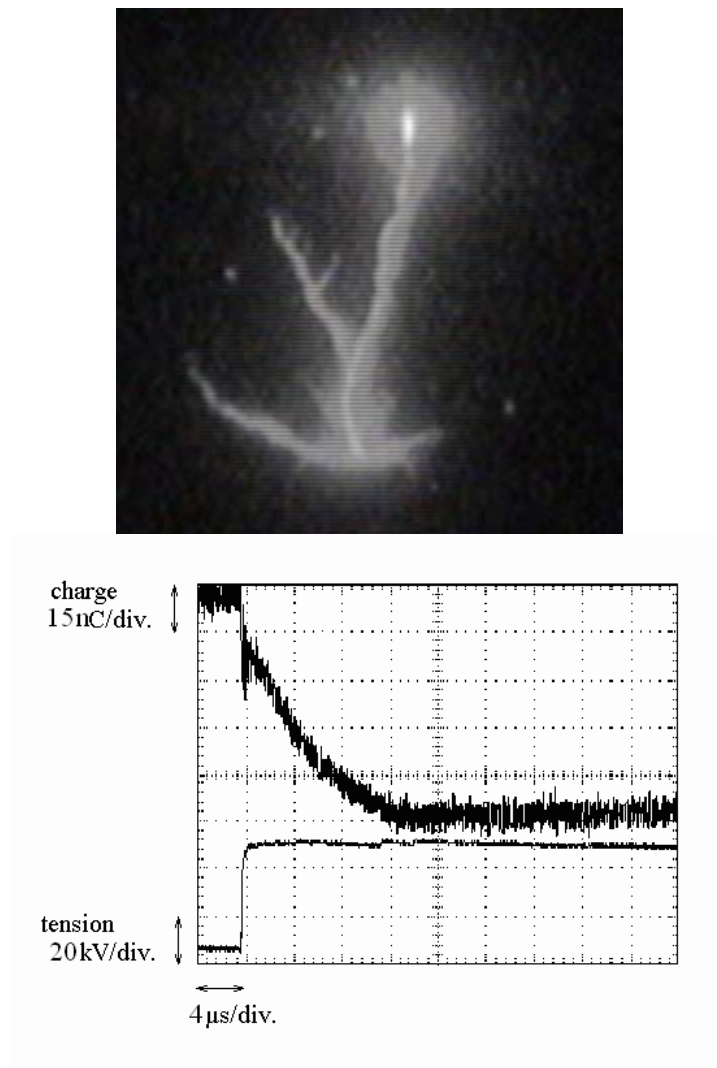


Fig. 3.37 Photographie intégrale d'un streamer touchant le plan sans produire de claquage et signaux électriques associés à sa propagation. $D= 2\text{cm}$, $U= 44\text{kV}$, $U_c= 46\text{kV}$.

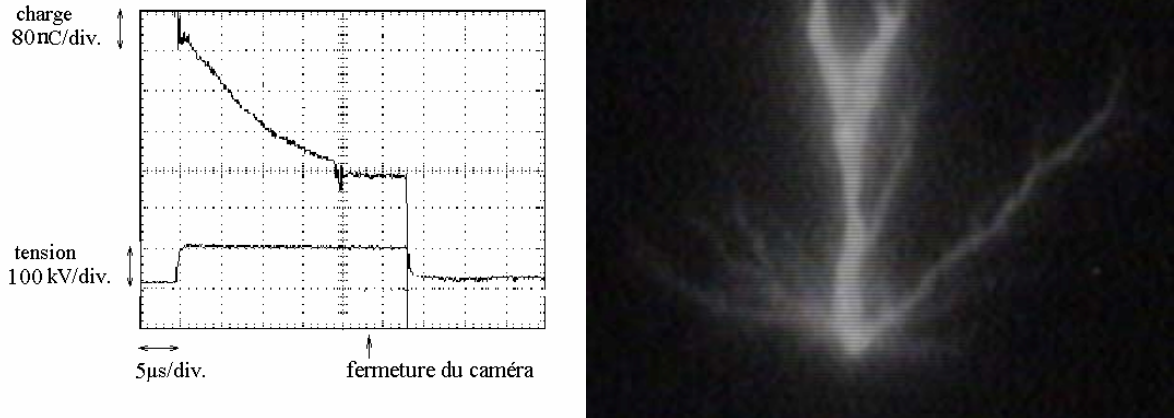


Fig. 3.38 Photographie intégrale d'un streamer touchant le plan $6\mu\text{s}$ avant le claquage. $D=5\text{cm}$, $U=94\text{kV}=U_c$.

La Fig. 3.38 montre une photographie intégrale (durée d'exposition d'environ $22\mu\text{s}$) d'un streamer avec l'intensificateur fermé $6\mu\text{s}$ avant le claquage (voir oscillogramme). A ce moment là, le streamer touche le plan mais le claquage ne survient que $6\mu\text{s}$ plus tard. On remarque sur l'oscillogramme que la charge devient sensiblement constante, c'est à dire que le courant est pratiquement nul environ $8\mu\text{s}$ avant le claquage. Il existe donc un « temps de repos » d'environ $8\mu\text{s}$ avant le claquage pendant lequel il n'y a pas de courant dans le circuit extérieur, ce qui montre que le streamer n'est pas « conducteur » à ce moment.

3.4.2.2 Streamers à vitesse intermédiaire ($2 < v < 5\text{km/s}$).

Dans la zone B, c'est-à-dire pour une tension appliquée un peu inférieure à la tension d'accélération U_a , la propagation du streamer s'effectue en deux phases différentes, comme il est indiqué sur les Fig. 3.39 et Fig. 3.40.

A partir d'une certaine tension (100 kV sur la Fig. 3.29b), un autre type de streamer très différent et rapide est observé au début de la propagation. Cette première phase comporte des réilluminations successives de forte intensité. Elles sont nettement plus lumineuses que les réilluminations du streamer de 2^{ème} mode décrit précédemment et elles sont associées à des impulsions de courant d'amplitude beaucoup plus élevée. La vitesse moyenne de propagation, déduite de l'image de la caméra à balayage, est d'environ 20km/s , ce qui correspond au « 3^{ème} mode » de propagation du streamer. La propagation correspondant aux fortes réilluminations, s'arrête à une distance l_3 bien inférieure à la distance totale D .

Ensuite, dans une deuxième phase, la propagation du streamer suit le 2^{ème} mode décrit précédemment. Ce streamer se propage d'une façon continue, à vitesse plus faible, jusqu'à

une longueur finale l_s . L'enregistrement de charge (Fig. 3.40) montre bien les sauts enregistrés en début de propagation, suivis par une augmentation continue correspondant au 2^{ème} mode.

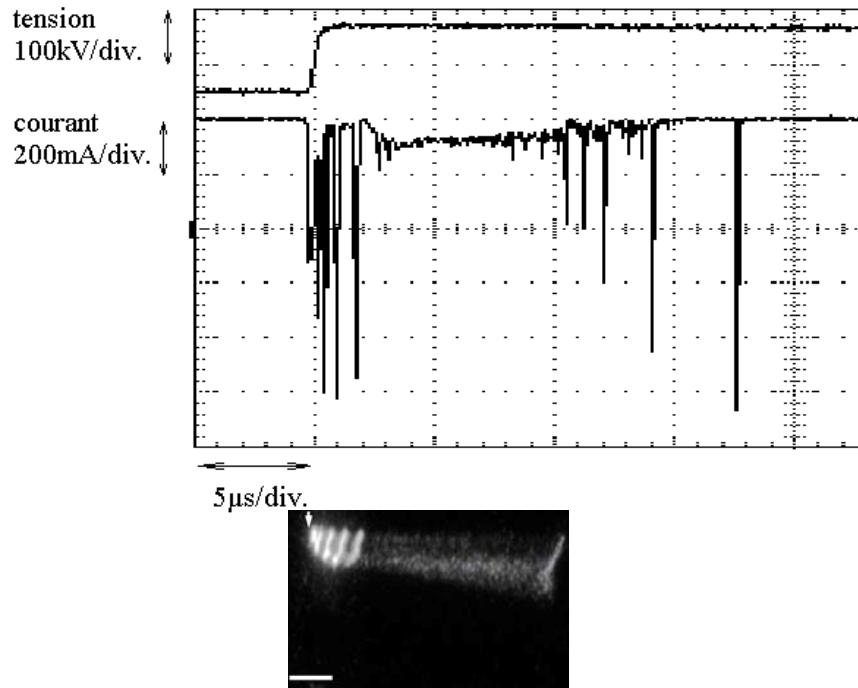


Fig. .39 Courant transitoire d'un streamer arrêté du "3^{ème} mode" et photographie correspondante ($D = 10$ cm, $U = 120$ kV)

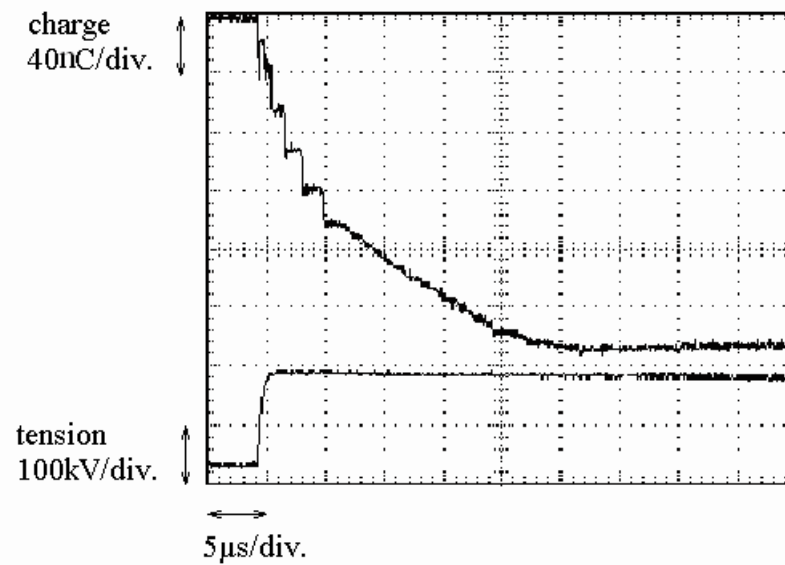


Fig. .40 Enregistrement de charge correspondant à un streamer arrêté du "3^{ème} mode" ($D = 20$ cm, $U = 158$ kV)

La Fig. 3.41 montre l'évolution des longueurs l_3 et l_s en fonction de la tension appliquée, ceci pour $D = 10\text{cm}$. Ces longueurs ont été déterminées à partir des photographies de la caméra à balayage de fente. On remarque que l_3 croît très rapidement avec la tension appliquée. Lorsque la longueur l_3 reste faible ($\ll D$), la plus grande partie de la propagation se fait selon le 2^{ème} mode, et la vitesse moyenne en fonction de la tension appliquée ne présente pas une augmentation importante (3 à 5 km/s au maximum).

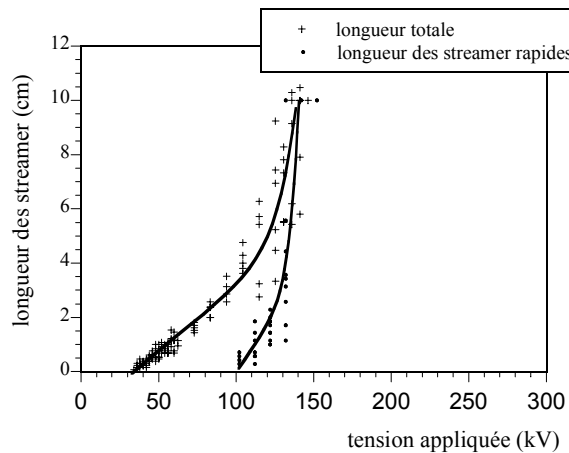


Fig. .41 Longueur d'arrêt totale l_s et longueur d'arrêt l_3 du streamer de "3^e mode" à $D = 10\text{ cm}$.

3.4.2.3 Streamers rapides observés pour $U \geq U_a$

Lorsque la longueur l_3 devient égale à D pour $U \geq U_a$, la propagation continue selon le « 2^e mode » disparaît et on n'observe plus qu'une propagation de streamer rapide jusqu'au claquage, qui s'effectue par « sauts » comme nous le verrons plus loin. Une transition brusque est alors enregistrée sur la courbe vitesse moyenne en fonction de la tension. Les enregistrements dans ces conditions (Fig. 3.42) montrent des caractéristiques intéressantes. Le temps de retard au claquage ($t_r = 4\ \mu\text{s}$) indique une vitesse moyenne $v = 25\text{ km/s}$. Le courant est principalement composé de 3 grandes impulsions (la dernière impulsion se produit de 200 ns avant le claquage). L'obturateur de la caméra a été fermé 100ns avant le claquage.

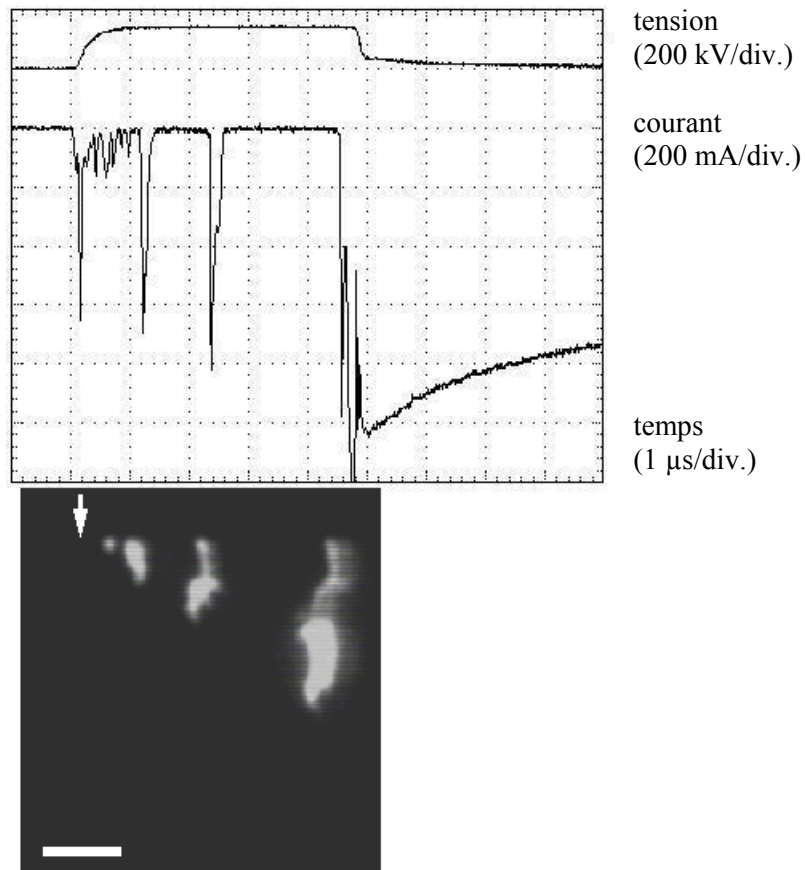


Fig. 3.42 Courant transitoire et photographie à balayage de fente des streamers du « 3ème mode ». $D = 10 \text{ cm}$, $U = 142 \text{ kV}$.

La photographie et le courant enregistrés montrent la discontinuité de la propagation de ce mode de streamer rapide. Chaque impulsion de courant est associée à un saut rapide et aucun signe de phénomènes (soit électrique ou lumineux) intervenant entre les sauts ne peut être observé. L'enregistrement de charge (Fig. 3.43) montre qu'il n'y a pas de déplacement de charge entre les sauts.

L'image de la lumière émise à chaque saut est constituée par deux phénomènes principaux (Fig. 3.42):

- Une "racine" partant de l'électrode, faiblement lumineuse et constituée par le filament gazeux créé lors du saut précédent;
- Une extension dans le liquide nettement plus lumineuse à la tête du streamer.

Lorsque la durée de chaque impulsion (environ 200 ns) est corrélée à la longueur du saut correspondant, cela indique une vitesse instantanée de chaque saut supérieure à 100 km/s.

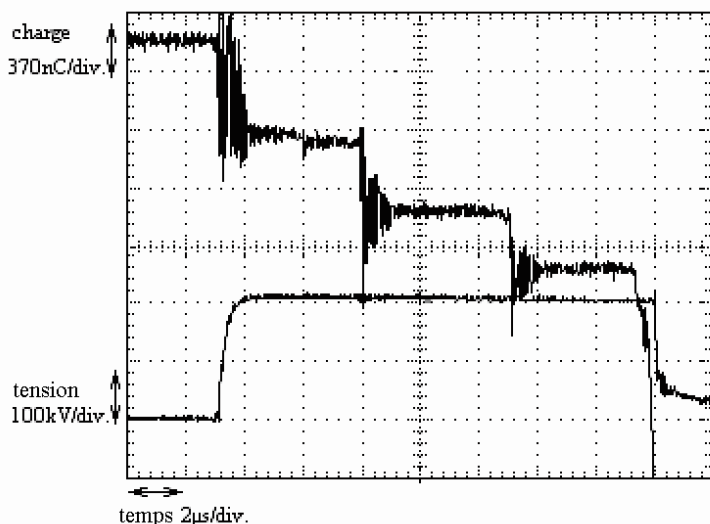


Fig. .43 Enregistrement typique de la charge d'un streamer constitué de « sauts » rapides qui se propage jusqu'au claquage ($D = 20$ cm, $U = 212$ kV)

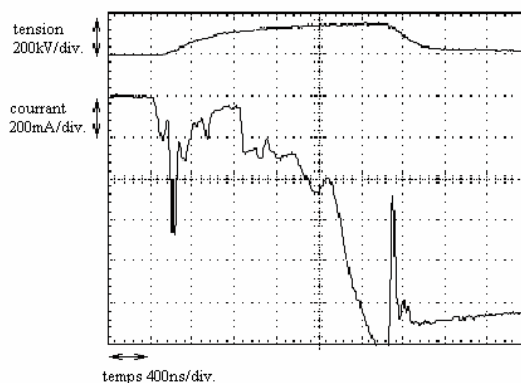


Fig. .44 Courant transitoire et photographie d'un streamer du "4^{ème} mode" constitué d'un saut unique se propageant jusqu'au claquage ($D = 10$ cm, $U = 152$ kV)

Dans la zone B, lorsque la tension est augmentée, la longueur des sauts augmente très rapidement et, par conséquent, le nombre de sauts nécessaires pour atteindre le plan diminue. Des sauts de petite taille (quelques mm) sont enregistrées à $U = 120$ kV (Fig. 3.39), plus grande à $U = 142$ kV (quelques cm, Fig. 3.43), et à $U = 150$ kV (zone C) le claquage est due à un seul saut rapide qui se propage de la pointe jusqu'au plan. Dans la zone C, la vitesse moyenne v déduite de la distance inter-électrodes et du temps de retard au claquage est égale à la vitesse instantanée d'un saut (120 km/s dans la Fig. 3.29). La Fig. 3.44 montre un enregistrement obtenu dans ces conditions. Le courant transitoire est constitué d'une composante continue (quelques A) dont l'amplitude augmente très rapidement à mesure que

le streamer s'approche du plan. Cette propagation en « saut unique » est très similaire au « 4^{ème} mode » enregistré dans les huiles minérales à beaucoup plus haute tension.

3.4.2.4 Phénomènes de streamers positifs et comparaison avec l'huile minérale

Les résultats obtenus ici montrent clairement que deux principaux mécanismes de propagation du streamer positif dans la RS50 avec des caractéristiques très différentes peuvent être distinguées en fonction de la distance inter-électrodes et de la tension appliquée:

- la propagation par « 2^{ème} mode »;
- la propagation rapide (> 100 km/s). Ce type de streamer peut se propager soit par des sauts rapides dans une gamme étroite de la tension (zone B), ou par un seul saut à plus haute tension ("4^{ème} mode").

Le « 3^{ème} mode » de propagation est constitué d'une combinaison de ces mécanismes (streamer rapide suivi par un ralentissement en « 2^{ème} mode ») et constitue le régime de transition du "2^{ème} mode" lent au saut unique rapide du "4^{ème} mode".

Ces phénomènes présentent plusieurs caractéristiques similaires avec ceux qui sont observés dans d'autres liquides. Les streamers positifs filamenteux du "2^{ème} mode" avec des vitesses de l'ordre de km/s ont été observés dans de nombreux liquides [55, 58, 62, 65, 67, 68, 84, 85, 93, 100-103]. Les streamers rapides ont été également observés dans des conditions variées telles que de champs uniformes ou dans des liquides contenant des halogènes [64, 91].

Des études plus détaillées de la transition au streamer rapide à haute tension dans les conditions pointe-plan ont été effectuées dans l'huile minérale [65, 68, 100], le cyclohexane [73], l'azote liquide [105], l'eau [106, 107], et certains liquides synthétiques [85, 103]. Cette transition se produit de différentes manières en fonction de la nature du liquide.

Dans la RS50, les streamers passent rapidement de "2^{ème} mode" au "4^{ème} mode": la transition ("3^{ème} mode") est observé dans une gamme très courte de la tension (de 100 à 150 kV à $D = 10$ cm, Fig. 3.29). La Fig. 3.33 montre une nouvelle propriété intéressante des streamers rapides en saut unique : leur vitesse devient constante en fonction de la tension appliquée. Une transition rapide de "2^{ème} mode" au "4^{ème} mode" a également été observée dans le cyclohexane [73] et dans l'eau [106, 107]. Dans l'eau les photographies des sauts sont très similaires à celles obtenus ici (Fig. 3.42). Dans ce liquide, deux mécanismes de base (appelés "type I" et "type II" dans [107]) ont également été observées, avec la propagation intermittente de "type II" qui évolue rapidement en un seul saut à haute tension avec une vitesse constante. La différence principale est la tension nécessaire nettement plus faible pour l'observation des streamers rapides du "4^{ème} mode" dans l'eau (de 30 kV pour une distance de 3 cm au lieu de 85 kV dans la RS50), et leur vitesse plus faible (30 km/s au lieu de 200

km/s). Dans le cyclohexane, des mesures de vitesse moyenne à une distance de 5 cm montrent également une augmentation rapide de 1,5 km/s à 100 km/s à proximité de la tension de claquage [73]. Dans les hydrocarbures aromatiques tels que isopropylbiphenyl et phenylxylylethane, la forte augmentation de la vitesse moyenne (jusqu'à 30 km/s) à la tension de claquage montre que U_c et U_a sont presque égales [103], comme dans la RS50. Dans ces liquides, les courants transitoires constitué par un certain nombre de grandes impulsions comme dans la Fig. 3.42 suggèrent fortement la propagation intermittente des streamers, avec une vitesse du chaque saut estimée à 140 km/s. Dans l'azote liquide (LN2) la transition aux streamers rapides (vitesse moyenne: 10 km/s) a été observée au-dessous de la tension de claquage [105].

L'huile minérale a été le liquide le plus largement étudié et une synthèse détaillée des phénomènes observés et des publications correspondantes peuvent être trouvées dans [100]. Les mesures précédentes obtenues dans [100] avec le même système expérimental utilisé dans cette étude sont rappelées pour une comparaison à la Fig. 3.29 (lignes pointillées). Cela montre le comportement très différent des deux liquides. Dans l'huile minérale, les streamers rapides avec une vitesse plus de 10 km/s sont observées au début de la propagation au-dessus de 160 kV, (comparé à 100 kV dans RS50). A tension plus élevée, l'évolution est totalement différente (Fig. 3.29b). L'extension très rapide des streamers par sauts comme dans la Fig. 3.41 n'est pas observée dans l'huile minérale. Leur longueur augmente jusqu'à 2cm à 360 kV ce qui produit une faible augmentation de la vitesse moyenne (3 km/s). À très haute tension, les streamers rapides de "4^{ème} mode" sont observés à la fin de la propagation, induisant une augmentation plus importante de la vitesse moyenne. Les tensions d'accélération U_a définies dans [100] avec un seuil arbitraire de 10 km/s ($U_a = 370$ kV à $D = 10$ cm) correspondent à l'apparition de ces streamers du « 4^{ème} mode ». Dans de l'huile minérale, il faut augmenter encore la tension au-dessus de U_a (jusqu'à 450 kV à $D = 10$ cm) pour pouvoir observer des streamers qui traverse entièrement la distance D en un saut unique [100], alors qu'ils se produisent à seulement 150 kV dans l'huile RS50 (Fig. 3.29). Des expériences menées dans l'huile minérale avec les mêmes conditions que dans la Fig. 3.33 ($D = 2$ cm avec des tiges de rayon de courbure variable [59]) montrent également l'augmentation plus lente de la vitesse moyenne en fonction de la tension (en pointillé).

Dans les huiles minérales, les photographies par la caméra à balayage de fente montrent clairement la propagation continue de la tête du streamer de "2^{ème} mode" [100], mais n'ont pas fourni de preuve claire de la propagation intermittente des streamers plus rapides. Des expériences menées avec un additif polyaromatiques (pyrène) ajouté au cyclohexane [73] a montré l'influence importante de ce type de composant à haute tension. Comme indiqué ci-dessus, dans le cyclohexane pur, le comportement est presque identique à l'huile RS50 (extension importante des streamers rapides, tension d'accélération faible). Avec du pyrène ajouté, une augmentation importante de la tension d'accélération est observée comme dans

l'huile minérale. L'ajout du pyrène produit une augmentation marquée du nombre de branches des filaments constituant le streamer. En conséquence, cela peut produire un mécanisme de régulation (auto-limitation du champ en tête du streamer) qui retarde la propagation rapide de streamer à haute tension [73].

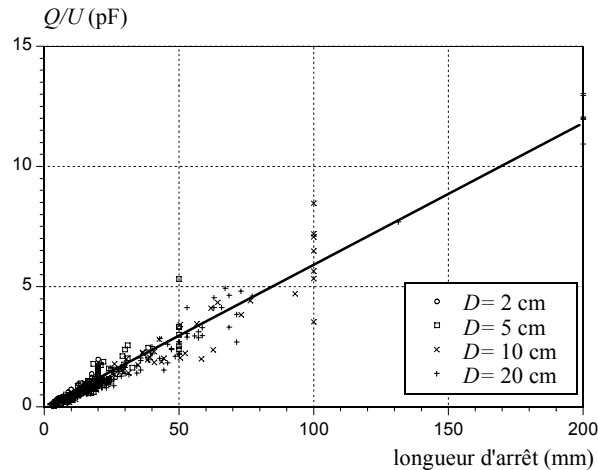


Fig. .45 Rapport Q/U en fonction de la longueur d'arrêt l_s des streamer positifs au dessous de la tension de claquage.

Sur la Fig. 3.45, nous avons tracé l'ensemble des valeurs du rapport Q/U par rapport à la longueur l_s du streamer, mesurée au-dessous de la tension de claquage à toutes les distances. Le rapport Q/U représente la "capacité" du streamer en face du plan, avec la simple hypothèse que le streamer est équipotentiel à la pointe. Tous les points de données sont superposés sur une seule ligne droite ce qui montre la dépendance linéaire de Q/U par rapport à la longueur du streamer. Cela est conforme à un modèle simple qui compare la propagation du streamer avec celle d'un cylindre conducteur s'allongent le long de l'axe inter-électrodes [108]. Sur la Fig. 3.45, la capacité par unité de longueur du streamer peut être évalué à 0,6 pF/cm. Une valeur de 0,3 pF/cm a été obtenue par une analyse similaire dans de l'huile minérale. La différence peut s'expliquer en partie par la permittivité plus élevée de RS50 par rapport l'huile minérale (3 au lieu de 2.2).

3.4.3 Différents « modes » de propagation des streamers négatifs

En polarité négative, les streamers négatifs ne montrent que deux modes de propagation, un mode lent pour $U < U_a$ et, un mode rapide pour $U > U_a$.

3.4.3.1 Streamers lents ($1\text{km/s} < v < 2\text{ km/s}$) observés pour $U < U_a$

1 Forme, charge et courant transitoire des streamers

Les Fig. 3.46 et Fig. 3.47 présentent respectivement le courant transitoire, la forme et la charge typiques du streamer négatif. Ces caractéristiques ressemblent au « 2^{ème} mode » de propagation des streamers positifs.

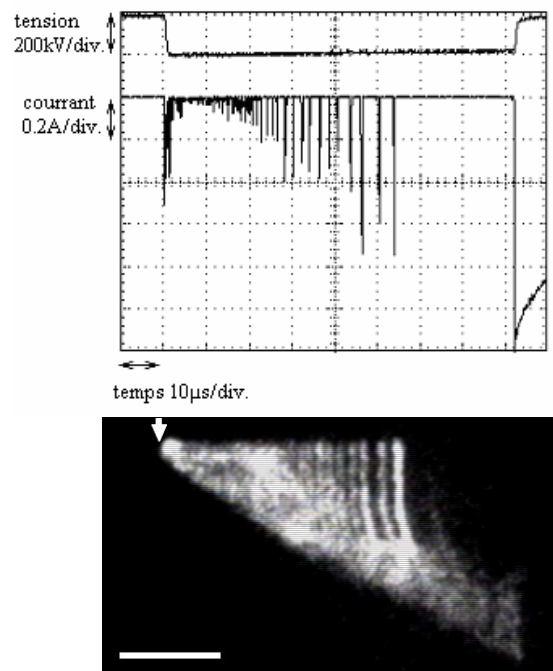


Fig. .46 Courant transitoire et photographie correspondante d'un streamer négatif se propageant jusqu'au claquage ($D = 10$ cm, $U = 185$ kV)

La lumière émise, enregistrée à l'aide de la caméra à balayage de fente, montre que la tête du streamer se propage à vitesse constante et que des réilluminations successives se produisent dans le canal produit par l'avancée du streamer vers le plan. Après une dernière réillumination à t_l , la tête du streamer continue de se propager jusqu'au claquage. L'enregistrement du courant -ou de la charge- montre que, pour $t > t_l$ le courant devient non mesurable, et que par conséquent la tête du streamer n'est plus «électriquement connectée» à la pointe. Le « temps de repos » avant le claquage d'environ $40 \mu\text{s}$ observé sur la courbe de charge de la Fig. 3.47 correspond à cet période.

2 Longueur d'arrêt et champ longitudinal dans le canal de streamer

Pour une tension donnée, la longueur d'arrêt l_s en polarité négative est plus faible qu'en polarité positive. Ceci est observé expérimentalement sur les Fig. 3.29 et Fig. 3.30. La longueur de propagation étant sensiblement proportionnelle à la tension appliquée, on en déduit des valeurs du champ moyen longitudinal E_l de propagation qui varient de 40 kV/cm à 26 kV/cm lorsque la distance D varie de 2 cm à 20 cm. Ces valeurs sont supérieures à la valeur de 16 kV/cm trouvée en polarité positive.

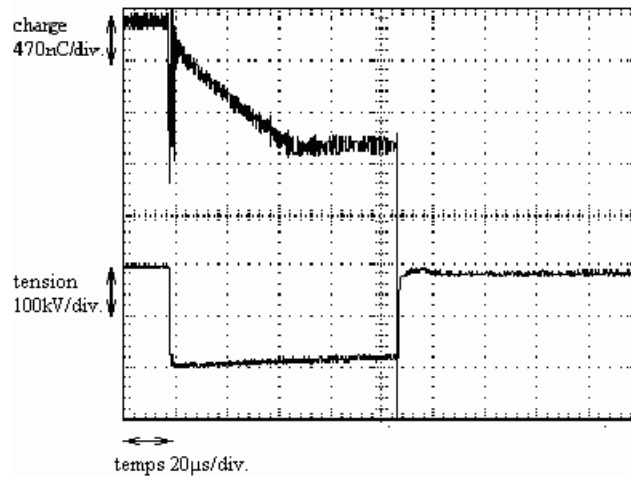


Fig. 47 Charge d'un streamer négatif se propageant jusqu'au claquage ($D = 10$ cm, $U = 196$ kV)

3 Transition au claquage

Comme en polarité positive, les streamers négatifs du 2^{ème} mode peuvent conduire au claquage lorsque ceux-ci atteignent le plan. Cependant, pour les grandes distances D , le fait que la tête du streamer peut se trouver électriquement non connectée à la pointe peut rendre plus difficile la transition du canal de streamer (relativement résistant) à un canal d'arc (canal très conducteur) qui est la condition requise pour obtenir le claquage.

3.4.3.2 Streamers rapides ($v > 5$ km/s) observés pour $U \geq U_a$

Au-dessus de U_a (Fig. 3.48 et Fig. 3.49), les streamers se composent de deux phases successives. Le courant transitoire lors de la première phase sont encore composées des impulsions mais avec une forme différente: par rapport à la Fig. 3.46, leur intensité a soudainement augmenté d'un facteur de près de 10, ils sont moins nombreux et ils ne présentent plus une augmentation régulière en intensité pendant la propagation du streamer. La vitesse au cours de cette première phase est de 5,5 km/s dans la Fig. 3.48. À la fin de la propagation (400 ns avant le claquage), une forte augmentation du courant correspond à un saut final rapide conduisant au claquage (deuxième phase). Ce saut rapide et très lumineux semble commencer à la tête du streamer comme il a été rapporté précédemment dans l'huile minérale [65, 69]. La vitesse moyenne du streamer dans la Fig. 3.48 est $v = D/t_r = 6,2$ km/s.

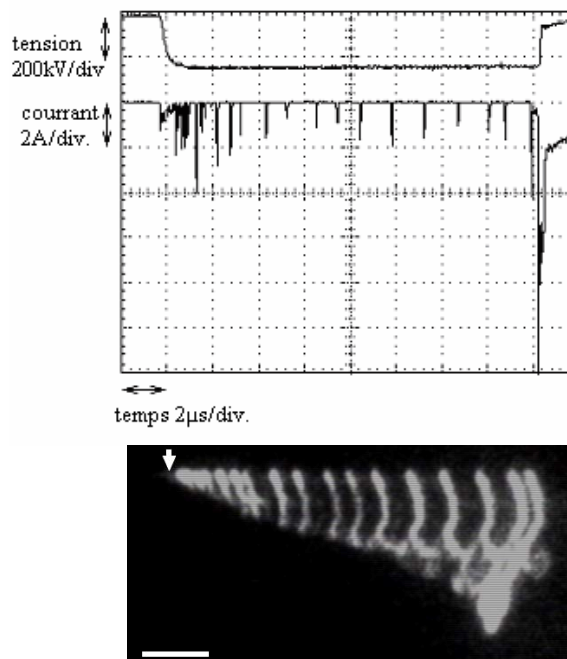


Fig. 48 Courant transitoire et photographie d'un streamer négatif se propageant jusqu'au claquage ($D = 10$ cm, $U = 228$ kV)

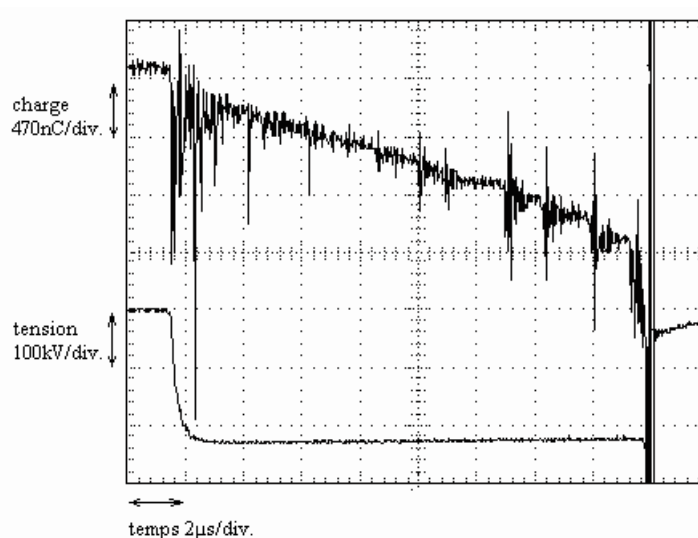


Fig. 49 Charge d'un streamer négatif se propageant jusqu'au claquage ($D = 10$ cm, $U = 228$ kV)

A tension plus élevée (Fig. 3.50, $v = 50$ km/s) la durée de la première phase est beaucoup plus courte et la vitesse au cours de cette phase augmente à 16 km/s. Peu d'impulsions sont à ce moment enregistrées au cours de cette phase (une seule dans la Fig. 3.50). D'autre part, un nouveau phénomène devient visible à haute tension: la propagation continue de filaments faiblement lumineux, associés à un courant continu (0,5 A dans la Fig. 3.50). L'impulsion unique à $1,8 \mu\text{s}$ se superpose à ce fond lumineux. Ce fond de lumière et le courant continu existent peut être à tension plus faible (comme dans la Fig. 3.48) mais ils ne sont pas clairement observés sur les enregistrements en raison du manque de sensibilité. À

haute tension, le saut final rapide se produit également plus tôt après l'application de la tension.

Les phénomènes observés présentent de nombreuses similitudes avec les streamers négatifs rapides observés dans l'huile minérale [65, 69]: impulsions de courant associées aux réilluminations, lumière de fond entre les réilluminations et saut final rapide.

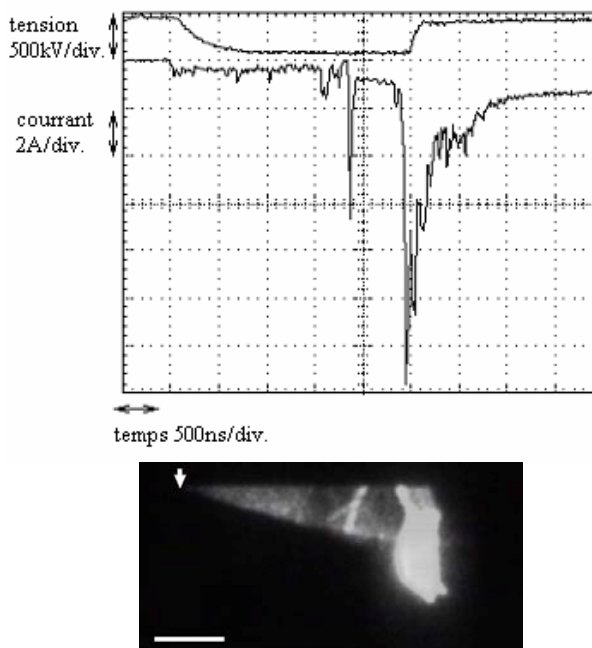


Fig. 3.50 Courant transitoire et photographie d'un streamer négatif se propageant jusqu'au claquage ($D = 10 \text{ cm}$, $U = 380 \text{ kV}$)

Il existe beaucoup moins de données concernant les streamers négatifs disponibles dans la littérature par rapport aux streamers positifs. Les streamers négatifs sont généralement considérés comme moins critiques car la tension de claquage est plus élevée dans cette polarité. Dans la gamme de tension envisagée, les streamers négatifs présentent de nombreuses similitudes avec les positifs: les vitesses allant de 0,1 km/s à 100 km/s, la forme des courants transitoires, les phénomènes de base qui composent les streamers (filaments faiblement lumineux à la tête du streamer, réilluminations, saut final rapide). Cependant, comme il a été discuté dans [69], il est plus difficile d'identifier clairement l'existence de différents "modes" en polarité négative. À basse tension, la transition claire qui existe dans la polarité positive à $U = U_p$ entre le "1^{ier} mode" (0,1 km/s) et "2^{ème} mode" plus rapide (1 km/s) n'existe pas. La seule transition est observée à $U = U_a$ où la courbe de la vitesse en fonction de la tension montre une discontinuité (Fig. 3.30, Fig. 3.32 et Fig. 3.34), corrélée à une variation brusque de l'intensité des impulsions de courant (intensité multipliée par 10) et un renforcement de la lumière émise. Deux "modes de propagation" principaux peuvent être ainsi reconnus en polarité négative au-dessous et au-dessus de U_a .

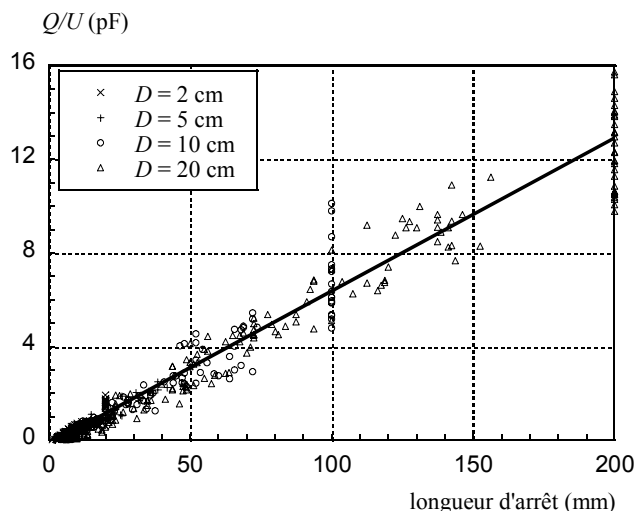


Fig. .51 Rapport Q/U en fonction de la longueur d'arrêt l_s à différentes distances D en polarité négative.

Comme dans la polarité positive, la courbe de Q/U en polarité négative (Fig. 3.51) montre une dépendance linéaire par rapport à la longueur l_s , avec la même valeur de la capacité par unité de longueur (0,6 pF/cm). Cette valeur est également plus élevée que celle dans de l'huile minérale en polarité négative (0,2 pF/cm) [69].

3.4.4 Influence d'une barrière isolante solide sur la propagation des streamers.

Dans le but de vérifier l'effet de "barrière" sur la propagation des streamers, nous avons introduit une barrière isolante solide, placée perpendiculairement à l'axe inter-électrodes, dont la distance x par rapport à la pointe peut être variée entre 0 et D . Il s'agit de disques de diamètre 15 cm en carton de transformateur. Pour ces essais, la distance entre les électrodes pointe/plan ($r_0 \approx 100 \mu\text{m}$) est fixée à $D=10\text{cm}$. La motivation de ce type de mesure est de simuler une situation qui se rencontre dans un transformateur réel où des barrières solides sont interposées entre les conducteurs.

3.4.4.1 Tension de claquage

Sur la

Fig. 3.52 sont présentées les tensions de claquage mesurées avec le carton isolant placé à différentes distances x de la pointe. Ces tensions de claquage ont été obtenues en appliquant une série de dix impulsions à chaque niveau de tension. Les tensions de claquage, mesurées en polarité positive (U_c^+) et négative (U_c^-) de la pointe en l'absence de barrière isolante, sont également montrées sur la figure pour comparaison. Lorsque la barrière est proche de la pointe ($x=0,5\text{cm}$), la tension de claquage est augmentée de 50% en positif et de

30% en négatif par rapport à celles mesurées dans l'huile seule. Elles diminuent au fur et à mesure que la barrière s'éloigne de la pointe.

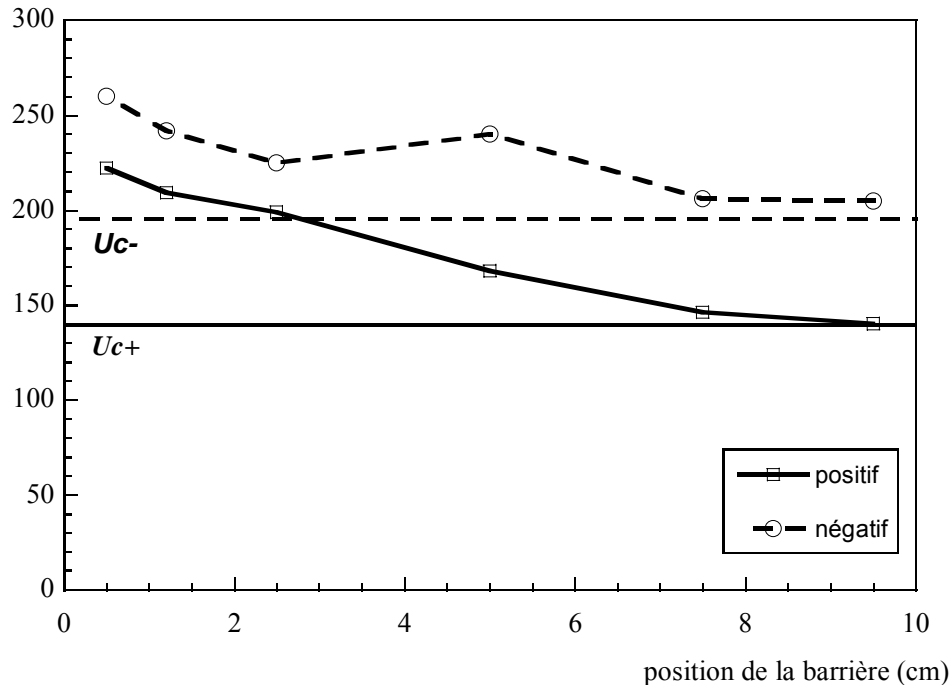


Fig. .52 Tensions de claquage en fonction de la distance x pointe-barrière. U_c^+ et U_c^- sont les tensions de claquage en l'absence de barrière. $D=10$ cm.

La visualisation des streamers avec la caméra intensifiée montre qu'ils se propagent d'abord de la pointe jusqu'à la barrière, ensuite ils rampent à la surface de celle-ci jusqu'à ses bords, puis se propagent de nouveau dans l'huile jusqu'au plan (Fig. 3.53).

Quand la barrière est éloignée de la pointe ($x > 5$ cm), le claquage est provoqué par la propagation des branches latérales du streamer, qui atteignent le plan directement sans ramper à sa surface. Les tensions de claquage mesurées pour ces distances sont par conséquent sensiblement égales à celles mesurées dans l'huile seule. Dans l'huile seule, les branches du streamer s'étendent naturellement sous forme d'un volume approximativement conique. La barrière située à une distance x n'a pas d'effet si son diamètre est plus faible que la section du cône à cette distance.

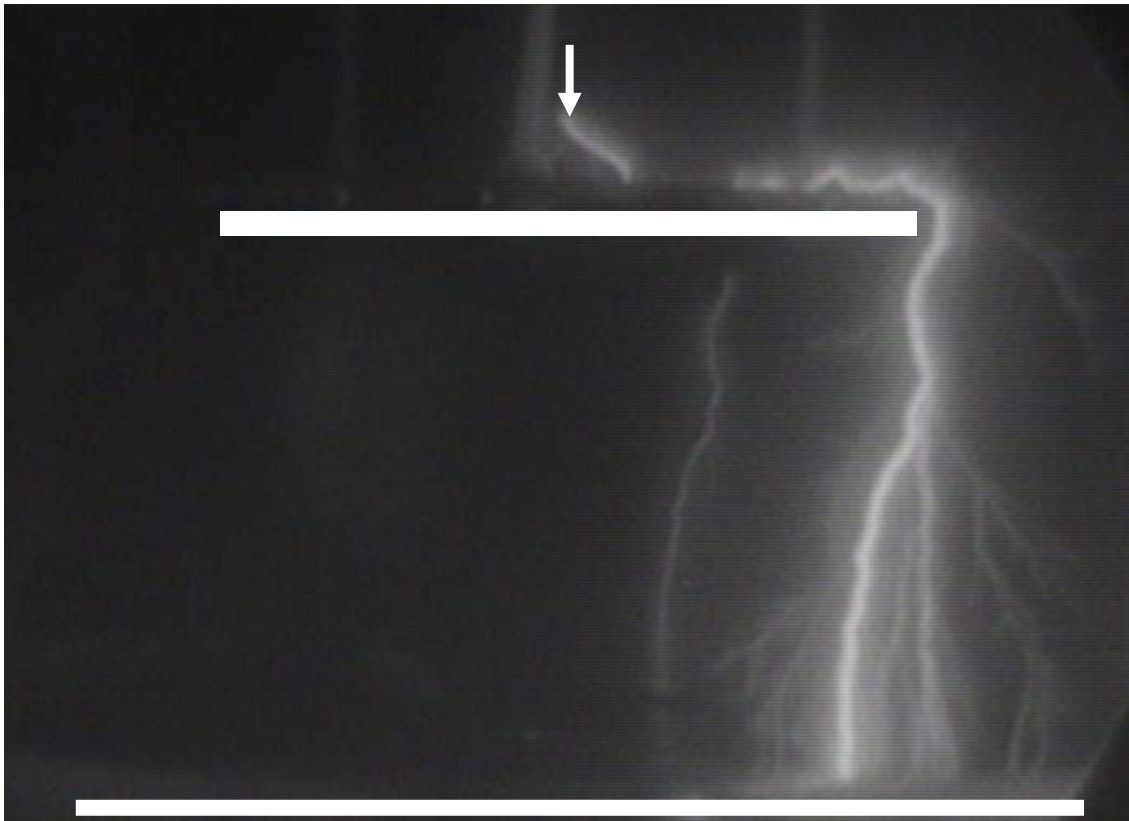


Fig. 3.53 Photographie du streamer positif contournant la barrière. $D=10\text{cm}$, $x=1,2\text{cm}$, $U= 230\text{kV}$.

3.4.4.2 Vitesse moyenne de propagation

La vitesse moyenne a été déterminée en considérant la distance maximum parcourue par le streamer, c'est-à-dire le total : propagation jusqu'à la barrière, à sa surface, et de la barrière au plan. Ainsi, par exemple sur la Fig. 3.53, la distance totale parcourue est de 17,5cm.

En polarité positive, la barrière perpendiculaire à l'axe inter-électrodes retarde l'apparition des streamers rapides si la distance pointe/barrière x est inférieure à $D/2$. En l'absence de barrière, les streamers rapides apparaissent à partir d'environ 150kV alors que, en présence d'une barrière à $x=1,2\text{cm}$, la tension d'apparition de ces streamers nécessite environ 210kV (Fig. 3.54). Pour des tensions $>220\text{kV}$ les streamers rapides rampent sur la barrière et produisent le claquage. Il est possible que cet effet soit dû aux charges accumulées sur le plan isolant pendant les essais précédents, qui réduisent le champ autour de la pointe. En polarité négative, l'influence de la barrière sur la vitesse de propagation est beaucoup moins sensible (Fig. 3.55).

L'effet d'une barrière est très comparable à celui observé dans l'huile minérale dans les mêmes conditions. L'augmentation de la tension de claquage est essentiellement due à l'augmentation de la longueur à parcourir par le streamer pour conduire au claquage.

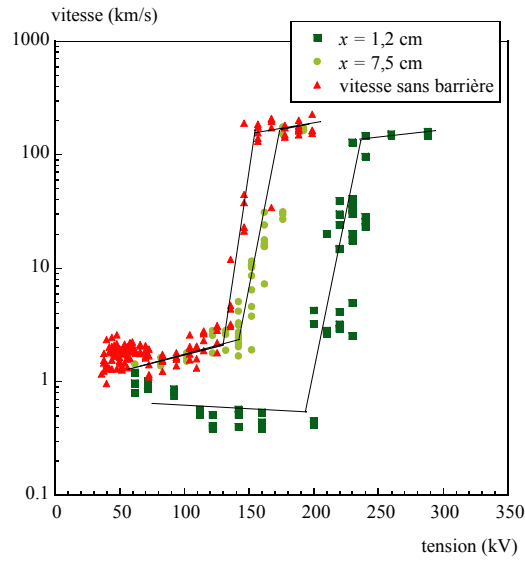


Fig. .54 Vitesse moyenne des streamers positifs en fonction de la tension appliquée en l'absence et en présence d'une barrière située à deux distances x différentes de la pointe. $D = 10$ cm.

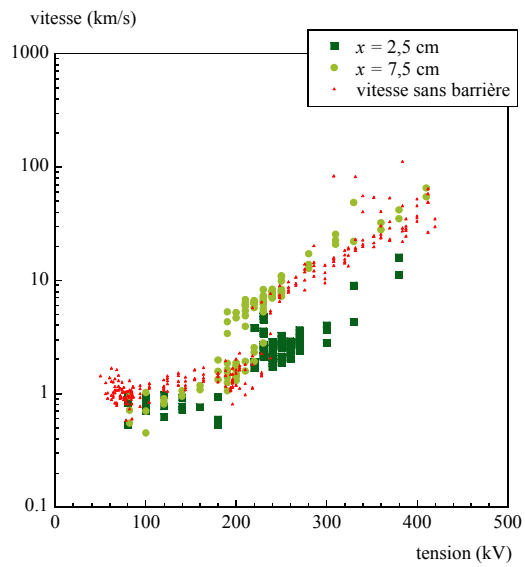


Fig. .55 Vitesse moyenne des streamers négatifs en fonction de la tension appliquée en l'absence et en présence d'une barrière située à deux distances x différentes de la pointe. $D = 10$ cm.

3.4.5 Discussion, comparaison avec l'huile minérale

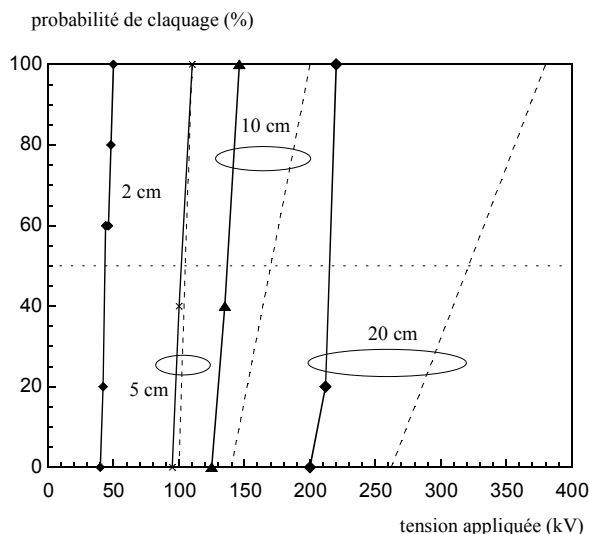


Fig. .56 Probabilité de claquage en fonction de la tension à différentes distances en polarité positive (lignes pointillées : huile minérale)[100]

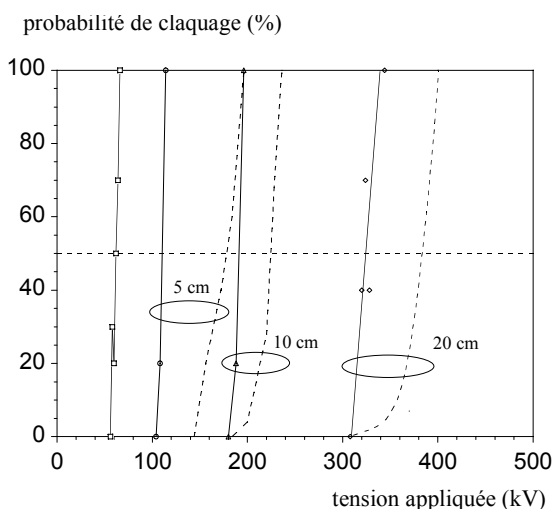


Fig. .57 Probabilité de claquage en fonction de la tension à différentes distances en polarité négative (ligne pointillées: huile minérale)[69]

Les Fig. 3.56 et Fig. 3.57 montrent la probabilité de claquage en fonction de la tension appliquée dans les deux polarités à différentes distances. Elle a été déterminée en comptant le nombre de claquages produits dans une série de 20 essais à chaque niveau de tension. Dans tous les cas, la probabilité de claquage a rapidement augmenté de 0 à 100% dans une gamme de tension très courte. Dans ce texte, la tension de claquage U_c correspond à une probabilité de claquage arbitrairement fixée à 50%. La comparaison avec l'huile minérale (lignes pointillées) montre que, dans l'huile RS50, la probabilité de claquage augmente très rapidement de 0 à 100%, alors que dans de l'huile minérale cette augmentation est plus lente.

La même conclusion a été obtenue en benzyl-toluène [85] où le claquage est également dû aux streamers rapides.

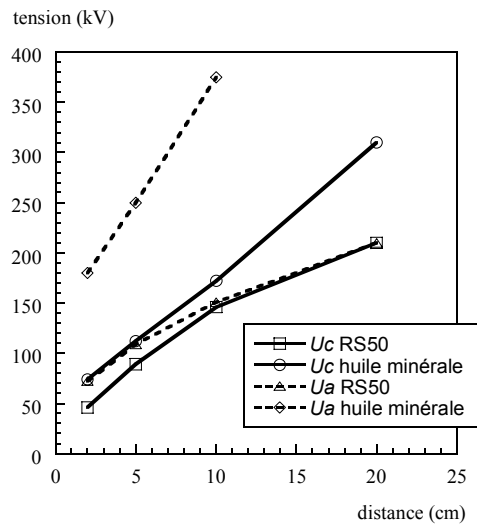


Fig. .58 Tension de claquage et tension d'accélération en fonction de la distance en polarité positive. Résultats dans l'huile minérale obtenus dans [100]

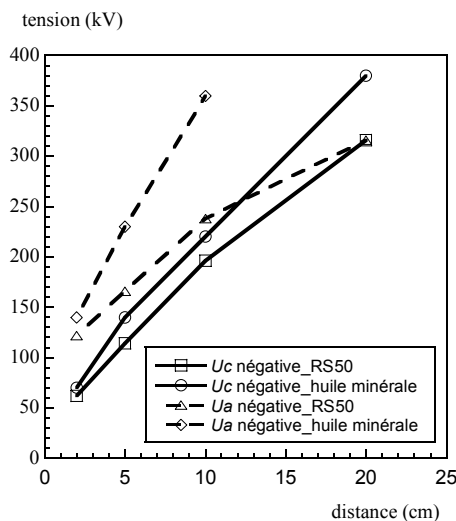


Fig. .59 Tension de claquage et tension d'accélération en fonction de la distance en polarité négative. Résultats dans l'huile minérale obtenus dans [69]

Un résumé des mesures de U_c et U_a en fonction de la distance est présentée dans les Fig. 3.58 et Fig. 3.59, ainsi que les résultats précédemment obtenus dans de l'huile minérale dans les mêmes conditions [69, 100]. Dans l'huile minérale, la tension d'accélération U_a (définie avec un seuil arbitraire de la vitesse v de 10 km/s) sont beaucoup plus élevées que la tensions de claquage U_c . Le claquage est dû aux streamers lents de "2^{ème} mode" (v de l'ordre de 2 km/s), même aux très grandes distances jusqu'à 80 cm [109]. Dans la RS50, le claquage à $D = 2$ et 5 cm est dû à la propagation du streamer de « 2^{ème} mode » et les tensions de claquage

sont environ 30 kV plus faibles que dans l'huile minérale. Cette différence augmente à des distances plus importantes (20 cm) lorsque le claquage est dû aux streamers rapides.

Avec la longue durée des impulsions de tension utilisée dans cette étude (0.5/1400 μ s), les streamer lents et rapides sont tous capables de se propager au claquage. Par conséquent, les différences de vitesses de propagation entre les liquides ne constituent pas la principale raison de la variation de la tension de claquage. Une faible tension de claquage reflète plutôt la capacité des streamers à se propager sur de longues distances. Il a précédemment été démontré que les décharges rapides se propagent plus loin que les lents. L'arrêt du streamer est dû à la chute de tension existante le long de filaments.

En polarité positive, les valeurs typiques de chute de tension moyenne d'un streamer de "2^{ème} mode" sont environ 20-30 kV/cm dans de l'huile minérale [67, 108]. Des valeurs identiques peuvent être déduites dans la RS50 à partir de la courbe $l_s(U)$ (Fig. 3.29, Fig. 3.30). Pour les streamers de longueur courte $l_s < 2D/3$, l'augmentation de l_s est proportionnelle à U avec une pente de 0,033 cm/kV ($D = 2$ cm, Fig. 3.29a) et 0,048 cm/kV ($D = 10$ cm, Fig. 3.29b), correspondant à des valeurs de la chute de tension (l'inverse de la pente) de 30 kV/cm et 21 kV/cm. Les streamers rapides sont beaucoup plus "conducteurs", avec une chute de tension interne estimée à 2 kV/cm à haute tension dans de l'huile minérale [108].

La courbe de la tension de claquage U_c en fonction de la distance (Fig. 3.58) fournit une autre preuve de ces faits: dans l'huile minérale à toutes les distances et dans la RS50 à de faible distance (jusqu'à 5 cm), le claquage est dû au streamer de "2^{ème} mode" et la tension de claquage augmente en fonction de la distance suivant un rapport similaire dans ces deux liquides (14 kV/cm). Lorsque le claquage est dû à des streamers rapides (dans le cas de RS50 avec $D \geq 10$ cm), le taux d'augmentation est plus faible, de 5 kV/cm. Une tendance similaire peut être observée dans d'autres liquides lorsque le claquage est dû à des streamers rapides: dans l'azote liquide [105] (taux de l'augmentation: 7 kV/cm) et les liquides aromatiques synthétiques (environ 5,5 kV/cm dans benzyl-toluène [85], isopropyl-biphényle et phenylxylyl-éthane [103]).

En polarité négative, la tension d'accélération U_a est deux fois plus élevée que la tension de claquage U_c à $D = 2$ cm (Fig. 3.59). Cette différence diminue à des distances plus grandes et à $D = 20$ cm, elles deviennent égales. Dans l'huile minérale, U_a est toujours plus élevée que U_c pour toutes les distances étudiées. La tension de claquage est pratiquement la même à faible distance ($D = 2$ cm) et elle est logiquement plus faible à grande distance ($D = 20$ cm) dans la RS50 lorsque les streamers rapides se propagent. Le taux d'augmentation de la tension de claquage U_c en fonction de la distance est de 14 kV/cm à grande distance, ce qui est plus élevé par rapport à la polarité positive.

3.5 Conclusions sur les streamers

Par rapport aux huiles minérales, la RS50 montre une propagation plus facile de streamers, qui à son tour induit une plus faible tension de claquage dans les deux polarités. La différence est particulièrement marquée en polarité positive. Dans cette huile, la propagation du streamer positive évolue rapidement du "2^{ème} mode" au "4^{ème} mode" (vitesse jusqu'à 200 km/s), tandis que l'huile minérale montre une plus grande stabilité à haute tension. La Fig. 3.60 montre le rapport $U_{c_RS50} / U_{c_huile\ minérale}$ en fonction de la distance mesuré dans les mêmes conditions. En fonction de la distance inter-électrodes, ce rapport se situe entre 0,6 et 0,95.

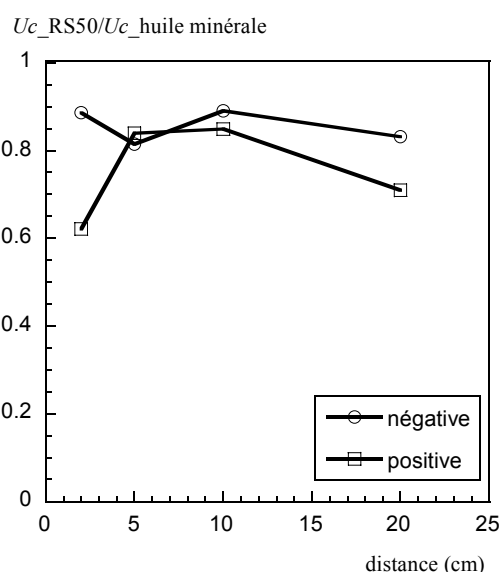


Fig. .60 Rapport des tensions de claquage dans les deux huiles

De ces résultats, il apparaît que les propriétés de propagation des streamers dans l'huile RS50 sont moins favorables pour l'isolation haute tension que dans de l'huile minérale. Cette conclusion ne pouvait pas être obtenue à partir d'une comparaison basée uniquement sur les résultats des tests de la rigidité diélectrique standard (c'est-à-dire la mesure de la tension de claquage sous tension alternative en champ uniforme avec des distances de l'ordre de mm) qui indiquent des propriétés presque identiques pour les deux liquides. Le champ uniforme dans ces expériences de claquage est très élevé (au-dessus de 40 kV/mm), environ dix fois plus important que dans les applications pratiques des liquides. Les expériences dans la configuration pointe-plan fournissent des informations sur des phénomènes qui peuvent se produire dans des systèmes réels quand une décharge est générée localement par un défaut (par exemple, une particule solide), avec des valeurs raisonnables du champ moyen U / D de quelques kV/mm.

L'existence de streamers rapides dans la RS50 à de grandes distances induit également une plus faible résistance aux transitoires hautes tensions de courte durée, telles que l'impulsion standard de choc de foudre, utilisée normalement pour le test des systèmes haute tension. Avec une vitesse de plus de 100 km/s, les streamers rapides positifs dans la RS50 sont capables de traverser une distance inter-électrodes de 10 cm pendant 1 μ s, alors que pour les streamers lents dans l'huile minérale ($v = 2$ km/s), il faudra 50 μ s. On peut donc prévoir que la différence entre les deux liquides sera encore plus importante avec l'impulsion normalisée de choc de foudre, dont la durée est nettement plus courte que celle utilisée dans cette étude. Ce point est particulièrement important pour la conception et l'essai d'isolations haute tension réalisées à base d'esters naturels.

La caractérisation détaillée des streamers dans les esters naturels apporte également de nouvelles informations intéressantes sur le développement des streamers. La photographie par caméra à balayage de fente montre clairement la propagation intermittente des streamers rapides positifs (Fig. 3.42), qui évolue rapidement en un seul saut rapide avec une vitesse pratiquement constante à plus haute tension. Ces photographies montrent aussi les deux origines différentes de la lumière émise à chaque saut. Dans les deux polarités à haute tension, des photographies et des enregistrements du courant prouvent aussi le développement continu de phénomènes rapides (streamers positifs de "4^{ème} mode" en un saut unique, Fig. 3.44), et l'existence d'un fond lumineux du streamer négatif (Fig. 3.50).

La comparaison avec les mesures déjà effectuées dans d'autres liquides dans des conditions similaires (principalement dans les huiles minérales, mais aussi dans plusieurs hydrocarbures purs, l'azote liquide, l'eau) montre que les mêmes processus peuvent être reconnus dans ces liquides de différentes compositions. Cela est utile afin de clarifier la description des phénomènes de préclaquage dans les liquides, et aussi de comparer les propriétés de différents liquides. En fonction de la nature du liquide, des processus identiques peuvent se produire à des niveaux de tension parfois très différents.

Conclusions générales

Dans ce travail, une caractérisation expérimentale des propriétés diélectriques d'une huile isolante composée d'esters naturels est réalisée. Elle concerne trois aspects importants pour son application (conduction, claquage, vieillissement). Dans ces travaux, nous avons mis en évidence les conclusions nouvelles suivantes.

Concernant l'influence de l'humidité, de la température et des particules sur les propriétés diélectriques de base :

- Les mesures de claquage réalisées en maîtrisant la teneur relative en eau et la présence de particules (huile très bien filtrée en circuit fermé, ou avec addition d'une quantité connue de particules) permettent de mettre en évidence que l'huile RS50 possède une rigidité diélectrique comparable à celle de l'huile minérale suivant la norme CEI 60156, avec une influence identique de la teneur relative en eau.
- En présence de particules de cellulose, la dégradation est sensiblement plus marquée dans l'huile végétale, en raison de la plus grande quantité d'eau disponible dans ce liquide pour hydrater les particules.
- En comparaison avec l'huile minérale de transformateur, l'huile végétale présente une conductivité (et par conséquent des pertes à 50 Hz) nettement plus élevée (environ 10 fois plus grande).
- Les gammes de fréquences caractéristiques dans lesquelles des pertes par conduction ou polarisation sont prédominantes ont été mises en évidence grâce à la mesure spectroscopique fréquentielle. Ces pertes varient en fonction de la température ce qui peut être expliqué par la variation de la viscosité du liquide. Au dessous de la limite de saturation, aucune influence de la teneur en eau sur ces pertes n'est observée.

Concernant l'évolution de ces propriétés diélectriques au cours de vieillissement thermique :

- L'huile RS50 peut maintenir sa tension de claquage après une longue période de vieillissement à 120°C.
- Le vieillissement de l'huile RS50 est plus progressif et continu par rapport à l'huile minérale. Il augmente parallèlement l'acidité, la conductivité, la permittivité et les pertes dipolaires à hautes fréquences.

- Le vieillissement de l'huile RS50 ne conduit pas à la formation de dépôts ou de boues, ce qui est un avantage indéniable pour l'utilisation de ce liquide dans les appareillages.

Concernant la génération et la propagation des streamers sous tension impulsionnelle :

- Par rapport aux huiles minérales, la RS50 montre une propagation plus facile des streamers, qui induit une plus faible tension de claquage sous tension impulsionnelle dans les deux polarités. La différence est particulièrement marquée en polarité positive.
- L'existence de streamers rapides dans la RS50 à de grandes distances induit également une plus faible résistance aux transitoires hautes tensions de courte durée, telles que l'impulsion standard de choc de foudre, utilisée normalement pour le test des systèmes haute tension.
- Dans cette huile, la propagation du streamer positif évolue rapidement du "2ème mode" au "4ème mode" (vitesse jusqu'à 200 km/s), tandis que l'huile minérale montre une beaucoup plus grande stabilité à haute tension. De ces trois résultats, il apparaît que les propriétés de propagation des streamers dans l'huile RS50 sont moins favorables pour l'isolation très haute tension que dans de l'huile minérale.

La caractérisation détaillée des streamers dans les esters naturels apporte également de nouvelles informations intéressantes sur le développement des streamers :

- La propagation intermittente des streamers rapides positifs, qui évolue rapidement en un seul saut rapide avec une vitesse pratiquement constante à plus haute tension.
- Dans les deux polarités sous très haute tension, les photographies et les enregistrements du courant prouvent aussi le développement continu de phénomènes rapides (streamers positifs de "4ème mode" en un saut unique) et l'existence d'un fond lumineux du streamer négatif.
- La comparaison avec les mesures déjà effectuées dans d'autres liquides dans des conditions similaires (principalement dans les huiles minérales, mais aussi dans plusieurs hydrocarbures purs, l'azote liquide, l'eau) montre que les mêmes processus peuvent être reconnus dans ces liquides de différentes compositions. Cela est utile afin de clarifier la description des phénomènes de préclaquage dans les liquides, et aussi de comparer les propriétés de différents liquides.

A partir de ces résultats, des conclusions concernant la méthodologie de réalisation des essais diélectriques peuvent également être tirées :

- Les résultats confirment que le test normalisé CEI 60156 est très sensible à la présence de particules. Ce test permet de comparer des liquides uniquement si leurs teneurs en eau et en particules sont strictement contrôlées, ce qui reste très difficile à réaliser en pratique. De plus, il caractérise le liquide avec un champ uniforme de valeur très élevée (jusqu'à plus de 40 kV/mm), qui est très éloigné des conditions réelles d'utilisation dans un transformateur de puissance. Les mesures réalisées sur les streamers en géométrie pointe-plan sont obtenues avec des valeurs plus réalistes de champ moyen.
- La mesure spectroscopique fréquentielle a montré son efficacité pour la caractérisation diélectrique des isolants liquides et dans le suivi de leur vieillissement.

Perspectives

Parmi les travaux réalisés dans cette étude, le problème très complexe du vieillissement n'a été abordé que partiellement, et pourrait être largement développé à l'avenir.

Le vieillissement hydro-thermique des huiles composées d'esters naturels consiste en deux processus parallèles : l'oxydation et l'hydrolyse. La contribution de chacun de ces processus n'est pas clairement distinguée. Ceci reste un point très intéressant à étudier dans les études de vieillissement de cette famille de liquide. Parallèlement, une étude du vieillissement des matériaux solides utilisés en combinaison avec cette huile isolante (isolants solides, métaux) reste indispensable pour obtenir une conclusion finale sur le potentiel d'applications de ces liquides bio-dégradables.

Annexe

L'huile Agrilec a été développée à partir de l'huile de colza de base par une transesterification pour répondre aux applications dans lesquelles une faible viscosité et un bas point d'écoulement sont nécessaires (en particulier pour les transformateurs de puissance). Pour vérifier l'influence de cette formulation sur les propriétés diélectriques, nous avons également réalisé des mesures des propriétés diélectriques (spectroscopie diélectrique) ainsi que la caractérisation des streamers dans l'huile de colza de base pour toutes les distances, dans des conditions exactement similaires. Nous résumons ici très rapidement ces résultats, les différences entre les deux liquides étant très faibles.

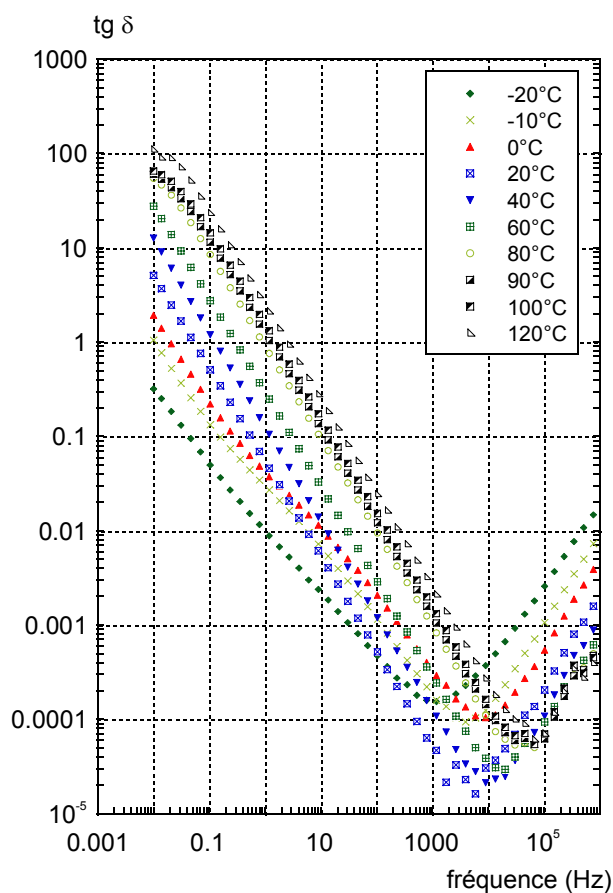


Fig A. 1 Dépendance des pertes de l'huile RS50 de la température

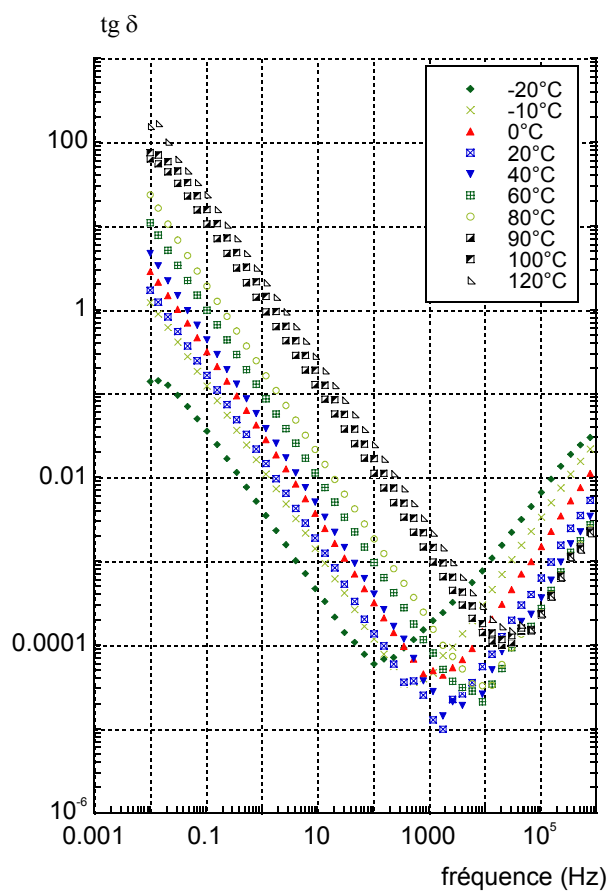


Fig A. 2 Dépendance des pertes de l'huile de colza de base de la température

En ayant une viscosité deux fois plus élevée et une température d'écoulement plus élevée que celles de l'Agrilec, l'huile de colza de base possède une conductivité et des pertes par conduction deux fois plus faibles à toutes les températures (Fig A. 1 et Fig A. 2). A part cette différence, les deux huiles montrent le même comportement des pertes, de la conductivité et de la permittivité sur tout le spectre fréquentiel (Fig A. 1 et Fig A. 2).

Les études de caractérisation de la propagation des streamers dans l'huile de colza de base montrent des propriétés identiques des streamers (vitesse, longueur d'arrêt, charge, courant, lumière émise). Dans ce liquide, on observe également des streamers à 2km/s à faible tension et des streamers rapides avec des vitesses de plus de 100km/s à des tensions plus élevées. A grande distance, la corrélation de l'apparition de ces streamers rapides avec de faibles tensions de claquage est également observée dans les deux polarités (Fig A. 3 et Fig A. 4).

Ces études montrent que en dépit d'une viscosité plus faible et d'une conductivité plus élevée, l'huile Agrilec possède la plupart des propriétés diélectriques de l'huile de colza de

base. Des mesures ont également montré un comportement similaire de l'huile commerciale Cooper FR3.

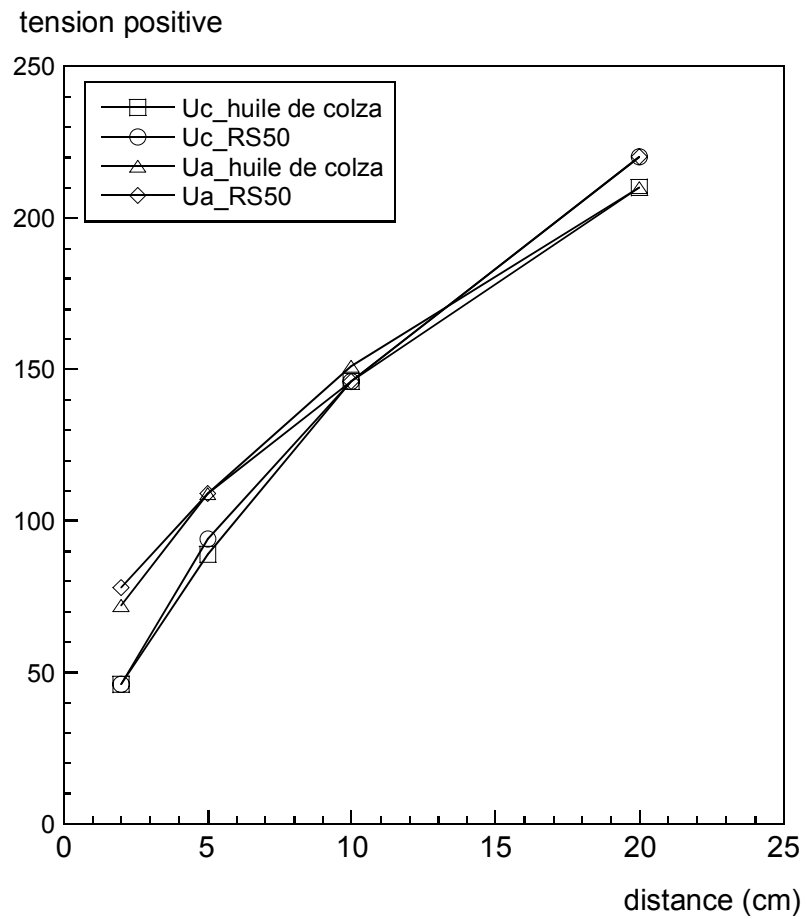


Fig A. 3 Tension de claquage et tension d'accélération de l'huile de colza de base en polarité positive en comparaison avec celles de RS50

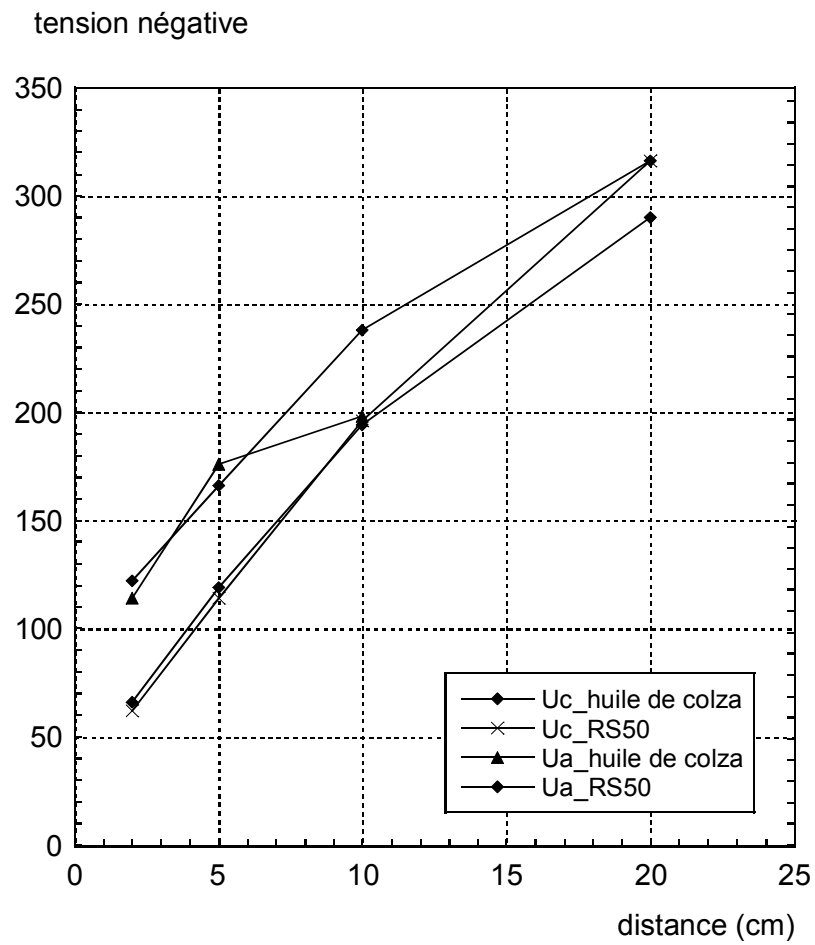


Fig A. 4 Tension de claquage et tension d'accélération de l'huile de colza de base en polarité négative en comparaison avec celles de RS50

Références bibliographiques

- [1] N.Berger, "Liquides isolants en électrotechnique, I-Présentation générale" *Techniques de l'ingénieur*.
- [2] M.Hemmer et al., "Electrical properties of rape-seed oil" Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2002.
- [3] Z.Wang et al., "New insulation fluids: Use of environmentally friendly fluids in power transformers" Cigre, Brugge, 2007.
- [4] H.Borsi et al., "New liquid insulating materials for power transformers" Cigre, Brugge, 2007.
- [5] D.Imamovic et al., "Partial discharge and dissolved gas analysis in bio-degradable transformer oil" Cigre, Brugge, 2007.
- [6] L.R.Lewand, "Laboratory testing of natural ester dielectric liquids" *Chemist's perspective*, 2004-2005.
- [7] U. U. Abdullahi et al., "The potential of palm oil as a dielectric fluid" National Power & Energy Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 2004.
- [8] M.Hemmer et al., "Investigation of the suitability of commercially available bio-oils as insulating liquid" Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2003.
- [9] R.Badent et al., "Inhibited rape-seed oil as substitute for mineral oils" Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2002.
- [10] C.P.McShane, "Vegetable-oil-based dielectric coolants" *IEEE Industry Applications Magazine*, 2002.
- [11] H.C.Keshavamurthy et S.Sridhar, "Novel capacitor fluid from vegetable oil" IEEE Inter. Symp. on Elec. Insul., Virginia, USA, 1998.
- [12] Y.Bertrand et L.C.Hoang, "Vegetables oils as substitute for mineral oils in medium voltage equipment" CIGRE, D1-201, 2004.
- [13] P.Rain, "Etude des phénomènes prédisruptifs et disruptifs à grande distance dans l'huile minérale de transformateur sous tension alternative", thèse de doctorant. Grenoble, France: INPG, 1992.
- [14] R.B.Kaufman et al., "Gas and moisture equilibrium in transformer oil" *Trans. Am. Inst. Elec. Eng.*, vol. 74, pp. 312-18, 1955.
- [15] P.W.Atkins, *Physical Chemistry*: Oxford University Press, 1982.
- [16] B.Fallou et M.Thilbault, "Quelques motions relatives à l'humidification des huiles isolantes usagées" *Ibid.*, vol. 72, pp. 242-47, 1963.
- [17] A.A.Zaky et R.Hawley, *Conduction and breakdown in mineral oil*: Peter Peregrinus Ltd., 1973.
- [18] K.Miners, "Particles and moisture effect on dielectric strength of transformer oil using VDE electrodes" *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, pp. 751-56, 1982.

- [19] N. G. Trinh et al., "Statistical dielectric degradation of large-volume oil-insulation" *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, pp. 3712-21, 1982.
- [20] R.Bartnikas, *Electrical insulating liquids*, vol. 3. Varennes, Québec, Canada: ASTM, 1991.
- [21] T.Tran-Van, "Etude de la génération des streamers dans l'huile minérale sous tension impulsionnelle et alternative", Thèse de doctorant. Grenoble: INPG, 1999.
- [22] "CEI 60156: Isolants liquides: détermination de la tension de claquage à fréquence industrielle", AFNOR, Ed., 1995.
- [23] G.Williams et D.K.Thomas, *Phenomenological and Molecular Theories of Dielectric and Electrical Relaxation of Materials*: Novocontrol, 1998.
- [24] G.Williams, *Dielectric Newsletter*, Novocontrol, March 1994.
- [25] R.Tobazéon et J.C.Filippini, "On the measurement of the conductivity of highly insulating liquids" *IEEE Trans. Dielec. Electric. Insul.*, vol. 1, pp. 1000-04, 1994.
- [26] W.Jost, *Diffusion in solids, liquids, gases*: Academic press, 1960.
- [27] C.Shen et G.Springer, "Moisture absorption and desorption of composite materials" *Journal of Composite Material*, vol. 10, pp. 2, 1976.
- [28] G.Brière et al., "Pertes électriques du nitrobenzène déionisé (50Hz-10MHz)" *Compte rendu d'Académie Scientifique*, Paris, 1965.
- [29] A. R. V. Hippel, *Dielectrics and Waves*. New York: John Wiley & Sons, 1954.
- [30] H.Borsi et E.Gockenbach, "Fundamental investigation on some transformer liquids under various outdoor conditions" *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 8, pp. 1040-47, 2001.
- [31] R. M.Hakim, "The effect of oxidation on the dielectric properties of an insulating oil" *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-7, pp. 185-195, 1972.
- [32] F.M.Clark, *Insulating materials for design and engineering practice*. New York: John Wiley & Sons, 1962.
- [33] J.Sabau, "On-line reclamation of aged transformer oils" *IEEE Conf. on Elec. Insul.* , USA, 2001.
- [34] P.Hodges, *Hydraulic fluids*. Holland: Elsevier, 1996.
- [35] F.Shahidi, *Bailey's industrial oil and fat products*. USA: John Wiley & Sons, 2005.
- [36] T.W.Solomon et C.B.Fryhle, *Organic chemistry*, 8 ed. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [37] H.Hart, *Organic chemistry a short course*. USA: Houghton Mifflin Company, 1999.
- [38] F.L.Wiseman, *Basic organic chemistry*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [39] D.Martin et al., "A comparative study of the chemical stability of esters for use in large power transformers" *IEEE Conf. on Elec. Insul. and Dielec. Pheno.*, USA, 2006.
- [40] C. Industries, *Envirotemp FR3 fluid testing guide*. Waukesha, USA: Cooper Industries Inc, 2004.

- [41] K.J.Rapp et al., "Interaction mechanisms of natural dielectric fluid and Kraft paper" IEEE Int. Conf. on Dielectric Liquids, 2005.
- [42] C.P.McShane et al., "Aging of paper insulation retrofilled with natural ester dielectric fluid" 2003 Annual Report on Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2003.
- [43] T. V. Oommen, "Vegetable oils for liquid-filled transformers" *IEEE Electrical Insul. Mag.*, vol. 18, pp. 6-11, 2002.
- [44] "CEI 61125: Isolants liquides neuf à base d'hydrocarbures - Méthodes d'essai pour évaluer la stabilité à l'oxydation ", AFNOR, Ed., 1992.
- [45] T.W.Dakin et J.Hughes, "The behaviour of individual conducting particles in electric fields"" Conf. on Elec. Insul. and Diel. Phen., Wasington D.C, 1968.
- [46] J.F.Roach et al., "Liquid and particle motion in transformer oil under 60Hz stress" IEEE Conf. Inter. Symp. EI, Boston, 1980.
- [47] S.S.Hakim et J.B.Higham, "A phenomenon in n-hexane prior to its electric breakdown" *Nature*, vol. 189, pp. 996-1002, 1961.
- [48] B.Farazmand, "Study of electric breakdown of liquid dielectrics using Schlieren optical techniques" *Brit. J. of Appl. Phys.*, vol. 12, pp. 251-254, 1961.
- [49] P.Gournay, "Génération et propagation des streamer positifs dans quelques hydrocarbures", Thèse de doctorant. Grenoble, France: INPG, 1994.
- [50] H.Yamashita et H.Amano, "Pre-breakdown phenomena in hydrocarbon liquids" *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, vol. 23, pp. 739-750, 1988.
- [51] A.Bérroual et R.Tobazéon, "Prebreakdown phenomena in liquid dielectrics" *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, vol. EI-21, pp. 613-627, 1986.
- [52] R.N.Allan et E.M.Hizal, "Prebreakdown phenomena in transformer oil subjected to nonuniform fields" *Proc. IEE*, vol. 121, pp. 227-231, 1974.
- [53] O.Lesaint et R.Tobazéon, "Streamer generation and propagation in transformer oil under ac divergent field conditions" *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, vol. EI-23, pp. 941-954, 1988.
- [54] W.G.Chadband, "The ubiquitous positive streamer" *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, vol. 23, pp. 697-706, 1988.
- [55] W.G.Chadband, "On the variations in the propagation of positive discharges between transformer oil and silicone fluids" *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 13, pp. 1299-1307, 1980.
- [56] E.Morikawa, "Optical observation of prebreakdown phenomena in dielectric oil" *Elect. Eng. in Japan*, vol. 92, pp. 11-17, 1972.
- [57] H.Yamashita et al., "Optical observation of prebreakdown and breakdown phenomena in transformer oil" *J. of Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 10, pp. 1753-1760, 1977.
- [58] J.C.Devins et al., "Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids" *J. of Appl. Phys*, vol. 52, pp. 4531-4545, 1981.
- [59] O.Lesaint et T.Tran-Van, "Streamer initiation in mineral oil. Part I: electrode surface effect under impulse voltage" *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, pp. 84-91, 2002.

- [60] S.J.Rzad et al., "Transient behavior in transformer oils: prebreakdown and breakdown phenomena" *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-14, pp. 289-96, 1979.
- [61] G.Massala, "Propagation et propriétés électriques des streamers positifs à grande distance dans l'huile minérale sous très haute tension impulsionnelle", Thèse de doctorant. Grenoble, France: INPG, 1999.
- [62] P.Gournay et O.Lesaint, "A study of the inception of positive streamers in cyclohexane and pentane" *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 26, pp. 1966-1974, 1993.
- [63] W.R.Wilson, "A fundamental factor controlling the unit dielectric strength of oil" *AIEE Trans.*, pp. 669-674, 1953.
- [64] R.E.Hebner, *Measurement of electrical breakdown in liquids*, vol. B193: Plenum Press, 1988.
- [65] D.Linhjell et al., "Streamer propagation under impulse voltage in long point-plane oil gaps" *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.*, vol. 1, pp. 447-458, 1994.
- [66] R.Badent et al., "Prebreakdown phenomena in insulating oil at large gap distance" IEEE Int. Conf. on Prop. and Appl. of Diel. Mat., Brisbane, Australia, 1994.
- [67] Yu.V.Torshin, "On the existence of leader discharges in mineral oil" *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.*, vol. 2, pp. 167-179, 1995.
- [68] L.Lundgaard et al., "Positive and negative streamer in oil gaps with and without pressboard interfaces" Int. Conf. on Cond. and Break. in Diel. Liq., Roma (Italie), 1996.
- [69] G.Massala et O.Lesaint, "A comparison of negative and positive streamers in mineral oil at large gaps" *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 34, pp. 1525-1532, 2001.
- [70] P.J.McKenny et P.B.McGrath, "Anomalous positive point prebreakdown behaviour in dielectric liquids" *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, vol. EI-19, pp. 93-100, 1984.
- [71] G.J.FitzPatrick et al., "Streamer initiation in liquid hydrocarbons" Conf. Elec. Insul. and Diel. Phen, 1985.
- [72] O.Lesaint, "Claquage et preclaquage dans l'huile minérale sous tension alternative", Thèse de doctorant. Grenoble (France): INPG, 1987.
- [73] O.Lesaint et 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.
- [74] E.F.Kelley et R.E.Hebner, "Prebreakdown phenomena between sphere-sphere electrodes in transformer oil" *Appl. Phys. Lett.*, vol. 38, pp. 231-233, 1981.
- [75] R.Badent et al., "Investigation of pre-breakdown phenomena in insulating oil" Inter. Symp. on Hi. Vol. Eng, Yokohama (Japan), 1993.
- [76] R.Badent et al., "The effect of hydrostatic pressure on streamer inception and propagation in insulating oil" IEEE Inter. Symp. on Elec. Insul., Pittsburgh (USA), 1994.
- [77] W.G.Chadband et T.M.Suffian, "Experimental support for a model of positive streamer propagation in liquid insulation" *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, vol. EI-20, pp. 239-246, 1985.

- [78] P.Atten et A.Saker, "Streamer propagation over a liquid/solid interface" *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 28, pp. 230-242, 1993.
- [79] H.Yamada et al., "Measurement of time to flashover along dielectric surfaces in transformer oil using electro-optic coupling method" *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 23, pp. 757-764, 1988.
- [80] Y.Nakao et al., "Studies of impulse creepage discharge in transformer oil" *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 26, pp. 732-738, 1991.
- [81] R.J.Schwabe et al., "Streamer propagation in oils and its relationship to arrester application" *IEEE Trans. on Power App. and Syst.*, vol. PAS-101, pp. 2799-2804, 1982.
- [82] A.Béroual, "Phénomènes de propagation et de génération des streamers dans les diélectriques liquides en géométrie pointe-plan sous créneau de tension", Thèse de doctorant. Grenoble: UJF-INPG, 1987.
- [83] A.Saker et al., "Propagation of streamers in mineral oil at large distances" Conf. Elect. Insul. Diel. Phen., Arlington (USA), 1994.
- [84] P.Rain et O.Lesaint, "Prebreakdown phenomena in mineral oil under step and AC voltages in large gap divergent field" *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.*, vol. 1, pp. 692-701, 1994.
- [85] F.M.J.McCluskey et al., "Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids under positive impulse voltages" *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.*, vol. 1, pp. 377-382, 1994.
- [86] O.Lesaint et A.Saker, "Etude des mécanismes de claquage des grands volumes d'huile", Rapport de synthèse LEMD/JST/IREQ. Grenoble (France), 1995.
- [87] H.Okubo et al., "Creepage discharge propagation in transformer oil with impulse voltages" Int. Symp. on Hig. Volt. Eng., Athens (Greece), 1983.
- [88] S.Ohgaki et Y.Tsunoda, "A study of the positive streamer growth under surface discharge configuration in liquid paraffin" *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.*, vol. EI-19, pp. 594-601, 1984.
- [89] N.Giao-Trinh et A.Saker, "Interpretation of the physical mechanism in the breakdown of long gaps in transformer oil" Int. Conf. on Cond. and Break. in Diel. Liq., Roma (Italie), 1996.
- [90] S.J.Rzad, "The influence of DC bias on streamers produced by step voltages in transformer oil and over solid-solid interfaces" *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-18, pp. 1-10, 1983.
- [91] S.Sakamoto et H.Yamada, "Optical study of conduction and breakdown in dielectric liquids" *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-15, pp. 171-181, 1980.
- [92] O.Lesaint et al., "Investigation on transient currents associated with streamer propagation in dielectric liquids" *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-26, pp. 699-707, 1991.
- [93] P.Rain et al., "Behavior of streamer under divergent ac fields in transformer oils at large gaps" *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, vol. 26, pp. 715-725, 1991.

- [94] A.Bérroual et al., "Measurement of the charge of a single or of a series of streamers in liquids subjected to a voltage step" *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 23, pp. 427-431, 1988.
- [95] P.N.Nikolopoulos et G.C.Sakkas, "Discharge propagation on the surface and in the volume of a pressboard-mineral oil combination under impulse voltages" *Symp. on Hig. Vol. Eng.*, Athens (Greece), 1983.
- [96] E.F.Kelley et al., "The effect of aromatic impurities on the positive streamer growth in Marcol 70" *IEEE Inter. Symp. on Elec. Insul.*, Montreal (Canada), 1984.
- [97] E.F.Kelley et al., "Observation of prebreakdown and breakdown phenomena in liquid hydrocarbons II. Non-uniform field conditions" *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-20, pp. 281-292, 1985.
- [98] E.O.Forster, "Progress in the field of electric properties of dielectric liquids" *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 25, pp. 45-53, 1990.
- [99] N.Giao-Trinh et al., "Statistical dielectric degradation of large-volume oil-insulation" *IEEE Trans. on Power App. and Syst.*, vol. 101, pp. 3712-3721, 1982.
- [100] O.Lesaint et G.Massala, "Positive streamer propagation in large oil gap: experimental characterization of propagation modes" *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.*, vol. 5, pp. 360-370, 1998.
- [101] O.Lesaint et P.Gournay, "Initiation and propagation threshold of positive prebreakdown phenomena in hydrocarbon liquids" *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.*, vol. 1, pp. 702-708, 1994.
- [102] I.S.Stekol'nikov et V.Ya.Ushakow, "Discharge phenomena in liquids" *Sov.Phys.-Tech. Phys.*, vol. 10, pp. 1307-1313, 1966.
- [103] F.M.J.McCluskey et al., "Breakdown processes over large distances in insulating liquids of distinct chemical compositions" *IEEE Int. Symp. on Elec. Insul.*, Pittsburg USA, 1994.
- [104] G.Berg, "Physics of electrical breakdown of transformer oil". Norway: Trondheim University, 1995.
- [105] P.E.Frayssines et al., "Prebreakdown phenomena at high voltage in liquid nitrogen and comparison with mineral oil" *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.*, vol. 9, pp. 899-909, 2002.
- [106] J.N.Salazar et al., "Characterization and spectroscopic study of positive streamers in water" *IEEE Int. Conf. on Diel. Liquids (ICDL)*, Coimbra, Portugal, 2005.
- [107] O.Lesaint et al., "A study of filamentary streamers in water" *5th Int. Symp. on Non Therm. Plas. Tech. for Pollu. Contr. and Sus. Del.*, Oléron, France, 2006.
- [108] G.Massala et O.Lesaint, "Positive streamer propagation in large oil gap: Electrical properties of streamer" *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.*, vol. 5, pp. 371-381, 1998.
- [109] O.Lesaint et al., "Streamer propagation and breakdown under AC voltage in very large oil gaps" *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.*, vol. 5, pp. 351-359, 1998.

Résumé

Pour des raisons autant écologiques qu'économiques ou techniques, des huiles de base d'esters naturels ont été utilisées pour remplacer de l'huile minérale dans les appareillages basse et moyenne tensions. Ce travail consiste en étude de caractérisation d'un mélange des esters naturels de faible viscosité (RS50) basant sur l'huile de colza pour les applications dans les transformateurs haute tension.

L'influence des facteurs humidité, température, teneur en particules ainsi que vieillissement thermique sur ses propriétés diélectriques telles que : permittivité, conductivité, pertes et rigidité électrique sous tension alternative a été mise en évidence. La RS50 présente une solubilité de l'eau élevée, la conductivité, la permittivité et les pertes plus élevées que celles de l'huile minérale mais ces différences sont réduites dans des huiles vieilles. Sa rigidité électrique en tension alternative est similaire à l'huile minérale, même après le vieillissement. Pourtant, une analyse des phénomènes de préclaquage et de claquage dans des configurations particulières ont montré que les esters naturels sont moins favorables pour les applications à haute tension que l'huile minérale.

Parallèlement, des études méthodologiques ont été effectuées. L'intérêt d'une application de la méthode de mesure spectroscopique fréquentielle à la caractérisation des isolants liquides est mise en évidence et la validité des conditions de mesure de la rigidité électrique du liquide isolant, ce qui est traditionnellement imposé suivant les normes, a été discutée.

Mots clés : ester naturel, huile de colza, huile minérale, propriétés diélectrique, spectroscopie diélectrique, teneur en eau, isolant liquide, streamer, propagation, génération, claquage, préclaquage

Abstract

For the reasons environmental, economic or technical, oils based on natural esters were used to replace mineral oil in electrical equipments in low and medium voltage. This work consists on characterization of a mixture (RS50) of low viscosity natural esters based on rapeseed oil for applications in high voltage transformers.

The influence of humidity, temperature, particle content and thermal aging on its dielectric properties such as permittivity, conductivity, losses and electrical strength was highlighted. The RS50 has a high water solubility, its conductivity, permittivity and losses are both higher than those of mineral oil but these differences are reduced in aged oils. Its electrical strength is similar to mineral oil even after aging. However, an analysis more precise of prebreakdown and breakdown phenomena in specific configurations have shown that natural esters are less favourable for high voltage applications than mineral oil.

Meanwhile, a methodological study was carried out. Advantage of using the frequency spectroscopy measuring method for the characterization of insulating liquids is highlighted. The validity of conditions for the dielectric strength measurement in the liquid insulation, which is traditionally imposed following the standards, was also discussed.

Keys words: natural ester, rapeseed oil, mineral oil, dielectric properties, dielectric spectroscopie, water content, liquid insulation, streamer, propagation, generation, breakdown, prebreakdown